

文章编号: 2095-2163(2023)10-0171-08

中图分类号: TU022

文献标志码: A

基于文献计量学的智能建筑研究进展及前沿分析

陈栋才¹, 张思洪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: 随着第五次信息革命的兴盛, 一种新型建筑体系—智能建筑应运而生。使用文献计量法, 以 Web of Science(WOS)数据库作为数据来源, 搜集基于人工智能和大数据的智能建筑研究相关文献数据; 利用 CiteSpace 软件绘制知识图谱; 将数据可视化处理分析, 以研究其涵盖的方向及热点。结果表明, 前期研究热点主要有建筑能耗管理策略、简单传感网络和电气自动化在建筑领域的应用; 当前的研究热点主要有物联网技术、基于数据驱动的建筑能耗预测和先进建筑能源管理技术。

关键词: 智能建筑; CiteSpace; 文献计量学; 数据可视化; 知识图谱

Research and analysis on intelligent buildings based on bibliometrics

CHEN Dongcai¹, ZHANG Sihong¹, CAI Yongxiang², CHEN Xiangping¹

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

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

【Abstract】 With the prosperity of the fifth information revolution, a new type of building system, intelligent building, is developed. In this paper, a bibliometric method is used to collect literature information related to intelligent building research based on artificial intelligence and big data from the Web of Science (WOS) database. By using visualized data and comparative analysis CiteSpace, this paper explores the directions and key interests of this research field. The results show that the main research hotspots lie in applications of building energy management strategies, simple sensing networks, and electrical automation in the building sector. The current research interests mainly include Internet of Things technology, data-driven building energy consumption prediction, and advanced building energy management technology.

【Key words】 smart buildings; CiteSpace; bibliometrics; data visualization; knowledge mapping

0 引言

随着第五次信息革命, 计算机技术得到高速发展。上世纪 80 年代, Joanna Eley^[1] 提出了智能建筑的概念, 美国的康州哈特福德市建造了第一座基于信息技术和物联网技术的智能建筑“都市办公大楼”。智能建筑通过使用系统集成技术, 将计算机网络技术、现代通讯技术、现代自动控制技术等数字化技术与建筑技术等相关技术有机地结合一体, 根据需求响应, 将建筑的结构、系统、服务管理进行最优组合, 所有的一切构成了安全、高效、方便和舒适的建筑物^[2]。智能建筑系统由多个互相协同的部分组成, 能够在任何情况下对建筑进行管理。通过对周围环境资源的合理利用, 智能建筑依托现代化技术, 实现了绿色环保、节能减排的目的, 如今已经成为建筑行业和信息

技术行业交叉发展的重要领域。

在人与建筑互动的过程中, 建筑与人之间产生了大量的数据, 因此可以把建筑看作一个具有感知能力的“生命体”。智能建筑拥有以下内涵特征: 自感知, 即可监测并收集建筑运行期间的历史数据等; 自管理, 即通过对历史数据信息的分析处理, 完成建筑内基于大数据学习的自我行为管理等; 自学习, 即能够分析建筑物自身运行及环境相关的大量数据, 进行自我学习; 自呼吸, 即使建筑物依托绿色技术, 模仿自然循环, 以达到减少能耗, 节约资源, 保护环境的目的。智能建筑典型特征如图 1 所示^[3]。

对于智能建筑领域的研究, 绝大多数学者选择从某一方面着手。如: 改进群智能算法^[4]、管理控制^[5-6]、建立评价体系^[7]、物联网集成^[8]、建筑负荷预测^[9]等方面, 仅局限于方法层面或技术层面。现

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; 陈湘萍(1977-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 综合能源管理。

通讯作者: 陈湘萍 Email: 384198892@qq.com

收稿日期: 2022-10-29

有的这些文章虽然具有一定价值,但未能客观揭示智能建筑研究的全貌,也未能适当关注探索过去几十年来的研究热点。在传统的评论文章中,很难在大时间尺度的大量研究中有效地组织、总结和定量分析某一特定领域的发展。

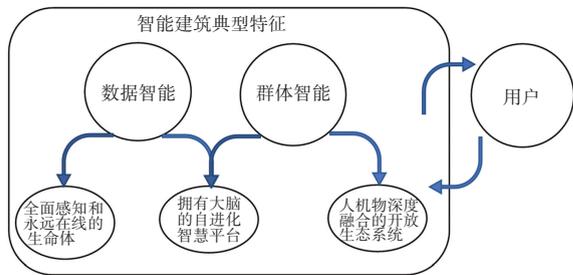


图1 智能建筑典型特征^[3]

Fig. 1 Typical characteristics of intelligent buildings

由于智能建筑是一个跨学科的研究领域,涵盖了建筑类、计算机类、能源类、控制类等学科,为了全面了解智能建筑的进展和热点,本文采用文献计量分析方法,利用可视化工具 CiteSpace 对国内外众多有关智能建筑的文献数据进行分析处理,绘制发文情况、关键词、被引文献等知识图谱,从智能建筑全局出发,并结合相关文献资料研究解读,得到至今为止国内外智能建筑的研究现状及前言,并预测智能建筑的发展趋势。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

以 Web of Science 数据库中的核心合集数据库作为数据来源,引文索引选择 Science Citation Index Expanded (SCIE) 和 Conference Proceedings Citation Index-Science (CPCI-S),主题以“smart building *” OR “intelligent building *” AND “artificial intelligence” AND “big data”进行检索,时间跨度选择 2010 年至 2022 年,并精炼检索结果,去重后得到 2 997 篇文献。

1.2 研究方法

CiteSpace^[10]是美国德雷塞尔大学陈超美教授基于 Java 平台开发的一款文献计量可视化分析软件,其结合网络分析与关联规则分析等方法,绘制知识图谱,并通过图谱分析该领域的研究动态、研究趋势、研究热点,是近年来最具影响力的信息可视化分析软件之一^[11]。当前, CiteSpace 软件已被广泛应用于诸多领域的研究综合分析^[12]。通过知识图谱的形式,与传统文献相比,可以更加清晰地展示智能建筑研究领域的发展脉络、研究热点等。

CiteSpace 与 3 个中心概念相关:异构网络、中介中心性和突变检测。这些概念可以解决 3 个实际问题,即了解研究的现状和热点、研究的相关性以及及时发现新趋势和突变。在 CiteSpace 中,当前的研究现状和热点是基于文献的标题、摘要和关键词等标识符中提取;研究的相关性通过识别具有高中介中心性的节点来确定,使用户更容易识别关键点,为了在可视化的网络中脱颖而出,关键点用紫红色外圈突出显示;突发检测算法可以适用于检测某个研究领域急剧增加的研究热点。

文献计量学是以文献计量特征为研究对象,采用数学与统计学的计量方法来描述、评价文献的分布情况、统计规律以及预测文献方向,是一门集合数学、统计学、文献学的交叉科学^[13]。文章通过 CiteSpace 的文献计量分析方法,来探索基于人工智能和大数据的智能建筑研究领域的相关知识图谱。首先,通过从 WOS 数据库中收集与智能建筑相关的文献数据;将数据导入到 CiteSpace 软件中,对文献的出版年份、国家与机构、作者共被引、共现关键词和聚类、文献共被引和聚类以及文献突变进行分析;最后得出智能建筑研究领域的知识图谱。

2 结果与分析

2.1 发文量分析

将收集到的 2 997 篇文献做一个年发文量统计,如图 2 所示。发文量的演变大致可分为 3 个阶段:第一阶段始于 2010~2012 年,期间智能建筑相关文献稀少且增长缓慢,反映出智能建筑处于起步阶段的事实;第二阶段始于 2013~2019 年,在此期间,智能建筑论文的年度发表量激增,表明智能建筑受到越来越多的关注,也表明更多的研究得到了执行;第三阶段始于 2020~2022 年,发文量开始下跌,表明研究热度有所下降,智能建筑的发展可能遇到了瓶颈。

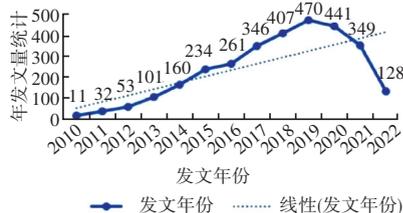


图2 基于 WoS 智能建筑研究年发文量统计

Fig. 2 Annual publication statistics based on WoS intelligent building research

2.2 发文国家与机构分析

发现重点关注的国家和机构评价其学术影响力,对于了解该研究领域的研究基础和研究动态具

有重要意义。因此,可将 CiteSpace 中节点类型设为“country”或“Institution”,得到发文国家与机构的共现网络。如图 3 所示,节点越大,频次越大,代表发

文数量越多,每个节点从中心沿半径方向到达边缘的颜色趋势表示了时间的演变,内圈的冷色代表早年,外圈的暖色代表近几年。

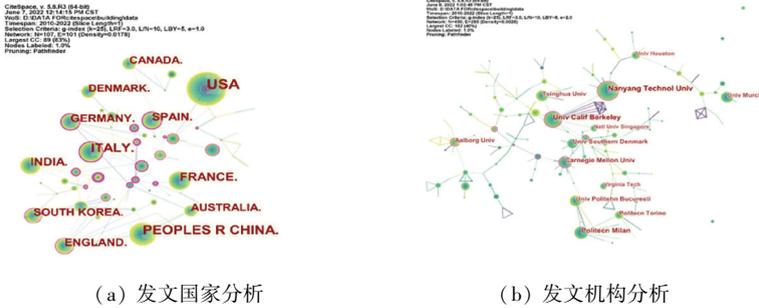


图 3 发文分析共现网络知识图谱

Fig. 3 Publishing and analyzing the co-existing network knowledge graph

由图 3 中可见,发文量排名前列的国家依次为美国、中国、意大利等。从图 3 所显示的复杂连线可知,各个国家之间的合作关系较为不同。如:中国和美国发文量是最多的,但与其他国家节点的连线很少,说明与其他国家之间的合作不多;而欧洲国家之间连线密集,说明欧洲国家之间合作很密切。

比较分散,需加强学术交流,形成良好的学术团体。

2.3 关键词共现和聚类分析

2.3.1 共现关键词分析

值得指出的是,高中心性意味着节点的重要性。按中心度来排列,印度<中国和法国<美国<英国<意大利<德国<西班牙,西班牙的中心度最高,达到 0.36,表明西班牙与意大利、德国、英国等许多国家保持着广泛的合作。表 1 显示大多数国家节点的中心性较低,这意味着大多数国家之间的合作研究较为有限,各国和国际机构有必要加强合作与沟通。

对文献关键词进行分析,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。频次较高的关键词可以反映该研究领域的研究热点,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^[14]。关键词共现可视化结果如图 4 所示,图中共有 481 个节点,642 条连线,网络密度为 0.005 6,说明智能建筑研究主题比较广泛,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。热门关键词在频次上的排序见表 3。

表 1 发文量前列的国家

Tab. 1 Countries with most publications

国家	发文量/篇	中介中心性
USA/美国	651	0.06
PEOPLES R CHINA/中国	332	0.03
ITALY/意大利	246	0.29
FRANCE/法国	203	0.03
INDIA/印度	174	0
SPAIN/西班牙	154	0.36
ENGLAND/英国	124	0.16
GERMANY/德国	120	0.34

表 2 发文量前 5 位的机构

Tab. 2 Top 5 institutions with most publications

国家	机构	发文量/篇
新加坡	Nanyang Technol Univ/南洋理工大学	62
美国	univ Calif Berkeley/加州大学伯克利分校	54
意大利	Politecn Milan/米兰理工大学	43
美国	Carnegie MellonUniv/卡内基梅隆大学	37
丹麦	univ Southern Denmark/丹麦南部大学	8

从表 1 和表 2 可以发现,中国、美国和意大利等发文量较多的国家,其发文并未集中在对应国家的国内某一机构,说明该国国内在该研究领域的研究势力

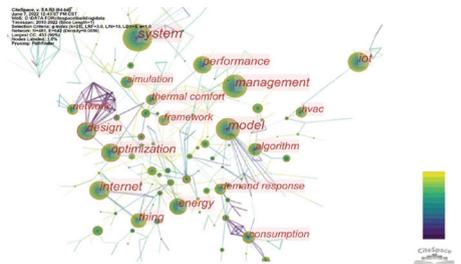


图 4 英文关键词共现网络知识图谱

Fig. 4 Knowledge graph of English keywords co-appear network

由表 3 对关键词的出现频次和中介中心性进行统计,出现频次由高到低的关键词为系统(317)、模型(286)、管理(168)、优化(143)等,是智能建筑研究的基础,且研究成果较多,绝大多数研究主要是以搭建模型系统模拟建筑运行,以进行管理优化为主。而设计(0.33)、效率(0.23)、策略(0.26)、需求侧管

理(0.27)、热舒适(0.17)、互联网(0.1)等中介中心性大于0.1的关键词,在智能建筑的研究中起连接作用,是该领域研究的重点内容,包括依托互联网实现人、物和建筑之间的互联^[15];基于需求侧管理的建筑能效分析^[16];考虑建筑能耗和人员热舒适度的管理控制策略^[17]等。

表3 重点关键词

Tab. 3 Important keywords

频次	中介中心度	关键词
317	0.06	system/系统
206	0.17	model/模型
181	0.1	internet/互联网络
176	0.06	iot/物联网
168	0	management/管理
143	0.12	optimization /优化
117	0.33	design/设计
103	0.08	energy/能源
95	0.08	demand response/需求侧响应
72	0.14	consumption /消费
63	0.12	framework /框架
62	0.17	thermal comfort /热舒适
43	0.23	efficiency /效率
39	0.26	Strategy/策略
33	0.27	demand side management /需求侧管理

2.3.2 关键词聚类分析

由于未考虑到不同文献时效性所带来的影响,因此热点研究的薄弱程度不足以反映一个学术领域的研究趋势。为了克服这个弱点,对关键词进行聚类分析,以获得智能建筑研究的新兴趋势和前沿,集群的标签是 LLR 集群的命名模式,不同集群之间的某些部分可能会重叠。聚类结果如图5所示,得到了10个聚类(仅显示最大连接组件),模块度 Q 为0.816,平均轮廓值 S 为0.9286,且每个聚类的轮廓值都超过了0.5,表明结果是可靠且有意义的。

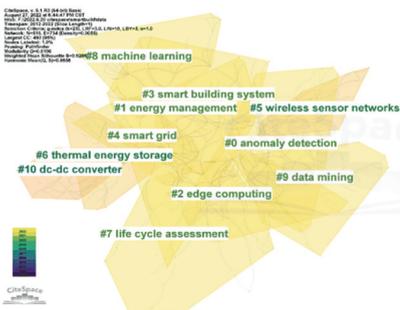


图5 2010-2022年的文献关键词的聚类可视化

Fig. 5 Cluster visualization of literature keywords from 2010 to 2022

由图5的聚类效果可见, #2 edge computing(边缘计算)、#5 wireless sensor network(无线传感网络)符合智能建筑的“自感知”特征; #0 anomaly

detection(故障诊断)、#1 energy management(能量管理)和#3 smart building system(智能建筑系统)符合智能建筑的“自我管理”特征; #8 machine learning(机器学习)、#9 data mining(数据挖掘)符合智能建筑的“自学习”特征; #4 smart grid(智能电网)、#6 thermal energy storage(热能存储)和#7 life cycle assessment(生命周期评估)符合智能建筑的“自呼吸”特征。

聚类中出现频次较高的关键词 system(系统)、neural network(神经网络)、energy forecasting(能源预测)、iot(物联网)、reinforcement learning(强化学习)、predictive control(预测控制)、energy management(能源管理)等,从总体上来看:智能建筑的研究热点主要集中于现代计算机技术、通信技术、电气能源技术以及现代控制技术在建筑领域上的交叉应用。

但是,新的控制和通信技术的引入,对建筑能源管理系统产生了深远影响,提供了更精确、高效的能源监测和控制手段,促进了建筑能源管理技术的不断发展和创新需求。模型预测控制(MPC)以其在能源管理方面的潜力,成为近年来的一项研究热门。国外学者 Serale G^[18]定义了MPC制定框架,并讨论不同的现有MPC算法用于建筑和HVAC系统管理的结果,强调了应用MPC在提高建筑物能源效率方面的潜在好处。先进的建筑能源管理技术的发展离不开建筑负荷预测的发展,然而建筑能耗具有非线性、时变性强和不确定等特点,主流的基于详细能耗模型模拟方法存在使用复杂,建模时间久,且存在性能差距等问题^[19]。因此,基于数据挖掘与机器学习的建筑负荷预测研究的重要性日益提高。通过使用包括人工神经网络(ANN)、支持向量机(SVM)、梯度提升(XGBoost)、分类与回归树(CART)等方法分析数据关联关系,进行特征选择,挖掘影响建筑能耗的决定性因素,进行负荷预测^[20]。以良好的建筑能源管理技术为基础,以新型传感器网络为骨干,以物联网集成系统为统帅,再辅以大数据、云计算等信息技术,即可实现绿色节能建筑^[21],实现智能建筑的“自呼吸”。在国内王宏等人^[22]开展了针对人工智能和物联网等技术为基础的AIoT(Artificial Intelligence and Internet of Things)在实际绿色智能建筑楼宇自控中的融合应用研究。主要包括基于AIoT的智能建筑楼宇自控系统总体层级架构、智能自动照明系统的节能优化控制及其故障诊断与预测等研究,基于物联网技术和神经网络的故障预测诊

之一的腾讯滨海大厦为例,其已经拥有了高效的能量利用效率,完善的数字化转型基础设施以及智慧化管理平台等多项智能建筑特征,深度融合了云计算、物联网、人工智能、信息安全等前沿技术。然而,目前智能建筑领域发展仍存在瓶颈与不足。以物联网的应用为例,当前物联网的应用场景过于广泛,导致存在碎片化问题,缺乏统一的连接协议和应用协议标准^[37];数据挖掘以及深度学习在智能建筑上的应用存在数据不规范,重量不重质的问题,神经网络属于黑箱结构,工作状态不稳定;智能技术的应用仍然以检查和监测为主,并多采用信号提示的方式与人工进行交互,而缺乏进一步自主的智能应对^[38];同时中国的智能建筑起步较慢,很多核心技术以及产品以国外市场为主流,冒失运用在国内智能建筑的实施可能存在“水土不服”的情况,需进一步推动国产技术的创新。

3 结束语

通过文献计量学并结合 CiteSpace 应用程序,旨在探究智能建筑研究领域的研究现状和热点。通过从多个视角对绘制知识图谱进行分析,发现关于智能建筑研究领域有如下特征:

(1) 中国和美国发文量是最多的,但是和其他国家节点的连线很少,说明中国和美国和其他国家之间的合作不多;而欧洲国家之间连线很密集,说明欧洲国家之间合作很密切。

(2) 通过对关键词的共现和聚类分析,发现当前研究热点主题主要聚焦于能量管理、热舒适度、无线传感网络、深度强化学习、预测控制等。

(3) 对共被引文献和关键词的突变检测分析,探索研究前沿,主要有物联网技术、基于数据驱动的建筑能耗预测和先进建筑能源管理技术等。

(4) 综合研究发现,智能建筑是现代化技术的集大成之作。然而目前主流技术应用仍存在很大的局限性与不足。

在智能建筑的发展中,需要从设计阶段就开始重视智能化技术的应用,加强技术创新,提高相关系统的使用效率,避免出现重建设轻使用的奇怪现象,全方位发挥智能建筑的优势。

参考文献

[1] Joanna Eley. Intelligent buildings[J]. Facilities, 1986, 4(4): 4-11.
[2] 陈剑. 浅谈我国智能建筑的发展现状及对策[J]. 信息记录材料, 2018, 19(2): 9-10.

[3] 《智慧建筑白皮书》: 建筑将成为拥有“大脑”的智慧平台[J]. 智能建筑与智慧城市, 2017(5): 20-21.
[4] Germán Ramos Ruiz and Eva Lucas Segarra and Carlos Fernández Bandera. Model predictive control optimization via genetic algorithm using a detailed building energy model[J]. Energies, 2018, 12(1): 1-34.
[5] TIAN Zhichao. Multi-objective optimization model predictive dispatch precooling and ceiling fans in office buildings under different summer weather conditions[J]. Building Simulation, 2019, 12(6): 999-1012.
[6] 王明菱, 李增光, 孙树国, 等. 中央空调表冷阀自动控制方法改进[J]. 智能计算机与应用, 2022, 12(1): 74-79.
[7] 李晴. 智慧建筑全过程综合评价研究[D]. 成都: 西华大学, 2019.
[8] 薛玮. 物联网技术在智能建筑中的应用研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018.
[9] 黄元行, 刘晓波, 范津玮, 等. 基于注意力机制和 EMD-GRU 模型的电力负荷预测[J]. 智能计算机与应用, 2021, 11(3): 33-37, 43.
[10] 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.
[11] 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.
[12] 李杰, 陈超美. CiteSpace 科技文本挖掘及可视化(第二版)[D]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2017.
[13] 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.
[14] WANG Qiang, LI Rongrong, ZHAN Lina. Blockchain technology in the energy sector: from basic research to real world Applications[J]. Computer Science Review, 2021, 39(2): 100362-100387.
[15] 何勇, 王晓丽, 肖海飞, 等. 基于物联网的非侵入式用电器在线监测系统设计与实现[J]. 智能计算机与应用, 2021, 11(12): 158-164, 170.
[16] Alhasnawi Bilal Naji, et al. A new Internet of Things based optimization scheme of residential demand side management system[J]. IET Renewable Power Generation, 2022, 16(10): 1992-2006.
[17] 蒋志恒, 张明媛, 袁永博. 兼顾节能效益的建筑室内热舒适温度调整研究[J]. 建筑经济, 2016, 37(3): 84-88.
[18] 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): 631-666.
[19] VAN DEN BROM P, MEIJER A, VISSCHER H. Performance gaps in energy consumption: household groups and building characteristics[J]. Building Research & Information, 2018, 46(1): 54-70.
[20] LIU Ronghui. Short-term probabilistic building load forecasting based on feature integrated artificial intelligent approach[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 206(5): 1-11.
[21] ANDREAS P. PLAGERAS, KOSTAS E. Psannis, Christos Stergiou, et al. Efficient IoT-based sensor BIG Data collection-processing and analysis in smart buildings[J]. Future Generation Computer Systems, 2018, 82(5): 349-357.
[22] 王宏, 韩晨, 李丹丹, 等. AIoT 技术在绿色智能建筑楼宇自控系统中的最新发展和应用探究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2021, 55(1): 52-60.

- [23] 赵翔君, 祁爱华, 高丽婷, 等. 基于传感网的智能建筑设备远程控制方法研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(4): 376-379.
- [24] Salvatore Carlucci. Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)[J]. Energy and Buildings, 2015, 104(10): 378-394.
- [25] LI W, WANG S. A fully distributed optimal control approach for multi-zone dedicated outdoor air systems to be implemented in IoT-enabled building automation networks[J]. Applied Energy, 2022, 308(2): 118408-118418.
- [26] Yar Hikmat. Towards smart home automation using IoT-enabled edge-computing paradigm[J]. Sensors, 2021, 21(14): 4932-4932.
- [27] 吕华章, 陈丹, 范斌, 等. 边缘计算标准化进展与案例分析[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(3): 487-511.
- [28] DOUNIS A I, CARASCOS C. Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment-A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 13(6): 1246-1261.
- [29] Luis Pérez-Lombard, José Ortiz, Christine Pout. A review on buildings energy consumption information[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(3): 394-398.
- [30] LU J, SOOKOOR T, SRINIVASAN V, et al. The smart thermostat: using occupancy sensors to save energy in homes [C]//Proceedings of the 8th ACM conference on embedded networked sensor systems. 2010; 211-224.
- [31] MINOLI D, SOHRABY K, OCCHIOGROSSO B. IoT considerations, requirements, and architectures for smart buildings - energy optimization and next-generation building management systems [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(1): 269-283.
- [32] Andreas P. Plageras, Kostas E. Psannis, Christos Stergiou, et al. Efficient IoT-based sensor BIG data collection-processing and analysis in smart buildings [J]. Future Generation Computer Systems, 2018, 82(5): 349-357.
- [33] AMASYALI K, NORA M. EL-GOHARY. A review of data-driven building energy consumption prediction studies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 1192-1205.
- [34] LAWRENCE T M, BOUDREAU M C, HELSEN L, et al. Ten questions concerning integrating smart buildings into the smart grid [J]. Building and Environment, 2016, 108: 273-283.
- [35] WEI T, WANG Y, ZHU Q. Deep reinforcement learning for building HVAC control [C]//Proceedings of the 54th annual design automation conference 2017. 2017: 1-6.
- [36] REYNOLDS J, REZGUI Y, KWAN A, et al. A zone-level, building energy optimisation combining an artificial neural network, a genetic algorithm, and model predictive control[J]. Energy, 2018, 151: 729-739.
- [37] 贾岩. 物联网平台关键组件安全研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [38] 吴志强, 王坚, 李德仁, 等. 智慧城市热潮下的“冷”思考学术笔谈[J]. 城市规划学刊, 2022(2): 1-11.

(上接第170页)

3 结束语

本文提出了一个新的预测模型, 融合药物和疾病数据的相似性和关联性、药物-疾病节点对的特性, 以及来自多个元路径的语义信息, 并且为无属性的疾病节点进行了属性补全以预测药物-疾病的关联。建立了3个异构网络, 以便于学习每个异构网络中节点的属性表示。本文还提出了2个注意力机制, 将更高权重分配给更重要的元路径和节点邻居。通过与其他6个预测模型比较, 本文提出模型在AUC和AUPR方面均取得了更好的预测性能。

参考文献

- [1] NEUBERGER A, ORAIOPOULOS N, DRAKEMAN D L. Renovation as innovation: is repurposing the future of drug discovery research? [J]. Drug discovery today, 2019, 24(1): 1-3.
- [2] PENG Y, WANG M, XU Y, et al. Drug repositioning by prediction of drug's anatomical therapeutic chemical code via network-based inference approaches [J]. Briefings in bioinformatics, 2021, 22(2): 2058-2072.
- [3] ZHANG W, HUANG F, YUE X, et al. Prediction of drug-disease associations and their effects by signed network-based nonnegative matrix factorization [C]//2018 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM). IEEE, 2018: 798-802.
- [4] ZHANG W, YUE X, LIN W, et al. Predicting drug-disease associations by using similarity constrained matrix factorization[J]. BMC bioinformatics, 2018, 19: 1-12.
- [5] LUO H, LI M, WANG S, et al. Computational drug repositioning using low-rank matrix approximation and randomized algorithms [J]. Bioinformatics, 2018, 34(11): 1904-1912.
- [6] LIU H, SONG Y, GUAN J, et al. Inferring new indications for approved drugs via random walk on drug-disease heterogeneous networks[J]. BMC bioinformatics, 2016, 17: 269-277.
- [7] WANG Y, CHEN S, DENG N, et al. Drug repositioning by kernel-based integration of molecular structure, molecular activity, and phenotype data[J]. PloS one, 2013, 8(11): e78518.
- [8] LUO H, WANG J, LI M, et al. Computational drug repositioning with random walk on a heterogeneous network [J]. IEEE/ACM transactions on computational biology and bioinformatics, 2018, 16(6): 1890-1900.
- [9] XUAN P, YE Y, ZHANG T, et al. Convolutional neural network and bidirectional long short-term memory-based method for predicting drug-disease associations[J]. Cells, 2019, 8(7): 705.
- [10] JIN D, HUO C, LIANG C, et al. Heterogeneous graph neural network via attribute completion [C]//Proceedings of the web conference 2021. 2021: 391-400.
- [11] LIANG X, ZHANG P, YAN L, et al. LRSSL: predict and interpret drug-disease associations based on data integration using sparse subspace learning [J]. Bioinformatics, 2017, 33(8): 1187-1196.