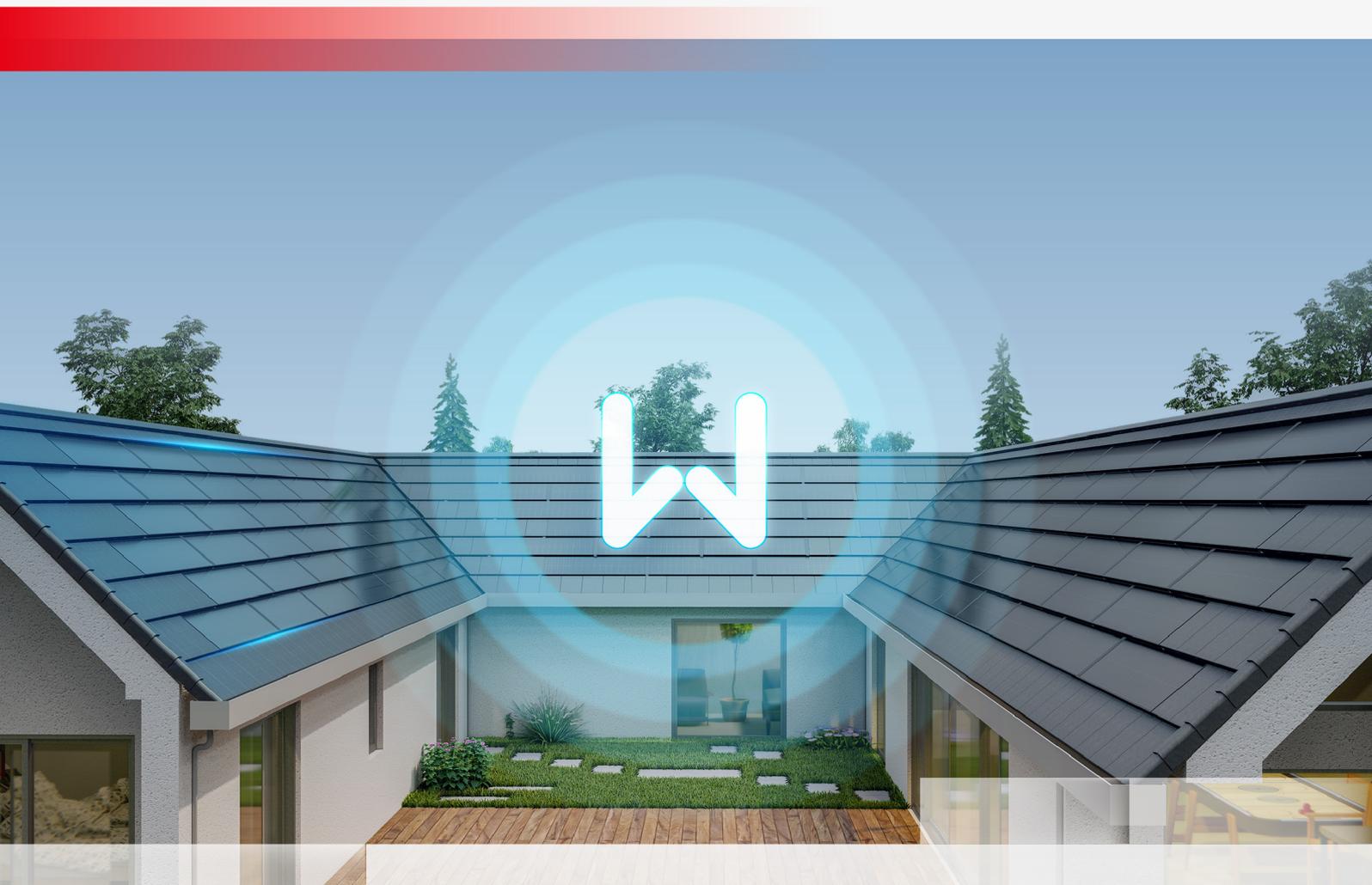


# 光电建筑安全 白皮书



# CONTENTS

## 目录

<b>01.前言</b>	02
<b>02.背景</b>	03
2.1光电建筑发展趋势	03
2.2光电建筑安全风险	04
<b>03.光电建筑安全解决方案</b>	07
3.1直流拉弧检测解决方案	07
3.2快速关断解决方案	09
3.3结构增强解决方案	11
3.4防水解决方案	13
3.5抗风揭解决方案	14
<b>04.性能验证及技术评级</b>	16
4.1光电建筑电气安全验证评估	19
4.2光电建筑结构安全验证评估	21
<b>05.总结与展望</b>	23

# 01. 前言

在碳达峰、碳中和的目标指引下，建筑业低碳发展已成为必然趋势，与建筑相结合的分布式光伏包括附着在建筑上的光伏系统（BAPV）和光电建筑一体化（BIPV）是未来光伏产业发展的重要方向。

在光电建筑快速发展的同时，安全问题也随之突出。目前整体上已建成的光电建筑防护水平并不高，尤其在直流侧，由于安装、防护装备以及标准不足导致的安全事故频发，其中以电气火灾发生的频次最高。此外，由于恶劣环境和人为因素导致的设备安全问题也时有发生。

考虑到目前行业对于光电建筑的发展需要以及未来发展趋势，固德威技术股份有限公司（以下简称“固德威”）针对电气安全开发了直流拉弧检测和组件级快速关断技术，结构方面推出了最高等级防火、抗风揭及结构增强的光电建筑一体化产品，并委托德国莱茵TÜV集团（以下简称“TÜV莱茵”）和中国国检测试控股集团股份有限公司（以下简称“国检集团”）对光电建筑安全特性指标进行验证及评审。本白皮书旨在分析光电建筑可能遇到的安全风险以及现有的安全解决方案，供行业参考。

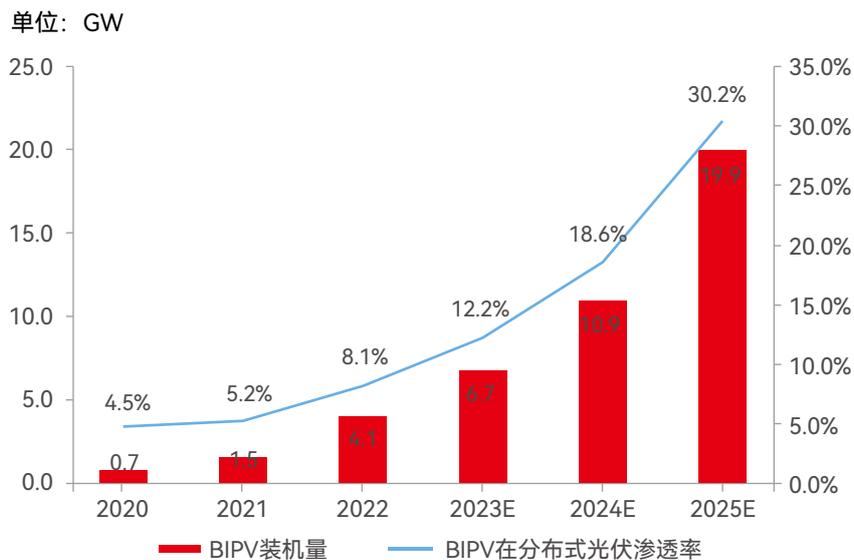


# 02.背景

## 2.1 光电建筑发展趋势

截至2022年年底，我国光伏发电并网装机容量达到392GW，连续8年位于全球首位。“十四五”以来，光伏发电实现巨大突破，在新增光伏发电并网装机中，分布式光伏在历史上首次突破50%，2022年新增超51GW。依赖于近年来国家对分布式光伏的大力倡导，以及分布式光伏在灵活性，环保性，土地利用率等方面的优势，可以预见在“十四五”期间以及未来十年，分布式光伏在新增光伏装机中依旧会保持较高比重。在分布式光伏中，随着整县屋顶分布式光伏开发试点方案的政策推进，与建筑相结合的分布式光伏未来成长空间十分充足。《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》提出，到2025年，装配式建筑占当年城镇新建建筑的比例达到30%（较2020年提升近10%）；全国新增光电建筑光伏装机容量50GW以上。

目前，实现光电建筑的技术路线主要分为传统的BAPV和新兴的BIPV两类。BIPV作为光电建筑新的解决方案，未来将占据越来越大的市场份额。从与建筑的结合方式来看，BIPV具有更广泛的应用空间。BAPV大多数通过不同类型的支架将普通光伏组件固定在彩钢瓦或水泥屋顶，主要用于闲置屋顶空间的改造。BIPV除了屋顶之外，还可以应用在光伏幕墙、光伏遮阳、阳光房等更多的应用场景。单以屋顶作为比较，BIPV具备多项显著的技术优势，包括在建筑外观、屋顶荷载受力、防水性能、设计寿命以及施工难度方面领先于BAPV技术，到2025年BIPV市场在分布式光伏中的渗透率有望突破30%。当前BIPV增量市场装机总潜力约为6-8GW，目前仍以存量改造项目为主，预计新建建筑的市场会逐渐增加。



光电建筑一体化装机情况

在建筑光伏蓬勃发展的同时，随之而来的“安全风险”也越来越多，引起行业的关注和重视。尤其是建筑类光伏，大多处于商业区和居民区，对安全方面的要求更高，在电气、结构安全方面此类系统需要重点防范。

## 2.2 光电建筑安全风险

### 2.2.1 火灾事故及成因

在光伏电站所有安全问题中，火灾是最大的安全隐患。类似于其他电气行业，光伏系统面临很多电气安全隐患，如拉弧故障，短路故障，接地故障以及反向电流等。这些故障都可能引起光伏系统局部过热并引起火灾。全球范围内，一些建筑光伏发生的火灾事故造成了极大的财产损失和人身安全威胁。

据统计，在中国近三年已有约45起典型的光伏火灾事故，日本在近十年也有约125起屋顶光伏系统火灾。根据德国弗劳恩霍夫协会统计，德国在过去20年间发生了350起光伏火灾。

2021年6月，苏州园区内某公司屋顶光伏起火，光伏组件持续燃烧4到5个小时，2021年6月同一天内，美国亚马逊也发生一起由屋顶光伏电站引起的火灾事故，造成了约50万美元的损失。



2021年6月光伏火灾（图源网络）

自2015年以来，全球各地的光伏系统火灾数量一直呈上升趋势，除了来自于外部原因的火灾外，光伏系统自身的火灾隐患更需要引起重视。光伏系统自身的火灾事故据统计一半以上为直流拉弧引起，随着近年来光伏组件的规格越来越大，直流侧的电流也越来越大，引起火灾的风险大大增加，直流拉弧是光伏系统中常见的故障现象，绝缘破裂、触点脱落、器件老化或接地不良等因素都会产生电弧，而且光伏系统中直流电弧的危害远远大于交流电弧，因为直流电弧没有过零点，一旦发生就会持续燃烧，难以熄灭，很容易引发火灾事故。

### 2.2.2 消防安全隐患

当消防员到达发生火灾的建筑时，为了保障安全，他们的首要任务之一是断开建筑与电网的连接。在光伏逆变器中集成了直流隔离开关，即使消防人员断开了建筑的交流开关和逆变器的直流开关，逆变器和光伏板之间仍存在直流高电压。通常单个光伏组件的工作电压在30-60V，而在户用和工商业的光电建筑中组串式连接直流电压可达600-1500V，严重威胁消防人员的安全。

## 2.2.3 结构安全隐患

### 风灾

除火灾外，大风也是引发光伏事故的主要原因之一，目前已建成的部分屋顶光伏项目在台风带来的强风暴雨等恶劣天气和灾害情况下出现了不同程度的损坏，由于早期项目方案没有深度考虑风荷载的影响，大多简单地将光伏系统叠加固定至原有屋顶之上，甚至有组件被吹落屋顶，这类情况极大地威胁了业主和他人的生命安全。

2021年3月中旬，内蒙古出现大风和强沙尘天气，最高风力达到11级，瞬时极大风速一度逼近50年一遇。大风造成多个光伏电站受灾，组件破碎，支架断裂，有光伏电站直接经济损失达上千万元。

2019年第15号台风「法西」以日本关东史上最强等级台风之姿侵袭关东地区，千叶县首当其冲，位于市原市水库湖面上的日本最大规模水上太阳能板被吹翻。



内蒙古，日本千叶风灾（图源网络）

### 雪灾、冰雹

2021年6月30日，山东聊城几百户光伏电站在突如其来的暴雪加冰雹中受损。据知情人士表示：完全损毁的户用电站有5家左右，每家平均30kW，直接损失在50万以上。

2021年11月内蒙古通辽遭受极端天气暴雪影响，某光伏电站出现不同程度的坍塌。



山东聊城，内蒙古通辽雪灾、冰雹（图源网络）

## ■ 2.2.4现行评价标准不完善

从现有的标准来看，针对光伏系统电气安全标准相对健全，安全规范也相对成熟。光伏电站系统设计主要按照IEC 62548《光伏方阵设计要求》及相关标准，主要对光伏系统的电击保护、过电流保护以及电气装置的安装和选择等方面进行了设计方面的要求。对于直流拉弧保护，欧盟和美国也出台了相应的标准如UL 1699B及IEC 63027。针对消防安全，早在2014年，美国NEC发布了NEC 2014 690.12标准，对光伏系统的快速关断做出了要求，并在2017年和2020年进行了两次修订，此标准在2019年1月在美国开始强制执行。这些标准规定了需要满足建筑光伏电气安全的最低要求，但是对于如何建造更高安全标准的光电建筑还有一定的改善空间。此外，从光电建筑整体来看，目前光伏系统和建筑相结合的标准还需要完善。

针对光电建筑，国内已有标准根据适用范围大致可分为光电建筑材料和设备标准、构件标准以及工程标准等三类。整体来看，现阶段标准的制定主要由建筑领域主导，建筑与光伏行业的沟通和合作机制虽然越来越紧密，但行业间的融合还存在很大的提升空间。传统的光伏产品立足于降低成本、提高转换效率，从而缺少对建筑行业的了解和建材制造的能力，对建筑要求的防水、防火、耐热、采光、结构安全等性能缺乏系统性的考虑。同时，传统建筑存在方案设计、施工等多个阶段，不同的建材有明确的时间介入点，而现存的建设项目中光伏介入建筑的时间较为滞后，导致其为了满足建筑在颜色、材质和形状等方面的要求，需要频繁修改光伏组件的设计，加大施工难度，拖慢施工进度；后期运维易出现权责不清的现象。

近年来我国加快了针对光电建筑的国家标准体系的建设，例如在2019年发布的《光伏与建筑一体化发电系统验收规范》和《建筑光伏幕墙采光顶检测方法》、包括《建筑节能与可再生能源利用通用规范》第5.2.9中规定“太阳能光伏发电系统中的光伏组件设计使用寿命应高于25年”，强调了组件本身的使用寿命，但是没有将组件融入屋面围护系统中以建材的属性作为衡量标准。就目前的光电建筑行业标准来看，主要问题集中在光伏技术和建筑领域的融合不够深入。

# 03. 光电建筑安全解决方案

光电建筑发展前景十分广阔，电气火灾和结构安全是建设光电建筑的首要考虑因素之一。采用智能化的措施，将直流拉弧检测技术和组件级快速关断技术相结合预防电气火灾，选取具有结构安全建筑光伏一体化产品，提高光电建筑的安全防控水平势在必行。

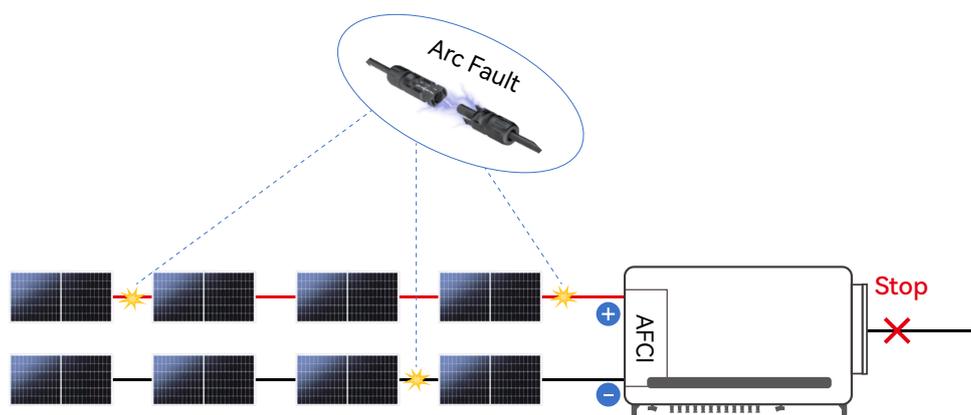


光电建筑潜在安全风险

## 3.1 直流拉弧检测解决方案

### ■ 3.1.1 技术描述

当直流侧组串任意位置发生损坏（组件边框，线缆，端子等）并发生拉弧，根据焦耳定律，短路点的热效应与电流的平方成正比，电流越大，引起火灾的风险也会增加。因此，能够有效减少火灾风险的方法之一是切断直流电流，方法是通过断开逆变器交流电，停止直流到交流的电流转换从而停止直流侧的电流注入。

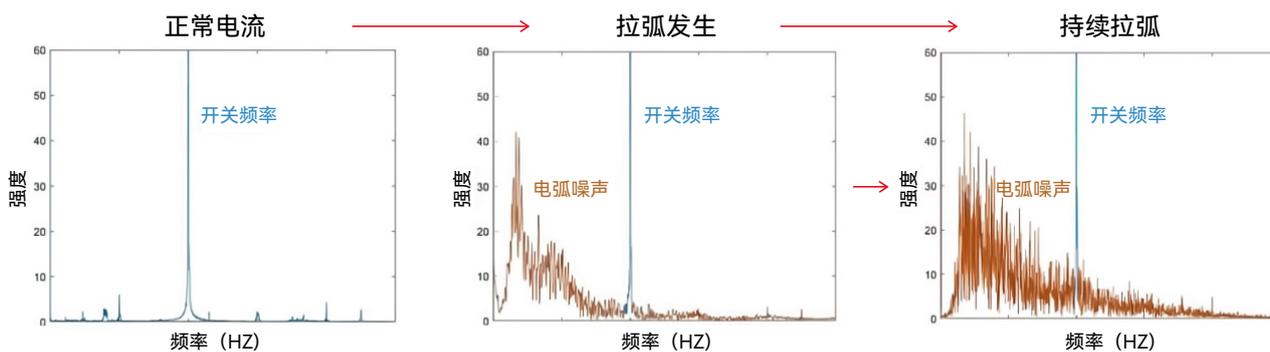


逆变器的直流拉弧检测保护功能

因此，如何识别拉弧电流并及时切断直流侧的电流注入成为直流拉弧检测保护功能的关键。

电弧本质上是由于导体间电场过强，气体发生了电击穿形成了持续的等离子体并产生非常明亮的紫外线和强烈的热量。由于光伏系统中产生拉弧的机制以及位置各不相同，一般通过测量直流侧的电流并利用频谱分析的方法对拉弧电流进行识别。

拉弧发生期间，由于空气发生了电离，等离子体处于杂乱无章的状态，流过电弧的电流会有很强的波动性。在频谱图上，这种高波动性的电流体现出非常宽的噪声频带，也就是频谱分析中所谓的“白噪声”，而正常状态没有干扰的直流电流则体现出比较稳定的状态。如下图所示，当没有拉弧现象时，直流电流频谱图只有逆变器的开关频率，而当拉弧开始发生，出现了一定的“噪声频率”，并在持续拉弧过程中产生更加杂乱的噪声频率。



电弧频谱图

当逆变器的直流拉弧保护功能打开之后，逆变器会对每个组串的输入电流进行实时检测。当检测到电弧的特征电流现象之后（如上图），逆变器会立即切断交流侧并报错，切断交流电同时会阻断直流侧的电流回路并消除电弧。

### 3.1.2 技术特点

固德威坚持关注电站的安全问题，对AFCI技术不断地进行改进，包括算法，检测精度等等，经过三次技术变革，在直流拉弧检测技术方面取得了突破性的进展，现已推出AFCI 3.0技术。



#### AI融合深度学习

区别于传统方案中电弧检测算法和阈值设定主要基于人的经验，AFCI 3.0对海量数据进行计算、迭代，持续学习电弧特征，形成独有的电弧特征库，杜绝环境噪声造成的误报和漏报。AI与深度学习相结合，使检测模型具有不断学习未知频谱的能力，适应各种应用场景。



#### 强大数据采集能力

AFCI 3.0采用专用的拉弧传感器，具有强大的数据采集能力，不间断搜寻电弧特征，一旦发现电弧，及时上报芯片大脑。



#### 场景适应，极速响应

满足各种类型光电建筑对于线缆长度和大电流组件对于输入电流的要求。在毫秒级别内快速切断电源，远远优于行业标准，打造极致安全光电建筑。



## 3.2 快速关断解决方案

### 3.2.1 技术描述

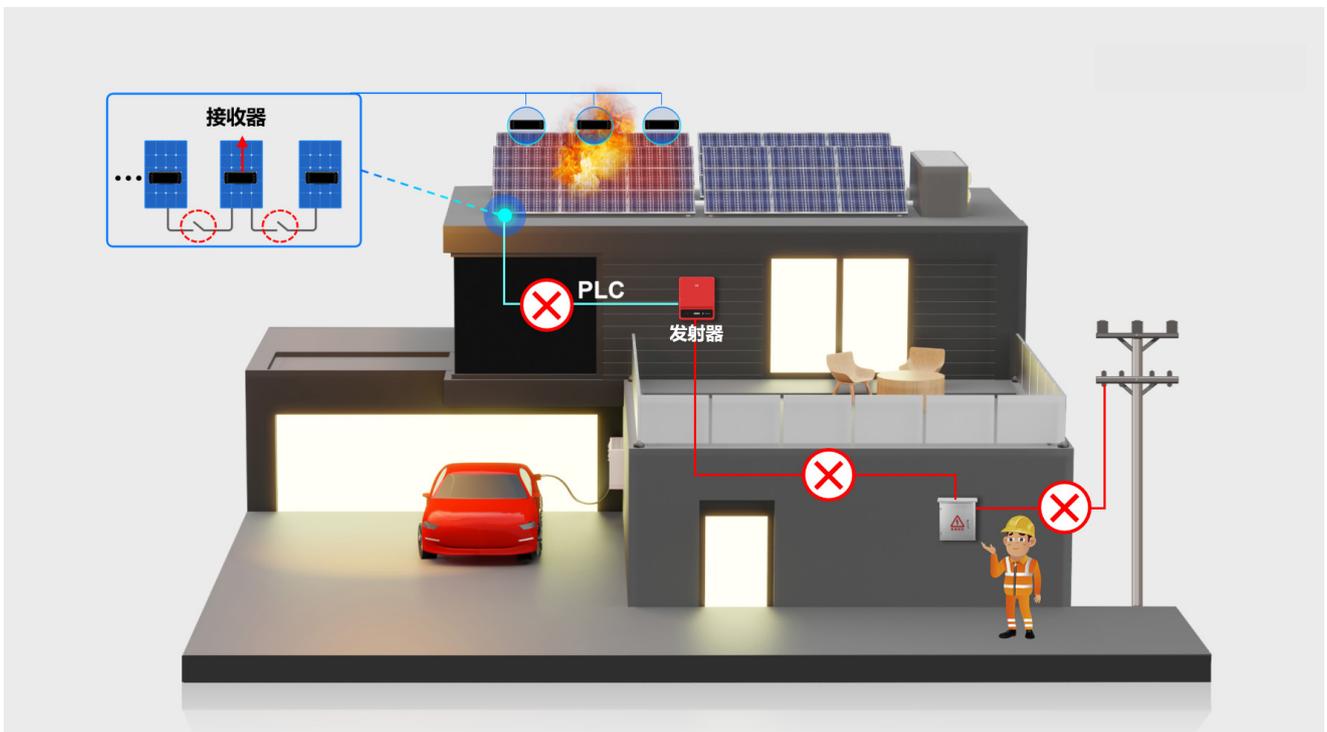
传统的关断技术和防火措施并不能很好地解决上述提到的消防安全问题，包括以下：

- 交流侧开关和逆变器集成的直流开关可以切断电流回路，但是直流侧组串高压仍然存在
- 直流侧智能分断开关同理不能消除组串的高压
- 屋顶直流消防开关尽管可以切断屋顶至逆变器之间的高电压，但是组串至开关之间仍然存在高压
- 使用特殊具有防火特性的线缆，一方面增加了成本，另一方面线缆还是有破损的风险并威胁消防员的安全

目前被证明最简单且成熟的方案是利用组件级快速关断技术来保障光伏电站的消防安全。

组件级快速关断技术可在危急情况下，远程或者手动快速切断每一块组件之间的连接，因此消除建筑屋顶组串中存在的高压，降低触电的风险。

组件级智能关断器，由发射器（集成或独立于逆变器）和接收器（装于组件侧）组成，发射器将PLC信号耦合到直流母线，发送PLC信号；接收器根据接收到的PLC信号，控制组件直流输出。当遇到紧急情况时停止向发射器供电，发射器则停止维持开通信号的发送，接收器一段时间接收不到维持开通信号，就启动快速关断。



组件级快速关断原理

### 3.2.2 技术特点

固德威始终秉承为行业提供高性价比的光伏设备和解决方案的理念，并持续在光伏安全方面不懈努力和保持创新，推出快速关断解决方案，技术特点如下：



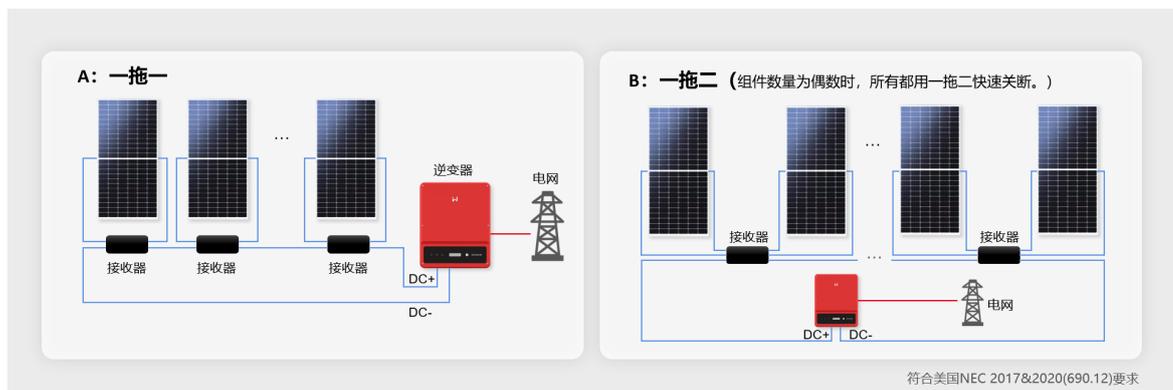
#### 极致安全

符合NEC 2020、Sunspec RSD要求，当交流侧关断，自动断开直流侧电源，在极短时间内将组串电压降至安全电压内，远远优于标准要求。



### 场景适应性

固德威快速关断解决方案完美适配1100V及1500V直流系统电压；一拖一和一拖二设备可选，提高应用的经济性和灵活性；



### 安装友好

体积小，重量轻，便于安装维护。产品功耗小，发热量低，不会给系统造成额外安全隐患。且高度集成，内部器件少，可靠性高。

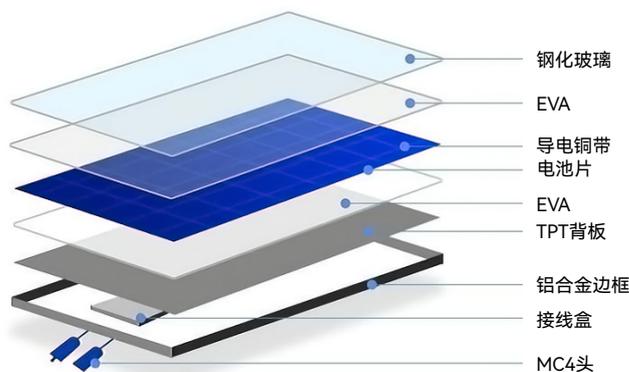


### 一体化解决方案

适配固德威组串式逆变器且完美匹配BAPV和固德威BIPV应用场景。

## 3.3结构增强解决方案

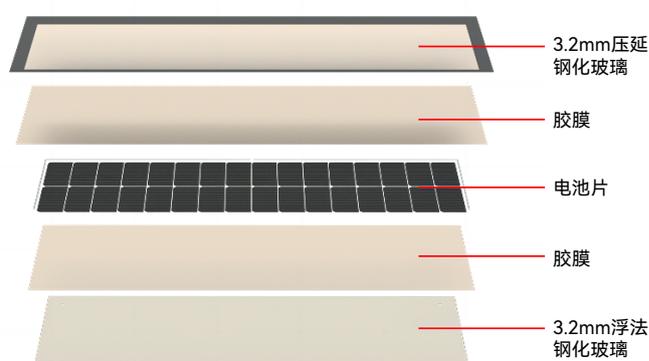
根据GB 50797—2012《光伏发电站设计规范》中的规定，光伏组件的使用寿命一般为25年以上，光伏组件边框和光伏支架的设计使用年限宜为25年。为了保证光伏组件能在飓风、积雪和覆冰等各种极端环境下正常使用，光伏组件需承受5400Pa荷载，各部件的最大应力均小于对应材料的屈服极限，从而保证光伏组件的使用寿命和可靠性。光伏组件如图所示的结构，具有使用寿命长，机械抗压外力强等特点。



光伏组件结构示意图(图源网络)

### 3.3.1 双玻结构

双玻结构不仅重量一致性好，还可有效提高机械强度，减少搬运过程中产生的裂纹。其次双玻结构耐腐蚀性、阻隔性能优异，可以避免水汽、空气等透过玻璃对电池片产生腐蚀，从而降低产品的衰减率。从建筑的外围护要求来看，合理的玻璃尺寸与厚度也会满足光伏与建筑同寿命的强度要求。同时双玻结构的防火等级由普通晶硅组件的C级提升至A级，可有效提高防火安全性。固德威的光电建材产品可满足GB 8624-2012中平板状墙面保温建筑材料及制品燃烧性能等级A级的技术要求。<sup>①</sup>



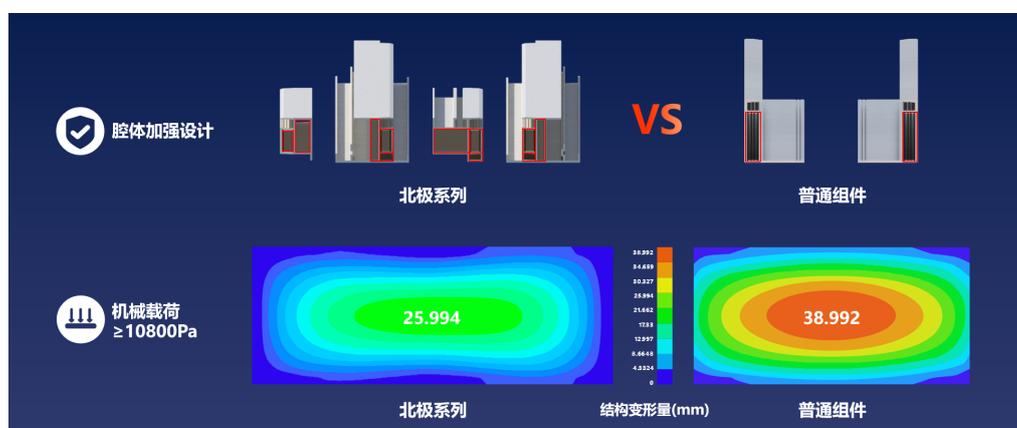
双玻结构示意图

### 3.3.2 加强层

在一些承载力不足的屋面场景中，经常会出现常规组件无法满足屋面的结构承载选用柔性组件，而常见的柔性组件也容易受到雨雪、冰雹等自然环境的影响。轻质光电建材相比于柔性组件在产品中封装了一层超薄强化玻璃、在兼顾产品轻质特性的同时也为电池片提供了一层刚性的可靠保护，这种创新的结构也赋予了产品更好的抗冰雹冲击的能力。

### 3.3.3 版型优化

常规组件为了降低单瓦成本而将版型越做越大，这种又薄又大的结构在风压、雪载以及施工运维等作用下易产生无法复原的形变。作为光电建筑其建材的属性，要求产品必须达到高于标准的机械载荷能力。为了在发电的同时尽可能减少风压雪载对面板的影响，固德威不断优化产品版型设计，为边框增设了许多腔体结构来提高产品的载荷能力，使边框强度能够满足运维需求，减少运维通道的设置从而提高装机容量。



强化的结构安全

<sup>①</sup> | CTC国检集团 燃烧性能A(A2)级 编号WT2022A03K000008

## 3.4防水解决方案

### 3.4.1单瓦分散式排水

民用建筑和公共建筑多以瓦片的坡屋面形式为主，常规光伏支架的安装会破坏原有屋面的防水层，穿孔部位处理不当还会造成渗漏。



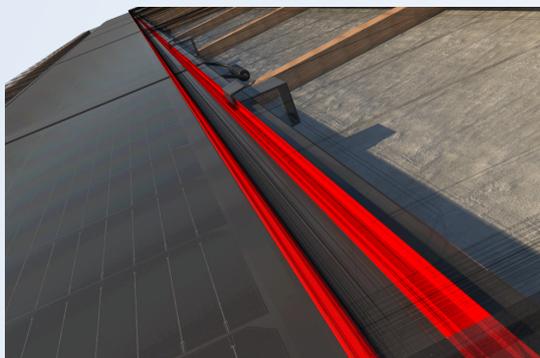
坡屋面常规光伏安装（图源网络）

#### ○ 常规防水方案

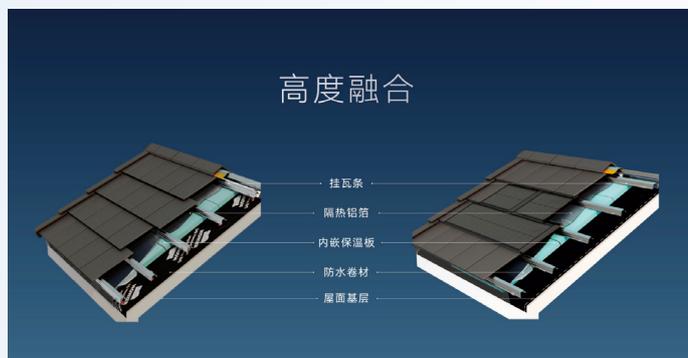
在屋面增加横向和纵向的导水槽以及屋檐接雨漏斗，通过屋顶排水沟将水排出。但是此方案在雨水量过大或水槽堵塞时容易造成反水，且整个排水系统安装步骤繁琐，易发生由于装配不良而导致的安全事故。

#### ○ 单瓦分散防水方案

光伏瓦通过上下两片的搭接咬合，拥有双道密封防水措施，形成类似传统瓦片风雨檐的防水构造，防止逆向雨水的渗漏。同时固德威的屋面系统从设计阶段就可以导入，并且光伏瓦的无穿孔安装配合专用的防水卷材，可以实现整体防水，使得屋面系统的防水性能进一步提升。



两道防水



光伏坡屋面系统

### 3.4.2 卷材融合式防水

工业厂房建筑以金属屋面为主，但是金属屋面的接缝由于施工工艺和自然灾害，传统光伏组件自身难以实现高性能防水，防水系统采用高分子防水卷材外露的形式并与预制的光伏支座组合。但是市面上的光伏支座多为穿透式构造，在大型工商业光伏屋顶项目中，固定的同时会留下成百上千个穿透屋面的孔洞而造成漏水隐患。

为解决行业痛点固德威推出将太阳能光伏组件与柔性高分子防水卷材复合而成的轻质产品，并且无需专门的支座，无需穿透屋面防水层和保温层，安全美观，通过热风焊接与TPO防水卷材深度融合，不破坏原有屋面结构形式，施工方便，屋面可达一级防水，TPO防水卷材可保证屋面25年不漏水。



穿透式光伏支座



热风焊接施工图

## 3.5 抗风揭解决方案

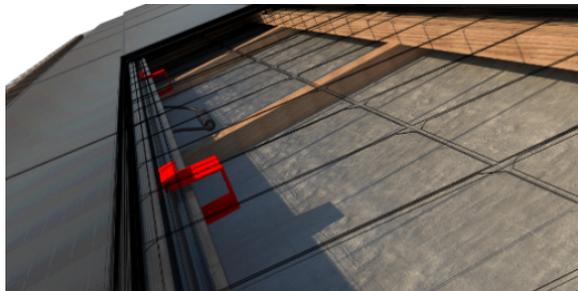
光伏组件具有较高的自身承载能力，需满足IEC 61215标准中正面5400Pa、背面2400Pa的承载要求。但光伏板边框较薄，通常只有1.5-1.8mm。当边框与支架横梁采用螺栓连接时，在台风等极大风速的作用下，极容易被撕裂，造成“飞板”现象。当边框采用压块连接时，接触面积较大不易被撕裂，但在长期风荷载的振动作用下，压块容易松脱，导致整个组件脱落。目前主流的解决方案是采用压块和螺栓共同连接，并在不同位置错开，防止强风对光伏组件的影响。然而，这种光伏组件固定方式无法与建筑本身融合形成一个整体结构。



“飞板”、扭曲压块示意图（图源网络）

### 3.5.1 抗风挂钩

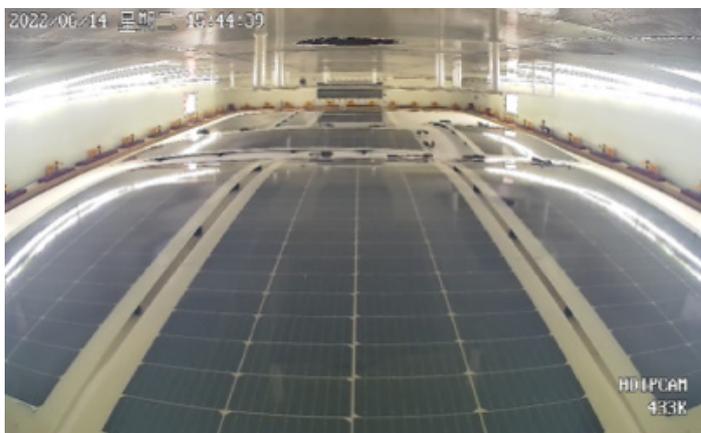
固德威致力于探索光伏和建筑的一体化产品，从产品端解决了光伏适配坡屋面的安装方式。推出了独特的抗风挂钩，集成挂瓦、抗风和美观三位一体，同时满足国家标准GB/T 36584-2018的抗风性能测试要求，实测数据最大能抵抗177km/h的风力，相当于抵抗15级强台风（三级飓风，可以轻易将车辆吹翻）。<sup>②</sup>



光伏瓦抗风挂钩

### 3.5.2 热风焊接

固德威致力于将建筑中成熟的施工方案融合进光伏产品，打破常规光伏需要支架的思路，将光伏与防水卷材通过热风焊接与屋面深度融合。热风焊接这种施工形式适合各种材质包括PP、PE、PVC、TPO、EVA、PIB以及各种改性橡胶和改性沥青材料，施工完成后产品本身还兼具优异的抗风性能。固德威的光电建材产品通过了国家标准GB/T 31543-2015抗风揭测试，<sup>③</sup> 以及GB/T 36584-2018抗风性能测试。<sup>④</sup>



轻质产品抗风揭测试



轻质产品抗风性能风洞试验

② | CTC国检集团 抗风性能F类 编号WW20213022

③ | 江苏凯伦股份先进技术研究院检测中心 抗风揭性能 报告编号CL202206001

④ | CTC国检集团 抗风性能检验 报告编号2022FJ095/2022FJ096

# 04. 性能验证及技术评级

鉴于屋顶的电气火灾安全和消防安全，美国国家电气规范NEC对于80V以上的直流系统，都有直流拉弧检测的强制要求，如NEC 2017 690中的UL 1699B。中国国家能源局也于2021年发布了关于直流拉弧的设计规范《分布式光伏发电系统直流电弧保护标准》。

针对关断方面的标准，目前已有的标准包括：美国最新版国家电气规范NEC 2020，加拿大电气规范2021，德国VDE-AR-E 2100-712以及泰国太阳能屋顶电源安装电气规范。

以上规范中规定的主要性能指标见下表：

评价项目	评价标准
直流拉弧	UL 1699B/IEC 63027: 关断时间 $\leq 2.5\text{S}$ 最长检测距离 $\geq 80\text{m}$ 最大电弧电流 $\geq 16\text{A}$ 电弧能量 $\leq 750\text{J}$
组件级关断	美国NEC 2020（强制）： 以距光伏矩阵305mm为限，超出限位，触发装置启动后30S内，电压降至30V以下；边界内要求有“光伏危险控制系统”，触发装置启动后30S内将电压降至80V以下。
	加拿大电气规范2021（强制）： 当光伏系统直流侧电压大于80V时，应安装电弧故障遮断装置或其他等效设备。当光伏系统安装在建筑物内或建筑物上时，应安装快速关闭装置。距离光伏组件1米处，快速关机装置启动后，需要在30S内将电压降到30V以下。
	中国国家能源局“加强分布式光伏发电安全工作的通知（征求意见稿）”（非强制）： 提出了进一步加强分布式光伏发电安全工作，促进产业健康可持续发展的意见。通知中指出：“安装电弧故障断路器或采用具有相应功能的组件，实现电弧智能检测和快速切断功能”；“光伏组件应具有安全关断保护功能，保证逆变器关机，交流断电后，系统子阵外直流电压低于安全电压”。
	德国VDE-AR-E 2100-712（非强制）： 在光伏系统中，如果逆变器关闭或电网出现故障，直流电压需要小于120V。所使用关断装置使直流侧电压低于120V。
	泰国太阳能屋顶电源安装电气规范（非强制）： 要求屋顶光伏电站必须配备快速关断装置，限距光伏矩阵300mm。限制范围内的电压在设备启动后30秒内降至80V以下，限制范围外的电压降至30V以下。

针对光电建筑结构安全标准，目前已有的规范标准包括：

GB 8624-2012建筑材料及制品燃烧性能，IEC 61215机械载荷测试，GB/T 36584-2018的抗风性能测试。以上标准中规定的主要性能指标见下表：

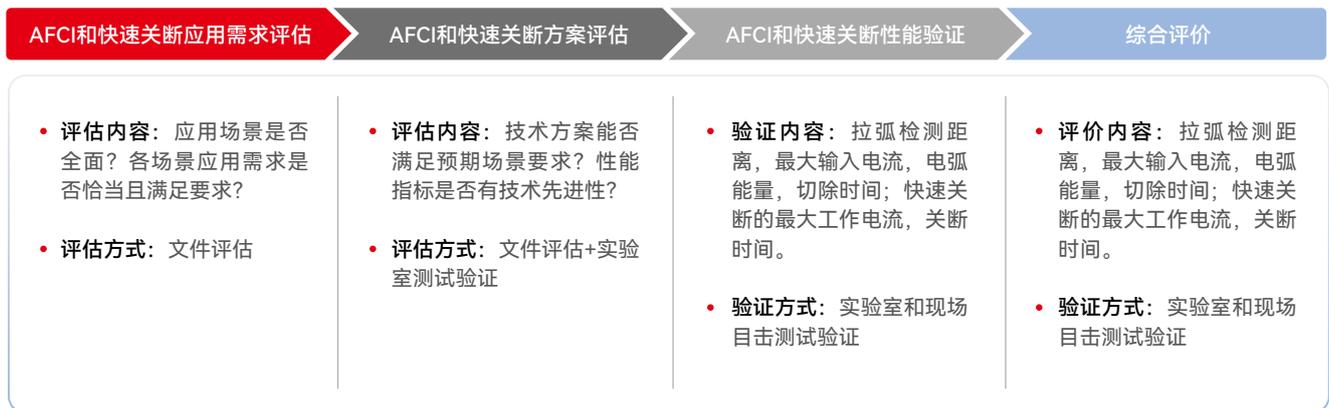
评价项目	评价指标										
建材燃烧性能	<p>GB 8624是建筑材料及制品燃烧性能的分级,是判断光伏产品能否防火的重要标准。根据升高温度、质量损失率、燃烧热值和燃烧蔓延等测试依据可分为下表的燃烧性能等级。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>燃烧性能等级</th> <th>名称</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A级</td> <td>不燃材料（制品）</td> </tr> <tr> <td>B1级</td> <td>难燃材料（制品）</td> </tr> <tr> <td>B2级</td> <td>可燃材料（制品）</td> </tr> <tr> <td>B3级</td> <td>易燃材料（制品）</td> </tr> </tbody> </table>	燃烧性能等级	名称	A级	不燃材料（制品）	B1级	难燃材料（制品）	B2级	可燃材料（制品）	B3级	易燃材料（制品）
燃烧性能等级	名称										
A级	不燃材料（制品）										
B1级	难燃材料（制品）										
B2级	可燃材料（制品）										
B3级	易燃材料（制品）										
机械载荷测试	<p>依据IEC 61215</p> <p>光伏组件需要经过机械载荷测试，其目的是测试组件承受风、雪、静压和冰载的能力。静态机械载荷通常是先在组件正面施压2400Pa一小时后，将组件翻转再施压2400Pa一小时，如此循环三次，最后一个循环的组件正面施压增加到5400Pa。试验完毕后测试组件的外观、IV及湿漏电性能。5400Pa的正面压强可满足一般雪压和单人在组件的荷载，而2400Pa的背面压强是基于12级台风的三倍风压考虑的，防止大风掀翻光伏产品。</p>										
抗风性能	<p>依据GB/T 36584-2018</p> <p>试验时保持环境温度在23℃±5℃。当试验板安装就位后立即开动风扇，调节管口规定等级，A类为97km/h，D类为147km/h，F类为177km/h。风速允许波动范围为±5%，试验时间为2h。在试验期间，观察者注意试样的吹起，应记录整个试样板的任何损坏或脱落，同时记录发生的时间。若在试验期间发生破坏，停止吹风，记录经过的时间，标记产生破坏点的位置。</p> <p>若在本试验期间任何零件未从试验板上脱离，试样未脱落、未损坏，即为试验通过；若装配在试样板上的试样未固定住被吹落，或试验中试样任何自由部分吹起成90°竖立，认为该试验不通过。以试样及试样板吹风后的破坏程度表示，两块试验板均通过该试验，则认为该产品抗风性能试验通过。</p>										

结合现有标准以及光电建筑的发展现状和未来方向，固德威联合TÜV莱茵和国检集团针对光电建筑制定了安全方面的分级评价要求，具体如下：

	评价项目	基本级	一星级	二星级	三星级
直流拉弧检测	检测距离	80m	80m	200m	200m
	最大输入电流	16A	22A	26A	30A
	电弧检测能量	750J	600J	500J	300J
	关断时间	2.5S	1.5S	1S	0.5S
	检测准确率	100%	100%	100%	100%
	技术要求	1%高精度检测CT	>200DMIPS 高性能处理器+1% 高精度独立CT	>500DMIPS 高性能处理器+0.5% 高精度独立CT	>1000DMIPS 高性能处理器+0.5% 高精度独立CT
组件级 快速关断	关断时间	30S	20S	15S	10S
	最大系统电压	1100V	1100V	1100V	1500V
	最大工作电流	11A	15A	20A	22A
民用建筑 结构安全	建材燃烧性能 依据GB 8624-2012 建筑材料及制品燃烧 性能分级	B2(可燃)	B2 (可燃)	B1 (难燃)	A (不燃)
	防水安装方案	破坏防水层	破坏防水层	密封胶	结构防水
	机械载荷等级 依据IEC 61215 机械载荷测试	5400Pa(正面) 2400Pa(背面)	6500Pa(正面) 2900Pa(背面)	7600Pa(正面) 3400Pa(背面)	8100Pa(正面) 3800Pa(背面)
	抗风等级 依据GB/T 36584-2018 屋面瓦试验方法	10级 (风速89-102km/h)	12级 (风速118-133km/h)	13级 (风速133-148km/h)	15级 (风速166-184km/h)
工业建筑 结构安全	防水安装方案	破坏防水层	夹具安装	密封胶	融合式防水
	机械载荷等级 依据IEC 61215 机械载荷测试	5400Pa(正面) 2400Pa(背面)	6500Pa(正面) 2900Pa(背面)	7600Pa(正面) 3400Pa(背面)	8100Pa(正面) 3800Pa(背面)
	抗风等级 依据GB/T 36584-2018 屋面瓦试验方法	10级 (风速89-102km/h)	12级 (风速118-133km/h)	13级 (风速133-148km/h)	15级 (风速166-184km/h)

## 4.1 光电建筑电气安全验证评估

为准确评估固德威AFCI和快速关断技术的性能水平，受固德威委托，TÜV莱茵成立验证小组，对固德威相关技术开展全面验证评估，评估流程见以下框图。



### ○ 应用需求和技术方案评估

对于AFCI技术，固德威将其主要分别应用在户用和工商业光伏发电系统产品中，应用场景明确，从政策和标准上显示相关场景的应用需求明显。同样，对于快速关断技术，应用场景也主要规划为分布式光伏发电系统，因为该技术关系到紧急情况下应急人员的触电危险防范。

为此固德威有针对性地提出相应的技术指标并开发了对应的解决方案，具体见本文第三章。通过验证组的评审，评估结论如下：固德威提出的技术指标相对于目前主流的技术标准具有相当的先进性，其研发的AFCI解决方案为实现提出的技术指标提供了充分的硬件和软件支撑，并将在接下来的验证环节进行实测试验。

### ○ 性能验证

结合固德威制定的技术指标，以及上文所述的安全分级评价要求，验证组借鉴现有国际标准的制定了实验室和现场测试方案。

### 4.1.1 AFCI验证测试方案

测试序列	Minimum $I_{arc}$ (A)	$I_{mpp}$ (A)	$V_{mpp}$ (V)	$V_{oc}$ (V)	间隙 (mm)
1	2.5	3.0	312.0	480.0	480.0
2	7.0	8.0	318.0	490.0	490.0
3	14.0	16.0	318.0	490.0	490.0
4	7.0	8.5	607.0	810.0	810.0
5	18	30.0	318.0	490.0	490.0

备注:

- 1.每个测试分别在PV输入正极起点、组件中间位置以及PV输入负极末端3个点模拟串联拉弧;
- 2.在每个测试点分别模拟两种边框技术类型组件的特性进行测试;
- 3.测试均在模拟线路长度为200米的条件下进行;
- 4.以上测试分别在DNS-G3 (户用单相组串逆变器) 和SMT-US (中功率三相组串逆变器) 两种型号带有AFCI功能的逆变器上进行, 分别模拟户用和工商业两种应用场景, 其中测试序列5只在SMT-US上进行;
- 5.以上测试均在实验室用光伏阵列模拟器、耦合网络、线路模拟网络、拉弧发生器等测试设备完成。

### 4.1.2快速关断验证测试方案

测试序列	输入电压 $V_{in}$ (V)	输入电流 $I_{in}$ (A)
1	8	15
2	9.5	20
3	40	20
4	44	22
5	60	15
6	80	10
7	1250	>5

备注:

- 1.测试序列1~6是在实验室中对型号为GR-B1F-20的单个快速关断器进行测试, 测试序列7是在现场对满配该快速关断器的光伏发电系统进行直流总压的快速关断性能验证。

根据以上测试方案, 通过多次重复测试, 得到测试验证结果如下:

#### AFCI性能测试验证结果

性能指标	结果
检测电弧类型	直流串联电弧
电弧可检测范围	PV输入、输出及组件中间
最大检测电缆长度	200m
最大输入电流	30A
电弧检测能量	<300J
关断时间	<500ms
电弧检测准确率	100%

### 快速关断性能测试验证结果

性能指标	结果
关断时间	<10s
最大系统输入电压	1500V
最大输入电流	22A

## 4.1.3 综合评定

基于固德威AFCI和快速关断的技术评估和实证测试结果，可以得出以下综合结论：

- (1)固德威AFCI和快速关断技术先进，指标优良，实际测试中表现可靠稳定；
- (2)满足现行主流标准如美国NEC 2020，UL 1699B等标准中性能指标的要求，部分指标超出标准要求，达到上述光电建筑安全评价要求的**三星级**最高等级；
- (3)集成AFCI功能的固德威光伏组串逆变器，结合组件级电力电子器件快速关断器应用于户用和工商业光伏发电系统，能有效预防电弧危害以及相关火灾的发生，减少财产损失，并能在紧急情况下保障相关人员的人身安全。

## 4.2 光电建筑结构安全验证评估

固德威针对民用建筑的光电建材产品旭日瓦：

评价项目	验证结果	评定结果
防火	通过GB 8624-2012中平板状墙面保温建筑材料及制品燃烧性能等级A级的技术要求，属于A级不燃建材	三星级
防水	采用了结构防水方案，在国家标准GB/T 36584-2018模拟雨淋的两小时布水试验后旭日瓦背面无水滴。保证屋面无漏水现象。	三星级
载荷	内部实验通过了13500Pa极限载荷实验，可满足运维人员在表面的正常踩踏。	三星级
抗风	通过了GB/T 36584-2018的抗风性能测试要求，实测数据最大能抵抗177km/h的风力，相当于抵抗15级强台风；	三星级

综上，固德威的户用旭日系列产品可满足**三星级**安全分级评价标准。

固德威针对工业建筑的光电建材产品银河轻质光电建材：

评价项目	验证结果	评定结果
防水	采用了TPO卷材的融合式防水方案，可保证屋面25年不漏水。	三星级
载荷	内部实验通过了有衬底支撑的8100Pa极限载荷实验，按照平均雪密度0.25g/cm <sup>3</sup> 换算相当于3.2m厚的积雪压力。	三星级
抗风	通过GB/T 31543-2015抗风揭测试以及GB/T 36584-2018的抗风性能测试要求，实测数据最大能抵抗177km/h的风力，相当于抵抗15级强台风；	三星级

\*工业建筑相比于一般的民用建筑都是新材料和新技术的实验载体。在防火等级的处理上按照不同的屋顶构造形式，有比较灵活丰富的选择。比如光伏产品可在钢板保护中完成整个屋面系统的A级防火等级，故针对工业建筑的光伏屋顶，防火等级不局限在光伏产品上而需着眼于整个屋面系统。

综上，固德威的工业银河轻质光电建材系列产品可满足**三星级**安全分级评价标准。

# 05. 总结与展望

光电建筑既应包含绿色建筑中生态与可持续发展的含义，更应该是安全无害的象征。光伏作为绿色能源应用于建筑领域，安全性无疑是重要前提和基本条件。当下，我国在光电建筑方面处于高速发展的阶段，相关的规范要求和安全经验也需要同步得到完善和提高。未来随着国家对光电建筑的支持和技术的日趋成熟，光电建筑将进一步得到普及和发展，其系统安全性问题应该引起行业内的广泛关注和高度重视，建议在现有的规范基础上结合实际施工制订更完善的行业标准，统筹专业人员研究光电建筑的安全性，并定向培养相应的现场施工人员，从设计、施工和验收各个环节提高重视程度，保障光电建筑的系统安全。在探索中，固德威致力于通过光电建材及其应用，为用户提供光伏建筑一体化解决方案，让安全绿色的光电建筑走进千家万户，守护绿水青山，蓝天白云。



**GOODWE**  
固德威

 **TÜVRheinland**<sup>®</sup>  
Precisely Right.

 **中国国检测试控股集团股份有限公司**  
China Testing & Certification International Group Co., Ltd.

**固德威技术股份有限公司**

GOODWE TECHNOLOGIES CO., LTD.

电话：0512-69582253

网址：www.goodwe.com

地址：江苏省苏州市高新区紫金路90号



固德威官方微信



零碳建筑社区



固德威光伏社区