

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-19

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260520003

微电子行业洁净空调系统节能技术研究进展与挑战

蒋宗志¹ 尹海全² 宋孟杰¹ 王宝龙³ 孙德宇⁴

(1 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081; 2 北京市热力集团有限责任公司石景山分公司 北京 100043;

3 清华大学建筑学院 北京 100084; 4 中国建筑科学研究院有限公司 北京 100013)

摘要 微电子洁净空调具有高能耗、高精度、连续运行等特征,占厂房总能耗的40%~60%,既有综述多聚焦单一技术,缺乏系统梳理与工程适配分析,难以支撑先进制程低碳制造与“双碳”目标落地。本文以系统节能为主线,采用文献计量与归纳评述方法,围绕“风系统、冷热源、智能控制、能量回收”4个维度,综述关键技术路径、适用场景与研究进展,剖析现存科技瓶颈并预判产业发展方向。结果表明:风系统优化、冷热源高效配置、智能控制、能量回收技术可实现10%~39%的节能率,多技术融合协同、数字孪生与低GWP制冷剂为当前研究热点;行业仍存在技术落地性差、耦合机理不清、全生命周期评价缺失、标准体系不完善等突出问题。本文构建了完整的节能技术框架,明确了量化节能潜力与优化方向,以期微电子洁净空调节能设计、运行优化及技术升级提供系统理论参考与工程依据。

关键词 微电子行业;洁净空调系统;节能优化;智能控制

中图分类号: TB657. 2; TU831. 3

文献标识码: A

Research Progress and Challenges of Energy-Saving Technology for Clean Air Conditioning Systems in the Microelectronics Industry

Jiang Zongzhi¹ Yin Haiquan² Song Mengjie¹ Wang Baolong³ Sun Deyu⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Shijingshan Branch, Beijing District Heating Group Co., Ltd., Beijing 100043, China; 3. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. China Academy of Building Research Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract Cleanroom air conditioning in microelectronics requires high energy input, high precision, and continuous operation, accounting for 40% - 60% of the total plant energy consumption. Most reviews concentrate on a single technology and lack systematic classification and engineering adaptation analysis. Thus, they fail to support low-carbon manufacturing for advanced processes and dual carbon goals. Focusing on systematic energy savings, this study used bibliometric analysis and inductive review to summarize key technical routes, application fields, and research developments across four aspects: air systems, cold and heat sources, intelligent control, and energy recovery. Technical limitations are also analyzed, and future development trends are predicted. The results indicate that improvement of air systems, rational allocation of cold and heat sources, intelligent control techniques, and energy recovery technologies can achieve an energy-saving rate of 10% - 39%. Multi-technology integration and cooperation, digital twins, and low Global Warming Potential (GWP) refrigerants have emerged as dominant research themes. The industry still faces significant challenges, including low technology implementation rates, unresolved coupling mechanisms, a lack of comprehensive life-cycle evaluations, and divergent industry standards. This study builds a complete energy-saving technology framework and clarifies the potential energy-saving and optimization directions, with the aim of providing a systematic theoretical framework and an engineering foundation for the energy-saving design, operational optimization, and technological upgrading of cleanroom air conditioning systems in microelectronics.

Keywords microelectronics industry; cleanroom air-conditioning system; energy-saving optimization; intelligent control

收稿日期:2026-05-20;修回日期:2026-06-15;录用日期:2026-06-15

责任编辑:田甜

基金项目:国家自然科学基金(52576006)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52576006).)

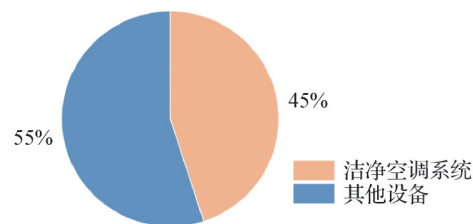


移动阅读

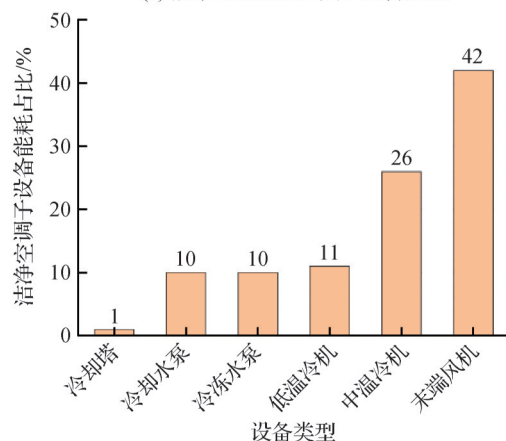
高端电子器件制造对于洁净厂房环境控制有着非常严苛的要求,微电子洁净空调需要保持 $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温、 $45\% \pm 5\%$ 的恒湿、ISO(国际标准化组织, international organization for standardization) 1~8 级的洁净度,换气次数达到 30~80 次/h 并且全年 8 760 h 不间断运行^[1-2]。其能耗为普通公共建筑空调的 10~30 倍^[3],其中末端风机与冷机是主要的耗能设备,分别约占厂房总能耗的 42% 和 26%^[4],如图 1(a)和图 1(b)所示,是节能的核心^[5]。在国家“双碳”目标、《工业能效提升行动计划》等政策的指引下,重点工业行业单位增加值能耗 2025 年较 2020 年下降 13.5%,节能目标清晰且任务紧迫^[6]。微电子洁净空调作为高耗能、高保障的关键设备,其能效水平直接关乎企业运行成本、生产安全与能源安全。长久以来,该系统因为高风量、高过滤、高精度运行的特点,一直存在能耗高、优化困难、适配性差等突出问题。开展微电子洁净空调节能技术研究,既是产业发展的必须,也是落实国家节能降碳政策的重要举措^[6-7]。

我国洁净室工程市场规模不断扩张,为节能技术发展创造了现实场景并带来了迫切需求。由图 1(c)可知,2016 年全国洁净室工程新建面积约 1 800 万 m^2 ,预计 2032 年将会突破 7 700 万 m^2 ,行业体量持续增长。虽然行业增速从 2017 年峰值逐步回落,但 2026 年后仍将保持 6%~8% 的中高速增长,这将进一步提高行业整体能耗水平,加剧节能降耗的紧迫性。国内外相关研究已经从单一设备、参数的优化^[8]逐渐转向系统集成^[9]、多技术融合与智能调控方向,但尚未形成统一、成熟、可大规模推广的技术体系。现有的文献大多聚焦于单项技术改进,缺少对全系统、全流程、全生命周期的系统性梳理与对比分析^[8,10]。与普通建筑空调、生物医药洁净空调相比,微电子洁净空调在控制精度、连续运行、负荷特性上存在显著差异,节能技术的适配门槛更高^[4]。现有综述未能充分覆盖技术瓶颈、场景差异与工程落地问题,难以满足先进制程低碳制造需求^[5,11]。因此,对微电子洁净空调节能技术进行全面综述,对凝练科学问题、指引研究方向、支撑工程实践有着重要的理论与应用价值。

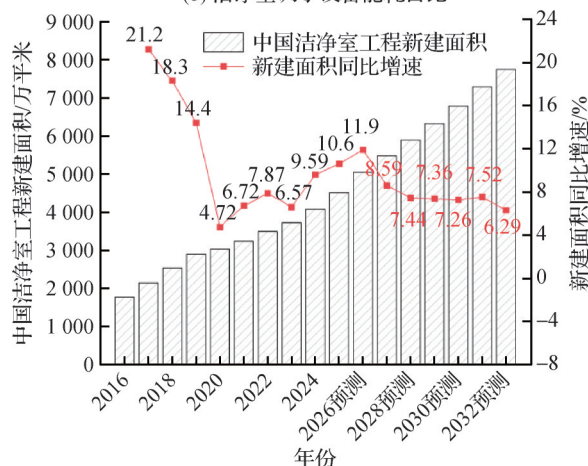
从相关文献的地域分布、研究重点看,全球的研究呈现出一种格局,即“中国台湾领跑、大陆快速跟进、美日韩各有侧重”,技术路线与应用场景差异显著。中国台湾地区依托成熟的半导体产业基础,是该领域研究起步最早且工程应用最丰富的地区。例如, Hu S. C. 等^[12]将 MAU(新风空调机组, make-up air unit)出口温度从 $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$,使 MAU 系统能



(a) 洁净空调系统和其他设备占比



(b) 洁净空调子设备能耗占比



(c) 中国洁净室工程新建面积及同比增速

图 1 中国洁净室新建面积及洁净空调能耗构成及占比
Fig.1 Newly constructed cleanroom area in China and energy consumption structure of clean air conditioning

耗降低了 29%、晶圆厂总能耗降低了 2.1%; J. M. Tsao 等^[13-14]开发了 DCC(干式冷却盘管, dry cooling coil)与 MAU 加热盘管水循环热回收方案,在设计工况下 MAU 系统节能率高达 49.1%。在风机变频^[15]、多冷机负荷调度^[16]、局部微环境构建^[17]等诸多方向上,已形成大量能够实际落地的工程技术,相关成果已经在头部企业中规模化应用。中国大陆地区在该领域的研究起步较晚但发展迅速,近年逐步从单一设备优化朝着系统集成研究方向转变: Yin Jiawen 等^[18]主要针对冷热偏移开展了可行性验证,进而系统提出取消再加热与回风热回收方案^[19-20],单个工厂的年节能量可达 $621\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$,占空调总能耗的

20.2%; Ma Zhiyao 等^[21-22]针对风机高能耗问题,验证了降低通风速率与优化盘管布置的节能效果,FFU(风机过滤器机组, fan filter unit)风机功率可节省25.8%~29.0%; Zhao Jiaan 等^[23-24]提出非均匀环境通风理论和基于人员位置的FFU控制策略,能够减少通风空气量至42%~55.3%; Jia Lizhi 等^[25]开发的免费冷却系统,年节能率可达15.1%,显著优于传统冷却塔冷却方案。国际上,美国研究侧重于智能控制与新型技术融合:W. K. Brown^[26]综述热回收等节能技术;Sun Wei^[27]利用实时颗粒传感器反馈调节风机转速实现节能;Xu Tengfang^[28]通过微环境压差特性研究,验证了低压差下维持高洁净度的可行性,为智能控制提供了依据;S. Villarreal 等^[29]将太阳能光伏集成至晶圆厂以提升能效;H. Taboada 等^[30]探索了光伏协同储能系统在洁净室中的减排应用。日本与韩国则聚焦冷热源系统与排风余热回收:Song Y. H. 等^[31]评估了半导体厂冷却系统,采用集成冷却塔、自由冷却及冷冻水量控制,年耗电量降低约35%;H. Suzuki 等^[32]通过去除AHU(空气处理机组, air handling unit)换热翅片冷凝水,提升换热效率24%,实现空调系统节能3%;G. S. Song 等^[33]利用空气洗涤器回收排风余热,实验证明其冬夏季能效优于传统系统。这些研究形成了各具特色的技术路线。

虽然国内外在研究上已经有了相当数量的成果,但当下微电子洁净空调节能领域依旧存在比较明显的欠缺之处,制约了整体能效的提升。在系统优化方面,风系统、水系统、控制系统大多是各自独立进行研究的,其间的耦合机理和协同节能机制还不太明确。例如在智能调控方面,动态负荷适配、多参数协同策略的研究不够充分,恒定参数运行依旧占据主导地位;在能量回收方面,排风余冷余热利用、梯级供冷等技术的应用比例较低,高效集成方案缺少系统的归纳;在工程应用方面,研究成果和实际落地实践相互脱节,在不同洁净等级、工艺场景下的技术选型依据不够充分。相比于国际先进经验,我国在多技术深度融合、长期运行稳定性验证、标准化模式建设这些方面仍存在差距。现有文献多集中在局部技术改进上,缺少对全系统节能路径、技术适用性、综合效益的系统梳理。针对ISO 1~3级超高洁净区的节能技术总结、对比尤其缺乏,难以进一步支撑先进制程低碳制造需求。现有综述多侧重于单一技术介绍,未涵盖技术演进、节能潜力、适用场景与现存短板,行业迫切需要全面系统的技术梳理和评述。

本文对微电子洁净空调节能技术的研究现状、技术短板、发展趋势展开系统综述,依照背景、现状、

问题、展望的综述模式,展现该领域研究的前沿发展情况。通过梳理国内外的研究成果与工程应用实例,从风系统优化、冷热源配置、智能控制、能量回收4个主要方向,归纳出技术的演进路径、实现方法、节能潜力,并且对比分析不同技术在ISO 1~8级洁净厂房中的适用情况、具备的优势与局限,从而明确末端风机、冷机等核心设备的节能关键要点。本文总结了技术从单点优化到系统集成、从常规调控到智能运行的发展历程,提炼出典型案例、关键突破,指出当前研究在系统耦合、场景适配、工程转化等方面存在的欠缺之处,厘清技术瓶颈与发展阻碍,可为微电子洁净厂房的节能技术选型、系统集成设计、运行优化提供理论依据和决策参考。

1 微电子洁净空调系统核心节能技术研究进展

微电子洁净空调系统具有高能耗、高稳定、高精度的运行特征,节能技术已围绕风系统、冷热源、智能控制、能量回收4个方向形成系统化研究体系。风系统以降低输送能耗与气流精准分配为核心,冷热源聚焦能效提升与负荷品位匹配,智能控制实现动态供需协同,能量回收致力于低品位余热再利用。4类技术相互支撑、协同增效,共同构成微电子洁净空调节能的核心技术框架,为系统设计、改造与运行优化提供理论与实践支撑。本节对四大核心节能技术的研究现状、技术路径、节能潜力与适用场景进行梳理,明确技术瓶颈与发展趋势。

1.1 微电子洁净空调风系统优化技术

风系统是微电子洁净空调的主要耗能单元,能耗占空调系统总能耗的20%~40%,节能关键在于气流组织优化、换气次数合理匹配与系统阻力降低。风系统主要节能优化技术的对比如表1所示。传统均一化送风与过量换气设计存在明显风量浪费,基于尘源分布的非均匀环境营造方法可显著降低循环风量^[34],在保证洁净度的前提下能耗可降低56%~60%。国内外学者通过数值模拟与现场实测证实,洁净室气流组织受设备布局^[35]、建筑构造、通风参数与工艺工况等多因素^[36-37]共同影响,优化后可实现约18%的典型节能率,适配ISO 4~7级洁净环境。换气次数优化直接针对“过设计”问题,在满足洁净度条件下,合理下调换气次数可降低风机能耗^[38],同时优化气流组织可改善室内流场均匀性^[39],改造难度小、普适性强。步进式值班运行模式可在非生产时段将送风量降低43.8%,风机功耗降低59.1%,且能维持压差稳定^[40]。采用低阻高效过滤器可显著降低系统

运行阻力 300 Pa 以上^[41-42],配合风管漏风控制及过滤器低阻选型^[43],进一步降低风机输配能耗。同时,过滤器的阻力性能受风速影响显著^[44],合理选型与优化维护^[45-46]对节能至关重要。风系统优化从风量、流

场、阻力、运行模式多维度切入,形成源头减耗、过程控耗、末端低阻的完整技术链,是洁净厂房节能改造的首选措施。

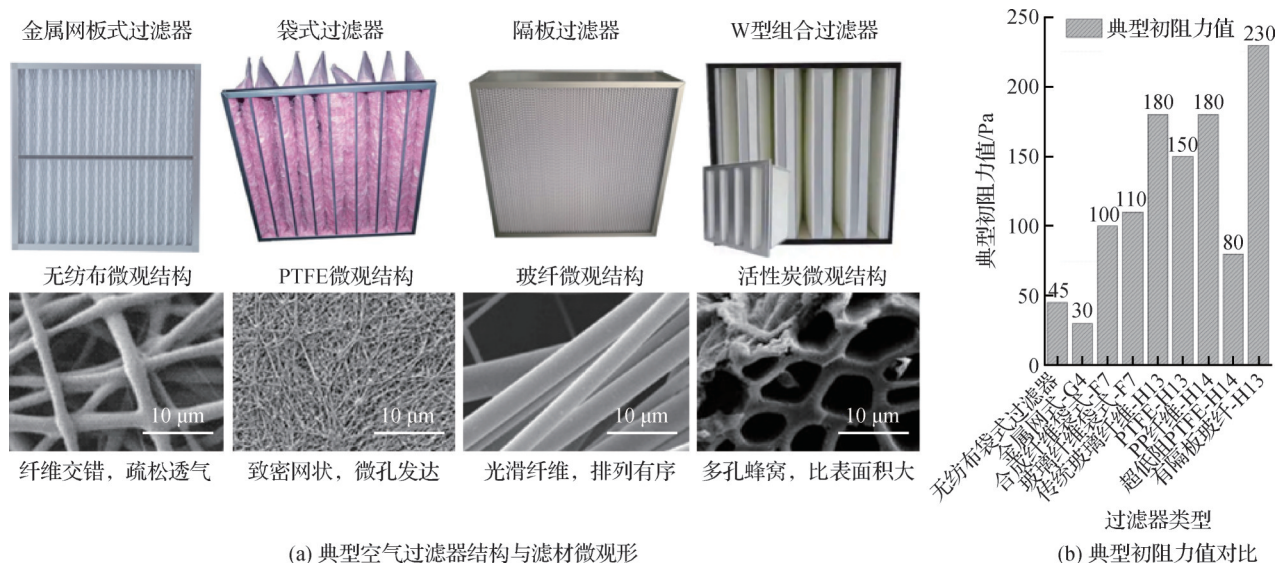
表 1 风系统节能技术相关研究对比

Tab.1 Comparative study on air system energy saving technologies

序号	优化技术	节能率	洁净度等级	主要优点	主要缺点	参考文献
1	气流组织优化	18%	ISO 4~7 级	均匀性提升,减少无效风量,适配复杂布局	依赖模拟仿真,边界条件需现场校准	[34-37]
2	换气次数优化	14%	ISO 4~7 级	直接降低风机能耗,效果稳定,改造难度小	过度降低会影响洁净度与压差	[38-39]
3	步进式运行模式	40%	ISO 5~8 级	非生产时段大幅节电,压差稳定	需自控系统支持,逻辑调整复杂	[40]
4	低阻高效过滤器	10%	ISO 1~5 级	系统阻力下降,风机功耗降低,寿命更长	初投资略高,需匹配风机特性	[41-46]

不同类型过滤器的阻力特性直接影响风系统能耗,分级选型与科学运维是实现长效节能的关键。如图 2(a)所示,洁净室常用空气过滤器按结构形式可分为金属网板式、袋式、隔板式、W 型组合式等类型,其滤材微观结构差异显著:无纺布滤材呈纤维交错、疏松透气结构,PTFE (聚四氟乙烯, polytetrafluoroethylene) 滤材为致密网状、微孔发达结

构,玻纤滤材为光滑纤维、排列有序结构,活性炭滤材为多孔蜂窝、比表面积大结构,这些微观特征直接决定了过滤器的阻力与过滤性能。如图 2(b)所示,9 种典型过滤器初阻力差异显著,金属网式-G4 过滤器初阻力最低约 30 Pa,有隔板玻纤-H13 过滤器初阻力最高达 230 Pa,超低阻 PTFE-H14 过滤器阻力仅 80 Pa,在保证过滤效率的同时可大幅降低风机功耗。



(a) 典型空气过滤器结构与滤材微观形

(b) 典型初阻力值对比

图 2 不同类型空气过滤器特性对比

Fig.2 Comparison of characteristics of different types of air filters

如表 2 所示,在工程中应按洁净等级分级选用过滤器:初效 G1~G4 用于 MAU 新风预过滤,中效 F5~F9 用于 MAU 中段与 RCU (循环空调箱, recycled airhandling unit) 回风过滤,高效 H10 - H14 用于 ISO 5~7 级 FFU 末端送风,超高效 U15 - U17 用于 ISO 5 级及以上核心制造区。定风量运行和过早更换过滤器会加剧能耗浪费,基于压差监测的动态更换策略可延长滤芯寿命并降低综合成本^[47-48]。采用阶梯型多重密封结构的组合式空气处理机组,漏风率可降

至 0.66%,显著低于传统机组,有效减少漏风带来的能量损失^[48]。风系统阻力控制与全生命周期运维优化,可将节能效果从单点改进扩展至系统级提升,推动风系统向低阻化、智能化、按需化方向发展。

1.2 微电子洁净空调系统的冷热源高效配置技术

冷热源系统能耗占微电子洁净空调总能耗的 40%~60%,节能潜力也很大,核心技术路径为设备能效提升、负荷品位匹配、系统集成优化,如图 3 所

表 2 不同类型过滤器对比表
Tab.2 Comparative study on different types of filters

序号	类别	等级	拦截粒径	效率范围	洁净室常见使用位置
1	初效过滤器	G1~G4	≥5 μm的大颗粒	20%~90% G1~G4递增	MAU新风入口一级预过滤
2	中效过滤器	F5~F9	1~5 μm的中等颗粒	45%~95% F5~F9递增	MAU中段过滤、RCU回风过滤等
3	高效过滤器	H10~H14	≥0.3 μm的微小颗粒	85%~99.995% H10~H14递增	ISO 5~7级洁净区FFU末端送风、洁净室高效送风
4	超高效过滤器	U15~U17	≥0.12 μm的纳米颗粒	≥99.9995% U15~U17递增	ISO 5级及以上微电子制造核心区

示。冷水机组作为冷源核心设备,其COP(性能系数, coefficient of performance)每提升1,空调能耗可降低10%~15%^[4]。冯显桓^[49]对比发现高低温双冷水机组比单台低温机组耗电量减少10.23%、冷机平均COP提高24.86%。M. Porowski等^[50]指出热回收仅在无回风或内回风系统中节能5%~66%。邵森等^[51]分析了过渡季冷源低负荷补偿方案。S. C. Hu等^[52]对比5种空调系统,证明MAU+FFU系统能耗最优。张瑞等^[53]通过实验与仿真分析指出,采用冷却水变流量运行策略,并配合变频离心式或变频螺杆式冷水机组,在50%~100%负荷区间均具有节能潜力,且冷却塔风机变频运行可进一步增强节能效果。温湿度独立控制技术通过新风承担全部湿负荷、循环机

组处理显热^[54],彻底消除冷热抵消现象,并能通过自适应解耦策略优化全工况能效^[55],同时集成热回收与自由冷却可获得2.3%~33.1%的节能效果^[56]。负荷品位匹配理论从热力学底层优化空气处理流程,减少能量品位浪费,为系统重构提供理论支撑^[57]。MAU+FFU+DCC系统较传统方案节能14%~21%,运行成本低、控制精度高,广泛应用于ISO 1~6级洁净厂房^[58-59]。集成式冷水站可使年运行费用降低55%,投资回收期仅2.5年,规模化应用优势显著^[60]。4种冷热源高效配置节能技术相关研究对比如表3所示。冷热源优化以高能效、高匹配、高集成为特征,实现节能与运行稳定性同步提升。

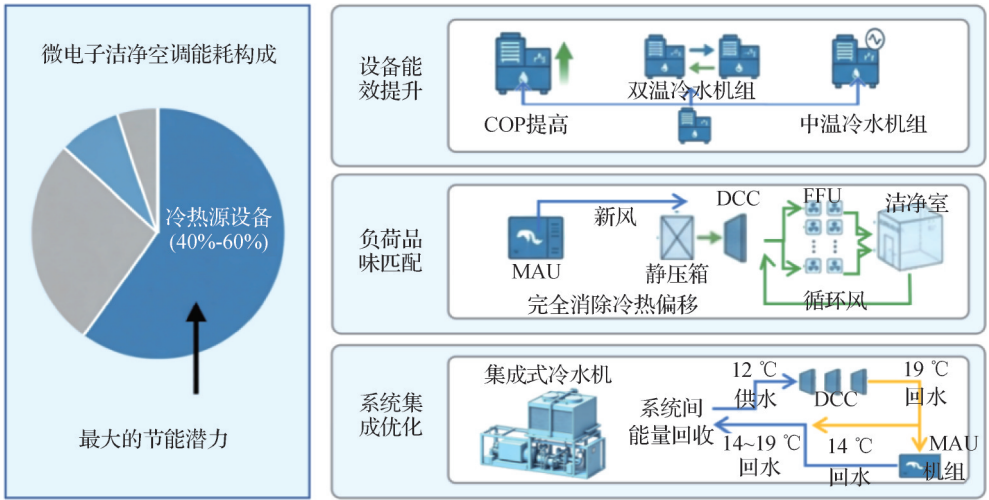


图 3 微电子洁净室空调冷热源系统高效节能技术路线

Fig.3 High-efficiency energy-saving technology route for cold and heat source systems in microelectronics cleanrooms

表 3 冷热源高效配置节能技术相关研究对比表

Tab.3 Comparative study on high-efficiency configuration energy-saving technologies for cold and heat sources

序号	优化技术	典型节能率	适用洁净等级	核心优势	投资回收期	参考文献
1	冷水机组优化	10%~25%	ISO 1~8级	能效高,大负荷稳定	—	[49~53]
2	温湿度独立控制	2%~33%	ISO 4~8级	消除冷热抵消,温湿度解耦,初投资小	—	[54~57]
3	采用MAU+FFU+DCC系统	14%~21%	ISO 1~6级	运行成本低,控制精度高	—	[58~59]
4	集成式冷水站	年费用降低55%	—	系统COP显著提升,运维简化	2.5年	[60]

工程实践进一步验证了梯级供冷与能量回收协同优化的工程价值。台北科技大学研究团队对比了8种亚热带新风处理方案,结果表明DCC回水法能量回收效果最优,可显著降低预热与再热负荷^[14]。分段式制冷技术通过两级冷源实现梯级降温除湿,提升负荷处理效率,更适配微电子工艺高精度温湿度控制需求^[61]。微电子洁净冷源需同时满足恒温与恒湿要求,对部分负荷性能与动态响应速度提出更高标准。冷热源系统已从单机能效提升,逐步走向多表冷源协同、梯级供冷、余热内循环的系统集成模式。与普通建筑冷源相比,洁净空调冷热源更强调负荷精准匹配与连续稳定运行。冷热源高效配置技术可实现2%~33%的节能效益,是支撑先进制程芯片厂房低碳运行的关键技术支撑。

1.3 微电子洁净空调系统智能控制技术

智能控制技术通过精准调控系统运行参数,实

现供需匹配,是降低运行能耗的重要手段,相关研究对比如表4所示。其中变频控制是智能调控的基础措施,广泛应用于风机^[62-63]、水泵及冷水机组^[64]。风机根据室内尘源强度、室内CO₂浓度、余压状态^[65]与压差实时调速,较定频控制节能10%~20%。水泵变频改造一般可使运行效率提升20%~30%^[64]。基于自适应免疫遗传算法优化的改进PID(比例、积分、微分控制算法,proportional integral derivative)控制策略,响应更快、控制更稳定,节能率较传统PID提升8%~12%^[66]。神经网络模型用于新风量自动调节,可使系统能耗有效降低^[67]。多智能体分布式优化方法可同步优化各区域通风率与机组运行参数,实现20.0%~39.3%的能耗降低,适配ISO 1~5级高洁净要求场景^[68-69]。智能控制已从设备单机调节走向系统级协同,从单一参数控制走向多目标全局优化。

表4 智能控制节能技术相关研究对比

Tab.4 Comparative study on related research of intelligent control energy-saving technologies

序号	优化技术	典型节能率	适用洁净等级	主要优点	主要缺点	参考文献
1	变新风量控制	10%~20%	ISO 5~8级	按静压动态调节,保障品质	需传感器与联动逻辑	[62-63,65]
2	水泵变频	根据负荷20%~30%	ISO 4~8级	部分负荷下的节能效果显著	负荷稳定时收益不明显	[64]
3	改进PID	较传统PID高8%~18%	ISO 4~8级	控制稳定,响应快,节能稳定	参数整定需现场优化	[66]
4	系统级智能协同	20%~39%	ISO 1~5级	完全消除再热,精度极高,多区协同	编写的控制逻辑复杂	[68-69]

系统级智能协同控制是破解冷热抵消、实现高精度节能的核心技术,代表洁净空调控制的最高水平。基于分程控制理论的温度控制策略,可完全消除夏季MAU降温后再热造成的能源浪费,干冷盘管节能率可达51.02%~100%^[70]。多区域协同控制可以平衡不同洁净等级区域的压差、温湿度与风量需求,避免局部过处理与能耗浪费。通过实时颗粒传感、边缘计算与群控算法结合,可实现全年全天候自适应运行,快速响应室外气象与室内负荷波动。与传统固定设定值控制相比,智能协同控制在环境稳定性、控制精度与节能效果3方面实现同步提升。自控系统的普及与智能算法落地,使洁净空调从“被动保障生产”转向“主动优化能耗”。智能控制技术为其他系统的协同运行提供核心支撑,是实现整体最优节能的必要保障。智能控制技术以动态供需匹配、多参数协同优化为核心,是提升系统运行能效、保障环境精度的重要手段,综合节能率可达10%~39%。

1.4 微电子洁净空调系统能量回收技术

能量回收技术通过对排风余热、工艺废热等低

品位能量进行回收,降低新风处理能耗,在对热湿处理流程进行改善的同时也减少了能量的流失。汪延璐^[71]与鲁家彤等^[72]对比不同热湿处理系统形式,实现对低品位能量的回收,降低新风能耗;张贤康^[73]和顾冬明等^[74]则结合实际工程案例,分析了该技术净化空调系统中的应用效果与节能措施。微电子厂房新风量大、热湿处理能耗高,显热回收、全热回收与工艺余热梯级回收已形成多元化技术体系。转轮式全热回收效率达70%~80%,可使新风处理能耗降低30%以上,在严寒、寒冷地区适用性最强^[74-75]。热管式显热回收结构简单、投资回收期仅1.8年,适合夏热冬冷地区显热回收。溶液吸收式全热回收可同时回收显热与潜热,较传统热回收系统节能率提升5%~8%,适配高湿湿热地区^[76-77]。工艺余热回收利用芯片生产废热预热新风:Tang Chunli等^[78]利用双向新风换热器,王维蔚等^[79]提出的热回收系统消除“冷热抵消”现象,均可节能40%以上。多个独立分散排风集中回收技术,可实现能量梯级利用,系统整体节能率提升8%~12%^[80]。能量回收将低品位废热转化为高品位可用能,可以显著提升系统全生命周期能

源利用率。

不同能量回收方案在节能率、投资回收期与适用气候上存在明显差异,因地制宜选型是实现最优效益的关键。能量回收节能技术相关研究对比如表5所示,溶液吸收式^[81]、转轮式^[74-75]、热管式^[82]3类主流方案在节能与经济性上各有优势,可依据地域气候、负荷特性与运维能力匹配选用。微电子洁净厂房典型空调系统工艺流程如图4(a)所示,系统由冷却水系统、冷冻水系统、洁净风系统及工艺排气系统构成,通过MAU、DCC、FFU等设备实现温湿度控制与洁净度保障,为热回收技术的系统级耦合提供了基础架构。新风热回收梯级处理系统较一次回风系统节能10%~15%,空调季运行费用降低12%~18%,综合效益突出^[80]。热回收技术与MAU+DCC系

统耦合,可实现冬夏无电无蒸汽供暖,进一步降低外部能源消耗,其中针对各系统的热回收方案节能效果对比如图4(b)所示:其中仅使用热回收冷机,可以降低38%能耗^[13];DCC+MAU耦合热回收方案节能率最高可达54.1%^[20],DCC+MAU+冷却塔梯级回收方案节能率约为33.1%^[56],而单一排风+MAU回收方案节能率仅为11.4%^[83],多系统耦合的梯级热回收路径优势显著。能量回收技术已从单一显热回收走向显/潜热全回收,从单点回收走向系统级梯级利用,技术成熟度与工程适配性持续提升^[84]。能量回收与温湿度独立控制、冷热源梯级供冷深度融合,成为洁净空调实现低碳、近零能耗运行的重要支撑^[85]。能量回收技术是破解冷热抵消、提升系统能效的重要路径,针对单一系统的节能范围达6%~38%。

表5 能量回收节能技术相关研究对比

Tab.5 Comparative study on energy recovery energy-saving technologies

序号	优化技术	节能率	独特适合气候	主要优点	主要缺点	参考文献
1	热管式显热回收	约6%	夏热冬冷	结构简单,回收期1.8年	仅回收显热,高湿工况一般	[82]
2	溶液吸收式全热回收	约8%	高湿湿热	显热+潜热全回收,效率最高	需溶液维护,成本略高	[81]
3	转轮式全热回收	新风能耗降30%	严寒寒冷	回收效率70%~80%,稳定可靠	交叉污染风险,需密封	[74-75]
4	冷机热回收	降38%	夏热冬冷	只利用热回收冷水机组	受选型限制,适用性受限	[13,85]

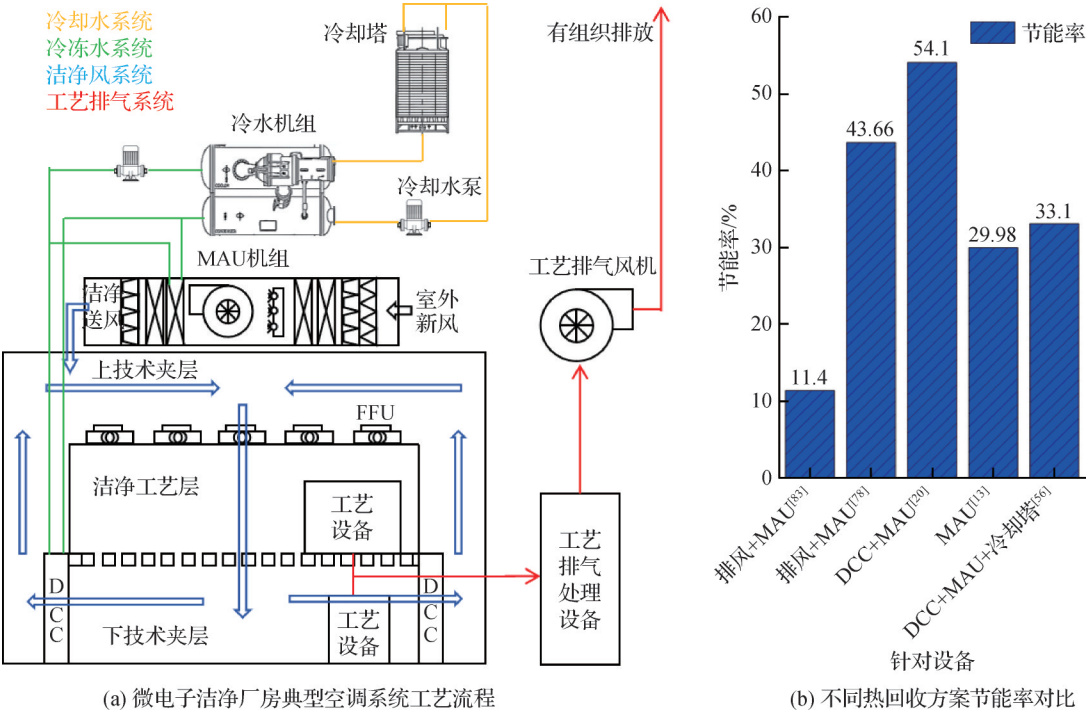


图4 微电子洁净厂房空调系统热回收方案节能效果对比

Fig.4 Comparison of energy-saving effects of heat recovery schemes for air conditioning in microelectronics clean workshops

2 微电子洁净空调系统的研究热点与前沿

近年来,微电子洁净空调节能技术呈现多技术

融合、数字赋能、低碳环保三大发展趋势。如图5所示,2020~2025年全球洁净空调节能领域三大研究方向的文献量呈现差异化增长态势:其中数字孪生

相关研究呈指数级爆发式增长,发文章从2020年不足800篇攀升至2025年超6 000篇,已成为领域绝对核心研究热点;多技术融合协同优化研究稳步增长,2022年后增速显著加快,2025年发文章突破150篇,印证其作为系统级节能核心路径的持续升温;低GWP(全球变暖潜值,Global Warming Potential)制冷剂应用研究在2022年出现阶段性低谷后快速回升,2023年起维持稳定增长,成为低碳转型背景下的重要前沿方向。3类技术的发展轨迹清晰反映了各类新技术、新方法、新理论不断涌现,推动洁净空调从单一设备节能走向系统协同、从经验运行走向智能决策、从高碳走向绿色低碳发展。本节围绕多技术融合协同优化、数字孪生与智能调控、低GWP制冷剂应用三大热点,系统梳理前沿进展、核心优势与未来方向。

2.1 微电子洁净空调系统多技术融合协同优化

多技术融合协同优化是当前洁净空调节能最核心的研究热点,其本质是打破单一技术节能瓶颈,实现全系统全局最优。如图6(a)所示,多技术融合的底层支撑是材料与配件级的节能单元,包括温湿度传感器、气动阀门、高效过滤器、变频器等,这些单元是实现精细化控制与高效运行的基础硬件保障。在此基础上,设备和子系统级的优化构成了节能体系的中层框架,如图6(b)所示:风系统FFU变频改造、冷热源冷水机组高效配置、能量回收热交换器应用、智能控制温湿度独立调控等子系统技术,通过初步耦合联动可实现风机能耗降低30%~40%^[68]、系统节能率提升25%~42%^[72]。向上延伸至系统级

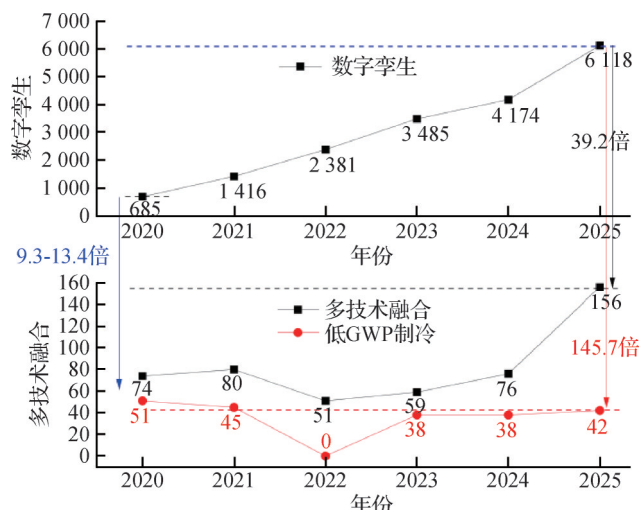


图5 2020~2025年洁净空调节能领域研究热点文献量统计
Fig.5 Statistics of literature quantity on research hotspots in clean air conditioning energy saving from 2020 to 2025

层面,如图6(c)所示,智能控制作为协同中枢,可将风系统、冷热源、能量回收子系统深度耦合,根据洁净间实时负荷动态调节冷机、水泵、FFU的运行状态^[86],形成覆盖设计、运行、维护的全生命周期优化闭环,实现全周期能耗最低化^[84,87]。从优化方法层面来看,如图6(d)所示,多目标优化算法与系统集成仿真技术的应用,推动了节能路径从“局部改善”向“系统优化”升级,打破了单一技术的边界限制,实现全系统全局最优^[88-89],已成为行业节能升级的主流路径。

多技术融合协同优化不断深入,依靠耦合机理清晰、工程化方法完备。现有研究已证实协同优化

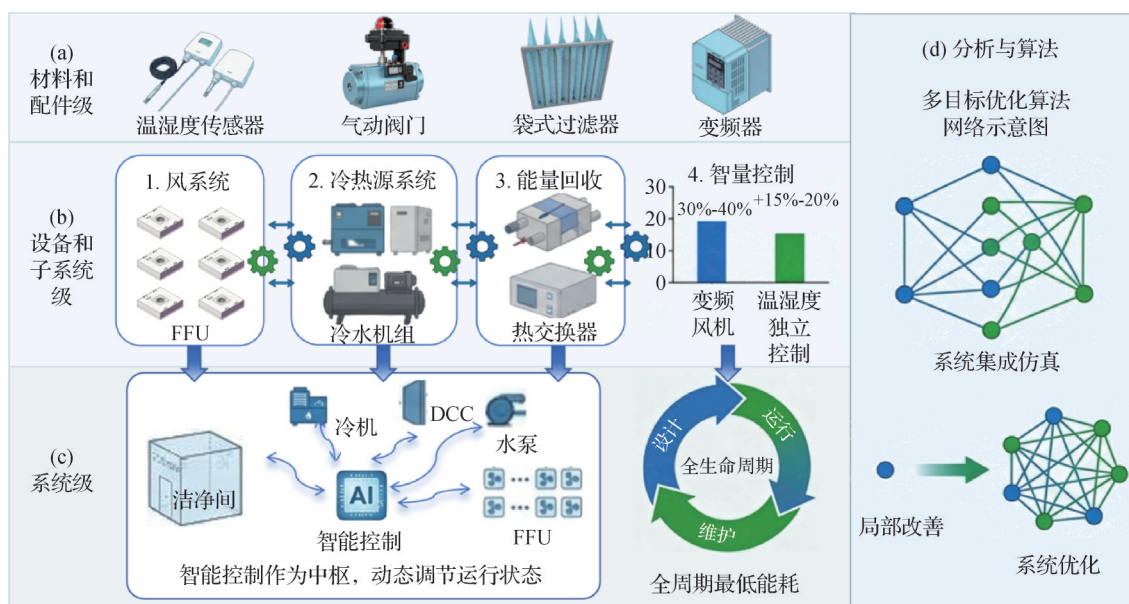


图6 微电子洁净空调节能领域多技术融合路线

Fig.6 Multi-technology integration route in microelectronics clean air conditioning energy saving

的优势,但风系统和冷热源、能量回收与智能控制之间的耦合机理仍需要进一步定量研究。引入多目标优化算法、全生命周期评价、系统集成仿真等工具,为协同优化提供了科学支撑,使得多约束、多工况、多目标优化能够实现。未来研究需关注典型气候、典型洁净等级、典型工艺场景,建立标准化协同优化流程和设计指南。同时应强化现场验证和长期运行监测,提高协同方案的稳定性、可靠性和可复制性。多技术融合协同优化将持续朝着更精准、更协同、更易实施的方向发展,不断释放系统级节能潜力。

2.2 微电子洁净空调系统的数字孪生与智能调控

数字孪生与智能调控是洁净空调领域迈向智能化、精细化运行的核心前沿,为实现“动态匹配、精准调控、零浪费”提供技术路径^[89]。数字孪生通过构建与物理系统完全映射的虚拟模型,实现运行状态实时感知、故障预判与策略优化,突破传统离线仿真与固定参数控制的局限。结合机器学习与负荷预测算法,数字孪生可提前感知热湿负荷、洁净度需求变化,主动调节系统输出,从“被动响应”转向“主动节能”。基于 DesignBuilder 与 Matlab/Simulink 搭建的联合仿真平台,可完整复现空调系统动态特性,实现全工况冷热抵消完全消除,节能与控稳双重提升。针对早期能源模型缺失问题,基于 ANN(人工神经网络,artificial neural network)构建的全气候、全场景通用能源模型^[90],以室内冷负荷、送风换气次数、新风比、MAU 送风温度为输入参数,可预测转折点温度、加热/加湿斜率、冷却/除湿斜率及基础能源消耗,支撑厂址规划与系统设计,如图 7(a)所示。同时,传统

PID 控制流程通过分程控制器驱动 MAU 加热盘管与 DCC 干冷盘管,实现洁净间温度的闭环调控。如图 7(b)所示,洁净室空调系统可采用 GA(遗传算法,genetic algorithm)与 PSO(粒子群优化算法,particle swarm optimization)等智能优化算法,通过选择、交叉、变异或速度与位置更新的迭代寻优过程,实现系统控制参数的全局最优整定。如图 7(c)所示,PSO 算法相对 PID 可实现 21.4% 的节能率,GA 算法相对 PID 可实现 31.0% 的节能率,并大幅提升高端制造场景的控制稳定性^[91]。物联网 IoT(物联网,internet of things)与多维度传感器网络为数字孪生提供底层数据,实现环境参数、设备状态、能耗数据的全天候全面采集与高速传输^[92-93]。相较于传统 PID 控制,智能算法与系统协同控制可实现 7.09% 的节能效果,大幅提升高端制造场景的控制稳定性^[4,91]。数字孪生与智能调控深度融合,形成感知、仿真、决策、执行的闭环,引领洁净空调进入智能节能新阶段。

数字孪生与智能调控的规模化落地,仍需在实时性、通用性、工程适配性上持续突破。当前数字孪生模型多以单系统、单厂房为主,跨区域、多厂房集群孪生研究较少,模型通用性与迁移能力有待提升。边缘计算、5G 通信、实时数据库的普及,将进一步提高孪生系统响应速度,满足毫秒级调控需求。轻量化建模、自动参数校准、少样本学习等技术,可降低数字孪生部署门槛,使其更适合存量厂房改造。未来研究将聚焦实时孪生、自适应调控、全域协同,推动智能控制从设备级、系统级走向厂区级能源互联网。数字孪生与智能调控将成为支撑微电子洁净空调实现“高精度、低能耗、高可靠”目标的关键支撑技术。

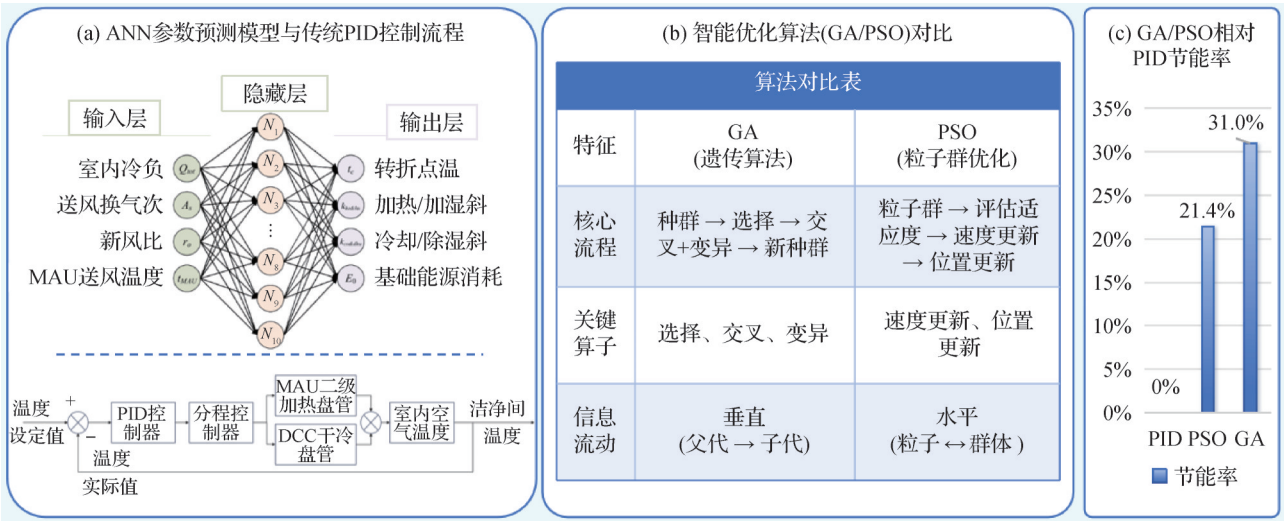


图7 洁净室空调系统的控制方法与节能效果对比

Fig.7 Comparison of control methods and energy-saving effects of cleanroom air conditioning systems

2.3 微电子洁净空调系统低GWP制冷剂应用

低GWP制冷剂应用是微电子洁净空调实现绿色低碳、符合全球环保政策的重要前沿方向,直接关系到全生命周期碳减排目标。传统HFCs(氢氟碳化物类制冷剂,hydrofluorocarbons)类制冷剂存在全球变暖潜值高、温室效应显著等问题,在全球“双碳”目标与制冷剂管控政策约束下,低GWP环保制冷剂替代已成为行业必然趋势。高润森等^[94]综述了冷链装备中自然制冷剂、HCs(碳氢类制冷剂,hydrocarbons)和HFOs(氢氟烯烃类制冷剂,hydrofluoroolefins)替代方案,可减排5%~20%;薛雯等^[95]模拟了6种低GWP制冷剂过冷循环,单位制冷量和COP均随过冷度增加;张迪等^[96]总结了-100~200℃下HFO-1234yf等低GWP制冷剂的应用进展。制冷剂替代应用的关键参数对比如图8所示:图8(a)展示了典型制冷剂的分子结构;图8(b)为常见冷水机组的组成;图8(c)的GWP柱状图体现了各制冷剂的温室效应差异;图8(d)为标准沸点柱状图。其中HFOs类制冷剂如R1234ze,GWP远低于传统R134a,可使水冷离心机组全生命周期气候性能LCCP(全生命周期气候性能,life cycle climate performance)指数降低10%,综合环保优势突出^[97]。HCs类混合制冷剂R290/R600a环境性能优异,能耗较R134a降低27.5%,已在中小型洁

净空调设备中开展示范应用^[98]。自然工质R744即CO₂的ODP(臭氧损耗潜值, ozone depletion potential)为0、GWP为1,极端低温下CO₂热泵制热COP仍大于2.0^[99],且夏季可同时实现制冷与免费热水回收,可以满足大型晶圆厂全年用热需求,应用前景广阔。各类低GWP制冷剂从环保与节能双重维度,为洁净空调系统低碳升级提供可行选择。低GWP制冷剂替代已从研究探索走向工程示范,成为绿色洁净空调的标志性技术。

低GWP制冷剂的规模化推广,仍需解决安全性、换热特性、系统适配性等关键问题。R290等HCs类制冷剂具有可燃性,需要强化防爆设计、泄漏监测与通风保障;CO₂跨临界循环运行压力较高,对冷机提出特殊要求。未来研究应重点面向微电子厂房高低温需求、精密控温等典型场景,开展制冷剂物性、换热特性、系统匹配的定量研究,形成专用设计规范与运维标准。同时应开展全生命周期成本与碳减排效益评价,为技术选型提供科学依据。随着材料、装备与控制技术的进步,低GWP制冷剂将逐步实现从中小型设备到大型冷机站、从常规工况到高精度工况的全面覆盖,推动微电子洁净空调真正走向低碳、安全、高效、可持续发展。

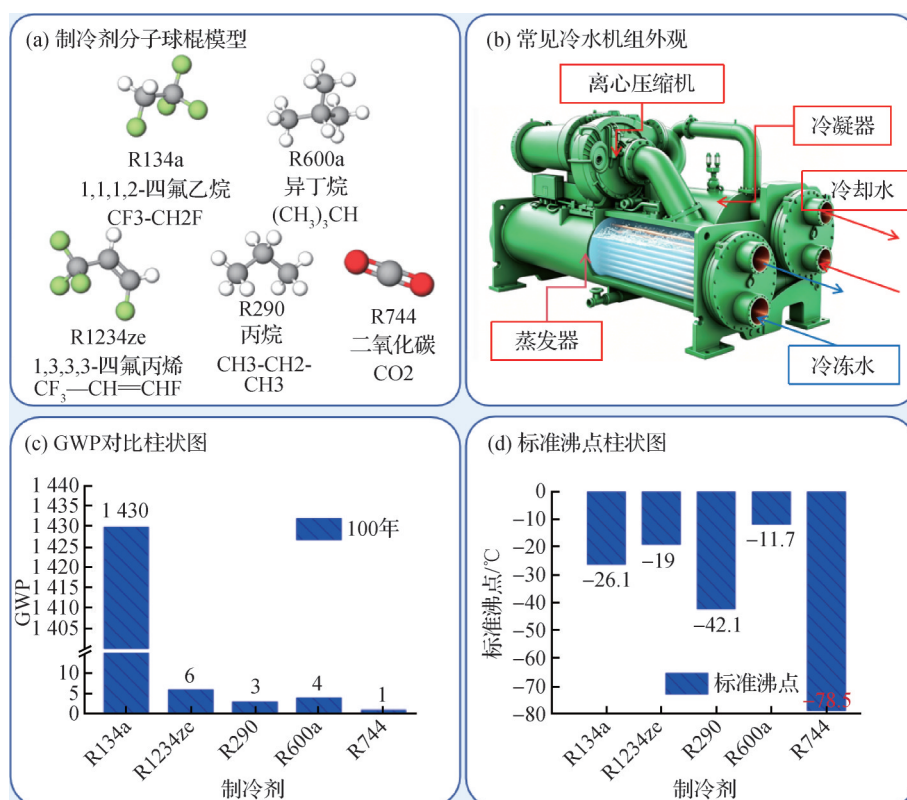


图8 制冷剂替代应用组合图

Fig.8 Application combination diagram of refrigerant substitution

3 微电子洁净空调系统节能技术现存关键问题

微电子洁净空调节能技术在快速发展的同时,仍面临工程适配不足、机理研究薄弱、评价体系缺失、标准支撑不够四大核心瓶颈,根据矛盾由大到小从0~5归一化结果如图9所示。现有技术多停留在实验室优化与局部改造阶段,在复杂工艺、变负荷、长期运行等真实工程场景中普遍存在落地难、效果弱、成本高的问题。多技术协同增效的底层机理尚未明晰,系统级优化仍依赖经验判断。全生命周期评价覆盖不全^[100-101],指标量化与核算方法不

统一,难以支撑科学决策与政策制定。行业能耗基准、检测方法、验证规范等基础标准缺失,制约节能技术规模化推广与产业化应用^[102]。本节从技术适配、融合机理、评价体系、基础标准4个维度,系统梳理当前领域亟待解决的关键问题。

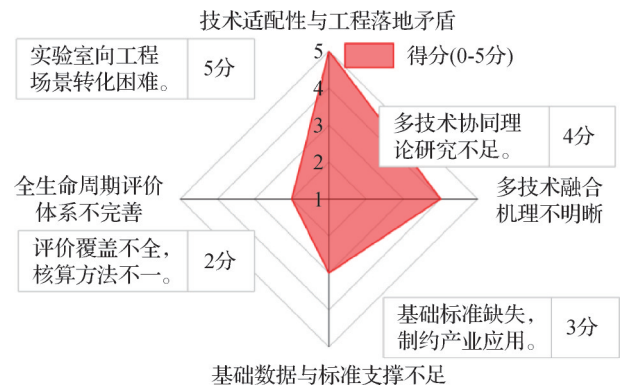


Fig.9 Radar chart of weight distribution of existing problems in energy-saving technologies

3.1 微电子洁净空调系统节能技术适配性与工程落地矛盾

当前节能技术大多在特定工作环境、生产工艺

条件下开发,在实际工程安装使用过程中会出现不匹配的问题。例如,非均匀送风技术在复杂工艺布局厂房中的应用效果不佳;低GWP制冷剂的可燃性与毒性限制了其在大型系统中的推广^[103];能量回收的投资回收期较长,影响企业应用积极性。此外,部分节能技术存在“节能不节费”现象,如变频设备在负荷波动较小的场景下难以快速回收成本。

3.2 微电子洁净空调系统节能多技术融合机理不明晰

在多技术融合进程里,技术相互之间的影响机制尚未被完全明晰。风系统优化和冷热源调控的耦合关系、智能控制算法与能量回收系统的协同机制等,都欠缺深入研究。当前研究多采用实验测试同数值模拟相结合的方式,难以全面呈现多因素耦合作用下系统的能耗特性,致使协同优化效果未达预期。且对于各种节能技术间的重要性排序、搭配选择次序,尚缺乏具体的参考指标与选用准则,在工程设计中只能依赖经验判断。

3.3 微电子洁净空调系统全生命周期评价体系不完善

现有研究多将重点放在运行阶段的能耗优化方面,对于设备生产、安装、拆除阶段的碳排放关注不足^[100]。现有评价指标主要集中在能耗与能效上,缺乏对环境影响、经济性及可靠性的综合考量^[100]。电子洁净厂房节能评价指标体系虽已初步建立,但部分指标,如工艺节能指标的量化方法尚未统一,并且缺少动态调整机制,很难适应不同工艺升级和技术迭代的需求^[102]。此外,制冷剂泄漏与回收环节的温室气体排放核算方法不完善,未被纳入现有评价模式。全生命周期各阶段评价指标存在不同程度的缺失,如表6所示,明确了全生命周期评价模式的不足之处,为后续模式完善指明了方向。

表6 全生命周期评价指标缺失情况统计表
Tab.6 Statistics of missing indicators in life cycle assessment

序号	阶段/指标类别/情况	能耗指标	碳排放指标	环境指标	经济性指标	可靠性指标
1	生产阶段:节能设备/材料生产过程	完全缺失	完全缺失	完全缺失	基本完善	基本完善
2	安装阶段:空调系统施工安装过程	完全缺失	完全缺失	完全缺失	基本完善	量化方法缺失
3	运行阶段:系统日常运行过程	基本完善当前研究核心	部分缺失	基本完善	量化方法缺失	量化方法缺失
4	回收阶段:设备、制冷剂回收处理过程	完全缺失	量化方法缺失	完全缺失	完全缺失	完全缺失

3.4 微电子洁净空调系统基础数据与标准支撑不足

微电子洁净空调系统的能耗特性和工艺参数、

环境条件关联紧密,然而当前基础数据的积累尚不充足。对于不同洁净等级、工艺类型而言,能耗基准值缺少统一标准,使得节能潜力评估、效果验证缺少

参考依据^[57]。此外,节能技术的检测与评价标准不完善,如非均匀送风的洁净度验证方法、能量回收效率的测试标准等未明确,这在某种程度上阻碍了节能技术的发展与项目实施^[75]。

4 微电子洁净空调系统节能技术未来发展方向

针对第3节提出的技术适配性不足、融合机理不明、评价体系缺失、标准支撑滞后四大核心问题,微电子洁净空调节能技术未来将围绕工程化落地、系

统级协同、全生命周期评价、标准化建设四大主线推进,如图10所示。技术层面,从单一设备优化向多技术深度融合、数字孪生智能调控升级,破解工程落地难题;机理层面,深化多系统耦合规律研究,构建全局最优节能体系;评价层面,完善全生命周期碳足迹核算方法,建立科学决策支撑;标准层面,补齐行业基准、检测方法、设计规范等短板,推动技术规模化推广。本节结合行业发展趋势与技术演进规律,提出四大核心发展方向,为领域研究与工程实践提供指引。

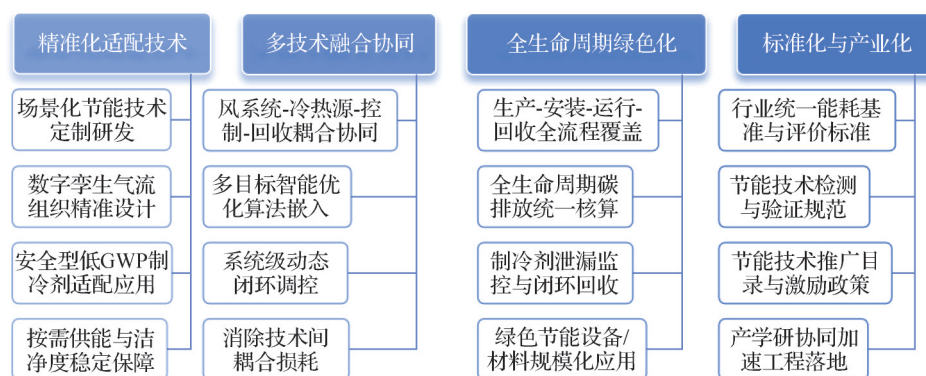


图10 未来技术研发重点与实施路径

Fig.10 Future key technology research and implementation paths

4.1 微电子洁净空调系统节能技术精准化与适配性技术研发

面向复杂工程场景的技术适配与落地优化,是破解理论与实践脱节、推动节能技术规模化应用的核心方向。未来研究需以真实微电子厂房为载体,针对不同洁净等级、工艺类型、气候区域,开展全工况、长周期的技术适配性研究,形成可复制、可推广的工程化解决方案。重点突破非均匀送风、按需通风等技术在设备密集、流场干扰强场景下的流场调控难题,优化气流组织设计方法,保障节能效果与洁净度双达标。针对低GWP制冷剂的安全与适配性问题,开发专用防爆系统^[103]、高效换热设备与智能泄漏监测技术^[104],推动其在大型冷源系统中的规模化应用。优化能量回收系统的经济性设计,通过模块化集成、成本管控缩短投资回收期,提升企业改造积极性。建立技术适配性评价模型,量化不同场景下的节能效果、可靠性与经济性,为工程选型提供科学依据。面向工程场景的技术适配与落地优化,将推动节能技术从实验室走向生产线,真正实现产业级节能增效。此外,在后续推广中,面向夏热冬冷及严寒地区洁净厂房的全年低能耗运行需求,低温环境下换热设备结霜结冰的精准预测与防控策略也值得进

一步关注和探索^[105]。

4.2 微电子洁净空调系统节能多技术融合协同优化

对多技术融合的耦合机理展开探索,并搭建系统级协同优化模型。例如,构造风、水、冷热源回收技术的耦合模型,以此研究各技术间的相互作用规律;开发多目标优化算法,在能耗、经济性、环境影响方面求取最大平衡点。此外,推动智能控制技术与数字孪生技术相互结合,建立可实时响应、动态调整的智能调控系统,提高系统在变负荷工况下的节能效果。

多技术深度融合、系统级全局优化,乃是突破单一技术节能瓶颈、达成能效最大化的关键途径^[106]。未来的研究需重点关注风系统、冷热源系统、智能控制、能量回收等技术的耦合机理,定量揭示各技术间的交互规律、增益边界、协同机制,建立多目标全局优化理论框架。需开发多技术融合的一体化节能系统,以智能控制为中枢,实现风、水、控、回收系统的动态协同和自适应调节,充分释放系统级节能潜力,实现1+1>2的协同增效。结合数字孪生技术,搭建全系统仿真平台,实现多技术融合方案在全工况下的模拟、优化与验证,降低工程试错成本。针对不同工

艺场景,建立标准化的多技术融合组合方案、设计流程,明确技术优先级、匹配顺序、运行策略。推动多技术融合从“简单叠加”朝着“有机协同”升级,从局部优化迈向全局最优。多技术深度融合与系统级全局优化,将成为未来微电子洁净空调节能的核心技术范式。

4.3 微电子洁净空调系统全生命周期绿色化发展

全生命周期碳足迹评价与低碳设计,是落实“双碳”目标、推动行业绿色可持续发展的关键方向。未来需构建覆盖设备生产、安装施工、运行维护、报废回收全流程的碳足迹核算体系,完善各阶段能耗、碳排放、环境影响的量化方法与评价指标。将碳足迹评价纳入洁净空调系统设计、改造与运维全流程,建立“低碳设计-低碳运行-低碳回收”的全生命周期管理模式。针对制冷剂泄漏、回收处理等薄弱环节,完善温室气体排放核算方法,将其纳入碳足迹评价核心指标。开发全生命周期优化工具,实现节能方案的能耗、碳排放、经济性多目标协同优化,筛选真正意义上的全周期最优方案^[107]。推动碳足迹评价与绿色建筑、低碳工厂认证体系衔接,为政策补贴、行业监管提供数据支撑。全生命周期碳足迹评价与低碳设计,将引领微电子洁净空调从单一节能向全面低碳转型。

4.4 微电子洁净空调系统的标准化与产业化推进

行业基础数据与标准体系建设,是规范技术发展、保障工程质量、推动产业升级的重要支撑。未来需建立全国统一的微电子洁净空调能耗基准数据库,覆盖不同洁净等级、工艺类型、气候区域的负荷特性、能耗水平、节能潜力等基础数据,为节能评估、项目验收提供客观依据^[85,108]。加快完善行业标准体系,制定非均匀送风、能量回收效率、智能控制精度等关键技术的检测方法与评价标准,填补现有标准空白。编制洁净空调节能技术设计指南、工程应用规范与运维手册,为工程实践提供标准化指导。推动基础数据与标准体系的国际化对接,提升我国在全球洁净空调节能领域的话语权。加强产学研用协同,建立数据共享、标准共建的行业生态,支撑节能技术高质量、规模化发展。行业基础数据与标准体系建设,将为微电子洁净空调节能技术的长远发展筑牢根基。

5 微电子洁净空调系统节能技术结论与展望

本文基于文献的计量与系统归纳评述,针对微电子洁净空调节能技术研究碎片化、工程适配性差、缺乏量化体系的行业现状,开展了多维度、体系化的节能技术梳理、量化对比与瓶颈研判研究,明确了洁净空调能耗分布特征、各技术节能潜力、现存核心问题与未来发展趋势,主要结论与展望如下:

1) 能耗特征清晰:微电子洁净空调为典型高能耗系统,运行能耗是普通公共建筑空调的10~30倍,占厂房总能耗的40%~60%;末端风机与中温冷机为主要耗能设备,节能改造重心清晰。

2) 技术路径有效:风系统优化、冷热源高效配置、智能控制、能量回收四大核心技术节能潜力显著,单一技术可实现5%~35%节能率,多技术融合协同可使综合节能率再提升15%~20%,系统级优化增效突出。

3) 瓶颈问题突出:当前行业节能技术适配性不足,多系统耦合的机理尚不明确,全生命周期评价不够完善、基础数据与标准有所缺失4项关键问题,致使理论节能潜力与工程落地效果之间存在显著偏差。

4) 前沿方向明确:未来将向精准适配、系统协同、全生命周期低碳、标准产业化方向发展。通过体系化技术升级,综合节能率有望突破40%、投资回收期缩短至2年以内,支撑高端电子制造绿色低碳转型。随着基础数据完善、核心技术成熟与政策扶持加强,微电子洁净空调有望在2030年前后实现高精度环境保障与低碳高效运行的深度协同,为我国高端电子制造绿色转型提供关键支撑。

本文受北京市科学技术委员会、中关村科技园区管理委员会首都信息服务数据中心低碳运行技术研究及示范、碳排放碳中和科技支撑课题(Z231100006123010)、河北省科学技术厅2024年度燕赵黄金台聚才计划骨干人才(科技平台)项目(244A7625D)、河北省科学技术厅中央引导地方科技发展资金项目(科技成果转化项目254Z4504G)资助。(The project was supported by Capital Information Service Data Center Low-carbon Operation Technology Research and Demonstration, Carbon Emission Reduction and Carbon Neutrality Technology Support Project (No. Z231100006123010), 2024 Yanzhao Golden Platform Talent Gathering Plan Backbone Talent (Science and Technology Platform) Project (No. 244A7625D), Central Government Guided Local Science and Technology Development Fund Project (Scientific and Technological Achievement Transformation Project

No. 254Z4504G.)

参考文献

- [1] 赵护印. 简仑电子洁净工业厂房的建筑节能设计[J]. 粘接, 2020, 42(4): 128-131. (Zhao Huyin. Brief discussion on building energy-saving design of electronic clean industrial plant[J]. Adhesion, 2020, 42(4): 128-131.)
- [2] 蒋梦奇, 李楠, 陶辰阳, 等. 芯片厂房洁净空调系统节能运行影响因素研究[J]. 暖通空调, 2022, 52(10): 161-167. (Jiang Mengqi, Li Nan, Tao Chenyang, et al. Influencing factors of energy efficient operation of clean air conditioning systems in chip workshops [J]. Journal of HV&AC, 2022, 52(10): 161-167.)
- [3] 贺志勇. 洁净厂房空调系统节能技术的研究[J]. 洁净与空调技术, 2018(1): 46-51. (He Zhiyong. Research on energy saving technology of clean room air conditioning system [J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2018(1): 46-51.)
- [4] Zeng Xinran, Li Chunhui, Li Xiaoying, et al. Energy efficiency optimization of air conditioning systems towards low-carbon cleanrooms: review and future perspectives [J]. Energies, 2025, 18(13): 3538.
- [5] Zhao Wenxuan, Li Hangxin, Wang Shengwei. Energy performance and energy conservation technologies for high-tech cleanrooms: state of the art and future perspectives [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 183: 113532.
- [6] 李芃达. 六部门发布《工业能效提升行动计划》推进重点行业绿色低碳发展[J]. 环境与生活, 2022(8): 20-21. (Li Pengda. Six departments issued the action plan for improving industrial energy efficiency to promote green and low-carbon development in key industries [J]. Environment and Life, 2022(8): 20-21.)
- [7] 董学鑫. 半导体厂房空调系统节能研究[J]. 价值工程, 2020, 39(15): 233-234. (Dong Xuexin. Research on energy saving of air-conditioning system in semiconductor factory[J]. Value Engineering, 2020, 39(15): 233-234.)
- [8] 杨志景. 洁净室净化空调系统的节能措施分析[J]. 科技创新与应用, 2019, 9(31): 147-148. (Yang Zhijing. Analysis of energy-saving measures for clean room purification air conditioning system [J]. Technology Innovation and Application, 2019, 9(31): 147-148.)
- [9] 石小雷. 浅谈洁净室净化空调系统的节能方案[J]. 中国设备工程, 2017(24): 96-97. (Shi Xiaolei. Discussion on energy saving scheme of clean room purification air conditioning system [J]. China Plant Engineering, 2017(24): 96-97.)
- [10] 蓝巧灵. 洁净室净化空调系统的节能探究[J]. 企业技术开发, 2017, 36(9): 41-43. (Lan Qiaoling. Research on energy saving of clean room purification air conditioning system [J]. Technological Development of Enterprise, 2017, 36(9): 41-43.)
- [11] Chang C K, Lin T, Hu S C, et al. Various energy-saving approaches to a TFT-LCD panel fab [J]. Sustainability, 2016, 8(9): 907.
- [12] Hu S C, Lin T, Huang S H, et al. Energy savings approaches for high-tech manufacturing factories[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2020, 17: 100569.
- [13] Tsao J M, Hu S C, Chan D Y, et al. Saving energy in the make-up air unit (MAU) for semiconductor clean rooms in subtropical areas [J]. Energy and Buildings, 2008, 40(8): 1387-1393.
- [14] Tsao J M, Hu S C, Xu Tengfang, et al. Capturing energy-saving opportunities in make-up air systems for cleanrooms of high-technology fabrication plant in subtropical climate [J]. Energy and Buildings, 2010, 42(11): 2005-2013.
- [15] Yu K T, Su C L, Kuo Jianlong. Variable recycled air controls of HVAC systems for energy savings in high-tech industries [C]//2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2016: 215-220.
- [16] Lu Yanyue, Chen J, Liu T C, et al. Using cooling load forecast as the optimal operation scheme for a large multi-chiller system [J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(8): 2050-2062.
- [17] Hu S C, Chuah Y K, Yen M C. Design and evaluation of a minienvironment for semiconductor manufacture processes [J]. Building and Environment, 2002, 37(2): 201-208.
- [18] Yin Jiawen, Liu Xiaohua, Guan Bowen, et al. Performance and improvement of cleanroom environment control system related to cold-heat offset in clean semiconductor fabs[J]. Energy and Buildings, 2020, 224: 110294.
- [19] Yin Jiawen, Zhang Tao, Ma Zhiyao, et al. Feasibility analysis of canceling reheating after condensation dehumidification in semiconductor cleanrooms [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 102589.
- [20] Yin Jiawen, Liu Xiaohua, Guan Bowen, et al. Performance analysis and energy saving potential of air conditioning system in semiconductor cleanrooms [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 37: 102158.
- [21] Ma Zhiyao, Guan Bowen, Liu Xiaohua, et al. Performance analysis and improvement of air filtration and ventilation process in semiconductor clean air-conditioning system [J]. Energy and Buildings, 2020, 228: 110489.
- [22] Ma Zhiyao, Liu Xiaohua, Zhang Tao. Measurement and optimization on the energy consumption of fans in semiconductor cleanrooms [J]. Building and Environment, 2021, 197: 107842.
- [23] Zhao Jiaan, Shao Xiaoliang, Li Xianting, et al.

- Theoretical expression for clean air volume in cleanrooms with non-uniform environments [J]. Building and Environment, 2021, 204: 108168.
- [24] Zhao Jiaan, Liang Chenjiyu, Wang Huan, et al. Control strategy of fan filter units based on personnel position in semiconductor fabs[J]. Building and Environment, 2022, 223: 109420.
- [25] Jia Lizhi, Liu Junjie, Wei Shen, et al. Study on the performance of two water-side free cooling methods in a semiconductor manufacturing factory [J]. Energy and Buildings, 2021, 243: 110977.
- [26] BROWN W K. Makeup air systems energy-saving opportunities[J]. ASHRAE Transactions, 1990, 96(2): 609-615.
- [27] Sun Wei. Cleanroom fan energy reduction—airflow control retrofit based on continuous, real-time particle sensing [J]. Journal of the IEST, 2019, 62(1): 11-25.
- [28] Xu Tengfang. Characterization of minienvironments in a clean room: design characteristics and environmental performance [J]. Building and Environment, 2007, 42(8): 2993-3000.
- [29] Villarreal S, Jimenez J A, Jin Tongdan, et al. Designing a sustainable and distributed generation system for semiconductor wafer fabs [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(1): 16-26.
- [30] Taboada H, Xiong Zhenhua, Jin Tongdan, et al. Exploring a solar photovoltaic-based energy solution for green manufacturing industry [C]//2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2012: 40-45.
- [31] Song Y H, Akashi Y, Yee J J. A study on the energy performance of a cooling plant system: air-conditioning in a semiconductor factory[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(8): 1521-1528.
- [32] Suzuki H, Hanaoka H, Ohkubo Y, et al. Energy saving in semiconductor fabs by out-air handling unit performance improvement[J]. IEEE, 2000:293-296.
- [33] Song G S, Yoo K H, Kang S Y, et al. An experimental study on energy reduction of an exhaust air heat recovery type outdoor air conditioning system for semiconductor manufacturing clean rooms [J]. Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 2009, 21(5): 273-281.
- [34] Čaja A, Kapjor A, Vantúch M, et al. Reducing the energy consumption of the air conditioning system in clean rooms using the idle mode[J]. System Safety: Human-Technical Facility-Environment, 2024, 6(1): 289-298.
- [35] Han Gang, Feng Guozeng, Tang Chunli, et al. Evaluation of the ventilation mode in an ISO class 6 electronic cleanroom by the AHP-entropy weight method[J]. Energy, 2023, 284: 128586.
- [36] 刘毅超, 樊洪明. 电子洁净厂房设备站脚高度对气流组织影响研究[J]. 洁净与空调技术, 2023(4): 22-26. (Liu Yichao, Fan Hongming. Airflow study of electronic cleanroom based on numerical simulation[J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2023(4): 22-26.)
- [37] 吴昌, 罗贤才, 葛小林, 等. 非均匀开孔率高架地板的电子洁净厂房气流组织CFD仿真初探[J]. 洁净与空调技术, 2020(4): 73-77. (Wu Chang, Luo Xiancai, Ge Xiaolin, et al. CFD simulation of air distribution in a large clean electronic workshop with non-uniform open-hole ratio elevated floor [J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2020(4): 73-77.)
- [38] Ozelame K, Maffessoni D. Commissioning-based analysis of heating, ventilation, and air conditioning systems in biopharmaceutical cleanrooms: enhancing energy efficiency and reducing cost [J]. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, 2024, 59: e2036.
- [39] 朱明明, 宣永梅, 贡欣, 等. 不同气流组织下某洁净室内流场研究[J]. 节能, 2016, 35(11): 19-23. (Zhu Mingming, Xuan Yongmei, Gong Xin, et al. Flow field study of different air distributions modes in a clean room [J]. Energy Conservation, 2016, 35(11): 19-23.)
- [40] 杨冕, 李倏帆, 刘喜松, 等. 生物制药厂房洁净空调步进式值班模式切换策略压差稳定性实测研究[J]. 建筑科学, 2025, 41(4): 223-230. (Yang Mian, Li Shufan, Liu Xisong, et al. Test study on differential pressure stability of stepwise duty mode switching strategy for clean air conditioning in biopharmaceutical industry[J]. Building Science, 2025, 41(4): 223-230.)
- [41] 赵晨煜, 林忠平, 张万毅, 等. PTFE高效滤料的容尘性能优化研究[J]. 洁净与空调技术, 2019(4): 1-5. (Zhao Chenyu, Lin Zhongping, Zhang Wanyi, et al. Optimizing study on dust loading performance of PTFE HEPA filter material [J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2019(4): 1-5.)
- [42] 刘晓亮. 超低阻高效ePTFE覆膜滤袋的开发与应用[J]. 上海纺织科技, 2025, 53(7): 60-62. (Liu Xiaoliang. Development of ultra-low resistance high-efficiency ePTFE laminated filter bag and its application [J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2025, 53(7): 60-62.)
- [43] 杨军. 医院洁净空调节能措施及其经济效益分析实例[J]. 中国医院建筑与装备, 2017, 18(8): 90-92. (Yang Jun. Analysis on energy saving measures and economic benefit of hospital clean air conditioning [J]. Chinese Hospital Architecture & Equipment, 2017, 18(8): 90-92.)
- [44] 牛彦静, 苗利婷, 张申申, 等. 高效空气过滤器性能实

- 验研究[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2010, 27(2): 69-72. (Niu Yanjing, Miao Liting, Zhang Shenshen, et al. Experimental study on HEPA filters performances [J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2010, 27(2): 69-72.)
- [45] 陈玲. 半导体洁净室的空气净化技术综述[J]. 集成电路应用, 2022, 39(1): 49-53. (Chen Ling. Overview of air purification technology in semiconductor cleanroom [J]. Applications of IC, 2022, 39(1): 49-53.)
- [46] 崔吉想, 张雪娇, 李春雷, 等. 对洁净空调箱送风量控制策略的讨论及测试[J]. 流程工业, 2023(8): 70-72. (Cui Jixiang, Zhang Xuejiao, Li Chunlei, et al. Discussion and test on air supply volume control strategy of clean air conditioning box[J]. Process, 2023(8): 70-72.)
- [47] 杨会敏, 黄伟环, 唐楚强. 基于差压原理的空调过滤网洁净度检测[J]. 家电科技, 2021(6): 102-106. (Yang Huimin, Huang Weihuan, Tang Chuqiang. Air-conditioning filter cleanliness detection based on the principle of differential pressure [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2021(6): 102-106.)
- [48] 林锡德. 医院组合式空气处理机组的维护保养[J]. 现代制造技术与装备, 2015, 51(5): 171-173. (Lin Xide. Hospital modular air handling units maintenance [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2015, 51(5): 171-173.)
- [49] 冯显恒. 基于高低温双冷水机组的恒温恒湿洁净车间空调系统节能性分析[J]. 洁净与空调技术, 2023(3): 84-89. (Feng Xianhuan. Energy saving analysis of constant temperature and humidity air conditioning system in clean workshop based on high and low temperature double chillers[J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2023(3): 84-89.)
- [50] Porowski M, Jakubiak M. Energy-optimal structures of HVAC system for cleanrooms as a function of key constant parameters and external climate [J]. Energies, 2022, 15(1): 313.
- [51] 邵森, 向文君, 赵卓洲, 等. 过渡季冷源低负荷工况下的补偿方案研究[J]. 工程技术, 2022(5): 16-18. (Shao Sen, Xiang Wenjun, Zhao Zhuozhou, et al. Study on compensation scheme of cold source in transition season under low load condition [J]. Engineering Science, 2022(5): 16-18.)
- [52] Hu S C, Tsao J M. A comparative study on energy consumption for HVAC systems of high-tech FABs [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(17/18): 2758-2766.
- [53] 张瑞, 罗定鑫, 李元阳, 等. 集中式空调系统冷却水变流量特性研究[J]. 制冷与空调(北京), 2021, 21(4): 65-71, 81. (Zhang Rui, Luo Dingxin, Li Yuanyang, et al. Research on variable cooling water flow characteristic of central air-conditioning system [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2021, 21(4): 65-71, 81.)
- [54] 刘拴强, 刘晓华, 江亿. 温湿度独立控制空调系统在医院建筑中的应用[J]. 暖通空调, 2009, 39(4): 68-73. (Liu Shuanqiang, Liu Xiaohua, Jiang Yi. Application of temperature and humidity independent control air conditioning system in hospital buildings [J]. Journal of HV&AC, 2009, 39(4): 68-73.)
- [55] Zhuang Chaoqun, Wang Shengwei, Shan Kui. Adaptive full-range decoupled ventilation strategy and air-conditioning systems for cleanrooms and buildings requiring strict humidity control and their performance evaluation [J]. Energy, 2019, 168: 883-896.
- [56] Zhao Wenxuan, Li Hangxin, Wang Shengwei. A generic design optimization framework for semiconductor cleanroom air-conditioning systems integrating heat recovery and free cooling for enhanced energy performance [J]. Energy, 2024, 286: 129600.
- [57] 陈英. 洁净厂房空调系统的特点与节能分析[J]. 中国高新技术企业, 2013(31): 72-73. (Chen Ying. Characteristics and energy saving analysis of air conditioning system in clean workshop [J]. China High-Tech Enterprises, 2013(31): 72-73.)
- [58] Zhao Yu, Li Nan, Tao Chenyang, et al. A comparative study on energy performance assessment for HVAC systems in high-tech fabs [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 39: 102188.
- [59] Zhao Wenxuan, Li Hangxin, Wang Shengwei. Performance analysis of air-conditioning systems for high-tech cleanrooms under different climate conditions [C]//The 13th International Conference on Applied Energy, 2021: 1-5.
- [60] 殷浩, 付茜, 丁德坤, 等. 集成式冷水机站在厂房节能改造中的应用[J]. 暖通空调, 2018, 48(5): 66-71. (Yin Hao, Fu Xi, Ding Dekun, et al. Application of integrated chiller station in energy saving retrofitting of workshops [J]. Journal of HV&AC, 2018, 48(5): 66-71.)
- [61] 陈可. 分段式制冷技术在洁净空调行业的应用分析[J]. 科学技术创新, 2024(8): 50-53. (Chen Ke. Application analysis of segmented refrigeration technology in clean air conditioning industry [J]. Scientific and Technological Innovation, 2024(8): 50-53.)
- [62] 王跃勇, 刘虎平. 谈暖通设计中的变频技术[J]. 山西建筑, 2018, 44(9): 87-88. (Wang Yueyong, Liu Huping. Discussion on the frequency conversion technology in HVAC [J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(9): 87-88.)
- [63] 胡士光, 李孝胜, 马艳香. 洁净室空调机组变频节能改造实例分析[J]. 暖通空调, 2013, 43(3): 71-73. (Hu

- Shiguang, Li Xiaosheng, Ma Yanxiang. Variable frequency energy saving reformation for air handing units in a clean room[J]. Journal of HV&AC, 2013, 43(3): 71-73.)
- [64] Chien C F, Chen Y J, Han Y T, et al. Industry 3.5 for optimizing chiller configuration for energy saving and an empirical study for semiconductor manufacturing [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 168: 105247.
- [65] 由玉文, 曹宝山, 李颖, 等. 洁净空调系统变新风量的节能控制研究[J]. 洁净与空调技术, 2010(2): 15-18. (You Yuwen, Cao Baoshan, Li Ying, et al. The research of energy saving control on variable fresh air volume in cleaning air conditioning system [J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2010 (2) : 15-18.)
- [66] 张印洲. 洁净空调冷水阀门一阶惯性滞后PID独立控制方法[J]. 机械与电子, 2024, 42(1): 31-36. (Zhang Yinzhou. First order inertia lag PID independent control method for cold water valve of clean air conditioner [J]. Machinery & Electronics, 2024, 42(1): 31-36.)
- [67] 赵丽娜, 盛志国, 董明. 医院洁净空调系统节能措施分析[J]. 设备管理与维修, 2024(12): 178-181. (Zhao Lina, Sheng Zhiguo, Dong Ming. Analysis of energy saving measures for hospital clean air conditioning system [J]. Plant Maintenance Engineering, 2024(12): 178-181.)
- [68] Meng Han, Liu Junjie, Shang Wenzhe, et al. Multi-agent distributed control method for clean air-conditioning systems: balancing cleanliness, pressure and energy consumption[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 107: 112806.
- [69] 王文文, 朱尧. 洁净室空调通风系统节能措施探讨[J]. 城市建筑, 2017, 14(8): 349. (Wang Wenwen, Zhu Yao. Discussion on energy-saving measures of air conditioning and ventilation system in clean room [J]. Urbanism and Architecture, 2017, 14(8): 349.)
- [70] 张娜, 柏宁娟, 胡茜. 浅谈分程控制系统在工业自动化中的应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2013(5): 76-79. (Zhang Na, Bai Ningjuan, Hu Qian, et al. Discussion on the application of split-ranging control system in industrial automation [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2013(5): 76-79.)
- [71] 汪延璐. 热回收节能技术在洁净空调系统中的应用[J]. 科技与创新, 2021(11): 174-175. (Wang Yanlu. Application of heat recovery energy-saving technology in clean air conditioning system [J]. Science and Technology & Innovation, 2021(11): 174-175.)
- [72] 鲁家彤, 张超旭, 董晓菲, 等. 液体循环式热回收系统的模型建立及节能分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2025, 55(4): 149-159. (Lu Jiatong, Zhang Chaoxu, Dong Xiaofei, et al. Model establishment and energy-saving analysis of liquid circulation heat recovery systems [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(4): 149-159.)
- [73] 张贤康, 司劲松. 热回收水在洁净空调系统中的节能应用与分析[J]. 节能技术, 2025, 43(5): 469-474. (Zhang Xiankang, Si Jinsong. Energy-saving application and analysis of heat recovery water in clean air conditioning system [J]. Energy Conservation Technology, 2025, 43(5): 469-474.)
- [74] 顾冬明, 杨一心. 医药净化空调系统的节能措施[J]. 暖通空调, 2018, 48(7): 63-66. (Gu Dongming, Yang Yixin. Energy saving measures of pharmaceutical purification air conditioning systems [J]. Journal of HV&AC, 2018, 48(7): 63-66.)
- [75] 朱俭峰. 医药工业空调带转轮热回收装置的工程设计和节能分析[J]. 洁净与空调技术, 2012(4): 28-38. (Zhu Jianfeng. Pharmaceutical industry air conditioner with whell heat recovery device of engineering design and energy saving analysis [J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2012(4): 28-38.)
- [76] 胡芳丽, 刘辉, 王群芳. 洁净空调系统节能措施简析[J]. 科技与创新, 2025(7): 189-192. (Hu Fangli, Liu Hui, Wang Qunfang. Analysis on energy saving measures of clean air conditioning system [J]. Science and Technology & Innovation, 2025(7): 189-192.)
- [77] 陈晓阳, 从琳, 张婷, 等. 溶液调湿空气处理技术的研究进展[J]. 暖通空调, 2011, 41(01): 21-27. (Chen Xiaoyang, Cong Lin, Zhang Ting, et al. Research progress of air handling technology with solution humidity adjustment [J]. Journal of HV&AC, 2011, 41(1): 21-27.)
- [78] Tang Chunli, Sun Shitong, Li Siwen, et al. Energy-saving optimization of MAU integrating a two-way fresh air heat exchanger and the performance comparison across three cities [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 278: 127281.
- [79] 王维蔚, 王辉涛, 韩金蓉, 等. 降低再热能耗的空调热回收系统分析[J]. 化工进展, 2018, 37(11): 4181-4189. (Wang WeiWei, Yu, Wang Huitao, et al. Analysis of air conditioning heat recovery system for reducing reheate energy [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(11): 4181-4189.)
- [80] 陈益武. 新风热回收梯级处理的洁净空调系统节能分析[J]. 制冷与空调(四川), 2023, 37(5): 694-698. (Chen Yiwu. Energy-saving analysis of the clean air-conditioning system based on cascade processing technology about fresh air heat recovery [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2023, 37(5): 694-698.)
- [81] 韩智香. 洁净厂房溶液调湿空调技术应用的节能研究

- [J]. 上海节能, 2018(6): 432-436. (Han Zhixiang. Energy-saving analysis of the liquid desiccant air conditioning technology application in the clean workshop [J]. Shanghai Energy Conservation, 2018(6): 432-436.)
- [82] 万思敏. 洁净室空调系统排风热回收技术分析[J]. 消费电子, 2024(10): 45-47. (Wan Simin. Analysis of exhaust heat recovery technology in clean room air conditioning system [J]. Consumer Electronics Magazine, 2024(10): 45-47.)
- [83] Kircher K, Shi X, Patil S, et al. Cleanroom energy efficiency strategies: modeling and simulation [J]. Energy and Buildings, 2010, 42(3): 282-289.
- [84] 鄂天放. 洁净厂房建筑节能措施应用探讨[J]. 数字化用户, 2026(6): 91-93. (E Tianfang. Discussion on the application of energy-saving measures in clean workshop building [J]. Digitization User, 2026(6): 91-93.)
- [85] 涂有, 涂光备. 话说微电子工业洁净室的节能(2)——空调方案、设备选择和余热利用[J]. 暖通空调, 2023, 53(1): 25-33. (Tu You, Tu Guangbei. Discussion on energy conservation measures of cleanrooms in microelectronics industry (2): Air conditioning scheme, device selection and waste heat utilization [J]. Journal of HV&AC, 2023, 53(1): 25-33.)
- [86] 王云莉, 林忠平, 张万毅, 等. 基于生命周期评价的FFU碳足迹分析[J]. 洁净与空调技术, 2024(2): 39-45. (Wang Yunli, Lin Zhongping, Zhang Wanyi, et al. Analysis on carbon footprint of FFU based on lifecycle assessment [J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2024(2): 39-45.)
- [87] 张景姿. 电子洁净厂房建设全生命周期建设成本管理[J]. 城市建筑与发展, 2025, 6(17): 1-3. (ZHANG Jingzi. Whole life cycle construction cost management of electronic clean workshop [J]. Urban Architecture and Development, 2025, 6(17): 1-3.)
- [88] 朱申琳. 工业建筑暖通空调系统的工艺适配与节能优化设计[J]. 工程建设, 2026, 9(2): 85-88. (ZHU Shenlin. Process adaptation and energy-saving optimization design of HVAC system in industrial buildings [J]. Engineering Construction, 2026, 9(2): 85-88.)
- [89] 王彦杰. 电子厂房能源管理系统应用平台开发研究[J]. 安装, 2023(S1): 126-127. (WANG Yanjie. Research on development of application platform for energy management system in electronic workshop [J]. Installation, 2023(S1): 126-127.)
- [90] Zhao Wenxuan, Li Hangxin, Wang Shengwei. An ANN-based generic energy model of cleanroom air-conditioning systems for high-tech fabrication location and technology assessments [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 216: 119099.
- [91] Wang K J, Dagne T B, Lin C J, et al. Intelligent control for energy conservation of air conditioning system in manufacturing systems [J]. Energy Reports, 2021, 7: 2125-2137.
- [92] 李帮贵. 制药厂的物联网空调控制系统研究[J]. 中国新技术新产品, 2014(4): 79. (Li Banggui. Research on air conditioning control system of Internet of Things in pharmaceutical factory [J]. China New Technologies and Products, 2014(4): 79.)
- [93] 张洁, 何军涛. 基于蓝普锋大型PLC的洁净厂房暖通空调集中监控系统[J]. 自动化博览, 2021, 38(4): 35-37. (Zhang Jie, He Juntao. Centralized monitoring system of HVAC in clean workshop based on Lanpufeng large PLC [J]. Automation Panorama, 2021, 38(4): 35-37.)
- [94] 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. (Gao Runmiao, Song Mengjie, Gao Enyuan, et al. Review on greenhouse gas reduction related to refrigerants in cold chain [J]. CIESC Journal, 2023, 74(S1): 1-7.)
- [95] 薛雯, 张华, 刘宗麟. 低GWP制冷剂的过冷制冷循环性能对比分析[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(5): 505-511. (Xue Wen, Zhang Hua, Liu Zonglin. Comparative analysis of subcooling refrigeration cycle performance for low-GWP refrigerants [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(5): 505-511.)
- [96] 张迪, 郭智恺, 于万金, 等. 新型低GWP制冷剂在-100~200℃的应用研究进展[J]. 制冷学报, 2024, 45(3): 23-37. (Zhang Di, Guo Zhikai, Yu Wanjin, et al. Research progress on the application of novel low GWP refrigerants in the temperature range from -100 °C to 200 °C [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(3): 23-37.)
- [97] Akinseloyin M O, Hall C, Stallbaumer-Cyr E M, et al. Analyzing the carbon dioxide emissions of R134a alternatives in water-cooled centrifugal chillers using the life cycle climate performance framework [J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1293993.
- [98] Cao R, Qi Y. The research progress of new environmental protection refrigerant mixture R290/R600a [J]. Journal of Advances in Physical Chemistry, 2016, 5(4): 97-104.
- [99] 管孝强. 跨临界CO₂制冷循环系统运行特性与能效分析[J]. 制冷, 2026, 45(2): 59-62. (Guan Xiaoqiang. Operating characteristics and energy efficiency analysis of transcritical CO₂ refrigeration cycle system [J]. Refrigeration, 2026, 45(2): 59-62.)
- [100] 郝志刚, 魏庆芑, 邓杰文, 等. 公共建筑空调系统全过程管理方法研究(1): 方法概况[J]. 暖通空调, 2018, 48(12): 138-144. (Hao Zhigang, Wei Qingpeng, Deng

- Jiewen, et al. Research on whole process management method of air conditioning system in public buildings (1): method profile [J]. Journal of HV&AC, 2018, 48 (12): 138-144.)
- [101] 石宇. 民用建筑典型空调的生命周期评价[J]. 中国建材科技, 2025, 34 (12): 45-49. (Shi Yu. Life cycle assessment of typical air conditioning in civil buildings[J]. China Building Materials Science & Technology, 2025, 34 (12): 45-49.)
- [102] Solano - Olivares K, Romero R J, Santoyo E, et al. Life cycle assessment of a solar absorption air-conditioning system [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 240: 118206.
- [103] 沈军, 黄宇杰, 钟权, 等. 混合物 R1234yf/R290 和 R1234ze (E)/R290 的可燃极限研究 [J]. 制冷学报, 2025, 46 (4): 22-28. (Shen Jun, Huang Yujie, Zhong Quan, et al. Research on the flammability limits of R1234yf/R290 and R1234ze (E)/R290 mixtures [J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(4): 22-28.)
- [104] 董晓强, 李坤, 刘玉婷, 等. 氨制冷机房氨气泄漏扩散的数值模拟[J]. 制冷学报, 2017, 38(6): 12-19. (Dong Xiaoqiang, Li Kun, Liu Yuting, et al. Numerical simulation of the ammonia-leakage diffusion in ammonia refrigeration room [J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38 (6): 12-19.)
- [105] 余思锐, 宋孟杰, 沈俊, 等. 低温静止与运动表面结冰特性预测技术研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(10): 150-168. (Yu Sirui, Song Mengjie, Shen Jun, et al. Research progress on icing characteristic prediction technologies for low temperature stationary and moving surfaces [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(10): 150-168.)
- [106] 薛晓, 王新利. 多联机节能技术的转型趋势及零碳路径分析[J]. 科技与创新, 2025(23): 170-172. (Xue Xiao, Wang Xinli. Transformation trend and zero-carbon path analysis of multi-connected energy-saving technology [J]. Science and Technology & Innovation, 2025 (23): 170-172.)
- [107] 石新新, 何延隆. 建筑工程中的暖通空调节能技术应用 [J]. 建设科技, 2025 (24): 81-83. (Shi Xinxin, He Yanlong. Application of HVAC energy-saving technologies in building engineering [J]. Construction Science and Technology, 2025(24): 81-83.)
- [108] 肖周贵. 商业综合建筑空调节能设计策略研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2026, (2): 148-150. (XIAO Zhougui. Research on energy-saving design strategies for air conditioning in commercial complex buildings [J]. Intelligent Building and Smart City, 2026, (2): 148-150.)

通信作者简介

宋孟杰,男,教授,北京理工大学机械与车辆学院,18811726830,E-mail:mengjie.song@bit.edu.cn。研究方向:寒湿环境冰霜防控等。

About the corresponding author

Song Mengjie, male, professor, School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, 86-18811726830, E-mail: mengjie.song@bit.edu.cn. Research fields: frost and ice prevention in cold and humid environments, etc.