

城市轨道交通车站出入口分布式光伏发电应用研究

张翼 周超

(中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都)

摘要 [目的] 基于我国“碳达峰、碳中和”目标,以及城市轨道交通绿色、低碳、可持续发展的需求,研究分布式光伏发电系统在车站出入口应用的可行性。[方法] 以深圳地铁为例,结合车站出入口的造型,研究了车站出入口光伏建筑一体化方案和光伏系统并网方案,分析了车站出入口光伏发电系统的经济效益和社会效益。[结果及结论] 车站出入口是应用分布式光伏发电系统的理想场地,各类车站出入口结构形式均具备应用光伏发电技术的条件。城市轨道交通线路众多,每条线路车站出入口数量超过百余个,随着光伏发电成本进一步降低及国家“双碳”目标的推动,“光伏+轨道交通”将会产生更大的经济效益和显著的社会效益。

关键词 城市轨道交通; 车站出入口; 分布式光伏发电

中图分类号 TM615; U231.8

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.06.053

Application of Distributed Photovoltaic Power Generation at Urban Rail Transit Station Entrances and Exits

ZHANG Yi, ZHOU Chao

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] Based on the goals of carbon peak and carbon neutrality in China and the demand for green, low-carbon and sustainable development of urban rail transit, the feasibility of applying distributed photovoltaic power generation system (the photovoltaic system for short) at urban rail transit station entrances and exits is studied. [Method] Taking Shenzhen Metro as an example, in the light of the shape of station entrances and exits, an integration scheme of photovoltaic buildings at the station entrances and exits and the photovoltaic system grid connection scheme are studied, and the economic and social benefits of the photovoltaic system are analyzed. [Result & Conclusion] Station entrances and exits are ideal sites for applying the photovoltaic system, and the structure forms of all types of station entrance and exit fulfill the conditions for the application of photovoltaic power generation technology. There are many urban rail transit lines, with more than 100 station entrances and exits on each line. As the cost of photovoltaic power generation further decreases with the pro-

motion of China's dual carbon goals, photovoltaic + rail transit will produce greater economic benefits and significant social benefits.

Key words urban rail transit; station entrance and exit; distributed photovoltaic power generation

在我国“碳达峰、碳中和”目标背景下,以光伏为代表的新能源成为绿色转型和实现“双碳”目标的主要力量。城市轨道交通较好地解决了大城市日益严重的交通问题,但本身也是城市耗能大户。以深圳地铁为例,2021 和 2022 年度运营电耗约 16 亿 kWh,约占全市用电量的 1.5%,能耗费用占运营成本已超过 10%。从设计源头上挖掘节能潜力是一项重要任务。探索光伏发电技术在城市轨道交通中的应用,是促进城市轨道交通绿色、低碳、可持续发展的重要举措,也可为实现“双碳”目标做出积极贡献。

随着近年来城市规模不断扩大,城市用地也日趋紧张,城市轨道交通很多线路都采用地下敷设方式。出入口作为地下车站与地面之间的过渡和联系,在周边条件允许时,在地面以上均设置有出入口上盖,这为地下车站利用太阳能提供了应用场所。目前除有文献对出入口局部应用进行探讨外^[1],暂无具体应用实践。本文详细介绍了车站出入口分布式光伏发电系统应用的设计方案及适应性,可为城市轨道交通车站出入口分布式光伏发电技术的应用提供借鉴。

1 车站出入口建筑形式

城市轨道交通车站出入口结合各个车站所在位置地面建筑及街道的具体情况进行布置,选择在吸引客流量大、与地面交通换乘方便的地方。根据其设计形式可将出入口分为独立式出入口、合建式出入口和下沉式出入口^[2],其中独立式出入口又分为开敞式出入口和有盖出入口,通常有盖的独立式出入口才具备利用太阳能进行发电的基础条件。

车站出入口上盖造型与城市建设水平、建筑特色、城市文化等因素相关,并要与城市景观相协调。以深圳地铁为例,车站出入口造型顺应目前国内外出入口的流行趋势,多采用轻钢玻璃结构,内部结构采用钢结构,上盖顶棚采用玻璃或金属复合铝板,立面采用玻璃以满足出入口采光要求,屋面有平顶和弧形两类,整体上既轻巧、简洁,又美观大方。常见地下车站出入口如图 1 所示。

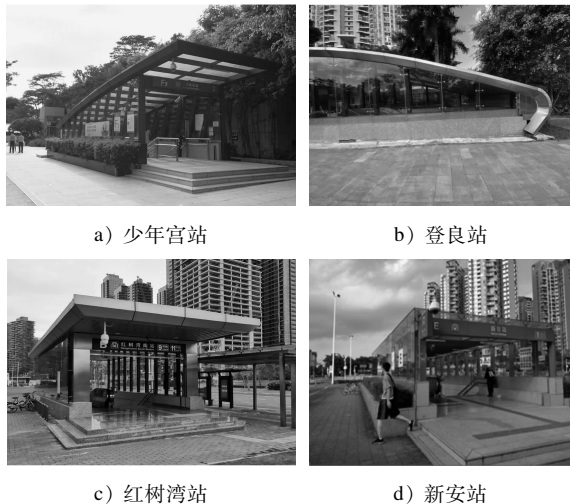


图 1 深圳地铁车站出入口外观造型

Fig. 1 External appearance of the entrance and exit of Shenzhen metro stations

根据疏散宽度要求、服务水平不同,在车站出入口设置扶梯或电梯的数量不等,在规模上也略有不同,常见车站出入口楼扶梯设置类型及出入口规模如表 1 所示。

表 1 车站出入口楼扶梯设置类型及出入口规模

Tab. 1 Type and scale of stairs and escalators deployed at station entrance and exit

楼扶梯设置类型	宽度/m	顶棚面积/m ²	立面面积/m ²
两扶梯一楼梯	7.0	120	140
一扶梯一楼梯	5.5	100	140
无扶梯一楼梯	4.0	65	140

2 车站出入口光伏建筑一体化方案

2.1 太阳能光伏组件选择

光伏发电系统核心设备就是光伏电池,其利用半导体界面的光生伏特效应将光能转变为电能^[3]。光伏电池主要有单晶硅电池、多晶硅电池、非晶硅电池、碲化镉电池、铜铟镓硒电池等,各类型光伏电

池特点如表 2 所示。其中,转换效率和制造成本是制约光伏电池推广应用的关键因素。目前市面上应用最多的是多晶硅电池,随着生产工艺和技术进步,单晶硅电池成本与多晶硅电池相比已无差异。薄膜电池具有弱光性好,色彩、透光率多样化的优点,但由于转换功率低,因此性价比稍低,应用范围相对较小。但是,薄膜电池的用硅量极少,有助于降低制造成本,又因其更容易与建筑完美结合,现已成为光伏建筑发展的新趋势。

表 2 不同类型太阳能光伏电池特点

Tab. 2 Characteristics of different types of solar photovoltaic cells

电池类型	转化效率/%	制造成本	原料资源	市场占有率
单晶硅电池	17 ~ 22	较低	较丰富	高
多晶硅电池	15 ~ 21	较低	较丰富	高
非晶硅电池(薄膜)	10 ~ 12	低	丰富	低
碲化镉电池(薄膜)	11 ~ 16	较高	稀少	较低
铜铟镓硒电池(薄膜)	14 ~ 18	较高	稀少	较低

光伏电池通过串并联组合构成光伏组件。光伏组件根据材料、结构、用途和封装方式的不同,分为不同的种类,各种光伏组件具有不同的特点。光伏组件的选择还需结合建筑屋面特点、实施条件、组件封装和安装形式来确定,常见的光伏建筑一体化应用形式如表 3 所示^[4]。

表 3 光伏建筑一体化应用形式

Tab. 3 Application form of photovoltaic building integration

光伏建筑形式	光伏组件类型	适用范围及优势
光伏采光顶(天窗、顶棚)	玻璃组件(透明)	同时满足采光、隔热和发电需求
光伏屋顶	光伏瓦	适用于古建筑、农房
光伏幕墙(透明)	玻璃组件(透明)	兼顾建筑效果、发电、采光和隔热要求
光伏幕墙(非透明)	玻璃组件(非透明)	兼顾建筑效果、发电和隔热要求
屋顶光伏方阵	普通组件	标准化程度高、安装方便、价格便宜
多造型光伏顶棚、墙面	柔性组件	适用于大跨度、异型屋面或墙面、无光污染

总体来讲,对于造型规则的出入口顶棚和立面,可选择标准的光伏组件;对于不规则的出入口顶棚及立面,可选择外形适应能力强的柔性薄膜光

光伏组件,在满足发电要求的同时也不影响出入口风格和外形^[5]。柔性薄膜光伏组件可通过直接粘的方式与顶棚结合,与普通光伏组件安装相比节约了光伏支架系统,安装方式更简便,经济性更好。因此需结合车站出入口造型来选择适宜的光伏组件。不同光伏组件的应用实例如图2所示。

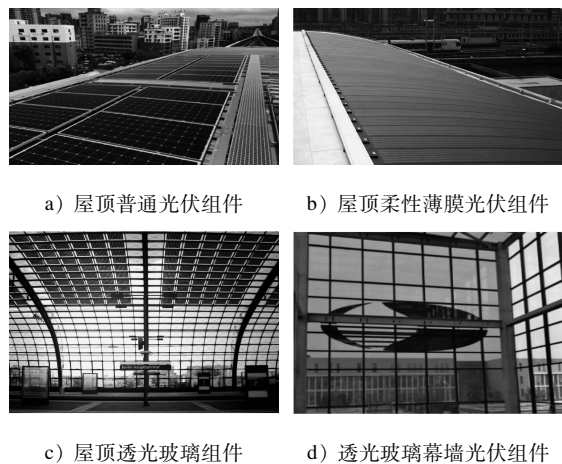


图2 不同光伏组件的应用实例

Fig. 2 Application examples of different photovoltaic modules

2.2 方案设计

根据车站出入口造型,可安装光伏组件的区域包括出入口顶棚和立面。出入口侧面由于采光需要通常采用透光玻璃,顶棚采用的材料包括透光玻璃和不透光的金属复合铝板两类。因此,车站出入口立面采用透光玻璃组件,顶棚根据出入口景观需要选用透光玻璃或其他类型组件。

根据光伏电池性能、不同光伏组件最佳适用场景,车站出入口立面选择转化效率高、弱光性好、与周边环境结合更友好的薄膜玻璃组件;出入口顶棚选用单晶硅电池,出入口若为采光顶棚则选用单晶硅玻璃组件,若为非采光顶棚则选用单晶硅柔性组件。光伏玻璃组件可根据需要调整透光率及色彩,能够满足采光及出入口景观需求。车站出入口光伏方案设计效果如图3所示。

3 车站出入口光伏发电系统并网方案

光伏发电系统分为独立光伏发电系统和并网光伏发电系统两类^[6],后者不需配置蓄电池,从而使成本大幅降低。考虑到城市轨道交通供电系统的可靠性及经济性要求,车站出入口光伏发电系统宜选用并网光伏发电系统。

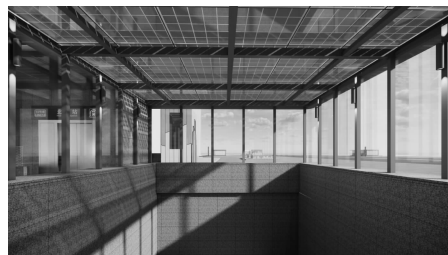
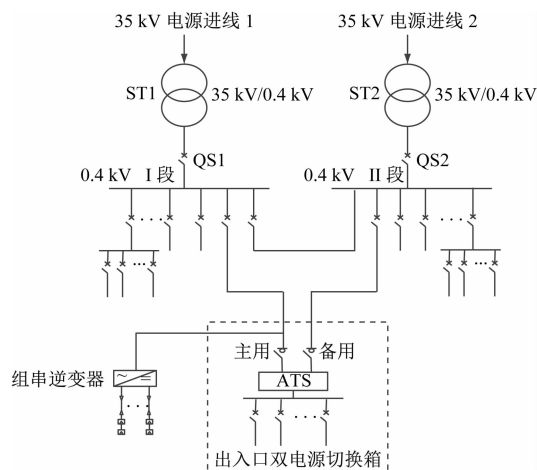


图3 车站出入口光伏方案设计效果图

Fig. 3 Design rendering of station entrance and exit of the using photovoltaic scheme

并网光伏发电系统有高压并网和低压并网两种方案。由于地下车站用电负荷较大,可供安装太阳能光伏组件车站出入口的面积又有限,每个出入口的光伏发电最大并网容量不超过30 kW。若车站出入口均采用分布式光伏发电系统,经计算各车站日时发电量仍均小于日时用电量,仅能满足车站部分动力照明用电需求。因此,车站出入口光伏发电系统采用低压并网方式^[7]。

在车站出入口一般均设置有出入口双电源切换箱,给出入口的电扶梯、水泵及电动卷帘门等设备配电。根据出入口扶梯数量、提升高度不同,出入口电源箱的容量也有所差异,一般在20~80 kW之间。为保证最大限度就近优先使用光伏电源,出入口光伏发电系统优先就近接入到出入口双电源切换箱,并网主接线图如图4所示。



注:ST—变压器;QS—断路器;ATS—双电源切换装置。

图4 车站出入口光伏发电并网系统图

Fig. 4 Grid connection system diagram of photovoltaic generated power at the station entrance and exit

每个出入口设置一台具有多路MPPT(最大功率点跟踪)、转化效率高的组串式光伏逆变器,将太阳能光伏组件所产生直流电能转化为满足车站并

网要求的交流电。由于出入口 3 个立面、顶棚的方位和角度不同,在同一时刻所接受的太阳辐照强度也有所差异,为最大化利用太阳能,3 个立面及顶棚的光伏组件均单独组串,分回路接入组串式光伏逆变器。同时,为避免光伏发电系统接入后的潮流变化对双电源切换装置的影响,并网点选择接入到双电源主用进线前端。

车站出入口设备优先使用光伏发电量,当光伏发电系统的发电量不够或不能发电时由车站供电系统补充;当发电量超过车站出入口设备用电时,超出部分反馈至车站变电所,再由变电所分配给其他用电负荷使用。

4 预期效益分析

4.1 经济效益

根据车站规模、周边环境不同,车站出入口在形式上有所差异,本文选择数量较多的两扶梯一楼梯车站出入口进行分析。该类出入口顶棚面积为 120 m^2 ,出入口立面面积为 140 m^2 。光伏发电系统建设方案根据顶棚是否采光分为两类。方案一:顶棚采光,立面柔性薄膜玻璃光伏组件+顶棚单晶硅玻璃光伏组件。方案二:顶棚不采光,立面柔性薄膜玻璃光伏组件+顶棚柔性单晶硅光伏组件。

柔性薄膜玻璃光伏组件选用透光率 40% 的组件,组件峰值功率为 75 W/m^2 ;单晶硅玻璃光伏组件峰值功率为 140 W/m^2 ;柔性单晶硅薄膜组件峰值功率为 195 W/m^2 。方案一和方案二的装机容量(峰值功率)分别为 22.47 kW 和 28.41 kW ,建设成本(光伏系统成本减去原来出入口玻璃成本)分别为 26.72 万元和 27.68 万元。

以深圳地区为例,太阳能资源标准有效利用日照数按 $1\,461\text{ h/年}$ 计算。光伏发电系统设计寿命为 25 年,光伏组件在 10 年内功率衰降率不大于 10%,25 年设计期限内功率衰降率不大于 20%。

光伏发电系统发电量 W 计算式为:

$$W = Pt\eta \quad (1)$$

式中:

P ——光伏发电系统装机容量;

t ——年峰值日照小时数;

η ——光伏发电系统的综合效率。

综合考虑光伏效率、逆变器效率、交流并网效率等因素,出入口顶棚光伏系统综合效率取 0.8,侧面光伏系统综合效率取顶棚综合效率的 0.7 倍。表

4 为 25 年设计寿命周期内车站出入口光伏发电系统发电量及节能减排情况^[8]。

表 4 25 年设计寿命周期内车站出入口光伏发电系统发电量及节能减排情况

Tab. 4 Power generation and energy conservation and emission reduction of the PV power generation system at the station entrance and exit within the design life cycle of 25 years

建设方案	发电量/(MWh)	CO ₂ 减排量/t	SO ₂ 减排量/t	节约标准煤/t
方案一	5.560	462.63	88.97	169.54
方案二	7.093	590.14	113.49	216.27

发电效益按深圳地铁目前电价 0.82 元/(kWh)且每年上涨 2% 测算。同时,根据深圳市关于分布式光伏发电系统的补贴政策,补贴期为 5 年,光伏建筑一体化并网发电项目前两年补贴 0.36 元/(kWh),第三年和第四年补贴 0.24 元/(kWh),第五年补贴 0.12 元/(kWh)。表 5 为 25 年设计寿命周期内车站出入口光伏发电系统的投资回收期及经济效益。由表 5 可见,方案二的投资回收期更短,经济效益更好。

表 5 25 年设计寿命周期内车站出入口光伏发电系统投资回收期及经济收益

Tab. 5 Investment payback period and economic benefits of the PV power generation system at the station entrance and exit within the design life cycle of 25 years

建设方案	不考虑政策补贴		考虑政策补贴	
	投资回收期/年	经济收益/万元	投资回收期/年	经济收益/万元
方案一	12.4	31.21	11.0	34.41
方案二	10.2	46.22	8.8	50.30

4.2 环境及社会效益

在城市轨道交通设计中,充分利用可再生太阳能资源,可减少化石燃料的使用,减少碳排放。从表 4 的减排数据可以看出,车站出入口分布式光伏发电系统具有明显的环境效益。

城市轨道交通作为覆盖范围广、客流量大的公共交通系统,在车站出入口安装光伏发电系统,市民可近距离感受光伏科技带来的变化,在国家“双碳”政策背景下可起到良好的节能减排宣传和示范作用。同时,在 2022 年,全国各地由于受持续高温

干旱灾害天气影响,多地电网均面临极其严峻的限电保供形势,发展分布式光伏发电系统,对于优化城市电网结构、应对极端条件具有重要意义。

5 结语

城市轨道交通车站出入口是应用分布式光伏发电系统的理想场地,结合不同光伏组件特性分析可知,各类车站出入口结构形式均具备应用光伏发电技术的条件。通过光伏建筑一体化设计,将光伏发电系统和车站出入口融为一个整体,这种运用“光伏+”科技践行绿色、低碳发展理念,对城市轨道交通节能减排、降低运营成本具有重要意义。

无论是新建线路车站出入口,还是既有线路车站出入口,均具备建设光伏发电系统的可行性。城市轨道交通线路众多,每条线路车站出入口数量超过百余个,车站出入口分布式光伏发电应用具有广阔的前景。随着光伏发电成本进一步降低及国家“双碳”目标的推动,“光伏+轨道交通”将会产生更大的经济效益和显著的社会效益,更有助于推动分布式光伏发电技术在我国城市轨道交通中的应用。

参考文献

- [1] 郑燕,张琨.城轨扶梯出入口光伏系统方案研究[J].现代城市轨道交通,2016(2):15.
ZHENG Yan, ZHANG Kun. Study on photovoltaic system solutions at transit escalator entrance[J]. Modern Urban Transit, 2016(2):15.
- [2] 潘佩君.地铁车站出入口设计探讨[J].现代城市轨道交通,2019(5):91.
PAN Peijun. Discussion on design of entrance and exit of metro station[J]. Modern Urban Transit, 2019(5):91.
- [3] 周超.太阳能光伏发电在城市轨道交通中的应用[J].都市快轨交通,2013,26(2):77.
ZHOU Chao. Application of solar photovoltaic power generation in

- urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013, 26(2):77.
- [4] 王钧,陈明媛,冯冠华,等.太阳能光伏系统建筑应用技术适宜性探研与典例分析[J].建筑节能,2021,49(8):91.
WANG Jun, CHEN Mingyuan, FENG Guanhua, et al. Technical applicability of solar photovoltaic system used in building and typical case analysis[J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(8):91.
- [5] 靳忠福.光伏发电在城市轨道交通中的应用及其关键技术[J].城市轨道交通研究,2020,23(12):186.
JIN Zhongfu. Application and key technology of photovoltaic power generation in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12):186.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.民用建筑太阳能光伏系统应用技术规范:JGJ 203—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for application of solar photovoltaic system of civil buildings: JGJ 203—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [7] 周超.地铁高架车站太阳能光伏发电系统设计[J].都市快轨交通,2014,27(6):104.
ZHOU Chao. Solar photovoltaic power generation system design for elevated subway station[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014, 27(6):104.
- [8] 中国电力企业联合会.中国电力行业年度发展报告[R].北京:中国电力企业联合会,2021.
China Electricity Council. Annual development report of China's electric power industry[R]. Beijing: China Electricity Council, 2021.

· 收稿日期:2022-09-03 修回日期:2023-04-11 出版日期:2024-06-10
Received:2022-09-03 Revised:2023-04-11 Published:2024-06-10
· 通信作者:张翼,高级工程师,543985761@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第290页)

- [10] 朱伟鹏.深圳地铁11号线受电弓碳滑板磨损率研究[J].铁道机车车辆,2018,38(4):121.
ZHU Weipeng. Research on wear rate of pantograph carbon slide in Shenzhen metro line 11[J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(4):121.

· 收稿日期:2021-11-16 修回日期:2021-12-10 出版日期:2024-06-10
Received:2021-11-16 Revised:2021-12-10 Published:2024-06-10

· 第一作者:王亮,正高级工程师,282652189@qq.com
通信作者:牛秀蓉,工程师,1558872471@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license