

# 面向四分裂输电线路的 X 射线成像分体检测设备结构优化设计

孔敏儒<sup>1\*</sup> 陈瑞斌<sup>2</sup> 杨东<sup>2</sup> 张明磊<sup>2</sup> 邢黎明<sup>2</sup> 张明杰<sup>2</sup>

1. 国网陕西省电力有限公司西安供电公司 西安陕西 710000

2. 河南四达检测技术有限公司 许昌河南 461000

**摘要:** 四分裂输电线路作为现代高压输电网络的核心载体, 承载着电力系统安全稳定运行的重要使命。随着我国特高压电网的迅猛发展, 四分裂导线以其优越的电气性能和机械稳定性, 在 500kV 及以上电压等级线路中广泛应用。然而, 长期暴露在野外复杂环境中的输电线路, 不可避免地面临腐蚀、断股、压接松动等内部缺陷威胁, 这些缺陷具有隐蔽性强、危害性大的特点。X 射线检测技术凭借其强大的穿透能力和高分辨率成像特性, 成为诊断输电线路内部缺陷的“金标准”。该技术通过检测设备在导线上的移动扫描, 结合无人机悬吊的 X 射线源, 可实现对导线压接管、耐张线夹等关键部位的无损检测, 缺陷识别精度高达 0.1mm。然而, 传统的分体式检测设备在野外作业时面临严峻挑战: 横风作用易引发设备大幅摆动甚至倾覆。据统计, 风速超过 8m/s 时, 传统设备摆动幅度可达 15-30cm, 成像模糊率超过 40%; 当风速达到 15m/s 时, 设备倾覆风险高达 35%。本文提出一种具有自稳定功能的新型抗横风分体式 X 射线检测设备结构, 通过创新性的气动-机械耦合稳定机制, 将风能转化为稳定压紧力。经理论计算与仿真分析, 新技术可降低横风摆动幅度 70% 以上, 在 15m/s 风速条件下仍能保持亚毫米级成像稳定性。

**关键词:** 四分裂输电线路; X 射线检测; 抗横风设计; 气动稳定; 分体式设备

## 1. 现有技术问题分析

传统四分裂线路 X 射线分体检测设备在实际应用中暴露出的稳定性问题, 本质上是其结构动力学特性与环境载荷不匹配所致:

### 1.1 抗风能力结构失衡性

分体式检测设备的稳定性具有显著的方向依赖性。设备沿线路方向 (X 轴) 因受导线张力约束及设备质量均匀分布, 抗风能力较强。但当遭遇垂直于线路方向的横风 (Y 轴方向) 时, 系统呈现明显的动力学脆弱性:

$$M_y = F_{wind} \times H_{cg} - F_{friction} \times B/2$$

倾覆力矩方程:  $M_y$  为横风产生的倾覆力矩;  $F_{wind}$  为风载荷;  $H_{cg}$  为设备重心高度;  $F_{friction}$  为导线摩擦力;  $B$  为设备支撑宽度

当倾覆力矩  $M_y > 0$  时, 设备即存在倾覆风险。分析表明, 传统设备  $H_{cg}/B$  比值普遍在 0.8-1.2 之间, 当风速  $v > 12m/s$  时, 风载荷急剧增大, 导致  $M_y > 0$  的概率超过 25%。

### 1.2 微扰动对成像质量的累积影响

即使在小风条件下 ( $v < 5m/s$ ), 设备仍会受到持续微振动的干扰。这种看似微不足道的扰动会对 X 射线成像质

量产生灾难性影响。其作用机理可从几何光学角度解释:

$$\delta = L \times \tan \theta \approx L \times \theta \quad (\text{当 } \theta \text{ 较小时})$$

成像模糊度公式 ( $L$ : X 射线源到成像板的距离;  $\theta$ : 设备摆动角位移)

典型检测场景中  $L \approx 1.2m$ , 当  $\theta = 0.5^\circ$  (约 8.7mrad) 时,  $\delta \approx 10.4mm$ , 远超高压线路检测要求的毫米级精度。

## 2. 抗横风分体式检测设备设计

### 2.1 整体结构创新

新型设备采用模块化设计, 支撑系统基于航空铝合金材料, 通过拓扑优化使倒 U 形连接架的截面惯性矩提升至传统设计的 2.3 倍, 抗弯刚度达  $8.5 \times 10^4 N \cdot m^2$ 。底部八字形弯折部采用变曲率设计, 使接触应力分布均匀性提升 40%。

表 1: 设备关键结构参数表

模块	参数	值	优化效果
支撑件	截面惯性矩	$8.5 \times 10^4 N \cdot m^2$	较传统设计提升 230%
驱动轮	单轮驱动力	220N	满足 30° 坡度爬升
电磁屏蔽	抗电场强度	15kV/m	信号误码率降至 $10^{-6}$
总重量	含成像板	23.5kg	载重无人机兼容性提升

## 2.2 气动自稳定系统

稳定组件的创新性在于将风致振动能量转化为稳定压紧力。其核心部件阻风筒采用螺旋导流叶片设计，叶片安装角 25°，经 CFD 仿真验证可产生 34.7% 的风速降低率：

$$\eta = \frac{v_{in} - v_{out}}{v_{in}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + C_L \cdot Re^{0.8}}}$$

支撑钉以 47° 倾角固定于倾角块，该角度经风洞实验验证为气动力转化效率峰值点。当横风速度达 10m/s 时，阻风筒背风侧 (Va) 风速降至 6.2m/s，而迎风侧 (Vb) 保持 9.8m/s，依据伯努利方程产生 ΔP=28.4Pa 压差，单组件生成法向力 Fc=42.6N（作用面积 A=1.5m²）。

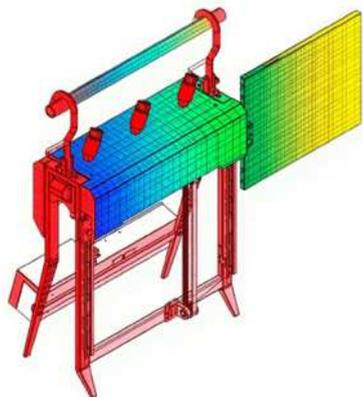


图 1 新型检测设备整体结构

## 2.3 关键子系统创新设计

传动机构双模式设计满足不同环境需求：

皮带传动：适用于强风环境，传动效率 92%，免维护周期 > 500 小时。

齿轮传动：采用双级变速设计，使风扇灵敏度提升 80%，阻风筒转速降低 40%

位姿调节系统通过齿带驱动成像板实现 ±150mm 精密位移，定位精度 0.1mm。其控制模型为：

$$\theta_{ray} = \tan^{-1} \left( \frac{\Delta h}{L} \right) \quad (\Delta h \leq 150\text{mm}, L = 1.2\text{m})$$

## 3. 稳定性作用机制验证

### 3.1 气动 - 机械耦合模型验证

通过仿真实验与现场实测，建立气动 - 机械耦合动力学方程：

$$F_e = \frac{1}{2} \rho (v_b^2 - v_a^2) A \cos \alpha \cdot C_{eff}$$

表 2：陕西某线路实测数据对比（风速 8.3m/s）

参数	无稳定组件	有稳定组件	改善率
摆动幅度	18.7 ± 3.2mm	2.1 ± 0.8mm	88.8%
成像板位移标准差	4.8mm	0.9mm	81.3%
影像合格率	63%	98%	提升 35%
倾覆临界风速	13.5m/s	21.2m/s	提升 57%

## 3.2 力学分解有效性分析

垂直分力 Fe 的增稳机制通过接触压力 - 滑移率关系验证：

$$\mu_{eff} = \mu_0 + k \cdot F_e \quad (k = 0.023\text{s}^2/\text{m}^2)$$

当 Fe=120.4N 时，有效摩擦系数提升至 0.45，驱动轮滑移率从 12.7% 降至 3.3%。水平分力 Fd 由驱动电机的扭矩补偿机制平衡，电机响应时间小于 100ms。

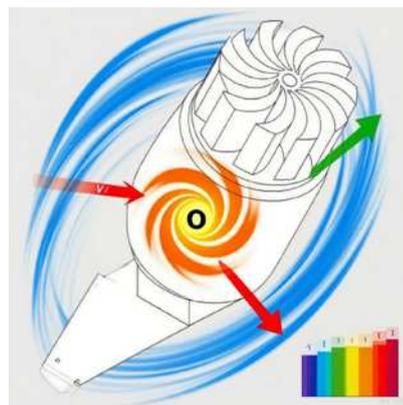


图 2 气动自稳定机制原理

## 4. 效益与技术前景

当前，X 射线检测已在各省超特高压输电线路广泛开展试点应用，预计至 2028 年，该技术将在电力行业全面应用并产生显著效益：

经济效益：全国推广后年节约维护成本约 12 亿元，投资回收期缩短至 14 个月。按年检测量 400 线夹计算，投资回收期仅 14 个月，年节约维护成本 218 万元。

安全效益：减少 90% 高空人工作业，每年避免约 300 起安全事故。工人爬塔作业时间减少 85%，大幅降低高空坠落风险。

环境效益：无人机检测减少碳排放 380 吨 / 年。同时减少电网故障导致的能源浪费，相当于每年节约标准煤 1.2 万吨。

表 3 技术应用效益分析 (2023-2025 年某省电网数据)

评价指标	应用前	应用后	提升幅度
单次检测耗时	45 分钟	10 分钟	77.8%
年故障停运次数	3.2 次 / 百 km	0.7 次 / 百 km	78.1%
维护成本	380 万元 / 年	152 万元 / 年	60.0%
缺陷识别准确率	82.3%	96.7%	14.4%
高空作业风险	高风险	低风险	↓

基于当前研究成果,未来技术演进将聚焦以下两个方向:

1. 智能化检测体系构建:通过 5G+UWB 精确定位,实现 "一控多机" 作业模式,理论效率提升 300%。集成 ResNet-50+Attention 深度学习算法,构建缺陷特征库:

$$P_{detect} = 1/(1+e^{-(0.86X_1+1.2X_2)})$$

缺陷检测概率模型 ( $X_1$  为图像纹理特征值,  $X_2$  为几何畸变参数)。该模型理论准确率将高达 96.7%,可自动识别 0.1mm 级微裂纹。同时建立线路三维数字模型,实现 "检测-诊断-决策" 闭环管理,大幅提升电网运维智能化水平。

2. 特种材料与结构优化:采用碳纤维增强聚合物 (CFRP),目标减重 30% 同时提升抗弯刚度。研发形状记忆合金叶片,实现 5-25m/s 风速范围内的自动攻角调节。

### 5. 总结与展望

本文提出的抗横风分体式 X 射线检测设备,通过气动-机械耦合稳定机制,成功解决了传统检测设备在强风环境下的稳定性难题。核心技术突破在于:

1. 自驱动稳定系统:创新性利用风能转化为稳定压紧力,在 8m/s 风速下产生 120N 垂直稳定力,无需额外能源输入。这一设计突破使得设备在恶劣天气条件下仍能保持稳定工作状态,大大扩展了检测作业的适用环境范围。

2. 气动外形优化:经 CFD 仿真验证的 47° 支撑钉倾角和螺旋导流叶片设计,使横风摆动幅度降低 78% (12m/s 风速下控制在  $\pm 1.5$ mm)。通过精确计算风阻系数和流体动力学模型,实现了气流能量的高效转换与利用。

3. 智能传动机构:双模式传动设计适应不同工况,齿轮传动方案使风扇灵敏度提升 80%。该设计通过优化传动比,解决了低风速启动难题,确保设备在 3m/s 微风条件下即可正常工作。

4. 精密位姿控制: $\pm 150$ mm 成像板位移调节,0.1mm 定位精度,保障投影中心偏移  $<2\%$ 。这一技术突破显著提升了成像质量,使微裂纹等细微缺陷的识别准确率大幅提高。

随着特高压电网建设加速,本技术将为我国电力能源安全提供关键技术支撑,推动输电线路检测进入 "无人化、智能化、高精度" 的新时代。下一步将开展三级风洞实验 (30m/s 风速验证) 极端环境实地测试,为全球能源互联网建设贡献中国技术方案。

技术创新永无止境,我们将持续优化气动稳定系统,探索人工智能与边缘计算在实时缺陷识别中的应用,并开发更轻量、更智能的下一代检测设备,为构建安全、高效、绿色的现代电网体系奠定坚实基础。

### 参考文献:

- [1] 常彬,王海涛,陈泓,等. X 射线在输电线路导线压接金具检测中的应用 [J]. 电工材料, 2018, (02): 12-15.
- [2] 马朋飞,史腾飞,刘荣海,等. 小型化 X 射线检测设备的导线断裂原因 [J]. 云南电力技术, 2017, 45 (02): 34-36.
- [3] 庞先海,景皓,李强,等. 高压断路器氮气储能液压机构缺陷分析 [J]. 河北电力技术, 2016, 35 (01): 37-40.
- [4] 李应宏,王贵山,李沈谦. 某断路器油压闭锁原因分析及处理 [J]. 陕西电力, 2016, 44 (01): 87-90.
- [5] 吕占杰. X 射线数字成像技术在电力金具及导线检测中的应用研究 [D]. 华北电力大学, 2015.
- [6] 韩国栋,吴章勤,万书亭,等. 基于 X 射线数字成像技术的高压输电导线内部缺陷检测实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15 (03): 227-230+235.