

引用格式: 黄镜欢. 高速公路交能融合项目开发的影响因素分析及建议 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(增刊 1): 1-6. HUANG J.H. Analysis of influencing factors and suggestions for the development of highway transportation and energy integration projects [J]. Southern energy construction, 2024, 11(Suppl. 1): 1-6. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.S1.01.

# 高速公路交能融合项目开发的影响因素分析及建议

黄镜欢<sup>✉</sup>

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** [目的]在国家“双碳战略”的背景下, 交能融合发展是交通领域低碳转型的必由路径。为推进高速公路与能源融合项目的开发建设, 提出高速公路交能融合项目开发的主要影响因素及建议。[方法]首先, 分析高速公路的用地特点、场地特性, 结合光伏发电项目开发建设的特点, 分析高速公路交能融合项目开发所需关注的重点; 其次, 对高速公路交能融合开发建设场所的建设条件进行分析; 最后, 对交能融合项目开发过程中遇到的与常规光伏项目不同的特有问题进行了全面的梳理、分析, 总结高速公路交能融合光伏开发影响经济性的主要因素。[结果]提出高速公路交能融合项目开发所需关注的重点, 就交能融合项目开发建设提出相关的技术建议, 提出公路边坡光伏开发经济性的主要影响因素和建议。[结论]研究结果为高速公路交能融合项目可行性研究和工程设计应关注的重点和方向可提供一定的指引, 为项目的开发建设可提供参考借鉴, 能推进高速公路交能融合发展。

**关键词:** 交能融合; 公路边坡光伏; 光伏发电; 项目开发要点; 投资控制

中图分类号: TK519; U417

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)S1-0001-06

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.S1.01

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

## Analysis of Influencing Factors and Suggestions for the Development of Highway Transportation and Energy Integration Projects

HUANG Jinghuan<sup>✉</sup>

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] In the context of the "dual carbon strategy" in China, the integrated development of transportation and energy is an essential path for low carbon transformation in the transportation sector. To promote the development and construction of highway and energy integration projects, the main influencing factors and suggestions for the development of highway transportation and energy integration projects are proposed. [Method] First, this paper analyzed the key points that should be concerned in the development of highway transportation and energy integration projects by comprehensively analyzing the characteristics of the highway energy consumption and sites, and the characteristics of development and construction of photovoltaic power generation projects. Second, this paper analyzed the construction conditions of the development and construction sites for highway transportation and energy integration projects. Finally, a comprehensive review and analysis were conducted on the unique issues encountered in the development and construction process of highway transportation and energy integration projects, which were different from conventional PV projects, and the main factors affecting the economy of highway transportation and energy integration photovoltaic development were analyzed. [Result] This paper proposes the key points for the development of highway transportation and energy integration projects, proposes relevant technical suggestions on the development and construction of transportation and energy integration projects, and points out the main influencing factors and suggestions on the economic efficiency of highway slope photovoltaic development. [Conclusion] The research results provide certain guidance for the focus and direction of feasibility study and engineering design for highway transportation and energy integration projects, and provide reference for the development and construction of transportation and energy

收稿日期: 2023-08-12 修回日期: 2023-09-13

基金项目: 中国能建广东院科技项目“综合交通与能源融合关键技术研究”与工程示范”(ER10791W)

integration projects, and promote the development of highway transportation and energy integration.

**Key words:** transportation and energy integration; photovoltaics on highway slope; photovoltaics; key points of project development; investment control

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

2020年9月,习近平主席在第七十五届联合国大会上提出中国“3060”双碳目标。2021年10月,国务院发布《2030年前碳达峰行动方案》明确“将绿色低碳理念贯穿于交通基础设施规划、建设、运营和维护全过程,降低全生命周期能耗和碳排放”。提出“开展交通基础设施绿色化提升改造,统筹利用综合运输通道线位、土地、空域等资源”等系列要求,计划到2030年,风电、太阳能发电总装机容量达到1.2 TW以上。《绿色交通“十四五”发展规划》《“十四五”可再生能源发展规划》《“十四五”现代能源体系规划》等规划也提出了推进公路沿线、服务区等合理布局光伏发电设施,推动光伏发电多场景融合开发,构建绿色低碳交通运输系统等系列要求。

根据国家能源与交通行业的发展战略规划,加快交通用能绿色替代是能源与交通领域的共同任务。能源领域需要构建以新能源为主体的新型电力系统,加快新能源开发利用,加大交通等领域绿色电能替代;交通领域需要加快形成绿色低碳运输方式,推进交通领域低碳转型,推进新能源、清洁能源应用。道路运输是交通运输大气污染和碳排放的重要来源,其二氧化碳和氮氧化物排放分别占全行业排放总量的80%和60%左右<sup>[1]</sup>。在“双碳战略”的背景下,高速公路交能融合项目的建设是非常必要和紧迫的。

近年来,我国不断探索推进交通基础设施与新能源设施统筹布局规划建设,将共建共享理念融入交能基础设施。目前,我国交能融合处于起步探索阶段,“融合”存在一系列亟待解决的技术和非技术问题,包括融合路径不明确、技术标准不完善、盈利模式不清晰、政策机制不完善等方面的问题<sup>[2-4]</sup>。部分研究<sup>[5-8]</sup>从交能融合的产业背景、发展应用现状、系统规划等方面的宏观研究,提出交能融合的宏观发展策略、存在问题与发展思路。部分研究从高速公路的能源应用技术<sup>[9-10]</sup>、光伏应用情况<sup>[11-13]</sup>、建设

路径<sup>[11, 14-15]</sup>、融合方案<sup>[16-17]</sup>、应用案例<sup>[12, 18-19]</sup>等方面进行探讨,其中相当部分研究对象集中在高速公路服务区<sup>[15, 17, 20]</sup>。总体来说,国内交能融合研究较少,大多聚焦于交能融合系统的规划研究、建设路径探讨、应用技术案例、融合存在问题等。但缺少从交能融合项目实施开发建设关注的要点,针对高速公路(特别是边坡)的特殊应用场景开发光伏项目的全面分析、研究。

本文章通过分析高速公路的用能特点、场地特性,结合光伏发电项目开发建设的特点,提出交能融合项目开发关注要点;对高速公路交能融合开发建设场所的建设条件进行了分析,并提出选择建议;全面分析交能融合在高速公路建设中的问题,创新性提出交能融合在高速公路的投资决策影响因素和对策建议,为高速公路交能融合的开发建设提供参考借鉴。

## 1 高速公路的用能特点

根据国际能源署统计,全球碳排放前三名分别是电力行业、工业和交通运输业。我国交通运输业的体量巨大,能源消耗总量和电能消耗数量庞大并呈现较快增长趋势。公路是实现客运和货运的重要动脉,燃料以汽油、柴油为主,能源消耗总量大、碳排放量大。

高速公路的用电主要有公路沿线的基础设施、服务区、隧道、收费站等场所的用电,用电负荷主要包括照明、通信、监控、通风空调、服务区生活用电和汽车充电负荷等。

照明、通信、监控、服务区生活用电负荷较稳定,波动性较小;通风空调用电负荷存在季节性,存在一定的波动性;电动汽车的充电负荷与交通出行车辆情况密切相关,新能源车流量、节假日对充电需求影响较大,充电负荷具有一定的随机性,波动性较大。公路交通用能主要受出行行为影响,具有明显的时间特征,节假日用能需求较大,平日用能需求较小;

白天用电负荷较大,夜间负荷较小<sup>[16]</sup>。

随着社会经济的快速发展,人们生活水平的不断提高,人们对出行服务的需求也越来越高,公路交通量的迅猛增长,新能源车辆的比例逐步提高,公路及服务区的用电需求将快速增长,大规模的充电负荷需求将加大高速公路供电系统的压力。预计到2025年,全国城市公交、出租汽车、城市物流配送领域新能源汽车占比将分别达到72%、35%和20%。到2030年,当年新增的新能源、清洁能源动力交通工具比例将达到40%左右<sup>[2]</sup>。

综上,高速公路交能融合项目的开发建设需充分考虑公路沿线场所和设施用电特点,包括用电新能源汽车的用能需求,实现公路沿线资源充分利用,绿色能源就近供给,缓解电网压力。

## 2 交能融合项目开发关注要点

交能融合是指交通行业与能源行业的融合发展。其主要目标是推动新能源产业在交通领域发展,推动公路用能低碳化,助力碳达峰、碳中和。高速公路交能融合充分考虑光伏工程技术与涉路工程要求,推动“光伏+交通”模式的发展,提高高速公路沿线资源利用率,有助于绿色交通转型。

高速公路交能融合项目应综合考虑道路走向、资源条件、边坡坡度、附属工程(如声屏障)设施、高压线、变电站情况,以及光伏建设成本、发电效率及对公路运营安全影响等。项目规划选址、太阳能资源、建设规模、建设条件、电力送出条件、电力消纳分析、经济效益等是项目建设可行性的关键所在,在开发阶段需要重点关注。

## 3 高速公路交能融合开发建设条件分析及建议

高速公路交能融合开发方向主要利用公路红线范围内的可利用地,开发沿线风光等新能源资源,建设风光储充等设施,构建“源+网+荷+储”一体化系统,为公路沿线基础设施和运输车辆提供绿色清洁能源。

### 3.1 土地性质

项目建设范围的土地属性应符合国家土地利用相关法律法规要求,不涉及基本农田或基本林地等不可用地类,无压覆矿产,不涉及军事文物保护区、

水源地等环境敏感地,严守生态保护红线。高速公路交能融合项目是以高速公路为载体建设能源设施,主要利用高速公路范围的土地,是公路建设用地范围内的一地多用,因此,用地的性质是符合国家规范和政策的要求,一般不存在合规性风险。

### 3.2 场地资源

高速公路拥有大量的服务区(停车区)、收费站、互通区域、路基边坡等可利用的土地资源,产权归属高速公司,但实际发挥的效能很小,多数处于闲置状态,可用于开发建设必要的发电设施<sup>[12]</sup>。从土地资源看,高速公路的沿途路基边坡、互通匝道、服务区空地、停车区、建筑屋面及收费站屋面等具备开发新能源的用地条件。

### 3.3 资源条件

地理位置(经纬度)、太阳能资源条件(日照强度、时长等)、周边情况(遮挡)、气候条件等是影响项目发电量的重要因素,直接关系到光伏发电项目的效益和投资可行性。对于高速公路边坡光伏的开发,宜选取东西走向的高速公路向阳侧边坡,边坡内外构筑物 and 树木较少,对光伏组件无阴影遮挡的路段。

### 3.4 建设条件

根据公路沿线的地形地貌特征、水文特征、地质条件等,充分考虑施工和运营安全性、施工难度及工程造价,选取光伏建设路段。用地范围的建设条件对光伏发电项目的建设规模、项目投资有较大的影响,宜选用边坡地质条件好,坡面面积大,护栏等级高、桥梁河流跨越少的路段。

### 3.5 规划扩建情况

公路范围及周边的改扩建规划对项目的建设范围和项目的可行性有直接的影响,建议与公路主管部门进一步确认公路改扩建规划需求,确保建设场址在建设运营期间无改扩建规划,确保公路交能融合的建设范围不受改扩建工程影响,项目的投资收益才能得以保障。

## 4 高速公路交能融合光伏开发影响经济性的主要因素和建议

光伏发电项目的经济性与装机成本、发电收益、运营维护费用相关。高速公路交能融合光伏开发影响经济性的主要方面如下:



#### 4.1 清洁能源自利用率

内部收益率是建设项目常用的经济性判断指标,目前国内新能源项目基本都是平价上网,可以根据电价计算项目内部收益率 IRR<sup>[21]</sup>。高速公路交能融合项目发电一般采用自发自用、余电上网的模式,自用部分电量按照用电电价计算收益;余量上网部分按照所在地区脱硫煤标杆上网电价计算收益。自用电价和上网电价差异较大,自用电量占比越多,上网电量占比越少,项目经济收益越高。因此,结合交通用能特性,充分挖掘高速公路领域规模化应用场景,提高公路交通电气化水平,开发路衍经济产业,提高公路清洁能源自用电比例,有利于提高交能融合项目的经济收益。服务区、隧道等作为当前公路的集中用能和能耗较高的场景,建议作为优先开发的重点场所。

#### 4.2 接入系统方案

集中式光伏电站是利用大范围的土地集中建立的大型光伏电站,所发电力直接并入较高电压等级(通常 110 kV 或更高)的电网,电网通过接入高压输电系统供给远距离用户用电。分布式光伏电站是指装机规模较小、布置在用户附近的小型光伏发电系统,一般接入 10 kV 或者更低电压等级的电网。

光伏发电的合理接入对电网侧和用户侧均可带来可观的经济效益<sup>[22]</sup>。光伏电站电网接入系统应根据光伏电站总装机容量、当地电网的实际情况、电网规划情况和经济性等技术要求选择合适的接入电压等级和接入方案。输电线路的电压等级根据电力系统的电源容量、输电距离、经济性和环境问题等因素决定。电源容量越大,传输距离越远,线路损耗越大。一般来说,电力输送容量越大,输电距离越长,为了减小线路损失,输电的电压等级也就越高。随着电压等级的提高,输电线路工程的造价也会增加,因此必须结合经济因素合理选择电压等级。

项目前期开发应根据高速公路长线型的特点,充分调查公路沿线周边电网的接入条件及要求,按就近接入的原则将公路边坡光伏发电并网,降低线路工程造价及电力输送损失,以实现电力资源的最大化利用,提高工程经济性。

#### 4.3 技术安全评价

高速公路边坡光伏属于在公路用地范围内并行于公路的建设工程,属于涉路工程。按照涉路工程

建设流程和有关规定,边坡光伏发电工程设计方案应进行涉路工程安全技术评价,开展涉路工程对公路安全影响专题研究。

高速公路路侧设置光伏板可能对行驶车辆产生安全影响、车辆冲出护栏后撞击光伏板造成的二次伤害、光伏板布设施工及后期存在及养护对路基边坡的稳定性造成的不利影响等问题。因此,高速公路边坡光伏建设项目应从高速公路行车安全、发生事故二次伤害以及边坡稳定性影响方面研究评估高速公路边坡光伏板布设对交通安全的影响。

根据涉路工程安全研究专题和技术评价要求,在高速公路边坡加装光伏系统提升了公路交通安全事故严重程度,需按照 JTG D81 的规定,结合事故严重程度、公路技术等级及设计速度等,相应提升护栏防护等级。同时,技术安全评价研究对边坡光伏设备的布置、二次伤害防护措施、边坡的开挖、水土保持、基础型式的设计等都提出了一定的要求。其中,提升护栏防护等级的费用较高,对项目投资的影响最大。因此,项目开发前期应充分估算各路段需要进行护栏防护等级提升的投资,结合边坡建设的光伏容量规模和投资,综合评估整体经济性,选取经济可行的路段建设光伏发电。建议公路护栏等级从高到低选取开发路段,优先选用 SA 及以上等级路段。

#### 4.4 环境影响评价

环境影响评价对项目实施后可能造成的环境影响进行分析、预测和评估,提出预防或者减轻不良环境影响的对策和措施。

根据公路光伏发电的建设情况及光伏组件反光率等特征,计算光伏组件反射光的方位角、入射角及强度,评估光伏建设可能造成影响的程度和范围。结合敏感点实际情况,提出具体的预防措施,提出污染防治措施和生态恢复措施。为管理部门决策、设计部门优化设计和建设单位的环境管理提供科学依据。

根据《建筑环境通用规范》(GB 55016—2021),敏感目标应包括博物馆、展览馆的展览室及对光线有要求的实验室、陈列室等、住宅、学校、养老院、医院。结合当地房屋建筑特征,计算反射光到达敏感点的位置和高度,分析对现有敏感点的影响。对于反射光影响,建议优先采用避让的方法,在光伏布置设计时避让敏感点;其次,改变反射光的角度,以

减少或避免光影响。

#### 4.5 公路边坡光伏系统设计优化及造价控制

公路边坡光伏发电项目利用公路边坡建设光伏发电系统,项目可利用的面积十分有限,地块成带状长条形布置,道路安全影响因素较多。因此,如何克服所有不利条件,确保电站安全稳定运行的前提下,降低工程建设成本,提高系统效率,提高发电量,增加经济效益,是确保项目投资可行的重点。

公路边坡光伏系统设计优化应根据项目所在地的建设条件,因地制宜,充分考虑带状长条形地块布置光伏的特点,对逆变器选型、电缆选型、线缆压降、箱变选型和设备布置进行综合分析比选,设备选型和布置设计结合系统效率、设备投资和发电量收益进行技术经济比选,选择配置最佳的光伏发电系统,控制工程造价,最终实现项目投资收益目标。

对新建公路,建议把光伏发电系统作为公路机电建设的一部分,将交通设施与能源设施统筹规划设计,将高速公路与配套新能源工程充分融合,实现一体化设计,分期实施,减少不必要的投资。对于既有高速公路开发建设光伏发电的项目,应充分考虑光伏设备基础对公路边坡安全的影响,从边坡稳定性、适用性、经济性、安全性等角度综合比选适合高速公路边坡的光伏组件、支架及基础型式,确保光伏系统和公路边坡的安全稳定。

#### 4.6 公路边坡光伏系统运维成本控制

高速公路边坡光伏呈长线型布置,覆盖范围距离较长,不便于运维管理,光伏系统故障运维、组件清洁、杂草修剪等运维工作较常规集中式地面光伏电站要投入更多的人力、物力和费用。因此,建议采用集中管控、智能诊断、在线监控、无人机巡检、组件自清洁技术等高效便利的运维技术和智能智慧管控措施,以减少运营阶段的运维成本,提高项目整体效益。

## 5 结论

高速公路交能融合项目的关键点是如何实现高速公路与新能源设施的融合。本文通过分析高速公路的用能特点、场地特性,结合光伏发电项目开发建设的特點,提出交能融合项目开发关注要点;对高速公路交能融合开发建设场所的建设条件进行分析,并提出了交能融合项目开发建设相关的技术建议;

全面分析交能融合在高速公路开发建设中的问题,创新性提出高速公路交能融合光伏开发影响经济性的主要因素和建议,包括自用率、接入系统方案、技术安全评价、环境影响评价、设计优化和造价控制、以及运维成本控制等,为高速公路交能融合的开发建设提供参考借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 曾晓莹,邱荣祖,林丹婷,等.中国交通碳排放及影响因素时空异质性[J].*中国环境科学*,2020,40(10):4304-4313. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2020.10.013.  
ZENG X Y, QIU R Z, LIN D T, et al. Spatio-temporal heterogeneity of transportation carbon emissions and its influencing factors in China [J]. *China environmental science*, 2020, 40(10): 4304-4313. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2020.10.013.
- [2] 毛宁,于琦,刘杰,等.交能融合宏观策略与技术路径[J].*中国公路*,2022(22):28-31. DOI: 10.13468/j.cnki.chw.2022.22.005.  
MAO N, YU Q, LIU J, et al. Macro strategy and technical path of energy integration [J]. *China highway*, 2022(22): 28-31. DOI: 10.13468/j.cnki.chw.2022.22.005.
- [3] 姚沅,付豪,梁叶云,等.公路交通与能源融合实践模式探究[J].*交通节能与环保*,2023,19(2):100-105,113. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2023.02.018.  
YAO Y, FU H, LIANG Y Y, et al. Research on practical mode of integration of highway transportation and energy [J]. *Transport energy conservation & environmental protection*, 2023, 19(2): 100-105,113. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2023.02.018.
- [4] 高嘉蔚,孙芳,毛宁,等.公路交通与能源深度融合发展思路与展望[J].*交通节能与环保*,2022,18(2):1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2022.02.001.  
GAO J W, SUN F, MAO N, et al. Research on development ideas and prospects of deep integration of transportation and energy [J]. *Transport energy conservation & environmental protection*, 2022, 18(2): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2022.02.001.
- [5] 贾利民,程鹏,张蜚,等.“双碳”目标下轨道交通与能源融合发展路径和策略研究[J].*中国工程科学*,2022,24(3):173-183. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.03.018.  
JIA L M, CHENG P, ZHANG Z, et al. Integrated development of rail transit and energies in China: development paths and strategies [J]. *Strategic study of CAE*, 2022, 24(3): 173-183. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.03.018.
- [6] 杨鹏浩,陈诗璇,肖建伟.高速公路边坡太阳能研究现状及发展展望综述[J].*科技与创新*,2020(17):19-21,23. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2020.17.007.  
YANG P H, CHEN S X, XIAO J W. Overview of the current status and development prospects of solar energy research on expressway slopes [J]. *Science and technology & innovation*, 2020(17): 19-21,23. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2020.17.007.
- [7] 毛宁,李齐丽,刘杰,等.交通运输行业光伏发展现状及对策建议[J].*交通节能与环保*,2022,18(2):11-14. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2022.02.003.  
MAO N, LI Q L, LIU J, et al. Development status and countermeasures of photovoltaic in transportation industry [J]. *Transport energy conservation & environmental protection*, 2022, 18(2): 11-14. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2022.02.003.

- [8] 杨勇平, 武平, 程鹏, 等. 我国陆路交通能源系统发展战略研究 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(3): 153-162. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2022.03.016](https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2022.03.016).  
YANG Y P, WU P, CHENG P, et al. Development strategy for energy system of land transport in China [J]. *Strategic study of CAE*, 2022, 24(3): 153-162. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2022.03.016](https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2022.03.016).
- [9] 江里舟, 别朝红, 龙涛, 等. 能源交通一体化系统发展模式与运行关键技术 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(4): 1285-1300. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.210539](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210539).  
JIANG L Z, BIE Z H, LONG T, et al. Development model and key technology of integrated energy and transportation system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(4): 1285-1300. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.210539](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210539).
- [10] 李义, 刘志胜. 高速公路沿线发展分布式光伏发电项目可行性研究 [J]. *科技与创新*, 2022(4): 173-176,181. DOI: [10.15913/j.cnki.kjycx.2022.04.053](https://doi.org/10.15913/j.cnki.kjycx.2022.04.053).  
LI Y, LIU Z S. Feasibility study on the development of distributed photovoltaic power generation projects along the expressway [J]. *Science and technology & innovation*, 2022(4): 173-176,181. DOI: [10.15913/j.cnki.kjycx.2022.04.053](https://doi.org/10.15913/j.cnki.kjycx.2022.04.053).
- [11] 韩伟. 山西省高速公路推广路域光伏产业的路径研究 [J]. *山西交通科技*, 2023(3): 128-131.  
HAN W. Research on path of expressway promoting road area photovoltaic industry in Shanxi province [J]. *Shanxi science & technology of transportation*, 2023(3): 128-131.
- [12] 王宏民. 高速公路光伏发电 [J]. *山西交通科技*, 2020(1): 16-20.  
WANG H M. Highway photovoltaic power generation [J]. *Shanxi science & technology of communications*, 2020(1): 16-20.
- [13] 艾彝, 孟海龙. 四川高速公路范围内分布式光伏发电潜力浅析 [J]. *交通节能与环保*, 2023, 19(4): 95-99. DOI: [10.3969/j.issn.1673-6478.2023.04.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6478.2023.04.023).  
AI B, MENG H L. Analysis on the potential of distributed photovoltaic power generation within the scope of Sichuan expressway [J]. *Transport energy conservation & environmental protection*, 2023, 19(4): 95-99. DOI: [10.3969/j.issn.1673-6478.2023.04.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6478.2023.04.023).
- [14] 陈丽, 徐展, 徐峰达, 等. 交通枢纽节点的交能融合系统建设路径研究 [J]. *低碳世界*, 2022, 12(10): 130-132. DOI: [10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2022.10.012](https://doi.org/10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2022.10.012).  
CHEN L, XU Z, XU F D, et al. Research on the construction path of energy integration system for transportation hub nodes [J]. *Low carbon world*, 2022, 12(10): 130-132. DOI: [10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2022.10.012](https://doi.org/10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2022.10.012).
- [15] 魏坤, 刘洋, 周立钦, 等. 交能融合在高速公路服务区建设中的应用研究 [J]. *交通节能与环保*, 2023, 19(1): 86-90. DOI: [10.3969/j.issn.1673-6478.2023.01.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6478.2023.01.020).  
WEI K, LIU Y, ZHOU L Q, et al. Research on the application of traffic energy integration in the construction of expressway service areas [J]. *Transport energy conservation & environmental protection*, 2023, 19(1): 86-90. DOI: [10.3969/j.issn.1673-6478.2023.01.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6478.2023.01.020).
- [16] 张友民, 马冬冬. 交能融合背景下的高速公路绿色电力发展研究 [J]. *光源与照明*, 2022(12): 177-179.  
ZHANG Y M, MA D D. Research on the development of green electricity on freeways under the background of transportation and energy integration [J]. *Lamps & lighting*, 2022(12): 177-179.
- [17] 张进进, 户磊, 李永汉, 等. 高速公路智慧服务区建设方案研究 [J]. *北方交通*, 2022(9): 90-94. DOI: [10.15996/j.cnki.bfjt.2022.09.023](https://doi.org/10.15996/j.cnki.bfjt.2022.09.023).  
ZHANG J J, HU L, LI Y H, et al. Research on the construction scheme of intelligent service area of expressway [J]. *Northern communications*, 2022(9): 90-94. DOI: [10.15996/j.cnki.bfjt.2022.09.023](https://doi.org/10.15996/j.cnki.bfjt.2022.09.023).
- [18] 陈善炜, 李晓曦, 王文丹, 等. 太阳能光伏发电系统在高速公路领域的应用探讨 [J]. *智能建筑与智慧城市*, 2023(6): 190-192. DOI: [10.13655/j.cnki.ibci.2023.06.057](https://doi.org/10.13655/j.cnki.ibci.2023.06.057).  
CHEN S W, LI X T, WANG W D, et al. Discussion on the application of solar photovoltaic power generation system in the field of expressway [J]. *Intelligent building & smart city*, 2023(6): 190-192. DOI: [10.13655/j.cnki.ibci.2023.06.057](https://doi.org/10.13655/j.cnki.ibci.2023.06.057).
- [19] 孔雷军. 光伏发电技术在高速公路隧道中的应用 [J]. *广东公路交通*, 2022, 48(6): 122-125,143. DOI: [10.19776/j.gdgljt.2022-06-0122-04](https://doi.org/10.19776/j.gdgljt.2022-06-0122-04).  
KONG L J. Application analysis on photovoltaic power generating technology in highway tunnel [J]. *Guangdong highway communications*, 2022, 48(6): 122-125,143. DOI: [10.19776/j.gdgljt.2022-06-0122-04](https://doi.org/10.19776/j.gdgljt.2022-06-0122-04).
- [20] 李志锋, 王小军. 高速公路运营期节能减排评估标准体系构建 [J]. *公路交通技术*, 2020, 36(3): 132-139. DOI: [10.13607/j.cnki.gljt.2020.03.023](https://doi.org/10.13607/j.cnki.gljt.2020.03.023).  
LI Z F, WANG X J. Establishment of energy-saving and emission-reduction evaluation standard system in the operation stage of expressway [J]. *Technology of highway and transport*, 2020, 36(3): 132-139. DOI: [10.13607/j.cnki.gljt.2020.03.023](https://doi.org/10.13607/j.cnki.gljt.2020.03.023).
- [21] 王栋杰, 李宾斯, 周思恺. 新能源项目 LCOE 度电成本与 IRR 内部收益率的等效性分析 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(2): 101-109. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.014](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.014).  
WANG D J, LI B S, ZHOU S K. Equivalence analysis of LCOE and IRR for new energy projects [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(2): 101-109. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.014](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.014).
- [22] 李健, 林声宏, 党三磊. 光伏电力经济效益实用分析方法研究 [J]. *南方能源建设*, 2015, 2(2): 129-132. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.025](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.025).  
LI J, LIN S H, DANG S L. Research of practical analysis method on solar photovoltaic power economic benefit [J]. *Southern energy construction*, 2015, 2(2): 129-132. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.025](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.025).

#### 作者简介:



黄镜欢

黄镜欢 (通信作者)

1979-, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事新能源工程咨询设计管理工作 (e-mail) [huangjinghuan@gedi.com.cn](mailto:huangjinghuan@gedi.com.cn)。

(编辑 赵琪)