

城市轨道交通光伏发电系统应用分析

黄任繁

南宁轨道交通运营有限公司，广西壮族自治区南宁市，530029；

摘要：城市轨道交通光伏发电系统基于太阳能光伏电池原理，与轨道交通用电特性适配，其具体应用于车站建筑、轨道沿线、车辆段与停车场，通过屋顶光伏、光伏幕墙、光伏阵列等形式实现能源供给。但该系统面临技术瓶颈、经济回报周期长及社会环境协调等问题。未来需聚焦技术创新与设备优化，完善政策与市场机制，并提升公众参与意识，以推动城市轨道交通光伏发电系统的广泛应用与可持续发展。

关键词：城市轨道交通；光伏发电系统；能源

DOI：10.69979/3029-2727.25.05.045

随着全球能源结构加速向清洁化转型，我国“双碳”战略的深入推进，城市轨道交通作为绿色交通的重要载体，其能源消耗与碳排放问题备受关注。传统供电模式已难以满足轨道交通日益增长的用电需求与环保要求，光伏发电凭借可再生、无污染的特性，成为城市轨道交通绿色发展的新方向。研究城市轨道交通光伏发电系统的应用，对降低运营成本、提升能源自给率、助力实现碳中和目标具有重要的现实意义。

1 城市轨道交通光伏发电系统概述

城市轨道交通光伏发电系统依托半导体材料的光生伏特效应，实现太阳能向电能的直接转换，该系统主要涵盖集中式与分布式两种类型：前者通过大规模光伏阵列集中发电，并经升压处理后接入电网；后者则借助车站屋顶、轨道沿线等零散空间进行布局，以就近消纳电力，更适配城市轨道交通场景需求。系统核心由光伏电池板、逆变器、储能设备及监控系统构成，各组件相互协作，完成光电转换、电能品质优化及智能化运维任务^[1]。

城市轨道交通呈现用电规模大、负荷稳定且峰谷特征显著的特点，与光伏发电的输出特性高度契合。日间运营高峰期正值光伏发电高效时段，可实现电力的即时利用；储能技术的应用则有效应对光照不足时的供电难题。轨道交通沿线丰富的闲置空间，如车站屋面、高架区间顶部、车辆段场地等，为光伏发电系统提供了充足的布设条件。将光伏发电融入城市轨道交通，不仅能够降低对传统电网的依赖，还可大幅削减碳排放，有力推动交通领域的绿色化转型进程^[2]。

2 城市轨道交通光伏发电系统的具体应用

2.1 车站建筑光伏应用

城市轨道交通车站建筑的光伏发电系统，主要通过站房屋顶、外立面及玻璃幕墙等区域进行建设布局。站房屋顶凭借其开阔的面积与充足的光照条件，适宜大规模铺设单晶硅或多晶硅光伏板，利用支架构建光伏阵列，产生的电能经逆变器转换后接入站内电网，优先保障照明、通风、电梯等站内设备用电。针对玻璃幕墙的透光需求，碲化镉、铜铟镓硒等薄膜光伏材料可与幕墙进行一体化设计，在确保建筑美观与采光性能的同时，实现光能向电能的转化。车站出入口雨棚、天桥顶棚等闲置空间，也可安装光伏组件以拓展发电区域，并且借助智能化监控系统对发电数据实施实时监测，依据光照强度与用电负荷灵活调整供电方案，有效提升能源利用效率，助力车站实现部分绿色电力自给，降低运营成本。

2.2 轨道沿线光伏应用

轨道沿线作为城市轨道交通光伏发电系统的关键应用区域，在高架区间与地面线路展现出显著适用性。于高架轨道区间，光伏板可灵活安装于桥墩顶端、轨道梁侧部或桥面底部，通过倾斜或水平的布局方式，最大化捕捉光照资源。所产生的电能经由专用电缆，直接汇入邻近的牵引变电所或车站电力系统，为轨道供电设备、信号控制装置等提供清洁电力支持。在地面线路段，依托轨道两侧的绿化带、隔离带等闲置空间，铺设光伏阵列构建光伏廊道。然而，此类应用面临列车运行震动、风沙侵蚀及阴影遮挡等挑战，需通过优化支架结构设计、选用高防护性能组件，保障系统稳定运行。借助智能追光技术，驱动光伏板自动调节角度，提升发电效能。轨道沿线光伏发电系统的部署，不仅实现线性空间资源的

高效利用,降低土地占用,更为轨道交通的低碳化运营提供坚实保障^[3]。

2.3 车辆段与停车场光伏应用

由于车辆段与停车场具备广阔的占地面积和开阔平坦的屋顶条件,成为光伏发电系统规模化建设的优质区域。于车辆段场景下,检修库、停车库等大型建筑的屋面适合铺设光伏板,进而打造兆瓦级光伏电站。其产出电力不仅能满足车辆段内照明、设备运行的用电需求,还可借助储能设备进行储存,在用电高峰或光照匮乏时释放,确保电力供应的持续性与稳定性。在停车场区域,采用光伏车棚一体化方案,将光伏板作为顶棚主体,既为车辆提供防护遮蔽,又实现太阳能的转化利用。光伏车棚还可与充电桩集成,为新能源车辆供应绿色电能。此外,通过搭建能源管理平台,对车辆段与停车场的光伏发电、储能及用电环节实施统筹调度,实现能源资源的合理分配与高效运用。这种应用模式不仅大幅提升轨道交通的可再生能源使用占比,还能创造附加经济价值,助力车辆段与停车场向绿色化、智能化方向转型升级。

3 光伏发电在城市轨道交通中面临的挑战

3.1 技术挑战

光伏发电系统与城市轨道交通既有供电系统的兼容性存在显著技术难题。轨道交通供电对电能稳定性、连续性要求极高,而光伏发电具有间歇性、波动性特点,其输出功率受光照强度、天气变化影响大,直接并网易造成电压波动、频率偏移等问题,威胁电力系统稳定运行。同时,轨道沿线复杂环境对光伏设备的耐久性与可靠性提出严苛要求,如列车运行产生的震动、隧道内潮湿多尘环境、沿海地区的盐雾腐蚀等,易导致光伏组件老化、线路松动,增加设备故障风险。加上目前光伏储能技术尚不成熟,储能设备成本高、能量密度低、充放电效率有限,难以有效解决光伏发电的间歇性问题,无法满足轨道交通持续稳定的用电需求,限制了光伏发电在城市轨道交通中的大规模应用^[4]。

3.2 经济可行性

光伏发电在城市轨道交通领域的经济可行性面临严峻考验。初期建设成本高昂,涵盖光伏组件采购、安装施工、配套电网改造、储能设备投入等多方面费用,加之城市轨道交通项目建设周期长,导致投资回收周期普遍超过10年,企业资金压力巨大,光伏发电收益受政策补贴影响显著,随着补贴退坡,项目盈利能力大幅

下降。并且城市轨道交通场景下,光伏系统的运维成本较高,需定期对轨道沿线、车站屋顶等区域的设备进行巡检、清洁与维护,人工与设备维护费用持续增加。与传统供电方式相比,光伏发电在成本上缺乏竞争力,若无法有效降低成本、提升发电效率,难以吸引企业大规模投资建设,阻碍其商业化推广进程。

3.3 社会与环境因素

光伏发电在城市轨道交通中的应用面临诸多社会与环境制约因素。公众对光伏发电设施存在认知偏差,担心光伏板产生的电磁辐射、强光反射等影响身体健康与周边环境,部分居民对在车站、轨道沿线建设光伏项目存在抵触情绪,易引发社会矛盾,增加项目推进难度。此外,城市轨道交通线路多穿越人口密集区与城市核心区域,土地资源稀缺且用途规划严格,光伏项目建设可能面临土地使用审批困难、与城市景观规划冲突等问题。在生态环境方面,轨道沿线光伏阵列的铺设可能改变局部微气候,影响动植物栖息地,施工过程中产生的噪音、扬尘等也会对周边环境造成短期污染,若处理不当,易引发环境争议,不利于项目可持续发展。

4 城市轨道交通光伏发电系统未来发展趋势及建议

4.1 技术创新与设备优化

技术创新与设备优化是推动城市轨道交通光伏发电系统发展的核心动力。在系统融合技术上,需大力研发智能微电网技术,借助物联网、大数据与人工智能算法,实时监测光伏发电与轨道交通用电负荷,实现光伏发电与传统电网的动态互补。例如,通过预测性控制策略,提前调整电力输出,有效平抑光伏输出的波动,确保供电稳定性。针对复杂环境适应性难题,一方面,采用纳米涂层技术和高强度复合材料,研发抗震动、防腐蚀的新型光伏组件,使其能在隧道潮湿、沿海盐雾等特殊场景长期稳定运行;另一方面,引入柔性光伏材料,解决曲面建筑光伏安装难题,提升车站玻璃幕墙、弧形顶棚等特殊结构的光伏利用率。

在储能技术领域,加速钠离子电池、固态电池等新型储能技术的研发与应用,突破锂电池成本与安全性瓶颈,提升储能设备的能量密度与充放电效率。同时,构建“光伏+储能+智能电网”一体化管理系统,通过能量管理软件对光伏发电、储能装置、用电负荷进行协同调控,实现能源的高效存储与灵活调配,从根本上解决光伏发电间歇性问题,为轨道交通稳定供能提供坚实技术

保障^[5]。

4.2 政策与市场机制支持

政策引导与市场机制创新是城市轨道交通光伏发电系统规模化发展的关键保障。在政策层面，政府需制定专项扶持政策，明确将轨道交通光伏发电项目纳入重点支持范畴，简化项目审批流程，缩短从规划到落地的周期。设立专项补贴基金，对项目建设给予资金补助，同时实施差异化电价补贴政策，根据项目发电效率和消纳情况，提供阶梯式补贴，增强企业投资积极性。此外，完善光伏发电并网标准，明确轨道交通与电网的接入规范，保障电力输送的安全性与稳定性。

在市场机制方面，建立绿色电力交易平台，允许轨道交通企业将多余的清洁电力参与市场交易，获取额外收益；推动碳交易市场建设，鼓励企业通过光伏发电减少的碳排放量，进行碳指标交易，实现环境效益向经济效益的转化。同时，引入第三方金融机构，开发绿色金融产品，如低息贷款、绿色债券等，拓宽项目融资渠道，降低企业资金压力，形成政策引导、市场驱动的良性发展格局。

4.3 公众参与与意识提升

公众参与和意识提升是城市轨道交通光伏发电系统顺利推进的重要基础。首先，应构建全方位、多层次的科普宣传体系，利用新媒体平台、社区宣传栏、校园科普讲座等渠道，以图文、视频、动画等通俗易懂的形式，向公众普及光伏发电的原理、安全性及环保价值，重点消除公众对电磁辐射、强光反射等方面的误解，增强公众对清洁能源的科学认知。

其次，建立透明高效的沟通机制至关重要。在项目规划初期，通过听证会、民意调查、线上意见征集等方式，充分吸纳周边居民、企业和社会组织的建议，针对公众关切的景观影响、施工噪音等问题，优化项目设计方案。在建设过程中，定期公开项目进展和环境监测数据，邀请公众代表参与监督，增强项目透明度和公信力。

最后，鼓励开展社区共建活动，将光伏发电项目与社区发展有机结合。例如，在车站设置科普展示区，开展绿色能源主题活动；设立社区志愿者岗位，让公众参与设备巡检与维护，提升公众的参与感与责任感。通过以上举措，激发公众对城市轨道交通光伏发电系统的认同感，形成全社会共同支持绿色交通发展的良好氛围。

4.4 商业模式创新与合作共赢

商业模式创新与合作共赢是推动城市轨道交通光伏发电系统可持续发展的重要动力。在投资运营模式上，推广“公私合营（PPP）”模式，吸引社会资本参与项目建设与运营，政府部门负责政策引导与监管，企业发挥技术与资金优势，实现风险共担、利益共享；探索“能源服务协议（ESA）”模式，由专业能源服务公司为轨道交通企业定制光伏发电解决方案，通过能源管理服务获取收益，降低轨道交通企业前期投入成本与运营风险。

在资源整合与合作方面，构建跨领域战略联盟，联合光伏设备制造商、电力运营商、科研机构等，共同开展技术研发、项目建设与市场拓展。例如：光伏设备制造商提供高效组件，电力运营商负责电力消纳与并网，科研机构提供技术支持，形成完整产业链协同效应。同时建立区域合作平台，促进不同城市轨道交通企业间的经验交流与资源共享，共同探索适合本地发展的商业模式，以及完善利益分配机制，根据各方投入资源与贡献程度，制定合理的收益分配方案，保障合作的稳定性与可持续性，通过多方合作实现城市轨道交通光伏发电系统的规模化应用与高质量发展。

5 结语

城市轨道交通光伏发电系统的应用，是实现交通领域节能减排与可持续发展的关键路径，在降低运营成本、优化能源结构方面展现出显著潜力。然而，技术瓶颈、经济回报周期及社会协同等问题仍制约其大规模推广。未来，需通过技术创新突破、政策机制完善及公众意识提升，推动该系统实现更大范围应用，助力城市轨道交通向绿色低碳转型，为实现“双碳”目标提供有力支撑。

参考文献

- [1] 孙丹, 李瑜龙. 城市轨道交通存量维修基地光伏发电系统研究与应用 [J]. 人民公交, 2025, (06): 82-84.
- [2] 迟晓娟, 王斌, 张晨曦, 等. 城市轨道交通光伏发电系统应用分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27 (S2): 156-159.
- [3] 刘昊, 李克飞. 太阳能光伏发电系统在城市轨道交通中的应用研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2022, (08): 38-41.
- [4] 陈超华. 光伏发电系统在城市轨道交通的设计与应用 [J]. 低碳世界, 2021, 11 (12): 120-121.
- [5] 刘阳. 光伏发电系统在城市轨道交通中的应用 [J]. 光源与照明, 2021, (08): 69-70.