

轨道交通沿线分布式光伏示范电站设计方案研究^{*}

吉祥雨^{1,2**} 李 晔^{1,2} 刘国桐^{1,2} 吴宗臻¹ 王小锁¹

(1. 铁科院(北京)工程咨询有限公司, 100081, 北京;

2. 城轨创新网络中心有限公司, 100071, 北京//第一作者, 助理研究员)

摘要 目的: 鉴于现阶段大多数轨道交通车站开始大规模铺设光伏发电设施, 但缺乏如何利用轨道交通沿线资源进行光伏发电系统布置的科学研究及工程项目, 为了提高光伏与建筑一体化发展, 需要对我国轨道交通沿线土地光伏发电系统的设计方案进行研究。方法: 介绍了我国首个应用于轨道交通沿线并网发电的装机容量为 216 kW 的轨道交通沿线分布式光伏示范电站及其能源管理系统的总体设计方案。基于在线监测获取的数据分析了光伏发电系统的平日发电量和出力相关性变化趋势; 采用神经网络拟合模型, 预测温度、湿度和光照强度对光伏发电系统瞬时功率的影响。结果及结论: 影响光伏发电系统的关键影响因素主要为光照强度、温度及湿度。在光照强度为 50 lx、湿度为 40% 的条件下, 光伏示范电站的发电瞬时功率随着温度的上升而波动上升, 且在 15 ℃ 时达到峰值, 而后波动下降。当湿度小于 60% 时, 其对发电瞬时功率基本无影响; 而当湿度大于 60% 时, 发电瞬时功率随湿度的增加而快速减小。光照强度与光伏发电系统的瞬时功率呈正相关, 且光照强度在 50~200 lx 与 250~300 lx 范围内趋于稳定, 而在其他范围内近似线性增加。轨道交通沿线分布式光伏电站的选址应首要考虑光照强度, 并尽量避免在高湿度及气候变化剧烈的地区建设。

关键词 轨道交通; 分布式光伏示范电站; 设计方案

中图分类号 TU271.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.10.015

Design Scheme for Distributed Photovoltaic Demonstration Power Stations along the Rail Transit Line

JI Xiangyu, LI Ye, LIU Guotong, WU Zongzhen, WANG Xiaosuo

Abstract Objective: Given the current trend of large-scale installation of PV (photovoltaic) power generation facilities at most rail transit stations, there is a lack of scientific research and engineering projects on how to utilize resources along the rail transit line for the deployment of PV power generation sys-

tems. To enhance the integrated development of PV with architecture, it is essential to conduct research on the design schemes for land-based PV power generation systems along the rail transit line in China. Method: The overall design scheme of China's first grid-connected distributed PV demonstration power station along a rail transit line with an installed capacity of 216 kW is introduced, along with its energy management system. Based on data obtained from online monitoring, the trend of correlation variation between daily power generation and output of the PV power generation system is analyzed. A neural network fitting model is employed to predict the impact of temperature, humidity, and light intensity on the instantaneous power of the PV power generation system. Result & Conclusion: The key factors affecting the PV power generation system are primarily light intensity, temperature and humidity. Under conditions of 50 lx light intensity and 40% humidity, the instantaneous power generation of the PV demonstration power station fluctuates upward with increasing temperature, reaching a peak at 15 ℃, followed by a fluctuating decline. When the humidity is below 60%, it has little effect on instantaneous power, while exceeding 60%, the instantaneous power rapidly decreases with increasing humidity. Light intensity is positively correlated with the instantaneous power of the PV power generation system, stabilizing within the ranges of 50-200 lx and 250-300 lx, while increasing in seemingly linear manner in other ranges. The site selection for distributed PV power stations along the rail transit line should primarily consider light intensity and aim to avoid construction in regions with high humidity and drastic climate changes.

Key words rail transit; distributed PV demonstration power station; design scheme

First-author's address Academy of Railway Sciences (Beijing) Engineering Consul Co., Ltd., 100081, Beijing, China

^{*} 铁科院(北京)工程咨询有限公司基金项目(2022ZXJ003)

^{**} 通信作者

随着光伏建筑一体化系统的发展,越来越多的轨道交通车站开始大规模铺设光伏发电设施^[1],但仍较少应用于轨道交通沿线地区,这是由于光伏电站选址不仅需考虑电力传输与光照强度的平衡问题,还需考虑安全性和维护问题:安全性问题即光伏发电系统稳定性导致的轨道交通电网用电安全,以及沿线部署光伏发电系统对线路限界可能造成影响所导致的安全隐患;维护问题即光伏发电系统部署时会依照当地光照条件调整倾斜角度和光伏阵列位置^[2],使用过程中积沙、积尘等会引发泥带问题,严重时大幅影响光伏转化能效。以上问题导致轨道交通沿线土地光伏发电系统应用的实质性推进较为艰难。

装机容量为 216 kW 的轨道交通沿线分布式光伏示范电站(以下简称“光伏示范电站”)位于国家铁道试验中心,是我国首个应用于轨道交通沿线地区并网发电的分布式光伏项目,旨在探索推动我国轨道交通沿线大规模建设光伏电站的有效路径^[3]。本文介绍了该示范电站的设计方案,并对该电站的实际运行数据及规律进行了分析。

1 光伏示范电站总体设计方案

结合场址具体情况,光伏示范电站项目针对线路间夹心地和沿线边坡两类典型轨道交通沿线光伏发电系统的铺设场地,划分为柔性支架光伏区域(以下简称“柔性支架区”)和钢结构支架光伏区域(以下简称“钢结构支架区”),共布置峰值功率为 540 W 的单晶光伏组件 401 块,装机容量共计 216.54 kW。其中:柔性支架区位于线路间夹心地,装机容量为 43.74 kW,布置 1 台输出额定功率为 40 kW 的组串式光伏逆变器;根据线路走势和光伏组件朝向不同,将位于沿线边坡的钢结构支架区划分为钢结构西南支架区、钢结构正南支架区。钢结构西南支架区装机容量为 43.2 kW,布置 1 台输出额定功率为 40 kW 组串式光伏逆变器;钢结构正南支架区装机容量为 129.6 kW,布置 1 台输出额定功率为 110 kW 组串式光伏逆变器。所有光伏发电系统均经光伏逆变器汇入 400 V 配电箱内,另设 1 套 100 kW/204.3 kWh 磷酸铁锂储能系统并入场区低压网。

结合光伏组件与储能模块的选定和安装需求,按照上述设计方案进行施工建设。光伏示范电站项目平面布置如图 1 所示。



图 1 光伏示范电站项目平面布置

Fig. 1 Planar layout diagram of PV demonstration power station project

2 光伏示范电站能源管理系统设计

2.1 光伏示范电站能源管理系统需求分析

轨道交通沿线可铺设光伏的地块通常较为狭长,光伏组件敷设较为零散,且距有人值守车站存在一定距离,难以实现经济可行的数据有线传输与监测。因此,轨道交通沿线光伏示范电站能源管理系统的总体设计思想是利用物联网、云计算等技术手段^[4],破解传统光伏电站运营模式存在的数据孤岛、响应低效等弊端。轨道交通沿线光伏示范电站能源管理系统的业务需求和功能需求如下。

2.1.1 业务需求

光伏电站能源管理系统应将采集后的数据面向运维、管理等业务需求进行数据汇总和维度扩展。该系统包括基础需求和定制化需求两类。基础需求包括用户管理、设备管理、数据统计与台账生成、可视化设计等^[5]。定制化需求包括:

- 1) 用能分析,如光伏示范电站消纳水平分析、设备用能优化控制策略生成与辅助决策等;
- 2) 系统预测,如光伏示范电站发电趋势分析与设备用能趋势分析,电站用能调度策略生成等;
- 3) 运维管理,如设备健康管理、运维工单自动派发、碳资产管理与双碳服务等。

2.1.2 功能需求

光伏示范电站所需采集和监测的数据可分为电气侧、气象侧和维保侧三方面。其中:电气侧需

获取光伏示范电站实时运行情况,包括光伏发电系统的电压、电流、功率、转换效率及总电能,储能系统的 PCS (储能变流器) 运行数据、SOC (荷电状态),以及并网点处测得的电压、电流及电量数据等;气象侧通常需同步监测光伏组件周边的温湿度、辐照强度及风速、风向等。考虑到轨道交通边坡距离远、维护难,且处于线路安全保护区范围内,因此,边坡光伏示范电站维保侧还应考虑对光伏组件积灰损耗水平、路肩/轨旁形变水平、车致振动水平、气动荷载等进行采集监测,以提升维保效率,确保行车安全。

2.2 光伏示范电站能源管理系统设计

光伏示范电站能源管理系统架构如图 2 所示。通过工业控制模块和数字仪表等设备,就近分散采集光伏示范电站的现场数据,使用云计算技术将该电站的并网逆变器、电能表、环境检测仪等设备数据通过以太网上传至云端服务器,用户可以通过监

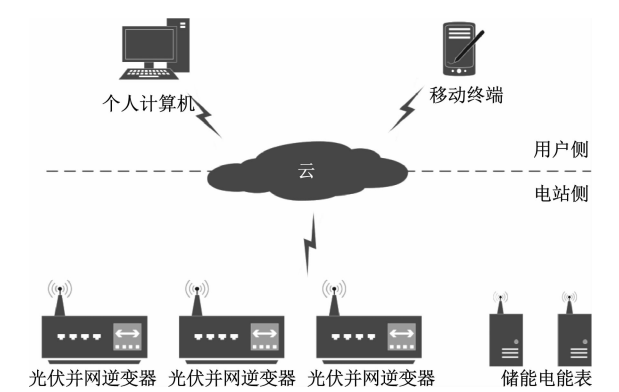


图 2 光伏示范电站能源管理系统架构

Fig. 2 Architecture of PV demonstration power station energy management system

控计算机及移动设备对数据进行集中管理和记录^[6]。光伏示范电站能源管理系统不仅能够监测光伏组件的电压、电流数据,而且可以监测光伏组件附近的环境参数,以及整个光伏示范电站的发电情况,为今后该系统的科研分析提供数据支撑。

考虑到运维管理人员工作和项目展示需求^[7],本项目配套开发轨道交通沿线分布式光伏及能源管控电子看板,对光伏发电系统发电侧、并网消纳侧等的关键运行参数进行展示。光伏示范电站能源管理系统界面见图 3。



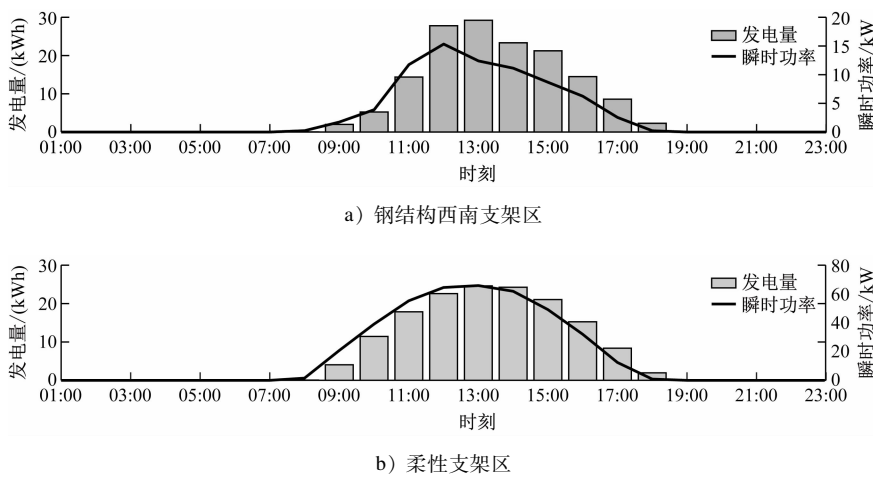
图 3 光伏示范电站能源管理系统界面截图

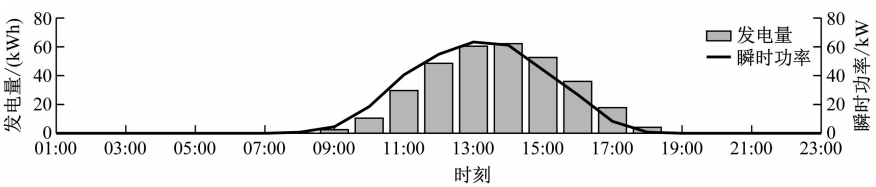
Fig. 3 Interface of PV demonstration power station energy management system

3 光伏示范电站运行数据分析

3.1 示范电站运行数据分析

图 4 展示了 2022 年 11 月 5 日,3 类地块光伏发电系统的发电量与瞬时功率随时间变化曲线^[8]。从图 4 可以看出:光伏发电系统每日出力最多的时段通常集中于 11:00—16:00,该时段约占全日总发电量的 40% ~ 50%。





c) 钢结构正南支架区

图 4 光伏示范电站发电量与瞬时功率随时间变化曲线

Fig. 4 Curve of PV demonstration power station power generation and instantaneous power changing over time

光照强度是影响光伏发电系统发电量的最直接因素。图 5 统计了光伏示范电站钢结构西南支架区日发电量和光照强度。由于天气原因,可见图 5 中 11 月 11 日、11 月 15 日、11 月 24 日光照强度大幅下降,其日发电量与相邻日期相比亦显著降低。

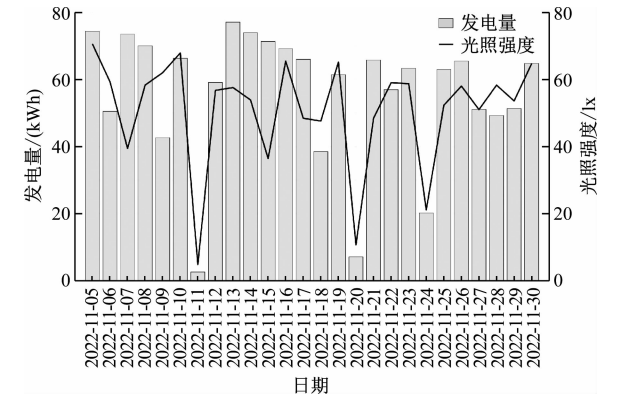


图 5 光伏电站 11 月每日发电量及光照强度

Fig. 5 Daily power generation and light intensity of PV power station in November

3.2 出力相关性分析

为了分析轨道交通沿线光伏示范电站的发电量影响因素,本文采用神经网络拟合模型对关键影响因素与发电量进行拟合。光伏发电系统神经网络拟合模型架构如图 6 所示。

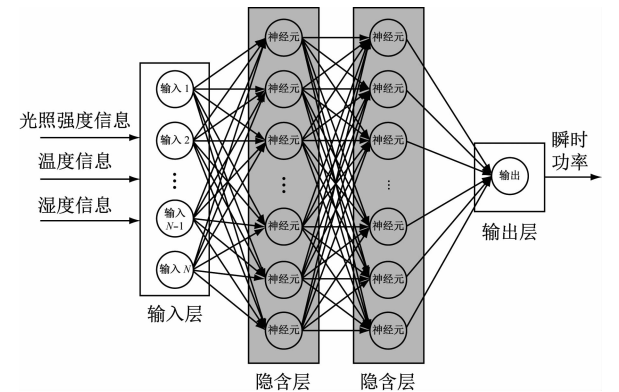


图 6 光伏发电系统神经网络拟合模型架构图

Fig. 6 Architecture diagram of PV power generation system neural network fitting model

在光伏示范电站 2022 年 6 月至 2023 年 5 月的监测数据中,随机选取 70% 的数据作为网络训练集,15% 的数据作为网络测试集,剩余数据作为网络验证集。将影响光伏发电系统的关键影响因素(光照强度、温度及湿度)作为神经网络拟合模型的输入变量,将光伏发电系统的瞬时功率作为输出。光伏发电系统神经网络拟合模型的参数设置见表 1。

表 1 光伏发电系统神经网络拟合模型参数表

Tab.1 Parameters of PV power generation system neural network fitting model

参数	取值
隐含层/层	2
隐含层神经元数/个	10
输入层神经元数/个	3
输出层神经元数/个	1

采用 Levenberg-Marquardt 算法进行模型训练。光伏发电系统神经网络拟合模型均方误差-迭代次数关系曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出:在训练 62 个回合后,该模型均方误差-迭代次数关系曲线趋于稳定;在训练 88 次后,模型误差曲线趋于稳定。

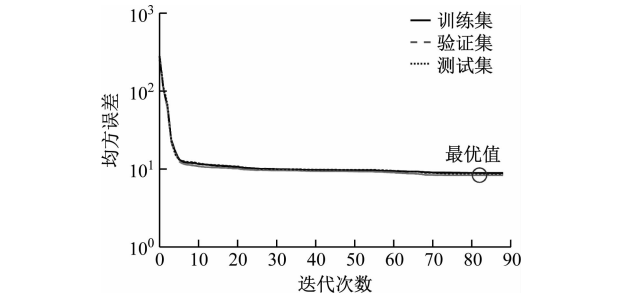


图 7 光伏发电系统神经网络拟合模型均方误差-迭代次数关系曲线

Fig. 7 Relation curve between mean square error and iteration times of PV power generation system neural network fitting model

采用回归值 R 描述预测值与目标值间的相关性; R 值越接近 1,代表预测值与目标值间的关系越

密切; R 值越接近 0,代表预测值与目标值间的关系随机性很大。图 8 为神经网络拟合模型预测值与目标值间的相关性。由图 8 可见:训练集的 R 值为

0.846 64,测试集的 R 值为 0.845 22,验证集的 R 值为 0.849 98,全集的 R 值为 0.845 78,神经网络拟合模型精度满足要求。

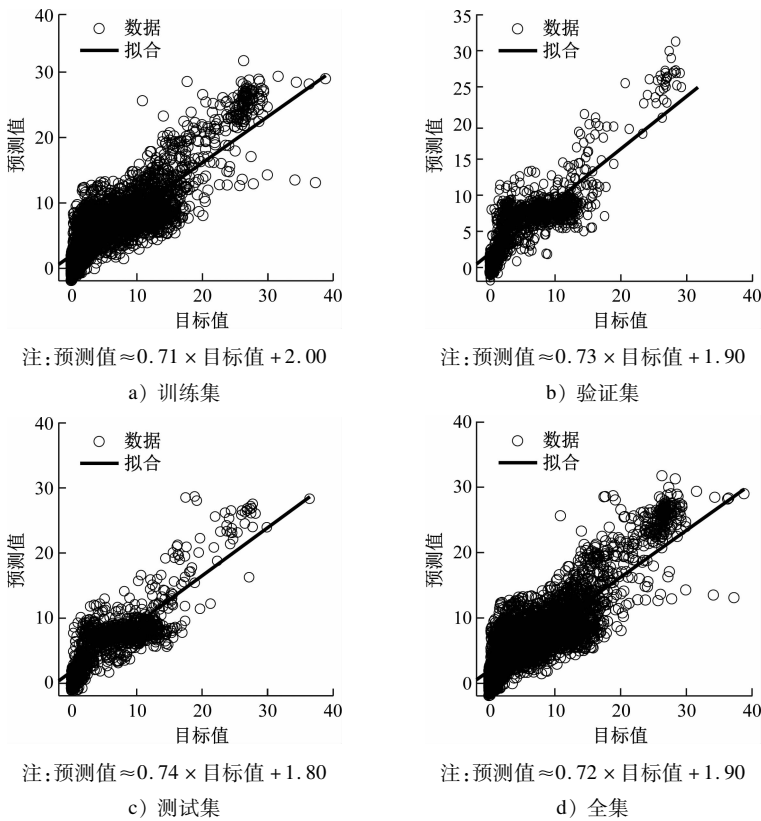


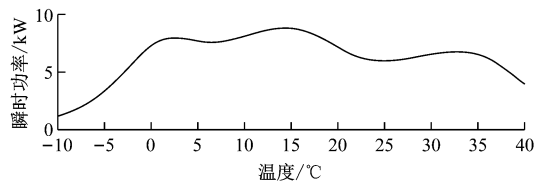
图 8 神经网络拟合模型预测值与目标值间的相关性
Fig.8 Correlation between the predicted and target values of neural network fitting model

设置 3 种常见的光伏电站环境:①光照强度为 50 lx,湿度为 40%,温度为 10 ~ 40 ℃;②光照强度为 50 lx,温度为 8 ℃,湿度为 15% ~ 95%;③湿度为 40%,温度为 8 ℃,光照强度为 1 ~ 350 lx。利用训练好的神经网络拟合模型,预测温度、湿度和光照强度对光伏发电系统瞬时功率的影响,结果如图 9 所示。

由图 9 可知,在光照强度为 50 lx、湿度为 40% 的条件下,光伏发电系统的瞬时功率随温度的上升而波动上升,且在 15 ℃ 时达到峰值,而后波动下降。在光照强度为 50 lx、温度为 8 ℃ 的条件下,湿度小于 60% 时,湿度对光伏发电系统的瞬时功率基本无影响;湿度大于 60% 时,发电瞬时功率随着湿度的增加而快速减小。在湿度为 40%、温度为 8 ℃ 的条件下,光伏发电系统的瞬时功率随着光照强度的增加而不断增大,且在 50 ~ 200 lx、250 ~ 300 lx 区间内趋于稳定,而在其余区间近似线性增加。

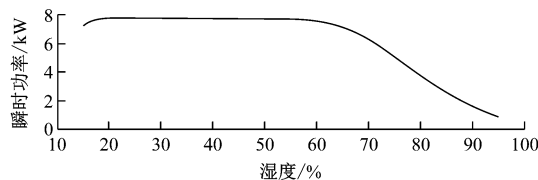
4 结语

本文介绍了轨道交通沿线光伏示范电站及智能监测系统的设计方案,并对位于国家铁道试验中心的装机容量为 216 kW 光伏示范电站的实际运行数据及其规律进行了分析。采用神经网络拟合模型对关键影响因素和发电量间的关系进行拟合,预测周边温度、湿度、光照强度对光伏发电系统瞬时功率的影响。通过数据分析可知:冬季时段,该光伏示范电站的发电瞬时功率随着温度的上升而波动上升,且在 15 ℃ 时达到峰值,而后波动下降。当湿度小于 60% 时,其对发电瞬时功率基本无影响;而当湿度大于 60% 时,发电瞬时功率随湿度的增加而快速减小。光照强度与光伏发电系统的瞬时功率呈正相关,且光照强度在 50 ~ 200 lx 与 250 ~ 300 lx 范围内趋于稳定,而在其他范围内近似线性增加。因此,光伏示范电站的选址应首要考虑光照强



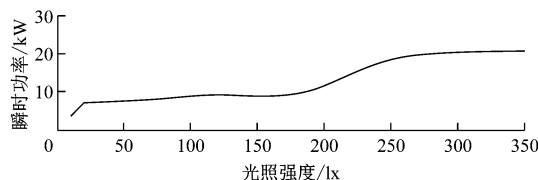
注:光照强度为 50 lx,湿度为 40%。

a) 瞬时功率-温度相关性曲线



注:光照强度为 50 lx,温度为 8 °C。

b) 瞬时功率-湿度相关性曲线



注:湿度为 40%,温度为 8 °C。

c) 瞬时功率-光照强度相关性曲线

图 9 光伏发电系统的瞬时功率-不同影响因素的相关性曲线

Fig. 9 Correlation curve of PV power generation system instantaneous power and different influencing factors

度,并尽量避免在高湿度及气候变化剧烈的地区建设。本文成果有助于研究光伏电站的选址方案,后续将利用该电站的相关运行数据,进一步开展轨道交通沿线光伏发电系统功率预测研究,有效提升光伏消纳率。

参考文献

- [1] 陈屹. 太阳能光伏发电系统在轨道交通中的应用研究[J]. 现代城市轨道交通, 2010(2): 59.
CHEN Yi. Application research on solar photovoltaic generation system in rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2010(2): 59.
- [2] 李子萧, 彭宁, 王向阳, 等. 基于无线组网的分布式光伏监控

系统设计及应用[J]. 自动化仪表, 2022, 43(1): 92.

LI Zixiao, PENG Ning, WANG Xiangyang, et al. Design and application of distributed photovoltaic monitoring system based on wireless networking [J]. Process Automation Instrumentation, 2022, 43(1): 92.

- [3] 吴宗臻, 王小锁, 张凌云, 等. 轨道交通光储直柔技术应用及展望[J]. 现代城市轨道交通, 2022(8): 19.
WU Zongzhen, WANG Xiaosuo, ZHANG Lingyun, et al. Progress of PDEF technology and its application prospect in rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2022(8): 19.
- [4] 徐栋, 赵正阳, 王文斌, 等. 双碳背景下城市轨道交通基础设施运维管理平台建设[J]. 现代城市轨道交通, 2022(8): 56.
XU Dong, ZHAO Zhengyang, WANG Wenbin, et al. Construction of urban rail transit infrastructure operation and maintenance management platform under the background of carbon peaking and carbon neutrality[J]. Modern Urban Transit, 2022(8): 56.
- [5] 王冰, 李洋, 王文斌, 等. 城市轨道交通智能运维技术发展及智能基础设施建设方法研究[J]. 现代城市轨道交通, 2020(8): 75.
WANG Bing, LI Yang, WANG Wenbin, et al. Research on development of urban rail transit intelligent operation and maintenance technology and intelligent infrastructure construction method [J]. Modern Urban Transit, 2020(8): 75.
- [6] 刘莉敏, 曹志峰, 许洪华. 50 kWp 并网光伏示范电站系统设计与运行数据分析[J]. 太阳能学报, 2006, 27(2): 146.
LIU Limin, CAO Zhifeng, XU Honghua. Design and analysis of 50 kWp grid-connected PV station[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2006, 27(2): 146.
- [7] 谢伟. 地铁供电智能运维系统实践解析[J]. 现代城市轨道交通, 2022(8): 84.
XIE Wei. Practical analysis of intelligent operation and maintenance system for metro power supply[J]. Modern Urban Transit, 2022(8): 84.
- [8] 司如意. 铁路运输企业光伏发电在线监测系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
SI Ruyi. Research on on-line monitoring system of photovoltaic power generation in railway transportation enterprises [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

(收稿日期:2023-05-15)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com