

# 基于平准化度电净现值模型的轨道交通光伏发电储能一体化项目的经济效益分析<sup>\*</sup>

张宇翔<sup>1</sup> 何海艳<sup>2</sup> 黄骏飞<sup>3</sup> 李浩锋<sup>2</sup>

(1. 铁科院(北京)工程咨询有限公司, 100081, 北京; 2. 成都大学建筑与土木工程学院, 610106, 成都;

3. 国铁建信资产管理有限公司, 100036, 北京 // 第一作者, 助理研究员)

**摘要** 目的: 为了降低轨道交通光伏发电储能一体化项目投资规模, 需要构建合理的理论模型对轨道交通光伏发电储能一体化项目的经济效益进行深入研究。方法: 基于投资和运营成本、财务成本、税务成本及效益等参数, 建立了轨道交通光伏发电储能一体化项目模型。以 LCOE (平准化度电成本) 模型为基础, 建立 LNPVE (平准化度电净现值) 模型用于分析轨道交通光伏发电储能一体化项目的经济效益。选取某轨道交通光伏发电储能一体化项目为研究对象, 计算折现率分别为 3%、6% 和 8%, 以及自用消纳比例分别为 30%、40% 和 50% 下的平准化度电成本和平准化度电净现值。从经济因素、财务因素、政策因素等方面对轨道交通光伏发电储能一体化项目的经济效益进行了敏感性分析。结果及结论: LNPVE 模型表明, 轨道交通光伏发电储能一体化项目在现有基础参数下能够实现经济效益; 敏感性分析结果表明, 影响项目经济效益的因素按重要性程度划分依次是经济因素、政策因素和财务因素, 经济因素中最重要的是消纳电价和自用消纳比例, 政策因素中最重要的是增值税进项税抵扣优惠, 财务因素中最重要的是资本金比率。

**关键词** 轨道交通; 光伏发电储能一体化项目; 经济效益; 平准化度电净现值模型

**中图分类号** F530.7

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.10.018

## Economic Benefit Analysis of Rail Transit Photovoltaic Power Generation and Energy Storage Integration Project Based on Levelized Net Present Value Model

ZHANG Yuxiang, HE Haiyan, HUANG Junfei, LI Haofeng

**Abstract** Objective: In order to reduce the investment scale of URT (urban rail transit) photovoltaic power generation and energy storage integration projects, it is necessary to construct a reasonable theoretical model to thoroughly investigate the e-

conomic benefits of such projects. Method: A model for such projects is established based on parameters including investment and operating costs, financial costs, tax costs, and benefits. Using the LCOE (levelized cost of electricity) model as a foundation, a LNPVE (levelized net present value of electricity) model is developed to analyze the economic benefits of URT photovoltaic power generation and energy storage integration projects. Taking a specific project of this type as the research object, LCOE and LNPVE are calculated for discount rates of 3%, 6%, and 8%, and self-consumption rates of 30%, 40%, and 50%. Sensitivity analysis is conducted on the economic, financial, and policy factors affecting the economic benefits of the project. Sensitivity analysis is carried out on the economic benefits of the mentioned project from aspects such as economic, financial, and policy factors. Result & Conclusion: The LNPVE model indicates that the mentioned project can achieve economic benefits under the existing parameters. Results of the sensitivity analysis reveal that the factors influencing project economic benefits are ranked by descending importance as economic, policy, and financial factors. Among economic factors, the most significant are the electricity purchase price and self-consumption rate. For policy factors, the most important is the value-added tax input tax deduction incentive. Among financial factors, the most crucial is the capital-to-equity ratio.

**Key words** rail transit; photovoltaic power generation and energy storage integration project; economic benefit; LNPVE

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

## 0 引言

为贯彻落实中国共产党第二十次全国代表大

<sup>\*</sup> 铁科院(北京)工程咨询有限公司基金项目(2022ZXJ007);四川省软科学研究计划资助项目(2023JDR0180)

会报告中“推动能源清洁低碳利用,推进工业、建筑、交通等领域清洁低碳转型”的要求,各地响应国家双碳发展战略部署,积极利用余地、余热、余压资源,推动热电联动、分布式能源及轨道交通光伏发电储能一体化项目的建设。我国太阳能资源相对丰富,轨道交通基础设施和沿线空间具有充足的空间资源,能够实现光伏发电储能一体化系统的建设。

文献[1]介绍了目前国内城市轨道交通光伏发电系统的应用现状,对光伏并网方案及拓扑结构进行了分析,指出了并网后面临的技术难题。文献[2]表明采用光伏发电技术后,蓄电池组将太阳能电池发出的电能进行存储,并将其随时与列车充电机进行电耦合共同为列车供电。文献[3]通过调研太阳能光伏发电系统在城市轨道交通中的应用,对其未来发展趋势进行了预测,认为城市轨道交通光伏发电系统亟需拓展新的应用场景。文献[4]对高架车站与光伏发电系统的结合类型,高架区间光伏发电系统中的“光污染”治理、高架区间光伏发电系统集成及车辆基地光伏发电系统的安装方式等关键技术进行了分析。文献[5]认为光伏发电系统接入城市轨道交通供电系统具有交流并网和直流并网2种模式,交流并网模式具有控制策略简单、成熟的优点,直流并网模式通过控制策略优化补偿牵引网电压减少的接触网损耗,具有提高城市轨道交通牵引供电质量和节能的双重作用。文献[6]认为光伏发电系统选址的光资源分布情况、可供开发利用的闲置土地资源、牵引负荷功率、行车密度及地方政府支持力度等因素与光伏出力、系统装机容量及电量消纳率等密切相关,而这些量又会直接影响到系统效益。文献[7]从高架车站光伏建筑一体化,光伏发电系统的并网方案、监控方案、附属设施等方面介绍了分布式光伏发电系统及其应用情况。文献[8]对光伏发电项目的经济风险进行了科学和细致的分析与评价。

综上所述,上述文献从不同角度对光伏发电系统在轨道交通领域的应用进行了分析和探讨,但目前鲜有对轨道交通光伏发电储能一体化项目经济效益的深入研究,且尚无对影响该项目经济效益的因素以及这些因素影响程度的系统研究。本文以LCOE(平准化度电成本)模型为基础,建立LNPVE(平准化度电净现值)模型,用于分析轨道交通光伏发电储能一体化项目的经济可持续性。

## 1 轨道交通光伏发电储能一体化项目经济效益模型

### 1.1 模型参数

在文献[9-10]的研究基础上,本文将基于LCOE的轨道交通光伏发电储能一体化项目经济效益模型的主要参数归纳为以下四部分:

1) 投资和运营成本参数。主要是指项目初期的静态投资和运营期的经营成本等。

2) 财务成本参数。主要是指因项目融资而偿还的债务资金的利息支出。

3) 税务成本参数。主要是指项目运营期内的税金支出,包括增值税、营业税金及附加、企业所得税。

4) 效益参数。项目的效益参数包括:①光伏发电收入和储能收入,光伏发电收入是指项目自发自用和余电上网带来的收入,储能收入是指通过储能系统进行电力负荷调峰的收入;②补贴收入,主要是指依据国家相关政策,在购买固定资产等过程中享受的税收优惠;③固定资产余值,项目达到设计运营年限后,由于终止项目运营产生的固定资产余值收入。

#### 1.1.1 投资和运营成本

轨道交通光伏发电储能一体化项目的建设投资为:

$$I = I_s + I_c + I_d \quad (1)$$

式中:

$I$ ——项目总的建设投资;

$I_s$ ——光伏发电设备投资;

$I_c$ ——储能设备投资;

$I_d$ ——充电设备投资。

轨道交通光伏发电储能一体化项目的总运营成本为:

$$C_t = C_{r,t} + C_{o\&m,t} \quad (2)$$

式中:

$C_t$ ——项目在第 $t$ 年总的运营成本;

$C_{r,t}$ ——项目在第 $t$ 年的场地租赁成本;

$C_{o\&m,t}$ ——项目在第 $t$ 年的运营成本。

#### 1.1.2 财务成本

光伏发电储能一体化项目的LCOE分析对象不同,是否将利息支出纳入LCOE存在差异。文献[9]未提及融资和利息等相关内容,但文献[10-11]在需要考虑融资影响时会根据情况加入融资和利

息相关的成本分析项。本文参考文献[10]将贷款利息纳入 LCOE 分析。

### 1.1.3 税务成本

轨道交通光伏发电储能一体化项目在第  $t$  年的税务成本  $T_t$  为:

$$T_t = T_{av,t} + T_{abb,t} + T_{inc,t} \quad (3)$$

式中:

$T_{av,t}$ ——第  $t$  年的增值税税金;

$T_{abb,t}$ ——第  $t$  年的营业税及附加;

$T_{inc,t}$ ——第  $t$  年的所得税。

轨道交通光伏发电储能一体化项目中各项税金为:

$$\begin{cases} T_{av,t} = P_t R_{av,t} / (1 + R_{av,t}) \\ T_{abb,t} = T_{av,t} R_{abb,t} \\ T_{inc,t} = (P_t - C_t - D_t - T_{abb,t}) R_{inc,t} \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$P_t$ ——项目第  $t$  年的收入;

$R_{av,t}$ ——项目第  $t$  年的增值税税率;

$R_{abb,t}$ ——项目第  $t$  年的营业税及附加税的税率;

$R_{inc,t}$ ——项目第  $t$  年的所得税税率;

$D_t$ ——项目在第  $t$  年偿还的贷款利息。

### 1.1.4 效益

轨道交通光伏发电储能一体化项目第  $t$  年的效益参数为:

$$P_t = P_{m,t} + P_{s,t} + P_{c,t} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} P_{m,t} = F_t J_{m,t} B_t \\ P_{s,t} = F_t J_{s,t} (1 - B_t) \\ P_{c,t} = 365 (F_{t,t} - F_{c,t}) \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$P_{m,t}$ ——项目第  $t$  年自产自用的电费收入(含税);

$P_{s,t}$ ——项目第  $t$  年余电上网的收入(含税);

$P_{c,t}$ ——项目第  $t$  年的储能服务收入;

$F_t$ ——项目第  $t$  年的发电量;

$J_{m,t}$ 、 $J_{s,t}$ ——项目第  $t$  年的综合电价和上网电价;

$B_t$ ——项目第  $t$  年的自用消纳比例;

$F_{f,t}$ 和  $F_{c,t}$ ——项目第  $t$  年的储能放电电价和储能电价。

## 1.2 基于 LNPVE 的轨道交通光伏发电储能一体化项目经济效益模型

### 1.2.1 LCOE 模型

LCOE 模型是国际上通用的用于评估不同区域、不同规模、不同投资额及不同发电技术的发电成本方法<sup>[10]</sup>。考虑了时间价值的度电成本,即净现值为零时的电价。当项目的电价为平准化度电成本  $C_{LCOE}$  时,投资者在项目寿命期内的经济收益为零。本文在文献[9-10]的基础上,构建轨道交通光伏发电储能一体化项目的 LCOE 模型。在项目全生命周期内,假设收入的现值总和与成本的现值总和相等,则:

$$\sum_{t=0}^{t_0} \frac{P_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^{t_0} \frac{I + C_t + D_t + T_t - V}{(1+r)^t} \quad (7)$$

式中:

$t_0$ ——项目生命周期;

$r$ ——折现率;

$V$ ——项目残值。

将项目收益表示为  $C_{LCOE}$  与发电量的乘积,则:

$$\sum_{t=0}^{t_0} \frac{C_{LCOE,t} E_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^{t_0} \frac{I + C_t + D_t + t_0 - V}{(1+r)^t} \quad (8)$$

式中:

$E_t$ ——第  $t$  年的发电量;

$C_{LCOE,t}$ ——第  $t$  年的平准化度电成本。

假设  $C_{LCOE,t}$  在全生命周期为一个常数  $C_{LCOE}$ ,则:

$$C_{LCOE} = \frac{\sum_{t=0}^{t_0} \frac{I + C_t + D_t + t_0 - V}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{t_0} \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (9)$$

### 1.2.2 LNPVE 模型

上述 LCOE 模型仅包含成本参数和发电量指标,参考文献[10],构建综合衡量收益参数、成本参数和发电量指标的 LNPVE 模型。

假设项目净现值不为 0,将收益表示为某一价格  $R_{LROE,t}$  与发电量的乘积,则:

$$\sum_{t=0}^{t_0} \frac{R_{LROE,t} E_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^{t_0} \frac{P_t}{(1+r)^t} \quad (10)$$

假设  $R_{LROE,t}$  在全生命周期内为一个常数  $R_{LROE}$ ,则:

$$R_{LROE} = \frac{\sum_{t=0}^{t_0} \frac{P_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{t_0} \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (11)$$

进一步定义平准化度电净现值  $V_{\text{LNPE}}$  为  $R_{\text{LROE}}$  与  $C_{\text{LCOE}}$  之差,则有:

$$V_{\text{LNPE}} = R_{\text{LOE}} - C_{\text{LOE}} =$$
$$\frac{\sum_{i=0}^{t_0} \frac{P_i}{(1+r)^i} - \sum_{i=0}^{t_0} \frac{I + C_i + D_i + t_0 - V_i}{(1+r)^i}}{\sum_{i=0}^{t_0} \frac{E_i}{(1+r)^i}} \quad (12)$$

1.2.3 敏感性分析

敏感性分析用于度量影响项目经济效益诸多因素的重要性程度和影响程度。参考文献[10, 12],本文引入敏感系数作为比较影响程度的指标,计算公式如下:

$$Y_i = (\Delta_{\text{LNPE}} / V_{\text{LNPE},0}) / (\Delta_{xi} / x_{0i}) \quad (13)$$

式中:

$Y_i$ ——影响因素  $i$  的敏感系数;

$\Delta_{\text{LNPE}}$ —— $V_{\text{LNPE}}$  的变化值;

$V_{\text{LNPE},0}$ —— $V_{\text{LNPE}}$  的初始值;

$\Delta_{xi}$ ——影响因素  $i$  的变化量;

$x_{0i}$ ——影响因素  $i$  的初始量。

2 案例分析

2.1 基本参数的选取

选取某轨道交通光伏发电储能一体化项目为研究对象,该项目在车辆基地采用“光伏发电系统 + 储能系统 + 机动车充电桩”的建设模式,同时采用“自发自用,余电上网”的合作模式。该项目的基本参数如表 1 所示。

2.2  $C_{\text{LCOE}}$  和  $V_{\text{LNPE}}$  的计算结果

计算  $r$  分别为 3%、6% 和 8% 以及自用消纳比例  $B$  分别为 30%、40% 和 50% 下的  $C_{\text{LCOE}}$  和  $V_{\text{LNPE}}$ ,结果如表 2 所示。

表 1 某轨道交通光伏发电储能一体化项目的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of a specific URT photovoltaic power generation and energy storage integration project		
指标	参数	取值或说明
初始投资成本	发电总投资/万元	2 239.4
	光伏发电系统单位投资/(元/W)	5
总的运营成本	场地租金/万元	8.114 6
	运营成本/万元	20.916 5
财务成本	资本金比例/%	30
	贷款期限/年	10
	贷款利率/%	4.5
	项目寿命期/年	25
	残值率/%	3
	所得税率/%	免征(第 1 年—第 3 年);12.5% (第 4 年—第 6 年);25%(其他)
税务成本	增值税率/%	13
	城市建设维护税率/%	5
	教育附加税率/%	3
	消纳电价/(元/(kWh))	0.844 8
项目收入	余电上网电价/(元/(kWh))	0.377 9
	储能电价/(元/(kWh))	0.277 9
	储能放电电价/(元/(kWh))	0.976 4
	年有效发电小时数/h	1 570.188 1
发电能力	光伏装机容量/kW	4 183.3
	$B$ /%	40
	储能衰减率/%	2

表 2 不同  $r$  和  $B$  下的  $C_{LCOE}$  和  $V_{LNPVE}$

Tab. 2  $C_{LCOE}$  and  $V_{LNPVE}$  under different values of  $r$  and  $B$

$r/\%$	不同 $B$ 下的 $C_{LCOE}$ 和 $V_{LNPVE}$					
	$B$ 为 30%		$B$ 为 40%		$B$ 为 50%	
	$C_{LCOE}$	$V_{LNPVE}$	$C_{LCOE}$	$V_{LNPVE}$	$C_{LCOE}$	$V_{LNPVE}$
3	0.461 3	0.090 1	0.474 5	0.123 7	0.487 6	0.157 2
6	0.559 0	-0.007 6	0.571 1	0.027 0	0.583 3	0.061 5
8	0.631 3	-0.079 9	0.642 7	-0.044 7	0.654 2	0.009 4

由表 2 可见:当  $r$  保持不变时,项目的  $C_{LCOE}$  与  $B$  正相关;当  $B$  保持不变时, $r$  越高,项目的  $C_{LCOE}$  越高。若  $r$  为 3%, $V_{LNPVE,1} > 0$ , $V_{LNPVE,2} > 0$ , $V_{LNPVE,3} > 0$ ,表明当  $r$  较低时,项目在较低的  $B$  下也能够实现较好的经济效益;若  $r$  为 6%, $V_{LNPVE,1} < 0$ , $V_{LNPVE,2} > 0$ , $V_{LNPVE,3} > 0$ ,项目可在  $B$  为 40% 和 50% 时实现较好的经济效益;若  $r$  为 8%, $V_{LNPVE,1} < 0$ , $V_{LNPVE,2} < 0$ , $V_{LNPVE,3} > 0$ ,项目在  $B$  达到 50% 时才能实现较好的经济效益。综合电价为消纳电价和余电上网电价的加权平均电价。当  $B$  为 30% 时,综合电价为 0.518 0;当  $B$  为 40% 时,综合电价为 0.564 7;当  $B$  为 50% 时,综合电价为 50%。当  $C_{LCOE} <$  综合电价时,项目的实际发电成本小于实际发电收益,可见项目具有经济可行性;当  $C_{LCOE} >$  综合电价时,项目的实际发电成本大于实际发电收益,即项目的  $V_{LNPVE} < 0$ ,可见项目在目前参数下不具有经济可行性。

2.3 敏感性分析

2.3.1 经济因素

轨道交通光伏发电储能一体化项目的经济因素包括消纳电价、自用消纳比例、储能放电电价和储能电价。 $r$  为 6% 时,上述经济因素的敏感系数如图 1 所示。

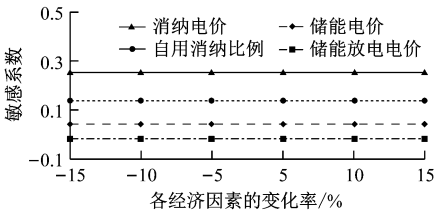


图 1  $r$  为 6% 下各经济因素的敏感系数

Fig. 1 Sensitivity coefficient of each economic factor with  $r$  as 6%

由图 1 可见:该轨道交通光伏发电储能一体化项目的经济因素按影响程度排序依次为消纳电价、自用消纳比例、储能放电电价和储能电价。这表明该项目的收益主要来源于自发自用的电费收入,管

理者可通过争取更高的消纳电价和自用电量比例进一步提高项目的经济效益。

2.3.2 财务因素

轨道交通光伏发电储能一体化项目的财务因素包括资本金比例和债务融资成本。不同  $r$  下各财务因素的敏感系数如图 2 所示。由图 2 可知:资本金比例的敏感系数为正,表明提高债务资金的使用比例有助于提高项目的  $V_{LNPVE}$  值;债务融资成本的敏感系数为负,表明债务融资成本越高,项目的  $V_{LNPVE}$  值越低;随着  $r$  的提高,财务因素的敏感系数也越高,表明  $r$  越高,财务因素对项目的  $V_{LNPVE}$  值的影响也越大。

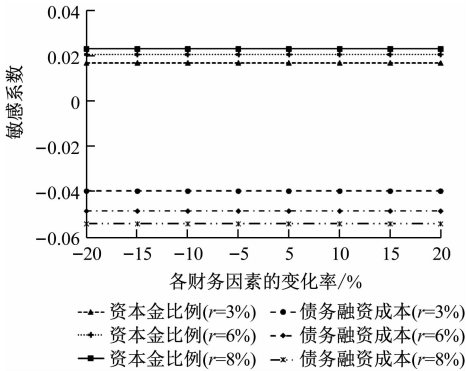


图 2 不同  $r$  下各财务因素的敏感系数

Fig. 2 Sensitivity coefficient of each financial factors with  $r$  of different values

2.3.3 政策因素

目前,国内对光伏项目的税收优惠包括增值税进项税抵扣和所得税“三免三减半”。其中:增值税进项抵扣是指项目建设初期投入的建设资金形成的固定资产有大量的进项税可以抵扣,该部分税金根据项目收益在未来若干年抵扣;所得税“三免三减半”是指自项目产生第一笔经营收入所属年度起,第 1 年至第 3 年免征所得税,第 4 年至第 6 年减半按 12.5% 征收所得税,此后按 25% 征收所得税。

案例项目总投资为 2 239.40 万元,按残值率

5% 计算,可抵扣的进项税合计 276.57 万元。不同  $r$  和  $B$  下的  $V_{LNPVE}$  见表 3。假设不享受增值税进项税抵扣,项目的  $C_{LCOE}$  为 0.612 2,较享受进项税抵扣时增加 0.014 1;项目的  $V_{LNPVE}$  为 -0.014 1,较享受进项税抵扣时降低 0.038 3。这表明案例项目对增值税进项税抵扣的依赖程度较高,当失去该税收优惠时,项目将失去经济可行性。假设不享受所得税“三免三减半”税收优惠时,项目的  $C_{LCOE}$  为 0.582 0,较不享受所得税优惠时降低 0.008 1;项目的  $V_{LNPVE}$

为 0.016 1,较不享受所得税优惠时降低 0.008 1。这表明所得税优惠有助于提高案例项目的经济效益,但项目在不依赖所得税优惠的情况下也具有较好的经济性。案例项目既不享受增值税减免也不享受所得税优惠时,项目的  $C_{LCOE}$  为 0.619 9,  $V_{LNPVE}$  为 -0.021 8。这表明在增值税进项税抵扣和所得税“三免三减半”两项税收优惠中,案例项目对增值税进项税抵扣的依赖程度更高。

表 3 不同  $r$  和  $B$  下的  $V_{LNPVE}$   
Tab.3  $V_{LNPVE}$  under different values of  $r$  and  $B$

项目	$C_{LCOE,0}$	$C_{LCOE,1}$	$\Delta_{LCOE}$	$V_{LNPVE,0}$	$V_{LNPVE,1}$	$\Delta_{LNPVE}$
增值税减免	0.573 9	0.612 2	0.038 3	0.024 2	-0.014 1	-0.038 3
所得税减免	0.573 9	0.582 0	0.008 1	0.024 2	0.016 1	-0.008 1
无税收优惠	0.573 9	0.619 9	0.046 0	0.024 2	-0.021 8	-0.046 0

3 结语

轨道交通光伏发电储能一体化项目作为轨道交通和光伏发电储能多元化项目,光伏发电系统和储能设备投入的资金规模较大,需构建合理的理论模型评价项目的经济性,探讨影响项目经济性的因素及其重要程度。本文以轨道交通光伏发电储能一体化项目为研究对象,基于 LCOE 模型,从投资和运营成本、财务成本、税务成本及收入等参数出发,建立 LNPVE 模型用于分析轨道交通光伏发电储能一体化项目的经济可持续性,并以某实践项目进行案例研究。案例分析表明,从 LNPVE 模型结果来看,项目在现有基础参数下能够实现经济效益;从敏感性分析结果来看,影响项目经济效益的因素按重要性程度划分依次是经济因素、政策因素和财务因素。其中,经济因素中最重要的是消纳电价和自用消纳比例,政策因素中最重要的是增值税进项税抵扣优惠,财务因素中最重要的是资本金比率。

参考文献

[1] 陈霞,韩春白雪,张晔,等.城市轨道交通光伏发电系统的应用现状及发展趋势[J].城市轨道交通研究,2021,24(6):166.  
CHEN Xia, HAN Chunbaixue, ZHANG Ye, et al. Application status and development trend of photovoltaic power generation system in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(6): 166.  
[2] 侯霄,卢衍伟,朱丽媛,等.光伏发电技术在轨道交通客车

中的应用[J].城市轨道交通研究,2017,20(6):138.  
HOU Xiao, LU Yanwei, ZHU Liyuan, et al. Application of photovoltaic power generation in rail transit vehicle[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(6): 138.  
[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(8):38.  
LIU Hao, LI Kefei. Study on the application of solar photovoltaic generation system in urban rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2022(8): 38.  
[4] 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.  
[5] 倪卫标,沈小军,赵时旻,等.光伏发电系统接入城市轨道交通供电系统模式研究[J].城市轨道交通研究,2014,17(11):78.  
NI Weibiao, SHEN Xiaojun, ZHAO Shimin, et al. Grid modes of PV generation system in urban rail transit power supply[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(11): 78.  
[6] 邓文丽,戴朝华,陈维荣.轨道交通能源互联网背景下光伏在交/直流牵引供电系统中的应用及关键问题分析[J].中国电机工程学报,2019,39(19):5692.  
DENG Wenli, DAI Chaohua, CHEN Weirong. Application of PV generation in AC/DC traction power supply system and the key problem analysis under the background of rail transit energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5692.  
[7] 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.

(下转第 115 页)

成都:西南交通大学,2015.

ZHANG Nian. Research on the key methods for railway track irregularity prediction [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

- [9] 韩子杰. 石太线轨道几何不平顺变化特征和维修作业辅助决策研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2022.

HAN Zijie. Research on the variation characteristics of track geometric irregularity and auxiliary decision-making of maintenance operations on Shitai Line [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2022.

- [10] 许玉德, 吴宣庆, 刘思磊, 等. 捣固与打磨复合作业下有砟轨道几何不平顺预测模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 99.

XU Yude, WU Xuanqing, LIU Silei, et al. Geometric irregularity prediction model of ballasted track considering tamping and grinding[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(1): 99.

- [11] 詹璐, 刘仍奎, 王福田, 等. 地铁轨道几何不平顺指标预测方法研究[J]. 铁道建筑, 2020, 60(7): 128.

ZHAN Lu, LIU Rengkui, WANG Futian, et al. Study on prediction method of subway track geometry irregularity index[J]. Railway Engineering, 2020, 60(7): 128.

- [12] 王志鹏, 刘仍奎, 邱荣华, 等. 基于机器学习的地铁轨道几何劣化规律个性化建模研究[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(4): 54.

WANG Zhipeng, LIU Rengkui, QIU Ronghua, et al. Individualized modeling of subway track geometry degradation law based on machine learning[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(4): 54.

- [13] 彭丽宇, 张进川, 苟娟琼, 等. 基于BP神经网络的铁路轨道几何不平顺预测方法[J]. 铁道学报, 2018, 40(9): 154.

PENG Liyu, ZHANG Jinchuan, GOU Juanqiong, et al. Prediction method of railway track geometric irregularity based on BP neural network[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(9): 154.

- [14] 赵正阳, 吴艳华, 程智博, 等. 基于3D卷积神经网络的高铁轨道质量指数预测方法[J]. 铁路计算机应用, 2020, 29(12): 7.

ZHAO Zhengyang, WU Yanhua, CHENG Zhibo, et al. High-speed railway track quality index prediction method based on 3D convolution neural network[J]. Railway Computer Application, 2020, 29(12): 7.

(收稿日期:2023-05-06)

(上接第 108 页)

- [8] 王荟廷. 分布式光伏发电项目风险的研究[J]. 科技视界, 2014(6): 137.

WANG Huiting. Study on risk of distributed photovoltaic power generation project [J]. Science & Technology Vision, 2014(6): 137.

- [9] 洪凌, 孙志久, 寿春晖, 等. 基于财务评价体系的光伏项目含税 LCOE 分析[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 203.

HONG Ling, SUN Zhijiu, SHOU Chunhui, et al. Analysis of taxed-LCOE for photovoltaic project based on financial evaluation system[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2022, 43(2): 203.

- [10] 昌敦虎, 田川, 张泽阳, 等. 基于 LCOE 模型的光伏发电经济效益分析: 以宜昌农村地区光伏扶贫电站项目为例[J]. 环境科学研究, 2020, 33(10): 2412.

CHANG Dunhu, TIAN Chuan, ZHANG Zeyang, et al. Economic benefit analysis on photovoltaic power generation with LCOE mod-

el: the case of poverty alleviation project in rural areas of Yichang City [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(10): 2412.

- [11] 潘彬彬, 陈祉好, 贾楠菲, 等. 关于光伏发电成本核算问题的研究: 基于 LCOE 方法的分析[J]. 价格理论与实践, 2019(5): 138.

PAN Binbin, CHEN Zhihao, JIA Nanfei, et al. Research on cost accounting of photovoltaic power generation—analysis based on LCOE method[J]. Price: Theory & Practice, 2019(5): 138.

- [12] 孙建梅, 陈璐. 基于 LCOE 的分布式光伏发电并网效益分析[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 88.

SUN Jianmei, CHEN Lu. Analysis on grid-connected benefit of distributed photovoltaic power generation based on LCOE model [J]. Electric Power, 2018, 51(3): 88.

(收稿日期:2023-05-06)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821