

陈栋才, 蔡永翔, 陈湘萍. Citespace 视角下暖通空调节能研究热点及趋势分析[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(2): 24–32.
DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.250204

Citespace 视角下暖通空调节能研究热点及趋势分析

陈栋才¹, 蔡永翔², 陈湘萍¹

(1 贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025; 2 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵阳 550002)

摘要: 目前, 暖通空调 (Heating Ventilation and Air Conditioning, HVAC) 系统的节能研究在国内外备受关注。知识图谱能够直观地呈现 HVAC 系统在建筑节能领域中的研究概况与发展脉络, 本文使用文献计量学的方法, 以 Web of Science (WOS) 数据库为数据来源, 利用 CiteSpace 软件绘制可视化知识图谱, 从时空分布、国家与机构分布、关键词共现、研究趋势变化等方面研究其涵盖的方向及热点。基于关键词共现与聚类分析, 得到当前研究热点主要有 HVAC 系统的建模方式、能耗影响因素挖掘、可采用的控制措施以及可控制对象; 基于高被引文献突变分析, 得到未来的研究趋势以先进建模技术和先进控制策略为主, 如模型预测控制和强化学习控制。

关键词: 暖通空调; CiteSpace; 文献计量学; 建筑节能

中图分类号: TU022

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)02-0024-09

Research hotspots and trends of HVAC energy conservation from the perspective of Citespace

CHEN Dongcai¹, CAI Yongxiang², CHEN Xiangping¹

(1 College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2 Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: Energy-saving research in Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems for building applications has been significantly attracted attention worldwide. A visual representation of knowledge graphs is offered to summarize and introduce energy-saving research in the field of HVAC systems within the context of building engineering. In this paper, a bibliometric approach is adopted, utilizing the Web of Science database (WOS) as the data source and employing CiteSpace software to construct visual knowledge graphs. These graphs cover aspects such as spatial-temporal distribution, country and institution distribution, co-occurrence of keywords, and research trend analysis. The current research hotspots are identified, including modeling approaches for HVAC systems, the identification of energy consumption influencing factors, applicable control measures, and controllable objects, through the utilization of keyword co-occurrence and cluster analysis. Furthermore, future research trends are predicted through the analysis of highly cited literature and the identification of sudden changes. These trends are expected to focus on the advancement of modeling techniques and the adoption of advanced control strategies such as model predictive control and reinforcement learning control.

Key words: HVAC; CiteSpace; Bibliometrics; Buildingenergy conservation

0 引言

随着能源需求的大幅增长, 节能已成为全球关注的重点。根据全球建筑联盟发布的《2020 全球建筑现状报告》以及中国建筑节能协会发布《中国建筑能耗研究报告 2020》, 建筑业的能源消耗占比和碳排放占比已经达到了惊人的程度。在 2019 年, 建

筑行业能源消耗量达到了全球年度能源消耗的 35%, 居民建筑占比达 22%; 并且建筑排放 (包含居民建筑以及非居民建筑的直接或间接排放) 已达全球能源相关排放总量的 28%, 若加上建筑工业部分的排放, 该比例可达 38%, 建筑碳排放量达到了有史以来的最高值^[1]; 在国内, 建筑耗材生产和建筑运行阶段分别占据国内能源消耗的 23% 和 21%, 能

基金项目: 国家自然科学基金 (51867007)。

作者简介: 陈栋才 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 建筑节能。

通信作者: 陈湘萍 (1977—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 综合能源管理。Email: 384198892@qq.com。

收稿日期: 2023-07-17

耗总量为 22.33 亿 tce (1 吨标准煤当量);建筑业 2019 年全国建筑全过程碳排放总量为 49.97 亿吨二氧化碳,占全国碳排放的比重为 50.6%^[2]。

根据研究分析,在建筑设备中,除了热水、制冷和照明外,HVAC 系统的供暖、通风和空调能耗占建筑物能源使用的约 40%^[3]。因此 HVAC 系统在建筑节能减排中承担了至关重要的作用,提高建筑 HVAC 系统的能源效率是节省能源消耗的最直接、有效的措施^[4]。

对 HVAC 系统的节能研究主要以设备运行控制策略的改进为主,熊磊^[5]提出一种基于改进麻雀搜索算法的空调节能控制法,面对不同的负荷需求,寻找最佳温控点,可节约能耗达 25.13%;王可^[6]基于车间工况需求,采用双反馈机制重调度策略,解决调机组调度问题;王子轩^[7]基于随机增量粒子群算法,开发大型集中空调优化控制器,节能达 13.18%~13.45%;Barone G^[8]开发了一种新的用于人体热行为评估的热舒适模型,评估生理参数的动态变化并表征乘员的热感觉,对建筑温湿度参数和相应的供热和制冷需求进行动态控制。

近年来,关于 HVAC 系统节能研究的相关综述大多数都基于某一特定场景或具体技术应用展开讨论。如:王博^[9]与骆清怡^[10]开展了数据中心制冷系统的优化运行综述;宋曾强^[11]分析讨论了模糊控制以及模型预测控制的概念及特点,综合分析了其在 HVAC 领域应用效果;崔治国^[12]全面阐述了数据挖掘技术在 HVAC 系统节能领域的研究进展;谢富豪^[13]与曹勇^[14]侧重于通风系统优化,对 HVAC 系统节能效果影响开展了综合讨论。

以上关于 HVAC 的综述对特定技术的应用进行了特定分析,对具体的技术细节有重要的总结和参考价值。一般探讨以技术细节为主,没有利用可视化方法将各项技术在 HVAC 的应用开展静态分析和动态发展结合的论述。目前关于 HVAC 系统的节能研究成果在文献计量学和科学知识图谱视角下的梳理和挖掘成果较少。本文基于 HVAC 系统在建筑节能领域的研究应用,利用知识图谱进行比较研究,创新使用可视化分析软件 CiteSpace 探索最新的前沿技术和研究成果;

本文采用综合的分析框架,结合文献计量法和 CiteSpace 可视化辅助工具,针对 HVAC 系统在建筑节能领域的研究,从多个角度进行定量和定性分析,分析研究的基本热点和潜在趋势。通过使用这一综合分析框架和定量/定性分析方法,本文旨在对以往

该领域的相关研究做进一步的总结,揭示领域最新技术特点,把握该领域节能研究的发展状况和方向,为促进领域的发展和创新提供进一步的依据和参考。

1 研究方法和数据来源

1.1 研究方法

文献计量学是以文献计量特征为研究对象,采用计量方法来描述、评价文献的分布情况、统计规律、预测文献方向,是一门集合数学、统计学、文献学的交叉科学^[15]。随着信息技术的飞速发展,传统计量法逐渐向科学计量法的方向发展,其中最主要的发展趋势为使用信息可视化技术生成科学知识图谱,辅助文献计量法的分析。科学知识图谱具有知识可视化的“图”属性和分层鲜明的时间序列的知识“谱”属性,实现了数据可视化,可以更好地呈现相关领域的研究热点与趋势。

在第 11 届科学计量学与信息计量学国际学术研讨会中,“可视化研究和利用 CiteSpace 分析科学引文”被确定为研讨主题,为信息可视化的研究提供了明确的操作分析路径。CiteSpace 是基于第三代信息可视化技术开发的文献计量软件,结合了静态的知识关系图谱展示和动态的知识发展图谱,有效地展示研究领域的结构关系和演变过程^[16-17]。当前 CiteSpace 软件已经广泛应用于诸多领域的研究综合分析,通过知识图谱的形式,可以更加清晰地展示 HVAC 系统在建筑领域的节能研究的发展脉络、研究热点等^[18]。

本文基于 CiteSpace 的可视化辅助,使用文献计量分析方法定量分析年代、作者、机构、高被引文献等文献外部特征,侧重于分析文献形式特征的“量”,探讨 HVAC 系统在建筑领域的节能研究的结构、特征和规律;分析文献内容及关键词,侧重于分析文献内容特征的“属性”,挖掘其中的隐性特征,判断研究热点和前沿,总结当前 HVAC 系统在建筑领域的节能研究的发展状况。

1.2 数据来源

数据来源于 Web of Science(WOS)核心合集数据库,引文索引选择科学引文索引(Science Citation Index Expanded, SCIE)和会议论文引文索引(Conference Proceedings Citation Index Science, CPCI-S),主题以“building energy saving *”AND “HVAC”进行检索,检索时间跨度从 2010 年~2022 年,进行人工精炼,最终得到 1 017 篇文献。

2 外部特征统计与分析

2.1 发文量分析

对 1 017 篇文献做 HVAC 系统的建筑节能设计年发文量统计,如图 1 所示。发文量在 2010 年~2021 年间一直处于增长状态,直至 2021 年达到研究的高峰期(因为数据收集时间限制,2022 年发文量暂不具备可统计性)。从发文量的趋势变化来看,共有 3 个节点(2013 年、2016 年以及 2020 年),年发文量变化趋势有较大变化,尤其是 2020 年。多国立法推动可再生能源产业发展,设立碳中和目标,大幅影响了节能领域的研究热度^[19]。年度发文量的持续增长及其趋势变化表明,HVAC 系统在建筑节能领域的研究热度不断上升。

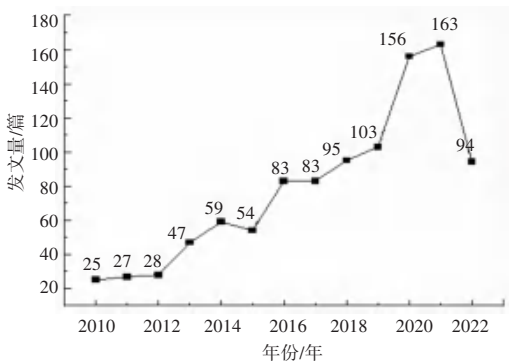


图 1 HVAC 系统的建筑节能设计年发文量统计

Fig. 1 Annual publication statistics of building energy-saving design of HVAC systems

2.2 国家、机构合作图谱分析

分析重点关注的国家、机构并评价其学术影响力对于了解该研究领域的基础和研究动态具有重要意义。本文将 CiteSpace 中节点类型设为“Country”、“Institution”,分别得到对应的共现网络知识图谱,如图 2 所示。图谱中节点越大,代表发文量越多,节点从中心沿半径方向到边缘的颜色变化对应时间趋势,内圈的冷色代表早年,外圈的暖色代表近几年,节点之间的连线表示彼此之间的研究合作关系。

由图 2(a)可知,发文量排名前列的国家依次为美国、中国、意大利和西班牙等;由复杂交叉的连线可知,各个国家之间的合作关系较为不同,比如美国和其他国家节点的连线很少,说明和其他国家之间的合作不多;而中国与周围节点联系密切,合作广泛;欧洲国家之间连线较为密集,比较注重彼此的合作。

由图 2(b)可知,研究机构集中在各大高校和国家级实验室,其中发文量大于 10 的机构包括美国 4 所高校和 3 所国家级实验室,中国 5 所高校,新加坡、意大利和加拿大各一所高校。机构共现图谱形成了 7 个主要合作网络,各个合作网络轮廓清晰,交叉较少,说明机构间的合作网络仍是初步区域合作,相对独立,缺少大规模跨区域合作与聚集效应。

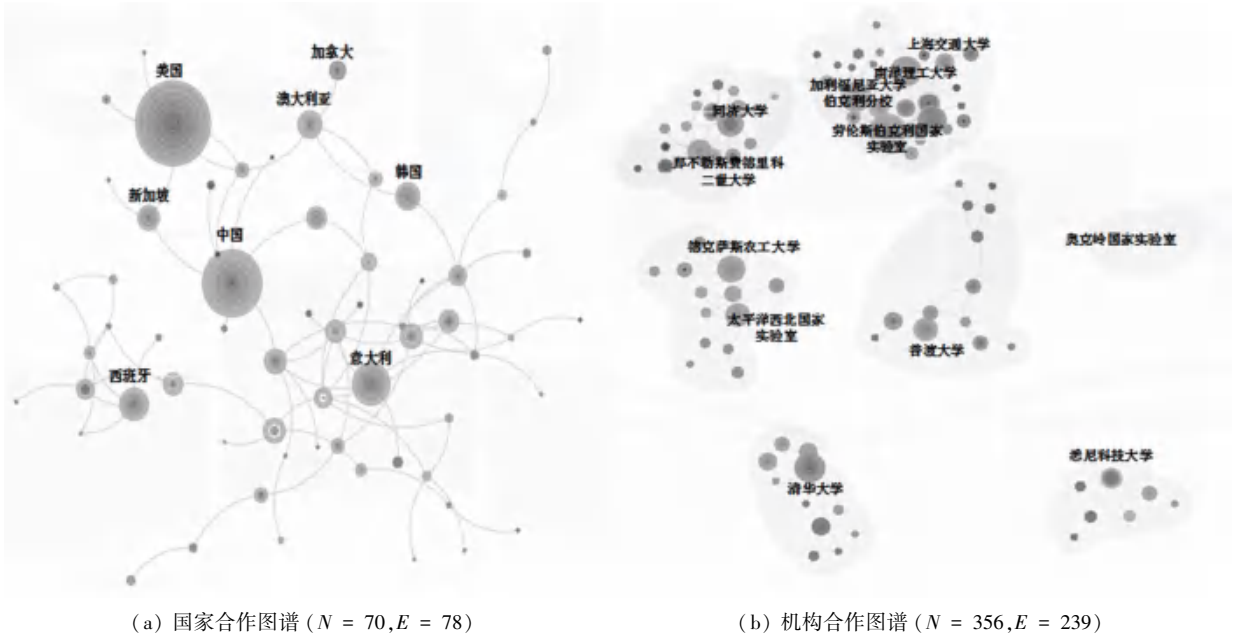


图 2 发文国家与相关机构的共现网络知识图谱

Fig. 2 Network knowledge graph of the issuing country and relevant institutions

3 研究基础与热点分析

3.1 研究基础分析

高被引文献一般指学术价值高,研究影响力大的相关期刊文献,通常是一个研究领域的重要组成部分。

部分。通过对文献被引频次的统计分析,可以探析该研究领域的理论基础和知识构成。将 WOS 数据库中获得的检索结果,进行“高被引论文”精炼,获得 2010 年~2022 年被引次数前十的文献,具体情况见表 1。

表 1 2010 年~2022 年高被引文献统计
Table 1 Statistics of highly cited literature from 2010 to 2022

高被引文献名称	作者	被引频次/10 ⁴
Thermal comfort and building energy consumption implications—A review	Yang L	692
Energy intelligent buildings based on user activity: A survey	Nguven TA	423
Neural networks based predictive control for thermal comfort and energy savings in public buildings	Ferreria PM	269
Extending air temperature setpoints: Simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings	Hoyt T	260
A review of different strategies for HVAC energy saving	Vakiloroya V	249
Importance of occupancy information for building climate control	Oidewurtel F	236
A Smart Home Energy Management System Using IoT and Big Data Analytics Approach	Al-Ali AR	221
Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review	Chenari B	203
Automatic generation and simulation of urban building energy models based on city datasets for city-scale building retrofit analysis	Chen YX	177
Gradient boosting machine for modeling the energy consumption of commercial buildings	Touzani S	147

通过分析表 1 可知,该领域的研究方向基础主要集中在 HVAC 系统的能耗影响因素:包括 Yang^[20]研究的热舒适性;Nguven^[21]研究的用户活动影响;Oidewurtel^[22]研究的房间占用信息等。HVAC 系统可采用的节能控制措施:Ferreria^[23]基于热舒适性和最小化能耗为目标,采用 Model Predictive Control(MPC)技术达到节能优化目的;Al-Ali^[24]结合物联网技术和大数据,管理用户的能源使用需求;Vakiloroya^[25]描述和回顾了各种 HVAC 节能策略,研究了每种策略对暖通空调节能的影响。HVAC 系统的节能控制对象:如 Hoyt^[26]研究的恒温器的温度设定值。Chenari^[27]研究通风策略的控制影响。此外,因为建筑热动态模型是一个复杂非线性模型,对 HVAC 系统的节能研究来说,一个合适的模型是极其重要的,Chen^[28]介绍一个新的开放的基于网络的工具——CityBES,基于城市建筑数据集和用户选择的节能措施,使用 EnergyPlus 自动生成和模拟建筑能源模型;Touzani^[29]提出一种基于梯

度提升机的能耗基线建模法。
综上所述,HVAC 系统在建筑领域的节能研究的基础方向包括 HVAC 系统建模、HVAC 系统的能耗影响因素、HVAC 系统的节能控制对象以及 HVAC 系统可采用的节能控制措施。

3.2 研究热点分析

对文献的关键词进行分析可对文章主题进行概括。一篇文献的几个关键词存在着某种关联,而不同的文献出现相同的关键词代表着文献间存在着某种关联,这种关联可以用异构网络来表示。高频关键词代表了研究领域的热门话题,而高中心性关键词则反映了相应研究内容在该研究领域的地位和影响力。通过对做关键词共现和聚类分析,得到 HVAC 系统在建筑领域的节能研究热点。

3.2.1 关键词共现分析

关键词的共现网络知识图谱结果如图 3 所示,图 3 共有 482 个节点,857 条连线,网络密度为 0.007 4,说明 HVAC 系统在建筑领域的节能研究主

题广泛,彼此之间较为松散。图谱中的节点表示关键词,节点的大小、颜色、色带宽度皆与关键词的性

质有关,重点关键词在频次上的排序见表 2。

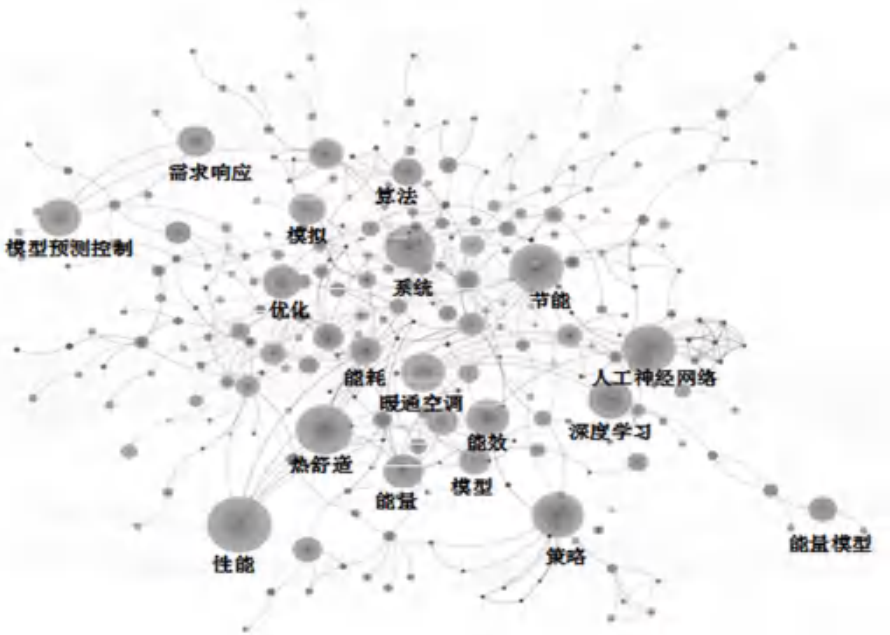


图 3 关键词共现网络知识图谱 (N=482,E=857)

Fig. 3 Keyword co-occurrence network knowledge graph (N=482, E=857)

表 2 重点关键词频次排序		
Table 2 Priority keyword frequency ranking		
频次	中介中心性	关键词
245	0.03	性能
186	0.12	热舒适
176	0.02	节能
167	0.01	系统
152	0.07	能效
151	0.05	暖通空调
143	0.04	策略
142	0.10	仿真模拟
125	0.13	模型
125	0.04	优化
103	0.16	消费
98	0.02	设计
95	0.02	模型预测控制
94	0.02	能耗
76	0.05	管理

通过对关键词的共现分析,可以发现:HVAC 系统在建筑领域的节能研究中,热舒适度、模型、设计以及消费(包括能耗)的中介中心性皆大于 1,证明在研究中这些方向重要性高;性能、热舒适度、能效、

节能、模型和消费的频次位列前茅,证明在研究中研究人员往往同时关注多个目标。

3.2.2 关键词聚类分析

关键词聚类分析是对文献的关键词进行聚类,同时也是对共现分析的一种补充,进一步发现该研究领域所采用的研究方法和研究对象,聚类结果如图 4 所示,得到了 14 个聚类(仅显示最大连接组件),集群的标签为 LSI(Latent Semantic Indexing)集群命名模式。

从图 4 可以看出通过文献主题聚类发现 HVAC 系统在建筑领域的节能研究的热点研究方法和研究对象主要集中在:(#0 能效)、(#1 热舒适度)、(#2 空调)、(#3 深度强化学习)、(#4 暖通空调)、(#5 模型预测控制)、(#6 节能)、(#7 热循环)、(#8 设计)、(#9 热储存)、(#10 室内空气质量)、(#11 非线性模型)、(#12 占用检测)、(#13 遗传算法)。这些集群代表着 HVAC 系统在建筑领域的节能研究的主要热点方向。聚类中出现频次较高的关键词:热舒适度、能效、控制策略、预测控制、深度学习、深度强化学习、算法、启发式、需求响应、模型等。

综合图 3 和图 4,对 HVAC 系统在建筑领域的节能研究的主要热点进行分析:



图 4 2010~2022 年的文献关键词的聚类可视化

Fig. 4 Cluster visualization of literature keywords from 2010 to 2022

(1) 能效和热舒适度作为最大集群, 反映出 HVAC 系统在建筑领域的节能研究的主要考虑因素, 该研究通常是一个多目标问题, 要综合考虑各因素间的耦合关系, 其中包含的关键词“需求响应”、“占用检测”和“温度设定点”, 代表学者在研究过程中考虑的不同影响因素及其相互作用。

(2) 深度强化学习和预测控制作为重要集群, 反映出 HVAC 系统的节能研究主要以运行时的控制策略为主, 控制策略需要解决的往往是一个多目标优化问题, 所以启发式算法, 如遗传算法在该领域得到广泛应用, Afroz^[30] 选择粒子群和神经网络进行建模和优化。深度强化学习 (Deep Reinforcement Learning, DRL) 的无模型-策略学习的形式引起了很多学者的研究兴趣, 如秦浩森^[31] 提出一种基于深度强化学习的调度方法, 对不同的建筑类型自我学习建模, 在热舒适收益和能耗成本间寻找平衡; Brandi^[32] 采用两种部署方式部署深度强化学习控制器, 针对 4 种不同的场景进行测试, 评估该控制器的性能。

(3) HVAC 系统、非线性模型作为重要集群, 反映出模型建立作为 HVAC 系统的节能研究的第一步也受到广大学者关注。因为非线性模型一般是黑箱模型, 主要优点是开发成本较低, 且任何信号都可以用作输入或输出。

3.3 研究前言分析

科研领域的研究前沿代表的是在该领域逐渐兴起的某种趋势和演变风向。科学计量学的先驱

Derek 教授^[33] 指出一个领域的研究前沿, 可通过最新的被积极引用的文献所代表; SCI (科学引文索引) 创始人 Garfield^[34] 把研究前沿定义为最新的被积极引用的文献, 并从文献里的高频词汇中提取研究前沿主题。本文根据共被引文献突变分析, 绘制高频共被引文献的突变图谱, 直观展现该领域随着时间推移而不断演进的研究前沿动态。

3.3.1 共被引文献突变检测分析

文献的突变检测能够发现该研究领域的新兴趋势, 即在某一时间段内人们对某一特定出版物的研究内容的关注突然激增。引文突发提供的证据表明对出版物研究内容的关注与引用的激增相关联, 表明相关文献在该研究领域已经受到了相应的关注。根据引用爆发强度以及开始时间选择了根据爆发开始时间排序的代表性参考文献见表 3, 黑色线段表示突现持续的时间, 而灰色线段表示该文献在该领域研究中并没有发生突变的时间段, 即该文献在这一段时间不是研究热门。

共被引文献突变大致分为 3 个阶段。

第 1 阶段: 2011 年~2013 年, Perez-lombard^[35] 主要讨论了如下内容: 1. 初步分析了 1973 年至 2004 年世界能源消耗, 二氧化碳排放率及人口增长之间的对比和关系, 对发达国家和非发达国家能耗进行了对比和预测; 2. 居民建筑中空调 (HVAC) 能耗是热水能耗的一倍以上, 欧盟国家 HVAC 能耗高于其他对比国家; 非居民建筑中, 办公建筑的 HVAC 系统, 照明、电器设备能耗均高于其他建筑类型; 而

酒店类型建筑热水能耗高于其他建筑类型;3. 对不同国家、不同建筑,建筑内不同能耗进行了对比,为

后期建筑 HAVC 系统研究奠定基础。

表 3 根据爆发开始时间排序的代表性参考文献
Table 3 Representative references sorted by outbreak onset

作者	年份	DOI	强度	持续年份	突变范围(2010–2022)
Perez–Iombard L	2008	10. 1016/j. enbuild. 2007. 03. 007	6. 47	2011–2013	
Oldewurtel F	2012	10. 1016/j. enbuild. 2011. 09. 022	9. 60	2013–2017	
Morosan PD	2010	10. 1016/j. enbuild. 2010. 03. 014	4. 15	2013–2015	
Ferreira PM	2012	10. 1016/j. enbuild. 2012. 08. 002	5. 65	2014–2017	
Oldewurtel F	2013	10. 1016/j. apenergy. 2012. 06. 014	5. 87	2015–2018	
Siroky J	2011	10. 1016/j. apenergy. 2011. 03. 009	5. 86	2015–2016	
Goyal S	2013	10. 1016/j. apenergy. 2013. 01. 039	4. 76	2015–2018	
Afram A	2014	10. 1016/j. buildenv. 2013. 11. 016	7. 26	2016–2019	
Yang L	2014	10. 1016/j. apenergy. 2013. 10. 062	6. 49	2018–2019	
Serale G	2018	10. 3390/en11030631	4. 51	2020–2022	
Afroz Z	2018	10. 1016/j. rser. 2017. 10. 044	4. 07	2020–2022	
Peng YZ	2018	10. 1016/j. apenergy. 2017. 12. 002	3. 76	2020–2022	
Wei TS	2017	10. 1145/3061639. 3062224	3. 44	2020–2022	

第 2 阶段:2013 年~2019 年,突变强度最高的文献,Oldewurtel^[36] 研究使用模型预测控制和天气预报实现节能建筑气候控制。

(1) 对 1 280 个不同类型不同地域和环境的建筑进行了节能控制方法的验证,以证实模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)的泛化性;

(2) 作者从多个角度对控制方法的节能性能进行比较,从整体角度分析验证了随机模型预测控制(Stochastic Model Predictive Control, SMPC)方法在节能方面优于文中其他方法;

(3) 证明了 SMPC 优越性能源于对天气预测不准确所带来的误差进行了有效的处理,在节能的同时保证了居住者的舒适性。

其他高突变强度文章,如 Afram^[37] 确定了用于 HVAC 控制的几种控制方法,并总结了每种主要方法的主要思路;Yang^[20] 分析了热舒适性对建筑能耗的影响;Oldewurtel^[22] 提出的占用信息对 HVAC 系统控制的影响。皆是前文所分析的高被引文献,代表着 HVAC 系统的建筑节能研究的主流方向。

第 3 阶段:2020 年~2022 年,主要有 5 篇突变文献。Serale^[38] 整理了过去的 MPC 方法在建筑节能领域的应用:

(1) 讨论用于建筑和 HVAC 系统管理的不同 MPC 控制方法;

(2) 介绍准确捕捉建筑动态以建立基于模型的预测控制器所需的模型以及理论和实验控制过程的主要特征;

(3) 定义了专门针对建筑和暖通空调系统的制定 MPC 控制方法的明确框架。

为了提高对 HVAC 系统的控制节能效果,选择和实施最适合的建模技术,改进 HVAC 系统的控制策略是一个持续的挑战,Afroz^[39] 对此进行了批判性审查研究:

(1) 阐述了 HVAC 系统中精确建模的必要性;

(2) 介绍并分类了暖通空调系统中使用的建模技术;

(3) 总结当前建模技术的优点、缺点、应用和性能,突出现有暖通空调系统应用研究的不足之处,并据此提出改进建筑 HVAC 系统性能的建议。

并且随着机器学习的兴起,Peng^[40] 在该领域进行相关研究:

(1) 本研究采用两种机器学习方法——无监督学习和有监督学习,用于学习乘员行为,并在两个不同的学习过程中进行应用;

(2) 对办公楼内居住者的随机行为进行了深入分析,基于机器学习方法学习乘员的行为,用于控制冷却系统的实时温度设置点;

(3) 这种基于学习的方法减少了对冷却系统控

制中人为干预的需要。在真实条件下控制办公楼的冷却系统进行实验,与传统计划的冷却系统相比,节能 7%至 52%;

Wei^[41]用深度强化学习的方法,智能地学习建筑 HVAC 系统操作的有效策略:

(1)将 HVAC 控制操作表述为马尔可夫决策过程,并定义了系统状态、控制动作和奖励函数;

(2)为了获得更高的可扩展性,提出了一种启发式变体,用于复杂多区域系统的有效控制,基于 EnergyPlus 的联合仿真框架,用于离线培训和验证;

(3)与传统的基于规则控制的方法相比,该算法在降低能源成本方面更有效,同时将室温保持在期望的范围内。

3.3.2 研究前沿分析

HVAC 系统的建筑节能研究领域的研究前沿主要包括两个方面:先进建模技术和先进控制策略。

1)先进建模技术

“白盒模型”是一种基于物理建模的方法,利用物理原理深入建模和分析热力学性质,通过物理概念解决传热现象的计算问题。

“黑盒模型”又称“数据驱动模型”,一种基于历史数据创建模型的方法。从测量数据中学习建筑物的动态,而无需考虑物理关系。常用的黑盒模型包括线性模型(自回归模型)、参数非线性模型(人工神经网络)、非参数非线性模型(支持向量机,决策树和随机森林)、高斯过程模型。

“灰盒模型”结合黑盒和白盒模型两种方法,包括简化的物理关系和基于测量数据的参数估计。通常通过模型降阶来简化模型中的物理问题,并在降阶简化后能够保持相同水平的精度^[42]。

2)先进控制策略

模型预测控制(MPC):与经典控制相比,模型预测控制(MPC)是更高效的控制,能更大程度的节能,更好的调节室内环境^[43]。在控制能源效率、成本和控制机制方面的未来预测时,MPC 是合适的最佳选择^[44]。MPC 是一种用于过程控制的高级控制策略,其优势在于利用建筑物的数学模型预测其未来的热动力学状态。通过这些预测,MPC 能够基于预设的优化目标选择最优控制策略,同时兼顾舒适性需求和其他技术约束,以降低能源消耗成本。

深度强化学习(DRL)通过延迟奖励机制与受控环境交互来学习最佳控制策略^[45]。DRL 可以满足对 HVAC 系统控制的所有要求:

(1)运行在连续状态空间上的 DRL 算法,例如

深度确定性策略梯度,可以学习连续控制策略,通过与环境的交互作用来最大化给定的奖励函数;

(2)对如何定义奖励功能没有限制,可以使用多标准奖励功能和权衡要求,获得复杂策略;

(3)如果使用新接收的测量数据进行更新,则可以在线更新算法以适应新的建筑物动态。

4 结束语

本文以 WOS 数据库中文献为基础,获得建筑节能中 HVAC 的相关研究成果,并通过文献计量学与 CiteSpace 应用程序,从合作网络、研究基础、研究热点、研究趋势等角度绘制相关知识图谱,并进行剖析与解读,得到如下结论:

(1)HVAC 系统的建筑节能研究发文量逐年递增,研究热度高;

(2)美国、中国以及欧洲诸国是研究主力。中国起步较晚,但发展快,且重视国际间的合作交流;美国目前仍占据该领域的主导地位,但更侧重于本国的研究机构的研究;

(3)该领域的研究主要集中于 HVAC 系统建模、HVAC 系统的能耗影响因素、HVAC 系统的节能控制对象以及 HVAC 系统可采用的节能控制措施;

(4)该领域的未来研究方向主要集中在先进建模技术以及先进控制策略(模型预测控制和强化学习控制)。

参考文献

- [1] HAMILTON L, RAP O. Global state of buildings report 2020 [R]. Europe:GlobalABC, 2020.
- [2] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告 2020[J]. 建筑节能(中英文), 2021, 49(2): 1-6.
- [3] YOON A Y, KIM Y J, ZAKULA T, et al. Retail electricity pricing via online-learning of data-driven demand response of HVAC systems[J]. Applied Energy, 2020, 265(C): 114771.
- [4] YAO Y, SHEKHAR D K. State of the art review on model predictive control in Heating Ventilation and Air-conditioning field [J]. Building and Environment, 2021, 200(5): 107952.
- [5] 熊磊,苗雨润,范新舟,等. 一种利用改进麻雀搜索算法的中央空调系统节能控制方法[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(4): 495-504.
- [6] 王可,何利力. 基于精准按需供能的中央空调开机调度研究[J]. 智能计算机与应用, 2022, 12(6): 110-115.
- [7] 王子轩,姚晔,赵鹏生. 高维度集中空调系统优化控制模型及算法研究[J]. 制冷技术, 2021, 41(4): 20-26.
- [8] BARONE G, BUONOMANO A, FORZANO C, et al. A new thermal comfort model based on physiological parameters for the smart design and control of energy-efficient HVAC systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023(173): 113015.
- [9] 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.
- [10] 骆清怡, 王长宏. 数据中心多尺度热管理策略综述[J]. 制冷技术, 2021, 41(3): 1-11.
- [11] 宋曾强, 王前进, 翟晓强. 模糊控制与模型预测控制在空调系统中应用的研究现状[J]. 制冷技术, 2022, 42(6): 79-85.
- [12] 崔治国, 曹勇, 魏景姝, 等. 数据挖掘技术在建筑暖通空调领域的研究应用进展[J]. 建筑科学, 2018, 34(4): 85-97.
- [13] 谢富豪, 韩杰, 李越铭, 等. 基于自然通风与空调联合调节的混合冷却系统综述[J]. 桂林理工大学学报, 2022, 42(3): 749-756.
- [14] 曹勇, 丁天一, 于震. 地铁站通风空调控制系统节能优化研究综述[J]. 建筑科学, 2022, 38(4): 213-228.
- [15] 邱均平, 段宇锋, 陈敬全, 等. 我国文献计量学发展的回顾与展望[J]. 科学学研究, 2003(2): 143-148.
- [16] 杨东, 杨秀春, 金云翔, 等. 基于文献计量的草地生物量遥感监测研究进展[J]. 草业科学, 2021, 38(9): 1782-1792.
- [17] 李雯, 姜仁贵, 解建仓, 等. 基于文献计量学的城市洪涝灾害研究可视化知识图谱[J]. 西安理工大学学报, 2020, 36(4): 523-529.
- [18] 李杰, 陈超美. CiteSpace 科技文本挖掘及可视化(第二版)[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2017.
- [19] 兰莹, 秦天宝. 《欧洲气候法》: 以“气候中和”引领全球行动[J]. 环境保护, 2020, 48(9): 61-67.
- [20] LIU Y, YAN H Y, LAM J C, et al. Thermal comfort and building energy consumption implications: A review[J]. Applied Energy, 2014, 115(6): 164-173.
- [21] NGUYEN T A, AIELLO M. Energy intelligent buildings based on user activity: A survey[J]. Energy & Buildings, 2013, 56(4): 244-257.
- [22] OLDEWURTEL F, STURZENEGGER D, MORARI M, et al. Importance of occupancy information for building climate control[J]. Applied Energy, 2013, 101(4): 521-532.
- [23] FERREIRA P M, RUANO A E, SILVA S, et al. Neural networks based predictive control for thermal comfort and energy savings in public buildings[J]. Energy & Buildings, 2012, 55(12): 238-251.
- [24] AL-ALI A R, ZUALKERNAN I A, RASHID M, et al. A smart home energy management system using IoT and big data analytics approach. [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2017, 63(4): 426-434.
- [25] VAKILOROAYA V, SAMALI B, FAKHAR, et al. A review of different strategies for HVAC energy saving [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 77(1): 738-754.
- [26] HOYT T, ARENS E, ZHANG H, et al. Extending air temperature setpoints: Simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings[J]. Building and Environment, 2015, 88(6): 89-96.
- [27] CHENARI B, CARRILHO J D, SILVA M G, et al. Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59(6): 1426-1447.
- [28] CHEN Y, HONG T, PIETTE M A, et al. Automatic generation and simulation of urban building energy models based on city datasets for city-scale building retrofit analysis [J]. Applied Energy, 2017, 205(6): 323-335.
- [29] TOUZANI S, GRANDERSON J, FERNANDES S, et al. Gradient boosting machine for modeling the energy consumption of commercial buildings [J]. Energy & Buildings, 2018, 158(1): 1533-1543.
- [30] AFROZ Z, SHAFIULLAH G M, URMEE T, et al. Predictivemodelling and optimization of HVAC systems using neural network and particle swarm optimization algorithm [J]. Building and Environment, 2022, 209(12): 1-26.
- [31] 秦浩森, 于震, 李太禄, 等. 基于深度强化学习的热泵供热系统节能控制[J]. 建筑科学, 2022, 38(12): 1-6.
- [32] BRANDI S, PISCITELLI M S, MARTELLACCI M, et al. Deep reinforcement learning to optimise indoor temperature control and heating energy consumption in buildings[J]. Energy & Buildings, 2020, 224(6): 1-53.
- [33] DEREK J D S P. Networks of scientific papers: The pattern of bibliographic references indicates the nature of the scientific research front[J]. Science, 1965, 149(3683): 510.
- [34] GARFIELD E. The impact factor[J]. Current Contents, 1994, 25(20): 3-7.
- [35] PÉREZ-LOMBARD L, ORTIZ J, POUT C, et al. A review on buildings energy consumption information [J]. Energy & Buildings, 2007, 40(3): 394-398.
- [36] OLDEWURTEL F, PARISIO A, JONES C N, et al. Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control[J]. Energy & Buildings, 2011, 45(6): 15-27.
- [37] AFRAM A, JANABI-SHARIFI F. Theory and applications of HVAC control systems - A review of model predictive control [J]. Building and Environment, 2014, 72(11): 343-355.
- [38] SERALE G, FIORENTINI M, CAPOZZOLI A, et al. Model Predictive Control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: Problem formulation, applications and opportunities[J]. Energies, 2018, 11(3): 1-35.
- [39] AFROZ Z, SHAFIULLAH G M, URMEET T, et al. Modeling techniques used in building HVAC control systems: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 83(3): 64-84.
- [40] PENG Y Z, RYSANEK A, NAGY Z, et al. Using machine learning techniques for occupancy - prediction - based cooling control in office buildings[J]. Applied Energy, 2018, 211(2): 1343-1358.
- [41] WEI T S, WANG Y Z, ZHU Q, et al. Deep reinforcement learning for building HVAC control[C]//Proceedings of the 54th Annual Design Automation Conference 2017. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1-6.
- [42] PICARD D, JÁN D, MICHAL K, et al. Impact of the controller model complexity on model predictive control performance for buildings[J]. Energy & Buildings, 2017, 152(6): 739-751.
- [43] 李卓阳, 靳小龙, 贾宏杰, 等. 考虑建筑物热动态特性的暖通空调模型预测控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3928-3940.
- [44] DRGOÑA J, ARROYO J, CUPEIRO F I, et al. All you need to know about model predictive control for buildings[J]. Annual Reviews in Control, 2020, 50(1): 190-232.
- [45] WANG Z, HONG T Z. Reinforcement learning for building controls: The opportunities and challenges[J]. Applied Energy, 2020, 269(7): 1-18.