

# 防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置研制

高 展，赵安家，明 鑫

(国网山东省电力公司利津县供电公司，山东 东营 257400)

**摘要** 本研究研制了一种防高空杆塔作业人员误碰带电线路的警示装置。研制工作严格依照可靠性第一、适应性广泛和方便应用这三大原则展开，该装置的核心内容包括：把多种传感器融合起来实现多模感知，形成完备的分级预警体系，研发灵敏度高的近电感应模块，并且加入有效的抗干扰加强设计。研究结果显示，该装置可以有效地对临近的带电线上发出警报信息，从而为高空作业人员提供主动的安全保护，减少了触电事故的发生概率。

**关键词** 杆塔作业；防误碰；近电感应；分级预警；多模感知

中图分类号：TM75

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.010

## 0 引言

高空杆塔施工属于电力运维领域高危作业环节，人员误碰带电设备会带来人身安全风险。传统安全管理手段靠制度约束和个体防护意识来执行任务，缺少实时监测及动态预估功能，在复杂工况中有一定局限性。要从根源上加强现场操作的安全水平，需研制具备即时观测能力的智能化守护装置。本研究旨在研制一种便于携带或者穿戴的新型警示装置，通过精准地感知周围环境中各种电磁场散布特性，并在靠近危险源时可立即发出警示信息，为作业人员提供可信赖的保障措施。

## 1 防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置概述

防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置是保障电力作业安全的重要设备，它突破传统警示手段在复杂作业环境的限制，将多维度感知技术与动态预警机制结合，通过捕捉作业人员肢体动作轨迹、杆塔周边电场分布及环境参数变化，构建立体化风险识别网络。研发难点为保证感知数据准确、传输稳定，不受高压强电磁干扰和杆塔复杂结构影响，还要保证装置轻量化、抗恶劣天气。从技术架构上讲，该系统把微机电系统传感器、超宽带定位单元、自适应滤波算法融合起来，可以对作业人员与带电线路之间的安全距离实施动态检测，按照风险的等级高低分层报警<sup>[1]</sup>。其主要功能是通过佩戴终端设备振动提醒、声光提示，同时杆塔警示标志同步闪烁，形成人、机、环三元互动的信息反馈闭环体系。这种装置彻底改变了过去依

靠人工观察、经验判断的被动安全模式，把安全防护从静态警示提升为动态守护。在实际作业中，它可以准确地捕捉到作业人员不自觉的危险动作趋势，提前发出预警信号，给作业人员留出足够的时间来反应。不管是在茂密林区遮挡视线的场景，还是在暴雨大风等恶劣天气下，装置都能够稳定运行，依靠强大的环境适应性，为一线作业人员筑牢安全防线，成为电力作业现场不可缺少的安全保障力量。

## 2 防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置原则

### 2.1 坚持可靠性第一原则

按照可靠性第一原则从技术架构底层做起，建立全链条风险防控体系。它的创新之处就在于把故障树分析法与实时工况模拟技术相结合，在研发初期就对可能造成预警失效的，如高压电磁脉冲干扰等极端情况，进行数字化建模，并通过大量的模拟测试来改进应对策略。在核心模块中加入多路径数据校验机制，使得感知到的数据在传输过程中可以即时比对、纠错，防止出现误判或者漏判。另外，还要解决极寒或高温环境下元器件性能降低的问题，用特殊材料进行封装，用智能温控算法的方式，使关键元件能在恶劣的环境下持续正常运转。从技术实现角度来讲，该装置采取分布式供电架构，各个感知单元配有独立的备用电源系统，迅速达成电源切换，防止由于主电源失效造成设备停止运作。同时集成动态冗余算法模块，实时检测组件运行状态，当部分性能下降的时候启动备用通道，保证预警系统连续稳定。从风险预判到应急处置

的全流程设计，使可靠性从单一的指标变成了一直贯穿始终的核心支撑，在复杂多变的作业环境中也能筑牢安全防线。

## 2.2 遵循适应性广泛原则

防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置符合适用范围广的特点，不再像传统的警示装置那样局限于某种类型的杆塔、某种电压等级的线路或者是某种地理环境，而是形成了模块化、可重构的体系。此体系能够按照不同的作业场景需求，灵活地对感知模块组合及预警算法参数进行调整，在山区多雾地带，自动增强红外感知模块的探测强度，改良声光预警的穿透性参数设置；在城市密集分布多条电线时，重点加强超宽带定位模块抵御外界电磁信号干扰的能力，避免周围电磁波对距离测算造成影响<sup>[2]</sup>。想要达到广泛的适用性存在技术上的困难，一方面要解决不同电压等级线路电场特性不同导致的感知精度问题，使用自适应电场校准算法使装置可以识别线路电压类型，并调节相应的感知阈值标准，从而保证装置在各种电压环境下准确捕捉到潜在的风险信号。另一方面则是要面对杆塔结构类型的多样性，根据角钢塔、钢管塔、水泥杆等不同材质外形的特点，设计出能够快速匹配安装的部件组件，这些零件要具有足够的强度和灵活性，既要牢固地固定在各种杆塔上，又不能因为杆塔的振动而造成感知模块失稳。以场景为导向的柔性设计，使装置可以主动去适应环境而不是被动地去适应，大大拓宽了它的应用边界。

## 2.3 恪守便捷化应用原则

防高空作业误碰带电线路警示装置设计时要遵从便捷原则，看重现场作业人员的真实需求，还要把技术创新和人性化设计结合起来，从而冲破传统设备的技术瓶颈。系统的主要特点就是简单的操作加智能的辅助，采用快插式接口，不需要专业工具就可以快速安装，使用激光定位技术，可以自动对准，轻量级移动终端，图形化界面直接显示重要的报警信息，支持触摸交互查看相关信息。简化操作要平衡功能完整性，在保证电气连接稳定性、机械强度的同时，核心问题是智能辅助部分同工作流程的适配问题，通过准确识别作业场景目标、产生最适宜的布设方案，使技术辅助贴合实际的操作习惯。设备运维操作同样便捷，系统内部包含远程诊断功能模块，运行时能及时把数据上传到管理平台，方便技术人员精准定位故障并完成软件更新。对现场出现的各种异常情况，都有相应的维修指导方案可以参照，使维护变得简单且具有针对性。

全周期的便捷化设计既降低了操作人员的门槛，又保证了装置全生命周期内的高效、稳定运行，从而提升作业的安全保障水平。

## 3 防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置研制方法

### 3.1 集成多模感知技术

防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置的研制，关键是打破感知技术的壁垒，依靠跨领域协同融合形成智能化感知网络，而不是简单地拼接传感器。红外热成像、电场感应、毫米波雷达、姿态传感器数据互补、相互校验。电场感应模块检测到线路带电之后，毫米波雷达追踪作业人员与线路的距离，红外热成像模块追踪作业人员的肢体动作，三种检测数据实时传递到中央处理单元进行综合分析，防止单一传感器受干扰误判。集成过程中会遇到很多难题<sup>[3]</sup>。一方面要开发传感器转换数据接口和同步算法，消除信息频率、格式的差别，实现多源数据准确对接；另一方面采用轻量化边缘计算模型，在装置内对数据进行初步筛选和部分分析，平衡数据冗余度的同时保证运算效率，减少上传到远程平台的数据量，保证解析速度。根据杆塔结构以及作业人员活动范围，采用三维仿真技术对传感器布置及角度进行优化，保证监测范围覆盖且无信号干扰。该策略意在全方位、准确地感知现场人员、线路运行及周边环境的信息，为预警系统打下数据基础。研发团队特别注重感知模块的兼容性和抗干扰能力，经过多次测试调节算法参数，在高压电磁环境下仍能保证不同传感器数据输出的稳定性。针对杆塔作业中出现的金属遮挡、信号反射等现象，专门对雷达波的发射角度和热成像的识别阈值进行优化，保证复杂场景下的感知精度。同时边缘计算模块的加入提高了数据处理的速度，减少了装置对远程通信的依赖，在信号弱的地方也可以独立完成风险的初步判断，为后面分级预警提供可靠的技术支持，使多模感知真正成为装置安全防护的核心能力。

### 3.2 构建分级预警机制

防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置打破了传统单一预警模式的技术束缚，开创性地将风险评价模型同现场动态特征参数进行融合，从而构造多维度差别化的分级预警系统。这个体系抛弃依靠固定空间距离划定警戒区域的老办法，转而考虑输电线路电压等级，操作是否符合规范以及外界环境干扰强度等要素，并凭借机器学习算法对以前发生的事故案例和

仿真场景数据执行深入分析，进而生成实时更新的风险量化指标，按照这种风险值来划分工作状态为三个级别：提示阶段只是触发穿戴设备里的小震动反应并伴随绿灯闪烁提醒；当进入预警就会一同启动声光报警并且照亮塔身的辅助标记以便指引姿态修正动作；危急情况下不但能加大视觉听觉警告力度，还会联结监控平台给地面指挥中心发出求救信息并操控施工机械停止运转以免发生意外状况。建立该机制的技术难点是保证风险评估准确及时，既要实时采集各影响因素变化数据，动态调整模型中各参数权重，来解决多因素权重如何动态分配的问题，以免固定权重造成评估误差。另外，还要深入研究不同作业环节的安全要求，做到预警措施与作业流程无缝对接，以确保预警不会打乱正常作业秩序，又能快速启动有效防护措施，真正实现分级预警精准响应，最大程度保障作业安全。

### 3.3 开发近电感应模块

防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置攻破了近电感应模块的技术瓶颈。这个模块冲破传统单一频率信号依赖模式的限制，创新性地应用宽频域感知技术和智能识别算法，很大程度上改善了对不同种类输配电设施检测准确度以及反应速度。它的主要功能就是不仅能够精确分辨高压输电线缆，而且还能应付低压配网甚至包含通信电缆在内的复杂情形，并且依靠内置频谱解析单元提取目标线路独有的电磁特征参数值，再经由数据库标准模型库比较来自动判定电压等级和路径属性信息内容，在此之后为下一步灵敏程度调节提供数据支撑，从而防止发生相互干扰现象<sup>[4]</sup>。在这一过程中需系统处理关键技术难点：针对强电磁环境抗扰动能力不足，采用多层屏蔽结构设计与自适应滤波策略剔除背景噪声；改进传感线圈材料特性与绕制工艺，提升微弱场源探测水平；结合实验数据分析出典型工况下三维电场分布规律曲线，引入动态校正机制改进测量结果准确性，保证整机运行稳定性达预期。该模块需具备低功耗特性，采用休眠唤醒机制与高效电源管理电路，在不影响感应性能的前提下延长运行时长，适合高空杆塔工作环境，满足不常换电池需求，确保带电线路检测准确，为预警系统稳定运作提供数据与状态保障。

### 3.4 引入抗干扰强化设计

高空作业防误碰带电线路警示装置研发重点围绕抗干扰特性展开系统化设计与改良工作。在硬件、软件以及结构这三个维度上建立全方位的抗干扰技术架构体系来应对复杂环境下多种干扰因素所带来的考验，

如电磁辐射现象、恶劣天气状况以及机械振动。就硬件而言，采用电磁兼容理念对核心电路实施合理布局安排，并且采取屏蔽隔离措施把那些比较敏感的元件同其他可能造成影响的因素分隔开来。其次是选择耐压水平较高并且具备较强抵御干扰能力的电子元器件作为主要材料之一，而且还要配备浪涌保护单元和滤波器组件等附加设施，从而有效减轻外部噪声对外界功能信号所造成的不良影响。软件部分，则开发出一系列专门针对该问题而设立的相关算法模型方案，其中包含数据校验规则设定方法、异常检测机制建立流程以及动态补偿策略制定步骤等内容。在实际运行过程中能够及时地识别并修正各种各样的异常情形表现出来的情况，如传感器收集到的数据存在偏差或者传输通道被堵塞的时候，相关的程序就会立刻启动纠错。特别是对于由瞬态脉冲引发的局部失真情况，可以利用特征对比的方式完成快速复原任务目标信号。引入该设计面临诸多技术难点，需为各类干扰制定专项抗干扰方案，处理多类干扰并存问题，因不同干扰源对装置影响机制不同，且要确保方案间无矛盾。同时，要通过仿真测试和实验，平衡抗干扰性能与装置体积、重量及功耗的关系，避免因过多抗干扰组件增加装置复杂度和成本，在保证抗干扰效果的同时优化整体规划<sup>[5]</sup>。

## 4 结语

本研制项目完成对高空杆塔作业的防误碰带电线路警示装置开发，结合多模感知和建立分级预警机制，达成危险源识别准确告警目标，并且近电感应、抗干扰设计配合使产品在复杂电磁环境下依然可以稳定运行，彻底贯彻了可靠性、适应性、便捷性原则，为高空作业人员提供了主动的安全守护措施，在预防触电事故方面对电网安全稳定有重要的实践意义与应用效益。

## 参考文献：

- [1] 王振宇,邹德华,李智慧,等.高空翻转式无人机用导地线便携式挂架研究及应用[J].电气时代,2025(09):57-60.
- [2] 邹贊政.浅析输电线路防高空坠落柔性导轨减振装置的应用[J].机电信息,2018(09):47,49.
- [3] 刘代全.输电线路杆塔防坠落装置应用分析[J].机电信息,2012(15):44-45.
- [4] 何国飞,吴玉燕.钢绞线防坠落装置在杆塔登高作业中的应用探讨[J].广西电力,2008(04):69-70,73.
- [5] 刘劲松,孟昊,王禹民.送电线路防高空坠落装置[DB/OL].锦州:辽宁省电力有限公司两锦供电公司,2000-08-04.<https://www.tech110.net/portal.php?mod=view&aid=5076470>.