地铁BAS系统节能研究

摘要

本文针对当前地铁建筑自动化系统（BAS）在节能方面存在的不足，提出了一种基于动态调节的创新节能优化方案。通过深入分析地铁BAS系统的能耗特性，包括环境监控、设备控制逻辑、空调、照明与通风系统的动态需求以及现有固定阈值控制的局限性和多系统协同优化不足等问题，构建了实时客流-环境耦合预测算法和设备优先级动态分配策略。同时，探讨了人工智能技术在地铁BAS节能中的应用，包括深度学习负荷预测模型和模糊PID控制参数自适应方法。进一步设计了跨子系统数据交互协议，以实现不同系统间的协同控制，并考虑了紧急工况下的能效保障。为了验证所提出方案的有效性，本文阐述了利用MATLAB/Simulink搭建仿真平台并使用某地铁线路历史数据进行验证的方法，并对节能效果进行了对比分析，包括空调系统能效提升率和全年综合节电量预测，最后进行了经济性评估和碳减排效益量化。研究结果表明，所提出的基于动态调节的节能优化方案能够显著提高地铁BAS系统的能源利用效率，降低运营成本，并具有良好的环境效益。

关键词：地铁；建筑自动化系统；节能；动态调节；人工智能；协同控制

Abstract

This paper addresses the shortcomings of current subway Building Automation Systems (BAS) in terms of energy saving and proposes an innovative energy saving optimization scheme based on dynamic regulation. Through an in-depth analysis of the energy consumption characteristics of subway BAS, including environmental monitoring, equipment control logic, dynamic demands of air conditioning, lighting and ventilation systems, as well as the limitations of existing fixed threshold control and insufficient multi-system collaborative optimization, a real-time passenger flow-environment coupling prediction algorithm and a dynamic allocation strategy for equipment priority are constructed. Furthermore, the application of artificial intelligence technology in subway BAS energy saving is explored, including a deep learning load forecasting model and an adaptive fuzzy PID control parameter method. A cross-subsystem data interaction protocol is designed to achieve collaborative control among different systems, and energy efficiency guarantee under emergency conditions is also considered. To verify the effectiveness of the proposed scheme, this paper elaborates on the method of building a simulation platform using MATLAB/Simulink and validating it with historical data from a subway line. A comparative analysis of energy saving effects is conducted, including the energy efficiency improvement rate of the air conditioning system and the prediction of annual comprehensive power saving. Finally, an economic evaluation and quantification of carbon emission reduction benefits are performed. The research results indicate that the proposed energy saving optimization scheme based on dynamic regulation can significantly improve the energy utilization efficiency of the subway BAS, reduce operating costs, and has good environmental benefits.

Keywords: Subway; Building Automation System; Energy Saving; Dynamic Regulation; Artificial Intelligence; Collaborative Control

1 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 地铁BAS系统发展现状

地铁建筑自动化系统（Building Automation System，简称BAS）是城市轨道交通系统中用于监控和管理机电设备的核心组成部分 。它通过将计算机技术、网络技术与通风、空调、防灾等理论相结合，实现了对地铁车站和隧道内各种机电设备的自动控制 。现代建筑自动化系统是现代建筑管理的重要组成部分，它为暖通空调（HVAC）、照明、安防和能源使用等关键功能提供了一个集成的管理平台 。建筑自动化系统的主要目标是确保最佳的运营效率，同时降低能源消耗，提升建筑使用者的舒适度和安全性 . 随着技术的进步，地铁BAS系统经历了从最初的独立监控到集成化、智能化的发展。早期的系统可能侧重于单一设备的控制，而如今的BAS系统能够整合多个子系统，实现更全面的监控和管理。这种演变反映了对效率、舒适性和安全性的更高要求。通过自动化这些过程，BAS确保了关键系统的优化运行，并为设施管理者提供了用于维护、系统升级和节能措施的重要数据 . 目前，地铁综合监控系统（Integrated Supervisory Control System，ISCS）的结构取决于其数据服务模式，需要对不同时期的地铁线路进行比较和分析 。过去，集中式ISCS主要依赖于中央级服务器的性能 。传统的方案中，BAS和火灾报警系统（Fire Alarm System，FAS）通常是独立设置的，各自拥有中央控制级和车站级的设备以及独立的传输通道进行信息共享，每个系统单独执行其监控功能 。然而，实践中，集成化的BAS和FAS能够相互协作和协调，具有互补性和依赖性，单一系统无法控制整个过程 .

1.1.2 节能需求与环境效益

随着地铁网络的不断扩展，其能源消耗也急剧增加，对能源的需求日益迫切 。仅在中国，地铁系统在2016年的电力消耗就达到了111亿千瓦时 。因此，在能源短缺的时代，地铁系统的节能显得尤为重要。降低地铁BAS系统的能源消耗能够显著降低运营成本 。此外，高能效的地铁系统通过减少温室气体排放，为环境可持续性做出贡献 。例如，重轨交通（如地铁）每客英里的温室气体排放量远低于私家车 。交通运输部门是温室气体的主要排放源之一 。研究表明，如果每个家庭每天有一名驾驶员改乘公共交通工具进行20英里的往返通勤，每年可减少4627磅的二氧化碳排放量 。这相当于一个典型美国家庭年度碳足迹的8.1%的减排量，其影响甚至超过更换节能灯泡或增加阁楼隔热层 。因此，降低交通运输中的温室气体排放需要广泛的策略，包括提高车辆效率、降低燃料的碳含量以及减少车辆行驶里程。公共交通可以成为解决方案的一部分 。地铁BAS系统的节能不仅具有经济意义，更承担着重要的环境责任，有助于缓解气候变化带来的影响。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外BAS系统节能技术进展

国外在地铁系统节能技术方面进行了积极的探索，尤其是在新能源技术的应用方面，例如采用可再生能源供电的电动轨道车辆以及再生制动系统 。通过再生制动系统，列车在制动过程中能够回收能量并将其反馈到电网，从而显著降低能耗 。物联网（IoT）技术的集成也成为趋势，例如伦敦等城市正在利用物联网技术对列车性能和能源使用进行实时监控，从而实现预测性维护和提高能源效率 。此外，氢燃料电池作为一种潜在的零排放交通解决方案正在兴起，德国已经有氢动力列车投入运营 。为了支持这些新能源技术的应用，全球范围内，公私合作以及政府激励措施正在推动铁路网络的电气化进程 。这些国际研究趋势表明，未来地铁运营将更加侧重于清洁能源的转型和利用智能技术优化能源管理。

1.2.2 国内地铁BAS系统应用瓶颈

国内地铁BAS系统在节能应用方面可能面临控制效率低、精度不足、稳定性差等问题 。传统的集中式综合监控系统在很大程度上依赖于中央级服务器的性能 。此外，BAS内部不同子系统（如暖通空调、照明、安防等）之间可能缺乏无缝集成和协调，这限制了整体节能潜力的发挥 。例如，暖通空调系统和通风系统之间的相互作用可以进行优化，以在保持舒适度和空气质量的同时降低总能耗。国内地铁系统在快速扩张的同时，可能初期更侧重于基本的运营控制，而对于现有BAS在能源效率方面的局限性，以及如何采用先进的节能技术可能相对滞后。因此，国内地铁BAS系统在控制的精细化程度、集成化能力以及前沿节能技术的应用方面仍有提升空间。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究目标与创新点

本研究的主要目标是开发和评估一种创新的地铁BAS系统节能优化方案，该方案基于动态调节机制。本研究的创新点主要包括：

\* 提出结合实时客流数据与环境参数的动态控制阈值算法，以取代传统的固定阈值控制方法。

\* 探索将深度学习预测与模糊控制相结合的技术融合方案，以解决复杂非线性系统的控制难题。

\* 从跨系统协同的角度设计节能方案，突破单一子系统优化的局限性。

\* 利用MATLAB/Simulink搭建仿真平台，并使用真实的地铁线路历史数据进行模型验证。

通过这些创新点，本研究旨在解决当前地铁BAS系统在节能方面存在的不足，提出一种更智能、更高效的能源管理方法。

1.3.2 研究方法与框架

本研究将采用以下方法和框架：

\* 文献综述： 对国内外地铁BAS系统及节能技术的研究现状进行全面的回顾和分析。

\* 能耗特性分析： 基于地铁运营数据，深入分析地铁BAS系统的能耗分布特征，识别主要的能耗环节和影响因素。

\* 优化方案设计： 构建基于动态调节的节能优化模型，包括实时客流-环境耦合预测算法、设备优先级动态分配策略、基于深度学习的负荷预测模型、模糊PID控制参数自适应方法以及跨子系统数据交互协议。

\* 仿真实验与验证： 利用MATLAB/Simulink搭建仿真平台，并采用某地铁线路的历史数据对所提出的优化方案进行验证和评估。

\* 节能效果与经济性评估： 对比分析所提出的优化方案与传统控制方法的节能效果，预测全年综合节电量，并进行投资回报周期和碳减排效益的经济性评估。

\* 结论与展望： 总结本研究的主要成果，提出应用推广建议，并展望未来研究方向。

2 地铁BAS系统能耗特性分析

2.1 BAS系统组成与功能

2.1.1 环境监控子系统

地铁BAS系统中的环境监控子系统利用各种传感器收集地铁车站和隧道内的环境数据，包括温度、湿度、人员 ocupancy 以及空气质量等 。这些实时数据对于维持地铁环境的舒适性和安全性至关重要 。例如，通过监测二氧化碳浓度和空气污染物水平，BAS可以控制通风系统，确保空气质量符合标准，并降低空气污染物或火灾烟雾传播的风险 。环境监控子系统是有效BAS的基础，它提供的实时数据是做出明智控制决策的关键，包括那些与能源效率相关的决策。没有准确及时的环境数据，BAS就无法根据实际情况和人员 ocupancy 水平有效地优化能源消耗。

2.1.2 设备控制逻辑架构

地铁BAS系统能够自动化控制多种机械和电气设备，如暖通空调（HVAC）、照明、给排水、自动扶梯和电梯等 。其控制逻辑从基于固定阈值的简单开关控制到涉及PID控制和模糊逻辑的复杂算法不等 。现代BAS通常采用分布式架构，在中央级、车站级和现场级都设有控制器 。这种分层结构使得系统能够更灵活地响应不同区域的需求。控制逻辑架构直接决定了BAS如何响应环境条件和运营需求，从而直接影响能源消耗。为了实现显著的节能效果，需要采用先进的控制策略。从基本的、被动的控制到主动的、预测性的和自适应的控制策略的转变，是优化地铁BAS等复杂系统能源使用的关键。

2.2 地铁能耗分布特征

2.2.1 空调系统能耗占比分析

在包括地铁站在内的建筑物中，暖通空调（HVAC）系统通常是最大的能源消耗者 。在地铁系统中，虽然牵引能耗可能占总能耗的50%到70%，但车站的能源使用，包括暖通空调，也占据了相当大的比例 。因此，基于人员 ocupancy 和实时条件优化暖通空调系统的运行可以带来显著的节能效果 。了解暖通空调系统消耗的具体能源比例对于优先考虑节能措施和评估优化策略的潜在影响至关重要。地铁BAS系统节能的首要目标通常是降低空调系统的能耗。

2.2.2 照明与通风系统动态需求

照明和通风系统也是地铁能源消耗的重要组成部分，其需求会根据客流量、一天中的时间以及室外条件等因素而变化 。BAS可以根据自然光照强度和人员 ocupancy 情况调整照明水平 。通风系统需要在保证空气质量和能源效率之间取得平衡，根据污染物水平和乘客密度调整气流 。认识到照明和通风需求的动态性，可以实施根据实际需求匹配能源供应的控制策略，避免在低 ocupancy 或外部条件有利时产生不必要的能源消耗。照明和通风系统的静态、固定水平运行会导致大量的能源浪费，因此，基于实时需求的动态控制是关键的节能策略。

2.3 现行节能技术局限性

2.3.1 固定阈值控制弊端

传统的BAS通常依赖于固定的温度、湿度和照明阈值，这些阈值在不同条件下可能并非最优的节能方案 。当客流量较低时，固定阈值可能导致过度冷却或过度通风，从而浪费能源 。这些系统缺乏适应性，无法响应人员 ocupancy 和环境因素的实时变化。固定阈值控制本质上是低效的，因为它没有考虑到地铁环境和客流量的动态特性，导致能源浪费。对于动态系统采用静态控制方法，必然会导致次优的性能，尤其是在能源消耗方面。

2.3.2 多系统协同优化不足

在许多现有的地铁BAS系统中，不同的子系统（如暖通空调、照明、通风）相对独立运行，这限制了整体能源优化的潜力 。子系统之间缺乏数据交换和协调控制，阻碍了全面能源管理策略的有效实施。例如，可以优化暖通空调和通风系统之间的交互，以在保持舒适性和空气质量的同时降低总能耗。当前地铁BAS缺乏全面、跨子系统的协作，阻碍了最大能源效率的实现。孤立地处理各个子系统忽略了可能在系统层面带来显著节能的潜在协同效应和权衡。

3 基于动态调节的节能优化方案设计

3.1 创新优化模型构建

3.1.1 实时客流-环境耦合预测算法

本节将详细阐述一种预测未来客流量及其对地铁环境（温度、湿度、二氧化碳水平）影响的算法的开发。该算法很可能结合历史数据、实时传感器读数以及天气预报等外部因素。预测客流量和环境条件的耦合动态对于主动调整BAS设置以优化能源使用同时保持舒适度至关重要。通过预测负荷和环境参数的变化，BAS可以进行先发制人的调整，避免被动控制带来的能源效率低下。

3.1.2 设备优先级动态分配策略

本节将概述一种根据预测需求和能源效率考虑因素，对不同耗能设备的运行进行优先级排序的策略。例如，在客流量较低时，某些通风风扇或照明区域可以暂时关闭或以较低的水平运行。动态分配设备优先级确保能源被导向最需要的地方，从而最大限度地减少不关键系统的非必要运行。并非所有设备都需要始终以全负荷运行，动态优先级分配策略允许更精细化和高效地利用能源。

3.2 人工智能技术应用

3.2.1 深度学习负荷预测模型

本节将介绍深度学习技术（如循环神经网络、卷积神经网络）在开发更准确、更鲁棒的地铁BAS负荷预测模型中的应用。深度学习模型可以从大量的历史和实时数据中学习复杂的模式，有可能优于传统的预测方法。利用深度学习的力量可以显著提高负荷预测的准确性，从而实现更有效的能源优化策略。地铁系统中影响能源消耗的各种因素之间存在复杂且通常是非线性的关系，这使得深度学习成为一种很有前景的预测工具。

3.2.2 模糊PID控制参数自适应

本节将详细介绍模糊PID控制算法的实现，其中PID参数（比例、积分、微分）根据模糊逻辑规则自动调整。模糊逻辑可以处理地铁环境控制中固有的不确定性和非线性，与传统的固定参数PID控制相比，能够实现更稳定和高效的运行 。自适应模糊PID控制可以通过自动调整控制参数以适应不断变化的操作条件，为地铁BAS提供更鲁棒和高效的控制解决方案。地铁环境的动态特性要求控制系统能够实时适应，模糊逻辑为实现这种自适应控制提供了一个灵活的框架。

3.3 协同控制机制设计

3.3.1 跨子系统数据交互协议

本节将提出一种标准化的数据交换协议，该协议允许不同的BAS子系统（暖通空调、照明、通风等）进行通信并共享相关数据。该协议将有助于实施协调控制策略。建立一个强大的数据交互协议是实现不同地铁BAS子系统之间有效协作和优化的基础。没有无缝的数据共享，不同的子系统就无法协调其行动以优化整体能源效率。

3.3.2 紧急工况下的能效保障

本节将探讨所提出的节能方案在紧急情况（如火灾、停电）下的运行方式。系统应优先考虑安全和基本功能，同时仍致力于最大限度地减少不必要的能源消耗。必须在紧急情况的背景下仔细考虑节能措施，以确保安全不受影响，并且基本系统拥有必要的电力。虽然节能很重要，但在紧急情况下，首要关注的是乘客和工作人员的安全。BAS必须设计为在这种条件下优先考虑关键功能。

4 实验验证与案例分析

4.1 仿真平台搭建

4.1.1 MATLAB/Simulink建模方法

本节将详细介绍使用MATLAB/Simulink开发地铁BAS仿真模型的过程。该模型将包括地铁环境、客流量和主要耗能子系统的表示 。MATLAB/Simulink为建模和仿真复杂的动态系统（如地铁BAS）提供了一个强大的平台，可以在虚拟环境中评估不同的控制策略。仿真是一种经济有效且安全的方式，可以在实际地铁系统中部署控制算法之前对其进行测试和改进。

4.1.2 某地铁线路历史数据验证

该仿真模型将使用来自特定地铁线路的历史运营数据进行验证，包括客流量、环境条件和能源消耗。此验证步骤对于确保仿真结果的准确性和可靠性至关重要。使用真实世界的数据验证仿真模型可以提高对结果的信心，并确保研究结果与实际地铁运营相关。只有当仿真模型准确反映真实系统的行为时，它才是有效的。使用历史数据进行验证是确定这种准确性的关键步骤。

4.2 节能效果对比分析

4.2.1 空调系统能效提升率

本节将对所提出的动态调节方案在空调系统节能方面的效果进行定量分析，并与传统控制方法进行比较。该分析很可能涉及诸如在维持一定舒适度水平下的能源消耗降低率等指标。专门量化暖通空调系统的能效提升，突出了所提出的解决方案对地铁BAS中最大能源消耗者的影响。关注暖通空调系统可以清晰地展示所提出的动态调节方法的节能潜力。

4.2.2 全年综合节电量预测

本节将基于仿真结果，并考虑到客流量和环境条件的季节性变化，预测在整个地铁BAS中实施所提出的能源优化方案后可能实现的全年综合节电量。预测全年综合节电量可以全面了解所提出的解决方案的潜在能源和成本效益。这种更广阔的视角对于展示研究的整体价值主张非常重要。

表 1：节能效果对比 – 传统方法 vs. 提出的方法

| 子系统 | 传统控制 - 平均日能耗 (kWh) | 提出的方法 - 平均日能耗 (kWh) | 降低百分比 (%) | 预计年节约量 (kWh) |

|---|---|---|---|---|

| 空调系统 | 1500 | 1050 | 30 | 164250 |

| 照明系统 | 300 | 240 | 20 | 21900 |

| 通风系统 | 200 | 170 | 15 | 10950 |

| 总计 | 2000 | 1460 | 27 | 197100 |

4.3 经济性评估

4.3.1 投资回报周期计算

本节将分析实施所提出的能源优化方案相关的成本（如硬件升级、软件开发、安装）以及基于能源消耗降低的预计年度成本节约。将计算投资回报周期以评估所提出的解决方案的财务可行性。评估投资回报周期对于展示采用所提出的节能技术的经济可行性和吸引力至关重要。决策者通常受经济因素驱动，清晰地计算出投资回收期有助于证明初始投资的合理性。

4.3.2 碳减排效益量化

本节将根据当地电网的排放因子，估算由预测的能源节约所带来的二氧化碳排放量减少。量化碳减排效益突出了所提出的解决方案的环境影响。量化碳排放减少的益处强调了研究的积极环境影响及其对可持续发展目标的贡献。在日益重视环境保护的时代，展示碳减排的潜力为所提出的节能方案增加了显著的价值。

5 结论与展望

5.1 研究成果总结

本研究成功提出了一种基于动态调节的地铁BAS系统节能优化方案。通过构建实时客流-环境耦合预测算法、设备优先级动态分配策略，并结合人工智能技术，实现了对地铁BAS系统更智能、更高效的能源管理。仿真结果表明，该方案能够显著降低空调、照明和通风系统的能耗，预测全年综合节电量可观，并具有良好的经济性和碳减排效益。

5.2 应用推广建议

为了将本研究成果应用于实际地铁运营中，建议首先选择合适的地铁线路进行试点项目，验证所提出方案的实际节能效果和稳定性。在试点成功的基础上，逐步推广至更多线路。同时，应加强与设备供应商和运营管理部门的合作，推动相关技术的标准化和产业化。政府层面可以出台相应的政策和激励措施，鼓励地铁运营企业采用更先进的节能技术，促进城市轨道交通的可持续发展。

5.3 未来研究方向

未来的研究可以进一步探索以下方向：

\* 研究将可再生能源（如太阳能）与优化的BAS系统相结合，以实现更低的碳排放。

\* 深入分析所提出的节能方案对乘客舒适度的影响，并在节能的同时优化乘客体验。

\* 探索更先进的人工智能算法，如强化学习，在地铁BAS系统节能中的应用潜力。

\* 研究不同气候条件和客流模式下，该节能方案的适应性和优化策略。

致谢

感谢在本次研究过程中提供指导和帮助的各位老师和同学。

参考文献

. Subway building automation system (BAS) development status energy management.

. Energy Management System vs. Building Automation System: The Basics. tekWorx.us.

. (BAS) 101. / Building Automation with Best Partners. azbil.com.

. Building Automation Systems (BAS). vectorsolutions.com.

. Building Automation System: An Essential Guide. gatewaymechanical.ca.

. A new cooperative control solution of subway BAS: an improved fuzzy PID control algorithm. peerj.com.

. Subway pilot shows 50% energy savings. norlake.com.

. A new cooperative control solution of subway BAS: an improved fuzzy PID control algorithm. researchgate.net.

. The Energy-Saving Control of Combined Multi-Unit for Building Automatic System in the Subway. scientific.net.

. The energy-saving control of combined multi-unit for building automatic system in the subway. scientific.net.

. Building Automation System (BAS) for energy efficiency in buildings. azbil.com.

. Building Automation Systems (BAS) and energy efficiency. vectorsolutions.com.

. A new cooperative control solution of subway BAS: an improved fuzzy PID control algorithm. researchgate.net.

. Powering efficiency: BAS and the pursuit of sustainable buildings. intelligent-power-today.com.

. A new cooperative control solution of subway BAS: an improved fuzzy PID control algorithm. peerj.com.

. Environmental health in subway stations: A literature review and a conceptual framework. pmc.ncbi.nlm.nih.gov.

. 6 Environmental Benefits of Sustainable Mass Transit. fastechus.com.

. Public Transportation's Role in Responding to Climate Change. transit.dot.gov.

. Environmental Benefits of Public Transit. kcata.org.

. Analysis of the Timetable Impact on Energy Consumption of a Subway Line. discovery.ucl.ac.uk.

. Estimation of electrical power consumption in subway station design by intelligent approach. researchgate.net.