



# 预防、 检测和 灭火

清洁能源防火实用指南





# 目录

|                      |    |
|----------------------|----|
| 1. 简介                | 1  |
| 2. 清洁能源系统的风险解析       | 3  |
| 3. 升级路径：小问题如何演变为重大事件 | 5  |
| 4. 预防：降低火灾风险         | 6  |
| 5. 检测：识别潜在隐患         | 7  |
| 6. 灭火：控制事件并限制事态升级    | 8  |
| 7. 清洁能源防火的分层防护策略     | 9  |
| 8. 结论                | 10 |



# 异常运行状况与电气故障如何逐步升级并引发火灾事故，以及分层防护策略如何阻断该演变过程。

## 1. 简介

电池储能、风力发电、光伏电站等清洁能源基础设施建设规模快速扩张，使得此类系统的运行可靠性与安全问题愈发受到关注。

尽管清洁能源基础设施发生重大火灾事故的概率相对较低，但一旦发生，后果往往十分严重，通常会严重危及人员安全、损害资产效能、影响合规运营并造成重大项目经济损失。

目前针对清洁能源系统防火的相关探讨，大多聚焦于火灾发生后的处置环节。然而实际上，绝大多数事故都存在逐步演变的过程，其源头往往更早，始于运行异常或电气故障。

对公开报道的电池储能系统（BESS）安全事故分析表明，绝大多数事故（**相关统计数据通常约为 89%**）并非由电池电芯本体引发，多源于系统配套设备故障，例如电力基础设施、控制系统及系统集成类相关问题。<sup>1</sup>

1. 基于公开报道的电池储能系统（BESS）失效事故分析。例如：EPRI《电池储能系统（BESS）故障事件数据库的见解：故障根本原因分析》，2024 年版。



若早期预警信号未被及时察觉，轻微隐患会逐步升级为设备故障，最终引发起火、火灾或热失控事故。

**掌握该事故演变规律，是现代能源系统风险管控的关键所在。**

目标不应局限于火灾发生后的被动灭火，而是要查明并切断可引发起火的事故连锁诱因。

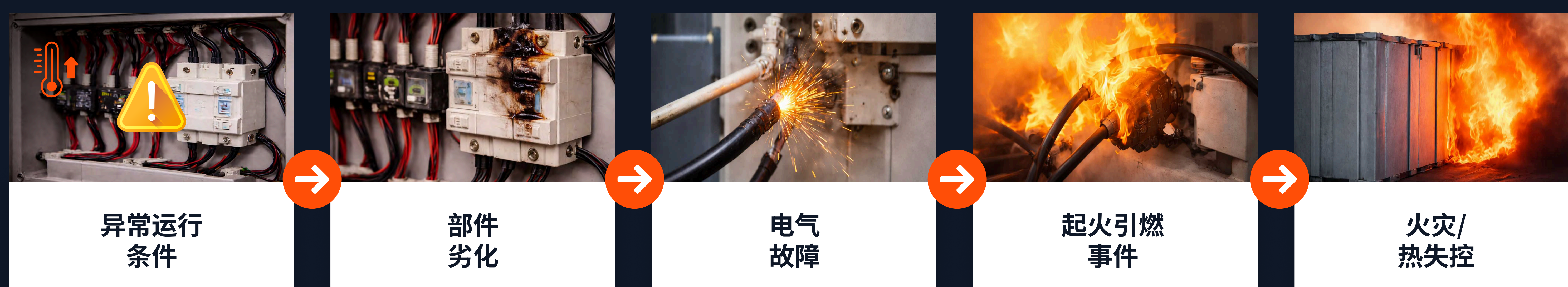
本指南概述了一个用于管理清洁能源基础设施火灾风险的实用框架。它分析了异常状况的产生机理、异常演变为火灾事故的发展过程，以及以预防、早期探测、精准灭火为核心的分层防护策略，如何大幅降低事故的发生概率与严重程度。

尽管内容重点涵盖电池储能系统，但许多相同的潜在风险路径也适用于其他清洁能源技术。例如，风力涡轮机机舱、太阳能逆变器柜、电气配套设施设备以及相关的控制与变换设备都包含可能出现异常运行状况或先于火灾事件发生的电气故障的部件。

**通过理解这些升级路径并采用分层防护策略，设计人员和操作人员可以在支持清洁能源资产长期可靠性的同时，提升安全性。**

## 关键概念：火灾事故很少会突然发生

大多数重大事故都遵循一个演进过程：



**尽早中断事故连锁链条是降低风险的最有效方法。**



## 2. 清洁能源系统的风险解析

清洁能源技术高度依赖在严苛环境下运行的复杂电气系统。

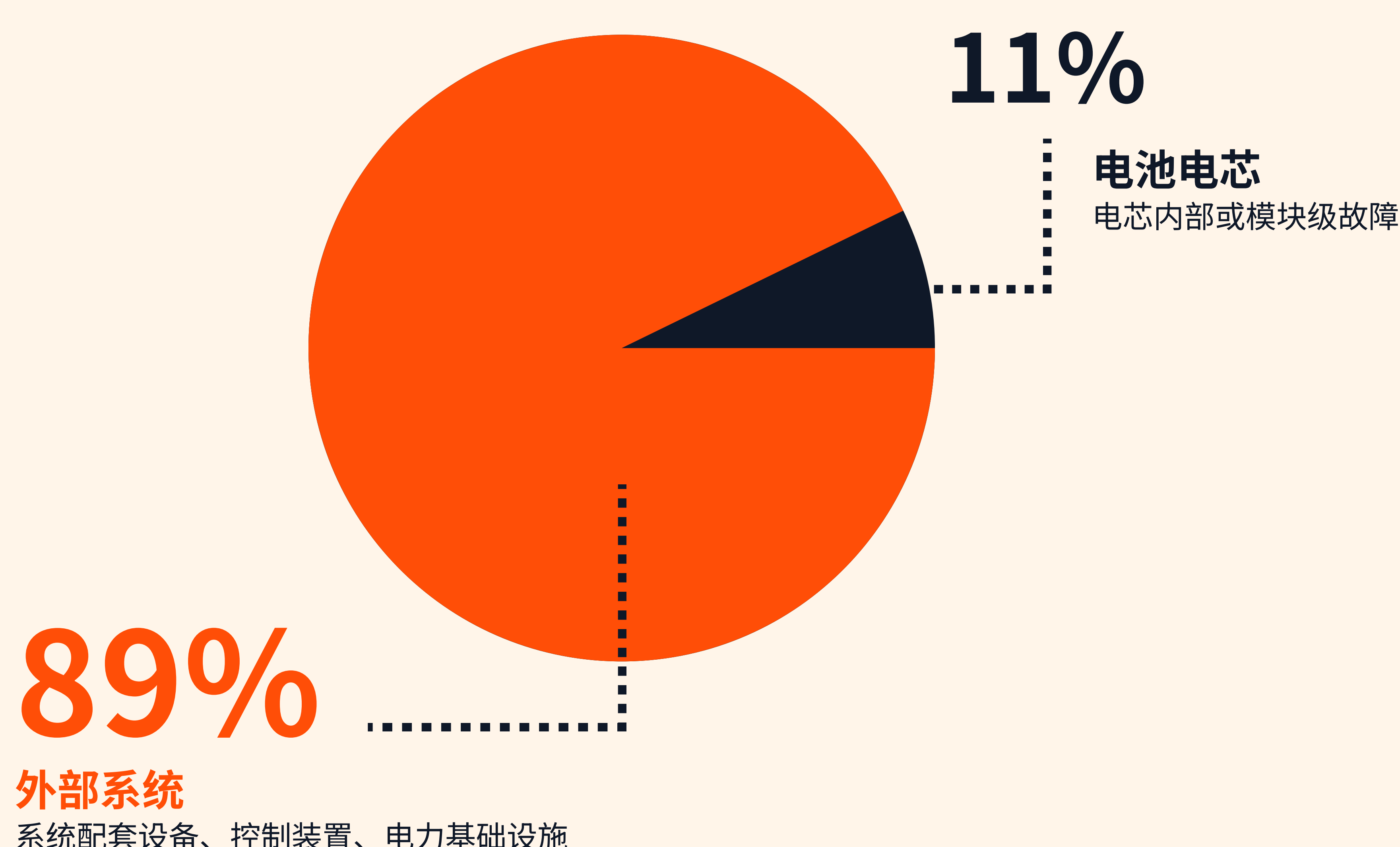
电力变换设备、大容量电缆、逆变器及控制系统可实现能源的高效生产与储存，但同时也会带来潜在故障诱因，需严格管控。

在大多数情况下，火灾风险并非源于设备突发故障，而是由环境因素或运行工况长期作用，逐步造成系统部件性能劣化所致。高温、高湿、粉尘悬浮及腐蚀性大气环境，往往会加速绝缘破损、连接器老化与电气部件过热失效。长期来看，此类不利环境因素会大幅增加电气故障及系统异常运行的发生概率。

这些问题在清洁能源设施场景中尤为突出。风力涡轮机长期运行于严苛户外环境，湿气、盐雾及空气污染物均会对机舱内部电气设备造成不良影响。光伏设施常使逆变器柜与汇流箱长期暴露于高温、粉尘及各类环境应力之下。电池储能系统虽多为封闭式布置，但其内部电气设备排布密集，对温度和湿度的变化较为敏感。

在众多能源应用场景中，火灾事故通常源于电气故障或运行工况异常，而非核心能源设备本体直接起火燃烧。在电池储能系统中，电气故障同样可作为初始诱因，进而引发电芯损坏或热失控。

BESS 火灾事故的典型诱因来源<sup>2</sup>



2. 基于公开报道的 BESS 事故分析得出的典型分布规律表明：绝大多数事故并非发生于电芯本体，多由系统配套设备或控制系统相关问题引发。



对过往事故案例的分析表明，多数电池火灾并非始发于电芯本体，往往先在配套电气设备或电力电子装置中出现隐患，后续逐步恶化，最终引发电池故障。过往研究结论与行业大范围事故数据分析结果一致：储能系统中，系统配套组件及控制装置是最常见的故障诱因。<sup>3</sup>

水体侵入是能源基础设施另一项关键风险诱因。已有多起案例记录显示，水体侵入（包括消防灭火系统管道渗漏、环境雨水侵蚀、设备箱体密封不严等情况），曾引发储能电池装置及其他电气设备发生重大故障。

因此，识别并解决这些早期风险因素，是现代清洁能源体系构建有效防火的关键环节。



### 清洁能源基础设施中的常见环境风险因素

| 风险因素      | 典型影响      | 典型分布区域          |
|-----------|-----------|-----------------|
| 温度过高      | 绝缘劣化      | 逆变器柜、电池槽        |
| 湿度过高/凝露结露 | 设备腐蚀、短路故障 | 电池储能系统舱体、海上风电设施 |
| 灰尘积聚      | 冷却受阻      | 太阳能电站，涡轮机机舱     |
| 腐蚀性空气     | 连接器劣化     | 沿海风电设施          |
| 水体侵入      | 电弧故障和设备损坏 | 电气柜             |

3. 基于公开报道的电池储能系统（BESS）失效事故分析。例如：EPRI《电池储能系统（BESS）故障事件数据库的见解：故障根本原因分析》，2024 年版。



### 3. 升级路径： 小问题如何演变为重大事件



**能源系统中的火灾事故通常遵循一个演变过程，即早期阶段的异常会发展为更严重的故障状态。行业调查和事后分析始终表明，许多能源基础设施火灾发生前，电气系统、环境条件和设备运行状况都出现了可察觉的变化。尽早识别这些指标，就有机会在发生燃烧之前中断其升级过程。**

多数源于外部系统部件的事故均遵循该演变规律，若未及时处置，早期异常状况将逐步恶化并最终引发起火。

## 清洁能源系统中的故障升级路径

## 异常运行状况如何演变为火灾事件



## 预防

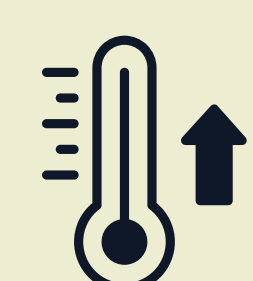
## 检测

## 灭火

## 分层防护策略可在多个阶段阻断这一升级路径



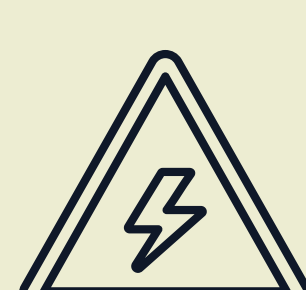
## 异常运行状况的早期征兆



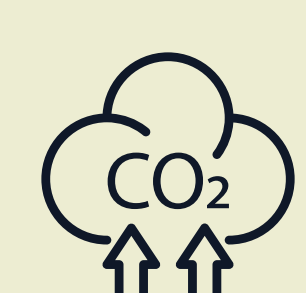
温度升高或波动



空气质量下降或存在颗粒物



电气故障或系统异常行为



意外气体排放

## 4. 预防：降低火灾风险

预防是清洁能源系统防火体系的第一道防线，通常也是成效最优的一环，核心在于提前识别异常运行状况，避免其进一步恶化为电气故障。环境监测技术可持续监测电气柜和设备空间内的状况，为该项防护工作提供愈发有力的支撑。

通过对温度、湿度、空气质量及其他环境因子的实时监测，操作人员能够提前识别渐进式隐患，防范其进一步诱发电气故障。这些环境状况通常参照预期运行基线与变化趋势进行评估，而非依靠固定阈值判定，且评判标准会随系统设计与应用环境的不同而存在差异。

日常维护与检查同样发挥着至关重要的作用。电气连接松动、绝缘老化、通风通道堵塞及机械振动，若未及时整改，均会引发设备过热与电气故障。

渗水侵入也是安全预防工作中需重点关注的隐患。管道系统渗漏、柜体密封不严或环境露天暴露，均会导致带电设备区域侵入湿气，进而造成短路。



### 实施提示

对环境状况与系统运行状态进行持续监测，能够在引发火灾之前很久就发现潜在问题，便于操作人员在故障恶化初期及时采取整改措施。



## 5. 检测：识别潜在隐患

探测预警是分层防火防护体系的第二道防线。在许多能源应用中，正在发展的危险往往首先表现为系统行为的细微变化，例如异常热特征、气体排放或电气异常，远早于出现可见的火灾状况。

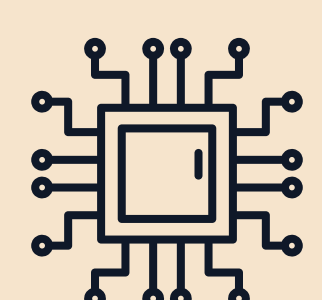
用于识别这些预警指标的方法可能包括：



用于识别异常运行环境的环境传感



可检测异常热信号的热监测系统

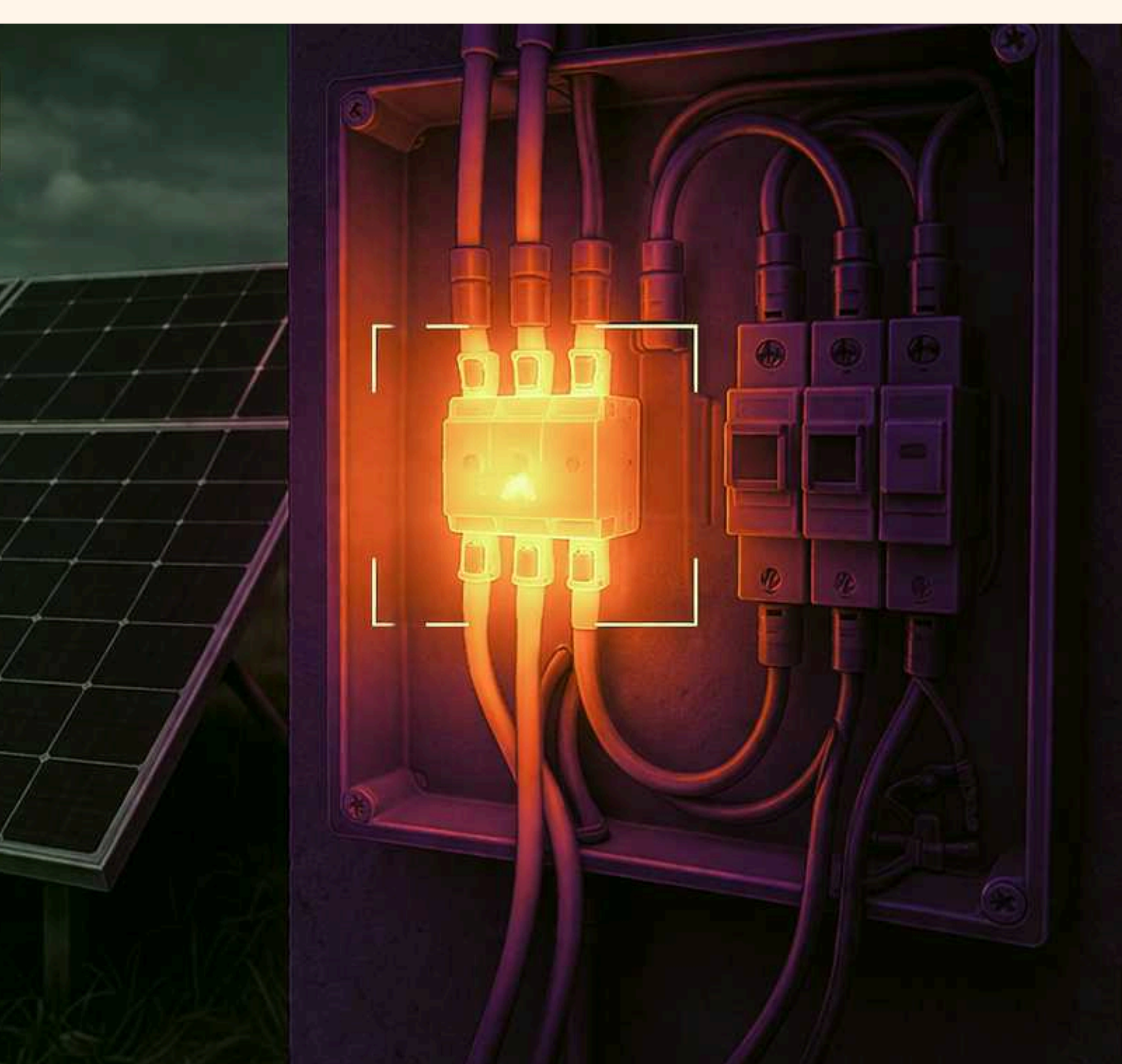


电气异常监测



可识别电池早期排气的气体检测

将上述监测手段融入系统监测架构后，操作人员可提前识别渐进式隐患，并在险情发展至起火阶段前及时处置。



### 检测为响应争取更多时间

早期检测可延长对异常状况的调查时长，隔离故障设备、启动防护措施，降低渐进式故障升级为引燃或火灾事故的概率。



## 6. 灭火： 控制事件并限制事态升级

尽管采取了强有力的预防和检测措施，起火事件仍有可能发生。灭火系统提供最后一道防护防线，能够迅速控制火势并减少损失。

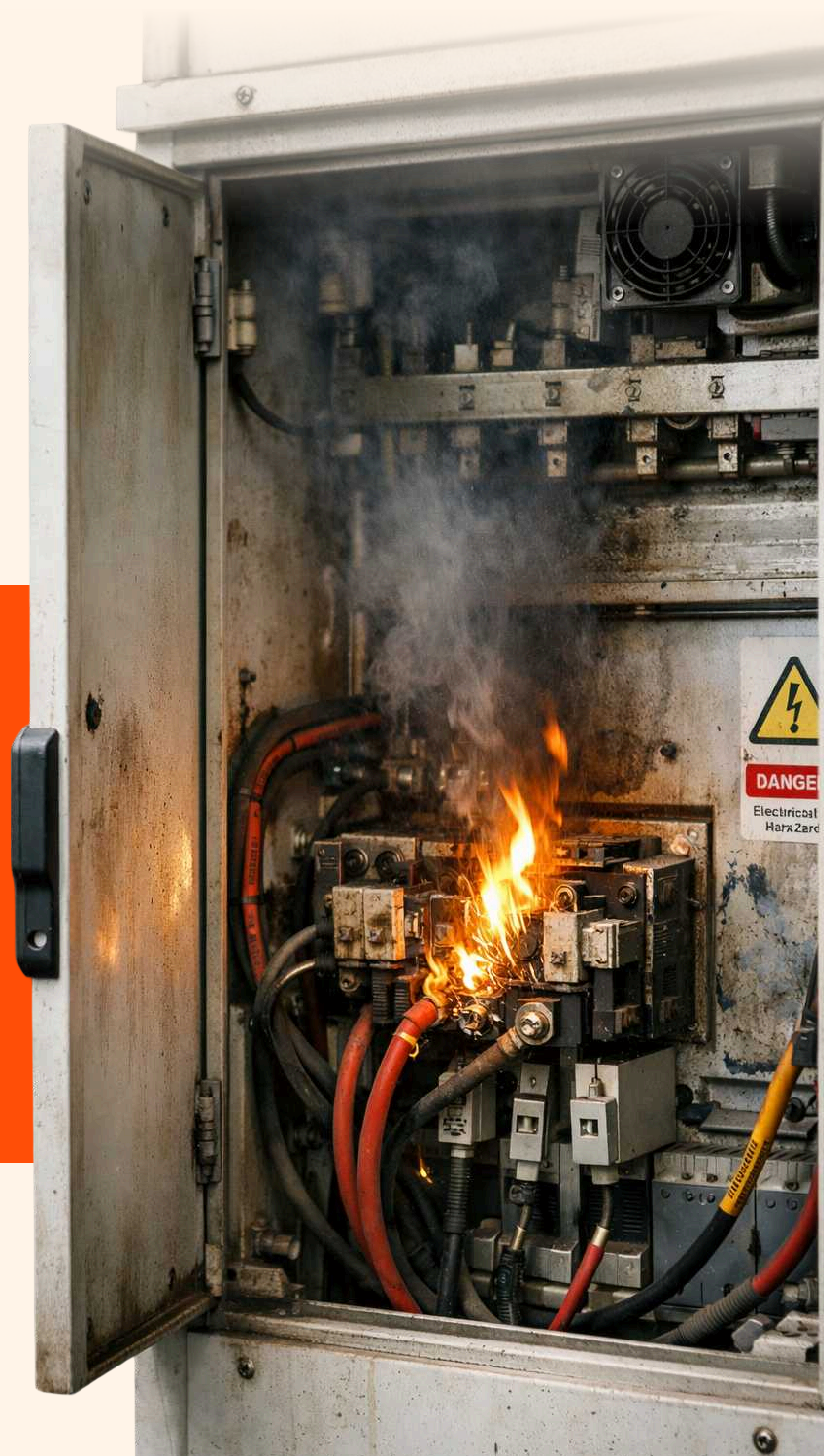
一旦发生热失控或形成持续性火情，应对策略可能会变得更为有限，防护重心通常转为火情围挡隔离与人员设备防护。虽然仅有小部分安全事故起源于电芯内部，但这些情况一旦发生往往更难控制，这进一步凸显了在事态升级之前尽早发现和干预的重要性。

电气环境对灭火工作存在特殊挑战。火灾常伴随带电设备作业、密闭受限空间或易快速蔓延燃烧的材料。在这些环境中使用的灭火技术可能包括凝聚气溶胶灭火系统、洁净气体灭火剂或其他灭火方式，此类技术可中断燃烧过程，且不会损坏敏感的电气设备。

这些系统尤其适用于电池舱、逆变器柜、风力涡轮机机舱等密闭空间，在这类场景中，快速灭火抑爆至关重要。

### 电气环境中的灭火目标

- 快速响应起火
- 中断燃烧过程
- 限制密闭空间内的火势蔓延
- 保护相邻设备





# 7. 清洁能源防火的分层防护策略

有效的防火策略采用多层级防护体系，旨在应对火灾蔓延路径的不同阶段。实际应用中，该防护方案整合状态监测、危险探测与灭火措施，实现事故全周期的风险管控。

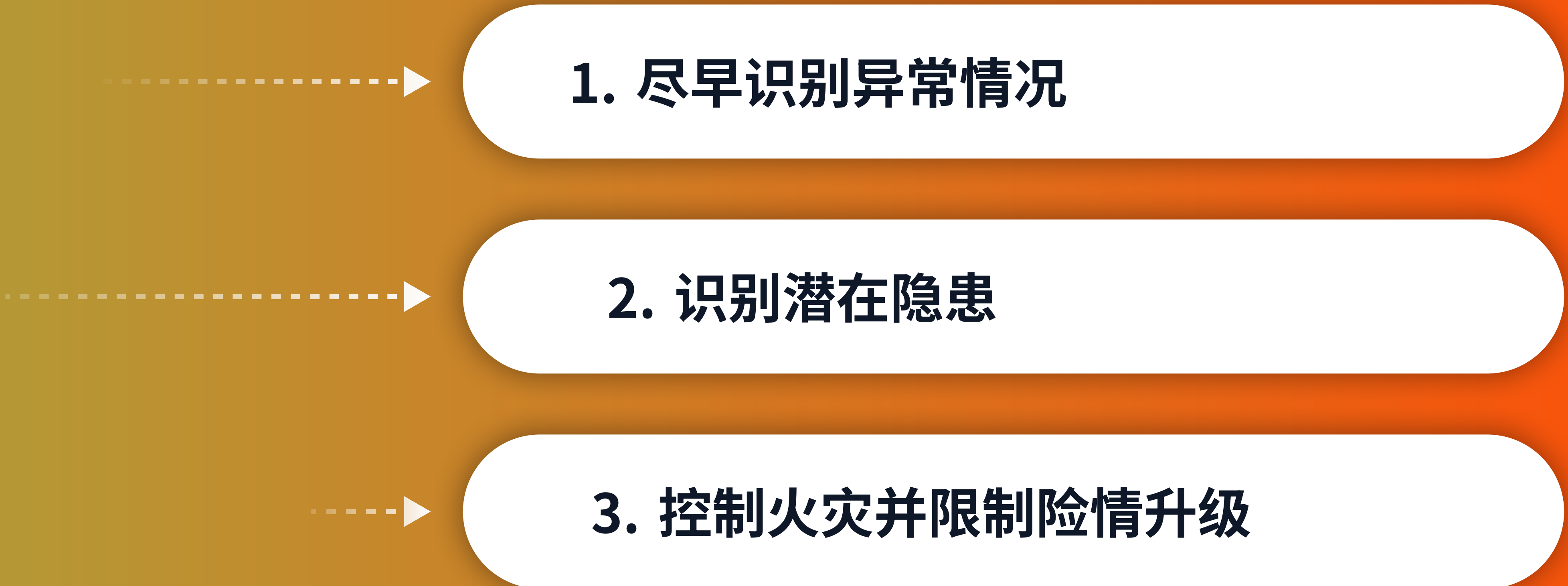
该分层防护理念契合现行防火规范与行业指导文件的发展方向，涵盖美国国家消防协会（NFPA）及相关标准体系。此类规范愈发强调风险评估、早期隐患识别，以及电气与能源系统一体化协同防护策略的落地应用。<sup>4</sup>

分层防护不再依赖单一防护手段，而是明确各类技术各司其职、分工协作。预防措施侧重于识别异常运行状况，并降低故障发展的可能性。检测方法能对正在形成的危险提供早期警示，从而留出干预的时间。灭火系统作为最后的保障措施，在发生火灾时控制火情并限制其蔓延。

当这些措施共同实施时，它们会构建起一个更具韧性的系统——这个系统不仅能应对火灾事件，还能从一开始就降低火灾发生的可能性。

4. 例如 NFPA 855《固定式储能系统安装标准》以及围绕储能系统安全与防火防护制定的各类配套指导文件。

## 预防 检测 灭火





## 8. 结论

随着清洁能源基础设施的不断拓展，深入理解复杂电气系统内火灾风险的演变规律变得愈发重要。

许多安全事故始于微小的异常状况，这些异常会逐步演变为电气故障并引发起火事件。

实施以预防、早期探测和有效灭火为核心的分层防护策略，能够显著降低清洁能源基础设施火灾的发生概率及事故后果。

### 了解更多清洁能源分层防火防护相关内容

Fireaway 专注研发电气环境与清洁能源基础设施专用防火防护技术，涵盖可识别早期预警信号的先进传感技术，以及全球广泛应用于电池储能、风力涡轮机与光伏电站的冷凝气溶胶灭火系统。

#### 了解更多



[ultrasense.net](https://ultrasense.net)



[statx.com](https://statx.com)