

轨道交通运营中的能源消耗分析与节能减排措施

朱文锋 牟琨鹏 范勇岐

青岛地铁运营有限公司 山东 青岛 266000

【摘要】：城市轨道交通发展迅猛，其运营能耗成为焦点。深入探究可知，能耗分布于列车运行、车站设备、车辆段等诸多环节。列车因线路坡度、速度曲线等因素致使牵引能耗波动；车站照明、空调等依客流量与运营时段耗能各异。经全方位剖析，从技术革新如节能型列车应用、智能变频调控，到管理优化如精准运行图编排、设备按需启停等方面挖掘节能潜力，力促轨道交通绿色、高效前行。

【关键词】：轨道交通；能源消耗；节能减排；智能技术；运营优化

DOI:10.12417/2705-1358.25.16.076

引言

在城市化进程高歌猛进之际，轨道交通撑起城市公共交通大梁。但庞大的运营体系消耗巨量能源，给能源供给与生态环境带来双重挑战。一方面，能源紧张局势促使各行业节能降耗；另一方面，轨道交通作为城市名片，有责任践行绿色发展理念。剖析其运营能耗构成，找寻节能减排路径至关重要，既能削减运营开支，缓解能源压力，又可为市民打造更环保、舒适的出行环境，这正是当下深入研究的关键缘由。

1 能耗现状剖析

轨道交通运营能耗构成极为复杂，宛如一张紧密交织的网，涵盖列车运行、车站设施运转、车辆段维护等多个环节。列车牵引能耗占据关键地位，它受到诸多因素的深度影响。线路纵断面起伏如同山川地貌般复杂，当列车爬坡时，就如同人在攀登陡峭山峰，需大功率输出，耗电量瞬间急剧上升，这在山区城市轨道交通线路中尤为明显。以重庆为例，其轨道交通线路依山而建，多处路段坡度超 30%，列车爬坡时牵引功率可达 1500 - 2000kW，相比平原地区同等工况下功率提升 40% - 60%。而弯道曲率恰似道路的转弯半径，过大的曲率会增加列车行驶阻力，迫使列车消耗更多能量。如上海地铁部分早期线路弯道半径较小，列车通过时需降低速度，能耗较直线段增加约 15% - 20%。列车运行速度策略也至关重要，平原城市若频繁启停、加减速，就像汽车在拥堵路段频繁换挡，同样能耗不菲。

车站则像是一座小型的能耗综合体，各种设备协同运作，消耗着大量能源。照明系统犹如城市的昼夜灯火，或全天长明，或分时段亮起。在客流量大的换乘站，照明时长与强度需求极高，以满足乘客的视觉需求。像广州体育西路站，作为日均客流量超 80 万人次的大型换乘枢纽，其照明系统全天运行时长超 18 小时，灯具功率密度达 12 - 15W/m²。通风空调系统更是如同车站的呼吸系统，夏季制冷、冬季制热，并且依据室内

外温湿度、空气质量动态调整。在高峰客流时段，全力运转以保证舒适环境；平峰时则适当降低负荷，节约能源。

车辆段与停车场内，能耗同样不容小觑。检修设备如同医生的手术刀，在保障列车安全运行的也在持续消耗能源。洗车设施定期为列车清洁，办公用电维持着日常运营秩序，这些设备日积月累消耗总量惊人。更为严重的是，众多设备待机、空转现象时有发生，就像无人房间的灯依旧亮着，造成了隐形浪费，使能耗进一步增加。深入分析不同线路、车站能耗数据，会发现老线路因早期技术局限，如同年迈的老人，能耗相对较高，设备老化还带来额外损耗。天津地铁 1 号线部分设备运行年限超 20 年，其能耗较新线路同类型设备高 20% - 30%。新线路虽有节能设计，但客流量快速增长易突破设计能耗边界，就像小马拉大车，力不从心。而且，昼夜、季节变化使得能耗曲线跌宕起伏，清晨与深夜列车班次少、车站客流疏，能耗低；上下班高峰、夏季午后等时段能耗飙升。以深圳地铁为例，夏季 7 - 8 月午后时段，车站空调能耗较冬季增加 50% - 60%，列车因高温环境下散热需求，牵引能耗也上升 10% - 15%。精准掌握这些动态特征是节能的基石，只有了解能耗的变化规律，才能有的放矢地制定节能策略。

2 节能关键探寻

技术革新无疑是节能攻坚的锐利武器，在轨道交通领域发挥着至关重要的作用。新型节能列车通过采用轻量化材料，实现了整车重量降低 10% - 20% 的显著成效，这就好比为运动员减轻了装备重量，使其在奔跑时更加轻松，从而有效削减了牵引能耗。某型新型地铁列车采用铝合金车体与碳纤维复合材料部件，整车减重 15% 左右，同等工况下牵引能耗降低 12% - 18%。高效永磁同步电机的应用大幅提升了电能转化效率，配合智能调速系统，能够依据线路路况、列车载重精准调控运行功率，节能效果超 20%。在一些城市的轨道交通线路中，应用该技术后，列车能耗明显下降，运行稳定性也大幅提高。在车站方面，通风空调引入变频技术堪称一大创举。风机、水泵

转速如同灵活的舞者，依据室内环境需求柔性变化，避免了全功率恒速运行的能源浪费，节能可达 30% - 40%。如杭州地铁部分车站改造后，通风空调系统采用变频技术，每年节省电量达 300 - 400 万千瓦时。智能照明系统集成光照传感器、人体红外感应，如同拥有了智慧的双眼，无人区域自动熄灯、采光良好区域自动调光，节能效果显著。

运营管理优化同样蕴含着无限潜力，能为轨道交通节能带来巨大变革。科学编排运行图是其中的关键一环，精准计算发车间隔需要如同精密仪器般的精确。依据客流潮汐规律增减车次，能够有效减少空驶里程与低效运行时段，就像合理规划航班航线，能降低列车整体能耗 15% - 25%。以上海地铁为例，通过大数据分析客流规律，在非高峰时段优化发车间隔，减少空驶里程，每年节约电能约 500 - 600 万千瓦时。车站设备管控迈入智能化时代，通过监控系统实时采集客流量、温湿度等数据，利用先进的算法模型预测设备开启数量与运行模式。在高峰前 15 分钟提前启动通风空调预冷预热，让乘客进入车站便能感受到舒适环境；平峰时段部分电梯、扶梯间歇运行，杜绝能源浪费，实现了精细化管理。广州地铁部分车站实施智能化管控后，车站设备能耗降低 18% - 25%。

人员节能意识培养在整个节能体系中占据着不可或缺的重要地位，堪称从细微处汇聚节能成效的关键所在。加强员工培训，向他们系统传授设备节能操作的专业知识，无疑就如同为员工精心配备了一本详尽的节能指南。员工们在掌握这些知识后，能够在日常工作中养成良好习惯，随手关闭不必要的照明灯具，及时关停暂时不用的办公设备，避免能源的无端浪费。员工们还会定期对设备进行巡检，凭借专业技能敏锐地发现并消除设备“跑冒滴漏”等现象。这些看似不值一提、微不足道的小行动，恰似山间的涓涓细流，日复一日、年复一年地持续汇聚，最终必将成就显著的节能成效，从细微点滴之处为轨道交通节能事业添砖加瓦，贡献出坚实力量。实际上，许多轨道交通运营单位早已认识到这一点，并积极付诸实践。通过定期组织形式多样的节能培训，深入浅出地讲解节能知识与技巧，同时开展别开生面的节能竞赛等活动，极大地激发了员工参与节能的积极性与主动性。在这一系列举措的推动下，员工节能意识得到了大幅提升，节能成效也十分显著。以南京地铁某运营分公司为例，通过一系列行之有效的节能举措，员工们在日常工作中的节能行为切实发挥了作用，成功使办公区域能耗降低了 10% - 15%，为轨道交通领域的节能工作树立了良好典范。

3 减排措施落地

能源替代在轨道交通减排之路上勇当先锋，发挥着不可替代的重要作用。在车站屋顶、车辆段空旷区域铺设太阳能光伏发电板，就像是为建筑戴上了一顶顶绿色的能量收集帽。所发

电量供给站内照明、弱电系统使用，以某大型车站为例，年发电量满足自身 30% - 40% 用电需求，大大减少了对电网取电的依赖，从而有效减少了碳排放。如深圳福田高铁站，其站房屋顶安装的太阳能光伏发电系统，装机容量达 1.2 兆瓦，年发电量约 110 - 130 万千瓦时，相当于减少二氧化碳排放 800 - 1000 吨。地源热泵技术在车辆段、停车场大显身手，利用浅层地热实现冬暖夏凉。它如同大自然的温度调节器，相比传统供热制冷方式，能耗降低 40% - 60%，温室气体排放也随之锐减，为环境保护立下汗马功劳。北京地铁某车辆段采用地源热泵系统后，冬季供热能耗较传统方式降低 50% 左右，每年减少二氧化碳排放约 1500 - 2000 吨。

能量回收利用是减排过程中的关键环节，如同变废为宝的神奇魔法。列车再生制动能量回收系统持续升级，将制动产生电能高效回馈电网或直接供给相邻启动列车，回收率从早期 30% 提升至 60% - 70%。这不仅减少了能源消耗，还降低了刹车闸瓦磨损产生的粉尘污染，一举两得。上海地铁部分线路应用先进的再生制动能量回收系统后，每年回收电能达 2000 - 3000 万千瓦时，减少粉尘排放约 5 - 8 吨。车辆段内，雨水收集系统结合绿化灌溉、洗车用水，水资源循环利用超 70%。通过巧妙设计与合理规划，实现了水资源的高效利用，节约用水的同时减少了污水排放处理能耗，促进了资源的循环利用。广州地铁某车辆段的雨水收集系统，每年收集雨水约 5 - 8 万立方米，用于绿化灌溉和洗车，节约自来水用量达 4 - 6 万立方米，降低污水处理能耗约 10% - 15%。

环保材料应用与车辆优化协同推进，为轨道交通减排降噪打造绿色出行长廊。在列车制造过程中，工程师们精心挑选低能耗、可回收的环保材料，内饰选用无污染材质，从源头上大幅减少对环境的负面影响。车顶采用可回收的铝合金材料，既减轻了车身重量，又能在列车报废后高效回收利用；座椅面料使用植物纤维材质，天然环保且触感舒适。车辆外形更是经过大量风洞实验优化，宛如精心雕琢的艺术品。优化后的外形设计，使列车在运行时降低空气阻力 10% - 15%，运行能耗随之显著降低。而且行驶过程中产生的噪音明显减小，为乘客提供了更加安静舒适的出行环境，全方位助力减排降噪，提升了轨道交通的绿色形象。

4 成效展望总结

过往一系列节能减排措施在轨道交通领域落地生根，结出了累累硕果。能耗指标逐年优化，恰似一位坚韧不拔的运动员，在长期的艰苦训练中不断突破自我，一次次刷新成绩记录。通过采用高效节能的设备、优化列车运行的调度方案以及推行精细化的能源管理策略，轨道交通系统成功降低了单位运营里程的能耗。以成都地铁为例，近年来通过实施多项节能措施，单位运营里程能耗较 5 年前降低了 18% - 22%。能耗的降低直

接转化为运营成本的有效控制,节省下来的资金,如同涓涓细流汇聚成河,为线路拓展、服务提升积累了宝贵的资金储备,也为整个行业的可持续发展奠定了坚实的物质基础。每年节省的运营成本可达数千万元,为城市轨道交通的持续发展提供了有力支持。

在车站环境方面,智能调控技术的广泛应用,如同为车站配备了一位贴心的管家。通过实时监测车站内的温度、湿度、空气质量等环境参数,智能调控系统能够精准地控制通风、空调、照明等设备的运行状态。当车站内人员密集时,系统自动加大通风量和空调制冷量,确保空气清新、温度宜人;当客流量减少时,则相应降低设备功率,避免能源浪费。这种智能化的环境调控,极大地提升了乘客的出行体验,使车站环境愈发舒适宜人,就像顾客置身于精心布置的舒适商场,购物体验感大幅提升,乘客满意度也随之节节攀升。许多城市的轨道交通车站通过智能调控,乘客满意度提升至90%以上,投诉率显著降低。

展望未来,科技发展将为轨道交通节能注入澎湃动力。超导技术作为前沿科技领域的璀璨明珠,有望在轨道交通领域掀起一场革命性的变革,彻底革新列车牵引系统。超导材料具有零电阻特性,能够显著降低列车运行过程中的能量损耗。一旦超导技术在列车牵引系统中成功应用,预计能耗将再次降低50%,这无疑如同为列车安装了一台超级引擎,让列车在节能高效的轨道上飞驰。目前,国内外多家科研机构与企业正在积

极开展超导技术在轨道交通领域的应用研究,已取得阶段性成果。与此大数据与人工智能的深度融合,将为轨道交通能耗管理带来全新的思路和方法。通过对海量运营数据的实时分析,人工智能算法能够实现全场景能耗的实时精准预测,提前预判不同时段、不同路段的能耗需求,并据此对列车运行、设备运行等进行智能调控,使节能管理更加高效智能,达到精准节能的目的。

在能源结构优化方面,新能源多元融合发展的趋势愈发明显。氢能作为一种清洁、高效的新型能源,逐步在轨道交通领域开展试点应用。氢燃料电池列车以氢气为燃料,通过电化学反应产生电能驱动列车运行,整个过程仅产生水,几乎不排放任何污染物,能够进一步削减轨道交通的碳排放。目前,我国部分城市已开通氢燃料电池有轨电车线路,运行效果良好。随着产业链上下游企业的协同创新,从基础设施建设到运营维保的各个环节,都将迎来全方位的绿色升级。

5 结语

城市轨道交通节能减排征程未有穷期。未来,技术创新浪潮将持续翻涌,节能设备愈发高效智能,能源回收利用近乎极致,新能源应用多点开花;运营管理借助前沿科技迈向超精细化,依客流、环境瞬息万变精准施策。这不仅大幅削减能耗与运营成本,更将重塑出行体验,提升城市魅力。轨道交通将以绿色之姿,穿梭繁华都市,助力生态环境华丽蜕变,向着交通强国、绿色家园目标全速奋进,开启低碳未来崭新篇章。

参考文献:

- [1] 王洪伟.城市轨道交通节能技术研究[J].都市轨道交通,2021,34(03):112-116.
- [2] 刘铁.轨道交通车站节能优化策略[J].交通节能与环保,2020,16(02):67-70.
- [3] 陈志强.列车牵引系统节能技术探讨[J].中国铁路,2019,0(11):85-89.
- [4] 赵晓丽.新能源在轨道交通中的应用[J].现代城市轨道交通,2022,0(05):23-27.