

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-12

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250128001

集中空调系统末端研究现状与展望

韩逸潇¹ 刘寿松² 王志华¹ 王沅浩¹

(1 西安交通大学人居环境与建筑工程学院 西安 710049; 2 中国建筑科学研究院有限公司 北京 100013)

摘要 在全球能源危机与环境污染日益加剧的背景下,空调系统的高能耗特性及其显著的碳排放问题已成为制约可持续发展的重要因素。作为空调系统的关键组成部分,末端装置的性能优劣对提升系统整体能效具有决定性作用。本文深入探讨了集中空调系统末端技术的最新研究进展,系统性地综述了对流传热末端(风机盘管、变风量机组)及辐射传热末端等类型末端的工作原理、技术演进、数学模型构建、智能控制策略及故障诊断方法等核心内容,通过对比分析各类末端技术的性能特征与适用场景,阐述现有技术体系存在的局限性,并基于能效提升与节能减排的双重目标,提出了未来空调末端技术的发展方向与创新路径,为推进暖通空调领域的绿色转型提供了理论依据与技术支持。

关键词 空调末端;仿真建模;控制策略;故障诊断;节能优化

中图分类号: TU831.3;TU831.7

文献标识码: A

Research Status and Prospects of Terminals of Central Air-Conditioning Systems

Han Yixiao¹ Liu Shousong² Wang Zhihua¹ Wang Fenghao¹

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China; 2. China Academy of Building Research, Beijing, 100013, China)

Abstract In the context of the global energy crisis and the increasingly severe environmental pollution, the high energy consumption and significant carbon emissions of air-conditioning systems have become important factors restricting sustainable development. As a crucial component of air-conditioning systems, the performance of terminal devices contributes significantly to the enhancement in the overall energy efficiency of the system. This study examines the latest research progress in terminal technologies for central air-conditioning systems. It systematically reviews the core contents of various types of terminals, such as convective heat-transfer terminals (fan-coil units and variable air-volume units) and radiant heat-transfer terminals, including their operating principles, technological evolution, mathematical-model construction, intelligent-control strategies, and fault-diagnosis methods. The limitations of the existing technical systems are expounded by comparing and analyzing the performance characteristics and applicable scenarios of different terminal technologies. Based on the goals of energy-efficiency improvement, energy conservation, and emission reduction, development directions and innovative paths for future air-conditioning terminal technologies are proposed, thus providing a theoretical basis and technical support for promoting green transformation in the fields of heating, ventilation, and air-conditioning.

Keywords air-conditioning terminal; simulation modeling; control strategy; fault diagnosis; energy-saving optimization

随着社会发展与经济活动增强,我国能源消耗持续攀升,2023年能源消耗总量达57.2亿t标准煤,CO₂排放量增长至126亿t,减碳任务艰巨^[1]。在此背景下,发展低碳经济成为必然选择。

HVAC(heating, ventilation and air conditioning)系统在建筑中承担调节室内环境的重任,但其运行能耗与碳排放较高,建筑领域碳排放与能耗占比较为可观。其中,公共建筑的空调系统能耗已接近其总

能耗的50%,且呈逐年上升趋势^[2]。因此,推动制冷空调行业节能技术革新,特别是提升空调末端节能水平,对实现“双碳”目标至关重要。图1所示为典型公共建筑与空调系统能耗分布情况。

对于整个空调系统,空调末端占据重要地位,主要负责将制冷剂的热量传递到外界,实现空调系统的制冷或制热功能。为满足人体的舒适性要求,房间内热湿参数通常设计为夏季干球温度为24~27℃,

基金项目:十四五国家重点研发计划(2023YFC3806402)资助项目。
(The project was supported by the National Key Research and Development Program during the 14th Five-Year Plan Period (No. 2023YFC3806402).)

收稿日期:2025-01-28;修回日期:2025-04-08;录用日期:2025-05-27

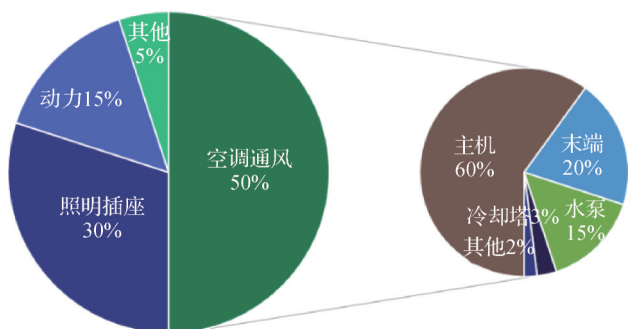


图1 典型公共建筑与空调系统能耗分布^[3]

Fig.1 Energy consumption distribution of typical public buildings and air-conditioning systems^[3]

相对湿度为50%~60%;冬季干球温度为18~24℃,相对湿度为40%~50%^[4],以此来确保空调系统在满足室内环境需求的同时将运行能耗维持在合理阈值

内。因此,亟需通过技术创新提升系统能效指标,促进空调末端技术的进步。聚焦于末端设备的结构优化与控制策略革新,结合前沿的创新技术和发展理念,打造先进的建模与控制策略。该研究路径可以构建环境参数精准控制、运行成本有效降低、碳排放显著减少的综合性解决方案。

为系统梳理研究脉络并避免共性内容重复,本文首先基于建模原理与控制策略对末端技术进行分类总结,继而针对对流式、辐射式及复合式末端的特性差异,分别探讨其技术演进规律与应用挑战。通过分析归纳末端结构、建模方法及控制逻辑,最终提出空调末端的未来发展路径。图2所示为本文的末端装置综述流程。

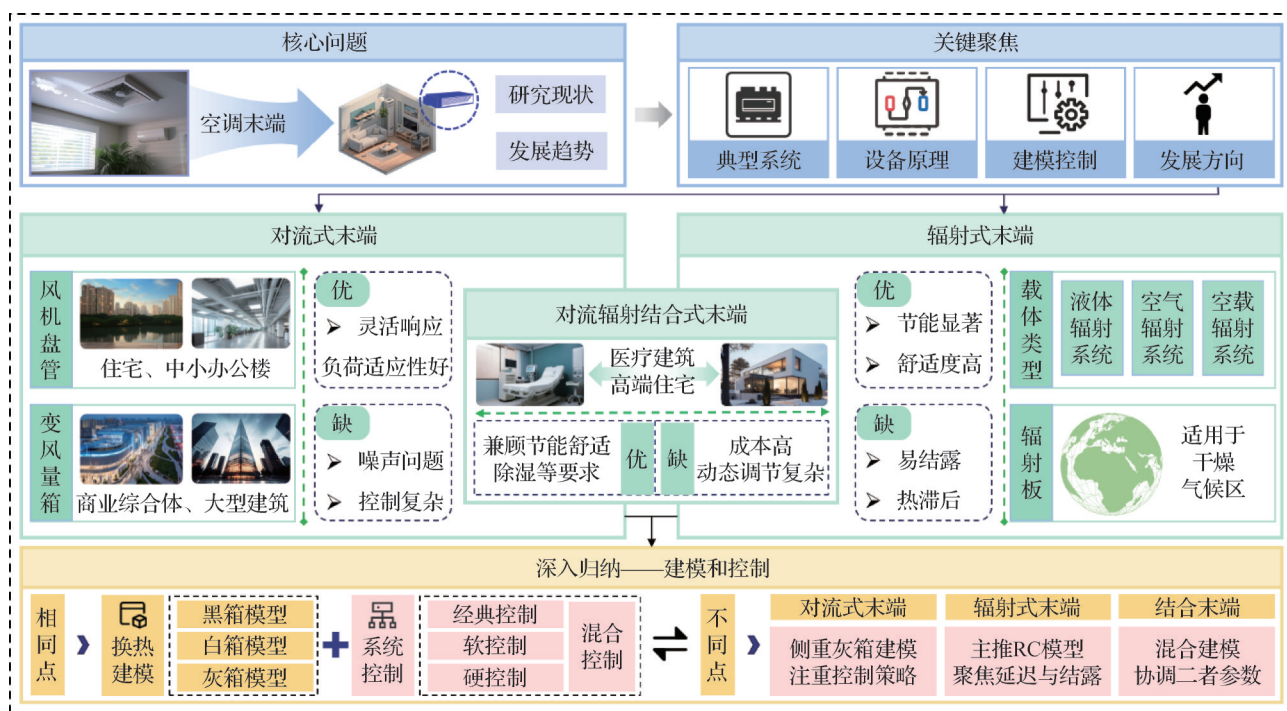


图2 末端装置综述流程

Fig.2 Flowchart of the review of terminal devices

1 空调末端技术发展综述

1.1 末端分类

受各地区的气候条件、经济条件及政策等因素制约,空调末端呈多样化形式发展。常用的末端设备根据传热机理可分为:1)对流传热末端,如风机盘管、变风量箱、新风机、多联机、空气处理机组(地板嵌入式空调器)等;2)辐射传热末端,如传统辐射顶板、地板(地暖盘管、毛细管)、顶板+地板、毛细管等;3)辐射与对流结合末端,如主动/被动式冷梁系统等。图3所示为末端装置分类。

1.2 末端装置建模原理

为了更好地提升末端性能,进行精确的建模设计是十分必要的。对于各类末端,在整体上建模方法主要有黑箱模型、白箱模型和灰箱模型3类。其中,黑箱模型指不考虑风机盘管的内部物理机理,完全依赖实验数据,直接根据输入和输出来确定模型;而白箱模型主要依靠对末端内部结构及换热过程的深入分析来建立联系;灰箱模型通过将实际机理与大量数据相结合共同构造模型,是黑箱与白箱法的一种折中方案,一般具有较强的物理可解释性(即模型结构与参数能反映实际系统的物理或机理含义)



(a) 末端装置示意图



(b) 不同末端分类

图3 不同末端类型分类

Fig.3 Display diagrams of different terminal types

与准确度。

不同模型具有不同的特性,具体而言,数据驱动模型应用较多,其性能高度依赖于训练数据的规模与质量,但在实际工程应用中,获取充足且具有代表性的样本数据往往面临诸多挑战,这一数据瓶颈严重制约了模型的预测性能。更为关键的是,若模型训练过程中的超参数(如训练精度、迭代周期等)设置不当,极易导致过拟合问题,导致模型在训练集范围内表现出色,却难以保证对训练集外数据的泛化能力,从而显著降低预测结果的可靠性。因此,要提高黑箱模型实际应用价值,需做到:建立科学的数据采集与预处理机制,保障训练数据质量;依工程实际选自适应算法优化参数和模型;用交叉验证等评估模型泛化性能,构建最优预测模型体系^[5]。此外,机理模型虽能通过物理机理揭示换热规律,但因依赖详实参数与实验验证而应用受限。半物理模型融合机理方程与数据驱动,可在有限数据下兼顾精度与泛化性,成为更具工程实用性的方案。然而,如何实现物理原理与数据方法的高效协同,尤其是灰箱模型的统一处理机制,仍需深入研究。

1.3 末端控制理论基础

末端建模的准确度保证了输入输出参数具有稳定的量化关系。要降低系统能耗,提高舒适度,还需要使用合理的控制策略来平衡系统的综合效能。近年来,由于数据存储、计算和传输等技术的快速发展,各种先进的控制技术被广泛用于空调系统的控制^[6]。空调系统的控制技术主要分为经典控制、软控制、硬控制、混合控制4大及其他方法^[7]。首先,经典控制即为开关控制与PID控制等,这类控制简单,但是波动大,抗干扰能力差,在现有很多热惯性大的HVAC系统里使用已经较为乏力。其次,软控制是指基于模糊控制、神经网络等技术的控制手段,应用于建筑运行领域具有较好的节能潜力。此外,硬控制技术是基于控制理论,如非线性系统,模型预测控制(model predictive control, MPC)等技术。在众多技术中, MPC凭借多目标动态优化能力,在耦合热惯性大的HVAC系统中展现出强大的应用前景。最后,还有很多混合控制方法及其他类型方法,如强化学习、决策控制等应用于系统优化控制。现有研究表明,空调系统控制技术在不断演进,随着建筑数字化进程加速与计算硬件升级,数字化、轻量化、多元融合的控制算法将成为主流,推动空调系统向“感知-预测-优化”闭环的智慧化方向发展。

2 对流式末端发展详述

2.1 风机盘管

2.1.1 发展历程及运行效能

在空调系统的末端中,风机盘管作为典型的对流式空调末端设备,其核心结构由换热盘管、离心风机及驱动电机等组件构成。工作原理依托于冷/热水介质与室内空气间的强迫对流传热:流经盘管的水介质通过管壁与肋片进行显热交换,驱动风机使室内空气流经盘管表面完成冷却或加热过程,进而实现室内热湿环境的调控^[8]。该技术自1938年由一家美国公司实现工程应用^[9],我国相关技术始于1966年国产化试制阶段。早期产品型号有限,行业标准建立后产品谱系不断完善,加工工艺革新促使其规模化应用,如今已成为集中式空调系统主流末端形式。调研数据表明我国4大城市公共建筑中72%采用风机盘管系统^[10-11]。图4所示为风机盘管发展历程。

中央空调风机盘管按照形式分为:卧式暗装、卧式明装、立式暗装、立式明装、卡式5种^[6]。图5所示为公共建筑风机盘管形式。

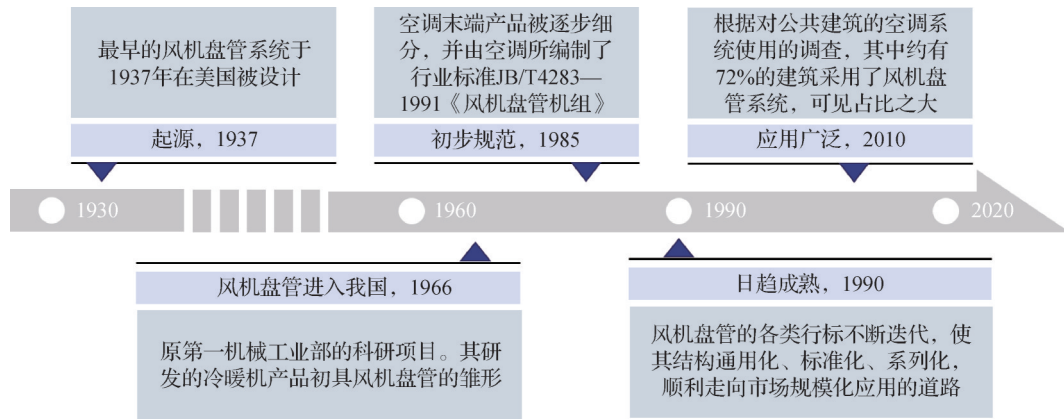


图4 风机盘管发展历程

Fig.4 Development history of fan coil units

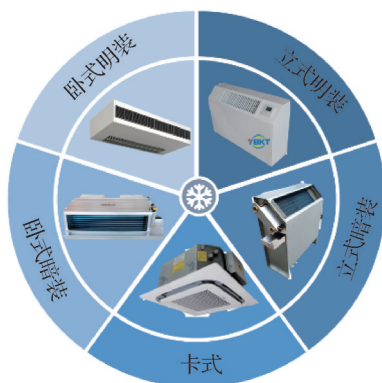


图5 公共建筑风机盘管形式

Fig.5 Fan coil unit forms in public buildings

在非公共建筑中还有壁挂式和立柱式2类。实际应用中会根据不同的建筑内部布局,设计选择最优的风机盘管形式。

在风机盘管的运行当中,其传热传质能力受到如环境温湿度、冷冻水温度等诸多因素影响。当其处于热带高湿地区,由于气温高且湿度大,风机盘管的除湿能力受到限制,去除的水分量较低,无法使室内湿度达到舒适水平^[12]。而在不同冷冻水温度下,风机盘管性能同样会受到影响。这是因为随着冷冻水温度的升高,其与室内空气之间的传热温差减小,进而导致换热性能降低,制冷量减少^[13]。研究表明,对于4排盘管,冷冻水供水温度每升高1℃,其换热量将降低6.13%,析湿系数将下降0.045^[14]。此外,当风机盘管除湿能力受到高温冷冻水限制时,许多建筑会采用温湿度独立控制系统来对室内环境进行调节。通过对冷冻水温度进行合理限制,避免了因冷冻水温度过低而造成系统能耗过高的情况^[15]。此外,在特定空调系统设计中,会策略性引入非标温度冷水。在显冷需求主导工况下采用高温冷水输配策略,当潜热负荷需求大时切换至除湿模式,由此实现

系统能耗的梯度优化。

尽管风机盘管的性能可能受限于多种因素,但鉴于其易于调节、快速响应以及灵活布置的优点,风机盘管系统仍是大多数公共建筑(中小型办公楼)空调解决方案中的核心选择^[16]。

2.1.2 风机盘管换热建模

尽管风机盘管的性能可能受限于多种因素,准确的风机盘管模型对其结构优化设计和性能提升作用显著。传统白箱方法主要考虑风机盘管的详细物理特性如翅片厚度或管材尺寸等,以及其换热过程,如许多研究采用对数平均温差法、 ϵ -NTU有效单元法等方法。为了深入理解并有效应用相关研究方法,本文系统综述了风机盘管建模领域的重要研究成果。通过梳理现有文献,旨在全面分析不同建模技术的特点及其适用场景,从而为工程实践提供理论依据和技术参考。这不仅有助于厘清该领域的研究脉络,更能为后续建模方法的优化与创新奠定基础。现有主要建模研究如表1所示。

通过对现有研究的系统梳理发现,各类风机盘管建模方法兼具独特优势与固有局限性,在此背景下,融合机理与数据驱动的灰箱模型(半物理建模方法)正逐渐成为学界关注焦点。

2.1.3 风机盘管系统优化控制

在风机盘管的控制领域,经典控制方法在风机盘管空调系统中实施简便,却难以适应负荷变化较大的场景。相比之下,软控制技术在处理负荷预测和热舒适控制方面展现出显著优势,并具有显著的节能潜力。如将人工神经网络的方法用于预测需求响应期的最大减载,发现平均绝对百分比误差为15%^[24]。吴文德^[25]建立了基于误差反向传播算法的神经网络架构,得到的模型系统设定值预测误差低于10%,系统能耗降低6.99%。MPC技术在风机盘管

表1 现有主要建模研究

Tab.1 Part of the existing modeling research

模型类别	作者	建模方法	具体效果
黑箱模型	R. Selbaş等 ^[17]	多层前馈网络	传热速率预测结果拟合程度较好
	G. N. Xie等 ^[18]	神经网络	管壳式换热器性能预测偏差在2%以内
白箱模型	Li Wenxing等 ^[19]	FCU逆流换热模型	以(完全/部分)湿/干燥过程来考虑显热和潜热交换
	B. Tashtoush等 ^[20]	简化风机盘管模型	将出口空气温度和湿度的比用于盘管模型入口制冷剂温度的近似
灰箱模型	王青等 ^[21]	CFD形式的机理建模法	风机高效区的偏差很小,静压误差在3%以内
	董菲菲 ^[22]	基于GA-PSO算法的风机盘管热力学模型	误差低于4%,较好地验证了换热阶段的传热过程
	凌飞等 ^[23]	动态换热模型	适用于变干湿工况,相对误差均在约2%

系统中应用较多,如T. Hilliard等^[26]对LEED(leadership in energy and environmental design)银级机构建筑进行建模,采用MPC策略对其进行控制。经过MPC控制,空调系统能耗降低了10%。R. De Coninck等^[27]将模型预测控制方法应用于某中型办公楼,用户热舒适性显著提高,同时降低了30%以上的能源成本。

2.1.4 风机盘管噪声问题

在风机盘管系统运行的过程中,由于风机的存在,当送风量提高时,往往会产生大量噪声。这会影响到要求较高且对噪声有严格要求的场所的舒适度^[28]。一般可以采用噪声较小的直流式无刷式电机,或是增加风道长度与加装吸声材料降噪,但特殊情况下吸声材料降噪幅度有限,可以采用加装消声部件来显著降低噪声,提高舒适度,进而保障室内用户的舒适度^[29]。

2.2 变风量末端

2.2.1 典型系统与类型

在对流式末端中,存在一种较为特殊的类型,它一般应用于变风量系统。变风量VAV(variable air volume)空调系统是通过同时改变变风量空调机组的送风温度、空调机组及变风量末端装置(VAV box)的

送风量来调节室内空气温度的节能全空气空调系统^[30]。变风量末端是变风量空调系统的标志性构件,决定了整个空调系统的具体节能方式和效果^[31]。VAV系统末端装置由传感器、控制器、调节阀及箱体组成,作为系统关键组件,其控制性能直接影响运行效率。美国研发的3代变风量末端装置中,初代采用简单风阀,存在入口风速高、能耗大的问题;第2代改进结构并采用电子风速传感器,节能性显著提升;第3代以风机取代风阀,节能效果进一步提升^[32]。直至今日,变风量末端已经较为成熟,有多种类型,并为进一步节能提供结构保障。图6所示为典型的变风量末端装置。

变风量箱按结构分类可以分为4种,变风量箱的类型如表2所示。

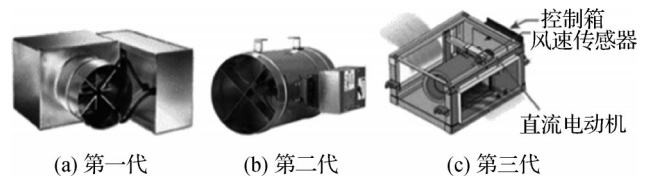


图6 典型的变风量末端装置^[30]

Fig.6 Typical variable air volume terminal device

表2 变风量箱类型

Tab.2 Variable air volume box type

变风量箱类型	工作原理	特点	应用场景
节流型	利用节流元件改变风量	存在局部构件阀门,能量损失大,不节能	无特殊优势场景,较为基础通用
风机动力型	并联 内置加压风机,并联风机间歇运行	设计风量小,能耗较低	风量需求小,节能要求高
	串联 内置加压风机,串联风机连续运行	设计风量大,能耗较高,可减小末端设备和风管尺寸	一次风低温送风系统,大温差空调水系统
双风道型	由冷/热2个变风量箱组合而成	温度调节范围大,可精确调节,控制复杂	温度调节精度要求高,控制不太敏感
旁通型	利用旁通管道改变空气输送量	系统静压变化,该技术适应性较好,但其整体系统效率不高,节能效果甚微	系统静压变化敏感,节能要求不高

2.2.2 变风量末端建模

不同结构形式的末端装置在节能效果方面存在

显著差异,风机动力型由于其优异的节能性在工程实践中得到广泛使用。从系统运行机理而言,该装

置通过冷却/加热盘管实现送风参数的初步调节,再借助混合箱内的再加热盘管进行送风温度的精确控制。这种分级调节机制可有效将调节空间温度稳定在设定范围,同时显著降低系统能耗,实现节能与舒适性的双重优化。

盘管与混合箱建模主要基于物理过程建立量化关系。对于盘管,其动态温度模型的建立来源于空气-水换热器中的能量平衡;而对于变风量箱的建模,是基于混合空气的能量平衡与质量平衡实现。也有部分研究采用神经网络等机器学习算法对盘管进行黑箱模型建模,但由于训练数据缺乏,模型实现比较受限^[33]。灰箱模型作为混合模型,具有更高的准确度与解释力,如 Jin Guangyu 等^[34]将质量和能量平衡方程相结合,研发了一种动态冷却盘管单元模型。随后通过非线性在线识别方法,可在较宽的工作范围实现模型参数的良好估计。V. Vakiloroya 等^[35]研发了一种冷却盘管的混合模型,并且实时实验数据可用于确定线圈参数。但这类模型也存在研发难度大、对模型研究者要求高的局限,有待进一步发展研究。

2.2.3 变风量末端控制策略

VAV 空调系统末端的运行和控制对于提高系统能源使用效率非常重要。变风量系统的优化需要首

先对系统各部分进行建模分析,其次选择合适的控制策略,这对变风量系统尤为重要,最后通过控制手段结合优化算法,计算目标函数优值得出最佳方案。

相比于其他系统,变风量控制策略的核心差异在于它是通过改变供应源到受控空间的空气量(阻尼器的启闭),而不是直接改变供应空气的温度,以此来改变受控空间中的温度,故对于该系统而言,除了常用的温度设定,风量比例也会纳入控制的优化变量^[33]。如 Li W. Z. 等^[36]将送风的新鲜空气比率和各个区域的温度设定点认作是典型控制策略的重要优化变量。深入而言,VAV 空调系统控制策略是实现最佳控制所采用的方法,通常通过解决多目标优化问题(如室内空气质量、舒适性、能源效率等)来确定 HVAC 系统中控制回路的设定点,且方法大致可以分为 2 类,即压力有关型(pressure dependent control, PDC)和压力无关型(pressure independent control, PIC)控制策略,因为 PIC 提供了更稳定的变风量箱操作控制,故大多数工程师更喜欢使用压力无关型控制而不是压力有关型控制^[37-38]。彭琼林^[31]基于粒子群优化算法,利用 MATLAB 进行了仿真建模,验证了压力无关型变风量系统参数整定方法的有效性。图 7 所示为变风量系统优化流程。

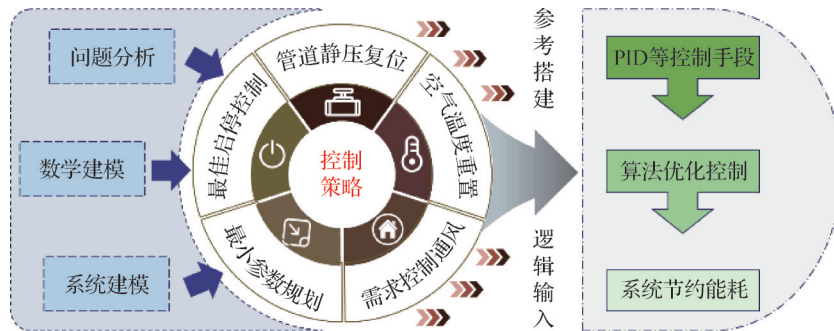


图7 变风量系统优化流程

Fig.7 Variable air volume system optimization process

不同控制策略各具特点:最佳启停策略指系统待设定点温度达标后启动,可最大程度减少运行时间,避免无人时段能耗;而管道静压复位策略通过调节送风量重置管道静压设定值,适用于部分负荷下的动态能耗调整^[39];合理选择控制策略,可以有效实现策略到末端的调控。而控制策略的实现需要搭载 PID 等控制器手段,如恒定静压控制通常采用 2 个比例积分 PI(proportional-integral)控制器,并根据风道中静压的偏差来调整变风量箱中风扇的转速^[40]。此外,控制器参数极大地影响系统控制的稳定性与准确性,而最优参数的选择是实现高效控制的关键因

素。采用人工智能算法可以对参数进行优化,以此实现显著的节能效果。Shi Shanrui 等^[40]提出一种基于模型的多区 VAV 空调系统最优控制策略,在典型制冷运行条件下,与传统静压复位控制技术相比,最优策略可分别节省约 6.71% 和 7.91% 的风扇和系统能耗。

3 辐射式末端发展详述

3.1 末端优势与分类

辐射供暖末端技术最早可追溯到 20 世纪 50 年代的欧洲,最初应用于工业建筑,随着不断发展,其

在20世纪70年代首次被用于为房间制冷^[41]。建筑物辐射空调系统利用辐射板进行传热,较其他空调系统类型具有一定优势,主要体现在2方面^[42]:1)采用低品位冷热源,更节能。相较于传统空调系统的7℃冷冻水,辐射系统采用16~18℃高温冷水,凭借高效的辐射传热方式,其设计温度较传统系统高约2℃,节能效果显著。当前研究通过软件模拟或案例分析等手段,均得出辐射制冷技术能耗较对流式末端技术低,根据不同案例能实现15%~80%的节能水平^[43-45];2)室内舒适度高^[46]。一方面,辐射形式末端通过长波辐射来冷却或加热每个表面,故室内送风

量少,吹风感弱,室内噪音低;另一方面,在舒适工况下,人体辐射散热占比达45%,故辐射传热更契合人体舒适特性。同时,辐射环境垂直温差小,可实现更均匀的身体冷却,有效提升用户热舒适体验。

辐射空调技术可以按能量载体型和布置位置分类,如图8所示。按照能量载体可分为3类:1)液体辐射系统,以水为传热介质,为传统形式;2)空气辐射系统,以空气为传热介质,为近年研究热点;3)空载能量介质辐射系统,如电加热辐射系统等^[47]。根据辐射面布置方式可分为辐射吊顶冷却、辐射吊顶采暖、辐射地板冷却、辐射地板采暖等系统。

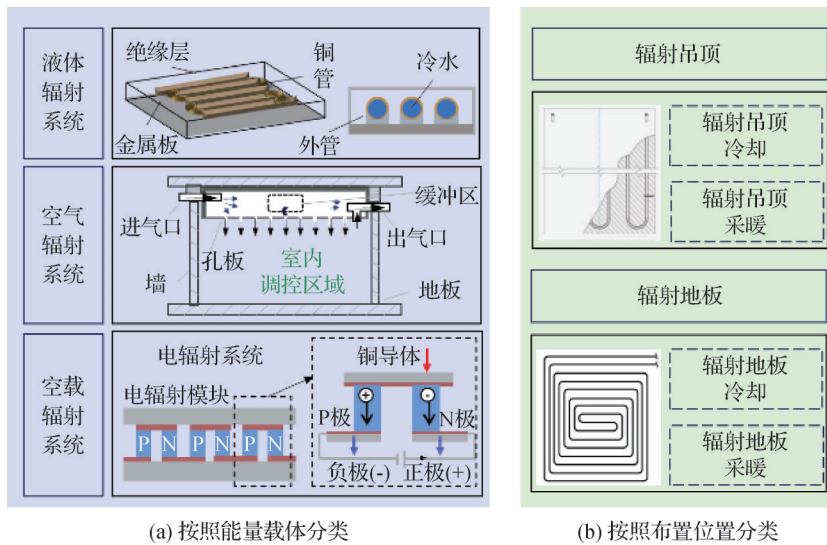


图8 辐射空调系统分类

Fig.8 Classification of radiant air conditioning systems

3.2 辐射传热建模

对于辐射传热过程,其换热建模主要基于物理过程。根据能量守恒定律和辐射的传热平衡方程,其中包括辐射板能量平衡方程、流道的能量平衡方程和流道内工质的能量平衡等方程,进而进行求解。

在辐射空调系统建模中,借助Energy Plus等软件模拟辐射供冷/供热效果的研究较为普遍。鉴于辐射供冷传热过程复杂且建筑围护结构存在蓄热导致的热延迟现象,需将围护结构与辐射空调系统作为整体进行建模分析^[48]。如M. Bojic等^[49]以居住建筑为研究对象对比了地板、墙壁、天花板和地板+天花板这4种形式的供暖效果。S. Moslehi等^[50]仿真模拟评估了伊朗不同气候区冷辐射板的结露风险及可行性,结果表明干燥区域结露风险较低且能耗可降低9.1%。目前模型主要包括分析/数值解模型、热容热阻(resistance-capacitance, RC)模型和数据驱动模型。其中,RC模型原理契合辐射传热物理过程与建筑蓄热特性,且热容、热阻等参数可通过统计方法、机器

学习或软件模拟数据确定^[42,48,51],因此,RC模型作为灰箱模型适用于辐射空调研究,已得到广泛应用。

3.3 辐射末端控制与特性问题

建筑物辐射冷却作为一种节能、舒适的冷却方式,在营造绿色健康的建筑物室内热环境方面非常有前景。然而,辐射板由于其自身特点也存在相关问题。一方面,辐射的热传递较对流式末端表现出相当大的滞后性与时间延迟,影响了系统的及时调节^[52];另一方面,辐射制冷末端容易结露且冷却能力低,尤其在炎热潮湿地区,其应用受到极大限制^[53-54]。基于以上2点,针对辐射系统迟滞性问题,通常会采用模型预测技术等方法代替传统的PID控制,这样不仅有更好的室内温度控制效果,还可降低系统能耗,Gong Guangcai等^[55]发现使用MPC方法后,室温稳定性比PID控制高18.8%,能耗降低8.51%,表现出较强的解决能力。

针对末端结露问题,从现有研究中可以总结出2种策略^[56-57]:1)从辐射制冷板出发,改变表面形态

或改善表面温度分布;2)通过通风、干燥等操作来改善冷凝问题。

4 对流与辐射结合式末端详述

4.1 末端原理

对流与辐射结合式末端是通过耦合辐射与对流传热机制实现室内热湿环境的高效调控。典型构型由辐射传热单元(如辐射冷热板)与辅助对流末端(如风机盘管)协同运行,兼具动态负荷适应性与热舒适-能耗的协同优化特性。

4.2 末端协同与控制性能

在很多场景中,复合式末端可以确保内部空气足够干燥以防止冷凝^[58]。在现代建筑环境控制领域,辐射板与对流式末端设备结合的复合系统优势明显。可冷却除湿新风的空气对流箱使复合系统供冷能力更强、供冷容量更大、能耗更低、对气象条件适应性更强,能精准匹配空间冷负荷需求^[59]。辐射系统与风机盘管系统组合多样,含置换通风等类型的末端,在部分研究中,还采用专用外部空气系统替代传统风机盘管末端以进一步优化除湿节能性能,实现多区域精准控制,有效降低了能耗。若个性化通风与辐射地板、置换通风协同,还可改善局部热环境,提升室内污染物去除效果^[60]。

通过对普通辐射+风机盘管系统与传统全空气系统的能耗对比计算可知,前者效率比传统全空气系统高17.5%;而这种新型复合系统的节能效果更为突出,可达30%^[61]。此外,为有效降低热延迟,通风系统应在辐射地板冷却系统启动前至少1h开启运行^[62]。鉴于辐射冷却系统存在表面冷凝等问题,合理设计辐射对流末端结合系统也是未来的发展方向。

4.3 末端可靠性

结合式末端的建模与控制更为复杂,其可靠性高度依赖精密控制水平。在高自动化、多自由度系统中,故障检测与排除尤为重要,可参考多联机系统的制冷剂充注、室内机等故障诊断方法,以应对系统效率与舒适度下降问题^[63]。

基于故障诊断一般包括3类方法,基本分类如图9所示:1)基于物理的方法。一般考虑系统组件的结构参数或是传热过程热物理参数,其中,关键输入参数的确定对故障诊断具有重要作用^[64]。在制冷剂充注故障的排除中,Li Haoron等^[65]利用过冷温度和过热温度来检测制冷剂的过量和不足故障,有助于故障的发现;2)基于机器学习方法。随着人工智能算

法应用于模型的预测,以此来辅佐故障诊断。3)基于知识驱动的方法,一方面基于历史经验对系统故障及成因进行分类归纳;另一方面借助贝叶斯等数学方法构建判断指标,对原始数据进行降维处理以保留变量相关性。常用的有采用主成分分析法进行故障诊断^[66]。

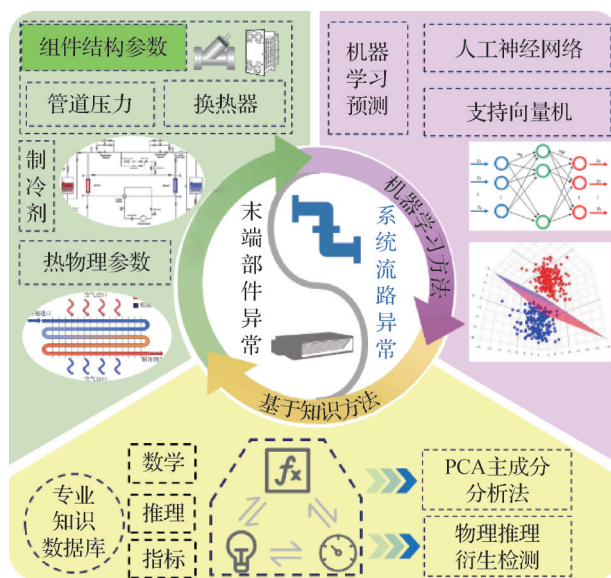


图9 末端故障诊断方法总结

Fig.9 Summary of fault diagnosis methods for centralized air conditioning system terminals

末端的故障诊断研究进展,揭示了末端设备可靠性提升的技术路径。通过对典型故障的机理剖析,诊断技术不仅实现了故障预警能力的跃升,更会逆向驱动末端结构的优化设计:在结构层面,基于故障末端的溯源分析促使关键组件升级与冗余架构改进;在控制层面,诊断算法与调节策略的深度耦合,推动电子膨胀阀等执行机构形成自适应抗扰动机。

如若能实现“以诊促建”的技术闭环,使多联机末端从被动防护向主动免疫演进——其可靠性保障不再停留于故障后的应急修复,而是通过诊断与控制的协同设计实现前置性风险消解,便会为新一代空调末端的高鲁棒性发展建立中坚基石。

5 空调末端发展展望

在能源与环境问题日益突出的背景下,空调末端技术对空调系统至关重要。

对流传热末端中的风机盘管应用广泛,却在除湿、负荷调节、能耗和噪声等方面存在缺陷;变风量机组不断发展,但面临控制系统集成调试和末端协同运行的挑战;辐射传热末端节能又舒适,却受困于

热传递滞后和结露问题;复合系统操作灵活,然而系统平衡、能耗预测与故障诊断方面尚需改进。各类空调末端均有优劣。一方面,需充分挖掘现有末端的潜力;另一方面,不同末端的特性问题存在共性,例如变风量的控制策略、辐射板的结露、高自动化复合系统的协同控制及故障诊断等问题,在其他末端系统中也有类似情况。因此,将某种末端特性问题的解决思路推广,以解决共性问题,或构建优势互补的高效组合式系统可作为研究方向。展望未来,空调末端技术将朝着智能化、舒适化和绿色环保方向发展。实现这一目标,需要优化现有技术,攻克现存难题,融合先进技术与理念,进而提升空调系统能效,降低能耗,减少环境影响,为人们打造更优质的室内环境。

参考文献

- [1] 姜昕. “双碳”背景下我国不同气候区公共建筑节能低碳技术分析[J]. 绿色建筑, 2024, 16(3): 58-63. (Jiang Xin. Analysis of energy-saving and low-carbon technologies for public buildings in different climate zones in China under the background of "dual carbon"[J]. Green Building, 2024, 16(3): 58-63.)
- [2] 黄生云, 李准, 李暄, 等. 基于“双碳”背景的风机选型风压及管长范围分析和探讨[J]. 暖通空调, 2022, 52(增刊2): 302-304. (Huang Shengyun, Li Zhun, Li Xuan, et al. Analysis and discussion on wind pressure and pipe length range of fan selection based on "double carbon" background [J]. Journal of HV&AC, 2022, 52(S2): 302-304.)
- [3] 王昂. 多联机系统冷负荷下冷凝器风冷与喷雾复合冷却技术研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2022. (Wang Ang. Research on the compound cooling technology of air-cooling and spraying for condensers under the cooling load of variable refrigerant flow systems [D]. Hengyang: University of South China, 2022.)
- [4] 袁柯婷. 变风量空调温度与湿度解耦控制方法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021. (Yuan Keting. Research on the decoupling control method of temperature in variable air volume air-conditioning systems [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.)
- [5] Mohanraj M, Jayaraj S, Muraleedharan C. Applications of artificial neural networks for thermal analysis of heat exchangers—A review [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015, 90: 150-172.
- [6] 辛吉利, 郑振东. 谈风机盘管在空调中的应用及发展[J]. 黑龙江科技信息, 2011(2): 22. (Xin Jili, Zheng Zhendong. Application and development of fan coil unit in air conditioning [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2011(2): 22.)
- [7] AFRAM A, JANABI-SHARIFI F. Theory and applications of HVAC control systems—a review of model predictive control (MPC) [J]. Building and Environment, 2014, 72: 343-355.
- [8] 冯岑. 办公室风机盘管加新风系统送风方式与优化研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020. (Feng Cen. Study on air supply mode and optimization of office fan coil unit plus fresh air system [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.)
- [9] 丁晓晓. 风机盘管房间夏季温湿度控制效果评估及双控方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021. (DING Xiaoxiao. Research on the evaluation of summer temperature and humidity control effects and dual-control methods in fan-coil unit rooms [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021.)
- [10] 王智超, 刘赟, 袁涛, 等. 基于调查的风机盘管控制方式与应用[J]. 工业建筑, 2010, 40(增刊1): 109-113. (Wang Zhichao, Liu Yun, Yuan Tao, et al. Fan-coil control methods based on investigation and application [J]. Industrial Construction, 2010, 40(S1): 109-113.)
- [11] 郁惟昌, 胡仰耆, 陆城军. 风机盘管机组产品的发展沿革与展望[J]. 暖通空调, 2020, 50(7): 97-102. (Yu Weichang, Hu Yangqi, Lu Chengjun. Development and prospect of fan coil units [J]. Journal of HV&AC, 2020, 50(7): 97-102.)
- [12] Dezfouli M M S, Dehghani-Sani A R, Kadir K, et al. Is a fan coil unit (FCU) an efficient cooling system for net-zero energy buildings (NZEBs) in tropical regions? An experimental study on thermal comfort and energy performance of an FCU [J]. Results in Engineering, 2023, 20: 101524.
- [13] Bai Mengmeng, Wang Fenghao, Liu Jun, et al. Experimental and numerical studies of heat and mass transfer performance and design optimization of Fan-coil with high supply chilled water temperature in Air-Conditioning system [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 45: 101209.
- [14] 白梦梦, 王洋浩, 王志华, 等. 中温水空调系统风机盘管的性能研究[J]. 制冷学报, 2019, 40(3): 52-59. (Bai Mengmeng, Wang Fenghao, Wang Zhihua, et al. Study on the performance of fan-coil unit in a moderate water temperature air conditioning system [J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(3): 52-59.)
- [15] 丁杰. 干式风机盘管结合独立新风系统的应用研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2015. (Ding Jie. Application research on dry fan-coil unit combined with independent fresh air system [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015.)

- [16] Zhu Xuwei, Wang Haobo, Han Xiaojing, et al. Experimental study on the operating characteristic of a combined radiant floor and fan coil heating system: a case study in a cold climate zone [J]. *Energy and Buildings*, 2023, 291: 113087.
- [17] Selbaş R, Şencan A, Kılıç B. Alternative approach in thermal analysis of plate heat exchanger [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2009, 45(3): 323–329.
- [18] Xie G N, Wang Q W, Zeng M, et al. Heat transfer analysis for shell-and-tube heat exchangers with experimental data by artificial neural networks approach [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(5/6): 1096–1104.
- [19] Li Wenxing, Nurdin H, Swan P. Control-oriented fan coil unit modeling for room dynamics considering dehumidifying cooling conditions and indoor air quality [J]. *Energy Conversion and Management: X*, 2023, 20: 100476.
- [20] Tashtoush B, Molhim M, Al-Rousan M. Dynamic model of an HVAC system for control analysis [J]. *Energy*, 2005, 30(10): 1729–1745.
- [21] 王青, 徐伟. 风机盘管性能及内部流场CFD分析[J]. 洁净与空调技术, 2024(2): 35–38. (Wang Qing, Xu Wei. Unsteady CFD simulation of the flow field of fan coil unit [J]. *Contamination Control & Air-Conditioning Technology*, 2024(2): 35–38.)
- [22] 董菲菲. 风机盘管系统分布式模型预测控制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023. (Dong Feifei. Research on distributed model predictive control of fan coil system [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.)
- [23] 凌飞, 杨春节. 适用于湿工况的风机盘管简化换热模型 [J]. 暖通空调, 2012, 42(9): 105–109. (LING Fei, YANG Chunjie. Simplified heat exchange model of fan coil in wet cooling conditions [J]. *Journal of HV&AC*, 2012, 42(9): 105–109.)
- [24] Cao Jingyu, Zhao Wanfang, Song Jiaming, et al. Development of a dynamic demand response quantification and control framework for fan-coil air-conditioning systems based on prediction models [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 239: 122098.
- [25] 吴文德. 基于神经网络的建筑负荷预测与供暖优化控制研究[D]. 长春: 长春工程学院, 2023. (Wu Wende. Research on building load prediction and optimized heating control based on neural networks [D]. Changchun: Changchun Institute of Technology, 2023.)
- [26] Hilliard T, Swan L, Kavacic M, et al. Applying model predictive control to a LEED silver-certified building [J]. *Energy Procedia*, 2015, 78: 1817–1822.
- [27] De Coninck R, Helsen L. Practical implementation and evaluation of model predictive control for an office building in Brussels [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 111: 290–298.
- [28] 朱杰明. 风机盘管机组降噪方法研究 [J]. 制冷与空调 (北京), 2018, 18(10): 49–51. (Zhu Jieming. Research on noise reduction method of fan coil unit [J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2018, 18(10): 49–51.)
- [29] 刘兴仁. 室内风机盘管消声措施研究 [J]. 暖通空调, 2022, 52(S1): 418–420. (LIU Xingren. Study on noise elimination measures of indoor fan coil unit [J]. *Journal of HV&AC*, 2022, 52(S1): 418–420.)
- [30] 陈向阳. 变风量空调系统的优化控制 [J]. 暖通空调, 2024, 54(8): 21–29. (Chen Xiangyang. Optimized control of VAV air conditioning system [J]. *Journal of HV&AC*, 2024, 54(8): 21–29.)
- [31] 彭琼林. 客房变风量空调末端智能控制系统的研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2014. (PENG Qionglin. Research on the intelligent control system of variable air volume air-conditioning terminals in guest rooms [D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2014.)
- [32] 陈向阳. 空调系统的变风量末端装置 [J]. 暖通空调, 2024, 54(5): 25–32. (Chen Xiangyang. VAV terminal units of air conditioning systems [J]. *Journal of HV&AC*, 2024, 54(5): 25–32.)
- [33] Okochi G S, Yao Ye. A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (VAV) air-conditioning systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 59: 784–817.
- [34] Jin Guangyu, Cai Wenjian, Wang Yaowen, et al. A simple dynamic model of cooling coil unit [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(15/16): 2659–2672.
- [35] Vakiloroyaya V, Samali B, Madadnia J, et al. Component-wise optimization for a commercial central cooling plant [C]//IECON 2011–37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Melbourne, VIC, Australia. IEEE, 2011: 2769–2774.
- [36] Li W Z, Wang S W, Koo C. A real-time optimal control strategy for multi-zone VAV air-conditioning systems adopting a multi-agent based distributed optimization method [J]. *Applied Energy*, 2021, 287: 116605.
- [37] Montgomery R, McDowall R. Control diagrams and sequences [M]//Fundamentals of HVAC Control Systems. Amsterdam: Elsevier, 2008: 216–249.
- [38] Fan Ziyu. Dynamic performance of control loops and their interactions in a VAV HVAC system [D]. Montréal: Concordia University, 2002.
- [39] Shim G, Song Li, Wang Gang. Comparison of different fan control strategies on a variable air volume systems through simulations and experiments [J]. *Building and Environment*,

- 2014, 72: 212–222.
- [40] Shi Shanrui, Miyata S, Akashi Y, et al. Model-based optimal control strategy for multizone VAV air-conditioning systems for neutralizing room pressure and minimizing fan energy consumption [J]. *Building and Environment*, 2024, 256: 111464.
- [41] 吕鹏啸. 天空辐射制冷耦合地理管换热空调系统性能及优化研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024. (Lü Pengxiao. Research on the performance and optimization of an air-conditioning system coupling sky radiative cooling and ground-coupled heat exchanger [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2024.)
- [42] 皮刚. 基于模型预测的辐射板空调系统室温优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022. (Pi Gang. Study on room temperature optimization of radiant panel air conditioning system based on model prediction [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.)
- [43] Seo B, Yoon Y B, Yu B H, et al. Comparative analysis of cooling energy performance between water-cooled VRF and conventional AHU systems in a commercial building [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 170: 114992.
- [44] Niu J L, Zhang L Z, Zuo H G. Energy savings potential of chilled-ceiling combined with desiccant cooling in hot and humid climates [J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34(5): 487–495.
- [45] Memon R A, Chirarattananon S, Vangtook P. Thermal comfort assessment and application of radiant cooling: a case study [J]. *Building and Environment*, 2008, 43(7): 1185–1196.
- [46] 谭跃龙, 邓文昊, 陈伟, 等. 辐射供冷空调研究综述 [J]. *上海节能*, 2023(9): 1324–1332. (Tan Yuelong, Deng Wenhao, Chen Wei, et al. Summary of research on radiant cooling air conditioning [J]. *Shanghai Energy Saving*, 2023(9): 1324–1332.)
- [47] Peng Pei, Gong Guangcai, Mei Xiong, et al. Investigation on thermal comfort of air carrying energy radiant air-conditioning system in south-central China [J]. *Energy and Buildings*, 2019, 182: 51–60.
- [48] 秦峰华. 混凝土地板辐射制冷系统建模与控制[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018. (QIN Fenghua. Modeling and operating control of concrete radiant floor cooling system [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2018.)
- [49] Bojić M, Cvetković D, Bojić L. Decreasing energy use and influence to environment by radiant panel heating using different energy sources [J]. *Applied Energy*, 2015, 138: 404–413.
- [50] Moslehi S, Maerefat M, Arababadi R. Applicability of radiant heating-cooling ceiling panels in residential buildings in different climates of Iran [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 145: 18–25.
- [51] Hassan M A, Abdelaziz O. Best practices and recent advances in hydronic radiant cooling systems—Part II: simulation, control, and integration [J]. *Energy and Buildings*, 2020, 224: 110263.
- [52] Zhao Jing, Shi Linyu, Li Jiayu, et al. A model predictive control regulation model for radiant air conditioning system based on delay time [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 62: 105343.
- [53] Gu Jiaan, Wu Huijun, Liu Jia, et al. A comprehensive review of high-transmittance low-conductivity material-assisted radiant cooling air conditioning: Materials, mechanisms, and application perspectives [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 189: 113972.
- [54] Xing Daoming, Li Nianping. Reconstruction of hydronic radiant cooling panels: conceptual design and numerical simulation [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022, 30: 101272.
- [55] Gong Guangcai, Liu Jia, Mei Xiong. Investigation of heat load calculation for air carrying energy radiant air-conditioning system [J]. *Energy and Buildings*, 2017, 138: 193–205.
- [56] Xing Daoming, Li Nianping, Cui Haijiao, et al. Theoretical study of infrared transparent cover preventing condensation on indoor radiant cooling surfaces [J]. *Energy*, 2020, 201: 117694.
- [57] 渠景伟, 麻建超, 郑晓红, 等. 不同气候区典型城市室内辐射空调高透膜防结露特性 [J]. *制冷学报*, 2024, 45(5): 90–97. (Qu Jingwei, Ma Jianchao, Zheng Xiaohong, et al. Anti-condensation characteristics of high permeability films for radiation air conditioning in typical urban indoor environments of different climate zones [J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(5): 90–97.)
- [58] Seo J M, Song D, Lee K H. Possibility of coupling outdoor air cooling and radiant floor cooling under hot and humid climate conditions [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 81: 219–226.
- [59] Cui Shixin, Kim M K, Papadikis K. Performance evaluation of hybrid radiant cooling system integrated with decentralized ventilation system in hot and humid climates [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 1245–1252.
- [60] Cui Mengying, Ning Baisong, Wu Xiaozhou, et al. The development of radiant floor cooling system (RFCS): System type, control strategy, and application [J]. *Results in Engineering*, 2024, 23: 102544.
- [61] Khan Y, Khare V R, Mathur J, et al. Performance evaluation of radiant cooling system integrated with air system under different operational strategies [J]. *Energy*

- and Buildings, 2015, 97: 118–128.
- [62] Zhu Xuwei, Su Meng, Han Xiaojing, et al. Experimental study on the operating characteristic of a combined radiant floor and fan coil cooling system [J]. Energy and Buildings, 2024, 325: 114979.
- [63] Guo Yabin, Li Guannan, Chen Huanxin, et al. Modularized PCA method combined with expert-based multivariate decoupling for FDD in VRF systems including indoor unit faults [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 115: 744–755.
- [64] Zhang Li, Cheng Yahao, Zhang Jianxin, et al. Refrigerant charge fault diagnosis strategy for VRF systems based on stacking ensemble learning[J]. Building and Environment, 2023, 234: 110209.
- [65] Li Haorong, Braun J E. A methodology for diagnosing multiple simultaneous faults in vapor-compression air conditioners [J]. HVAC&R Research, 2007, 13 (2) : 369–395.
- [66] Hou Zhijian, Lian Zhiwei, Yao Ye, et al. Data mining based sensor fault diagnosis and validation for building air conditioning system[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(15/16): 2479–2490.

通信作者简介

王志华,男,教授,西安交通大学人居学院,029-88395100, E-mail:wangzh065@xjtu.edu.cn。研究方向:低碳建筑与热泵技术,制冷空调新技术。

About the corresponding author

Wang Zhihua, male, associate professor, School of Energy and Power Engineering, School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, 86-29-88395100, E-mail: wangzh065@xjtu.edu.cn. Research fields: low-carbon buildings and heat pump technology, new technologies in refrigeration and air-conditioning.