

# “双碳”背景下城市轨道交通绿色发展分析

孟双杰

西南交通大学希望学院, 中国·四川 成都 610400

**摘要:**“十四五”规划中, 实现“双碳”目标已成为新时代轨道交通领域面临的重大机遇与历史使命。城市轨道交通以运量大等优势, 已成为公共交通的重要组成部分, 正处于快速发展阶段。随着轨道交通运营里程的不断增长, 其能源消耗问题以及“双碳”目标达成的影响日益显著, 备受社会的关注。论文针对中国城市轨道交通建设规模及能耗现状进行深入分析, 并在“双碳”背景下提出了一系列节能措施, 包括供电系统节能、车站运营节能、车辆能效提升以及优化运输组织模式等。同时, 本研究也指明了城市轨道交通节能的未来方向, 旨在为构建绿智融合的城市轨道交通体系提供一定的参考和借鉴。

**关键词:**“双碳”; 城市轨道交通; 车站能耗; 节能减排

## Analysis of Green Development of Urban Rail Transit under the Background of “Dual Carbon”

Shuangjie Meng

Southwest Jiaotong University Hope College, Chengdu, Sichuan, 610400, China

**Abstract:** In the 14th Five Year Plan, achieving the “dual carbon” goal has become a major opportunity and historical mission facing the field of rail transit in the new era. Urban rail transit, with its advantages such as large capacity, has become an important component of public transportation and is currently in a rapid development stage. With the continuous growth of the operating mileage of rail transit, its energy consumption and the impact of achieving the “dual carbon” target are becoming increasingly significant, attracting social attention. The paper conducts an in-depth analysis of the scale and energy consumption status of China’s urban rail transit construction, and proposes a series of energy-saving measures under the background of “dual carbon”, including energy-saving of power supply system, energy-saving of station operation, improvement of vehicle energy efficiency, and optimization of transportation organization mode. At the same time, this study also points out the future direction of energy conservation in urban rail transit, aiming to provide some reference and inspiration for building a green intelligent integrated urban rail transit system.

**Keywords:** “dual carbon”; urban rail transit; station energy consumption; conserve energy, reduce emissions

## 0 前言

近年来, 全球变暖问题日益严峻, 而导致全球变暖加速的最大驱动力就是二氧化碳的排放量。根据国际能源署 (IEA) 的统计数据, 1990—2021 年, 中国交通领域的碳排放量从 9400 万吨增至 9.6 亿吨左右, 增长了 9 倍。针对这一问题, 国务院发布的《“十四五”节能降碳综合工作方案》中明确提出了交通运输节能减排的具体目标, 即到 2025 年年底, 交通运输领域二氧化碳排放强度较 2020 年降低 5%, 全国单位国内生产总值能源消耗比 2020 年下降 13.5%, 为推动碳达峰、碳中和目标的达成奠定坚实基础<sup>[1]</sup>。为实现“双碳”目标, 交通运输业在旅客运输和货物运输方面都进行了重大改革, 在此期间, 大力发展绿色交通, 加快建设绿色交通基础设施设备, 实施各种节能减排活动, 致力于提高环境质量。而城市轨道交通系统作为绿色交通的重要产业支柱, 既是城市居民出行和生活的必要保障, 也是实现“双碳”战略目标的关键领域。

作为一种公共交通方式, 城市轨道交通凭借其大容量、

低污染和高速度的特点, 在公共交通体系中占据着核心位置。它显著减轻了城市交通拥堵的状况, 并在很大程度上影响了人们的出行选择。城市轨道交通相对于公交车来说, 其绿色发展可持续性可体现在以下几个方面: 首先, 地铁作为一种大运量的交通方式在运行过程中主要依赖电力驱动, 且电力来源多为清洁能源 (如核能、风能、水能等), 因此碳排放量相对较少; 其次, 地铁一般在地下以及高架上, 极大缓解道路拥堵问题; 最后, 相较于私家车和公交车来说, 其在运营过程中很少产生碳排放, 是绿色交通的主力军。由于其建设和运营过程中需要大量的资金支持, 所以目前只在部分一线和二线城市中得到广泛应用。

在“双碳”背景下, 大多数学者致力于对城市轨道交通节能减排方面的研究。吴丹等人<sup>[2]</sup>根据北京、上海、深圳等城市中城市轨道交通的发展情况, 提出“六位一体”的技术改革措施。忻剑鸣<sup>[3]</sup>根据绿色交通低碳的发展理念提出了轨道交通在建设方面的节能减排研究, 为上海市交通的发展提供一定保障。张博<sup>[4]</sup>从列车运行时刻角度出发, 通

通过对客流量的调查和预测，提出一系列节能减排和提高列车运行效率的措施，同时在此基础上也对旅客满意度进行调查研究，为现如今智能化城市轨道交通的发展，提供一定的技术支持。黄焕隆<sup>[5]</sup>等人以供电系统的节能减排方面出发，针对具体案例出发，对系统内的变压器及动力照明设备进行了优化，在文章最后基于供电系统还提出引入智能化检测技术，以确保轨道交通的安全运行。国外学者<sup>[6-7]</sup>在这一领域同样开展了相关研究，他们主要关注于对轨道交通运行环境的综合评估。这些研究深入分析轨道交通在运行过程中对环境产生的影响，并探索出有效的措施，从而进一步提高城市轨道交通系统的环保质量和可持续性。

基于以上学者的研究，论文在此基础上，在“双碳”背景下对城市轨道交通的绿色发展进行不同层面的分析，探讨城市轨道交通如何在节能减排、资源高效利用，推动城市轨道交通行业的绿色转型，促进可持续发展贡献力量。

## 1 城市轨道交通绿色发展现状

### 1.1 城市轨道交通发展现状分析

截至 2023 年底，中国（不含港澳台）已经有 59 个城市开通城市轨道交通运营线路，其众多城市中共建设线路 338 条，所有线路总长达到 11224.54km，全年累计运送客运量 294.66 亿人次，相较于上年，同比增长了 53% 左右，总客运周转量 2450.53 亿人次公里，相较于去年增加了半数以上，同时城市轨道交通的日均旅客周转量突破 8000 万人次<sup>[8]</sup>。与此同时，城市轨道交通的建设步伐仍在不断加快，根据“十四五”规划，新建线路的总长度将超过 13000 公里，这将逐步覆盖中国的主要区域，从而显著提升居民的出行体验。

### 1.2 城市轨道交通能耗分析

城市轨道交通的能耗主要来源于电力使用，其中因购买电力而间接产生的碳排放占总排放量的 90%，这表明电力消耗是碳排放的主要来源。具体来说，列车的牵引能耗大约占总能耗的 53%，而动力照明能耗则大约占 47%。在车站设备能耗中，通风空调、照明和自动扶梯等系统的能耗占比达到 70% 至 80%。因此，牵引系统和环境控制系统的节能减碳成为重点研究领域。在 2022 年期间，全国城市轨道交通的总电力消耗量为 227.92 亿千瓦时，其中用于牵引的能耗为 113.15 亿千瓦时。随着新线路的不断开通，加之“双碳”目标的推动，城市轨道交通的整体能耗和碳排放量均呈现上升趋势。在这一年中，平均每列车每公里的电力消耗为 3.72 千瓦时，较前一年略有下降 0.48%；而平均每位乘客每公里的电力消耗为 0.144 千瓦时，较前一年增长了 34.02%。这一现象表明，城市轨道交通的客运强度越大，越有助于降低平均人次公里的能耗，进而减少碳排放。因此，通过提升轨道交通在乘客出行中的占比，也是实现绿色低碳出行的重要途径之一。

在城市轨道交通能耗优化与车站能效提升的探讨中，详尽地解析能耗的多元影响因素，以及它们各自在总体能耗中的占比与关联因素，对于精准把握节能减排的关键节点、指导车辆选型决策、优化线路布局及前瞻新车型设计等方面，具有深远的指导意义。同时，这也为城市轨道交通的节能减排工作提供了方向。因此，论文致力于全面汇总城市轨道交通能耗的主要驱动因素，并从这些因素出发，围绕运输组织模式革新、车站能效管理以及车辆技术进步等关键领域，综合概述了当前主流的节能策略与实践。在此基础上，论文探讨了在“双碳”战略指导下，城市轨道交通如何有效实施节能减排措施，旨在为其向绿色低碳发展模式的转变提供强有力的支撑。

## 2 城市轨道交通主要节能措施

随着城市轨道交通的迅速发展，节能和减少能源消耗已成为业内关注的焦点。各城市在轨道交通的建设和运营中实施了多样化的技术和管理策略，这些策略覆盖了多个系统，如轨道牵引、通风空调、照明和电梯等。这些策略的目标是减少能源消耗、提升能源效率，并推动实现低碳环保的发展。其具体的节能减排措施如图 1 所示。

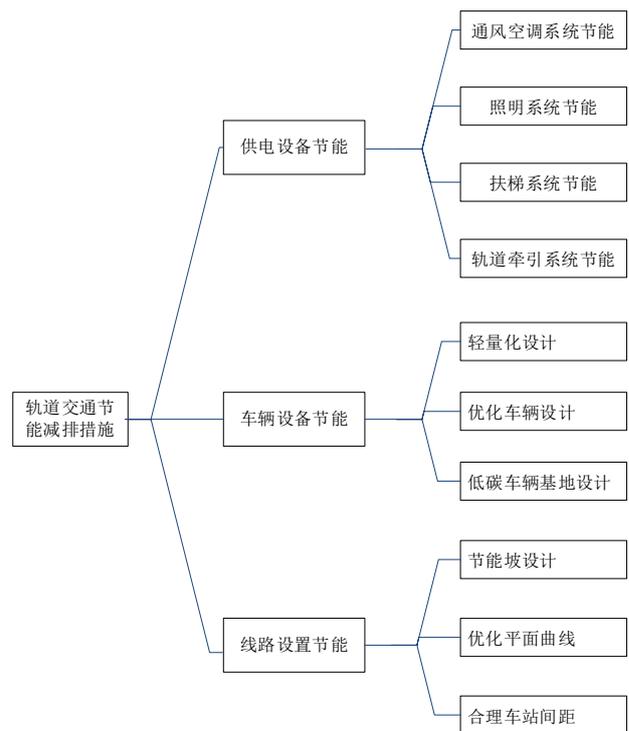


图 1 节能减排措施

### 2.1 供电设备节能

#### 2.1.1 通风空调系统节能

通风空调系统的节能技术涵盖了多个层面，旨在适应地铁环境的复杂多变，实现高效节能。在智能调控方面，系统能够依据地铁环境的不同需求，提供包括除湿模式、舒适模式在内的多场景环境智能调控方案。这些方案特别适用

于站内湿度过高、瞬时大客流等特定场景,通过精准调节室内环境参数,确保乘客的舒适体验同时,有效减少不必要的能耗。在高效设备的应用上,通风空调系统广泛采用了变频风机、高效制冷机组等节能型设备,这些设备通过提高能效比和降低运行功耗,显著减少了系统的整体能耗。此外,系统优化也是节能的关键一环,通过合理设置送风量、温度等参数,以及对通风路径和气流组织的优化,进一步提升了系统的节能效果。

### 2.1.2 照明系统节能

城市轨道交通中照明系统在节能方面也是主力军。推广 LED 环保照明灯具,凭借其亮度高、能耗低的优势,显著降低了照明系统的能源消耗。而随着智能照明控制系统的引入,进一步提升了节能效果。该系统能够根据车站客流量、光照强度等实时因素,自动调节照明亮度和色温,既保证了照明质量,又实现了按需照明,避免了能源的浪费。

### 2.1.3 扶梯系统节能

车站扶梯的能耗在很大程度上受到系统结构和设备特性的影响。目前,车站自动扶梯普遍实施自动启停功能,这在节能方面取得了明显效果,但可能会对扶梯的使用寿命造成影响。鉴于扶梯及其辅助设施常面临长时间运行与负载不均挑战,采用变频调速运行成为节能减排的有效手段。此模式在保持节能效益的同时,还能延长扶梯及其辅助设施的使用寿命,实现了多方面的效益。

### 2.1.4 轨道牵引系统的节能

节能技术在城市轨道交通的轨道牵引系统中还有相关体现。再生制动技术的应用,使得列车在制动过程中产生的电能得以回收和再利用,这一创新不仅降低了能耗,还提高了能源的利用效率。同时,通过优化列车牵引策略、提高列车运行效率等方式,轨道牵引系统的能耗得到了进一步的降低。

## 2.2 车辆设备节能

### 2.2.1 轻量化技术

目前,车辆在建造过程中,采用较轻的材料构造也是目前节能的关键措施。轻量化意味着在保障车辆安全性和功能性的前提下,通过选用高强度、低密度的材料,如铝合金车体,来有效降低车辆的整体重量。这一举措不仅直接减少了车辆因自身重量而产生的附加能耗,还提升了车辆的加速性能和制动性能,间接促进了能源的合理利用。铝合金等轻量化材料的运用,结合先进的制造技术,既保证了车辆的结构强度,又大幅度减轻了重量,为实现绿色、高效的交通出行提供了有力支持。

### 2.2.2 优化车辆设计

在车辆设计中,可以通过改变车辆外观来进行节能减排。首先,通过优化车辆外形,如采用流线型设计,可以显著减小车辆在高速行驶过程中遇到的空气阻力,从而降低能耗。这一设计理念不仅适用于列车头部,也贯穿于整个车身

设计之中,确保了车辆在整个运行周期内都能保持较低的能耗水平。此外,节能型空调和通风系统的应用也是优化车辆设计的重要一环。这些系统通过精确控制车内温度和空气流通,既保证了乘客的舒适度,又有效减少了车辆在运营过程中的能耗,同时提升了能效和舒适性。

### 2.2.3 构建低碳车辆基地新模式

针对城市轨道交通车辆基地的独特性,我们推行了一系列创新实践,涵盖库房屋顶及外墙的光伏一体化设计、被动式建筑设计理念、低碳建材的优选、预制装配式构件的应用,以及集成智能照明(含光导管照明)技术,旨在塑造一个零碳排放的车辆基地典范。例如,崇明线项目建设的东靖路和陈家镇两大车辆基地,两者均在其建筑屋顶部署了光伏项目。本项目分布式光伏系统遵循“自给自足,余电并网”的原则运作,由上海地铁新能源公司主导投资与运维。该系统产生的电力优先满足崇明线车辆与车站的用电需求,多余电量则输送至国家电网。

简言之,东靖路车辆基地的运用库与检修库屋顶铺设了单晶硅光伏组件,总装机容量接近 5.4 兆瓦,经由两座 35 千伏光伏升压站升压后,并入崇明线的 35 千伏电网。而陈家镇车辆基地的运用库屋顶同样配置了单晶硅光伏组件,装机容量约为 1.6 兆瓦,通过一座 35 千伏光伏升压站升压后,并入崇明线的电力系统

## 2.3 线路设置节能

### 2.3.1 节能坡设计

节能坡设计充分利用了自然地形条件,通过精心规划,使线路呈现进出站上坡、出站下坡的态势。这样的设计不仅符合列车运行的物理原理,能够有效利用列车自身的重力势能,在进站时通过上坡减缓速度,减少制动能耗,同时在出站时利用下坡加速,降低牵引供电需求,从而实现能源的节约。

### 2.3.2 优化平面曲线

在线路规划阶段,设计师们也要根据整体规划布局以及实际地形条件,科学合理地设置平面曲线的半径。通过减小不必要的急弯,不仅可以提升列车运行的平稳性和乘客的舒适度,更重要的是能够显著降低车轮的磨耗以及列车在行驶过程中的阻力,进而减少能耗。这一设计策略体现了对细节的精雕细琢和对能源效率的深刻认识。

### 2.3.3 合理车站间距

在车站位置与间距的确定上,需要综合考虑规划要求、客流分布、地质条件以及地形地貌等多重因素。通过科学的选址和间距设置,可以确保列车在运行过程中减少不必要的启动与制动次数,从而有效降低这部分能耗。这一做法不仅有助于提升整体运营效率,还能够在保障乘客出行便利性的同时,实现能源的最大化利用。

## 3 结论

城市轨道交通作为城市公共运输中一种电能消耗耗能

较大的行业，故而在实际的运行中，更要执行严格的管理，从而更好的推进交通城市轨道交通的绿色转型。论文针对中国城市轨道交通的耗能和碳排放量，提出了供电设备节能、车辆设备节能以及线路设置节能三个层面的节能措施，旨在提升能源利用效率并减少碳排放。由于中国城市轨道交通正处于快速发展期，需求持续上升，整个行业仍面临节能减排的重大挑战。因此，研究制定科学高效的节能减排方案，并严格执行，以降低运营能耗与碳排放，对实现中国“双碳”目标具有重要意义。

#### 参考文献：

- [1] CHEN K Y, ZHANG G B, WU H Y, et al. Uncovering -20-the Carbon Emission Intensity and Reduction Potentials of the Metro Operation Phase:A Case Study in Shenzhen Megacity[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2023,20(1):206.
- [2] 庞明潇,刘巧玉,王海涛,等.城市轨道交通绿色节能技术路线研究[J].山东工业技术,2023(6):28-32.
- [3] 忻剑鸣.“双碳”目标下城市轨道交通绿色低碳发展路径探索[J].建筑科技,2024,8(9):18-20.
- [4] 张博,任朝辉.城市轨道交通车辆运行控制系统优化与节能策略[J].人民公交,2024(15):85-88.
- [5] 黄焕隆.关于城市轨道交通供电系统的节能措施与经济运行[J].低碳世界,2020,10(12):201-202.
- [6] AHSAN N, HEWAGE K, RAZI F, et al. A Critical Review of Sustainable Rail Technologies Based on Environmental, Economic,Social,and Technical Perspectives to Achieve Net Zero Emissions[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews,2023(185):113621.
- [7] GIUNTA M. Trends and Challenges in Railway Sustainability: The State of the Art Regarding Measures,Strategies, and Assessment Tools[J]. Sustainability,2023,15(24):16632.
- [8] 中国城市轨道交通协会.城市轨道交通2023年度统计和分析报告[R].北京:中国城市轨道交通协会,2024.