

# 带电更换 500kV 直线小转角塔绝缘子串关键技术研究

邵长一

(江苏省电力公司检修分公司徐州分部, 江苏 徐州 221000)

**摘 要:** 分析了一种 500kV 直线小转角杆塔的检修现状, 针对杆塔自身结构等问题, 应用新型角钢卡具, 解决了带电作业时横担侧承力工具缺乏悬挂点的问题。通过受力分析, 指出作业难点所在, 并提出解决方案。

**关键词:** 直线转角; 角钢卡具; 带电作业

随着近年来, 输电网络以及高铁等城市基础设施的发展, 线路路径受到一定限制, 设计部门在进行相关杆塔设计时, 不可避免的会出现小转角。在耐张段较短的情况下, 采用耐张塔进行转角时, 基础、杆塔本体的投资、运行维护工作等各方面的投入都将增大很多, 因而直线小转角塔较耐张杆塔经济性优势巨大。但是直线小转角杆塔特殊的结构和受力特点, 对带电作业造成了一定的影响。目前此类杆塔的检修多采用停电检修的策略。

## 1 500kV 直线小转角塔的特点

500kV 直线小转角塔与普通直线塔的不同点是, 除承受导线自身重量、绝缘子串金具重量外, 还承受一定的角度荷载, 图 1 是角度荷载示意图。

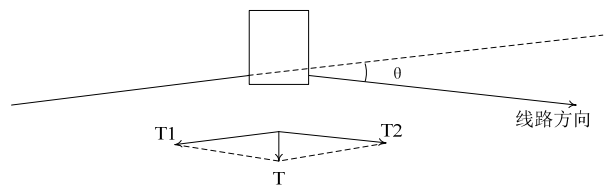


图 1 角度荷载示意图

通过受力分析, 可得到直线小转角塔角度荷载:

$$T = 2\sigma A \sin \frac{\theta}{2}$$

式中:  $\sigma$ —导线应力;  $A$ —导线截面;  $\theta$ —线路转角度数。

由于角度荷载的存在, 绝缘子串不能保持竖直状态, 而向线路内侧偏移一定的角度  $\Phi$ , 给带电更换绝缘子的作业造成了难度。

## 1 作业难点分析

目前 500kV 直线小转角塔带电作业不能有效开

展, 主要难点集中在以下几方面。

### 2.1 横担侧承力工具缺乏悬挂点

图 2 是我们拍摄的某 500kV 线路直线小转角塔线路外侧边相横担照片, 由图片可以看到, 横担上空间狭小, 而且没有任何可以安装承力工具的地方。



图 2 某 500kV 小转角塔边相横担

通过对 500kV 小转角塔的塔形进行分析, 我们发现很多直线小转角塔形横担侧都没有有效的挂点。而且 500kV 直线小转角塔挂点金具主要有两种不同的形式, 导线侧悬吊方式也有两种, 如果卡具安装在金具上, 对应不同的金具就要设计专门的挂点卡具, 显然经济性太差, 因此要解决承力工具的安装问题, 使用角钢卡是最理想解决办法。

图 3 是我们设计的角钢卡主视图。

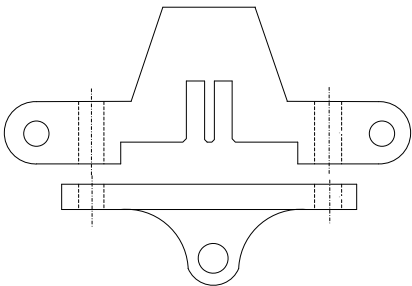


图 3 角钢卡主视图

这种角钢卡完全根据角钢的形状进行设计, 可

以卡在我们需要的任何部位的角钢上，为承力工具提供挂点。其优点在于，不受悬挂方式以及悬挂点金具不同的影响，作业人员可以根据作业需要，灵活地选择悬挂点。它对于更换横担缺乏工作孔的直线绝缘子串、耐张绝缘子串作业也同样适用。当应用于 V 型串绝缘串更换时，由于增大了卡具与角钢的接触面积，能有效地减少绝缘子脱离导线后荷载变化引起的横担部位角钢变形。

## 2.2 绝缘子串弓形变化，脱离导线困难

由于角度荷载的存在，绝缘子串正常情况下偏离悬挂点一定的角度，因此在起吊导线时，绝缘子串松弛将呈弓形状态，仍然无法脱离绝缘子串与导线连接。为了防止绝缘子松弛产生的弓形变化，需要用托瓶架或者吊瓶钩，保持绝缘子串直线状态，以保证最下方一片绝缘子的球头和碗头挂板有足够的活动空间，使两者脱离。见图 4。

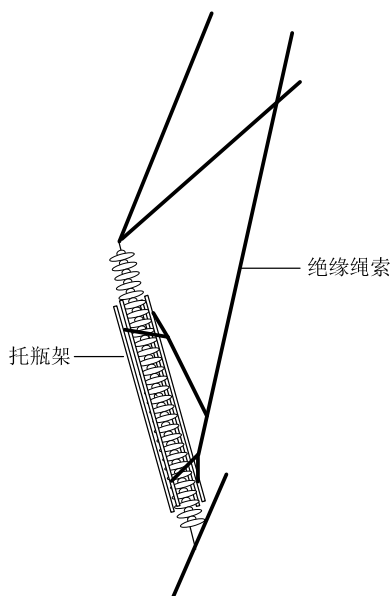


图 4 托瓶架安装示意图

必要时，塔上作业人员可以在横担上，通过托瓶架或者托瓶钩上的绝缘控制绳索，协助等电位人员安装就位。值得注意的是，在安装托瓶架时，托瓶架的控制绳在导线侧预留的长度相对横担侧要短。在更换线路边相绝缘子时，因绝缘子倾斜方向与塔身不一致，托瓶架绝缘控制绳索也要根据实际情况选择不同的悬挂点。

## 2.3 新绝缘子连接困难

由于角度荷载的存在，悬垂绝缘子串向受力一侧偏转一定的角度，绝缘子球头和碗头挂板不能保证在同一直线上。这给绝缘子的连接造成了很大的

难度。

以线路内侧边相绝缘子为例，承力工具挂点选择在绝缘子悬挂点附近时，绝缘子和导线整体受力图如图 5 所示。

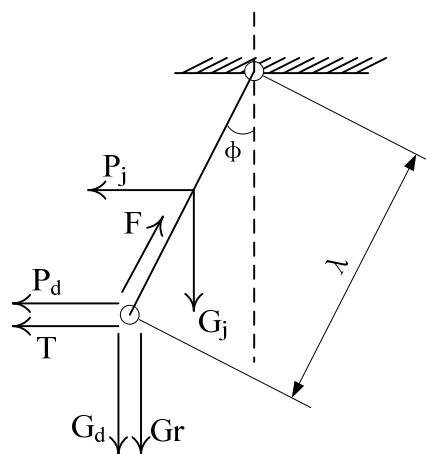


图 5 绝缘子和导线受力分析 1

假设绝缘子串导线在承力工具收紧后处于静止状态，根据力矩平衡方程：

$$\begin{aligned} \sum M_0 = & (G_d + G_r)(\lambda \sin \phi) + G_j \left( \frac{\lambda}{2} \sin \phi \right) \\ & - (P_d + T)(\lambda \cos \phi) - P_j \left( \frac{\lambda}{2} \cos \phi \right) \end{aligned}$$

整理得

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{P_d + T + \frac{P_j}{2}}{G_d + G_r + \frac{G_j}{2}} \right)$$

其中：  $P_d = g_4 AL_h$ ，  $G_d = g_1 AL_v$ ，

$$P_j = 9.8(n+1)A_j \frac{v^2}{16}$$

式中：  $P_j$ —绝缘子表面风压；

$P_d$ —导线表面风压；

$T$ —导线角度荷载；

$G_d$ —导线重量，N；

$G_r$ —人和工具、材料重量，N；

$G_j$ —绝缘子串重量，N；

$\lambda$ —绝缘子串长度，m；

$\phi$ —绝缘子表面风压；

A—导线截面积,  $\text{mm}^2$ ;

$A_j$ —单片绝缘子受风面积 (单裙绝缘子取  $0.03\text{m}^2$ , 双裙绝缘子取  $0.04\text{m}^2$ );

$g_l$ —导线自重比载,  $\text{N}/(\text{m}\cdot\text{mm}^2)$ ;

$g_4$ —风压自重比载,  $\text{N}/(\text{m}\cdot\text{mm}^2)$ ;

n—每串绝缘子的片数, 片;

v—计算情况下的风速,  $\text{m/s}$ ;

F—承力工具受力, N。

根据力矩平衡方程, 若脱离绝缘子串与导线连接, 平衡将被打破。绝缘子串倾角  $\varphi$  将增大, 增加了连接新绝缘子的难度。

因此承力工具挂点选择时, 宜考虑限制绝缘子串偏移的角度。若将悬挂点往塔身内侧移动一段距离, 可得受力图如图 6 所示。

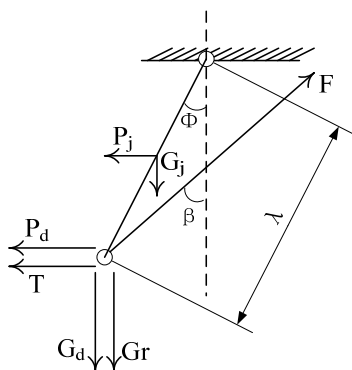


图 6 绝缘子和导线受力分析 2

力矩平衡方程将变成:

$$\sum M_0 = (G_d + G_r)(\lambda \sin \phi') + G_j \left( \frac{\lambda}{2} \sin \phi' \right) - (P_d + T)(\lambda \cos \phi') - P_j \left( \frac{\lambda}{2} \cos \phi' \right) + F \lambda \sin(\beta - \phi')$$

整理可得

$$\phi' = \tan^{-1} \left( \frac{P_d + T + \frac{P_j}{2} - F \sin \beta}{G_d + G_r + \frac{G_j}{2} - F \cos \beta} \right)$$

$$= \tan^{-1} \left( \frac{P_d + T + \frac{P_j}{2}}{G_d + G_r + \frac{G_j}{2}} \cdot \frac{1 - \frac{F \sin \beta}{P_d + T + \frac{P_j}{2}}}{1 - \frac{F \cos \beta}{G_d + G_r + \frac{G_j}{2}}} \right)$$

式中:  $\beta$ —承力工具与垂直方向夹角。

$$\text{因为 } \varphi < \beta, \text{ 则可以得到: } \frac{1 - \frac{F \sin \beta}{P_d + T + \frac{P_j}{2}}}{1 - \frac{F \cos \beta}{G_d + G_r + \frac{G_j}{2}}} < 1$$

由以上结论可以得到:  $\varphi' < \varphi$ 。即承力工具悬挂点向塔身移动, 绝缘子偏移角度将减小。作业时可将角钢卡安装在绝缘子偏移的反方向: 对于线路内侧边相绝缘子, 悬挂点可以尽量靠近塔身; 对于线路外侧绝缘子, 悬挂点可以尽量靠近横担头。这样就可以减小绝缘子偏移的角度, 减小连接的难度。

## 2 承力工具选择

解决了横担侧挂点的问题, 接着进行导线侧卡具的选择。由于导线侧连接金具不同, 可以选择不同的起吊工具。我们选定的作业杆塔, 由于横担尺寸较小, 不适宜进行丝杠操作, 只能在导线侧进行。因此我们选择直线四钩卡与承力工具进行连接, 图 7 是工具组装图。

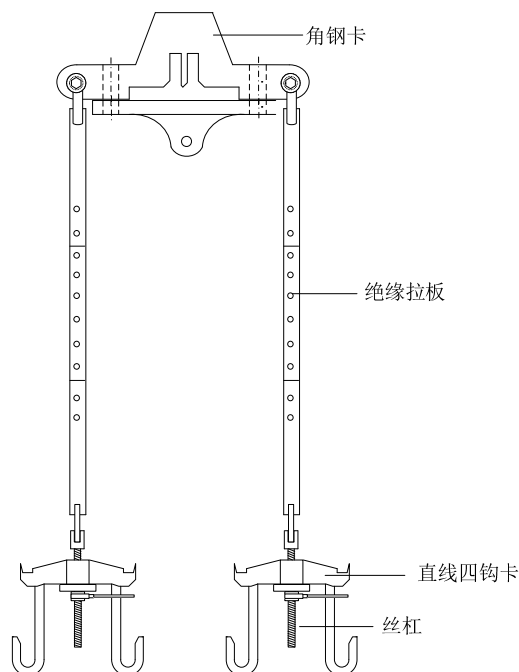


图 7 承力工具组装图

忽略绝缘子表面风压, 采用双吊点提升双串绝缘子时, 承力工具需要施加力 F 满足下式:

$$F = \frac{1}{2} \sqrt{(P_d + T)^2 + (G_d + G_r + G_j)^2}$$

考虑到两侧承力工具平衡系数  $\xi$  取 1.1, 冲击系

数  $\varepsilon$  取 1.1, 安全系数  $K$  取 2.5。

则承力工具强度  $P$  要满足:

$$P \geq K \xi \varepsilon \cdot F = 3F$$

在进行相关塔型带电作业时, 要事先计算出相应的  $P$  值, 根据计算结果选择相应型号的丝杠。

绝缘拉板使用前应先测量绝缘子串结构长度, 扣除丝杠以及连接部分长度, 事先调整好绝缘拉板长度。为保证绝缘拉板满足强度要求, 根据实际需要选择不同的拉板。由于导线角度荷载的原因, 直线小转角塔在进行绝缘子串更换作业时, 拉板承受的力较直线串要大不少, 因此不能套用直线串的作业工具。使用前应进行拉伸和剪切强度计算。

### 3 相关数据计算

下面我们将进行相关数据的计算。

#### 3.1 承力工具强度要求

查阅导线规格表, LGJ-400/35 导线, 外径  $D=26.82\text{mm}$ , 计算截面  $A=425.24\text{mm}^2$ , 一般对于钢芯铝绞线导线应力取  $100\text{N/mm}^2$ 。

在设计时, 由于小转角塔线绝缘子串偏移垂直位置, 考虑到风偏角的影响, 档距一般都较小,  $L_h=300\text{m}$ 。

(1) 由于线路转角  $\theta$  较小, 角度荷载可以近似表示为:

$$T = 4 \times 2 \sigma A \sin \frac{\theta}{2} = 4 \sigma A \theta \frac{\pi}{180}$$

将转角度数  $\theta=5^\circ$ , 代入上式得到:  $T=14836\text{N}$

(2) 导线垂直荷载  $G_d$  可用公式:

$$G_d = 4 \times \frac{K A L_h}{100} = 18881\text{N}$$

式中:  $K$ —系数, 按表 1 选用;

$A$ —导线截面积,  $\text{mm}^2$ ;

$L_h$ —垂直档距,  $\text{m}$ 。

表 1 系数  $K$  的取值

导线型号	LGJ-50~LGJ-70	LGJ-95~LGJ-300	LGJ-400 及以上
$K$	4.0	4.2	3.7

(3) 每片绝缘子重量取  $10\text{kg}$ , 绝缘子片数  $n$  取 28, 等电位作业人员及工具重量取  $100\text{kg}$ , 则可以得出: 人和工具重量  $G_r=1000\text{N}$ , 每串绝缘子重量  $G_j=2800\text{N}$ 。

(4) 假定作业时风速  $10\text{m/s}$ , 查阅导线比载表可以得到风压比载:

$$g_4 = 4.389 \times 10^{-3} \text{N}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)$$

代入相关数据, 则可以求出导线表面风压:

$$P_d = 4 g_4 A L_h = 2240\text{N}$$

从而可以求出:

$$P = \frac{3}{2} \sqrt{(P_d + T)^2 + (G_d + G_r + G_j)^2} = 42586\text{N}$$

#### 3.2 拉板强度校验

目前带电作业用的绝缘支、拉、吊杆大都采用 3240 或 3260 环氧酚醛玻璃丝布层压制品。这种材料除了优良的电气性能之外, 具有较高的机械性能, 其极限应力  $\sigma^0=180\text{N/mm}^2$ 。

安全系数  $K=4$ , 则许用应力:

$$[\sigma] = \sigma^0 / 4 = 45 \text{N/mm}^2$$

$$\text{拉板危险截面积: } S_{11} = (b - d)a$$

其中:  $b$ —拉板宽度,  $\text{mm}$ ;

$a$ —拉板厚度,  $\text{mm}$ ;

$d$ —螺孔直径,  $\text{mm}$ 。

$$\text{需满足如下条件: } \frac{P}{S_{11}} \leq [\sigma]$$

我们取  $a=10\text{mm}$  的 3240 进行计算, 螺孔直径  $d=13\text{mm}$ , 拉板的宽度:

$$b \geq \frac{P}{a[\sigma]} + d = 108\text{mm}$$

因此, 拉板宽度至少要  $108\text{mm}$  才能满足强度要求。

### 4 注意事项

由于 500kV 直线小转角塔的特殊受力状况, 在作业时尤其要注意以下几点:

(1) 由于线路外侧边相绝缘子向铁塔内侧倾斜, 其安全距离较直线串要小。因此在进行带电作业之前, 应充分考虑风偏角的影响。另外还要测算作业时各种安全距离, 满足规程的规定方可进行。

(2) 在进行紧凑型直线小转角塔带电作业时, 尽量在保证足够的工具强度、性能的前提下, 减少工具的金属连接部分, 以保证有效安全距离满足作

业要求。

## 5 结束语

通过对 500kV 直线小转角塔进行分析,根据其悬垂绝缘子串受力特点,通过新型卡具的应用解决了 500kV 直线小转角塔的带电作业难题。

新型工具的通用性较高,不仅适用于直线小转角塔形的悬垂串,对于 V 型串也同样适用。作业时只要根据实际需要选择搭配的承力工具即可。新型角钢卡预留安装孔,可以根据需要加装需要的部件,以满足作业要求,具有较高的实用价值。

参考文献:

- [1] 国家电网公司人力资源部.输电线路带电作业[M].北京:中国电力出版社,2011.
- [2] 国家电网公司.带电作业操作方法(第一分册 输电线路)[M].北京:中国水利水电出版社,1993.
- [3] 易辉.带电作业技术标准体系及标准解读[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [4] 赵先德.输电线路基础(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2010.

---

作者简介:

邵长一(1984-),男,江苏徐州人,助理工程师,带电作业技师,从事输电线路检修工作,E-mail:hikki1111@163.com。