

基于建筑结构适配性的屋顶光伏系统优化设计研究

贾嵩 汪陈威 吴埏淳 王道 林森

华能东莞燃机热电有限责任公司 广东东莞 523590

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17631

[摘要] 屋顶光伏系统与建筑结构适配性欠佳会引发安全隐患、功能冲突等状况。本文着重关注建筑结构特性与光伏系统的协同适配需求,剖析核心适配要素与理论关联,搭建适配性优化设计体系,围绕结构特性匹配、功能协同优化等方面开展理论探讨,给出系统性优化策略,达成光伏系统安装与建筑结构安全的有机结合,为屋顶光伏系统的科学设计及规范化应用给予理论支持与实践指引。

[关键词] 建筑结构; 屋顶光伏; 适配性; 优化设计; 结构协同; 安装规范

引言

在“双碳”目标的大背景之下,屋顶光伏系统已然成为建筑领域里达成节能减排的关键载体,然而其与建筑结构适配性出现失衡的状况,对该行业的发展形成了一定的限制。在传统的设计模式当中,光伏系统的设计和建筑结构的特性相互脱离,容易引发如结构承载超出限度以及围护体系遭到破坏等一系列问题。本文以建筑结构的本质属性为立足点,对适配性的核心理论展开深入分析,构建起一套科学的优化设计框架,以此为实现屋顶光伏系统和建筑结构的协同发展开拓新的思路。

一、建筑结构特性对屋顶光伏系统设计的影响机制

(一) 结构形式的影响机制

建筑结构形式直接决定着光伏系统的安装基础以及设计方案,不同结构形式在力学特性与空间布局方面存在差异,这会对光伏系统的布局方式以及支架选型产生根本性的影响。混凝土结构屋面有承载力强以及稳定性好的特点,然而其表面平整度与节点构造决定了支架的安装方式;钢结构屋面重量较轻且跨度较大,不过节点连接的可靠性以及抗疲劳性能对光伏系统安装提出了更高要求;砌体结构屋面承载力较低,这限制了光伏系统的安装容量与密度。结构形式的影响机制体现在“结构特性决定设计边界”,进行光伏系统设计时需依据结构形式的力学特性,选择适配的安装模式,避免因结构形式不匹配而导致设计不合理的问题^[1]。

(二) 结构服役状态的影响机制

结构服役状态包含结构使用年限、材料老化程度以及损伤情况等方面,其影响机制体现在对光伏系统设计安全系数

以及安装方式的限制方面。新建建筑结构性能处于最佳状态,可采用常规安装方式以及设计参数;而对于老旧建筑,结构材料存在不同程度的老化与腐蚀现象,承载力有所降低,需要提高安全系数,采用轻量化、分散式的安装方案。结构服役状态的影响还体现在荷载预留量的计算当中,服役年限较长的建筑,需要考虑材料强度衰减因素,适当降低光伏系统附加荷载设计值,以保证结构安全。对于存在过往损伤的建筑结构,需要在光伏系统设计之前进行修复加固,防止损伤部位因荷载叠加而恶化。

(三) 结构力学特性的影响机制

结构力学特性覆盖了结构刚度、抗震性能以及抗风承载力等方面,这些特性对于光伏系统设计的影响主要体现在系统抗风险能力的匹配性之上。结构刚度可决定其变形程度,刚度较大的建筑结构变形量相对较小,此时光伏系统可以采用刚性连接方式;而刚度较小的结构变形量会比较大,这种情况下就需要采用柔性连接设计来适应变形。抗震性能会对光伏系统的节点连接设计产生影响,在地震高发区域需要采用抗震型支架和连接节点,以此提高系统抗地震冲击的能力。抗风能力则决定了光伏系统的固定方式,在强风区域需要加强支架锚固强度,防止系统被风荷载破坏。结构力学特性的影响机制着重强调“风险等级匹配”,光伏系统的抗风险设计需要与建筑结构的力学性能相适应,保证在极端工况下两者都可保持稳定^[2]。

二、基于建筑结构适配性的屋顶光伏系统优化设计

(一) 承载力适配优化设计

承载力适配优化设计把“荷载精准匹配、传递路径合理”

当作核心理论，借助科学计算以及方案设计，达成光伏系统荷载跟建筑结构承载力的良好适配。要全面了解建筑结构承载力的实际状况，结合光伏系统荷载的特性，运用“精准计算—分级匹配—动态调整”这样的设计思路，能保证结构安全，又能充分运用建筑屋顶空间^[3]。

首先，要着手进行建筑结构承载力的全面检测与评估工作，运用无损检测技术对建筑结构展开全面排查，同时结合结构设计图纸以及竣工资料等，以此明确结构各个区域的承载力限值，建立起承载力分布图谱。针对不同区域存在的承载力差异，采用分级布局策略，对于承载力较高的区域，可以适当提升光伏组件的安装密度；而承载力较低的区域则采用稀疏布局或者不进行安装，以此保证荷载可均匀分布。在组件与支架选型方面，优先选择轻量化材料，比如铝合金支架以及超薄型光伏组件等，降低系统的自重荷载。对于荷载余量较小的建筑，采用“组件轻量化 + 支架模块化”的设计方式，减少单个模块的荷载集中情况。优化荷载传递路径，借助有限元分析软件模拟荷载传递过程，把光伏系统荷载直接传递至建筑主体结构，防止传递至非承重构件，支架安装点设置在结构受力核心区域，采用多点分散承载的方式，降低单个安装点的应力集中现象。建立动态监测机制，在光伏系统运行期间，实时监测结构应力的变化情况，如果发现应力接近限值，及时调整组件布局或者减少安装容量，保证承载力可长期适配。

（二）围护体系适配优化设计

围护体系适配优化设计围绕“功能协同、防护升级”这一理论核心展开，着重突出光伏系统安装与围护结构功能之间的有机结合，借助节点密封以及材料兼容等技术手段，达成“安装不破坏、功能不降低”的目的。

针对不同类型的屋面围护结构来制定差异化的安装方案，对于卷材防水屋面，采用“夹具固定 + 密封胶封堵”的工艺，安装支架的时候要防止螺栓穿透防水层，选择和卷材材质相兼容的密封胶，在支架底座与屋面接触的地方设置防水垫层，以此形成多重防水屏障。金属屋面运用“卡扣式连接 + 波形适配”的设计，依据屋面板波形定制专用支架，借助卡扣式固定方式与屋面板紧密结合，无需打孔，同时在支

架与屋面板接触处加装橡胶垫片，提高密封性能。混凝土屋面采用“预埋套管 + 防水砂浆封堵”的技术，预先在屋面预留安装孔洞，安装完毕后用防水砂浆分层封堵，外侧涂刷防水涂料，保证节点防水的可靠性，优化保温隔热适配设计，在光伏组件与屋面之间预留合理的通风间隙，形成空气流通层，减少热桥效应。对于保温性能要求较高的建筑，在支架安装区域增设保温延伸层，避免因支架安装致使保温层断裂。选用低导热系数的支架材料，降低热量传递效率。

（三）变形协调适配优化设计

变形协调适配优化设计依据“变形同步、应力释放”理论展开，其核心要点在于借助柔性设计以及分区布置等方式，达成建筑结构与光伏系统之间的变形协调，防止附加应力的出现。

对连接节点设计给予优化，选用可滑动式支架节点，于支架和建筑结构的连接处设置滑动导轨，使其可沿着结构变形的方向产生一定的位移，该位移量依据结构变形的计算结果来确定，一般控制在±10mm的范围之内。在节点处添加橡胶缓冲垫或者弹簧减震器，借助弹性材料的变形能力来吸收结构振动以及温度变形所产生的应力，减少对光伏组件的冲击。采取分区布置的策略，依据建筑结构变形缝的位置对光伏阵列区域进行划分，每个区域都设置独立的伸缩段，伸缩段的长度按照结构变形量的计算来确定，以此保证各区域的光伏系统可独立变形，彼此之间不会产生干扰。对于大跨度建筑屋面，按照结构受力的特点划分成多个安装单元，每个单元之间预留出变形间隙，防止整体变形造成组件被挤压损坏。对光伏组件选型加以优化，挑选边框柔韧性佳且抗弯曲性能出色的组件，以此提升组件自身对于变形的适应能力，在组件连接时采用柔性导线，防止因出现变形致使导线受到拉扯而断裂。

（四）功能协同适配优化设计

功能协同适配优化设计围绕“协同增效、美学统一”这一理论核心展开，希望能够达成光伏系统发电功能同建筑结构使用功能以及美学功能的协同提升，收获“1+1>2”的综合效益。

推动光伏和建筑一体化设计工作，把光伏组件当作屋面装饰材料的一部分，依据建筑屋面的造型以及色彩搭配来挑

选适配的光伏组件，达成光伏组件与建筑外观的协调统一。针对平屋面建筑，运用“光伏遮阳棚”设计方式，光伏阵列按照一定倾角进行布置，能契合发电需求，还可作为屋面遮阳设施，降低建筑室内的温度；对于坡屋面建筑，把光伏组件与屋面瓦进行一体化设计，取代传统屋面瓦，实现防水、发电以及装饰等多重功能。对光伏系统布局与建筑功能的适配给予优化，依据建筑使用功能来划分屋面区域，于人员活动较为频繁的区域，采用“低高度加上防护栏杆”这种光伏阵列设计方式，以此保证人员的安全。在设备机房上方的区域，结合设备散热的需求，对光伏阵列间距加以优化，保障设备可通风散热。按照建筑朝向以及采光需求，对光伏组件布局作出调整，防止遮挡建筑的采光窗口。提高光伏系统和建筑能耗之间的协同性，依据建筑用电负荷的特性，对光伏系统容量设计给予优化，达成发电量和用电量的供需匹配，运用“自发自用、余电上网”模式，削减建筑用电成本。把光伏系统与建筑节能系统相联动，借助智能控制系统达成光伏电力在空调、照明等设备中的优先利用，提升建筑节能成效。

这一理论核心展开，着重突出光伏系统材料性能和建筑结构材料特性之间的匹配关系，以及安装工艺与建筑结构施工要求的协同状况。

对材料选型以及兼容设计优化，光伏支架材料要选用那种与建筑结构材料兼容性良好的类型。如果钢结构建筑，可以优先选用钢材支架；混凝土建筑则可以选用铝合金或者不锈钢支架，防止不同金属材料接触产生电化学腐蚀，支架表面进行防腐涂层处理，涂层材料要与建筑结构表面装饰材料兼容，不会发生化学反应。光伏组件封装材料选用耐候性强且与屋面材料热膨胀系数相近的类型，以此减少因温度变化而导致的材料变形差异。对不同结构类型的安装工艺优化，对于混凝土屋面运用“预埋式 + 膨胀螺栓固定”工艺，在建筑施工阶段预先埋设预埋件，使其能与混凝土结构紧密相连，后续安装支架时借助膨胀螺栓进行二次加固，以此提升连接的可靠性。钢结构屋面采用“焊接 + 螺栓紧固”工艺，支架与钢结构主体凭借焊接方式相连，在节点部位加装加强板来提高承载能力，同时利用螺栓实施二次固定，提高其稳定性。砌体结构屋面采用“穿墙螺栓 + 承重支架”工艺，借助穿墙螺栓把支架固定于建筑主体结构上，在支架底部设置承重垫板，扩大受力面积，防止砌体出现局部压裂的情况。

结语

本文聚焦于建筑结构适配性这一关键议题，对屋顶光伏系统优化设计的理论及实践之路展开探讨，经由剖析承载力、围护体系等适配性核心理论，明晰建筑结构特性对光伏系统设计的影响机制，构建了多维度优化设计策略。未来，有必要深入研究不同结构类型的适配规律，借助智能化技术提高设计精准度，促使屋顶光伏系统与建筑结构实现更紧密融合，为建筑领域绿色低碳发展给予更有力的技术支持。

[参考文献]

[1] 郑卉. 太阳能光伏系统在老旧住宅屋顶“绿色植入”的方案及效益[J]. 住宅与房地产, 2025, (27): 92-94.
 [2] 罗丹雪. 深度学习在屋顶光伏系统的多场景应用[D]. 云南财经大学. 2025. 000005.
 [3] 杜军, 房建军. 基于 PVsyst 的屋顶光伏电气系统优化设计[J]. 绿色建筑, 2024, (01): 52-57+68.

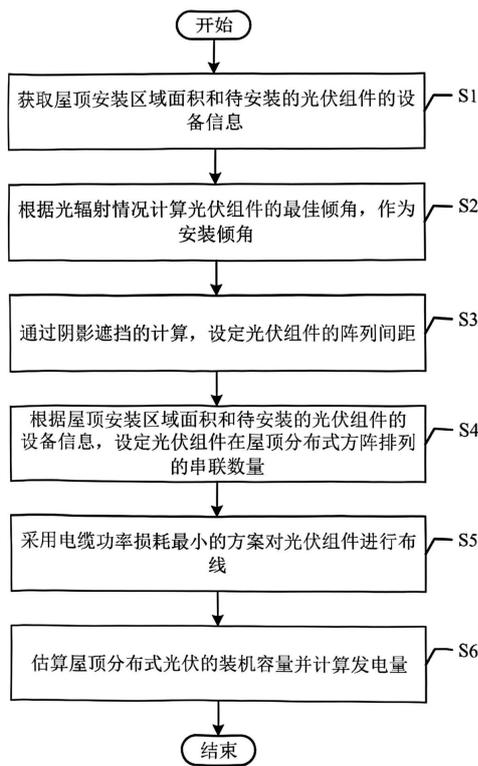


图 1 一种屋顶分布式光伏发电量优化计算方法与流程

(五) 材料与工艺适配优化设计

材料与工艺适配优化设计围绕“材料兼容、工艺适配”