

太阳能光伏建筑一体化应用与发展探索

魏莹

中建科工集团有限公司

摘要：本文以太阳能光伏建筑一体化作为切入点，简要叙述光伏建筑一体化技术的涵义、特点、优缺点与实现要求。随后，详细阐述太阳能光伏建筑一体化技术在现代建筑工程中的应用方法，探讨光伏建筑一体化的国内外发展现状，并对光伏建筑一体化的未来发展趋势进行展望。旨在论证光伏建筑一体化的应用可行性，由此来拓展建筑建造思路，在理论与技术层面为光伏建筑的大规模应用推广奠定坚实基础，推动我国建筑业迈向全新发展阶段。

关键词：太阳能光伏建筑；一体化技术；发展趋势

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2022.09.117

近年来，为积极响应可持续发展与低碳减排战略号召，对现代建筑工程的节能属性提出了更高要求，光伏建筑一体化技术应运而生，以太阳能作为辅助能源来取代部分电能，在降低线损量、减少室内空调冷热负荷量、遮阳防晒等方面取得极为显著的节能效果。对光伏建筑一体化的应用推广，是现代建筑乃至我国建筑业的必然发展趋势，本文就此开展研究。

一、太阳能光伏建筑一体化技术概述

（一）光伏建筑一体化涵义

光伏建筑一体化简称为BIPV技术，是由太阳能光伏系统与建筑系统相互结合的全新概念，在建筑围护结构外表面上搭建光伏电池组件与配套设备，或是将光伏系统纳入建筑主体结构体系当中，在保证建筑使用功能正常发挥的前提下，持续把所接收太阳光辐射能量转换为电能进行供电，在昼间把多余电能临时储存，或是并入电网中输出盈余电量。相比于普通的BAPV光伏建筑，BIPV建筑的结合程度更为深度，光伏组件将以光电瓦屋顶、光电幕墙以及光电采光顶等形式进行应用，并非在建筑结构上额外放置光伏组件^[1]。

（二）光伏建筑一体化优缺点

相比与传统建筑，一体化光伏建筑有着无需占用额外地面空间、原地发电用电、建筑节能效果显著、明显改善建筑围护结构热工性能、建筑光伏发电期间不排放污染物与消耗化石能源、减少二氧化碳排放量、可根据建筑情况自由搭配光伏发电容量、减少建筑装饰材料耗用量等突出优势，有利于全面提升建筑工程的社会、经济与环境效益。例如，从经济效益角度来看，虽然前期需要投入大量费用来采购光伏组件，但可以通过光伏模块替代建筑外装饰材料来压低工程造价，并在后续建

筑使用期间持续将太阳能转换为电能，通过减少用电费用、向电力企业售卖盈余电量来获取经济效益。

此外，根据当前实际应用情况来看，光伏建筑一体化技术存在着成本高昂、发电效果稳定性差的缺陷不足，限制了光伏建筑一体化的大规模应用推广。其中，成本高昂缺点在于，光伏建筑的设计与施工成本较为高昂，组建模块采购价格也高于普通的光伏组件价格，相同单位下的光伏发电成本是常规发电成本的2-3倍，虽然可以减少建筑全寿命周期的总体使用成本，但投资回报率在普遍在10-15年，如果在期间出现光伏组件损坏、老化腐蚀等问题，还将产生额外的维修成本，拉长投资回报周期。而发电效果稳定性差缺点在于，光伏系统发电效率受气候条件的直接影响，日照时间越短、太阳光强度越低，则实际发电量越少。同时，在光伏系统发电功率频繁波动时，还有可能引发一系列电气故障的出现，存在发电安全隐患^[2]。

（三）实现要求

为取得理想应用效果，避免因搭建光伏系统而影响到建筑物的正常使用。因此，当建筑企业应用光伏建筑一体化技术时，必须结合工程情况，判断是否满足力学性能、美学、电学性能配合三方面的要求。其一，力学性能要求在于，综合分析建筑楼层高度、安装方式等因素，获取准确力学计算结果，根据结果来选择一体化结合形式与光伏组件规格，如在某高层建筑中，选择在循环式双层幕墙体系中使用2块6mm厚钢化超白玻璃夹胶光伏组件，确保光伏组件不会在受力状态下出现破裂、变形等质量通病。其二，美学要求在于，在安装光伏组件容易破坏建筑外立面造型的美感，可以从设计层面加以改进，如把光伏系统的接线盒、旁路二极管埋置在幕墙骨架当中，既可以改善外立面整体效果，还可以阻挡雨水侵蚀线盒管路。其三，电学性能配合要求在于，在建筑外立面上合理排列光伏组件，不得因各区域光伏组件的形状尺寸不同而形成差异电压电流，确保各处光伏组件的电学性能在标准值上下限定范围内。

二、太阳能光伏建筑一体化技术的应用方法

（一）光伏组件与建筑的结合

光伏组件与建筑结合是在建筑表皮上以附着形式安装光伏方阵，把建筑物本体结构视为光伏系统的支撑载体，具体结合方式包括屋顶光伏方阵、墙面光伏方阵两种。其中，屋顶光伏方阵是在建筑屋顶部位安装曲面或是平板形式的光伏电池板，在周边安装逆变器、控

制器与蓄电池等配套设备,在屋顶处形成一个小光伏发电系统。墙面光伏方阵则是利用建筑外墙面上的空闲位置,固定安装光伏电池板,如在阳台外侧倾斜安装电池板,墙面方阵可与屋顶方阵一同使用,有着整体发电效率高、充分利用太阳能直射、光伏电池板可倾斜角度安装的优势,但会对建筑外立面造型美观度造成一定程度的影响,当前仅在少数建筑工程中采取到屋顶光伏方阵、墙面光伏方阵作为一体化结合形式。此外,在制定屋顶/墙面光伏方阵安装方案时,需要综合分析太阳位置、建筑朝向、日照时间、建筑物高度等因素,确定最佳的光伏板朝向位置、间隔距离和安装方式。例如,在安装屋面光伏方阵时,可选择采取自然坡度平铺方式,各排组件间不存在阴影遮挡问题,无需预留间隔距离来躲避阴影,仅需在屋顶上预留宽度在0.5-0.6m的检修通道即可,以此来增加光伏面积、提高发电容量^[3]。

(二) 光伏组件与建筑的集成

光伏组件与建筑集成是将光伏材料视为一种建筑材料,在建筑围护结构施工期间使用大量的光伏组件,所搭建光伏方阵既可以持续将太阳光辐射能量转换为电能,同时,还将起到遮阳防晒、隔热保温、室内自然采光等多种作用。目前来看,在现代建筑工程中,光伏组件与建筑集成形式主要分为光伏采光顶、光伏屋顶、光伏幕墙、光伏遮阳板四种,不同结合形式的结构组成、应用效果存在明显差异,具体如下。

第一,光伏采光顶。在建筑屋顶部位安装半透明状或全透明状的光伏玻璃组建,既可以通过大面积安装光伏组件来增加光伏发电容量,还可以取得室内自然采光、屋顶遮风挡雨、提高建筑外立面美观度等额外作用,多用于周边无高大建筑遮挡的建筑工程,大连国际会议中心、广州南站、保定城市低碳公园等项目都采取这一结合形式^[4]。同时,需要着重关注光伏阵列倾角问题,根据当地日照时间、太阳位置来计算最佳倾角,例如,在我国南方与北方地区,要求阵列倾角分别超过当地纬度的 $5^{\circ}-10^{\circ}$ 与 $10^{\circ}-15^{\circ}$ 。

第二,光伏屋顶。以光伏屋面瓦作为光伏组件,在建筑屋面上铺设具备光伏发电功能的屋面瓦,无需安装其他发电设备,由太阳能屋顶彻底取代普通建筑屋顶,其有着发电容量大、造价成本低廉、易于安装的显著优势。与此同时,考虑到光伏屋面瓦始终裸露在外,受到雨水侵蚀和外部环境侵蚀,如果屋面瓦出现破裂破损问题,会对屋面功能发挥和建筑室内环境造成明显影响,要求建筑企业挑选具备良好承载能力、防火防水能力与抗冲击能力的光伏屋面瓦,如使用高岭土、纤维增强体与黏土等材料制备的陶瓷光伏屋面瓦。

第三,光伏幕墙。在建筑围护结构上安装光伏玻璃组件来取代玻璃面板,组件是在多片玻璃夹层内放入

PVC胶片复合电池片,由电池片吸收透过玻璃照射入内的太阳光,持续把辐射能量转换为电能,可以根据室内自然采光要求来选用透明幕墙或是非透明幕墙形式,这类光电幕墙有着可直接作为建筑围护与光伏支撑结构的优势,但系统发电容量和输出功率相对较低,是当前最为常见的光伏建筑一体化结合形式。

第四,光伏遮阳板。这一形式简称为光电遮阳,在建筑墙体外侧设置遮阳板,在板上固定铺设太阳能电池片,由遮阳板阻挡太阳光射入室内环境,并由电池片来吸收太阳光辐射能量,同时起到遮阳防晒、光伏发电两项作用。与此同时,可以根据建筑遮阳要求来细化光伏遮阳板形式。例如,在建筑具备室内自然采光要求时,可以在建筑外墙处安装透明状光伏玻璃组件作为遮阳板,将部分太阳光射入室内环境,且不会因太阳光照射而明显提高室内温度。也可以选择安装具备跟踪调节功能的光电遮阳系统,系统根据太阳位置变化来自动调节遮阳板角度,或是由使用者根据室内采光要求来调整遮阳板角度^[5]。

(三) 光伏光热建筑一体化

目前来看,受到材料、技术等诸多因素限制,一体化光伏建筑的光电转换效率普遍在20%左右,仅能吸收太阳光中的少部分辐射能量,剩余能量会透过光伏系统进入建筑室内环境,由此造成室内温度升高、空调冷负荷量增加等一系列后果。对此,近年来提出光伏光热建筑一体化的全新概念,强调在建筑物中同时安装光伏组件与集热模块,由光伏组件从太阳光中吸收部分辐射热量并转化为电能,再由集热模块收集太阳光中的剩余辐射热量,使用热量来加热淋浴用水,把水温加热至 $40-60^{\circ}\text{C}$ 左右。如此,即可以避免因室外太阳光照射而明显提高室内温度,还可以在实质层面做到对太阳辐射能量利用率的显著提升,由此取得额外的节能效果。例如,在某住宅建筑工程中,选择在屋顶部位施作光伏采光顶,在采光顶下方与阳台部分嵌入安装太阳能集热器的真空管,由光伏系统与光热系统相互配合,分多次吸收太阳光中蕴含的辐射热量^[6]。

三、太阳能光伏建筑一体化的发展现状及未来发展趋势

(一) 发展现状

在化石能源供需紧张、生态环境遭受严重破坏的时代背景下,太阳能光伏建筑一体化技术一经问世,便在建筑工程领域中得到广泛关注,世界各国都出台相关政策来扶持新型光伏建筑,并在若干工程案例中充分论证了光伏建筑一体化的显著应用价值。例如,日本在1974年推出“新能源技术研究开发计划”,强调于长期性、综合性的研发太阳能电池技术,在20世纪80年代末进入住宅用太阳能系统的实用阶段,并于1994年推出“新阳

光计划”，向搭建光伏系统的住宅建筑所有人提供一定额度的补偿金，截止到2016年底，日本住宅建筑与全部建筑的光伏系统总装机量分别超过9GW和36GW。同时，光伏建筑一体化技术在甲府市政厅、横滨钻石大厦、藤泽智能街区等项目中得到应用。以甲府市政厅项目为例，在高层屋顶安装448枚233W单晶太阳能电池组件，在外围遮阳棚上安装648枚133.5W单晶太阳能电池组件，在低层屋顶安装471枚233W单晶太阳能电池组件，光伏系统总装机量达到300KW，在2014年5-8月份的月平均发电量为30MWH，占据市政厅总耗电量的17%^[7]。

我国为加快光伏建筑一体化的发展进程，陆续发布《关于支持加快太阳能光电建筑应用的政策解读》等政策文件，设立包括国家电投总部大楼、北京大兴国际机场、嘉兴秀洲光伏科技馆在内的多项示范项目，积累了较为丰富的光伏建筑一体化技术应用经验。例如，在国家电投总部大楼项目中，在大厦三面应用汉能推出的薄膜太阳能发电技术，光伏总装机量达到170.66kWp，预计在使用寿命内的年均发电量控制在12.69万kWh，可以节省70.9万kW能耗和减少超过20t的碳排放量。

（二）未来发展趋势

现阶段，根据光伏建筑一体化技术应用情况来看，主要面临着前期建造成本高昂、光电转换效率偏低的问题，使得部分建筑企业对此项技术心存顾虑，出于成本和投资回报周期等因素着想，并未在承接项目中应用到光伏建筑一体化技术，或是将光伏总装机量控制在一定范围内。对此，需要着重推动光伏建筑一体化技术朝低成本化、高光电转换效率方向发展。

第一，低成本化。随着光伏组件制造工艺的成熟，以及生产规模的扩大，建筑光伏系统的建造成本呈现出逐年稳步递减的发展态势，以日本为例，在1992年-2005年，得益于配套工艺技术的更新换代，光伏建筑建造成本由每千瓦370万日元降低至每千瓦70万日元，成本减少了80%。同时，各国政府推出光伏建筑推广计划，向新一代光伏建筑提供不同比例的政府资助，如日本在新阳光计划中把政府资助比例设定在33%-50%，意大利在1万屋顶计划中把政府资助比例设定为75%-80%，德国在10万屋顶计划中把政府资助比例设定为38%，我国则从发电量补贴、建设补贴等方面着手。

第二，高光电转换效率。各代光伏电池的光电转换效率都有所不同，如第二代碲化镉光伏电池的平均与最大光电转换效率分别为14.7%与21.5%，铜铟镓硒光伏电池在玻璃基上的平均光电转换效率接近20%，而第三代电池中的钙钛矿光伏电池理论层面上的平均光电转换效率将提升至25.2%。同时，在光伏建筑建造期间，建筑企业还可以采取设定最佳倾角、调节光伏组件角度等措施来提高实际光电转换效率。

此外，为兼顾建筑工程的低碳节能与生态环保目标，赋予建筑物崭新的生命力，需要从建筑表皮设计方面着手，既把建筑表皮视为光伏组件的支撑载体，同时，将建筑表皮当作沟通建筑室内空间与室外自然环境的重要窗口，推动光伏建筑一体化技术的生态发展。例如，优先使用由废弃材料再生利用、同时具备保温隔热与遮阳防晒等多项使用功能的光伏组件，如在高雄市太阳能体育场项目中，总计覆盖8844块太阳能电池板，在看台顶棚部位使用玻璃压缩制成的光电板，年均发电量超过110万度，等同于减少660吨碳排放量，并取得70%左右的遮光效果，这也是世界上最大的太阳能光伏单体建筑之一。同时，在保定市电谷锦江国际酒店项目中，于建筑的东、西、南侧立面上使用黑色光伏玻璃幕墙作为建筑表皮，光伏系统并网容量为300KW，既可以满足建筑大楼公共照明用电需求，同时，建筑表皮还具备自然通风的使用功能，在室内空气较为浑浊、或是室内温度超过25℃时，自动开启光伏玻璃幕墙在顶部及底部设置的百叶，起到通风降温作用，由此来提高室内空气质量、减少室内空调冷负荷量。

结语

综上所述，光伏建筑一体化概念的提出，为我国建筑业带来了全新发展契机，也为超低能耗与零能耗建筑的实现指明了具体方向。建筑企业和从业人员都需要提高对光伏建筑一体化技术的重视程度，深入了解技术的各个方面，结合工程情况采取与建筑结合、与建筑集成和光伏光热建筑一体化的应用方法，并推动光伏建筑一体化技术朝低成本、高光电转换效率、建筑表皮生态化方向发展，以此来推动我国建筑业的健康发展。

参考文献

- [1] 文道源, 高伟俊. 日本光伏建筑的发展与应用[J]. 建筑学报, 2019 (S2): 24-28.
- [2] 郑钧曦, 赵丽. 太阳能光伏建筑一体化系统应用分析[J]. 现代建筑电气, 2017, 8 (04): 53-55+66.
- [3] 叶雪华. 杭州地区太阳能光伏建筑一体化应用分析[J]. 建筑节能, 2014, 42 (04): 30-34.
- [4] 喻扬帆. 太阳能光伏建筑一体化及应用与发展前景[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2014 (12): 323-324.
- [5] 吝鹏飞. 生态建筑表皮与光伏建筑一体化研究[D]. 河北工程大学, 2014.
- [6] 李庆党, 和学泰, 李子良, 祝方舟. 光伏建筑发展与经典案例[J]. 建筑技术开发, 2022, 49 (04): 1-6.
- [7] 周文波. 碳中和背景下的光伏建筑一体化发展趋势[J]. 现代雷达, 2021, 43 (07): 98-99.