

文章编号: 1671-6612 (2026) 02-240-06

高铁车站空调系统智能控制研究综述

胡光华¹ 董彦习¹ 王旭江²

(1. 济郑高速铁路有限公司 济南 250100; 2. 山东大学 济南 250000)

【摘要】 高铁车站是区域交通网络的核心节点, 具有建筑尺寸大、单位时间载运乘客数量多以及舒适度要求高等众多特点。高铁车站内空调系统的节能研究对于高铁系统的节能减排意义重大。控制技术是实现空调系统节能减排的关键因素。因此, 对高铁车站空调系统的智能控制技术开展了系统性文献梳理与调研。研究表明, 当前智能控制在暖通空调领域的应用已较为广泛, 深度学习方法成为主要技术路径。然而, 针对高铁车站这一特定场景的实证研究仍相对不足, 相关研究亟需深化。

【关键词】 暖通空调; 高铁车站; 智能控制; 人工智能

中图分类号 TK01+8 文献标志码 A

Review on the Intelligent Control of Air Conditioning Systems in High-Speed Railway Stations

Hu Guanghua¹ Dong Yanxi¹ Wang Xujiang²

(1. JiZheng High Speed Railway Co., Ltd, Jinan, 250100; 2. Shandong University, Jinan, 250000)

【Abstract】 High-speed railway stations are the core nodes of the regional transportation network, featuring large building sizes, a large number of passengers carried per unit time, and high comfort levels. Research on the energy conservation of heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems in high-speed railway stations is of great significance for energy conservation and emission reduction in the high-speed railway system. Control technology is a key factor in realizing energy conservation and emission reduction of air conditioning systems. Therefore, this study conducts a systematic literature review and investigation on intelligent control technologies for HVAC systems in high-speed railway stations. The findings indicate that the application of intelligent control in the HVAC field has become increasingly widespread, with deep learning emerging as the predominant methodological approach. However, empirical research focusing on the specific context of high-speed railway stations remains relatively limited, highlighting the need for further in-depth studies.

【Keywords】 HVAC; High-speed railway station; Intelligent control; Energy conservation

0 引言

“碳达峰、碳中和”是我国未来三十年最重要的国家能源战略。根据全国能源使用状况统计, 目前碳排放集中在电力、交通、化工与水泥等重点领域。因此, 交通领域的节能减排压力重大。高速铁路是我国交通领域重要的组成部分, 并且在近十余年内得到了快速的发展。据报道, 我国力争到 2025 年全国铁路营业里程达到 16.5 万公里, 其中高铁 5

万公里, 铁路网覆盖 99.5% 的城区人口 20 万以上城市, 高铁网覆盖 97.2% 的城区人口 50 万以上城市。高铁车站是区域交通网络的核心节点, 具有建筑尺寸大、单位时间载运乘客数量多以及舒适度要求高等众多特点。因此, 高铁车站的能耗不容忽视。据报道, 在高铁车站的运维过程中, 确保乘客舒适性的暖通空调能耗占到了高铁车站能耗的 15% 以上^[1]。然而, 现存的大型中央空调还存在一些不足

基金项目: 山东省交通运输厅科技计划项目 (2023BJN04-03)

作者 (通讯作者) 简介: 胡光华 (1985.03-), 男, 硕士, E-mail: 979595310@qq.com

收稿日期: 2025-09-04

与缺陷^[2]。比如，在空调设计过程中，为了满足温控需求，设计参数存在普遍偏大、室内温度过低与新风量过大等问题；此外，目前大型中央空调的控制相对粗放，各子系统独立控制，缺少相互之间的协同优化。这导致了负荷、输配系统以及冷热源之间的匹配度差，能源的利用率也偏低。近年来，随着 AI 与智能群控技术的发展，学者们针对大型中央空调的智能控制技术开展了大量的研究。此外，一些科研成果也已经在众多企业中得到了产业化应用。比如某公司推出 AI 预测算法为核心的中央空调群控方案。通过结合近七天的室外温湿度、冷机开启台数、设定值对应的冷量、室内外温湿度数据、末端负荷运行参数等输入，结合 AI 神经元群控模型训练技术末端负荷历史运行数据，预测出制冷机组台数、最优与出水输出、冷冻与冷却水泵的运行台数与频率以及冷却塔运行参数等。通过对中央空调的海量数据进行采集，并基于强大的数据挖掘能力，识别关键因素，为故障诊断与运维提供解决方案。虽然大量相关公司均布局了相关的智能化业务，但是 AI 技术迅速发展，空调系统智能控制也相应地需要不断进步。因此，本文主要针对近年来相关研究进行整理，为高铁车站空调系统智能控制的发展提供思路。

1 负荷预测

空调系统的核心目标是满足建筑内人员的冷热负荷与热舒适性需求。上述需求与室外的气象条件及室内热源密切相关。由于室外气象条件和室内

热源的动态变化，建筑冷热负荷呈现出分钟级的频繁波动。然而，满足冷热负荷的机组却无法实现快速频繁的工况切换。因此，需要对建筑内的负荷进行准确的预测，为机组的工况的提前切换提供依据。随着大数据与人工智能算法的快速发展，当前大多数研究均基于不同算法，结合实测或模拟数据开展负荷预测^[3-15]。

Liu T 等人^[3]提出一种基于深度强化学习（DRL）的短期 HVAC 系统能耗预测方法。该方法采用深度确定性策略梯度（DDPG）算法，并结合自动编码器（AE）提取状态空间的高级特征。以河南某办公楼的地源热泵系统数据为例，作者对比了 BP 神经网络、支持向量机等监督学习模型的预测效果。结果表明，DDPG 模型在预测精度上显著优于传统模型，AE 的加入进一步提升了特征提取能力，验证了 DRL 在 HVAC 能耗预测中的潜力。Mohan R 等人^[4]开发了一种集成极限梯度提升（XGB）、决策树（DT）和随机森林（RF）的堆叠集成模型，用于预测住宅建筑的供暖和冷却负荷能耗。通过贝叶斯优化调整超参数，并与岭回归、Lasso、KNN 等传统模型进行了对比。结果显示堆叠模型在均方根误差（RMSE）和决定系数（R²）上表现最优，这验证了集成学习在处理复杂能耗数据中的优势，尤其在 HVAC 系统这样的多负荷预测场景。Cho J 等人提出一种针对办公建筑 HVAC 系统的能源需求的预测方法，如图 1 所示^[5]。通过矩阵组合分析空调、中央设备和水分配子系统，构建了 960 种 HVAC 系统的组合模型。

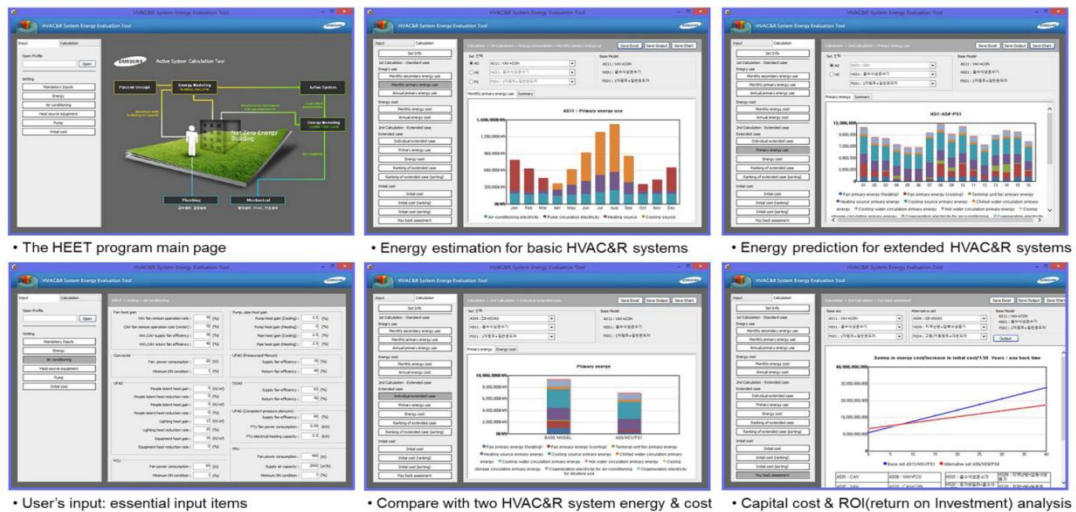


图 1 能耗评估方法

Fig.1 Energy consumption assessment method

Xiao Z 等人^[7]探讨数据预处理和特征选择对 HVAC 能耗预测的影响, 对比高斯核密度估计和 Savitzky-Golay 滤波两种平滑方法, 并分析历史数据时长、训练集规模和模型更新频率的作用。结果显示, 1 天历史数据结合干球温度、露点温度等输入变量效果最佳, 建议模型每 7 周更新一次以平衡计算成本与精度, 为实际应用中的数据处理策略提供了参考。Pandey PR 等人^[8]利用深度神经网络 (DNN) 预测住宅宿舍的开窗行为对 HVAC 能耗的影响。通过分析 16 个宿舍的 48 扇窗户数据, 建立基于时间序列的 DNN 模型, 并集成到 EnergyPlus 仿真中。结果表明, 卧室窗户的开关行为更具时间依赖性, 模型在考虑室内 CO₂ 浓度和室外温度时预测准确率达 96.7%, 量化了自然通风对能耗的影响, 为混合通风策略优化提供了依据。Bazazzadeh H 等人^[14]利用 ML 算法来预测美国各地办公楼中优化 HVAC 系统带来的节能和热舒适度改善的有效性。论文首先基于 HadCM3 气候模型生成 16 个美国城市的未来天气数据, 模拟夜间温度回退策略。作者对多个 AI 模型进行了预测, 结果表明 LGBMR 模型能够准确预测节能和热舒适度的提高, 准确率为 88%。Suda T 等人^[15]研究了鲁棒预测与模型预测控制 (MPC) 在 HVAC 中的应用, 作者通过 k-means 聚类太阳辐射数据分群, 滤波处理异常值, 提升了预测鲁棒性 (MRE 降低 1.15%), 之后, 论文构建了多房间 HVAC 模型, 通过 MPC 最小化温度偏差与能耗, 在日本某办公楼模拟中实现峰值电力削减 4.7kW, 月成本减少 99280 日元。研究验证了数据驱动与模型结合的实时优化潜力, 为智能建筑能源管理提供新框架。

2 空调控制技术

空调系统主要策略是利用控制技术实现负荷与热源的匹配。空调系统存在不同时间与空间尺度的子系统, 控制参数数量庞大且异常复杂。因此, 传统的 PID 算法很难实现如此多尺度多变量的复杂控制。目前的研究依然是基于深度学习与先进控制算法, 实现暖通空调的控制^[16-24]。具体的研究状况如下。

本部分主要是针对具体的暖通空调的场景, 开展控制相关的研究, 如图 2 所示。Kim M 等人^[16]提出一种结合优化与监督学习的 HVAC 实时控制

框架。该框架利用数学优化生成最优控制解作为训练目标。通过 Transformer 编码器处理时序输入, 并采用拉格朗日松弛损失函数进行优化。实验表明, 相比较传统的深度强化学习方法, 该框架能额外降低 7.8% 的电费, 且平均 PMV 违规 (PMV violations) 减少 85%, 有效缓解了能耗与热舒适性的冲突。Jin R 等人^[17]综述报道了 HVAC 系统在需求响应中的优化控制方法, 着重对比了模型驱动 (MPC) 与无模型 (RL) 方法。论文指出 MPC 依赖精确模型, 而 RL 需大量数据且泛化性不足。此外, 作者提出了一种融合 DRL 与迁移学习的框架。该框架通过结合大语言模型提升控制适应性, 并且在未来可以拓展至多区域系统及复杂建筑环境, 推动智能化控制的发展。Qin H 等人^[19]对比了 DQN 与 D3QN 算法在 HVAC 系统中的应用。通过标准化状态空间, 分析了 Q 网络结构的影响。结果表明, 两层隐藏层的 D3QN 算法在优化效果与稳定性上更优, 并且在不同项目中测试能效提升显著。这为 RL 在 HVAC 中的实际应用提供了网络结构方面的参考。Cui C 等人^[20]提出了主动干扰抑制控制辅助的强化学习 (AD-RL) 方法。该方法通过主辅控制器分离控制变量, 其中主控制器用 TD3 算法优化区域风量, 辅助控制器用 ADRC 调节新风比。利用 EnergyPlus 工具进行测试, 结果表明该方法较传统规则控制和 TD3-RL 分别降低 22.37% 和 13.53% 能耗。Yao L 等人^[22]的论文提出了结合强化学习与模糊推理的 HVAC 控制方法, 可同时优化送风温度、流量和速度。实验表明, 相较于仅优化温度的 RL 方法, 本方法的能耗降低 6.16%, 热舒适性提升 15.15%, 这为 HVAC 多参数协同优化提供了新思路。Elhami M 等人^[23]针对实际建筑, 提出了兼顾能耗、热舒适和室内空气质量的 HVAC 系统三目标优化框架, 基于 EnergyPlus 建模与多层感知器结合预测系统性能, 并通过多目标优化动态调整设定点和通风策略。结果显示, 优化后热舒适不适小时数减少 63.19%, CO₂ 浓度降低 9.61%, 证明该框架在平衡能耗与乘客健康方面的有效性。Heidarykiany R 等人^[24]提出了结合输入凸长短期记忆网络 (ICLSTM) 与模型预测控制 (MPC) 的 Q 学习算法, 用于优化 HVAC 的需求响应。仿真结果表明该框架具有明显的节能效果, 这为智能 HVAC 控制提供了高效解决方案。

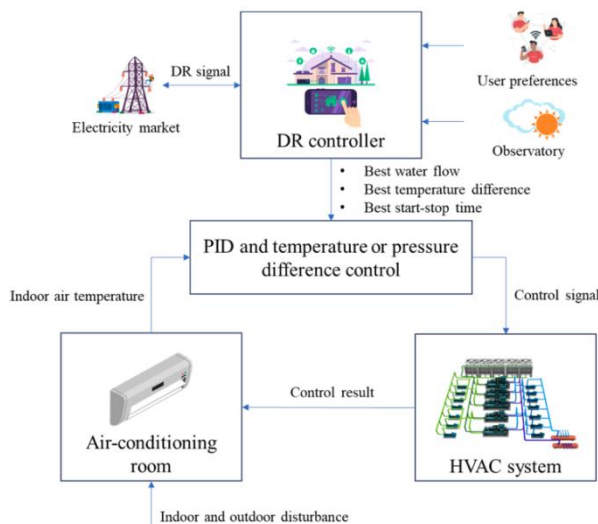
图 2 HVAC 控制系统图^[17]

Fig.2 HVAC control system

3 高铁车站的应用

目前,大部分发表的论文与工程报道,均是普通的民用建筑。将上述相关技术,应用于高铁车站的研究非常不足。经过调研,相关研究进展如下^[25-29]。Li Y 等人^[25]针对高铁车站的冷热电联产(CCHP)系统,提出了一种基于平衡热电负荷(FBL)的改进运行策略。该策略包含三种不同冗余能量的子策略,如图 3 所示,以一次能源消耗率、CO₂减排率、运行成本节约率和综合性能匹配参数(CPM)为评价指标优化了燃气轮机额定容量。结果表明,FBL 策略显著提升了各项指标,CPM 分别提升 20.82%、14.8%和 18.52%。作者还发现 CPM 与热电比高度相关,并得出了线性函数关系式。Zhou P 等人^[26]聚焦高铁车站候车厅室内热环境问题,通过现场测量和问卷调查,发现存在水平温度分布不均等热问题,并且超过 30%的乘客对空调系统不满。为此,作者提出基于实时占用率的改进分区控制策略和 AMPC 控制优化算法,并利用 MATLAB/Simulink 模拟进行效果评估。结果显示,相比传统控制策略,该改进分区控制方法可节省 28.04%的风机能耗,并有效改善了室内温度控制效果,为高铁车站空调系统的节能优化提供了新途径。Ciani L 等人^[27]针对高铁列车 HVAC 系统的维护优化问题,提出基于模糊逻辑的可靠性中心维护(RCM)方法。以某高铁车站 HVAC 系统为例,

作者将故障模式的发生、严重和检测程度进行模糊化处理,通过模糊规则确定最优维护任务。结果表明,使用该方法,86%的任务能够基于诊断完成,54%的任务通过状态监测实现。这显著降低了专家判断的主观性,提升了系统可靠性并降低了成本。Qian B 等人^[28]对中国 15 座高铁车站的能耗与环境质量展开研究,发现其年能耗强度在 117-470kWh/(m²·a)范围内。其中具体能耗与车站面积和客流量相关,并且采用区域供热的车站能耗更高。采光方面,高墙窗比虽然能够带来良好的自然光,但光照均匀性比较差。热环境方面,乘客在冬季可接受的环境温度范围更广。但是车站的平均换气率在冬季为 3.2h⁻¹,远超过夏季的 1.8h⁻¹,这是 HVAC 系统能耗高的主因。西南交通大学 Lv R 等人^[29]针对青藏高原高铁车站的混合空调系统(辐射地板+全空气系统)供暖控制难题,提出基于自适应建筑模型的模型预测控制(MPC)方法。构建了基于 RC 动态模型,并通过 TRNSYS-MATLAB 进行了联合仿真测试,对比了自适应 MPC、PID 控制和无自适应 MPC 的性能。结果表明自适应 MPC 算法具有更优异的节能效果,这为大型公共建筑的高效节能控制提供了算法参考。古文超等人^[30]针对京沪高铁车站运维能耗成本过高的问题,设计了一套能耗管理系统。整个系统框架一共有五层。从采集层进行各种数据的采集开始,到应用层实现能耗

追踪与优化管理。徐春蕾等人^[31]提出了一套高铁车站能源管理系统，用于进行高铁车站内能耗的管

理。结合历史数据与信息化管控，实现能耗成本优化的目标。

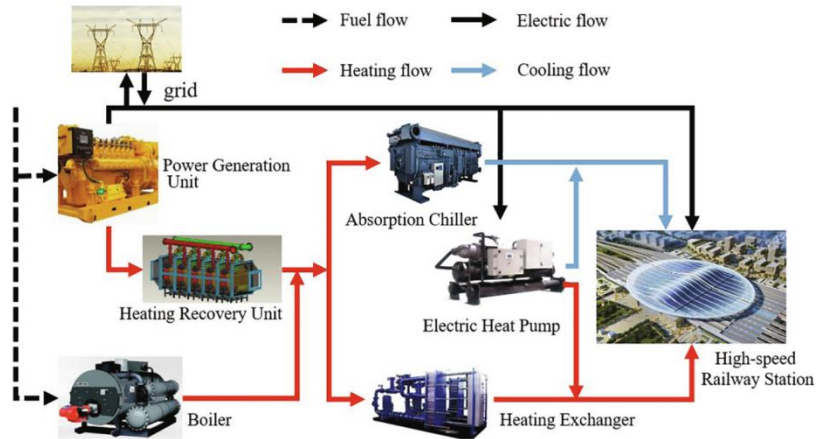


图 3 CCHP 的系统图^[25]

Fig.3 CCHP system^[25]

4 结论

本文对高铁车站中央空调智能控制相关研究进行了系统梳理。从技术思路上看，现有研究主要集中在负荷预测、智能控制策略设计以及在高铁车站场景中的应用三个层面。调研结果表明，中央空调智能控制已成为近五年来建筑能源管理领域的重要研究方向。在人工智能技术迅速发展和广泛应用的推动下，现有研究大多通过结合实测或模拟数据，利用多种智能算法实现负荷预测与控制优化。然而，针对高铁车站这一特定场景的实证研究仍然相对有限，其研究深度和广度与实际需求之间尚存在差距。

参考文献：

[1] 孙海荣,于金朋,苟国庆.高速列车运行能耗分析[J].Open Journal of Acoustics and Vibration, 2017,5(4): 61.

[2] 扶祺高.地铁车站公共区空调系统存在的问题分析[J].制冷,2026,45(1):89-92.

[3] Liu T, Xu C, Guo Y, et al. A novel deep reinforcement learning based methodology for short-term HVAC system energy consumption prediction[J]. International Journal of Refrigeration, 2019,107:39-51.

[4] Mohan R, Pachauri N. An ensemble model for the energy consumption prediction of residential

buildings[J]. Energy, 2025,314:134255.

[5] Cho J, Shin S, Kim J, et al. Development of an energy evaluation methodology to make multiple predictions of the HVAC&R system energy demand for office buildings[J]. Energy and Buildings, 2014,80:169-183.

[6] Cho J, Kim Y, Koo J, et al. Energy-cost analysis of HVAC system for office buildings: Development of a multiple prediction methodology for HVAC system cost estimation[J]. Energy and Buildings, 2018,173:562-576.

[7] Xiao Z, Gang W, Yuan J, et al. Impacts of data preprocessing and selection on energy consumption prediction model of HVAC systems based on deep learning[J]. Energy and Buildings, 2022,258:111832.

[8] Pandey PR, Dong B. Prediction of window opening behavior and its impact on HVAC energy consumption at a residential dormitory using Deep Neural Network[J]. Energy and Buildings, 2023,296:113355.

[9] Liu H, Liu Y, Guo X, et al. An energy consumption prediction method for HVAC systems using energy storage based on time series shifting and deep learning[J]. Energy and Buildings, 2023,298:113508.

[10] Ciampi FG, Rega A, Diallo TML, et al. Energy consumption prediction of industrial HVAC systems using Bayesian Networks[J]. Energy and Buildings, 2024,309:114039.

- [11] Asamoah PB, Shittu E. Evaluating the performance of machine learning models for energy load prediction in residential HVAC systems[J]. *Energy and Buildings*, 2025,334:115517.
- [12] Kassai M. Prediction of the HVAC energy demand and consumption of a single family house with different calculation methods[J]. *Energy Procedia*, 2017,112:585-594.
- [13] Sha H, Xu P, Hu C, et al. A simplified HVAC energy prediction method based on degree-day[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019,51:101698.
- [14] Bazazzadeh H, Hoseinzadeh S, Mohammadi MM, et al. AI-aided surrogate model for prediction of HVAC optimization strategies in future conditions in the face of climate change[J]. *Energy Reports*, 2025,13:1834-1845.
- [15] Suda T, Namerikawa T. Robust prediction and MPC-based optimal energy management for HVAC System[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2018,51(25):472-477.
- [16] Kim M, Kwon S. Real-Time HVAC control for utilizing demand response and renewable energy using optimization-informed supervised learning[J]. *Energy and Buildings*, 2025,344:115954.
- [17] Jin R, Xu P, Gu J, et al. Review of optimization control methods for HVAC systems in Demand Response (DR): Transition from model-driven to model-free approaches and challenges[J]. *Building and Environment*, 2025,280:113045.
- [18] Walther K. Model-based design, digital delivery, and implementation of HVAC controls-Lessons learned from a building-scale application for AHUs and PLCs[J]. *Building and Environment*, 2025,282:113126.
- [19] Qin H, Meng T, Chen K, et al. A comparative study of DQN and D3QN for HVAC system optimization control[J]. *Energy*, 2024,307:132740.
- [20] Cui C, Xue J, Liu L. Optimal control of HVAC systems through active disturbance rejection control-assisted reinforcement learning[J]. *Energy*, 2025,323:135824.
- [21] Ajifowowe I, Chang H, Lee CS, et al. Prospects and challenges of reinforcement learning- based HVAC control[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024,98:111080.
- [22] Yao L, Huang L-Y, Teo JC. HVAC control based on reinforcement learning and fuzzy reasoning: Optimizing HVAC supply air temperature, flow rate, and velocity[J]. *Journal of Building Engineering*, 2025,103:112143.
- [23] Elhami M, Goodarzi SS, Maleki S, et al. Three-objective optimization of the HVAC system control strategy in an educational building to reduce energy consumption and enhance indoor environmental quality (IEQ) using machine learning techniques[J]. *Journal of Building Engineering*, 2025,105:112444.
- [24] Heidarykiany R, Ababei C. Advanced day-ahead scheduling of HVAC demand response control using novel strategy of Q-learning, model predictive control, and input convex neural networks[J]. *Energy and AI*, 2025,20:100509.
- [25] Li Y, Tian R, Wei M, X et al. An improved operation strategy for CCHP system based on high-speed railways station case study[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020,216:112936.
- [26] Zhou P, Zhou J, Tang Y, et al. An improved zonal ventilation control method of waiting hall of high-speed railway station based on real-time occupancy[J]. *Buildings*, 2024,14(6):1783.
- [27] Ciani L, Guidi G, Patrizi G, et al. Condition-based maintenance of HVAC on a high-speed train for fault detection[J]. *Electronics*, 2021,10(12):1418.
- [28] Qian B, Yu T, Bi H, et al. Measurements of energy consumption and environment quality of high-speed railway stations in China[J]. *Energies*, 2019,13(1):168.
- [29] Lv R, Yuan Z, Lei B, et al. Model predictive control with adaptive building model for heating using the hybrid air-conditioning system in a railway station[J]. *Energies*, 2021,14(7):1996.
- [30] 古文超,杨辉,孙瑞海,等.京沪高铁能源管控系统的设计与实现[J].*铁路计算机应用*,2025,34(2):59-63.
- [31] 徐春蕾,黄飞.高铁车站能源管理系统的设计与实现[J].*现代计算机*,2023,29(21):88-92.