

建筑光伏一体化系统的火灾风险建模与防控策略

蒋全洪

四川正平消防科技有限公司 四川凉山

【摘要】建筑光伏一体化系统在提升能源利用效率与推动绿色建筑发展方面具有重要价值，但其复杂的电气结构与建筑环境叠加，潜在火灾风险不容忽视。通过风险建模，可从电气故障、材料特性、安装工艺及运行环境等角度揭示火灾诱因与演化机理，并利用定量与定性相结合的方法评估危险水平。在此基础上，防控策略应聚焦于源头防范、实时监测、快速隔离与系统化管理，以实现风险最小化。本文构建的研究框架为建筑光伏一体化系统的安全运行提供了理论支撑与技术路径。

【关键词】建筑光伏一体化；火灾风险建模；防控策略；电气安全；绿色建筑

【收稿日期】2025年4月15日 **【出刊日期】**2025年5月12日 **【DOI】**10.12208/j.ace.2025000179

Fire risk modeling and prevention strategies for building photovoltaic integrated systems

Quanhong Jiang

Sichuan Zhengping Fire Technology Co., Ltd. Liangshan, Sichuan

【Abstract】 Integrated photovoltaic systems in buildings play a vital role in enhancing energy efficiency and advancing green architecture. However, their complex electrical structures combined with building environments pose significant fire risks that require attention. Through risk modeling, this study reveals fire triggers and evolution mechanisms from perspectives including electrical faults, material properties, installation techniques, and operational conditions. A combination of quantitative and qualitative methods is employed to assess hazard levels. Based on these findings, prevention strategies should focus on source control, real-time monitoring, rapid isolation, and systematic management to minimize risks. The research framework established in this paper provides theoretical support and technical pathways for safe operation of integrated photovoltaic systems in buildings.

【Keywords】 Integrated photovoltaic systems; Fire risk modeling; Prevention strategies; Electrical safety; Green building

引言

建筑光伏一体化的兴起，使能源转换设备与建筑结构紧密结合，既拓展了清洁能源利用的边界，也带来了复杂的安全挑战。高电压直流系统、大面积可燃材料以及环境耦合效应，使火灾风险表现出多维度与不确定性。近年来，相关事故案例频发，凸显出风险建模与科学防控的迫切性。通过深入剖析火灾发生的内在机制，并探索有效的预警与隔离措施，可在建筑节能与安全之间建立稳固的平衡，为未来城市能源系统的安全性与可持续性奠定基础。

1 建筑光伏一体化系统火灾风险的现实背景与突出问题

建筑光伏一体化系统在近年来的快速发展中，已

成为绿色建筑与清洁能源利用的重要方向。然而，将光伏组件与建筑外立面、屋顶及幕墙深度融合，使得传统电气系统与建筑材料、结构形态产生高度耦合，导致火灾风险呈现出新的复杂性^[1]。高电压直流电流的长期运行，加之电气连接点多、线路长度大、环境暴露程度高，使电弧放电、接触不良及短路等问题更易积累和诱发。同时，建筑本身常采用的保温层、密封材料和装饰构件存在一定可燃性，一旦局部过热或发生电气故障，极易形成初始火源并迅速蔓延，增加火灾的不确定性和破坏力。

在实际运行过程中，光伏组件长期暴露于高温、紫外辐射、风雨冲刷与粉尘沉积环境中，材料性能易发生衰减，组件绝缘层老化、接线盒失效等问题普遍存在，

这些因素共同加剧了系统的隐患。部分建筑在设计和施工阶段忽视了光伏系统与消防设施的协调匹配，造成火灾探测、报警与灭火措施滞后或缺位。再加上复杂的安装工艺与不均衡的维护水平，常常使得火灾风险无法在早期被有效识别。尤其在高层建筑或大型公共建筑中，一旦光伏系统引发火情，烟气蔓延路径复杂，扑救难度显著增加，不仅威胁结构安全，也对人员疏散构成巨大挑战。

火灾案例的不断增多表明，建筑光伏一体化系统的安全风险已不仅仅是单一电气问题，而是电气安全、材料科学、建筑防火设计与运行管理的交织结果。火灾的发生机理在此类系统中表现出多源性与链式反应特征，局部故障可能迅速演变为系统性灾害。这种新兴风险背景要求从源头上理解建筑光伏一体化火灾的特殊性，并结合风险建模手段识别主要危险源，揭示事故发展的内在逻辑^[2]。只有全面剖析现实背景与突出问题，才能为后续防控策略的构建奠定基础，为绿色能源应用与建筑安全之间的协调提供科学支撑。

2 火灾风险建模的理论基础与关键影响因素解析

火灾风险建模作为建筑光伏一体化系统安全研究的核心工具，能够通过定量与定性分析手段揭示潜在风险的生成与演化机理。在理论基础上，建模工作往往依托系统安全工程、概率风险评估和火灾动力学等学科框架，将复杂的电气参数、材料性能和环境变量转化为可计算的模型因子。高电压直流电流运行下的电弧放电特征、组件内部热失控过程以及不同环境条件下的火焰传播行为，均可通过建立数学模型与仿真模型加以描述^[3]。火灾动力学方程、蒙特卡洛随机模拟以及模糊综合评价等方法被广泛应用，用于推演从电气故障到火灾形成的多阶段过程。这种理论支撑使得火灾风险不仅停留在事故经验层面，而是上升为可预测、可控制的科学问题，为建筑光伏一体化系统的安全设计提供了坚实的基础。

在影响因素的解析中，电气系统的稳定性被认为是最主要的风险来源。光伏组件之间存在大量电气连接点，连接不良或导线绝缘层老化极易引发电弧，进而导致局部高温积聚。逆变器及汇流箱作为核心设备，其散热条件、负荷稳定性与绝缘保护措施均直接关系到火灾概率。除电气层面外，材料特性也是建模的重要变量。光伏组件封装材料、建筑外立面保温层与密封胶等常常具有可燃性，不同材料的燃点、热释放速率和烟气毒性均会显著影响火灾的扩展速度和危害程度。环境条件同样不可忽视，外部风速、温度变化和粉尘沉积会

改变火灾传播路径与燃烧效率。例如，在高层建筑外墙集成光伏系统中，烟囱效应可能放大火焰的垂直传播，使建模结果与地面系统存在显著差异。

为了提高火灾风险建模的准确性，还需综合考虑建筑设计与运维管理等外部因素。建筑布局决定了火灾探测和灭火措施的有效性，若缺乏与光伏系统匹配的消防设施，风险模型中的火灾后果部分会呈现更高的严重等级。施工工艺与维护水平也对风险参数产生重要影响，焊接缺陷、接线松动以及维护不及时都会增加模型中的危险概率。通过多因子、多层次的建模方式，可以在系统层面呈现火灾风险的全貌，并为后续的防控策略提供量化依据^[4]。火灾风险建模不仅是理论方法的应用，更是对建筑光伏一体化系统复杂性的一种科学映射，它在揭示关键影响因素的同时，奠定了建立系统化防控机制的研究基础。

3 建筑光伏一体化火灾防控的技术路径与策略体系

建筑光伏一体化系统的火灾防控需要在设计、施工与运行各环节形成完整的技术路径。系统在设计阶段应充分考虑电气安全与建筑防火规范的融合，通过合理的电气回路规划和冗余设计降低故障发生的可能性^[5]。在光伏组件和逆变器的选型上，优先采用耐高温、阻燃性能优异的材料，减少因材料缺陷带来的火灾隐患。安装布局则应避免高密度集中布置，保证必要的通风与散热条件，并与建筑主体的防火分区相匹配，使潜在的火源难以跨越结构扩散。施工环节应严格执行质量控制，确保电气连接可靠与密封措施到位，从源头上减少电气弧光与过热的诱因。

在运行阶段，实时监测技术成为防控体系的关键环节。通过布设直流电弧故障检测装置、智能传感器和热成像监控系统，可以对电气异常和局部温升进行早期预警。基于物联网平台的集中管理系统能够实现远程数据采集与风险评估，为运维人员提供快速响应的决策依据。一旦检测到异常，自动切断开关与快速隔离装置能够在短时间内中断电路，阻止火灾的蔓延。同时，将建筑火灾报警系统与光伏运行监测系统联动，可以实现从故障识别到报警响应的高效衔接。通过这种多层次、实时性的技术路径，火灾风险得以在萌芽阶段被控制。

防控策略还应从管理制度与应急体系的角度形成支撑。建立完善的定期巡检与维护制度，对光伏组件的绝缘状态、接线盒和汇流箱等重点部位进行周期性检测，减少因老化或松动引发的潜在危险。运维团队应具

备专业的消防知识与操作规范，在火灾发生时能够快速采取科学的应对措施。应急预案的编制与演练不可或缺，特别是在高层建筑或大型公共场所，疏散通道与灭火设施必须与光伏系统布局形成有效匹配^[6]。通过技术与管理的双重保障，建筑光伏一体化系统的火灾防控能够形成从设计到运行的全链条体系，实现能源利用与安全性能的协调统一。

4 火灾风险建模与防控策略的综合应用与实施成效

火灾风险建模与防控策略的综合应用能够实现从理论研究到工程实践的有效转化。通过建立适合建筑光伏一体化特征的风险模型，可以对不同运行状态下的潜在危险源进行动态识别和量化分析。概率风险评估方法与火灾动力学模拟的结合，使得模型能够模拟电气故障、热失控与燃烧传播的全过程，并在虚拟环境中验证防控措施的有效性^[7]。这种以数据和算法为支撑的建模方式，不仅揭示了火灾形成的关键链条，也为防控策略的制定提供了科学依据，实现了从事故经验到预测预防的跨越。

在防控策略的实施过程中，模型输出结果能够直接指导技术措施与管理制度的优化。通过对不同材料可燃特性的模拟，可以在设计阶段优先选择阻燃性更强的封装材料和建筑外立面构件；通过对电气负荷与温升分布的分析，可以明确关键部位的传感器布设位置和监测优先级。运行中，基于风险建模的动态预警系统能够将实时监测数据与模型预测结果进行对比，实现异常情况的快速定位与电路隔离。同时，建筑火灾报警系统与光伏监控平台的联动，也可在模型指导下形成闭环机制，确保防控措施的高效落地。

在综合应用层面，风险建模与防控策略的结合不仅提升了系统的本质安全性，也在实践中展现出显著的实施成效。部分示范性项目表明，通过应用这一体系，电气故障转化为火灾的概率大幅降低，火情响应时间得到缩短，建筑整体防火等级显著提升。更为重要的是，该方法强化了能源利用与安全运行的协调性，为绿色建筑在高密度城市环境中的推广提供了可靠保障^[8]。随着建模工具的不断完善与防控措施的持续优化，建筑光伏一体化系统的安全水平将更加稳固，其火灾防控

成效也将成为推动清洁能源应用的重要支撑力量。

5 结语

建筑光伏一体化系统的火灾风险研究凸显了能源利用与建筑安全之间的矛盾关系。电气故障、材料可燃性与环境复杂性共同构成了火灾隐患，而风险建模为揭示事故机理与量化危险水平提供了有力工具。防控策略在设计、运行与管理环节的全链条应用，使得潜在风险能够被动态识别并有效控制。综合实践表明，模型与策略的结合显著降低了事故概率，提升了系统整体防护能力。建筑光伏一体化的可持续发展，必须建立在科学评估与系统防控的基础之上，以实现绿色能源利用与建筑安全性能的真正统一。

参考文献

- [1] 夏云龙,夏登友,陈昶霖,等. 石油储罐区火灾事故的多层次建模与风险分析[J].消防科学与技术,2025, 44(08): 1056-1061.
- [2] 蔡宏伟. 建筑外立面铜铟镓硒光伏幕墙一体化施工技术研究[J].山西建筑,2025,51(16):42-45+50.
- [3] 刘博,沈彦蕊. 基于太阳能光伏发电一体化的建筑电气节能方案研究[J].绿色建造与智能建筑,2025,(08):52-55.
- [4] 龚顺明,白洁,马良栋,等. 建筑光伏一体化围护结构动态负荷计算模型与软件实现[J].绿色建筑,2025,17(04):100-104+109.
- [5] 李竹琳,李雅婧,屈录超. 建筑光伏一体化技术在某技术创新研究院项目中的应用[J].建筑技艺(中英文),2025, (S1):442-444.
- [6] 童雅婷.油储系统火灾应急过程风险与情景间耦合模式分析及建模[D].大连海事大学,2023.
- [7] 明金科.面向火灾风险的城市消防站选址-分配模型研究[D].中国科学技术大学,2022.
- [8] 雷柳,李德尚玉,冀琳.建议推进建筑光伏一体化出台农村建筑光伏标准[N].21世纪经济报道,2025-03-10(003).

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS