

极端天气下敞开式接地开关导电杆设计优化研究

李杰¹, 龙国华¹, 刘相前², 朱春良³, 程梦盈¹

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 2. 泰山职业技术学院, 山东 泰安 271001;
3. 国网江西省电力有限公司超高压分公司, 江西 南昌 330029)

摘要: 室外电力设备易受到极端天气的影响, 进而降低电力系统的稳定性。敞开式接地开关作为变电站的重要设备, 起到电气隔离、倒闸操作的作用, 对保障电力系统的可靠运行起关键作用。文中针对某 500 kV 变电站极端天气下的异常合闸情况, 探究了传动杆凹槽和螺栓对抱箍紧固性能的影响, 分析了故障开关的结构设计缺陷; 同时, 通过理论计算, 研究了风荷载和平衡弹簧对导电杆的影响; 结合故障开关导电杆实验数据和理论计算结果, 从连接抱箍结构、限位垫块材质以及导电杆开口结构等角度, 提出了相应的改进优化措施。研究结果对于极端天气下接地开关导电杆异常的处理和预防具有一定意义。

关键词: 接地开关; 导电杆; 极端环境; 有限元仿真

中图分类号: TM 763 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-348X(2026)02-0001-07

0 引言

敞开式接地开关是电力系统中重要的一次设备, 在电气隔离、倒闸操作等方面起着重要作用, 但容易受运行环境的影响, 出现发热缺陷、传动缺陷和电动操作缺陷等问题。近年来, 随着台风、局部强对流等极端天气的增多, 敞开式接地开关机械缺陷频次居高不下, 严重影响了供电可靠性。专家学者对接地开关缺陷问题进行了较多的研究, 然而此类研究只从机械设计或控制回路单方面进行分析, 缺乏理论和仿真上的分析^[1-11]。文中围绕一起 500 kV 变电站在极端天气下接地开关的异常合闸事件, 对故障接地开关导电杆进行了检查、试验和仿真分析, 并提出了相应的优化措施, 对于接地开关的设计、运维具有一定的工程指导意义。

1 故障概述

某 500 kV 变电站在现场无操作、无检修工作情况下, 220 kV IA 母 21002 接地开关 A 相发生异常合闸, 导致 220 kV IA 母 A 相、1 号主变 A 相先后发生故

障。故障当时出现极端强对流天气, 伴有强雷电、强降水、雷暴大风和冰雹, 极大风速高达 32.3 m/s。

现场检查发现, 220 kV IA 母 21002 接地开关 A 相在接近合闸位置, 导电杆距静触头均压罩约 30 cm, B、C 两相处于分位。操作机构箱抱箍机械位置指示在分位, 如图 1 所示。

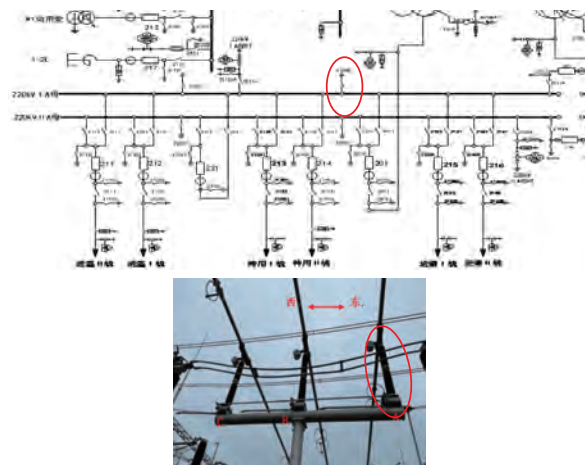


图 1 现场接地开关位置及机械指示位

2 接地开关运动原理分析

国内主流开关厂家接地开关设计方案均为直杆

收稿日期: 2025-11-05

作者简介: 李杰(1997), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为高压电力设备试验检测与状态评估技术。

式结构,该结构又细分为一步动作与两步动作,两种细分结构国内厂家均有生产。一步动作结构简单,接地导电杆由分闸水平状态直接转动竖立并打入静触头合闸,存在触头合分闸插入和脱离过程容易出现卡涩憋力等缺点;两步动作的接地开关合闸过程分为导电杆竖起段和触头向上竖直插入两个过程,由于最后触头插入段为竖直插入,合闸力臂小,操作阻力小,合分闸不会卡涩、抖动,触头插入和脱离动作更顺畅。本次故障接地开关为两步动作结构,如图2所示。

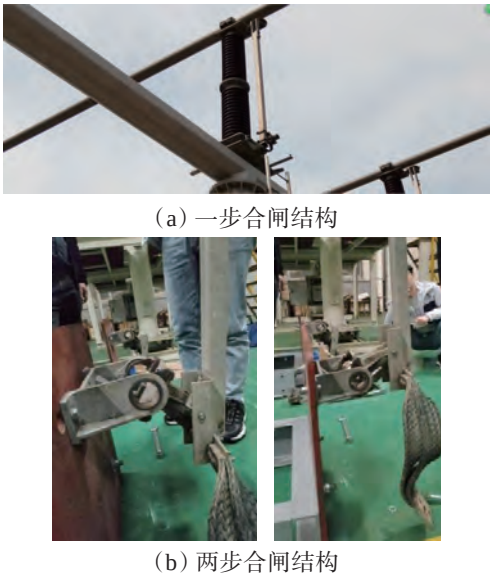
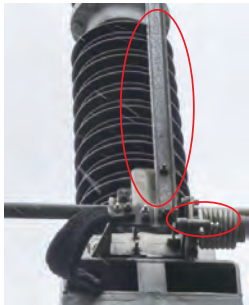


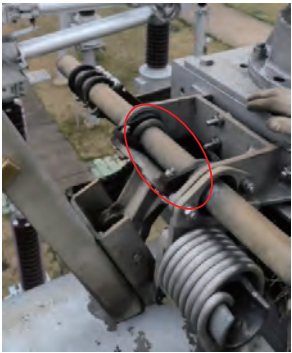
图2 直杆式接地开关结构

该型接地开关操作机构布置于边相(A相),其导电杆为U型开口结构,开口朝分闸方向,合闸方向与本次极端天气风向一致,长度为2.48 m,宽度0.045 m,总重量为6.1 kg,静触头屏蔽罩外径为0.35 m。

如图3所示,接地开关导电杆带有平衡弹簧,接地开关在分位时,弹簧为储能状态,合闸时弹簧能量释放。接地开关导电杆与传动连杆采用2个U型抱箍固定,通过垫块起到一定的限位作用,而未采用常见的止钉销或扁平抱箍(面接触)的固定方式。



(a) U型导电杆、平衡弹簧



(b) U型抱箍

图3 接地开关主要部件结构图

结合现场检查情况和返厂实验分析,判断本次接地开关合闸异常的根本原因为接地开关结构设计不合理。导电杆与传动连杆间抱箍固定方式不可靠,抱箍采用圆环形设计,且尺寸匹配度差,与传动连杆间仅为线接触,未采用止钉销或扁平抱箍(面接触)的固定方式,导致摩擦力不足,固定程度完全依赖螺栓紧固性能,长期运行中振动、弹垫失效等引发螺栓力矩降低后抱箍发生松动;同时,在平衡弹簧作用下,导电杆吹动后在任意位置可自保持,在本次极端强对流天气下,导致导电杆迎风角和受风力矩持续加速增大,从而引发误合闸。

为避免同类事件再次发生,保障极端天气下电力系统安全稳定运行。文中分别从实验和仿真角度,研究基座与水平传动杆的连接抱箍结构、限位垫块材料,不同导电杆结构对接地开关导电杆稳定性的影响,为优化该类接地开关导电杆结构提供一定的实验依据和理论支撑。

2.1 接地开关设计缺陷分析

1) 故障导电杆设计

鉴于接地开关一般无较大迎风面,现场风一般均为侧向风,目前各厂家对该类接地开关一般不做特殊的防风处理,该型接地开关也未做专门的防风设计。

该地导电杆截面形状为图4右侧所示的倒U型截面,风阻系数要高于圆形或方形截面导电杆。根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)中的风荷载计算方法,常规圆柱形、方形的风荷载型体系数分别为0.6及0.8,U型槽为0.9,即在同样的风速下,导电杆采用U型承受的风力较圆柱形高50%,较方形高12.5%。

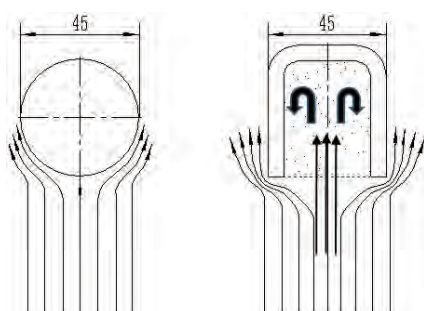


图4 不同体型导电杆受风情况

若要防止风力对导电杆合分闸运行造成影响,主要还是需要在传动环节防滑加固上设计加强,优先采用穿销、机械卡扣等设计方案。

2) 传动部件防滑设计

该故障接地开关主要传动部件的驱动拐臂与其驱动横轴采用2个U型螺杆抱紧、连接、传递扭矩。根据受力分析,底座四杆机构的存在使导电杆的力矩放大3.24倍后作用至U型抱箍。本接地开关该处抱箍未见可靠的穿销或嵌入卡扣等机械防滑结构,全靠U型螺杆紧固产生的摩擦力传动,可靠性不足,在遇到较大的载荷扭矩时容易发生滑动。

对比同类接地开关的驱动拐臂位置与驱动轴连接,其现有固定方式为穿销连接,而非U型抱箍连接,不存在传动打滑隐患,如图5所示。



图5 不同驱动拐臂位置与驱动轴连接结构

2.2 风荷载计算分析

1) 抱箍松动

该接地导电杆迎风面积为 0.1035 m^2 ,表1所示为不同风速下U型抱箍处扭矩,按照12级大风(34 m/s)对应的迎风面风压 700 Pa ,进行极端向上风力荷载计算,风力荷载值约为 65.2 N ,风压中心位于导电杆中间位置,其力矩示意图如图6所示。由于四杆机构的力矩放大作用(放大系数约3.24倍),可得此时风荷载对抱箍处产生的扭矩为 $227.5\text{ N}\cdot\text{m}$,若连接抱箍没有定位卡销,且抱紧力不足时,易发生打滑情况,导致接地导电杆合闸。

表1 不同风速下U型抱箍处扭矩

风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	15	32.3	34
导电杆力矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	31.0	66.7	70.2
抱箍扭矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	100.34	216.1	227.5

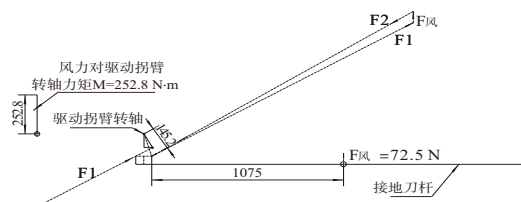


图6 力矩示意图

2) 导电杆受风抬升

因风向与导电杆夹角的随机性,保守取导电杆与风向的夹角在 $10^\circ\sim 25^\circ$ 间,则风荷载在导电杆垂直方向分量系数为 $0.17\sim 0.42$,计算抱箍完全松动下,不同力矩下的对应风速(均假设风垂直于导电杆平面),结果如表2所示。

表2 抱箍完全松动下风荷载计算

力矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	6.8	12.0	15.0
垂直风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	8.83	11.78	13.17
实际风速折算/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	21.02~51.94	28.05~69.29	31.36~88.24

可以看出,当风速达到 32 m/s 时,作用在接地开关导电杆垂直方向力矩可达到 $15\text{ N}\cdot\text{m}$,接地开关可持续向合闸方向运动。由于平衡弹簧的存在,导电杆在往合闸方向的任何位置可自保持,迎风角进一步增加,导致导电杆往合闸方向的受风力矩加速增大。受局部湍流的影响,部分位置风速可能超过 34 m/s ,超出GB/T 11022—2020中产品的正常使用条件。

2.3 平衡弹簧设计分析

如图7所示,该接地导电杆分闸过程中,由于导电杆倾斜悬挑,会对扭簧拐臂转轴中心产生顺时针方向的重力矩;而扭簧拐臂处由于安装有平衡扭簧,对扭簧拐臂转轴中心提供逆时针方向的平衡力矩。若两者在合分闸过程中的同步变化完全相等,则导电杆

处于完全平衡状态;若重力矩大于平衡力矩,在自由状态下,导电杆将自动分闸;若平衡力矩大于重力矩,在自由状态下,导电杆将自动有合闸倾向。

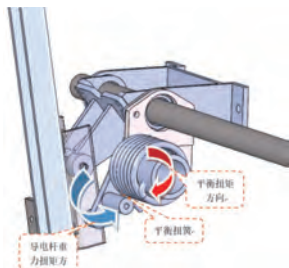


图7 平衡弹簧作用原理

该接地开关在导电杆上下插入和拔出行程段内,平衡扭簧不受扭力,不提供扭矩,只有在接地导电杆开始倾倒后,才受到扭力作用,提供平衡扭矩,如图8所示。

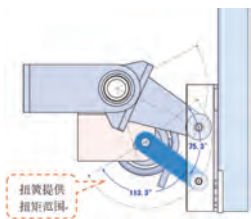


图8 平衡弹簧动作范围

实测的平衡扭簧为不锈钢丝材料,钢丝直径 $d=11\text{ mm}$ 、弹簧中径 $D=100\text{ mm}$ 、圈数 $n=7.25$,经计算,该扭簧的扭转刚度 $k=1.062\text{ N}\cdot\text{m}/^\circ$,再根据接地导电杆重量、重心参数,结合导电杆受力情况,推算出绕扭簧拐臂转轴的导电杆重力矩与扭簧平衡扭矩从该位置随扭簧拐臂分闸转动角度的变化曲线如图9所示。

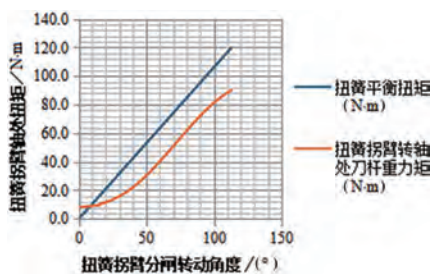


图9 平衡弹簧扭矩与导电杆重力力矩曲线

由图9力矩曲线判断,该接地导电杆合闸过程中,平衡扭簧扭力与导电杆重力矩相差较小,匹配度良好。因此,本次故障现场接地开关在任意位置可实现自保持。

3 导电杆风荷载仿真分析

3.1 导电杆建模和边界条件设置

依据该型220 kV接地开关的尺寸,对接地开关

及底座支撑结构等进行有限元实体建模,总长度为2 480 mm(含底座),如图10所示。



图10 接地开关及底座支撑结构

对三种不同形状的接地开关进行分析计算。其中,U形接地开关外径45.0 mm,内径32.9 mm,深度45.0 mm;矩形接地开关高度45.0 mm,宽度57.0 mm;圆形接地开关直径45.0 mm,计算模型如图11所示。

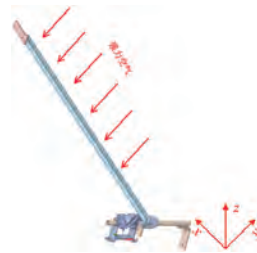


(a) U形导电杆 (b) 矩形导电杆 (c) 圆形导电杆

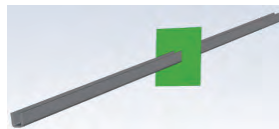
图11 三种不同形状的接地开关示意图

3.2 计算结果分析

接地开关采用铝合金材料,导电杆为 x 轴方向并取其与基底连接处为坐标原点,接地开关受到如图12(a)所示 $-z$ 方向的强烈空气的吹动作用,空气密度为 $1.225\text{ kg}/\text{m}^3$,粘度为 $1.79\times 10^{-5}\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,流速为 32.3 m/s 。为了提高计算效率,文中仅对导电杆进行受力分析,同时如图12(b)所示,在 y 轴方向建立截面,来分析导电杆的压力以及附近空气的流动情况。



(a) 接地开关受空气吹动示意图



(b) 导电杆截面

图12 接地开关导电杆受力仿真模型示意图

通过有限元计算,得到了接地开关的压力场分布数据。该变电站 220 kV 接地开关的压强分布云图如图 13 所示。从云图中可以看出,U形接地开关的内部压强最大,由内向外呈阶梯状分布,最大压强可达 1526 Pa;其次为矩形接地开关,最大压强为 1383 Pa;圆形接地开关的压强最小,仅为 362 Pa;此外,与 U 形及矩形接地开关相比,圆形接地开关两侧的低压区域更明显,面积更大,这是因为空气在流经圆形接地开关时,产生了流动分离现象,导致该区域内的空气流速增加,压强降低。为了进一步分析导电杆的受力情况,根据计算得到了导电杆周围的空气流动情况,如图 14 所示。

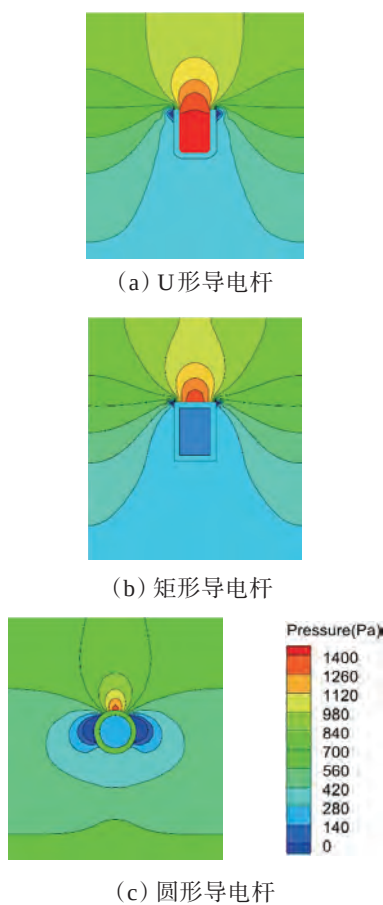
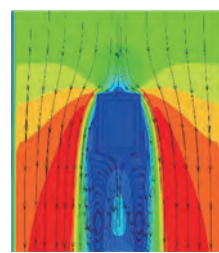
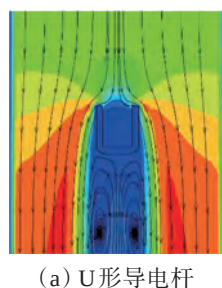
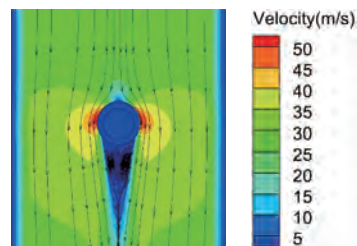


图 13 接地开关压力场分布



(b) 矩形导电杆



(c) 圆形导电杆

图 14 导电杆附近空气流动示意图

可以看出,空气在遇到导电杆后向两侧流动,并在导电杆底部形成了大小相等、相互对称的两个漩涡。值得注意的是,U形导电杆内部的空气流速非常低,基本处于停滞状态,但该处的压强却处于U形导电杆最大的位置。这说明U形导电杆内部的空气一直受到外部空气的挤压,在该处形成了强烈的气动压力。如能减小或者消除此部分气动压力,该处的压强将会大大降低。此外,还通过计算得到了导电杆的阻力图和压强与x轴坐标的关系图,如图 15 所示。

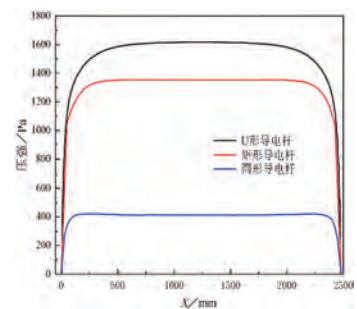
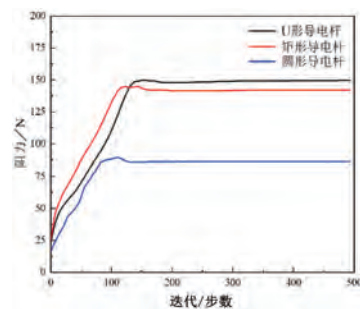


图 15 导电杆阻力、压强随位置变化计算结果图

图 15(a)为三种形状导电杆阻力与 x 轴坐标的关系变化图,三种形状导电杆的阻力均随着 x 的增加而先上升后稳定,其中圆形导电杆受到的平均阻力值最小,U 形和矩形导电杆的平均阻力值相近;图 15(b)为三种形状导电杆压强与 x 轴坐标的关系变化图,三种形状导电杆的压强分布均较为均匀,在导电杆的首尾两端所受的压强略微减小,其中 U 形导电杆所受压强最大,圆形导电杆所受压强最小。为了对三种不同结构导电杆受力情况进行进一步比较,通过计算得出各结构导电杆的平均压强和平均阻力值,如表 3 所示。

表 3 导电杆平均阻力和压强值

导电杆	平均压强/Pa	平均阻力值/N
U 形导电杆	1 526	157
矩形导电杆	1 283	145
圆形导电杆	362	83

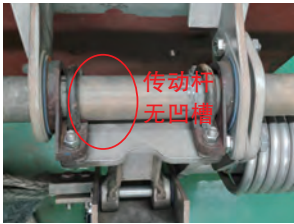
计算得出接地开关导电杆受强烈空气扰动的阻力情况。可以看出,在 32.3 m/s 的空气扰动作用下,U 形导电杆受到的阻力最大值为 157 N,矩形导电杆受到的阻力最大值为 145 N,圆形导电杆受到的阻力最大值为 83 N;因强烈空气造成的扰动,圆形导电杆所受的影响最小,U 形导电杆所受的影响最大。

4 导电杆优化措施研究

为模拟故障接地开关在外力作用下的运动情况,开展了异常合闸过程复现实验。将接地开关导电杆与水平面置于一定角度 α ,在距导电杆旋转轴心 2 m 处,测量导电杆垂直方向推力,得到该角度下导电杆作用力矩。

4.1 传动杆凹槽对抱箍紧固性能的影响

图 16 为故障相和非故障相传动杆上凹槽情况,其中故障相传动杆上无凹槽,非故障相传动杆上有凹槽。根据《电网金属技术监督规程》(DL/T 1424—2024)第 8.4.3 条“4.8 级的 M12 螺栓紧固力矩值不应小于 40 N·m”的规定。为分析传动杆上凹槽对 U 型抱箍紧固性能的影响,在抱箍螺栓正常紧固力矩(50 N·m)下,测试了故障相和非故障相导电杆合闸到特定角度时所需力矩,实验数据如表 4 所示。



(a) 故障相传动杆表面无凹槽



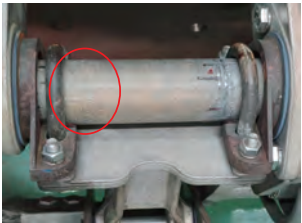
(b) 非故障相传动杆表面有凹槽

图 16 故障相及非故障相传动杆表面凹槽情况

表 4 抱箍螺栓正常紧固力矩下不同合闸角度所需力矩

实验对象	不同合闸角度所需力矩/N·m				
	15°	30°	45°	60°	70°
故障相(无凹槽)	44.3	123.5	176.4	/	/
非故障相(有凹槽)	105.8	190.1	/	/	/

由表 4 可知,相同合闸角度下,故障相所需力矩明显低于非故障相所需力矩,表明非故障相传动杆上凹槽可一定程度上增大抱箍与传动杆之间的摩擦力,提升抱箍紧固性能。故障相和非故障相上施加力矩分别达到 176.4 N·m(合闸角度为 45°)、190.1 N·m(合闸角度为 30°)时,抱箍与水平传动杆之间均未发生滑动(考虑导电杆基座处在外力过大时存在形变风险,停止继续增大力矩),表明抱箍螺栓在正常紧固力矩作用下,抱箍紧固作用良好,抱箍与水平传动杆之间难以滑动。对比实验前后传动杆表面凹槽情况,限位垫块在正常螺栓紧固力矩作用下,传动杆上无新增凹槽痕迹,如图 17 所示。



(a) 实验前传动杆表面凹槽情况



(b) 实验后传动杆表面凹槽情况

图 17 实验前后传动杆表面凹槽情况

4.2 抱箍螺栓紧固状态对抱箍紧固性能的影响

表5为故障相在抱箍螺栓完全松动状态下不同合闸角度所需力矩,当外力达到较小的力矩时,接地开关导电杆可由分闸位置运动至合闸位置。

表5 抱箍螺栓完全松动状态下不同合闸角度所需力矩

实验对象	不同合闸角度所需力矩/N·m			
	10°	30°	45°	>60°
故障相	5.0	6.2	6.8	0(自动抬升)

为模拟弹垫失效或振动引发的力矩降低现象,按照不同螺栓紧固程度对抱箍螺栓分别施加了50 N·m、35 N·m、30 N·m和20 N·m的紧固力矩,测试在不同螺栓紧固程度下,抱箍与传动杆发生滑动所需力矩以及滑动时合闸角度 α 。如表6所示,螺栓在正常紧固力矩下,故障相和非故障相抱箍均未发生滑动,但随着螺栓紧固力矩的下降,抱箍滑动所需力矩呈现明显的下降趋势,这表明该U型抱箍紧固性能十分依赖其螺栓紧固程度,一旦紧固程度下降,则容易出现滑动的风险。

表6 不同螺栓紧固力矩下抱箍滑动时所需力矩及合闸角度

不同螺栓紧固力矩/N·m	故障相		非故障相(垫块处有凹槽)	
	抱箍滑动所需力矩/N·m	合闸角度 α (°)	抱箍滑动所需力矩/N·m	合闸角度 α (°)
50	未发生滑动	/	未发生滑动	/
35	160.7	38	未发生滑动	/
30	78.4	23	180.3	30
20	49.0	15	54.9	16

4.3 采用扁平抱箍验证

故障接地开关驱动拐臂与驱动横轴采用2个U型螺杆连接,导电杆底座通过U型抱箍的静摩擦力带动导电杆运动。接触面积越大,且接触表面越粗糙时,静摩擦力越大。根据测算,线接触的U型抱箍与扁平式面接触结构的U型抱箍的接触面积值如表7所示,可见后者较前者的接触面积增大了5.6倍,大大提高了静摩擦力。

表7 不同抱箍型式的接触面积

		mm ²
线接触的U型抱箍	扁平式面接触结构U型抱箍	
75	500	

采用如图18所示扁平抱箍(面接触)固定方式替代原有U型抱箍固定方式,同时对比了两种固定方式下,不同螺栓紧固力矩下抱箍滑动所需力矩,如表8所示。采用U型抱箍固定方式时,仅在螺栓正常紧固力矩(50 N·m)下,抱箍与传动杆之间不发生滑动;而采用扁平抱箍固定方式后,螺栓紧固力矩由50 N·m下降至20 N·m后,抱箍与传动杆之间仍不发生滑动,表明扁平抱箍固定方式可有效增大抱箍与传动杆之

间摩擦力,提升抱箍紧固性能。



图18 扁平抱箍固定方式

表8 不同螺栓紧固力矩下两种抱箍滑动时所需力矩(均无凹槽)

螺栓紧固力矩/N·m	U型抱箍		扁平抱箍	
	抱箍滑动所需力矩/N·m	合闸角度 α (°)	抱箍滑动所需力矩/N·m	合闸角度 α (°)
50	未发生滑动	/	未发生滑动	/
30	78.4	23	未发生滑动	/
20	49.0	15	未发生滑动	/

5 结语

文中针对极端天气下接地开关导电杆的稳定性进行了探索研究,对导电杆的结构进行了深入全面的分析,并且针对其设计缺陷,提出了相应的改进优化措施,这有利于增强导电杆在极端天气下的稳定性,从而预防故障的发生。

1) 接地开关导电杆基座与水平传动杆的连接抱箍设计的不合理,会导致在基座传动机构的放大作用下,力矩在抱箍处集中达到最大;本次故障接地开关抱箍内径尺寸较水平传动杆外径大(3 mm),且抱箍为圆柱状,并无穿心定位销或扁平式设计,螺栓紧固后与水平传动杆为线接触,接触面积小,固定程度完全依赖螺栓紧固程度,长期运行中振动、弹垫失效等引发螺栓力矩小幅降低后,抱箍容易滑动;将传动部位采用线接触的U型抱箍更换为扁平式面接触结构U型抱箍,可大幅增加与水平传动杆的接触面积,增大摩擦力。

2) 限位垫块为碳素钢,表面为冷镀锌工艺,较主流厂家采用的不锈钢材质硬度要低,且易生锈,止位效果有限。在与水平传动杆连接处设置凹槽,可明显增大摩擦力,但为非标准化工艺,应从源端设计上提高抱箍与水平传动杆的紧固可靠性。

3) 接地开关导电杆采用U型开口结构,较常规圆柱形或方形导电杆风力体型系数更大,受力更大。在强对流天气下,U形导电杆更容易受到影响,导电杆应将U形截面改为圆形或方形截面。(下转第26页)

对于已经规划好的航线,在 Mavic3T/E 无人机上执行时,可以参照如图 15 所示的自主巡检标准化作业流程,在每次拍照前手动使用遥控器云台偏航回中功能,即在自主巡检过程中解决点位偏移问题,使得之前已规划好的海量自主巡检航线重新得以利用。

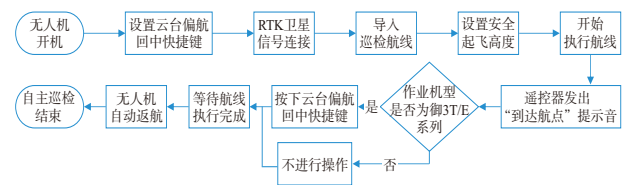


图 15 自主巡检标准化作业流程

4 结语

- 1) GPS/北斗 RTK 差分定位系统、无人机偏航运动、云台俯仰运动均不是无人机在自主巡检过程中拍摄点位发生偏移的主要因素。在执行航线过程中,无人机云台发生的偏航运动是影响拍摄点位准确性的主要因素。
- 2) 无人机自主巡检过程中,在每个拍摄点位拍照前,手动使用遥控器云台偏航回中功能,或在航线规划阶段的航点动作里添加云台偏航回中指令,可使得拍摄点位的偏移率显著减小,提高自主巡检的质量。

参考文献:

[1] 舒展,张伟晨,王光,等.特高压直流接入江西电网后的故障影响分析及其应对措施[J].电力系统保护与控制,2019,47(20):163-170.

[2] 武汉至南昌 1000 kV 特高压工程的“高空舞者”[J].江西电力,2023,47(06):63.

[3] 李博江,石维韬,叶倩,等.特高压南昌站投切空载线路、空载变压器时过电压和过电流仿真计算[J].江西电力,2024,48(04):16-19,22.

[4] 邓亮,李鑫,李晋强,等.旋翼无人机在输电线路中应用 X 射线无损检测技术的研究[J].机电产品开发与创新,2025,38(06):14-17,20.

[5] 杨杰.基于无人机协同的输电线路智能巡检与故障诊断技术[J].电气应用,2025,44(11):153-158.

[6] 卞昌浩.输电线路自主巡检无人机避障路径控制方法[J].自动化应用,2025,66(22):135-137.

[7] 龙飞.大疆无人机御 3 航拍摄影与后期从入门到精通[M].北京:化学工业出版社,2024.

[8] 严尔梅,刘博迪,时磊,等.基于 5G+云边 AI 协同的无人机输电线路巡检应用研究[J].计算技术与自动化,2025,44(04):166-172.

[9] 吴健.基于无人机的架空输配电线路自主巡检技术研究[J].科技资讯,2025,23(24):87-89.

[10] 程俊翔,何相奎,金哲,等.输电线路高精度自主巡检智能机巢系统研究与应用[J].内蒙古电力技术,2026,44(01):45-51.

(上接第 7 页)

参考文献:

[1] 李运涛,刘同杰.GW16A-252DW 型隔离开关拒动故障原因分析及处理[J].四川电力技术,2014,37(02):75-77.

[2] 盛明学,王志清.户外高压隔离开关常见故障的原因分析与处理[J].高压电器,2010,46(10):93-96.

[3] 夏业波.隔离开关控制回路常见问题及处理措施[J].设备管理与维修,2019(22):96-97.

[4] 张帆.一起 GW22A-252II 型隔离开关拒动故障原因分析及处理[J].江西电力,2019,43(12):29-32.

[5] 祖武强,霍克伟.一起 220 kV 敞开式隔离开关拒分的原因分析[J].红水河,2016,35(04):99-100,115.

[6] 张秀斌,温定筠,彭鹏,等.110 kV GIS 隔离开关故障原因分析及反事故措施研究[J].电工技术,2014(06):51-52.

[7] 万寿雄.一起接地开关故障引起两座变电站跳闸的事故分析[J].电气技术,2024,25(06):72-76,81.

[8] 田世济,房崇峰,高田雨.GW7B-550 型接地开关故障缺陷分析与处理[J].电工技术,2021(04):83-84.

[9] 邱志斌,阮江军,黄道春,等.高压隔离开关机械故障分析及诊断技术综述[J].高压电器,2015,51(08):171-179.

[10] 李娜,马飞越,牛勃,等.750 kV 敞开式接地开关异常合闸故障分析[J].四川大学学报(自然科学版),2020,57(06):1131-1136.

[11] 朱青,刘波,李万民,等.弹簧应力松弛对 GIS 故障关合接地开关关合特性的影响研究[J].四川电力技术,2020,43(01):31-34,66.