

建筑一体化光能利用设计与实践

梁水保，刘同飞

华润电力技术研究院有限公司，广东 深圳 518057

DOI:10.61369/WCEST.2025050005

摘要：建筑一体化光能利用将太阳能技术与建筑设计深度融合，实现能源生产与建筑功能的协同优化，是降低建筑能耗、改善能源结构的重要路径。本文系统梳理建筑一体化光能利用的设计原理与关键技术，从建筑选址、材料选型、系统集成三个维度分析设计要点，结合住宅与商业建筑两类实践案例验证技术应用效果，进而剖析当前面临的技术、成本与政策挑战，并提出针对性对策。研究表明，通过科学的设计方案与技术选型，建筑一体化光能利用系统可实现年均 15%–30% 的建筑能耗替代率，兼具环境效益与经济价值，未来需通过技术创新、政策扶持与市场培育加速推广应用。

关键词：建筑一体化；光能利用；光伏建筑一体化（BIPV）；太阳能热利用；系统集成设计

Integrated Design and Practice of Building Energy Utilization

Liang Shuibao, Liu Tongfei

China Resources Power Technology Research Institute Co., LTD., Shenzhen, Guangdong 518057

Abstract : Integrated solar energy utilization in architecture deeply integrates solar technology with building design, achieving synergistic optimization between energy production and architectural functions. This approach serves as a crucial pathway to reduce building energy consumption and improve the energy structure. This paper systematically examines the design principles and key technologies of integrated solar energy utilization in architecture, analyzing design considerations from three dimensions: site selection, material selection, and system integration. Practical case studies of residential and commercial buildings validate the application effects of these technologies, while addressing current challenges in technology, cost, and policy. Research demonstrates that through scientific design solutions and technology selection, integrated solar energy utilization systems can achieve an average annual energy substitution rate of 15%–30%, delivering both environmental benefits and economic value. Future efforts should focus on accelerating adoption through technological innovation, policy support, and market cultivation.

Keywords : building integration; light energy utilization; building-integrated photovoltaics (BIPV); solar thermal utilization; system integration design

引言

随着全球工业化进程加快，化石能源过度消耗引发的能源短缺与环境污染问题日益严峻。我国建筑运行阶段能耗占全社会总能耗的 21.7%，其中供暖、照明、热水供应等需求占比超 60%，能源结构转型需求迫切。太阳能作为清洁、可再生的新能源，其开发利用成为建筑行业低碳转型的核心方向。建筑一体化光能利用打破传统“建筑 + 太阳能设备”的简单叠加模式，将光能收集、转化与存储系统融入建筑设计全过程，实现“建筑即能源站”的功能升级。一方面，该技术可直接为建筑提供电力与热能，降低对市政能源的依赖，减少碳排放；另一方面，通过与建筑外观、结构的协同设计，避免传统太阳能设备对建筑美学的破坏，提升建筑整体品质。从行业发展视角看，建筑一体化光能利用不仅是实现“双碳”目标的关键技术路径，更是推动建筑行业从“高能耗建造”向“低能耗运营”转型的重要抓手，具有显著的环境、经济与社会意义^[1-3]。

作者简介：梁水保（1991.06-），男，壮族，广西柳州人，助理工程师，本科，研究方向：太阳能光伏与建筑数字化方向。

一、建筑一体化光能利用设计原理与关键技术

(一) 设计基本原理

1. 光能收集与转化机制

建筑一体化光能利用的核心是实现太阳能向电能与热能的高效转化，其机制基于两种技术路径：光伏转化与光热转化。光伏转化通过半导体材料的光生伏特效应实现，当太阳光照射光伏组件时，光子激发半导体中的电子跃迁，形成电流，经逆变器转化为交流电供建筑使用或并入电网；光热转化则通过吸热材料吸收太阳辐射能，将其转化为热能加热介质（如水、空气），用于建筑供暖或热水供应。影响转化效率的关键因素包括：一是太阳辐射条件，需根据建筑所在地的太阳高度角、日照时长、辐射强度优化系统布局；二是材料性能，光伏组件的转换效率（当前主流单晶硅组件效率达 23%~25%）、光热材料的吸热率（优质真空管吸热率超 90%）直接决定转化效果；三是系统匹配性，如光伏逆变器的最大功率跟踪（MPPT）精度、光热系统的换热效率，需通过优化设计实现能量损失最小化^[4]。

2. 与建筑结构融合原则

建筑一体化光能利用需遵循“安全优先、功能协调、美学统一”三大原则。安全方面，太阳能系统的荷载（如光伏组件重量约 15~20kg/m²）需纳入建筑结构设计，确保满足抗风、抗震、承重要求；同时，电气系统需符合《民用建筑电气设计标准》，避免漏电、火灾等安全隐患。功能协调方面，需平衡光能利用与建筑使用需求，如光伏遮阳系统需兼顾发电与遮阳效果，避免影响室内采光；光热系统需匹配建筑热水用量，避免能源浪费。美学统一方面，太阳能组件的颜色、尺寸需与建筑外观协调，如光伏幕墙可采用透明或半透明组件，融入建筑立面设计；光伏屋顶可采用与屋面坡度一致的组件，避免破坏建筑轮廓^[5]。

(二) 关键技术类型

1. 光伏建筑一体化（BIPV）技术

BIPV 技术是建筑一体化光能利用的核心，根据应用部位可分为三类：一是屋顶式 BIPV，将光伏组件替代传统屋面材料（如瓦片、彩钢板），适用于平屋顶与坡屋顶建筑，具有安装便捷、发电效率高的特点，典型案例为住宅屋顶光伏系统，年均发电量约 120~150kWh/m²；二是墙面式 BIPV，将光伏组件集成于建筑外墙（如幕墙、外墙板），适用于高层建筑，可充分利用垂直面的太阳辐射，但发电效率较屋顶低 15%~20%，需通过优化组件倾角提升效率；三是遮阳式 BIPV，将光伏组件设计为遮阳棚、遮阳百叶，兼具发电与遮阳功能，适用于夏热冬暖地区，可降低建筑空调能耗，实现“发电+节能”双重效益。

2. 太阳能热利用技术

太阳能热利用技术主要包括两类：一是太阳能热水系统，由集热器、储水箱、循环管道组成，根据集热器类型可分为真空管型与平板型，真空管型适用于寒冷地区，热效率高；平板型适用于温暖地区，安装灵活，可集成于建筑屋面或墙面，典型住宅项目的太阳能热水系统可满足 60%~80% 的热水需求，年均节能约 1500kWh/户；二是太阳能供暖系统，通过集热器收集热量，

经换热器加热供暖循环水，适用于北方地区，可与燃气壁挂炉、热泵系统组成复合供暖系统，降低化石能源消耗，某北方住宅项目应用该技术后，冬季供暖能耗降低 40%~50%，碳排放减少约 0.8t/m²^[6]。

二、建筑一体化光能利用设计要点

(一) 建筑选址与朝向设计

建筑选址需结合太阳辐射条件与气候特征，优先选择地势开阔、无遮挡的场地，避免周边高层建筑、树木遮挡阳光。对于北半球建筑，最佳朝向为南向，可获得最大日照时长；东西向次之，但需通过优化组件倾角补偿辐射损失。不同气候区的设计策略存在差异：北方寒冷地区需强化南向光能收集，提升供暖效率；南方夏热地区需兼顾南向发电与东西向遮阳，降低空调能耗；高原地区太阳辐射强，可适当增加光伏组件面积，提升能源自给率。

(二) 光伏组件与建筑材料选择

1. 光伏组件选型

光伏组件选型需综合考虑效率、成本、耐久性与外观。当前主流组件类型包括：单晶硅组件，转换效率高（23%~25%）、寿命长（25~30 年），但成本较高，适用于对效率要求高的项目；多晶硅组件，效率中等（20%~22%）、成本较低，适用于大面积推广；薄膜组件，柔性好、外观美观（可制成透明或彩色），但效率低（15%~18%）、寿命短（15~20 年），适用于对外观要求高的建筑（如商业幕墙）。此外，需根据建筑功能选择组件类型，如住宅屋顶可选用标准尺寸组件（166mm×166mm），商业幕墙可选用定制化尺寸组件，确保与建筑立面协调。

2. 建筑材料适配

建筑材料需与太阳能系统兼容，确保安全性与耐久性。屋面材料方面，坡屋顶建筑需选用与光伏瓦片匹配的防水卷材，避免漏水；平屋顶建筑需采用承重能力强的屋面结构，如混凝土屋面，满足光伏支架安装需求。墙面材料方面，光伏幕墙需选用高强度玻璃（如超白钢化玻璃），确保抗风压性能；外墙板需与光伏组件的安装接口匹配，简化施工流程。此外，材料的热工性能需与太阳能系统协同，如光热集热器周边需采用保温材料（如聚氨酯保温板），减少热量损失；光伏组件背面需预留通风间隙，降低组件工作温度，提升发电效率^[7]。

(三) 系统集成设计

1. 电气系统集成

电气系统集成需实现光伏发电、储能、电网与建筑用电的协同。电路设计方面，需根据光伏组件容量确定串并联方式，避免局部阴影导致的“热斑效应”；逆变器选型需匹配组件功率，如 10kW 光伏系统选用 10~12kW 逆变器，确保最大功率跟踪精度。电网连接方面，需符合《分布式光伏发电并网技术要求》，低压并网（380V）适用于户用项目，高压并网（10kV）适用于商业项目，同时安装防逆流装置，避免电能倒送影响电网安全。储能系统集成方面，需通过控制器实现“光伏优先、储能补电、电

“网备用”的运行模式，如白天光伏发电量大于建筑用电量时，多余电能存入储能系统；夜间或阴天储能系统放电供建筑使用，不足部分由电网补充。

2. 热系统集成

热系统集成需实现太阳能热利用与建筑供暖、热水系统的无缝衔接。太阳能热水系统需与建筑热水管网串联，设置辅助加热装置（如电加热器、燃气热水器），确保热水供应稳定；循环管道需采用保温材料包裹，减少热量损失，同时安装温控阀，避免水温过高导致的安全隐患。太阳能供暖系统需与建筑供暖管网集成，通过换热器实现热量传递，避免腐蚀问题；同时与辅助供暖系统（如燃气壁挂炉）联动，当太阳能热量不足时，自动启动辅助系统，确保室内温度达标。此外，热系统需设置排气阀、排污阀，便于系统维护，延长使用寿命^[8]。

三、建筑一体化光能利用面临的挑战与对策

（一）技术挑战与突破路径

当前建筑一体化光能利用面临三大技术瓶颈：一是光伏组件效率与建筑适配性的矛盾，高效单晶硅组件多为刚性结构，难以满足曲面建筑、异形立面的安装需求；二是系统集成兼容性不足，光伏、光热、储能与建筑原有能源系统（如中央空调、供暖管网）的接口不统一，易出现“信息孤岛”，导致能源调度效率低下；三是储能技术存在短板，锂电池储能存在寿命短（5–8年）、低温性能差（–10°C以下容量衰减超30%）的问题，难以适应北方寒冷地区需求^[9]。

突破路径需从三方面发力：一是研发新型光伏材料，如柔性钙钛矿光伏组件，其转换效率已达28%，且可弯曲、重量轻（约5kg/m²），适用于异形建筑；二是制定系统集成标准，参考《光储直柔建筑技术标准》，统一设备接口与通信协议，实现“光伏–储能–建筑负荷”的智能联动；三是探索多元储能技术，如将相变储能材料（如石蜡）与建筑墙体结合，实现热能存储，或发展氢储能技术，满足长期、大容量储能需求，某试点项目应用氢

储能后，能源自给率提升至85%以上。

（二）成本挑战与控制策略

成本高是制约建筑一体化光能利用推广的核心因素，主要体现在三方面：一是初始投资高，当前BIPV系统造价约12–15元/W，是传统光伏系统的1.5–2倍，商业光伏幕墙造价更是高达2000–3000元/m²，远超普通玻璃幕墙；二是运维成本不确定，光伏组件清洗、储能电池更换等运维费用缺乏长期数据支撑，部分项目因运维不当导致系统效率逐年下降（年均衰减超5%）；三是补贴政策退坡，国内分布式光伏电价补贴逐步取消，项目投资回报周期延长，企业投资意愿降低。

成本控制需采取“降本+提效+政策”组合策略：一是推动产业规模化，通过扩大产能降低组件成本，如柔性钙钛矿组件量产后期望成本降至8元/W以下；二是优化设计与施工，采用模块化安装技术，减少现场施工周期（如某项目采用预制光伏屋面模块，施工效率提升40%），降低人工成本；三是完善市场化机制，推广“合同能源管理（EMC）”模式，由能源服务公司承担初始投资与运维，建筑业主按节省电费的比例支付费用，降低业主资金压力；四是加大政策支持，如对BIPV建筑给予容积率奖励（如增加0.2–0.3），或提供专项贷款（利率下浮10%–15%），某省份实施该政策后，BIPV项目数量同比增长60%^[10]。

四、结论

本文通过理论分析、案例验证与问题剖析，得出以下结论：一是建筑一体化光能利用通过“设计–技术–运营”协同，可实现年均15%–30%的建筑能耗替代率，是建筑行业低碳转型的关键路径；二是技术选型需因地制宜，北方地区优先发展太阳能供暖与屋顶BIPV，南方地区侧重光伏遮阳与幕墙BIPV，高原地区可扩大组件规模提升能源自给率；三是当前技术、成本、政策挑战可通过新型材料研发、规模化降本、政策机制创新逐步解决，案例表明科学设计的项目投资回收期可控制在8–12年，兼具经济性与环境效益。

参考文献

- [1] 王健, 刘艳峰, 周伟. 光伏建筑一体化(BIPV)系统设计与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2020: 45–68.
- [2] 张军, 李帆, 赵伟. 柔性钙钛矿光伏组件在异形建筑中的应用研究 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 123–130.
- [3] 刘长滨, 王怡. 建筑一体化光能利用项目成本控制与效益分析 [J]. 建筑经济, 2021, 42(8): 35–40.
- [4] 李明, 陈晓东. 合同能源管理模式在BIPV项目中的应用实践 [J]. 可再生能源, 2022, 40(10): 135–141.
- [5] 龙海珊. 物流园区光伏发电系统设计要点 [J]. 建筑电气, 2024(09).
- [6] 劳大实, 欧阳东, 胡魁琦. 双碳智慧园区建筑电气节能系统设计探讨 [J]. 绿色建造与智能建筑, 2024(07).
- [7] 林子富. 分布式光伏发电项目接入电力系统的技术研究 [J]. 电气技术与经济, 2023(03).
- [8] 谭志昆. 光伏建筑一体化光伏系统设计探讨 [J]. 建筑电气, 2022(10).
- [9] 徐征龙, 高长伟, 李东宇, 张凤军. 分布式光伏逆变器虚拟惯性和阻尼综合控制 [J]. 东北电力技术, 2022(05).
- [10] 袁绍军, 郭金智, 尹兆磊, 潘立巍. 单相逆变器双环+时滞的复合控制方法研究 [J]. 电力电子技术, 2022(08).