

# 城市化进程中轨道交通车站可持续发展策略探究

文 / 丛静婷 广州地铁设计研究院股份有限公司

**摘要:** 随着城市化进程的加速推进,轨道交通作为城市公共交通的骨干,其车站的可持续发展成为城市建设的重要议题。本文从绿色建筑设计、可再生能源利用、全生命周期管理、智慧运营等维度,构建了轨道交通车站可持续发展的策略体系。研究提出了基于空间优化、能源管理、环境协调、社会融合的四维一体可持续发展模式,强调通过渐进式自然光环境设计、混合致凉系统、被动式气候调节等创新技术的应用,实现车站的低碳运营。

**关键词:** 城市化进程; 轨道交通车站; 可持续发展

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.050

## 引言

进入 21 世纪以来,我国城市化进程不断加快,城市人口规模持续扩大,对城市交通系统提出了更高要求。轨道交通以其大运量、高效率、低污染的特点,成为解决城市交通拥堵、改善城市环境的重要途径。轨道交通车站作为城市轨道交通系统的重要节点,不仅承担着客流集散功能,更是城市空间的重要组成部分。在全球应对气候变化、推进碳中和的大背景下,探索轨道交通车站的可持续发展策略,对于实现城市交通系统的绿色转型、促进城市可持续发展具有重要的理论价值和现实意义。

### 一、轨道交通车站可持续发展的理论基础

可持续发展强调在满足当代人需求的同时,不损害后代人满足其需求的能力。对于轨道交通车站而言,可持续发展意味着在提供高效交通服务的同时,最小化对环境的负面影响,实现经济效益、社会效益和环境效益的统一。绿色建筑理论为车站的可持续设计提供了重要指导,通过被动式设计策略、高效能源系统、可再生能源利用、绿色建材选择等手段,实现建筑全生命周期的资源节约和环境友好。循环经济理论倡导资源的减量化、再利用和资源化,在车站建设和运营中应用循环经济理念,可以有效减少资源消耗和废弃物排放。韧性城市理论强调城市系统应对各种冲击和压力的能力,轨道交通车站作为城市基础设施的重要组成部分,需要具备应对自然灾害、气候变化等风险的能力。

### 二、基于低碳理念的轨道交通车站设计策略

#### (一) 渐进式自然光环境设计

轨道交通车站的渐进式自然光环境设计是解决地下空间照明能耗和乘客视觉舒适度的关键策略。设计人员必须在车站入口处设置 15-20 米的光过渡缓冲区,通过逐级降低照度的方式,让乘客的眼睛有充分的适应时间。车站入口天棚应采用半透明材料,透光率控制在 40%-60% 之间,既能引入自然光又能避免直射阳光造成的眩光。在站厅层顶部设置采光井时,设计团队要根据当地的太阳高度角和方位角进行精确计算,确定采光井的最佳位置和倾斜角度,一般采光井间距控制在 20-30 米,单个采光井面积不小于 20 平方米。导光管系统的应用能

够将自然光传输到地下 10-15 米的深度,每根导光管的直径应在 0.5-1.0 米之间,内壁采用高反射率镀膜材料,反射率达到 98% 以上,确保光线传输效率。智能照明控制系统要在每个功能区域安装照度传感器,实时监测环境光照水平,当自然光照度超过 300lux 时,人工照明自动调暗或关闭。控制系统应将站厅划分为入口区、过渡区、售票区、候车区等多个控制分区,每个分区根据其功能需求和自然光分布情况设定不同的照明策略。高峰时段客流密集时,系统自动将照度提高到 500-750lux,平峰时段降低至 300-500lux,深夜低客流时段进一步降至 150-300lux。照明灯具要选用可调光 LED 光源,色温在 4000K-5000K 之间,显色指数不低于 80,确保乘客能够准确识别导向标识和安全信息。为优化光环境舒适度,设计团队必须运用专业照明设计软件进行全年度的采光模拟分析,考虑不同季节、不同时间段的太阳位置变化对车站内部光环境的影响。采光口的遮阳设计要采用可调节的百叶系统或电致变色玻璃,根据太阳高度角自动调整遮阳角度,防止夏季正午的强光直射造成局部过热和眩光。在关键视觉作业点如售票窗口、闸机区域、楼梯口等位置,要进行重点照明设计,确保垂直照度不低于 150lux,同时控制光源的遮光角大于 30 度,避免直接眩光。

#### (二) 混合致凉模式优化

轨道交通车站的混合致凉模式是通过多种制冷方式的优化组合来实现节能降耗的创新策略,通风系统设计人员必须精确计算列车进出站产生的活塞风量,一般情况下单列车可产生 15-20 立方米/秒的风量,通过在隧道与站台之间设置活塞风道和调节风阀,将这部分免费的冷源引入站台和站厅。风亭的位置要根据主导风向确定,夏季主导风向的上风向设置进风亭,下风向设置排风亭,风亭间距控制在 50-80 米,高度不低于 2.5 米,确保形成有效的自然通风通道。在春秋过渡季节,当室外温度在 18-26℃ 之间时,控制系统自动开启自然通风模式,关闭机械制冷设备,仅依靠活塞风和自然风压差进行通风换气,此模式下每年可运行 60-90 天,节约空调能耗达 25% 以上。分区域温度控制系统要将车站划分为入口缓冲区、付费区、非付费区、设备区等多个温控

区域，每个区域安装独立的温湿度传感器和变风量末端装置。入口缓冲区作为室内外的过渡空间，夏季温度设定值可比室外低 3-5℃，一般控制在 28-30℃；站厅非付费区人员停留时间短，温度可设定在 26-27℃；付费区和站台候车区人员密度大且停留时间长，温度应控制在 24-26℃；设备用房根据设备散热需求，温度控制在 28-35℃。空调水系统采用变流量控制，根据各区域的实际冷负荷需求调节供水量，水泵采用变频控制，避免大流量小温差的能源浪费现象。蓄冷系统的建设要充分考虑当地的峰谷电价差，当峰谷电价比超过 3:1 时，投资回收期可控制在 5 年以内。蓄冷水池的容量按照白天高峰时段 8 小时的冷负荷进行设计，一般需要 2000-3000 立方米的蓄水容积，采用温度分层型水蓄冷方式，上部储存 12-15℃ 的温水，下部储存 4-7℃ 的冷水。夜间 23:00 至次日 7:00 的低谷电价时段，制冷机组满负荷运行制取冷水储存，白天 8:00-22:00 的高峰时段，优先使用蓄冷水池的冷量，不足部分由制冷机组补充。控制系统要根据次日的天气预报和客流预测，自动计算最优的蓄冷量，避免过度蓄冷造成的能源浪费。

### (三) 被动式气候调节边界设计

被动式气候调节边界设计充分利用地下土壤的恒温特性来优化车站的热环境，是实现低能耗运营的重要手段。地下 15 米深度的土壤温度常年稳定在 15-18℃，设计人员必须通过精心设计的围护结构来利用这一天然的冷热源。车站主体结构的混凝土墙体厚度应达到 800-1000 毫米，不仅满足结构强度要求，更重要的是提供足够的热惰性，延缓室内外温度波动的传递。在混凝土墙体外侧增设 100-150 毫米厚的挤塑聚苯板保温层，导热系数不大于 0.03W/(m·K)，确保土壤侧的恒定温度能够有效传递到室内，同时阻隔地面高温或严寒的影响。防水层与保温层之间要设置 20 毫米的空气间层，进一步提高隔热性能，围护结构与土壤的接触面积要最大化设计，通过增加地下室外墙的埋深和延长与土壤接触的长度，提高土壤蓄热体的有效利用率。地源热泵系统的设

计要基于详细的地质勘察资料，确定地下水位、土壤导热系数、地温梯度等关键参数。垂直埋管式地源热泵的钻孔深度一般为 80-120 米，孔间距 4-6 米，单孔换热量在 40-60W/m 之间。水平埋管系统适用于有足够场地的车站，埋深 2-4 米，管间距 0.8-1.2 米，每延米换热量 20-30W。地埋管内循环介质采用乙二醇防冻液，浓度根据当地最低气温确定，确保冬季不结冰。热泵机组的能效比 (COP) 在制冷工况下可达 4.5-5.5，制热工况下达到 3.5-4.0，相比传统空调系统节能 30%-40%。系统设计时要进行全年逐时负荷计算，确保地下取热量和排热量基本平衡，避免土壤温度场的长期偏移。相变材料的应用是被动式调温的创新技术，选用相变温度在 22-26℃ 的石蜡基或盐水合物相变材料，封装在厚度 20-30 毫米的板材或微胶囊中，安装在车站吊顶或墙面内侧。每平方米相变材料板可储存 150-200kJ 的潜热，相当于将 10 立方米空气温度改变 5℃ 所需的热量。当室内温度超过 26℃ 时，相变材料吸热融化，储存多余热量；当温度低于 22℃ 时，相变材料放热凝固，释放储存的热量，从而将室内温度稳定在舒适范围内。

### 三、轨道交通车站运营管理的可持续发展策略

#### (一) 能源管理体系建设

轨道交通车站的能源管理体系建设必须从基础监测设备的部署开始，在配电室安装精度 0.5 级的智能电表，每个回路独立计量，在空调机房安装超声波流量计监测冷冻水流量，在关键区域布置温湿度传感器，采集间隔设定为 5 分钟，确保数据的实时性和准确性。能源管理平台要具备数据采集、存储、分析、报警四大功能模块，通过 B/S 架构实现远程访问，管理人员可随时查看各系统的能耗曲线、同比环比分析、能效指标等关键信息，如图 1 所示。每季度委托有资质的第三方机构进行能源审计，审计内容包括用能设备清单核查、运行参数测试、能源平衡分析、节能潜力评估等，审计报告要明确指出能源浪费的具体环节和改进措施。

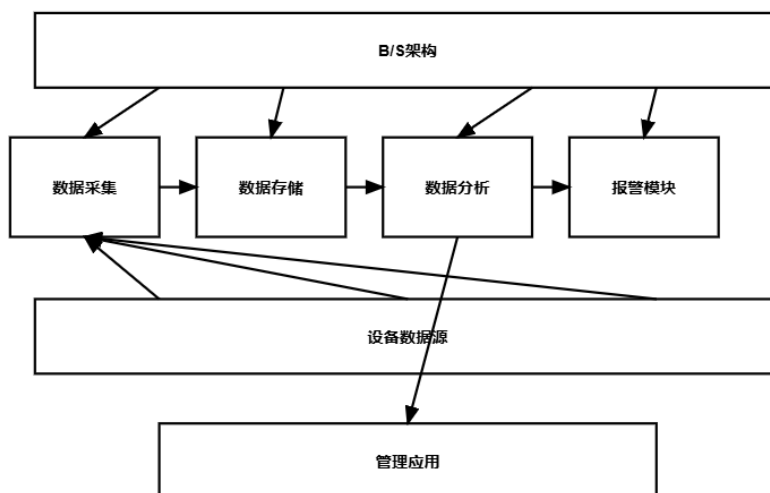


图 1 能源管理平台系统架构示意图

**(二) 设备设施优化管理**

设备管理部门必须制定三年设备更新计划，优先淘汰能效比低于 3.0 的冷水机组，更换为磁悬浮离心机组，能效比可达到 6.0 以上，单台机组年节电量超过 20 万千瓦时。风机和水泵的电机要全部进行变频改造，根据实际负荷需求调节转速，改造后风机能耗降低 30%-40%，水泵能耗降低 20% ~ 30%，投资回收期约 2 年。照明系统要将传统 T8 荧光灯管更换为 LED 灯管，功率从 36W 降至 18W，寿命从 8000 小时延长至 50000 小时。维护人员要在关键设备上安装振动传感器、温度传感器、电流互感器等监测装置，通过设备健康管理系统实时监测轴承振动值、电机温升、运行电流等参数，当振动值超过 4.5mm/s 或温升超过设计值的 80% 时自动报警。维护计划要从传统的定期维护转变为基于状态的维护，根据设备运行数据制定个性化维护方案，如冷水机组运行 2000 小时进行一次小保养，5000 小时进行中保养，10000 小时进行大保养。智能控制系统要根据实时客流数据调整设备运行策略，当进站客流低于 100 人 /5 分钟时，自动停运部分自动扶梯，保留一部上行扶梯运行；当站台温度低于设定值 2℃ 且客流稀少时，新风机组自动降频至 30Hz 运行。电梯群控系统要根据客流分布规律优化调度算法，高峰时段采用分区运行模式，平峰时段采用最短候梯时间模式，通过优化调度可减少 15% ~ 20% 的电梯能耗，同时将平均候梯时间控制在 30 秒以内，如表 1 所示。

表 1 电梯群控系统调度数据表

时段	调度模式	能耗降幅	候梯时间
8:00-9:30	分区运行	-18%	28 秒
9:30-11:30	最短候梯	-16%	22 秒
11:30-13:30	分区运行	-19%	26 秒
13:30-17:30	最短候梯	-15%	25 秒
17:30-19:00	分区运行	-20%	29 秒
19:00-22:00	最短候梯	-17%	18 秒

**(三) 客流组织与服务优化**

客流分析系统必须接入 AFC 闸机数据、视频客流统计数据 and 手机信令数据，建立基于深度学习的客流预测模型，提前 15 分钟预测进出站客流量，准确率达到 85% 以上。运营调度中心根据预测结果提前调整闸机开放数量、自动扶梯运行方向和工作人员配置，当预测 5 分钟内进站客流超过 2000 人次时，提前开启备用闸机和增派站务人员。车站要在站厅和站台安装不少于 20 块 LCD 信息显示屏，实时显示各出入口的拥挤程度、换乘通道的步行时间、站台的候车密度等信息，用绿黄红三色标识

引导乘客选择人流较少的通道。售票设施的配置要根据工作日、节假日的客流特征差异化设置，工作日早高峰在付费区内增设 2-3 台自动售票机，满足临时购票需求，晚高峰在非付费区增设充值机，减少排队时间。自助设备的比例要达到 80% 以上，包括自动售票机、自助充值机、自助查询机等，每台设备的平均使用率应保持在 60%-75% 之间，避免设备闲置或过度排队。

**(四) 环境质量管理**

环境监测系统必须在站厅、站台、设备区等关键位置安装多参数环境监测仪，每 50 米设置一个监测点，实时监测温度、相对湿度、CO<sub>2</sub> 浓度、PM2.5、甲醛等指标。当 CO<sub>2</sub> 浓度超过 1000ppm 时，新风系统自动增大新风量，将新风阀门开度从 30% 提升至 60%；当 PM2.5 超过 75 μg/m<sup>3</sup> 时，启动空气净化装置。新风系统要配备 F7 级以上的过滤器，过滤效率不低于 85%，每季度更换一次滤芯。站台和隧道区间要采用弹性短轨枕、橡胶减振垫等减振措施，将钢轨振动降低 15-20 分贝，在居民区附近的高架段设置 3 ~ 4 米高的声屏障，采用吸声系数大于 0.8 的多孔吸声材料。环保部门要在车站周边敏感点布设 4-6 个噪声监测点，采用自动监测设备 24 小时连续监测，确保昼间噪声不超过 60dB(A)，夜间不超过 50dB(A)。垃圾分类要设置可回收物、有害垃圾、厨余垃圾、其他垃圾四类收集容器，垃圾桶要有明显的分类标识和投放指引，可回收物由专业回收公司处理。废弃的日光灯管、电池、电子设备等危险废弃物要单独存放在防渗漏的专用容器内，每月由有资质的危废处理企业统一收运处置，建立完整的转移联单制度，确保全程可追溯。

**结语**

轨道交通车站的可持续发展是一项长期而复杂的系统工程，需要政府、企业、科研机构和社会公众的共同努力，只有坚持创新驱动、系统思维、因地制宜、持续改进的原则，才能真正实现轨道交通车站的可持续发展，为建设资源节约型、环境友好型社会做出应有贡献。随着技术进步和管理创新，相信未来的轨道交通车站将成为城市可持续发展的典范，为市民提供更加便捷、舒适、绿色的出行环境。

**参考文献**

[1] 龚金刚, 马云良, 何丹. 基于可持续发展理念的短编组城市轨道交通地下车站规模控制研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27 (12): 390-393.

[2] 赵程, 景亮. 城市轨道交通车站机电安装及装修施工管理浅谈 [J]. 智能城市, 2020, 6 (11): 19-20.

[3] 黄武平. 城市轨道交通高架车站结构设计研究 [J]. 智能城市, 2019, 5 (10): 129-130.

[4] 于海, 刘大治. 浅析规划引导城市轨道交通车站设计 [J]. 中外建筑, 2018, (05): 101-103.

[5] 钱约. 智能建筑系统在智慧城市中的应用研究 [J]. 华东科技, 2025, (04): 95-97.