2022 年第 6 期

广 东 公 路 交 通

Guangdong Highway Communications

Vol. 48 No. 6

Dec. 2022

文章编号：1671 - 7619(2022)06- 0122- 04 DOI:10. 19776/j . gdgljt. 2022- 06- 0122- 04

光伏发电技术在高速公路隧道的应用

孔雷军

（ 广州市高速公路有限公司，广州 510335)

摘要：高速公路隧道运营中，照明、通风等设备的电能消耗占隧道用电的绝大部分，其中隧道出入口段加强照明 占隧道照明总功率的 70% ~ 80% , 占照明总用电量的 40% ~ 50% 。通过在隧道洞口的减光棚上安装光伏发电系 统，可实现洞口光过渡的同时充分利用太阳能发电，与市电并网，共同给照明负荷供电，有效地降低市电消耗。

关键词：高速公路：隧道；光伏发电；直流并网

中图分类号：U453 . 7 文献标志码：B

0 引言

目前在房建工程中已有大量的建筑物利用外 墙设置太阳能电池板，与公共电网联网，为建筑提 供供电服务 。在高速公路领域，光伏发电技术的 应用主要有：

(1) 光伏独立发电系统 。在用电负荷周边建 设微型光伏发电站，该电站完全独立，不与供电电 网相联，为公共电网未覆盖、或长距离供电不经济 的负荷供电，主要供摄像机、气象站等小负荷设备 用电 。为满足夜间或阳光不足时负荷用电的需 求，该类应用需设置较大的储能设施，通常储能设 施的投资远高于光伏发电设施。

(2) 补充型光伏发电系统 。利用高速公路服 务区停车区车棚顶部、收费站大棚顶部等部位设 置光伏发电站[1] , 通过与公共电网并网的方式，共 同供区域内的负荷用电 。该类光伏发电不反向送 电到公共电网，主要目的是减少公共电网的消耗， 降低电费支出 。该方式采用交流的方式并入高速 公路的低压配电网，已在上海市、甘肃省、山西省 等多个省市的高速公路中应用[2] 。

(3) 全并网光伏发电系统 。 电网公司利用高 速公路的互通、边坡等空闲地块设置光伏发电站， 电站所发的电力全部进入公共电网，高速公路方 以出租场地或发电分成的方式获取收益 。该方式 已在江苏省、河北省的高速公路中应用[3] 。

本文结合广州新白云国际机场第二高速公路

电、直流并网技术在隧道工程的应用进行探讨。 1 工程概况

机场二高南段项目是广州城区通往机场的第 二条高速通道的组成部分，全长约 24km , 采用全线 照明方案 。在近城区广深高速公路北侧的大观路 段设置有大观路隧道，为双向 6 车道下沉式隧道， 设计车 速 80km/h , 全 长 1 520m , 其 中 暗 埋 段 长 945m , 西洞口敞开段长 300m 。为减少阳光直射的 影响，西洞口设置减光建筑。

大观路隧道为下穿式隧道，西洞口接近正西 方向，为减少黄昏时分阳光的影响，洞口设置了遮 光棚，长 150m、宽 30. 4m 。为了实现减光段亮度的 平稳过渡，充分利用减光棚顶部空间，减光棚上设 置光伏发电板，在达到减光过渡的同时，兼顾光伏 板发电，为隧道照明提供绿色能源，减少碳排放， 节省运营电费。

机场二高南段项目在广州主城区内建设，互 通立交密集，且设置全线照明 。按照传统的高速 公路配电方案，需要约 2km 设置一个 10kV 供电 点，在立交互通区域还需加密设置供电点 。而供 电部门不能密集地提供电网接入点，一般要求建 设单位采用 10kV 配电开关房接入，在高速公路红 线内自行建设 10kV 配电系统。

由于在高速公路红线范围内自建 10kV 供电 系统的造价达 100 万元/km , 为减少沿线 10kV 供 电点的数量，结合高速公路上的 LED 灯具、摄像

南段工程（ 本文简称“机场二高南段”），对光伏发 机、情报板等负载均为直流的特性，机场二高南段

作者简介：o,，大学本科，高级工程师，主要从事高速公路供配电和机电系统的技术管理工作，E mail :

· 122 ·

项目采用在收费站／隧道变电站接入 10kV 公共电 网，使用变压器降低为 0. 4kV 交流电后，通过直流 柜转换为 750V 直流电源，向高速公路沿线设备供

电（ 图 1) 。LED 灯具的电源模块通过直流电压转 换，将 750V 直 流 电 变 换 为 LED 照 明 所 需 的 电 压 [4] 。



图 1 供配电方案

2 光伏发电系统

光伏发电系统一般由光伏列阵、直流汇流柜、 继电保护装置、储能装置以及最大功率点跟踪装 置等组成 。光伏系统中最基础的环节就是光伏列 阵，光伏列阵将太阳能转化为电能，然后再通过电 池单体根据电压电流的实际需求，将其串并联安 装在支架上 。最大功率点跟踪装置能够保证电池 列阵时刻保持最大的输出功率 。储能装置主要是 对光伏系统中的电能进行调节和控制[5] 。

大观路隧道照明总负荷为 200. 88kW , 其中西 洞口出口加强照明和入口加强照明功率合计为 83kW , 为了节约建设投资和后期运营维护费用，采 用光伏发电“ 即发即用”的总体方案 。结合光伏发 电输出、日照强度、加强段照明需求三者的正相关 性，选择隧道加强照明消纳光伏发电产生的电能。 此外，由于光伏发电功率不大，与运营期间的维护 成本相比，安装最大功率点跟踪装置的建设投入 及运营维护费用远大于其产生的效益 。结合即发 即用的总体方案，机场二高南段项目的光伏发电 系统无需建设储能装置和最大功率点跟踪装置 。

机场二高南段项目选用 370W 单晶硅太阳能

电池板（ 约为 200Wp/m2 ) , 单块太阳能电池工作输 出电压为 34V ~ 41V 。直流电压转换器的输出电压 应与主干配电直流 750V 相当，因此采用 20 块电 池板串联的方式接入直流汇流柜，单路输出功率 为 8 . 4kWp 。为满足加强照明负载功率 83kW 的需 求，直流汇流柜汇集 12 路光伏电池串联电流，并配 备必要的防雷设施后，输出到直流变换柜，并入高 速公路直流配电网。

3 光伏发电与市电并网

光伏发电并网后，应优先于市电向负载供电。 对比光伏发电和市电，光伏发电是一种电源，它可 以输出电能，而且只能输出电能；而电网是一种特 殊的电源，它既可以向负载提供电能，也可以作为 负载接收电能 。根据电流都是从电压高处流向电 压低处的原理，当光伏发电时，并网设备的电压始 终比电网的电压略高一点，因此负载可优先使用 光伏发电，只有当光伏的功率小于负载功率后，并 网点的电压才会下降，电网才会向负载供电 。光 伏并网有交流并网和直流并网两种。

3 . 1 交流并网

太阳能电池板输出的为直流电，而市电为交 ·123 ·

流电，因此必须设置逆变器实现直流到交流的转 换 。在交流并网馈电系统中，交流并网设备必须 采集电网的电压／频率／相位，逆变器输出的交流 电和市电网相位频率相同，输出电压略高于市网 电压，使光伏发电能够优先被使用。

交流并网设备具备交流过压、欠压保护，超 频、欠频保护，高温保护，交流及直流的过流保护， 直流过压保护，防孤岛保护等功能 。在出现异常 情况时，应切断交流输出，以避免出现反向送电产 生的安全风险。

3 . 2 直流并网

由于太阳能电池板输出为直流电，相比于交 流，直流并网时不必考虑相位、频率 一 致性等问 题 。通过 DC/DC 转换电路，将直流汇流箱输入的 直流电直接变换为略高于负载回路的直流电压， 通过半导体电路的单向保护功能，即可并入负载 回路（ 图 2) 。



图 2 直流并网

3 . 3 直流并网的优势

(1) 并网易控，电网波动小 。直流并网设备中 的直流变换柜能够允许较宽的电压输入范围，功 率输出易控，可根据太阳能电池板提供的电量，以 恒流源的形式灵活地将能量注入负载电路中，便 捷地实现输出功率的控制 。且光伏发电交流并网 故障短路电流暂态过程持续周期长、波动大；直流 并网的系统短路电流仅短时振荡，恢复非常快[6] 。

(2) 转换设备相对简单可靠 。随着国家绿色 能源政策的推进，电动车充电桩大规模地安装使 用，直流电压转换技术和元件产品的可靠性已经 得到验证 。相比逆变器的交流转换，实现对市电

· 124 ·

的频率和相位的跟踪需要大量电容、电感元件，直 流电压转换设备的结构更加简单可靠。

(3) 与市电电网相对隔离，提高了整个电网的 安全性 。直流配电系统通过对市电进行整流而形 成，直流部分对市电的影响被半导体元件隔离，不 会出现对电网的能量反送，全部发电量由自身负 载消耗，因此光伏发电系统并入的电能对市电电 网的影响极小 。而交流并网系统缺乏这种隔离功 能，一般认为配电网内光伏发电系统不应主动参 与电压调节，但光伏发电作为间歇性电源的接入 不但会影响稳态电压分布，还会引起系统电压波 动，可能导致系统电压超限，须采取合理的控制和 补偿措施[7] 。

(4) 可扩容性好 。通过半导体元件和电路，直 流并网系统较易实现多路太阳能电池板发电组的 并网接入和隔离保护，且多路太阳能板发电系统 接入结构简单 。 由于交流并网需解决相位、频率 的一致性，在多路逆变设备并网，必须保持设备的 步调一致，因此对逆变设备和继电保护的可靠性 要求较高。

3 . 4 光伏发电并网方案

机场二高南段项目在收费站／隧道变电所采 用 10kV 接入供电部门的电网，因此，光伏发电所 产生的电能采用 10kV 回送电网是不可行的 。光 伏发电与项目的配电并网在负载出线回路侧完 成，由直流变换柜负责对供电母线的电压进行监 控，并将直流汇流柜输入的电压稳定到略高于供 电母线的电压，和直流配电系统的负载回路分别 通过 IGBT 实现并接，实现光伏发电和直流配电系 统的并网 。在此结构中，IGBT 的单向导电特性，实 现了两个直流系统的故障隔离。

3 . 5 光伏发电和隧道照明的协同

机场二高南段项目的隧道监控系统中设置亮 度检测仪，可以实时检测洞内外的亮度，并将相关 数据发送到照明控制主机 。照明控制主机计算得 出相应隧道内的照明值，逐步调整加强照明段的 发光亮度，使得隧道内的照明亮度与外场亮度相 适应 。当外场亮度增大时，照明控制主机发出增 强加强段照明的信号，加强照明用电量增加；同时 光伏发电系统受太阳光照射产生电能，外场亮度 增加时，光伏发电系统的发电量相应增加 。光伏 发电和隧道加强照明协同一致，可充分利用光伏 发电，减少市电电能消耗。

4 节能减排评估

机场二高南段项目增加的光伏发电系统，主 要用于加强段的照明，装机容量设定为 100kWp ,

负载消耗约 88 . 32kW 。光伏板采用固定倾角安装 的方式，按照最佳倾角，本项目光伏发电系统 25 年 的发电量见表 1 。

表 1 机场二高南段项目光伏发电系统 25 年发电量

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 年份 | 年发电量/( × 104 KWH/年） | 年份 | 年发电量/( × 104 KWH/年） | 年份 | 年发电量/( × 104 KWH/年） |
| 第 1 年 | 8. 59 | 第 10 年 | 8. 05 | 第 19 年 | 7. 51 |
| 第 2 年 | 8. 53 | 第 11 年 | 7. 99 | 第 20 年 | 7. 45 |
| 第 3 年 | 8. 47 | 第 12 年 | 7. 93 | 第 21 年 | 7. 39 |
| 第 4 年 | 8. 41 | 第 13 年 | 7. 87 | 第 22 年 | 7. 33 |
| 第 5 年 | 8. 35 | 第 14 年 | 7. 81 | 第 23 年 | 7. 27 |
| 第 6 年 | 8. 29 | 第 15 年 | 7. 75 | 第 24 年 | 7. 21 |
| 第 7 年 | 8. 23 | 第 16 年 | 7. 69 | 第 25 年 | 7. 15 |
| 第 8 年 | 8. 17 | 第 17 年 | 7. 63 | 平均每年 | 7. 87 |
| 第 9 年 | 8. 11 | 第 18 年 | 7. 57 | 25 年合计 | 196. 75 |

按照目前市电接入 0. 8 元／千瓦时计算，平均 每年 节 省 电 费 约 6. 3 万 元；根 据 施 工 图 预 算， 88. 8kWp 的光伏发电系统投入约为 50 万元，约 9 年可以收回投资。

按照 25 年累计发电 196. 75 万千瓦时计算，25 年合计可减少标准煤的消耗 707 . 07t , 减少 CO2 排 放 1 762 . 26t , 减少 SO2 排放 53 . 03t , 减少 NO x 排放 26. 51t , 减少粉尘排放 480. 81t , 社会效益和生态效 益显著。

5 结语

广州机场二高南段项目采用外场监控和照明 系统全直流配电、光伏发电直流并网方案，是对国 家《2030 年前碳达峰行动方案》中提出的开展光 （ 光伏发电）储（ 储能）直（ 直流配电）柔（ 柔性用 电）应用的一个探索，即将进入实施阶段，可为高 速公路“直柔”用电提供参考应用。

广州机场二高南段项目充分利用洞口的散碎 地块，设置太阳能光伏发电系统，实现“ 即发即 用”，可有效地降低隧道照明电费费用 。采用直流 配电、直流并网的方式实现微电网间的故障隔离， 能够提升供电并网的可靠性，便捷地实现分布式 可再生能源的并网，充分利用可再生能源。

直流配电和可再生能源的并网应用尚处于试 点阶段 。可再生能源及时消纳是方案应用的关 键，虽然在建筑行业已有较多应用，但在高速公路 应用场景中相关的配套设备还不够丰富，应用经 验和技术仍需不断地积累和完善。

参考文献：

[1] 郝瑞．高速公路服务区分布式光伏发电应用 [ J] .

山西电子技术，2020(1) : 22- 23 .

[2] 李明霞．太阳能光伏发电系统在高速公路领域的

应用探讨 [ J] . 科技创新与应用，2020(31) : 177- 178 .

[3] 许雪记，徐文文，殷承启，等 . 江苏省高速公路站

区光伏能源综合利用研究 [ J ] . 能源环境保护，2020 , 34

(2) : 43 - 47.

[4] 管浩宇，季清，韩天，等 . 植物工厂 LED 照明系统

的直流配电模式研究[ J] . 电子世界，2022(2) : 25- 27.

[5] 于冬，李瑶 . 储能技术在光伏并网发电系统中的

应用研究[ J] . 中国设备工程，2021(24) : 196- 197.

[6] 张新燕，赵理威，赵理飞，等 . 新能源多馈入直流

并网与传统交流并网对比[ J] 高电压技术，2017 , 43 ( 4) :

1121 - 1128.

[7] 刘伟，彭冬，卜广全，等 . 光伏发电接入智能配电

网后的系统问题综述[ J] . 电网技术，2009 , 33(19) : 1 - 6.

（ 收稿日期：2022- 05- 16)

（ 下转第 143 页）

·125 ·

大学，2009.

[7] 游锦龙，叶瑞云，等 . 广东南岭生态旅游公路规划 研究[ R] . 广州：广东省交通运输规划研究中心，2019.

[8] 叶瑞云，周玉松，衷平 . 基于乡村振兴发展的旅

游公路规划选线研究[ J] . 公路，2021 , 66(12) : 257- 260.

（ 收稿日期：2022- 07- 06)

Impact of Guangdong Nanling Eco-tourism Highway on Regional Development

YE Ruiyun

( Guangdong Provincial Transportation Planning & Research C enter , Guangzhou Guangdong China 510101)

Abstract: As a proj ect , it is difficult for the financial evaluation of the tourist highway to achieve financial balance , but

yEsm Highway have been analyzedand the impact of tourism highways on regional

it plays a significant role in driving regional development from society's perspective . In this paper , the status and

Key words:eco-tourism highway; regional development; rural revitalization; nanling

■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■

（ 上接第 121 页）

Study on Reasonable Spacing of Shallow-Embedded Biased Neighborhood Tunnel with CD Method Construction

BI Yu

( Huangmaohai Link Management Center , Zhuhai Guangdong China 519055)

Abstract: With a shallow tunnel with small bias distance as the background , FLAC3D software has been used to

ssbi nlehe ter aaaa lla v

establish tunnel models with different clear distance conditions . The plastic zone range , corresponding displacement and

distance has been determined by CD method , and the monitoring and simulation data have been compared and analyzed . The reasonable clear distance of CD method construction of shallow buried bias small clear distance tunnel has been determined , and the monitoring and simulation data have been compared and analyzed . The results have shown that with the increase of clear distance , the plastic zone range below the side of middle rock pillar decreases , the horizontal and vertical displacement on the right side of middle rock pillar increases slowly , the horizontal and vertical displacement on the left side of middle rock pillar decreases gradually , and the maximum principal stress of middle rock pillar decreases . By analyzing the plastic zone , displacement and stress of surrounding rock with rock pillar , it has been concluded that the reasonable spacing of CD method is 0. 75B . The error range of monitoring and simulation data is 5% ~ 15% , which

esri r t CD method construction; reasonable spacing

■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■

（ 上接第 125 页）

Application Analysis on Photovoltaic Power GeneratingTechnology in Highway Tunnel

KONG Leijun

( Guangzhou Expressway Co . , LTD , Guangzhou Guangdong China 510335)

Abstract: In the operation of expressway tunnel , the electric energy consumption of lighting , ventilation and other equipment accounts for the vast maj ority of the tunnel electricity consumption . In the tunnel lighting , the entrance and exit section of enhanced lighting accounts for about 70% ~ 80% of the total power of the tunnel lighting , accounting for 40% ~ 50% of the total electricity consumption of the lighting. Through the installation of photovoltaic power generation system on the reduced light shed at the entrance of the tunnel , the light transition can be realized at the same time , the full use of solar power generation , and grid connection to the lighting load power supply , can effectively reduce the electricity consumption , with better social and economic benefits .

Key words: expressway; tunnel lighting; photovoltaic power generating; DC grid connection

·143 ·