

城市轨道交通列车节能运行策略分析

金状兵*, 叶特, 唐虎, 王凯, 王峰宇

(株洲时代瑞唯减振装备有限公司, 湖南 株洲 412000)

摘要 城市轨道交通作为重要的公共交通方式, 其能耗问题日益凸显。本文深入探讨了城市轨道交通列车的节能运行策略, 全面剖析了列车运行原理及能耗构成, 详细阐述了现有能耗统计与分析方法。通过研究国内外典型城市的实践案例, 总结经验, 从技术层面阐述了牵引与制动节能、列车轻量化以及辅助系统节能等技术策略; 从运营管理方面提出了优化列车运行、开展智能运维与故障预测以及引导乘客行为等策略, 旨在为城市轨道交通行业提供全面且具有实操性的节能方案, 助力其降低能耗、提升运营效益, 实现可持续发展。

关键词 城市轨道交通; 列车节能; 运行策略; 能耗分析

中图分类号: U12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.021

0 引言

随着城市化进程的加速, 城市人口急剧增长, 交通拥堵和环境污染问题愈发严重。城市轨道交通以其大运量、高效率、低排放等优势, 成为缓解城市交通压力的关键手段。近年来, 我国城市轨道交通建设迅猛发展, 截至 2024 年底, 全国城市轨道交通运营里程已达 10 945.6 km。然而, 随着运营规模的不断扩大, 列车运行的能耗也在持续攀升。据统计, 城市轨道交通系统中, 列车能耗占总能耗的 60%~70%, 其中牵引能耗约占列车能耗的 50%~60%。过高的能耗不仅增加了运营成本, 还对城市的能源供应和环境质量带来了压力。因此, 探索高效的列车节能运行策略, 对于城市轨道交通的可持续发展至关重要。

1 城市轨道交通列车运行原理与能耗分析

1.1 列车运行基本原理

城市轨道交通列车运行主要历经牵引、制动和惰行三个状态:

牵引阶段, 列车借助牵引电机将电能转化为机械能, 克服列车自身重力、轨道摩擦力以及空气阻力, 实现加速前进。现代列车多采用交流牵引电机, 以某型号为例, 其额定功率可达 300 kW, 能提供强大动力。制动时, 制动方式分为机械制动和电气制动。机械制动依靠刹车片与车轮的摩擦实现减速, 电气制动则利用电机的发电特性, 将列车动能转化为电能反馈回电网(再生制动)或通过电阻转化为热能消耗(电阻制动)。在惰行状态下, 列车依靠惯性前行, 牵引电机停止工作,

仅需克服微小的运行阻力。合理把控列车在这三种状态间的转换, 对优化能耗意义重大^[1]。

1.2 能耗构成与影响因素

列车能耗主要由牵引、空调、照明及其他辅助设备能耗组成。其中, 牵引能耗占比最大, 达 50%~60%。线路坡度对牵引能耗影响显著, 当线路存在 5% 的上坡坡度时, 列车牵引能耗约增加 15%; 而下坡时, 可通过再生制动回收约 10%~15% 的能量。列车载重与能耗紧密相关, 研究表明, 列车载重每增加 10%, 牵引能耗约上升 8%~10%。运行速度也会影响能耗, 当列车速度从 60 km/h 提升至 80 km/h 时, 空气阻力增大, 能耗约增加 20%~25%。空调系统能耗在夏季和冬季较高, 约占总能耗的 20%~25%, 受车厢内外温差、客流量等因素影响。照明能耗虽占比较小, 但随着运营时间的积累, 也不容忽视^[2]。

1.3 现有能耗统计与分析方法

为准确掌握列车能耗情况, 现有多种能耗统计方法, 相关信息如表 1 所示。

从表 1 可知, 不同能耗统计方法各有优劣。电表计量能准确获取整体能耗, 但无法深入了解各设备能耗; 传感器监测可实时掌握各设备能耗分布, 却面临成本问题; 智能电表便于数据管理, 不过通信网络可能影响数据传输; 车载能量监测系统专业性强, 但系统复杂成本高。在实际应用中, 通常需综合运用多种方法, 全面、准确地获取能耗数据, 并借助能耗趋势分析、能耗对比分析等方法, 为节能策略制定提供数据支撑。

*本文通信作者, E-mail: jinzhbly@163.com。

表1 能耗统计方法

| 能耗统计方法 | 测量原理 | 优点 | 局限性 |
|----------|-------------------------------------|---------------------|----------------------|
| 电表计量 | 通过电表测量电路中的电流和电压，进而计算电能消耗 | 数据直观、精准 | 仅能统计整体电能消耗，难以细分到具体设备 |
| 传感器监测 | 运用各类传感器，如电流、电压、温度传感器等，监测设备运行参数并计算能耗 | 可实时监测各设备能耗，便于分析能耗分布 | 传感器安装和维护成本较高 |
| 智能电表 | 具备数据采集、处理和通信功能，可远程传输能耗数据 | 方便数据管理和远程监控 | 依赖通信网络，可能出现数据传输延迟 |
| 车载能量监测系统 | 安装在列车上，对列车牵引、制动等过程中的能量变化进行监测 | 针对性强，能详细记录列车运行能耗 | 系统较为复杂，成本较高 |

2 国内外城市轨道交通列车节能运行实践案例

2.1 国外先进城市案例

新加坡在城市轨道交通列车节能运行方面成果斐然。其运用先进的列车运行优化算法，对列车运行图进行精细化调整。通过合理规划列车停站时间和发车间隔，减少了列车不必要的加减速，有效降低了能耗。据统计，通过运行图优化，列车能耗降低了约12%。此外，新加坡引入节能型列车，采用新型永磁同步牵引电机，相较于传统电机，效率提高了8%~10%，进一步降低了牵引能耗。

2.2 国内典型城市经验

北京在城市轨道交通节能方面积极探索。一方面，大力推广智能运维系统，利用大数据和人工智能技术对列车设备进行实时监测和故障预测。通过提前发现设备潜在故障，及时维护，避免因设备故障导致的能耗增加。例如：某线路采用智能运维系统后，设备故障率降低了15%，能耗相应降低了8%~10%。另一方面，北京重视对乘客的节能宣传教育，通过在车站和车厢内设置节能标语、播放节能宣传片等方式，引导乘客合理使用空调等设备，培养乘客节能意识。调查显示，经过宣传教育后，约30%的乘客节能行为明显增加，对列车能耗降低起到积极作用。

上海在节能技术应用方面表现突出。其部分线路采用LED照明技术，相较于传统照明灯具，LED灯能耗降低了约30%~35%。同时，上海对列车空调系统进行节能改造，采用智能温控技术，根据车厢内温度和客流量自动调节空调制冷量，有效降低了空调能耗。此外，上海在列车运行管理方面，通过优化列车运行调度，提高列车准点率，减少列车在车站的等待时间，从而降低能耗。

2.3 案例对比与启示

对比国内外案例，国外先进城市在节能技术研发和应用上较为领先，如新加坡的运行图优化算法、东京的再生制动能量回收利用技术。国内城市则在智能

运维和乘客节能宣传方面成效显著。从技术层面看，我国城市轨道交通应加大对先进节能技术的研发投入，引进和吸收国外先进技术，如高效牵引电机、轻量化材料等。在管理方面，需进一步完善智能运维系统，提高设备管理水平，同时加强不同部门间的协同合作，优化列车运行调度。在政策方面，政府应出台相关鼓励政策，如对采用节能技术的企业给予补贴，推动城市轨道交通列车节能运行发展。通过借鉴国内外成功经验，结合我国实际情况，制定适合我国城市轨道交通列车节能运行的策略。

3 城市轨道交通列车节能运行技术策略

3.1 牵引与制动节能技术

永磁同步牵引电机作为高效节能的牵引设备，在城市轨道交通列车中的应用愈发广泛。其功率密度比高，可使电机体积更小、重量更轻，降低列车自重。以某型号为例，永磁同步牵引电机功率密度比可达4.5 kW/kg，相较于传统异步牵引电机提高了20%~25%。同时，其效率更高，额定工况下，效率可达95%~96%，能有效降低牵引能耗。

在制动方面，电阻制动与再生制动结合技术应用广泛。再生制动将列车动能转化为电能反馈回电网，实现能量回收利用。当再生制动无法满足制动需求时，电阻制动作为补充^[3]，将多余电能通过电阻转化为热能消耗。这种结合方式既能有效回收能量，又能确保列车制动的安全可靠。据统计，采用电阻制动与再生制动结合技术，可使列车制动能耗降低20%~25%。

3.2 列车轻量化技术

列车轻量化材料的应用是降低列车能耗的重要途径。表2为常见轻量化材料的技术参数对比。

从表2数据可知，铝合金凭借适中的密度和强度，以及良好的加工性能，在列车车体制造中应用广泛，能使列车自重减轻8%~10%。碳纤维复合材料强度高且重量极轻，但因其制造工艺复杂、成本高昂，目

表 2 常见轻量化材料的技术参数对比

| 轻量化材料 | 密度 (g/cm ³) | 强度 (MPa) | 应用优势 | 应用难点 |
|---------|-------------------------|---------------|--------------------|-----------------|
| 铝合金 | 2.7 ~ 2.8 | 150 ~ 600 | 质量轻, 耐腐蚀性好, 加工性能优良 | 成本相对较高, 焊接工艺要求高 |
| 碳纤维复合材料 | 1.5 ~ 1.8 | 1 000 ~ 7 000 | 强度高, 重量轻, 可设计性强 | 制造工艺复杂, 成本高昂 |
| 镁合金 | 1.7 ~ 1.8 | 150 ~ 400 | 密度低, 减震性能好 | 耐腐蚀性较差, 加工难度大 |

前应用相对受限。镁合金虽密度低且减震性能好, 却存在耐腐蚀性和加工方面的问题。在实际应用中, 需综合考量材料性能、成本和加工工艺等因素, 合理选择轻量化材料, 以实现降低列车能耗的目的^[4]。

3.3 辅助系统节能技术

空调系统是列车辅助系统中的能耗大户。智能温控策略通过安装在车厢内的温度传感器实时监测温度, 根据设定温度范围自动调节空调制冷或制热功率。当车厢内温度接近设定温度时, 空调自动降低功率运行, 避免过度制冷或制热。同时, 新风优化技术根据车厢内空气质量和客流量动态调整新风量。客流量较少时, 适当减少新风量, 降低空调能耗。研究表明, 采用智能温控和新风优化技术, 可使空调系统能耗降低 15% ~ 20%。

4 城市轨道交通列车节能运行运营管理策略

4.1 优化列车运行

优化列车运行图是节能的关键手段。通过合理安排列车停站时间, 可避免列车长时间等待乘客上下车, 减少不必要能耗。例如: 根据客流量统计数据, 在客流量较小的车站适当缩短停站时间, 在客流量较大的车站合理延长停站时间。同时, 优化发车间隔, 高峰时段适当缩短发车间隔, 提高列车运输效率; 平峰时段适当延长发车间隔, 减少列车空驶能耗。以某城市轨道交通线路为例, 通过优化运行图, 列车能耗降低了约 10% ~ 12%。此外, 还可采用节能驾驶模式, 培训司机合理控制列车加速、减速和惰行, 减少不必要的制动和启动, 进一步降低能耗。

4.2 智能运维与故障预测

基于大数据和人工智能的智能运维系统能实时监测列车设备运行状态。通过安装在列车各关键部件上的传感器采集设备振动、温度、电流等参数, 利用数据分析算法对这些数据进行处理和分析, 提前预测设备可能出现的故障。例如: 通过对牵引电机振动数据的分析, 当发现振动异常时, 及时预警并安排维护人员检修, 避免因电机故障导致能耗增加。据统计, 采用智能运维系统后, 列车设备故障维修时间缩短了 20% ~ 25%, 能耗降低了 8% ~ 10%。同时, 智能运维系统还能对设备能耗数据进行分析, 找出能耗异常原因并及时优化。

4.3 乘客行为引导与节能宣传

乘客行为对列车能耗有一定影响。例如: 乘客上下车速度过慢会延长列车停站时间, 增加能耗; 不合理调节车厢内空调温度会导致空调能耗增加。因此, 通过在车站和车厢内设置节能宣传标语、播放节能宣传片等方式, 引导乘客快速上下车, 合理设置空调温度。同时, 可利用车站广播和车厢内显示屏提醒乘客注意节能。此外, 还可开展节能活动, 对节能行为突出的乘客给予奖励, 提高乘客节能积极性。通过这些措施, 培养乘客节能意识, 使乘客主动参与列车节能行动, 对降低列车能耗起到积极促进作用^[5]。

5 结束语

本研究全面分析了城市轨道交通列车节能运行策略, 通过剖析列车运行原理与能耗构成, 借鉴国内外实践案例, 从技术和运营管理两方面提出了一系列节能策略。在技术方面, 采用永磁同步牵引电机、电阻制动与再生制动结合、列车轻量化材料以及辅助系统节能技术等, 可有效降低列车能耗。在运营管理方面, 通过优化列车运行图、实施智能运维与故障预测以及引导乘客行为等措施, 也能实现显著节能效果。然而, 目前节能策略实施中仍面临一些问题, 如节能技术成本较高、不同部门间协同困难、乘客节能意识有待提高等。

参考文献:

- [1] 江志彬, 王炳勋, 李洪运, 等. 基于快速通勤需求的地铁列车跨站停车方案优化 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2025, 53(03): 410-419.
- [2] 周成尧, 司玉林, 赵雷廷, 等. 基于数字孪生的高可靠性城市轨道交通永磁牵引系统发展展望 [J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(03): 89-92, 97.
- [3] 耿鹏, 刘霞, 袁重阳. 城市轨道交通牵引计算仿真平台设计 [J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(03): 265-269.
- [4] 屠朝丰. 城市轨道交通智慧段场的设计与应用 [J]. 科技创新与应用, 2025, 15(07): 23-26.
- [5] 杨建国. 城市轨道交通复杂开行方案下客流分配研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2025(03): 92-99.