[无人机]

高空翻转式无人机用导地线便携式挂架研究及应用

文/王振宇[1,2] 邹德华[1,2] 李智慧[1,2] 吴志田[1,2] 李鹏[1,2] 罗昌宏[1,2]
1. 智能带电作业技术及装备（机器人）湖南省重点实验室（国网湖南省电力有限公司超高压输电公司）；
2. 带电作业及智能巡检技术国家电网公司实验室（培育）（国网湖南省电力有限公司超高压输电公司）

近年来我国社会经济不断发展，超／特高压电网规模随之日益扩大，杆塔高度也呈现增高的趋势，登塔过程中后备安全保护显得愈发重要。基于“无人机+挂架+后备保护绳”“无人机+挂架+临时柔性轨道+电动升降装置”场景，对带电作业中攀登杆塔时后备保护机械强度及导线的导线间安全距离校验从理论进行分析，并设计一种高空翻转式无人机用导地线便携式挂架。进一步围绕±800 kV复奉线#1494～#1495带电修补导线使用便携式挂架的安全性、可行性进行分析，针对攀登杆塔使用后备保护存在的具体问题，提出相应的解决方案，并应用于实际攀登杆塔中。作业结果表明设计的导地线便携式挂架可以提升登塔过程中的安全性。

为提升电力检修作业本质安全，国网公司明确提出，登塔过程中不得失去安全保护，由于500 kV及以下杆塔大多没有装设防坠轨道，作业人员常需采用安全带与后备保护绳交替的方式登塔，过程繁琐费时，体力在过程中被严重浪费，对作业人员的安全性带来严重挑战。

近年来，随着无人机技术高速发展，在各个行业中应用也越来越广泛，在输电线路检修中，采用“无人机+挂架+后备保护绳”或是“无人机+挂架+临时柔性轨道+电动升降装置”（小飞人）防坠方式开展高空作业逐渐成为新趋势，其中挂架的设计对整个作业的时间和安全性起着关键作用。因此，亟需对挂架进行深入研究，保障其在作业过程中的安全性和实用性。

本文从理论上对“无人机+挂架+后备保护绳”和“无人机+挂架+临时柔性轨道+电动升降装置”应用于带电作业场景下的导线间安全距离及导线的机械强度校验进行分析，并设计一种高空翻转式无人机用导地线便携式挂架，通过现场应用与分析，验证了工器具的安全性、可行性和实用性。

安全距离及机械强度校验理论分析

在“无人机+挂架+后备保护绳”和“无人机+挂架+临时柔性轨道+电动升降装置”应用于带电作业场景下，由于导地线断股是常见的输电线路缺陷之一，断股将导致机械强度降低，其机械强度校验将必不可少。与此同时，受力点在导地线上，导致弧垂增大，将带来安全距离校验的问题。

1. 机械强度校验分析

为方便分析，以输电线路孤立档为例。当挂架挂载某线路上A点时，作业点增加的荷载为q，荷载前后应力σ_1、σ_2之间关系为

$$\sigma_2-\frac{El_0^2g_l^2}{24\sigma_2^2}-\frac{l_xq(q+l_xg_lA)E}{8A^2\sigma_2^2\Sigma l_i}=\sigma_1-\frac{El_0^2g_l^2}{24\sigma_1^2}-\alpha E(t_2-t_1) \tag{1}$$

基金项目：高空翻转式无人机用导地线便携式挂架研制（5216AJ240004）

式中，l_x为集中荷载作用档的档距，m；q为集中荷载，N；σ_1、σ_2，为荷载，MPa；l_0为绝缘子串长度，m；$\sum l_i$为地线总长度，m；g_l为导线的比载，N/(m·mm^2)；A为导线截面积，m^2；E为架空地线弹性系数，MPa；α为地线热膨胀系数，1/℃。

在“无人机+挂架+后备保护绳”和“无人机+挂架+临时柔性轨道+电动升降装置”两个场景中，增加的最大重量为：作业人员体重+挂架重量+临时柔性轨道重量+电动升降装置重量。将查勘时发现的断股数、作业增加的重量和其他杆塔数据代入式（1），考虑安全裕度后，可完成机械强度校验。

2. 安全距离校验分析

当作业点增加的荷载为q、作业点距绝缘子串xm时，弧垂f发生变化，计算公式为

$$f=\frac{1}{\sigma_0\cos\beta}\left[\frac{\gamma_X(L-x)}{2}+\frac{(\gamma_S-\gamma)\lambda_0^2}{2}\right]+\frac{xqb}{\sigma_0 L} \quad (2)$$

式中，q为集中荷载的单位截面载荷，N/mm^2；λ_0为绝缘子串水平投影长度，m；γ_S为绝缘子串比载，N/(m·mm^2)；L为档距，m；σ_0为地线水平应力，N/mm^2；β两点高差角；γ为地线比载，N/(m·mm^2)；γ_X为地线水平比载，N/(m·mm^2)。

式（2）在实际工程中，可进行简化为

$$f=\frac{1}{\sigma_0\cos\beta}\left[\frac{\gamma_X(L-x)}{2}\right]+\frac{xqb}{\sigma_0 L} \quad (3)$$

将增加的重量及作业场景中的数据代入式（3），可计算出上述场景下的弧垂数值。进一步得到线间距离，可以完成该电压等级下安全距离校验。

高空翻转式无人机用导地线便携式挂架设计

1. 技术难点

无人机对挂架进行挂线操作时，存在以下3个难点，如图1所示。

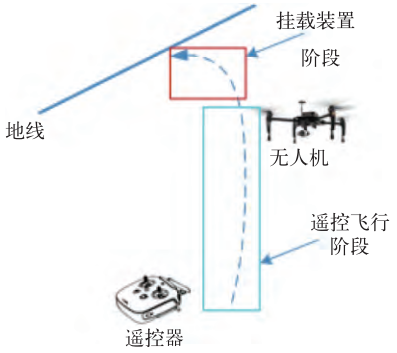

图1　无人机对挂架进行挂线操作

（1）挂线难

由于环境因素导致无人机抖动，很难对准导地线，加上高空观察难度大，导致挂线操作存在很大难度。因此，无人机挂线受无人机飞手技术和现场环境影响较大。

（2）保险难

作业的关键在于挂架的安全性和稳定性，由于带电作业处于高电压强磁场中，电动装置受电量和电场影响较大，工作状态不稳定，增大了挂架保险的设计难度。

（3）取下难

作业完成后，需用无人机将挂架取下来，该过程操作难度大，受无人机飞手技术和现场环境影响。

鉴于上述问题考虑，本文设计一种高空翻转式无人机用导地线便携式挂架。利用巧妙的结构设计，解决上述挂线难、保险难和取下难3大难点。

2. 解决难点结构设计

该工具设计图如图2所示。

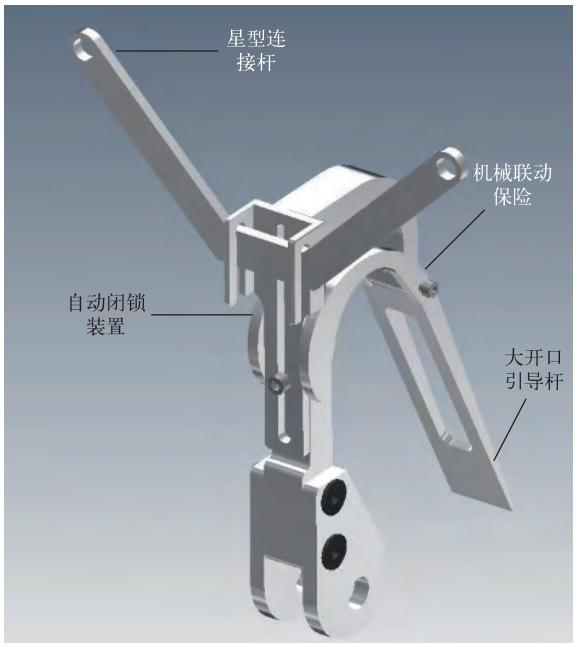

图2　工具设计图

（1）解决挂线难问题

设计一种引导杆，形成大开口，当无人机携带挂架接近导地线时，大开口引导杆增大了挂架挂上导线的范围，极大降低挂线难度。

设计一种双挂点连接，如图3所示。可通过无人

机自转带动挂架开口转动，使开口对准导地线，提高挂线的准确率。

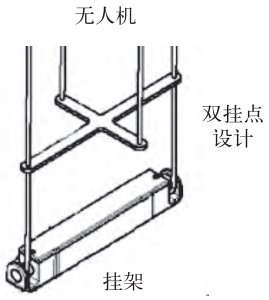

图3　双挂点连接设计图

（2）解决保险难问题

设计一种机械联动保险装置，挂架接触导地线前，由于引导杆设计为左重右轻，引导杆处于打开状态；当挂架接触导地线后，推动联动装置，使引导杆达到关闭状态，避免引导杆从导地线上脱力，达到闭锁的目的。

设计一种自动闭锁装置，当无人机释放吊索后，星型连接杆由于重力作用下落，对引导杆进行闭锁。

（3）解决取下难问题

采用地面对接方式，在地面将无人机与挂架携带的绝缘绳索进行连接，然后无人机携带绝缘绳索升空，达到挂点高度的两倍时，挂架翻转，星形连接杆回复原位，自动闭锁装置打开，推动联动装置打开引导杆，闭锁状态解除。随着无人机带动绝缘绳索上升，挂架随之脱离导地线。

图4　工具实物图

按照上述设计思路采用铝合金6061材料对工具进行加工，该工具实物图如图4所示。尺寸为200 mm×75 mm×30 mm，重量为0.6 kg，载重可达1.5 t，兼顾了重量轻、体积小和载重大等优势，且设计巧妙，不会给输电线路检修作业带来任何负担。若采用后备保护绳方式，可由无人机携带挂架和绝缘绳悬挂在地线近塔端的位置，作为登塔人员的后备保护；若采用电动升降装置方式，可将挂架及柔性轨道通过无人机直接悬挂在消缺作业位置，由电动升降装置搭载作业人员直达线上作业点。现已在各电压等级中试用，反馈良好，既方便携带，又安全可靠。

现场应用与分析

以采用“小飞人”的方式进行±800 kV复奉线#1494～#1495档中地线断股带电修补为例进行分析。

经过现场勘查，作业所在档中档距为295 m，故障点在#1494极I小号侧距离绝缘子50 m处，共断2股。其地线在温度25 ℃时的参数见表1。

表1　地线相关参数

参数	地线
单位质量/(kg/km)	1 000.2
截面积/mm^2	151.11
外径/mm	16.32
弹性系数/MPa	151 300
计算拉断力/N	181 320
线膨胀系数/(1/℃)	1.19×10^{-5}

1. 机械强度校验

当无人机将挂架挂上地线后，作业人员通过自动提升装置上线，地线的张力发生变化，取安全系数为3.5，通过查表计算可估算，作业点处地线拉断力F_1=151 020 N，将杆塔基本数据代入式（1）中，可得到该地线断2股剩余拉断力F_2=183 640 N，$F_1<F_2$，满足机械强度校验。因此，该处作业采用“小飞人”的方式进入作业点进行地线断股修补，符合作业的安全性。

2. 安全距离校验

作业人员通过自动提升装置上线时，增加的重量作业人员加工具，按150 kg计算，集中荷载q增加1 500 N，示意图如图5所示。

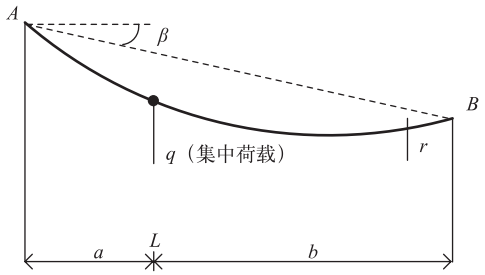

图5　载荷示意图

作业人员在提升过程中，地线弧垂增大，导致线间距离减小，存在不满足带电作业安全距离要求的可能性。将作业点地线参数表1中数据代入式（3）中进行估算，再减去原弧垂值，可得到作业时地线弧垂增量Δf=0.9 m。此时，线间距离减少为16.9 m，满足±800 kV电压等级下安全距离的要求，可完成安全距离校验。

3. 工具现场试用

未验证本文设计的高空翻转式无人机用导地线便携式挂架的实用性，对±800 kV复奉线#1494～#1495档中地线断股进行带电修补。

鉴于上述机械强度校验和安全距离校验，可采用“小飞人”的方式进入故障点进行作业，如图6所示。经过0.5 h作业，圆满完成任务，大幅度提高作业人员的工作效率，降低劳动强度和登塔时的安全风险。

图6　作业人员乘坐“小飞人”

结束语

本文设计一种高空翻转式无人机用导地线便携式挂架，适用于110 kV及以上电压等级输电线路检修作业，可以提高输电线路检修的安全性和高效性。具体成效如下：

1）可显著提升安全效益。应用本文成果做后保可在不改变作业人员登塔习惯的前提下，减少因登塔体力消耗过大带来的安全风险，有效降低劳动强度；配合电动升降装置开展销钉补装、引流板发热处理作业时，等电位人员可直接上线，不需要地电位人员辅助进出等电位，从根本上减少人员登塔频次，可显著提升安全效益。

2）可显著提升登塔效率。以50 m高的杆塔为例，使用传统“安全带＋后背保护绳”交替方式，登塔时间常需30 min左右。采用该项目成果做后保，无人机挂设挂架需5 min，登塔时间需10 min，用时缩短一半。

3）可显著提升作业效率。以带电修补地线为例，使用传统登塔进入等电位方式，作业时间约需60 min。采用本文成果配合电动升降装置，可直接从地面到达作业位置，作业时间仅需30 min，极大提升作业效率。EA

（收稿日期：2024-11-03）