

# BIPV 光伏建筑一体化 “防水—发电—结构” 协同施工技术

孙九鹏 袁 宁 林 森 徐晨晨 马生康  
中铁十局集团第七工程有限公司 陕西 西安 710065

**摘 要：**针对传统BIPV光伏施工中防水层与光伏支架冲突、屋面渗漏、景观不协调等行业痛点，结合十堰郧阳区屋顶分布式光伏发电项目多类型屋面施工需求，研发BIPV光伏建筑一体化“防水—发电—结构”协同施工技术。依托实际工程构建三维协同体系，采用“力学—流体—能效”协同方法，通过有限元分析、流体模拟完成参数优化，形成成套施工技术。工程应用表明，该技术实现抗风荷载0.6kPa、水流阻力降低25%、年发电量提升8%、施工周期缩短30%、综合成本降低12%等效果，可灵活适配多类屋面场景，对推动分布式光伏与建筑行业深度融合具有重要意义。

**关键词：**BIPV光伏建筑一体化；协同施工技术；防水—发电—结构；分布式光伏；屋面改造；景观融合设计

**引言：**在我国‘双碳’战略与城乡建设绿色转型双重背景下，分布式光伏发电已成为建筑领域降碳增效的核心技术路径，BIPV（光伏建筑一体化）技术兼具能源生产与建筑功能双重属性，是行业融合发展核心趋势。当前我国BIPV应用规模持续扩大，但传统施工技术存在旧厂房屋顶渗漏隐患突出、光伏支架与防水体系冲突、设施与景观不协调、资源利用效率低等问题，严重制约项目实施。本文以十堰郧阳区屋顶分布式光伏发电项目为背景，针对多类型屋面施工需求，研发“防水—发电—结构”协同施工技术，总结工艺原理、施工流程及应用效果，为同类BIPV项目提供参考，推动行业深度融合<sup>[1]</sup>。

## 1 工程概况

十堰郧阳区屋顶分布式光伏发电项目是湖北省重点能源民生工程，总覆盖屋面约216万平方米，涉及神州龙产业园等多个工业园区，涵盖三种核心屋面类型。其中，神州龙产业园有9600m<sup>2</sup>彩钢瓦屋面翻新，绿筷子二期有10220m<sup>2</sup>破损屋面改造重建；部分厂区规划建设光伏长廊等景观类光伏设施，打造“光伏+景观”新模式。

项目原拟用传统光伏施工技术，但该技术无法解决光伏支架安装与屋面防水冲突，旧厂房屋面破损渗漏、光伏布局与景观规划有视觉冲突、屋面空间资源紧缺、光伏政策迭代等问题导致项目实施困难。为此，技术团队研发应用BIPV光伏建筑一体化“防水—发电—结构”协同施工技术，改造既有彩钢瓦屋面，新建屋面直接集成光伏系统，解决多重需求<sup>[2]</sup>。

## 2 协同施工技术实施方案

### 2.1 协同施工体系设计

本技术核心是构建“防水—发电—结构”三维协同

体系，采用“力学—流体—能效”协同方法实现系统效能提升，结合模块化排水、旧屋面适配、景观融合设计，实现建筑功能与光伏系统深度融合。如图1结构体系图所示：

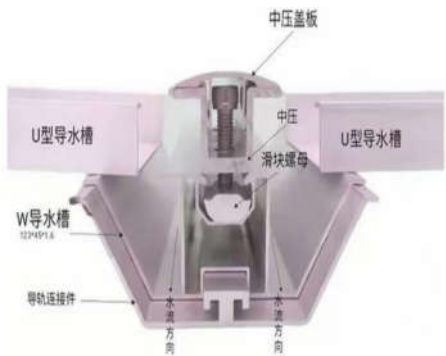


图1 结构体系图

**力学协同：**光伏支架与屋面基层可靠连接，经ANSYS有限元分析验证，可承受0.6kPa风荷载、0.3kPa雪荷载，满足6度抗震设防要求，避免施工破坏原有屋面结构。

**流体协同：**采用“横向矩形+纵向W型”导水槽模块化设计，W型槽采用流线型结构，经CFD模拟水流阻力较传统方案降低25%，3%坡度形成闭环排水系统，渗漏风险降低60%。

**能效协同：**组件阵列间距优化为1.5倍组件高度，年发电量较密排方案提升8%；组件形成遮阳层，夏季屋面吸热减少50%，降低空调能耗，同时减缓屋面碳化速度60%，屋面寿命延长至15年以上。

**旧屋面适配：**针对破损彩钢瓦屋面，采用“结构加固+BIPV导水槽”组合方案，改造后屋面承载力提升40%，已成功应用于9600m<sup>2</sup>彩钢瓦屋面改造工程<sup>[3]</sup>。

### 2.2 景观融合施工设计

针对园区景观规划与光伏设施融合需求，项目技术团队在光伏组件布局与景观类光伏设施施工中采取专项设计措施，结合十堰项目案例，形成成套景观融合施工方案：

光伏组件阵列布局上，按厂区功能划分为工业生产区、办公区、景观核心区，采用差异化策略：①工业生产区密排布局，提升发电效率，屋面光伏利用率超85%；②办公区疏朗布局，阵列间距优化为2.0倍组件高度，兼顾采光与发电；③景观核心区避开光伏设施，确保景观视觉完整，协调发电与景观效果。景观类光伏设施施工方面，光伏长廊、凉亭用定制支架与浅灰色系彩色光伏板，色彩匹配建筑风格；支架用弧形钢结构，兼顾承载与美观；凉亭光伏组件斜向布局，保证发电、形成遮阳篷，统一能源生产与场地功能。如图二：光伏景观融合

效果图所示



图2 光伏景观融合效果图

2.3 核心材料选型

核心材料关键性能参数如表1：材料最终选型表所示：

表1 材料最终选型表

| 序号 | 设备名称      | 规格                                                                         | 单位 | 数量 | 备注              |
|----|-----------|----------------------------------------------------------------------------|----|----|-----------------|
| 1  | 304不锈钢导水槽 | 耐盐雾性能 $\geq 5000$ 小时                                                       | m  | /  | GB/T 14976-2012 |
| 2  | 硅酮耐候胶     | 耐温 $-40^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ ，弹性模量 $\geq 0.6\text{MPa}$ | kg | /  | GB 16776-2005   |
| 3  | 光伏组件      | 双玻620Wp                                                                    | 块  | /  |                 |

支架配件采用M12膨胀螺栓（锚固深度  $\geq 100\text{mm}$ ）、Q235钢角码（厚度8mm）、304不锈钢抱箍（直径10mm），确保连接力  $\geq 5\text{kN}$ 。

2.4 核心施工工艺

BIPV光伏建筑一体化“防水-发电-结构”协同施工技术核心工艺流程：施工准备→测量放线→光伏支架安装→导水槽安装→光伏组件安装→盖板及检修步板安装，各工序环环相扣，设精度控制与质量检验标准，上道工序合格方可进入下道工序，具体如下：

施工准备：技术准备需编制专项方案，明确核心指标，如轴线偏差  $\leq 5\text{mm}$ 等，对人员培训3天，考核合格上岗并交底；材料准备需核查进场材料，抽样检验核心材料，分类存放并做好防护；现场准备需研判工况，预处理屋面基层，控制平整度误差  $\leq 3\text{mm}/2\text{m}$ ，检测含水率，含水率  $> 8\%$ 时严禁施工。

测量放线：用全站仪定位屋面，标记支架轴网与立柱点位，控制轴网偏差  $\leq \pm 5\text{mm}$ ，激光打标准确定位立柱；复测屋面坡度，调整导水槽坡度补偿值，确保排水坡度  $\geq 3\%$ ；复核旧屋面承载力，调整支架安装间距与加固方案<sup>[4]</sup>。

光伏支架安装：按标记位置安装立柱，用M12膨胀螺栓连接，锚固深度符合要求；安装斜梁与檩条，高度与导水槽标高匹配；检测垂直度、坡度，支架顶部坡度偏

差  $\leq \pm 1^{\circ}$ ，垂直度偏差  $\leq 1/1000$ ，结构稳定无松动变形，合格后进入导水槽安装工序。

导水槽安装：是防水与结构协同核心工序，分W型与矩形安装，把控连接密封与排水坡度。拼装环节，W型由多部件组成，矩形与W型搭接，用自攻丝固定并防腐；连接固定环节，屋面荷载  $\geq 0.7\text{kN}/\text{m}^2$ 用钢角码连接， $< 0.7\text{kN}/\text{m}^2$ 用不锈钢抱箍连接，确保连接力  $\geq 5\text{kN}$ ；密封处理环节，涂抹硅酮耐候胶，宽度  $\geq 10\text{mm}$ 、厚度  $\geq 5\text{mm}$ ，固化后淋水试验无渗漏方可进入下道工序；排水系统校核环节，校核排水坡度与顺直度，形成闭环排水系统。

2.5 技术难点及解决方案

本技术在工程应用面临旧屋面结构加固与光伏集成适配、导水槽密封防渗漏、支架与屋面结构力学协同、光伏组件布置与景观融合四大核心技术难点，经针对性研发形成解决方案，具体如下：

难点1：既有破损彩钢瓦屋面结构承载力不足，加固与光伏集成冲突。解决方案：采用“混凝土柱包钢+新增钢柱”加固，对原有混凝土柱用4mm厚钢板包钢，在屋面承载力薄弱区新增H150×150规格H型钢柱，形成新支撑体系；将光伏支架与加固后的钢柱、檩条连接，避免作用于破损屋面基层，实现适配。

难点2：导水槽纵横连接点多，密封难，易渗漏。解决方案：制定标准化密封工艺，连接点采用“龙骨套芯+

自攻丝固定+硅酮耐候胶密封”三重防护,密封胶涂抹宽度 $\geq 10\text{mm}$ 、厚度 $\geq 5\text{mm}$ ;导水槽安装后依次进行淋水(2小时)、通水(流量 $5\text{m}^3/\text{h}$ )、闭水(高度 $100\text{mm}$ ,24小时)试验,补封渗漏点,确保排水无渗漏。

难点3:光伏支架施工易破坏屋面结构,需满足多重荷载要求。解决方案:用M12膨胀螺栓与屋面混凝土基层连接,避开防水薄弱处钻孔;通过ANSYS有限元分析模拟验算支架结构,考虑屋面、风( $0.6\text{kPa}$ )、雪( $0.3\text{kPa}$ )等荷载,确保支架承载满足《建筑结构荷载规范》GB50009-2012(2019版)6度抗震设防要求。

难点4:光伏组件布置易遮挡厂区景观,视觉差。解决方案:建立“发电效率-景观布局”双优化模型,将光伏组件阵列间距优化为1.5倍组件高度,发电量提升8%,减少遮挡;景观区用光伏板与定制钢架打造景观化光伏设施,融合能源生产与建筑美学;通过厂区绿化遮挡光伏支架底部,提升景观协调性。

### 3 效益分析

BIPV光伏建筑一体化“防水-发电-结构”协同施工技术在十堰郧阳区屋顶分布式光伏发电项目应用,实现经济、社会、环保效益统一,综合效益显著。效益指标通过与传统光伏施工技术工程实测对比得出,对比基数为十堰项目同类型屋面传统施工实测数据,确保数据真实可追溯。

经济效益上,该技术使施工周期缩短30%、综合成本降低12%、屋面空间利用率提升30%,屋面结构寿命超15年、建筑空调能耗降50%,光伏发电效率年衰减率 $\leq 2\%$ 、发电效率提8%,降低项目全生命周期成本,提升整体收益。

社会效益方面,该技术为十堰补充清洁能源,缓解用电高峰压力,为能源结构转型提供样本;提升屋面空间利用率30%,破解屋面资源紧缺难题,开辟屋面资源利用新路径;首创“防水-发电-结构”三维协同体系,为BIPV项目提供可复制解决方案,推动分布式光伏技术

创新与行业发展;带动当地新能源相关产业,创造就业岗位,助力地方经济。

环保效益上,该技术通过清洁能源生产和建筑节能,减少化石能源消耗和有害气体排放,改善生态环境;光伏组件阵列减缓屋面基层碳化速度60%,降低建筑垃圾,践行绿色低碳理念。

### 结束语

本研究依托十堰郧阳区屋顶分布式光伏发电项目,研发BIPV光伏建筑一体化“防水-发电-结构”协同施工技术,解决传统光伏施工痛点。该技术构建三维协同体系,采用“力学-流体-能效”方法,结合模块化排水等设计实现协同优化,有降本增效等优势。工程实测,可满足抗震等要求,提升发电量、缩短周期、降低成本。

本技术核心创新有四方面:一是体系创新,首建“防水-发电-结构”三维协同体系与分析方法;二是工艺创新,研发模块化排水系统,降低水流阻力,破解渗漏难题;三是适配创新,提出破损彩钢瓦屋面改造方案,拓展应用场景;四是设计创新,建立“发电效率-景观布局”双优化模型,解决景观与设施不协调问题。

在“双碳”目标下,本技术以“光伏+”为核心,适配多场景,耦合储能系统可提升能源供给稳定性。未来可从三方面深化应用:优化特定场景方案,拓展边界;结合新技术构建智能管控体系,提升精度与效率;完善评价体系,推动技术落地,助力产业融合,支撑“双碳”目标。

### 参考文献

- [1]GB50009-2012(2019版),建筑结构荷载规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [2]GB/T51368-2019,建筑光伏系统应用技术标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [3]李刚,王鹏.光伏建筑一体化屋面防水施工技术研究[J].建筑技术,2024,55(2):189-192.
- [4]国家能源局.分布式光伏发电开发建设管理办法[Z].国能发新能规〔2025〕7号,2025.