

光伏发电玻璃在桥梁工程上的应用研究

陈培新, 李胡涛, 彭良祝, 周涛, 闫福成

[林同棧国际工程咨询(中国)有限公司, 重庆市 401120]

摘要: 系统探讨光伏发电玻璃在桥梁工程中的集成应用技术, 提出了光伏与桥梁工程协同设计技术路线, 提高桥梁全寿命周期的经济性, 有效减少碳排放。基于工程案例, 构建了全生命周期碳效评估模型, 研究结果为桥梁光伏发电系统的设计与实施提供理论依据和技术指导, 推动可再生能源在交通基础设施中的应用, 为绿色交通基础设施建设提供创新范式。

关键词: 光伏发电玻璃; 桥梁; 新能源; 光资源分析; 储能

中图分类号: U448.11; U443.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0414-05

Research on the Application of Photovoltaic Glass in Bridge Engineering

CHEN Peixin, LI Hutao, PENG Liangzhu, ZHOU Tao, YAN Fucheng

[T.Y. Lin International Engineering Consulting (China) Co., Ltd., Chongqing 401120, China]

Abstract: The integrated application of photovoltaic (PV) glass is systematically investigated in bridge engineering, proposing a synergistic design approach that enhances the whole-life-cycle economic performance of bridges while effectively reducing carbon emissions. By constructing a lifecycle carbon efficiency assessment model based on an engineering case study, the research findings provide theoretical foundations and technical guidance for the design and implementation of PV systems in bridge projects. The application of renewable energy is advanced in transportation infrastructure and an innovative paradigm for green transportation infrastructure development is established.

Keywords: photovoltaic glass; bridge; renewable energy; solar resource analysis; energy storage

0 引言

全球交通基础设施碳排放占比达28%(2025年数据), 传统桥梁工程面临能源消耗大、功能单一等问题。光伏发电玻璃作为新型BIPV (building integrated photovoltaic, BIPV) 材料, 其透光率($>85\%$)、抗弯强度(≥ 120 MPa)与建筑一体化特性, 为桥梁工程提供“结构发电体”革新路径^[1]。近年来, 光伏玻璃技术在高透光、轻量化、智能化等方向取得显著突破, 成为推动光伏产业降本增效的关键支撑^[2]。

光伏玻璃技术已从早期的晶硅外挂式组件(效率15%~18%)发展到第三代钙钛矿/碲化镉薄膜技术(效率28%~31%), 材料厚度从10 mm降至6 mm以下, 抗弯强度提升至120 MPa以上^[3]。意大利XI Settembre光伏桥(2021年)采用碲化镉薄膜玻璃, 实现桥面发电与美学融合, 年发电量提升27%。中国

黎滩河大桥(2025年)则创新应用蜂窝状光伏玻璃结构, 解决预应力锚固区应力集中问题, 将应力峰值控制在18.2 MPa以下。

成都科幻馆项目(2024年)采用梯度透光率设计(桥面中央85%、护栏45%), 实现日均发电量18.7 kWh/m², 同时集成DAS-3000健康监测系统(200+传感器), 维护成本降低35%^[12]。湖北友谊大道高架桥(2023年)为国内首例全封闭光伏声屏障项目, 600 m试验段年发电16万度, 节省标煤49 t, 余电用于新能源车充电站, 开创交通设施光伏发电新模式^[13]。黎滩河大桥的全生命周期评估显示: 光伏系统年发电18万度, 满足80%照明需求, 运营阶段碳减排贡献达63%, 全周期净减排144 tCO₂/a, 投资回收期缩短至8.3 a。探索光伏发电玻璃与桥梁工程的深度融合, 将进一步降低全生命周期成本, 助力我国实现2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标。

1 工程概况

1.1 总体布置

某桥梁工程位于广东省深圳市, 上跨城市主干

收稿日期: 2025-04-30

作者简介: 陈培新(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

路,在道路两侧设置梯道和电梯接地,同时与两侧商业建筑连接。桥梁供行人通行,桥顶设置雨棚,可提供遮阳、避雨功能,属于区域连廊体系的主廊工程。

1.2 桥梁工程

桥梁分上下两层,其中第一层桥梁平面总体呈T字形结构。如图1所示,横跨城市主干路部分桥梁跨径布置为5.15 m+19 m+15.5 m+15 m+17.8 m+7.25 m=79.7 m,平行城市主干路部分桥梁跨径为3 m+23.91 m+24.25 m+3 m=54.16 m;第二层主梁架设于第一层主梁之上,跨径布置为36.55 m+14.5 m+7.25 m=58.3 m;主体结构为多孔带悬臂刚构桥,采用钢箱梁。如图2所示,标准桥面宽 10.4 ~ 14.3 m。标准段主梁高度 1.0 m。

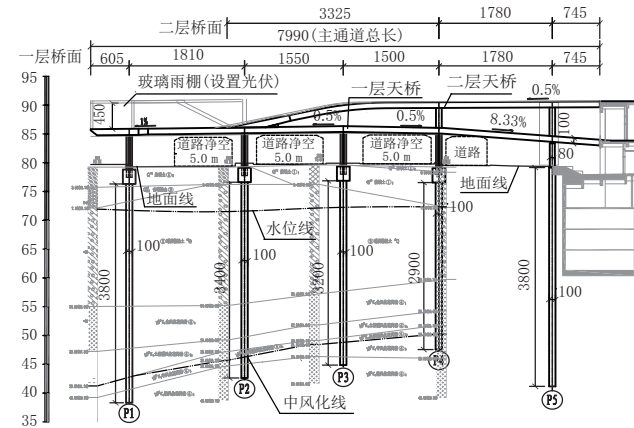


图1 桥梁立面布置图(单位:cm)

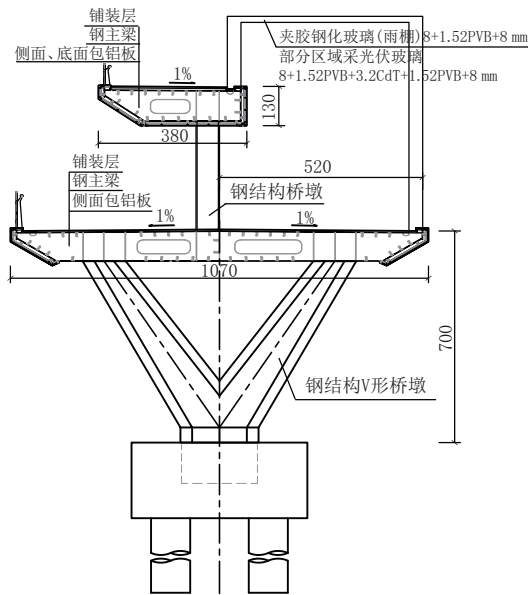


图2 桥梁断面布置图(单位:cm)

桥梁纵断面主要位于*i*=1.5%的双向纵坡上。南侧受限于建筑接口高程和道路净空要求,桥面纵坡局部调整为8.33%。平面位于直线上。桥面设1%双向横坡^[4-5]。主梁采用Q355C钢材。桥梁设计主要技术标准如表1所示。

(1)顶板

顶板采用正交异性钢桥面板,由桥面板纵肋、横隔板及桥面板组成,一般截面桥面板厚 14 mm,墩梁固结段桥面板厚 20 mm。桥面板纵肋均采用I肋,厚度 12 mm,高 120 mm,桥面板纵肋标准间距 350 mm^[6]。

表1 主要技术标准表

序号	项目	技术标准
1	设计基准期 / a	100 a
2	设计安全等级	一级
3	设计环境类别	Ⅲ类
4	设计荷载	人群荷载: 5.0 kN/m ²
5	桥面标准宽度	桥面标准宽 6.8 m,最宽处 13.4 m
6	桥梁纵坡	双纵坡 <i>i</i> =0.5%
7	桥面平曲线	平面均位于直线上
8	桥面横坡	双向 1% 横坡
9	车行净空 / m	≥5.0
10	设计风速	基本风速 37.5 m/s
11	整体温度	多年平均气温 22.0 ℃,月平均最低温 11.4 ℃,极端最高温 38.7 ℃,极端最低温 0.9 ℃
12	桥梁抗震设防标准	抗震设防烈度为 7 度,抗震设防措施等级为 8 级
13	人群活载挠度限值	1 / 600× <i>L</i>
14	人致振动校核自振频率敏感范围	竖向和纵向振动: 1.25 Hz≤ <i>f_i</i> ≤2.3 Hz, 横向振动: 0.5 Hz≤ <i>f_i</i> ≤1.2 Hz
15	光伏组件型号	碲化镉 20% 除膜率组件 (TP8+ 2.28PVB+3.2CdTe+2.28PVB+TP8 钢化夹胶光伏玻璃顶棚)
16	光伏雨棚面积 / m ²	544.86
17	光伏装机功率 / kW	59.93

(2)底板

一般截面底板厚 14 mm,墩梁固结段底板厚 20 mm。底板纵肋均采用I肋,I肋厚度 12 mm,高 120 mm,纵肋标准间距均为 400 mm。

(3)腹板

一般截面边腹板、中腹板厚 14 mm,墩顶处墩梁固结段腹板厚 20 mm。其纵肋采用I肋,I肋厚度 12 mm,高 120 mm。

(4)横隔板

梁体横隔板基本间距 2.0 m/道,墩顶处隔板与桥墩支撑中线对齐,二层主梁与一层主梁固结处主梁隔板与二层主梁顶底板对齐,二层主梁桥下立柱支撑处主梁隔板与立柱板件对齐^[7]。

一般截面横隔板厚 10 mm,墩梁固结段处与墩身顶、底板对齐的横隔板厚 20 mm。

1.3 光伏工程

该人行桥梁位于城市慢行活动主轴线上,其所

表2 光伏组件主要设备表

序号	设备名称	规格	数量
1	逆变器 (36 kW)/台	SUN2000-36KTL-M3	1
2	光伏直流 电缆/m	H1Z2Z2-K-1×2.5(红黑各一半)	2 850
3	光伏直流 电缆/m	H1Z2Z2-K-1×4	16
4	电缆/m	WDZB-YJY-0.6/1kV-3X35+2×16	10
5	电缆/m	WDZB-YJY-0.6/1kV-3×16+1×10	10
6	MC4连接器/对		82
7	直流汇流 套件/套	四汇一(带防逆流装置)	3
8	直流汇流 套件/套	五汇一(带防逆流装置)	5
9	并网柜 BW/台	1. 断路器:CM3-100L/4378B/H/80A, 4P 固定式+失压;2. 电流互感器: 100/5;3. 浪涌:NXB-63 4P C63A、ZQ-MD-40 kA/4P Iimp=12.5 kA;4. 电流表、电压表;5. 防孤岛保护、防逆流功率保护	1
10	并网/项		1

建造阶段:预制模块化安装减少现场施工碳排放 15%,结合智能监测系统,实时优化结构应力分布,延长使用寿命至 50 a;

运营阶段:25 a 年均发电量 6.13 万度,碳减排贡献达 63%,结合储能系统实现“发电—照明—储能”闭环,全周期净减排 CO₂ 34.96 t/a。

(3)经济效益与功能拓展

成本控制:通过光伏补贴政策与碳交易收益,项目投资回收期缩短至 8.45 a,全周期成本降低 19%;

多功能集成:集成智能响应系统,玻璃透光率可随光照强度动态调节(响应时间<30 s),暴雨天气自动启动疏水涂层,雨棚排水效率提升 40%;

美学融合:采用六边形蜂窝状彩色玻璃单元(Pantone 色卡级定制),与桥梁景观照明联动,夜间可呈现动态光影效果,成为城市低碳地标。

3 全生命周期评估与碳效分析

3.1 发电量与回收周期测算

首先,测算光伏发电量,以使用年限 25 a 为研究基准。光伏玻璃发电能力随时间有一定幅度衰减(见图 7)。

其次,根据所选用的光伏组件,计算投资额、发电上网收益、碳交易收益等,进而求得回收周期(见表 3)。

综上,自用部分年均收益为 3.55 万元(单价 0.9 元),余电上网年均收益为 0.98 万元(单价 0.45 元),

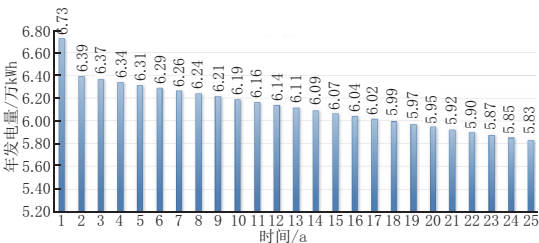


图7 光伏发电量模拟计算

表3 回收周期测算

产品名称	20% 碲化镉发电玻璃	
产品类型	12TP+2.28PVB+3.2CdTe+2.28PVB+12TP	汇总
产品规格	根据设计尺寸定制	
透光率/%	20	
功率/(W·m ⁻²)	110	
面积/m ²	544.86	544.86
朝向	平铺安装	
装机容量/kWp	59.93	59.93
25 a 年均发电量/(万 kWh·a ⁻¹)	6.13	6.13
光伏部分投资合计/万元	108.11	
年发电量自用部分收益/万元	3.55	
年发电量上网部分收益/万元	0.98	
碳交易收益/万元	0.36	
年总收益/万元	4.89	
除去原有幕墙部分增量回收期/a	8.45	

碳交易年均收益为 0.36 万元,合计年收益为 4.89 万元。光伏总计投资 108.11 万元,相对原有雨棚方案(常规玻璃雨棚,无光伏组件)增加 41.37 万元,增量回收期 41.37 / 4.89=8.45 a。

3.2 储能工程

光伏组件的应用,储能装置的成本相对较高,本文对是否设置储能装置做了 3 个方案的对比研究。

(1)自发自用,余电上网:光伏发电供桥梁无障碍电梯、照明、监控等设备使用,多余电量及桥梁设备非用电时段所产生电量,进行上网,不设储能设备;

(2)部分储能:桥梁共计 3 部电梯,日均用电约 108 度,剩余 60 度储能;经测算,储能设备采购费用约 24 万元。

(3)全部储能:桥梁日均发电 168 度,全部储能。经测算,储能设备采购费用约 67.2 万元。

4 结 语

4.1 适用该技术的桥梁类型

(1)地理区域

该技术适合太阳能资源丰富的地区。我国太

阳能资源丰富或较丰富的地区(年总辐射量高于 $1\,050\text{ kWh/m}^2$)面积广阔,约占全国总面积的 $2/3$ 以上,这为大规模发展太阳能利用提供了得天独厚的优越条件。

(2) 遮挡条件

该技术使用时应避免受高层建筑严重遮挡的区域。设置雨棚的桥梁往往位于人流密集区,容易收到周边建筑的影响,这给该技术的推广带来了一定的困扰。如本文中的案例,受限于南侧建筑遮挡,仅在北侧设置光伏设施。

(3) 遮阳避雨需求强烈

该技术适合应用于城市高强度开发区的人行桥梁。光伏雨棚可提供全天候防护,同时发电。目前各地对民生需求日益重视,既有天桥加装雨棚或新建天桥设置雨棚的案例层出不穷,尤其是广州市和深圳市,走在了前列。广州市是较早系统化推进天桥加装雨棚的城市之一。因其高温多雨的气候特点,广州市在BRT沿线、繁华商业区、交通枢纽以及学校、医院周边等人流密集区域的许多天桥都已加装了雨棚。广州市政府将此作为民生工程逐步推进。根据《深圳市人行天桥和连廊设计标准》(SJG70—2020),大型公共建筑(如医院、机场、火车站、口岸)、公共交通站点(地铁站、公交站、客运码头)等人流集中区域的步行联系通道,宜设置遮阳和挡雨棚。

(4) 结构兼容性

该技术适合于中、小跨度桥梁。应正视桥梁主梁在活载下变形与雨棚变形存在的协调性问题。在前期阶段,需充分考虑桥梁主梁在车辆、人群、风载等作用下的挠度变形,以及温度变化引起的热胀冷缩。光伏雨棚的支撑骨架必须具备一定的适应变形能力,或通过加强结构(如采用斜拉索、张弦桁架)来控制变形,防止组件隐裂或连接失效。

(5) 规模要求

光伏雨棚面积宜大于 500 m^2 ,以发挥规模效益。

4.2 建设成本增量指标分析

结合第3章节的案例,采用该技术与采用常

规夹胶玻璃雨棚的桥梁,建设成本增量主要在光伏组件(碲化镉薄膜玻璃)、辅助设备(逆变器、电缆、汇流套件等),单位面积增量成本为 759 元/m^2 。

通过发电收益和碳交易补偿,回收周期约为 8.45 a 。在我国当前的体制机制下,商业用电成本较高,若能结合相关用电单位综合开发,比如光伏发电直接供应邻近商业建筑,回收周期或能进一步压缩。

针对雨棚面积较大的场景,规模效应增大,增量成本或能进一步降低。

4.3 运维成本增量指标分析

与传统雨棚对比,光伏玻璃雨棚因接入智能监测系统而减少人工巡检需求,维护成本可有效降低。

就主要材料的寿命而言,光伏玻璃与常规夹胶玻璃一般取决于中间层胶片的耐老化性能。一般采用PVB夹胶玻璃,合理使用寿命可达 $15\sim 20\text{ a}$ 。光伏玻璃的使用寿命还与光伏组件的功率衰减有一定关系。通常要求 25 a 后发电效率仍保持在 80% 以上。

定期检查和专业维护能显著延长玻璃寿命。对于光伏玻璃,定期清理表面灰尘、检查电气连接很重要。对于夹胶玻璃,应注意避免使用酸碱性强清洁剂,以免腐蚀胶层。

参考文献:

- [1] 中国光伏行业协会. 光伏玻璃在交通领域的应用白皮书[R]. 北京: 中国光伏行业协会, 2024.
- [2] 徐政, 王永昌, 马寅初, 等. 玻璃光伏技术研究进展[J]. 应用化学, 2020, 37(12): 1871-1878.
- [3] 李国强, 孙晓明, 刘继东, 等. 玻璃-玻璃太阳能电池的研究进展[J]. 太阳能学报, 2019, 40(1): 1-10.
- [4] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范[S].
- [5] CJJ 11—2011, 城市桥梁设计规范[S].
- [6] JTG D64—2015, 公路钢结构桥涵设计规范[S].
- [7] CJJ 69—95, 城市人行天桥与地道技术规范[S].
- [8] SJG 71—2020, 桥梁工程设计标准[S].
- [9] GJG 203—2010, 民用建筑太阳能光伏系统应用技术规范[S].
- [10] QX/T89—2018, 太阳能资源评估方法[S].
- [11] SJG70—2020, 深圳市人行天桥和连廊设计标准[S].
- [12] 李慧, 毛彦永. 分布式储能在成都科幻馆的应用[J]. 建筑电气, 2024, 43(8): 42-49.
- [13] 国网湖北省电力有限公司. 湖北武汉公司: 应用光伏声屏障服务绿色城市建设[J]. 农村电气化, 2024(1): 17.