



CRN

CHINESE REFRIGERATION NEWSLETTER

中国制冷简报

2023年双碳背景下中国制冷技术研究及应用进展专刊



中国制冷学会 主办

谷轮工业热泵及储能解决方案赋能行业绿色未来



储能系统解决方案

为储能多维度应用场景提供热源管理方案：
发电侧储能、电网侧储能、用户侧储能

特点和优势

- 高可靠性助力储能长时间服务特点，减少维修
- IP67防护等级应对多变应用场景
- 卓越的油循环率有效提高系统能效
- 多种环保冷媒可选，高压冷媒如R410A等，低压冷媒如R134a、R1234yf等
- 满足UL、CE认证



谷轮资料馆



谷轮官方微信



超高温工业热泵解决方案

专为超高温热泵系统开发，满足工业应用领域中的余热回收和高温热风、热水和蒸汽需求

特点和优势

- 80-130°C高温应用全覆盖，满足工业领域的高温热水蒸汽烘干以及余热回收再利用等多种需求
- 提供压缩机、变频器、膨胀阀、主控和传感器等整套解决方案，有力保障系统运行可靠性，减少系统开发时间和投入
- 专家团队提供支持，针对具体行业应用进行定制化设计
- 实时监控系統运行状况，同时提供数据存储和远程监控
- 与传统锅炉和电加热相比，大大降低运行费用，减少碳排放，降低系统配电规格，减少电网投入

联系方式

上海分公司

+86 21 3338 7317

广州分公司

+86 20 8595 5188

COPELAND



Danfoss

转换视角，了解脱碳
丹佛斯零碳就绪
ESG 首选合作伙伴



2024 中国制冷展
丹佛斯展位 E2D01
敬候莅临



冰轮环境
MOON-TECH

智慧绿能生态
INTELLIGENT GREEN ENERGY ECOLOGY

绿色冷暖科技 共创低碳未来

Temperature Control Technology & Digital Solutions

冰轮环境着力构建低碳技术支撑体系和运营管理体系
为全球客户提供智慧绿色能源互联互通的综合解决方案
携手共赴高质量发展之路



低碳发展支柱

- 进军低碳产业
- 研发低碳技术
- 完善低碳制造
- 打造低碳链条
- 拓展低碳服务
- 建设低碳文化



低碳科技变革

- 产业结构高端化
- 能源消费低碳化
- 资源利用循环化
- 生产过程清洁化



官方网站



官方公众号



《中国制冷简报》着重介绍中国制冷、空调、供暖、通风及相关领域的各类信息，旨在推动科技创新，推广应用技术，报道行业动态，促进业内交流，为我国制冷事业的发展服务，为学术及技术交流服务，为培养专业人才服务。

主办单位：中国制冷学会

主 编：张 华

编 委：陈 浩、陈焕新、常 琳、范 薇、
刘金平、刘业凤、罗二仓、马国远、
邵双全、施 俊、石文星、田长青、
吴玉庭、肖 伦、邢子文、徐震原、
杨 昭、殷光文、张会明、张晓刚、
臧建彬（按姓氏拼音排序）

执行主编：范 薇

校 对：王亚薇、田 甜

封面设计：王 昊

编辑部联系方式

地址：北京市海淀区阜成路67号银都大厦10层

邮编：100142

电话：010-68463224

传真：010-68434679

邮箱：wfan@car.org.cn

广告索引

封面折页 谷轮环境科技(苏州)有限公司

封底 威乐(中国)水泵系统有限公司

封二 丹佛斯(中国)投资有限公司

首插页 冰轮环境技术股份有限公司

版权声明

凡本刊发表的文章、图片，未经本刊允许不得转载。经本刊同意授权刊登，应注明出处，向本刊编辑部及作者邮寄样刊，并向作者寄发稿酬。

序 言

自2021年起，中国制冷学会在《中国制冷简报》连续出版了两期“双碳”专刊，对中国制冷行业发展现状、低碳转型路线、技术应用等进行分析总结，为推进“双碳”技术进步和行业健康发展发挥了重要作用，产生了很好的社会影响。为了继续推进行业向绿色高效、节能环保的高质量方向发展，再次编辑出版《中国制冷简报》2023年“双碳”专刊。

本期《中国制冷简报》专刊共分4章，约12万字，包括“双碳”政策及标准、制冷产业总体发展情况、产业未来发展趋势、系统设备及关键零部件的新技术新产品、重点细分领域的技术发展及新产品等。内容主要侧重于2023年出现的新政策、新技术、新产品，并在各章节尽量汇集一些典型案例，继续为读者提供可借鉴、可复制的技术。

本期专刊由中国制冷学会邀请专家学者和企业技术专家撰写，企业技术专家还根据最新研发的新产品提供了案例素材。上海理工大学张华教授、刘业凤教授对稿件进行了汇编、审校和总结，中国制冷学会秘书处常琳、范薇为专刊的出版做了大量组织、协调和编辑工作。特此向各位编者和材料提供者表示衷心感谢！限于编写水平和时间原因，错漏之处恳请读者批评指正。

张 华

2024年03月10日

C 目录 CONTENTS

第一章 总 论

- 1.1 “双碳”政策及标准 (1)
- 1.2 制冷产业总体情况 (3)
- 1.3 制冷产业技术研究及应用进展 (5)
- 1.4 制冷产业未来发展趋势 (12)

第二章 系统、设备及关键零部件

- 2.1 制冷系统及自动控制 (15)
- 2.2 常规形式制冷热泵整机设备 (29)
- 2.3 关键零部件 (38)
- 2.4 制冷产业与新技术的融合 (48)
- 2.5 新型制冷技术的整机设备 (53)

第三章 重点细分领域应用进展

- 3.1 家用及商用制冷及供热 (74)
- 3.2 工业余热利用 (84)
- 3.3 食品与生物制品冷链 (88)
- 3.4 数据中心及超算中心冷却 (97)
- 3.5 交通运输领域空调及能源管理 (114)
- 3.6 储冷、储热技术及能源管理 (124)
- 3.7 电池热管理技术研究进展 (136)

第四章 企业家之声

- 4.1 谷轮创新技术赋能绿色低碳发展 (150)
- 4.2 丹佛斯ESG“零碳”行动，实践“绿色脱碳”技术 (155)
- 4.3 威乐重塑可持续发展战略，“创新、关爱、连接”绿色未来 (158)
- 4.4 碳氢类自然工质在工业冷冻领域的应用 (162)

第一章

总 论

1.1 “双碳”政策及标准

张晓刚

（国家节能中心）

实现“碳达峰碳中和”是党中央统筹国内国际两个大局、推动经济高质量发展、全面建设社会主义现代化国家作出的重大战略决策。“双碳”目标提出3年来，我国把“双碳”工作纳入生态文明建设整体布局和社会发展全局，加快构建碳达峰碳中和“1+N”政策体系，有序开展“碳达峰十大行动”，坚定实施积极应对气候变化国家战略，扎实推动产业结构、能源结构、交通运输结构等调整优化，协同推进降碳、减污、扩绿、增长，建成全球规模最大的碳市场和清洁发电体系，使“双碳”目标日益成为我国经济高质量发展的绿色引擎，以负责任的大国担当赢得国际社会普遍赞誉。

2023年是全面贯彻落实党的二十大精神开局之年，是全面推动落实碳达峰碳中和战略部署的重要一年，也是“十四五”规划承上启下的关键之年。一年来，有关部门、单位、行业组织和地方政

府相继出台了一系列政策法规和标准文件，在碳达峰碳中和“1+N”政策体系的基础上同有关政策规划加以协同，并进一步完善、深化和细化，碳达峰碳中和实现路径、举措和保障体系更加明确和具有操作性。

在国家战略规划层面，《质量强国建设纲要》旨在统筹推进质量强国建设，全面提高我国质量总体水平。在推动经济质量效益型发展方面提出树立质量发展绿色导向，包括开展重点行业 and 重点产品资源效率对标提升行动、加快低碳零碳负碳关键核心技术攻关、推动高能耗行业低碳转型等。《中共中央 国务院关于做好2023年全面推进乡村振兴重点工作的意见》提出，加快发展现代乡村服务业，鼓励有条件的地区开展新能源汽车和绿色智能家电下乡。

在国家部委政策文件方面，生态环境部印发

《2024年度氢氟碳化物配额总量设定与分配方案》的通知，根据基线年HFCs生产核查结果和海关进口贸易记录，确定2024年我国HFCs生产配额总量为18.53亿吨二氧化碳当量（tCO₂），内用生产配额总量为8.95亿 tCO₂、进口配额总量为0.1亿 tCO₂，并就配额总量分配、配额核发、调整做出详细规定。工信部等三部门印发《轻工业稳增长工作方案（2023—2024年）》，推动轻工业发展实现质的有效提升和量的合理增长。提出推广300项以上升级和创新产品，轻工百强企业竞争力进一步增强，培育升级50个规模300亿元以上轻工特色产业集群；促进轻工业高端化、数字化、绿色化稳步发展等目标。从着力稳住重点行业、提升产业链现代化水平等6方面，提出支持轻工企业进行技术改造和设备更新，推广绿色低碳先进技术，提高行业节能降碳水平，加速形成轻工业绿色竞争优势。国家发展改革委等印发《关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见》，旨在提升我国重点产品碳足迹管理水平，促进相关行业绿色低碳转型，积极引导绿色低碳消费，提出到2025年、2030年分别出台50个和200个左右重点产品碳足迹核算规则 and 标准等目标；部署制定产品碳足迹核算规则标准、建设碳足迹背景数据库、丰富产品碳足迹应用场景等5项重点任务。

在国家标准建设方面，国家标准委等十一部门关于印发《碳达峰碳中和标准体系建设指南》的通知，提出加快构建结构合理、层次分明、适应经济社会高质量发展的碳达峰碳中和标准体系；提出到2025年制修订不少于1000项国家标准和行业标准等主要目标，明确碳达峰碳中和标准体系包含4个一级子体系、15个二级子体系和63个三级子体系，并规定了各子体系下各标准重点建设内容。《国家发展改革委 市场监管总局关于进一步加强节能标准更新升级和应用实施的通知》，旨在进一步加快节能标准制定修订速度，提高重点行业和重要产品设备能

效水平要求，强化节能标准应用实施和监督检查，为积极稳妥推进碳达峰碳中和、加快发展方式绿色转型提供支撑。围绕加快节能标准更新升级、加强节能标准应用实施与监督检查、强化能效领先正向激励、夯实节能标准化工作基础等4个方面，部署了12项重点任务。

在轻工业领域双碳实施方案方面，中国轻工业联合会印发《轻工业重点领域碳达峰实施方案》，旨在加快轻工业绿色低碳转型，实现高质量发展。方案明确我国轻工业绿色低碳转型2025年和2030年目标，提出到2025年绿色低碳消费品供给能力和水平不断提升，大宗家电产品、通用照明设备能效达节能水平的占比提升10%以上，助力经济社会绿色转型能力明显。到2030年，产业绿色低碳发展总体布局更加完善，工业能耗强度、二氧化碳排放强度持续下降，绿色低碳产品产业链供应链稳定顺畅，基本建成绿色低碳、循环发展的轻工产业体系。方案以“双碳”工作为总牵引，围绕“效率提升、结构优化”，提出“6个方面28项重点任务”“9项重点行业达峰行动”，绘制了轻工行业绿色低碳转型“路线图”。

其他相关领域政策文件方面包括：《绿色航空制造业发展纲要（2023—2035年）》《国家碳达峰试点建设方案》《市场监管总局关于统筹运用质量认证服务碳达峰碳中和工作的实施意见》《关于统筹节能降碳和回收利用 加快重点领域产品设备更新改造的指导意见》《绿色低碳先进技术示范工程实施方案》《锅炉绿色低碳高质量发展行动方案》等。

我国“双碳”政策经历了一个从顶层到基础、从宏观到实践层面的建设过程，目前已经基本完备，从国家到地方、从部门到行业、从园区到企业，正在一步步团结奋斗、将之变为现实，相信我国碳达峰碳中和目标任务一定能够如期实现。

1.2 制冷产业总体情况

张华 刘业凤

(上海理工大学)

中国是全球制冷空调产品制造第一大国，同时也是全球消费第一大国和国际贸易第一大国，中国制冷空调产品产量占据全球总产量的80%以上，其中家用空调产品数量大、产值高，对制冷空调行业影响大，占比也较高，约为70%。制冷空调的耗电量巨大，一般而言在全国总耗电量的占比是15%~20%。中国制冷空调行业主要分布在企业珠三角地区、长三角地区、环渤海地区。在河南、安徽、湖北、重庆等地区也有大量分布。

2023年，随着我国“双碳”目标从能耗“双控”向碳排放“双控”方向发展，全社会将进一步强化减碳技术的研究和开发。据统计，冷量、热量几乎占全社会终端用能的50%，脱碳需求大，对中国制冷行业低碳发展尤其重要。制冷行业节能减碳面临“减少温室效应制冷工质排放”和“制冷产品节能”大问题。同时，还有行业和技术面临“转型革命”这个大问题，拓宽制冷供热的使用范围，跨入工业热能、交通，如工业热泵、高温热泵、电动汽车热泵，同时也要拓展制冷供热的能源利用种类和方法，如低碳能源利用、自然冷热能利用、氢燃料利用。制冷空调行业可行的减排方法，一是改变能源结构，从源头减少碳排放；二是通过技术进步，提升设备能效。“绿色+智能”逐渐成为行业主流趋势，我国制冷产业国内以旧换新，国际市场不断开拓，发展前景良好。

制冷是减碳的重点领域，随着我国《绿色高效制冷行动方案》出台，要求大幅提高制冷能效和绿色水平，扩大绿色产品供给。在家电领域率先提标节能，然后是工商制冷、工商空调、电子通信领域、空调和交通运输空调领域。加快家用空调、多联式空调机组节电，加快数据中心、汽车空调、冷库、冷藏车、制冰机、除湿机、冷水机组、商用制冷展示柜、热泵（热水）机组等产品节能。到2030年制冷总体能效水平提升25%以上、绿色高效制冷产品市场占有率提高40%以上。科技创新对制冷行业

碳中和发展具有推动作用，大力推动制冷低碳科技的应用，无论采购、生产、运输、销售、使用、回收等环节，还是标准、机制、制度方面提升水平。

“双碳”背景下，制冷空调行业将转型发展，制冷制造商优先投资净零碳制冷设备，消费者购买和使用低碳制冷设备。

国家发展改革委和市场监管总局联合发布的《多联式空调（热泵）机组能源效率标识实施规则》表示要管控市面的空调用电效率以及能源消耗比。国家发展改革委发布了《关于促进绿色智能家电消费若干措施的通知》，提出要全面促进智能冰箱洗衣机空调、智慧康养等绿色智能家电消费。鼓励家电生产和流通企业开发适应农村市场特点和老年人消费需求的绿色智能家电产品。鼓励有条件的地方对购买绿色智能家电产品给予相关政策支持。工业和信息化部发布《关于推动轻工业高质量发展的指导意见》强调要加快完善家用电器和照明产品等终端用能产品能效标准，促进节能空调、冰箱、热水器、高效照明产品等绿色节能轻工产品消费。完善政府绿色采购政策，加大绿色低碳产品采购力度。鼓励有条件的地方开展绿色智能家电下乡和以旧换新行动。国家出台了一系列促进制冷电器行业发展的政策措施，如《关于进一步做好家用空调节能补贴工作的通知》《关于开展家用空调能效标识管理工作的通知》《关于开展家用空调能效标识管理工作的通知》等，旨在提高制冷电器的节能环保水平，引导消费者购买高效节能产品，推动制冷电器行业转型升级。此外，国家还加大了对新型制冷技术和新材料的研发支持，鼓励企业加强技术创新和品牌建设。

随着科学技术的发展，制冷产业在技术性能上不断实现新的突破，包括节能减排、低碳生活等政策的引导以及节能惠民补贴政策的推动，变频技术、清洁取暖方式等也得到了不断发展，微通道热交换器逐渐兴起。这将直接带动空调向高效、节

能、环保方向发展。制冷产品的健康和舒适性越来越受到重视。国内企业也在健康、节能功能以及外观设计上经过引进、消化、吸收，技术水平及产品质量都在不断趋于完善。技术创新方面，随着科技水平的不断提高，制冷产品也呈现出智能化、多功能化、个性化等特点。智能化是指利用物联网、云计算、人工智能等技术，实现制冷电器产品的远程控制、自动调节、故障诊断等功能，提高用户的使用便捷性和舒适性。多功能化是指在满足制冷需求的基础上，增加除湿、净化、杀菌、除味等功能，提高用户的健康水平和生活品质。个性化是指根据用户的不同需求和喜好，提供定制化的制冷产品，满足用户的个性化表达和差异化消费。

虽然我国制冷空调出口市场仍面临诸多挑战，如国际经济形势不稳定、贸易保护主义等，但我国制冷空调技术不断提升，行业国际影响力明显增强。海外市场将成为我国制冷空调行业重要增长点。

我国制冷产业链上游是金属等原材料、传感器等主要零部件、芯片以及物联网等技术供应，中游是制造商，其中包括国内外知名企业美的、海尔、格力等，下游是线上线下相结合的销售模式和工程用户。随着“双碳”目标的推进，中国制冷行业发展迅速。工业高温热泵、冷链物流、新能源汽车热管理、数据中心冷却等行业快速发展。制冷应用领域不断拓展，不断出现创新产品和应用案例。

国家统计局数据显示，2022年中国制冷空调行业（包括工商制冷空调设备及配件，家用电冰箱、冷柜、房间空调器等，但不包括家用制冷空调配件及配套设备）的工业总产值（现价）累计约7700亿元人民币，与2021年同比实现小幅增长。

2023年随着疫情结束市场放开，制冷产业行业开始恢复发展，虽然2023年总的制冷行业统计数据还没有出来，但据奥维云网（AVC）推总数据显示，2023年1—11月中国冰箱市场零售额为920亿元，同比增长6.0%，反映市场开始呈现出良好的恢复态势。

根据尚普咨询集团数据显示，2022年中国家用空调市场规模达到了3765亿元，同比增长9.8%；2022年中国家用冰箱市场规模达到了1470亿元，同比增长6.5%。据中国家用电器协会统计，2021年中国房间空调器产量约1.55亿台，全球占比接近80%；2022年产量比2021年稍有下滑，约1.48亿台，出口量为6121.1万台。我国空调行业仍处于一个较为活力的阶段，但市场逐渐趋于饱和是空调行业一个不可避免的问题。2023年的出口情况对空调市场零售量和零售额规模影响大。

近年来，我国空调行业持续保持贸易顺差，进口数量远低于出口数量，是空调行业的出口大国，2022年，我国空调进口1.36万台，同比增加312.12%，出口5300.6万台，是进口量的3897倍；2023年1—7月我国空调进口1.37万台，出口4040.68万台，进口金额为1.06亿元，出口金额为560.55亿元。

2022年美的集团、格力电器、海尔智家等三家公司的空调业务收入分别为1506.35亿元、1348.59亿元和400.59亿元，可以看出，这三大巨头的空调业务收入在2022年都呈增长态势，其中美的集团的空调业务收入最高。我国空调行业前5大品牌的市场份额持续提高，2022年达到了82.4%，比上一年提高了2.7%。其中，格力、美的、海尔智家、海信家电和奥克斯分别占据了32.8%、25.6%、10.4%、7.3%和6.3%的市场份额，均实现了同比增长。

据报道，2023年度海尔集团营收3718亿元，提高6%，利润267亿元，提高6%；格力公司营收2050亿元，提高7.8%，利润290亿元，提高19%；美的公司营收和利润也是正增长；海信集团营收也超过2000亿元，利润150亿元。

目前行业龙头企业已经纷纷结合技术开发能力和节能减排的要求，大力开发具有市场潜力的新型空调产品，已经成为众多企业努力的方向，不少企业已经在太阳能应用技术、智能电网技术、物联网家电技术等方面进行了积极有效的尝试。

1.3 制冷产业技术研究及应用进展

张华 刘业凤

(上海理工大学)

本期双碳专刊以案例为特色总结制冷技术发展。具有能效提高、环保工质替代、应用拓展、智能控制、新能源应用等特点，案例常常是综合性的，制冷空调行业发展由设备提供商到整体解决方案提供商转化。随着科技的不断进步和制冷产业的持续发展，大数据、人工智能、新材料、新工艺、新能源等技术正在以前所未有的方式融入制冷产品的设计、制造和运营过程中。不仅改变了传统制冷行业的面貌，也为产品的智能化、高效化、低碳化和个性化提供了全新的可能性。

2023年，在基加利修正案生效和国家“双碳”目标的指引下，中国制冷产业继续向低碳、高效、智能化方向持续转型，在环保制冷剂替代、关键零部件、系统及设备等方面取得明显技术进步，各大厂商针对天然环保制冷剂开发的压缩机、换热器、阀、制冷设备等层出不穷，越来越多的新型环保高效制冷产品在不同领域得到推广应用。适应特殊领域需求的特色高效产品不断涌现。

我国制冷剂正加速向R290、R600a、CO₂、水等天然制冷剂方向切换。多家企业研发出以R290、CO₂、水、R32等为制冷剂的新型高效压缩机，并在压缩机容量和工况调节范围扩大、高速轻量化设计等方面取得了重大研究和技术进展。磁悬浮技术日趋成熟，气悬浮实现了静压气悬浮技术的突破。微通道换热器由于结构紧凑、制冷剂充注量小，对于由于易燃易爆而充注量受到限制的R290等制冷系统非常受欢迎，近年来在换热性能、紧凑性、抗腐蚀性、防泄漏等方面得到了提升。此外，由于其低GWP值，在欧洲市场销售可以享受较低的碳排放税收收，其应用会愈来愈多。

制冷系统发展显现出一个全方位的低碳转型过程，包括对新型环保制冷剂的替代、关键零部件的研发、整体系统的创新设计。大数据、人工智能技术在制冷设备的生产、销售、运行维护以及故障检

测与诊断等方面也得到越来越广泛的应用，不断推进产品向智能化、高效化、低碳化和个性化方向发展。

工商业空调与热泵节能减排技术不断涌现，光伏直驱、储能技术、负荷品位分级与自然能源结合高效利用、高效压缩机技术、空调系统的智能化运维管理和优化控制方面等技术逐渐成熟。余热回收热泵技术在大温升高温热泵和大容量高温热泵方面得到快速发展，以R1233zd(E)、R1234ze为代表的新型制冷剂成为工商业冷（热）水机组厂家新的角逐点。冷链技术在节能高效、与可再生能源结合、环保制冷剂等低碳技术与设备设施上取得明显进步。

我国学者在储热储冷材料制备及性能调控、装置设计与性能优化、系统集成应用等方面不断进步，应用领域也越来越广。在电池热管理方面，空气冷却、液体冷却和相变材料冷却与装置技术方面取得了不错的技术进步。各种新型制冷技术也在不断发展进步。

本章主要通过案例说明制冷产业研究及应用进展，主要体现包括并不限于如下成果：

上海诺通以空气、水为热源，吸收环境中的低品位热能，采用复叠热泵技术，实现高温蒸汽的发生或高温热水的产生，可产生高达125℃热水再闪蒸出蒸汽，可应用于化工、医药等需要微压蒸汽的工业领域以及供暖、食品加工等需要100℃以下热水的领域。

格力与上海交通大学合作研发的大容量离心式热泵，回收钢铁厂炼钢排放的废水热量，用于中国北方城市的区域供暖，该机组开辟了大容量离心压缩机新结构体系，取消增速齿轮装置，结构简单可靠，运转更稳定。机组运行的机械损失平均减少70%，压缩机重量减少60%，噪声降低8dB(A)。

冰山集团提出“泛在热源耦合的深焓能源综合

解决方案”，在一些农产品产业园中建成了规模化的冷热回收系统，可作为区域化余热利用的集成示范。

深圳金沙湾国际乐园的冰雪馆、海洋馆等利用LNG冷能制冰造雪以及中央空调供冷，每年节约用电2000万度。

天津商业大学研发了一种“冷链进口冷冻食品病毒消杀关键技术及系统”，示范应用于天津港国际冷链物流基地。

成都银犁冷藏物流股份有限公司针对节能问题，建设了光伏保温节能冷库，在屋顶安装大型分布式光伏电站，该项目系统装机容量达693kW、利用仓库屋顶面积1万m²。

海尔集团提出数据中心冷却技术专用化、无油化以及定制化的创新思路，推动制冷设备朝着高效节能方向不断发展。

中国移动长三角（淮南）数据中心针对数据中心冷量需求大、制冷能耗高、能源利用效率居高不下等问题，开发应用了AI智能算法，打造了“智冷”空调控制系统，优化制冷系统控制参数调节流程，实现最优节能运行，为数据中心空调系统的自动化控制提供了新思路。

比亚迪、华为、蔚来、小鹏等在热管理系统上集合热泵、废热回热等各种降低系统能耗的新技术。

北涪公园车站中央空调M-BMS超高效智能环控系统中，部署了风水联动控制策略，自适应调节风机频率，水阀开度，水泵频率，系统供水温度等参数，实现对整个空调系统的自动寻优调节，使系统始终处于高效节能的运行状态。

基于软解耦算法的温湿分控及PMV舒适节能控制技术开发了基于新型权重模糊逻辑控制的温湿度软解耦控制算法，并对权重的分布规律进行了研究，提出了16种基本权重组合模式，将无边界的解耦问题转变为了有限边界的模式寻优问题。采用温湿度自寻优控制算法，将复杂的PMV计算方程转化为温湿度解耦查询表。通过人工神经网络模拟空调热湿耦合数据平面，当获取多个温湿度组合下的空

调输出能力，可以求解出使空调能效最佳的温湿度组合。

美的高效机房多智能体分布式控制系统与智慧运维云平台为高效机房多智能体分布式控制系统，分布式控制系统结合不同模组自有优化控制算法及多智能体指挥官协调优化控制算法可保证空调系统长期高效稳定运行。

丹佛斯通过开发智盈供热管理平台加上Leanheat智能软件，真正实现了AI人工智能管理。智盈供热管理平台功能强大，可以进行云端数据收集、分析和建模，主要设备健康状态诊断等。

大型超市制冷系统中装设有EMS集中控制系统，该控制系统具有较复杂的控制逻辑，可实现多级并联控制，也可有序控制设备的启停。

家用空调机特别是多联机技术不断创新，智能、舒适和节能成为多联机技术的重要发展趋势；新风除湿一体机大量涌现，满足日益提高的建筑新风及湿度控制需求；家用空调器与光伏/储能系统深度融合，打造家庭能源中心，助力实现“双碳”目标；空调室内机与建筑一体化推动风管机发展；制冷剂替代持续推进，影响深远。人工智能技术为家用空调节能减排的推进提供了强有力的工具。家用空调存在众多可能的节能减排路径，而人工智能技术更是种类繁多。

珠海格力电器股份有限公司开发了基于人工智能算法的节能舒适空调（格力·星宇），该产品利用空调系统关键部件的数值仿真和BP自适应拟合技术，搭建了全工况因子拟合仿真模型，获取空调在全工况的运行数据，并进行空调最佳性能点寻优控制。该产品搭载了“格力自研的AI芯片”，开发了将NPU单元进行并联和级联的架构，设计了AI编译器，实现了AI算法的高效运行。

格力家庭地暖空调两联供系统，目前已推出静享“天氟地水”、润享“天水地水”系列产品。系列产品均配有变频变容、智能物联、三管制除湿不降温等技术，提供个性化定制方案。

松下集团推出的“天氟地水”地暖中央空调，针对冬季低温时屋内快速升温所设计出了“冬季地

暖+中央空调连供模式”，冬季供暖时同时开启对流和辐射两种末端。

工商业用中央空调冷（热）水机组的发展趋势有以下特点：（1）磁悬浮技术日趋成熟，成为工商业冷（热）水机组企业技术实力的标志，宽范围负载率高效、新冷媒是各厂家的重要展示技术点；（2）气悬浮技术实现了静压气悬浮技术的突破，“先浮后转”的技术特征使机组真正实现了全运行过程无摩擦；（3）在制冷剂替代迫在眉睫、节能减排呼声高涨的形势下，以R1233zd(E)、R1234ze为代表的新型冷媒被各厂家所推崇，成为工商业冷（热）水机组厂家新的角逐点；（4）为适应工业生产领域、居民供暖领域的需求，中高温热泵机组大放异彩；（5）适应特殊领域需求的特色高效产品突出，体现了企业对市场需求的敏锐洞察力；（6）控制技术精细化成为制造企业提升机组能效的重要手段，远程控制数字智能化逐渐成为企业提升服务能力与市场竞争力的新途径。

推进工业能效提升，是产业提质升级、实现高质量发展的内在要求，是降低工业领域碳排放、实现碳达峰碳中和目标的重要途径，是培育形成绿色低碳发展新动能、促进工业经济增长的有效举措。2022年，《工业能效提升行动计划》提出，在多个工业领域的加热、烘干、蒸汽供应等环节，推广高温热泵等替代工艺技术装备，扩大电气化终端用能设备使用比例。为工业用户提供更加绿色高效的热泵系统解决方案，推动行业低碳电气化发展。满足工业端低温（常温）-中温-高温-超高温全温度段的供能需求、适应建筑用暖、生活热水和高温蒸汽等多元化的应用场景。

当前中国能源结构仍以煤炭为主，替代难度大，非化石能源发展面临多重制约，产业的高耗能、高排放、低能效问题并存，绿色低碳技术亟需加强的现状。工业过程供热占据能源消耗的50%，因此实现工业过程供热的低碳化是实现碳中和的重要部分。为达到工业过程供热所需的体量和温度，高温/蒸汽热泵需要深入研究和广泛推广。王如竹等从国内外工业热泵技术现状，分析目前工业热泵通常采用的系统循环型式、制冷剂压缩技术、水蒸气

压缩技术；结合第四代低GWP值制冷剂发展现状，给出环保工业热泵的适用制冷剂；提出工业热泵技术发展展望，最后结合双碳目标的实现和工业锅炉替代市场分析，展开了工业热泵应用场景的拓展分析。

空气处理机组产品性能持续升级迭代，推出提升室内空气品质和环境舒适度的产品；其次，为响应国家的双碳政策，厂商在节能增效方面进行技术升级，采用热回收、高效电机、智慧算法等先进技术，以实现更低的能源消耗、更为紧凑的集成化结构。

制冷压缩机在天然制冷剂应用、压缩机能效水平提升、容量和工况调节范围扩大、高速轻量化设计等方面取得了重大研究和技术进展。制冷压缩机在结构优化、变频电机驱动、数智化控制等多方面提高能效，助力制冷空调行业节能减排。

冰山松洋开发了应用于热泵热水领域的内部高压直流变频补气R290涡旋压缩机，采用具有支撑径向卸载、非对称延展角涡旋盘的喷气增焓、压力差卸载等结构，有效提高压缩机可靠性，并扩大运转范围，最大冷凝温度从65℃提高到86℃，运转范围覆盖R410A热泵压缩机运转范围。

美的从降低压缩机的制冷剂驻留量、提高压缩机的容积效率、提高压缩机的机械效率的维度提出三大创新技术，实现R290转子压缩机的单体高效化和制冷剂驻留的减量化，从而实现充注量限制下的单体能效突破。

海立针对CO₂热泵热水器开发了一款高效、低噪、直流变转速CO₂压缩机，成为国内首家实现热泵热水器用CO₂直流变转速压缩机销售的厂家，于2023年获得“国际先进”水平鉴定。

711研究所研发了“大流量带压蒸汽螺杆热泵装置”，采用注过热蒸汽+氮气隔离和抽凝的轴封结构，提高了高温下机组运行的可靠性；搭建国内首个10MW高温热泵试验平台，完成大流量热泵的全工况测试，填补国内空白，总体技术达到国际先进水平。

凌达研发的新国标超高效低振动2P变频压缩

机，开发的FTz-SM151AXBD压缩机单体低频COP较基础机型提升1.6%，综合能效APF提升0.64%。

美芝研发的14kW 环保高效变频涡旋压缩机，内部结构进行泄漏间隙的优化、机械部接触摩擦的不可逆损失研究，综合实现压缩机单体效率的大幅提升，确保压缩机搭载客户系统能效实际体现。

电机效率的提高意味着压缩机电效率和总体效率的提高，有益于实现制冷压缩机高能效水平。2023年，多家公司深耕电机效率研究，突破诸多关键性技术难题。

万宝针对非晶材料冲压和装配的技术难题，进行“非晶电动机及高效变频压缩机关键技术研究及应用”，研发了多层黏接技术、复合夹层结构，在行业首次实现了非晶电动机的批量生产，大大提高电动机效率，达到国际领先水平。

美的从全分瓣式定子、磁轴相移转子和压缩机低端流平衡块三个方面展开深入研究、创新，大幅提升整机的功率密度与能效水平，同时具有高效制造、高可靠性的优点，实现高功率密度永磁电机及压缩机。

格力对大数据驱动热泵地暖动态建模，建立云边协同的热泵地暖预测控制系统，对建筑地板蓄热进行合理规划，实现热泵地暖系统的品能适配与高效节能。

雪人研发的SRS-2016LS氨用半封闭单机双级螺杆压缩机采用变频+滑阀无级容量调节，通过变频调节冷量，通过滑阀调节内容积比，实现了冷量和内容积比的相互独立调节，能精准高效地实时匹配制冷系统的运行工况和负荷，特别适合于负荷与工况变化范围要求很高的应用场合。

艾默生针对超高温工业制热应用场景开发的谷轮120℃超高温涡旋压缩机，可将压缩机最高冷凝温度提升至135℃，能够满足包含高温热风、热水和蒸汽在内的多种100℃以上的多种工业应用领域需求。

丹佛斯研发的DSG240-DSG480涡旋压缩机，优化涡旋型线及制冷剂流道，大范围拓展低温运行及应用范围，同时配备中间排气阀及防自转轨道环系统（ORD），具有高能效、低噪声、高可靠性等优

点。

冰轮环境研发的永磁变频氨半封螺杆热泵压缩机，将永磁变频电机与压缩机集成后，电机磁路简单，减少了绕组端部、转子端环等结构，进一步优化电机腔体，压缩机整体尺寸有效缩减。美的研发的“绿色高品质薄型化永磁电机”针对传统永磁电机体积庞大、材料用量多、成本较高的问题，利用磁场调制效应提高功率密度的电机技术，并结合新型模块化铁芯技术，实现永磁电机系统的薄型轻量化，获得2023年“国际领先”鉴定。

新世界研发的水蒸气螺杆压缩机组将压缩机的密封气系统与机组中气动阀的气源系统合二为一，共用一套压缩空气系统，在分支管路上采用调节阀，将压缩空气的压力调降到各自适合的压力，简化机组系统结构，实现机组小型化。

广州万宝集团有限公司针对超低温冰箱冷柜市场需求，主导研发了一款新型碳氢混合工质超低温压缩机，在工质成分选择和配比优化、专用冷冻润滑油研发、润滑结构优化及系统降噪等方面进行了深入研究，研发出适用于单级蒸气压缩低温和超低温系统的压缩机，制冷温度可达-86~-40℃，具有结构简单、环保、低噪、高可靠性等优点。

上海海立股份有限公司自主研发的小型高速大冷量变频转子式压缩机，采用八极电机新结构，实现大功率电机高效小型化；研发全域气流脉动抑制技术，降低压缩机压力脉动；应用激光焊接技术，保证压缩机全频段低噪声运行；开发了重载油膜压力均衡技术和快速自回油润滑技术，保证压缩机全转速范围内可靠稳定运行。

广州万宝集团有限公司创新研发了R32 制冷剂大容量变频涡旋压缩机，应用涡旋中心偏置、涡旋始尾端修正等关键技术，排量达到150cm³/r，突破变频容量限制；采用立体动态的供油方式及全新涡旋型线修正技术，实现高运行范围及高可靠性；开发变容积比结构和低离心阻力涡旋盘，加上减少流体阻力的排气止回阀结构和吸气口结构，极大提高压缩机能效。

珠海格力电器股份有限公司设计开发了120~600RT的半封闭永磁同步变频螺杆式压缩机，创新性

开发出完全自由曲线高效GRZ转子型线，较SRM-D标准型线，接触线缩短12%，泄漏三角形减小7%。采用高效变频变容控制技术，有效解决了低转速性能衰减难题。

天津飞旋科技股份有限公司研发的磁悬浮离心制冷压缩机，国标工况250RT和300RT满负荷性能均达到GB/T 19577—2015一级能效水平，IPLV远超一级能效水平。该产品采用高效全三维流体叶轮、磁悬浮轴承及控制器、高速永磁电机、高频矢量变频器、直流电抗器等先进技术，实现高速直驱、无油无摩擦、高效可靠运转。

换热器是制冷空调系统中最重要部件之一，其换热性能及阻力特性对整个系统的性能影响显著。微通道换热器由于结构紧凑、制冷剂充注量小，得到愈来愈多的关注和应用，近年来在换热性能、紧凑性、抗腐蚀性、结构等方面得到了提升。此外，由于R290等低GWP值制冷剂，在欧洲市场销售可以享受较低的碳排放税收，其应用会愈来愈多，但因其易燃易爆的属性，相应的换热器防泄漏特性也获得了关注。近年来因高效的换热性能而被各大厂商重视的微通道换热器、用作经济器和复杂制冷系统的板式换热器、可用于采暖系统的套管式换热器、耐高压抗腐蚀性好的壳管式换热器、常用于蒸发及冷凝等相变换热场景的翅片管式换热器等技术不断进步。

弹热制冷机的多项关键技术于2023年取得了突破，制冷性能于2023年取得了显著进展，最大制冷量达到200W以上，最大制冷温差可达50K，已达到部分应用场景的需求，展现出了在空间站等特种应用的优势和潜力。

南开大学团队进一步利用光伏供电可穿戴电卡器件，将人舒适温区从22~28℃扩展到12.5~37.6℃。

辐射制冷薄膜、涂料等产品已实现规模化制备与应用推广，辐射制冷技术在建筑、粮储、油储、电力通信等领域得到了广泛应用。辐射制冷在大型公共建筑中的应用展现出较好的节能效果，如杭州萧山国际机场航站楼廊桥在应用辐射制冷技术后，单个廊桥的年空调制冷节能率可达43.7%。在粮食仓储领域，应用辐射制冷的平房仓在持续高温天气条

件下，仓温和上层粮温降幅最高分别可达8.8℃和3.1℃^[9]。在油气储罐表面喷涂辐射制冷涂料后，罐壁温度可下降15℃，有效降低了储罐内部压力以减少损耗。

海信集团研发的多场景送风技术的舒适空调器依据气流的康达效应对出风流道进行冷热分流送风设计，实现沐浴式制冷和地毯式制热。

格力提出的全热双向流新风空调一体化技术、贯流双侧分区送风技术和连续供热高效热气除霜技术用于保障空调室内的舒适性。

美的磁悬浮冷水机组可与储能结合，并应用于机场、轨道交通、酒店等多种建筑领域。合肥轨道交通5号线共计使用了62台磁悬浮变频离心式冰蓄冷双工况机组。

海尔静压气悬浮轴承是利用制冷剂通过碳基复合材料所形成的微纳尺度气孔节流所形成气膜的静压作用。采用冷凝器/蒸发器双位置制冷剂取液、双齿轮泵供液及高精度液位控制保障供液，采用电热稳压及蒸发器泄压实现气体轴承的稳定供液压力。

美的中央空调研发的智慧楼宇管理系统（M-BMS）采用了AIE+E（能效+环境）优化算法，通过智能控温、智能启停、智能控载、智能寻优及智能联动，实现系统全自动优化运行。

海尔中央空调发布的MetaBuiding楼宇数智化平台，集成了中央空调物联智控、高效机房智控、能源智控、楼宇综合智控等多个智控单元，面向不同需求场景定制智控方案，在深圳地铁14号线、唐山古冶居民供热改造、三星堆发掘舱等项目中取得良好应用效果。

目前易腐食品腐损造成的碳排放在冷链中占最大比例，因此应该进一步发展和完善我国冷链设备设施和全程冷链体系，以降低食品腐损造成的浪费和碳排放。然而冷链低温环境的获得与保持带来了大量的碳排放，并会随着我国冷链物流的高速发展而快速增加，因此有效控制和降低全程冷链碳排放已成为我国冷链产业高质量发展的必然要求。党中央、国务院高度重视冷链行业的发展，2021年12月国务院办公厅发布《“十四五”冷链物流发展

规划》，明确指出发展基本原则之一是“顺应绿色生产生活方式发展趋势和推进碳达峰、碳中和需要，把绿色发展理念贯穿到冷链物流全链条、各领域”，为我国冷链物流发展提出了新的要求，因此在满足易腐食品和生物制品流通品质情况下，节能与可再生能源利用、环保制冷剂等技术及设备设施应用势在必行。

四方科技集团研发了高效洁净全自动堆积螺旋式食品速冻装置，采用高效食品快速技术、气流组织优化、蒸发器大面积翅片结构与精密制造、智能监控集成控制等多项技术，实现了自堆积螺旋高效稳定驱动及在线监控技术、高效冻结技术、全自动CIP原位清洗技术及装备成套设计制造、核心部件系列化、产业化技术的集成运用和集成创新，提高了农产品冻结速度，降低能耗；通过开发相应软硬件系统，实现了各智能监控点的集成优化。

针对蒸煮成熟后的甜糯玉米棒急速冻结，冰山冷热提出了智能型下旋流隧道速冻装置速冻机（图3.3-2）。该设备根据玉米棒实际冻结曲线合理分区，预冷段、冷却段、深冷段的温度分别为 $+5^{\circ}\text{C}$ 、 -15°C 、 -35°C 。采用振动装置使多层玉米换热均匀，独有的下旋流送风方式，实现均匀布风，冻结效率高、冻结速度快，弧形挡风板设计，无送风死角，减少运行损失。

福建雪人股份有限公司推出了SRS-2016LS氨用半封闭单机双级螺杆压缩机，压缩机搭载氨用永磁同步变频电机，采用VFD控制技术结合压缩机容量滑阀无级能调，实现低负载启动，运行电流平稳、高效节能。

艾默生环境优化技术（苏州）有限公司推出了谷轮™ZF1140低温大型商用冷冻涡旋压缩机，单机制冷能力拓展至40HP，秉承谷轮柔性涡旋设计，采用喷气增焓技术，效率更高，COP 优于传统活塞压缩机；宽运行范围，蒸发温度 $-40 \sim -4^{\circ}\text{C}$ ，覆盖中低温应用；智能模块兼顾排温和电机保护，喷气控制，保证压缩机长期稳定可靠地运行。

云南师范大学对光伏冰蓄冷冷库系统蓄冰模式与结霜故障特性开展了理论分析与实验研究。对比了光伏驱动冷藏库中串联匹配和并联匹配的蓄冰集

成模式，串联匹配模式在抑制光伏波动方面优于并联匹配模式，而并联匹配模式在可变太阳辐照度下存在冷却能耗不足。串联匹配模式在以市政供电和光伏发电为能源的空载和满载条件下都具有更高的性能系数。

青岛海尔生物医疗股份有限公司和上海理工大学开发了碳氢复叠及自复叠低温制冷技术，在低温条件下应用了高效板式换热器及微通道换热器，满足换热前提下将液态制冷剂存量降至最低。研发低温级流量控制并结合自适应的控制方案，解决了高效换热带来的开机阶段各级之间压力不匹配的问题，开发超低温自动化样本库。

青岛海尔特种电冰柜有限公司和西安交通大学基于非共沸混合工质HX46（R290/R170）开发了 -60°C 低温冷柜，采用环保混合制冷剂HX46替代低温产品常用的R12、R508B等制冷剂，对臭氧层无破坏，同时可将温室效应降低90%以上。采用J-T制冷循环替代自复叠和复叠循环，实现了 -60°C 的低温，空箱降温200min可达 -60°C ，装载在24h内可将60kg负载降低到 -18°C 以下，是普通冷柜产品的5~6倍；另外与同类型低温冷柜相比，能耗可降低38.4%以上。采用滑移温度自清除技术解决了非共沸混合制冷剂温度滑移的问题。通过耦合蒸发器压降与混合制冷剂滑移温度的方式，成功将蒸发器的进出口温度控制在 3°C 以内。

华商国际工程有限公司根据某屠宰厂的实际运行数据，对热泵机组全热回收系统生产 60°C 热水的相关参数进行了对比分析。对于主营冷鲜猪肉的生猪屠宰加工项目，采用全热回收系统回收制冷系统的余热生产 60°C 热水经济性高，采用燃气生产热水运行费用是热泵机组的3倍（峰电）、4.8倍（平电）、11.9倍（谷电），采用市政蒸汽分别为2.6倍、4.1倍和10.3倍。

冰轮环境建设的冰温库采用织物风道下部渗透风，水平小孔送风，射程3m，末端风速 0.3m/s ，尾部大孔喷风以减少风道长度降低成本。通过回风温度控制压缩机，压缩机15%~100%无级调节。采用大风量低风速风场，上下全截面空气自然对流。

京科伦研发了基于变频控制与翅片顶排管的温

冷库。采用台数和变频控制，保证温度波动小；冷库顶部布满翅片顶排管，保证空间均匀性。

华商国际工程有限公司、清华大学等单位建立了适用于多功能超大冰面的亚临界、跨临界多工况并行CO₂直接蒸发制冰集中式制冷系统，首创了超大冰面CO₂直接蒸发制冷系统，研究了以CO₂为制冷剂的人工冰场冰池冷排管的构造及排布，通过对不同热量品位需求的梯级热回收技术实现了CO₂制冷系统高效运行，同时满足制冰、除湿、生活热水等多种功能。建立了冰面形成过程及其与室内环境关系的理论分析模型，开展了国家速滑馆超过1.2万m²超大冰面CO₂制冷系统工程示范应用，在2022年北京冬奥会国家速滑馆成功应用，获得绿色化、高效化、精准化的显著效果。

人工智能风起云涌，ChatGPT成为标志性成果，数据中心算力要求高，能耗大。Sora火爆背后，惊人的数据中心碳排放会挑战碳中和进程吗？数据中心也是人工智能、大数据、云计算、工业互联网等新兴行业发展的基石，这些行业的高速发展对数据和算力提出越来越高的要求，国家推出了“新基建”、“东数西算”等战略，推动数据中心的高速发展与高效利用。据研究，人工智能有望在能源优化、智能交通系统、精准农业、气候模型等方面帮助减少碳排放。然而也需要注意，AI系统的训练和运行需要大量的计算能力和电力，这可能导致更多的碳排放。

冷却系统是数据中心高效稳定运行的保障，也是数据中心绿色转型节能降碳的重要环节，液冷技术、高效制冷技术、自然冷却技术、蒸发冷却技术和智慧运维技术是实现数据中心冷却系统从设计节能到运行节能的关键，技术和产品创新与应用也更值得期待。从消纳可再生能源电力、提供高效算力输出和热力输出，通过“电力-算力-热力”的协同优化，实现数据中心的能源高效综合利用，是打造绿色数据中心的根本途径。

2023年，我国学者在储热储冷材料制备及性能

调控、装置设计与性能优化、系统集成应用等方面，取得了重要进展。热能储存聚焦在对熔盐储热、相变储热和热化学储热三大技术的研究上；而对冷能储存的研究，则主要聚焦于冰/冰浆储冷和相变储冷技术。

北京环球影城项目位于北京市通州区文化旅游区内，环球主题公园规划用地面积约4km²，旅游度假区约1.4km²，区域能源站的供能涵盖度假区内主题公园、配套酒店和餐饮、办公场所、数据中心等，共计约40万m²；项目电力负荷需求25.1MW，冷负荷需求62.27MW，热负荷需求84.82MW。环球影城区域能源站按多能互补技术，结合项目全年供冷、夏季昼夜负荷变化幅度明显等特点，配备总容量155MW·h的蓄冰槽和11.4MW的自然冷却板式换热器。供冷总装机能力为65.9MW，完全满足园区冷负荷需求。

内蒙古金澜伊利乳业有限责任公司是伊利集团液态奶全球智造标杆基地，日处理鲜奶6500吨。设计并搭建了采用分层储罐蓄冷的“泵+并联螺杆制冷机组”双循环制冷系统，低温自然冷却与高温机械制冷双模式，开发应用了基于分层储罐蓄冷的需求侧管理策略、基于样本库管理的热物理模型-AI融合驱动节能控制技术，采用自主研发的“PLC+智控平台”双擎驱动架构，实现平均节能率达25%，实时节能率最大可达40%，产生了显著的经济效益。

威乐集团研发智能高效泵智能控制系统，可以实现高度集成化与智能互联，推动行业数字化转型。威乐为埃及Toshka项目供了约400台大型中开泵和智能控制系统，服务埃及沙漠绿洲化建设。

“双碳”持续推进，制冷技术持续创新，我国的高校、科研院所和在中国的企业三方协调，产学研融合，为“双碳”目标落地贡献力量。企业通过创新性绿色技术帮助客户实现脱碳发展，企业本身推动自身的工厂、办公、供应链的脱碳、绿色行动。相信2024年我国制冷产业“双碳”工作会更进一步，取得更大成绩。

1.4 制冷产业未来发展趋势

张华 刘业凤

(上海理工大学)

1.4.1 制冷/热泵工质的低温室效应（GWP）化方向发展

中国制冷空调行业积极履约《蒙特利尔议定书》，淘汰消耗臭氧层物质已经取得重要进展。按照《基加利修正案》要求，注重HFCs削减活动与能效提升的协同效应。当前，我国制冷空调行业各类工质的年消费量（含维修）超过31万吨，最多的是HFCs工质约20万吨，其次是HCFCs工质超过10万吨，而天然工质消费量超过1万吨。因此，环保工质替代贯穿碳中和的全过程，关乎绝大部分制冷产品。工质替代有历史问题，也有现实的节能、节钱、安全、可靠、技术、知识产权等问题。现行的工质中HCFCs类工质有R22、R123、R142b；HFCs类工质有R410A、R134a、R32、R507A、R404A、R407C等；天然工质有NH₃、R600a、CO₂、R290、水、空气等。低GWP替代工质主要包括低GWP的HFCs、HFOs及混合物、天然工质。低GWP的HFCs主要包括R32、R152a等，HFOs及混合物包括R1234yf、R1234ze(E)、R1234ze(Z)、R1233zd(E)、R1336mzz(Z)、R1132(E)、R513A、R514B、R515A等，天然工质包括NH₃、R600a、CO₂、R290、水、空气等。超低GWP（GWP<5）的工质包括一些天然工质和一些合成工质。

国家和行业围绕工质的碳减排路径，开展工质替代、工质管理、设备能效提升等方面技术革新。存在的难题是削减任务难度增加，可选直接替代的工质的种类越来越少，天然工质局限性导致能效和系统成本上的劣势，废弃工质缺乏有效地管理等难题。破局方法是探索全链条的工质减排技术方案，开展候选替代工质自主研发，废弃工质的回收利用。

工质减排技术方案主要按照《基加利修正案》规定的HFCs削减进程（以CO₂当量进行计算）。我国是2024年冻结，2029年削减10%，2035年削减

30%，2040年削减50%，2045年削减80%。中国政府颁布了HCFCs控制的多项政策，建立了消耗臭氧层物质总量控制和配额管理等制度，2021年9月我国将HFCs纳入了受控物质清单。

家用冰箱工质替代基本完成，是天然工质R600a，而家用空调是R32、R290、HFOs。汽车空调现在大部分是R134a，未来是HFOs、R290、CO₂等。冷链物流行业制冷链条长，现行工质有R22、R134a、R404A、R507A、NH₃等，未来工质NH₃、CO₂、R290、R600a、R32、R1270、HFOs等。热泵工质与制热温度有关，种类比较多。

绝大部分新一代替代工质存在着可燃、高压或容积效率低等缺点，导致在一定时期内替代产品的成本会明显高于当前水平，市场对新的替代产品的接受度也是一个考验。未来的替代技术选择和行业履约工作还将面临着巨大的压力和挑战。通过对不同工质存在的问题进行“缺陷管理”的模式加以处理，确保这些替代品在规定条件下的安全使用。

1.4.2 建筑和工业供热从燃料制热向热泵制热化方向发展

随着化石能源逐渐被限制使用，在能源结构转向可再生能源主导的未来，与使用天然气和电力直接加热相比，热泵将是一种更清洁、更便宜的加热解决方案。随着热泵能效和容量的提高和电力成本的降低，热泵的经济优势将进一步增强。然而，尽管热泵具备明显的碳减排优势和长期碳减排潜力，目前热泵的市场份额仍然很低，其原因既有技术经济层面，也有社会政策因素。

热泵包括空调热泵、热水制备热泵、热能与蒸汽制备热泵、工业生产的化石能源替代供热热泵等。热泵的驱动方式有电驱动热泵和热力热泵。电驱动热泵契合未来终端用能电气化发展的需求，是电力高效转为热量的最佳途径，在某些场合替代燃

料锅炉供热。未来电驱动热泵的碳排放强度与未来电网电力的清洁性关联，热泵性能系数COP越高，其在碳排放强度的缩减量也越大。如果基于光伏、风电、水电这种近零碳排放的电力输入，热泵几乎可以视为是近零碳燃料，更是远低于直接燃煤燃气供热的碳排放。

在清洁能源丰富的地区，推广电驱动热泵供热，减碳优势明显。在当地余热资源丰富，温度水平较高地区，发展空气源和余热工业热泵优势明显；未来大规模热能制备的热泵发展方向是面向区域集中供热的水泵热水制取技术、基于高温热泵的高温热能和蒸汽供应、面向工业余热就地消纳利用的热泵技术等。为了支撑这些技术路线的实现，热泵将向高温、大温升、大体量、高效化和环保工质等方向发展，并最终为我国的“双碳”目标实现提供强力支持。

电动汽车空调的电驱动热泵化、智能化成为未来的重要方向。干燥领域同样需要热泵倍增的热量，是解决干燥热源问题、实现双碳目标的必然选择。未来的干燥市场愈来愈大，应大力推动热泵干燥技术发展。对于高温干燥技术，采用热泵复合热泵工质，研究高温高压制冷压缩机，提高冷凝温度，开发高温热泵，满足干燥过程的高温需求。

1.4.3 冷热量制取技术向适应全面电气化方向发展

根据预测，我国到碳达峰的2030年，单位国内生产总值CO₂排放将比2005年下降65%以上，风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿kW以上。制冷空调用能推进能源清洁低碳转型，关键是加快非化石能源，尤其风电、太阳能发电等利用。我国到2025、2030年，非化石能源占一次能源消费比重将达到约20%、25%。我国能源消费达峰后，电气化水平提高，电力需求仍将持续增长，电力行业不仅要承接交通、建筑、工业等领域转移的能源消耗和排放，还要对存量化石能源电源进行清洁替代，预计我国95%左右的非化石能源主要通过转化为电能加以利用。制冷空调行业和技术面临全面电气化、电力直流化局面，制冷空调产品电气化改造、直流化改造任务艰巨。根据低碳能源的变化预测，制冷空调

在能源消费侧全面推进电气化和节能提效。

未来冷热量制取要关注能源结构变化，开展多种能源综合利用，随着全社会“双碳”目标的推进，国家的能源结构和供给方式必然发生变化，行业推进“双碳”目标的实现，首先要适应这种能源结构的调整变化。一方面要大力推进可再生能源等清洁能源的利用使用，如太阳能、余热废热、空气源热泵、天然冷源等；另一方面，对使用清洁能源制取的冷量和热量，应从冷热两端加以全面利用，同时结合储能技术开发，解决清洁能源生产的不稳定性问题。

根据IPCC的预测，电力将会成为未来能源系统的主要供能方式，终端能源用户需尽快全面电气化，尽可能少用燃料、多用电。用户侧的冷热量，则需要由电动制冷、电驱动热泵或电力供热来提供。将燃烧化石燃料、具有较大直接碳排放和间接碳排放的直燃型吸收式制冷系统，替换为高效电驱动冷水机组等；在有条件的地区或实际工程中，以各种适宜的电驱动热泵技术替代燃煤、燃气、燃油锅炉等，实现空调系统的全面电气化，将空调系统的直接碳排放降至零。

因此，在未来的能源体系中，可再生电力将成为能源供应的主体，而在用能端建筑、工业、农业和交通等不同行业仍然需要约50%的热冷需求，因此电气化的高效热冷供应将变得非常重要，而热泵将起到连接二者的桥梁作用；同时热泵可以实现工业用热效率的提升，通过降低能源消费体量并降低可再生能源体量提升的压力。

1.4.4 制冷制热产品向绿色化及其智能化方向发展

制冷制热产品及系统的发展呈现绿色化、节能化特点，产品应用的范围和领域得到拓展。制冷空调企业开发出高效、紧凑、重量轻、可靠性高、经济性好的新型换热器。低碳技术应该特别重视制冷空调系统实际运行能效。系统运行能效涉及系统集成优化及系统的各个设备的优化匹配控制。如空调系统，空调系统涉及冷水（热泵）机组、水系统、风系统、控制系统等设备，按照兼顾动态负荷和使

用保障要求的原则，必须优化空调系统与各个设备的匹配，通过自动控制和调节手段，使得系统在不同运行场合和时段均处在高效运行状态，达到节能运行的目的。

制冷行业与人工智能领域相结合是发展趋势，目前有了许多优秀的研究成果与应用案例，也带来了很好的经济效益和社会效益。例如，空调生产线的智能制造得到空调大厂的欢迎，智能制造生产线的流程按照产品全生命周期的理念建设，形成了智能设计、智能设备、智能生产、智慧物流、智慧服务、智能决策等环节的智能化，制造过程呈现自动化、少人化，俗称无人工厂、黑灯工厂。产品的模糊控制得到广泛应用，将用户积累的经验知识转化为模糊规则，通过模糊推理过程对系统实施控制，达到比常规的PID控制具有更好的节能和控制效果。

推进互联网大数据平台是制冷行业智能化发展鲜明的特点。互联网成为全产业链各个环节互联互通的重要支撑平台，利用大数据、人工智能等时代

化技术工具，推动产业技术进步、组织变革以及生产效率和产品质量的提升，并借此全面提升行业生产力和创新能力。大数据和人工智能的应用是行业未来发展的方向，在产品和工程设计、工艺过程设计、生产调度、故障诊断、运行维护和使用、资源回收利用等环节，通过大数据分析掌握和推演出更优的设计、制造或应用方案，在实现产品智能化、制造智能化、运行维护智能化的同时，可以获得最大限度的产品生命周期低碳排放的协同效应。

工业互联网平台结合能源互联网、大数据、云计算、5G网络等技术，通过智慧能源总控平台助力园区实现能源流、数据流、信息流、碳追溯流的“四流合一”，并通过对园区能源动力生产、输送、配用的全环节进行集中、直观的动态监控和数字化管理，改进和优化能源平衡，大幅提高了能源的综合利用效率。因此，行业出现一批大数据、智能制造方面的低碳示范园区、低碳生产线和工厂。

第二章

系统、设备及关键零部件

2.1 制冷系统及自动控制

(天津大学 杨昭团队)

近年，中国制冷空调行业迅速发展，制冷空调与各个行业融合加速，创新产品和应用案例不断涌现^[1]。图2.1-1所示为2022—2023年10月中国空调累计产量及增长情况，2022年全年中国空调累计产量达到22247.3万台，累计增长1.8%。截至2023年10月中国空调产量为1373万台，同比下降0.5%。2023年1—10月中国空调累计产量达到20738.5万台，累计增长12.4%。制冷行业是当之无愧的能耗大户，与我国的“双碳”目标息息相关。

目前，在制冷系统中使用的制冷剂种类繁多，其制冷剂性质、状态各异，各制冷剂之间存在替代关系。在新型环保制冷剂的选择中，理想的制冷剂应满足：零ODP，极低的GWP，安全无毒，优异的热力学性质和较低的价格。但是，在全球范围内还未找到“完全理想”的制冷剂。近年来，随着新型环保的替代进程的深入，也涌现出一系列新技术、新应用^[2]。随着人们对生活品质和舒适度要求的提高，以及对能源效率和环境保护的关注，追求整个制冷系统能效比达到最佳状态成为行业发展的必然

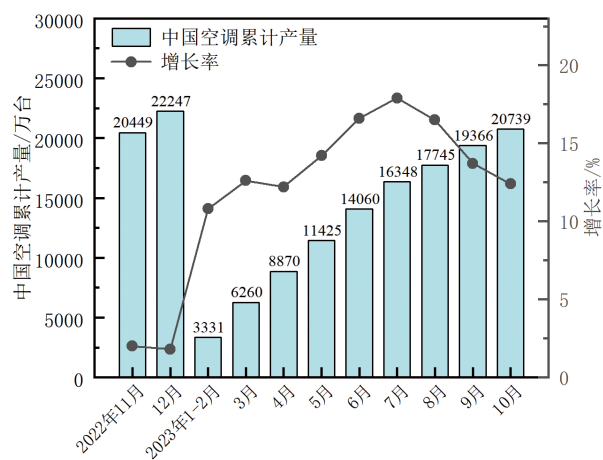


图2.1-1 2022—2023年10月中国空调累计产量及增长情况

趋势，系统的性能提升解决方案与自动控制技术也成为研究的重点。

传统的机械控制模式是通过压力开关来控制压缩机和冷凝器的启停，可以保证系统稳定运行，但由于其通过采集系统内部压力来控制相应设备，

没有较为复杂的内部算法来精确控制，无法达到降低磨损，节能降耗的目的，更不能将整个制冷设备集中管理，存在着控制精度低、能耗高、可靠性差等问题。为了解决这些问题，制冷系统的自动控制技术应运而生。自动控制技术可以实现制冷系统的精确控制，提高系统的能效比，降低能耗和运行成本，同时保证系统的稳定性和可靠性^[3]。

制冷系统自动控制主要涉及到传感器技术、控制器设计、控制算法等方面。传感器用于实时监测系统的运行参数，如温度、压力、流量等，并将其反馈给控制器。控制器根据传感器反馈的信息，采用相应的控制算法，对制冷系统进行精确的控制^{[4][7]}。

控制算法是制冷系统自动控制的核心，常见的控制算法包括PID控制、模糊控制、神经网络控制等。PID控制是一种经典的控制算法，具有结构简单、稳定性好等优点，但对于非线性系统的控制效果较差。模糊控制和神经网络控制是两种智能控制算法，具有自学习、自适应等优点，可以更好地适应非线性系统的控制需求^[8]。此外，随着人工智能技术的发展，深度学习等技术也被应用于制冷系统的自动控制中。深度学习可以通过对大量数据的学习，提取出系统的特征和规律，实现更加精确的控制。

随着全球气候变化问题日益严重，人们对制冷系统高效、环保、稳定、可靠运行的要求逐渐升高，传统制冷技术已不能满足人们需求，新型制冷技术正逐渐成熟，同时随着传感器技术、控制器设计和控制算法、物联网等方面的不断发展，制冷系统的自动控制技术将会不断完善和提高，为人们带来更加舒适和节能的生活环境。

2.1.1 研究进展

制冷剂是制冷系统中的重要组成部分，国际上在各个产品领域采用何种替代技术路线仍存在诸多争议，目前在全球范围内尚未找到“完全理想”的制冷剂。日本和美国一直在寻找环保性能较好的合成类制冷剂，而欧盟一直积极地推行天然工质的替代方案。更低GWP的制冷剂在全球范围内的应用推广将是必然趋势。当前低GWP的替代制冷剂主

要包括天然制冷剂（如NH₃、R600a、CO₂、R290、H₂O等）、低GWP的HFCs（如R32、R152a等及其混合物）、HFOs、HCFOs及混合物（如R1234yf、R1234ze（E）、R1234ze（Z）、R1233zd（E）、R1336mzz（Z）、R1132（E）、R513A、R514B、R515A等）。

HCs以丙烷（R290）、异丁烷（R600a）、丙烯（R1270）为代表^[1]，其技术应向往家用空调、冰箱、热泵、冷水机组等领域发展。HFOs作为新型合成制冷剂是近几年的研究热点，但是，全球的HFOs核心专利主要由国外企业掌握^{[9][13]}。我国HFOs制冷剂开发与先进国家相比还存在较大差距。R1234yf被认为是R134a在汽车空调中的替代制冷剂，在欧洲汽车空调行业得到了普遍应用。许多研究人员正在考虑将R1234yf的技术扩展到其他领域，如家用冰箱、热泵、小型制冷系统和冷水机组等。低GWP的HFCs也具有不错的应用前景，R32在中小型空调设备中得到了广泛的应用，R152a也可作为汽车空调制冷剂。

工商业空调与热泵节能减排技术不断涌现，光伏直驱、储能技术、负荷品位分级与自然能源结合高效利用、高效压缩机技术、空调系统的智能化运维管理和优化控制方面等技术逐渐成熟，提高了人们的生活品质。格力公司与清华大学联合研发的“集成蒸发冷却和太阳能光伏的复合超高效空调器”^[14]，如图2.1-2所示为集成蒸发冷却和太阳能光伏的复合超高效空调器系统原理图。蒸气压缩循环中，经压缩机的高温高压制冷剂以相同排气压力分别进入2个冷凝器，在室外冷凝器冷凝放热后，经初级节流进入闪发罐，被闪发后的气态制冷剂进入压缩机小缸，另一部分液态制冷剂经不同阻力的节流装置，分别进入高温蒸发器及低温蒸发器，实现与室内空气的梯级换热，其中高温蒸发器主要处理显热，低温蒸发器处理所有潜热及部分显热，制冷剂吸热气化后，分别进入压缩机对应吸气缸。该系统结构相较更简单，经济性、可靠性高，同时也避免了系统复杂的回油回路及压缩机均油设计。

在蒸发冷却新风方面，利用机械通风直接蒸发冷却处理室内负荷，实现通风、降温、除湿功能；利用室外机蒸发冷凝的压缩机损失、节流损失和蒸

发器损失；通过光伏直驱与市电耦合控制技术，减少市电用量；采用环保制冷剂R152，确保产品较低GWP和高安全性，并避免过大的充注量和经济成本；利用新风调节室内负荷，实现了环境自然冷源利用、高效机械冷源制取、光伏直驱和先进控制等技术的全面融合，减碳效果显著。

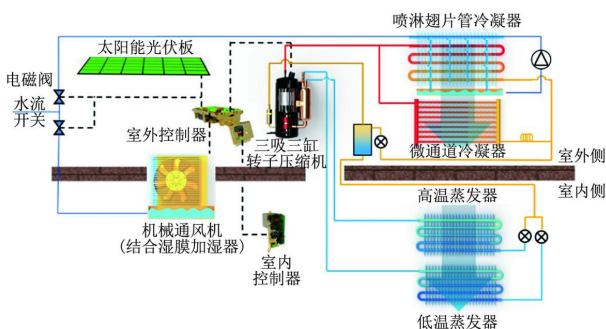


图2.1-2 集成蒸发冷却和太阳能光伏的复合超高效空调器系统原理图

我国一直把能效标准作为节能减排的主要手段，在房间空调器行业的发展过程中，能效标准作为基础文件、技术支撑帮助行业实现节能减排。美的集团为改善室内空调舒适性，采用R290自然工质，研发的高效舒适的房间空调，如图2.1-3所示，该空调器是全国首款R290制冷剂一级能效空调，新能效标准下，第一台R290新一级能效的产品的出现，对整个行业都是一个振奋人心的消息。同时这也意味着，R290空调替代进入高能效的新阶段，空调产业的环保冷媒市场将面临一次巨大颠覆和变革。除了节能低碳的亮点，在房间舒适度设计上，利用室内机多矢量旋转风道技术提升射流速度，在制热模式下可实现垂直送风、热风直达地面，针对现有多联机因频繁开关机而导致的室温波动大、能耗高问题，提出了基于房间负荷动态预测的多联机变蒸发温度-变过热度控制方法。

工业余热及冷能利用发展迅速。上海诺通以空气、水为热源，吸收环境中的低品位热能，采用复叠热泵技术，实现高温蒸汽的发生或高温热水的产生，可产生高达125℃热水再闪蒸出蒸汽，可应用于化工、医药等需要微压蒸汽的工业领域以及供暖、食品加工等需要100℃以下热水的领域。



图2.1-3 全国首款R290制冷剂一级能效空调美的G2-A1N7

格力联合上海交通大学研发的大容量离心式热泵，如图2.1-4所示，回收钢铁厂炼钢排放的废水热量，用于中国北方城市的区域供暖，该机组开辟了大容量离心压缩机新结构体系，取消增速齿轮装置，结构简单可靠，运转更稳定。机组运行的机械损失平均减少70%，压缩机重量减少60%，噪声降低8dB(A)。机组采用大功率高速永磁同步电机，最大电机功率1800kW，电机转速达10000r/min以上。机组的额定工况电机效率高达98.3%，且全转速范围运行效率衰减小，全工况效率均达96%以上，节能减排效果显著。此外，格力还研发出基于“热-流-力”匹配定向散热的螺旋环绕制冷剂喷射冷却技术，可以有效冷却定子和转子，电机绕组温度控制在30~40℃，远低于180℃退磁温度，确保电机可靠运行。机组可采用各种合适温度的热源实现供冷与供暖，包括地下水、江河水、土壤源、工业废热/水、电厂废热/水、城市污水/再生水等。目前，格力的离心热泵机组已经投入市场使用，能够满足各型项目的大容量高温热泵需求。鞍山钢铁集团的低品位余热回收示范项目作为标杆项目采用了格力2台10MW永磁同步变频离心式热泵机组。该项目运营后，用于回收钢铁厂加热炉工艺流程中净环水产生的30℃工业废热，能将低品位热源提升至65℃转换成高品位的热能加以利用，满足厂区18万m²冬季供热需求^[15]。大庆油田污水站地热利用示范工程采用3台串联的高温热泵离心机替代了原有锅炉房，将石油开采过程中产生的含油污水余热回收，实现油罐底部加热和厂房供暖，减少工业废水热污染。冰山集团提出“泛在热源耦合的深焓能源综合解决方案”，在一些农产品产业园中建成了规模化的冷热回收系统，可作为区域化余热利用的集成示范。此外，深圳金沙湾

国际乐园的冰雪馆、海洋馆等利用LNG冷能制冰造雪以及中央空调供冷，每年节约用电2000万度。在LNG动力船舶上，LNG冷能被因地制宜地利用在制取冷冻水，满足船上的制冷需求。既减少了船舶空调系统设备的初投资费用，又无需额外消耗空调系统电量，每天可以节约近6000元的费用^[1]。



图2.1-4 热源塔离心式串联热泵

冷链物流技术在可再生能源、储能、大数据、高效保温技术、低碳消杀技术等方面取得长足发展。福建赛特冷链科技有限公司研发了一种直拼保温箱，该保温箱非常适合冷链短途运输，采用硬质聚氨酯（PU）与VIP板相结合作箱板，整个保温箱可以拆卸、折叠，便于周转运输。天津商业大学针对冷库进出库货品消毒成本和效率方面等问题，优化了一级冷库进出库货品消毒作业流程，研发了一种“冷链进口冷冻食品病毒消杀关键技术及系统”，示范应用于天津港国际冷链物流基地。成都银犁冷藏物流股份有限公司针对节能问题，建设了光伏保温节能冷库，在屋顶安装大型分布式光伏电站^[16]，如图2.1-5所示，该项目系统装机容量达693kW、利用仓库屋顶面积1万m²。项目建成预计年均发电量53.16万kWh，首年发电量为59.94万kWh，使用寿命25年以上。经初步统计，该光伏电站并网发电日最大发电量接近4500kWh，即使在烟雨蒙蒙的阴天，日发电量也能达到450kWh，首月累计发电7.28万kWh，年发电量可达110万kWh，目前已累计发电700万kWh。该项目与相同发电量的火力发电相比，每年可节约标准煤202.07吨，减少二氧化碳排放量约529.41吨，二氧化硫排放量约1.72吨，氮氧化物排放量约1.50吨。



图2.1-5 大型分布式光伏电站

随着数字世界的发展和人们对信息技术需求的增长，数据中心的节能减排问题日益得到重视。数据中心冷却设备能耗较高，约占数据中心总能耗的20%~40%，是实现数据中心节能减排的重点。海尔集团提出数据中心冷却技术专用化、无油化以及定制化的创新思路，推动制冷设备朝着高效节能方向不断发展。中国移动长三角（淮南）数据中心针对数据中心冷量需求大、制冷能耗高、能源利用率居高不下等问题，开发应用了AI智能算法，打造了“智冷”空调控制系统，优化制冷系统控制参数调节流程，实现最优节能运行，为数据中心空调系统的自动化控制提供了新思路。为有效解决数据中心的耗电量高、温度高等系列问题，澳蓝数据中心自主研发生产了以间接蒸发冷却空调机组AHU为主的蒸发冷却数据中心系列产品，以其高效节能的特点，成为数据中心运营商和企业的首要选择^[17]。图2.1-6所示为间接蒸发冷却降温。间接蒸发冷却空调机组AHU的工作原理是通过空气与水间接接触换热，从而实现对空气的降温。具体来说，该机组通过先将空气送入空气处理单元中进行初步处理，然后将空气送入间接蒸发芯体，在芯体中，干通道的产出气流与湿通道经蒸发冷却降温后的工作气流进行热交换，从而实现对空气的等湿降温。这种间接蒸发冷却的方式可以大幅降低数据中心的能耗，提高数据中心的能效。与传统的机械制冷方式相比，间接蒸发冷却空调机组AHU具有更高的能效和更低的维护成本。它能够减少机械压缩系统的开启时间，从而减少能源消耗和环境污染。与此同时，该

机组还具有更好的温湿度控制性能，可以更好地保护数据中心的设备，并延长设备的使用寿命。

目前，新能源汽车制冷自动控制系统的研究主要集中在以下几个方面：（1）高效制冷技术，研究如何提高制冷系统的效率，减少能耗和排放；（2）智能控制算法，研究如何通过智能控制算法实现制冷系统的自动控制，提高舒适性和节能效果；（3）多能源协同控制，研究如何实现制冷系统与其他能源系统的协同控制，提高能源利用效率；（4）环境适应性，研究如何使制冷系统适应不同的环境条件，提高系统的可靠性和稳定性。

无专利壁垒的天然工质正在被主机厂积极采用，在热管理方面，我国新能源汽车主机厂及零部件供应商积极创新，技术方案紧追国外一线厂商。

比亚迪、华为、蔚来、小鹏等在热管理系统上集合热泵、废热回热等各种降低系统能耗的新技术。图2.1-7为多功能的整车热管理系统^[18]，其中包括乘员舱制冷/制热循环、动力电池冷却循环及电机冷却循环。乘员舱制冷/制热循环包括的部件有蒸发器（车内换热器）、冷凝器（车外换热器）、四通换向阀、气液分离器和压缩机；动力电池冷却循环包括的部件有电池水泵、电池换热器、电池PTC加热器及动力电池本体；电机冷却循环包括动力电机、电机冷却水泵、冷却液膨胀水罐、电机部分车内换热器及电机散热器。该设计通过电磁阀、三通电磁阀、四通换向阀等部件实现不同循环和不同工况的切换，控制各关键部件在合理的工作范围内，并满足乘员舱、电池组和电机部分的热需求。该结构的设计可以实现乘员舱散热与加热、动力电池组的散

热与预热以及电机电气系统的散热与能量回收，提高能源利用率，实现节能减排。

制冷技术的研究展示了一个全方位的低碳转型过程，其中包括对新型环保制冷剂的替代、整体系统的创新设计，以及自动化控制技术的集成应用。制冷剂的替代策略目标是减少对环境的影响，同时保持或提升制冷效率。系统解决方案的进步则是在整合这些新型制冷剂的的同时，优化整体系统的性能。自动控制技术的融入进一步增强了这些系统的智能化和效率，使其能更好地适应不同环境和需求。这些创新的交织和融合，推动着制冷行业向着一个更加低碳可持续和技术先进的未来迈进。

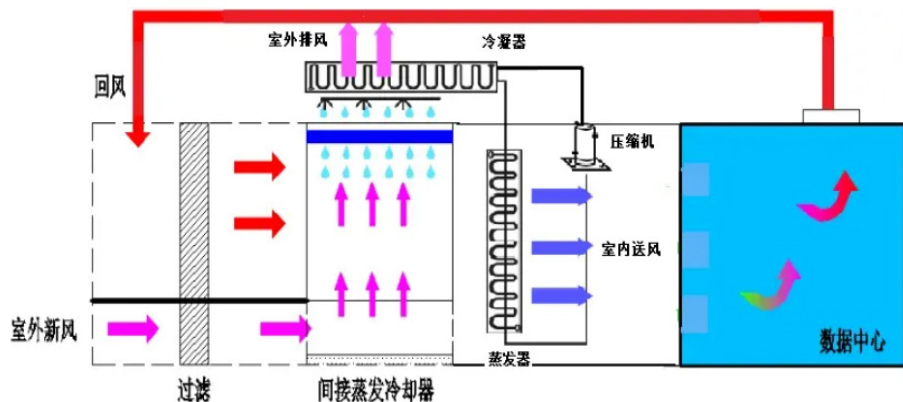


图2.1-6 数据中心间接蒸发冷却降温

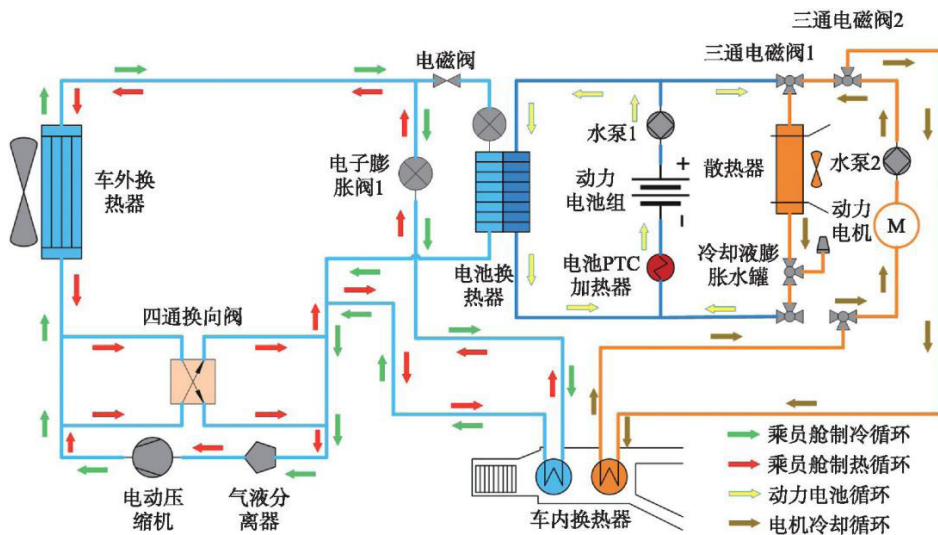


图2.1-7 整车热管理系统原理图

2.1.2 关键技术

关键技术作为行业基石，不仅是制冷系统能效和性能提升的驱动力，也是确保系统可靠性和安全性的基础。主要包括以下几个方面：

（1）高效节能技术：节能技术涉及多个方面，例如通过对换热器进行革新设计，提高热交换效率；制冷剂的有效回收和重复利用，降低环境污染和成本；提高压缩机的能效比，减少能源浪费；余热的高效回收利用，转化成其他形式的能量；与太阳能、风能等新型能源技术的结合，开辟能源多元化道路。这些节能创新举措，不仅有助于降低制冷系统的能耗，同时提升了能效比，符合环保和可持续发展的要求。

（2）先进自动控制技术：先进的自动控制技术包括精确的传感器选择，用于实时监控系统中的关键参数如温度、压力和流量；创新的控制器设计，以便更加准确地响应传感器数据；高效的控制算法，用于优化系统性能和响应速度。此外，随着智能技术的快速发展，包括人工智能、物联网和云计算在内的智能控制技术被广泛应用于制冷系统中。这些技术使制冷系统能够进行远程监控、智能调节和故障预测，显著提升了系统的运行效率、可靠性和用户体验。

（3）创新故障诊断技术：创新的故障诊断技术包括对传感器进行故障检测，确保数据的准确性；控制器的故障诊断，保证系统控制的可靠性；以及对整个制冷系统的综合故障分析，及时发现潜在问题并采取措施进行纠正。这些故障诊断技术的应用，不仅有助于防止意外事故的发生，还能减少维护成本，延长设备的使用寿命。通过这些技术，制冷系统的安全性和稳定性得到了极大提升，同时也为用户提供了更加可靠和高效的服务。

这些技术的应用不仅显著提升了制冷系统的能效和性能，还增强了系统的智能化和安全性。随着这些技术的不断发展和完善，我们可以期待制冷系统在未来将更加高效、智能和可靠，从而更好地服务于现代社会的需求。

2.1.3 优秀产品案例

2.1.3.1 北滘公园地铁站M-BMS超高效智能环控系统

北滘公园站为广州市轨道交通7号线一期西延顺德段与佛山市城市轨道交通3号线换乘车站。车站外包总长210m，标准段外包总宽度49.9m，两侧站台宽13m，中间换乘站台宽9m，设计客流量为35863人/h。北滘公园站采用双线共享冷源系统，车站设置了2套冷源系统，分别为给车站大系统供冷的水冷主机系统及给车站小系统供冷的水源多联机系统。车站中央空调系统于2022年5月开始试运行调试，7月进入稳定运行阶段，图2.1-8所示为北滘公园车站中央空调设备机组。



图2.1-8 北滘公园车站中央空调设备机组

北滘公园站采用美的M-BMS超高效智能环控系统，该系统使用AIE+E（能效+环境）优化算法，通过智能控温、智能启停、智能控载、智能寻优及智能联动，实现系统全自动化运行。本系统对机房内空调系统的设备实行实时、全天候的自动监测和控制。并同时收集、记录、保存及分析管理系统运行的重要信息和数据，优化系统控制方案，达到提高能源效率，满足室内环境需求的同时，节省能源，节省人力，延长设备使用寿命，最大限度降低设备

寿命周期的费用。

北潞公园车站中央空调M-BMS超高效智能环控系统中，部署了风水联动控制策略，如图2.1-9所示，该控制策略可根据系统运行状态，自适应调节风机频率、水阀开度、水泵频率、系统供水温度等

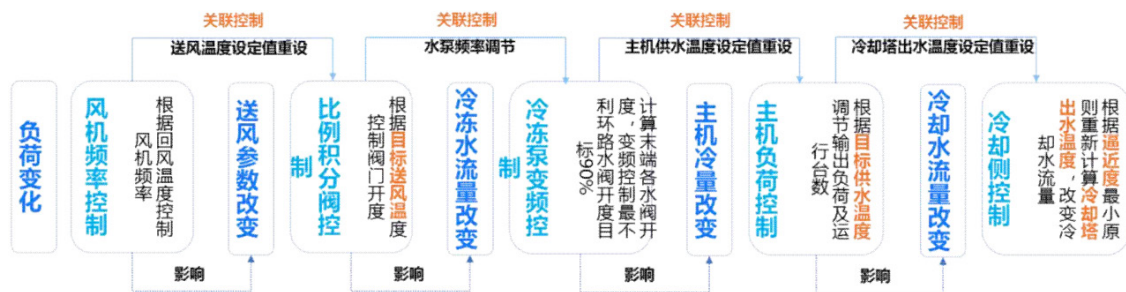


图2.1-9 北潞公园车站中央空调M-BMS超高效智能环控系统

北潞公园站中央空调系统的能力特点为：

(1) 从冷源到末端进行了整体系统优化。针对冷源设备，制冷机组采用了美的高效变频磁悬浮离心式冷水机组，实现全负荷段高效变频供冷；

(2) 冷冻水泵、冷却水泵采用变频调节运行，配合相关的温压双控控制策略，能够实现智能升降频；冷却塔并联运行，配合智能加减载算法，能够根据系统运行状态智能控制冷却水温度，保证冷水主机的高效运行；

(3) 针对输配系统，空调冷冻水供回水采用大温差、低流量设计，降低输配系统能耗；制冷机房内管路采用低阻力阀件等措施降低管路阻力；

(4) 末端采用美的大温差低阻力组空、空调箱及风机盘管末端。空调自控系统采用美的M-BMS超高效智能环控系统，可根据车站冷负荷变化智能控制冷水主机、水泵及冷却塔频率，实现自适应调整。

应用美的M-BMS超高效智能环控系统，北潞公园站空调系统运行稳定，能够根据系统运行状态进行自适应寻优控制，达到了良好的节能效果。经控制系统检查与传感器验证后，基于监控系统制冷季历史数据，对项目冷源系统能效进行计算分析。由第三方出具的检测报告结果可知，在检测时间段内

参数，实现对整个空调系统的自动寻优调节，使系统始终处于高效节能的运行状态。空调系统末端还配备了智慧阀，能够对各末端区域温度及冷量等数据进行实时监测与调节，实现对末端系统的全局流量平衡控制，保证各末端区域的冷量需求。

(2022年08月22日—2022年11月04日) 制冷机房系统运行能效比为6.76，空调系统制冷能效比为4.05。

2.1.3.2 基于软解耦算法的温湿分控及PMV舒适节能控制技术

目前市场上主流家用空调的控制目标为单一的室内温度，若要对其优化以降低能耗，必然要提高设定温度，这是以牺牲用户舒适度为代价的。从本质上讲，单一的控制维度必然只能实现单一的目标，要么舒适，要么节能，这两者之间是矛盾的。该案例空调从温度和湿度两个维度入手，首先创立了全新的热湿耦合数据平面的概念，研究出将温度和相对湿度两个参数都作为独立控制对象的温湿分控软解耦控制算法，实现了温度、湿度都能精准控制的二维控制；其次开发了能在不同气候区域内，自识别建筑热湿负荷特征的多维参数舒适性控制技术，即在保证用户热舒适的前提下，在二维温湿度组合中自动寻找最节能的参数组合，同时实现舒适与节能；最后，提出了三阶段运行理念，即空调开启后，先快速将室内温湿度调整至舒适区间，然后在舒适区间内，让室内状态稳定至不同的温湿度值，并自学习不同温湿度组合对热湿负荷的影响，最后选择舒适又节能的温湿度组合，并将室内温湿度调整至该组合数值。

该案例技术提出了热湿耦合数据平面的概念，

它是将输出的显热冷量和潜热冷量进行分别研究，绘制出的二维耦合数据平面。开发了基于新型权重模糊逻辑控制的温湿度软解耦控制算法，并对权重的分布规律进行了研究，提出了16种基本权重组合模式，将无边界的解耦问题转变为了有限边界的模式寻优问题。采用温湿度自寻优控制算法，将复杂的PMV计算方程转化为温湿度解耦查询表，如表2.1-1所示。基于空调稳定运行时输出能力与建筑热湿负荷相匹配这一基础理论，通过神经网络模拟空调热湿耦合数据平面，当获取多个温湿度组合下的空调输出能力，就能推演出该目标建筑的热湿负荷随温湿度变化的情况，进而可以求解出使空调

能效最佳的温湿度组合。

季节自识别技术模型见表2.1-2，以GB/T33658中人体舒适度模型的5个评价维度（PMV、垂直温差、吹风感指数、温度均匀性、温度波动）和室内空气质量标准参数为目标，一键（AI）启动，以舒适度模型5个评价维度及空气品质的舒适控制。季节自识别匹配最适宜运行模式，实时动态寻优最舒适节能温湿度设定值，全程三阶段参数化运行，自动为用户营造舒适、新鲜、洁净、低噪的室内热环境，且运行节能，并避免因为空调温度过冷、冷风直吹引起的健康问题。

表2.1-1 夏季PMV与温湿、湿度解耦表

湿度 温度/℃	10%	20%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	80%	90%
28.0	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.1	1.2
27.5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0
27.0	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8
26.5	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6
26.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.5
25.5	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3
25.0	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
24.5	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	0.0
24.0	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2
23.5	-0.9	-0.9	-0.8	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5
23.0	-1.1	-1.0	-1.0	-0.9	-0.9	-0.9	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6

表2.1-2 季节自识别技术模型表

温区划分	室外环温/℃	室内环温/℃	相对湿度/%	季节	初始运行模式
第1区间	≤10	—	—	冬季	制热
第2区间	11~16	≤18	—	冬季	制热
第2区间	11~16	19~23	<60	春季低湿季节	弱制热
第2区间	11~16	19~23	60~79	早春高湿阴冷季节	温室分控
第2区间	11~16	>23	≥60	早春高湿阴冷季节	温室分控
第2区间	11~16	>23	<60	早春低湿季节	送风
第3区间	17~24	≤18	—	早春低温低湿季节	弱制热
第3区间	17~24	19~25	<60	早春低湿季节	送风
第3区间	17~24	19~25	60~79	早春高湿阴冷季节	温室分控
第3区间	17~24	>25	≥80	梅雨潮湿闷热季节	温室分控
第3区间	17~24	>25	60~79	春季中湿季节	常规除湿
第3区间	17~24	>25	<60	春季低湿季节	送风
第4区间	25~27	≤27	<60	夏季低湿	送风
第4区间	25~27	≤27	60~79	夏季中湿	常规除湿
第4区间	25~27	≤27	>80	夏季高湿	温室分控
第5区间	>27	>26	—	夏季	制冷

该案例技术的能力特点为：

(1) 变频软解耦控制算法的温湿分控技术，将一维的温度控制拓展为二维的温湿度控制。实验测试结果表明，在各种低温高湿环境负荷工况下，温湿分控模式，温度波动小，房间相对湿度值相比普通除湿，多下降约15%~26%。用户体验结果表明，体感更加干爽、舒适，可满足全国大部分区域除湿需求。

(2) PMV动态寻优的舒适节能控制技术，实现快速冷热、舒适、节能三者兼顾，以制冷为例，海信普通空调制冷及采用该技术的AI功能，实验室验证表明，与固定的设定温度相比，PMV和PPD都相当，节能10%以上，以满足用户的舒适和节能需求。

(3) 季节自识别的多维参数舒适性控制技术，通过AI舒适家-热湿管理技术创造性将舒适控制、节能控制、温湿分控控制、健康技术、气流控制等关键技术系统集成，一键启动。

(4) 全程三阶段参数化智能控制技术，实现“四度一感”（温度、湿度、洁净度、新鲜度、风感），为用户营造舒适健康的室内好空气。一方面先速冷热、后舒适、再节能控制，将温、湿度控制到舒适的同时，实现节能约10%，起到节能效果。另一方面通过达到温度目标的同时，相对湿度值下降15%~26%，实现温度、湿度都控制到舒适的区间。

2.1.3.3 内蒙古金灏伊利液态奶生产用制冷系统及节能智慧调控系统

内蒙古金灏伊利液态奶生产基地日处理鲜奶6500吨，针对其用冷需求，设计并搭建了采用分层储罐蓄冷的“泵+并联螺杆制冷机组”双循环制冷系统，低温自然冷却与高温机械制冷双模式。开发应用了基于分层储罐蓄冷的需求侧管理策略、基于样本库管理的热物理模型-AI融合驱动节能控制技术，采用自主研发的“PLC+智控平台”双擎驱动架构，实现平均节能率达25%，实时节能率最大可达40%，产生了显著的经济效益。

制冷系统由内循环制冷机组、内循环冬季室外换热板换、外循环车间生产冷水供给系统与连接内

外循环的分层储水罐组成，车间生产所需的冷水由分层储水罐与内循环制冷机组共同提供。冬季工况下为充分利用室外冷源，最大限度节约能源，关闭制冷机组，通过室外板换采用自然冷却方式供冷。制冷机组集成应用了节能智慧调控系统，如图2.1-10所示，采用“PLC+智控平台”双擎驱动架构：制冷系统PLC自控系统实时监控并收集系统运行参数后上传至智慧调控计算平台中，通过基于样本库管理的热物理模型-AI融合驱动节能控制算法，计算出满足制冷需求目标的最优控制参数并下发至PLC设备，实现制冷系统的实时最优控制，节约能源与运行成本。

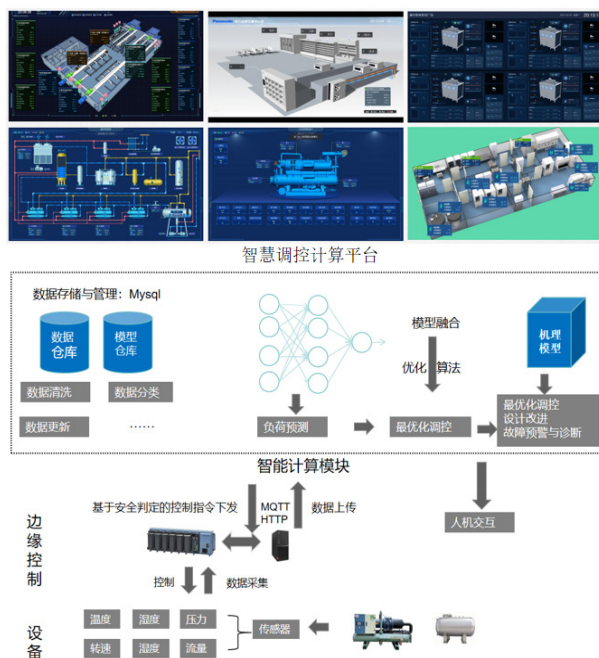


图2.1-10 液态奶工艺制冷系统及节能智控平台流程图

该项目实施策略的特点有：

(1) 基于分层储罐蓄冷的需求侧管理策略：采用分层储罐进行短时高频储冷和放冷，针对低温自然冷却与高温机械制冷双场景，开发基于负荷精准预测的全局能量平衡技术，平抑冷量需求侧和供给侧失衡难题，为液态奶生产工艺的精准控温保驾护航。

(2) 机理+AI节能智控架构：开发基于样本库管理的热物理模型-AI融合驱动节能控制技术，突破了传统经验控制节能率低、单一AI模型控制数据成

本高、训练周期长的瓶颈，可实现短-中-长期的全运行周期节能，节能率高达20%~40%。

(3) “PLC+智控平台”双擎驱动：自研制冷压缩机及系统负荷精准适配的PLC高效自控算法，与机理+AI节能智控平台协同作用，避免了海量参数群控优化对算力的高需求，保障了制冷系统节能控制的安全性和可靠性。

将开发的控制策略与智控系统应用于液态奶生产车间，成功实现了以下效果：

(1) 节能效果显著：在相同的气象与环境温度下，达到相同产量所需的单吨制冷能耗下降16%~40%，平均节能率高达25%；制冷系统负荷峰值降低20%以上，能耗峰值降低15%以上，内外循环冰水流量极值差缩减50%以上。

(2) 温控精度提升：液态奶生产负荷激增或降低时，通过神经网络提前预测流量与负荷变化，及时通过储冷罐平抑冷量需求侧和供给侧的差异，供需失衡率降低30%以上，有效提高了制冷系统供冷温度的精度和稳定性。

(3) 压缩机可靠性明显提高：采用自研的螺杆制冷压缩机负荷精准适配的PLC高效直接自控算法，压缩机故障率明显降低。

2.1.3.4 广东美的高效机房多智能体分布式控制系统与智慧运维云平台

中央空调系统的能耗占公共建筑总能耗的30%~60%，而制冷机房能耗占中央空调系统能耗的60%~90%。制冷机房设备的运行耦合度高、控制调节复杂，蕴含很大的节能潜力，是公共建筑节能降碳的重点。

如图2.1-11所示为高效机房多智能体分布式控制系统，提出了高效机房标准化设计技术路径，能够加快项目设计及落地建设。创建了

全新的多智能体分布式节能控制系统架构，将高效机房控制系统解耦为独立运行的高效一体机模组、高效冷却塔模组及具备自组织协调控制功能的高效机房多智能体指挥官，对比传统机房控制系统具有灵活性高、算法自动适配、鲁棒性强的特点。分布式控制系统结合不同模组自有优化控制算法及多智能体指挥官协调优化控制算法可保证空调系统长期高效稳定运行，保障制冷机房全年平均能效比超过5.0，节能率30%以上。

如图2.1-12所示，为Xbrain云能效智慧运维平台，包含了运行监控、数据分析、能源管理、能效日历、预警分析、故障诊断、优化算法等多种功能。采用基于大数据的无模型自适应方法在云端构建环控系统多维态势诊断模型，对现场设备进行在线诊断。可实时计算分析设备的劣化度曲线，预测故障发展趋势并做阶段性预警和提供预防性维护决策方案，实现环控系统故障检测率提升30%，减少故

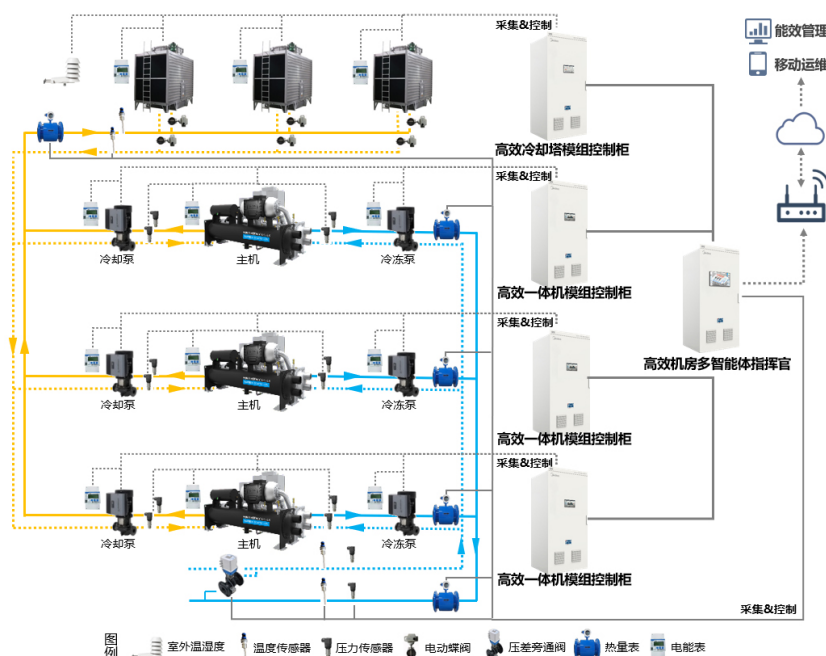


图2.1-11 高效机房多智能体分布式控制系统



图2.1-12 Xbrain云能效智慧运维平台

障维修时间50%以上的效果。

该案例的技术特点有：

(1) 高效机房设计标准化技术路径与多智能体分布式控制系统。高效制冷机房设计标准化包括系统设计标准化、水力平衡方案标准化及设备选型标准化，通过标准化设计方案在降低水系统阻力损失的同时保证设备运行在高效区间。多智能体分布式节能控制系统架构，将系统划分为高效一体机模组、高效冷却塔模组及高效机房多智能体指挥官，通过模组的自组织调度协作实现机房整体的高效优化运行。

(2) 高效机房多智能体分布式控制系统节能控制算法模块。分别针对高效一体机模组与高效冷却塔模组制定了通用化、可拓展的节能控制算法，保证每个多智能体模组可以独立高效运行。针对高效机房多智能体指挥官开发AI协调控制算法，实现冷水机组最优化启停控制、低负荷水蓄冷控制及分集水器阀门动态平衡控制，通过智能调度多智能体模组的运行状态实现高效机房的整体能效最优。基于零代码图形化编程技术封装了高效制冷机房控制算法模块，实现高效机房场景控制系统程序的快速搭建，提高工程实施效率。

(3) 利用云计算、IoT技术开发智慧运维云平台，构建环控系统云能效大数据分析引擎，实现系统及设备态势管理。采用基于大数据的无模型自适应方法在云端构建环控系统多维态势诊断模型，实现对现场设备的AI在线诊断与故障预测。利用数字孪生技术对地铁车站环控系统进行3D建模，将态势诊断结果集成到孪生系统，并通过VR及AR技术向运维人员展示态势信息，提高运维效率。

应用多智能体分布式控制系统及节能控制算法能使制冷机房全年平均能效比超过5.0，节能率30%以上。应用智慧运维云平台可使环控系统故障检测率提升30%，减少故障维修时间50%以上，护航系统全生命周期健康高效运行。多智能体分布式控制系统架构结合云端智慧运维给各应用项目带来了智能高效的控制效果和可观的节能收益，其中天河公园经国家第三方检测机构认证，实现系统节能率42%，制冷机房年均能效达6.3。项目成果已经在广州地

铁“十三五”线路160多个车站推广应用，且已在深圳地铁四期工程、苏州地铁6号线、合肥地铁5号线、佛山地铁3号线等国内其他诸多城市地铁建设中推广，带动了整个行业的技术进步，对加快轨交行业节能减排以及绿色轨道交通建设具有重要指导意义。此外，高效机房多智能体分布式控制系统已在全球各地的楼宇能源优化计划中稳步推进，在全国各地和各行业建立了大量的样板工程，为商业综合体、酒店、工业园区、数据中心、机场航站楼等公共建筑提供解决方案，取得了良好的节能效果。

2.1.3.5 某大型超市制冷系统中EMS集中控制系统^[19]

某大型超市制冷系统中装设有EMS集中控制系统，该控制系统具有较复杂的控制逻辑，可实现多级并联控制，也可有序控制设备的启停。除此之外，在现场冷库管控中，可通过通讯方式读取冷柜等设备的数据，并实现数据的修改和管理。图2.1-13所示为EMS控制系统。

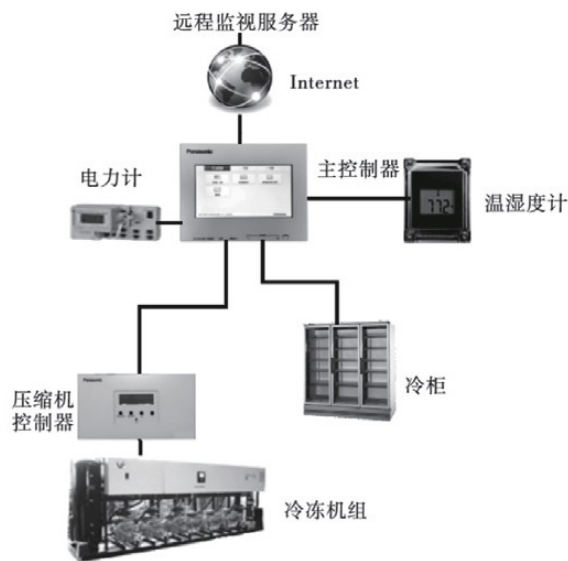


图2.1-13 EMS控制系统

该EMS控制系统主要有以下改造：

(1) 电气控制回路改造。为保证制冷系统的节能运行，需要对电气控制回路进行改造。通常每台压缩机都会配备自己的保护装置，主要有机头温度过高保护、电机过热过载保护及油压差保护等，运行原理是通过设定压力来实现压缩机的闭合和断

开，具体通过对压缩机的压力开关进行控制，一旦压力出现异常升高情况时，压力开关闭合，启动压缩机，直到压力值降至设定值为止。虽然这样的控制方式可保障系统的运行，但因为需要频繁启停压缩机，长时间会使设备使用寿命缩短，也不利于降低能耗，无法实现节能的目的。针对这一情况，现通过中间继电器通断方式将EMS计重控制其切换至控制系统中，以此实现压缩机手/自动控制切换，且具有较高的逻辑数据控制的精确性，进而使得整个系统能够达到节能降耗的目的。

(2) 节能改造。在制冷系统节能改造上，通过增加一个简单的切换回路来降低能耗。这一设置的逻辑为：在原系统中增设节能控制切换系统，一旦切换回路空开闭合后，继电器接收信号产生对应的触发动作，同时跳到控制器回路上，如此可避开高低压力开关控制压缩机和冷凝器回路。之后接着进行节能控制的调整，具体如下：

① 冷冻机低压控制。所谓冷冻机低压控制，主要是指对各冷却设备的运转及冷却能力进行控制，包括冷柜、冷冻箱等，通过冷冻机低压设定值的合理化，能保证这些冷却设备的运转状态和冷却能力更加平衡，进而减少电量的消耗。若低压值设定过高，压缩机启动时间就会越晚，运转频率就会少，虽然能够在一定时间内降低冷冻机的耗电量，但是也会降低其冷却能力，进而容易导致冷柜等冷却设备的运转瘫痪。针对这样的情况，应在冷柜等机器正常运转的状态，将低压设定值设定至当时最合理的设定值，以此减少耗电量，同时考虑外部环境条件等因素的影响，也应对不同环境条件下设定相应的低压值，当外部环境条件有变化时，可迅速将低压设定值切换至最合理的值。

② 温度智能控制。实现制冷系统的节能改造，也需要实现对温度的智能控制，应当根据一定范围时间的温度变化情况，实现对柜温的有效控制，确保其在允许的范围内变动，如若不在允许范围内，则通过控制系统对其温度调整，从而实现节能降耗。

③ 夜间节能控制。所谓夜间节能控制，就是要在超市闭店时通过设定一个高于开店时的温度来实

现节能。

在运用此EMS集中控制系统后，可实现冷却设备的手动和自动切换控制，且根据采集的电量情况显示，该控制系统可降低制冷系统的能耗，且效果较明显，可大幅降低企业耗电费用，也能保障压缩机、冷凝风扇等设备的稳定运行，进而延长设备的使用寿命。

2.1.3.6 中国移动长三角（淮南）数据中心的“智冷”空调控制系统^[20]

以数据驱动的方式，引入制冷系统能耗模型和系统控制参数寻优的AI手段，从系统层面对制冷系统的海量控制参数进行精确寻优，输出能耗最优的控制执行参数设置值。结合安全约束阈值及业务服务等级协议约束条件，由楼宇自控系统自动下发执行，随着温度及IT负载变化动态调优，保证系统处于最优工况。图2.1-14所示为项目总体方案架构。进行关联，作为最后的结果输出。



图2.1-14 “智冷”空调控制系统总体方案架构

“智冷”技术运用自动化手段可以大幅提升特征数据准确性。依托动环监控系统及BA系统的600+数据采集点，实时监测制冷系统运行状态。开展数据过滤、清洗，并分析、提取有效特征参数，从600+采集点降维至70+相关特征参数，大幅降低了建模工作量。

能力特点具体为：

(1) 基于 Arima时间序列预测算法进行未来工况预测。由于制冷系统制冷过程存在天然滞后性，因此采用Arima时间序列预测算法。由待分析时序数据集生成拟合模型，最后做出预测，现场选取3个月IT设备负载功率及环境温湿度历史曲线进行分析，预测未来2h的机房IT设备负载功率、环境温湿度等

数据，以便提前对制冷系统进行工况参数调节，使生产的冷量与末端需求冷量相匹配。经过实际验证，匹配率从原有的72.5%提升至92.8%，应用效果较好。

(2) 基于XGBoost决策树算法构建能耗模型。利用XGBoost决策树算法对制冷系统的整体能耗进行建模，通过对全部参数数据集进行计算，找出各类参数对系统能耗的影响权重，最终得出影响制冷能耗模型的冷水供水温度、冷水泵频率、冷却水泵频率、冷却塔风机频率及冷却塔出水温度等关键控制参数。与基于物理公式对单个设备建模相比，该方法的模型准确率更高。

(3) 基于遗传算法精确寻优控制参数组合。采用遗传算法将能耗模型的最低值设定为寻优目标，对冷水供水温度设置值、冷却塔出水温度设置值、冷水泵频率及冷却水泵频率等关键参数的多种参数组合进行精确寻优，找出最优控制参数组合。

(4) 优化制冷系统控制参数调节流程，实现最优节能运行。制冷系统传统运行模式是基于气候变化、负载变化等，依据人工经验进行控制参数调节，平均每15d调节1次，调节频次低，效果难以保证。嵌入AI“智冷”控制模式后可实现每5min进行1次参数寻优计算，每2h实现1次最优控制参数下发BA系统自动执行，动态匹配温湿度及IT负载变化，保证制冷系统处于最优节能工况。图2.1-15所示为具体模式调参流程对比。

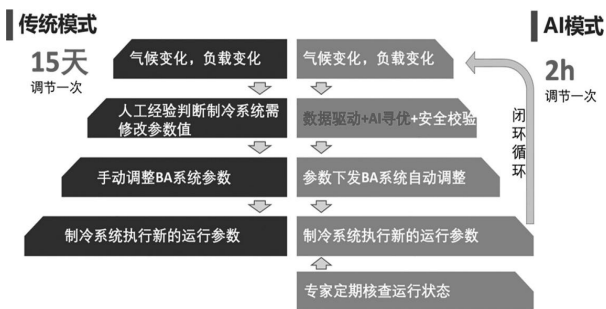


图2.1-15 传统模式及AI模式调参对比

其能力特点为：

(1) 结合AI工况预测进行精准寻优。在满足业务安全约束的前提下，结合工况预测和实时状态参数分析，采用时序预测算法对未来控制周期内各个

空调的运行参数进行精准预测，通过遗传算法计算系统能耗最低的参数组合，保证节能效果最优。

(2) 建立更加精准的系统级寻优模型。与传统的基于物理公式对单个设备建模相比，利用AI技术对空调系统的整体能耗进行建模准确率更高、适用性更广，能够实现系统级整体能耗最低，同时可以直接为不同数据中心的空调系统节能运行赋能。

(3) 嵌入运维流程，实现智能化动态调节。将AI建模和参数寻优嵌入数据中心空调运维流程，通过自动采集、智能预测寻优、自动控制调节，实现由人工月度参数调节到小时级别参数智能自动调优，全程自动化，更加高效、安全，适用范围为数据中心水冷中央空调系统智能调优工作，大型数据中心均可使用。

通过分析这些具体案例，我们可以清晰地看到制冷技术在实际应用中的多样性和创新性。无论是改进传统制冷系统，还是引入先进的控制技术和节能策略，这些案例都展示了制冷技术在不断进步，有效提升能效、降低成本，并在不断的创新中满足了日益增长的市场需求。这些案例的成功实施不仅为制冷行业提供了宝贵的经验，也为未来技术的发展指明了方向。

参考文献

- [1] 张华, 刘业凤. 制冷行业碳中和技术应用与发展趋势[C]//中国制冷学会. “2022年双碳背景下中国制冷技术研究及应用进展论坛”会议论文集. 上海理工大学, 2023:8.
- [2] 张华, 刘妮, 周孟怡. 碳中和目标下的中国制冷行业[C]//中国制冷学会. “2022年双碳背景下中国制冷技术研究及应用进展论坛”会议论文集. 上海理工大学, 2023:6.
- [3] 刘瑞恒. 大型冷库智能控制与监控系统的应用[D]. 兰州理工大学, 2021.
- [4] 赵奇剑, 应雪明, 陈敏霞等. 空调制冷系统的自动化控制与节能策略研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(06):96-98.
- [5] 陈亚丽, 杨伟兵. 制冷与空调设备电气自动控制技术[J]. 中国高新科技, 2023, (10):80-81+96.
- [6] 宋玉明. 自动控制在制冷空调技术中的应用[J]. 电气传动自动化, 2022, 44(01):27-30.
- [7] 苏远, 高宇. 暖通空调制冷系统的优化与控制技术[J]. 现

- 代制造技术与装备, 2023, 59(02):179-181.
- [8] 段鹏斌, 左裕轩, 王旻等.自适应模糊控制在制冷系统中的应用[J].仪器仪表用户, 2023, 30(10):52-55+68.
- [9] 高润淼, 宋孟杰, 高恩元等.冷链装备制冷剂相关温室气体减排研究进展[J].化工学报, 2023, 74(S1):1-7.
- [10] 胡远洋, 江斌.不同制冷剂的循环特性及其分配特性研究[J].制冷技术, 2022, 42(04):54-60.
- [11] Nagarjuna K , Harish S K .Current status of refrigerants used in domestic applications: A review[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189(PB).
- [12] Mojtaba S H , Leyla A , Hakim N , et al.Thermodynamic analysis of high temperature cascade heat pump with R718 (high stage) and six different low-GWP refrigerants (low stage)[J].Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 53103812-.
- [13] 刘义腾, 高一鸣, 刘广彬等.不同制冷剂对气悬浮压缩机电机冷却及系统性能的影响[J].制冷学报, 2023, 44(06):110-117.
- [14] 杨子旭, 崔梦迪, 肖寒松等.适用(亚)热带季风及莽原气候的超高效空调器设计[J].暖通空调, 2022, 52(07):158-164
- [15] 锚定热泵市场, “格力造”亮相2023中国供热展[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1768769298957859547&wfr=spider&for=pc>, 2023-6-15..
- [16] 成都银犁市场屋顶光伏发电并网成功创成都首例[EB/OL].<https://www.kesolar.com/headline/72688.html>, 2016-06-20..
- [17] 澳蓝间接蒸发冷却空调机组AHU以创新助推数据中心绿色发展[EB/OL].<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1777065846375033452&wfr=spider&for=pc>, 2023-9-15.
- [18] 王彦, 王陶, 邹小俊等.基于电机余热回收的电动汽车综合热管理系统分析[J].南京理工大学学报, 2023, 47(03):389-396.
- [19] 徐希爱, 宋明刚, 张晶.大型制冷系统自动控制及节能探讨[J].当代化工研究, 2021, (11):174-175.
- [20] 杨韬, 王虎.数据中心空调系统AI能力的研究与应用[J].暖通空调, 2023, 53(S1):232-233.

2.2 常规形式制冷热泵整机设备

刘金平

(华南理工大学)

2.2.1 家用空调

家用空调机特别是多联机技术不断创新,智能、舒适和节能成为多联机技术的重要发展趋势;新风除湿一体机大量涌现,满足日益提高的建筑新风及湿度控制需求;家用空调器与光伏/储能系统深度融合,打造家庭能源中心,助力实现“双碳”目标;空调室内机与建筑一体化推动风管机发展;制冷剂替代持续推进,影响深远。

家庭用地暖中央空调系统具有地板辐射末端和空调对流散热末端两套系统。夏季制冷时,利用空调对流散热末端向室内提供冷风。冬季供暖时,室外机将产生的高温介质送到地板辐射末端,向室内辐射供暖,达到“头凉足暖”的供热效果,减少了冬季屋内吹风带来的人体不适感,有效改善人体热舒适性。根据对流末端和辐射末端内流通的介质种类,地暖中央空调系统可分为“天水地水”(对流末端与辐射末端均为水循环)系统,以及“天氟地水”(对流末端为氟循环,辐射末端为水循环)系统。与氟循环相比,水循环可减少制冷剂的充灌量和使用量。

2.2.1.1 研究进展

家用空调的普及带来了能耗的快速增长,人工智能技术为家用空调节能减排的推进提供了强有力的工具。家用空调存在众多可能的节能减排路径,而人工智能技术更是种类繁多,目前业界尚未结合这两个方面进行系统化的梳理,邵俊强等^[1]以家用空调节能减排的实现途径为脉络,总结整理各种可用的人工智能技术,并对每种技术进行简要介绍。由于大多数的人工智能技术均离不开数据的支持,最后还介绍了通过联合仿真来高效获取训练数据的方法。

高文琪^[2]针对影响空调制冷工况下的舒适性指标进行了研究,并给出了制冷工况下的部分舒适性指标的试验方法及试验结果。随着生活水平的提高,

人们对家用房间空调器的功能也有了更高的要求,不再仅仅局限于空调最基本的制冷及制热功能,而是对房间空调器的功能提出了新的要求,即舒适性。人体热舒适性是指人体对湿热环境的满意程度,是人体通过自身的热平衡和环境状况综合起来获得的人体舒适程度。

对热泵系统运行策略的合理优化是实现系统长效运行节能的关键,但策略优化过程易受负荷不确定性的影响,从而导致优化的运行策略节能性不如预期。对此,刘澄宁等^[3]提出了一种基于随机负荷预测的运行策略优化方法,采用多重随机过程采样来模拟负荷预测的不确定性,从而提升优化后策略应用时的稳定性和节能性。以某空气源热泵热水系统为对象,对该优化方法的节能性进行了验证和分析。结果显示,随机负荷下的优化策略能减少峰电的意外使用几率,并增加谷电的利用率。在长期运行模拟中,随机负荷下的优化策略与传统的策略优化方法相比,可额外节省约6.4%的运行电费。

根据《北京市民用建筑节能降碳工作方案暨“十四五”时期民用建筑绿色发展规划》,提倡新建建筑采用分户热泵供暖系统。但目前北京地区城市居住建筑中,大部分还是采用市政集中供暖。为有效推动分户热泵供暖系统在北京地区的推广应用,王立国^[4]从初投资、运行费用、碳排放量、使用感受、管理运维、对建筑方案影响等角度对分户热泵供暖系统与市政集中供暖系统进行对比分析。结果表明:初投资跟户型建筑面积相关;分户空气源热泵供暖系统的运行费用及碳排放量更低;分户空气源热泵供暖系统更灵活智能、减少物业运维、对建筑方案更有利但对热泵设备也提出了更高的要求。

宋一平等^[5]选择用带有经济器的空气源热泵机组(简称:热泵机组)系统进行制热工况研究,设计4组实验对其制热性能进行研究。结果表明:在

各实验工况下，主电子膨胀阀存在最佳开度，最佳开度为保证一定过热度范围所对应的最大开度，在最佳开度下，热泵机组最大值热量为额定工况的85.99%、76.58%、57.46%和38.25%，能效分别为2.21、2.08、1.95、1.55。补气电子膨胀阀的开启可以有效提升制热量，但随着补气阀开度的增大，系统能效有所降低，若以能效比作为热泵机组优化运行目标，可能导致制热量不足。此外，补气回液也是影响热泵机组制热量和能效的主要因素，在补气口未回液时，热泵机组制热量分别提高了18.35%、12.14%、25.95%，但补气口回液时，制热量降低了15.22%。

变频空气源热泵用于建筑供暖时，其转速根据热负荷的变化而调节，改变室外盘管表面与空气的温差，进而影响结霜，使其结霜特性与定频空气源热泵有较大差异。为揭示变频空气源热泵因负荷控制方法不同而导致的结霜差异，倪龙等^[6]通过实验建立了变频空气源热泵在严寒地区的结霜图谱，并进一步通过数值模型绘制了实验机组在寒冷地区和夏热冬冷地区供暖运行的结霜图谱，定量研究了热负荷调节对结霜特性的影响。结果表明：变频空气源热泵的结霜临界相对湿度的变化与定频空气源热泵完全相反，其随着室外温度的降低而下降；同一台热泵机组在不同地区供暖时，供暖室外计算温度越低，结霜临界相对湿度越高，同时结霜区域的上下限温度越低；变频空气源热泵机组在哈尔滨、北京和上海供暖时的结霜区域温/湿度范围分别为-26.5~1.0℃/63%~81%、-18.3~3.2℃/59%~72%、-10.1~5.0℃/53%~63%；而当变频机组运行在最高频率后，其结霜表现出与定频机组相同的趋势。

为了研究微通道换热器的性能特性，特灵科技亚太研发中心密洁霞^[7]将微通道换热器替代翅片管式换热器应用于家用热泵型空调器中进行实验对比分析，实验结果表明：保证同样的制冷能力下，微通道换热器空调器的制冷剂充注量减少9%。微通道换热器空调器制冷能力在额定制冷和中温制冷工况下分别增加了1.0%、1.2%；制热能力在额定制热、额定除霜和低温制热工况下增加了1.9%、2.9%、2.5%。微通道换热器空调器在结霜/除霜周期内性能系数

(COP)增加了8.6%；除霜周期比翅片管式换热器缩短了28 min，表明微通道换热器空调器除霜更频繁。

2.2.1.2 优秀产品

(1) 基于人工智能算法的节能舒适空调（格力·星宇）

珠海格力电器股份有限公司开发了基于人工智能算法的节能舒适空调（格力·星宇），该产品利用空调系统关键部件的数值仿真和BP自适应拟合技术，搭建了全工况因子拟合仿真模型，获取空调在全工况的运行数据，并进行空调最佳性能点寻优控制。建立了基于温降速度、温控准确性、运行稳定性的温控适应度函数，获得最佳目标温控曲线，开发了动态温差自适应控制系统，实现空调快速控温，避免过度调节。该产品搭载了“格力自研的AI芯片”，开发了将NPU单元进行并联和级联的架构，设计了AI编译器，实现了AI算法的高效运行，减少了系统带宽，提高了计算能效比，缓解了推理运算时遇到的存储瓶颈问题，经实验室测试8h制冷节能率高达23%。

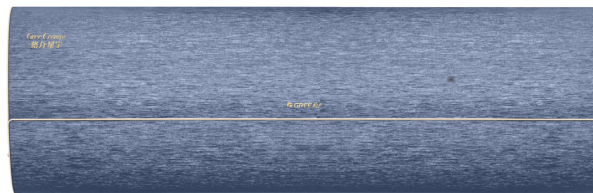


图2.2-1人工智能算法的节能舒适空调（格力·星宇）

(2) 格力家庭地暖空调两联供系统





(a) 静享“天氟地水”地暖空调系统



(b) 润享“天水地水”地暖空调系统

图2.2-2 格力地暖中央空调系统

格力家庭地暖空调两联供系统，目前已推出静享“天氟地水”、润享“天水地水”系列产品。系列产品均配有变频变容、智能物联、三管制除湿不降温等技术，可根据用户需求和安装场景，提供个性化定制方案。

(3) 松下集团的“天氟地水”地暖中央空调

松下集团推出的“天氟地水”地暖中央空调，与其他地暖中央空调相比，该地暖中央空调多模式智能化供能方案中，专门针对冬季低温时屋内快速升温所设计出了“冬季地暖+中央空调连供模式”，冬季供暖时同时开启对流和辐射两种末端。在该模

式运行下，热流体首先进入对流末端使房间快速升温，待达到适宜温度后由地暖辐射末端维持室内温度，采用温度自调节技术，提供更宜居的热湿环境。其中针对北方供暖所研发的地暖中央空调系统能在 -35°C 低温下运行，增强了该类系统的适用范围，提高了供暖稳定性。



图2.2-3 松下“天氟地水”地暖中央空调

2.2.2 工商用制冷空调及热泵机组

工商业用中央空调冷（热）水机组的发展趋势有以下特点：（1）磁悬浮技术日趋成熟，成为工商业冷（热）水机组企业技术实力的标志，宽范围负载率高效、新冷媒是各厂家的重要展示技术点；（2）气悬浮技术实现了静压气悬浮技术的突破，“先浮后转”的技术特征使机组真正实现了全运行过程无摩擦；（3）在制冷剂替代迫在眉睫、节能减排呼声高涨的形势下，以R1233zd(E)、R1234ze为代表的新型冷媒被各厂家所推崇，成为工商业冷（热）水机组厂家新的角逐点；（4）为适应工业生产领域、居民供暖领域的需求，中高温热泵机组大放异彩；（5）适应特殊领域需求的特色高效产品突出，体现了企业对市场需求的敏锐洞察力；（6）控制技术精细化成为制造企业提升机组能效的重要手段，远程控制数字智能化逐渐成为企业提升服务能力与市场竞争力的新途径。

2.2.2.1 研究进展

当前中国能源结构仍以煤炭为主，替代难度

大，非化石能源发展面临多重制约，产业的高耗能、高排放、低能效问题并存，绿色低碳技术亟需加强的现状。工业过程供热占据能源消耗的50%，因此实现工业过程供热的低碳化是实现碳中和的重要部分。为达到工业过程供热所需的体量和温度，高温/蒸汽热泵需要深入研究和广泛推广。胡斌等^[8]从国内外工业热泵技术现状，分析目前工业热泵通常采用的系统循环型式、制冷剂压缩技术、水蒸气压缩技术；结合第四代低GWP值制冷剂发展现状，给出环保工业热泵的适用制冷剂；提出工业热泵技术发展展望，最后结合双碳目标的实现和工业锅炉替代市场分析，展开了工业热泵应用场景的拓展分析。

刘义腾等^[9]建立了气悬浮离心制冷压缩机的数学模型，分析了不同制冷剂（R134a、R1234yf、R1234ze(E)）对电机冷却过程和制冷系统性能的影响。研究结果表明：采用R1234ze(E)时电机内部温度最高，电机永磁体最高温度比采用R134a和R1234yf时高60~90℃；采用3种制冷剂时电机的绕组平均温度均随冷却入口温度的升高而降低；采用R134a和R1234yf时永磁体最高温度均随冷却入口温度的升高而降低，采用R1234ze(E)的永磁体最高温度随冷却入口温度的升高先增后降，在冷却入口温度约为25℃时最高。冷却入口温度每上升4.5℃，电机冷却回路的出口干度下降约3%~5%。带电机冷却支路的系统与传统系统相比，电机温度可以控制在更安全的运行范围之内，但采用R134a、R1234yf、R1234ze(E)的系统COP分别降低1.23%~1.82%、1.23%~1.65%、1.14%~1.17%。

针对两级压缩技术在中小容量冷水机组中较少应用的现状，珠海格力电器股份有限公司联合西安交通大学开发了名义制冷量为615.48kW的两级压缩水冷螺杆式冷水机组^[10]，采用新型转子型线和结构设计研制了两级变频螺杆制冷压缩机，并依据国家标准对开发的压缩机和冷水机组进行实验测试。结果表明：研发的两级变频螺杆制冷压缩机容积效率普遍高于96%，等熵效率最高达84.4%；冷水机组在出水温度为7℃的名义工况下COP达7.01，相比标准GB 19577—2015规定的一级能效水平高16.83%，部分负荷综合性能系数（IPLV）达到10.45，相比标准

GB 19577—2015规定的一级能效水平高39.33%。两级压缩技术能够有效提升水冷螺杆式冷水机组的性能，与无中间冷却相比，中间冷却后冷水机组制冷量和COP分别提升11%和8%以上。

重庆通用工业（集团）有限责任公司对离心式冷水机组用高效传热管进行了单管强化传热试验研究^[11]。结果表明：蒸发管的管外传热系数相比管内传热系数对综合传热性能的影响更大；通过综合传热性能的优化，在相同条件下机组设计的换热管总面积会得到有效降低，预计在机组整体成本方面可降低约8%。

为提高冷水机组的部分负荷性能，满足用户的节能改造要求，荏原冷系统（中国）有限公司对定频螺杆式冷水机组进行变频改造及相关试验研究^[12]。结果表明，定频螺杆式冷水机组变频改造后的IPLV提高22%。最后对变频改造带来的运行电流、控制逻辑、运行范围、谐波、共振等问题给出相应解决方案。

2.2.2.2 优秀产品

（1）高效节能变频基站空调

针对通讯基站设备24h不间断工作、持续产热的高显热比、低除湿量的负荷需求，珠海格力电器股份有限公司开发了高效节能变频基站空调，该产品协调控制压缩机频率、风机转速、蒸发器温度等多个耦合参数，制冷显热比提升至0.995，开发了全工况低除湿制冷控制技术，减少了过度除湿产生的能源浪费。优化了风叶直径、叶形及双风叶间距，开发了双轴流高风量低压损新技术，提升了基站空调柜机送风量和送风距离，可使机房环境快速降温；发明了参数自适应寻优控制技术，提升了低速运行效率，3P机型SEER可达7.68；APF高达5.70。与原定频空调的实际运行相比，耗电量可降低18.2%。



图2.2-4 高效节能变频基站空调

(2) 永磁同步变频螺杆式冷水机组

针对地铁空调系统冷负荷变化大、机组大部分时间处于部分负荷运行且负荷与冷却水温变化不同步的特点。珠海格力电器股份有限公司开发了永磁同步变频螺杆式冷水机组，该产品转速调节制冷能力、滑阀调节压比，制冷能力与压比解耦独立可调，全工况自适应调节。实现了压缩机内外压比相匹配，提升了机组运行效率。换热器水路采用了串联双系统流路设计，进一步提高了主机能效。两器异侧接管设计，降低了水阻。发明了基于凸级效应的高启动转矩峰值永磁同步电机，采用新型无位置传感器控制技术，实现了位置高精度辨识与转速快速跟踪，解决了满载启动难题。该产品名义制冷性能系数COP为7.08，IPLV为9.40。

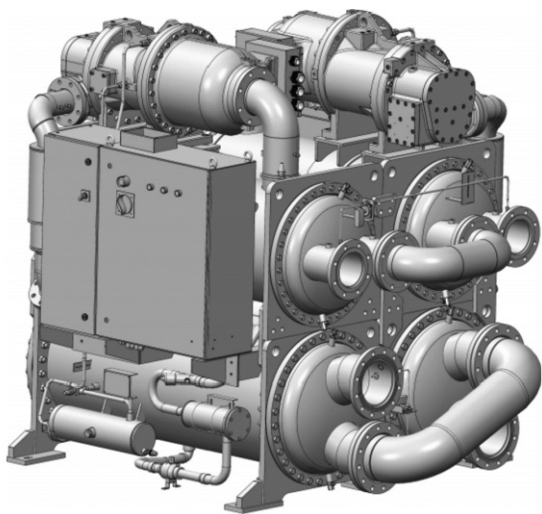


图2.2-5 永磁同步变频螺杆式冷水机组

(3) 高效磁悬浮变频离心式冰蓄冷双工况机组

重庆美的通用制冷设备有限公司开发了高效磁悬浮变频离心式冰蓄冷双工况机组，该离心压缩机采用宽范围自学习防喘振控制技术，提高了喘振面预测值精度，拓宽了机组运行范围。应用多工况气动优化设计技术、基于高漏抗低谐波定子绕组的永磁同步电机技术和基于能量平衡法的自适应补气增焓控制技术，提升了复杂工况的能效。研发了长寿命备降轴承及转子系统技术；发明了高精度多自由度过载抑制磁悬浮控制技术，实现高压比连续喘振稳定悬浮无故障；开发了运行参数主成分分析的磁悬浮压缩机故障预警技术，准确故障预警。实现了

机组在空调和冰蓄冷工况双高效，在 -5.6°C 蓄冰工况下COP为4.66，在GB/T 18430.1空调工况下COP为7.03，节能效果显著。



图2.2-6 高效磁悬浮变频离心式冰蓄冷双工况机组

(4) HD-宽温域离散余热相变提质离心机组

随着降碳减排工作的持续深入推进，国内钢铁、化工、造纸等工业领域高温和中温余热资源得到有效利用，但低温余热资源回收尚不普及，低品位余热资源的回收利用已经成为提效降碳的一个难点和痛点。对各种工业场合而言，能源消耗规模大、能源整体利用率低，同时也是余热资源回收的主体。推广使用热泵技术，提供高品位热能是低温余热利用的有效途径。

针对偏远离散类低品位余热资源，进行梯级的提质应用，如钢铁、石油、化工、电力、煤化工、制药、乳品等行业余热资源的回收利用，提高综合运行能效；工业园区蒸汽及热水供应，替代燃煤燃气锅炉。冰轮环境技术股份有限公司开发了专用离心压缩机，通过热力计算、气动设计、叶轮设计、流场分析、轴承设计、组合同隙等方面的专业设计，确保高温离心压缩机的高效率及高可靠性，突破了现有离心压缩机的上限应用温度。

在此基础上，创新设计了微重力高效蒸汽发生分离一体器，采用专用高效换热管，实现了微重力流管内高效换热、管外高效冷凝的综合换热效率提升，并将水蒸气发生、气液分离功能集成，高温水循环泵及水侧节流装置的取消精简了热泵机组整体流程，使机组更加简洁高效。

该产品在离心压缩机设计、换热器设计、机组智能控制工质分布三个方面高效协作。单机制热量

大，运转效率高，体积小，在工业余热回收方面有显著优势。



图2.2-7 HD-宽温域离散余热相变提质离心机组

(5) 应用静压气悬浮的离心式冷水机组

静压气悬浮技术利用压力产生浮力的简单原理实现转子悬浮及自调节。不同于动压气悬浮的“先转后浮”，静压气悬浮技术实现了“先浮后转”，消除了机组启停过程中的摩擦问题，实现了机组运行全过程无摩擦。



图2.2-8 海尔静压气悬浮离心式冷水机组

海尔开发了应用静压气悬浮的离心式冷水机组，该静压气悬浮轴承是利用制冷剂通过碳基复合材料所形成的微纳尺度气孔节流所形成气膜的静压作用。采用冷凝器/蒸发器双位置制冷剂取液、双齿轮泵供液及高精度液位控制保障供液，采用电热稳压及蒸发器泄压实现气体轴承的稳定供气压力。此外，机组还针对离心机组的喘振难题，研发了智能喘振检测方法和喘振自学习功能，使离心式冷水机组检测喘振更准确，运行可靠性更高。海尔气悬浮离心式冷水机组以350RT为主，已形成50-750RT系

列化产品，COP、IPLV达到双一级能效。

(6) MDV8 无界多联机

多联机产品不断创新，在追求性能提升的基础上，进一步向智能化、健康化、舒适化和多功能化发展。美的开发了MDV8 无界多联机，该款多联机具有以下特点：①采用IP55 级别全密闭电控防护设计，可防止风沙、雨雪、蚊虫、入侵电控元器件；②采用智能电控热管理系统，使用制冷剂冷板直冷技术，实现对腔体内部温度精细化管控，大幅扩大多联机使用地域限制，且保证产品稳定性。③使用了宽电压通信技术（0-36 V 代替0-5 V），实现了无屏蔽线超强抗干扰通讯，节省安装成本30%以上，实现了室内机掉电情况下的状态回正，解决了多联机组室内外机组分区能源管理的行业痛点。④采用多联智能算法融合技术，实时监测多联机组脏堵状况、冷媒不足等故障，实现准确故障预诊断。⑤侧出风设计提供同层布置新选择，可选外机采用侧向或上侧排风，多联机外机可在层间布置，安装灵活，且外机静压可维持80 Pa，即使围护结构有格栅设计也可保证良好的排风散热。

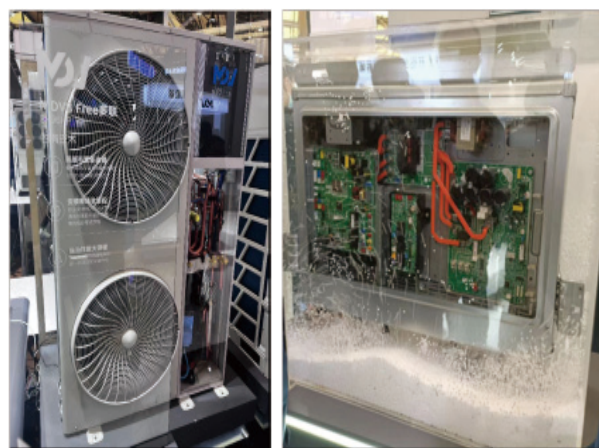


图2.2-9 美的MDV8 无界多联机

2.2.3 空气处理机组

空气处理机组产品性能持续升级迭代，推出提升室内空气品质和环境舒适度的产品；其次，为响应国家的双碳政策，厂商在节能增效方面进行技术升级，采用热回收、高效电机、智慧算法等先进技术，以实现更低的能源消耗、更为紧凑的集成化结构。

2.2.3.1 研究进展

喻颖睿等^[13]针对制药行业干燥废气处理不完全、异味大、余热无法回收等问题，设计了一种由热管、水盘管、热泵等组成的废气零排放热泵系统。通过闭式除湿、废气处理和加热升温，保证了气体的循环再利用质量，从而实现近零排放和余热回收。系统性能实验研究结果显示：在平均送风温度为65.1℃，相对湿度为21.1%和风量为12 000 m³/h的条件下，该系统的热泵机组性能系数（COP）为4.7，系统单位功耗除湿量（SMER）为8.5 g/(kW·h)。对循环气体成分分析显示，热泵机组对废气中挥发性有机物（VOCs）的吸收率为73.2%，且在一个生产周期内系统内不存在不凝性易燃易爆气体的累积。

冷冻水系统大温差设计对空调系统节能具有重要意义。配套使用空气处理机组也需采用大温差设计，达到节能效果。徐艳妮等^[14]在空气处理机组换热机理的理论基础上，分析了冷冻水大温差对空气处理设备换热性能的影响。通过优化表冷器管形、回路等方法，采用焓差法实验对比了大温差工况下不同管形、不同回路、不同翅片片距等对表冷器性能的影响，在相同换热截面下，大温差空气处理机组较常规机组能耗降低约20%，并在此基础上，提出了大温差表冷器优选结构方案，采用高效内齿形换热管，4排高效换热管可与6排光管表冷器达到相同冷风比，且整机能耗低约5%，为大温差设计的应用和实践提供借鉴和参考。

溶液除湿空调可以实现温湿度独立控制，具有避免再热、高能效、送风洁净度高等优势。溶液除湿空调在工业场景中应用节能效果显著。刘晓华等^[15]实测了溶液除湿空调系统在某锂电池生产厂房中应用的运行效果。结果表明：夏季工况下，当送风含湿量为5.3~5.8 g/(kg干空气)时，系统的COP可以达到3.1~3.3；相较于转轮除湿空调系统的升温除湿过程，溶液除湿空调系统可以实现降温除湿，除湿后无需再次对空气进行冷却；溶液除湿空调系统的再生温度显著低于转轮除湿空调系统，运行费用比转轮除湿空调系统低41.8%~44.7%。

2.2.3.2 优秀产品

(1) 开思拓重力柜无风感冷暖末端

昆山开思拓空调技术有限公司开发了重力柜无风感冷暖末端，重力循环柜是辐射毛细管的另一种应用，它是将5排毛细管安装在一个金属柜体中，柜体上下开有送回风口。依靠辐射和自然对流进行供冷和供暖。夏季，毛细管内走冷水，冷水下进上出，冷风下出上回，冬季正好相反。重力循环柜依靠自然通风，夏季下出上回，属于置换通风。毛细管正下方放置冷凝水盘盛接冷凝水。其作用原理是毛细管内通入冷水（7℃），柜体上下分别置有进风口出风口，通过空气密度差和自然对流原理，毛细管内的冷水将热空气冷却，冷空气经过压差从下方出风口送出，不含风机，没有噪声。冷凝水自由顺毛细管壁滑落，滴入毛细管正下方冷凝水盘中，利用自然结露的原理带走室内的潜热负荷。无风机噪声，运行能耗低，且避免了空气强制对流的吹风不适感。



(a) 开思拓重力柜

(b) 重力柜原理

图2.2-10 开思拓重力柜无风感冷暖末端

(2) 欧风系列新风换气机

北京环都拓普空调有限公司针对欧洲地区的使用习惯及地理特点开发了欧风系列新风换气机，风量范围涵盖150-2000CMH，具有通风换气、热回收节能、噪声低、送风距离远、智能控制等特征。新风换气机具有独特的内部结构，EPS一体式风道结构，密封性好，噪声低，兼具良好的保温性能，机器外部不再使用保温棉，更加美观。机器结构独特，两个风机居中放置，10档风量调节，出风均

匀，换热更充分。外壳采用咬合封边工艺，提升了壳体强度，封边处不漏风，提升了送风效率。热交换器采用环都第五代换热纸，热交换效率更高，减少了空调能耗。树脂框架集成过滤器滑道简洁美观。

新风机采用直流塑封结构电机，具有体积小、重量轻、震动小、功耗低、绝缘性好等特点。环都拓普智能控制系统将多个传感器联动起来，实现4种模式调节、12项基本功能、4项高级功能和5项预设功能。智能控制满足用户操作方便、按需定制、云端控制的使用需求。



图2.2-11 欧风系列新风换气机

(3) HYplus四重滤杀·臻洁净净化产品

南京天加环境科技有限公司开发了HYplus四重滤杀·臻洁净净化产品。该产品介质过滤采用美国赫氏摩擦静电棉，低阻力、高容尘量、高净化效率以及超长静电保持；采用化学除甲醛技术，精准高效去除甲醛污染，无二次释放风险；采用银离子杀菌涂层，集中灭活拦截下来的细菌病毒，灭活的同时有效抑制二次污染；室内换热器，水盘等区域易滋生细菌处采用紫外光（UVC）持续照射，有效防止微生物污染。自适应寻优算法：减少状态波动带来的能量浪费，真正做到全生命期高效，全溯源智控。

在去除微生物与颗粒物方面采用介质型过滤器的净化方式，在同等循环条件下污染物的净化更全面、效率更高。四重滤杀型净化产品整体采用介质过滤+化学过滤+紫外灯灭活的组合式净化方式，在30m³的空间内整机循环净化效率远超市场同类产品，PM2.5循环净化效率99.9%，15min；微生物循环效率99.4%，30min；甲醛循环净化效率90%，30min。



图2.2-12 HYplus四重滤杀·臻洁净净化产品

(4) 天加新排风热回收组合式空气处理机组

天加开发了新排风热回收组合式空气处理机组，与传统的电加热再热相比能耗节省10%，排风再利用热回收率高达75%。采用微模块组合，在狭小的机房也能方便安装，且维修方便（图2.2-13）。



图2.2-13 天加新排风热回收组合式空气处理机组

(5) 约克YJFC 高效净化型风机盘管

为推出提升室内空气品质和环境舒适度的产品，约克开发了高效净化型风机盘管，自带的微静电过滤器，可高效去除PM2.5和微生物（包括空气中自然菌和病毒），空气自然菌去除率为93.5%（图2.2-14）。

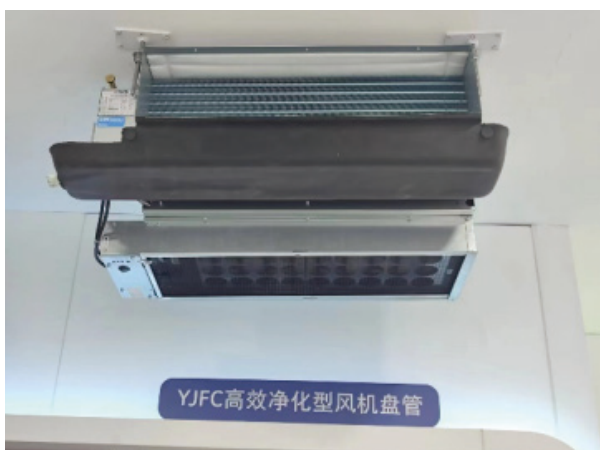


图2.2-14 约克YJFC 高效净化型风机盘管

(6) 克莱门特“逸风”厨房专用风机盘管

克莱门特推出厨房专用的风机盘管，搭载特殊油烟过滤器，可以高效防油烟（图2.2-15）。超大风量，定点送风，送风范围广，可以实现厨房快速降温。



图2.2-15 克莱门特“逸风”厨房专用风机盘管

参考文献

[1] 邵俊强, 郑雨霖, 车铭江, 等. 人工智能技术在家用空调节能减排领域的应用 [J]. 制冷学报, 2023, 44 (3): 14-28, 40.

[2] 高文琪. 家用空调制冷舒适性指标研究 [J]. 家用电器, 2023(7): 42-43.

[3] 刘澄宁, 梁星宇, 邵亮亮, 等. 基于随机负荷预测的热泵热水系统节能运行策略优化 [J]. 制冷学报, 2023, 44 (6): 36-42.

[4] 王立国. 北京地区分户空气源热泵供暖与市政集中供暖对比分析 [J]. 住宅产业, 2023(12): 55-57, 61.

[5] 宋一平, 常蹇, 李达君, 等. 带有经济器空气源热泵在超低温环境下制热运行实验研究 [J/OL]. 制冷学报, 1-7[2024-02-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2182.tb.20231128.1042.002.html>.

[6] 倪龙, 林木森, 魏文哲, 等. 变频空气源热泵供暖结霜图谱 [J]. 暖通空调, 2023, 53 (8): 131-137.

[7] 密洁霞. 微通道换热器在热泵型空调中的应用分析 [J]. 制冷技术, 2023, 43 (3): 66-69.

[8] 胡斌, 姜佳彤, 吴迪, 等. 工业高温热泵发展现状与展望 [J]. 制冷学报, 2023, 44 (6): 1-12.

[9] 刘义腾, 高一鸣, 刘广彬, 等. 不同制冷剂对气悬浮压缩机电机冷却及系统性能的影响 [J]. 制冷学报, 2023, 44 (6): 110-117.

[10] 张治平, 王鹏, 王闯, 等. 超高效两级压缩水冷螺杆式冷水机组开发 [J]. 制冷学报, 2023, 44 (3): 81-86.

[11] 李仕黛, 谭江峰, 夏龙平. 冷水机组用高效换热管传热及阻力特性试验研究 [J]. 化工机械, 2022, 49 (6): 869-873.

[12] 张腾, 帅成光. 定频螺杆式冷水机组的变频改造及试验研究 [J]. 制冷与空调, 2022, 22 (10): 82-85.

[13] 喻颖睿, 魏娟, 李伟钊, 等. 制药行业干燥过程废气零排放热泵系统性能实验研究 [J]. 制冷学报, 2023, 44 (1): 43-49.

[14] 徐艳妮, 卓明胜, 张龙爱, 等. 大温差空气处理机组表冷器换热能力优化设计及实验验证 [J]. 制冷学报, 2021, 42 (06): 65-70.

[15] 关博文, 张勤灵, 张涛, 等. 溶液除湿式空气处理机组在锂电池生产厂房中的应用 [J]. 暖通空调, 2022, 52 (03): 100-104, 161.

2.3 关键零部件

邢子文¹ 刘金平²

(1. 西安交通大学; 2. 华南理工大学)

2.3.1 压缩机

制冷空调行业作为国家能源消耗的主要行业之一, 约占全社会用电总量的15%^[1]。其中, 制冷空调行业以蒸汽压缩式系统为主, 而压缩机作为蒸汽压缩制冷循环中能耗占比高、结构复杂、技术含量高、开发和制造难度大的关键产品, 成为本行业的重点研究对象。截止2023年, 本行业研究人员多方位优化制冷压缩机, 突破国际技术壁垒, 显著提高了制冷空调行业的能效水平。

2.3.1.1 关键研究和技术进展

如前所述, 压缩机对制冷空调行业节能减排意义重大。因此, 为响应“双碳”政策, 大量研究人员及公司骨干积极投身于压缩机研发。2023年, 制冷压缩机在天然制冷剂应用、压缩机能效水平提升、容量和工况调节范围扩大、高速轻量化设计等方面取得了重大研究和技术进展。

1) 天然制冷剂应用

目前我国制冷空调行业制冷剂多以R134a、R410A、R32、R407C等氢氟烃类HFCs为主, 此类制冷剂含氢不含氯, 虽对臭氧层无破坏, 但有着较大的全球变暖潜值GWP^[2]。因此, 在基加利修正案生效的背景下, 我国制冷剂正加速向R290、R600a、CO₂、水等天然制冷剂方向切换。

然而, R290等部分天然制冷剂易燃易爆, 因此在保证安全性可靠性的前提下, 扩大其应用范围成为业内研究重点之一^[3]。冰山松洋开发了应用于热泵热水领域的内部高压直流变频补气R290涡旋压缩机, 采用具有支撑径向卸载、非对称延展角涡旋盘的喷气增焓、压力差卸载等结构, 有效提高压缩机可靠性, 并扩大运转范围, 最大冷凝温度从65℃提高到86℃, 运转范围覆盖R410A热泵压缩机运转范围。美的从降低压缩机的制冷剂驻留量、提高压缩机的容积效率、提高压缩机的机械效率的维度提出三大创新技术, 实现R290转子压缩机的单体高效化

和制冷剂驻留的减量化, 从而实现充注量限制下的单体能效突破。

此外, CO₂天然制冷剂虽绿色环保且无爆炸等安全隐患, 但其性能较差, 应用范围受限^[4]。因此, 提高CO₂天然制冷剂能效水平成为研究及应用重点。海立针对CO₂热泵热水器开发了一款高效、低噪、直流变频CO₂压缩机, 成为国内首家实现热泵热水器用CO₂直流变频压缩机销售的厂家, 于2023年获得“国际先进”水平鉴定。

水制冷剂具有绿色环保、原料易得、安全性好、汽化潜热大等诸多优势, 但也具有压比高、体积流量大、单位容积制冷量小、排气温度高等缺点, 因此提高水蒸气压缩机性能成为研究重点^[5]。七一一研究所研发了“大流量带压蒸汽螺杆热泵装置”, 采用注过热蒸汽+氮气隔离和抽凝的轴封结构, 提高了高温下机组运行的可靠性; 搭建国内首个10MW高温热泵试验平台, 完成大流量热泵的全工况测试, 填补国内空白, 总体技术达到国际先进水平。

2) 压缩机能效水平提升

压缩机运行过程中消耗能源而产生的碳排放, 远大于其制造过程等环节产生的碳排放。因此, 在尽量减少原材料使用、取消或减少制造过程的化石燃料使用等前提下, 制冷空调行业的重点任务是持续提高各种压缩机的能效水平^[6]。2023年, 制冷压缩机在结构优化、变频电机驱动、数智化控制等多方面提高能效, 助力制冷空调行业节能减排。

制冷压缩机结构直接影响其运行性能, 目前业内人员多方位优化各类压缩机结构, 大幅提高了制冷压缩机能效水平^[7]。凌达研发的新国标超高效低振动2P变频压缩机, 对变频M系列泵体进行Ⅱ代升级, 开发的FTz-SM151AXBD压缩机单体低频COP较基础机型提升1.6%, 综合能效APF提升0.64%。美芝研发的14kW环保高效变频涡旋压缩机, 内部结构进行泄漏间隙的优化、机械部接触摩擦的不可逆损失

研究，综合实现压缩机单体效率的大幅提升，确保压缩机搭载客户系统能效实际体现。

电机效率的提高意味着压缩机电效率和总体效率的提高，有益于实现制冷压缩机高能效水平^[8]。2023年，多家公司深耕电机效率研究，突破诸多关键性技术难题。万宝针对非晶材料冲压和装配的技术难题，进行“非晶电动机及高效变频压缩机关键技术研究及应用”，研发了多层黏接技术、复合夹层结构，在行业首次实现了非晶电动机的批量生产，大大提高电动机效率，达到国际领先水平。美的从全分瓣式定子、磁轴相移转子和压缩机低湍流平衡块三个方面展开深入研究、创新，大大提升整机的功率密度与能效水平，同时具有高效制造、高可靠性的优点，实现高功率密度永磁电机及压缩机。

制冷压缩机实际运行过程中，常见的供需不平衡现象会导致设备能耗过大或供冷能力不足，因此对设备进行数智化控制至关重要^[9]。格力对大数据驱动热泵地暖动态建模，建立云边协同的热泵地暖预测控制系统，对建筑地板蓄热进行合理规划，实现热泵地暖系统的品能适配与高效节能。此外，格力研发基于能效寻优的自适应化霜技术，解决结霜期间热泵机组热量与能效衰减大的问题，结霜期间的热泵运行能效得到显著提升。

3) 容量和工况调节范围扩大

容量和工况调节范围扩大，不仅有利于制冷装置制冷量与外界热负荷平衡，提高制冷压缩机运行经济性，还有利于适应不同工况运行要求，减小蒸发温度及被冷却物温度波动或提高产品热舒适性，减少压缩机启停次数从而延长压缩机使用寿命。

制冷压缩机容量调节主要有吸气节流调节、变速调节、内置容量调节滑块等方法，研究人员优化各类方法，扩大了容量调节范围^[10]。雪人研发的SRS-2016LS氨用半封闭单机双级螺杆压缩机采用变频+滑阀无级容量调节，通过变频调节冷量，通过滑阀调节内容积比，实现了冷量和内容积比的相互独立调节，能精准高效地实时匹配制冷系统的运行工况和负荷，特别适合于负荷与工况变化范围要求很高的应用场合。

制冷压缩机分为活塞压缩机、转子压缩机、涡旋压缩机、螺杆压缩机、离心压缩机，由于结构限制，每类压缩机均有各自应用范围。因此，突破每类制冷压缩机的应用范围，从而扩大其调节范围以适应宽工况运行需求，成为制冷压缩机研究的重点^[11]。艾默生针对超高温工业制热应用场景开发的谷轮120℃超高温涡旋压缩机，可将压缩机最高冷凝温度提升至135℃，能够满足包含高温热风、热水和蒸汽在内的多种100℃以上的多种工业应用领域需求。丹佛斯研发的DSG240-DSG480涡旋压缩机，优化涡旋型线及制冷剂流道，大范围拓展低温运行及应用范围，同时配备中间排气阀及防自转轨道环系统（ORD），具有高能效、低噪声、高可靠性等优点。

4) 高速轻量化设计

小型轻量化、超高转速可实现压缩机材料使用的减少，可显著降低压缩机制造过程中的碳排放^[12]。因此，高速轻量化设计成为业内另一研究重点，并于2023年取得诸多关键性技术突破。

2023年，多家公司创新性研发出多种先进技术，实现制冷压缩机高速轻量化。冰轮环境研发的永磁变频氨半封螺杆热泵压缩机，将永磁变频电机与压缩机集成后，电机磁路简单，减少了绕组端部、转子端环等结构，进一步优化电机腔体，压缩机整体尺寸有效缩减。美的研发的“绿色高品质薄型化永磁电机”针对传统永磁电机体积庞大、材料用量多、成本较高的问题，利用磁场调制效应提高功率密度的电机技术，并结合新型模块化铁芯技术，实现永磁电机系统的薄型轻量化，获得2023年“国际领先”鉴定。新世界研发的水蒸气螺杆压缩机将压缩机的密封气系统与机组中气动阀的气源系统合二为一，共用一套压缩空气系统，在分支管路上采用调压阀，将压缩空气的压力调降到各自适合的压力，简化机组系统结构，实现机组小型化。

2.3.1.2 优秀产品介绍

2023年，多家公司研发出优秀的高效压缩机产品，大大提高了制冷行业能效水平，本文介绍活塞压缩机、转子压缩机、涡旋压缩机、螺杆压缩机和离心压缩机的优秀案例各一项。

1) 新型碳氢混合工质超低温活塞压缩机

广州万宝集团有限公司针对超低温冰箱冷柜市场需求，主导研发了一款新型碳氢混合工质超低温压缩机，在工质成分选择和配比优化、专用冷冻润滑油研发、润滑结构优化及系统降噪等方面进行了深入研究，研发出适用于单级蒸汽压缩低温和超低温系统的压缩机，制冷温度可达 $-86 \sim -40^{\circ}\text{C}$ ，具有结构简单、环保、低噪、高可靠性等优点^[13]。



图2.3-1 广州万宝集团有限公司新型碳氢混合工质超低温压缩机

2) 小型高速大冷量变频转子式压缩机

上海海立股份有限公司自主研发的小型高速大冷量变频转子式压缩机，采用八极电机新结构，实现大功率电机高效小型化；研发全域气流脉动抑制技术，降低压缩机压力脉动；应用激光焊接技术，保证压缩机全频段低噪声运行；开发了重载油膜压力均衡技术和快速自回油润滑技术，保证压缩机全转速范围内可靠稳定运行。该产品集高效小型化、低振动低噪声、高可靠性等优点于一体，目前已被多家主流调整机企业应用并得到市场的良好反馈^[14]。



图2.3-2 上海海立股份有限公司小型高速大冷量变频转子式压缩机

3) R32 制冷剂大容量变频涡旋压缩机

广州万宝集团有限公司创新研发了一款R32制冷剂大容量变频涡旋压缩机，应用涡旋中心偏置、涡旋始末端修正等关键技术，排量达到 $150\text{cm}^3/\text{rev}$ ，突破变频容量限制；采用立体动态的供油方式及全新涡旋型线修正技术，实现高运行范围及高可靠性；开发变容比结构和低离心阻力涡旋盘，加上减少流体阻力的排气止



图2.3-3 广州万宝集团有限公司R32 制冷剂大容量变频涡旋压缩机

回阀结构和吸气口结构，极大提高压缩机能效。本产品可实现18.9高压比的超低温制热和 -45°C 低蒸发温度的使用需求，制热综合性能系数 IPLV(H) 可达3.3以上，高于一级能效要求^[15]。

4) 半封闭永磁同步变频螺杆式压缩机

珠海格力电器股份有限公司设计开发了一款120~600RT的半封闭永磁同步变频螺杆式压缩机，创新性开发出完全自由曲线高效GRZ转子型线，较SRM-D标准型线，接触线缩短12%，泄漏三角形减小7%。采用高效变频变容控制技术，名义COP较一级能效提升12.38%，综合部分负荷性能系数IPLV较一级能效提升16.05%，有效解决了低转速性能衰减难题^[16]。



图2.3-4 珠海格力电器股份有限公司半封闭永磁同步变频螺杆式压缩机

5) 磁悬浮离心制冷压缩机

天津飞旋科技股份有限公司研发的磁悬浮离心制冷压缩机，国标工况250RT和300RT满负荷性能均达到GB/T 19577—2015一级能效水平，IPLV远超一级能效水平。该产品采用高效全三维流体叶轮、磁悬浮轴承及控制器、高速永磁电机、高频矢量变频器、直流电抗器等先进技术，实现高速直驱、无油无摩擦、高效可靠运转。测试结果表明，该压缩机运行范围宽，运行稳定，本体运行噪声小于80dBA，得到客户的良好反馈^[17]。



图2.3-5 天津飞旋科技股份有限公司磁悬浮离心制冷压缩机

2.3.2 换热器

换热器是制冷空调系统中最重要部件之一，其换热性能及阻力特性对整个系统的性能影响显著。微通道换热器由于结构紧凑、制冷剂充注量小，得到愈来愈多的关注和应用，近年来在换热性能、紧凑性、抗腐蚀性、结构等方面得到了提升。此外由于R290等低GWP值制冷剂，在欧洲市场销售可以享受较低的碳排放税收，其应用会愈来愈多，但因其易燃易爆的属性，相应的换热器防泄漏特性也获得了关注。

2.3.2.1 研究进展

垂直翅片微通道换热器（VMHX）具有高效的热工水力性能和良好的排水性能，可广泛应用于空气源热泵中。Siyuan Wu等^[18]采用基于实验结果验证CFD方法，研究了空气侧干工况下的热工水力性能，对复合材料翅片波纹与百叶窗的排列顺序和连接方式进行了对比，并研究了翅片间距、翅片长度、管间距和翅片厚度等因素对复合材料翅片性能的影响。最后，采用田口方法进行参数优化。结果表明，在相同的风机功率下，前百叶窗后波纹反向

连接的翅片强化传热效果最好。当采用综合指数性能评价准则（PEC）对VM HX进行性能评价时，管间距和翅片长度是影响VM HX性能的主要因素。实际可用的参数范围内，最优性能的结构参数组合是1.8mm翅片间距、25.6mm翅片长度、12.0mm扁平管间距和0.12mm翅片厚度。

王晓宇等^[19]研究了微通道换热器竖直集管两相分配特性，制冷剂两相分配均匀性是影响换热器性能的重要因素。针对微通道换热器采用竖直集管分液效果较差的问题，提出了两级均液集管的设计方案，通过两相制冷剂分配测试，对比了不同干度和总流量下，各支路的气液相流量比率。实验结果表明：空集管的顶部支路缺液，底部过液，各支路液相流量的相对标准差（RSD）大于95%；多股流集管通过底部进液腔分配，在多股流通道中向上流动并从侧面出流孔进入环形横隔腔，各支路液相RSD大于60%；在多股流集管中加入芯部整流腔和顶部分配腔后，液相RSD在5%以内，气相RSD在15%以内，分配效果良好。

R290作为替代R32、R410A等制冷剂的新型天然制冷剂，不仅有着环保、低GWP的优点，其优秀的热力性能、易生产获得及政府的补贴等因素，使得R290越来越受空调企业青睐。通过对一款欧洲区1.5P变频热泵空调分别采用R290与R32两种冷媒进行测试，结果表明R290系统采用 $\phi 5$ 换热器可以满足欧洲A++/A+能效等级，且R290系统制冷SEER相对于R32 $\phi 7$ 换热器提升约2.4%，制热SCOP下降约6.3%，充注量下降59.5%。由于R290制冷剂GWP值极低，使得R290类型空调产品在欧洲市场销售可以享受较低的碳排放税收^[20]。

R290易燃易爆（属A3安全等级），因此R290的安全性成为了市场推广的重要障碍。为了消费者使用安全，相关法规对R290的最大充注量做了限制，虽然低充注量阻碍了R290冷媒制热效果的发挥，但一定程度上降低了由于泄漏造成的易燃易爆现象发生。

2.2.3.2 优秀产品

近年来由于其高效的换热性能被各大厂商重视的微通道换热器、用作经济器和复杂制冷系统的

板式换热器、可用于采暖系统的套管式换热器、耐高压抗腐蚀性好的壳管式换热器、常用于蒸发及冷凝等相变换热场景的翅片管式换热器等技术不断进步。

1) 抗腐蚀微通道换热器

微通道换热器主要由铝合金微通道扁管。集流管和翅片等部件经过焊接制成，具有紧凑高效。轻量化、低冷媒充注量等优点。在汽车、家商用空调热泵设备等得到了广泛的应用。

由于家用及商用空调热泵设备会被安装在不同的地区和应用场合，其中的换热器产品会频繁和空气换热，换热器不可避免会受到空气中水汽、灰尘、污染物、腐蚀性介质（如氯化物、硫化物等）的影响。随着时间的推移，金属材质的换热器不可避免会出现外腐蚀的情况，导致换热能力下降，部分情况下甚至出现腐蚀液漏，具有足够的耐腐蚀寿命是换热器的基本可靠性要求之一，由于微通道扁管的壁厚通常只有0.3mm左右，市场端的腐蚀泄漏主要发生在微通道扁管。经过多年的发展，伴随着材料和涂层技术的进步，微通道换热器的耐腐蚀寿命不断提升。涂层产品由于成本偏高，无涂层的微通道产品是性价比更高的选择。目前空调热泵设备所用的无涂层微通道换热器普遍采用3103等的长寿命扁管合金，虽然比1100、3102等常规合金的寿命有所提升，但在部分腐蚀性高的环境（如近海地带、热带湿润地区等）或使用要求高（如数据中心、储能等）的情况下仍不能有效满足空调热泵设备的寿命要求。

杭州三花微通道换热器有限公司开发了采用不同抗腐蚀涂层的微通道换热器和用于数据中心冷却的微通道空调蒸发器。其根据换热器不同的使用环境（室内、沿海、工业区、高污染城市）提出了不同的解决方案，分别对换热器采用了亲水涂层、E-coating涂层、TCP涂层等以应对不同的腐蚀条件，使蒸发器寿命延长1000h以上；同时，在微通道扁管的加工上，采用三花专利高耐蚀扁管合金及高耐蚀芯体设计，优化了微通道芯体的材料及电位匹配，大幅度延长了翅片对扁管的牺牲防护时间；自主开发的无锌扁管SWAAT自腐蚀寿命比现有3102铝合金

提高2倍以上，比现有3103铝合金提高50%以上。



图2.3.6 不同涂层微通道换热器

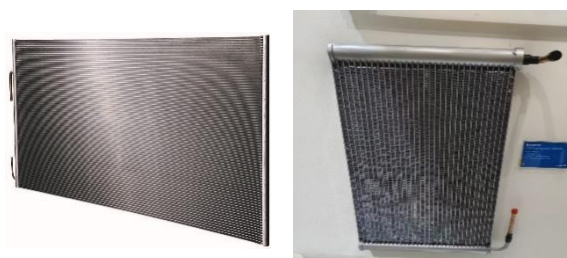


图2.3.7 微通道换热器结构图

2) 数据中心微通道换热器



图2.3.8 数据中心微通道换热器

目前市场上常规的数据中心微通道换热器是采用单片成A型布置，当风向为下出风时，机组正常运行时，换热器进口集流管内的制冷剂液面会浸没过部分扁管孔，此时浸没过的扁管孔内液态制冷剂较多，液面上的扁管孔内气态制冷剂较多，由于微通道扁管孔的特殊结构，会导致靠近迎风侧的扁管孔内制冷剂偏少，靠近背风侧的扁管孔内制冷剂偏多，造成传热效率较低。

所以在上述基础上，杭州三花微通道换热器有限公司新设计的小折弯段方案，可以有效的让靠近迎风侧的扁管孔入口浸没在进口集流管的液面下，

从而保证了迎风侧传热效率最高的区域对应充足的制冷剂，进而提高整个方案的传热效率和机组系统能效。该产品具有结构紧凑、出风均匀和高效节能的特点。

3) 双板丙烷冷凝器

随着制冷剂向低GWP和自然工质方向发展，丙烷作为热泵制冷剂得到了更多的应用。但鉴于丙烷的可燃性，充注量有明确限制，板式换热器具有减少制冷剂充灌量的优势。常规板式换热器如果出现内漏会导致丙烷流入水侧，并传输到室内产生安全风险。丹佛斯（嘉兴）板式换热器有限公司开发了双板丙烷冷凝器，该产品采用独特的双壁微板技术，提供了卓越的防丙烷泄漏的解决方案，具有与类似尺寸的单壁微板型号相同的换热性能，优于常规人字波形态的板式换热器，具有低压降和零介质混合风险。同时拥有优秀的传热效率和较低的水侧压降，以及紧凑的外形结构和免维护优势。

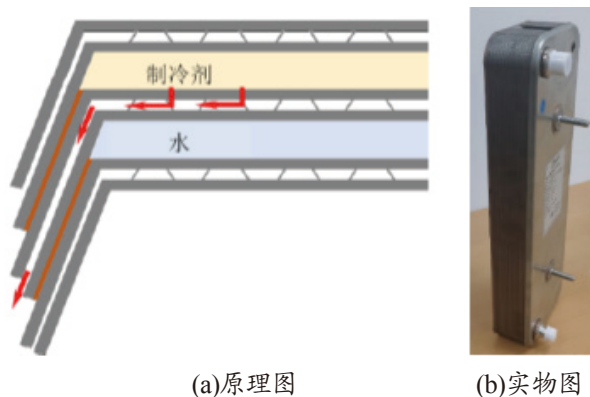


图2.3-9 双板丙烷冷凝器

2.3.3 水泵

在各类建筑中空调系统能耗约占整个建筑能耗的40%以上，空调水力输配系统能耗在空调系统总能耗中占比达20%~30%，因此空调水力输配系统的节能手段和设备的研究和开发变得非常重要。

2.3.3.1 研究进展

撒世忠等^[21]介绍了一种智能模块集成泵组的原理和应用，其集成若干台扬程相同、流量不同的水泵，并采用低阻力的冷水泵附件（过滤器和止回阀等），通过若干台小流量水泵并联组合成一台大流量变流量泵组，并收获较好的宽频高效率区，和变

频水泵一样能较好地诠释了一级泵变水量在冷水泵节能环节的优势，为高效制冷机房提供冷水泵节能解决方案。

刘新民^[22]从暖通空调和自动控制的不同专业角度，给出了多台相同性能水泵并联运行的安全保障技术措施。在对比分析冷源侧供回水总管压差和用冷侧最不利末端压差2种控制方案之后，介绍了1种多末端分布式压差控制解决方法，供设计师参考。

2.3.3.2 优秀产品介绍

威乐（中国）水泵系统有限公司开发了集装箱式水力模块-水力模块解决方案，该产品按照客户的需求，在设备出厂之前以水泵为核心部件，通过BIM设计将整个输配系统的部件、管路提前整合安装在一个撬块中，预留管路的进出口和电气接点。整体运输至现场后通过简单的管路连接和电源电缆的连接即可满足使用要求。威乐利用该技术针对建筑楼宇行业推出了Ice Cube水力模块整体解决方案，通过搭配Walo智慧云控制系统，为客户提供一站式整体解决方案。

该产品应用于上海移动民生大厦中央空调冷水系统，采用GIGA-N系列水泵作为核心动力部件，实现了不同工况的模块效率最优化，水泵效率高达82.95%。

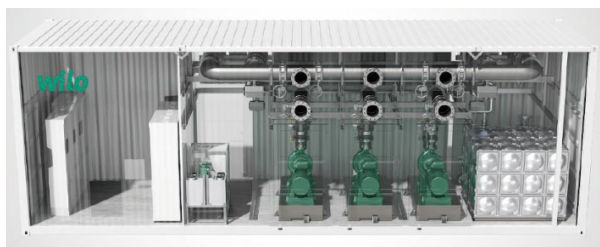


图2.3-10 集装箱式水力模块-水力模块解决方案示意图

2.3.4 风机

风机是暖通空调系统中主要的耗能设备，特别是在低负荷时其能耗占比更显著，且风机普遍效率不高，因此风机的节能降耗也比较重要。

2.3.4.1 研究进展

AC（交流）风机采用交流电动机。传统地铁项目都采用AC风机，电动机为变频电动机，需要

外置变频器才能变频调速。频率调整范围通常在30~60Hz，风量调节范围较小、能耗高。EC风机特点（electrical commutation，电子换相）风机采用直流无刷电动机，输入交流电，内置智能控制模块，转换交流为直流使用，内置变频器。转速调整范围为10%~100%，风量调节范围大、能耗小。EC风机的电动机与风机为一体化设计，无需皮带，内置变频器。由于整体设计、安装方便，整体效率高。

2.3.4.2 优秀产品介绍

常州祥明智能动力股份有限公司开发的型号为FLH250-FLH400和FLQ120-FLQ310数据中心空调用EC风机^[23]。主要由全集成智能化直流无刷外转子电机（EC电机）和高效离心风轮构成。EC电机采用永磁直流无刷电机节能的基本原理，通过外转子电机的结构集成化成组技术，将永磁直流无刷直流电机、功率逆变器、电子控制线路、嵌入式软件和通信接口集成于一体（全集成），同时运用电磁场有限元分析技术，优化电机电磁设计，进一步提高电机效率，并对电机控制和本体参数进行合理匹配，提升电机整机运行效率。风机叶轮采用独特设计，具有高效区宽的特点，保证在特定风压区间的高效运行。通过有效的数据模型和算法实现，满足数据中心空调高灵活性、柔性制冷及动态自适应调整输出等要求。产品具备网络智能化控制功能。EC风机系列产品适用于数据中心、5G通信交换、储能、电源逆变系统的冷却及环境控制系统。产品风轮直径 $\phi 250\sim\phi 400$ ，最大风量为5 800 m³/h。



图2.3-11 数据中心空调用EC风机

2.3.5 控制阀件

阀件是流体输送系统中的控制部件，与压缩机协同控制制冷剂流量的同时，各类控制阀件的性能对于制冷系统优化与能效提高影响很大，近年来主要在智能化、高效节能、降低噪声、提高稳定性等方面有了提升。

2.3.5.1 研究进展

电子膨胀阀是空调运行的关键部件之一，也是可能产生噪声的部件之一。空调运行产生的噪声可能会影响其舒适性，而阀门的两相流致噪声问题也带来了一定的困扰。为解决这一问题，改造阀门结构并进行研究，以实现阀门降噪的目标。

周绍华等^[24]设计了可以对阀前后制冷剂状态进行调节控制并对产生的啸叫噪声进行测量分析的实验系统，得到不同工况及阀开度下的啸叫噪声发声规律。研究表明：啸叫噪声来源于阀内流体高频压力脉动引起的流体周期性振荡，其发声特性是阀内环锥形流通道与阀腔构成的亥姆霍兹共振腔结构对共振频率附近的噪声源信号选择性放大的结果。啸叫噪声声压级主要与阀内制冷剂流速及阀开度有关，阀开度为700 pls（脉冲）下制冷剂速度由2.5 m/s增至3 m/s时，噪声声压级提高了21%；阀内制冷剂流速决定了流体振荡频率，阀开度决定了阀内声腔共振频率；通过改变阀腔结构以增大共振频率，使常见空调工况下阀内制冷剂冲击引起的振荡频率低于共振频率，可以有效避免啸叫噪声产生。

宋永兴等^[25]针对双向节流元件电子膨胀阀的流动特性，提出了在阀门管路上加入沟槽结构以实现制热方向的降噪，对阀门阀座进行倒角处理等优化方案以实现制冷方向的降噪。

节流装置的调节对恒温恒湿箱系统性能具有重要影响。金露露等^[26]基于恒温恒湿箱定频制冷系统，实验研究了不同目标工况下EEV开度（10%~30%）对蒸发器过热度、压缩机排气温度、蒸发器翅片温度及箱内温湿度的影响。结果表明：电子膨胀阀开度为15%~30%时，可保证过热度（8~15℃）和排气温度在安全合理范围内；电子膨胀阀开度为20%以下时，设置旁通毛细管，使压缩机吸气带液冷却

而安全运行；低温低湿和高温高湿工况下，较大开度使温湿度调节时间缩短10~20min，低温高湿和高温低湿工况下，较大开度造成额外湿补偿或热补偿的能耗并延长温湿度调节时间；不同目标工况下，小开度（15%）相比大开度（25%、30%）箱内的相对湿度和干球温度更趋近目标温湿度，温湿度控制精度更高。

陶乐仁等^[27]基于一台跨临界CO₂空气源热泵，通过实验研究在恒定气冷器进口水温及水流量工况下，电子膨胀阀对于65~80 Hz的4个高频热泵系统的调节特性，提出针对不同目标的膨胀阀控制策略。研究结果表明：频率一定时，随着膨胀阀开度不断减小，制热量、出口水温、排气压力均先增大后减小；性能系数COP、蒸发压力均不断减小；针对制热量、出口水温和COP随开度变化呈现不同的变化趋势，提出不同的电子膨胀阀调控策略以满足不同的用户需求；在电子膨胀阀的实际调控过程中，可以通过观测出口水温和排气压力随开度的变化来避免因质量流量过小导致压缩机性能恶化。

陶乐仁等^[28]基于一台R32冷水机组，通过实验研究了低频工况下换热器水侧出口温度、阀前过冷度对于电子膨胀阀调节特性和系统性能的影响，得到以下结论：低频率下吸气过热度对于膨胀阀开度的改变更加敏感，此实验中相同的过热度范围，35 Hz的膨胀阀调节范围为3%，比50 Hz下降9%，容易造成膨胀阀过调的现象，影响系统的稳定性；过冷度对于膨胀阀的敏感问题无改善作用，而提高水侧出口温度可以扩大阀的调节范围，此实验中冷却水出口温度提高5℃，膨胀阀开度调节范围扩大2.8%；冷冻水出口水温提高4℃，膨胀阀开度调节范围提高2.6%，提高系统稳定性，但过度提高水侧出口温度会影响机组的性能，在实际的应用过程中需要结合实际情况调节水侧出口温度。

2.3.4.2 优秀产品

1) ETS 8M电子膨胀阀

丹佛斯（天津）有限公司开发的ETS 8M电子膨胀阀采用了自主研发的高精度电机系统，具有防卡死特性，使开阀迟滞满足最严苛的使用要求。优秀的防失步特性及防脏堵能力，可以确保更高更稳定

的控制精度。产品的体积与重量相较同类型同冷量的产品减小约50%，并且使用寿命超过行业标准两倍以上。



图2.3-12 ETS 8M电子膨胀阀

该电子膨胀阀能在两个方向上不受压力限制自由开启。相较于同类型同冷量的产品，正向开启压差提高20%，反向开启能力最高提高300%，而且理论上还有提升空间。

该电子膨胀阀能减小在不同制冷应用特别是热泵系统高压差应用下，对阀件产生的侧向力造成的磨损，延长了产品的使用寿命，同时完全满足无油系统的要求。

2) LPV电子膨胀阀

浙江盾安人工环境股份有限公司开发了LPV电子膨胀阀，该产品阀口采用软密封设计，较传统硬密封阀件内泄漏控制水平更高，可实现13mm口径产品内泄漏≤100mL/min，达到同口径电磁阀内泄漏标准，远优于日系同口径硬密封内泄漏标准，采用轴承减磨设计，避免软密封阀口长期使用后发生磨损，达到长期运行后仍保持低内漏水平。该产品应用压力平衡设计，阀头开/关过程中实际受到负载力较小，可减小驱动力需求，实现小规格线圈应用，驱动功耗低30%以上。止挡导轨采用塑料外螺纹，低阻尼、低噪声。该产品开阀能力高，阀头采用压力平衡设计，消除系统压差在阀头上的负载，实现口径7.0~13.0mm全系列产品满足带载最低动作电压低于6V该产品逆向开阀压差高，实现逆向压差高达3.0MPa，反向使用也能在全开度下精密调节，更好地满足双向应用系统。具有体积小，低功耗，低成本，低运行噪音和高可靠性的优点。



图2.3-13 LPV电子膨胀阀

3) 四通换向阀

浙江盾安人工环境股份有限公司开发了大容量交叉式电磁四通换向阀（图2.3-14），该阀通过对外置导阀电磁线圈的通断电控制，引导外部高压气体在阀体内部的流向切换，改变活塞两端压力差，使活塞在阀体内部移动，改变活塞流道与阀体外部4根接管的位置配合，从而改变制冷剂在系统中的流向，实现制冷模式与制热模式的切换。其采用了交叉十字低流阻结构且全钢管制造，内部设置自润滑衬套结构及精密的间隙控制，优化设计了壳体壁厚与接管壁厚、避免了使用过程中应力集中而导致的壳体变形，使产品在全生命周期内能够可靠运转、换向寿命达到10 万次以上且市占率达到50%。解决了大容量制冷系统同时具有热泵供热功能所需要的四通换向阀的需求，广泛应用于大型热泵制冷系统、大型制冰机等产品中。



图2.3-14 大容量交叉式电磁四通换向阀

4) 双向电磁阀

浙江盾安人工环境股份有限公司开发了创新结构设计的RSV 电磁阀（图2.3-15），该阀可双向流通、双向截止，且具有低流阻、大流量的特性，在相同接管管径下，RSV 双向电磁阀相对于普通电磁

阀Kv 值增加3~5 倍，可广泛用于需要流体通断控制的制冷空调系统中，助力系统能效和可靠性提升。



图 2.3-15 盾安RSV 电磁阀

参考文献

- [1] 张朝晖, 王若楠, 刘慧成, 等. 绿色高效制冷空调产业发展分析与展望[J]. 制冷与空调, 2020, 20(1):1-6.
- [2] 郭晓林, 陈敬良, 李雄亚, 等. 全球主要国家和地区制冷剂替代进展与展望[J]. 制冷与空调, 2023, 23(7): 55-63, 69.
- [3] 邓雅静. 《中国消耗臭氧层物质替代品推荐名录》公布, R290成为家用空调制冷剂首选[J]. 电器, 2023 (7):44.
- [4] 杨艳艳, 乔家辉, 李连生. 跨临界CO₂制冷技术发展现状及其改进途径综述[J]. 制冷与空调(四川), 2023, 37(5): 679-686.
- [5] 胡斌, 姜佳彤, 吴迪, 等. 工业高温热泵发展现状与展望[J]. 制冷学报, 2023, 44(6):1-12.
- [6] 张治平, 王鹏, 王闯, 等. 超高效两级压缩水冷螺杆式冷水机组开发[J]. 制冷学报, 2023, 44(3):81-86.
- [7] 刘明昆, 李彦澎, 王闯, 等. “双碳”目标下螺杆制冷压缩机的技术发展趋势[J]. 制冷与空调, 2022, 22(3): 55-62, 83.
- [8] 王鲁, 王司墩. 空调压缩机电机的多极化探讨研究[C]// 中国家用电器协会. 2022年中国家用电器技术大会论文集. 《电器》杂志社, 2023:6.
- [9] 勾倩倩, 许树学, 刘海波, 等. 制冷空调设备控制方法的研究进展[J]. 制冷与空调, 2023, 23(9):57-64.
- [10] 雷芙蓉, 宋春雨, 王瑶, 等. 多种气量调节模式下往复压缩机连杆小头瓦润滑特性[J]. 流体机械, 2023, 51(11): 29-35.
- [11] 孙时中, 周明龙, 陈文卿, 等. 双螺杆制冷压缩机排气压力脉动特性的实验研究[J/OL]. 制冷学报: 1-8 [2024-01-10].
- [12] 邢子文, 屈胜利, 王闯. 制冷压缩机技术研究及应用进展[C]//中国制冷学会. “2022年双碳背景下中国制冷技术研究及应用进展论坛”会议论文集. 西安交通大学, 2023:3.
- [13] 万宝压缩机3项科技成果通过国家级鉴定[J]. 电器, 2023(7): 2.

- [14] 海立电器.喜讯|海立两项关键技术再获评“国际领先”[EB/OL]. (2023-12-29) [2023-12-29]. <https://mp.weixin.qq.com/s/2XL6AfzvC9CaSRwP6lMufg>.
- [15] 新黄河.江森自控日立万宝压缩机：创新开发节能减排领先产品 推动企业高质量发展[EB/OL]. (2023-05-06) [2023-12-29]. <https://static.nfapp.southcn.com/content/202305/06/c7652103.html>.
- [16] 永磁同步变频螺杆式冷水机组[J].上海节能, 2023(7): 1039-1040.
- [17] 飞旋科技.用磁悬浮技术改变生活[EB/OL]. (2023-7-11) [2023-12-29]. <http://www.emaging.com.cn/page281.html>.
- [18] Siyuan Wu, Rijing Zhao, Yongfeng Zhao, etc. Air-side thermal-hydraulic analysis and parameter optimization for vertical-fin microchannel heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 26 February 2023.
- [19] 王晓宇, 宋分平, 谢李高, 等. 微通道换热器两级均液竖直集管设计及两相分配特性 [J/OL]. 制冷学报, 1-11[2024-02-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2182.TB.20240206.1327.004.html>.
- [20] 冼志健, 龙俊云. 欧洲区R290冷媒变频热泵空调性能研究 [J]. 洁净与空调技术, 2022(1): 18-21.
- [21] 撒世忠, 吕铁骑, 施勇, 等. 基于高效智能泵组的一级泵变水量空调系统应用探讨 [J]. 暖通空调, 2023, 53 (S2): 119-123.
- [22] 刘新民. 基于安全与高效的空调水循环泵选型方法与控制策略浅析 [J]. 暖通空调, 2024, 54(1): 95-105. DOI:10.19991/j.hvac1971.2024.01.18.
- [23] 数据中心空调用EC风机 [J]. 上海节能, 2022(7): 937-938.
- [24] 周绍华, 詹飞龙, 丁国良, 等. 电子膨胀阀内啸叫噪声特性及发声规律的实验研究 [J]. 制冷学报, 2022, 43 (5): 106-113.
- [25] 宋永兴, 王均宇, 刘正杨, 等. 电子膨胀阀的两相流致噪声特性及降噪技术研究 [J]. 机电工程技术, 2024, 53 (1): 1-4, 47.
- [26] 金露露, 盛健, 张华. 电子膨胀阀开度对恒温恒湿箱系统性能的影响 [J/OL]. 制冷学报, 1-7 [2024-02-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2182.TB.20231213.1033.002.html>.
- [27] 丁夏杰, 陶乐仁, 虞中旸, 等. 电子膨胀阀对变频CO₂热泵调节特性的研究 [J]. 化学工程, 2023, 51 (11): 78-83.
- [28] 丁夏杰, 陶乐仁, 任凯. 低频工况下电子膨胀阀的调节特性 [J]. 化学工程, 2023, 51 (2): 83-88.

2.4 制冷产业与新技术的融合

陈焕新

(华中科技大学)

随着科技的不断进步和制冷产业的持续发展，大数据、人工智能、新材料、新工艺、新能源等技术正在以前所未有的方式融入制冷产品的设计、制造和运营过程中。不仅改变了传统制冷行业的面貌，也为产品的智能化、高效化、低碳化和个性化提供了全新的可能性。

2.4.1 大数据与人工智能研究及应用进展

互联网与大数据已经深入影响到人们生活与工作的方方面面，它们的应用对制冷行业产生了深远的影响。手机、平板计算机、个人电脑等，它们无一不是数据的来源及承载方式，将我们置身于网络时代、数据爆炸的时代。在制冷空调行业中，运用大数据技术进行生产、销售、运行维护以及故障检测与诊断等正在潜移默化地改变整个行业。

在制冷空调行业中通过数据挖掘和关联规则可以从数据中挖掘出有用的信息。而海量的数据以及其中关联规则给计算机算法带来了严峻的挑战，同时也促成了人工智能技术的飞跃。人工智能（Artificial Intelligence）是一门新的技术科学，主要研究用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统。人工智能目前属于计算机科学的一个分支，该领域的研究囊括了许多方面，包括机器人、语言识别、图像识别、自然语言处理和专家系统等。人工智能从诞生以来，理论和技术日益成熟，应用领域也不断扩大，目前，专用人工智能的发展已经到了超前的水平。制冷行业作为一个高度现代化的产业，大部分应用方向已经与人工智能领域的知识相结合，并取得了许多优秀的研究成果和应用案例，为行业带来了良好的经济效益和社会效益。

(1) 数据挖掘算法及其应用进展

在数据挖掘算法中，常见的方法可以分为有监督学习算法和无监督学习算法两类。有监督学习是指已知部分输入与输出的对应关系，在此基础上建

立数学模型，从而将未知输出的数据进行分析。在制冷行业中，常用的有监督学习算法包括决策树和支持向量机。

决策树是一种通过一系列规则建立的树形结构，用于分类和预测，可应用于故障预测等方面，包括ID3算法、C4.5算法、CART算法、PUBLIC算法和SLIQ算法等。决策树算法结构简单，分类准确度较高，对噪声数据的处理具有较好的鲁棒性，但处理大规模数据时受计算机内存容量的限制。Li等^[1]针对VRF系统提出了一种改进的基于决策树的故障诊断方法，该方法将DT模型与基于虚拟传感器的故障指示器相结合，用实验测试集以及在线测试数据集进行验证，结果表明，该方法能够正确分离出换热器脏污、制冷剂欠充以及制冷剂过充三种故障。沙华晶等^[2]提出了一套基于数据挖掘方法的冷机控制策略识别框架，利用CART决策树和加权关联规则算法，以冷机和水泵的能耗数据为输入，实现了多台冷机序列控制逻辑和冷机水泵的联控逻辑的识别。

支持向量机是一种利用结构风险最小化准则实现置信范围和经验风险最小化的有监督学习方法，广泛应用于统计分类和回归分析中，在暖通空调故障检测与诊断领域已得到广泛应用。它对所学习的样本求解，得出样本的最大边距超平面，以实现了对数据进行二元分类的目的。支持向量机算法在暖通空调故障检测与诊断领域已得到广泛应用，并能灵活地与其他的方法结合，如小波分析理论、特征选择、专家知识等，进而得到一个更为有效的故障检测与诊断模型。Du等^[3]将增量学习支持向量机模型与基于深度学习的生成式对抗网络相结合，对数据中心空调系统制冷剂泄漏故障进行诊断，结果表明，该模型可以很好地解决误分类问题，提高诊断效率。

而无监督学习则是指输入与输出的关系未知，直接对输入数据建立数学模型，分析数据特征。在制冷行业中，常用的无监督学习算法包括关联规则

分析和聚类分析。关联规则分析是一种简单、实用的分析技术，用于发现大量数据集中存在的关联性或相关性，可应用于发现事物之间的规律和模式。而聚类分析则是一种多元统计分析方法，基于某种原则建立数学模型，将具有相似特征的数据划分在同一类或簇中，使同一类或簇中的数据具有较高的相似度，而不同类或簇之间的数据具有较大的相异性。聚类分析方法分为层次法和划分法，层次法主要包括BIRCH算法、DBSCAN算法^[4]等，划分法主要包括K-means算法^[5]等。聚类分析在制冷空调行业中主要用于空调系统的故障检测与诊断，根据不同故障之间的数据具有的不同特征，将不同故障状态下的数据区分开。

(2) 控制优化算法及其应用进展

随着制冷行业及技术的高度发展，制冷系统和设备的复杂性也越来越高，再加上制冷系统中各参数往往存在时变性，导致数学模型难以建立，传统经典控制方法和现代控制理论难以实现有效的控制，因此基于人工智能算法的控制策略成为了时下研究热点。

在空调系统的自动控制研究中，许多人工智能优化算法已得到了应用，构成了过程优化控制、参数寻优等相关工作的关键部分。其中典型的算法有遗传算法、模拟退火算法等。遗传算法是模拟自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型，利用仿真计算通过模拟自然进化过程搜索最优解。模拟退火算法是一种随机寻优算法，其出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题之间的相似性。模拟退火算法从某一较高初温出发，伴随温度参数的不断下降，结合概率突跳特性在解空间中随机寻找目标函数的全局最优解，即在局部最优解时能概率性地跳出并最终趋于全局最优。

智能控制方法也已在空调系统的自动控制上得到研究与应用。智能控制主要包括模糊控制、神经网络控制和专家控制等，近年来研究较多的智能控制技术主要是模糊控制和神经网络控制。

模糊逻辑控制，又称模糊控制，属于智能控制方法的一种。模糊控制近20多年来无论是在理论上还是技术上都有良好的发展，成为自动控制领域一

个非常活跃的分支。模糊控制作为一种非线性系统控制策略，最大的特点是无需建立系统的精确数学模型，可以将操作者的经验知识直接转化为模糊规则，通过模糊推理过程对系统实施控制。仿真和实验研究表明，模糊控制可以实现暖通空调系统的有效控制，比常规的PID控制具有更强的鲁棒性。

神经网络控制是人工神经网络（Artificial Neural Networks, ANN）与系统控制理论相结合的产物，它是智能控制的一个新的分支。神经网络模仿人脑的神经系统，以一种简单的处理单元——神经元为节点，采用某种结构构成活动网络。神经网络建模时间短、易于进行计算机模拟，具有模拟高度非线性系统的优点，且具有较强的学习能力、容错能力和联想能力。此外，神经网络还具有较强的自适应能力，例如可通过重新训练网络进行设备特性的动态校准功能，这也是它优于其他控制方法的主要特点。

2.4.2 新材料与新工艺研究及应用进展

新型材料的研发与应用也为制冷系统的节能开拓了新的发展思路。现研发出的新材料涉及制冷领域的各个方面，从新型节能设备材料到新制冷剂材料，都为制冷领域的发展奠定了基础。

当前，制冷技术中应用最广泛的气体制冷剂具有严重的温室效应，贡献了社会总碳排放量的7.8%，同时整个制冷行业消耗了社会总电力的25%^[6]。为了实现“碳中和”战略目标，必须构建零碳制冷新技术。塑晶材料里发现的庞压卡效应为实现这一目标提供了全新的技术路线。压卡制冷技术是一种新型的制冷技术，它可以实现零排放，并同时保持高制冷效率，有望替代传统蒸气压缩技术，实现绿色、高效制冷。围绕这一问题，中国科学院金属所沈阳材料科学国家研究中心功能材料与器件研究部的科研人员与合作者发现了有机碳硼烷（ $C_2B_{10}H_{12}$ ）和无机碘化铵（ NH_4I ）两类性能优异的材料^[7]，这两类材料的发现对庞压卡制冷技术应用提供了坚实的物质基础，以该类材料为工质的制冷样机正在研制中。

第四代制冷剂是指不破坏臭氧层、GWP较低的制冷剂。目前，第四代制冷剂已经开始商业化生产和应用。其中，以第四代制冷剂 HFO-1234yf 为例，

由于其和 R134a 的效果相近,同时由于其分子量、密度等性质和第三代制冷剂接近,因此在现有空调上做少量调整即可直接应用,因此 HFO-1234yf 最有可能替代三代制冷剂成为新一代汽车制冷剂。我国是制冷剂消费大国,受广阔的市场前景吸引,国际厂商纷纷在国内建厂或授权代工,在此背景下,我国 HFO-1234yf 制冷剂产业规模不断扩大,但由于专利限制、价格高昂、标准不统一,我国 HFO-1234yf 制冷剂市场推广、应用仍存在较多问题。

中国科学院兰州化学物理研究所清洁能源化学与材料实验室研究员高祥虎团队通过热诱导相分离技术制备了一种具有 3D 多孔结构的介电/聚合物复合薄膜材料,实现了具有优异光谱选择性的辐射制冷材料。该材料在防冰融化测试中展现出了优异的降温效果。同时,该复合材料还具有优异的机械性能和自清洁性能。经过 30 多天的紫外照射,该复合材料仍保持优异的光学性能。该材料可用于大型石油储存罐、大型电力设备等,在辐射制冷的规模化生产和应用等方面具有重要意义^[8]。

2.4.3 新能源研究及应用进展

随着人们对环境舒适性要求的提高,现实生活中大多数暖通空调系统需要长期保持高负荷运转状态,例如办公楼、商超、医院等,其产生的能耗是巨大的。在传统技术模式下,暖通空调采用的主要能源为电能,而目前传统能源依然是主要的电能生产渠道,因此电能的高消耗意味着传统能源的高消耗。为了降低暖通空调系统能耗,除了通过改良系统结构、应用变频技术等方法,从系统设备本身的角度降低能耗外,还能够通过应用新能源的方式,从根源上减少传统能源的消耗、减少环境污染。新能源的典型特征在于,无论是能源获取,还是投入到实际应用环节中,对生态环境的影响都非常小^[9]。为了实现生态可持续发展,在制冷空调领域引入新能源技术成为未来研究的必然趋势,比较常见的新能源包括太阳能、风能、地热能 and 海洋能。

太阳能在制冷领域中的应用主要有两类方法。一类是通过太阳能发电驱动压缩式制冷,原理是利用太阳能转化板,将太阳能转化为电能,再驱动压缩制冷设备运转。这对太阳能转换板材料要求较

高,并且涉及到的成本较高,需要从太阳能转化和空调机本身角度进行技术改良。另一类是太阳能吸收式和吸附式制冷技术。太阳能吸收式制冷技术借助太阳能集热器来接收太阳光^[10],形成循环热水,在发生器内促进一种工质对另一种工质的吸收和释放,实现吸热和放热,常用的工质对主要为溴化锂-水和氨-水,以前者居多。而太阳能吸附式制冷是利用太阳能使吸附床中的固体吸附剂对制冷剂进行周期性的吸附、解吸附过程实现制冷循环,工质对的吸附能力取决于吸附剂的多孔属性和等温特性^[11],常见的一些工质对有硅胶-水、沸石-水、活性炭-甲醇等。

在制冷空调系统中,通风换气、空气净化是十分关键的环节,因此对风能的使用同样重要。关于风能的应用,一方面,在一些大型工业园区,可以通过风力发电的方式,为园区建筑暖通空调系统提供必要的电力支持。另一方面,通过改良暖通空调中通风系统的结构,利用风能带动主要叶片转动,在不用大量开启窗户的情况下,利用热压和风压的原理,可用自然风解决通风问题,结合内部空气净化装置,同步实现室内通风和空气净化的功能。并且,自然风在过渡季节具有天然冷量,一些地域过渡季节的自然风冷量可直接满足室内设计温湿度要求,空调原本这部分所消耗能源可以节省下来。

地热能作为一种非碳基、清洁可再生能源,具有稳定连续输出的优势。地热制冷系统主要由地热能采集装置、热交换装置和制冷设备组成。地热能采集装置采集地下的冷能后,通过热交换装置与制冷介质进行热交换使介质降温^[12]。然后冷能通过传输系统输送至建筑内的制冷设备,如空调机组将室内的热能吸收,实现室内制冷效果,为建筑提供舒适的室内环境。通过地热制冷系统建筑可以实现高效的制冷同时减少能源消耗和碳排放,该系统不需要额外的化石燃料,利用地下地热能源进行制冷,具有较低的运行成本 and 环境影响。

海洋能根据能量形式可以分为海洋热能和海洋动力能。海洋热能应用于制冷系统较为广泛,一方面海水本身是一个天然的低温源,利用海水作为冷却介质,减少对传统冷却设备中的冷却塔或冷却水

泵的依赖。另一方面可以利用海洋中的温差来产生热能，进而用于制冷空调系统中的吸热过程。海洋动力能中最具代表的是潮汐能，潮汐能可以驱动发电机产生电力，然后利用电能来驱动制冷循环达到制冷效果，这种方法可以在没有传统电网供电的地区或者需要清洁能源的地方提供制冷服务。

总之，为减少能源消耗和环境污染，在制冷领域引入新能源技术成为未来发展的趋势。在实际应用中，需要充分考虑当地的能源储备和技术情况，合理利用太阳能、风能、地热能、海洋能等新能源，找寻最适合的新能源制冷研发方向，促进生态可持续发展。

2.4.4 优秀案例（上海旻实第四代环保型制冷剂高精度防爆充装生产线）

全球氟制冷剂升级换代，零 ODP 和低 GWP 是发展趋势。第三代氢氟烃制冷剂对臭氧层无破坏，但对气候的制暖效应较强，国内外应用广泛，目前进入淘汰初期。第四代氢氟烯烃制冷剂具有卓越的性能与环保性，但因其是易燃物料，对生产过程与控制提出更高的要求。我国是制冷剂生产和消费大国，但国内行业基本以人工操作为主，充装设备落后，控制精度较低，劳动强度大。因此，围绕第四代环保型制冷剂充装过程的自动化和智能化水平亟待解决。

上海旻实智能科技有限公司围绕第四代环保型制冷剂防爆充装生产线的关键技术展开研究，实施完成行业内第一条第四代环保型制冷剂高精度防爆充装生产线，实现多品种产品的柔性化、自动化和智能化生产，充装精度比行业标准提高 60%，实现生产过程自动化、透明化、可视化和精益化。

该环保型制冷剂充装生产线由 24 个防爆充装站、2 条防爆主输送线、2 套防爆码垛系统、1 套防爆缠绕打包及链板输送系统组成，充装能力为 4800 瓶/8 小时，充装压力可达 4.0MPa，适合 R290\R600a\R1234yf\R32 等不同类型环保制冷剂。整线具有自动抽真空、充装和余料回收功能，且充装精度不大于 $\pm 20\text{g}$ 。此外，生产线能够自动在钢瓶上贴防伪标，缠绕膜的垛上贴垛标，完成瓶与垛的两级数据关联和追溯，且具有设备监控、计划进度显示、生产状

态显示和报警等功能。



图2.4-1 上海旻实制冷剂充装生产线现场

上海旻实生产线的先进制造技术主要包括防爆隔爆技术、组合阀密封技术、高速充装控制技术。在防爆控制方面，采用正压吹扫、隔爆分离、静电消除或降低输入电信号功率等技术和方法，对生产线的充装站、喷码设备、视觉检测设备等进行改进型设计，实现电气接头与外部空间制冷剂的有效隔离。视觉检测设备是通过算法分析，实时判断产品是否符合要求，进而指导下一工位的动作。在密封方面，基于自主研发的组合阀组进行控制，加注阀采用双流量阀实现前段的高速加注及后期的微流量加注。同时，设计增压回收阀，将余料通过高压重新注入到物料管道，回收与密封效果更好。在充装控制方面，提出一种考虑管道流量、压力和真空度等参数的充装质量控制方法，使得单个小钢瓶制冷剂充装质量偏差精度相较行业标准提高 60%，充装效率和余料回收效果得到显著提升。

参考文献

- [1] LI G, CHEN H, HU Y, et al. An improved decision tree-based fault diagnosis method for practical variable refrigerant flow system using virtual sensor-based fault indicators[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129: 1292-1303
- [2] 沙华晶, 许鹏, 冯帆, 等. 基于能耗数据挖掘的冷机调控策略识别[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(6): 41-46.
- [3] DU Z, CHEN K, CHEN S, et al. Deep learning GAN-based data generation and fault diagnosis in the data center HVAC system[J]. Energy & Buildings, 2023, 289: 113072.

- [4] LI G, HU Y. Improved sensor fault detection, diagnosis and estimation for screw chillers using density-based clustering and principal component analysis[J]. Energy & Buildings, 2018, 173: 502-515
- [5] 金锋, 姜国良, 解鸣, 等. 基于k-means聚类 and MILP 模型的CCHP系统运行优化[J]. 暖通空调, 2020, 50(11): 74-80, 73.
- [6] 李昂. 压卡材料研究的新趋势[C]// 内蒙古自治区人民政府、中国工程院、中国稀土学会、中国稀土行业协会. 中国稀土学会2022学术年会、第十四届中国包头•稀土产业论坛摘要集. 中国科学院金属研究所沈阳材料国家科学研究中心, 2022: 153
- [7] REN Q, QI J, YU D, et al. Ultrasensitive barocaloric material for room-temperature solid-state refrigeration[J]. Nature Communications 13, 2293 (2022).
- [8] J. Mater. Chem. A, 2023, 11: 3126-3135.
- [9] 路学明. 新能源与可再生能源在暖通空调系统中的实践探究[J]. 居业, 2022, 14(1): 180-182.
- [10] 褚吉平, 庄利, 刘帅. 太阳能吸收式制冷专利技术现状[J]. 中国科技信息, 2023(21):16-20.
- [11] 刘岩, 马春元, 张梦. 太阳能吸附式制冷系统的研究现状与发展前景[J]. 太阳能, 2018(7):5-9, 26.
- [12] 范兴龙, 袁久旺, 姬铭泽. 地热能在建筑节能中的应用研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2023(18):90-92.

2.5 新型制冷技术的整机设备

2.5.1 热声制冷

罗二仓 杨睿 吴张华

(中国科学院理化技术研究所)

随着我国双碳重大战略的稳步推进,传统制冷技术面临强制性更新换代,环保、高效的新型制冷技术备受期待。热声制冷技术是一种基于热声效应通过消耗声功实现泵热的制冷技术,其循环在理论上高度可逆,系统无或少运动部件,采用的工质一般为氦气、氩气等惰性气体以及氮气等自然工质气体,因而具有潜在高效性、高可靠性和环保等优势^[1],非常符合双碳背景下的发展要求。

热声制冷的形式主要有两类。第一类是电驱动热声制冷。如图2.5.1-1(a)所示,其基本形式是利用电带动声源产生声波,驱动热声制冷机单元(包括回热器和换热器)实现制冷。在热声制冷机单元内,按照热声学原理,回热器(也称热声换能器)是发生热声效应的场所,其内部工质气体微团在交变压力波作用下,不断经历压缩与膨胀过程,同时气体微团往复运动,与周围固体产生热量交换,最终实现将冷端的热量接力泵送至热端的“泵热效应”。如果热端为环境,利用冷端冷量的机器即为

制冷机;如果冷端为环境,利用热端热量的机器则为热泵。第二类热声制冷技术是热驱动热声制冷。如图2.5.1-1(b)所示,其基本结构是将热声发动机和热声制冷机通过一定的声学结构串联起来,利用热声发动机将热能转换为声能,再通过热声制冷机消耗发动机产生的声能进行制冷。相较于电驱动热声制冷,热驱动热声制冷具有完全无机械运动部件的特性,因而可靠性更高。

下面分别介绍两类热声制冷系统的研究进展。

1 研究进展

1) 电驱动热声制冷

电驱动热声制冷的研究始于上个世纪70年代Merkli等对热声制冷效应的发现^[2]。当时普遍采用的技术方案是利用扬声器或直线电机等声源驱动驻波型热声制冷机进行制冷。其中的代表是美国Los Alamos国家实验室研制的应用于“发现号”航天飞机上的STAR热声制冷机^[3]。国内在这方面的研究主要在热泵温区上,代表性研究单位是中国科学院理化所。他们在2015年搭建了由两个对置式直线电机搭配一个热声热泵单元的系统^[4]。实验结果表明,在环境温度为 -20°C ,热泵单元加热温度为 50°C 时,系统的最大制热系数(定义为制热量与消耗的声功之比)为2.1,泵热量为260W。同年,他们还搭建了一台1kW热泵单元反向布置的电驱动型自由活塞斯特林热泵,当冷端温度为 -20°C ,供热温度为 50°C 时,整机制热性能系数达到了1.4。近期,该研究团队研制了一台电驱动自由活塞热声斯特林空气源热泵,在普通(3°C)、寒冷(-15°C)和极寒(-28°C)地区供暖工况下(供暖侧入、出水温度分别为 41°C 和 46°C),电驱动自由活塞斯特林热泵的整机制热性能系数分别达到了2.3、2.0和1.8。此外,国内浙江大学、同济大学、西安交通大学、华中科技大学、北京理工大学等单位也进行了相关研究。

在深冷温区,直线压缩机驱动的自由活塞热声斯特林制冷机替代工作在较低制冷温度的复叠蒸汽压缩制冷技术应用是当前的热点之一。美国Stirling

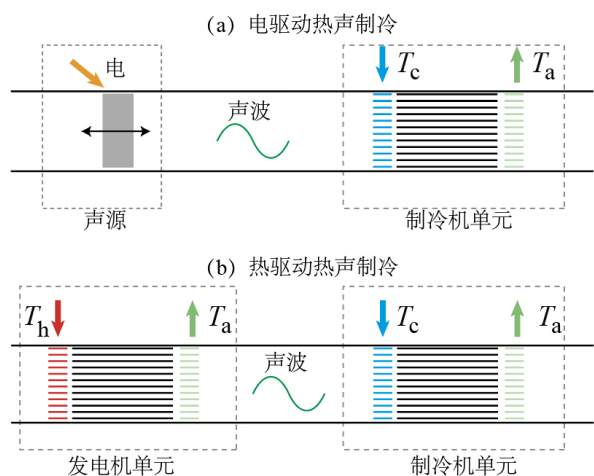


图2.5.1-1 两类热声制冷系统原理示意图

(a) 电驱动热声制冷系统 (b) 热驱动制冷系统

T_h 、 T_a 和 T_c 分别代表热源温度、环境温度和制冷温度

Ultracold公司（其前身是荷兰Global Cooling公司）在2010年前后推出了三款基于自由活塞斯特林制冷机的冰箱，可提供低至 -80°C 的低温环境。同时，该公司比较了采用自由活塞斯特林制冷机及传统复叠制冷机的冰箱能耗，结果表明前者的制冷系数是后者的1.5倍多。日本的Twinbird公司研制了多款基于自由活塞斯特林制冷机的便携式冰箱，制冷温度在 $-100\sim-80^{\circ}\text{C}$ 、制冷量在15~45W。在国内，宁波华斯特林公司研发了多款便携式冰箱，其制冷温度与制冷量与Twinbird公司产品相似。此外，中国科学院理化所、中国电子科技集团第16研究所、上海理工大学等机构也开展了类似的研究。其中，中国科学院理化所研制的在 -80°C 温区的电驱动自由活塞斯特林热声制冷机的制冷系数可以超过0.5^[5]，比传统复叠蒸气压缩制冷技术的效率高出40%以上。



图2.5.1-2 电驱动自由活塞热声斯特林空气源热泵

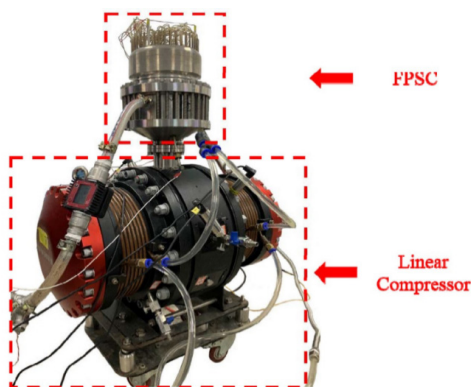


图2.5.1-3 电驱动深冷温区热声斯特林制冷机

2) 热驱动热声制冷

(1) 采用气体谐振管的热驱动制冷系统

早期的热驱动热声制冷系统以驻波型为主。经过三十余年的发展，该领域的研究热点已集中在效

率更高的双行波型系统上。这里的“双行波”是指发生热声转换的回热器和传输声功的谐振管均处在以行波为主的声场，这样有利于提升热声转换和声功传输的效率，进而提升系统性能。

这一类系统的结构一般为环路，在环路中存在多组热声发动机和制冷机单元。其中一个例子是如图2.5.1-4所示的具有两个热声核心单元的热声制冷系统。每个核心单元包括一个热声发动机单元和一个热声制冷机单元。当系统运行时，由于热声效应，热量在热声发动机单元中被转化为声波，所产生的声波经谐振管被传播至热声制冷机单元内，进而通过消耗声功实现泵热。近些年相继出现了空调温区和低温制冷温区系统样机^[8-12]。2020年，荷兰Sound Energy公司基于双行波结构推出了一台名为THEAC-25的商用热驱动热声制冷机，该系统可利用 $100\sim 200^{\circ}\text{C}$ 的余热驱动，在制冷温度为 25°C 时实现25~40 kW的制冷量输出^[12]。2022年，中国科学院理化所研制了一台两单元热驱动热声制冷系统，在 300°C 的加热温度下，可将5.6kW的冷量从 10°C 泵至 45°C ，COP达0.41^[8]。

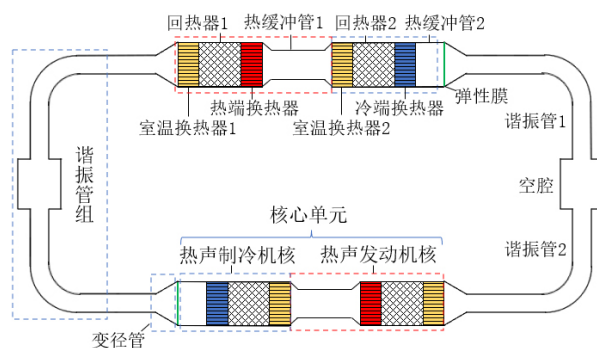


图2.5.1-4 两单元双行波式热驱动热声制冷机

(2) 采用气-液耦合或气-固耦合谐振器的热驱动热声制冷系统

降低谐振管内的声功传输损失是提升热声制冷系统性能的重要途径。其中一种方式是在谐振管中引入液体活塞形成气-液耦合谐振器，以减小谐振管尺寸或降低谐振频率，进而降低声功传输损失并提升系统效率。在图2.5.1-5所示的三级行波热声制冷系统中，采用了以液态水作为谐振活塞的气-液耦合谐振器，显著降低了系统谐振频率。在最新的实验中，当充气压力为5MPa、加热温度为 250°C 时，该系

统在 $-10\sim 10^{\circ}\text{C}$ 的制冷温度区间内可获得 $3.7\sim 5.7\text{kW}$ 的制冷量，COP为 $0.4\sim 0.5$ 。这比同工况下以气体谐振管替代气-液耦合谐振器时的制冷量和COP提升了2~3倍。

另一个减小谐振损失的方式是引入固体活塞形成气-固耦合谐振器。这一思路在热声发动机领域已经有诸多实践并取得了良好效果^[13-14]，但在热驱动热声制冷和热泵领域的应用还较少。目前尚无关于采用气-固耦合谐振器的热驱动制冷系统的实验研究；相关理论预测表明，在 300°C 的热源温度下，这一类系统在空调工况下的COP可超过 0.6 ^[15]。

此外，对于热驱动热声制冷系统，当加热温度升高时，系统由于能流不匹配，效率出现瓶颈。近期，中国科学院理化所提出了一种热声制冷新流程，在高加热温度下，采用旁通结构使得部分声功绕过发动机直接进入制冷机，使系统在高加热温度下，在实现声场、阻抗协同的基础上进一步实现能流协同（因此又称为三协同型热驱动热声制冷机），大幅度提升系统的COP。在此基础上，搭建了一台如图2.5.1-6所示的热驱动热声制冷系统实验样机^[16]。最新的实验结果表明，该系统在 550°C 的加热温度和标准空调工况下，最高COP达到1.34，制冷功率为 2.37kW 。这一COP是热驱动热声制冷技术的最高水平，超越吸附式，甚至双效吸收式制冷技术。这一研究进展极大提振了将热声制冷技术应用于室温制冷的信心，使得该技术真正有能力和吸收、吸附等传统技术媲美，甚至有望成为颠覆性制冷技术。

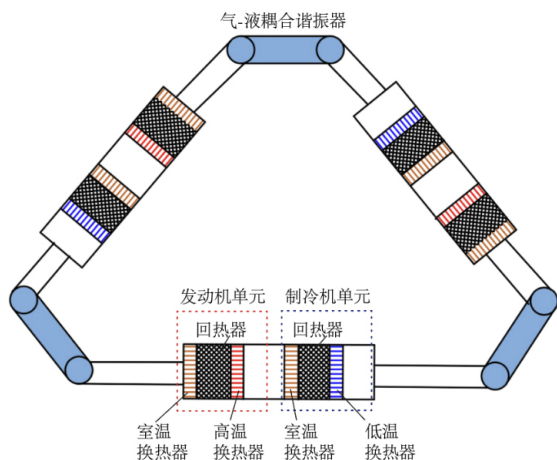


图2.5.1-5 采用气-液耦合谐振器的热驱动热声制冷系统

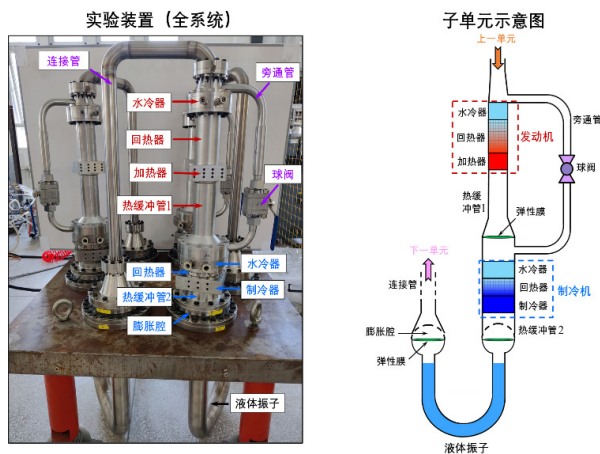


图2.5.1-6 三协同型气液耦合谐振热驱动热声制冷系统

2 关键技术

从热声制冷的发展上看，虽然在技术上已取得很大的进步，但一些关键技术仍需进一步突破，才能达到规模化应用的需求。这些关键技术主要包括两大方面：

1) 在电驱动热声制冷方面，自由活塞斯特林制冷机具有效率高、结构紧凑的优势，已经在低温及深冷温区率先获得应用。然而，当冷端温度升至 0°C 附近的普冷温区时，冷热端温差减小，带来两个问题：一是排出器尺寸难以缩小。由于制冷机核心单元出口声功占入口声功比重大，现有排出器回收声功方案尺寸难以减小，不利于未来降低成本、提高紧凑性。如何降低回收声功的量是关键问题之一。二是较大功率直线压缩机技术不成熟。现有电驱动热声制冷都应用在冰箱，功率较小。对于空调应用，通常功率在几千瓦至数十千瓦以上。相关直线压缩机技术还有待进一步完善。

2) 在热驱动热声制冷方面，仍需要进一步提升性能。一方面需进一步降低谐振损失。可采用气-液耦合或气-固耦合谐振器，通过大幅减小谐振机构尺寸来减小损失。目前，采用气-液耦合谐振器系统的性能仍需进一步提升，而气-固耦合谐振器的引入则会大幅增加系统的机械复杂度，这些问题都需要解决。另一方面还需要研发高性能的交变流动换热器。在热声系统的换热器中，换热依赖于气体工质与固体壁面的对流作用，其传热系数远低于依靠相变换热的蒸汽压缩制冷系统中的换热器。这导致传

热温差很大,严重影响系统性能。由于交变流动的特性,换热器的性能很难通过增大流动方向尺寸来提高。解决该问题的潜在技术方案包括采用自泵式换热器等。

3 产业化应用

随着“双碳”目标的推进,我国制冷行业将迎来重大变革,为新技术的发展带来了机遇。针对现有制冷技术工质不环保、工作温区受限、极端条件下制冷性能不高等缺点,热声制冷技术在突破上述关键技术后,有可能在以下场合获得应用:

1) 深冷温区电驱动制冷机。现有研究表明,相比已有的复叠制冷技术,热声制冷技术在性能上可提高50%以上。同时,还可以摆脱现有对环境有影响的工质。相关技术国外已有产品,国内实验室已完成性能技术上的突破,下一步是实现工程化研究。

2) 电驱动大温差热泵,包括用于寒冷区域的移动或非移动式电驱动热泵、用于工艺过程的电驱动高温热泵等。大温差热泵应用范围广,节能空间大,但传统蒸汽压缩制冷技术难以满足需求,热声制冷技术在实现大温差制冷和供热方面具有优势,是发展的重要方向。

3) 燃烧热驱动的高效率热声空气源热泵。相比现有利用天然气等燃料直接燃烧采暖,燃料燃烧热驱动的空气源热泵技术可在满足相同需求下大幅减少燃料消耗,实现节能与减排。采用新型流程的液态活塞热声制冷和热泵有很大发展潜力,具有实现制冷系数和制热系数2.0以上的发展潜力。

4) 中低品位太阳能、动力余热等驱动的热声制冷。太阳能是清洁能源,利用集热器汇集后可得到中低品位的热,进而实现制冷,可减少一次能源消耗。对动力余热的利用也可减少一次能源的消耗。

参考文献

[1] CHEN G, TANG L, MACE B, et al. Multi-physics coupling in thermoacoustic devices: A review[J/OL]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 146: 111170.

[2] MERKLI P, THOMANN H. Thermoacoustic effects in a resonance tube[J]. Journal of fluid mechanics, 1975, 70(1):

161-177.

[3] GARRETT S L, ADEFF J A, HOFER T J. Thermoacoustic refrigerator for space applications[J]. Journal of thermophysics and heat transfer, 1993, 7(4): 595-599.

[4] YANG Z, YANYAN C, GUO Y, et al. Experimental investigation on a linear-compressor driven travelling-wave thermoacoustic heat pump[J]. Energy Procedia, 2015, 75: 1844-1849.

[5] LUO K Q, SUN Y L, JIANG Z J, et al. A Free-piston Stirling cooling prototype for ultra-Low temperature freezing[J/OL]. 2021[2024-02-08]. <https://cryocooler.org/resources/Documents/C21/215.pdf>.

[6] BALLISTER S C, MCKELVEY D J. Shipboard electronics thermoacoustic cooler[D]. CA: Naval Postgraduate School Monterey, 1995.

[7] ZOLPAKAR N A, MOHD-GHAZALI N, HASSAN EL-FAWAL M. Performance analysis of the standing wave thermoacoustic refrigerator: A review[J/OL]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54: 626-634.

[8] CHI J, YANG Y, WU Z, et al. Numerical and experimental investigation on a novel heat-driven thermoacoustic refrigerator for room-temperature cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2022: 119330.

[9] ZHANG L M, HU J Y, WU Z H, et al. A 1 kW-class multi-stage heat-driven thermoacoustic cryocooler system operating at liquefied natural gas temperature range[J]. Applied physics letters, 2015, 107(3): 033905.

[10] HOU M, WU Z, HU J, et al. Experimental study on a thermoacoustic combined cooling and power technology for natural gas liquefaction[J/OL]. Energy Procedia, 2019, 158: 2284-2289.

[11] XU J, HU J, SUN Y, et al. A cascade-looped thermoacoustic driven cryocooler with different-diameter resonance tubes. Part II: Experimental study and comparison[J/OL]. Energy, 2020, 207: 118232.

[12] Sound Energy. THEAC-25 Thermoacoustic energy converter[EB/OL]. [2022-02-26].

[13] WU Z, YU G, ZHANG L, et al. Development of a 3kW double-acting thermoacoustic Stirling electric generator[J]. Applied Energy, 2014, 136:866-872.

[14] HU J Y, LUO E C, ZHANG L M, et al. Analysis of a displacer-coupled multi-stage thermoacoustic-Stirling engine[J]. Energy, 2018, 145: 507-514.

[15] LUO K, ZHANG L, HU J, et al. Numerical investigation on a heat-driven free-piston thermoacoustic-Stirling refrigeration system with a unique configuration for

recovering low-to-medium grade waste heat[J/OL]. International Journal of Refrigeration, 2021, 130: 140-149.

- [16] XIAO L, LUO K, WU Z, et al. A highly efficient heat-driven thermoacoustic cooling system[J/OL]. Cell Reports Physical Science, 2024: 101815.

2.5.2 磁制冷

李振兴 沈俊 刘亚坤

(北京理工大学)

制冷与低温技术在人类生活和科技发展中起着十分重要的作用^[1-2]。磁制冷是一种基于磁性材料磁热效应的固态制冷技术^[3]。其原理主要是利用磁场变化中磁热材料的温度变化实现制冷效果。根据磁制冷的作用温区, 可将磁制冷技术分为室温磁制冷、低温磁制冷与极低温磁制冷等三部分。

1 关键研究及技术进展

目前, 室温磁制冷发展较为成熟, 已报道近百台样机^[4], 但大部分样机制冷温跨、制冷量较小, 尚不能满足实际需求。目前研究主要集中在制冷系统的优化设计上, 在磁场时序、优化算法、磁工质颗粒排列形式等方面取得了重要进展。2023年沈俊团队通过实验研究了磁场运行时序对室温磁制冷机性能的影响, 实验装置如图2.5.2-1, 研究发现磁场间歇运行在温度跨度和冷却功率方面优于磁场连续运行, 当频率和利用系数分别为0.55 Hz和0.52时, 间歇型磁场的最大温度跨度为22.7 K, 比连续型磁场大2 K^[5]。摩洛哥O. Chdilde团队结合遗传算法, 对主动磁回热器 (AMR) 数值模型中10个参数同时优

化, 结果表明AMR的性能可以显著提高近40%^[6]。韩国Kim等通过实验研究了磁制冷机中Gd颗粒排列对室温磁制冷机性能的影响, 研究发现相较于Gd颗粒不规则排列, 规则排列的AMR的性能系数提高了10.5%~37.3%^[7]。

低温磁制冷在国内研究尚处于起步阶段, 当前研究集中于流程设计和关键器件研制等方面, 整流程和架构研究较少。在流程设计方面, 沈俊团队构建了一种液氢温区多级磁制冷系统, 如图2.5.2-2。通过数值仿真, 三级系统的最大冷却功率为40.09 W, 热力学第二效率为28.14%^[8]。在器件方面, 沈俊团队研究开发了填充Pb、ErNi和EuTi_{0.875}Al_{0.125}O₃的新型AMR, 应用于GM/磁混合制冷机, 如图2.5.2-3, 与GM制冷模式相比, 混合制冷模式可获得更大的制冷功率和制冷效率^[9]。

极低温磁制冷技术发展相对较早, 目前绝热去磁制冷 (ADR) 已成为空间探测、量子技术等前沿科学中主流极低温制冷技术。近年来, 极低温绝热去磁制冷机逐步由单级向多级、由间歇制冷向连续制冷发展^[10-13]。ADR的关键技术难点主要在于磁热模块、热开关及多级流程架构与控制等方面。在热开关方面, 李珂、戴巍等通过数值仿真研究双管、三管构型热开关的换热性能。研究发现, 双管热开关的对流换热性能略优于三管^[14]。而在控制方面, 由于ADR系统的强非线性, 传统PID参数整定十分依赖人工试错, 需要耗费大量时间。戴巍等研究开发了基于遗传算法的GGG磁热模块的PID参数整定, 其流程如图2.5.2-4, 实现了在较短时间内ADR系统中PID参数整定^[15]。

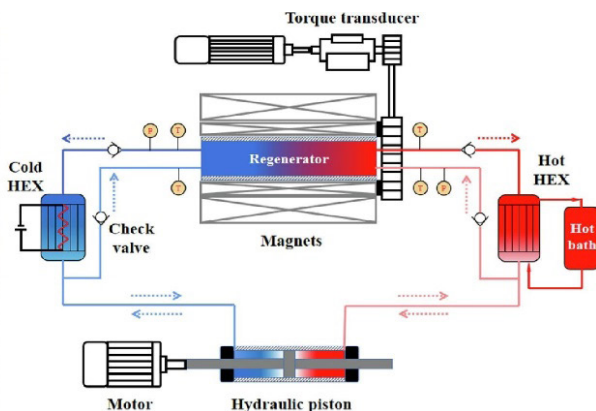
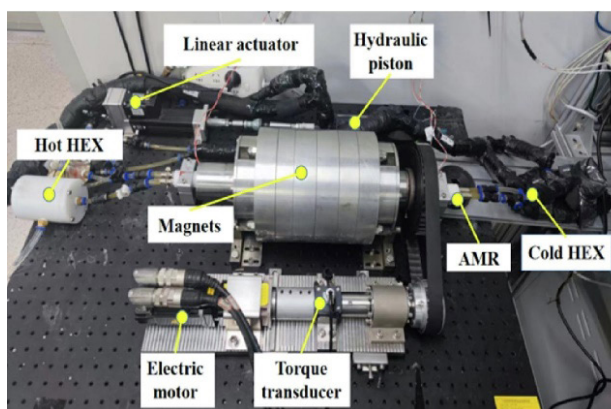


图2.5.2-1实验装置图 (左) 和原理图 (右)

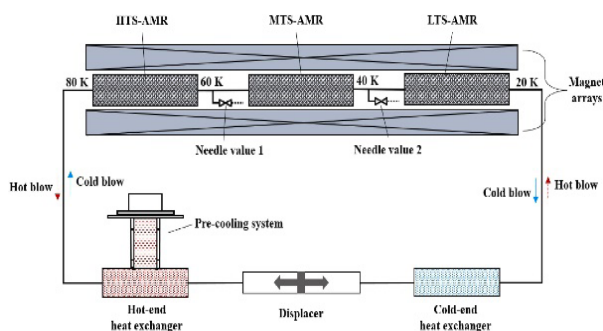


图2.5.2-2 液氢温区多级磁制冷系统流程图

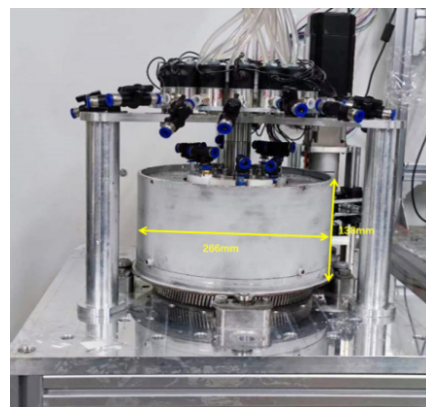
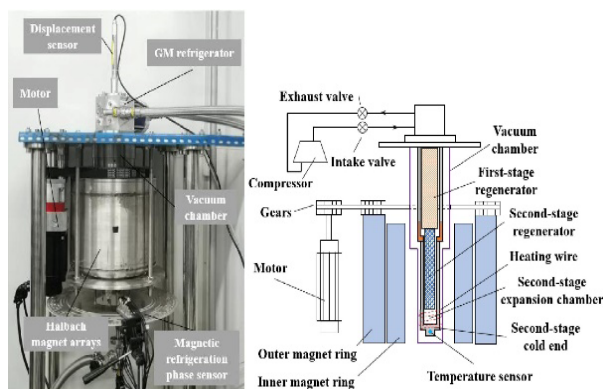


图2.5.2-5 多磁极-多回热器式磁制冷机装置



(a) photo of the hybrid refrigerator (b) schematic diagram of the hybrid refrigerator

图2.5.2-3 GM/磁混合制冷机装置（左）和原理图（右）

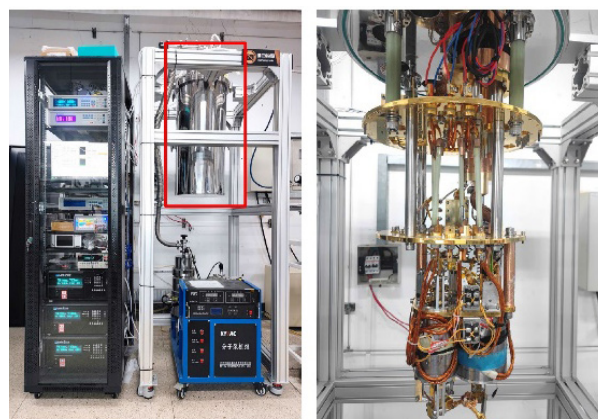


图2.5.2-6 多级ADR系统实物图

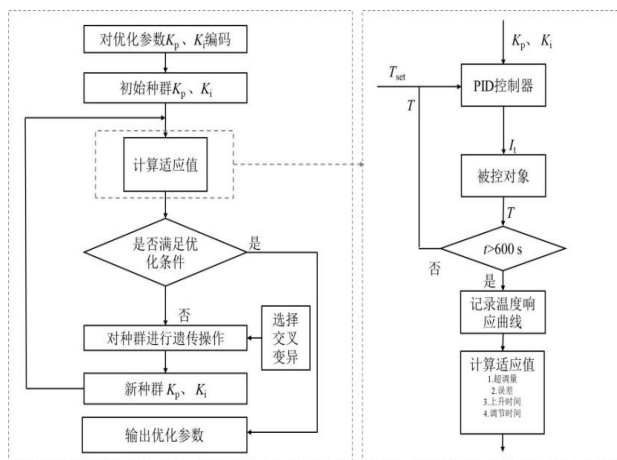


图2.5.2-4 基于遗传算法的单级ADR的PID参数整定流程图

2 整机设备

作为极具应用前景的新型制冷技术之一，磁制冷技术涉及磁学、热力学、机械、材料等多学科交叉融合，整机系统的设计理论与实验方法逐步被完善。当前室温与极低温磁制冷技术具有较好的应用前景。

在室温制冷机方面，包头稀土研究院研制了一台装配双磁回热器的室温磁制冷机。该机在 22℃ 环境温度工作时，温跨为 26 K。最大制冷功率约为 100 W，COP 为 0.45^[16]。沈俊团队通过设计两个高/低磁场区，构建了一台多磁极-多回热器式样机，如图 2.5.2-5，该样机最大空载温跨为 17.5 K，当温跨为 6 K 时，热力学第二效率为 20.2%。在 ADR 整机架构方面，沈俊团队设计并研制了一台 50 mK 多级绝热去磁制冷机，该机为三级串联架构，最低温可达 38 mK，100 mK 时制冷量约 71 mJ，温度波动仅为 10.6 μ K^[17]。随着磁制冷及其相关技术的不断迭代更新，磁制冷凭借其绿色环保稳定高效等优点，必将在制冷与低温领域占据一席之地，推动我国高、精、尖产业的发展。

参考文献

- [1] 荆华乾, 高恩元, 于志慧, 等. 2016 年度中国制冷行业发展分析报告[J]. 制冷技术, 2017, 37: 1-82.
- [2] 吴业正, 朱瑞琪, 曹小林, 等. 制冷原理及设备[M]. 西安

- 交通大学出版社, 2010.
- [3] TISHIN A M, SPICHKIN Y I. The magnetocaloric effect and its applications [M]. London: Institute of Physics Publishing, 2003.
 - [4] 李振兴, 李珂, 沈俊, 等. 室温磁制冷技术的研究进展[J]. 物理学报, 2017, 66(11): 13-29.
 - [5] HAI P, SHEN J, LI Z, et al. Influence of different magnetic field profiles on the performance of a rotary magnetic refrigerator[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219: 119561.
 - [6] CHDIL O, BIKEROUIN M, BALLI M, et al. New horizons in magnetic refrigeration using artificial intelligence[J]. Applied Energy, 2023, 335: 120773.
 - [7] CHOI J, LEE S, KIM M S. Comparative study on packing arrangement of irregular gadolinium inside active magnetic regenerators in a magnetic refrigeration system[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 280: 116779.
 - [8] ZHENG W, SHEN J, LI Z, et al. Numerical simulation of a multistage magnetic refrigeration system in the temperature range of liquid hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 51: 523-535.
 - [9] ZHENG W, SHEN J, LI Z, et al. Performance improvement of a 4K GM/magnetic hybrid refrigerator with a new magnetic regenerator[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 226: 120272.
 - [10] SERLEMITOS A T, SANSEBASTIAN M, KUNES E S. Final design of the XRS/Astro-E ADR[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1998, 43: 957-963.
 - [11] WHITEHOUSE P L, SHIRRON P J, KELLEY R L. The X-ray microcalorimeter spectrometer (XMS): a reference cryogenic instrument for Constellation-X[J]. Cryogenics, 2004, 44(6-8): 543-549.
 - [12] SHIRRON P, WEGEL D, DIPIRRO M. A continuous adiabatic demagnetization refrigerator for cooling to 10 mK and below [J]. American Institute of Physics, 2006, 850(1): 1573-1574.
 - [13] JAMES B, MARTINEZ R, SHIRRON P, et al. Mechanical design of a 3-stage ADR for the Astro-H mission[J]. Cryogenics, 2012, 52: 102-113.
 - [14] 李珂, 王亚男, 等. 基于遗传算法的绝热去磁制冷机中PID参数整定[J/OL]. 真空与低温:1-8[2024-02-21].
 - [15] YU F, ZOU A, LI K, et al. The numerical study of multi-tube passive convective heat switches[J]. Cryogenics, 2023, 132: 103688.
 - [16] GAO Lei, WANG Pengyu, GUO Yaru, et al. Performance study of a double-regenerator room temperature magnetic

refrigerator with 26°C temperature span[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 148: 143-151.

- [17] 李珂, 王亚男, 刘萍等. 50 mK多级绝热去磁制冷机的实验研究[J]. 物理学报, 2023, 72(19):37-44.

2.5.3 弹热制冷

钱苏昕

(西安交通大学)

在寻找低GWP替代制冷剂的道路上, 考虑到固体不会挥发, 具有零GWP、可绿色回收、安全无毒、内禀高效特性的固态相变制冷近年来受到了广泛关注, 已成为制冷领域的科学前沿。其中, 弹热制冷 (elastocaloric cooling) 可利用现有的商用级材料, 具有高导热率、高制冷能量密度、高效率等突出优势, 在液氮至室温的宽温域具有潜在的应用价值。

弹热制冷使用应力驱动固态工质在两种 (及以上) 不同晶格结构之间发生准可逆相变, 使用固态结构相变过程的潜热进行制冷: 加载应力时, 释放潜热, 固态工质温度升高; 卸载应力, 吸收潜热, 固态工质温度降低。当加载/卸载应力的过程绝热时, 固态工质的温度变化被称为绝热温变^[1]。商用级镍-钛二元合金弹热工质的绝热温变可达20 K以上, 制冷效应显著。使用中空结构的弹热工质, 在液态传热流体交变流动与周期性加、卸载的作用下, 可产生远超过工质绝热温变的制冷系统温差。一般将中空结构液-固换热的弹热工质与内部传热流体、外部围护结构构成的关键部件称为弹热回热器 (elastocaloric regenerator); 与低温制冷机中的回热器不同, 弹热工质可在回热器内产生热量, 因此也被称为主动弹热回热器。本文简称为弹热回热器。

目前, 弹热制冷的研究集中在室温。经历了10年的发展, 弹热制冷机的多项关键技术2023年取得了突破, 制冷性能在2023年取得了显著进展, 最大制冷量达到200 W以上, 最大制冷温差可达50 K, 已达到部分应用场景的需求, 展现出了在空间站等特种应用的优势和潜力。本节重点介绍弹热制冷在2023年取得的关键研究进展, 并展望弹热制冷的应用前景。

1 关键研究和 技术进展

1) 基于低成本、低应力高分子弹热工质的首个弹热回热器

高分子材料，例如天然橡胶，具有10 K以上的绝热温变，虽然制冷效应低于合金，但所需的应力比合金低一个数量级，成本比合金低多个数量级，如能大规模应用，可极大地提升弹热制冷的竞争力。2023年，法国里昂大学报道了首个基于高分子弹热工质的弹热回热器。该回热器使用了19~55根厚度为0.3~0.45 mm的天然橡胶管，仅需24 MPa驱动应力（镍-钛合金需要500 MPa以上），工质即可产生10 K左右的绝热温变。受限于天然橡胶的导热系数和大应变所需的驱动时间，弹热回热器在0.1 Hz运行频率下，获得了10 K的最大制冷温差和1.5 W的最大制冷功率密度。尽管该回热器尚未发挥出回热效果，制冷性能有限，但使用商用级低成本天然橡胶管和极低驱动力的微型驱动

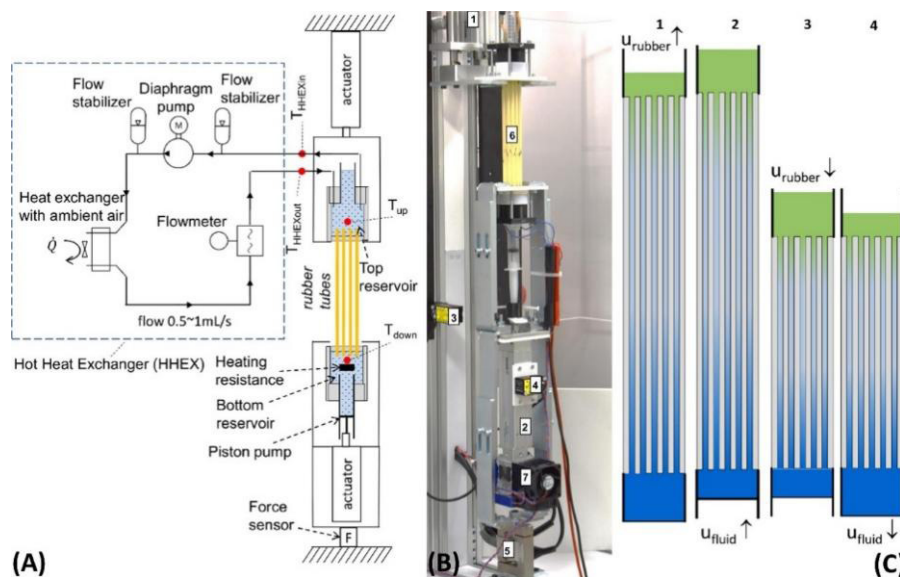


图2.5.3-1 首个使用天然橡胶的弹热回热器及其制冷性能测试平台^[2]

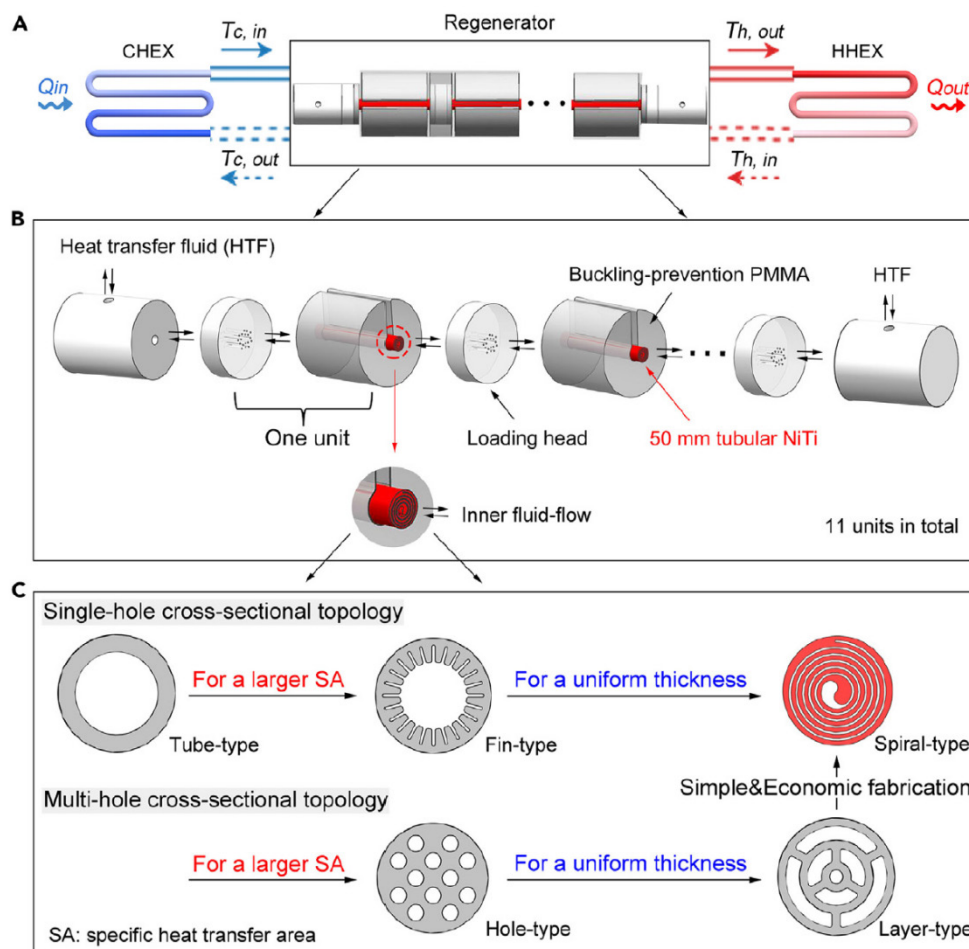


图2.5.3-2 管状微通道结构拓扑优化构建的弹热制冷系统（A）、弹热回热器（B）及弹热工质横截面（C）^[3]

器即可构建结构紧凑的弹热制冷系统，展示出了巨大的应用潜力，丰富了现有的以合金为主的弹热回热器研究范畴。

2) 微通道结构拓扑优化构建的高比表面积合金弹热回热器和弹热制冷系统

弹热回热器内的对流传热流型普遍为层流，在边界层充分发展后，传热系数受限。针对该问题，香港科技大学提出了通过降低流道厚度减少边界层厚度的思路，不仅可以提高对流传热系数，还能显著增加流-固对流传热面积，可综合提高弹热回热器的传热性能和制冷性能。通过高精度线切割工艺，该团队在柱状弹热工质内部加工了厚度为0.15 mm的阿基米德螺旋线型微通道流道，采用了马里兰大学提出的轴向压缩管状弹热工质、轴向流动换热、径向约束的结构设计，并沿用了马里兰大学提出的内插构件减小线切割流道中心区域死体积，构建了多层弹热回热器，并匹配直线电驱动器，搭建了单回热器的弹热制冷系统（图2.5.3-2）^[3]。受益于螺旋线型微通道流道的优异传热性能，弹热制冷机获得了50.6 K的制冷温差（新的世界纪录）和203 W的制冷量，弹热回热器内的制冷功率密度达到了1.75 W/g，已达到与现有蒸汽压缩制冷的制冷功率密度相接近的水平。巧妙使用线切割工艺、通过结构拓扑优化改善传热性能，从而提高系统制冷性能，为弹热制冷的进一步发展指明了新的发展方向。

3) 传热流体管网可切换的多模式弹热制冷系统

马里兰大学和西安交通大学发现了利用因子决定了管束工质中弹热效应两种释放途径的比例，其中一部分弹热效应可被传热流体带走用于制冷，而另一部分弹热效应需要留在管束工质内部，用于维持工质在传热流体流动方向的温度梯度，而最佳利用因子反映了两两者之间的竞争关系。主动回热循环需要更多的弹热效应维持温度梯度，最佳利用因子在0.6左右；单级循环可将大部分弹热效应用于制冷，最佳利用因子大于6。为了充分发挥单级循环和主动回热循环在不同工况下的优势，双方联合研制了多模式弹热制冷机（图2.5.3-3）^[4]，通过传热流体网络的自动切换，在小制冷温差条件下采用较大的利用因子运行单级循环，在大制冷温差需求时运

行小利用因子的主动回热循环，显著拓展最佳利用因子的范围，使其可在大范围工况变化时保持高效率，因此成功实现了260 W的制冷量（新的世界纪录）和22.5 K的制冷温差。该系统首次将弹热制冷的综合制冷性能做到了与现有主流磁制冷系统相同的水平，为弹热制冷的发展提供了新的思路。

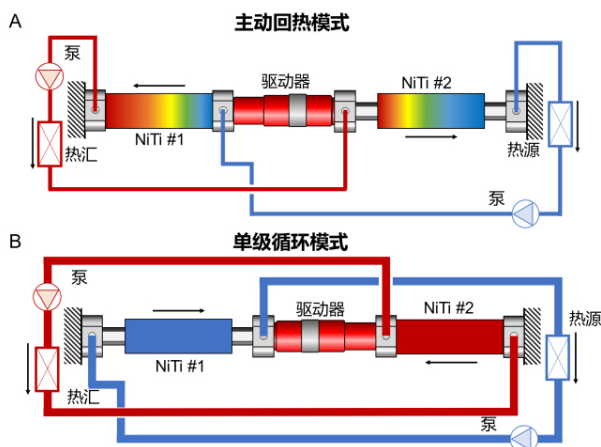


图2.5.3-3 多模式弹热制冷机：（A）主动回热模式；（B）单级循环模式^[4]

2 整机设备

2021年爱尔兰Exergyn公司宣称的60 kW级弹热热泵仍然在研，进展于2023年6月在德国举办的首届弹热制冷大会报道，尚无制热性能的实测数据。

弹热制冷系统使用低压单相流体进行换热，对重力不敏感，无泄漏风险；弹热回热器采用模块化设计，方便拆卸维护；弹热工质具有内禀高效（90%热力完善度）的特性，因此，使用现有管状弹热回热器技术的弹热制冷冷水机组即可直接部署，以香港科技大学的性能数据为例^[3]，模块化的弹热回热器可提供最大50 K的制冷温差或在25 K制冷温差提供100 W的制冷量，单个回热器已可满足冷藏甚至冷冻的制冷需求，多个模块化弹热回热器组合使用，可提供更宽广的制冷性能包络线，满足空间站日益增长的特种制冷需求。如能在对成本不敏感的天基制冷率先得到应用，还能降低相关产业链成本，特别是弹热工质（目前属性是医疗器械，极高溢价）和电驱动器（大推力小位移，目前需要定制）的成本，有望为民用化做好铺垫^[5]。

另一方面，弹热工质既是制冷剂，也可作为

蓄冷剂，具有高导热系数、高储能密度两点核心优势，在对体积敏感但对质量特别敏感的场景有望得到应用。例如，使用弹热工质作为汽车座椅在启动前预冷或预热的储热装置^[6]。

参考文献

- [1] QIAN S. Thermodynamics of elastocaloric cooling and heat pump cycles[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219: 119540.
- [2] SEBALD G, LOMBARDI G, et al. High-performance polymer-based regenerative elastocaloric cooler[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 223: 120016.
- [3] ZHOU G, ZHU Y, YAO S, et al. Giant temperature span and cooling power in elastocaloric regenerator[J]. Joule, 2023, 7(9): 2003-2015.
- [4] QIAN S, CATALINI D, MUEHLBAUER J, et al. High-performance multimode elastocaloric cooling system[J]. Science, 2023, 380(6646): 722-727.
- [5] WANG Y, LIU Y, XU S, et al. Towards practical elastocaloric cooling[J]. Communications Engineering, 2023, 2(1): 79.
- [6] LU Y, QIAN S, SHEN J. A fully solid-state cold thermal energy storage device for car seats using shape-memory alloys[J]. Frontiers in Energy, 2023, 17: 504-515.

2.5.4 电卡制冷

钱小石

(上海交通大学)

电致熵变在宏观上表现为温度或热的变化。这种电热转变的效应称电卡效应，其独特优势是直接的电驱动，具有极低的不可逆损失、碳排放和高的理论循环效率。电卡器件也具有小型化、可穿戴的潜力。2006年（无机）和2008年（有机）巨电卡效应发现至今，电卡已发展为一种颇具潜力的新型高效制冷技术，且在一些特种领域作为传统技术的补充替代有着优秀表现。

1 关键研究和技术进展

电卡材料的发展一是追求同等场强下更高的电卡，二是拓宽材料的工作温区。

高电卡强度可在保持制冷能力时降低驱动场强，提高器件寿命。上海交大研究团队发现在

PVDF-TrFE-CFE材料中引入少量C=C双键能够大幅提高电卡强度，实现低场强下的巨电卡，从而将制冷循环提高到超百万次（图2.5.4-1）。LIST（卢森堡）研究团队在B位高有序的钽铌酸铅中发现了3.7 K/40 kV cm⁻¹的巨电卡效应，其电热转换效率超100倍。福建物质结构研究所团队在有机钙钛矿[(CH₃)₂CHCH₂NH₃]₂PbCl₄中发现了11.06 K/29.7 kV cm⁻¹的巨电卡效应。上海交大研究团队通过牺牲多元醇保留活性界面，在PVDF-TrFE-CFE体系中实现了100 J/(kg·K)的大电卡熵变（图2.5.4-2）。

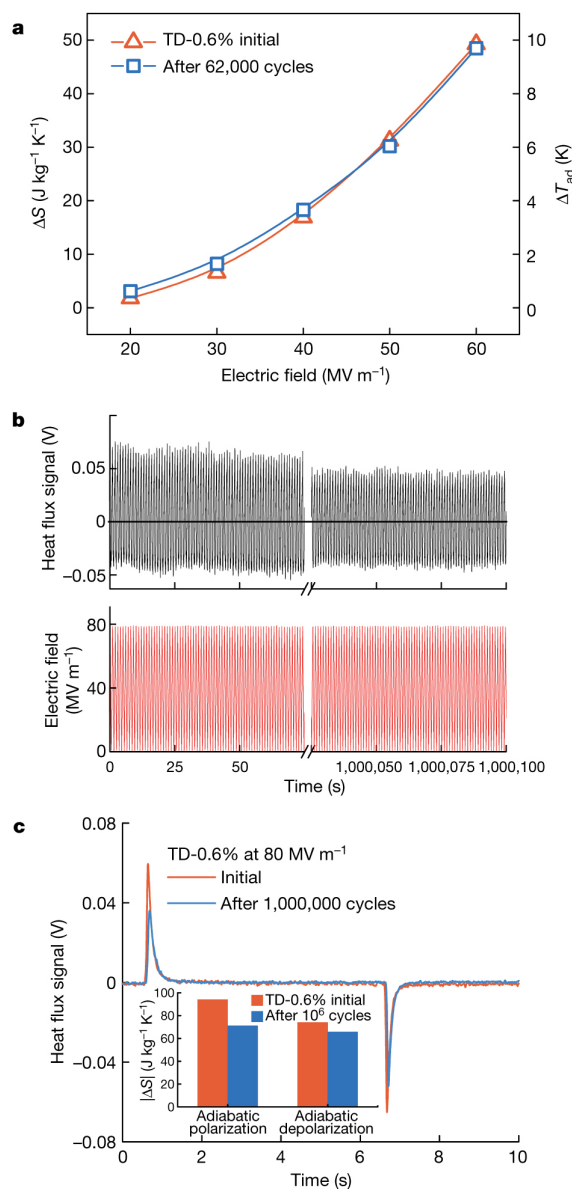


图2.5.4-1 高熵聚合物的低场巨电卡效应实现百万次循环

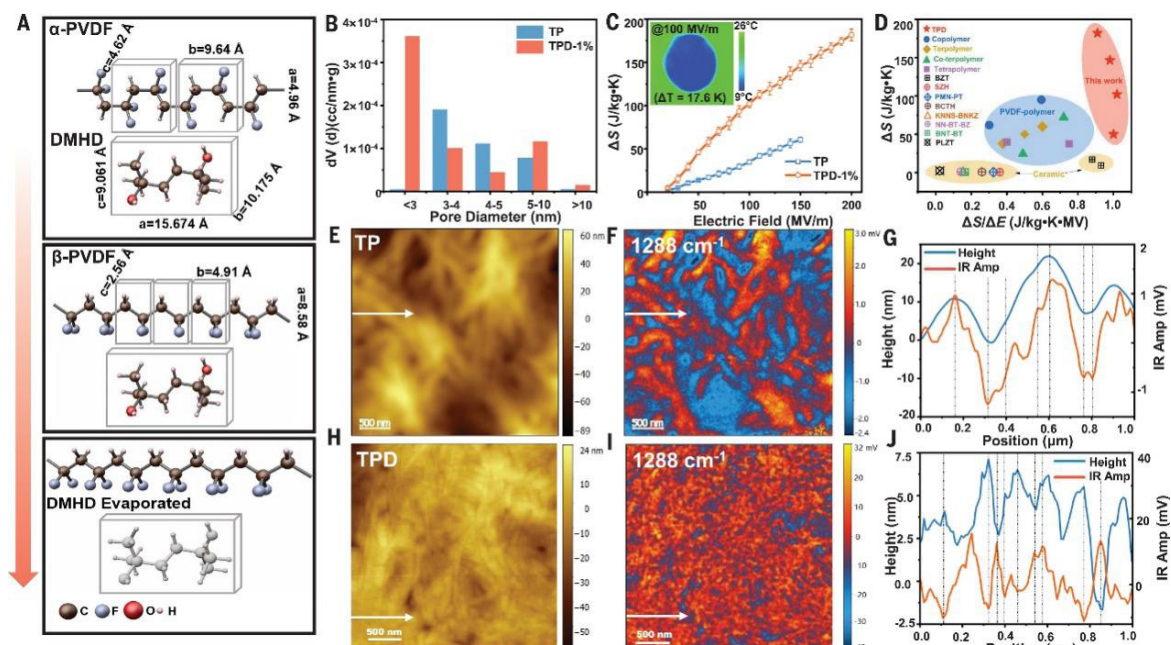


图2.5.4-2 牺牲多元醇仅保留活性界面增强电卡效应

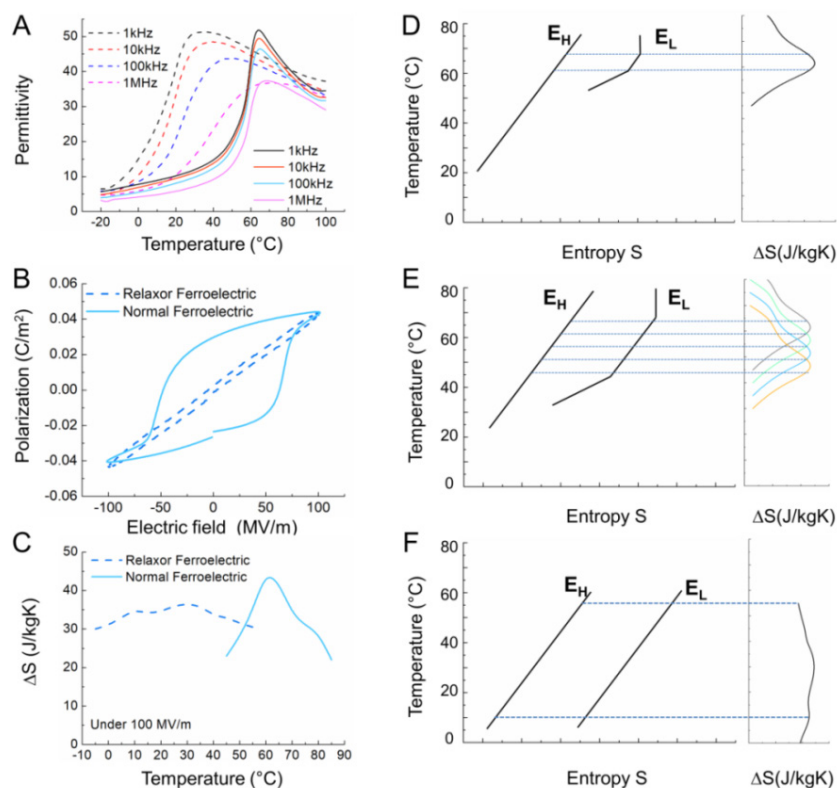


图2.5.4-3 铁电体和弛豫铁电体的介电性质，可以形成不同的循环。(A-C)法向铁电体和弛豫铁电体的温度依赖性介电常数谱(A)、电滞回线(B)、电卡温变依赖特性(C)，其中实线和虚线分别表示铁电体和弛豫铁电体。(D-E)单级(D)和级联多级电卡工作体(E)的热力学循环示意图。(F)单级弛豫铁电材料的热力学循环，可覆盖室温温区。

有机无机复合也可以改善电卡聚合物性能。上海交大研究团队通过复合改性六方氮化硼在保持高电卡强度的同时改善了电卡聚合物的导热。该团队的另一项研究也证明了低介电纳米填料提高电卡聚合物性能的作用。

电卡材料通常是温度敏感的，目前解决方案是用不同工作温度的材料级联来加宽工作温区（图2.5.4-3E）。

弛豫铁电体具有较大的电卡效应和较小的温度

依赖（图2.5.4-3A-C）。弛豫相的亚稳性可将巨电卡扩展到更大温区（图2.5.4-3D-F）。与铁电体相比（图2.5.4-3D），弛豫体的两个热力学等场过程在较宽的温区中互相平行（图2.5.4-3F），应用潜力大。四川大学研究团队就在 NaNbO_3 基弛豫铁电体的工作获得了宽的有效温区。

利用界面作用，材料本身的叠层级联也能实现大工作温区。北科大研究团队的工作在钛酸钡叠层陶瓷中就实现了57 K的宽温区（图2.5.4-4）。

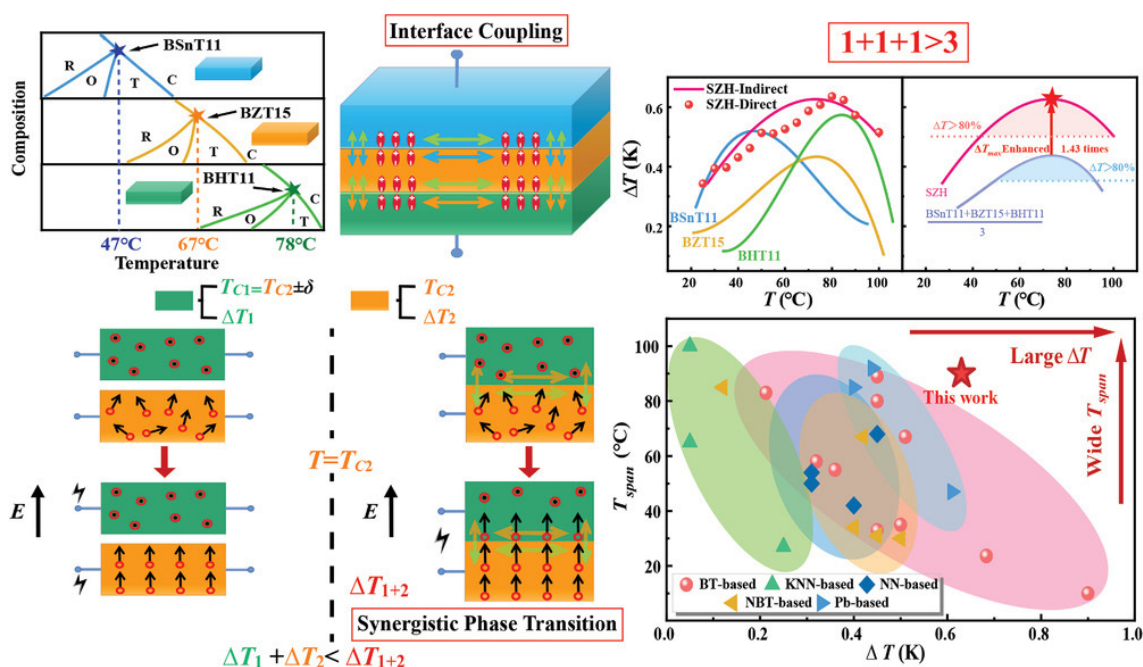


图2.5.4-4 钛酸钡基叠层陶瓷实现了大温区电卡增效

2 整机设备

电卡制冷器件的设计与原型机介绍。近3年，材料的进步让器件研究加速。UCLA（美国）研究团队开发的电吸附式电卡器用3 K绝热温变的材料在四层级联下实现了空载 8.7 K的制冷温差（图2.5.4-5）。PARC（美国）研究团队通过往复接触实现了5.2 K的制冷温差，其热流密度达135 MW/cm²（图2.5.4-6）。LIST（卢森堡）研究团队也在液态换热电卡器中得到了13.0 K的制冷温差（图2.5.4-7）。该团队开发的双循环电卡热泵可达到20 K的温差或产生4.2W的制冷功率密度（图2.5.4-8）。

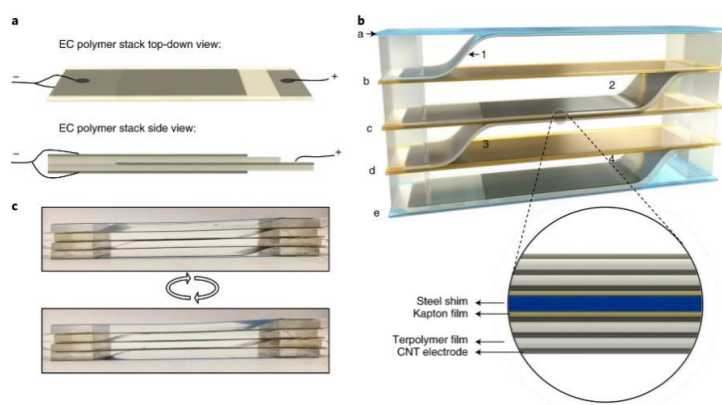


图2.5.4-5 叠层级联柔性电卡器件实现8.7 K制冷温差

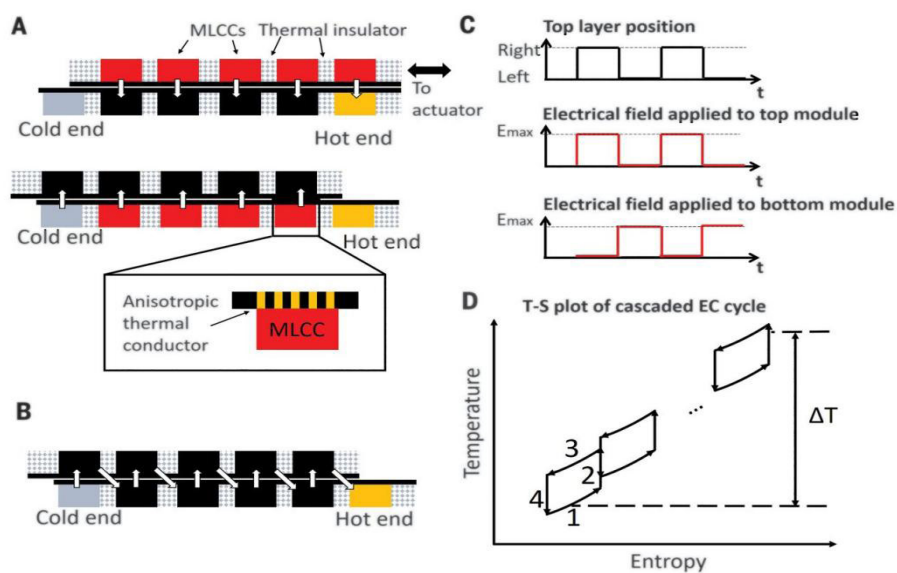
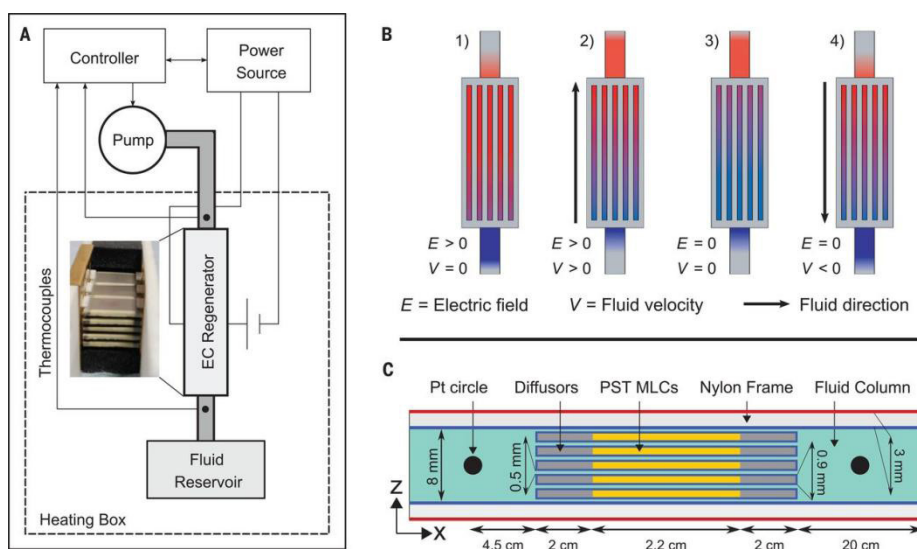
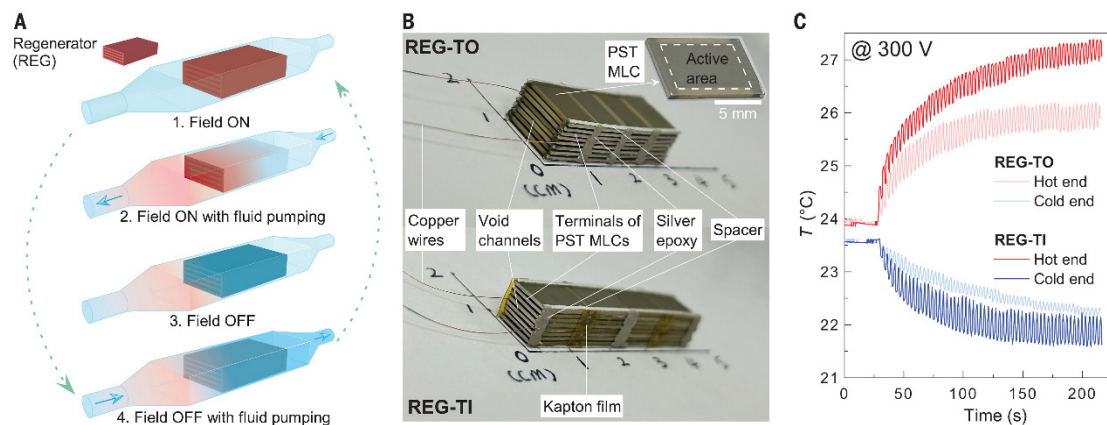
图2.5.4-6 钽铌酸铅多层电容器器件实现 135 MW/cm^2 的热流密度图2.5.4-7 液态换热电卡制冷器件实现 13.0 K 的制冷温差

图2.5.4-8 双循环电卡热泵器件

将工质基底与回热介质通道堆叠构成电卡回热器可以使只有1 K绝热温变的工质产生3.3 K的制冷温差（图2.5.4-9A）。2017年UTRC（美国）研究团队也成功开发了类似回热器，其能够达到14 K的制冷温差（图2.5.4-9B）。

多层电容器（MLC）结构可显著降低驱动电

压。PSU（美国）研究团队报道了一系列MLC结构的电卡器件，在仿真中功率密度达9 W/cm³（图2.5.4-9C）。此外该团队从模拟和实验两方面论证了一种旋转结构电卡回热器（图2.5.4-9D）。

通过电致伸缩或静电力与热效应的耦合，可以设计出无外电机的电卡器。研究者展示了电卡作为可穿戴热管理器件使用的可行性（图2.5.4-9E-F）。

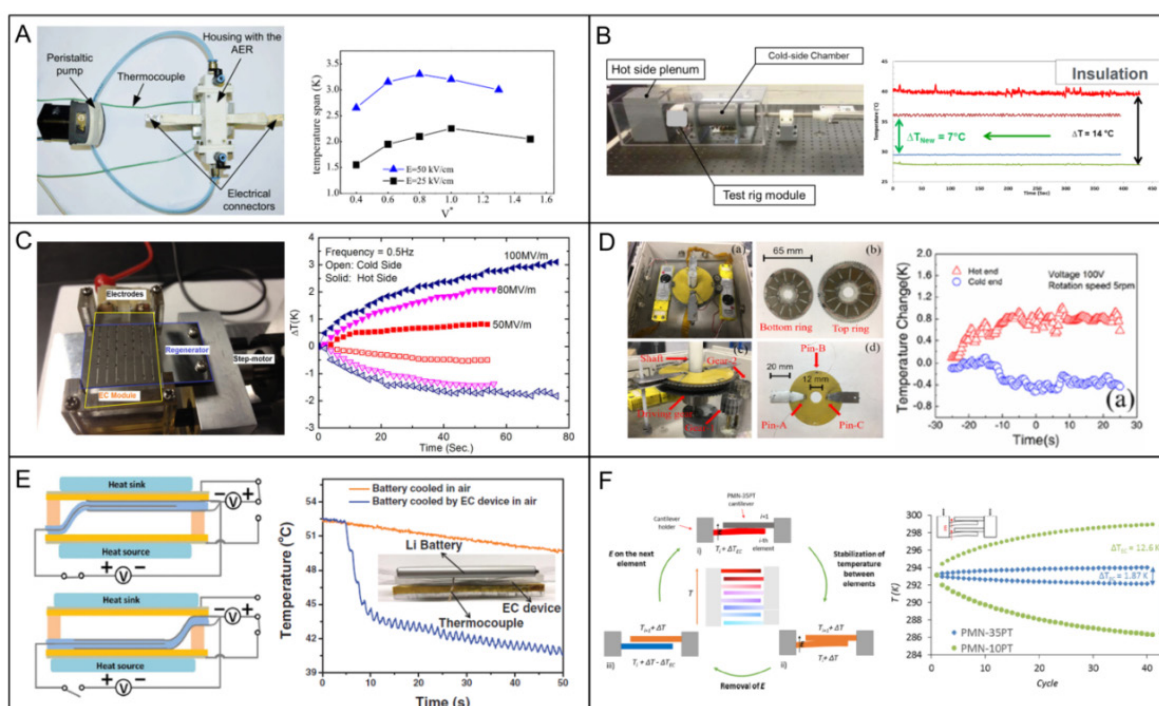


图2.5.4-9 最近报道的一些电卡制冷器的设计和原型机

南开大学团队进一步利用光伏供电可穿戴电卡器件，将人舒适温区从22~28℃扩展到12.5~37.6℃（图2.5.4-10）。

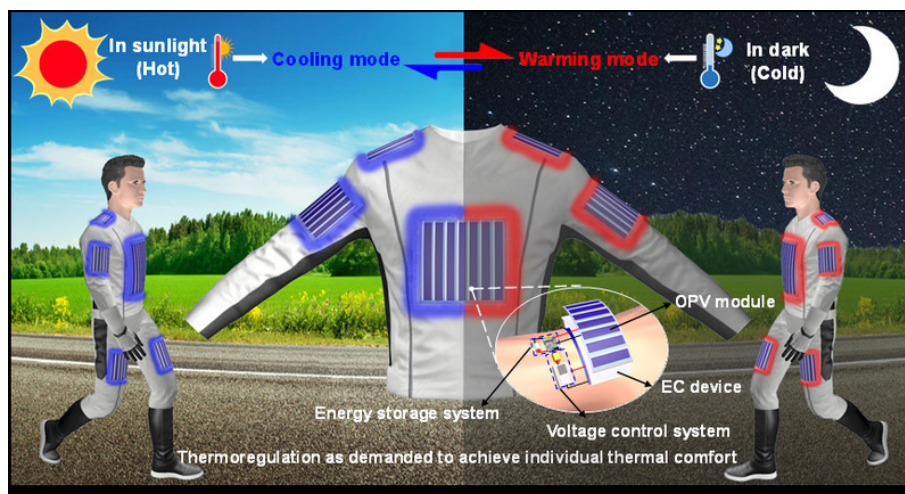


图2.5.4-10 光伏供电的可穿戴电卡器件

2.5.5 空气制冷

马国远 荣维来 许树学

(北京工业大学)

空气制冷是采用空气作为工质的一种制冷技术，空气具有安全、环保、无毒、不燃等优点。空气制冷循环又称逆布雷顿循环，主要由压缩机、高温换热器、膨胀机和低温换热器组成，系统循环包括等熵压缩、等压放热、等熵膨胀及等压吸热4个基本过程，其工作过程为：空气在压缩机中压缩，经高压换热器冷却放热，冷却后进入膨胀机膨胀降压降温，同时膨胀机对外做功，低压冷空气在低压换热器中吸热，再次进入压缩机。空气制冷系统可以将冷风直接送入用冷空间，省去低压换热器，可以分为开式系统和闭式系统^[1]。如图2.5.5-1所示。

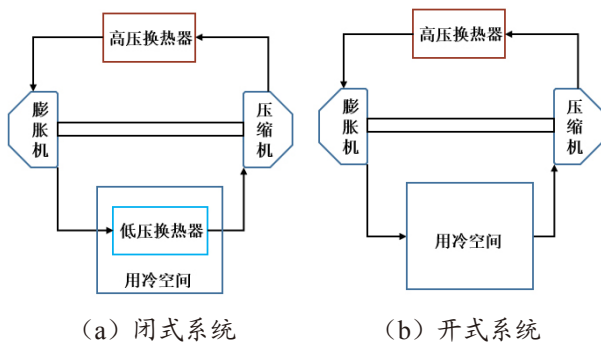


图2.5.5-1 空气制冷原理

1 关键研究和技术进展

1) 关键研究

(1) 在飞机空调中的研究

张明等^[2]对飞机中采用电动压气机驱动增压引气系统进行了研究，建立了供气系统数学模型，并在Simulink仿真平台上仿真计算了压气机实际功率，同时在相同工况下，仿真对比了电动压气机引气和发动机引气系统的性能损失，结果表明环控系统采用电动压气机驱动增压引气较发动机直接引气可以减少发动机推力的损失，降低油耗。

石旭东等^[3]对飞机空调系统的空气循环机性能及动态变化规律进行研究，通过AMESim-Simulink联合的方式实现仿真，研究空气循环机的制冷量、发动机冲压功、发动机压缩功三个参数的变化规律，

分析参数变化对空气循环机性能系数的影响，飞机引气系统和空气循环机模型结构设计图如图2.5.5-2所示。结果表明：制冷量在飞行工况中变化很小，且发动机冲压功数值最小，同飞机飞行高度和飞行马赫数变化趋势一致；而发动机压缩功数值最大，同飞机飞行高度和飞行马赫数变化趋势相反，对系统制冷系数的影响最大；制冷系数在飞机爬升阶段增大，在下降阶段降低，在滑行、起飞、巡航、进近和着陆阶段几乎不变。

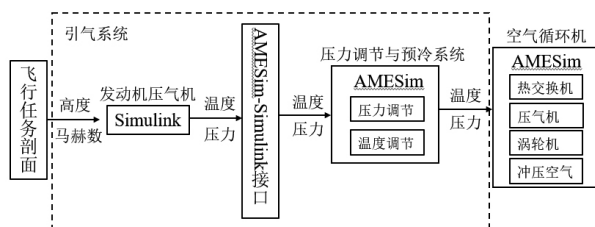


图2.5.5-2 飞机引气系统和空气循环机模型结构设计图

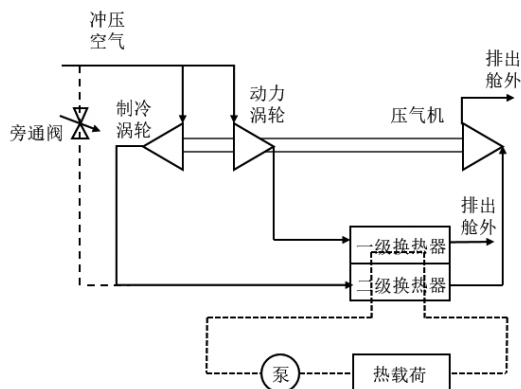


图2.5.5-3 TTC双涡轮并行制冷环控系统原理图

王超等^[4]研究了一种改进型的动力涡轮驱动的冲压空气循环吊舱环控系统，该系统采用双涡轮并行制冷技术体制，结合试验与仿真分析研究系统制冷性能，TTC双涡轮并行制冷环控系统原理图如图2.5.5-3所示。高温冲压空气经动力涡轮、制冷涡轮膨胀制冷后，动力涡轮出口低温空气进入一级空液换热器与被电子设备加热的高温液体进行热交换，从一级空液换热器出来的高温空气直接排出舱外；制冷涡轮出口低温空气进入二级空液换热器与被电子设备加热的高温液体进行热交换，从二级空液换热器出来的高温空气进入与涡轮同轴的压气机，通过压气机增压后排出舱外；从空液换热器出来的低温液体通过供液泵送入电子设备，把电子设备所产生的热量带走。结果表明：双涡轮制冷系统制冷量比

传统制冷系统增加20%以上，高空飞行状态下制冷量增加60%以上；在飞行高度为10km、飞行马赫数为0.4~1.0时，随着马赫数的升高，制冷系统制冷量先升高后降低，在马赫数为0.9时，系统制冷量最大；当马赫数为0.75、飞行高度为0~15km时，随着飞行高度的升高，制冷系统制冷量先升高后降低，在飞行高度为6km时，系统制冷量最大。

(2) 在低温冷库的研究

空气制冷机极易制取低温，并在很宽的冷却负荷和低温运行工况范围内具有优良的性能，特别适用于需要低温和工况条件变化较大的场合。

现代食品冷冻和冷藏工艺有不断向低温方向发展的趋势，根据不同的食品和不同的冷冻或冷藏工艺要求，要求库温在-100~0℃大范围内可调节，并要求制冷系统长期在-30℃以下运行，空气制冷系统在低温下宽温度范围内运行性能优良，工质无臭无害和制冷速度快的特性使其非常适合于食品的冷冻冷藏。A. M. Foster等^[5]介绍了一种闭式空气循环食品冷冻和食品加热的装置，借鉴了飞机空调中的增压透平膨胀机，该装置增加了一台并联压缩机，压缩机出口温度最高可达234℃，最低可达-140℃。测试得压缩机等熵效率在0.66~0.77，在压比为1.6时，压缩机的最大设计效率为0.83；测试得涡轮机等熵效率在0.7~0.77，在压比为3时，涡轮机的最大设计效率为0.81，在压比为4时效率为0.84。

(3) 与蒸发冷却系统复合的研究

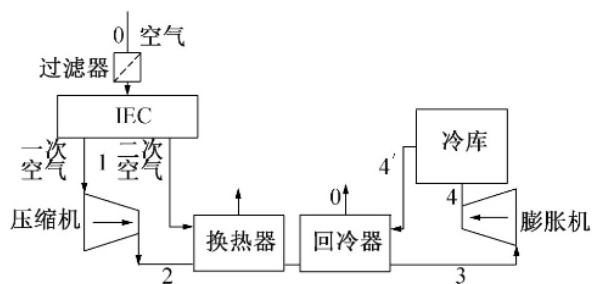


图2.5.5-4 新型空气制冷循环流程图

王鹏等^[6]研究了一种与露点间接蒸发冷却器耦合的冷库用新型空气制冷循环，循环流程图如图2.5.5-4所示。该循环将间接蒸发冷却器与空气制冷循环相结合，通过IEC（间接冷却器）对一次空气的预冷作用，减少空气制冷负荷，并利用二次空气冷

却压缩机出口工质，提高空气制冷的性能。结果表明：配置露点间接蒸发冷却器的新型空气制冷循环的性能在设计工况下最大COP可提高37.8%。

2) 技术进展

与传统制冷系统不同，对于逆布雷顿循环来说，可以通过回收气体膨胀功以提高循环效率的潜力。与往复机械相比，旋转机械具有显著优势。压缩机和膨胀机的效率对系统性能至关重要。循环中经常采用离心式压缩机和透平膨胀机来增加紧凑性和效率，离心式压缩机用于回收透平膨胀机的输出功。因此，压缩机膨胀机在压力、质量流量、转速和功方面存在耦合特性，它们的参数会相互影响^[7]。因此众多学者对压缩膨胀机、涡轮增压器的设计、效率提升和耦合等进行了研究。

陈双涛等^[8]对一体化压缩膨胀机进行了试验和分析。压缩膨胀机由膨胀机和压缩机组成，耦合在一起并直接相互作用。测试了其总效率以及膨胀机的膨胀、压缩机的预压缩之间压降的影响。对耦合参数进行了分析，对于TEC应首先充分利用膨胀机的效率，其次是压缩机的压力比。通过实验测试耦合性能，实验图如图2.5.5-5所示，结果表明：其总效率可以达到67.2%，同时回收效率可以达到22.3%。

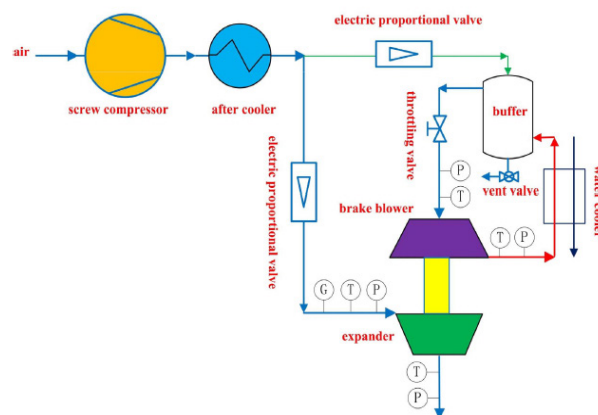


图2.5.5-5 带制动鼓风机的涡轮膨胀机试验台

杨晓玲等^[9]通过数值模拟对循环中的压缩机和透平膨胀机进行建模，研究了室温应用中开环空气循环的特性。基于压缩机和膨胀机的耦合特性，建立了系统模型，并以实验验证了一级压缩比和膨胀机入口温度对制冷机性能的影响。通过与实验的对比验证了系统模型的准确性，对产品化来说，制冷系

统的小型化是势在必行的。

陈学康等^[10]研究了涡轮增压器作为绝热机械的内部传热过程和热力学行为，特别是在低环境温度场景（如高原）。基于传热的基本原理，结合发动机的几种可能的低温情况，估计了两级涡轮增压器的内壁温度，揭示了两级涡轮增压器空气动力学参数和热力学过程的热敏感性。评估了两级涡轮增压器整体和部件中的流量功率损失，最大流量发挥损失（包括熵生成和热发挥损失）接近50%。虽然两级汽轮机的绝热效率在80%以上，但最大发挥效率仍低于15%。低压涡轮增压器的热能损失约为高压涡轮增压器的1.3倍，这表明蜗壳和级间管道需要更多的绝热保护措施。Christopher Fuhrer等^[11]开发了一种新的径向涡轮增压器优化方法，该方法允许针对多个设计目标进行优化。一方面，该模型旨在捕捉最重要的几何形状和设计特征，另一方面，它可以灵活地用于各种机器。基于替代模型的遗传算法用于优化几何形状，包括效率、耐久性（HCF）、低周疲劳（LCF）、惯性和质量。

Giovanni Tanda等^[12]研究了涡轮增压器的压缩机内部传热对其效率的影响，针对不同的入口压力、质量流量和压缩机转速进行了评估。红外热像法已被用于评估从涡轮机到压缩机的热传递速率，并对测量的压缩机非绝热效率进行校正。通过在准绝热条件下进行额外的测量，验证了该方法的有效性，避免了由于传热导致的性能图失真。提出了预测内部传热的简单关系式，并与实测值进行了验证。结合涡轮增压器压气机性能，概述了研究结果的实际意义。

2 整机设备

1) 空气制冷处理电镀废水研究

用于电镀废水处理的布雷顿制冷空气循环可以实现100%的水回收，Lu等^[13]开发了一种改进的带再热器的布雷顿制冷空气循环和一种改进型太阳能集热器的布雷顿冷冻空气循环用于电镀废水处理，可以避免膨胀过程中的湿空气冷凝。对于这两个新系统，由于太阳能收集器或再热器用于加热冷却器出口的空气，因此在膨胀过程中没有空气冷凝。

使用太阳能收集器（BRAC-SC）处理电镀废水

的布雷顿制冷空气循环如图2.5.5-6所示。在喷雾干燥塔中，电镀废水通过泵从溶液罐输送到喷雾干燥塔进行喷雾，然后液滴在塔中与干燥空气混合。当混合物流到塔底时，会发生热量和质量交换，导致空气温度下降，空气湿度增加，电镀废水被分离。最终，混合物在塔底和袋式过滤器中分离成潮湿的空气和金属盐颗粒。当废水在喷雾干燥塔中蒸发和分离时，高温干燥空气变成低温潮湿空气。然后，塔出口的湿空气被压缩、冷凝、膨胀和加热，低温湿空气转化为高温干空气，循环至结束。

回热器利用压缩机出口的高温空气对冷凝除湿后的空气进行加热。增加太阳能收集器以加热冷却器出口处的空气，并且使用再热器来提高太阳能收集器入口处的空气温度并降低冷却器入口处的空气温度，以确保膨胀过程中不会出现空气冷凝。太阳能收集器用于控制冷却器出口处的空气温度，并避免塔入口处的空气温度受到影响。

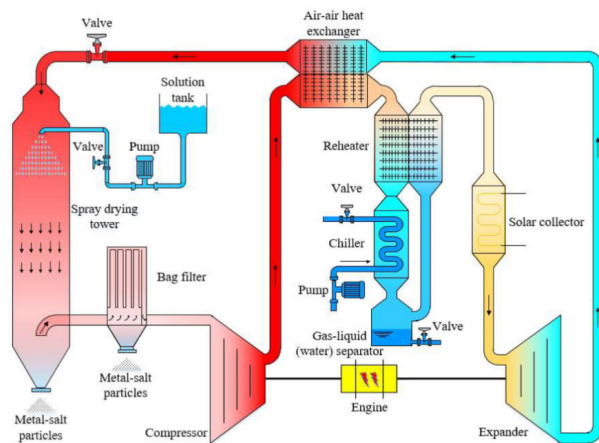


图2.5.5-6 使用太阳能集热器处理电镀废水的空气制冷循环

利用再热器和太阳能集热器对冷水机组出口的空气进行加热，可以有效避免空气冷凝对膨胀机造成的危害。

2) 热泵

空气循环热泵在低温下有一定的优势，随着室外环境温度的下降，空气热泵系统COP下降很小，空气循环热泵系统在低温环境应用中更具竞争力。

带有涡轮增压器和两个鼓风机的空气循环热泵

的装置如图2.5.5-7所示^[14]。它主要由两部分组成，包括空气循环部分和供热部分。装置主要包括一个电机涡轮增压器、两个鼓风机、两个热交换器、管道和阀门。其中一个热交换器（即回热器）位于压缩机的前部，以预热来自外部的空气，因为空气作为工作流体可以对环境开放。这种热交换器具有低的压力损失和更好的传热性能。为了提高涡轮增压器的入口温度，空气在回热器中预热，然后直接进入鼓风机，从而可以去除蒸发器。另一个热交换器用于加热与传统蒸汽压缩热泵中的冷凝器相等的供水。一台鼓风机安装在压缩机的前部，用于启动系统，另一台鼓风机用于提供背压。为了提高涡轮增压器的效率，为鼓风机制作了热回收装置，如图2.5.5-7a所示。涡轮增压器的压缩机和涡轮的流速不

同，使用一台鼓风机的再生空气循环热泵，涡轮增压器在低效条件下运行，装置使用了两台鼓风机作为驱动设备，以满足涡轮增压器所需的流量。

3) 空调

采用开式逆增压循环的全新风家用空气制冷系统装置如图2.5.5-8所示^[15]，该装置主要分为两个回路：制冷回路和送风回路。两回路在换热器进行热交换，在室内侧进行空气交换。制冷回路中，高速电机带动同轴的压缩轮和膨胀轮，室内侧的常压空气进入膨胀机膨胀至负压产生冷量，并输出膨胀功至压缩轮，膨胀至负压的低温空气进入换热器为送风回路的空气提供冷量，恢复常温后进入离心压缩机增压，达到常压后排至室外侧。送风回路直接

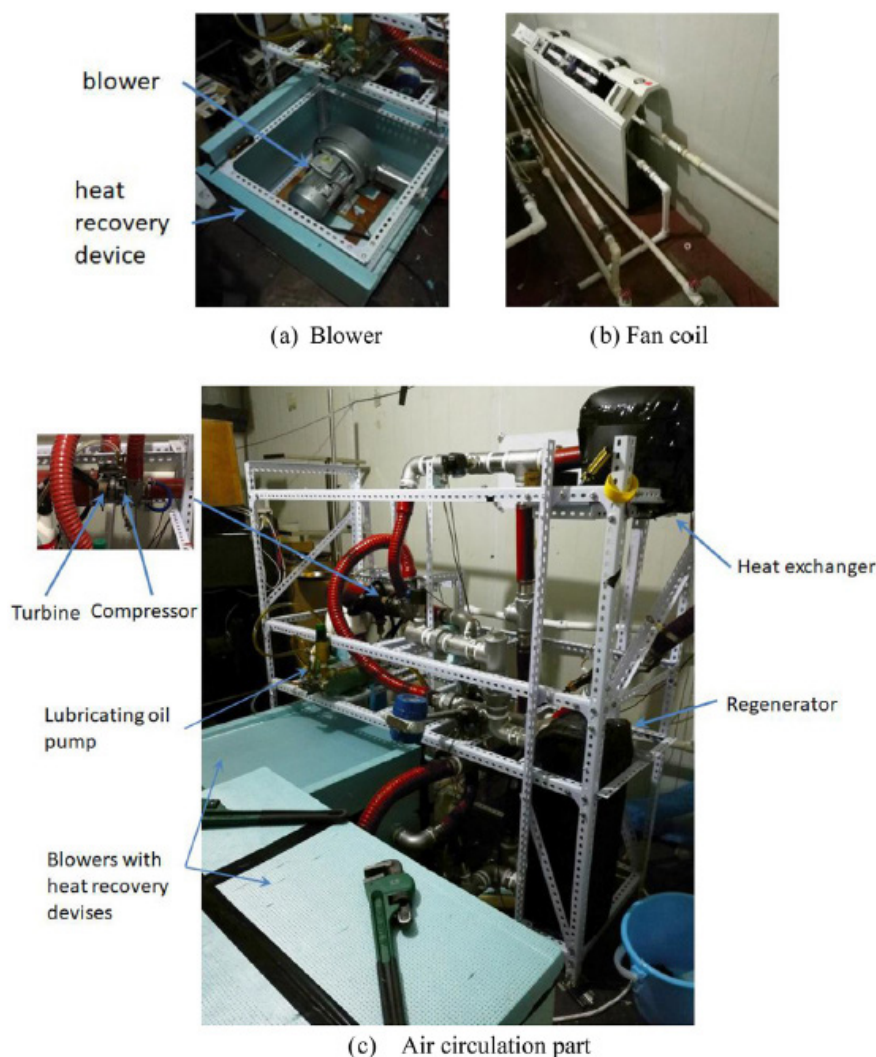


图2.5.5-7带有涡轮增压器和两个鼓风机的空气循环热泵的装置图

由送风风机将室外侧的高温空气经过换热器降温后送入室内侧。在标准空调工况下测试, 额定转速为38000r/min时, 制冷量为1.6kW, 送风温度随转速升高而降低, 制冷量随转速的升高而增大, 空气制冷装置有直接送风和送风可调的优势。

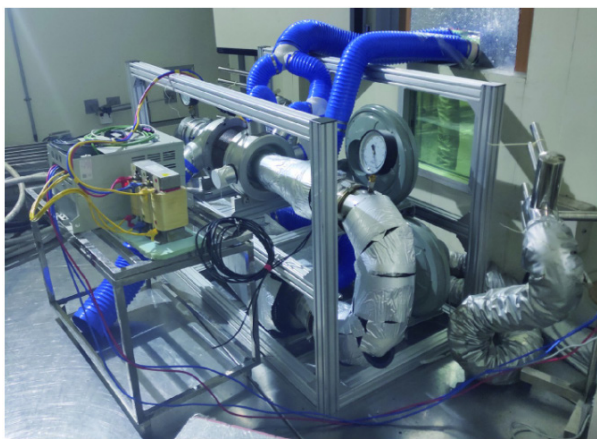


图2.5.5-8 空气制冷装置

4) 数据中心机房全年冷却

数据中心机房需要全年冷却, 蒸发冷却系统在高温高湿气候下效果较差, 空气制冷系统结构简单, 经合理设计可以将空气制冷、蒸发冷却、自然冷却三者相结合, 根据不同的气候切换复合系统的运行模式, 满足数据中心全年冷却的需求。

空气制冷优越的环境友好性, 是推动其发展的核心驱动力, 进一步提高其性能和扩大应用领域是其持续发展的研发方向。提高系统性能的研究主要包括: 压缩膨胀一体机的设计、耦合、膨胀功回收、宽工况范围运行及其降噪技术的研发等, 扩大应用领域的研究包括: 研发适用领域有竞争力的产品、和其他制冷系统组成复合系统等。

参考文献

- [1] LIU S L, MA G Y, XU S X, et al. A review of reverse Brayton air cycle refrigerators[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 150:200-214.
- [2] 张明, 朱永峰. 基于Simulink 仿真的电动压气机驱动增压引气系统研究[J]. 航空科学技术, 2016, 27(3):33-36.
- [3] 石旭东, 蒋贵嘉, 姜鸿晔. 基于AMESim-Simulink 的空气循环机性能影响研究[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(5):57-61.

- [4] 王超, 包胜, 王璐璐. TTC双涡轮并行制冷吊舱环控系统性能研究[J]. 电子机械工程, 2017, 33(1):48-51.
- [5] FOSTER A M, BROWN T, et al. Air cycle combined heating and cooling for the food industry[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(5): 1296-1304.
- [6] 王鹏, 王闯, 邢子文. 配置露点蒸发器的新型空气制冷循环的热力分析[J]. 制冷学报, 2021, 42(2):77-82.
- [7] AHMADI M H, AHMADI M A, POURFAYAZ F, et al. Thermodynamic analysis and optimization for an irreversible heat pump working on reversed Brayton cycle[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 110:260-267.
- [8] CHEN S T, FAN Y F, et al. Evaluation and analysis on the coupling performance of a high-speed turboexpander compressor[J]. Cryogenics, 2017, 88:81-90.
- [9] YANG X L, CHEN L, et al. Study on the coupled characteristics of high-speed centrifugal compressor and turboexpander of a reverse Brayton air refrigerator[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 147:20-28.
- [10] CHEN X K, SHI X, et al. Numerical investigation on the effect of cold climate on the thermodynamic behavior and exergy distribution in the two-stage radial turbine[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 223:120002.
- [11] FUHRER C, KOVACHEV N, et al. Multi-Objective Numerical Optimization of Radial Turbines[J]. Journal of Turbomachinery, 2024, 146(3): 031004.
- [12] GIOVANNI T, SILVIA M, et al. An experimental investigation of internal heat transfer in an automotive turbocharger compressor[J]. Applied Energy, 2017, 193:531-539.
- [13] LU J Y, XIA Y J, et al. Improvement of Brayton refrigeration air cycle for electroplating wastewater treatment[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 155:219-232.
- [14] Li S S, WANG S G, et al. Experimental investigation of a regenerated air cycle heat pump heating system with a turbocharger[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 100: 48-54.
- [15] 王喆峰, 李金波, 陈双涛. 全新风家用空气制冷系统性能测试[J]. 制冷学报, 2021, 42(6):15-20.

2.5.6 辐射制冷

赵东亮

(东南大学)

辐射制冷技术是物体通过“大气窗口”波段

（主要在8~13 μm ）向宇宙发射红外辐射以实现降温的技术。白天辐射制冷需要调控物体表面光谱使其同时实现太阳光谱高反射和红外光谱高发射。作为一种无需额外能量输入的制冷技术，辐射制冷具有广泛的应用前景，可用于建筑节能、缓解城市热岛效应、提高光伏发电效率等方面，为应对能源危机及全球变暖提供了新思路。近年来，随着辐射制冷材料大规模制备的突破，该技术已实现在不同领域的应用示范。

1 关键研究和技术进展

基于辐射制冷原理，材料的光谱选择性特性对实现高效辐射制冷至关重要。光子晶体材料通过设计纳米结构以反射和发射特定波长的光，首次实现了日间辐射冷却^[1]，但加工难度和高成本限制了其广泛应用。为实现低成本的可扩展制造，基于聚合物的辐射制冷材料受到广泛关注，如聚合物金属混合薄膜^[2]、分级多孔聚合物^[3]和聚合物基介电颜料涂层^[4]。然而有机聚合物易老化，开发兼具良好户外耐久性和可靠机械强度的辐射制冷材料是实现其长期应用的关键。

陶瓷材料（如氧化铝、二氧化硅等）以其优异环境稳定性在建筑行业得到广泛应用，最近的研究通过优化陶瓷的微观结构证实了其用于辐射制冷的潜力。由嵌入氧化铝纳米粒子的微孔二氧化硅框架组成的玻璃基陶瓷涂层^[5]以及基于微孔氧化铝骨架的陶瓷复合材料^[6]，分别展现出超过 96% 和 99.6% 的极高太阳反射率及超过 95% 和 96.5% 的高红外发射率。两者各自的三角二氧化硅和六方氧化铝密排晶体结构不仅赋予材料良好的辐射制冷特性，还保证了其在环境热、力、酸、碱作用下的稳定性。耐久性测试表明，材料的光谱性能并未随火焰灼烧、水浸和紫外线照射而改变，且能承受炎热潮湿气候下的污垢污染。尽管具有良好耐候性的陶瓷辐射制冷材料极大地推动了辐射制冷技术的规模化应用，但其碳减排效益应从全生命周期的角度来考虑，而不仅是关注使用过程中的节能效果^[7]。此外，供暖能耗的增加限制了辐射制冷在夏热冬冷地区的应用，具有户外耐久性的光谱可调动态辐射制冷材料仍有待进一步研究。

2 示范应用及发展前景

目前，辐射制冷薄膜、涂料等产品已实现规模化制备与应用推广，如图2.5.6-1所示，辐射制冷技术在建筑、粮储、油储、电力通信等领域得到了广泛应用。辐射制冷在大型公共建筑中的应用展现出较好的节能效果，如杭州萧山国际机场航站楼廊桥在应用辐射制冷技术后，单个廊桥的年空调制冷节能率可达43.7%^[8]。在粮食仓储领域，应用辐射制冷的平房仓在持续高温天气条件下，仓温和上层粮温降幅最高分别可达8.8 $^{\circ}\text{C}$ 和3.1 $^{\circ}\text{C}$ ^[9]。在油气储罐表面喷涂辐射制冷涂料后，罐壁温度可下降15 $^{\circ}\text{C}$ ，有效降低了储罐内部压力以减少损耗^[10]。此外，辐射制冷技术的应用发展亦不断趋于标准化，2021年8月首个团体标准T/ZZB 2304—2021《辐射致（制）冷膜》发布。2023年12月，首个行业标准QB/T 5970—2023《金属复合用辐射制冷膜》发布。可以预见辐射制冷技术在接下来将会得到更大规模的应用。



（a）宁波市城市展览馆屋面



（b）舟山市某储粮库



(c) 某油气预处理吸收塔罐



(d) 某储能电站

图2.5.6-1 辐射制冷技术在不同场合的应用示范

参考文献

- [1] RAMAN A P, ANOMA M A, ZHU L, et al. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight [J]. Nature, 2014, 515(7528): 540-4.
- [2] ZHAI Y, MA Y, ZHAO D. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling [J]. Science, 2017, 355: 1062-6.
- [3] MANDAL J, FU Y, OVERVIG A C, et al. Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling [J]. Science, 2018, 362(6412): 315-9.
- [4] MANDAL J, YANG Y, YU N, et al. Paints as a scalable and effective radiative cooling technology for buildings [J]. Joule, 2020, 4(7): 1350-6.
- [5] ZHAO X, LI T, XIE H, et al. A solution-processed radiative cooling glass [J]. Science, 2023, 382(6671): 684-91.
- [6] LIN K, CHEN S, ZENG Y, et al. Hierarchically structured passive radiative cooling ceramic with high solar reflectivity [J]. Science, 2023, 382(6671): 691-7.
- [7] ZHAO D, TANG H. Staying stably cool in the sunlight [J]. Science, 2023, 382(6671): 644-5.
- [8] 陈华, 鄢全科, 刘鹏, 等. 辐射制冷金属屋面系统施工技术研究 [J]. 建筑结构, 2021, 51(23): 38-42.
- [9] 黄志军, 金建德, 徐绍禹, 等. 辐射制冷材料平房仓控温试验研究 [J]. 粮食储藏, 2021, 50(2): 25-9.
- [10] 袁玉磊, 杨剑, 杨荣贵. 辐射制冷涂料在油气储罐中的应用 [J]. 石油化工设计, 2021, 38(3): 33-6.

第三章

重点细分领域应用进展

3.1 家用及商用制冷及供热

杨子旭 于天蝉 牛恒 刘树荣 刘心怡 石文星

(清华大学)

房间空调器、多联机等空气源热泵和冷热水机组是住宅和公共建筑主要空调系统或设备，是建筑的碳排放大户。降低空调系统的碳排放包括降低间接碳排放（即使用化石燃料生产空调运行耗电的碳排放，主要方法包括降低空调系统承担冷热负荷、全方面提升空调系统能效、结合可再生能源与空调系统柔性等）和降低直接碳排放（即因泄漏和维修、拆除导致的制冷剂排放）两部分，在2022年度的双碳报告^[1]中，总结的空调系统的年碳排放量表达式（参见公式（3.1-1）），为家用及商用制冷及供热领域推动“双碳”目标持续发展提供了碳减排技术思路。针对零碳发展与舒适人居的双重挑战，全行业不懈努力，做出了积极贡献。下面将从表3.1-1所示2023年度产出的主要技术成果介绍该领域的主要技术进展。

式中：

ε ——碳排放因子，kg/kWh，现有水平电网的碳排放因子可取0.577；

q ——建筑的冷热负荷强度，kW/m²；

A ——空调系统对应的服务面积，m²；

T ——空调系统的服务时间，h；

ΔE ——表示太阳能、风能和水利势能等可再生能源生产电能的使用量，kW·h；

G ——空调系统的制冷剂充注量，kg；

β ——制冷剂泄漏率，指空调系统在使用年限内制冷剂的总泄漏量与初始充注量之比，kg/kg， $0 \leq \beta \leq 1$ 。

$$C = \varepsilon \sum_{j=1}^{j=8760} \left(\sum \frac{q \cdot A \cdot T}{\text{COP}_{\text{sys}}} - \Delta E \right) + \frac{\text{GWP} \cdot G \cdot \beta}{N} \quad (3.1-1)$$

表3.1-1 技术措施及对应的减碳要点

技术措施	减碳要点
舒适空调与局部控制末端	提高空调能效（ COP_{sys} ）、降低空调承担冷热负荷（ $q \cdot A \cdot T$ ）
R290压缩机与空调器	降低非二氧化碳温室气体的碳排放当量（GWP）
气液分离与油气分离	提高空调系统能效（ COP_{sys} ）
无油压缩机与冷水机组	提高空调系统能效（ COP_{sys} ）
空调与光伏/储能系统	开发利用可再生能源（ ε 与 ΔE ）
调适技术	提高空调系统能效（ COP_{sys} ），通过智能调控技术提高空调设备与系统的全工况性能

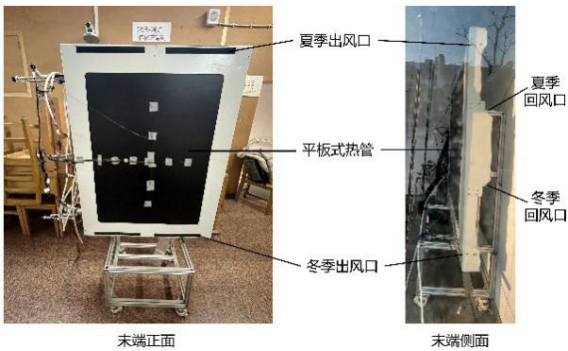
3.1.1 关键研究和应用进展

1) 舒适性空调末端技术

随着社会生活水平的不断提高，人们对居住环境的舒适度和健康性提出了更高的要求。空调环境也逐步朝着“健康舒适型”转变，这意味着人们对室内空气质量、气流舒适度以及控温稳定性提出了更高要求。传统房间空调器存在以下弊端：空调运行时房间密闭，空气流通不畅，可能引发头晕、乏力等不适感，影响用户健康；其次，送风过程往往会造成明显的吹风感；此外，空调器在冬季室外低温高湿环境下容易结霜，需频繁除霜，导致室内温湿度出现较大波动。因此，为满足用户对空调舒适环境的新需求，空调产品需要不断创新和改进。

无风感空调技术通过调节空气流动方式，以减少或消除传统空调中的强吹风感，主要通过改善空调送风方式来实现。例如，采用更为轻柔、均匀的气流分布，以降低直接风吹带来的不适感。此外，无风感空调还会采用智能控制系统，根据环境和用户需求动态调节送风方式和风速，以提供更为舒适的室内环境。针对传统的对流末端营造室内环境吹风感强、垂直温差大，而辐射末端需要连续运行、间歇性差等问题，对流/辐射一体化末端融合了对流和辐射末端的优势，可实现高效间歇的舒适室内环境营造。提出了对流/辐射一体化末端的设计方法，其中对流和辐射单元容量设计比应大于4.0^[2]，以满足间歇、舒适的要求。研发的分离式直膨、一体化直膨、平板热管式等一体化末端（参见图3.1-1）的室内升温过程可控制在15min以内（初始温度为10℃），间歇供暖营造效果得到了显著提升；再优化后环境营造效果均显著提升，室内环境匹配系数

分别提升了66.7%和70.0%^[3]。



(a) 平板热管式对流辐射一体化末端



(b) 一体式对流辐射末端

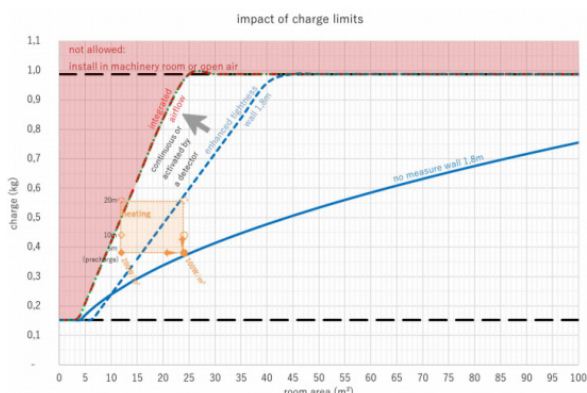
图3.1-1 对流/辐射一体化末端的设计方法

高效舒适的新型除霜技术不仅需要提高系统的除霜效率和运行性能，确保设备长期稳定运行，还需要为用户提供更加舒适和可靠的室内环境。为实现“无感除霜”，先进的除霜技术通常采用智能化的除霜控制算法，通过实时监测室内外环境温度、湿度等参数，精准控制除霜时间和能量消耗，以最小化除霜能耗对系统性能和用户舒适度的影响；同时展开除霜期间室内不间断供热技术研究，确保用户在除霜期间仍然享受到稳定的舒适温度。

2) R290环保制冷剂空调器

2021年9月15日,《基加利修正案》正式对中国生效。2024年,HFCs物质的生产和消费进入冻结阶段。因此,具有无氟无氯、低GWP、自然工质等优点的绿色环保R290制冷剂逐渐成为制冷空调领域的研究热点。目前,欧洲在推广R290空调方面走到世界前列,国内也开始加快R290制冷剂的推广应用步伐。R290属于A3类(低毒性、易燃易爆)制冷剂,其在家用空调应用中的制冷剂充注量受到安全性限制,亟需解决在R290替代和使用过程中的安全性问题。

研究表明,可燃制冷剂泄漏时只有空调系统附近的局部区域可能存在爆炸隐患,当制冷剂的充注量较少时,主要存在燃烧风险^[4]。2022年,IEC 60335-2-40 ED7《热泵、空调器、除湿器的特殊要求(草案)》通过,通过采取必要的安全措施,家用空调、热泵和除湿机中R290和其他易燃制冷剂的充注量限定值提高,扩大了R290的应用范围。R290空调器的实验结果表明,R290空调COP高于R410A和R32,与R134a接近。在R290压缩机的研发方面,国内多个企业已深入R290制冷剂相关设备研究开发加快替代进程,通过压缩机小型化设计,以低油量技术大幅降低润滑油中的R290浓度,为R290压缩机设计专用机油与压缩机结构(参见图3.1-2),使压缩机的工作寿命与能效表现得到进一步提升^[5]。此外,部分厂家通过全频域深度弱磁控制和高次谐波深度抑制技术,有效提升了R290空调运行的可靠性以及电能利用率;通过“凉芯桥”技术,保证了R290空调器在高温下的制冷力不衰减。



(a) IEC给出的充注量限制(R290)



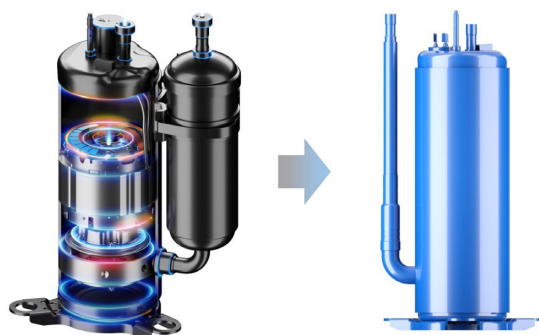
(b) R290制冷剂专用压缩机

图3.1-2 R290的充注限制及专用压缩机

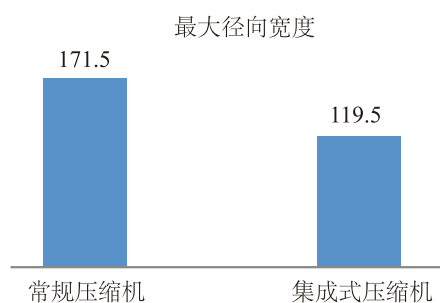
3) 集成式压缩机技术

近年来,随着国家节能减排政策、双碳目标的实施,以及国际大宗物料价格的上涨,在保证空调器性能的前提下,正朝着空调室外机小型化产品方向发展,以降低原材料的使用量,提高产品的资源利用效率,降低仓储、运输成本。压缩机是空调核心部件,其体积直接影响空调室外机尺寸大小。行业普遍通过从压缩机电机外径减小方向进行技术迭代,包括高速化压缩机,归根结底也是通过小系列代替大系列(电机外径减小)来实现,但是进一步减小的空间都非常有限。

超过99%的家用空调器采用转子压缩机。由于其气液分离器置于压缩机外侧,占据了压缩机近45%的径向空间,制约了压缩机和空调器向极致小型化方向发展。为了应对这一挑战,集成式压缩机技术颠覆性地改变了传统转子压缩机外置的气液分离器结构,重新设计了压缩机外观形态,将气液分离器改设为压缩机内部(参见图3.1-3)。同时,创新性地引入了吸气系统流场适配技术、逆重力回油技术以及近滞止气体隔热技术等,使得压缩机的径向尺寸减小了30%左右,气液分离效率提高了40%,并解决了压缩机气液分离器内置引起的回油及无效吸气过热大等难题,振动降低,能效提升,降低产品总成本并提升安装便利性,推动了行业向智能化、可持续方向发展。



(a) 常规压缩机与集成式压缩机结构对比



(b) 常规压缩机与集成式压缩机径向宽度对比

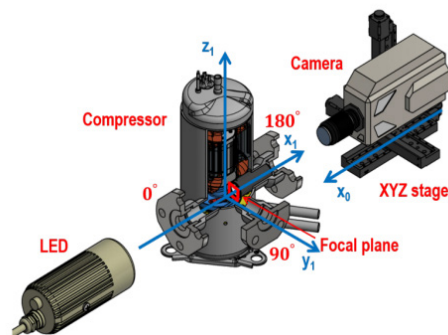
图3.1-3 集成式压缩机

4) 压缩机油气分离技术

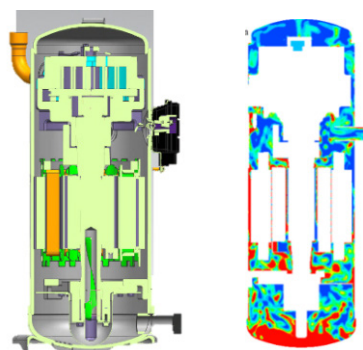
商用热泵、模块机厂商普遍选择大排量高转速的涡旋压缩机作为设备的核心部件。在大排量高转速的情况下，压缩机腔内油滴的跟随性明显加强，导致吐油量变大、油面不稳定、性能降低。为确保涡旋压缩机的稳定运行，研究关注点集中在实现高效的油气分离技术上。油气分离技术旨在从制冷剂气体中分离出微小油滴，并将其重新引导回涡旋压缩机以维持其内部油润滑系统的持续稳定性。若分离效率低下，将导致大量润滑油进入空调系统，并在蒸发器内壁附着，从而降低传热系数，影响换热效果，进而影响整个制冷系统的性能。

通过单曝光偏振相位全息测量技术，实测获取压缩机内部的油滴三维全息位置和粒径分布（参见图3.1-4），将之作为精细分析的真实边界条件进行CFD模拟，研究电动涡旋压缩机油气分离器升气管结构类型对分离性能的影响结果表明，锥形升气管分离器的分离效率最高^[6]，适当改变转速将提高油气分离器的分离效率。针对油分离器内部流场，采用RSM模型对油气分离器内的气相流场进行模拟计

算，同时利用DPM模型对4种分离器的油滴轨迹进行追踪，结果表明，变窄进口结构将促使油气分离器内部流场具有良好的对称性^[7]。



(a) 油气两相全息观测技术



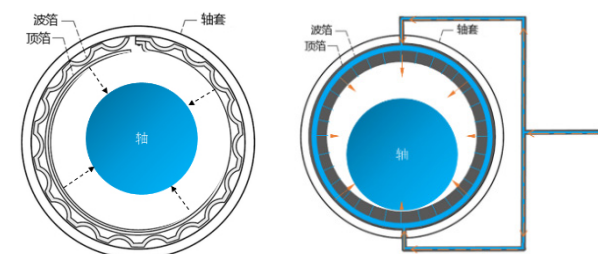
(b) 油气流体验分布

图3.1-4 涡旋压缩机油气分离相关技术

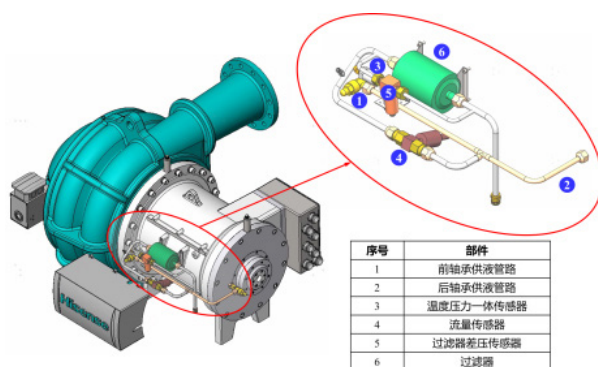
5) 无油冷水机组技术

冷（热）水机组是目前在公共建筑中应用最广的设备之一。针对压缩机噪声大，润滑油较多、不利于系统节能运行等问题，市场上近年来涌现出了多种类型的无油压缩冷水机组，大幅降低了机组的运行噪声；由于系统中无润滑油，自然也就不存在润滑油所引起的各种问题，使得机组的体积减小、制冷COP及IPLV大幅提升。

磁悬浮冷水机组凭借其节能、高效以及无油等优势，在无油冷水机组中占据主导地位。磁悬浮冷水机组的核心技术是使用磁悬浮轴承技术，利用磁场使转子悬浮，旋转时与叶轮没有机械接触，不会产生机械磨损，不再需要机械轴承以及相应的润滑系统。近年来，对于磁悬浮机组的性能改善，部分负荷高性能、新工质、宽负载率范围及高COP技术被越来越多应用于磁悬浮机组中。



(a) 动压与静压气悬浮技术



(b) 正压液浮陶瓷轴承供液模式

图3.1-5 高效冷水机组相关技术

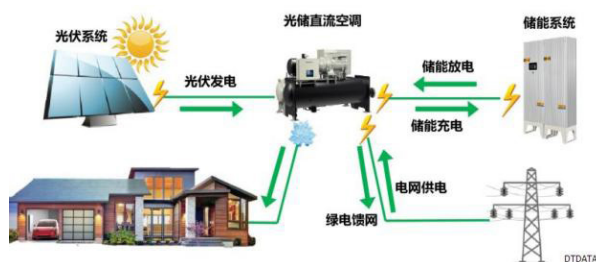
气悬浮压缩机能效更高、结构更加简单，采购维护成本更低，使其更适合离心机向高速、小型化方向发展。动压气悬浮技术通过机组运行后气体高速通过轴体，使其悬浮，大幅减少了运行时的摩擦损失；不同于动压气悬浮的“先转后浮”，静压气悬浮技术实现了“先浮后转”，静压气悬浮压缩机通过外部稳定的气源，利用气体压力产生浮力的原理实现转子悬浮及自调节，不存在低速干摩擦，避免了机组启动过程中的摩擦和磨损问题（参见图3.1-5（a）），实现了机组运行全过程无摩擦，使得系统更加可靠、高效。

针对无油离心压缩机在大冷量非稳态极端工况的轴承控制难题，提出正压液浮陶瓷轴承技术方案（参见图3.1-5（b））。创新性地将在航空航天领域的陶瓷轴承应用在正压制冷剂系统中的液浮技术研究，在轴承内外圈材料、涂层工艺、金属橡胶阻尼器、轴承工作条件、轴承监测及保护等方面做了全面优化，同时结合高精度轴向载荷算法、先行与反馈控制策略以及轴向载荷动态平衡技术，使得轴承寿命提升>60%。

6) 融合光伏/储能的空调系统

在“双碳”背景下，光伏等可再生能源不断得到广泛应用，将光伏与空调系统深度融合并进行综合管理调度，是当前行业关注的重点。空调设备的新能源化、直流化等产品，力图解决光伏输出直流电直接驱动空调、直接并网、储能直流对接、供需联动等多能互补供电的问题。

上述技术已开始业界持续得到研发、提升和应用，如“光储空”多联机采用光伏直驱、双端多元、多元换流、能源信息智慧管理等核心技术，融合光伏系统、储能系统和空调系统（参见图3.1-6）。该产品具备光伏直驱空调、光伏储能储电、光伏余电并网、空调离网运行功能。在光伏直驱空调方面，通过采用直流直驱技术，能效利用率达到99%，相较于传统系统提升效率约5%~8%。该设计省略了多个变流器和中间配电设备，实现了设备和工程一体化，降低了成本，且安装更为简便。在光伏储能储电方面，储能技术实现了电网的峰谷调节，同时利用光伏技术进行就地消纳，规避了光伏不稳定和日夜间歇性的负面影响。多余的电能可以直接并网，支持离网运行，实现即发即用、自发自用的能源利用。



(a) “光储空”多联机



(b) 零碳光驱储能方案

图3.1-6 空调与光伏/储能系统结合技术

在“零碳光驱储能”方案中，以光伏发电和储能系统协同为核心，旨在解决光伏发电的不稳定性和日夜间歇性的特性。系统采用储能管理技术，有效地存储光伏发电的剩余电量，并通过空调主机进行供能。超过需求的电量还可馈回电网，以实现能源的有效利用和分配。储能管理系统不仅仅限于光伏发电的电存储，还积极收集电网的谷电。这些储存的电能通过空调主机为用户提供冷热量，体现了系统的能动性。同时，光热光伏系统结合热水水箱和蓄热单元，有效地将多余的热量储存，为用户提供生活热水。空调主机在供冷供热的时候，借助换热单元和蓄热单元将冷量或热量储存，不仅有助于削峰填谷，同时通过蓄冷技术降低空调的用电费用。

7) 智能调控技术

基于实时运行数据对空调/供热系统进行智能调控，是实现空调系统全生命周期、全工况高效运行的重要途径。智能调控技术打破了传统空调/供热系统由经验驱动决策的方式，由经验和流程驱动转向数据驱动，以数据分析为切入点，实现空调/供热系统运行调节的最优决策和智能调控。

获取高质量的实际运行性能数据是分析空调/供热系统运行特性、实现系统智能调控与节能运行的基础。而在实际工程中，受限于仪器成本、测量精度等因素的影响，通常难以获得实时准确的运行数

据并及时反馈到控制软件中进行控制策略优化。针对多联机实时运行能耗测量问题，适用于本地单片和云端服务器两种场景的频率-电流曲面拟合法，以及仅适用于云端服务器的神经网络自学习法^[8]（参见3.1-7），能够在多工况、多场景均实现良好测量精度。针对实际供热系统中的流量测量数据可信度低、流量计工作状态难判定、流量计群的测量数据不闭合等问题，流量计云在线运行核查方法与流量计群在线核查方法能够快速判断在线应用的流量计的技术性能是否满足使用要求，有效提升了智慧供热系统数据质量^[9-10]。

空调/供热系统的水循环、空气循环、制冷剂循环与外界环境相互作用，具有非线性、时变性及强耦合性特点，传统反馈控制策略由于滞后性、热惰性等特性，难以保障系统高效运行。随着物联网、大数据等技术的快速发展，基于历史运行数据和机器学习算法的前馈控制技术成为研究热点。

精准预测空调/供热系统的负荷是实现前馈控制的前提，近年来，众多国内外学者利用统计多元回归模型、人工神经网络等模型开展空调负荷预测研究^[11]。随着人工智能技术的发展，为实现对系统能效、室内环境、人员舒适度等多目标的协同优化，基于数据驱动的自适应预测控制在空调/供热系统中的应用也愈加广泛。基于温度多元线性回归模型^[12]

的空调制冷站在线预测控制方法以冷水进出口温差和冷却水进出口温差为输入变量，以制冷机房全局COP为优化目标，综合考虑制冷机房整体特性及各设备的相互耦合特性，有效提升了制冷机房的整体运行能效。

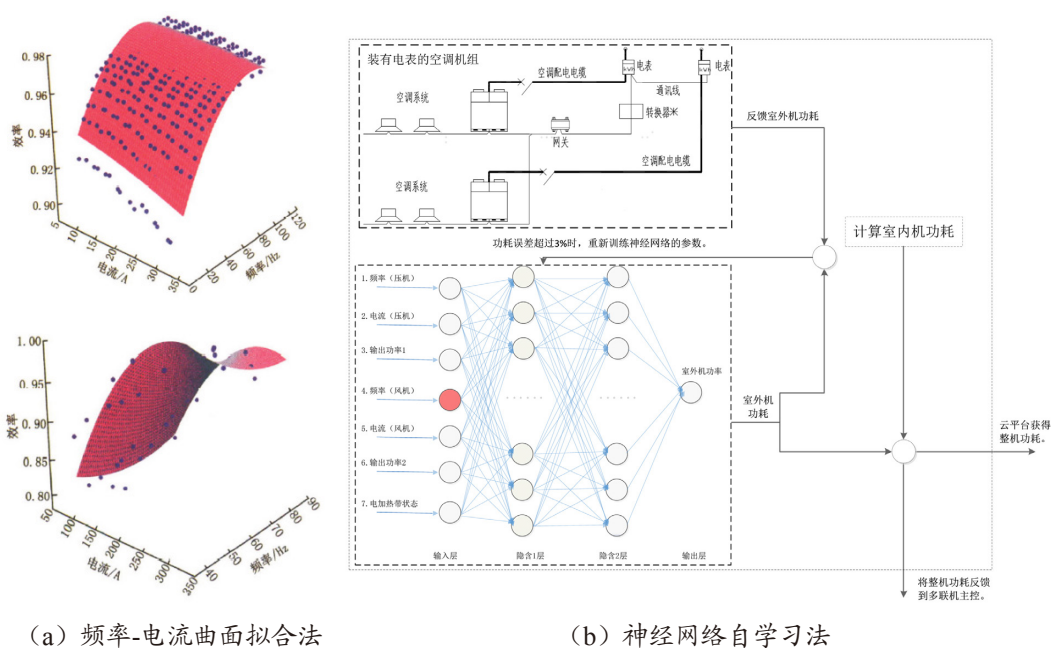


图3.1-7 多联机空调系统在线能耗测量方法

3.1.2 优秀案例

1) 舒适健康空调器案例

海信集团和清华大学合作研发的多场景送风技术的舒适空调器依据气流的康达效应对出风流道进行冷热分流送风设计，实现沐浴式制冷和地毯式制热。沐浴式制冷采用超大曲率风板引导冷风上扬，全域风速 0.12m/s 以下，任何位置让用户完全感受不到冷风，实现全域防直吹；地毯式制热利用上凹康达面引导热气流贴壁下送，落地后在房间内向前扩散，热风铺满地面而后自然上浮，并且开发了随环境温度变化的空调器可变参数控制算法，实现舒适的气流速度、温度（参见图3.1-8）。

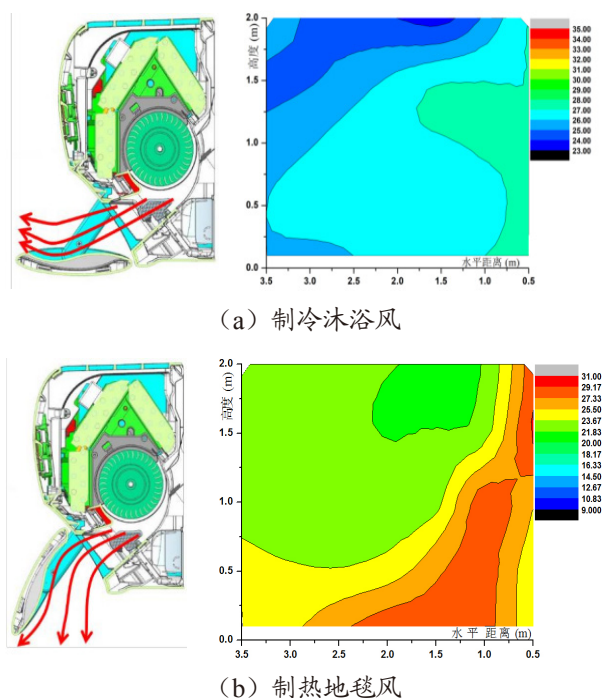


图3.1-8 基于康达原理的多场景冷热分流送风技术

在静音新风技术方面，海信研发的扇形导流前缘结构、渐变圆弧拱桥风圈蜗壳对插结构形式减少气体回流和涡流激励，从而在提高新风量的同时降低噪声。同时，开发的随环境温度变化的空调器可变参数控制算法，温度、气流速度舒适，降低了空调电耗。新的自然温感舒适模式与常规运行模式相比，实现了体感舒适、能耗降低、换热效果改善。

格力提出的全热双向流新风空调一体化技术、

贯流双侧分区送风技术和连续供热高效热气除霜技术用于保障空调室内的舒适性（参见图3.1-9）。全热双向流新风系统+空调送风系统的交叉融合解决方案，实现了空调新风一体化送风末端技术、高效全热交换双向流换新风布局技术，攻克了新风气流易短路、难送到人体活动区域及新风负荷大的问题；贯流式双侧分区送风技术，采用高效双侧送风方案和双区立体送风自适应控制方法，有效兼顾了活动区吹风感及温度调节效果；此外，热气直通除霜循环方式基于多参数耦合控制，研发了开启、节能特性优良的急开型电子膨胀阀，实现了热气均衡除霜，并应用了除霜热量配比自寻优控制技术，攻克了房间空调器冬季低温供热不连续、除霜效率低、除霜舒适性差的行业难题。

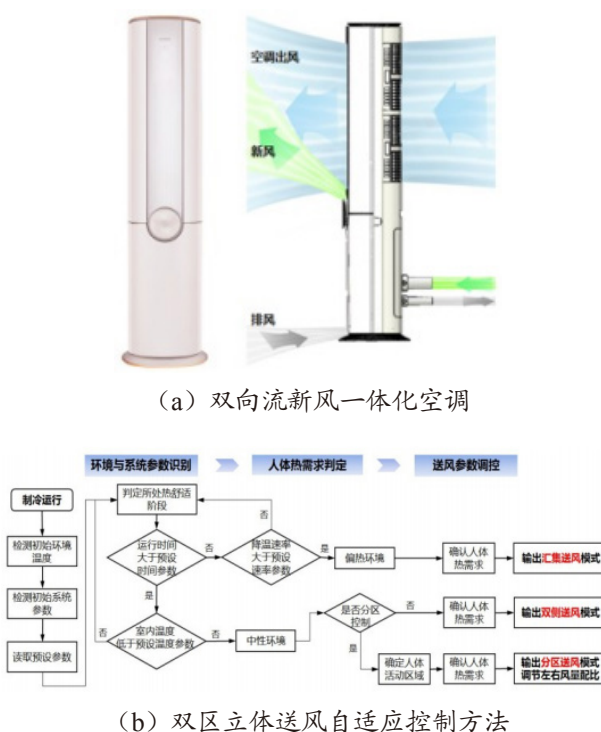


图3.1-9 双向流新风一体化空调及其送风原理

2) R290压缩机与空调器

美芝R290专用压缩机基于R290制冷剂的热物性，从制冷剂驻留量低减、泄漏抑制和摩擦优化三个维度解决了R290转子压缩机高效、制冷剂减量难题，已实现产业化落地，打破了传统双缸转子压缩机的结构限制，通过压缩机泵体的结构创新，特别是通过优化泵体关键尺寸和电机上下腔容积比使低

充注量下更多的制冷剂参与制冷系统循环，实现了R290充注量限制下的能效突破，降低了制冷剂充注量限制对系统性能的不利影响。优化后的R290压缩机高度降低了12.5%、油池容积下降了16%，使驻留压缩机内部的制冷剂质量下降了18%，实现了R290空调器的制冷剂低充注量约束和能效的整体突破，参见图3.1-10。

在制冷剂泄漏抑制方面，该压缩机根据泄漏损失分布和技术可行性确定以滑片端面和活塞端面为泄漏优化对象，应用主动供油技术改善间隙油气占比以降低泄漏损失；在摩擦优化方面，该产品根据摩擦损失分布和技术可行性，应用摩擦副柔性化等技术对轴承和滑片侧面摩擦进行了重点优化。通过上述技术创新，压缩机能效提升了10%以上，推动了R290空调器以更高能效、更低成本的产业化应用。以1.5HP变频空调器为例，采用该高效R290转子压缩机的空调器，1年可节省电量128kW·h。按照2023年销量300万台计算，一年可节约24349万kW·h电能。若节省的电能全部由标准煤获得，则相当于每年直接减排27万吨CO₂；若考虑我国的实际能源结

构（含光伏、风、电、水电），则相当于每年直接减排14万吨CO₂。

3) 油气主动分离技术

涡旋压缩机内油滴粒径分布不详，导致油气相互作用机理不明、仿真边界输入不准确、改善措施不聚焦；现有商用软件模型仅适用油次相、制冷剂主相状态的求解，针对油主相制冷剂次相、油制冷剂混合相无法精确求解的难题，行业现有油气分离装置设计则主要依赖经验和穷举实验方法，导致研发效率低、成本高。基于上述问题，美芝的油气主动分离技术首创单曝光偏振相位全息测量技术，可实测获得压缩机内部的油滴三维全息位置和粒径分布；在此基础上，提出了主次相转换欧拉-欧拉油气两相仿真模型，实现三种状态油气两相曳力的精确计算，仿真精度相较传统模型提升80%；基于上述技术，探明了油气主动分离技术途径：将油气引入下腔，以提高下腔的分离效率和减少切边回油二次卷吸，由此提出实现油气主动分离的压缩机结构（参见表3.1-2），与行业现有技术相比，其吐油量降低了16%。

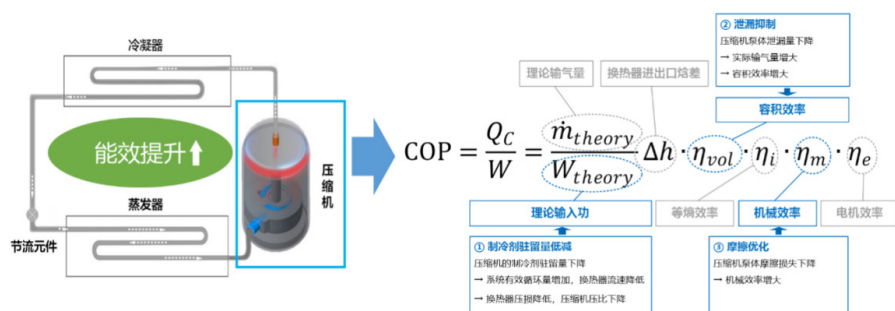


图3.1-10 美芝R290压缩机参数优化

表3.1-2 传统压缩机结构与油气主动分离的压缩机创新结构的对比

分类	油气引入下腔	提高下腔分离能力	减小切边回油二次卷吸			
创新结构	转子翻边罩	电机上下腔容积配比	主机架内插管	线包形状	下腔结构	油池挡板
原始方案示意						
创新结构示意						
设计要点	电机负压调流能力提升	下腔油气减速	回油板金件装配间隙罩油减少	切边回油分离点推迟	切边回油路径遮挡	油池挡板回油顺畅

4) 无油冷水机组在工商业建筑的应用

深圳市前海HOP天地商业广场采用3台来自海尔高效磁悬浮离心式冷水机组（参见图3.1-11），机组在部分负荷下COP可达9.0 W/W，IPLV值最高可达12 W/W。机组运行范围广，不需要普通压缩机所必需的油压差，机组完全无油，消除机械摩擦，比常规轴承更持久耐用，可使机组运行寿命增加一倍。经验证，机组在制冷季（5-11月）的实际运行性能系数超过6 kW·h/kW·h。

磁悬浮冷水机组也可与储能结合，并应用于机场、轨道交通、酒店等多种建筑领域。合肥轨道交通5号线共计使用了62台美的磁悬浮变频离心式冰蓄冷双工况机组。冰蓄冷空调系统利用夜间电力负荷较低的时段运行冰蓄冷机组蓄冰，在电力负荷较高的白天停运冰蓄冷机组空调，通过融冰将夜间储存的冷量释放出来，从而满足用冷单位的负荷需要。实现了节省投资、降低运行费用、节约能源和环境保护的作用，与常规空调系统相比节能约35%。



(a) 前海HOP冷站



(b) 磁悬浮变频离心式冰蓄冷双工况机组

图3.1-11 无油冷水机组在工商业建筑的应用

海尔静压气悬浮轴承是利用制冷剂通过碳基复合材料所形成的微纳尺度气孔节流所形成气膜的静压作用。采用冷凝器/蒸发器双位置制冷剂取液、双齿轮泵供液及高精度液位控制保障供液，采用电热稳压及蒸发器泄压实现气体轴承的稳定供液压力。目前，气悬浮冷水机组已应用于杭州睿升半导体科技有限公司，并通过云平台实时监控机组的运行特性，机组全年综合COP达7.46 kW·h/kW·h，COP范围在6.7~18.6 W/W。

5) 智慧楼宇管理系统及类似平台

美的中央空调研发的智慧楼宇管理系统（M-BMS）采用了AIE+E（能效+环境）优化算法，通过智能控温、智能启停、智能控载、智能寻优及智能联动，实现系统全自动优化运行。广州市轨道交通7号线北滘公园站中央空调系统的自控系统采用了美的M-BMS 超高效智能环控系统（参见图3.1-12），对空调系统的设备进行实时、全天候自动监测，收集、记录、保存、分析管理系统运行的重要信息和数据，并根据系统运行状态进行自适应寻优控制，满足室内环控需求的同时提高系统能源效率、节省运维人力。在检测时间段内，制冷机房的运行能效比达到6.76 kW·h/kW·h，整个空调系统的制冷能效比达到4.05 kW·h/kW·h。

类似地，海尔中央空调发布的MetaBuiding楼宇数智化平台，集成了中央空调物联智控、高效机房智控、能源智控、楼宇综合智控等多个智控单元，面向不同需求场景定制智控方案，在深圳地铁14号线、唐山古冶居民供热改造、三星堆发掘舱等项目中取得良好应用效果。



图3.1-12 美的中央空调研发的智慧楼宇管理系统

6) 模型预测控制在储能空调系统中的应用

深圳湾某一线地标建筑两栋办公楼采用冰蓄冷区域供冷系统, 采用了集成冷负荷预测模型、系统物理模型和优化算法的控制策略, 参见图3.1-13, 空调面积超3万平方米, 冰槽容量达4500RTh。控制系统基于历史冷负荷数据、气象参数及天气预报建立了预测未来24h逐时冷负荷的机器学习模型, 并基于经验模型和实际运行数据建立了空调系统和冰蓄冷

系统的物理模型, 在负荷预测模型和物理模型基础上, 采用非线性规划方法优化系统的运行策略, 以最大限度降低系统在当前分时电价下系统的运行成本。实测验证结果表明, 与传统控制策略相比, 累计耗电量可降低10.3%, 累计节费达11.6%。类似方法应用于北京大兴机场冰蓄冷区域供冷系统, 模拟结果表明该方法可使制冷季能耗降低8%^[13]。

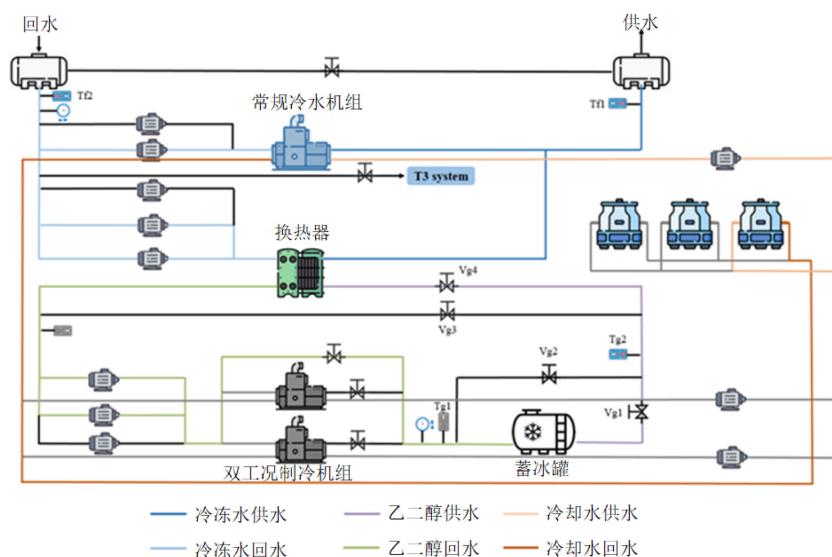


图3.1-13 结合模型预测控制的冰蓄冷系统

参考文献

- [1] 石文星, 杨子旭. 家用和商用空调与供暖低碳技术研究及应用进展[C]// 2022年双碳背景下中国制冷技术研究及应用进展论坛会议论文集. 中国制冷学会, 2023.
- [2] YANG Z, CHI J, LUO B, et al. Analyzing excess heat factors of convective/radiant terminals: Balancing beginning and steady stage [J]. Journal of Building Engineering, 2024(84): 108576.
- [3] WU Y, SUN H, YANG Z, et al. Dynamic process simulation of indoor temperature distribution in radiant-convective heating terminals [J]. Building Environment, 2023(244): 110843.
- [4] 田贯三, 高云峰, 宋成璋. 可燃制冷剂爆炸抑制模拟实验研究[J]. 山东建筑大学学报, 2016, 31(6):564-570.
- [5] 吴国强, 马国远, 许树学. R290变频热泵空调器性能的实验研究[J]. 北京工业大学学报, 2023, 49(3):379-385, 394.
- [6] 刘兴旺, 李迎福. 电动涡旋压缩机油气分离器升气管结构类型对分离性能的影响[J]. 化工机械, 2021, 48(5):706-710.
- [7] 刘兴旺, 康小兵. 电动汽车涡旋压缩机内油气分离器的研究[J]. 流体机械, 2021, 49(2):23-29.
- [8] 石靖峰, 肖寒松, 任兆亭, 等. 多联机空调系统在线能耗测量方法研究[J]. 暖通空调, 2023, 53(2): 51-56, 63.
- [9] 方修睦, 杨大易. 基于间接核查法的流量计云在线运行核查方法[J]. 暖通空调, 2024, 54(1): 75-80.
- [10] 方修睦, 杨大易. 基于归一化原理的流量计群在线核查方法[J]. 暖通空调, 2024, 54(1): 81-88, 9.
- [11] 李宗霖, 雷蕾, 郭雪松. 基于粗糙集和PSO-Elman的商业建筑空调冷负荷预测[J]. 流体机械, 2023, 51(6): 53-59.
- [12] 王佳明, 杨海滨, 赵天怡, 等. 基于温度多元线性回归模型的空调制冷站在线预测控制方法研究[J]. 暖通空调, 2023, 53(2): 140-147.
- [13] H. Tang, J. Yu, Y. Geng, et al. Optimization of operational strategy for ice thermal energy storage in a district cooling system based on model predictive control[J]. Journal of Energy Storage, 2023(62): 106872.

3.2 工业余热利用

徐震原

(上海交通大学)

统计年鉴显示,我国能量转换与加工的平均效率为73.2%,其中发电及供热的平均效率为47.1%^[1],而剩余部分均以余能的形式被浪费,并且以余热为主。在不同场景的余热中,工业余热具有体量大和分布集中的特性,具有较高的利用价值。如果对工业余热进行合理和有效的利用,可以实现显著的节能减碳。工业余热回收的主要技术包括直接利用和转换利用两种方式,其中直接利用需要余热和热需求之间的高度匹配,通常可利用场景有限;转换利用则包含了将余热转换为高品质的电、热和冷再进行利用。考虑到目前工业余热利用的概念已经被广泛接受,较容易实现的中高温余热和余热直接利用的推广度较高,工业余热回收的难点在于如何将低温余热进行高效转换利用,此时热泵或热驱动制冷技术是更为高效和经济的选项。

在制冷产业中,这些余热利用技术主要包括压缩式热泵、吸收式热泵、吸收式制冷和吸附式制冷等。近年来“双碳”目标的推进凸显了热能脱碳的紧迫性,热泵相关的研究受到了更多关注。为了实现更多用热场景和余热回收场景,需要热泵向高温输出、低温余热回收和大容量发展,因此近期余热回收的热泵技术也在大温升高温热泵和大容量高温热泵方面获得了快速发展与突破。

3.2.1 关键研究及应用进展

1) 高温压缩式热泵

高温热泵相比于常规热泵的主要区别在于运行温度高,通常达到80℃以上,导致常规热泵的工质、压缩和润滑技术等不适用。随着高温热泵近几年的兴起和探索,目前已经对其工质有较多探索,上海交通大学梳理了输出温度高于80℃高温压缩式热泵的常见工质及其替代品,考虑到HCFCs类工质将会被禁用,而R245fa、R236fa、R365mfc等18种具有高全球变暖潜值的HFCs类工质被列入了受控物

质清单,未来的发展重点将在HFOs、HCFOs类合成工质属于0 ODP、低GWP的环保工质,以及水、二氧化碳、氨以及碳氢化合物(HCs)等天然工质^[2-3]。Joaquín等对R-1336mzz(Z)高温热泵展开了实验研究,热泵在回收80~118℃余热实现100~160℃的高温输出,并获得1.9~4.4的COP^[4]。上海交通大学吴迪等研究了水蒸气准饱和压缩高温热泵循环的性能,展示了水蒸气压缩中连续喷水对降低排气过热度 and 提升性能的有效性,但喷水次数达到5次以上系统性能的提升就逐渐减缓^[5]。Alessia等研究了面向200℃以下高温输出的水/庚烷/甲苯混合工质、R1234ze(Z)/环丁烯混合工质,并展示了混合工质的有效性^[6]。

2) 大温升压缩式热泵

为了进一步在较低的余热回收温度下实现高温输出,就要求热泵兼具高温输出和大温升,这就一般需要复叠压缩式热泵,一方面需要在不同工作温区选取合适的工质是实现复叠压缩式热泵优化匹配与高效运行,另一方面也需要降低压缩过热度、中间补气等流程优化来减少不可逆损失^[3,7]。天津大学李敏霞等研究了采用跨临界二氧化碳/R1234yf工质的复叠压缩式热泵,系统可以在最低-35℃蒸发温度下工作,并最高可达到90℃的输出温度,达到了较大的循环温升^[8]。尽管该系统的研究背景并非工业应用,但这种类似的组合仍然可以应用在低温工业回收中。上海交通大学王如竹等研究了采用R134a/R245fa和R1234ze(E)/HP-1为工质的复叠压缩式热泵,系统可以在5~30℃的热源温度下获得90~120℃的高温输出,并分别获得1.72~2.73和1.77~2.75的COP,其中级间耦合温度和补气增焓压力的选取在性能优化中较为重要^[9]。

3) 大容量高温离心式热泵

工业余热回收的场景中余热体量通常较大,既可采用多台小型热泵的方案,也可以采用单台大

型热泵的方案，但热泵大型化后可以通过离心式压缩机实现更高的效率和更低的成本，对于提升余热回收的经济性非常重要。目前行业中高温压缩式热泵的应用主要以中小型容积式压缩机产品为主，制热量小且效率普遍偏低，无法满足工业余热的大容量、高效回收利用，而工业大容量高效高温离心式热泵国内外研究较少，主要存在可靠性和效率两方面难点：一方面压缩机在高温环境下冷却困难，轴承、电机和润滑油容易出现温失效，高温重载下转子高速运行稳定性差；另一方面高出水、大温升下系统性能低、高温下换热器性能差，难以满足高效热泵发展需求。格力和上海交通大学合作开展了采用R1233zd(E)为工质的两级变频离心式压缩机的热泵研究，实验样机在50℃热源和100℃热输出工况下可以达到3.67的COP和约400kW的热输出^[10]。格力进一步研发了面向高温输出的高速直驱高温热泵离心压缩机、大温升双压缩机串联流程、多级压缩补气的高效工业热泵系统，并成功研制出采用R1233zd(E)为工质的工业大容量高效高温离心式热泵机组。经检测，该热泵机组经在60℃温升、120℃冷凝温度时，制热量达到9114kW，COP达到4.36；在65℃温升下冷凝温度最高可达130℃，最大容量可达10MW，具有高温、高效、大容量等特点。相比传统工业锅炉具有显著的节能降碳效果，大容量高温离心式热泵可满足食品、医药、蒸酒、印染等场景需求，替代传统燃煤燃气锅炉。

4) 大温升吸收-压缩热耦合热泵

考虑到第二类吸收式热泵在高温运行和大容量工业余热回收方面的优势，采用低温级压缩式热泵与高温级吸收式热泵耦合的吸收-压缩热耦合热泵也是实现大温升、高温输出和大容量工业余热提质利用的有效技术路径。上海交通大学团队在前期已经提出压缩-吸收二级耦合热泵实现高温热输出的技术路线^[11]，为了进一步提高温度升程，团队在近期对三级耦合热泵的构建进行了探索。团队通过将压缩式热泵与吸收式热泵深度热耦合，提出了两种三级吸收-压缩耦合的热泵循环，即单级吸收-复叠压缩耦合热泵循环、两级吸收-单级压缩耦合热泵循环，建模分析的结果显示单级吸收-复叠压缩耦合热泵循环的性能更优，最大温升可超过150℃，在环境温

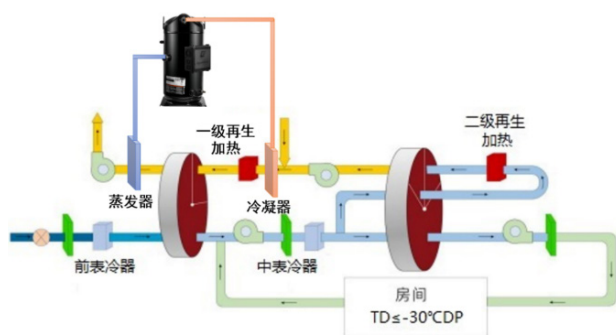
度为30℃、温升为100℃时COP可达到1.63^[12]。针对单级吸收-复叠压缩耦合热泵循环中吸收式子循环的冷凝热无法有效回收的问题，对循环的内部回热结构进行了优化，团队构建了带内回热的三级吸收-压缩耦合热泵循环，将最低运行环境温度从10℃降低至-20℃，最大温升从151℃提高至170℃^[13]。

3.2.2 优秀案例

1) 高温热泵在转轮除湿的应用

锂电制造工艺所需干燥间的超低露点是利用吸附技术对空气中的水分进行吸附除湿实现的，而转轮吸附除湿的方式已经逐步成为主流，但除湿转轮均配有再生加热器，且为了保证除湿效果，转轮的再生温度需要110~140℃，在系统运行时消耗大量的能源用于再生，成为企业生产制造成本的痛点。谷轮整体解决方案与应用团队和瀚润特环保设备公司团队合作，将超高温涡旋压缩机和整体解决方案与转轮除湿系统结合，推出超高温热泵整体解决方案。常用再生加热源采用电加热或蒸汽加热，常规的热回收使用传统热交换，回收效率低，而且回收的热能只能用于再生风预热，不可以直接用在一级转轮再生中，这就大大限制了热能的利用效率。高温热泵的出现完美弥补了这个缺陷，高温热泵将低温的再生排风热量高效回收，通过高温热泵系统转化为高温热能（120℃+），可直接用于转轮再生加热系统，而且热泵使用避免了板式交换泄漏的问题，大幅提高了热能利用率，从而达到节能减排的效果。

超高温热泵系统配置超高温工业专用压缩机，额定制热量为64kW，具备喷气增焓功能，最高冷凝温度可达135℃，排气温度限值为145℃，满足转轮除湿系统应用要求。在大量实验数据的基础上，摸索出一套成熟可靠的控制逻辑，既满足严苛的工艺要求，且保障了压缩机和阀件可靠稳定的运行，同时在压缩机底部及气液分离器底部布置电加热带以控制回液风险，使得在转轮除湿系统中应用热泵技术成为可能。经过长期的项目运行和数据监测，采用谷轮超高温涡旋压缩机后，对比采用纯电加热方案，一级转轮能耗降低38%，整套转轮设备能耗节省22%，整体碳排放量约减少38%。



(a) 流程图



(b) 现场图

图3.2-1 高温热泵在转轮除湿的应用

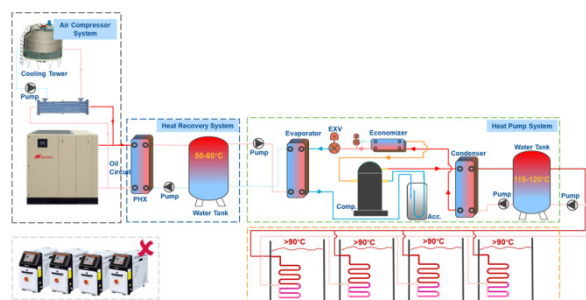
2) 高温热泵在磷化线余热回收的应用

磷化流程需要大量高温热能，谷轮苏州工厂的磷化生产线原本使用4台传统模温机合计96kW为6个工艺池供热，提供90℃以上工艺热水，不利于高效生产与低碳环保要求。为了实现能耗与碳排放的降低，工厂采用热泵进行空压机废热回收，并输出高温热能供磷化线使用。

项目采用2台制热量为56kW的CHP1065-CUFE-V-P-W热泵机组，机组搭载谷轮ZW650高温热泵压缩机，可以实现冷凝最高达到135℃，满足项目目标的要求的高出水温度，兼顾高出水温度的同时，使系统稳定运行在高能效水平。

改造后，空压机的余热通过热交换器回收，提供50~60℃热水作为热泵的低温热源，两台高温热泵提供稳定的120℃带压热水，在额定工况下热泵机组COP高达2.5。同时增加智能化控制管理，实现工艺池精准控温，产品磷化的一致性得到提升，并减少了人员在高湿度环境下对用电设施的操作，更加安

全可靠。系统在2022年9月改造完成，与改造前相比可以节能40%以上，每年可节省运行费用约30万元，投资回收期小于3年，每年减少二氧化碳排放约268吨。



(a) 流程图



(b) 现场图

图3.2-2 测试系统装置图

参考文献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 2023.
- [2] 胡斌, 姜佳彤, 吴迪, 等. 工业高温热泵发展现状与展望 [J]. 制冷学报, 2023, 44(6): 1-12.
- [3] 董益秀, 王如竹. 高温热泵的循环、工质研究及应用展望 [J]. 化工学报, 2023, 74(1): 133-44.
- [4] NAVARRO-ESBRÍ J, MOTA-BABILONI A. Experimental analysis of a high temperature heat pump prototype with low global warming potential refrigerant R-1336mzz(Z) for heating production above 155 °C [J]. International Journal of Thermofluids, 2023, 17: 100304.
- [5] 吴迪, 胡斌, 王如竹, 等. 水蒸气准饱和和压缩高温热泵循环性能分析 [J]. 化工学报, 2023, 74(S1): 45-52+2.
- [6] ABEDINI H, VIEREN E, DEMEESTER T, et al. A comprehensive analysis of binary mixtures as working fluid in high temperature heat pumps [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 277: 116652.
- [7] 周俊海, 赵盼盼, 屈博艺, 等. 带闪发器中间补气的

- R1234ze(E)热泵系统性能分析 [J]. 制冷技术, 2023, 43(2): 8-13, 20.
- [8] 张宁, 李敏霞, 马一太, 等. 跨临界CO₂与R1234yf低环温高温热泵热水系统性能分析 [J]. 制冷学报, 2023, 44(4): 85-92, 119.
- [9] DONG Y, YAN H, WANG R. Significant thermal upgrade via cascade high temperature heat pump with low GWP working fluids [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 190: 114072.
- [10] JIANG J, HU B, WANG R Z, et al. Experiments of advanced centrifugal heat pump with supply temperature up to 100 ° C using low-GWP refrigerant R1233zd(E) [J]. Energy, 2023, 263: 126033.
- [11] GAO J T, XU Z Y, WANG R Z. Enlarged temperature lift of hybrid compression-absorption heat transformer via deep thermal coupling [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 234: 113954.
- [12] ZHANG X, WANG R Z, XU Z Y. Air-source hybrid absorption-compression heat pumps with three-stage thermal coupling configuration for temperature lift over 150 °C [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 271: 116304.
- [13] ZHANG X, HU B, WANG R, et al. Performance enhancement of hybrid absorption-compression heat pump via internal heat recovery [J]. Energy, 2024, 286: 129539.

3.3 食品与生物制品冷链

田长青

(中国科学院理化技术研究所)

冷链是指以冷冻及冷藏工艺为基础、制冷技术为手段，使冷链物品从生产、流通、销售到消费者的各个环节中始终处于适宜的低温环境下的特殊供应链，承担着保证食品药品正常流通的重要作用，是减少农产品产后损失和更好满足人民日益增长美好生活需要的重要手段，是支撑农业规模化产业化发展和助力乡村振兴的重要基础，是推动国内国际双循环和“一带一路”发展战略实施的重要推手，是提高生物制品物流全过程品质管控能力，支撑实施食品安全战略和建设健康中国的重要保障。

“十三五”以来，冷链基础设施与设备得到快速发展。2016—2022年，我国冷库容量从4200万吨增至8365万吨，冷藏车数量从11.5万辆增至39万辆。近十多年来，随着冷链装备发展和冷链物流体系的逐步建立和完善，果蔬流通腐损率已由10年前的20%~30%降至蔬菜的流通腐损率接近20%，水果的流通腐损率为11%；肉类腐损率已由10年前的12%降至8%，水产腐损率由10年前的15%降至10%，表明我国在降低易腐食品的流通腐损率上已取得了明显进步。

目前易腐食品腐损造成的碳排放在冷链中占最大比例，因此应该进一步发展和完善我国冷链设备设施和全程冷链体系，以降低食品腐损造成的浪费和碳排放^[1]。然而冷链低温环境的获得与保持带来了大量的碳排放，并会随着我国冷链物流的高速发展而快速增加，因此有效控制和降低全程冷链碳排放已成为我国冷链产业高质量发展的必然要求。党中央、国务院高度重视冷链行业的发展，2021年12月国务院办公厅发布《“十四五”冷链物流发展规划》，明确指出发展基本原则之一是“顺应绿色生产生活方式发展趋势和推进碳达峰、碳中和需要，把绿色发展理念贯穿到冷链物流全链条、各领域”，为我国冷链物流发展提出了新的要求，因此在满足易腐食品和生物制品流通品质情况下，节能

与可再生能源利用、环保制冷剂等低碳技术与设备设施应用势在必行。

3.3.1 关键研究及应用进展

1) 食品速冻设备

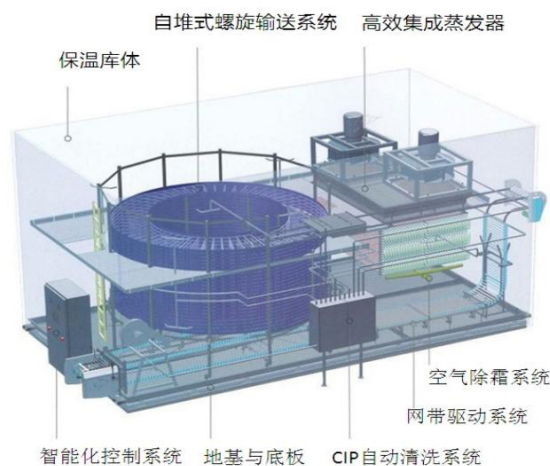


图3.3-1 高效洁净全自动堆积螺旋式食品速冻装置

速冻设备可以使食品在冻结过程中快速通过最大冰结晶生成带，是提升冻结食品品质的重要装置。四方科技集团研发了高效洁净全自动堆积螺旋式食品速冻装置，其主要由高效制冷系统、自堆积式螺旋输送系统、CIP原位清洗系统、保温库体、进出料装置、智能控制系统等几大部分组成（图3.3-1）。该速冻装置采用高效食品快速技术、气流组织优化、蒸发器大面积翅片结构与精密制造、智能监控集成控制等多项技术，实现了自堆积螺旋高效稳定驱动及在线监控技术、高效冻结技术、全自动CIP原位清洗技术及装备成套设计制造、核心部件系列化、产业化技术的集成运用和集成创新，提高了农产品冻结速度，降低能耗；通过开发相应软、硬件系统，实现了各智能监控点的集成优化。

针对蒸煮成熟后的甜糯玉米棒急速冻结，冰山冷热提出了智能型下旋流隧道速冻装置速冻机

(图3.3-2)。该设备根据玉米棒实际冻结曲线合理分区, 预冷段、冷却段、深冷段的温度分别为 5°C 、 -15°C 、 -35°C 。采用振动装置使多层玉米换热均匀, 独有的下旋流送风方式, 实现均匀布风, 冻结效率高、冻结速度快, 弧形挡风板设计, 无送风死角, 减少运行损失。

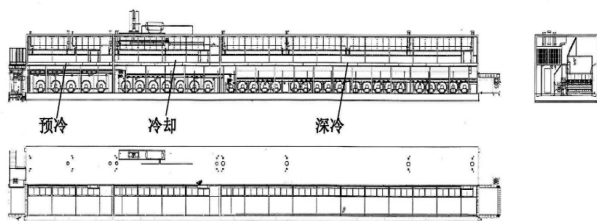


图3.3-2 下旋流隧道速冻装置速冻机

2) 冷冻冷藏制冷压缩机

制冷压缩机是冷链制冷设备的核心零部件, 满足冷链功能需求、高效节能、环保制冷剂是其发展方向。福建雪人股份有限公司推出了SRS-2016LS氨用半封闭单机双级螺杆压缩机(图3.3-3), 压缩机搭载氨用永磁同步变频电机, 采用VFD控制技术结合压缩机容量滑阀无级能调, 实现低负载启动, 运行电流平稳、高效节能; 转子采用全球注册专利螺杆转子“i”型线, 与第三代型线(SRM-D)相比, 压缩机能效比(COP)提高2.8%~9.9%; 大功率三段直联技术, 即电机驱动一级阳转子, 传动二级阳转子, 降低无效功损失, 与双机双级对比大幅减少零部件, 结构紧凑, 操作简单; 电机冷却主要采用循环式水冷和备用制冷剂喷雾双重冷却形式, 对比常规进气冷却, 采用水作为冷却媒介, 冷却效率提高2%~3%, 且仅循环式水冷形式运行时不消耗压缩功。

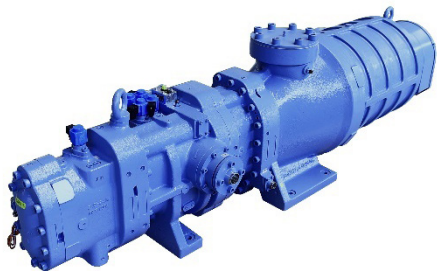


图3.3-3 氨用半封闭单机双级螺杆压缩机

艾默生环境优化技术(苏州)有限公司推出

了谷轮™ZFI140低温大型商用冷冻涡旋压缩机(图3.3-4), 单机制冷能力拓展至40HP, 为市场上暂无的产品, 通过灵活的并联应用, 可以覆盖更大冷量范围; 秉承谷轮柔性涡旋设计, 采用喷气增焓技术, 效率更高, COP 优于传统活塞压缩机; 宽运行范围, 蒸发温度为 $-40\sim-4^{\circ}\text{C}$, 覆盖中低温应用; 智能模块兼顾排温和电机保护, 喷气控制, 保证压缩机长期稳定可靠地运行。对比传统大六缸活塞压缩机, ARI低温标况点能效提升12%, 全年季节能效比更高; 结构设计紧凑, 对比传统活塞机, 减轻超过20%重量和50%占地面积。

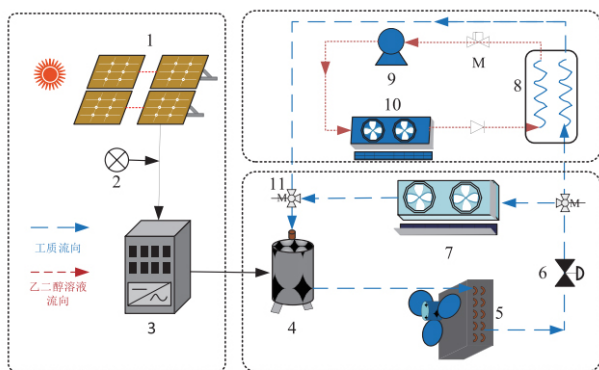


图3.3-4 大型商用冷冻涡旋压缩机

3) 光伏冰蓄冷冷库

为了降低冷库能耗, 实现节能减排目的, 发展了光伏驱动蓄能型冷库(图3.3-5)。天津商业大学基于TRNSYS仿真软件, 构建了太阳能-冷库蓄能型热力耦合模型, 以夏季工况下秦皇岛市某果蔬冷库为研究对象进行了数值模拟和理论分析^[2]。库内温度能够稳定维持在 $2.5\sim4.0^{\circ}\text{C}$ 范围内, 系统COP最高可达1.63, 17天累计能耗为91.5 kW·h, 节省电能59.4 kW·h, 节省用电费用30.294元, 降低碳排放46.6 kg。

云南师范大学对光伏冰蓄冷冷库系统蓄冰模式与结霜故障特性开展了理论分析与实验研究^[3]。对比了光伏驱动冷藏库中串联匹配和并联匹配的蓄冰集成模式, 串联匹配模式在抑制光伏波动方面优于并联匹配模式, 而并联匹配模式在可变太阳辐照度下存在冷却能耗不足。串联匹配模式在以市政供电和光伏发电为能源的空载和满载条件下都表现出更高的性能系数。



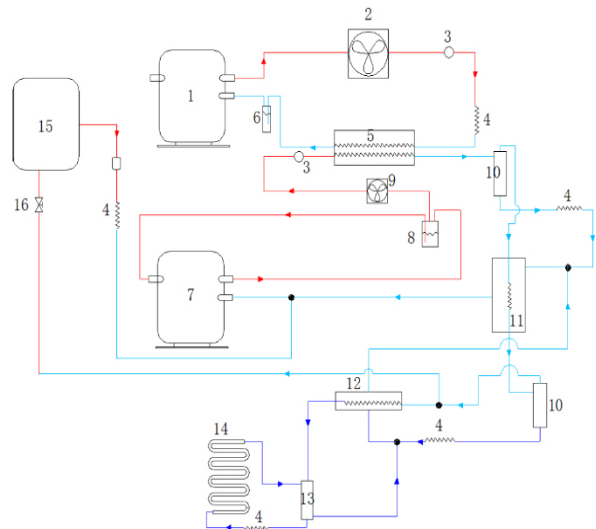
1.太阳能电池板 2.电网 3.光电转换组件 4.压缩机 5.冷凝器
6.节流阀 7.冷风机 8.蓄冷水箱 9.溶液泵 10.冷风机
11.电磁三通阀

图3.3-5 光伏驱动蓄能型冷库系统原理图

4) 超低温冷柜（库）

针对深海鱼类和生物制品的贮存保质需求，低温冷柜发展迅速。青岛海尔生物医疗股份有限公司和上海理工大学开发了碳氢复叠及自复叠低温制冷技术（图3.3-6），辅助专利锁紧及保温结构设计，在低温条件下应用了高效板式换热器及微通道换热器，满足换热前提下将液态制冷剂存量降至最低。研发低温级流量控制并结合自适应的控制方案，解决了高效换热带来的开机阶段各级之间压力不匹配的问题。开发的超低温自动化样本库在实现环保的同时，能效提升 50%。平均单台产品每年节碳 2 吨，按照目前市场保有量计算，年减碳 76878.28 吨。

青岛海尔特电冰柜有限公司和西安交通大学基于非共沸混合工质HX46（R290/R170）开发了-60℃低温冷柜（图3.3-7），采用环保混合制冷剂HX46替代低温产品常用的R12、R508B等制冷剂，对臭氧层无破坏，同时可将温室效应降低90%以上。采用J-T制冷循环替代自复叠和复叠循环，实现了-60℃的低温，空箱降温200min可达-60℃，装载在24h内可将60kg负载降至-18℃以下，是普通冷柜产品的5~6倍；与同类型低温冷柜相比，能耗可降低38.4%以上。采用滑移温度自清除技术解决了非共沸混合制冷剂温度滑移的问题。通过耦合蒸发器压降与混合制冷剂滑移温度的方式，成功将蒸发器的进出口温度控制在3℃以内。



(1.一级压缩机, 2.冷凝器, 3.过滤器, 4.毛细管, 5.中间换热器, 6.气分, 7.二级压缩机, 8.油分, 9.预冷器, 10.气液分离器, 11.一级换热器, 12.二级换热器, 13.经济器, 14.蒸发器, 15.膨胀罐, 16.电磁阀。)

图3.3-6 碳氢多机多级制冷系统

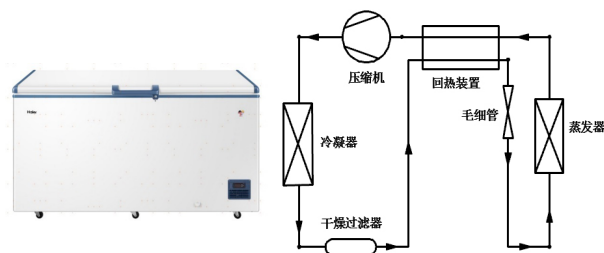


图3.3-7 -60℃低温冷柜及其原理

5) 冷热联供系统

冷热联供提高能源综合利用效率是冷冻冷藏领域值得深入探索的方向。生猪屠宰加工项目既消耗大量热量又需要对加工间进行降温除湿操作，其制冷系统的冷凝排热一般较大，此类项目冷热联供系统非常具有优势。华商国际工程有限公司根据某屠宰厂的实际运行数据，对热泵机组全热回收系统生产60℃热水的相关参数进行了对比分析^[4]。对于主营冷鲜猪肉的生猪屠宰加工项目，采用全热回收系统回收制冷系统的余热生产60℃热水经济性高，采用燃气生产热水运行费用分别是热泵机组的3倍（峰电）、4.8倍（平电）、11.9倍（谷电），采用市政蒸汽分别为2.6、4.1和10.3倍（图3.3-8）。热泵系统投资回报周期在2.5年以内，若采用谷电蓄热的方式，投资回报周期在2年以内。

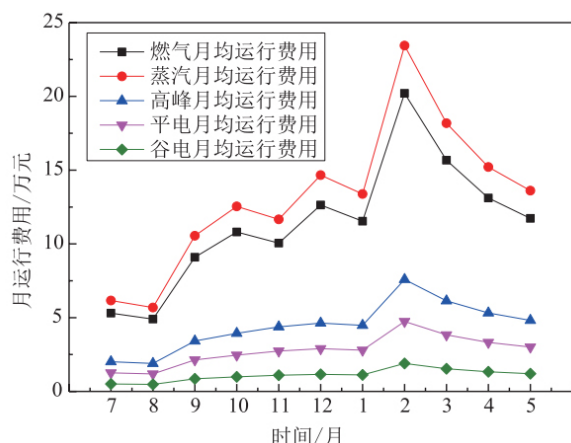


图3.3-8 不同生产热水方式月平均运行费用比较

6) 冰温冷库

冰温贮藏是将易腐食品贮藏 0°C 以下至食品冰点范围内,在不冻结情况下最大限度抑制了果蔬呼吸和有害微生物活动,延长了保鲜期,因此冰温冷库得到了较快发展。冰温冷库要求库温波动小,除了传统的夹套式冰温冷库,冰轮环境建设的冰温库采用织物风道下部渗透风,水平小孔送风,射程为3m,末端风速为 0.3m/s ,尾部大孔喷风以减少风道长度降低成本(图3.3-9)。通过回风温度控制压缩机,压缩机15%~100%无级调节。采用大风量低风速风场,上下全截面空气自然对流。



图3.3-9 采用织物风道的冰温库

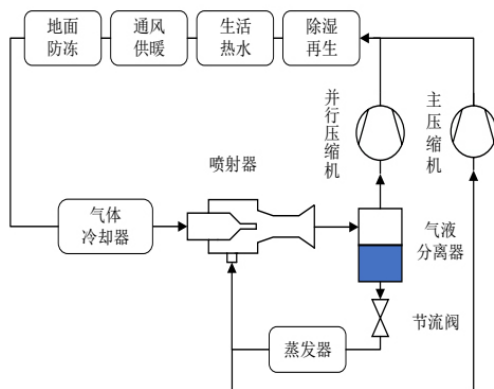
京科伦研发了基于变频控制与翅片顶排管的冰温冷库。采用台数和变频控制,保证温度波动小;冷库顶部布满翅片顶排管,保证空间均匀性(图3.3-10)。



图3.3-10 基于变频控制与翅片顶排管的新型冰温冷库

7) 超大冰面二氧化碳跨临界制冰系统

长期以来冬奥场馆制冰技术掌握在欧美发达国家手中,构建冬奥超大冰面高效 CO_2 制冰系统,具有十分重要的意义。华商国际工程有限公司、清华大学等单位建立了适用于多功能超大冰面的亚临界、跨临界多工况并行 CO_2 直接蒸发制冰集中式制冷系统(图3.3-11),首创了超大冰面 CO_2 直接蒸发制冷系统,研究了以 CO_2 为制冷剂的人工冰场冰池冷排管的构造及排布^[5],通过对不同热量品位需求的梯级热回收技术实现了 CO_2 制冷系统高效运行,同时满足制冰、除湿、生活热水等多种功能。建立了冰面形成过程及其与室内环境关系的理论分析模型,开展了国家速滑馆超过 1.2万 m^2 超大冰面 CO_2 制冷系统工程示范应用,在2022年北京冬奥会国家速滑馆成功应用,获得绿色化、高效化、精准化的显著效果。

图3.3-11 CO_2 直接蒸发制冰集中式制冷系统

3.3.2 优秀案例

1) 集装箱式可移动共享预冷加工中心技术

单位名称: 冰山冷热科技股份有限公司

单位地址：大连经济技术开发区辽河东路106号

背景：

随着国民经济发展和人民生活水平的提高，冷冻、冷藏、保鲜食品需求日益增长，我国冷链物流市场正在以每年8%~10%速度增长。近几年随着中国电商快速发展，生鲜配送供应链需求不断拓展，生鲜农副产品产地预冷、保鲜、冷冻速运的需求不断增加。

通过市场分析和了解客户需求，可移动式的产地预冷机、速冻机、冰温冷库是解决全程冷链最初一公里和提升产品保鲜品质的最优解决方案，也是延长果蔬保质期，降低果蔬损耗的重要技术手段。

原理：

根据每个项目产地的情况，产品的季节情况，提出“快速预冷+冰温贮藏”预冷加工技术，将移动式低温速冷机、移动式压差预冷机、冰温库等产品进行组合，形成预冷加工中心，实现从产地预冷、储存等一站式加工中心。

移动式低温速冷机：主要由隔热箱体、制冷系统、强制通风冷却系统和控制系统等四部分组成。其制冷机组采用30马力高效双级活塞，两机头并联设计；冷凝器采用风冷冷凝器，U型结构，三面进风，顶部出风。强通风采用落地式吸风式冷风机，集装箱内顶部设计导流板，快速冷冻。

移动压差预冷机：主要由隔热箱体、制冷系统、压差通风系统和控制系统等四部分组成，其中制冷系统中的冷风机和压差通风系统置于隔热箱体内部，而制冷机组和控制系统位于隔热箱体侧面。采用隧道式预冷方式，果蔬箱内被冷却物的热量以强制对流方式迅速带走。

冰温冷库：采用蓄冷剂固液相变时温度恒定的原理实现了冰盒的温度恒定，并通过调整蓄冷剂的冰点温度实现冰温库内温度调节，对果蔬进行冰温贮藏，延长保鲜期1倍以上。

依托产品和产品技术指标：

移动式低温速冷机：设计温度-30℃，冻结量4吨，货物入库温度25℃，出库温度-18℃，降温时

间10~20h，需求冷负荷43.8kW。蒸发温度-40℃，冷凝温度45℃，采用集中式供冷。

移动压差预冷机：设计温度0℃，预冷量3吨，货物入库温度25℃，出库温度0℃，降温时间2~3h，需求冷负荷42kW。蒸发温度-8℃，冷凝温度45℃，采用集中式供冷。

冰温冷库：设计冰点温度-0.5℃，冰点控制温度±0.3℃，最大装载5000kg，进货温度≤5℃。

产品图片：



节能环保效果：

集装箱式可移动共享预冷加工中心技术，设备可移动共享，节约了投资费用。采用压差预冷，可延长果蔬的货架期，保证水果品质，果蔬的损坏率减少约10%。采用环保制冷剂R404A，系统集成化设计，与常规冷库相比大幅降低了制冷剂充注量。

2) 绿色智能农产品保鲜冷库

单位名称：四方科技集团股份有限公司

单位地址：江苏省南通市通州区兴仁镇金通公路3888号

产品型号：500~70000m³（以容积计）

背景:

在国内国际双循环背景下，全球冷链产业高速发展，人均冷库容量持续增长。相比于中国，荷兰、新西兰、美国、加拿大、英国、德国等欧美发达国家的冷链发展已经非常成熟，经历了完整的冷链建设与探索历程，其研发的冷库呈现出高效节能、绿色环保、大型化、智能化的发展趋势，在国际高端冷库市场具有垄断地位。虽然我国冷链产业起步较晚，但凭借独特的资源优势，近年来，我国冷链产业飞速发展。目前已成为各类农产品的进出口大国，国内冷链产业正面临前所未有的发展良机，市场潜力巨大。特别是经历新冠肺炎疫情后，冷链作为重要的运载保存方式，受到政府及市场的极大重视，一定程度上新冠疫情对冷链产业发展打了一剂“催化剂”。

针对冷库发展瓶颈，国家“十四五”冷链物流发展规划指出：加快传统冷库等设施智慧化改造升级，加速绿色化发展进程，逐步淘汰老旧高能耗冷库，提高冷库保温材料保温和阻燃性能。

四方科技作为行业龙头企业，积极响应国家政策，全面打破了 NH_3/CO_2 绿色低能耗制冷、冷藏保鲜智能监控、安全环保高阻燃隔热围护等行业瓶颈，创新研制了“绿色智能农产品保鲜冷库”（含成套装备与系统），总体性能达到国际先进水平，在行业内推广、转化具有重要的战略意义。

原理:

“绿色智能农产品保鲜冷库”是为取代传统冷库而自主研发的新一代高端冷链保鲜装备与系统，具有节能显著、安全环保、智能化程度高、保鲜效果好等特点，核心指标国际先进。产品由安全环保节能（ NH_3/CO_2 ）制冷、高效换热（含冷风机、冷凝器）、B1级环保阻燃隔热围护、均匀精准流场传热、自动仓储物流、智能化信息采集与控制等装置与系统组成，用于各类农产品的高质量冷藏保鲜，是新鲜冷冻农产品配送至生鲜市场、农贸市场、超市、餐厅的必经环节，是物流保鲜的基础，对降低流通腐损率起决定性作用，在农产品冷链物流产业链中处于不可替代的核心位置。

产品由安全环保节能（ NH_3/CO_2 ）制冷、高

效换热（含冷风机、冷凝器）、B1级环保阻燃隔热围护、均匀精准流场传热、自动仓储物流、智能化信息采集与控制等装置与系统组成。

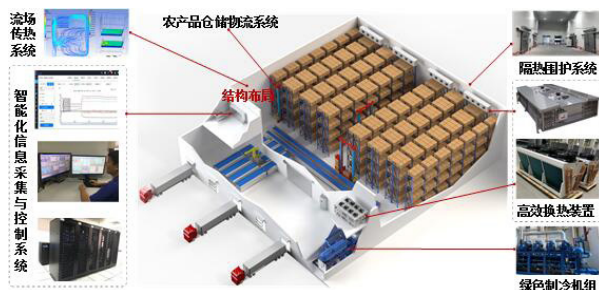


图1 绿色智能农产品保鲜冷库产品组成示意图

1、工作原理

（1）制冷机组的氨侧只有少量 NH_3 制冷剂，且仅集中在制冷机房内，氨侧压缩机排出的高压氨气经冷凝后在 CO_2 侧的冷却器内蒸发换热，将 CO_2 气体液化，气态氨回到压缩机循环换热； CO_2 侧液化后的 CO_2 制冷剂通过循环泵或二级压缩输送至冷库冷藏间冷风机内，完成蒸发换热后回到压缩机组内循环工作；换热装置的冷凝段和蒸发段均由翅片和盘管组成，冷凝段的制冷剂在冷库外冷凝放热，蒸发段的制冷剂在冷库内蒸发吸热；

（2）隔热围护系统是由冷库冷藏室、穿堂、月台等隔间的库门、库板及配套装置形成的保温结构，并兼顾了物流通道与温度分区；

（3）流场传热系统是由风机、库体、货架、农产品货物、蒸发器、冷凝器等形成的冷藏间流场、蒸发器流场和室外冷凝器流场，通过流固热耦合设计实现蒸发器和冷凝器高效换热以及库内恒定冷藏温度，以恒温实现农产品高品质保鲜；

（4）自动化仓储物流系统在冷库的相应区域，完成农产品冻品的自动化收货、质检、分拣、入库、上架、调仓、分拣、集货、出库管理，实现了货区物品的数据管理；

（5）智能化控制系统集制冷机组自动切换，仓储物流数据采集及自动控制，能耗智能管理， NH_3 和 CO_2 制冷剂、传热、融霜、回油精准调控于一体，实现冷藏保鲜系统节能、安全、环保、平稳、可靠运行。

2、已实现的技术突破

(1) 节能环保高可靠冷藏保鲜技术：发明了氨充注量极少、节能效果显著的撬块式 NH_3/CO_2 绿色制冷系统；突破了基于错排变片距异形翅片、模块化集管与冻结板及新型蒸发冷凝器的高效模块化换热技术；发明了基于超声波、水溶液和高压空气的高可靠自动除霜技术。比传统技术（以公称容积20000 m^3 、温度 -18°C 、制冷剂R507a的大型冷库为参照）能耗降低18%以上，碳排放量（基于GWP100指数计算）减少20000吨以上，解决了目前冷库能耗高、氨制冷系统安全风险大、氟制冷剂逆势增长导致环保性差的产业瓶颈。

(2) 大功率制冷系统平稳快速启动及高效高可靠运行技术：独创基于油分离降压的大型压缩机平稳启动新技术，制冷机组启动速度快，效率高。突破了三级分离高效卧式油分离技术、虹吸回收冷却油技术以及高效气液分离技术，制冷剂纯度高，制冷系统运行可靠，解决了100 kW以上大型制冷机组快速启动对电网的瞬时冲击非常大，制冷系统能耗高和故障率高的行业难题，机组工作效率提高50%以上。

(3) 安全环保高阻燃隔热围护技术：突破了环保高阻燃低导热材料研制、保温板设计、安全环保库体围护设计关键技术，发明了基于胀气慢回弹聚醚多元醇等4种多元醇组合的2种聚醚组分以及基于2种聚醚组分的聚异氰脲酸酯泡沫（PIR）夹芯板，采用戊烷发泡环保新工艺，研制出250mm厚、B1阻燃等级、低导热PIR板材及冷库围护结构，实现了隔热围护板材节能、防火、环保工艺的全面升级。

(4) 大型冷库流场和温度场均匀精准控制技术：基于CFD流固热耦合精准计算，突破了冷库风幕风场优化设计、冷风机自清洗自隔离技术及大风量风机设计制造技术，通过冷库库容与机组智能计算技术，实现了冷库库容、制冷机组、蒸发器、货物堆码、冷风机、气幕组合优化，破解了大型冷库温度分布不均导致的农产品高质量保鲜难保障的行业难题。

(5) 冷藏保鲜系统智能监控及能耗管理技

术：突破了基于“制冷机组自动切换，喷油、传热、回油、融霜精准调控，仓储物流自动控制”的冷藏保鲜智能监控技术及能耗智能管理技术，冷库年耗电量、温度波动及温度分布等核心指标全部达到国际先进水平。

3、创新点

(1) 突破了节能环保冷藏保鲜成套技术：集“ NH_3/CO_2 ”绿色制冷、“错排变片距异形翅片/模块化”高效换热、“超声波/水溶液/高压空气”自动除霜等技术为一体，比传统技术能耗降低18%以上，碳排放量减少20000吨以上（以20000 m^3 、 -18°C 、R507A冷库参照，基于GWP100指数计算），解决了目前冷库能耗高、氨制冷系统安全风险大、氟制冷剂逆势增长导致环保性差的产业瓶颈。

(2) 突破了大功率制冷系统平稳快速启动及高效高可靠运行技术：独创基于油分离器降压的大型压缩机启动新技术及基于高效卧式油分离的制冷剂提纯技术，解决了大型冷库制冷机组快速启动对电网的瞬时冲击非常大，制冷系统能耗高和故障率高的行业难题。

(3) 突破了大型冷库流场和温度场均匀精准控制技术：基于CFD流固热耦合精准计算，突破了风幕风场优化设计、大风量风机设计制造、库容与机组智能计算技术，实现了冷库库容、制冷机组、蒸发器、货物堆码、冷风机、气幕组合优化，破解了大型冷库温度分布不均导致的农产品高质量保鲜难保障的行业难题。

(4) 突破了基于“制冷机组自动切换，喷油、传热、回油、融霜精准调控，仓储物流自动控制”的冷藏保鲜智能监控与能耗管理技术，冷库年耗电量、温度波动及温度分布均匀性等核心指标全部达到国际先进水平。

技术指标：

库体传热系数 $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$: 0.14 (库板厚200mm)

空库降温时间/h: 2.3

库内温度不均匀性/ $^\circ\text{C}$: 1.9

工作时间系数: 0.5

融霜: 灵敏、可靠

产品图片：



图1 绿色智能农产品保鲜冷库



图2 绿色智能农产品保鲜冷库核心系统：制冷机组结构、换热系统结构



图3 绿色智能农产品保鲜冷库核心系统：隔热围护系统

节能效果：

提高农副产品加工行业的工业化水平，降低农产品产后损耗，提高资源有效利用率；

优化绿色制冷、高效换热、自动除霜等专利技术，比传统技术能耗降低18%以上、碳排放量减少20000吨以上（以20000m³、-18℃、R507A冷库参照，基于GWP100指数计算）；

采用大功率制冷系统平稳快速启动及高效高可靠运行技术，降低制冷系统能耗和故障率；

采用智能监控与能耗管理技术，减少冷库年耗电量、温度波动，提高温度分布均匀性。

3) 蒙牛乳业灵武基地园区智慧能源项目

案例类型：食品、药品等冷链及烘干（新建）

主申报单位：珠海格力电器股份有限公司

副申报单位：蒙牛乳业（宁夏）有限公司

使用单位：蒙牛乳业（宁夏）有限公司

地址：宁夏银川市西夏区宝湖西路550号

案例概况：

该项目位于宁夏灵武市，占地面积约589亩，一期建筑面积约为12万m²，主要为生产特仑苏、学生奶等产品提供冷冻水。为满足车间不同用冷需求，该项目搭建了工艺冰水、空调冰水、工艺冷却系统及自动控制系统。集成机组、水泵、水箱、冷塔、配电、监控、综合布线等系统于一体，实现了制冷、供电和管理组件的无缝衔接。同比节约土地面积30%，同比减少建设时间60天，同比减少建设人员10人。

技术特点：

冰水系统增设冷冻供水、回水箱，冷冻水分两路并行通过电动阀门的控制，阀门对合格水（≤0.5℃）和不合格水（0.5℃）进行判定，分别引流至对应水箱，提升系统对外负荷变化的适应性，弱化末端负荷突变对制冷机组的冲击。

空调系统配备光伏直驱变频离心机，光伏直流电直接驱动压缩机，省去光伏逆变器，总投入降低10%，省去传统光伏发电3次电能转换，能量损耗减少6%~8%；年发电量为1021万kW·h，减少CO₂排放4606.7t。

将冰水系统和空调系统相结合，利用水箱蓄冷合理匹配末端用冷需求。减少高峰用电时间，降低用电成本，同时解决了机组故障时的用冷需求问题。

实施效果：

该项目是空调系统高度模块化产品的集成应用，打造了高度智能化工业产品。考虑到经济性 & 换热效果，采用四流程降膜式蒸发器、纯铜换热管和双压缩机来适配低负荷工况下的稳定运行；通

过目标水温分段设定，保证机组平稳加载，避免出现瞬间负荷过调。该项目冰水系统自5月份运行以来，持续稳定输出 0.5°C 冷水，年机房能效 ≥ 3.5 ，高于常规氨基冰水系统能效3.0。

运行情况：

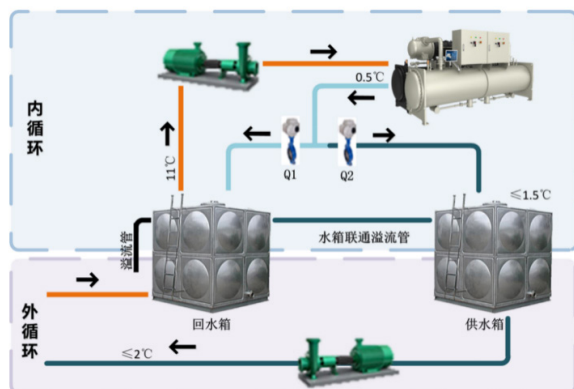
运行周期：全年运行。

经济效益：自2023年5月至2023年10月在园区运行以来，冰水系统运行过程中耗电量1159584kW·h，相比传统机房节省用电463833 kW·h。

社会效益：光伏发电不使用燃料，相比传统发电碳排放减少209t，节约标准煤57t，不排放有害气体，不产生噪声，对环境友好。

推广示范效应：该项目利用光伏（储）直驱变频空调系统，发用电一体，设备及工程投入减少10%，配电房面积减少50%，光伏投资回收期较常规系统缩短15%；蓄冷模块为夜间使用柔性供冷，节约了用电成本；采用模块化设计，缩减机房空间，降低安装成本。为我国乳制品产业模块化机房系统构建提供了解决思路。积极响应国家号召，实现共同建设“双碳”目标，有助于推动国家乳制品行业走低碳节能绿色发展的道路。

流程图：



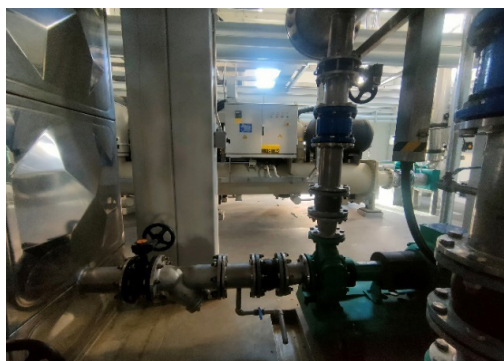
双水箱结构设计：通过冷冻供回水水箱，增加系统对外负荷变化适应性，弱化负荷变化对冷机的冲击。

内外循环分流设计：通过联通溢流管和外循环旁通管实现机房与站外分离，保持冷冻水温始终达到 0.5°C 及以下。

合格水输出结构设计：通过冷机出水管阀门Q1和Q2动作将不合格的冷冻水（ 0.5°C ）旁通至回水箱，合格冷冻水（ $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ ）输送至供水箱。

案例现场：

制冷机房模块化设计，占地面积为 885m^2 ，同比节约30%；总造价为4000万，同比节约10%；现场建设时间为30天，同比缩短60天；现场建设人数为10人，同比减少20人。该项目荣获第三届全国装配式机电工程设计应用技能大赛（装配之星）二等奖。



参考文献

- [1] 田长青, 孔繁臣, 张海南, 等. 中国冷链碳排放及低碳技术减排分析[J]. 制冷学报, 2023, 44(4): 68-74, 111.
- [2] 张海涛, 赵松松, 刘斌等. 光伏驱动冰蓄冷冷库系统数值模拟研究[J]. 冷藏技术, 2023, 46(1): 53-57.
- [3] 张卓力. 光伏冰蓄冷冷库系统蓄冰模式与结霜故障特性研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2023.
- [4] 王长江, 马进, 丁明青, 等. 冷热联供系统在生猪屠宰加工项目上的应用分析[J]. 冷藏技术, 2023, 46(4): 43-47.
- [5] 李锋, 韩晓婉, 司春强. 室内人工冰场冰池及冷排管构造实验研究[J]. 冷藏技术, 2023, 46(1): 36-39.

3.4 数据中心及算力中心冷却

邵双全

(华中科技大学)

数据中心是数字经济发展的引擎和载体，2022年我国数字经济规模已经达到50.2万亿元，占全国GDP的41.2%^[1]。数据中心也是人工智能、大数据、云计算、工业互联网等新兴行业发展的基石，这些行业的高速发展对数据和算力提出越来越高的要求，因此，国家推出了“新基建”“东数西算”等战略，推动数据中心的高速发展与高效利用^[2]。

数据中心特别是算力中心的快速发展，其高能耗和高水耗问题也日益受到关注。冷却系统是保障数据中心内部温度稳定的核心设备，也是数据中心能耗占比最大的辅助设备^[3-5]。因此，本文总结了数据中心冷却系统高效低碳技术的最新进展，并结合相关案例加以说明，为数据中心节能减排提供参考。

3.4.1 数据中心冷却技术研究进展

数据中心冷却系统主要是收集数据内部的热量并移除到室外环境中去，以保障数据中心电力电子设备的高效稳定运行。近年来，液冷技术、自然冷却技术、蒸发冷却技术、智慧运维以及能源综合利用等都取得了快速发展和应用。

1) 液冷技术

随着数据中心功率密度增大，液体冷却技术拥有比空气更高的对流换热系数和更高的冷却能力，并降低系统能耗。液冷还可以最小化房间内增加的热量、减少/消除风扇的使用、提升冷却液温度以实现余热回收、降低系统复杂度以及减少对地理气候的依赖。液冷有三种主流的方式：冷板式液冷、浸没式液冷和喷淋式液冷；而按照冷却介质是利用显热还是相变潜热进行冷却又可以分为单相液冷和相变液冷^[6]。2023年6月《电信运营商液冷技术白皮书》的发布更是有力地推动了液冷技术的实施^[7]。

2) 自然冷却技术

采用新型高效压缩机（如磁悬浮、气悬浮、液浮等无油压缩机）、高效换热器以及系统整体优化匹配等技术可以不断提升传统蒸气压缩制冷系统的运行能效。由于数据中心发热量大，需全年制冷运行，在室外存在低温自然冷源（如温度较低的空气、海水、湖水等）时，可以通过风侧自然冷却、水侧自然冷却、回路热管等方式制冷，不需要开启主动制冷系统，能够显著提高数据中心的能效，降低数据中心冷却系统碳排放^[8,9]。除北方地区广泛利用低温空气外，东江湖大数据中心、三峡东岳庙数据中心、武当云谷大数据中心等都利用低温水源实现全年和部分时间段的自然冷却。

3) 蒸发冷却技术

蒸发冷却技术以水为工质，由于水蒸发的相变潜热远远大于水或空气的显热，可以获得低于空气干球温度（直接蒸发冷却）甚至低于空气湿球温度（露点蒸发冷却）的低温介质，且该技术价格低廉、能耗较低。数据中心常用蒸发冷却技术形式主要分为：制冷冷风、制取冷水以及相变工质冷凝。蒸发冷却技术的应用不仅可以提升自然冷却的使用时间和节能效果，也可以提升蒸发压缩制冷系统的能效。近年来不仅在西北干燥地区广泛使用，也在东南高温地区的多个数据中心成功得到应用，都取得了优异的节能减排效果^[10]。

4) 智慧运维

由于数据中心全年不间断运行，IT设备运行负载状态与室外气象条件都处于不断变化中，高效运行是实现节能减排的根本。数据中心冷却系统的智慧运维是基于数字孪生的概念，针对运维目标创建数字化镜像，通过大量布置传感器实现对IT设备和

冷却系统的电子复刻，采集大量的气象参数、IT设备与冷却系统的运行参数，训练IT设备、冷却系统和气象参数模型，对数据中心冷却负荷及能耗进行预测，通过智能化运维平台进行数据的聚合、分析，调整IT设备及冷却系统的运行状态，实现冷却负荷的动态高效匹配，并对可能出现的异常情况进行预测和监测，保障数据中心的高效可靠运行。近年来，智慧运行技术在多家数据中心得到试用，实现数据中心能效的持续优化^[11]。

5) 能源综合利用

由于数据中心全年不间断运行，因此余热资源十分丰富。通常来说数据中心各种传热工质的工作温度在20~60℃，属于低温余热资源，可用于办公或住宅供暖、生活热水或者设施农业等领域都得到了尝试，并且取得了良好的效果。而数据中心作为稳定的用电负荷，近年来对于消纳风电、光电等可再生能源，打造绿色数据中心更是日益收到关注。因此，对于消纳可再生能源电力，提供高效算力和热力，实现“电力-算力-热力”系统优化也是数据中未来的重要发展方向^[12]。

3.4.2 浸没式液冷应用

1) 案例简介

数据中心名称：提尔科技液冷智算中心

数据中心地址：甘肃省庆阳市西峰区兰州路东数西算国家枢纽中心

数据中心标准：UptimeT3 & A 级

建筑面积：约100m²

设计算力机架：128架；

设计算力负荷：约 600kW；

设计PUE：1.05

竣工运营：2023年9月—2024年4月

集群共配置70kW液冷一体化机柜8台，设计最大IT功率600kW，可搭载浸没液冷专用服务器128台，最多容纳RTX4090算力卡1024张，能够形成170P的半精算力。

数据中心如图3.4-1所示。



(a) 室内侧



(b) 室外侧

图3.4-1 提尔科技液冷智算中心

2) 冷却系统架构

数据中心冷却系统原理如图3.4-2所示。通过采用浸没式液冷技术，将发热的电子元件直接浸没在冷却液中，由对流换热带走元件上的热量，并由外部的制冷系统将冷却液的热量导出。所使用的单相浸没式液冷技术，可以有效降低数据中心高热流密度元件的温度，更加节能环保，大大减少能源的浪费。

项目整体运行架构为工程产品化的模块化方案。以浸没液冷一体化机柜为载体，集成浸没液冷型人工智能服务器系统、液冷机柜系统、室内冷却子系统、室外散热系统、DICM等系统。将机房内风、火、水、电集成于一体化机柜内，再通过一体化机柜之间的并机扩容形成智算集群。

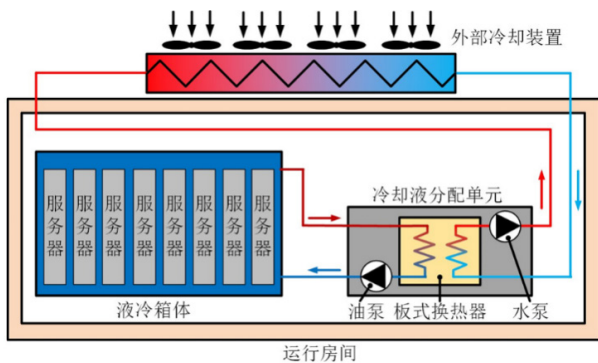


图3.4-2 浸没式液冷系统原理图

(1) 室外散热系统：数据中心采用N+1式干冷器系统，选用1300kW双盘管含湿膜机组 1 台（双盘管可实现1用1备）。配套动环系统实现远程监控与自动切换控制。

(2) 冷却水系统：环网配置，设计冷却水温度 30/35℃；冷却系统管路配置水处理装置以保证冷却水水质。水泵 N+1 配置，冷却水泵变流量结合干冷器。

(3) 自控系统：根据系统运行需求进行逻辑定制，常态时无需人工干预，据设定参自动全年运行。

(4) 室内末端：负荷侧采用浸没液冷散热方式，服务器完全浸没在散热液体中，冷却液采用自研“冰夷797”冷却液，其主要物性参数如表3.4-1所示。

(5) 室内冷却子系统（CDU）：包含有冷却液屏蔽泵、分集液装置等，单套CDU模块换热量不小于60kW，其规格如表3.4-2所示。单个液冷机柜内部配备2套CDU模块数量，有效实现一用一备。采用模块化在线热备份运行方式，CDU模块采用机架式抽拉模块设计，可根据维修及维护要求，实现不停机快速拔插更换。冷却液泵数量2套，有效实现一用一备。最大扬程不少于35米；流量5~30m³/h范围内可调；功率不大于4kW。CDU为液冷机柜提供冷却液循环与换热，接入冷源系统即可实现不间断散热。冷却液分配单元为液冷缸体提供均匀、稳定的流量，保证液冷缸体内服务器的散热安全性，极大提高整体系统的节能性。

表3.4-1 “冰夷797” 主要物性参数

项目	单位	数值
颜色	-	无色透明
气味	-	无气味
密度	kg/m ³ , 20℃	797
倾点	℃	<-65
开口闪点	℃	>164
沸程	℃	>300
燃点	℃	>175
导热系数	W/(m.K), 50℃	0.38
比热容	J/(kg.K)	2154
酸值	mgKOH/g	<0.01
体积电阻率	Ωm	6×10 ¹²
刺激性	-	无
挥发性	-	无
击穿电压	kV	≥30
水溶解度	-	0

表3.4-2 CDU技术规格

规格	详细说明
供回液温度	一次侧：入水最高32℃，出水最高37℃ 二次侧：入口最高40℃，出口最高45℃
换热量	≥60kW
冷却液循环泵	高效变频泵，工作点效率不低于55%
2N架构	2N架构，双备份设计
过滤装置	设置过滤网
排气装置	水管路最高处设有自动排气阀
运维说明	冗余设计可在线维护
供电说明	冷却液循环泵：380V/3相/50Hz
监控点位	冷却液进、出温度、压力及流量。 进、出水温、压力及流量。

3) 控制策略

液冷机柜进液和供液管路均设置温度传感器，根据情况，可以设置压力传感器，根据温差对热负荷进行调节；

液冷机柜的负荷调节可以由CDU进行控制，CDU根据各支路的供回液温度控制流量调节阀的开启度；

CDU主机的液泵根据压差进行控制，当流量调

节阀工作的时候，泵前后压差会有变化，通过调整频率，维持固定压差，压差可以设定；

柜体内部也分散布置若干组温度传感器，用于检测内部液体温度，防止局部液体温度过高；

液冷机柜内部设置液位检测装置，用于监测液体液位，当液体液位过高或者过低，都会发出告警；液体液位可以根据不同的服务器需求进行设定；

定义靠近液冷机柜一侧的液体循环系统为一次侧系统、向室外散热的水系统为二次侧系统。

CDU二次侧系统选用干冷器，由于干冷器负责带走机房内的热量；

CDU也可以对一次侧系统的供液温度进行设定和控制；

制冷主机可以根据一次侧负荷的变化情况，快速响应进行制冷量调节；

液冷机柜也可以设立独立的检测显示系统，可以通过本机显示屏查看本体系统的温度分布状态、进出液管温度、液位状态、液位告警信息、温度告警信息等参数。

4) 运行性能

目前，液冷集群建设了8台液冷机柜，目前已经投运了2台液冷机柜共计32台液冷服务器，可提供算力约50P FLOPS，系统平均运行PUE为1.08。

(1) 综合性能系数（GCOP）

在不同工况下数据中心冷却系统运行性能如表3.4-3所示，IT设备功率为68.8kW，GCOP可高达20，PUE可达1.05。系统PUE主要随水泵和油泵的功耗变化，如当水流量为5m³/h、油流量为10m³/h时，二者功耗较低，系统PUE为1.05；当水流量为7.5m³/h、油流量为32m³/h时，二者功耗较高，系统PUE为1.17。

表3.4-3 不同工况下系统运行性能

水流量 m³/h	油流量 m³/h	水泵 功率 kW	油泵 功率 kW	风机 功率 kW	GCOP	PUE
7.5	32	1.2	4.0	6.5	5.88	1.17

7.5	20	1.2	2.5	5.25	7.69	1.13
7.5	10	1.2	1.25	3.74	11.1	1.09
5	32	0.75	4.0	6.26	6.24	1.16
5	20	0.75	2.5	5.0	8.34	1.12
5	10	0.75	1.25	1.44	20.0	1.05

(2) 不同流量下系统性能

表3.4-4为2023年10月8日至9日该数据中心在冷却水流量为7.5m³/h时，冷却系统的运行性能。

表3.4-4 冷却系统性能（冷却水流量为7.5m³/h）

油流量m³/h	10	14	20	26	32
时段	19:13 -19:35	01:14 -01:32	23:16 -22:32	21:50 -22:04	19:34 -19:48
进油温度℃	28.2	28.8	29.3	29.6	29.8
出油温度℃	39.6	36.8	34.8	33.8	33.2
进水温度℃	25.1	25.5	25.5	25.2	25.2
出水温度℃	32	32.1	32.1	31.9	32.1
GPU温度℃	60.25	60.21	60.14	59.74	59.59
室内温度℃	23	20	20	20.2	20.5
室外温度℃	13	9	9	12	14

表3.4-5为2023年10月9日至10日该数据中心在冷却水流量为5m³/h时，冷却系统的运行性能。

表3.4-5 冷却系统性能（冷却水流量为5m³/h）

油流量m³/h	10	14	20	26	32
时段	23:45 -00:09	02:19 -02:37	04:17 -02:33	05:40 -05:54	07:01 -07:13
进油温度℃	29.2	29.3	30.5	30.6	30.9
出油温度℃	39.9	36.8	35.2	34.1	33.5
进水温度℃	25.4	24.6	25.3	25	25.2
出水温度℃	34	33.7	34	33.7	33.5
GPU温度℃	61.56	61.13	60.86	60.48	60.14
室内温度℃	22	22.9	21.8	22	21.5
室外温度℃	10	10	8	7	7

图3.4-3给出了不同冷却水流量和油流量下GPU的温度。从中可以看出，水、油的变化均会对GPU温度产生影响，当水、油流量降低时，GPU温度会出现小幅的增长，当水流量为2m³/h、油流量为8m³/h时，GPU温度为64℃，仍可保证系统安全稳定地运行。

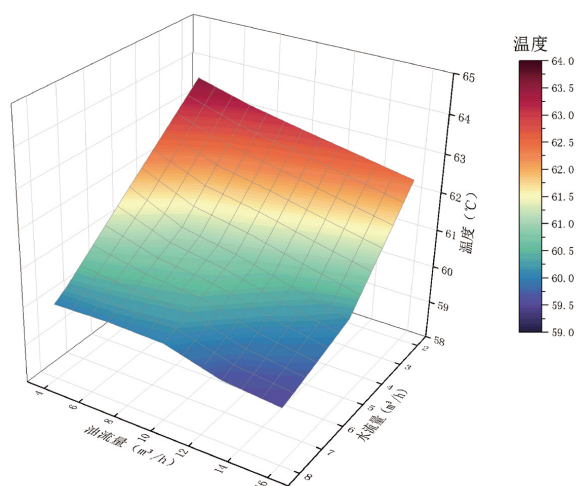


图3.4-3 不同水/油流量下的GPU温度

(3) 不同负载下系统性能

图3.4-4给出在水流量 $7.5\text{m}^3/\text{h}$ ，油流量为 $32\text{m}^3/\text{h}$ 时，冷却系统的温度变化。

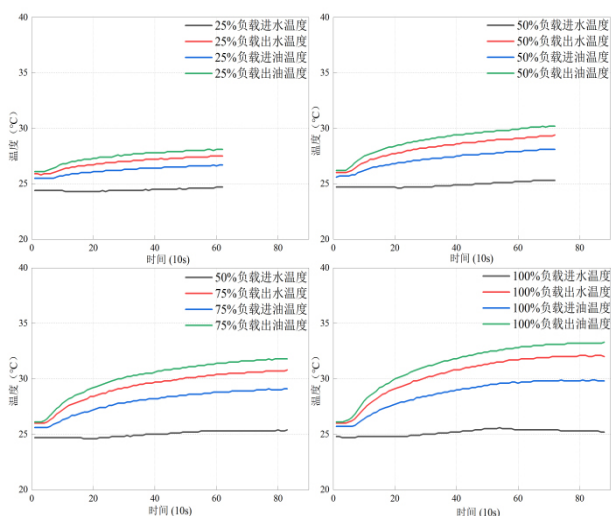


图3.4-4 不同负载下水/油温度变化

5) 系统亮点

采用该产品方案可以实现：

(1) **产品先进性**：将浸没式液冷技术与现有的方舱式数据中心方案相融合，方案内包含液冷方舱、配电方舱、监控方舱等，产品深度整合，所有部件实现工程产品化工厂预制生产。可根据IT设备空间容量需求进行整合，快速扩容。在实现建设模块化、标准化的数据中心基础上，进一步提升了系统的节能性与环保性。采用浸没液冷方案，冷媒与

发热器件直接接触，换热效率更高，且可实现全面自然冷却，采用全浸没方式，服务器内部温度场更加均匀，器件可靠性更有保障，系统PUE可实现1.05。

(2) **高配置**：占地面积相同的情况下，一台一体化液冷机柜比一台风冷设备，可以容纳多十倍的服务器，这也意味着同样单位体积下采用液冷系统，计算能力可以提升十倍以上。单机柜功率密度可达 60kW 。

(3) **高质量**：产品无泄漏风险，采用绝缘、环保的冷却液体，即使发生泄漏对基础设施硬件和外界环境均无任何风险；系统噪声更低，服务器全部元器件均可通过液冷方式散热，内部实现无风扇设计，满载运行噪声最低可至 45dB 。

(4) **减面积，降成本**：系统集成在机柜内部，占地面积较小。不需要装修、地板等配套工程，有效降低资本性支出，浸没式液冷提升整机能效，降低运营成本，使总体拥有成本TCO显著下降。

(5) **监管更全面，服务更有效**：一站式售后服务能及时处理各类设备故障问题，省时省心；通过动环监控系统，实现本地、远程监控管理，更多网点接入上层管理平台统一监管，多样化选择支持。

(6) **行业领先的核心技术首创液体控制算法+自研国产化冷却液+自研浸没液冷服务器**，对比传统数据中心基础设施方案初投资可降低25%，运营成本降低25%，5年期TCO可降低至少22%。

(7) **极快安装**：工厂预制化接电网即可上线。

(8) **低故障率**：对比风冷服务器，液冷服务器方案故障率下降达50%以上。

6) 小结

目前，液冷集群建设了8台液冷机柜，目前已经投运了2台液冷机柜共计32台液冷服务器，可提供算力约 50P FLOPS ，系统平均运行PUE为1.08，已投运的32台液冷机柜每年可产生360万元的算力收益。

预计到2024年4月或项目资金到位后，集群上满

128台服务器，可最多容纳RTX4090算力卡1024张，能够形成170P的半精算力。待集群上满128台服务器后每年可产生1450万元的算力收益。届时，通过运行状态调整以及AI调优等手段，或可实现整体系统运行PUE在1.05以下。

3.4.3 双回路热管空调应用

当前，机房空调系统节能技术有自然冷源利用、提高空调设备自身效率、气流组织优化等方法。热管空调就是通过最大限度利用自然冷源提高空调效率的方式实现节能减碳目的。通过对武汉电信某机房和安徽电信某机房实际运行情况，展开能耗计算和分析，验证热管空调节能改造效果和设备运行效率，以及空调系统运行可行性和节能潜力，为未来通信机房的节能改造提供方案参考。

1) 双回路热管空调原理

热管技术全面应用热传导原理和相变介质的高速热传导属性，通过热管把发热体的热量快速传送到热源以外，是机房冷却系统利用室外自然冷源的重要方式之一。将热管技术与压缩机制冷技术相结合，更大限度利用自然冷源，在不增加设备的前提下，既保证机房的制冷需要，同时降低机房PUE。如图3.4-5所示为双回路热管空调原理。

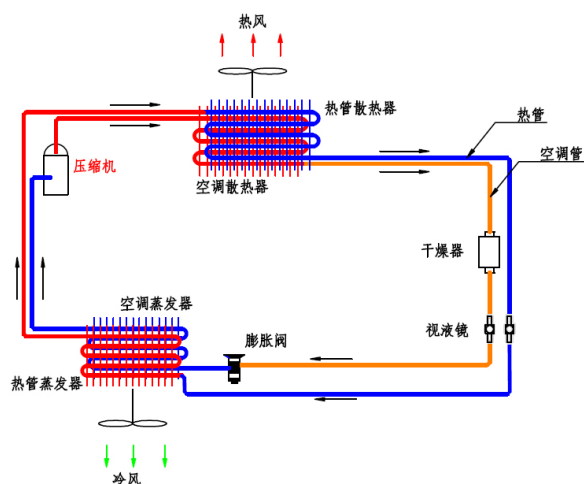


图3.4-5 双回路热管空调原理

该空调由蒸汽压缩式制冷回路和热管回路两个回路构成，室外机需高于室内机一定高度。两个回路可以各自独立运行，也可以联合运行。在室外温度低于室内温度时，热管回路可自动开启，从室

内吸收热量向室外散热；当热管回路热管不足或室外温度高于室内温度时，需要开启蒸汽压缩制冷循环，从室内吸热向室外散热。两个回路内的制冷剂不互换影响，制冷剂的遴选以及制冷剂充注量和换热器都可以根据各自的运行工况进行独立优化设计，可保证空调系统在各种运行模式下都保持高效运行，以降低系统能耗。

2) 在武汉电信某机房应用效果

(1) 机房情况介绍

机房长32.8米，宽8米，总面积262m²，安装有21列机柜，机房安装有不同厂家的10台5匹机房空调（图中红色标识KT-1~KT-10），设备布局如图3.4-6所示。

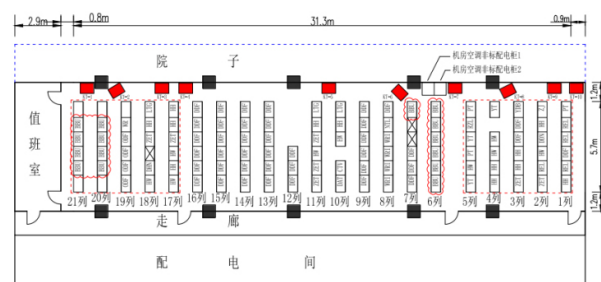


图3.4-6 武汉电信某机房布局图

改造前机房存在的问题为：机房局部发热问题比较严重。特别是6-7列、20-21列4G BBU机柜发热密度高，机房空调循环风量偏小，冷气不能送到BBU机柜，常发高温报警；制冷量不足，机房整体温度偏高，机房已无空余机柜不能增加设备；机房PUE偏高，4月份PUE为1.59，全年PUE在1.64左右。

经2018年4月5—6日实际测量，室外温度为6~13℃，机房主设备直流负荷电流1200A，机房空调运行情况和能耗如表3.4-6所示。

表3.4-6 改造前机房空调能耗

空调	设备年代	额定制冷量/kW	运行电流/A	日耗电/kWh	出风风速/(m/s)
KT-1	2016.8	12.6	7.91	87.46	10.8
KT-2	2016.2	12.6	7.98	88.24	9.6
KT-3	2014.7	12.6	7.64	84.48	7.7
KT-4	2013.5	12.5	9.29	102.72	5.5
KT-5	2012.7	12.5	7.51	83.04	7.3

KT-6	2012.9	12.6	8.29	91.66	9.1
KT-7	2006.5	12.6	8.71	96.31	4.1
KT-8	1996.12	12.5	8.86	97.97	4.3
KT-9	2017.3	12.6	7.91	87.46	10.9
KT-10	1996.12	12.8	9.55	105.60	4.8

机房空调日均总耗电量为924.93kWh，主设备电功率64.8kW，日耗电量1555.2kWh；机房PUE=1.59。（注：仅计算机房主设备和空调能耗，不计电源设备和照明的能耗）。

（2）机房改造方案

为解决机房问题和降低能耗，计划拆除原10台空调，采用10台“兴致汉德”双回路热管空调代替，其中7台为5P、3台为8P热管空调，8P空调布置在高发热列间。

在相同制冷量条件下，“兴致汉德”热管空调风量更大、送风距离更远，能有针对性解决机房局部热点问题。

（3）运行数据分析

热管空调于2018年6月安装完成至2022年2月17日，电表监测耗电数据如表3.4-7所示。

表3.4-7 改造后机房空调能耗（单位：kWh）

日期	2018/11/7	2021/6/5	2022/2/17
KT-1	10411	71639	90766.4
KT-2	14744	88766	115999.96
KT-3	12236	87876	110297.14
KT-4	8907	87008	112221.29
KT-5	14061	87089	107892.11
KT-6	13758	87940	110369.85
KT-7	9907	110189	133888.86
KT-8	12743	60637	77897.9
KT-9	4030	94016	120334.88
KT-10	5323	70654	88646.16

2018年6月至2021年6月，双回路热管空调总耗电量845814kWh，到2022年2月17日总耗电量为1068314.55kWh。从2018.6—2021.6三年整，主设备负荷由1200A增长到1800A，热管空调总耗电量为845814kWh，平均年耗电量281938kWh，机房年均PUE为1.34。

2021年7月至2022年2月期间232天，主设备功率增长到2230A，机房于2021年7月增加了1台5P普通机房空调。期间双回路热管空调耗电222500.55kWh，新装普通机房空调约耗电15600kWh，主设备耗电670498.56kWh,PUE为1.35。

（4）改造案例总结

节能效果明显。用“兴致汉德”双回路热管空调代替原空调后，该机房年PUE从1.64降低至1.34-1.35。

产品性能良好。改造后热管空调制冷效果好，送风距离远，有效解决了机房局部发热问题，在近4年主设备负荷大幅增加的情况下，还能较好地控制机房温度。

3）在安徽电信某机房应用效果

（1）机房情况介绍

机房信息：三层传输机房面积276平米，长约28.5米，宽约9.6米，机房高4米，密封良好。机房现有7台5P空调，采用上送风方式。机房平面图如图3.4-7所示：

机房问题：现有5P空调送风风量小、送风距离短，第9列机架OTN设备安装密度高，导致散热不畅产生局部高温。

（2）机房改造方案

新增一台兴致汉德5P双回路热管空调，安装在9列OTN机架位置如下图（蓝色标记位置），并关闭旁边的5P空调。兴致汉德热管空调比原空调送风更远，解决了第9列OTN机架局部高温问题。热管空调安装后机房平面图如图3.4-8所示。

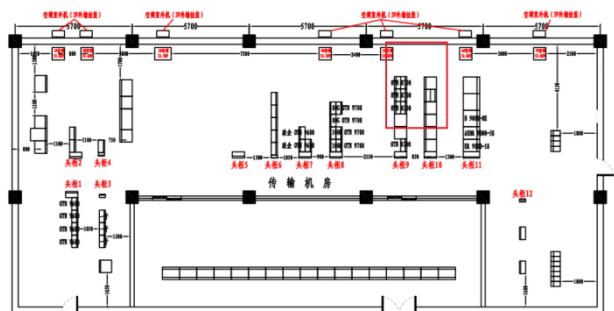


图3.4-7 安徽电信某机房布局图（改造前）

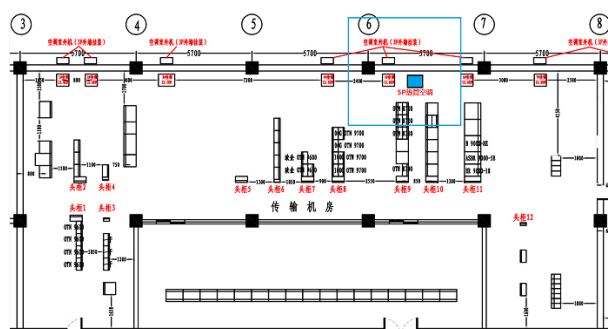


图3.4-8 安徽电信某机房布局图（改造后）

（3）运行数据分析

热管空调自带智能电表，同时给热管空调右侧的5P机房空调加装智能电表，进行耗电量采集对比。2020年8月20日5P热管空调安装完成。由于“兴致汉德”热管空调是新的且风量更大，因此安装区域的发热量要高于右侧机房空调。

2020年8月20日~11月4日共运行76天，热管空调耗电7999.83 kWh，原机房5P空调耗电8511.92kWh，期间两台空调都运行在压缩机制冷模式，因此耗电量相当，热管空调略低于原机房空调。对比数据如表3.4-8所示。

表3.4-8 蒸汽压缩制冷模式能耗对比

时间	型号	空调总耗电量	平均日耗电量
8.20-11.4	兴致汉德5P	7999.83kWh	105.26kWh
8.20-11.4	原空调5P	8511.92kWh	112kWh

进入11月之后气温降低，热管空调启用了热管模式（混合节能模式），从11月4日—11月27日共24天的耗电量来看，兴致汉德5P热管空调对比原机房空调节能率为29.5%。对比数据如表3.4-9所示。

表3.4-9 混合模式能耗对比

时间	型号	空调总耗电量	平均日耗电量
11.4-11.27	兴致汉德5P	1888.59kWh	78.69kWh
11.4-11.27	原空调5P	2682.17kWh	111.75kWh

进入12月之后气温更低，热管空调主要运行于热管自然冷却模式，节能效果好，从11月28日—2021年2月25日共90天的耗电量来看，兴致汉德5P热管空调相比原机房空调5P空调节能率为48.8%。对比数据如表3.4-10所示。

表3.4-10 自然冷却模式能耗对比

时间	型号	空调总耗电量	平均日耗电量
11.28-2.25	兴致汉德5P	5164.05kWh	57.37kWh
11.28-2.25	原空调5P	10065.52kWh	111.84kWh

（4）改造案例总结

通过从夏季到冬季的使用观察，热管空调运行稳定、制冷效果好，送风远风量大，可较好地解决机房局部热点问题；

在8—10月，热管空调耗电量与原机房空调相当，节能率约6%；

在11月，热管空调相对于原机房空调节能效果较显著，节电率29.5%；

在12月—2月冬春季节，热管空调相比原机房空调节能率为48.8%。

4) 小结

双回路热管空调一体机，能充分利用自然冷源，热管系统换热能力强，全年节能使用时间长、节能效率高、能有效降低机房PUE，尤其适用于室内外温差较大的通信机房。既能解决机房普遍存在的远端局部热点，又节能降耗，减少电费支出，在当前双碳政策和5G基站快速建设快速发展以及运营商电费持续居高不下的背景下，具有较强的适用性。

3.4.4 风侧直接蒸发冷却应用

1) 数据中心简介

数据机房名称：鄂尔多斯中国联通南分局核心机房

数据机房地址：鄂尔多斯市

数据机房标准：UptimeT2&B级

建筑面积：机房层高3.6m，南侧机房面积约220m²；北侧机房面积约100m²

机房空调配置：

南侧机房：3台精密空调（制冷量40kW，耗电功率约12kW）

北侧机房：1台精密空调（制冷量12.5kW，耗电功率约3.7kW）

鄂尔多斯市室外环境计算参数：

空调室外计算干球温度 29.1°C

空调室外计算湿球温度 19°C

机房设计要求：室内温度 $\leq 28^{\circ}\text{C}$ ；室内相对湿度 $\leq 75\%$ 。

2) 冷却系统

(1) 冷却系统架构

数据机房冷源系统采用蒸发冷却与机械压缩制冷系统联合运行模式，该机房采用7套澳蓝AZL18数据机房专用蒸发式冷气机系统（风量 $18000\text{m}^3/\text{h}$ ，功率 1.75kW ；每台机组包含排风机1台，风量 $9000\text{m}^3/\text{h}$ ，功率 0.75kW ），其中南侧6台，北侧1台，作为冬季及过渡季节核心机房的直接冷源，夏季高温季节蒸发冷却系统无法满足制冷要求时联动开启精密空调进行制冷，系统配套联动控制系统实现远程控制与自动切换控制。设备侧墙安装，通过管路分配对每个机柜通道进行降温，另一侧外墙安装排风机进行排风，保证机柜发散的热量排到室外，满足室内的气流组织要求。

蒸发式冷气机采用直接蒸发冷却技术，依靠干空气能源将室外的新鲜空气绝热加湿降温后送入数据机房内部，其工作原理如图3.4-9所示。

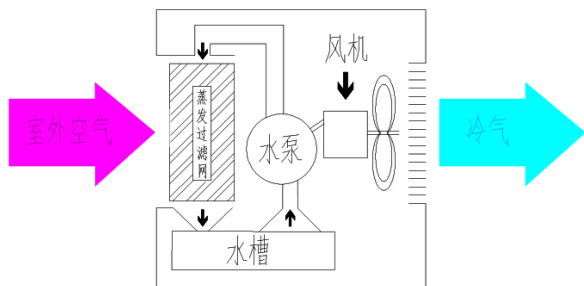


图3.4-9 数据机房及设备安装情况

系统配置远程监控设备，可通过远程操控，实现设备的实时设置及运行性能信息分析等功能。通过配置HUB放大器，支持群控功能，可实现最多40多台冷气机的联网控制，还具备自动控制、定时开关机、开机清洗、关机清洗、关机通风以及断电记忆等功能，集中统一控制，便于管理，设备运行状况一目了然。

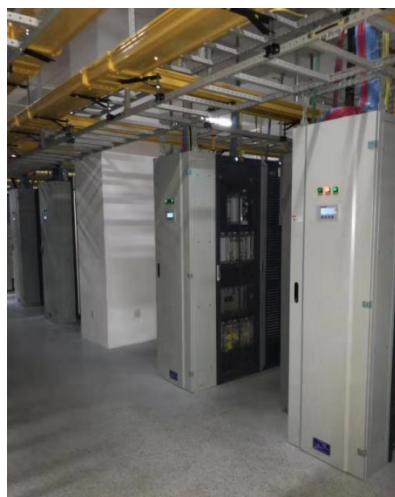
数据机房及冷却系统安装情况如图3.4-10所示。

(2) 冷却系统参数

机房设计温度为 28°C ，为保障制冷效果，该机房取设计送风温差 5°C ，因此蒸发冷却系统出风口温度需低于 23°C 。根据鄂尔多斯地区的全年逐时气象参数，可以确定全年大多时间均能够使用蒸发式冷气机，少数时间开启精密空调。



(a) 室外侧



(b) 室内侧

图3.4-10 数据机房及设备安装情况

(3) 运行控制策略

系统运行时，结合实际情况，以采用尽可能多的直接蒸发冷却系统，充分利用室外干空气能源为目的。

运行模式分析：

水帘新风模式：在合适的气候条件下，蒸发式冷气机、排风机开启运行，进、排风阀打开，室外新风经过过滤、蒸发冷却降温后送入机房内部，机房内的热湿空气通过排风机排出室外。此模式下风机可根据室内温度的变化情况变频运转。

联动精密空调模式：当室外处于高温高湿天气时，蒸发冷却降温系统运转无法满足机房的室内温湿度条件，蒸发式冷气机关闭运转，进、排风阀关闭，联动开启原机房精密空调系统，按设计参数正常运行，室内空气进行内循环降温。

(4) 冷却系统亮点

设备主要由壳体、湿膜、电机、风机、布水及节流装置、控制系统组成：

壳体采用高强度耐候性工程塑料，抗老化、抗紫外线、抗变形、抗腐蚀性；

配备有防尘网，可减少杂质和粉尘，净化空气；

采用直流无刷电机，运行平稳、噪声低、电机重量轻、温升低、无励磁声，效率高，相同风量风压情况下节能约20%；

采用专业设计的前倾多翼式离心风机，出口静压高，送风距离远；

采用新型复合材料的蜗壳及叶轮，重量轻、耐腐蚀、抗衰老及抗喘振效果好；

采用智能液晶控制，设备工作状态、故障显示一目了然；

恒功率电控，自动感测阻力调整风压及风量，保证送风量和送风距离；

采用大流量、高扬程高脚泵，阻燃壳体，内置低水位检测开关，能够使水泵运行更安全可靠。

4) 运行性能

系统运行测试时间为2018年10月—2019年9月，共计12个月，月均节电率如图3.4-11所示。年统计结果如表3.4-11所示。

表3.4-11 年节能统计

参数	数值
空调计划用电量kWh	103027.44
空调实际用电量kWh	3308.58
联动实际用电量kWh	14301.48
节电量kWh	85417.38
测试节电率	80.5%

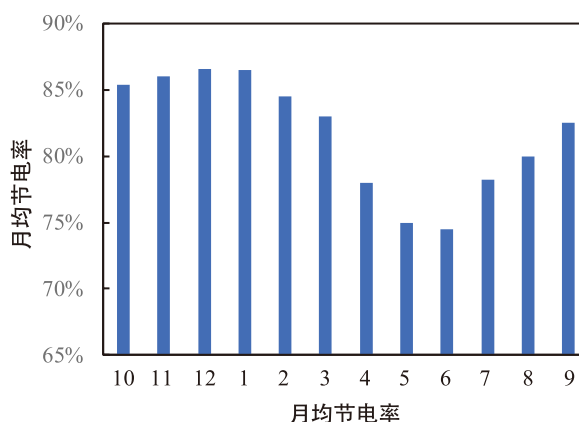


图3.4-11 月均节电率（2018年10月~2019年9月）

项目应用蒸发式冷气机后，平均节电量为精密空调的80.5%，参考鄂尔多斯地区的逐时气象参数，该项目全年使用蒸发式冷气机的时间为8508h，基本实现全年制冷，节能意义重大，并且使用蒸发冷却新风系统后，进入数据机房内部的空气质量并未受到影响，粉尘浓度和硫化物含量仍满足数据机房对空气品质的要求，粉尘浓度测试结果如表3.4-12所示（测试项目： $\geq 0.5\mu\text{m}$ 的个数，粒/ m^3 ；技术要求： < 17600000 粒/ m^3 ），硫化物测试结果如表3.4-13所示。

表3.4-12 粉尘浓度测试结果（单位：粒/ m^3 ）

测点序号	第一次	第二次	第三次
测点1	8928973	8670822	8421854
测点2	8728385	8119560	7834923
测点3	8236497	8127264	8173941
测点4	8383714	7993486	8102609
测点5	8457168	8288011	8304609
测点6	8194074	8082479	8379476
测点7	7669680	7654312	7484833
测点8	7249052	7282601	7359587
测点9	7430923	7246227	7253476
测点10	7458114	7282601	7205262
测点11	7017740	7052349	7097905
测点12	7202790	7255468	7081601
测点13	7142989	7182660	7085192
测点14	6527572	6491581	6430226
平均值		7656514	

表3.4-13 硫化物检测结果

检测项目	检测结果	单位
硫化氢	N.D.	mg/m ³
二氧化硫	0.072	mg/m ³
三氧化硫	N.D.	μL/L

备注：1. N.D.表示未检出；2. 样品原样经碱性吸收液吸收后稀释约1000倍，硫酸根离子未检出。

5) 总结

鄂尔多斯地区拥有典型的温带大陆性气候特征，四季分明，春秋季节温度快速变化，但降水较少，导致干旱和多风，气候较为干燥，空气的干湿球温度差较大，利用蒸发冷却技术降温效果很好，全年运行时间达97%以上，基本可实现全年制冷，极大地减少了精密空调的使用时间，并且能够实现蒸发冷却系统与机械压缩制冷系统的自动切换运行，便于有效控制与管理。

蒸发冷却技术广泛应用于数据机房、基站、数据中心制冷系统，使用澳蓝直接蒸发冷却系统后能够减少碳排放量4600万吨，利于节电、节煤等目标的实现，减少CO₂温室气体的排放以及对臭氧层的破坏，缓解我国能源紧张的现状，平衡生态环境，为我国实现碳达峰、碳中和目标做出贡献。

3.4.5 智慧运维应用

1) 数据中心简介

数据中心名称：万国数据廊坊八号数据中心
数据中心标准：UptimeT3 & A级
设计算力机架：约1000架
设计算力负荷：约7MW
设计PUE：1.42
竣工运营：2020.4Q

如图3.4-12所示，廊坊八号数据中心位廊坊市安次

区，总建筑面积13300m²，年均GCOPA达10.11，主要服务于大型互联网客户。

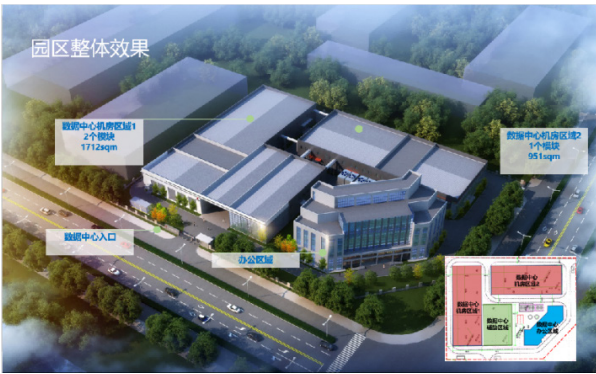


图 3.4-12 万国数据廊坊8号数据中心

2) 冷却系统介绍

(1) 冷却系统架构

冷却系统原理如图3.4-13所示。数据中心采用集中式N+1水冷冷水系统；机房选用1200RT约克变频离心式机组3台（2用1备）。室内负荷侧为热通道封闭，侧送上回，冷水精密空调N+2，机房冷通道温度控制不超25℃，湿度控制30%~60%。配套霍尼韦尔自控系统实现远程监控与自动切换控制。冷却系统设备配置如表3.4-14所示。

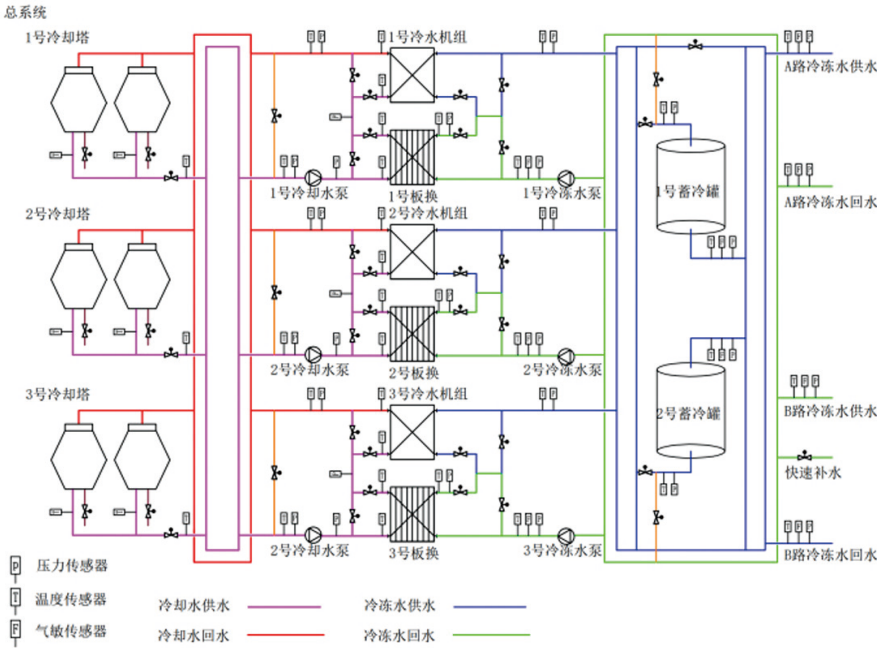


图 3.4-13 数据中心冷却系统原理图

表3.4-14 冷却系统设备配置

项目	参数	数量	备注
水冷冷机	Q=4220kW, N=602kW	3台	变频; 2用1备
	蒸发器: L=606m³/h 冷凝器: L=828m³/h 冷水设计温度: 15~1℃		
冷水泵	L=606m³/h, 40m/90kW	3台	变频; 2用1备
冷却水泵	L=830m³/h, 30m/90kW 冷却水设计: 35~30℃	3台	变频; 2用1备
开式冷却塔	Q≥4220kW (湿球温度 30.9℃)	3台	变频; 2用1备
闭式蓄冷罐	150m³	2个	
智能加药 装置	冷却水流量L=2000m³/h, N=2kW	2台	
定压补水 设备	补水泵: L=4 m³/h、 H=30m、N=1.1kW*2	2套	
全自动软化 水装置	产水量: 10m³/h	1套	
冷水型精密 空调	Q=155kW, N=9.9kW 空调设计: 20~32℃	63台	
新风机	L=5000m³/h, N=3.61 kW	2台	

(2) 运行控制策略

冷水机组控制策略: 制冷模式下, 根据单元冷机通讯平均负载与单元冷冻水侧计算出的负荷二者较大值与设定值对比计算进行负荷分析决定制冷机组的运行台数。

冷冻泵控制策略: 冷冻泵与冷机一一对应, 根据2个供回水环路的实际压力平均值计算实际末端压差, 与设定压差值比较做PID调节, 控制水泵频率。

冷却泵控制策略: 冷却泵与冷机一一对应, 依据冷机冷却水进出水温差与温差设定值做PID调节。

冷却塔风机控制策略: 湿球逼近度分段控制, 依据冷塔出水温度 (旁通后), 与计算设定温度T1 (依据室外实时湿球匹配不同的湿球段内 ΔT (可调), $T1 = \text{“湿球温度} + \Delta T\text{”}$) 进行PID调节, 同时支持依据人工设定温度做PID调节。

精密空调机组控制策略: 送风温度控制: 每个模块间采用相对独立群控系统 (参数设定、温湿度可共享, 风机可同步转速)

(3) 运行性能

从2021年7月至2022年6月年度性能如表3.4-15所示, 年均PUE为1.236, 年均IT负载率为42%, 未达运营理想IT负载率。

表 3.4-15 年度运行性能

设计 PUE	年均 PUE	年均 WUE	年均 PLF	年均 空调 CLF	年均 冷站 CLF	年均 IT负载 率
1.42	1.236	1.87	0.12	0.05	0.07	42%

3) 运行测试结果与分析

(1) 综合性能系数 (GCOP)

冷却系统综合性能系数 (GCOP) 和逐月运行性能如表3.4-16和表3.4-17所示。数据中心GCOPA达10.11, 根据《TCAR 9.2-2021 -数据中心冷却系统--第2部分: 不同地区综合性能系数 (GCOP) 和能效等级》, 可满足3区GCOPA限定值大于8.20, 能耗等级为一级。夏秋高温季度偏低, 春冬季季度较高, 最冷11月份可达15.14, 最热7月份4.88。

表3.4-16 季度GCOP

抽样时段	21'3Q	21'4Q	22'1Q	22'2Q	GCOP _A
GCOP	5.27	13.18	14.27	7.72	10.11

表3.4-17 月度运行性能

抽样时段	GCOP	PUE	CLF
21'7	4.88	1.389	0.233
21'8	5.2	1.367	0.219
21'9	5.72	1.325	0.19
21'10	9.63	1.232	0.107
21'11	15.14	1.186	0.067
21'12	14.76	1.191	0.066
22'1	13.91	1.192	0.07
22'2	14.11	1.19	0.07
22'3	14.8	1.176	0.07
22'4	9.17	1.21	0.115
22'5	7.91	1.231	0.135
22'6	6.09	1.269	0.177

(2) 能耗水耗运行数据

数据中心年度运行能耗水耗如表3.4-18所示。从2021年7月至2022年6月数据中心逐月运行能耗水耗如表3.4-19所示。

表 3.4-18年度运行能耗水耗

总电量 /kWh	总IT电量 /kWh	总水量 /t	PUE	CLF空调	CLF冷源	WUE	IT负载率	湿球温度 /℃	IT功率 /kW
31748449	25687830	47911	1.236	0.05	0.07	1.87	41.62%	9.75	2931

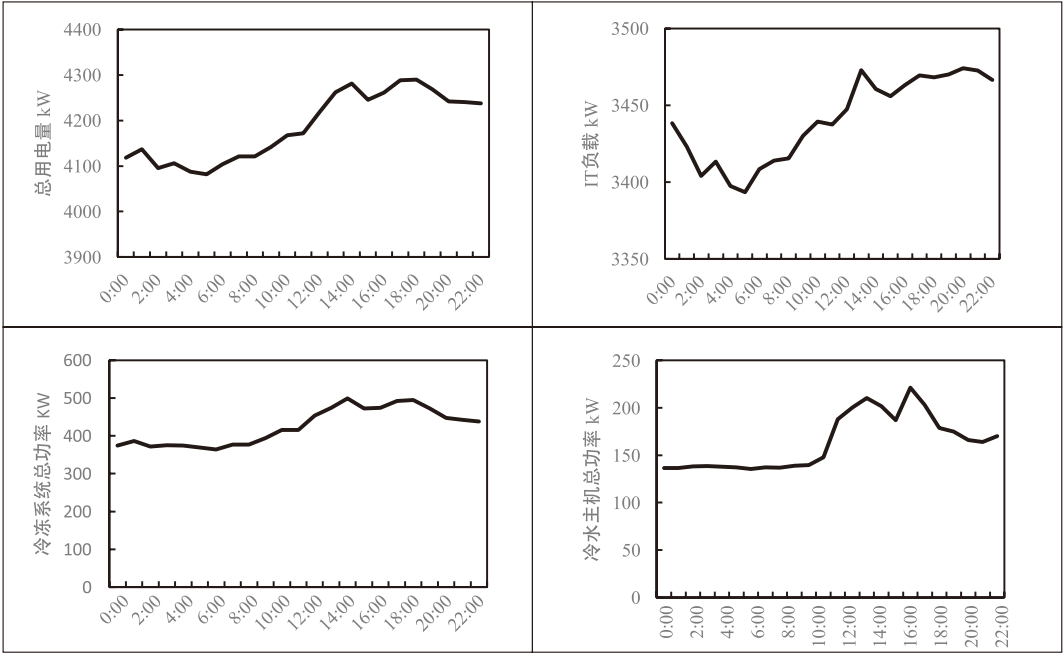
表 3.4-19月度运行能耗水耗

月份	总电量/kWh	总IT电量/kWh	PUE	CLF空调	CLF冷源	WUE	IT负载率	湿球温度/℃	IT功率/kW
2021.07	1975451	1422150	1.389	0.087	0.145	2.30	27.17%	23.76	1911
2021.08	2025786	1482355	1.367	0.081	0.138	2.46	28.32%	21.65	1985
2021.09	2049780	1547315	1.325	0.072	0.118	2.22	30.54%	19.48	2146
2021.10	2151438	1745822	1.232	0.046	0.061	1.81	33.35%	9.35	2318
2021.11	2460164	2073510	1.186	0.045	0.022	1.50	40.93%	3.33	2874
2021.12	2702510	2270000	1.191	0.044	0.022	1.29	43.36%	-1.42	3047
2022.01	2838360	2381496	1.192	0.043	0.027	1.22	45.49%	-3.23	3200
2022.02	2626940	2206608	1.190	0.045	0.025	1.32	46.67%	-2.87	3280
2022.03	2960170	2516174	1.176	0.039	0.031	1.70	48.07%	3.51	3379
2022.04	2968710	2452494	1.210	0.040	0.075	2.08	48.41%	9.73	3404
2022.05	3327250	2703264	1.231	0.040	0.094	2.34	51.64%	13.56	3622
2022.06	3661890	2886642	1.269	0.051	0.126	2.38	56.98%	20.12	4005
均值	2645704	2140653	1.236	0.053	0.074	1.88	41.74%	9.75	2931

(3) 典型日运行性能

春季典型日（2022年4月8日）数据中心逐时运行性能如图3.4-14所示。夏季典型日（2021年7月16日）数据中心逐时运行性能如图3.4-15所示。秋季典型日（2022年1月15日）数据中心逐时运行性能如图3.4-16所示。冬季典型日（2021年10月12日）数据中心逐时运行性能如图3.4-17所示。

春季典型日（2022年4月8日）数据中心逐时运行性能如图3.4-14所示。夏季典型日（2021年7月16日）数据中心逐时运行性能如图3.4-15所示。秋季典型日（2022年1月15日）数据中心逐时运行性能如图3.4-16所示。冬季典型日（2021年10月12日）数据中心逐时运行性能如图3.4-17所示。



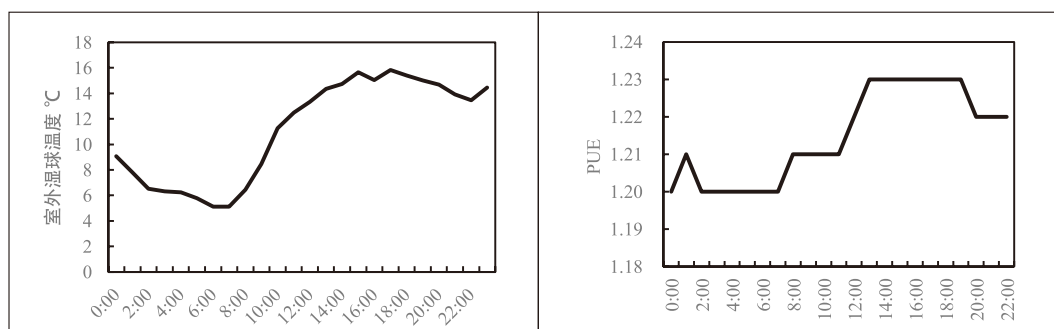


图 3.4-14 春季典型日逐时运行性能

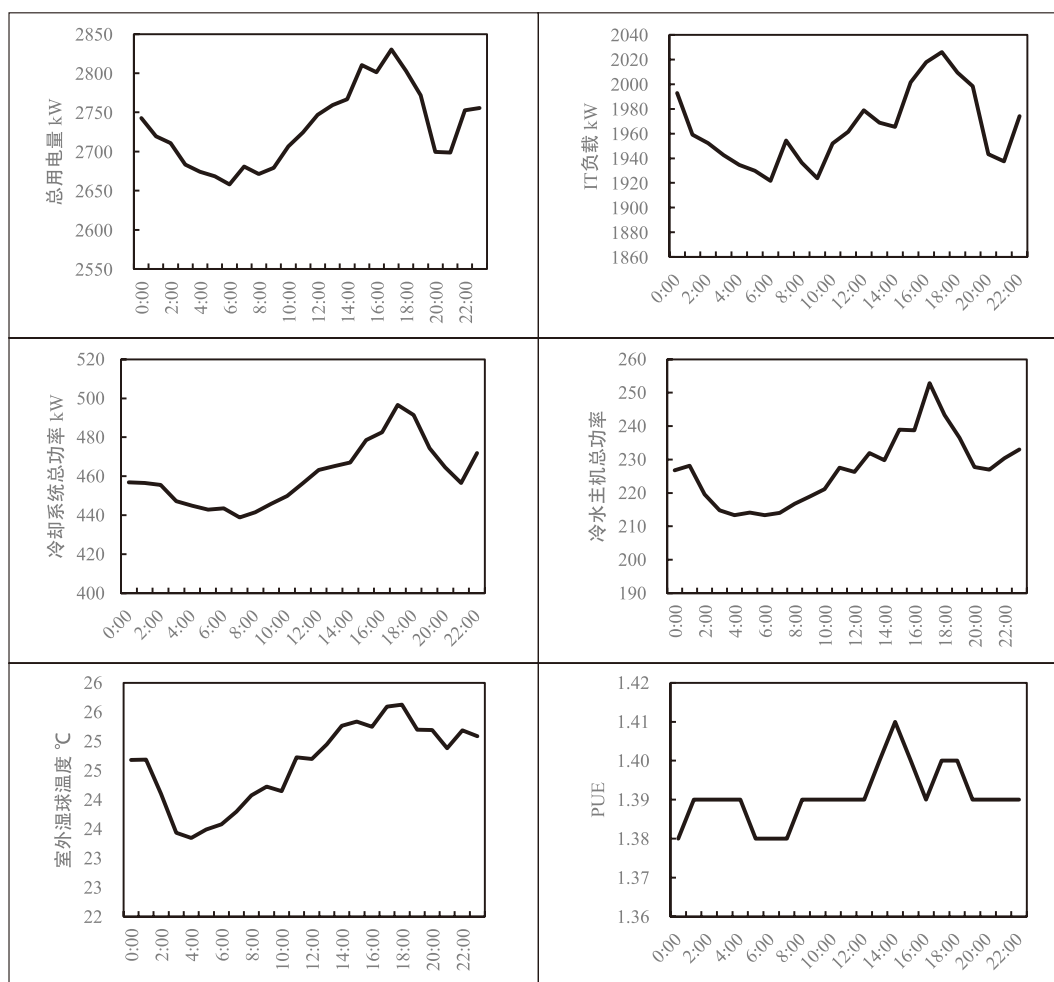
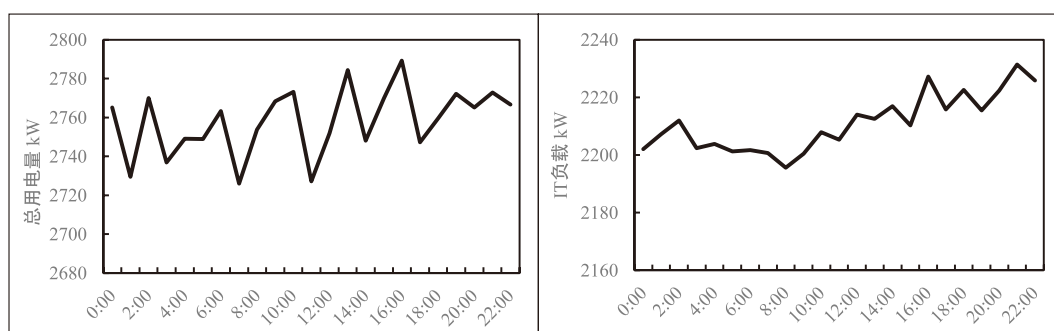


图 3.4-15 夏季典型日逐时运行性能



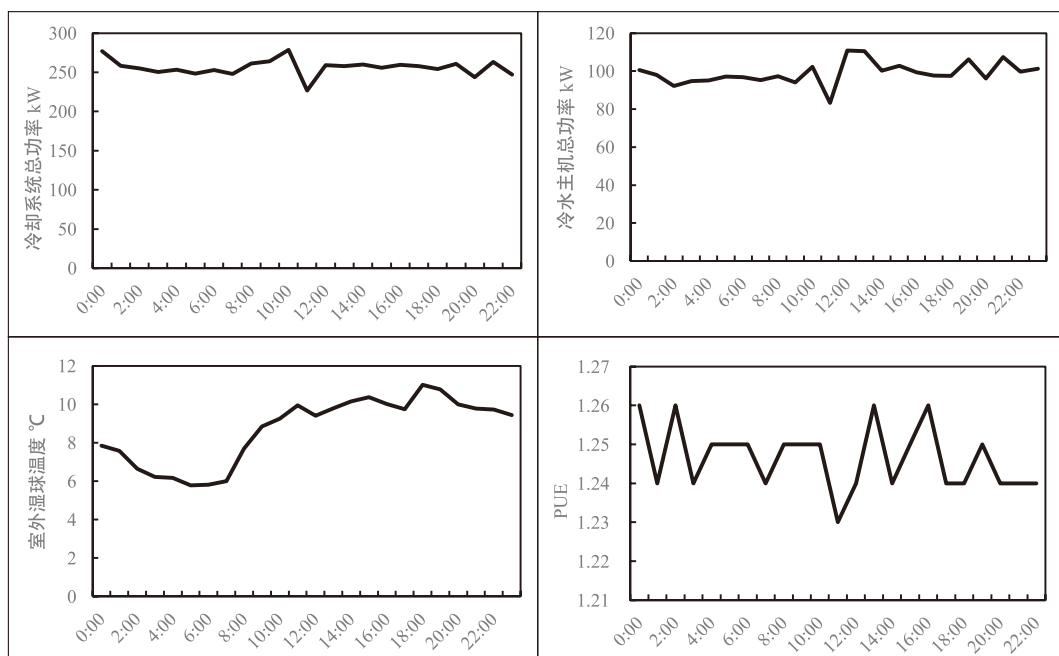


图 3.4-16 秋季典型日逐时运行性能

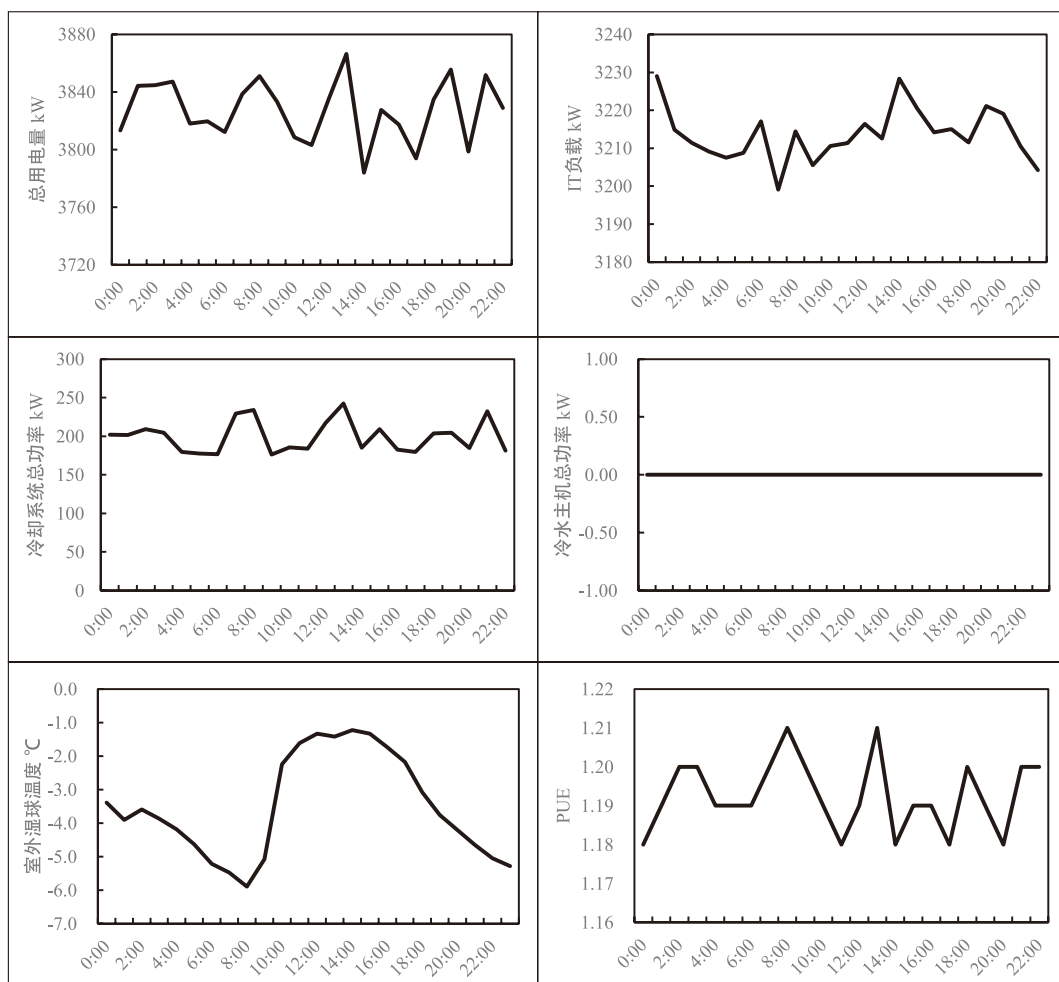


图 3.4-17 冬季典型日逐时运行性能

从典型日数据来看，春、夏季时数据中心冷却系统能耗受到昼夜温差影响较大，呈现出昼升夜降的“几”字型曲线，而秋、冬季冷却系统能耗受昼夜温差影响较小，呈现小幅度波动。

4) 小结

廊坊八号数据中心年均实际运行IT负载率为：42%偏低，未达理想运营负载；

数据中心冷却系统：环网冷却塔，散热效率高，年均WCLF为：0.074；

数据中心冷却系统出水温度：可提升至14℃及以上，后续可根据实际运行情况考虑提升冷却系统出水温度至设计出水温度；

数据中心不间断电源系统设计为：2N UPS，损耗偏高，其年均PLF因子高达：0.12，后续随负载上升宜更精益化管理UPS投入并控制UPS室整体温度；

数据中心地处：暖温带大陆性季风气候，四季分明，夏季极端高温天气较短暂，春、秋两季可合理利用自然低温天气降低冷源系统能耗，冬季寒冷天气可完全利用自然天气为机房提供冷量，自然冷年利用时长达4000小时以上，水冷制冷机组无需开启，利于能效控制与管理。

通过对自然低温资源的合理利用，兼具BA自动化逻辑、数字化、智能化、精细化运营，实现高安全可靠下2021年7月~2022年6月在IT为42%负载，且配电为2N UPS前提下年均PUE低至1.236，年GCOP达10.11。

未来，在“双碳”背景下为进一步提升能源、资源利用效率降低碳排放，万国数据将继续加强创新研发，对廊坊八号数据中心进行优化改造，并引进更多新技术如自研能效智能化自动化软件，冷却水处理新技术，使廊坊八号数据中心在能源使用效率、资源使用效率、运营智能提效等方面，持续保持水冷系统运营效率行业领先水平。

3.4.6 总结与展望

数据中心作为提供数据资源和算力资源的重要基础设施，保障了国家数字经济的快速发展需求，也促进了人工智能、大数据、工业互联网等新兴产

业的高速发展，未来还将保持快速增长。

冷却系统是数据中心高效稳定运行的保障，也是数据中心绿色转型节能降碳的重要环节，液冷技术、高效制冷技术、自然冷却技术、蒸发冷却技术和智慧运维技术是实现数据中心冷却系统从设计节能到运行节能的关键，技术和产品创新与应用也更值得期待。

从消纳可再生能源电力、提供高效算力输出和热力输出，通过“电力-算力-热力”的协同优化，实现数据中心的能源高效综合利用，是打造绿色数据中心的根本途径。

参考文献

- [1] 中国信息通信研究院. 全球数字经济白皮书（2023）[R]. 2024.1 (China Academy of Information and Communications Technology. White paper on global digital economics(2023) [R]. 2024.1)
- [2] 中国制冷学会数据中心冷却技术工作组. 中国数据中心冷却技术年度发展研究报告2022[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023. (Work Group for Data Center Cooling, Chinese Association of Refrigeration, Annual Reports on Data Center Cooling 2022 [M]. Beijing: Chinese Architecture Press, 2023.)
- [3] MASANET E, SHEHABI A, LEI N, et al. Recalibrating global data center energy-use estimates[J]. Science, 2020, 367: 984-986
- [4] Mytton, D., and Ashtine, M. Sources of data center energy estimates: A comprehensive review. JOULE, 2022, 6: 2032-2056
- [5] 王博, 郭焱华, 邵双全, 等. 数据中心冷却系统相关能效评价指标综述[J]. 制冷学报, 2023, 44(2): 18-27 (Wang B, Guo Y, Shao S, et al. Review of energy efficiency evaluation indexes related to data center cooling systems.
- [6] 包云皓, 陈建业, 邵双全*. 数据中心高效液冷技术研究现状. 制冷与空调, 2023, 23(10): 58-69. (Bao Y, Chen J, Shao S. Research status of high-efficient liquid cooling technology in data center [J]. 2023, 23(10): 58-69.)
- [7] 中国移动通信集团有限公司, 中国电信集团有限公司, 中国联合网络通信集团有限公司. 电信运行商液冷技术白皮书[R]. 2023.6. (China Mobile, China Telocom, China Unicom. Liquid cooling technology whitepaper[R]. 2023.6.)
- [8] ZHANG H, SHAO S, TIAN C, et al. A review on

- thermosiphon and its integrated system with vapor compression for free cooling of data centers[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 789-798.
- [9] Wang B, Wang F, Yang M, et al. Investigation on the two-phase loop cooling system composed of maglev compressor and liquid pump for data centers. Applied Thermal Engineering, 2023, 218, 119337.
- [10] Wu X, Shao S, Akkurt N. Investigation on application of plate-tube evaporative condensating technology for data centres in the northwest of China. Energy Reports, 2023, 9: 4713-4720.
- [11] ZHANG Q, MENG Z, HONG X, et al. A survey on data center cooling systems: technology, power consumption modeling and control strategy optimization[J]. Journal of Systems Architecture, 2021, 119: 102253
- [12] Wang Y, Han Y, Shen J, et al. Data center integrated energy system for sustainability: Generalization, approaches, methods, techniques, and future perspectives. The Innovation Energy, 2024, 1(1): 100014. (Feb. 26, 2024)

3.5 交通运输领域空调及能源管理

臧建彬 陈辛格 梁 峻

(同济大学)

坚持创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念，持续推动可持续发展，坚定走向生态良好的文明发展道路，加快建设资源节约型社会、环境友好型社会已成为我国基本国策。大型公共建筑节能是重要组成部分。随着我国经济发展，建筑产业能耗不断增高，整个建筑产业及其周边产业的能耗已占社会总能耗的50%以上。数据显示，我国机场、火车站等大型公建仅占6%，却消耗了城市全部建筑25%的能源^[1]。我国近年建筑全过程能耗数据分析如图1所示。2019年，我国建筑行业在建材生产、建筑建造和建筑运行全过程消耗能源总量近22.33亿吨标准煤，CO₂排放总量达到49.97亿吨，目前仍处于上升趋势^[2]。

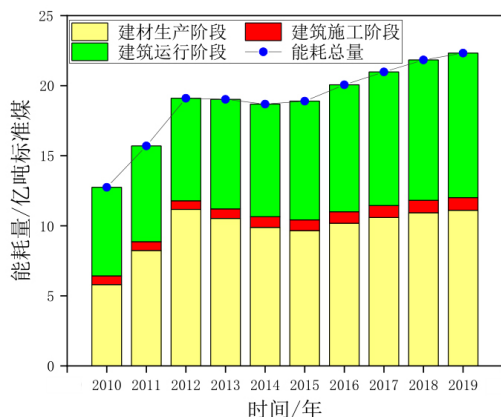


图3.5-1 我国近年建筑全过程能耗总量数据分析

同时，21世纪我国经济飞速发展，城市化进程加快，人口暴增给交通带来巨大压力。为缓解这一问题，地铁成为便捷高效的选择，截至2022年6月30日，全国51个城市共有9573.65公里城市轨道交通线路，其中地铁占78.64%。2022年上半年新增366.87公里城市轨道交通线路，其中87.03%为地铁。2021年客运量达236.9亿人次，同比增长34.7%^[3]。至2021年底，67个城市获得轨道交通建设批复，56个线路在建，总里程达6988.3公里^[4]。城市轨道交通发展带来能耗问题，我国城市轨道交通年耗电量约400亿千瓦时，占全国总耗电量的0.5%^[5]。能耗主要来自列车牵

引和车站通风空调系统。车站通风空调系统占地铁车站建筑总能耗的25%~35%，在湿热地区甚至可达40%。

因此，研究更节能的交通通风空调系统，以及更加智能高效的能源控制系统，对降低能耗、提高能源利用效率具有重要意义。

3.5.1 研究进展

地铁车站通风空调系统可分为三类：

1. 开式系统

指地铁车站区域与隧道不完全隔离，相邻车站之间通过通风竖井利用机械加压送风或列车运行产生的“活塞效应”进行空气置换。系统能耗较低，适用于温度较低且客流量较小的车站。

2. 闭式系统

车站内部空气处于封闭状态，通风井和风机阀门关闭，通过风机加压送风实现新风量需求。区间隧道所需新风通过列车“活塞效应”产生的活塞风进入，同时设置回风道排出多余的活塞风。闭式系统适用于客流量大的地区，通过风翼控制系统的开闭运行。

3. 屏蔽门系统

屏蔽门系统首次在广州地铁二号线使用，现已成为地铁车站通风空调系统中广泛采用的一种。屏蔽门设置在列车轨行区与站台中间，作为透明玻璃屏障隔离站台与轨行区，在站台边缘。区间隧道采用单独的通风系统。屏蔽门系统有效隔离了隧道内产生的热气流和列车运行产生的灰尘，减少了空调负荷。同时，确保了乘客候车时的安全性，提高了候车环境的舒适度。

王前进等^[6]对三种系统形式的特点进行了分析，并在空调系统的控制、系统末端送风方式以及空调冷热源种类等方面提出了不同的优化方案，同时详

讨论了这些方案的适用范围。

高康等^[7]提出了一种水冷制冷机直接蒸发式的空调系统，主要针对常用的水冷冷水机组。该系统利用制冷剂直接蒸发带走热量，省去了冷冻水部分的相应系统，达到节能的效果。实际运用和现场测试表明，该系统在能耗方面有一定的节能效果，并提升了空调系统的制冷循环能效比EER，值得在地铁空调系统设计中推广。王亮添等^[8]针对闭式系统常用的通风空调系统提出了问题，并提出一种隧道嵌装式全工况空调系统。该系统取消了冷却塔系统，采用可启闭式蒸发冷却冷水机组，实现全年节能运行。

郭谊婵^[9]指出目前的蒸发冷凝技术主要有整体式蒸发冷凝机组和隧道嵌装式冷凝机组两种形式。她通过对比这两种机组的工作原理、机组在车站机房的安装形式以及应用现状，发现整体式蒸发冷凝机组能够节能13.3%，而隧道嵌装式冷凝机组的节能效果更高，可达26.9%。然而，隧道嵌装式冷凝机组的实际运用案例较少，需要进一步探索其节能效果。李文博^[10]详细对比了整体式蒸发冷凝冷水机组和隧道嵌装式直膨型蒸发冷凝机组两种形式，包括初投资及运行费用、机房占地面积和系统运行维护情况。他指出整体式蒸发冷凝机组作为地铁空调系统的冷源来源更具经济性，同时去除冷却塔后仍可选用水冷螺杆式冷水机组。张超等^[11]通过实际案例对比了蒸发冷凝空调系统和采用螺杆式冷水机组的常规地铁空调系统。研究结果表明，蒸发冷凝式螺杆冷水机组相比于常规螺杆式冷水机组，机房占地面积更小，更加节能，运行维护更加方便，且故障率低，能够实现经济与环保相统一。

直膨式空调机组同样在地铁中有着广泛的应用与研究，李峰等^[12]提出了一种适用于地铁车站的直膨式空调系统，充分考虑了地铁车站空调系统末端供冷点较少的特点。该系统利用制冷剂膨胀带走热量，省去了传统空调系统中的冷冻水环路，从而大大减少了空调系统的能量消耗，实现了节能的目标。通过对系统的热工性能进行分析，并利用软件进行全年能耗数值模拟，研究结果显示，与常规的全空气一次回风系统相比，利用直膨式空调系统可以降低全年能耗约26.9%。

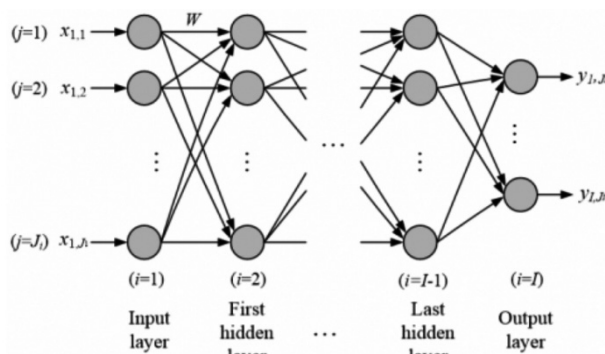


图3.5-2 多层前馈神经网络的结构

Gao等^[13]采用BP训练算法，如图2所示，构建了基于人工神经网络的二进二出模型，用于了解直膨式机组的运行特性。他们将不同压缩机和风机转速组合下DX-AC系统的总输出制冷量和显热比联系起来。该模型在验证中表现出良好的机组性能展现。

Xia等^[14]提出了一种基于白箱的直接膨胀空调系统动态模型，用于预测在变转速运行下的稳态运行性能。系统原理如图3所示，他们建立了包括压缩机、电子膨胀阀、蒸发器、冷凝器和条件空间在内的五个子模型，每个子模型基于部分集中参数法开发。通过表示总制冷量、设备显热比和性能系数之间的关系，展现了系统的固有稳态运行性能。研究结果显示，在较高的风机转速或较低的压缩机转速下，可以获得较高的COP。

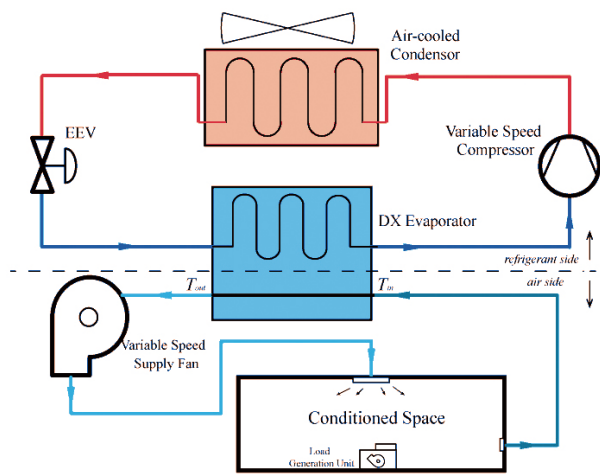


图3.5-3 模拟的直膨式空调系统示意图

在通过改善机组类型的同时，实现各节能控制策略下空调系统的优化运行，对于降低地铁运营能耗来说也具有十分重要的意义。

2002年, Jin XQ和Liu M等^[15]从冷冻水系统的节能控制角度出发, 讨论了系统的设计、操作和控制问题。他们开发了水泵功率计算和冷水机组蒸发温度的相关分析模型, 并分析了系统变流量控制对冷水机组运行效率的影响。研究得出结论认为系统可以通过采用变流量控制实现节能, 但该研究仅涉及螺杆式冷水机组, 对其他类型的冷水机组的借鉴性有一定局限性。2004年, Ken W^[16]完成了对通风空调系统能耗的计算, 比较了定频和变频策略下系统的能耗, 结果显示变频策略下可以节省10%的运行费用。William P等^[17]则深入研究了采用一次泵变流量控制策略下冷冻水系统的节能效果。2008年, Chan KT等^[18]考虑了如何应用冷水机组的最佳冷凝温度控制和变冷冻水流量的策略, 以提高风冷离心式冷水机组的性能。系统原理如图4所示。优化冷凝温度控制和改变蒸发器的冷冻水流量可以使冷水机组的COP增加0.8%~191.7%。

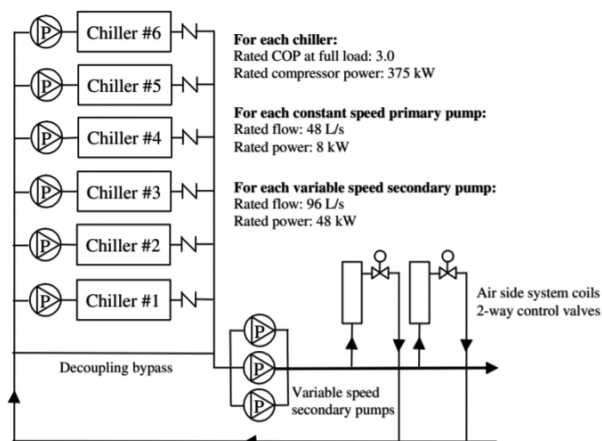


图3.5-4 变流量系统控制原理

2014年, Miquel Casals等^[19]通过现场调查和测量的数据统计出了地铁站的电力消耗情况, 发现照明系统在地铁站的能耗中占主导地位。他们分析了各系统的能耗占比情况, 为未来分析地铁能耗组成和实施节能措施提供了借鉴。

我国建筑领域中, 建筑运行阶段碳排放占比逐年增加, 建筑运维节能成为实现2030年碳达峰目标的关键领域。关于机场的空调系统及能源管理研究, 尤其在机场这种大型交通枢纽, 空调系统能耗占据运行阶段总能耗的半数以上, 这凸显了制定最佳空调系统运行策略对降低碳排放至关重要。

学者们致力于空调系统冷负荷的准确预测, 为实现系统优化控制奠定基础。清华大学的司鹏飞等^[20]关注机场航站楼的能耗, 通过对某机场的能耗统计, 发现航站楼是电力消耗的主要部分, 其中空调系统耗电量约占35%。Lin等^[21]通过仿真计算典型枢纽机场航站楼负荷, 引入不确定性分析得到更准确的冷负荷概率分布和峰值负荷分布, 结果显示温度和湿度是冷负荷预测的主要影响参数。在高大空间的冷负荷计算方面, 刘晓雨等^[22]以近机位候机厅、远机位候机厅和办票厅为例, 利用CFD软件计算了分层空调冷负荷的经验系数值, 为该类空间的冷负荷计算提供了贡献。

由于建筑能耗预测模型的输入和输出之间存在较高的非线性, 传统机器学习方法在预测精度、鲁棒性和泛化能力方面需要提高。为此, Zhong等^[23]提出了一种基于向量场的支持向量回归方法, 通过对中国沿海城镇某大型办公楼夏季冷负荷数据的预测分析(如图5), 结果显示该方法在精度、鲁棒性和泛化能力方面均有一定程度的提升。Kwok等^[24]采用多层感知器的人工神经网络模型, 以气候数据为参数进行建筑物冷负荷预测。为提高预测精准度, 采用了混沌SVM、小波分解SVM、SVM和BPNN等四种回归预测方法。



图3.5-5 大型办公楼示意图

Fan等^[25]以建筑的物理特性、气象信息和HVAC操作变量为输入, 对HVAC系统的短期冷却负荷进行预测, 预测流程如图6所示。Korolija等^[26]则从建筑的冷负荷和热负荷需求等方面入手, 对暖通空调系统的能耗需求展开研究。这些研究为机场及其他建筑冷负荷预测提供了多种方法, 有助于提高预测的准确性和适应性。

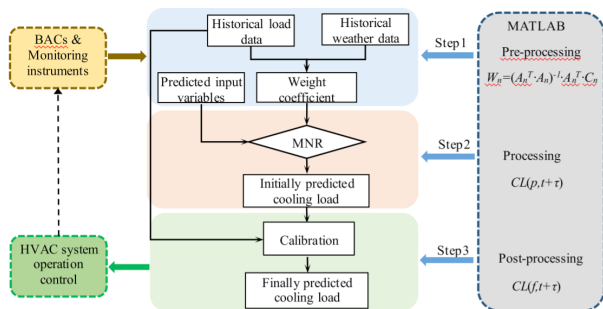


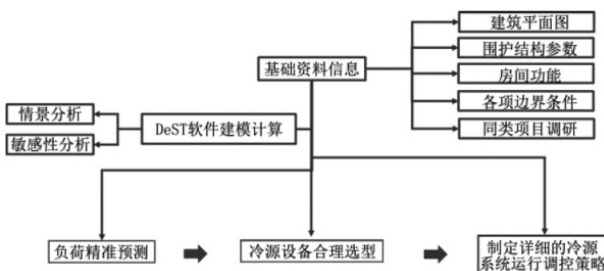
图3.5-6 预测过程流程图

3.5.2 关键技术

交通运输领域的空调及能源管理可以分为场站建筑的空调及能源管理和交通工具的能源管理。前者为准备出行的旅客提供热舒适服务，后者在旅途中为旅客提供舒适的客室环境。

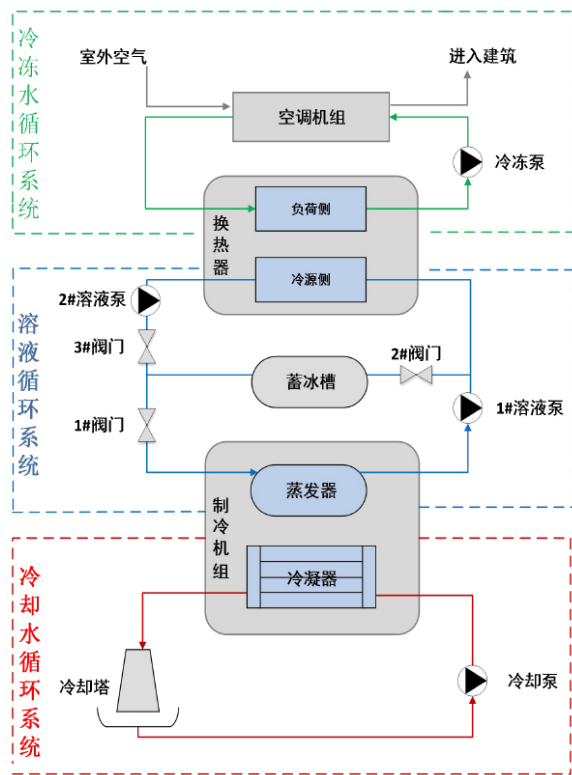
1. 机场建筑的空调及能源管理

据中国民用航空局数据，2023年我国通用机场数量已超过400座，其中民航机场数量突破260座，通用航空器数量已超过3200架^[27]；据交通运输部数据，2023年我国民航机场累计完成12.6亿人次旅客的吞吐量^[28]。民航机场的主要场站建筑为机场航站楼，体型高大、层高较高，功能分区复杂且运行时间较长，对室内热舒适性的要求较高。据统计，我国机场航站楼的年平均电耗约为177kW·h/m²，达到国标^[29]对于商业办公楼能耗限值的2倍，而暖通空调系统的耗能可以占到机场航站楼建筑总能耗的1/3到2/3，因此节能减排就成为了机场航站楼建筑设计与运行的关键所在。在机场航站楼设计之初，就应当对冷热负荷进行合理计算，从而使暖通空调设备选型更合理，有适宜的设计余量。

图3.5-7 空调系统负荷精算方法^[30]

除考虑围护结构参数与航站楼所在地气候条件、调研相似气候区同类型建筑的运行情况外，还

应当结合航站楼内不同功能区的功能要求，对空调负荷进行精细化计算。由于航站楼内末端送风多为喷口、风速较大，而机场旅客也多处于行走状态，进一步加大相对风速，因此可将室内温度设计值适当提高，而走廊等人员短时间停留区域应当将进一步提高室内温度设计值；航站楼内部受到热压、风压等影响，在实际上会有设计外的渗透风量，因此可以适当降低新风量；充分考虑机场运行特征，如进出港旅客流量的滞后性以及每天多次的客流量高峰^[30]。还可以考虑“削峰填谷”，采用冰蓄冷方法结合航站楼的空调负荷变化，合理分配空调机组与冰蓄冷装置承受的冷负荷，达到降低能耗、节约运行费用的目的^[31,32]。

图3.5-8 冰蓄冷空调系统结构^[31]

人体进入一个热舒适度发生变化的区域时，热感觉会有滞后现象，可以在更广泛的温度范围内获得舒适的感觉。基于此种滞后现象，针对机场办票、安检、候机等不同功能分区的实际情况，依照旅客停留时间和移动速度在机场内部划分“暂留区”，在“暂留区”内可以降低热舒适要求，采取较高的室内温度设计值，达到节能的目的^[33]。

机场航站楼这类大型建筑，多采用空调水系统，水系统在设计之初可以做到良好的水力平衡，即空调末端获得的水流量可以与抵消负荷的水流量相等。但是在施工阶段以及实际运行过程中，仍会出现水力不平衡的状况，使得水泵耗能增加且室内温度冷热不均。实测空调水系统发现水力不平衡状况后，可以采用比例调节法进行静态平衡调适，使水系统重新平衡^[34]，还可采用基于群智能的中央空调水控制系统，利用鲸鱼优化算法优化分配冷机负荷，从而智能分配水泵流量，从而在不同的工况下都可达到降低空调水系统运行能耗的目的^[35]。

民航客机在机场停泊时，通常由飞机地面空调机组提供机舱内空气环境调节。该类型设备在国外已有三十余年历史，在国内也有近十年的应用史。在该类型设备应用之前，飞机在地面停靠时都使用机上自带的APU（辅助动力装置）保障机舱内空气环境，使用地面空调机组可以达到节省航空燃油与降低碳排放的目的。飞机地面空调需要在30min内将舱室内温度降至25℃左右，这意味着要将停机坪新风温度由30~40℃降至0~2℃。这种空调有全新风、高静压和大风量的特点，因此可采用一级预冷、二级深度压缩制冷和三级风冷的技术保障夏季供冷，针对不同需求灵活采用电热、集中供热等手段实现冬季供冷，降低运行能耗^[36]。

2. 铁路和轨道交通领域的空调及能源管理

近年来我国高铁建设快速发展，大量高铁站陆续建成运营。高铁站建筑面积大、体型高大、层高较高，人员分布较为集中，通常使用中央空调系统，运行能耗可以达到高铁站总电耗的2/3，因此节能减排也是高铁站建筑设计运行的重点。目前小型站房使用的分布式冷热源群控系统以及大型站房使用的集中能源管理系统都存在能耗偏大、调节滞后、智能程度低的问题。使用智慧控制策略和控制系统、严密对接车站管理系统，根据环境和客流变化动态调整空调系统运行状态和模式，还可根据全年空调能耗数据和客流变化自我学习优化控制能力，进一步减少运维成本^[37]。

随着我国城市化建设的进步，为了缓解城市交通拥堵、降低道路交通压力，很多大型城市都将

地铁作为重要的公共交通工具。地铁站客流情况一日多变，存在明显的高峰与低谷期，目前大多数地铁站空调采用的全天候恒温控制未能充分考虑这一点，导致出现站内热舒适程度低、空调系统能耗较高的情况。对此，可引入基于卷积神经网络模型的人流量识别系统获得每日不同时段客流数据，以此为基础建立新型智能空调控制系统，根据站内人流量变化及时调控风机、变频器和制冷机组，在不同客流量情况下都可实现适宜站内环境，且有效节能10%以上^[38]。

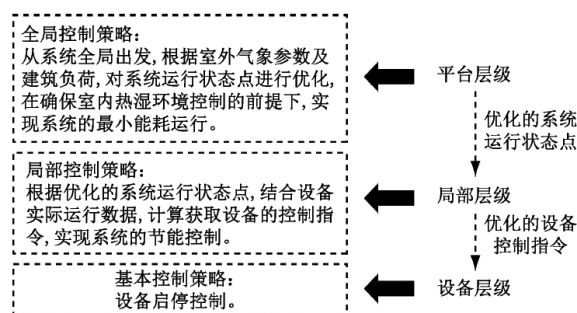


图3.5-9 智慧控制平台的控制原理^[37]

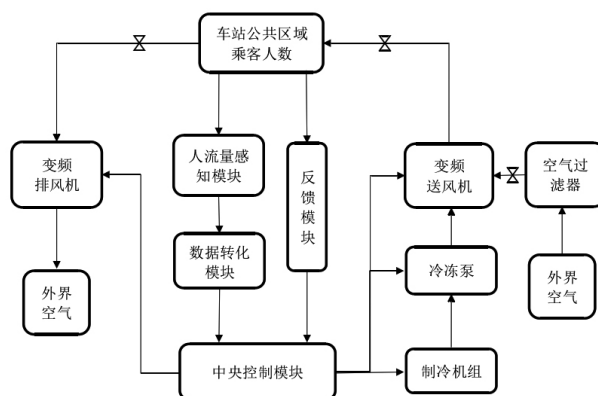


图3.5-10 基于人流量感知的地铁空调运行模式^[38]

根据能源监测系统采集到的空调系统负荷特征，定义“量特征”反映负荷变化情况，定义“质特征”反映负荷中的潜热负荷占比，根据影响地铁站空调负荷的因素使用神经网络进行负荷预测；基于负荷特征识别与负荷预测结果提出空调智能管控系统，使空调系统在低负荷与高负荷工况下都可高效运行，达到10%~20%的节能率^[39]。

针对地铁站内的环境污染问题，首先搭建融入卡尔曼滤波算法的地铁站室内空气质量采集系统采集一段时间的地铁站空气质量监测数据，基于此数

据使用基于注意力机制的环境预测模型预测未来一段时间的地铁站内空气污染情况，从而使通风控制系统及时改变运行模式提供适宜的通风量，不仅能消除站内污染还可做到节约能耗^[40]。

针对部分地铁站空调水系统运行能耗高的问题，建立准确的地铁站负荷模型，搭建空调水系统模型进行控制策略优化模拟，利用设定冷却塔出水温度、设定冷却水供回水温差和设定冷冻水供水温度控制手段实现10%以上的水系统节能率^[41]。

目前高铁列车与大部分地铁列车多采用单冷型车载空调，冬季制热时多采用电加热，少数列车搭载的热泵仅能满足-7℃以上环境的制热需求，且还需要辅热系统进行除霜，导致热泵机组运行条件受限、能耗大、安全性低。采用卧式涡旋补气增焓压缩机满足低温高效制热需求，在满足地蒸发温度的制热条件下提高制热量且保证运行稳定性和安全性；使用U型腔体的室外换热器，不仅缩小机体尺寸还可以保证换热效果；采用独立双热泵系统，达到除霜条件时，双制热系统中的一台高频制热，另一台低频运行除霜，不仅能保证除霜效率，还可保证送风温度高于客室内温度^[42]。



图3.5-11 补气增焓压缩机^[42]

列车空调机组的能耗占列车运行总能耗的1/5以上，环境温度升高时还会进一步超过1/3，因此列车空调也继续优化运行策略，降低运行能耗。采用变新风量控制技术实现温度优化控制；引入高效换热器和变频压缩机提高空调机组运行效率；在冬季寒冷地区采用低温热泵技术提高制热效率；未来引入蓄冷技术实现能量回收，都可在一定程度上改善列车空调运行能耗高的问题^[43]。

我国的高铁线路与地铁线路通常都有隧道内运行的情况，列车在通过隧道时会因为急剧变化的外

界空气压力导致压力波动传入车内，使车内乘员出现身体不适现象。采用基于车内外压力波动检测控制和被动式压力保护系统，可以满足市域列车车内3s气压变化不超过800Pa的需求；关闭列车空调新风阀可以适当降低列车高速通过隧道时的车内压力波动，从而提高车内乘客的舒适程度^[44]。

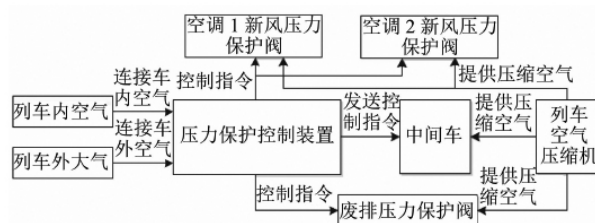


图3.5-12 被动式压力保护系统^[44]

3.5.3 案例介绍

1. 制冷剂回收再生

建筑空调系统以及铁路、轨道交通车辆空调系统在运行时都离不开制冷剂。目前中国每年碳排放总量超过100亿吨CO₂，其中每年由于建筑及交通领域制冷剂泄漏造成的温室气体超过1亿吨CO₂当量。我国是全球最大的制冷设备与制冷剂生产国和消费国。2020年，工商制冷空调行业预计实现利润165亿元。预计至2030年，我国制冷空调行业制冷剂消费总量将达15.4~17.8万吨，进入HCFCs制冷剂淘汰末期，我国将于2024年启动HFCs的产量和消费量削减。对制冷系统内原有的制冷剂进行回收再生处理是应对制冷剂产能配额削减压力和减少制冷剂排放的有效方法^[45]。

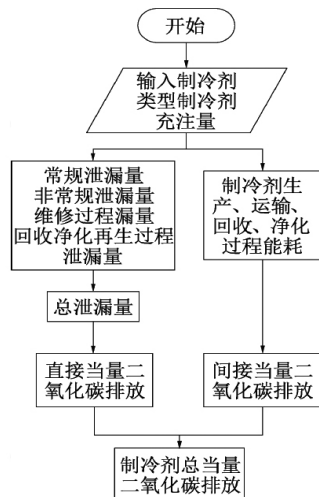


图3.5-13 制冷剂全生命周期模型计算流程图^[45]

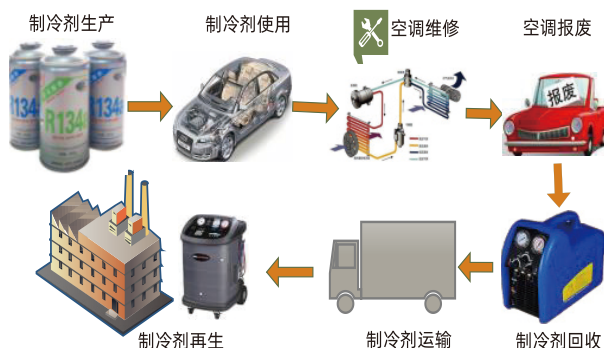


图3.5-14 制冷剂全生命周期^[45]

同济大学机械与能源工程学院与浙江衢州巨化集团合作，开展制冷剂回收再生的碳排放评估与经济性分析，建立制冷剂生产、运输、回收、净化、再生全生命周期的碳排放评估模型，考虑了制冷剂泄漏引起的碳排放，以汽车空调制冷剂R134a的回收再生为案例计算其碳排放量及回收再生经济性，得到如下结论：（1）制冷剂的再生主要分为简易再生和蒸馏再生两种方法，其中简易再生装置小、能耗低，但再生后制冷剂纯度低只能在原设备中使用，而蒸馏再生装置复杂、能耗高，但再生后制冷剂纯度高；（2）制冷剂回收再生过程的碳排放模型基于LCCP气候性能模型构建，补充了制冷剂净化再生环节的碳排放模型，包括制冷剂净化、再生过程的制冷剂泄漏和净化、再生过程能耗；（3）以汽车空调用制冷剂R134a为例进行碳排放评估，计算结果表明对汽车空调废旧制冷剂进行回收净化可减少约42%的当量CO₂排放；（4）对上述算例进行经济性分析表明，若以月最低工资为工人工资标准，则净化后制冷剂售价为11元/小时可在2年内收回设备初投资成本。

同济大学还与巨化集团成立了同济-联州车用制冷剂联合研究中心，研究制冷剂回收再利用技术与体系建设，围绕R22、R134a、R407C三种制冷剂的回收与净化，陆续开展了试验装置的理论设计、运行仿真、便携式回收净化试验装置开发、国内首台400kg/h净化速率集中式制冷剂再生装置开发的工作，并与国内头部制冷剂回收设备厂家合作，调研了一款定制的典型制冷剂现场回收机组，以R134a的集中蒸馏式冷媒净化再生设备为例，研究其回收净化过程的碳排放。

再生1吨制冷剂会造成0.188吨当量CO₂排放，再生制冷剂相比等量新生产制冷剂，所造成的CO₂排放可以减少98.9%；以2019年R134a制冷剂年产量15.3万吨为例，若生产配额全为新生产制冷剂，则碳排放量估计值243.2万吨；若生产配额由新生产制冷剂和回收再生制冷剂两部分组成，则需新生产制冷剂10.7万吨，回收制冷剂4.6万吨，碳排放量估计值184.9万吨，每年减少碳排放58.3万吨，减排率为29.7%。

回收再生制冷剂的总盈利计算公式：

$$P = p_i \times w \times t \times \eta$$

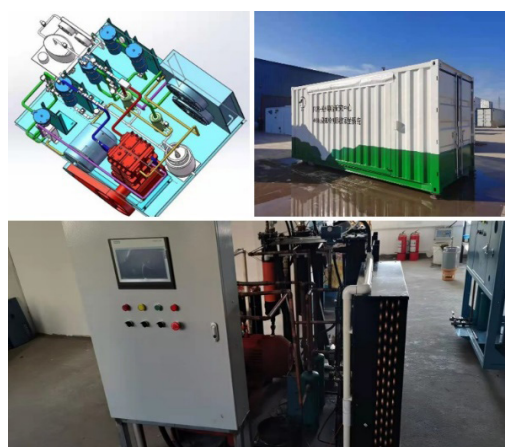


图3.5-15 制冷剂回收设备的模型与实物

处理后制冷剂以新制冷剂价格售卖可以在3年内收回全部初始投资的临界点，即Y=P。根据上述公式计算可知当w为14.94吨/年时，以新生产制冷剂价格售卖可以在3年内收回成本。当制冷剂年回收量越低时对单位制冷剂的补贴需求越高，以保证厂家不至于亏损。当制冷剂年回收量大于15吨时，无需政策补贴，厂家可自行回收成本。若年制冷剂回收量为10吨，则需政策性补贴9.61元/kg。当制冷剂年回收量越高时，仅需较低的价格即可收回成本，制冷剂年回收量为30吨时，可以新制冷剂售价的50%（11元/kg）出售，也可在3年内收回成本。一般回收后的制冷剂很难售出原价，假设回收处理后的制冷剂定价为新生产制冷剂价格的80%，显然制冷剂的年回收量越高，制冷剂回收厂家的总利润越高。如图4.7所示，当制冷剂年回收量到达当前国内一流回收能力可年处理700吨制冷剂时，回收产业总利润可达3169万元。

2. 盾构车站轨行区热环境研究

目前,大部分地铁站都采用屏蔽门系统将站台与轨行区分隔开来,站台热环境通过站台空调系统控制,而轨行区的热环境通过车站两端的活塞风井和轨行区排热系统控制。但在实际运行、列车靠站屏蔽门开启时,隧道内的活塞风会在惯性作用下通过屏蔽门产生大量热质交换,影响站台区和轨行区的热平衡^[20]。

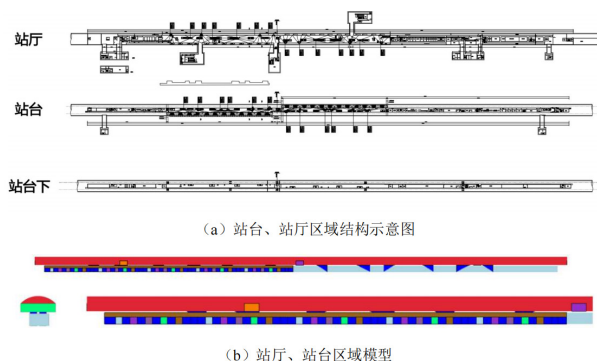


图3.5-16 盾构车站模型

以上海地铁某大盾构车站为研究对象,根据站台、站厅、隧道、列车的实际尺寸建立几何模型,采用STARCCM+软件对列车停站40s期间的站厅、站台公共区、轨行区及列车冷凝器进行了非稳态流场和温度场模拟,得到如下结论:(1)在列车停站的初始阶段,隧道活塞风尚未完全衰减,各冷凝器两侧进风口的平均温度均低于要求的45℃,随着停站时间的推移,出现个别冷凝器进风口温度高于45℃,且都发生在靠近屏蔽门侧的进风口。冷凝器近屏蔽门侧气流有短路现象,使其平均温度高于另一侧温度。

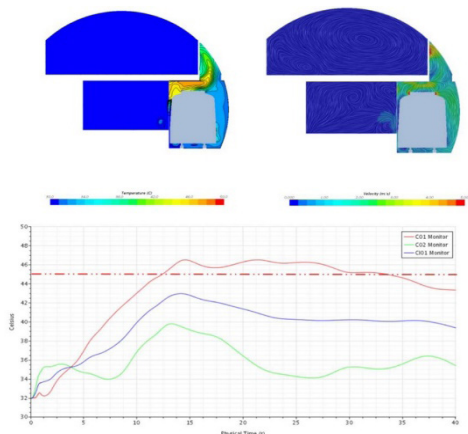


图3.5-17 冷凝器温度分布

(2) 轨行区排风口的排风在列车停站后的不同时刻来源有所区别。在列车停站10s时,排风源完全来自隧道入口;20s时,排风源约72%来自隧道入口,28%来自屏蔽门通风;30s时,排风源约65%来自隧道入口,30%来自屏蔽门通风,5%来自隧道出口;40s时,排风源约51%来自隧道入口,37%来自屏蔽门通风,12%来自隧道出口。(3) 轨行区排风口的排热量随列车停站时间增加而增加,与10s时的158kw排热量相比,40s时排热量增加了1.8倍。(4) 列车停站时,单个屏蔽门的漏风量在0~3m/s之间,靠近车尾处的屏蔽门气流从轨行区流向站台,靠近车头处的屏蔽门气流从站台流向轨行区,随着停站时间的推移,气流从站台流向轨行区的屏蔽门增多。

3. 洛阳地铁2号线市民之家站高效智能环控系统

市民之家站是洛阳市轨道交通2号线车站,位于洛龙区开元大道与金城寨街交叉口,为地下二层单柱岛式站台车站,车站总建筑面积35072.19m²。项目系统采用水冷直接制冷式空调机组方案,取消冷冻水系统,相较传统方案节省了冷水机房面积,系统更加简洁节能。水冷直接制冷式空调机组使用磁悬浮压缩机,采用旋转压降、多参数耦合、小压比设计,解决了运行工况偏移导致的压缩机效率衰减问题,提升了全工况效率。项目于2021年12月26日开通运营并正常供冷。经检验,2023年7月25日~2023年9月20日,空调制冷机房系统运行能效比为6.03 (kW·h)/(kW·h),空调制冷机房冷站运行能效比为7.25 (kW·h)/(kW·h),冷机能效比为9.35 (kW·h)/(kW·h)。

本项目应用高效直膨环控系统,对比常规系统(同类气候区的通风空调系统能效3.5),预计年节约用电40%,年节约用电量24万度,减少碳排放136.9 t;且因无冷冻水系统,施工调试时长大幅降低,具有节约能源、缩减工期的示范性效果,为轨道交通行业响应国家低碳节能绿色发展号召、实现双碳目标,提供全新的解决方案。本项目具有如下技术特点:

1、全工况高效设备:选配两台格力水冷磁悬浮直接制冷式空调机组,采用了冷水机组与空调箱一

体化设计,采用格力自主研发“小流量小压比磁悬浮压缩机”,解决了工况偏移效率衰减问题,提升了全工况效率,取消冷冻水循环,泵耗降低45%;

2、系统适配性设计:采用大小系统冷源分设、全直膨空调系统方案,通过取消冷冻水系统,实现智能控制,从根源解决空调能耗偏高痛点;基于地铁负荷特性,进行全年能效模拟,从能力、品位、压比、高效区等适配性,探索了最优的系统方案及控制策略;

3、基于高效机房管理平台,实现智能化运维:集在线监控、能效分析、专家诊断、故障报警、智能诊断建议等功能于一体,实现空调系统的智慧高效运行。

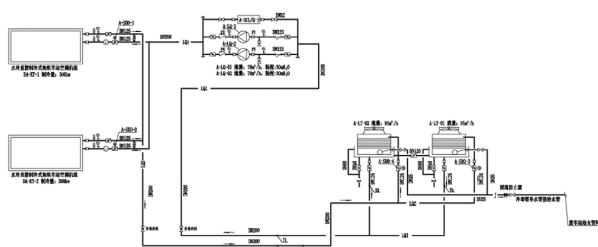


图3.5-18 本案例的流程图与现场

参考文献

[1] 杜滨.首都机场某合同能源管理项目节能效果研究[D].北京:北京建筑大学,2017.
[2] 聂己开.西北某机场航站楼中央空调系统能耗预测与

节能优化研究[D].陕西:西安建筑科技大学,2022.

[3] 城市轨道交通 2022 年上半年数据统计和分析[J]. 现代城市轨道交通, 2022(07): 116.
[4] 城市轨道交通 2021 年度数据统计和分析[J]. 现代城市轨道交通, 2022(05): 117.
[5] 智研咨询集团. 2017-2022 年中国城市轨道交通市场运行态势及投资战略研究报告[M]. 北京, 2017: 28-50
[6] 王前进, 翟晓强, 王晓保, 等. 国内地铁站空调系统研究进展[J]. 建筑科学, 2012,
[7] 高康, 张海波. 水冷制冷剂直接蒸发式空调系统在地铁站的应用[J]. 制冷, 2018, 37(1): 64-67.
[8] 王亮添, 黄云材, 黄国斌, 李迎春. 用于闭式系统地铁站的新型通风空调系统[J]. 制冷与空调, 2018, 18(07): 55-58.28(8): 97-103.
[9] 郭谊婵. 蒸发式冷凝技术在地铁车站空调系统中的应用研究[J]. 黑龙江科技信息, 2017 (17): 82-83.
[10] 李文博. 某地铁站采用蒸发式冷凝空调系统形式的选择[J]. 制冷与空调(四川), 2019, 33(04): 421-424.
[11] 张超, 丁路. 蒸发冷凝式螺杆冷水机组在地铁车站空调系统中的应用[J]. 暖通空调, 2018, 48(1): 96-98.
[12] 李峰, 郑林涛, 周孝清, 等. 直膨式空调系统用于地铁站的能耗分析[J]. 暖通空调, 2016, 46(6): 96-100.
[13] Gao X, Xia R, Zhang X, et al. A Steady-State Modeling Method for Direct Expansion AirConditioning Systems[J]. Journal homepage: <http://ijeta.org/journals/ijht>, 2021, 39(6):1945-1950.
[14] Xia Y, Jiangzhou S, Zhang X, et al. Steady-state performance prediction for a variablespeed direct expansion air conditioning system using a white-box based modeling approach[J]. Energies, 2020, 13(18): 4757.
[15] Liu, M. Variable water flow pumping for central chilled water systems[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2002, 124(3): 300.
[16] Ken W, Peterson. Primary-flow chilled-water-palnt conversion[J]. HPAC Engineering, 2004, 76(3):5-9.
[17] William P, Bahnfleth, Eric B. Varying views on variable-Primary flow chilled-water systems[J]. HPAC Engineering, 2004, 84(7): 32-38.
[18] Yu FW, Chan KT. Improved energy performance of air cooled centrifugal chillers with variable chilledwater flow[J]. Energy conversion and management, 2008, 49(6): 1595-1611.
[19] Casals M, Gangoells M, Forcada N, et-al. A breakdown of energy consumption in an underground station[J]. Energy and Buildings, 2014, 78(4): 89-97.
[20] 司鹏飞, 戎向阳, 石利军, 杨正武, 刘希臣. 航站楼能耗构成特征案例分析[J]. 暖通空调, 2019, 49(06):63-67.

- [21] Lin Lin, Xiaohua Liu, Tao Zhang, et al. Cooling load characteristic and uncertainty analysis of a hub airport terminal[J]. Energy & Buildings, 2021, 231:82-95.
- [22] 刘晓雨, 梁超, 梁乃正, 等. 航站楼类高大空间分层空调设计冷负荷减小率的数值分析[J]. 暖通空调, 2015, 45(03):95-100.
- [23] Hai Zhong, Jiajun Wang, Hongjie Jia, et al. Vector field based support vector regression for building energy consumption prediction[J]. Applied Energy, 2019, 242(15):403-414.
- [24] S.S.K Kwok, R.K.K Yuen, E.WM Lee. An intelligent approach to assessing the effect of building occupancy on building cooling load prediction[J]. Building and Environment, 2011, 46(8):1681-1690.
- [25] Chengliang Fan, Yunfei Ding, Cooling load prediction and optimal operation of HVAC systems using a multiple nonlinear regression model[J]. Energy and Buildings, 2019, 197:7-17.
- [26] Ivan Korolija, Yi Zhang, Ljiljana Marjanovic-Halburd, et al. Regression models for predicting U.K. Office building energy consumption from heating and cooling demands[J]. Energy and Buildings, 2013, 59:214-227.
- [27] 东方财富网. 2024年中国通用航空行业航空器及机场数量预测分析[EB/OL]. [20240126]. <https://caifuhao.eastmoney.com/news/20231214112836468213120>.
- [28] 东方财富网. 2023年中国民航机场情况分析: 旅客量累计完成12.6亿人次[EB/OL]. [20240126]. <https://caifuhao.eastmoney.com/news/20240125082134707832700>.
- [29] 民用建筑能耗标准(附条文说明):GB/T 51161-2016[S]. 2016.
- [30] 叶翠, 李哲青, 温嘉权, 等. 机场航站楼空调系统负荷精算方法研究:以我国夏热冬暖地区枢纽机场航站楼为例[J].暖通空调, 2023, 53(4):20-26, 19.
- [31] 周昕玮.西北某机场能源站冰蓄冷空调负荷预测及优化运行策略研究[D]. 陕西:西安建筑科技大学, 2022.
- [32] 冉彤.某机场能源站冰蓄冷空调系统负荷预测与节能优化研究[D]. 陕西:西安建筑科技大学, 2021.
- [33] 赵何超.某机场航站楼暂留区冷负荷预测与空调系统节能优化研究[D].西安建筑科技大学, 2023.
- [34] 杨鑫, 张世栋, 周拓, 牛利敏, 花雯倩, 杨茜, 齐泽伟, 宋业辉, 谷现良, 逢秀锋.北京大兴国际机场航站楼空调水系统水力平衡调适与节能验证[J].暖通空调, 2023, 第53卷(8): 40-45.
- [35] 康智桓.基于群智能的某机场航站楼中央空调冷冻水系统节能优化研究[D].西安建筑科技大学, 2023.
- [36] 周敏, 许安琪, 杨春方.西宁机场飞机地面空调改进方式研究[J].暖通空调, 2023, 第53卷(4): 54-57.
- [37] [蔡珊瑜, 高文佳, 高延峰, 等.人工智能控制技术在郑州南站空调系统的应用研究[J].城市轨道交通研究, 2023, 26(3):200-204, 209.
- [38] 崔伟强.基于人流量感知的地铁站空调节能系统研究[D].上海应用技术大学, 2020.
- [39] 丁天一.基于负荷特征识别的地铁站空调系统控制优化研究[D].中国建筑科学研究院有限公司, 2022.
- [40] 谷卫.基于深度学习的地铁站室内环境预测系统研究[D].南京信息工程大学, 2023.
- [41] 王广强.地铁站空调水系统优化控制研究[D].中原工学院, 2023.
- [42] 王宗昌, 卓明胜, 赵航, 陈垒, 沈民新.高速列车热泵技术研究[J].暖通空调, 2023, 第53卷(1): 156-161.
- [43] 吴楠楠, 黄琴, 黄进, 朱嘉, 赵亮.列车空调节能技术研究[J].轨道交通装备与技术, 2023, (5): 1-5.
- [44] 于晓良, 王胜光.市域列车车内空气压力波动控制技术[J].城市轨道交通研究, 2023, 第26卷(1): 214-217, 222.
- [45] 王月, 宓宏, 徐宏, 臧建彬, 王海鹰.制冷剂回收再生的碳排放评估及经济性分析[J].制冷学报, 2021, 第42卷(5): 48-55.
- [46] 臧建彬, 屈海波, 郑晋丽, 杨一, 吴妍.地铁站台与轨行区的非均匀非稳态流场及热平衡仿真分析[J].暖通空调, 2022, 第52卷(202): 67-71.

3.6 储热（冷）技术研究及应用进展

吴玉庭 张灿灿 鹿院卫 李传 李琦

（北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室，传热与能源利用北京市重点实验室）

引言

储热（冷）就是利用固体、液体或者相变储热（冷）材料作为储热（冷）介质，通过各种能量与热能的相互转化，实现能量的储存和管理。储热（冷）介质吸收辐射能、电能或其他载体的热量蓄存于介质内部，环境温度低于储热（冷）介质温度或者取热载体温度低于储热介质温度时储热介质热量即可释放到环境或取热载体。储热（冷）主要包括显热储热（冷）、相变储热（冷）和热化学反应储热（冷）^[1]。

要实现我国高比例可再生能源，2030年达到碳排放高峰和2060年达到碳中和的目标，必须在发电侧、电网和需求侧配备足够容量的储能装置。抽水储电站能由于具有低成本高效率的优势，是目前最主要的电网储能技术，但抽水储能由于需要特殊的地形条件，单靠抽水蓄能无法满足我国高比例可再生能源对储能的巨大需求，缺口很大，因此迫切需要发展抽水蓄能之外的新型大容量长时储能技术。

全社会能耗中以热能形式使用的能源占全社会能耗的51%，储热/冷首先能够用于使用建筑供暖供冷、工业供热（冷）/供汽，首先能够满足全社会51%的能耗需求。另一方面储热还可用于光热发电、火电厂深度调峰、压缩空气储能电站的压缩热回收储存、卡诺电池储能电站、风光互补的可再生能源综合能源系统储能等电力储能领域，可在发电侧、电网侧和用户侧均能发挥作用，是一种能够在碳中和中发挥重要作用的低成本长寿命大容量长时储能技术^[2]。

2023年，我国学者在储热储冷材料制备及性能调控、装置设计与性能优化、系统集成应用等方面，取得了重要进展。热能储存聚焦在对熔盐储热、相变储热、和热化学储热三大技术的研究上；而对冷能储存的研究，则主要聚焦于冰/冰浆储冷和相变储冷技术。

3.6.1 关键研究及应用进展

1.1 熔盐储热

熔盐一般需把几种不同的无机盐混合在一起形成共晶混合熔盐，可降低熔点，提高分解温度。混合熔盐具有液体温度范围大，是水的3倍到5倍，储能密度高、成本低、使用温度高、传热性能好和粘度小的优点^[3]。熔盐储热系统一般采用双罐熔盐液体显热储热系统进行储放热。跟固体储热和相变储热相比，双罐熔盐储热具有储/释热换热器进出口参数恒定，可精准调控熔盐的储/释热速率，储/释热换热器成本低的优点，目前已在三十余座太阳能热发电系统（总装机容量达到了350万千瓦，储热容量达到了100GWh）中得到了大容量的配备和长期运行，最长的已有18年的成功运行经验，充分证明熔盐双罐储热是一种低成本大容量长寿命的长时储能技术。

北京工业大学吴玉庭、鹿院卫、张灿灿团队研制了不同温度段的系列混合熔盐配方：①熔点342℃、分解温度750℃的三元混合碳酸硝酸混合熔盐^[4]；②熔点206℃和207℃，分解温度640℃的三元硝酸碳酸/氯化混合熔盐配方^[5]；③熔点301℃，分解温度652℃的低成本高温混合熔盐^[6]；④熔点400℃，分解温度900℃左右的高温混合碳酸熔盐配方^[7]；⑤熔点565℃，分解温度882℃的高温混合碳酸氯化熔盐配方^[9]；⑥熔点117℃，分解温度576℃^[8]；⑦熔点83℃，分解温度625℃^[9-11]；⑧通过在上述混合熔盐中添加纳米二氧化硅粒子制成熔盐纳米流体，提高比热20%以上，提高受迫对流换热系数30%以上^[12-15]。

罗志波等^[16]对高纯和工业级60%NaNO₃-40%KNO₃二元熔盐的热物性进行了对比测试，结果表明：高纯硝酸熔盐在高温长时间循环后，其热失重率明显低于工业级硝酸熔盐，高纯硝酸熔盐的密度、热熔、黏度和热导率均低于工业级硝酸熔盐；蔚清盛等人利用分子动力学模拟方法研究了温度对二元混合碳

酸盐热导率、黏度、比热容及热扩散系数的影响^[17]，结果表明：温度升高导致离子间距变小，熔盐结构变得更为紧凑，使得热导率和黏度均下降。温度越高，离子间碰撞越剧烈，因而能传输更多的热量导致热扩散系数增大；崔吉祥等人采用分子动力学模拟方法在高温范围对三种常用的氯化物熔盐单质和二元混合氯化物熔盐的比热容进行了系统研究^[18]；付殿威等人对基于分子动力学的熔盐(硝酸盐、碳酸盐和氯化盐)热物性研究现状进行分析，对熔盐分子动力学势函数进行总结归纳^[19]。朱文龙利用了“硬球”离子相互作用模型和共形离子溶液模型进行三元相图计算，完成了三元硝酸熔盐的相图计算^[20]。

张灿灿、韩松涛、董晓明等人^[21-23]实验获得了熔盐纳米流体在缠绕管换热器、扭曲扁管和插入扭转带管内的对流换热系数及其关联式。熊亚选等人实验得到了太阳盐+纳米SiO₂复合储热材料在储/放热循环过程中的热物理性质随循环次数和成分配比的关系^[24]。沈强等人对不同工况下的蒸汽加热熔盐系统充热流程、传热特性和能量转换效率进行了试验研究^[25]。董新宇等人以太阳盐为工质，实验研究了熔盐与过热蒸汽/亚临界水在管壳式换热器及蒸汽发生器中的流动传热特性，并开展管侧及壳侧流量、入口温度、压强等参数对熔盐流动传热的敏感性研究^[26-28]。王军等人创新性地提出将红焦热能传递并储存于熔盐的一种红焦热能交换和干法熄焦的工艺路线，建立了熔盐在熄焦炉内热能转换方程和数学模型，并结合实验分析了不同热流密度和压强下熔盐质量流量与温度的关系以及不同压强下熔盐吸热能力^[29]。陈玉爽等采用流热固耦合方法分析了U型管式换热器的温度场与应力场，给出了管板最高应力值及某些路径的应力变化规律^[30]。徐子砚等研究了垂直外部磁场对熔盐在绝缘管内流动传热特性的影响，考察了速度、湍流强度和Nu等参数随磁场变化的关系^[31]。刘赞等运用场协同原理对翼型微通道熔盐换热器进行了强化，强化后的换热器其熔盐侧全场场协同角下降约3.73°，综合换热性能(PEC)提升2.25%^[32]。郑策等^[33]通过数值模拟对熔盐电加热管的布置进行了优化，张国龙等^[34]对电阻式熔盐电加热器进行了动态建模和模拟分析，研究了在电负荷和熔盐流量扰动下及不同布置方式下电阻式熔盐加

热器的瞬态特性和内部温度场。蔡君等人以某大型光热电站高温熔盐储罐为研究对象，采用瞬态热-机械应力分析结果，依据ASME规范对储罐进行棘轮和蠕变-疲劳失效评估^[35]。叶冬挺等人总结出高温熔盐储罐的6大类泄漏原因并提出预防泄漏的措施^[36]。王锐对比分析了光纤测温与常规点式温度监测在双壁熔盐储罐表面温度及泄漏监测上的技术优劣，研究结果表明光纤温度及泄漏检测具有实时在线、覆盖面广、精确测量、安装方便、寿命长、经济价值高等优点^[37]。赵辉等人提出利用电极片检测熔盐储罐泄漏的方法并实验研究其可行性^[38]。

华北电力大学韩瑞等人比较了直接电加热和利用热泵循环加热熔盐的两种不同电转热形式的储能系统变工况效率，结果表明采用热泵的储能系统额定工况的往返效率可达61.46%，相比于直接电加热的系统往返效率提高了45.16%^[39]。哈尔滨锅炉厂赫广迅等人基于300MW等级亚临界参数燃煤电站向储能电站转型的应用场景，搭建了超高温热泵及熔盐储换热系统，本系统在550℃制热温度下获得了1.2623的制热效率，“电-热-电”系统循环转化效率可达到57.162%^[40]。北京工业大学刘金恺等人针对600 MW燃煤机组，提出了8种熔盐储热辅助调峰系统设计方案，并对比分析了各方案的调峰能力和热力性能。结果表明：储热时发电机输出电能直接加热熔盐，释热时熔盐加热旁路给水方案可获得最大调峰容量，调峰深度可达17.83%；储热时中压缸排汽抽汽加热熔盐，释热时熔盐加热旁路给水的方案可获得最高系统效率和经济性，系统热效率为40.95%^[41]。华北电力大学彭家辉等人针对某亚临界300 MW燃煤机组，进行熔盐储能改造，提出了6种储热策略和2种放热策略，并进行了技术经济比较，结果表明抽再热蒸汽储热策略调峰效果最好，调峰深度能到58.9%。放热时，加热给水产生蒸汽做功的发电增量最大，能到额定发电量的11.3%^[42]。河南省电力勘测设计院周信华针对2×660 MW燃煤供热发电机组，提出了抽取主蒸汽和再热蒸汽加热熔盐储热供汽调峰，实现了15%的深度调峰，同时满足了1400 MW的供热负荷及200 t/h的工业供汽需求，项目投资回收期5.9年，具有较好的经济性^[43]。西安热工研究院宋晓辉等人针对670MW电厂提出了4种

抽汽耦合电加热熔盐储热调峰系统方案，并对对比分析了各种方案的热力性能、调峰性能、环保性能及改造难度。结果表明：高温熔盐和低温熔盐储热组合方式有效克服了单种熔盐工作温度受限的问题，能够增强燃煤机组的调峰能力和循环效率；配置电加热器后熔盐能够以目标温度存储于热罐，热电转化效率得到提高，还额外平抑了部分可再生能源的不稳定性^[44]。上海电力大学刘亨等人针对300 MW 燃煤热电联产机组，进行了电加热高温熔盐储热供热调峰系统的分析，结果表明耦合熔盐储热系统后实现了热电解耦，拓宽了调峰运行区间，获得额外收益，大幅提高了运行经济性^[45]。西安热工研究院马汀山等人给出了燃煤发电机组电加热熔盐储热调峰系统的设计方法和容量计算方法^[46]。西安交通大学苗林等人结合 600 MW 亚临界机组案例，建立了集成电制热熔盐储热的燃煤发电系统模型，对不同释热方案下耦合系统的性能进行了分析，结果表明利用熔盐-水换热器承担部分锅炉热负荷或加热给水可提高系统热力性能，系统的等效往返效率（电-热-电）最高为 49.36%^[47]。景德镇陶瓷大学汤永智等人提出了熔盐储热技术以实现间歇式窑炉高温烟气的回收、储存和错时空利用，并对高温烟气熔盐储热特性以及烟气换热管布局、烟气流速和温度对熔盐储热速率的影响进行数值研究^[48]。赛迪热工环保工程技术公司吴娅等人对熔盐储热在钢铁发电系统的应用场景、规划设计评估思路以及未来研究方向进行了总结归纳^[49]。哈尔滨锅炉厂郑麒麟等人设计了一种基于三元熔盐储热的非补燃式压缩空气储能系统方案，充分利用了压缩热，提高了系统整体效率^[50]。

熔盐储热是一种低成本大容量长寿命的长时储能技术，在光热发电、电/太阳能/余热加热熔盐储热供热供汽、火电厂深度调峰等方面都有重要的应用前景。2023年，光热发电行业掀起新一轮发展热潮，与其黄金搭档的熔盐储能也开始爆发式增长。除了已投运的项目外，目前正在推进的光热发电项目中，全部配置了熔盐储能系统，累计装机达2.85GW。2022年12月15日，由江苏国信靖江发电有限公司联合西安热工研究院自主研发，全球首个与煤电耦合的熔盐储热调频调峰及安全供汽技术示范工程投运；2023年5月15日，国内首套66万千瓦煤电

机组耦合蒸汽熔盐储热调峰调频示范项目在华能魏家峁煤电公司成功投运，使用北京工业大学研发的260吨低熔点四元熔盐，储热容量为80兆瓦时，机组最低可调峰至20%额定负荷，负荷响应速率可增加每分钟0.5%额定负荷以上，同步大幅提升机组的调频能力。此外，龙山、宿州等8个熔盐储能项目也相继启动建设。2023年12月6日，世界首座电热熔盐储能注汽试验站在中国石油辽河油田竣工投产，这是首次将电热熔盐技术应用于油田生产注汽系统。通过独创研制的蒸汽发生系统将油田回用软化污水与高温熔盐换热产生额定8MPa、295℃、干度80%的湿饱和蒸汽直接用于油田注汽生产，有效减少能量过程损耗，综合效率从熔盐储能发电系统的35%提高到90%以上。2023年2月，呼和浩特单罐熔盐储热供暖系统投入运行，实际运行熔盐最高温度达到500℃，单罐熔盐储热供暖系统最大储热量为1.197MWh，电热转化效率为93.94%。

2. 相变储热

相变储热是利用材料发生相变过程释放/吸收潜热来进行热能的储存和释放，具有储热密度高、储放热过程中温度稳定及安全性好等优点受到国内外学术界和工业界的广泛关注。相变材料按相态转变的不同可分为固-液、固-固、固-气和液-气相变四大类。相比较其他三种相变方式，固-液相变在相变过程前后，材料的体积变化小、安全系数高且相变潜热值理想，因此被广泛应用于太阳能热发电、风力发电、空间太阳能热动力系统、建筑节能、航天技术及电网削峰填谷和提高电力系统供电稳定性和可靠性等领域。然而，相变材料存在的固有缺陷如导热系数低、液相泄漏、过冷及与封装材料不兼容等，严重制约和影响相变储热技术的大规模应用，所以目前对高性能相变储热材料及装置的研发是科研人员的主要工作。

根据相变材料的成分，可分为两类：有机相变材料和无机相变材料。有机相变材料大多为中低温储热材料，主要有醇类、石蜡、脂肪酸、芳香烃类及高分子聚合材料等，相变储热约150~240 J/g。有机类储热材料具有单位质量储热密度高、循环稳定性好、固态成型好、化学性质稳定、过冷度小、腐

蚀性低、热稳定性较好、不存在相分离与过冷、成本较低等优点；但是其单位体积储热密度低、相变点较低、导热系数小、密度较小且部分材料存在一定的毒性，不适于高温场合使用。无机类相变材料包括结晶水合盐、熔融盐和金属合金等。结晶水合盐是中低温储热领域的主要材料，通过结晶水的脱除和结合实现热能的存储和释放，主要包括碱和碱土金属的卤化硝酸盐、硫酸盐、乙酸盐等。结晶水合盐的相变点一般在100℃以下，导热系数在0.5 W/(m·K)，左右储热密度一般为200~700 J/cm³，单位体积储热密度可达350 kJ/L以上，具有较高的储热能力和导热系数。其适用范围广、材料易得且成本较低，常应用于建筑物的保温材料和热水系统等。无机盐是中高温领域的主要储热材料，具有潜热密度大、温度涵盖范围广、成本低、热稳定性好、易于控制和管理、饱和蒸汽压低等优点，常用的相变无机盐有碳酸盐、氯化盐、硝酸盐、氟化盐，其中硝酸盐相较于其他类熔融盐，具有熔点低、价格低、腐蚀性小等优点，已广泛应用。

相变材料导热系数低是影响蓄热装置性能的主要因素。因此，人们就如何提高相变材料的导热系数做了大量的工作。向相变材料中添加高导热性物质是提高相变材料导热性能的主要方法，如金属颗粒、纳米粒子和膨胀石墨等。天津商业大学朱猛等将8~12 nm、10~20 nm、20~40 nm三种不同直径的碳纳米管粉末，以5%的质量分数加入到石蜡中，显著提高了复合相变蓄热材料的导热系数及热扩散率提高，缩短了石蜡融化时间，8~12 nm的复合材料融化时间缩短18.2%~46.7%^[51]。河北农业大学侯俊英等以ZIF-8@ZIF-67核壳结构为载体，以石蜡为相变芯材，采用溶剂蒸发法制备了质量分数为50%、60%、70%和75%的石蜡/ZIF-8@ZIF-67定形相变材料，研究表明质量分数为70%的石蜡/ZIF-8@ZIF-67相变材料可以很好地保持整体系统的温度稳定性，具有良好的蓄-放热效果^[52]。北京建筑大学陈红兵等制备了二十二烷-十二醇(DE-CP)膨胀石墨复合相变材料，导热系数由原来二元相变材料的0.135 W/(m·K)提升至1.383 W/(m·K)，解决了相变材料自身导热系数低的问题^[53]。攀枝花学院徐众等以普通泡沫碳(CF)为支撑材料，石蜡(PW)、

十六酸(PA)和硬脂酸(SA)为相变主材，攀枝花提钒尾渣(TV)为导热强化剂，采用恒温浸渍法和浇注法制备了提钒尾渣/泡沫碳/有机质复合相变材料，有效提高了导热系数，缩短了储放热时间^[54]。辽宁石油化工大学李向辉等以膨胀蛭石为支撑材料，合成了癸酸·月桂酸/膨胀蛭石复合相变储热材料，提高了材料的调热性能^[55]。北京工业大学樊占胜等采用多孔吸附法将改性膨胀石墨和改性十二水硫酸铝铵复合，制备了一种新型复合相变材料，研究表明：复合相变材料的熔点、潜热和导热系数分别为93.23℃、235.40 kJ/kg和4.086 W/(m·K)，具有较好稳定性^[56]。内蒙古工业大学敖慈制备了一种硬脂酸/氮化硼复合相变储热材料，降低了熔化温度，提高了固化温度，导热系数也由0.96 W/(m·K)提高到了2.82 W/(m·K)^[57]。北京建筑大学杨洋等选取电石渣和钢渣1:1混合进行CO₂捕集和封存，将封存CO₂的电石渣-钢渣混合材料作为骨架材料制备了7种不同配比的NaNO₃/固碳电石渣-钢渣复合相变储热材料，研究表明电石渣-钢渣混合材料的固碳率为24.48%，热导率为1.057 W/(m·K)^[58]。北京建筑大学田曦等采用经固碳废弃混凝土为骨架材料，硝酸钠为相变材料，制备出了复合相变储热材料。研究结果表明，废弃混凝土在最佳实验工况下固碳效率高达24.7%，材料的抗压强度高达121.54 MPa^[59]。北京建筑大学熊亚选等采用兰炭灰作为骨架材料、膨胀石墨作为导热增强剂制备了硝酸钠-兰炭灰-膨胀石墨复合相变储热材料，研究表明复合相变储热材料强度达到了113.82 MPa、导热率1.844 W/(m·K)和储热密度424.91 J/g^[60]。北京工业大学许荣玉等采用冷压-热烧结方法制备了一种以NaNO₃-NaNO₂-KNO₂-LiNO₃共晶四元硝酸盐为相变基体材料，氧化镁为结构支撑材料，石墨为导热增强剂的复合相变储热材料，研究表明：添加8 wt.%的石墨后复合材料的热导率从0.41 W/(m·K)提高到了0.77 W/(m·K)；经150次循环后，复合材料表现出良好的热循环稳定性^[61]。中国广核新能源卢昀坤采用封装剂埋烧成膜的方法对K₂CO₃-Na₂CO₃/MgO/玻璃复合相变储热材料表面进行处理，使其表面形成不溶于水的涂层，有效解决了复合相变储热材料在高湿度环境下熔盐泄漏的问题^[62]。北京工业大学水潭等开发制备出一种相变温度

为150~220 ℃的三元硝酸盐相变微胶囊复合材料,研究表明三元硝酸盐可被有效地包覆在二氧化硅壳体中,所形成的微胶囊材料粒径范围为10~40 μm,最高包覆率可达90.9%,微胶囊化后的熔融焓为86.81 kJ/kg,储热利用效率达78.36%^[63]。苏州科技大学黄志国以钛酸四丁酯(TBT)为前体,采用界面水解-缩聚法制备了纳米相变微胶囊,纳米相变微胶囊的热导率提高到原材料的215%^[64]。北京工业大学李琦等制备了一种埃洛石纳米管-硝酸盐复合相变储热材料,研究表明复合相变储热材料具有稳定的结构和优秀的循环性能^[65]。在此基础上,北京工业大学李琦等进一步添加石墨制备出了埃洛石纳米管-硝酸盐-石墨复合相变储热材料,将导热系数由0.62提高到了1.3 W/(m·K)^[66]。

青岛科技大学高杨等针对多管式相变储热器对相同横截面积的圆管、椭圆管外的1.5%石墨烯/石蜡复合相变材料的熔化、凝固过程进行仿真,研究表明:椭圆管的换热综合性能高于圆管;当内管中水的流速相同时,椭圆管的蓄放热效率分别比圆管高12.96%和9.20%^[67]。北京工业大学王媛媛等提出微热管阵列梯级相变蓄热系统,以空气为换热流体,以52#石蜡和月桂酸作为梯级蓄热的两种相变材料,研究梯级蓄热装置在换热流体不同进口温度、不同流量下的蓄热特性。结果显示,该装置在较大的填充率下缩短了蓄放热时间,完成蓄热过程所需时间与单级蓄热装置相比缩短了43.75%^[68]。苏州科技大学黄志国等数值研究了顺排结构和叉排结构纳米相变微胶囊填充床的储放热性能^[69],研究表明叉排结构比顺排熔化/凝固更快,温度变化更加均匀,储放热功率大。武汉科技大学周凤鸣等建立了含金属类相变蓄热复合蜂窝体蓄/放热模型,对蜂窝体的蓄/放热过程进行数值模拟,研究了相变材料和换向时间对空气预热温度、能量回收率的影响^[70]。南京理工大学句子涵等对“三明治”结构的石墨/铝合金复合导热板强化石蜡的相变蓄热特性进行了数值研究,探究泡沫金属、平板翅片以及复合导热板三种传热结构对石蜡相变蓄热过程的影响,研究表明:石墨/铝合金复合导热板强化石蜡相变蓄热的性能明显优于其他传热结构,添加二级肋片后热源温升减小了15.87%,有效工作时间延长64.68%^[71]。中山大学张

媛媛等建立了双层相变材料熔盐斜温层储热系统的传热储热数值模型,分析了相变材料熔点/位置/含量/比例对储热系统斜温层厚度、流固温差和有效热效率等参数的影响规律,研究表明,储热系统形成热能梯级输出,使有效放热效率升高,提高了中高温段放热量,有效放热效率比单层时提高3%~10%^[72]。

上海交通大学胡茜茜等设计搭建并测试了一套高温相变胶囊梯级储热系统,采用了两种不同相变温度的多元碳酸盐材料作为储热材料,对换热工质空气的不同进口温度和进口流量的储放热过程进行了实验研究^[73]。合肥学院石军兵等制备了石蜡/改性坡缕石复合相变材料,将复合相变材料与砂浆结合制备相变储热砂浆,研究表明,相比于未改性的坡缕石,以改性坡缕石制备的复合相变材料的潜热储存能力可以提高29.6%,将8%的复合相变材料加入砂浆可以制备出强度符合围护结构使用要求的相变储热砂浆^[74]。山东建筑大学见禹等提出构建主干-分支两级分级结构金属骨架并与石蜡方腔相结合,形成传热效果更好的复合相变传热材料,并在此基础上添加翅片管结构来进一步优化复合相变材料的传热性能,研究表明优化后的复合相变材料相较于均匀骨架复合相变材料固液相变时间可缩短37.4%,熔化初期瞬时液相速率曲线的波谷提高了1.88倍并且使熔化后期800s时的最大温差减小了20.9%,提高了温度均匀性^[75]。中国电建山东电力建设第一工程公司侯立强等对旋转螺旋翅片相变储热单元进行了优化分析,研究表明:通过旋转螺旋翅片可以有效提高储热单元的传热性能,熔化强化率最大达到了200%^[76]。

江苏金合能源公司、贺迈新能源科技(上海)有限公司、陕西久维电力工程有限公司等企业都已实现相变储热规模化应用,在北京、青海、安徽等地先后建成一批基于相变储热技术的低碳清洁供热示范项目,代表工程包括北京华润生命科学园办公楼高效PCM相变柔性热池谷电蓄热供暖系统(4.6万平方米建筑)、安徽芜湖花桥开发区高温熔盐相变蓄热蒸汽装置能源站(100吨熔盐相变材料,80MWh,额定蒸汽产生量11t/h)、青海玛多县第四片区相变蓄热取暖工程(6MW,供暖面积50000平米)等。

3. 冰蓄冷

冰蓄冷技术发展至今主要经历了三个重要的发展阶段。首先是上个世纪80年代的冰球制冷方式，其次是90年代开始的盘管技术，2020年后的第三代是冰浆的方式。Yuang Zhang等^[77]采用负压闪蒸法制备了冰浆储冷乳液，并对其储冷性能进行研究；Shaolei Cai等^[78]研究颗粒熔化和微尺度对流对冰浆热导率的影响；Sijia Qin等^[79]考察冰浆制备过程中微尺度气泡的形成对冰成核速率和过冷抑制的影响，以及制备一种壳聚糖冰浆乳液用于农产品的保鲜运输；Gao等^[80]对添加有石墨烯纳米颗粒的冰浆乳液在水平圆管内的传热和流动性能进行研究。大连理工大学张宇昂等制备一种采用聚酯纤维作为骨架材料的定型水基相变材料，研究结果表明制备的材料具有优异的形状稳定性和优异的热物性参数^[81]。广州海源机电安装公司黎志峰以谷电制取动态冰浆储冷技术的投入使用，研究解决了乳制品生产企业工艺供冷系统的不足^[82]。

中国科学院广州能源研究所从2006年开始了新一代蓄冷技术-冰浆蓄冷技术的研发。在科技部863计划以及广东省科技计划项目等的支持下，在国内率先研发成功了流态化冰浆蓄冷技术，并建设了多个示范工程，完成了技术验证^[83]。在此基础上，他们提出了基于流态冰的新型冰源热泵系统^[84]，主要是在蒸发器中采用可控相变技术，实现了热泵系统连续提取水源凝固热的目的，解决了目前水源热泵存在进口水温下限高，显热的可用能量密度低等问题。他们还提出了以冰源热泵为核心的跨季节蓄冷技术^[85]，在寒冷季节将低成本冷能进行回收，并在炎热季节将冷能利用的技术，全年可以大幅降低的采暖供冷能量消耗。

中国绿发投资集团吴泽江等考察了国内冰蓄冷案例，对关键技术设备应用开展市场和技术调研，建立了评价指标体系，深入研究了蓄冰密度、融冰率、释冷速率等关键参数的影响因素，依靠智能调试和编程手段，解决了系统低效问题，减少了运行电费，缩短了投资回收期^[86]。20世纪90年代初，我国开始建造水蓄冷和冰蓄冷空调系统，主要是集中在城市建设和经济发展迅速、同时还有电力紧缺的

北京市和东南沿海地区，至今已有建成投入运行和正在施工的工程600多个，分布在4个直辖市和18个省，全国2/3的省市都建造了蓄冷空调系统，蓄冷空调最多的依次是浙江省（67项）、北京市（64项）、江苏省（57项）、广东省（29项）、山东省（28项）和上海市（27项）。在济南CBD地区建成的集中冰蓄冷供冷系统，已覆盖约21万平方米的供冷面积；在深圳前海规划建设10个冰蓄冷供冷站、90公里市政供冷管网，供冷服务建筑面积1500万平方米，目前已有3个冷站投入运行，216万平方米建筑面积已使用集中供冷。海南三亚海棠湾区集中供冷项目已具备130万平方米的供冷能力；此外，在广州大学城和北京中关村也已开始使用集中冰蓄冷供冷模式，河北大学新校区和石家庄职教园区也采用了中央冰蓄冷冷站。深圳湾超级总部基地、广州金融城等不少地方也正在前期规划或建设集中供冷项目。

4. 相变储冷

潜热蓄冷具有储能密度较高、热效率高、储/放冷过程中温度恒定或近似恒定等优点而被广泛应用于制冷领域。相变蓄冷材料根据化学成分可分为无机相变材料、有机相变材料和复合相变蓄冷材料三类^[87]。

无机类相变材料主要包括结晶水合盐、熔融盐、金属合金等。其中，结晶水合盐材料的储能密度较高、相变温度稳定、导热性良好、价格便宜，但大多数具有腐蚀性、过冷度较大以及相分离的问题。长沙理工大学李传常等制备出了 $(\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O} - \text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$ 共晶相变储冷材料，采用 $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 成核剂来减少过冷度，采用聚丙烯酸钠和去离子水来抑制相分离^[88]。东南大学王静远等通过在 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 加入一定比例 NH_4Cl 或 KCl ，制备出了5~15℃相变蓄冷材料，同时加入了3%十水四硼酸钠成核剂和 $(\text{C}_3\text{H}_3\text{NaO}_2)_n$ 增稠剂来抑制过冷和相分离^[89]。际华集团赵艳娇等利用熔融共混法制备了聚丙烯酸- Na_2SO_4 - $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{OH})_4$ 无机相变蓄冷材料，并加入了黏合剂、增稠剂及复合纤维，结果表明制备的相变储冷材料能在常温环境下结晶，结晶不凝霜，且结晶速度快，35℃相变成液体^[90]。

有机相变蓄冷材料主要包括烷烃类和非烷烃

类。相对于无机相变蓄冷材料而言,有机相变材料具有腐蚀性小、不易出现相分离和过冷现象等优点,但是其相变潜热和导热系数低,并且易燃。南京工业大学吴自德等采用结晶紫内酯和双对羟基丙烷制备了熔点 3.1°C 的正十四烷-正十二烷醇相变微胶囊蓄冷材料,研究结果表明制备的材料具有很好的稳定性和热性能^[91]。南京工业大学张盼等制备了聚甲基丙烯酸甲酯为表面材料的正十二烷相变微胶囊,制备的微胶囊具有良好的微观形态、优良的储热性能和好的稳定性^[92]。西安建筑科技大学卢喆等制备了葵酸-正辛酸-正十四烷共晶相变蓄冷材料,并添加纳米石墨来强化传热,研究表明相变材料的熔点为 0.32°C 、熔化潜热为 163.3kJ/kg 和导热系数为 $0.83\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ ^[93]。上海航天设备制造总厂孟金龙等通过相图和优选实验获得了四元脂肪酸共晶相变蓄冷材料优化配比^[94]。

复合相变蓄冷材料是在无机相变蓄冷材料和有机相变蓄冷材料的基础上衍生出来的一种较为新型的蓄冷材料。可兼具无机和有机相变蓄冷材料的优点。云南师范大学刘雅莉等制备了水基甘氨酸-山梨酸钾-甲基溴化铵改性膨胀石墨复合相变蓄冷材料,研究结果表明复合相变蓄冷材料的熔点为 -5.06°C ,熔化潜热 243.8kJ/kg ,导热系数为 $1.856\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ ^[95]。北部湾大学罗孝学等配备出一种新型复合相变蓄冷材料(81%六水氯化钙+5%乙醇+14%丙三醇),使用1%六水氯化铯消除了相变材料的过冷^[96],同时采用膨胀石墨来强化传热^[97]。长沙理工大学李沐等制备了六水氯化钙-尿素-六水氯化氨复合相变蓄冷材料,并添加 $\text{SrCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 来消除过冷,添加亲水气相二氧化硅来抑制相分离,添加纳米二氧化钛颗粒来强化传热^[98]。

北京工业大学陈传奇等用试验比较了肋片式储冷系统和肋片泡沫金属储冷系统的传热性能^[99]。常熟理工学院陆高峰等针对密布排列型、面心立方型和六角形三种结构的充填床储冷系统的性能进行了数值模拟和试验研究^[100]。东南大学王静远等对采用三种不同熔化温度的多阶段梯级相变储冷系统进行了数值模拟,获得了相变储冷系统的储放冷性能及温度相态分布变化规律^[89]。中原工业大学郑慧凡等对石蜡相变蓄冷球及其蓄冷设备进行了数值模拟,

获得了球直径、壳体材料、肋等对储放冷性能的影响规律^[101]。无锡中粮工程公司杨俊俊等建立了分形树状肋片结构的相变蓄冷装置释冷过程的二维非稳态理论模型并进行了数值模拟,获得了释冷过程中的形貌特征与温度场分布特性,评估了不同肋参数(肋高、肋厚、肋数)蓄冷装置的释冷效果,给出了粮食低温储存蓄冷装置的肋片优化结构^[102]。

中国中车集团石家庄车辆有限公司现已构建包括蓄冷式节能冷库、公铁联运干线运输装备、新能源城市物流车、蓄冷式恒温温控系统等在内完备的蓄冷式全程冷链装备体系,目前相变蓄冷冷库技术已经横跨多个地区,实现了 35000km 的公路运行和 1000km 的铁路运行;将相变储冷技术与供热系统或建筑材料结合,使其形成如内墙和楼板等建筑节能材料,成为建筑组成中的一部分,已经应用到我国南方部分省份;运用相变储冷材料替换现在市面上的水蓄冷冰袋,加工成不同温度区间的冷链物流产品,现已形成市场产品应用到食品、药品、和航空冷链运输行业。

3.6.2 优秀案例

1. 北京环球影城冰蓄冷案例

(1) 案例总体情况:北京环球影城项目位于北京市通州区文化旅游区内,环球主题公园规划用地面积约 4km^2 ,旅游度假区约 1.4km^2 ;区域能源站的供能涵盖度假区内主体公园、配套酒店和餐饮、办公场所、数据中心等,共计约 40万m^2 ;项目电力负荷需求 25.1MW ,冷负荷需求 62.27MW ,热负荷需求 84.82MW 。环球影城区域能源站按多能互补技术,结合项目全年供冷、夏季昼夜负荷变化幅度明显等特点,配备总容量 155MWh 的蓄冰槽和 11.4MW 的自然冷却板式换热器。供冷总装机容量为 65.9MW ,完全满足园区冷负荷需求。根据外融冰系统蓄冰槽的特性,出水极限温度为 1.5°C ,而且融冰速率快,所以将蓄冰槽串联在制冷主机之后,既可迅速将供水温度稳定在 $4\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,又可提高前端主机设备供冷效率。双工况主机及蓄冰槽盘管内为25%浓度的乙二醇溶液,夜间低谷电价时制冰,白天高峰负荷时通过双工况主机板式换热器进行制冷。夜间制冰时,双工况主机的进、出口温度为 $-5.6\sim -2.1^{\circ}\text{C}$,白天供冷

时,双工况主机的进、出口温度为4~9℃,经过双工况板式换热器换热,二次侧的供、回水温度为5~13℃。区域能源站的回水首先分别经过溴化锂主机、自然冷却板式换热器、双工况板式换热器冷却后,再进入蓄冰槽进行冷却降温,最终和基载主机并联后通过二级泵向园区提供4℃冷水。

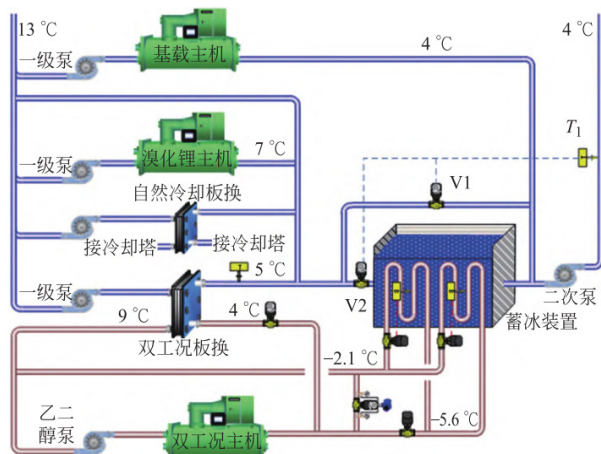


图3.6-1 环球影城区域能源站蓄冰供冷系统原理图

(2) 案例技术特色及技术优势: 环球影城能源中心项目供能系统以天然气作为一次能源,与冰蓄冷技术、自然冷却技术等相结合,实现项目节能、低碳的目标,提高项目运行经济性。项目白天、夜间的负荷差异较大,为利用北京地区峰平谷电价差,该项目冰蓄冷装机比例超过20%,制冷季时,利用蓄冰槽蓄放能可实现削峰填谷作用,提高电力系统的运行效率同时降低项目运行成本。对于反季节冷负荷,该项目设计自然冷却系统,严寒季时,采用冷却塔供冷,不开电制冷主机,大大降低能耗,节约成本。本项目蓄冰槽串联在制冷主机后,不仅可稳定供水温度,也可增大供回水温差,减小水泵能耗;自动控制系统可提高区域能源站的智能性,减少运行人员工作,最终实现无人值守功能;多能互补区域能源站供冷系统相比传统单一冷源供冷系统,运行更经济、更智能,降低运行费用超过17%。

(3) 运行情况: 本项目于2020年6月10日投入实际运行,各项指标均达到设计要求,项目的实际运行结果表明蓄冰槽蓄冰-释冷效率为85%,电制冷制冰系统COP为2.86,电制冷系统COP为3.78。蓄冰槽蓄冰制冷的运行费用明显低于使用主机直接供冷

的费用。在制冷系统白天工作时段,平均电价为1.00元/(kWh),蓄冰槽蓄冰制冷模式与主机直接供冷相比节约运行费用16.93%。

2. 基于分层储罐蓄冷的金澳伊利液态奶生产用制冷系统及节能智慧调控系统

(1) 案例总体情况: 内蒙古金澳伊利乳业有限责任公司是伊利集团液态奶全球智造标杆基地,日处理鲜奶6500吨。针对其用冷需求,设计并搭建了采用分层储罐蓄冷的“泵+并联螺杆制冷机组”双循环制冷系统,低温自然冷却与高温机械制冷双模式,开发应用了基于分层储罐蓄冷的需求侧管理策略、基于样本库管理的热物理模型-AI融合驱动节能控制技术,采用自主研发的“PLC+智控平台”双擎驱动架构,实现平均节能率25%,最大实时节能率40%,产生了显著的经济效益。

(2) 案例技术特色及技术优势: 采用分层储罐进行短时高频储冷和放冷,针对低温自然冷却与高温机械制冷双场景,开发基于负荷精准预测的全局能量平衡技术,平抑冷量需求侧和供给侧失衡难题,为液态奶生产工艺的精准控温保驾护航;开发基于样本库管理的热物理模型-AI融合驱动节能控制技术,突破了传统经验控制节能率低、单一AI模型控制数据成本高、训练周期长的瓶颈,可实现短-中-长期的全运行周期节能,节能率高达20%~40%;自研制冷压缩机及系统负荷精准适配的PLC高效自控算法,与机理+AI节能智控平台协同作用,避免了海量参数群控优化对算力的高需求,保障了制冷系统节能控制的安全性和可靠性。

(3) 运行情况: 金澳伊利液态奶生产用制冷系统已连续运行一年,经调试后,制冷机组运行高效平稳,克服了压缩机容调滑阀载位频繁增减的难题,供冷温度控制精度高,温度波动±1℃以内。基于“PLC+智控平台”双擎驱动,通过数据采集与分析,感知与预测液态奶生产线负荷的突变,实时优化调整压缩机、水泵与风机等设备的频率,与传统自控系统相比,实现了20%以上的节能率。在相同的气象与环境温度下,达到相同产量所需的单吨制冷能耗下降16%~40%,节能率高达25%以上;制冷系统负荷峰值降低20%以上,能耗峰值降低15%以

上, 内外循环冰水流量极值差缩减50%以上。

参考文献

- [1] 陈海生, 吴玉庭主编. 储能技术发展及路线图. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [2] Hafiz Muhammad Ali, Tauseef-ur Rehman, Müslüm Arıcl, Zafar Said, Benjamin Duraković, Hayder I. Mohammed, Rajan Kumar, Manish K. Rathod, Ozge Buyukdagli, Mohamed Teggat. *Advances in thermal energy storage: Fundamentals and applications. Progress in Energy and Combustion Science* 100 (2024) 101109.
- [3] 朱猛, 陈华, 侯玉洁. 碳纳米管直径对石蜡相变蓄热性能的影响. *制冷学报*, 2023, 网络首发: <https://link.cnki.net/urlid/11.2182.TB.20230823.1021.002>.
- [4] 侯俊英, 侯传源, 李建昌, 杨金星, 王雅雅, 袁大超, 郝建军. 石蜡/ZIF-8@ZIF-67 定形相变材料的储热性能. *农业工程学报*, 2023, 39(13):222-228.
- [5] 陈红兵, 李春阳, 王聪聪, 李瑞, 卢浩阳, 刘宇航, 张岩. 应用于低温集热蓄热的二十二烷-十二醇复合相变材料的制备和性能. *储能科学与技术*, 2023, 12(12): 3663-3669.
- [6] 徐众, 侯静, 李军, 吴恩辉, 丁界雄, 罗钦文. 提钒尾渣/泡沫碳/有机质复合相变材料蓄热性能. *矿产综合利用*, 2023, 网络首发: <https://link.cnki.net/urlid/51.1251.TD.20231123.1039.008>.
- [7] 李向辉, 刘松阳, 白瑞雪, 张佳晖, 戴佳楠. 建筑节能用癸酸-月桂酸/膨胀蛭石复合相变储热材料的制备及性能. *辽宁石油大学学报*, 2023, 43(3):34-40.
- [8] 樊占胜, 鹿院卫, 王元媛, 李正阳, 赵甜, 吴玉庭. 十二水硫酸铝铵新型复合相变材料及其性能研究. *热力发电*, 2023, 52(2): 32-38.
- [9] Ci Ao, Suying Yan*, Xiaoyan Zhao, Na Zhang, Yuting Wu. Stearic acid/boron nitride as a composite phase change material for thermal energy storage. *Diamond & Related Materials* 133 (2023) 109671.
- [10] 杨洋, 熊亚选, 任静, 赵彦琦, 李烁, 田曦, 丁玉龙. 碳捕捉对电石渣-钢渣复合相变储热材料性能的影响. *储能科学与技术*, 2023, 12(12): 3690-3697.
- [11] 田曦, 熊亚选, 任静, 赵彦琦, 晋世豪, 李烁, 杨洋, 丁玉龙. 碳捕捉对废弃混凝土复合相变储热材料性能的影响. *储能科学与技术*, 2023, 12(12): 3709-3719.
- [12] Yaxuan Xiong*, Xi Tian, Xiang Li, Jing Ren, Qian Xu*, Yuting Wu, Yulong Ding. Effects of expanded graphite on NaNO₃/semi-coke ash shape-stable phase change composites for thermal energy storage. *Journal of Energy Storage* 72 (2023) 108648.
- [13] 许荣玉, 陆海涛, 郭荷渡, 汤占赞, 李琦, 吴玉庭. 低熔点四元硝酸盐基定型复合相变材料的制备与研究. *储能科学与技术*, 2024, 网络首发: <https://link.cnki.net/urlid/10.1076.TK.20240115.1506.004>.
- [14] 卢昀坤, 唐宪友, 尹航, 张亚南, 张少杰. 高温熔盐/陶瓷复合相变储热材料表面封装及防泄漏性能研究. *无机盐工业*, 2023, 网络首发: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/12.1069.TQ.20230525.1644.004.html>
- [15] 水潭, 吴玉庭, 李传, 李琦. 三元硝酸盐@二氧化硅微胶囊相变材料的制备及其性能研究. *储能科学与技术*, 2023, 12(12): 3595-3603
- [16] 黄志国, 孙志高. 纳米相变微胶囊在蓄热结构化填充床中的应用模拟. *化工学报*, 2023, 74(10): 4109-4128
- [17] Chuan Li, Li Han, Guoyun Leng, Haitao Lu, Rongyu Xu, Yanping Du, Qi Li*, Yuting Wu. Nitrate salt-halloysite nanotube (HNT) composite phase change materials for thermal energy storage: The feasibility of material fabrication by using HNT as skeleton substance and its thermal properties. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 263 (2023) 112565
- [18] Chuan Li, Guoyun Leng, Li Han, Qi Li*, Haitao Lu, Rongyu Xu, Zhang Bai*, Yanping Du, Yuting Wu. Preparation and characterization of quinary nitrate salt based composite phase change material with low melting point for low and medium temperature thermal energy storage. *Journal of Energy Storage* 74 (2023) 109277
- [19] 高杨, 何焯, 许玲, 周艳. 椭圆管强化多管蓄热器的数值模拟. *青岛科技大学学报 (自然科学版)*, 2023, 44(1): 95-101
- [20] 王媛媛, 刁彦华, 赵耀华, 王泽宇, 王镇. 空气换热式微热管阵列梯级相变蓄热装置的蓄放热性能. *新能源进展*, 2023, 11(5): 395-403
- [21] 罗意彬, 段文超, 严景好, 李杰, 孙小琴, 廖曙光. 双翅片矩形相变储能单元蓄热性能实验研究. *储能科学与技术*, 2023, 网络首发 <https://link.cnki.net/urlid/10.1076.tk.20231031.0952.003>
- [22] 周凤鸣, 张美杰, 顾华志, 夏求林, 叶成梁, 王建军, 陈定. 相变蓄热蜂窝体传热行为数值模拟研究. *工程热物理学报*, 2023, 44(12): 3372-3379
- [23] 句子涵, 于坤洋, 李强, 胡定华. 石墨/铝合金复合导热板强化石蜡相变蓄热研究. *工程热物理学报*, 2023, 44(12): 3399-3406
- [24] 石军兵, 徐雪青, 司大雄, 陈家骥, 陈辉. 石蜡/改性坡缕石相变储热砂浆的制备及建筑节能效果研究. *安阳师范学院学报*, 2023, (5): 89-94
- [25] 见禹, 陈宝明, 宫晗语. 基于分级结构骨架相变储热系统强化传热特性. *化工进展*. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2023-1285>
- [26] 侯立强, 阎帅, 钮晓博, 张文成, 胡志鹏, 王亚鹏. 基于主动旋转的螺旋翅片储热单元传热性能优化分析. *电力科技与环保*, 2023, 39(6): 553-560
- [27] Hui Yang, Chenchen Wang, Yelong Zhang, Binjian Nie, Lige Tong, Shaowu Yin, Li Wang, Yulong Ding.

- Experimental investigation of a thermochemical energy storage system based on MgSO_4 -silica gel for building heating: adsorption/desorption performance testing and system optimization. *Energy Conversion and Management* 301 (2024) 118000.
- [28] Hangbin Zheng, Xianglei Liu, Yimin Xuan, Yulong Ding, Gilles Flamant. Efficient direct solar-driven thermochemical energy storage of $(\text{AlMgFeMn})\text{OxCaCO}_3$ pellets in a fluidized bed reactor. *Energy Conversion and Management* 285 (2023) 116990.
- [29] Yupeng Lu, Yimin Xuan, Liang Teng, Jingrui Liu, Busheng Wang. A cascaded thermochemical energy storage system enabling performance of concentrated solar power plants. *Energy* 288 (2024) 129749.
- [30] Wenjie Ji, Heng Zhang, Shuli Liu, Yongliang Li, Zhihao Wang, Shihan Deng. A metal mesh net-packed method for improving thermochemical energy storage reactor performance by increasing the void fraction. *Applied Thermal Engineering* 225 (2023) 120248.
- [31] Wei Wang, Yong Shuai, Jianyu Yang, Bachirou Guene Lougou, Yudong Huang. Heat transfer and heat storage characteristics of calcium hydroxide/oxide based on shell-tube thermochemical energy storage device. *Renewable Energy* 218 (2023) 119364.
- [32] Xiaogang Jin, Hengxing Bao, Yuanjun Luo, Xiang Ling. Experimental investigation on sustainable cycling of thermochemical energy storage $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$ using a pressurized air flow. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 439: 140925.
- [33] Xinyi Luo, Wei Li, Lianjie Zhang, Min Zeng, Jiri Jaromir Klemes, Qiuwang Wang. Effects evaluation of Fin layouts and configurations on discharging performance of double-pipe thermochemical energy storage reactor. *Energy*, 2023, 282: 128821.
- [34] Gabriele Humbert, Adriano Sciacovelli. Design of effective heat transfer structures for performance maximization of a closed thermochemical energy storage reactor through topology optimization. *Applied Thermal Engineering* 239 (2024) 122146.
- [35] Yong Zhang, Mingke Hu, Ziwei Chen, Yuehong Su, Saffa Riffat. Performance study of a thermochemical energy storage reactor embedded with a microchannel tube heat exchanger for water heating. *Journal of Energy Storage* 78 (2024) 110043.
- [36] Yuang Zhang, Yanqun Xu, Rongwen Lu, Shufen Zhang, Abdul Moqet Hai, Bingtao Tang. Form-stable cold storage phase change materials with durable cold insulation for cold chain logistics of food. *Postharvest Biology And Technology*, 2023, 203:112409
- [37] Shaolei Gai, Zhengbiao Peng, Behdad Moghtaderi, Jianglong Yu, Elham Doroodchi. LBM study of ice nucleation induced by the collapse of cavitation bubbles. *Computers and Fluids*, 2022, 246: 105616.
- [38] Sijia Qin, Yuankai Jin, Fuxing Yin, Zuankai Wang, Guoying Bai. Can solid surface energy be a predictor of ice nucleation ability? *Applied Surface Science*, 2022, 602: 154193.
- [39] Yuyun Lv, Xuelai Zhang, Jun Ji, Lingeng Zou. Preparation and experimental study of emulsion ice slurry under vacuum flash evaporation in solid adsorption. *International Journal of Refrigeration* 2022, 144: 55-64.
- [40] Yuguo Gao, Yilin Ning, Minghan Xu, Chengzhen Wu, Arun S. Mujumdar, Agus P. Sasmito. Numerical investigation of aqueous graphene nanofluid ice slurry passing through a horizontal circular pipe: Heat transfer and fluid flow characteristics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 134: 106022.
- [41] 黎志峰. 动态冰浆蓄冷技术在乳制品生产中的应用. *科技创新与生产力*, 2023, 44(8): 120-123.
- [42] 宋文吉, 冯自平, 肖睿. 冰浆技术及其应用进展. *新能源进展*, 2019, 7(2): 129-141.
- [43] 王瑛滢, 傅德坤, 陈明彪, 宋文吉, 冯自平. 冬冷地区冰源热泵系统清洁供暖的经济性. *储能科学与技术*, 2021, 10(4):1380-1387.
- [44] 陈明彪, 宋文吉, 王瑛滢, 傅德坤, 冯自平. 跨季节蓄冷特性与系统设计优化. *太阳能学报*, 2022, 43(6): 1-7.
- [45] 吴泽江, 庞峰, 蒋能飞, 牛菲菲. 冰蓄冷系统应用评估与策略. *制冷*, 2023, 43(2):24-29.
- [46] 焦峰, 李晓凤, 马臻, 马阔, 李靖, 吕桂花, 俞祖辉. 相变蓄冷材料研究进展和应用综述. *冷藏技术*, 2023, 46(2): 71-79.
- [47] Chuanchang Li, Meicheng Peng, Baoshan Xie, Yaxi Li, Mu Li. Novel phase change cold energy storage materials for refrigerated transportation of fruits. *Renewable Energy* 220 (2024) 119583.
- [48] Jingyuan Wang, Yonggao Yin, *, Yikai Wang, Jinyan Huang. Thermal performance analysis of multi-stage cold storage packed bed with modified phase change material based on $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. *Applied Thermal Engineering* 219 (2023) 119666.
- [49] 赵艳娇, 葛爱雄, 冯嘉俊. 熔融共混法制备相变蓄冷材料及其性能表征. *纺织检测与标准*, 2023(2): 18-21.
- [50] Zide Wu, Xinyu Zhai, Ziliang Rui, Xudong Xu, Wang, Chunxiang Wang, Hao Peng. Thermochromic microencapsulated phase change materials for cold energy storage application in vaccine refrigerator. *Journal of Energy Storage*, 2023, 73B: 109027.
- [51] Pan Zhang, Lingling Xu, Xin Shi, Zemeng Guo, Jiajia Cheng. Preparation and Performance of n-Dodecane Microencapsulated Phase Change Cold Storage Materials.

- Journal of Renewable Materials, 2023, 11(2):689-705.
- [52] Zhe Lu, Sheliang Wang, Honghao Ying, Bo Liu, Wurong Jia, Jiangsheng Xie, Yanwen Sun. Preparation and thermal properties of eutectic phase change materials(EPCMs) with nanographite addition for cold thermal energy storage. *Energy* 290 (2024) 130148.
- [53] 孟金龙, 张庭玮, 陆晨, 徐世俊, 张明科, 万世豪. 空调用复合相变蓄冷材料的筛选、制备与性能分析. *合成材料老化与应用*, 2023, 52(6): 75-78.
- [54] Yali Liu a, Ming Li, Reda Hassanien Emam Hassanien, Yunfeng Wang, Runsheng Tang, Ying Zhang. Fabrication of shape-stable glycine water-based phase-change material using modified expanded graphite for cold energy storage. *Energy* 290 (2024) 130306.
- [55] Xiaoxue Luo, Shibo Cao, Jin Hu, Changzhen Zou, Xiaochun Han, Haotong Jing, Yu Fang. Study on coupling of expanded graphite and modified calcium chloride hexahydrate phase change cold storage material. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* (2023) 148:10001–10009.
- [56] 曹士博, 罗孝学, 韩晓春, 邹长贞, 蓝广林. 新型有机-无机复合相变蓄冷材料的制备及性能研究. *化工新型材料*, 2023, 51(5): 68-72.
- [57] Mu Li, Chuanchang Li, Baoshan Xie, Penghui Cao, Daifei Liu, Yaxi Li, Meicheng Peng, Zhenwei Tan. Emerging phase change cold storage gel originated from calcium chloride hexahydrate. *Energy* 284 (2023) 129278.
- [58] Chuanqi Chen, Yanhua Diao, Yaohua Zhao, Zeyu Wang, Yifa Han, Zhen Wang, Yutong Liu, Dongran Fang, Tingting Zhu. Thermal performance of cold thermal energy storage system with fin and fin-foam structures. *Applied Thermal Engineering* 228 (2023) 120459.
- [59] Gaofeng Lu, Juan Su, Haimin Zhu. Cold energy storage in a packed bed with novel structured PCM capsule layouts. *International Journal of Thermal Sciences* 197 (2024) 108831.
- [60] Huifan Zheng, Zhehui Zhang, Guoji Tian, Shuang Zeng, Zehua Lv, Junhao Sun. Study on performance of carbon nanotube composite phase change cold storage sphere with annular fins. *Journal of Energy Storage* 78 (2024) 110074.
- [61] 杨俊俊, 韩 娣, 王夏昕, 吴志成, 谢鹏宇, 徐晓丽, 王艳梅, 夏春杨. 低温粮食储存用相变蓄冷装置性能强化研究. *粮食与食品工业*, 2023, 30(3): 48-52.
- [62] 卢灼坤, 唐宪友, 尹航, 张亚南, 张少杰. 高温熔盐/陶瓷复合相变储热材料表面封装及防泄漏性能研究. *无机盐工业*, 2023, 网络首发: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/12.1069.TQ.20230525.1644.004.html>.
- [63] 水潭, 吴玉庭, 李传, 李琦. 三元硝酸盐@二氧化硅微胶囊相变材料的制备及其性能研究. *储能科学与技术*, 2023, 12(12): 3595-3603.
- [64] 黄志国, 孙志高. 纳米相变微胶囊在蓄热结构化填充床中的应用模拟. *化工学报*, 2023, 74(10): 4109-4128.
- [65] Chuan Li, Li Han, Guoyun Leng, Haitao Lu, Rongyu Xu, Yanping Du, Qi Li*, Yuting Wu. Nitrate salt-halloysite nanotube (HNT) composite phase change materials for thermal energy storage: The feasibility of material fabrication by using HNT as skeleton substance and its thermal properties. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 263 (2023) 112565.
- [66] Chuan Li, Guoyun Leng, Li Han, Qi Li*, Haitao Lu, Rongyu Xu, Zhang Bai*, Yanping Du, Yuting Wu. Preparation and characterization of quinary nitrate salt based composite phase change material with low melting point for low and medium temperature thermal energy storage. *Journal of Energy Storage* 74 (2023) 109277.
- [67] 高杨, 何焯, 许玲, 周艳. 椭圆管强化多管蓄热器的数值模拟. *青岛科技大学学报 (自然科学版)*, 2023, 44(1): 95-101.
- [68] 王媛媛, 刁彦华, 赵耀华, 王泽宇, 王镇. 空气换热式微热管阵列梯级相变蓄热装置的蓄放热性能. *新能源进展*, 2023, 11(5): 395-403.
- [69] 罗意彬, 段文超, 严景好, 李杰, 孙小琴, 廖曙光. 双翅片矩形相变储能单元蓄热性能实验研究. *储能科学与技术*, 2023, 网络首发 <https://link.cnki.net/urlid/10.1076.tk.20231031.0952.003>.
- [70] 周凤鸣, 张美杰, 顾华志, 夏求林, 叶成梁, 王建军, 陈定. 相变蓄热蜂窝体传热行为数值模拟研究. *工程热物理学报*, 2023, 44(12): 3372-3379.
- [71] 句子涵, 于坤洋, 李强, 胡定华. 石墨/铝合金复合导热板强化石蜡相变蓄热研究. *工程热物理学报*, 2023, 44(12): 3399-3406.
- [72] 张媛媛, 陈昆仑, 姚业成, 丁静, 陆建峰. 相变填充床熔盐斜温层储热系统梯级储热特性. *工程热物理学报*, 2023, 44(3): 787-794.
- [73] 胡茜茜, 张朝阳, 洪芳军. 高温相变胶囊梯级储热系统实验研究. *储能科学与技术*, 2023, 12(8): 2526-2534.
- [74] 石军兵, 徐雪青, 司大雄, 陈家骥, 陈辉. 石蜡/改性坡缕石相变储热砂浆的制备及建筑节能效果研究. *安阳师范学院学报*, 2023, (5): 89-94.
- [75] 见禹, 陈宝明, 宫晗语. 基于分级结构骨架相变储热系统强化传热特性. *化工进展*. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2023-1285>.
- [76] 侯立强, 阎帅, 钮晓博, 张文成, 胡志鹏, 王亚鹏. 基于主动旋转的螺旋翅片储热单元传热性能优化分析. *电力科技与环保*, 2023, 39(6): 553-560.
- [77] Yuang Zhang, Yanqun Xu, Rongwen Lu, Shufen Zhang, Abdul Moqet Hai, Bingtao Tang. Form-stable cold storage phase change materials with durable cold insulation for cold chain logistics of food. *Postharvest Biology And Technology*, 2023, 203:112409.

- [78] Shaolei Gai, Zhengbiao Peng, Behdad Moghtaderi, Jianglong Yu, Elham Doroodchi. LBM study of ice nucleation induced by the collapse of cavitation bubbles. *Computers and Fluids*, 2022, 246: 105616.
- [79] Sijia Qin, Yuankai Jin, Fuxing Yin, Zuankai Wang, Guoying Bai. Can solid surface energy be a predictor of ice nucleation ability? *Applied Surface Science*, 2022, 602: 154193.
- [80] Yuyun Lv, Xuelai Zhang, Jun Ji, Lingeng Zou. Preparation and experimental study of emulsion ice slurry under vacuum flash evaporation in solid adsorption. *International Journal of Refrigeration* 2022, 144: 55~64.
- [81] Yuguo Gao, Yilin Ning, Minghan Xu, Chengzhen Wu, Arun S. Mujumdar, Agus P. Sasmito. Numerical investigation of aqueous graphene nanofluid ice slurry passing through a horizontal circular pipe: Heat transfer and fluid flow characteristics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 134: 106022.
- [82] 黎志峰. 动态冰浆蓄冷技术在乳制品生产中的应用. *科技创新与生产力*, 2023, 44(8): 120-123.
- [83] 宋文吉, 冯自平, 肖睿. 冰浆技术及其应用进展. *新能源进展*, 2019, 7(2): 129-141.
- [84] 王瑛滢, 傅德坤, 陈明彪, 宋文吉, 冯自平. 冬冷地区冰源热泵系统清洁供暖的经济性. *储能科学与技术*, 2021, 10(4):1380-1387.
- [85] 陈明彪, 宋文吉, 王瑛滢, 傅德坤, 冯自平. 跨季节蓄冷特性与系统设计优化. *太阳能学报*, 2022, 43(6): 1-7.
- [86] 吴泽江, 庞峰, 蒋能飞, 牛菲菲. 冰蓄冷系统应用评估与策略. *制冷*, 2023, 43(2):24-29.
- [87] 焦峰, 李晓凤, 马臻, 马阔, 李靖, 吕桂花, 俞祖辉. 相变蓄冷材料研究进展和应用综述. *冷藏技术*, 2023, 46(2): 71-79.
- [88] Chuanchang Li, Meicheng Peng, Baoshan Xie, Yaxi Li, Mu Li. Novel phase change cold energy storage materials for refrigerated transportation of fruits. *Renewable Energy* 220 (2024) 119583.
- [89] Jingyuan Wang, Yonggao Yin, *, Yikai Wang, Jinyan Huang. Thermal performance analysis of multi-stage cold storage packed bed with modified phase change material based on $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. *Applied Thermal Engineering* 219 (2023) 119666.
- [90] 赵艳娇, 葛爱雄, 冯嘉俊. 熔融共混法制备相变蓄冷材料及其性能表征. *纺织检测与标准*, 2023(2): 18-21.
- [91] Zide Wu, Xinyu Zhai, Ziliang Rui, Xudong Xu, Wang, Chunxiang Wang, Hao Peng. Thermochromic microencapsulated phase change materials for cold energy storage application in vaccine refrigerator. *Journal of Energy Storage*, 2023, 73B: 109027.
- [92] Pan Zhang, Lingling Xu, Xin Shi, Zemeng Guo, Jiajia Cheng. Preparation and Performance of n-Dodecane Microencapsulated Phase Change Cold Storage Materials. *Journal of Renewable Materials*, 2023, 11(2):689-705.
- [93] Zhe Lu, Sheliang Wang, Honghao Ying, Bo Liu, Wurong Jia, Jiangsheng Xie, Yanwen Sun. Preparation and thermal properties of eutectic phase change materials(EPCMs) with nanographite addition for cold thermal energy storage. *Energy* 290 (2024) 130148.
- [94] 孟金龙, 张庭玮, 陆晨, 徐世俊, 张明科, 万世豪. 空调用复合相变蓄冷材料的筛选、制备与性能分析. *合成材料老化与应用*, 2023, 52(6): 75-78.
- [95] Yali Liu a, Ming Li, Reda Hassanien Emam Hassanien, Yunfeng Wang, Runsheng Tang, Ying Zhang. Fabrication of shape-stable glycine water-based phase-change material using modified expanded graphite for cold energy storage. *Energy* 290 (2024) 130306.
- [96] Xiaoxue Luo, Shibo Cao, Jin Hu, Changzhen Zou, Xiaochun Han, Haotong Jing, Yu Fang. Study on coupling of expanded graphite and modified calcium chloride hexahydrate phase change cold storage material. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* (2023) 148:10001–10009.
- [97] 曹士博, 罗孝学, 韩晓春, 邹长贞, 蓝广林. 新型有机-无机复合相变蓄冷材料的制备及性能研究. *化工新型材料*, 2023, 51(5): 68-72.
- [98] Mu Li, Chuanchang Li, Baoshan Xie, Penghui Cao, Daifei Liu, Yaxi Li, Meicheng Peng, Zhenwei Tan. Emerging phase change cold storage gel originated from calcium chloride hexahydrate. *Energy* 284 (2023) 129278.
- [99] Chuanqi Chen, Yanhua Diao, Yaohua Zhao, Zeyu Wang, Yifa Han, Zhen Wang, Yutong Liu, Dongran Fang, Tingting Zhu. Thermal performance of cold thermal energy storage system with fin and fin-foam structures. *Applied Thermal Engineering* 228 (2023) 120459.
- [100] Gaofeng Lu, Juan Su, Haimin Zhu. Cold energy storage in a packed bed with novel structured PCM capsule layouts. *International Journal of Thermal Sciences* 197 (2024) 108831.
- [101] Huifan Zheng, Zhehui Zhang, Guoji Tian, Shuang Zeng, Zehua Lv, Junhao Sun. Study on performance of carbon nanotube composite phase change cold storage sphere with annular fins. *Journal of Energy Storage* 78 (2024) 110074.
- [102] 杨俊俊, 韩娣, 王夏昕, 吴志成, 谢鹏宇, 徐晓丽, 王艳梅, 夏春杨. 低温粮食储存用相变蓄冷装置性能强化研究. *粮食与食品工业*, 2023, 30(3): 48-52.

3.7 电池热管理技术研究进展

陈浩 于瑞佼 叶芳 郭航 吴玉庭

(北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室, 传热与能源利用北京市重点实验室)

引言

要实现我国高比例可再生能源, 2030年达到碳排放高峰和2060年达到碳中和的目标, 必须在发电侧、电网和需求侧配备足够容量的储能装置。电池储能是支撑能源转型的关键技术之一, 相应产品广泛应用于新能源汽车、数据中心、通信基站、重大装备、储能电站等, 已经成为新型电力系统的重要组成部分、解决可再生能源间歇性和不稳定性的的重要手段, 也是涉及“源网荷储”协调运行的关键技术。截止到2023年12月底, 中国已投运电池储能累计超过71GWh, 新增电池储能超过45GWh。

为提高电池的性能和安全性, 配备高效的电池热管理系统是非常必要的。电池热管理系统具有冷却电池、加热电池和缓解电池热失控等功能, 可将电池包温度控制在25~40℃, 并且单体电池之间的温差小于5℃。电池对温度十分敏感, 当温度低于0℃时, 电池容易出现老、容量衰减等问题, 如广泛应用于储能电站的磷酸铁锂电池, 其电子与离子电导率在低温下显著下降。在高温环境下, 电池的整体性能不仅会下降, 甚至还会导致热失控和爆炸等安全事故, 因此, 及时排出热量是非常关键的。电池冷却技术可以对电池进行有效散热, 从而保护电池免受高温影响, 缓解热失控并降低安全事故发生的概率。总体来说, 电池加热较易实现, 而热量的散出往往需要借助外加设备, 因此热管理技术中的冷却技术起着更为关键的作用。

2023年, 我国学者在电池空气冷却、液体冷却和相变材料冷却与装置技术方面取得了重要进展。

3.7.1. 关键研究及应用进展

3.7.1.1 空气冷却

空气冷却一般分为自然冷却和强制冷却两种, 利用空气流动带走电池产生的热量进而冷却电池, 具有结构简单、成本低、无污染的优点。

自然冷却是一种被动式的冷却方式, 往往只需要设计散热风道, 在早期的锂离子电动汽车中应用广泛, 但是, 自然空气冷却难以满足其动力电池冷却需求, 导致电池包寿命大大衰减。因此, 为保证电池长循环寿命, 需要配置更高效的热管理系统。强制空气冷却是一种主动式空气冷却技术, 借助外部能量促进空气流动从而增强了热传递。2023年, 科研人员在空气冷却研究方面取得了重要进展。

张凌宇等^[1]针对容量为10 Ah的磷酸铁锂方形电池, 在前人的研究基础之上, 优化设计了八种不同的电池热管理系统模型, 在此基础上借助COMSOL多物理场仿真软件, 数值分析了电池散热性能的影响规律。发现断开翅片结构结合双侧异向空气冷却及非均匀翅片伸出高度, 不仅具有良好的热管理性能, 而且能够有效防止热失控的空间传播。杨寒雪等^[2]针对复合相变材料的改性优化和锂离子电池热管理系统的研究, 根据电池冷却散热使用的材料和系统不同, 着重研究了锂离子电池常用的冷却方法, 包括空气冷却、液体冷却、相变材料冷却、热管冷却、热电冷却和多种耦合方式冷却, 与使用某单一方法相比, 多种耦合的热管理系统不仅能提高散热效率, 还可以改善电池温度的均匀性。Shiji Xin等^[3]提出一种基于风冷和液冷的混合电池热管理系统, 电池产生的热量通过导热块传递到冷却液中, 导热块沿其轴向均匀分布, 以维持电池组的正常工作, 还设计并建立了三维仿真模型, 探究了导热块的数量和大小、流速和空冷添加对热管理综合性能的影响。结果表明, 当导热块数量为3个, 换热器块上冷却通道直径为6 mm, 每个冷却通道流量为0.002 kg/s时, 冷却性能、功耗和轻量化将达到良好的平衡。贺春敏等^[4]提出将金属碳化物材料与石蜡相变材料进行复合, 构建基于金属碳化物/石蜡复合相变材料、金属碳化物/石蜡复合相变材料耦合空气冷却的电池热管理系统及复合相变材料耦合液体冷却的电池热管理系统, 并对其散热性能进行研究分析。发

现与空气冷却相比,金属碳化物/石蜡复合相变材料耦合液冷电池热管理系统获得了优于耦合空冷的散热性能。Y. Salami Ranjbaran等^[5]研究了构成空气冷却系统的主动热管理的结构作用,对3种不同冷却管道结构和3种不同冷气流压差的9个实例进行了仿真研究。结果表明,即使在最坏的情况下,温度的升高也是安全、可接受的,并且对于热管理考虑来说足够平稳。Zhongmin Wan等^[6]对泡沫金属的新型阴极流场进行了实验研究。实验结果表明,当泡沫金属的高度为1 mm,泡沫金属的宽度从1 mm增加到5 mm时,风冷质子交换膜燃料电池的热管理得到了改善。在冷却设备部件的设计方面,Xingying Bai等^[7]提出了一种新型被动冷却方案,将均温板集成到质子交换膜燃料电池堆中进行热管理,以减轻传统风冷和水冷造成的寄生功耗。结果表明,与一般的风冷电堆相比,与均热板耦合的电堆的电堆电压显著提高了21.7%。Lincheng Wang等^[8]提出将微热管阵列(MHPA)集成到双极板中,用于小功率风冷PEMFC的热管理,通过实验研究了2 mm MHPA在风冷条件下的传热性能,并对风冷质子交换膜燃料电池的实际应用进行了对比研究。结果表明当加热功率发生变化时,MHPA可以在600~900 s内达到稳定状态。Hong Shi等^[9]提出一种电池热管理模式,集成风冷通道、鳍片和相变材料来改善电池的热性能。结果表明,当PCM厚度(d)从5 mm增加到20 mm时,电池组的热性能得到增强,而随着d的增加,系统的重量显著增加了146.7%。Ziqi Jiang等^[10]开发了一种基于超薄热接地平面的电池热管理系统(UTTGP-BTMS),该系统利用0.4毫米厚的新型UTTGP和风冷来散发电池间隙的热量。结果表明,在较大的速率下,较高的孔密度具有更好的性能。Haobing Zhou等^[11]提出了一种集成了半螺旋线圈和空气射流冲击的热管理方案,建立了带电池座的电池模块三维计算流体动力学模型,研究了不同电池热管理策略下锂离子电池的热性能、螺旋线圈的匝数、气流入口速度、入口温度和接触电阻。发现当撞击空气射流布置在圆柱形的两端时,与液基热管理系统相比,锂离子电池的最大温差值(ΔT)从5.7℃降至4.0℃。蒋喆斌等^[12]将风冷式热管理系统与液冷式锂电池热管理系统进行结合,设计一种风液结合式锂电池热管理系统。发现当加入最优空气流

速与冷却液流速时,风液结合冷却能够以较低的功耗在环境温度与充放电倍率较高的情况下更好地改善锂电池表面温度与温差情况。Zhikuan Liu等^[13]提出了一种新型混合液相变材料蜂窝结构的电池热管理系统,实验得到了电池的开路电压、内阻、开路电压温度导数、比热容和热导率。对比风冷、相变材料冷却和混合冷却三种热管理方案,发现采用风冷方案的电芯温度超过工作温度,而相变材料散热和混合散热方案的混合冷却能有效控制电芯的最高温度。Luyao Zhao等^[14]开发了一种结合直接液体冷却和强制风冷的新型混合电池热管理系统。在电池外部设计了夹套,在电池盒和夹套之间填充液体冷却液,形成直接冷却效果。通过数值模拟分析了电池与液冷夹套间隙间距、冷却管路数量、液体流速和风扇位置对冷却效果的影响,从而优化设计。研究结果表明电池热管理系统在电池4C放电倍率下获得良好的散热效果。

3.7.1.2 液体冷却

基于液体冷却的电池热管理系统是一种先进的电池热管理技术,旨在确保电池在充放电过程中的温度稳定性和安全性。这种技术通过循环液体介质来吸收和散发电池产生的热量,从而维持电池的工作温度在适宜范围内。液体冷却系统的主要组成部分包括冷却液、泵、冷却管道和散热器。冷却液在泵的作用下循环流动,通过冷却管道与电池单体或模块进行热交换。当电池产生热量时,冷却液吸收这些热量并将其传递到散热器中。散热器则通过自然对流或强制对流的方式将热量散发到环境中,从而保持冷却液的温度在一个较低的水平。

液体冷却系统相比其他热管理方式具有许多优点。首先,它具有较高的传热效率,能够快速响应电池的温度变化。其次,液体冷却系统能够实现均匀的温度分布,减少电池内部的温度梯度,从而提高电池的工作效率和寿命。此外,该系统还具有可扩展性和灵活性,可以根据电池包的大小和形状进行定制。然而,液体冷却系统也存在一些挑战和限制。首先,它需要更多的组件和管道,增加了系统的复杂性和制造成本。其次,冷却液的选择和维护也需要考虑,以确保其具有良好的传热性能和化学稳定性。此外,在极端条件下,如高温或低温环

境,液体冷却系统的性能可能会受到影响。

总的来说,基于液体冷却的电池热管理系统是一种有效的解决方案,用于确保电池在各种工作条件下的温度稳定性和安全性。随着电动汽车市场的不断发展,这种技术将继续得到优化和改进,以满足更高的性能要求和成本效益。2023年,基于液体冷却的电池热管理研究方面取得了许多进展。

Yang Li 等^[15]提出了一种利用基于SF33的液体浸没冷却方案的新型电池热管理系统。对比研究液体浸没冷却和强制风冷模块在不同场景下的温度响应。结果表明,即使液体浸没冷却模块在不发生相变的阶段下工作,液体浸没冷却模块也能有效缓解热量积聚,从而在温度控制和均衡方面具有显著优势。Santosh Chavan^[16]通过数值模拟分析液体冷却在电动汽车电池热管理系统中的有效性,调查了不同冷却配置对电池温度行为和传热的影响,还进行了电池级电池冷却分析,以确定不同流体流动配置的最佳流体和最佳流体流动参数。仿真结果表明,液冷可以显著提高双极板的热性能。不同的冷却配置,如弯曲、开放和矩形冷却通道,对双极板内的温度行为和传热有重大影响。N.P. Williams等^[17]通过实验研究了锂离子电池在介电液中浸没液体冷却条件下的热性能和电性能。发现在相同的充电和放电速率下,与单相液体浸泡和自然对流空气冷却相比,在两相浸没式冷却条件下观察到更好的性能。Qianqian Xin 等^[18]采用校准量热法测定考虑热损失的大容量电池的比热容和发热率,然后提出了3种大容量电池热管理系统案例,即仅采用复合相变材料冷却、仅采用液冷和将复合相变材料与液冷相结合的混合方式,研究发现,混合方式在相同条件下拥有电池模块的最低最高温度。Zhaoliang Chen等^[19]基于扰流板结构的性能差异,采用结构差异设计,提高高能量密度锂离子电池的温度均匀性,通过实验分析了放电速率和流量对液冷板散热性能的影响。结果表明,结构差异设计显著增强了电池的温度均匀性,并随着流速的增加而提高。杜江龙等^[20]提出了一种波浪形液冷散热结构,并利用伪二维电化学模型和三维传热模型构建了一个电池组模型,研究了放电倍率、环境温度、冷却液温度、冷却液流速和冷却管道与电池接触面积对电池组散热性能

的影响。发现高放电倍率会导致电池的最高温度和最大温差上升;低环境温度和冷却液温度可以有效降低电池组温度,但过低的环境温度和冷却液温度会导致电池组的温差较大。陈瑞可等^[21]测试了制作出的两种复合相变材料,通过仿真使用复合相变材料与液冷板耦合结构对电池组进行散热,发现单一的使用复合相变材料可以在30℃时使电池在安全的温度下工作,在更高的环境温度时则需要液冷板的加入,且水柱式液冷板比中空式液冷板效果更好。Nong Xie 等^[22]提出了一种结合相变材料、微热管阵列和液冷的新型混合电池热管理系统,并对其冷却性能进行了实验验证,采用Box-Behnken设计利用数值方法分析了电池热管理系统主要结构参数对冷却性能的影响,引入基于响应面法的多目标粒子群优化的多目标优化,优化冷却性能。Huizhu Yang 等^[23]提出一种具有多通道的新型锥形歧管通道散热器,分析比较了8种不同设计的电池最大温度和温差、温度分布不均参数和功耗性能,此外,还分析了基于液冷系统的延迟冷却策略对温度均匀性的有效性。结果表明,采用锥形歧管结构可以提高电池热管理系统的冷却性能,而增加通道通过次数可以提高热性能,但代价是功耗增加。Ping He 等^[24]设计了一种双层工字形液冷板,上层通道利用冷却液散热,下层通道回收冷却液,研究了3个设计变量(长宽比和通道间距)和不同入口条件对液冷板传热性能的影响。结果表明,在长比为0.70、宽比为0.85、通道间距近似为2.0 mm时,获得了最佳的最大温度和温度均匀性。Amarnathvarma Angani等^[25]提出了用于集成内部锯齿形板的72V电池模块的电池热管理系统,开发了混合冷却和液冷系统等两种外部冷却系统,评估并比较了两种型号在1C和1.25C放电速率下的单个最大电池温度、锯齿形板的传热速率和冷却液温度。从结果中可以看出,混合冷却系统降低了每个电池的温升,使温度分布更均匀。陈洋洋等^[26]以某方形锂离子电池为研究对象,在单体模型验证的基础上,提出了两种新颖的液冷板设计结构,运用数值仿真方法分析了两种液冷板对电池散热性能的影响。发现仿生叶脉分支通道具有良好的散热性能。Zhiguo An等^[27]针对圆柱动力锂离子电池,提出了一种液冷与复合相变材料相结合的新型蜂窝电池热管理系统,以改善恶劣放电条件下的冷却效果

和低温环境下的容量降低问题。在4C放电倍率下,对不含任何散热元件、采用被动复合相变材料或混合冷却元件的三种不同单体电池系统的冷却和预热性能进行了比较。发现电池模块可以在大约6 min内快速加热。Zhenwei Liu 等^[28]设计并优化了一种相变材料与液冷相结合的翅片增强混合冷却系统,数值研究了复合相变材料、翅片排列、冷却水流入方案和环境温度对电池组散热性能的耦合效应。发现复合翅片和双层相变材料的布置可以进一步提高适应性,具有更好的温度控制或温度均匀性,并获得了安全运行的环境温度、冷却液入口温度和速度的合适范围。陆张浩等^[29]提供了一种基于热管的全新的混合动力汽车热管理方案,并通过细致的多场耦合数值模拟研究评价了热管式热管理系统的性能。发现液冷方案下电池组的温升虽小,但热管方案下电池组的温差更小,均温性更好,温度分布更加合理。

3.7.1.3 相变材料冷却

在电池热管理系统中,相变材料是一种能够吸收、储存和释放大量热能的物质。在燃料电池或者锂离子电池工作中,由于化学反应和电流流动会产生热量,如果热量不能得到有效的控制,将会影响电池的效率 and 安全性。相变材料可以在温度升高时吸收热量,并通过相变过程将热量储存起来,然后在温度降低时将热量释放出来,从而达到控制电池温度的目的。2023年,关于电池热管理系统相变材料的研究取得了许多进展。其中,一些研究集中在寻找具有高热容、高相变潜热、高热稳定性、低成本和环保的相变材料。例如,一些研究者发现,某些无机盐类、脂肪酸类、高分子类等材料具有良好的相变性能和稳定性,可以作为电池热管理系统的相变材料。

传统石蜡材料依然是电池热管理系统中所使用的相变材料中的首选,一些研究学者针对传统相变材料开展了进一步的研究工作,比如在石蜡材料中添加其他成分从而获得更好的传热性能。吴晓昱等^[30]以石蜡作为相变基体,膨胀石墨和石墨烯协同增强导热,制备高导热性的复合相变材料,并在不同石墨烯含量下,观察其在锂电池放电过程中的冷却作用。发现复合相变材料能有效降低工作中锂离子电池的表面温度,同时使电池的性能更加稳定。

Chenqing Li等^[31]提出了一种集成复合相变材料的电池热管理系统,研究了不同质量分数石蜡/膨胀石墨复合相变材料对电池热管理系统的散热性能影响。结果表明,使用膨胀石墨含量为20 wt%的复合相变材料具有最佳的散热性能。

在无机相变材料研究方面,李强等^[32]采用实验与模拟相结合的方式,选取无机相变材料三水醋酸钠作为基材,并进行改性实验,研究了锂电池相变材料热管理系统热性能及其优化方案。该混合热管理模式显示出更好的协同效果。樊榕等^[33]选取了相变温度适用于锂电池热管理的水合盐混合体系,然后利用该水合盐混合体系,加入具有丰富孔隙的高导热膨胀石墨和加工性能良好的聚氨酯泡沫作为增强材料,制备了水合盐/聚氨酯泡沫复合相变材料,并对该材料在锂电池热管理和热失控阻隔性能进行了综合分析。发现水合盐/聚氨酯泡沫复合相变材料保留了水合盐的相变性能,且采用其进行电池热管理,具有良好的热管理性能。Ping Ping 等^[34]采用纳米封装界面聚合法合成了一种封装的无机相变材料,以降低电池热失控过程中相变材料的火灾风险。结果表明,无机相变材料表现出良好的冷却性能,并且可以抑制热失控过程时的热传播。

在复合相变材料方面,2023年相关学者开展了大量工作,并尝试了多种复合型相变材料的研究。周健夺等^[35]利用多孔材料和导热添加剂联合增强相变材料,开发了一种新型用于电池热管理的定型复合相变材料。发现质量分数为60%的复合相变材料具有优异的热物理性能,将其应用于电池模块,表现出优异的热管理性能,并且它还具有优异的反泄漏性能。吴毛毛等^[36]制备了性能优异的两种复合相变储能材料,并分析其对电池的控温效果,发现三元酸在制备过程中未发生化学反应,低共熔脂肪良好的热性能与稳定性有助于其在锂电池热管理系统中的应用。Chu Huang 等^[37]通过实验提出了一种用于电池浸没式冷却系统(BICS)的新型酯冷却剂季戊四醇酯,并与其他冷却剂进行了热性能的比较研究,研究了冷却液流速和排出速率对BICS热性能的影响。发现放电率的增加会导致电池组最高温度和温度不均匀性增加。Zaichao Li 等^[38]制备了一种新型Oct/SEBS复合相变材料,并将其应用于低温锂离子

子电池热管理系统。发现制备的Oct/SEBS具有良好的形状稳定性、足够高的潜热和热诱导柔韧性，此外，含有这种复合相变材料的电池热管理系统可以表现出优异的隔热性能。Abdulmunem R 等^[39]选择棕榈脂肪酸馏出物作为生物基相变材料，通过实验评估了其对于锂离子电池热调节和电性能的影响。结果表明，棕榈脂肪酸馏出物作为生物基相变材料，使锂离子电池温度分别降低了9.8%、19.5%和12.4%，电池电功率分别提高了17%、20%和43%。V. Muthya Goud 等^[40]使用20个锂离子电池以5串4并联配置在不同的放电速率下进行实验，用于自然对流空气和相变材料辅助冷却方法。研究表明，以肉豆蔻醇为相变材料的被动热管理对于大电流、高能量密度的锂离子电池是安全有效的。Chengzhi Hu 等^[41]制备了泡沫铜增强聚合物基复合相变材料，将填充到孔隙率为98%的泡沫铜中后，该种复合相变材料的导热系数提高了明显提高，是传统材料的近3倍。

一些学者尝试将金属材料与传统相变材料进行结合，研究结果可以表明其具有良好的传热特性。Lei Hu^[42]通过简单和高产率的策略制备了由金属有机框架衍生的高取向N掺杂碳纳米管（N-CNTs），然后以合成的N-CNT为载体材料，以二十二烷为功能材料，制备了N-CNTs/二十二烷复合相变材料。结果表明，二十二烷与N-CNTs的整合显著增强了二十二烷的形状稳定性。Hasan Najafi Khaboshan 等^[43]利用相变材料、泡沫金属和翅片的各种组合来设计电池热管理系统，在正常和恶劣的环境条件下，在3C电流率放电的情况下，将电池表面温度保持在最低水平。结果表明，由相变材料、泡沫金属和鳍片组合而成的最佳电池热管理系统可使电池表面温度有所降低。Mehwish Mahek Khan 等^[44]研究了相变材料在锂离子电池热管理系统中的应用，探究了锂离子电池、温度对其性能的影响，以及对可靠的电池热管理系统的需求。此外，该研究还讨论了振动对锂离子电池热管理系统的影响。Guanyi Chen^[45]研究了热管理系统方案设计在不同室温下的冷却效果，并将其与一些具有代表性的传统相变材料冷却方案进行了比较。结果表明，所采用的热管理方案设计能够为在温和热条件下工作的锂离子电池提供经济高效的被动相变材料冷却。Zijian Zhou 等^[46]通过数值

模拟研究了机械振动对单体圆柱形锂离子电池相变材料电池热管理模块在高环境温度、高放电倍率下的影响。发现机械振动增强了自然对流的传热，限制了锂离子电池的过度温升，提高了温度均匀性。Inderjot Kaur 等^[47]研究发现基于微小通道的冷却概念最近受到了相当大的关注，最近在探索的微通道冷却中加入相变材料，只有在质量流量、入口温度和相变温度的适当组合下才能产生令人满意的结果。此外，通过沸腾进行微通道冷却是一个很有前途的概念，但尚未开展深入研究，未来可以探索其在电池热管理系统中的应用。Aditya Bais 等^[48]研究基于相变材料的热电池管理系统的性能，以控制电池温度和电池寿命。结果发现，在相同的负载条件下，使用基于相变材料的热管理系统，电池单元的温度可以更好地保持，并且与裸电池单元相比，电池单元的持续时间大约是裸电池单元的两倍。

另外，还有一些研究集中在复合相变材料方面。通过将相变材料与其他材料复合，可以改善相变材料的导热性能、力学性能和化学稳定性等。例如，将相变材料与石墨等碳材料复合，可以显著提高相变材料的导热性能和力学性能。

总之，随着电池及可再生能源技术的快速发展，对电池热管理系统的要求也越来越高。未来，相变材料在电池热管理系统中将发挥越来越重要的作用。因此，需要继续开展相关研究，进一步优化相变材料的性能和制备工艺，以满足电池热管理系统的实际需求。

3.7.1.4 冷却装置及系统方面

2023年，电池热管理系统的冷却装置及系统研发方面取得了重要进展，其主要研究工作集中于换热设备的设计改进，散热设备是电池热管理系统中重要的元件，能够将电池产生的热量有效地散发到环境中。2023年，研究者们致力于优化散热器的设计和性能，以改善流体流动规律，从而提高散热效率。一些新型的散热器技术，如翅片式散热器、液冷散热器等，得到了广泛的研究和应用。未来，需要继续加强这些关键器件的研究和开发，以适应电动汽车和可再生能源技术的快速发展需求。同时，还需要关注关键器件的集成化和智能化发展，提高

电池热管理系统的整体性能和智能化水平。

电池的热管理策略以及系统设计改进对于电池热管理来说至关重要。研究人员更加注重优化系统的整体性能。例如,通过改进散热器的设计,提高散热效率;通过改进液冷系统的布局,提高冷却效果;通过优化控制策略,实现快速加热和冷却等。这些设计优化旨在提高电池的效率和安全性,满足电动汽车和可再生能源技术的实际需求。此外,研究者们还开始关注电池热管理系统的智能化和集成化。利用先进的传感器和控制系统,实现对电池温度的实时监测和智能调控;通过将电池热管理系统与其他车辆子系统进行集成,提高车辆的整体性能和能效。这些智能化和集成化的设计理念为电池热管理系统的未来发展指明了方向。

姚东升等^[49]基于多孔介质与密布翅片的等效特性,利用Fluent平台建立了电堆热管理系统的车顶散热器模型,并结合AMESim中燃料电池热管理系统模型,研究了散热器与车顶间距对空气质量流量和冷却液温度的影响。发现随着散热器与车顶间距的缩小,散热器换热能力不能充分发挥。姚安琪等^[50]建立燃料电池模型,并运用计算流体力学对燃料电池进行数值模拟,研究了不同反应气体进气方式、冷却水流动方向及冷却水温度对电池输出性能的影响。发现当质子交换膜燃料电池采用同向顺流或同向逆流模式时,当冷却水温度等于电池工作温度(353K),膜温度和水含量分布较为均匀,燃料电池的输出性能较好。刘书琴等^[51]建立了锂离子电池组热管理系统试验台架以及该系统耦合电动汽车动力学的一维仿真模型。发现试验与仿真结果的误差在3.0%以内,优化得到的系统最优配置参数方案较好地平衡了电池温度与系统功耗。Seyed Masoud Parsa等^[52]从不同方面对锂离子电池先进冷却系统(如空气/液基冷却、相变材料、制冷、热管和热电)进行了深入研究,此外,还讨论了数据驱动和机器学习在锂离子电池热调节中的应用。Tao Hai等^[53]对位于风道中的电池组传热进行了数值研究,用COMSOL模拟,测量了电池柱距离不同条件下电池温度的影响。Thai-Quyen Quach等^[54]提出了一种新颖的互连器设计,使用燃料和空气的交替流动概念,采用三维固体氧化物燃料电池模型对不同工

况进行热研究。表明与典型的错流设计相比,交替流设计的温差降低了40%,平均温度提高了53 K。Chengyuan Gong等^[55]提出了一种新型的固体氧化物燃料电池旋转型主流场,并研究了其热特性和流动特性。结果表明,温度均匀性指数至少提高了40%。Ukmin Han等^[56]提出了一种热管辅助混合鳍片,用于电池热管理系统中的电池间冷却,在高达50 W的极端热条件下,对其热性能进行了全面研究,并提出了关键变量,采用有限差分法建立了数值模型,并与基于人工神经网络的性能预测模型集成。实验验证了所提出的系统表现出更好的热性能。Xiao Xiong等^[57]设计了一种仿生流道结构的换热器,并将其应用于圆柱形锂离子电池模块,通过实验采集热力学参数,得到了电池热模型,建立了计算流体力学模型,通过多因素优化分析,研究了不同仿生流道结构参数对热管理系统热性能的影响,此外,还比较了具有仿生蜂窝状结构和传统螺旋结构的换热器的热性能。结果表明对于相同的体积分数和几何参数,蜘蛛网状结构的换热器比蜂窝状和传统的螺旋结构具有更好的热和流动特性。Haiji Chen等^[58]模拟了在风管中带有圆柱形和板式电池的锂离子电池组。研究了各种分流器阻尼器设置对锂离子电池组温度、输出空气温度和传热系数的影响。根据研究结果,锂离子电池组最大和最低平均温度分别沿分流器阻尼器三角形的0.4m和0.2m测量。在分流器阻尼器的所有长度上,椭圆形分流器阻尼器的传热系数均高于分流器阻尼器的三角形。Dexin Li等^[59]比较分析了脉动流和稳流对多通道冷板传热和能耗的影响。结果表明与稳态流动相比,脉动流动对总放电过程中的传热、压力损失和效率指数有正负影响。Hesam Moayedi等^[60]通过三维数值模拟研究了12个标签位置、电池长宽比和速率对锂离子电池温度偏差和性能的影响,采用综合D因子作为无量纲参数,评估有效参数对温度、电位和电流均匀性分析的影响。结果表明,使用标称、计数器和L形片优化锂离子电池中的电池长宽比可以有效降低温差并提高电池的寿命和性能。Xiangbo Cui等^[61]提出一种基于热电冷却器的鲁棒预测电池热管理策略和一种基于热阻的热电冷却器建模方法,采用差分法建立分布式电池热模型,然后,将热电冷却器模型与分布式电池热模型相结合,建立了热管理模型,最后,

提出了一种非线性模型预测控制方法来优化冷却过程。实验和验证表明,所提方法在4个不同循环下能够精确控制电池在目标温度附近工作,误差小于 0.5°C 。Hyun-Rok Cha等^[62]提出了4种热模型,即核心模型、优化模型、扩展鳍模型和纹波模型。对平均细胞温度、电池最高温度、热梯度、流向和整个电池组的均匀温度分布进行了评估和比较。结果表明,在1C、1.5C和2C的每个循环中,用新型波浪形冷板设计代替传统结构可以提高电池温度均匀性,并且观察到最高电池温度为 $<50^{\circ}\text{C}$ 。在锂离子电池方面,Bonab等^[63]采用组合冷却方法对锂离子电池进行热管理,并采用控制体积技术进行了数值模拟,用于模拟流动沸腾区的模型为欧拉-欧拉多相模型。结果表明,所提出的组合冷却方法有助于更好地管理电池组的热。Lei Hu等^[64]采用多目标拓扑优化实现铝冷板的新设计,以有效冷却由20个棱柱形锂离子电池组成的电池热管理系统,速度场、温度场和压力场采用有限元方法计算。计算流体力学的数值结果表明,优化后的支流型微通道冷板具有降低压降、提高综合传热性能的优点。Kim等^[65]研究了锂离子电池的热管理系统,对集成了两种不同类型的冷板(I型和II型)的两个电池组进行了实验,还分析了电池模块内部的发热情况。发现在相同条件下,加热器产生的温度比锂离子电池高 10% ,实验和仿真结果表明,II型冷板比I型冷板具有更出色的冷却性能。Alqaed等^[66]使用有限元法研究了由六个棱柱形电池组成的T形锂离子电池组。通过改变进出口的位置,引入了电池热管理的最优模型。结果表明,电池的最高温度通过改变入口的位置而变化。Ozge Yetik等^[67]采用NTGK模型对电池模型进行热学和电学分析,并采用田口设计研究了电池热管理过程中4个控制因素的主要影响,即入口速度、混合比、环境温度和C速率。发现随着放电速率的增加,模型的温度增加,而模型的温度随着纳米颗粒混合比的增加而降低,随着制冷剂入口速度的增加,模型的温度减小,而环境温度越高,模型达到的最高温升越小。Zhiyang Liu等^[68]建立了热管理系统的耦合模型,提出了一种解耦控制器,测试了所提解耦控制器的有效性、精度和可靠性。表明采用该解耦控制器,可以在线精确控制质子交换膜燃料电池电堆冷却水的进出口温度。Shengxiang Fu等^[69]将一种

新的机器学习算法,即极端梯度提升算法应用于质子交换膜燃料电池电堆的热管理方案,以控制电堆的入口和出口温度。结果表明,与其他基于机器学习的热管理系统策略和基于模糊逻辑的热管理系统相比,基于Xgboost的热管理系统具有最佳的控制性能,降低了燃料电池内温度的最大偏差和质子交换膜含水量的变化范围。Qiao Yang等^[70]提出了一种基于燃料电池汽车样机的不同控制策略的集成热管理系统模型,通过建模对燃料电池汽车热管理系统进行多工况仿真分析,推导出各子系统和集成系统的运行机理和热性能分析。发现即使在电池充电模式下,每个子系统的临界温度也能控制在合理的范围内,燃料电池产生的热功率比放电模式下多出约 136.6% ,来辅助电池充电。一些学者在热管理策略改进方面开展了研究工作,习璐等^[71]通过构建分布式的燃料电池电堆和动力电池热管理路径,采用目标探测算法对燃料电池热管理系统进行精确化控制。验证了热管理系统集成化设计方法的可靠性和稳定性,提升了车载燃料电池热管理的高效性能。郑萌等^[72]提供了一种基于PHP技术的全新的燃料电池车热管理方案,并通过细致的多场耦合数值模拟研究评价了PHP热管理系统的性能。发现PHP方案下电堆的温差更小,均温性更好,温度分布更加合理,并且提供了均温性更好的冷却大表面。王鹏宇等^[73]设计了一种适用于增程式燃料电池汽车的热管理系统结构方案,提出并验证了一种基于复合动力源温度轨迹规划的燃料电池汽车低温热管理控制策略,对于促进提升燃料电池汽车热管理关键技术研究 and 产品化工程技术应用具有参考价值。王星等^[74]合理设计热管理系统,提高输出性能;提出冷却液流量跟随热量控制,线性自抗扰控制空气流量的联合控制策略,实现水泵流量和散热空气流量控制的解耦。结果表明该控制策略能较好地控制电堆温度及冷却液出入堆温差。Zhaoming Liu等^[75]提出了一种改进的车载燃料电池热管理模型预测控制策略。提出了一种 60 kW 燃料电池系统的三体积模型以描述燃料电池冷却系统的热动力学,并通过动态负载实验进行了验证,此外,还进行了燃料电池温度敏感性实验,以确定舒适温度参考。实验结果表明温度跟踪误差降低了 $22\%\sim 60\%$,而节能能力则提高了 50% 。Chengyuan Gong等^[76]提出一种基于流网法的多堆栈

SOFC系统均匀性热管理方法及其决策过程,为了解决系统分布不均的问题,提出了一种利用旁通阀的热管理策略。结果表明旁通阀的应用使系统达到温度一致性,整个固体氧化物燃料电池热电联产系统在设定温度下热效率可提高50%。

Donghai Hu等^[77]提出了一种仅换热器热管理系统,并基于全局优化进行热力学建模和可控量模拟,以评估所提出的系统结构中余热利用的有效性。研究表明,所建议的燃料电池汽车热管理系统在所有三种工作情况下都存在,而废热利用系统则由正温度系数和热交换器同时加热乘客舱。T. Amalesh等^[78]报道了两种新型微通道冷板(MCP)设计的数值和实验研究,进行了详细的3D CFD仿真,以了解冷却液入口速度、冷却液入口温度和通道数对MCP的冷却性能的影响,使用代理高功率电池模块进行实验,进行验证和分析,报告了详细的流动可视化和热水力研究。仿真和实验都表明,这些参数对冷却性能有很大影响。

在热管理系统设计优化方面的研究中,一些研究人员针对传统热管理系统进行改进设计,姚东升等^[79]提出通过控制燃料电池节温器开度和风扇转速使燃料电池系统进出口水温维持在目标值,同时结合PID算法、过温处理策略以及多风扇转速分配策略,实现了燃料电池系统热管理系统快速响应,并且使燃料电池能够在极端工况下以较大功率运行。Quangang Xia等^[80]对30 kW燃料电池发动机冷却系统进行了仿真和实验验证;对比了机械式石蜡温控器和具有一定控制逻辑的电子温控器对发动机系统烟囱出口温度的影响,还采用温控阀的PID控制和模糊PID控制,采用耦合电加热器的控制方法,解决烟囱出口水温混合时的温度波动。结果表明,模糊PID控制器可以明显降低水温混合过程中的温度波动,优化的耦合控制策略可以降低冷却系统的水温波动,从而优化冷却系统的温度管理,显著提升系统的功率和可靠性。Junhua Fan等^[81]提出了一种新型的温度控制策略,即液态金属作为一种新型冷却剂,可以在SOFC电堆的稳定运行阶段和启停阶段工作,还开发了考虑化学/电化学反应、质量、动量和传热过程的三维模型,以评估液态金属冷却的效果。仿真结果表明,液态金属具有优异的提高电池单元温度均

匀性和电性能的能力,此外,当选择液态金属作为冷却剂时,进气对电池单元的性能影响不大。Farulla等^[82]提出了锂离子电池被动和混合热管理系统设计的系统框架。在受控环境中,在实际操作条件下对钛酸锂氧化物电池进行了热测试,在COMSOL Multiphysics中实现了电池的热流体动力学模型,并且利用实验验证模型,采用正交阵列评估不同设计和操作参数的影响,通过交互作用图讨论所研究参数的相互影响。结果表明,与自然冷却的基线情况相比,独立相变材料和混合冷却系统的优化设计使电池最高温度分别降低了11和22℃。Zeinab Esmacili等^[83]为由16节商用ICR18650-26 J锂离子电池组成的电池模块建立了配备多种扭曲胶带配置的冷却系统,研究了双绞带特定设计因素的影响。发现带有不均匀扭曲胶带的冷却系统优于传统外壳。

还有一些研究人员开发出了全新的热管理系统,闫昱州等^[84]提出一种基于跨临CO₂技术的热泵空调热管理一体化系统,利用多种控制算法,应用AMESim系统建模仿真平台进行模型搭建。可保证在任意行驶条件下,乘员舱和电池模块快速达到理想温度并保持稳定,且具有更佳的能量利用效率。Jian Guo等^[85]提出了一种采用热峰调节器的新型热管理系统,这种新型热管理系统可以消除或有效削弱燃料电池堆的热失控。在38℃夏季天气下,135 s和250 s的热失控持续时间分别缩短至0 s和105 s,后者的最高温度可由89℃降低至83℃。Abhijeet Mitra等^[86]开发了一种新型锂离子电池热管理系统,并实验观察了其在不同放电倍率下对圆柱形18,650锂离子电池的冷却性能。实验采用间接式液体冷却进行,具有不同流量配置的单铝和双铝蛇形通道。发现采用逆流配置的双通道在使用不同工作流体时,温降为8.6~13℃,可提供最佳冷却性能,且电池模块的温度均匀性非常好,最大偏差为1.5~3℃。Alberto Broatch等^[87]开发了一种新的燃料电池电动客车全局模型,其中包括基本组件的热模型。研究发现,在燃料电池功率需求较高的条件下,建议利用余热对电池进行预热,从而节省4%的能源,此外还提出了一种混合解决方案,其中燃料电池的余热用于加热机舱和电池,从而节省了10%的能源。Aida Farsi等^[88]开发了一种将质子交换膜燃料电池的热电化学建

模与经验传热相关性相结合的方法,以揭示质子交换膜燃料电池结构层的温度分布,此外,还比较了流经双极板冷却通道的各种冷却介质在不同流动条件下的冷却效果和燃料电池温度分布的均匀性。研究发现,增加通过冷却通道的冷却液流速与较低的冷却液流速相比,会导致通过冷却液结构的温度均匀性降低。Nóbrega 等^[89]总结了基于物理的低成本质子交换膜燃料电池模型所采用的不同假设和建模方法,重点关注与水和热管理相关的方面。它还描述了辅助系统组件的建模方法、验证实践,并比较了不同模型的计算效率。Ziyun Zeng等^[90]建立了燃料电池电堆和电厂平衡的完整数学模型,研究了典型无人机配置下不同飞行高度下冷却水流量、冷却液旁通阀开度和电堆温度之间的非线性关系,此外,还提出了一种支持在高电流密度下工作的冷启动模型。发现结冰引起的有效反应面积减小是电压损失的主要原因。Liang Tong 等^[91]研究了金属氢化物储罐和质子交换膜燃料电池之间的热管理,开发并验证了系统的集总参数模型,对质子交换膜燃料电池-金属氢化物系统的性能进行了预测。表明利用质子交换膜燃料电池产生的余热对氢气床进行加热是可行的。Yanchen Lai等^[92]建立了单管直式氨裂解固体氧化物燃料电池的全电池模型,并以数据驱动的方法分析了电池内部热冲击的产生机理。发现了引入氨预重整反应和提高氨裂解反应的活化能,都可以提高电池的整体平均温度,改善温度分布。Mingguang Yang等^[93]进行实验以比较由50个单元组成的堆栈在不同操作条件下的相关热性能,然后建立电堆中单节电池的三维、非等温稳态数值模型,分析微热管阵列对电池内电化学参数的影响。实验结果表明,在接近极限温度时,使用微热管阵列的电堆负载水平比没有微热管阵列的电堆高40%,数值研究表明,微热管阵列降低电池温度使质子交换膜保持更好的水合作用和更高的电流密度。

综上所述,2023年在电池热管理装置及系统设计方面取得了显著的研究进展。随着技术的不断进步和应用需求的不断提高,电池热管理装置及系统设计方面将面临更多挑战和机遇。未来,需要进一步深入研究对于系统设计方面的改进,不断优化电池热管理系统的设计,以满足电动汽车和可再生能

源技术的快速发展需求。同时,还需要加强智能化和集成化方面的研究,提高电池热管理系统的智能化水平和集成能力,为未来智能交通和绿色能源的发展提供有力支持。

3.7.2. 优秀案例

2023年,国内在电池热管理领域也出现了一些优秀案例,这些案例展示了国内在电池热管理技术方面的创新能力和实际应用成果。

3.7.2.1 比亚迪海豹电池热管理技术

比亚迪作为国内知名的电动车制造商,其在电池热管理方面也取得了一些重要突破。比亚迪的电池热管理系统采用了先进的热设计和材料技术,能够有效地降低电池温度,提高电池的循环寿命和安全性。此外,比亚迪还积极探索新型热管理技术进行电池热管理,以进一步提高电池的性能和安全性。比如比亚迪海豹电池热管理技术,2023年NE时代对该车型的电池热管理技术进行了拆解分析,并对其中的关键技术进行了分析。

海豹的热管理系统最大的革新在于其采用了液态水直冷方式对电池进行冷却,这种方式与传统的电池冷却方式的方式有所不同。由于液态水的比热容更大,因此能够更迅速地吸收电池产生的热量,从而省略了从冷却剂到液态水的热量传递过程。这样的设计使得整个热管理回路更为简洁,不仅降低了材料成本,还简化了回路设计。

这一设计决策与电池包的结构紧密相连。考虑到海豹采用的是磷酸铁锂电池,相较于三元锂电池,其温度特性更为稳定。此外,电池包的冷板被放置在电池包的下部,这意味着外部环境对电池的影响较大。同时,电池包内部的横梁设计将电芯划分为两个区域,使得热量产生被分隔开,降低了电芯之间的相互干扰,进一步减少了热损耗。

此外,该热管理系统的另一个显著特点是高度的共用性。首先,在空调制热时,系统同时利用热泵和加热器。其次,为了实现对电驱动部件的冷却,系统在九通阀的底部安装了一个板式换热器,通过两根散热器软管为驱动系统提供冷却散热。这些散发的热量可以被回收利用,为乘员舱和电池提

供加热。目前，该系统的其他共用部分尚未完全发掘，后续可以进一步研究和优化。

3.7.2.2 蔚来汽车的换电技术

虽然换电技术本身并不直接涉及电池热管理，但蔚来汽车的换电技术为电池热管理提供了新的思路。通过快速更换电池，蔚来汽车的换电技术能够避免电池长时间工作而产生的高温问题，从而减轻电池热管理的负担。此外，蔚来汽车还在换电站中设置了电池预热和冷却设备，确保更换后的电池能够在最佳的温度范围内工作。

蔚来汽车的换电技术对电动车电池热管理主要有以下几个作用：

首先，蔚来汽车的换电技术允许用户在短时间内快速更换电池，这大大减少了电池在极端温度条件下的暴露时间。在炎热的夏季或寒冷的冬季，快速更换电池可以避免电池过热或过冷，从而保护电池的性能和寿命。

第二，实时监控电池状态：换电站通常配备有先进的电池检测设备，可以在更换电池的同时对电池的状态进行实时监控。这包括电池的温度、电压、内阻等关键参数。通过实时监控，可以及时发现电池热管理方面的问题，并采取相应措施进行调整，确保电池始终处于最佳工作状态。

第三，平衡电池温度：换电站还可以对电池进行预热或预冷，以平衡电池的温度。在冬季，电池可能因为低温而性能下降，此时换电站可以通过预热来提高电池温度，确保车辆能够正常启动和运行。在夏季，预冷则可以帮助降低电池温度，防止电池热失控。

第四，提高电池使用效率：通过快速更换电池，换电技术可以确保车辆始终使用性能最佳的电池。这不仅可以提高车辆的运行效率，还可以延长电池的使用寿命。因为电池在长时间使用后可能会出现性能衰减，而及时更换电池可以避免这种情况的发生。

综上所述，蔚来汽车的换电技术对电动车电池热管理具有重要的作用。通过快速更换电池、实时监控电池状态、平衡电池温度以及提高电池使用效

率等方式，换电技术可以有效保护电池的性能和寿命，提高电动车的整体性能和可靠性

3.7.2.3 吉利汽车曹操60超级热泵空调技术

热泵空调技术是一种新型的空调技术，能够有效地利用环境热量来调节车内温度。吉利汽车在其电动车型中采用了热泵空调技术，通过利用电池产生的废热来提供车内暖气，从而降低了对电池热管理的需求。这种技术不仅提高了能量利用效率，还有助于减少电动车在寒冷环境下的能耗和续航里程损失。

吉利曹操60超级热泵空调对电池热管理的作用主要表现在以下几个方面：

第一，通过该热泵空调的运行提升电池效率，即通过有效的热管理，使热泵空调能够确保电池在适宜的温度范围内工作，从而提高电池的工作效率。这对于电动车来说尤为重要，因为电池的工作效率直接影响到车辆的续航里程和性能。

第二，可以延长电池寿命：电池过热或过冷都会影响其寿命，而通过与热泵空调的协同运行，并通过精确控制电池温度，可以避免电池受到极端温度的影响，从而延长电池的使用寿命。

第三，节能环保：热泵空调在运行时相比传统空调更为节能，这有助于降低电动车的能耗，减少对环境的影响。

综上所述，吉利曹操60超级热泵空调对电池热管理的作用是多方面的，它不仅能够提升电池效率、延长电池寿命，还能提高驾驶体验并促进节能环保。这些优势使得热泵空调成为电动车领域中一种重要的技术革新。

参考文献

- [1] 张凌宇. 基于相变冷却的锂离子电池热管理性能研究[D]. 河北：石家庄铁道大学, 2023.
- [2] 杨寒雪, 张冠华, 赵长颖. 基于复合相变材料的里电池热管理系统研究进展[J]. 能源科技, 2023: 56-61.
- [3] Shiji Xin, Chun Wang, Huan Xi. Thermal management scheme and optimization of cylindrical lithium-ion battery pack based on air cooling and liquid cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2023: 120100.
- [4]. 贺春敏. 基于MXene/石蜡复合相变材料的锂离子电池热

- 管理系统研究[D]. 江苏: 南京邮电大学, 2023.
- [5] Y. Salami Ranjbaran, M.H. Shojaeefard, G.R. Molaieimanesh. Thermal performance enhancement of a passive battery thermal management system based on phase change material using cold air passageways for lithium batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023: 107744.
 - [6] Zhongmin Wan, Hanzhang Yan, Yun Sun. Thermal management improvement of air-cooled proton exchange membrane fuel cell by using metal foam flow field[J]. *Applied Energy*, 2023: 120642.
 - [7] Xingying Bai, Qifei Jian. Experimental study of a passive thermal management system using vapor chamber for proton exchange membrane fuel cell stack[J]. *Renewable Energy*, 2023: 119095.
 - [8] Lincheng Wang, Zhenhua Quan, Yaohua Zhao. Heat transfer process analysis and performance research of micro heat pipe array applied for the thermal management of proton exchange membrane fuel cells[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023: 119531.
 - [9] Hong Shi, Meinan Liu, Yonghao Li. Multi-objective optimization of integrated lithium-ion battery thermal management system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023: 119991.
 - [10] Ziqi Jiang, Yinchuang Yang, Huihe Qiu. A novel battery thermal management system utilizing ultrathin thermal ground planes for prismatic Lithium-ion batteries[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023: 120869.
 - [11] Haobing Zhou, Jigao Niu, Xiaofeng Guo. Thermal performance of a hybrid thermal management system based on the half helical coil coupled with air jet cooling for cylindrical Lithium-ion battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023: 120231.
 - [12] 蒋喆斌. 基于风液结合的锂电池热管理系统设计与优化[D]. 湖北: 江汉大学, 2023.
 - [13] Zhikuan Liu, Gongqing Xu, Yonggao Xia. Numerical study of thermal management of pouch lithium-ion battery based on composite liquid-cooled phase change materials with honeycomb structure[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023: 108001.
 - [14] Luyao Zhao, Wei Li, Guoyang Wang. A novel thermal management system for lithium-ion battery modules combining direct liquid-cooling with forced air-cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023: 120992.
 - [15] Yang Li, Minli Bai, Zhifu Zhou. Thermal management for the 18650 lithium-ion battery pack by immersion cooling with fluorinated liquid[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023: 109166.
 - [16] Santosh Chavan, Jie Liu, B. Venkateswarlu. Numerical simulation of lithium-ion battery thermal management systems: A comparison of fluid flow channels and cooling fluids[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023: 108940.
 - [17] N.P. Williams, D. Trimble, S.M. O'Shaughnessy. Liquid immersion thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles: An experimental study[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023: 108636.
 - [18] Qianqian Xin, Tianqi Yang, Hengyun Zhang. Experimental and numerical study of lithium-ion battery thermal management system using composite phase change material and liquid cooling[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023: 108003.
 - [19] Zhaoliang Chen, Chao Li, Minqiang Pan. A structural difference design for thermal management to improve the temperature uniformity of high energy density lithium-ion batteries[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023: 119829.
 - [20] 杜江龙, 夏光宇, 练成. 基于波浪形液冷通道的锂离子电池热管理系统模拟分析[J]. *能源研究与管理*, 2023: 78-94.
 - [21] 陈瑞可. 基于复合相变材料的锂电池热管理结构及其控温性能研究[D]. 江西: 南昌大学, 2023.
 - [22] Nong Xie, Ying Zhang, Xiaojie Liu. Thermal performance and structural optimization of a hybrid thermal management system based on MHPA/PCM/liquid cooling for lithium-ion battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023: 121341.
 - [23] Huizhu Yang, Zehui Wang, Mingxuan Li. A manifold channel liquid cooling system with low-cost and high temperature uniformity for lithium-ion battery pack thermal management[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023: 101857.
 - [24] Ping He, Hao Lu, Yiwei Fan. Numerical investigation on a lithium-ion battery thermal management system utilizing a double-layered I-shaped channel liquid cooling plate exchanger[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023: 108200.
 - [25] Amarnathvarma Angani, Hyeon-Woo Kim, Myeong-Hwan Hwang. A comparison between Zig-Zag plated hybrid parallel pipe and liquid cooling battery thermal management systems for Lithium-ion battery module[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023: 119599.
 - [26] 陈洋洋. 新型液冷板应用于锂离子电池热管理的散热性能分析与优化设计[D]. 上海: 华东交通大学, 2023.
 - [27] Zhiguo An, Chunjie Zhang, Yushi Luo. Cooling and preheating behavior of compact power Lithium-ion battery thermal management system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023: 120238.
 - [28] Zhenwei Liu, Boyuan Wang, Youwei Tan. Thermal management of lithium-ion battery pack under demanding

- conditions and long operating cycles using fin-enhanced PCMs/water hybrid cooling system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023: 121214.
- [29] 陆张浩. 混合动力汽车锂电池热管理系统的设计与分析[D]. 江苏: 南京林业大学, 2023.
- [30] 吴晓昱, 陈明毅, 李海航. 基于石墨烯相变材料的锂离子电池热管理技术研究[J]. *中国测试*, 2023: 1-8.
- [31] Chenqing Li, Yan Ding, Zhiyu Zhou. Parameter optimization and sensitivity analysis of a Lithium-ion battery thermal management system integrated with composite phase change material[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023: 120530.
- [32] 李强. 基于无机相变材料的锂电池热管理系统热性能及优化研究[D]. 天津: 天津城建大学, 2023.
- [33] 樊榕. 复水合盐复合相变材料的制备及其锂电池热管理应用研究[D]. 四川: 中国民用航空飞行学院, 2023.
- [34] Ping Ping, Xinyi Dai, Depeng Kong. Experimental study on nano-encapsulated inorganic phase change material for lithium-ion battery thermal management and thermal runaway suppression[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023: 142401.
- [35] 周健夺. MOF/RGO基复合相变材料性能及在锂电池热管理应用研究[D]. 江西: 江西理工大学, 2023.
- [36] 吴毛毛. 复合相变储能材料的制备及其在锂电池热管理系统的应用[D]. 陕西: 西安工业大学, 2023.
- [37] Chu Huang, Haixi Zhu, Yinjie Ma. Evaluation of lithium battery immersion thermal management using a novel pentaerythritol ester coolant[J]. *Energy*, 2023: 129250.
- [38] Zaichao Li, Yuang Zhang, Fantao Meng. Flexible phase change materials for low temperature thermal management in lithium-ion batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023: 109413.
- [39] Abdulmunem R. Abdulmunem, Hussein M. Hamed, Pakharuddin Mohd Samin. Thermal management of lithium-ion batteries using palm fatty acid distillate as a sustainable bio-phase change material[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023: 109187.
- [40] V. Muthya Goud, G. Satyanarayana, J. Ramesh. An experimental investigation and hybrid neural network modelling of thermal management of lithium-ion batteries using a non-paraffinic organic phase change material, Myristyl alcohol[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023: 108395.
- [41] Chengzhi Hu, Yanhui Jiang, Sizhou Chen. Copper foam reinforced polymer-based phase change material composites for more efficient thermal management of lithium-ion batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023: 108918.
- [42] Lei Hu, Yongkang An, Li Zhang. Shape-stabilized phase change material based on MOF-derived oriented carbon nanotubes for thermal management of lithium-ion battery[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023: 108520.
- [43] Hasan Najafi Khaboshan, Farzad Jaliliantabar, Abdul Adam Abdullah. Improving the cooling performance of cylindrical lithium-ion battery using three passive methods in a battery thermal management system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023: 120320.
- [44] Mehwish Mahek Khan, Mohammad Alkhedher, Mohamad Ramadan. Hybrid PCM-based thermal management for lithium-ion batteries: Trends and challenges[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023: 108775.
- [45] Guanyi Chen, Yong Shi, Hanyang Ye. Experimental study on phase change material based thermal management design with adjustable fins for lithium-ion battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023: 119808.
- [46] Zijian Zhou, Sheng Chen, Maji Luo. Effect of mechanical vibration on phase change material based thermal management system for a cylindrical lithium-ion battery at high ambient temperature and high discharge rate[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023: 124255.
- [47] Inderjot Kaur, Prashant Singh. Progress in minichannel-based thermal management of lithium-ion batteries[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023: 113711.
- [48] Aditya Bais, Dattatraya Subhedar, Satyam Panchal. Experimental investigation of longevity and temperature of a lithium-ion battery cell using phase change material based battery thermal management system[J]. *materialstoday: PROCEEDINGS*, 2023, In press.
- [49] 周鹏. 客车燃料电池热管理系统的冷却及加热特性研究[D]. 山东: 山东理工大学, 2023.
- [50] 姚安琪, 曹亚平, 刘单珂. 质子交换膜燃料电池水热管理特性研究[J]. *电源技术*, 2023:122-126.
- [51] 刘书琴, 王小燕, 张振东. 锂离子电池组液冷式热管理系统的设计及优化[J]. *储能科学与技术*, 2023: 2155-2165.
- [52] Seyed Masoud Parsa, Fatemeh Norozpour, Shahin Shoeibi. Lithium-ion battery thermal management via advanced cooling parameters: State-of-the-art review on application of machine learning with exergy, economic and environmental analysis[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2023: 104854.
- [53] Tao Hai, Awatef Abidi, S. Mohammad Sajadi. Simultaneous cooling of plate and cylindrical batteries in an air-cooled lithium battery thermal management system, by changing the distances of the batteries from each other and the pack wall[J]. *Journal of the Taiwan Institute of*

- Chemical Engineers, 2023: 104931.
- [54] Thai-Quyen Quach, Young Sang Kim, Dong Keun Lee. Thermal management of Ammonia-fed Solid oxide fuel cells using a novel alternate flow interconnector[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023: 117248.
- [55] Chengyuan Gong, Zhengkai Tu, Zhifei Sun. A novel flow field design with flow re-distribution for advanced thermal management in Solid oxide fuel cell[J]. *Applied Energy*, 2023: 120364.
- [56] Ukmin Han, Yong Joo Jun, Hongseok Choi. Thermal performance analysis and optimization of heat pipe-assisted hybrid fin structure for lithium battery thermal management for extreme thermal conditions[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023: 107128.
- [57] Xiao Xiong, Zhaohui Wang, Yiwei Fan. Numerical analysis of cylindrical lithium-ion battery thermal management system based on bionic flow channel structure[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023: 101879.
- [58] Haiji Chen, Awatef Abidi, S. Mohammad Sajadi. Effect of splitter damper on airflow conduction for thermal management of a lithium-ion battery cooling system with plate and cylindrical batteries[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2023: 104853.
- [59] Dexin Li, Wei Zuo, Qingqing Li. Effects of pulsating flow on the performance of multi-channel cold plate for thermal management of lithium-ion battery pack[J]. *Energy*, 2023: 127250.
- [60] Hesam Moayedi. Performance improvement and thermal management of a lithium-ion battery by optimizing tab locations and cell aspect ratio[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023: 124456.
- [61] Xiangbo Cui, Tete Hu. Robust predictive thermal management strategy for lithium-ion battery based on thermoelectric cooler[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023: 119833.
- [62] Hyun-Rok Cha, Amarnathvarma Angani, Myeong-Hwan Hwang. Thermal management of lithium-ion batteries by novel designs of wavy cold plates: Performance comparison[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023: 109303.
- [63] Saber Abdollahzadeh Bonab, Sajjad Ahangar Zonouzi, Habib Aminfar. Combination of flow boiling cooling by taking advantage of helical pipes and air cooling for thermal management of lithium-ion batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023: 108322.
- [64] Mao-Sung Wu. Multi-objective topology optimization of cold plates featuring branched and streamlined mini-channels for thermal management system of lithium-ion battery module[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023: 108362.
- [65] Byung Ryeon Kim, Thi Nhan Nguyen, Chan Woo Park. Cooling performance of thermal management system for lithium-ion batteries using two types of cold plate: Experiment and MATLAB/Simulink-Simscape simulation[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023: 106816.
- [66] Saeed Alqaed, Jawed Mustafa, Fahad Awjah Almeahmadi. Thermal management of a prismatic lithium battery pack with organic phase change material[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2023: 104886.
- [67] Ozge Yetik, Ugur Morali, Tahir Hikmet Karakoc. A numerical study of thermal management of lithium-ion battery with nanofluid[J]. *Energy*, 2023: 129295.
- [68] Zhiyang Liu, Jian Chen, Lalitesh Kumar. Model-based decoupling control for the thermal management system of proton exchange membrane fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023: 19196-19206.
- [69] Shengxiang Fu, Dongfang Zhang, Suk Won Cha. An extreme gradient boosting-based thermal management strategy for proton exchange membrane fuel cell stacks[J]. *Journal of Power Sources*, 2023: 232617.
- [70] Qiao Yang, Tao Zeng, Caizhi Zhang. Modeling and simulation of vehicle integrated thermal management system for a fuel cell hybrid vehicle[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023: 116745.
- [71] 习璐. 基于目标探测的车载燃料电池热管理系统集成化设计[J]. *环境技术*, 2023: 1-8.
- [72] 郑萌. 车用质子交换膜燃料电池热管理系统设计与分析[D]. 江苏: 南京林业大学, 2023.
- [73] 王鹏宇. 增程式燃料电池汽车低温热管理控制策略研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2023.
- [74] 王星, 孙俊, 张振东. 燃料电池热管理系统的动态仿真及控制[J]. *电池*, 2023: 600-604.
- [75] Zhaoming Liu, Guofeng Chang, Hao Yuan. Adaptive look-ahead model predictive control strategy of vehicular PEMFC thermal management[J]. *Energy*, 2023: 129176.
- [76] Chengyuan Gong, Xiaobing Luo, Zhengkai Tu. Thermal management of bypass valves for temperature difference elimination in a 5 kW multi-stack solid oxide fuel cell system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023: 120590.
- [77] Donghai Hu, Wenshuo Hou, Chenjie Xiang. Waste heat utilization performance verification of Heat Exchanger Only Thermal Management System for fuel cell vehicle[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023: 139479.
- [78] T. Amalesh, N. Lakshmi Narasimhan, G. Ruchitha Reddy. Numerical and experimental studies on novel minichannel cold plates for lithium-ion battery thermal management[J].

- Journal of Energy Storage, 2023: 109167.
- [79] 姚东升, 周耀丹, 张志芸. 大功率质子交换膜燃料电池系统热管理控制策略研究[J]. 汽车文摘, 2023: 36-49.
- [80] Quangang Xia, Tong Zhang, Zhifei Sun. Design and optimization of thermal strategy to improve the thermal management of proton exchange membrane fuel cells[J]. Applied Thermal Engineering, 2023: 119880.
- [81] Junhua Fan, Yuqing Wang, Ran Tian. Thermal management of solid oxide fuel cells with liquid metal[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023: 10659-10670.
- [82] Girolama Airò Farulla, Valeria Palomba, Giovanni Brunaccini. Optimal design of lithium ion battery thermal management systems based on phase change material at high current and high environmental temperature[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023: 101862.
- [83] Zeinab Esmailim, Morteza Khoshvaght-Aliabadi. Thermal management and temperature uniformity enhancement of cylindrical lithium-ion battery pack based on liquid cooling equipped with twisted tapes[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2023: 104671.
- [84] 闫昱州, 张仕珩, 宋昱龙. 基于跨临CO₂热泵的氢燃料电池汽车整车热管理系统[J]. 制冷学报, 2023: 88-95.
- [85] Jian Guo, Zhibin Li, Lin Wei. A novel thermal management system with a heat-peak regulator for fuel cell vehicles[J]. Journal of Cleaner Production, 2023: 137712.
- [86] Abhijeet Mitra, Rajan Kumar, Dwesh K. Singh. Thermal management of lithium-ion batteries using carbon-based nanofluid flowing through different flow channel configurations[J]. Journal of Power Sources, 2023: 232351.
- [87] Alberto Broatch, Pablo Olmeda, Xandra Margot. Different strategies in an integrated thermal management system of a fuel cell electric bus under real driving cycles in winter[J]. Energy Conversion and Management, 2023: 117137.
- [88] Aida Farsi, Marc A Rosen. Thermal management of polymer electrolyte membrane fuel cells: comparative assessment of cooling systems[J]. e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 2023: 100174.
- [89] Pedro Henrique Affonso Nóbrega. A review of physics-based low-temperature proton-exchange membrane fuel cell models for system-level water and thermal management studies[J]. Journal of Power Sources, 2023: 232585.
- [90] Ziyun Zeng, Cheng Bao, Chuanxiang Li. A modeling study on water and thermal management and cold startup of unmanned aerial vehicle fuel cell system[J]. eTransportation, 2023: 100222.
- [91] Liang Tong, Chengqing Yuan, Tianqi Yang. Thermal management of metal hydride hydrogen storage tank coupled with proton exchange membrane fuel cells[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023: 102812.
- [92] Yanchen Lai, Zhe Wang, Daan Cui. Thermal impact performance study for the thermal management of ammonia-fueled single tubular solid oxide fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023: 2351-2367.
- [93] Mingguang Yang, Zhenhua Quan, Yaohua Zhao. Experimental and numerical study on thermal management of air-cooled proton exchange membrane fuel cell stack with micro heat pipe arrays[J]. Energy Conversion and Management, 2023: 116478.

第四章

企业家之声

4.1 谷轮创新技术赋能绿色低碳发展

殷光文

（谷轮中国区副总裁）

碳达峰碳中和重大宣示三年来，“双碳”1+N政策体系已成为引领中国各行各业高质量发展的“绿色引擎”。在2023年首个全国生态日之际，习近平总书记作出重要指示强调：“以‘双碳’工作为引领，推动能耗双控逐步转向碳排放双控，持续推进生产方式和生活方式绿色低碳转型”。谷轮作为可持续环境优化解决方案全球供应商，紧随全球可持续发展趋势、响应政府在减碳方面的倡议，不断追求用前沿创新技术赋能绿色未来。

4.1.1 环境可持续发展早已刻入谷轮的成长基因

暖通空调制冷市场是推进双碳工作的重要领域，作为全球暖通空调制冷行业的重要参与者和先行者，环境可持续发展早已深深刻入谷轮的成长基因。采用谷轮产品的各类设备系统，通过高效稳定

地运行，广泛应用于多种商住楼宇的温度控制、冷链运输、食品烘干等行业，实现每年数百万吨二氧化碳减排；我们全新推出的超高温热泵整体解决方案也为热泵系统进入工业应用领域揭开了全新序幕，给多类用户提供节能减排的双重价值。未来，我们的产品和解决方案将持续在以下方面发挥作用，支持暖通空调制冷和工业应用领域的能源转型、加快采用环境友好型低GWP制冷剂、通过高效和可持续的冷链来帮助保护世界上最重要的货物。

作为新的独立公司，谷轮依然身处积极变革的前沿，致力于推动下一代的可持续暖通空调制冷解决方案发展。在追求卓越、创新、合作、尊重、责任五项价值观的引导下，谷轮将持续以创新创造的探索精神，帮助客户应对不断变化的市场环境，达成低碳高效的可持续发展目标，进而助力中国“双碳”目标，赋能绿色未来。

4.1.2 谷轮超高温热泵解决方案助力工业端绿色低碳改造

推进工业能效提升，是产业提质升级、实现高质量发展的内在要求，是降低工业领域碳排放、实现碳达峰碳中和目标的重要途径，是培育形成绿色低碳发展新动能、促进工业经济增长的有效举措。2022年，《工业能效提升行动计划》提出，在多个工业领域的加热、烘干、蒸汽供应等环节，推广高温热泵等替代工艺技术装备，扩大电气化终端用能设备使用比例。

深耕热泵制热领域逾20年，谷轮坚持深入产品研发和技术创新，为工业用户提供更加绿色高效的热泵系统解决方案，推动行业低碳电气化发展。目前，谷轮拥有完备的热泵技术，满足工业端低温（常温）-中温-高温-超高温全温度段的供能需求、适应建筑用暖、生活热水和高温蒸汽等多元化的应用场景。

针对80℃~130℃的超高温制热需求，谷轮创新性地推出包括压缩机、变频器、膨胀阀、主控和传感器等在内的整套热泵解决方案。这些核心零部件默契配合，可确保系统拥有卓越性能和高可靠性，为客户降低生产运行成本、系统开发时间和投入成本。通过转化、回收、再利用，该方案能在工业应用领域实现高效用能，还可通过集中+分布式综合热源配置的方式，就近供给、按需开停、独立运行、精准控温，提升工业电气化、智能化水平，是工业端提升能源使用效率的理想之选。

在高温热泵应用中，谷轮超高温热泵解决方案对温度段进行了进一步的细分，力求以最合适的产品对应各种不同温度需求，从产品设计选型的源头就推进节能减排的理念。针对90℃的高温场景，谷轮拥有ZWV112超高温热泵变频压缩机。该压缩机最高冷凝温度可达95℃，支持最高90℃出水温度^{【*】}，可广泛用于电镀工艺、石油开采、纺织印染、生物发酵、肉类加工、杀菌消毒等领域；此外，ZWV112压缩机对各项零件进行强化设计，并针对高温工业热泵的使用特点进行了优化，可保证热泵机组常年稳定运行。ZWV112超高温热泵压缩机采用的是第三代压缩技术，效率高、可靠性强，可提升热

泵效率，减少能源消耗。

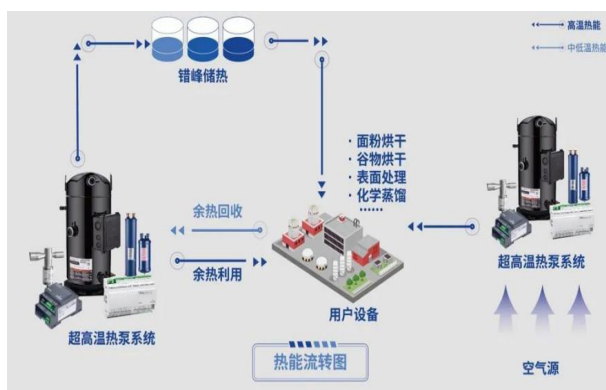


图4.1-1 谷轮超高温热泵解决方案



图4.1-2 谷轮ZWV112超高温热泵压缩机

针对100℃以上的工业制热应用场景，谷轮融合自身行业先进的关键创新技术，经过大量的实验室测试，创新性地推出了谷轮ZW650压缩机。该压缩机最高冷凝温度提升至135℃^{【*】}，大幅拓展了压缩机的运行范围。同时，压缩机配备的喷气增焓技

术，一方面能够将系统制热能力提升25%，制热能效提升10%^{【*】}，另一方面，还通过经济器换热提高热泵系统能效，是非常高效、可靠、环保的热泵解决方案。

谷轮开发的ZWV112超高温热泵压缩机和ZW650超高温热泵压缩机在超高温领域实现温度互补，共同组成了谷轮覆盖80℃~130℃应用的整体解决方案。目前，谷轮超高温热泵解决方案已在市场大规模应用，并由谷轮的系统集成团队提供专业服务和支持，助力客户迈向绿色未来。

谷轮率先将超高温热泵解决方案应用于苏州压缩机工厂生产线余热回收改造的项目中，应对传统工业生产中普遍存在的能耗偏高、大量余热浪费等现象。苏州压缩机工厂以构建低碳可持续的新型绿色工厂为目标，借助谷轮超高温热泵整体解决方案对生产线进行了余热回收、高效生产和智能控制三方面的升级。

经过谷轮工厂实际运行测算，谷轮超高温热泵解决方案不但大幅降低了生产线的能耗与综合碳排，还实现了生产线余热的综合利用：1）与改造前相比，节能40%以上；2）每年节省运行费用约30万元；3）投资回收期小于3年；4）每年减少二氧化碳排放约268吨。

2023年，一家新成立的山东现代化、数智化医药生产基地也使用了谷轮™ZW系列热泵专用涡旋压缩机，帮助其打造高水平、国际化的数智医药灯塔级工厂和医药创新研发高地。项目中，搭载谷轮™ZW系列热泵专用涡旋压缩机的机组，根据客户从建筑采暖、工艺热水，以及低压蒸汽的各类供热需求，高效稳定地提供从50℃到120℃各种热泵解决方案，尤其是采用ZW650超高温热泵专用压缩机的热泵机组，结合水蒸气压缩机成功帮助药厂实现了2吨/时150℃饱和蒸汽的稳定供应。目前，该项目正在稳定运行，谷轮™ZW系列热泵专用涡旋压缩机也凭借稳定高效的产品质量、高温领域的领先技术和优质服务给客户留下了深刻印象。

4.1.3 低GWP制冷剂创新，助力冷媒迎接新时代

制冷剂的使用与环境保护息息相关。在现实需

求和技术挑战的驱动下，全球制冷行业正不断进行下一代绿色替代工质的评估、论证和解决方案开发工作，并逐渐找到更为优越的选择。其中，自然工质里的佼佼者——CO₂，就凭借零ODP（消耗臭氧层潜值）、超低GWP（全球变暖潜值）（GWP=1）以及更多优势走入业界的视野，成为新一代替代技术的主流方向之一。

为响应国际组织和各国政府的顶层设计，同时也为了回应消费者对更加绿色环保产品的殷切期待，谷轮作为低GWP制冷剂技术的积极响应者和倡导者，始终都在积极完善、推动采用低GWP制冷剂的技术。面对目前全球各国及各行业都在采用多种方法进行制冷剂切换的现状，谷轮也在多方面进行产品和技术创新来响应这一趋势。

跨临界CO₂制冷解决方案是谷轮面向未来的一套创新型绿色制冷方案，专为使用低GWP自然制冷工质CO₂而设计。该解决方案采用的Stream系列CO₂半封闭活塞压缩机，对制冷剂流量和换热都进行了优化设计，并配有CoreSense™诊断技术模块，可以更快地诊断系统相关问题，甚至可在问题出现前及时发现。该系列压缩机是中温跨临界应用，以及低温亚临界侧应用中高静置压力（吸气压力90bar）系统的理想之选。谷轮跨临界CO₂制冷解决方案安静可靠运行；集成的变频器可根据实际冷量需求，精确控制压缩机的速度；EC风扇可以安静高效的方式带走气体冷却器中的热量；先进的电子控制器允许精确调控所有相关参数，并包括许多电子保护功能。在国际范围内，该解决方案已在超市、农场、食品加工、冷库等领域积累了一批成功应用案例。



图4.1-3 谷轮跨临界CO₂制冷机组

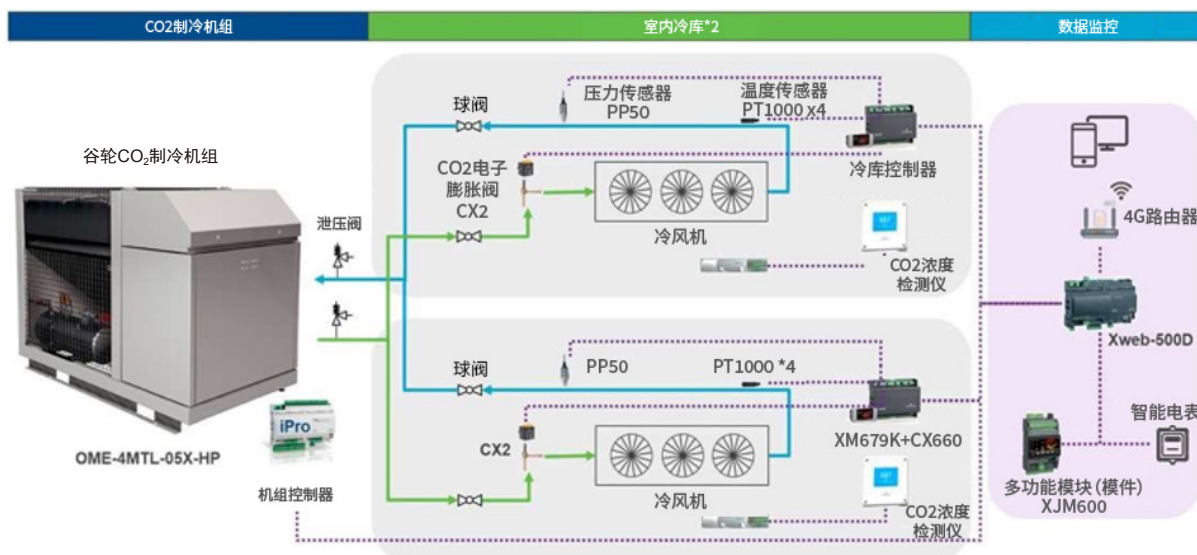


图4.1-4 运行系统图

2022年2月，谷轮与某全球知名家居零售商成功合作，配合其餐厅冷链系统冷媒绿色环保提升计划，为其在中国某地门店的西餐及配菜冷库，完成了跨临界CO₂系统的安装和调试。在该项目中，由一台5HP跨临界CO₂制冷机组为两个中温冷库提供冷量，两个冷库并联且独立控制。谷轮还为该店面安装了数据采集系统，可实现在线查看和获取数据，包括室外机组侧的运行参数、冷库侧的控制效果以及独立耗电量。

根据现场测试和数据监测，该系统：

- 可有效把库温控制在2~4℃以内，可满足冷库的冷藏需求，且运行稳定；

- 即使项目期间最高环境温度已经达到了36℃，压缩机吸气、排气压力及闪发罐压力均未超过最大压力限制，泄压阀无动作，说明该系统压力在安全控制范围内。

项目成功呈现和验证了跨临界CO₂制冷系统在餐厅冷库的可靠应用。所搜集的跨临界CO₂制冷相关实际运行数据，为分析适合中国及亚洲地区的跨临界CO₂制冷机组技术，以及谷轮在中国推广跨临界CO₂制冷提供了有益借鉴。

4.1.4 谷轮数据中心解决方案赋能打造绿色数字中心

根据国际能源机构（IEA）的数据，数据中心是

全球最大的能源消费者之一。据《财联社》报道，2025年我国的数据中心耗电量预计将增长至近4000亿kWh，数据中心耗电量占全国用电量比重预计将从2018年的1.6%增长至2025年的5.8%。如果能提升数据中心的能源利用效率，将是减少环境碳足迹和能源成本的有效方式。



图4.1-5 谷轮数据中心解决方案

2023年12月29日，国家发展改革委等部门发布的《关于深入实施“东数西算”工程 加快构建全国一体化算力网的实施意见》提出，推进数据中心用能设备节能降碳改造；加强全链条节能管理，严格节能审查、节能监察，提升数据中心能源利用效率和可再生能源利用率。同时，《信息通信行业绿色低碳发展行动计划（2022—2025年）》也提出，到

2025年，全国新建大型、超大型数据中心电能利用效率（PUE）降到1.3以下。

据《中国环境报》数据，在数据中心的能耗中，机房空调是仅次于IT设备能耗的第二大能耗源，约占40%。所以，空调设备的节能降耗是构建低PUE数据中心的重要发力领域。为此，谷轮创新性地推出了“谷轮数据中心解决方案”，该系列解决方案已在主流电信企业及多个互联网头部企业的数据中心项目中成功应用。

精密空调制造商一方面要降低数据中心PUE，提升运行效率，满足持续升级的机房空调能效要求，另一方面需要保障数据安全，为IT设备的正常运行提供所需温度。在某电信龙头企业的武汉数据中心项目中，谷轮数据中心解决方案应用于该项目的房间级和列间级机房空调系统，共计220套。每个空调系统搭载2台谷轮涡旋变频压缩机及2个变频

器。其中，变频器由谷轮自主开发，能更好地与变频压缩机匹配，可靠性更好，更高效。目前，整套谷轮涡旋压缩机解决方案在终端用户经过长期运行，其节能、稳定和可靠性方面的表现获得客户积极反馈。

作为深耕中国市场多年的可持续环境优化解决方案全球供应商，谷轮深刻洞察中国市场供能变化与客户需求，始终秉承“在中国，为中国”的理念，坚定助力“双碳”目标。未来，谷轮将持续依托近百年技术底蕴和国际化资源，不断深化与同行业者的通力合作，用创新的可持续解决方案帮助行业提高效率、减少排放、节约资源，推动中国制造业绿色转型升级，用创新技术赋能中国的绿色未来，以实际行动助力净零排放美好未来，为改善人类生活环境做出积极贡献。

【*】上述数据来源于谷轮内部实验室测试结果。

4.2 丹佛斯ESG“零碳”行动，实践“绿色脱碳”技术

施俊

（丹佛斯气候方案事业部中国区负责人）

在“双碳”政策的持续推进下，中国制冷技术的创新发展，为这一政策的目标落地贡献着积极的力量。作为全球领先的能效解决方案供应商，以及深入参与推动中国暖通空调与制冷技术创新发展的—员，丹佛斯致力于通过创新性绿色技术帮助客户实现脱碳发展。2022年，丹佛斯发布了全新的ESG战略，着力推动公司在脱碳、循环性以及多样、平等和包容三大领域实现重大变革。

按照规划，丹佛斯将在2030年前在全球所有业务区域实现碳中和。在集团碳中和战略的指导下，丹佛斯全球生产基地和办公室都在积极采取行动，持续降低能耗，并着力将公司在全球各地运营机构的能源需求转向可再生能源，兑现“零碳”发展承诺。

4.2.1 脱碳之路，从“绿色工厂”出发

自上世纪90年代进入中国以来，丹佛斯始终秉持“在中国，为中国”方针，持续强化在华投资，先后建设了丹佛斯（天津）有限公司、丹佛斯（鞍山）控制阀有限公司、浙江海利普电子科技有限公司及丹佛斯动力系统（浙江）有限公司等多家工厂，分别生产包括压缩机、阀件、换热器以及变频器等在内的多款空调与制冷产品。

2022年，中华人民共和国工业和信息化部发布年度绿色制造名单，丹佛斯（天津）有限公司和丹佛斯动力系统（浙江）有限公司凭借领先的绿色生产和运营实践被命名为“绿色工厂”；2023年，丹佛斯旗下丹佛斯（鞍山）控制阀有限公司和浙江海利普电子科技有限公司入选“绿色工厂”榜单。至此，丹佛斯已有四家工厂被工信部评为国家级“绿色工厂”。

绿色工厂是制造业的生产单元，是绿色制造的实施主体，属于绿色制造体系的核心支撑单元，侧重于生产过程的绿色化，实现企业运行全流程的绿色发展。申报成为国家级绿色工厂应具备以下能力：

（1）环境保护能力：具备较高的环境保护意识和环境管理能力，能够主动采取各种必要措施，减少对环境的污染和损害。

（2）资源利用效率：注重资源的节约利用和循环经济，提高资源利用效率和降低能源消耗

（3）技术创新能力：具备较强的技术创新能力，能够在生产过程中采用先进的技术和工艺，提高产品质量和市场竞争能力。

（4）社会责任感：具有较高的社会责任感，能够积极履行企业社会责任为社会和谐稳定作出贡献。

（5）经济效益：具有较好的经济效益和盈利能力，能够在市场竞争中取得优势地位，为企业的可持续发展打下良好基础。

绿色工厂评比活动由工信部为落实《“十四五”工业绿色发展规划》，全面推行绿色制造，助力工业领域实现碳达峰、碳中和目标而发起，所有提名和入选均经省级工业和信息化主管部门推荐及专家评审。



图4.2-1 绿色工厂标牌



图4.2-2 丹佛斯中国区工厂碳中和案例

丹佛斯中国工厂在绿色发展领域的实践已经在国内外广受认可。2022年举办的第七届国际能源署能效年度会议上，丹佛斯中国区工厂碳中和案例引发了广泛关注，向与会者全面展示了工业是如何通过能效措施大幅节能减排，实现脱碳发展，为业界打造了可借鉴的碳中和实践样本。

4.2.2 多重绿色方案，实现“零碳就绪”

2023年IEA的报告《能源部门实现2050净零排放路线图》首次提出“零碳就绪（Zero-carbon-ready）”概念，意为高效能建筑，要么直接使用可再生能源，要么依赖于可以完全脱碳的能源供应，如绿色电力或区域能源综合利用。那么，作为在暖通和制冷领域杰出的能效方案提供商，丹佛斯的绿色工厂采用了哪些自有技术和节能方案达成“零碳就绪”呢？总结下来有如下几项：

- 丹佛斯Turbocor®磁悬浮无油技术
- 丹佛斯VLT变频节能解决方案
- 丹佛斯供热系统水力平衡技术及大数据智能供能方案
 - 丹佛斯热泵供热方案
 - 丹佛斯余热回收解决方案
 - BMS智能化监控及能源管理系统。

以上提及的磁悬浮集中制冷、智能供热、热泵，热回收技术以及综合能源利用等多方面的技术优势，丹佛斯四家“绿色工厂”的能效实现了有效提升。相关数据统计，自从2016年到2022年，工厂营业额增长51%，总能耗下降3%，能效提升56%，能源强度降低36%，碳排放强度降低29%，每年实现减排18,000吨。

(1) Turbocor®磁悬浮无油技术

绿色工厂的中央空调系统采用丹佛斯Turbocor®磁悬浮无油机组，由28台磁悬浮压缩机共计14台机组服务，通过阀件，换热机组、传感器和变频器等整体解决方案，实现制冷能效提升达55%，每年实现减排6,300吨。



园区	磁悬浮压缩机型号	数量	机组数量
武清园区	TTS400/350	7	3
鞍山园区	TTS350	1	1
海盐园区	TT350	2	1
海盐园区	TTH	2	1
镇江园区	TT700	2	1
武清新制冷剂实验室	TTS 400/700	14	7
	总数	28	14

图4.2-3 供热系统水力平衡技术及大数据智能供能方案

丹佛斯始终致力于研发新产品及最佳供热系统解决方案，从热源侧、一次侧管网、换热站、二次管网到用户侧端到端的软硬件的优化服务。而丹佛斯的园区的暖通系统中水路控制采用了丹佛斯供热系统水力平衡技术及大数据智能供能方案。

以武清工厂为例，暖通系统采用丹佛斯混水机组，把办公区，车间，仓库分成18个区，按照各个区域的供热需求，实现分区差异化控制，根据生产班次，实现分时控制，形成按需供热的拉动式系统，供热效率显著提高，节能39%，每年实现减排500吨。

2022年以来，通过开发智盈供热管理平台加上Leanheat智能软件，丹佛斯真正实现了AI人工智能管理。智盈供热管理平台功能强大，可以进行云端数

据收集、分析和建模，主要设备健康状态诊断等。结合Leanheat软件，根据室内温度和室外气象参数，通过机器学习功能，系统可自动下发二次供水温度，舒适节能显著，这也为丹佛斯工业园区的节能做出了重要贡献。



图4.2-4 余热回收技术

丹佛斯通过余热回收技术，将制造车间的新风和排风的预热系统进行余热回收，再根据季节需求进行处理并进行应用，另外包括对生活热水余热、烟气余热等多维度的热量回收，进一步提升能源的利用效率，进而降低碳排放。同时，结合BMS控制系统，丹佛斯在武清园区、海盐工厂等均实现了全面覆盖，通过对能源应用进行监控，利用智能化管理的手段，将空调冷冻系统、工艺冷冻系统、氮气系统、压缩空气系统以及热水系统等，进行智能化监测和控制管理，通过时间表的设置，对能源利用结合实际需求进行合理分配，最终确保在点滴细节之中都能够做到能源的节约。能源效率显著提升，每年实现节能65万余元。



图4.2-5 MES（生产制造执行系统）系统

此外，丹佛斯武清园区还通过MES（生产制造

执行系统）系统，在线监控设备能耗数据并进行实时统计，实现了对整个厂区能源运行情况的动态监测和精细化控制和按需供应，以用最低能耗保证公司的生产和运营，节能39万，每年实现减排285吨。

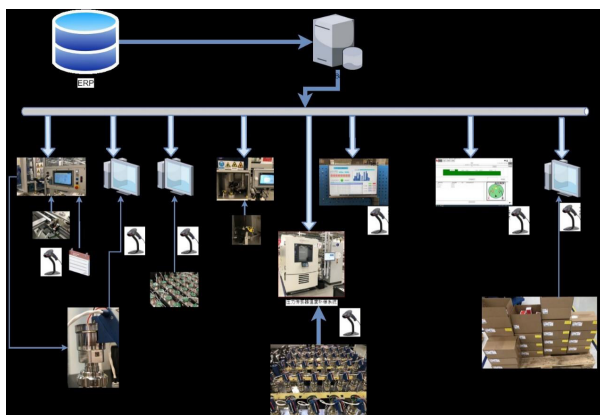


图4.2-6 全绿电供应

在探索绿色低碳发展的道路上，丹佛斯在武清园区自建光伏电站，为园区提供绿电能源。2024年1月1日，丹佛斯天津武清的园区正式开始全绿电供应，包括生产和办公用电，进一步达成了“零碳就绪”的状态。



图4.2-7 丹佛斯武清园区自建光伏电站

丹佛斯四家国家级“绿色工厂”的成绩说明，作为全球领先的能效解决方案供应商和绿色发展践行者，丹佛斯致力于通过创新性绿色解决方案帮助客户实现脱碳，并成为客户的首选ESG合作伙伴的同时，积极推进自身的绿色转型，向“碳中和”目标迈进。

4.3 威乐重塑可持续发展战略，“创新、关爱、连接” 绿色未来

Oliver Hermes

（威乐集团总裁兼首席执行官）

2023年又是充满挑战与动荡的一年，关注长期可持续发展目标、始终如一的行动变得愈发重要。威乐集团在2023年所取得的成功与成绩，要归功于所有9,000名员工，每天都在通过自己的辛勤工作为可持续发展贡献着源源不断的力量。

威乐也在不断审视自己、开拓创新。我们坚信：为了战胜这个时代所面临的重大危机、实现企业可持续的健康发展，我们需要有不断用新视角看待世界的勇气。即日起，威乐将可持续发展战略置于集团战略之首，所有其他职能性战略无一例外都退居其后。

这一战略使得威乐再次走在可持续发展的前沿。例如，威乐集团的长期融资战略体现了我们对可持续发展的明确承诺与践行，也证实了威乐在日常业务中进行战略调整的行之有效。2023年12月，威乐集团达成了一项全面的一揽子融资计划，其中包括总额为2.7亿欧元的期票贷款，该计划包含了诸多环境、社会和公司治理内容。

国内与国际投资者的高度关注也归功于威乐集团出色的EcoVadis排名：2023年，威乐集团再次被欧洲最重要的可持续发展评级机构授予白金评级。在EcoVadis每年评估的超过十万家全球企业中，只有不到百分之一的企业可以获此殊荣。

对于威乐集团，在将可持续发展战略置于首要地位这一意义深远的决策同时，还伴随着第二个重大转变。2023岁末，威乐集团重新制定了其可持续发展战略。现在这一战略比以往任何时候都更加关注我们行动所带来的长期影响。

威乐集团全新的可持续发展战略始终与“创新（Creating）”“关爱（Caring）”和“连接（Connecting）”这三大影响领域保持一致，威乐集团

也相应为这三大领域确定了到2030年的长期目标。

4.3.1 创新（Creating）：锐意创新，改变世界

“创新（Creating）”这一影响领域包括威乐出品的产品、系统和解决方案对去碳化和改善供水等方面的可持续贡献。对威乐来说这并非全新责任：150多年来，威乐始终以创新引领变革。

例如，Wilo-Stratos MAXO系列智能高效泵便是威乐作为可持续创新引领者的例证。这一产品代表着高度集成化与智能互联，可以通过各种通讯协议有效集成到楼宇控制系统中。威乐出品的系列智能泵推动了行业的数字化转型，为更可持续发展的未来指明方向。最智能的解决方案才最可持续 – 对此威乐深信不疑。



图4.3-1 Wilo-Stratos MAXO系列智能高效泵

除水泵的智能化外，Wilo-Stratos MAXO 的高效性也尤为突出，这也使其成为了一种可持续、面向未来的解决方案。它通过创新的节能功能和调控模式最大限度地提高了系统效率，是对能源短缺这一全球大趋势的明确回应。在全球范围内，仅在暖通空调领域采用高效泵每年就可实现246太瓦时的能源节约。出席迪拜第二十八届联合国气候变化大

会（COP28）的各国领导人也认识到了这一巨大潜力。

2023年12月签署的COP28最终宣言不仅呼吁到2030年将全球可再生能源容量增加两倍，还要求将能源效率提高一倍。虽然尚不明朗为何至今只有极少数签署该宣言的国家真正采取了激励措施来应对能源需求，但此宣言的签署是一个重要的信号：节约能源是当务之急！

威乐集团对可持续发展的承诺不仅体现在我们出品的高效产品和节能技术上。威乐出品的水泵和水泵系统被广泛应用于世界各地的重要基础设施中，这也使“创新（Creating）”成为了威乐战略中的三大核心之一。只有协助确保关键基础设施的安全运行，更重要的是协助关键基础设施的运营改善，我们才能真正可持续地提高人们的生活质量。

以城市为例，由于城镇化发展的大趋势，城市人口正在不断增加。众多城市日益向智能城市区域发展，逐步形成可持续发展的数字化城市群。2023年，威乐集团在新加坡举行的全球管理大会和威乐行业大会上深入讨论了这些网络化城市群的优势和挑战，以及威乐产品、系统和解决方案如何为宜居城市空间做出贡献。

无论是城市还是农村：全世界的人们都依赖水资源而生存。威乐的水泵和水泵系统能够可靠、高效地输送这一宝贵的生命资源。威乐集团能够大规模交付富有远见的大型项目，例如埃及的Toshka项目实现了约100万公顷的沙漠变为良田，显著改善了

该国水和粮食的安全状况。威乐为此项目提供了约400台大型中开泵。

在位于摩洛哥的Sebou项目（连接Sebou大坝和Sidi-Mohamed-Ben-Abdellah大坝）中，迄今已使用了12台威乐大型立式涡轮深井泵。它们将水源源不断地输送到70公里以外的地方，从而保证了拉巴特和马拉喀什等大都市以及周边地区的供水。显然，不仅在供水领域，在污水处理和水处理方面也都需要采取这种大胆创新的举措，以克服与水资源短缺这一全球大趋势相关的挑战。

人们现已越来越清晰地认识到，对清洁水供应的依赖程度远远超出了我们的想象。去年是有气象记录以来温度最高的一年，因此可怕的旱灾及火灾在全球新闻报道中屡见不鲜。例如在东非，3600多万人口正在遭受持续多年干旱带来的严重饥荒。水也意味着粮食，因为水资源对于农业的正常运转同样至关重要。

不止于此：水还意味着健康！在没有充足的水、环境卫生和个人卫生（WASH）供应的地区，常多发疾病。第二十八届联合国气候变化大会（COP28）也在这方面发出了重要信号，通过首次将这一主题正式列入议程，与会者强调了健康对世界可持续发展的重要性。

威乐的产品、系统和解决方案对人们的健康有着直接的影响 - 因为它们不仅为人们提供清洁的水，还是公共医疗保健不可或缺的一部分。Wilo-SiFresh就是一个很好的例子，这种紧凑型冷水循环系统尤

其受到医院和养老院的青睐，因为在这些机构中，饮用水卫生的缺失会造成极其严重的后果。Wilo-SiFresh 通过在循环过程中持续监测介质温度、防止滞流和仅在必要时自动换水，将饮用水卫生和可持续性有机结合在了一起。



图4.3-2 埃及的Toshka项目



图4.3-3 Wilo-SiFresh紧凑型冷水循环系统

4.3.2 关爱 (Caring): 承担责任，尽心竭力

威乐集团可持续发展战略中的第二大影响领域“关爱 (Caring)”描述了威乐对环境、员工和社会负责任的行为，包括减少生产过程中的排放和创造健康的工作环境等目标。正直、公平、尊重、热情和责任是威乐一直信奉并践行的价值观。

2023年，威乐积极履行了在这一影响领域的郑重承诺，不仅在全球生产基地采取了众多减排措施，在中国和印度开设了先进的重点生产基地，还在集团总部Wilopark中破土动工建造了全新的Health Cube健康中心，它将惠及全球威乐员工和整个地区。



图4.3-4 迪拜Heriot-Watt大学的威乐技术解决方案

2023年，威乐集团还承担起了慈善项目和协同合作的责任，尽心竭力为世界做出贡献。例如，威乐与救济世界饥饿组织Welthungerhilfe合作，向东非捐赠了旗下ABIONIK品牌的小型超滤模块Mini Cubes。作为“develoPPP”项目的一部分，为蒙古的学校和幼儿园提供了高效水泵，支持其现代化建设。威乐也为迪拜Heriot-Watt大学提供了解决方案：在该大学的威乐学院中，机械工程专业的学生可以在实践培训中使用这些设备进行学习。

至今，威乐集团已向乌克兰捐赠了超过140个PAUL净水背包，也向土耳其、叙利亚和摩洛哥的地震灾区送去了这些净水背包及紧急救援物资。这种便携式水处理系统包含一个超滤膜，能够可靠地去除水中的杂质、污染物和病原体。2023年，在威乐集团位于多特蒙德总部接受培训的威乐员工还用一天时间帮助德国的食物救济组织TAFEL分发食品。多年来，每年参与一次救济活动并照顾那些需要帮助的人一直是威乐员工培训计划中不可或缺的一部分。

4.3.3 连接 (Connecting): 用心建桥，连接全球

第三大影响领域“连接 (Connecting)”是通过参与强有力的国际伙伴关系来提高可持续影响。唯有携手合作才能战胜当今时代的全球性挑战。因此，威乐集团在全球范围内保持着强大的合作伙伴网络，威乐参与或邀请他人参加的众多活动都证明了这一点。

2023年5月，威乐与德国-非洲商业协会携手，在集团总部Wilopark迎接了参加“搭建桥梁 - 非洲”高级会议的来宾。在德国联邦经济合作与发展部部长Svenja Schulze女士的支持下，我们同与会者讨论了如何增加并深化德国在非洲大陆的经济活动。

新一届威乐行业大会的主题是“智能城市区域 - 合作连接多边世界”，该会议于2023年9月

在新加坡这一世界上最智能、最可持续发展的城市举行。来自政界、商界和学界的嘉宾就未来城市大展展开了讨论，相互交换了意见、建立了共识及联系。就在几周前，“智能建筑”也是越南一个类似会议的主题：威乐集团与多特蒙德工业大学共同举办了“智能城市区域”研究项目的启动会议。



图4.3-5 新一届威乐行业大会海报

2023年11月，威乐集团和德国可持续发展奖基

金会在杜塞尔多夫首次联合颁发了德国国际可持续发展奖。该奖项旨在表彰德国企业与全球企业之间成功的合作关系，从而促进国际之间的重要交流。建立国际连接也是上述第二十八届联合国气候变化大会（COP28）的重点，其中最重要的目标是寻求达成具体协议以实现巴黎气候目标，威乐集团也在现场发表了自己的观点。

2024年，威乐集团将继续沿着这条道路砥砺前行。我们将在世界多地举行活动，再次聚焦智能城市的精彩发展。我们也会保持交流，让全球约9000名威乐员工每天与彼此和客户伙伴持续对话。威乐集团的可持续发展战略：我们一切行动的内驱力。

“Creating” “Caring” “Connecting” - 创造、关爱、连接。这三大要素决定了威乐集团的今天和未来。

4.4 碳氢类自然工质在工业冷冻领域的应用

张会明 侯丽艳

(冰轮环境技术股份有限公司)

4.4.1 制冷剂替代的进程

制冷剂是在制冷机中完成热力循环的工质，其对制冷循环及制冷产品的设计、运行及性能有着重大的影响。制冷工质的选择需从环保性、热力性质、安全性、经济性、易获得、国际通用规则、国家政策、税款或补助金等多个方面进行考虑^[1]。在制冷空调领域发展的不同阶段，由于制冷剂使用要求、机器容量、使用条件以及机器种类的不同，对制冷剂性质要求的侧重面不同。表4.4-1所示为不同时期制冷剂选择的对比介绍。

在20世纪的制冷空调领域，CFCs和HCFCs凭借其不可燃、无毒、高效、安全等诸多优点成为制冷工质的主流。但是随着这类制冷剂的大量使用，其

导致的臭氧层空洞及温室效应问题也日益凸显。为了保护大气资源，各国先后签署了《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》和《京都议定书》，削减和淘汰CFCs和HCFCs物质的进程不断加快^[2]。

自然工质主要包括CO₂、HCS、NH₃等，表4.4-2为三者在制冷方面的优劣势对比。作为制冷工质，自然工质的主要优势是对臭氧层无破坏作用，温室效应小等^[3]。在寻找和开发替代工质的过程中，不同于人工合成的化合物，自然工质在排放后不会影响生态平衡，许多学者提出，使用自然工质替代CFCs和HCFCs是解决环境问题的最终方案。而考虑到经济和环境的可持续发展，碳氢化合物制冷剂应该是替代制冷剂的最佳方案。本文就工业冷冻领域常用的碳氢化合物制冷剂进行详细的介绍。

表4.4-1 不同时期制冷剂比较

	第一代 1830-1930	第二代 1931-2010	第三代 1987-2030s	第四代 2000s
关注点	可工作性	安全性和毒性	臭氧层的破坏	全球变暖
制冷剂种类	醚、SO ₂ 、甲酸甲酯、CCl ₄ 、碳氢、CO ₂ 、NH ₃ 、H ₂ O	CFC-11 CFC-12 CFC-114 CFC-115	低ODP值 HCFC-22 HCFC-142b等 零ODP值 HFC-134a/HFC-152a HFC-125/ HFC-32等	零ODP值， 低GWP值 HFC-152a HFC-161 HFO-1234yf HFE-143m CO ₂ 、碳氢、氨等

表4.4-2 CO₂、HCS、NH₃制冷剂的优劣势对比

	CO ₂ 制冷剂	HCs制冷剂	NH ₃ 制冷剂
优势	1.ODP=0，GWP=1 2.良好的安全性 3.单位容积制冷量高 4.价格低廉，易于获得	1.ODP均为0，GWP都很低，接近于零 2.单位容积制冷量大	1.环保，ODP=0，GWP=0 2.来源广泛，价格低廉 3.热物性好，低成本，高回报 4.分子量小，泄漏时上升 5.有刺鼻气味，极易溶于水
劣势	1.临界温度，0℃对应饱和压力高 2.作单一循环效率低 3.适合低温制冷和高温制热	易燃、易爆，A3类制冷剂	具有毒性和燃爆特性

4.4.2 碳氢类自然工质的研究现状

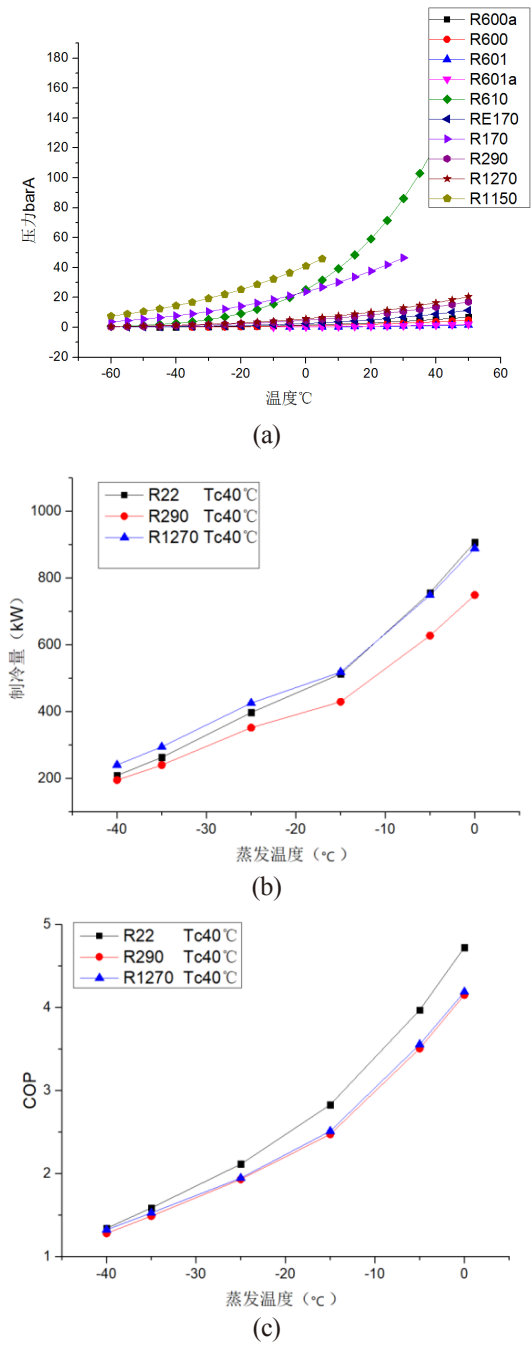
目前，作为制冷剂的碳氢化合物主要有丙烷（R290）、丙烯（R1270）、乙烷（R170）、乙烯（R1150）等，其热力学性质是其在不同情况下被选用的前提^[4]，表4.4-3为四者的参数比较。丙烷的主要物理参数与R22（二氟一氯甲烷）非常接近，压力适中，绝热指数低，排温低，油冷负荷小。由于不用改装原机和生产线，直接充灌丙烷，系统转换费用较低，可以作为R22的直接替代物，且适合发展中国家^[5]。研究表明，在效率方面，同机型、同排量、同工况下，R290冷量略低于R22，约为R22的0.85~0.93，充灌量仅为R22的一半。R290还可采用与R22相同的润滑油、节流阀、管子和密封材料等。R290对油的溶解性更好，回油效果好很多。使用R290替代R22能够有效减少R22的充灌量，减少ODP指标，同时减少CO₂排放^[6,7]。此外，R170同样压力适中，绝热指数低，排温低，油冷负荷小。与R23（三氟甲烷）的相关参数也比较接近，在效率方面，同工况下COP略高于R23，而且同R290一样是石油化工行业的副产品，十分容易获得。表4.4-4为R22和R23的基本物理性质。基于一般螺杆压缩机的容积效率与绝热效率的理论计算值，对不同制冷剂的性能对比曲线如图4.4-1所示。

表4.4-3 R290、R1270、R170、R1150参数比较

	R290	R1270	R170	R1150
沸点（℃）	-42.2	-47.7	-88.9	-104
临界温度（℃）	96.7	92.4	32.3	9.2
GWP	3	20	20	20
ASHRAE安全分类	A3	A3	A3	A3
使用情况	国内空调业大力扶持石油炼化产品	石油化工副产物	低温复叠系统的低温段 石油、化工副产品	
分析	最大障碍可燃性，需要防爆			
淘汰情况	自然工质，符合要求			

表4.4-4 R22和R23的基本物理性质

	R22	R23
相对分子质量	86.47	70.01
沸点（℃）	-40.81	-82.02
临界温度（℃）	96.15	26.14
ODP	0.055	0
GWP	1810	14800
ASHRAE安全分类	A1	A1



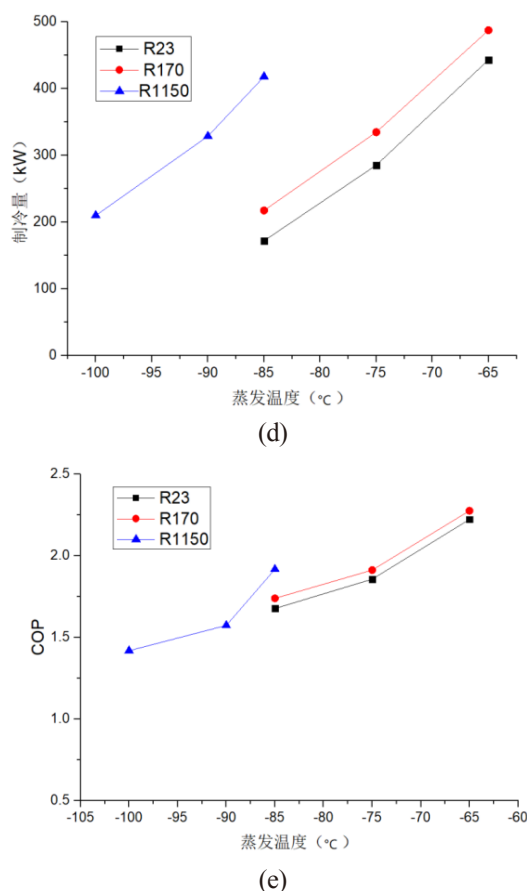


图4.4-1 对不同制冷剂的性能对比曲线

4.4.3 典型应用流程及实例

自然工质制冷机组的应用领域十分广泛，涉及到精细化工、气体液化、硅业、煤化工、石油化工、环境模拟、氯碱化工等多个行业^[8]。在油田天然气处理和轻烃回收领域，主要应用在天然气冷却、天然气液化、轻烃回收方面。原理是通过制冷机组原料气冷却，使其中各组分冷凝成液，从而进行分离回收，同时对尾气进行回热。在某油田公司轻烃回收项目中，处理气量最高可达15万方/天，入口温度40℃，入口压力1.6MPa，流程见图4.4-2。一级制冷剂R290，冷却至-20℃；二级制冷剂R290/R170复

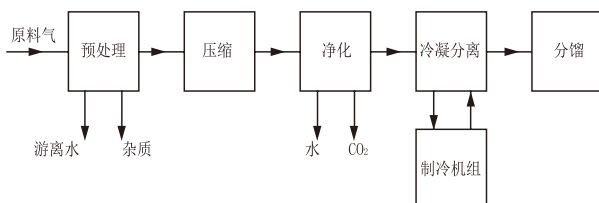


图4.4-2 轻烃回收流程图

叠，冷却至-68℃。回温至30℃，C3收率93%，装机总功率560kW。不同液化温度下适用的制冷剂见表4.4-5。

表4.4-5 不同温度下制冷剂的应用

项目/参数	单级	双级	复叠	单级或双级
液化温度(℃)	-20~-40	-40~-50	-50~-90	<-90
制冷剂	R290/ R1270	R1270	R1270/ R1150 R290/ R170	混合冷 剂

碳氢类自然工质应用在石化加工行业VOCs治理、汽油储存、运输行业油气回收领域时，VOCs、油气组分复杂；油气入口气量、温度、浓度波动范围大；油气入口处含水蒸气，需不停机切换蒸发器进行融霜。所以采用多级连续冷却的方法，使混合气中的各组分的温度低于凝点从气态变为液态，除水蒸汽外的空气仍保持气态，从而实现VOCs与空气的分离，流程见图3。某码头装卸船油气回收项目中，汽油油气处理气量2300m³/h，最大达到3000m³/h；浓度35%~50%；一级冷却至5℃，二级冷却至-30℃，三级冷却至-70℃；排放浓度小于18g/m³，回收效率>96%。各级制冷剂的选择见表4.4-6。

不同自然工质在工业冷冻领域的推荐温区及典型装置见表4.4-7。

工艺流程

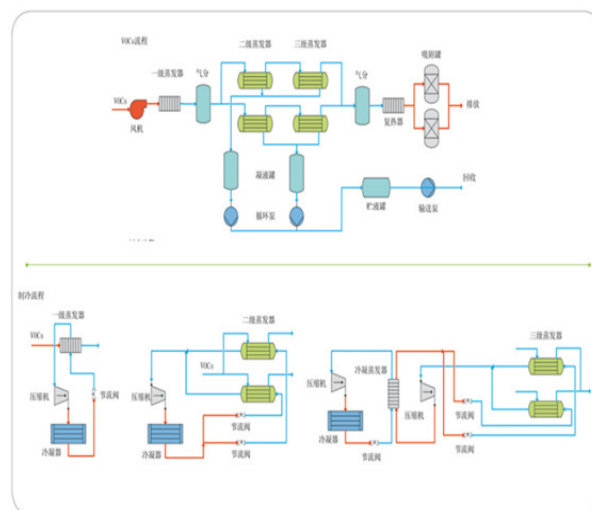


图4.4-3 油气回收流程图

表4.4-6 不同工况下制冷剂的应用

	一级	二级	三级
工况 (°C)	0/48	-35/+48	-75/-15
制冷剂	R290	R1270	R1270/R1150



(a) 某油田轻烃回收 (-70°C)



(b) 某油田轻烃回收 (-30°C)



(c) 某油田天然气冷却 (风冷)



(d) 某码头VOC回收机组

图4.4-4 自然工质在工业冷冻领域的应用

表4.4-7 自然工质在工业领域的推荐服务温区

细分行业/工艺装置	推荐温区 (°C)	典型应用实例 (冷冻装置)
丙烷	+10~-40	天然气冷却
		轻烃回收
		CO ₂ 液化
丙烯	+10~-45	HDPE/LDPE装置
		PP装置
		EOEG装置
		苯乙烯装置
乙烷	-45~-85	轻烃回收
		多晶硅尾气
		特殊气体冷却液化
乙烯	-70~-100	多晶硅尾气
		化工物料冷却
		电气特气冷却

4.4.4 自然工质面临的主要问题

需要注意的是碳氢化合物的易燃易爆性，对于民用场所不适用，但作为化工厂的应用，其防爆要求是完全可以满足的。在设计过程中，需要对制冷剂充注量进行严格的控制；提升设备的通风性能，避免达到爆炸极限；还要选用合适防爆等级的电气设备。例如控制台使用防爆技术，根据防爆形式不同，可以选择隔爆型或需要提供气源的正压型控制台；在仪器仪表的选择上，选择防爆机组配用的本安型、隔爆型、胶封型的仪器仪表；还要对机组采用防渗漏密封技术等。另外，如果是室外机组，还应做好防火放雷的措施。

4.4.5 结论

对于制冷系统而言，没有最好的制冷剂，只有最优化的设计和最经济的方案。目前对于碳氢类自然工质还处于持续研究阶段，更多的系统集成技术还需要更大人力物力的投入。系统的制冷剂充灌量的大小取决于制冷系统的集成技术发展、改进供液方式、改进换热器设计等，是安全考虑中的关键因素。对于易燃易爆的碳氢制冷剂及其混合物，如何在其可燃性方面进行抑制，避免在大中型制冷系统中存在安全问题，是制冷设备设计者和标准制定者

都需要考虑的问题。同时,寻找制冷剂的替代品是困难的,不但要思考替代品的合理性,也要考虑系统的兼容性^[9]。但是随着对制冷剂应用技术研究不断深入、使用经验的不断积累,环保型碳氢类自然工质制冷剂未来必将拥有广阔的市场应用场景。

参考文献

- [1] 郭辉红. 使用碳氢制冷剂的自复叠制冷系统性能优化研究[D]. 郑州轻工业大学, 2023. DOI:10.27469/d.cnki.gzzqc.2023.000139.
- [2] Effect of temperature and humidity on the flammability limits of hydrocarbons[J]. Rui Zhai;;Zhao Yang;;Yong Zhang;;Zijian Lv;;Biao Feng.Fuel, 2020
- [3] 张鹏, 张振涛, 杨俊玲等. 自然工质高温热泵技术研究进展与发展趋势[J]. 制冷技术, 2022, 42 (05): 78-86.
- [4] 宁静红. R290/CO₂自然工质复叠式制冷循环系统的理论分析与实验研究[D]. 天津大学, 2007.
- [5] 马松, 赵李曼. HFC及其混合物作为R22替代制冷剂的应用分析[J]. 冷藏技术, 2021, 44 (04): 40-44+50.
- [6] 徐昊. 碳氢制冷剂与R134a混合物的物性和燃烧性研究[D]. 华中科技大学, 2021. DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2021.002523.
- [7] 包继虎, 朱丰雷, 谢鸿玺等. 自然工质的研究现状及面临的问题[J]. 制冷, 2020, 39(03): 36-43.
- [8] 史婉君, 张建君, 鬲春利等. 浅析我国制冷剂标准的发展[J]. 制冷与空调, 2016, 16(03): 83-87.
- [9] Performance maximization by temperature glide matching in energy exchangers of cooling systems operating with natural hydrocarbon/CO₂ refrigerants[J]. Sai C. Yelishala;;Kumaran Kannaiyan;; Reza Sadr;; Ziyu Wang;; Yiannis A. Levendis;; Hameed Metghalchi. International Journal of Refrigeration, 2020

Pioneering for You

wilo

CARING FOR WATER WITH PASSION.
威乐, 让每一滴水更有价值

50 SUSTAINABILITY & CLIMATE LEADERS

A RACE WE CAN WIN



威乐, 秉承百年德国制造工艺, 根植中国近30年, 始终致力于为建筑领域、水务领域以及工业领域提供高效水泵解决方案, 不断创新, 与时俱进。



威乐中国官方微信

威乐(中国)水泵系统有限公司

www.wilo.com.cn

Tel.: +86 10 5234 7888

Fax: +86 10 5234 7666