

智能建造视角下城市电网与地铁机电系统协同发展研究

谭晓冰

(中铁十二局集团电气化工程有限公司, 福建 福州 350007)

摘要: 地铁作为现代城市的重要交通方式, 承担着越来越重要的角色。地铁机电系统作为地铁运营的核心组成部分, 其能效优化问题已成为当前研究的热点。城市电网在提升地铁机电系统能效、降低能源消耗方面起着关键作用。从智能建造的视角出发, 探讨了地铁机电系统与城市电网的协同发展。分析了地铁机电系统的能效现状及面临的挑战, 提出了基于反馈控制、负载调节和能量回馈技术的能效优化策略。通过引入先进的智能控制系统和优化算法, 地铁机电系统的能源消耗得到了有效控制和管理, 提升了运行效率。最后, 通过实际案例分析验证了优化策略的有效性。

关键词: 智能建造; 城市电网; 机电系统; 运行效率

Research on the coordinated development of urban power grid and subway electromechanical system from the perspective of intelligent construction

TAN Xiaobing

(China Railway 12th Bureau Group Electrification Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350007, China)

Abstract: As an important means of transportation in modern cities, subway plays an increasingly important role. As the core part of subway operation, the energy efficiency optimization of subway electromechanical system has become a hot topic of current research. Urban power grid plays a key role in improving the energy efficiency of subway electromechanical system and reducing energy consumption. From the perspective of intelligent construction, this paper discusses the coordinated development of subway electromechanical system and urban power grid. The energy efficiency status and challenges of subway electromechanical system are analyzed, and the energy efficiency optimization strategy based on feedback control, load regulation and energy feedback technology is proposed. By introducing advanced intelligent control system and optimization algorithm, the energy consumption of subway electromechanical system has been effectively controlled and managed, and the operation efficiency has been improved. Finally, this paper verifies the effectiveness of the optimization strategy through actual case analysis.

Keywords: intelligent construction; urban power grid; mechanical and electrical systems; operational efficiency

0 引言

地铁系统作为现代城市公共交通的核心组成部分, 已经成为解决城市交通拥堵、提高城市运

行效率的重要手段。地铁机电系统作为地铁运营的关键设施, 涵盖供电系统、照明系统、空调通风系统和自动化监控系统等多个子系统, 其性能和能效直接影响到地铁运营的稳定性、安全性和

节能效果。然而,随着地铁在城市交通中规模的不断扩大,如何保证地铁系统高效、安全运行,同时实现经济效益、生态效益及社会效益等多重效益,为各系统协同发展优化提出了新的要求。如今,在智能建造的技术与理念下,城市电网与地铁机电系统已实现深度融合,通过数字化、智能化手段实现系统效率提升和能源优化。城市电网可以实时监控、预测和调节地铁机电系统的能源使用状态;地铁机电系统也可以利用城市电网的调度提高运营效率,实现智能化管理。

本文旨在探索城市电网与地铁机电系统协同发展的优势及效果,并在智能建造的框架下,探讨二者如何优化协同发展,以提升能效水平。分析了地铁机电系统目前面临的挑战,指出传统管理模式下的能耗浪费与效率低下问题。在智能建造视角下,分析了二者协同发展的现状,通过技术融合智能建造的优化手段,能够有效提升地铁机电系统的能源利用效率,为城市电网更好地调配能源起到协同作用,同时减少能耗,并提升系统的舒适性和安全性^[1]。

1 智能建造的内涵

智能建造是指在建筑工程的全生命周期中,充分利用先进的信息技术手段,如物联网、大数据、人工智能和建筑信息模型(BIM)等,通过应用智能化系统,提高建造过程的智能化水平,减少对人工的依赖,从而达到安全建造的目的,并提高建筑的性价比和可靠性。

1) 数字化。智能建造通过数字化手段,将建筑设计、施工及管理等信息进行集成和管理,实现信息的共享和协同。

2) 自动化。利用自动化技术和设备,实现建造过程的自动化控制和操作,减少人工干预。

3) 智能化。通过应用智能化系统和算法,对建造过程进行智能决策和优化,提高建造效率和质量。

因此,智能建造是一种利用先进信息技术手段实现建筑工程全过程数字化、自动化和智能化的新型建造模式,为建筑行业的转型升级和可持

续发展提供了有力支撑。

2 智能建造视角下二者协同发展

2.1 供电系统智能化升级

在地铁机电系统中,电力供应是最基础、最重要的组成部分。因此,城市电网通过优化电力调度、提升电力设备效率,可以大幅减少能源的浪费。基于AI算法预测地铁列车运行密度,实时调节牵引变电站的输出功率,能够减少10%~15%的冗余供电损耗。例如,通过电力负荷预测和电力需求响应管理,可以实现对电网资源的优化配置,避免峰谷电力的浪费,同时通过电力调度系统的智能化,保证电力供应的稳定性和可靠性。地铁机电系统如图1所示。

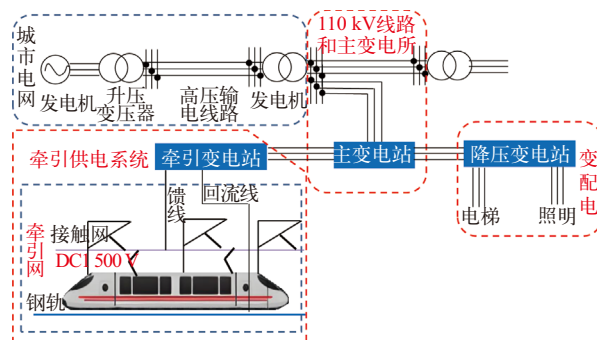


图1 地铁机电系统

Fig. 1 Subway electromechanical system

此外,部署智能断路器和数字继电保护装置,可将故障隔离时间从秒级缩短至毫秒级。列车制动能量回收装置与超级电容储能系统协同,结合电网负荷状态智能选择储能或并网。

2.2 机电设备全生命周期管理

智能建造视角下,地铁机电系统通过BIM+GIS构建三维可视化模型,集成10万+传感器数据点。城市电网的电力调配效果,使得地铁机电系统能够在能源消耗最少的条件下保持高效运行。地铁机电系统本身的设计和运营也离不开城市电网的支持。地铁机电系统包含空调、通风、照明和监控等多个子系统。在空调与通风系统方面,应用温湿度传感器和智能调节装置,可以精确控制车厢内的温度和湿度,在确保舒适度

的同时，最大程度减少能耗。此外，城市电网还能够通过设备之间的协同作业，优化电力使用，提高整体系统的能效。实施成效对比见下表。

表 实施成效对比
Tab. Comparison of implementation effectiveness

指标	传统系统	智能建造系统	提升幅度
供电可靠性	99.95%	99.999%	>10 倍
单位能耗	1.2 kW·h/ 车公里	0.98 kW·h/ 车公里	>18.3%
故障响应时间	15 min	90 s	>90%
设备寿命	15 年	18 ~ 20 年	>20%

城市电网与地铁机电系统在智能建造系统的深度融合下，正在催生新的技术标准体系，如《城市轨道交通智能能源系统技术规范》的出台，标志着地铁机电系统智能化进入标准化阶段。通风空调系统实现按客流量预测的智能启停策略，未来随着5G-R、数字孪生等技术的深度应用，地铁机电系统将成为城市新型电力系统的重要组成部分。

2.3 多系统能源协同优化

城市电网的发展不仅是单一技术的应用，更是系统化的整体协同优化过程。在地铁机电系统中，城市电网涉及从设备选型、系统设计到运行管理等多个方面。通过构建智能控制平台，可以实现设备状态的实时监控，及时发现故障并进行修复，从而延长设备寿命并降低维护成本。比如，车辆段屋顶光伏与储能系统构成微电网，日间供电自给率超30%。同时，利用大数据和云计算技术，可以对地铁机电系统的运行数据进行深度分析，预测设备的运行趋势，并提出合理的节能措施。再如，城市电网的直流柔性供电技术能够降低变电环节损耗。通过这一系列的智能化手段，地铁机电系统的能效得到了大幅提升，而城市电网则为这一系列优化措施提供了必要的技术支撑。

城市电网与地铁机电系统的协同发展，能够有效推动绿色城市和可持续发展的实现。随着能源危机和环境问题日益严峻，节能减排已经成

为社会各界关注的焦点。在地铁建设中，城市电网通过优化能源使用，降低系统的碳排放，能够为实现城市轨道交通的绿色发展贡献力量。通过应用高效的电力设备、智能控制技术和可再生能源，地铁机电系统的碳足迹将大大减少，进一步推动低碳经济的实现。城市电网与地铁机电系统的协同发展，不仅有助于提高地铁机电系统的能效，还能推动地铁行业向智能化、绿色化方向发展^[2-3]。

此外，负载调节与能量回馈技术在地铁机电系统中的应用，显著提升了系统的能效和运行效率。负载调节技术通过实时监控和调整设备负载，避免了能源的浪费。地铁中的电力系统、空调和通风设备等都会根据实际需求调节负载。例如，空调系统在车厢内温度较低时，可以自动降低运行功率，减少不必要的能耗；而通风系统会根据车厢内的空气质量和人数自动调节风机的转速，从而达到节能效果。

能量回馈技术通过回收制动过程中的多余能量并反馈至城市电网，降低了系统的整体能耗。如在地铁系统中，当列车减速或制动时，制动电动机会产生大量的电能，传统系统通常会将其转化为热能散失掉；而采用能量回馈技术后，这些电能可以被转化并反馈至电网中供其他列车使用，或者用于系统内其他设备的电力需求，实现了能源的循环利用。通过负载调节和能量回馈技术，地铁机电系统的能效得到了有效提升，不仅降低了运营成本，还减少了碳排放。这两项技术对城市电网能源的优化调度都起到了至关重要的作用。

3 智能建造视角下二者协同发展的案例分析

3.1 国内案例分析

(1) 广西某城市机电系统的节能改造项目

广西某城市地铁公司在其运营的地铁线路上实施了机电系统的节能改造项目，主要针对车站照明、空调、通风系统以及电力调度系统进行了优化。在照明系统方面，采用了LED智能照

明技术,结合光照传感器和定时控制系统,根据车站内外的自然光照情况,自动调节灯光的亮度,确保在不影响安全的情况下,尽可能减少能源消耗。在空调与通风系统方面,通过智能温控系统,依据车站内外的温湿度变化,自动调节空调与通风设备的运行状态,避免了设备的过度运转,大大降低了能耗。此外,对地铁电力调度系统进行了优化,利用大数据分析和预测技术,提前预判用电负荷波动情况,合理调度电力资源,实现了电力的精准管理,避免了电力浪费。

通过这一系列措施,该城市地铁机电系统的能效显著提高,引入先进的变频控制技术后,系统能够根据车内外温度和乘客流量自动调节,避免不必要的能耗,能源消耗降低约20%,同时降低了运营成本,并减少了碳排放,对环境产生了积极影响。该案例的成功实施,不仅证明与城市电网协同优化的措施在地铁机电系统中的应用价值,还为其他城市地铁机电系统提供了可行的节能改造方案,展示了地铁在城市电网节能领域的巨大潜力。通过对具体案例的分析与实践应用,可以看出城市电网的智能化在地铁机电系统中的重要性及实际效果,推动了地铁机电系统向智能方向发展的进程^[4]。

(2) 北京地铁空调和通风系统的智能化控制项目

北京地铁的能效优化主要集中在空调和通风系统的智能化控制上。传统的空调系统电力消耗高、能效低,而北京地铁通过引入前馈控制逻辑和实时负载调节策略,对通风和空调设备进行智能化调度和管理。同时,地铁通风系统也进行了智能化改造,通过安装空气质量传感器,可以根据车内空气质量和湿度自动调节风速,从而有效降低了空调和通风系统的能耗。通过优化列车的运行调度,减少了列车的停运时间,进一步降低了整体的能源消耗,减轻了城市电网在高峰期时的供电压力。通风空调前馈控制逻辑如图2所示。

通过环境温度、湿度和车内人数等因素的实时监测,前馈控制系统根据预测的负荷变化,提

前调整空调和通风系统的运行状态,从而减少能耗。系统还利用AI技术结合天气预报信息,进一步优化空调启动和调节过程,有效提高了能效,并降低了城市电网的系统负荷。

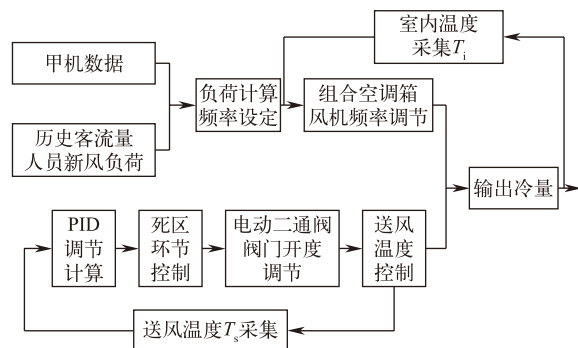


图2 通风空调前馈控制逻辑

Fig. 2 Feedforward control logic for ventilation and air conditioning

3.2 国外案例分析

(1) 新加坡地铁智能优化

新加坡地铁(SMRT)在地铁机电系统的智能优化方面采取了多项创新技术。以其通风空调系统为例,SMRT接入城市电网的自动调配系统,结合了环境数据监控与大数据分析技术,通过大数据算法优化,实现了空调负荷的动态调整。通过结合高效的变频驱动技术和智能空调控制系统,实时调节空调系统的输出功率,通过城市电网的智能分析,确保空调系统运行在最优化的能效区间。

此外,SMRT还应用了车厢内空气流动模拟系统,通过对车厢内空气流动的精确控制,降低了空调系统的过度运行,进一步减少了能量消耗。

(2) 东京地铁的智能电力计量系统

东京地铁通过使用智能电力计量系统优化能源采购和分配,确保能源的高效使用,并在能源管理系统(EMS)的建设方面进行了创新。由于城市电网的供电压力,地铁公司与城市电网共同引入了基于大数据分析的能效管理平台,采用了集成EMS实现机电系统的能效优化。该系统通过整合实时能源数据,分析地铁各个区域的能耗模式,利用机器学习技术预测和优化电力、空调和照明系统的使用。具体到通风和空调系统,

EMS通过智能反馈控制技术,结合实时气候数据、地铁内部乘客流量及能源消耗数据,动态调整各个系统的运行模式,以最小化能耗保持乘客舒适度。该系统的成功应用大大降低了东京地铁的整体能耗,优化了城市电网的能效^[5],并实时监测机电设备的运行状态,及时发现潜在的能效问题。通过数据分析,东京地铁能够对不同时间段的能耗进行预测,并根据预测结果调整运营策略,减少城市用电高峰期的能源需求。

这些国内外的案例表明,通过先进的控制策略、智能化调度和能源管理技术,地铁机电系统能效优化已经取得了显著成效。随着科技的不断进步,未来还将有更多创新的技术应用于地铁机电系统,进一步提升能效和可持续发展水平^[6]。

4 结束语

在城市电网和智能建造技术的背景下,本文对地铁机电系统能效优化与节能策略进行了深入研究。随着城市化进程的加速,地铁作为重要的公共交通方式,面临着越来越大的能效挑战。地铁机电系统包括供电、通风及空调等多个子系统,涉及大量的能源消耗。在这一背景下,如何通过技术创新和工程优化,提高地铁机电系统的能效,成为了亟待解决的课题。本文通过分析地铁机电系统的能效现状,揭示了当前能效管理中存在的主要问题,如能源浪费、设备运行效率低下以及缺乏智能化的控制手段等。针对这些问题,提出了基于城市电网和智能建造技术的协同优化策略,认为城市电网可以通过提升电力设备的运行效率和电力调度的智能化水平,帮助地铁机电系统更好地进行能源管理。与此同时,传感器、数据分析和自动化控制的引入,能够对地铁机电系统的运行状态进行实时监控和调整,实现负荷优化和能源回馈。

负载调节与能量回馈技术作为节能优化的关键手段,能够有效降低地铁机电系统的运行能耗,并通过对设备负荷的精确控制和多余能量的回收,达到节能降耗的目的。本文结合实际案例

进行了分析,展示了能效优化策略在不同地铁项目中的应用成果。通过优化措施的实施,多个案例实现了能效的显著提升,表明这些技术手段具有广泛的推广应用潜力。城市电网和智能建造技术的结合,不仅为地铁机电系统的能效优化提供了新的思路,也为未来城市轨道交通系统的可持续发展奠定了基础。未来,随着技术的不断进步和创新的推动,地铁机电系统将更加智能、高效,从而推动公共交通向低碳、环保的方向发展。然而,当前技术的应用仍面临一定的挑战,例如技术成本、设备兼容性问题。因此,如何在实际应用中解决这些问题,并进一步提升系统的整体能效,仍然是未来研究的重要方向。

参考文献

- [1] 周鑫. 地铁项目节能措施及效果研究[J]. 交通节能与环保, 2021, 17(3): 146-150.
- [2] 刘运超. 地铁供电系统关键设备维修策略优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [3] 邹全德. 计及地铁杂散电流影响的城市电网变电站地电位分析与测试[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [4] 陈璐, 伍俊伶, 黄华, 等. 地铁杂散电流引起上海电网变压器偏磁研究[J]. 变压器, 2023, 60(3): 16-22.
- [5] 潘蔚, 吕梦樊, 梁世文. 基于双向变流器方案的分散式地铁牵引供电系统功率潮流和再生电能利用特性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(S2): 26-30, 36.
- [6] 颜丙锐, 刘文霞, 刘耕铭, 等. 基于城市电力-地铁耦合网络的电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2024(8): 1-14.

作者简介

谭晓冰(1982—), 男, 助理工程师, 研究方向为电气自动化。

(收稿日期: 2025-01-10)