

配电杆塔高空作业限高阻隔智能预警系统设计与实现

李珍珍 区国洪 杨振鸿 唐晓烽

广东立胜电力技术有限公司 广东佛山 528000

DOI: 10.12238/ems.v7i10.15769

[摘要] 针对传统配电杆塔高空作业中物理阻隔装置智能化不足、缺乏实时预警机制的问题,本文设计了一款基于超声波测距的限高阻隔智能预警系统。该系统集成超声测距模块、多模态告警系统与低功耗控制单元,通过动态监测作业人员与危险区域的距离,实现分级声光与语音预警,并具备故障自检与便携安装特性。测试表明,系统测距精度达毫米级,待机时间 ≥ 24 小时,可有效降低高空作业触电与坠落风险,为电力及相关高空作业场景提供安全保障。

[关键词] 配电杆塔高空作业;限高阻隔;超声波测距;智能预警系统

引言

配电杆塔作为电力传输的关键设施,其维护、检修等高空作业伴随极高安全风险^[1-3]。传统安全措施依赖阻隔网、限高杆等物理装置,仅能被动隔离施工区域与带电危险区域,存在三大局限:一是无法实时监测人员与危险区域的距离变化,难以及时发现擅自攀爬行为;二是缺乏动态预警机制,仅靠物理阻隔难以制止危险行为;三是装置智能化程度低,无故障自检功能,易因设备失效导致安全隐患。

为解决上述问题,本文结合超声波测距、嵌入式控制与多模态告警技术,研发配电杆塔高空作业限高阻隔智能预警系统,实现“实时监测-分级预警-故障自检”一体化功能,提升高空作业安全性。

1 系统总体设计

1.1 系统架构

系统采用“感知-控制-预警-安装”四层架构(图1):

(1)感知层:由超声测距模块构成,负责采集作业人员(或工具)与阻隔装置的距离数据;

(2)控制层:以STM32L051C8T6为主控芯片,处理距离数据、判断危险等级并下发预警指令;

(3)预警层:包含声光告警(红色警示灯、蜂鸣器)与语音合成模块(SYN6288E芯片),实现多模态预警;

(4)安装层:采用可拆式可调节管夹,适配不同尺寸杆塔,确保装置稳定固定。

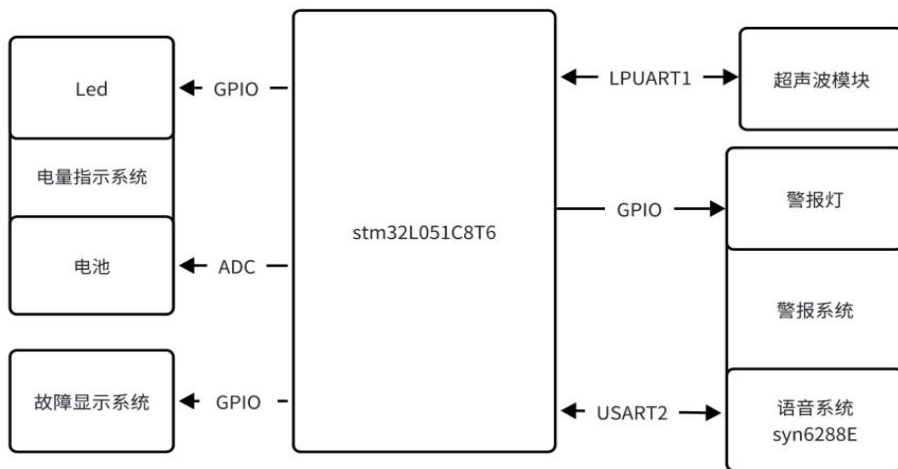


图1 配电杆塔高空作业限高阻隔智能预警系统架构

1.2 工作流程

系统工作分为三个阶段:

(1)自检阶段:设备启动后检测语音模块、电池电压(通过ADC采集)及超声模块状态。若电压 $< 3.3V$ 或模块异常,亮红灯并语音提示,进入休眠模式;无异常则亮绿灯,进入工作模式。

(2)监测阶段:工作模式下每1分钟检测电量(电压 $< 3.5V$ 时语音提示),通过LPUART1协议接收超声模块的距离数据,采用“动态休眠算法”调节监测频率(距离缩短10%,休眠时间减少20%,最大休眠2秒),平衡精度与功耗。

(3)预警阶段:当距离 $< 1m$ 时,触发红色警示灯与语音播报(如“距离危险区域1米,请立即停止攀爬”);距离 $< 0.3m$ 时,额外启动蜂鸣器,强化预警;距离 $> 1m$ 时,关闭所有预警设备。

1.3 算法流程

算法流程如图2所示,其核心设计思路是依据实时检测

到的距离信息,动态调整系统的休眠时间,从而在保证检测效果的同时实现资源合理利用。具体来看,流程首先对当前距离进行判断,查看其是否达到预设的1m警报距离。一旦当前距离处于这一警报范围内,系统会将休眠时间设定为0.5s。这样的设置能让系统以较高频率进行检测,确保对处于警戒范围内的目标动态进行及时捕捉。

若当前距离未达到1m的警报距离,系统则会进一步对比当前距离与上一次检测到的距离。如果上一次检测的距离比当前距离远50cm及以上,说明目标有较明显的靠近趋势,此时系统同样会将休眠时间设为0.5s,以高频检测持续追踪目标。而若两次距离的差距不足50cm,休眠时间则按照 $[0.5 + (\text{当前距离} - 1m) / 1m]s$ 的公式计算。比如当距离为2m时,休眠时间为1.5s;距离为3m时,休眠时间为2.5s。这种动态调整的逻辑,既保证了关键场景下系统响应的及时性,又在非关键场景中有效优化了能耗。

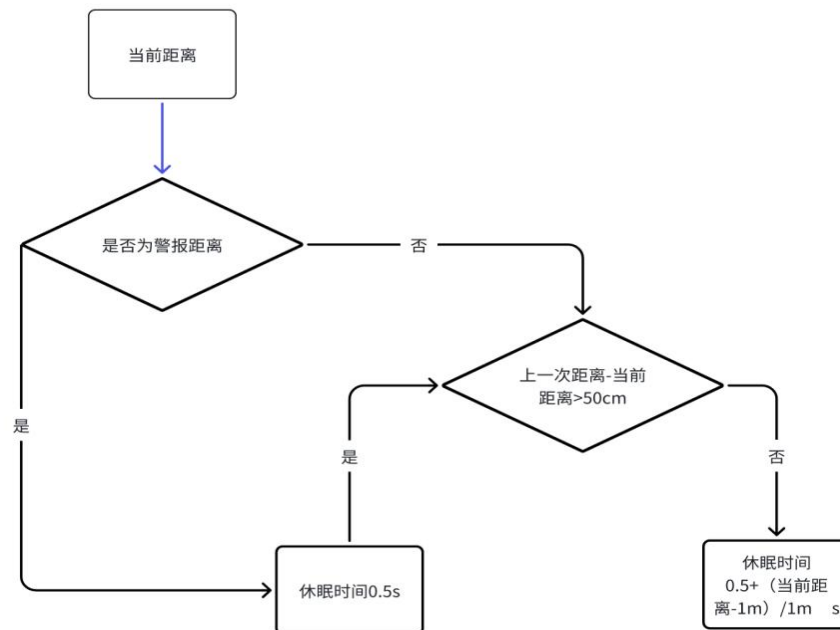


图2 算法流程图

2 关键技术实现

2.1 动态测距与分级预警

(1) 超声测距: 选用高精度超声波模块, 通过发射/接收超声波脉冲, 计算往返时间差获取距离 (公式: 距离=声速 $\times$ 时间差/2), 测距范围 0.1-5m, 精度达 ± 1 mm, 适应高空风噪环境。

(2) 分级预警逻辑: 根据距离阈值划分三级危险等级 (表1), 确保预警强度与危险程度匹配。

表1 危险等级与预警方式对应关系

距离范围	危险等级	预警方式
>1m	安全	无预警
0.3-1m	一级危险	红色警示灯+语音提示
<0.3m	二级危险	红色警示灯+语音提示+蜂鸣器

2.2 低功耗设计

为适配高空无外接电源场景, 系统从硬件与算法两方面优化功耗:

(1) 硬件选型: 主控芯片 STM32L051C8T6 支持低功耗模式, 待机电流仅 $0.27 \mu A$; 采用 3.7V 锂电池供电, 经 TC1262-3.3V LDO 芯片稳压至 3.3V, 满足各模块供电需求。

(2) 动态休眠算法: 根据距离调节监测间隔 (最远 5m 时休眠 2 秒, 最近 0.1m 时实时监测), 降低无效功耗, 确保待机时间 ≥ 24 小时。

2.3 多模态告警与故障自检

(1) 语音合成: 采用 SYN6288E 中文语音芯片, 直接驱动喇叭输出预警信息 (如距离、危险等级), 语音清晰可辨, 适应嘈杂作业环境。

(2) 故障自检: 实时监测模块状态, 若超声或语音模块异常, 自动重启模块; 重启失败则亮红灯并语音提示故障类型 (如“超声波模块故障”), 便于及时维护。

2.4 便携安装结构

图3为装置总体结构示意图, 1-1 超声波测距模块、1-2 装置外盒、1-3 声光报警器模块、1-4 装置外盒盖、1-5 电路板 (装饰)、1-6 下管夹摩擦皮革层、1-7 螺纹固定下管夹、1-8 上管夹摩擦皮革层、1-9 上管夹、1-10 管夹调节器、1-11 管夹锁紧螺丝。设计可拆式可调节管夹, 包含上/下管夹、摩擦皮革层与锁紧螺丝:

(1) 管夹通过固定插销实现单边硬连接, 配合锁紧螺丝快速开合, 适应直径 50-200mm 的杆塔;

(2) 摩擦皮革层增加管夹与杆塔的摩擦力, 避免高空晃动;

(3) 外壳采用防水防尘设计 (IP54 等级), 保护内部模块免受风雨、灰尘影响。

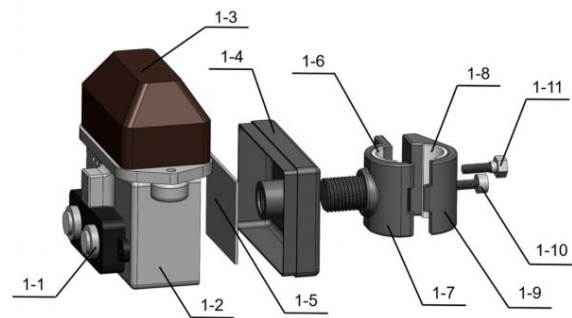


图3 装置总体结构示意图

3 结论

本文研发的配电杆塔高空作业限高阻隔智能预警系统, 通过超声测距实现距离实时监测, 结合分级多模态预警与低功耗设计, 解决了传统物理阻隔装置的被动性与低智能化问题。系统具备测距精准、预警及时、安装便捷等特点, 可有效提升高空作业安全性, 具有重要的工程应用价值。后续将进一步优化语音合成算法, 提升嘈杂环境下的语音辨识度, 并拓展 5G 远程预警功能, 实现作业区域的集中监控。

【参考文献】

- [1] 王强, 张宝, 刘忠堂, 等. 输配电杆塔登高防坠钢索装置的研发及应用[J]. 电气技术与经济, 2023, (09): 183-184+188.
 - [2] 赵亚光, 王继康, 龙飞. 输电线路简易防坠落装置的研制及应用[J]. 电气技术, 2015, (05): 102-105.
 - [3] 谢振雄. 电力输配电线路中运行维护、故障排除技术的应用及重要性[J]. 建材与装饰, 2017, (51): 244-245.
- 作者简介: 李珍珍 (1985-10), 女, 汉族, 广东梅州人, 本科, 电气助理工程师, 研究方向: 带电作业。