

微弱打火的两路高信噪比光学检测技术

夏志勇 刘文魁 杨兴念

中电科芯片技术(集团)有限公司, 重庆, 400012;

摘要: 在工业 4.0 战略推进背景下, 高压及瞬时高功率设备在装备制造、电子对抗等领域的应用日益广泛, 其运行过程中产生的电弧对设备可靠性与使用寿命构成严重威胁。此类电弧具有瞬时功率大、积分能量小、光谱分布宽(300nm~480nm)且信号呈不规则模拟特性, 传统检测方法难以实现高灵敏度、快速响应的检测需求。为此, 本文提出一种微弱打火的两路高信噪比光学检测方法, 通过光纤耦合传输、高灵敏光电转换及逻辑处理技术, 实现对微弱打火信号的精准捕获、传输与告警。该方法采用双路光纤采集不同部位信号, 结合磷化镓(GaP)探测器与多级放大比较电路, 检测灵敏度达-40dBm, 通过 RS422 接口完成参数配置与状态通信, 最终以光信号输出形式实现设备保护。该技术可为高压设备的安全运行提供可靠保障, 具备小型化模组开发潜力。

关键词: 瞬时高压设备; 微弱打火检测; 光电转换; RS422 通信; 设备保护

DOI: 10.69979/3060-8767.26.03.013

引言

随着电力电子技术与工业自动化的快速发展, 瞬时高压设备(工作电压≥10kV)在电子对抗、大型工业生产等场景中的应用愈发广泛。此类设备在启动阶段及运行过程中, 受瞬时高压冲击、电压波动等因素影响, 极易在行波管等关键部件产生电弧。电弧的产生不仅会导致设备局部过热、性能衰减, 严重时还会直接烧毁核心元器件(如行波管), 造成重大经济损失与安全隐患。因此, 开发微弱打火的两路高信噪比光学检测技术, 对保障高压设备安全稳定运行具有重要工程意义。

现有微弱打火检测方法多基于单一通道检测或电信号直接测量, 存在检测盲区、抗干扰能力弱、灵敏度不足等问题。针对上述缺陷, 本文提出一种两路高信噪比光学检测方案, 通过两路光纤同步采集设备不同部位的微弱打火信号, 经光电转换、信号放大、逻辑判断后, 输出保护信号并实现与主机的通信告警。该方案充分利用光学检测的抗电磁干扰优势, 结合高灵敏探测技术, 实现对微弱打火信号的精准捕获, 为高压设备的主动防护提供技术支撑。

1 光电检测系统总体架构

1.1 系统设计原则

本系统以“高灵敏度、高可靠性、快速响应”为核心设计目标, 需满足以下技术要求:

检测灵敏度≤-40dBm, 可捕获微弱打火信号;

光谱响应范围覆盖 300nm~480nm, 匹配打火光谱特性;

双通道独立检测, 无死角覆盖设备关键区域;

响应时间≤100ns, 实现快速保护;

具备 RS422 通信功能, 支持参数配置与状态监测。

1.2 总体架构组成

光电检测系统由光电检测单元、电源处理单元及通信接口单元三部分组成, 总体原理如图 1 所示。

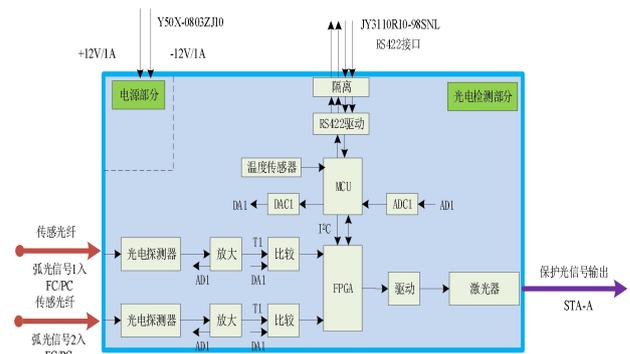


图 1 总体原理图

系统工作流程如下:

双路塑料光纤探头分别采集设备不同部位的微弱打火光信号; 光信号经光纤传输至光电检测单元, 完成光电转换与信号处理; 电源处理单元将输入±12V直流电源转换为±9V、+5V、+3.3V等稳定电源, 为各模块供电; 逻辑处理单元对信号进行判断, 驱动激光器输出保护光信号; 通过 RS422 接口实现系统与外部主机的通信, 支持参数配置、状态读取与告警上报。系统采用“两路并行检测”设计, 只要任意一路检测到有效微弱打火信号, 立即触发保护机制, 确保检测无盲区。

2 核心检测技术

2.1 光电检测原理与流程

光电检测单元是系统核心, 其工作原理如图 2 所示,

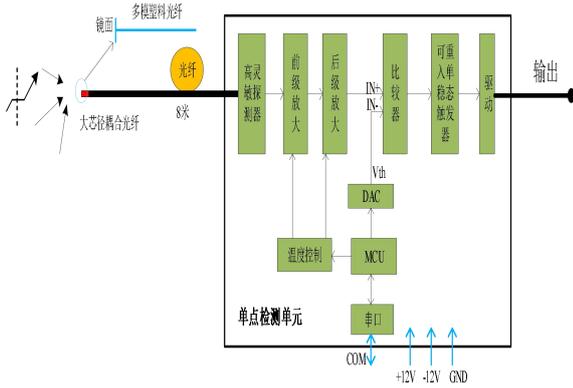


图2 工作原理图

具体流程如下：

光信号耦合：塑料光纤探头采集微弱打火光信号，通过端面研磨、抛光与镀膜处理，提高光耦合效率；

光电转换：采用高灵敏度磷化镓（GaP）探测器，将光信号转换为微弱电流信号，探测器暗电流 $\leq 30\text{pA}$ ，可响应 -40dBm 的光信号；

信号放大：前级与后级放大电路串联工作，将 nA 级电流信号放大并转换为可处理的电压信号；

信号比较：通过电压比较器将处理后的信号电平与预设参考电平对比，判断是否存在微弱打火；

逻辑处理：FPGA 对比较后的 TTL 电平进行时序分析与逻辑判断，输出保护控制信号；

保护输出：激光器将电控制信号转换为 850nm 波长的保护光信号，正常状态下持续输出红光，检测到微弱打火时红光熄灭，触发设备保护。

2.2 关键器件选型与性能分析

2.2.1 光电探测器

微弱打火光谱范围经实测为 $300\text{nm}\sim 480\text{nm}$ ，选用磷化镓（GaP）探测器作为光电转换核心器件。该探测器光谱响应范围为 $190\text{nm}\sim 570\text{nm}$ ，峰值响应波长 440nm ，与微弱打火光谱高度匹配，可有效捕获目标光信号。其关键性能指标如下：

检测灵敏度： $\leq -40\text{dBm}$ ；

暗电流： $\leq 30\text{pA}$ ；

响应时间： $\leq 50\text{ns}$ ；

封装形式：TO-46 金属管壳，顶部光窗与光纤端面精准耦合。

2.2.2 光纤探头

为提高光耦合效率，选用纤芯直径 1.2mm 的塑料光纤，其纤芯面积大，可有效收集微弱打火发散光信号。光纤探头采用不锈钢套管封装，具备耐高温（ 150°C ）特性，增强了在高压设备复杂环境中的可靠性；光纤端面经研磨、抛光与镀膜处理，进一步提升光传输效率。

2.2.3 跨阻放大电路

跨阻放大电路采用陶瓷基板与厚膜电路工艺，具备

高输入阻抗、高增益、高带宽、低噪声特性，通过微组装工艺与探测器共封装于密封箱体，有效降低外界干扰。电路等效模型如图3所示，可将 1nA 的微弱电流信号放大至可处理的电压信号，放大倍数稳定，线性度良好。

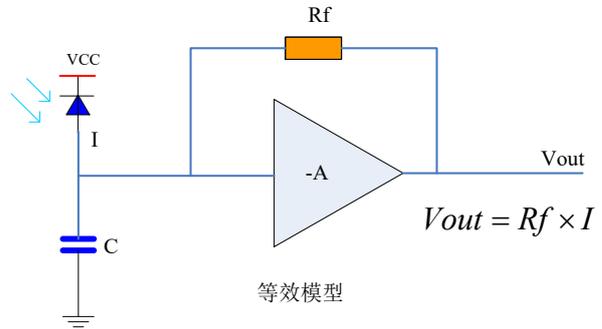


图3 电路等效模型

2.3 光谱特性与响应匹配

空气击穿放电产生的微弱打火光谱集中在 $300\text{nm}\sim 480\text{nm}$ ，GaP 探测器的光谱响应曲线覆盖该范围（ $190\text{nm}\sim 570\text{nm}$ ），且在 440nm 处达到响应峰值，与微弱打火主要光谱成分高度契合，确保了检测的有效性与准确性。图4为 GaP 探测器光谱响应曲线，可见其在目标光谱区间内响应度稳定，可实现对微弱打火信号的高效捕获。

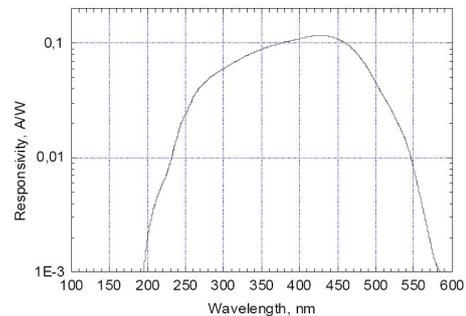


图4 探测器光谱响应曲线

2.4 保护机制与响应特性

系统保护输出采用光信号反馈模式，正常工作时输出 850nm 红光，作为设备运行正常的标识；当任意一路光纤检测到有效微弱打火信号（脉宽 $\geq 100\text{ns}$ ）时，FPGA 立即触发保护逻辑，激光器停止红光输出，后级电路接收到无光信号后切断高压回路，实现设备保护。该保护机制响应时间 $\leq 100\text{ns}$ ，可有效避免微弱打火对设备的持续损伤，保护状态持续至系统复位。

3 硬件系统设计与可行性分析

3.1 光纤探头设计

光纤探头是光信号采集的关键部件，其设计要点如下：

纤芯直径： 1.2mm ，最大化光耦合面积；

封装结构：不锈钢套管，增强机械强度与耐高温性能；

端面处理：研磨、抛光、镀膜，降低光反射损耗，提高传输效率；

工作环境适应性：耐受 150℃ 高温，适应高压设备内部复杂工况。

3.2 信号处理电路设计

3.2.1 放大电路

前级放大电路采用低噪声运算放大器，实现对微弱电流信号的初步放大；后级放大电路采用高增益、高带宽设计，将信号转换为符合比较器输入要求的电压信号。两级放大电路串联，总放大倍数可根据实际需求通过电阻参数调整，确保信号放大的线性度与稳定性。

3.2.2 逻辑处理单元

逻辑处理单元以 FPGA 为核心，负责信号时序分析、通道逻辑判断与保护信号输出。FPGA 具备并行处理优势，可同时处理两路检测信号，响应时间 $\leq 50\text{ns}$ ，确保保护机制的快速触发。此外，FPGA 还集成开机自检功能，可实时监测系统工作状态，通过 RS422 接口上报故障信息。

3.3 电源系统设计

电源处理单元为系统各模块提供稳定、低噪声的工作电源，设计指标如下：

输入电压：±12V 直流；

输出电压：±9V、+5V、+3.3V；

纹波系数： $< \pm 2\text{mV}$ ；

稳定性：电压波动 $\leq \pm 0.5\%$ ，确保检测电路的稳定性。

3.4 通信接口设计

系统采用 RS422 通信接口实现与外部主机的交互，具备以下功能：

参数配置：可通过主机设置参考电平、检测灵敏度等参数；

状态读取：实时获取系统工作状态、通道检测结果等信息；

告警上报：检测到微弱打火时，立即向主机发送告警信号。

RS422 接口具备抗干扰能力强、传输距离远（最大传输距离 1200m）等优势，适用于工业现场的通信需求。

4 系统性能测试与验证

4.1 灵敏度测试

在实验室环境下，采用光功率计模拟不同强度的微弱打火光信号，测试系统检测灵敏度。结果表明，当输入光功率为 -40dBm 时，系统可稳定检测到信号，光电

探测器输出电流为 1nA，满足设计要求；当光功率低于 -40dBm 时，系统无误触发，检测精度良好。

4.2 响应时间测试

通过信号发生器产生脉宽为 100ns 的模拟微弱打火信号，测试系统从检测到信号至输出保护信号的响应时间。测试结果显示，系统平均响应时间为 85ns，小于设计指标（100ns），可实现快速保护。

4.3 稳定性测试

将系统置于 150℃ 高温环境下，连续运行 72h，测试其稳定性。结果表明，系统各模块工作正常，检测灵敏度、响应时间等指标无明显漂移，电源纹波始终 $< \pm 2\text{mV}$ ，通信接口传输稳定，无丢包现象，满足工业现场的长期运行需求。

4.4 实际工况验证

将系统应用于某型 10kV 瞬时高压设备，双路光纤探头分别安装于行波管两端。设备运行过程中，人为模拟电压波动产生的微弱打火，系统成功检测到信号并触发保护，红光熄灭，后级电路及时切断高压，设备未出现损伤。多次测试结果表明，系统检测准确率达 100%，无漏检、误检现象。

5 结论

本文提出的微弱打火的两路高信噪比光学检测技术，通过光纤耦合传输、高灵敏 GaP 探测器、多级放大电路与 FPGA 逻辑处理的协同设计，实现了对 300nm~480nm 光谱范围微弱打火信号的精准检测，检测灵敏度达 -40dBm，响应时间 $\leq 100\text{ns}$ 。该系统具备两路无盲区检测、RS422 通信、高温稳定运行等优势，可有效保护高压设备免受电弧损伤。该技术可为高压设备的安全运行提供可靠保障，在电子对抗、工业生产等领域具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 王旭东, 温阳, 王慧云, 等. 基于光偏转原理的 AFM 光电检测系统设计[J]. 传感器与微系统, 2024(003): 043.
- [2] 徐志凯, 瑚琦. 便携式 PCR 实时光电检测系统设计[J]. Modeling and Simulation, 2025, 14.
- [3] 黄桂琼, 张廷玉, 成思韩, 等. 基于 Multisim 的光电检测电路的仿真设计[J]. 中国设备工程, 2025(1): 180-182.

作者简介：夏志勇（1975.10-），男，汉族，云南省昭通市人，本科，高级工程师，研究方向：汽车芯片可靠性和安全功能分析。