

城市轨道交通CBTC信号系统节能运行方案探讨

王永顺

徐州地铁运营有限公司 江苏 徐州 221000

摘要: 随着城市轨道交通系统的日益庞大, CBTC信号系统的节能运行成为重要研究课题。本文提出基于CBTC的节能运行方案, 通过优化列车控制策略、智能调度和能耗管理, 降低牵引、巡航和制动阶段的能耗。利用先进通信技术、自动驾驶与大数据分析, 提高运营效率与能源回收率。该方案旨在实现节能减排, 促进城市轨道交通的可持续发展。

关键词: 城市轨道交通; CBTC信号系统; 节能运行方案

引言: 随着城市轨道交通网络的不断拓展, CBTC信号系统在保障安全高效运营中扮演关键角色。然而, 系统高能耗问题日益凸显, 节能运行成为行业关注焦点。本文旨在探讨CBTC信号系统下的节能运行方案, 通过技术创新与优化控制, 实现列车运行过程中的能源消耗最小化, 提升轨道交通系统的绿色可持续发展能力。

1 城市轨道交通 CBTC 信号系统概述

1.1 CBTC信号系统基本原理

CBTC, 即基于通信的列车自动控制系统, 是现代城市轨道交通信号系统的主流技术。其核心在于无线通信技术的应用, 使列车与地面控制设备之间能够实现实时、高效的信息传输。CBTC系统主要由中央控制系统、车载设备和轨旁设备组成, 其中ATC子系统是核心部分, 包括ATS、ATP和ATO三个子系统。ATS子系统负责列车的监督与调度, 确保列车按照预定的运行图安全、准时地行驶。ATP子系统则承担列车安全防护的职责, 通过实时监测列车速度、位置等关键信息, 防止列车超速、追尾等事故的发生。而ATO子系统则实现列车的自动驾驶功能, 通过接收地面控制指令, 自动调整列车运行速度、完成车门开关等任务, 提高运行效率和乘客舒适度。

1.2 CBTC信号系统的技术优势

CBTC信号系统 in 提高运行安全性、运输效率和运行稳定性方面展现出显著的技术优势。通过无线通信技术的应用, CBTC系统能够实现列车与地面控制设备之间的双向、连续通信, 大大提升了信息传递的实时性和准确性。这不仅有助于预防事故的发生, 还能在事故发生后迅速做出反应, 减少损失。同时, CBTC系统采用移动闭塞方式, 根据列车实际运行情况和线路条件动态调整列车间隔, 提高了线路通过能力和运输效率。此外, CBTC系统还具备强大的自我诊断和修复能力, 能够自动检测故障并采取相应的应急措施, 确保列车运行的稳定性和

可靠性。

2 城市轨道交通 CBTC 信号系统节能运行方案设计

2.1 节能需求分析

在深入分析城市轨道交通系统的能源消耗现状时, 我们进一步细化到列车运行的各个阶段, 包括牵引阶段、巡航阶段、制动阶段, 这些阶段各自具有不同的能耗特性和节能潜力。(1) 牵引阶段: 此阶段是列车从静止状态加速到巡航速度的过程, 能耗最为显著。由于需要克服列车惯性及轨道阻力, 牵引电机需要输出较大功率。因此, 优化牵引策略成为减少此阶段能耗的关键。

(2) 巡航阶段: 列车在达到预定速度后, 进入稳定运行状态, 即巡航阶段。虽然此时能耗相对较低, 但长时间的持续运行仍然会积累可观的能耗。优化巡航速度和运行曲线, 确保列车在高效区间内运行, 是降低巡航阶段能耗的有效途径。(3) 制动阶段: 列车减速直至停车的过程即为制动阶段。传统制动方式会产生大量热能并散失到环境中, 造成能源浪费。而再生制动技术的应用, 可以将这部分能量回收利用, 转化为电能供系统内部其他设备使用, 实现能量的循环利用^[1]。

2.2 系统优化设计

2.2.1 基于CBTC的智能调度系统设计

(1) 牵引阶段节能策略。在牵引阶段, CBTC信号系统应结合列车性能、线路条件及实时客流情况, 动态调整牵引策略。例如, 利用先进算法预测列车所需牵引力, 确保在满足加速性能的同时, 避免过牵引导致的能源浪费。此外, 对于坡度较大的路段, 可采用智能坡道辅助控制策略, 通过提前调整牵引力, 减少上坡时的能量消耗, 同时利用下坡势能辅助制动, 减轻制动系统负担。(2) 巡航阶段节能策略。在巡航阶段, CBTC系统可实时监测列车运行状态及外界环境(如风速、气温等), 动态优化巡航速度。在条件允许的情况下, 适当

降低巡航速度以减少空气阻力和滚动阻力，从而降低能耗。同时，利用列车间的协同控制，避免频繁加减速造成的能量损失，确保列车群在高效能区间内稳定运行。

(3) 制动阶段节能策略。制动阶段是实现能源回收的重要环节。CBTC系统应全面集成再生制动技术，确保制动时产生的电能能够高效回收并再利用。此外，通过精确控制制动时机和制动力度，减少机械制动和空气制动的使用，进一步提高能源回收率。对于回收的电能，可优先供给车站内的照明、通风等设备使用，或储存于储能装置中，以供高峰时段或紧急情况使用。

2.2.2 能耗管理系统设计与应用

(1) 精细化能耗监控与分析。在能耗管理系统中，应实现对牵引阶段、巡航阶段和制动阶段能耗的精细化监控。通过安装高精度传感器和数据分析软件，实时采集各阶段的能耗数据，并进行分类统计和分析。例如，可以建立能耗模型，对不同阶段的能耗进行预测和评估，帮助运营人员更准确地掌握能耗情况，发现潜在的节能空间。(2) 智能调度与能耗优化算法。结合CBTC系统的实时数据，开发智能调度与能耗优化算法。这些算法能够根据当前线路状况、列车状态、客流量变化以及能源供应情况，自动调整列车运行计划和能耗管理策略。例如，在预测到即将进入高能耗区域（如长上坡路段）时，提前调整列车牵引策略，减少能量消耗；在发现某区段列车密度过高时，通过调整发车间隔或引导部分乘客换乘其他交通工具，降低该区段的能耗压力^[2]。

(3) 能源管理可视化平台。建立能源管理可视化平台，将能耗数据、运行状态、调度指令等信息以图表、动画等形式直观展示。平台支持多维度数据查询和对比分析，帮助运营人员快速了解系统运行状况，及时发现并解决能耗异常问题。同时，平台还具备预警功能，能够自动识别潜在的能耗风险，并提前发出预警信息，为运营决策提供有力支持。

2.3 设备与技术选型

(1) 高效能牵引与制动系统。在牵引系统方面，选用具有高效能转换率和低能耗特性的电机和传动系统。这些系统能够在保证列车加速性能的同时，减少能量损耗。在制动系统方面，全面推广再生制动技术，并优化制动控制算法，提高能量回收率和利用率。(2) 智能节能灯具与照明控制技术。在车站和隧道等照明需求较大的区域，采用智能节能灯具和照明控制技术。这些灯具能够根据环境光照强度自动调节亮度，避免过度照明造成的能源浪费。同时，结合人体感应、时间控制等智能控制技术，实现按需照明，进一步降低照明能耗。(3)

可再生能源与储能技术。积极引入可再生能源技术，如太阳能光伏发电、风力发电等，为轨道交通系统提供绿色、可持续的能源供应。在部分车站或区间设置太阳能光伏电站，将太阳能转化为电能供系统使用。同时，配置储能装置以储存多余的电能，并在能源短缺时释放使用，实现能源的平衡利用和高效调度。

3 城市轨道交通 CBTC 信号系统节能运行关键技术分析

3.1 数据处理与通信技术

(1) 利用高带宽、低延迟的无线通信技术。CBTC系统依赖于高效的无线通信技术来实现列车与地面控制中心之间的实时数据交换。为了实现节能运行，必须确保无线通信具有高带宽和低延迟的特性。高带宽允许系统快速传输大量数据，包括列车状态、线路条件、客流量等实时信息，为精确控制和优化调度提供数据支持。而低延迟则确保了信息的即时性，使得地面控制中心能够迅速响应列车状态变化，进行精准控制，从而避免不必要的能耗。

(2) 数据采集与处理的实时性和准确性保证。节能运行离不开对列车运行状态和线路环境的实时监测与精确分析。CBTC系统通过安装在列车和轨道沿线的传感器等设备，实时采集各类数据。这些数据经过高精度处理和分析后，能够准确反映列车的实时位置和速度、能耗状况以及线路条件等信息。基于这些数据，系统可以制定更加科学合理的调度和运行策略，降低能耗。

3.2 自动控制技术

(1) 自动驾驶技术及其节能应用。自动驾驶技术是CBTC系统的核心之一，也是实现节能运行的重要手段。自动驾驶技术能够根据预设的运行图和实时路况信息，自动控制列车的加速、减速和停车等操作。在节能运行方面，自动驾驶技术可以通过优化列车运行曲线和速度控制策略，减少列车启动和制动过程中的能耗浪费。同时，通过精确控制列车的运行间隔和时间，可以避免列车在车站等待或空驶过程中的无效能耗。(2) ATO系统自动调整运行速度及随行点以实现最佳节能运行状态。ATO系统是自动驾驶技术的重要组成部分。ATO系统能够根据线路条件、车况以及实时客流量等因素，自动调整列车的运行速度和随行点（即列车在轨道上的精确位置）。通过动态调整这些因素，ATO系统可以使列车保持在最佳节能运行状态。例如，在平缓的区段，ATO系统可以适当提高列车的运行速度以减少运行时间；在需要频繁制动的区段，则可以通过提前减速和精确停车来减少制动能耗^[3]。

3.3 系统优化与决策支持

(1) 利用人工智能和大数据技术。随着人工智能和大数据技术的不断发展,它们在CBTC系统节能运行中的应用也越来越广泛。通过引入人工智能技术,系统可以自动学习和优化运行策略,根据历史数据和实时信息预测未来的能耗趋势和变化,从而制定更加科学合理的节能措施。同时,大数据技术可以帮助系统处理和分析海量数据,发现隐藏在数据背后的规律和趋势,为决策提供有力支持。(2) 建立动态模型以优化运营决策和减少能耗。为了进一步提高节能效果,可以建立基于CBTC系统的动态模型。该模型能够综合考虑线路条件、列车性能、客流量以及外部环境等多种因素,通过仿真和模拟不同场景下的列车运行情况,评估不同运营策略的节能效果。基于这些评估结果,系统可以自动选择最优的运营策略并实时调整运行参数,以实现节能运行的目标。

4 挑战与对策

4.1 面临的主要挑战

(1) 技术复杂度高,人才储备不足。CBTC信号系统作为高度集成的智能化系统,其技术复杂度较高,涉及通信、控制、计算机等多个领域。因此,对专业人才的需求也极为迫切。然而,当前在相关领域内的人才储备尚显不足,尤其是在具有跨学科知识背景和实战经验的高级人才方面更为稀缺。这在一定程度上限制了节能运行方案的深入研究和有效实施。(2) 设备与系统依赖性高,稳定性要求高。CBTC信号系统的稳定运行是保障轨道交通安全高效运行的基础。然而,由于系统对设备和网络的依赖性较高,任何细微的故障或中断都可能对列车运行造成严重影响。因此,在实施节能运行方案时,必须充分考虑系统稳定性和可靠性的要求,确保方案实施不会对现有系统的正常运行造成负面影响。(3) 资金投入大,经济可行性考量。节能运行方案的实施需要大量的资金投入,包括技术研发、设备采购、人员培训等多个方面。这些投入在短期内可能难以获得显著的回报,因此需要对经济可行性进行充分考量。如何在确保方案实施效果的同时,合理控制成本、提高投资回报率,是摆在决策者面前的一个重要课题。

4.2 应对对策与建议

(1) 加强技术创新与研发。针对技术复杂度高的问题,应加大技术创新与研发力度,通过引进国内外先进技术、加强产学研合作等方式,不断突破技术瓶颈,提升自主创新能力。同时,建立健全的技术研发体系,鼓励科研人员积极投身于节能技术的研究和应用中,为方案的顺利实施提供有力的技术支撑。(2) 加强人员培训与人才引进。针对人才储备不足的问题,应加大对相关人员的培训和引进力度。一方面,通过举办培训班、邀请专家授课等方式,提升现有人员的专业技能和综合素质;另一方面,积极引进具有丰富经验和专业知识的高级人才,为团队注入新的活力和创造力。同时,建立健全的人才激励机制和职业发展通道,激发人才的积极性和创造力。(3) 合理规划资金使用,拓展资金筹措渠道。针对资金投入大的问题,应合理规划资金使用,确保每一笔资金都能够用在刀刃上。同时,积极拓展资金筹措渠道,争取政府补贴、银行贷款、社会资本等多种形式的资金支持。通过多元化、多层次的资金来源体系,为节能运行方案的实施提供坚实的资金保障。

结束语

综上所述,城市轨道交通CBTC信号系统节能运行方案的探讨,不仅是对当前技术应用的深入拓展,更是对未来绿色交通体系构建的重要贡献。通过智能调度、优化控制策略以及先进技术的融合应用,我们能够有效降低列车运行能耗,提升能源回收与利用效率。这一方案的实施,将促进城市轨道交通行业的可持续发展,为构建低碳环保的城市交通环境提供有力支持。

参考文献

- [1]胡清凤,施正杰.城市轨道交通信号CBTC系统控制系统分析[J].信息通信,2019(11):148-149.
- [2]叶川.LTE技术在城市轨道交通CBTC系统中的应用[J].信息与电脑(理论版),2019(07):75-77.
- [3]刘茜倩,何晶,陈玉江.基于无线通信的轨道交通CBTC技术分析[J].数字技术与应用,2020(02):10-11.