

角钢塔曲臂 K 节点变形原因分析及对策研究

辜良雨¹, 李林¹, 廖邢军¹, 刘翔云¹, 陇源杰², 付卫斌²

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;

2. 云南电网有限责任公司建设分公司, 云南 昆明 650051)

摘要:酒杯塔和猫头塔在单回交流输电线路中广泛应用, 曲臂 K 节点属于刚度相对薄弱点, 文中以某 500 kV 交流输电线路工程猫头塔曲臂 K 节点变形统计情况为例, 从设计、加工、施工三方面对曲臂 K 节点变形原因进行了深入分析, 提出了合适的结构措施和施工要求, 经过某新建工程验证, 控制措施效果显著, 值得在今后的铁塔设计、施工中借鉴采用。

关键词:猫头塔; 酒杯塔; 曲臂; K 节点; 变形控制

中图分类号: TM 752 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)03-0066-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220312

Cause Analysis and Countermeasure Research on K-joint Deformation of Angle-steel Tower

GU Liangyu¹, LI Lin¹, LIAO Xingjun¹, LIU Xiangyun¹, LONG Yuanjie², FU Weibin²

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group,

Chengdu 610021, Sichuan, China; 2. Construction Branch of Yunnan Power Grid

Co., Ltd., Kunming 650051, Yunnan, China)

Abstract: Cup-tower and cathead tower are widely used in single circuit AC transmission lines, but the K-joint of crank arm is a relatively weak point in stiffness. Taking the deformation statistics of the K-joint of crank arm in cathead tower in a 500 kV AC transmission line project for example, the deformation causes of the K-joint of crank arm are analyzed from three aspects of design, processing and construction, and the appropriate structural measures and construction requirements are put forward. Through the verification of a new project, the effect of the control measures is remarkable, which is worthy of reference in the future tower design and construction.

Key words: cathead tower; cup-tower; crank arm; K-joint; deformation control

0 引言

在单回交流输电线路中, 悬垂直线塔通常有酒杯塔和猫头塔两种型式, 两种型式各有优缺点。酒杯塔导线呈水平排列、导线水平间距大、线路走廊宽、房屋拆迁多; 但由于塔头较低, 防雷效果较猫头塔更优, 且塔材耗钢量较轻。而猫头塔导线呈三角形排列, 具有导线水平间距小、线路走廊小、房屋拆迁少的优点; 但由于塔头较高, 防雷效果不如酒杯塔, 且塔材耗钢量较重。

铁塔型式选择与沿线的地形条件、交通条件、气

象条件、林木和房屋以及对线路有影响的设施分布情况、运行维护等有着密不可分的关系。由于酒杯塔和猫头塔各有优缺点, 两种塔型在工程中都得到了广泛应用。但酒杯塔和猫头塔的塔头上下曲臂 K 节点属于刚度相对薄弱点。500 kV 平武线送电线路工程^[1]和 1000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程^[2]均出现了曲臂 K 节点位移的情况且经过了试验验证。文献[3-4]通过现场调查、理论分析和真型试验 3 个方面, 分析了 K 节点位移及其对结构承载力的影响。文献[5]利用数理统计原理分析铁塔 K 节点变形, 给出了 K 节点变形值的合理范围^[5]。

下面在上述研究成果的基础上,从设计、加工和施工的角度对角钢塔曲臂K节点变形原因进行分析,并结合理论研究和工程实践经验,提出有效控制角钢塔曲臂K节点变形的措施。

1 曲臂K节点变形情况调研

1.1 曲臂K节点

酒杯塔和猫头塔的共同特点是塔头由曲臂与导线横担构成,上下曲臂均为K节点连接结构。不同的是,酒杯塔边横担和中横担均在K节点以上,猫头塔边横担在K节点以下,如图1所示。

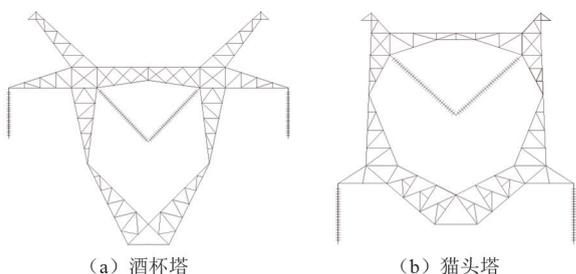


图1 酒杯塔、猫头塔塔头

上下曲臂采用K节点连接具有构造简单、传力清晰、施工方便等优点,但是K节点易产生水平方向变形,尤其对于导线三角排列的猫头塔,K节点向外鼓曲变形也是工程建设和运行维护中普遍存在的一个突出问题,曲臂K节点变形如图2所示。



图2 曲臂K节点变形实例及示意图

1.2 变形情况调研

以云南某500 kV交流输电线路工程为例,该工程采用南方电网典型设计5E1Y1、5E1Y2模块,在质检验收中发现有大量猫头塔曲臂K节点处存在不同程度的向外鼓曲变形。对各标段猫头塔进行了逐基测量,共得到479基铁塔的K节点位移值情况,详见表1。

表1 各标段猫头塔K节点单侧位移值统计

| 标段 | 塔数量/基 | 最小位移值/mm | 最大位移值/mm | 平均位移值/mm |
|----|-------|----------|----------|----------|
| 1 | 31 | 16 | 32 | 23.4 |
| 2 | 83 | 30 | 43 | 36.4 |
| 3 | 34 | 20 | 38 | 29.1 |
| 4 | 51 | 15 | 38 | 26.4 |
| 5 | 143 | 24 | 39 | 32.6 |
| 6 | 35 | 35 | 50 | 43.5 |
| 7 | 15 | 30 | 46 | 37.7 |
| 8 | 28 | 24 | 64 | 49.1 |
| 9 | 7 | 41 | 52 | 47.3 |
| 10 | 34 | 40 | 70 | 45.4 |
| 11 | 18 | 40 | 60 | 45.9 |
| 合计 | 479 | 15 | 70 | 35.3 |

从测量数据可以看出:各标段猫头塔曲臂K节点向外鼓曲变形是普遍存在的现象;不同标段单侧位移值离散性较大,同一塔型在不同塔位甚至在同一标段位移相差较大;各标段单侧位移平均值为23.4~49.1 mm,与外曲臂主材的长度之比约为1/160~1/350。对所有塔位的位移情况进行统计分析,所有塔位K节点单侧位移最小值为15 mm,最大值为70 mm,平均值为35.3 mm,位移值分布如图3所示。

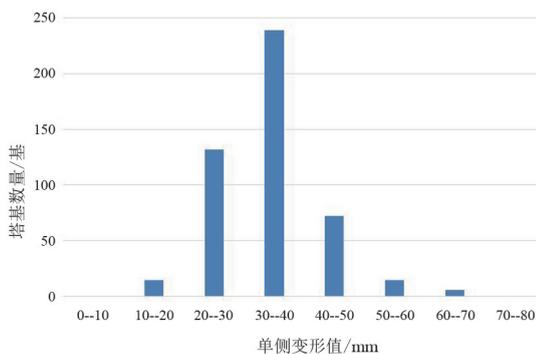


图3 曲臂K节点单侧位移值分布

由图3可见:约86.6%的塔位单侧位移小于40 mm,约12.6%的塔位单侧位移在40~60 mm,约0.8%的塔位单侧位移大于60 mm;约92.5%的单侧位移值集中在20~50 mm。

为分析猫头塔K节点变形原因,在地面进行了两种猫头塔塔头的试组装,采用卧式组装后再吊装竖直。试组装结果表明:卧式组装K节点位移值较小,甚至出现负值的情况,说明卧式组装由于螺孔间隙、安装误差、加工误差等原因会产生偏差,但是偏差值不大;吊装竖直后,受自重影响,螺栓发生滑移,螺栓与螺孔孔壁发生挤压抵紧,发出“咯吱咯吱”的

声响,K 节点向外鼓曲,单侧位移平均值在 30 mm 左右。

2 K 节点变形原因分析

2.1 设计因素

酒杯塔和猫头塔曲臂 K 节点以上部分是典型的铰拱结构,铁塔组装完成之后,在横担自重和导地线垂直荷载作用下会发生鼓曲变形,但受力特点存在差异:对于酒杯塔,中横担自重和中导线垂直荷载使得 K 节点向外鼓曲,但边横担自重和边导线垂直荷载使得 K 节点向内侧移动,如图 4 所示;对于猫头塔,中横担自重和中导线垂直荷载使得 K 节点向外鼓曲,边横担自重和边导线垂直荷载同样使得 K 节点向外侧鼓曲,如图 5 所示。

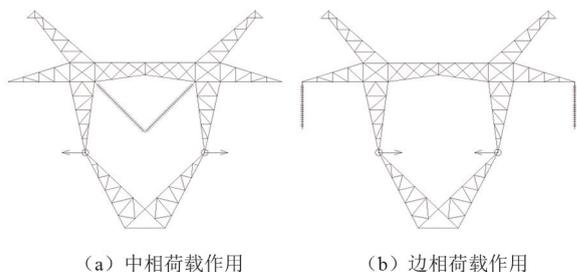


图 4 酒杯塔 K 节点位移分析

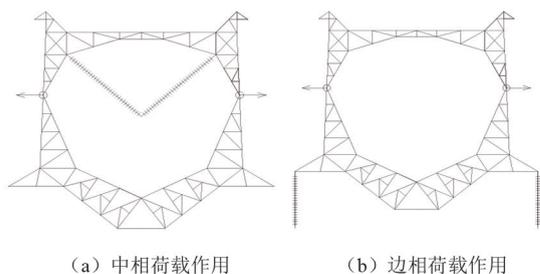


图 5 猫头塔 K 节点位移分析

因此,猫头塔曲臂 K 节点向外鼓曲变形是一种力学现象,是受力的必然反映;酒杯塔由于边导线和中导线具有相互抵消的作用,K 节点向外鼓曲变形的趋势要小一些。

为了研究猫头塔曲臂 K 节点理论变形量的大小,以 5E1Y2-ZMH 塔型为例,采用杆单元模型计算右曲臂外侧各节点的理论位移值。选择 6 个计算工况,其中:工况 1,未架线,无风;工况 2,未架线,风速为 10 m/s;工况 3,已架线,风速为 10 m/s;工况 4,已架线,大风,最大垂直荷载;工况 5,已架线,大风,最小垂直荷载;工况 6,已架线,覆冰,最大垂直荷

载。计算结果如图 6 所示。

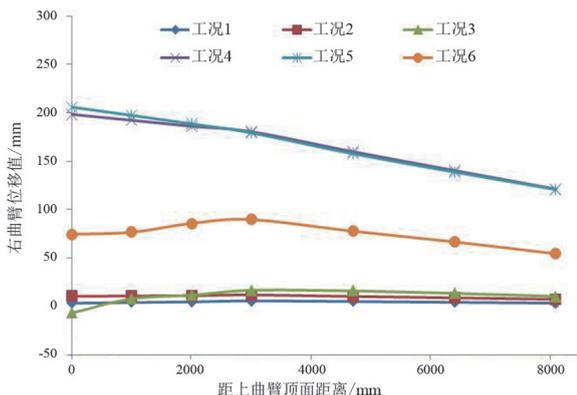


图 6 典型工况下猫头塔曲臂位移值

从图 6 中数据可以看出:

1) 上曲臂各点沿横担方向的位移值(绝对位移)在大风工况下较大,其次是覆冰工况,在安装和未架线工况下较小。

2) 在各工况下,上曲臂各点的变形并不相同。以曲臂 K 节点为界,变形曲线基本呈双折线模式,在曲臂 K 节点处出现拐点,即外鼓变形。这和现场观察到的现象基本一致。说明 K 节点作为刚度上的薄弱点,在正常加工和施工情况下,其受力时的变形现象为外鼓变形。

3) K 节点的相对变形值与导地线垂直荷载关系较大。垂直档距越大,垂直荷载越大,理论计算变形值也相对越大。

4) 在各工况下,K 节点相对外曲臂上下端点的理论变形值较小。架线前的相对变形约为杆件全长的 1/3000,架线后约为杆件全长的 1/500,大风情况下约为杆件全长的 1/750,覆冰情况下约为杆件全长的 1/350。

为了探讨 K 节点位移对附近杆件受力的影响,假定猫头塔未强行组装,K 节点位移主要为螺栓滑移变形,不会产生附加内力。因此,在正常加工和组装的前提下,可仅考虑 K 节点坐标、尺寸变化对构件承载力的影响。以 5E1Y1-ZMH1 为例,对 K 节点位移后的内外曲臂主材进行受力分析,如图 7 所示。

由图 7 可知,在不考虑附加内力的前提下,K 节点向外位移会导致上曲臂内主材、上下曲臂外主材内力增加,单侧位移达到 80 mm 时上曲臂内主材内力增加 11%。

2.2 加工因素

放样尺寸误差、螺孔间隙、塔材的初弯曲以及瓶口、曲臂、曲板角度等加工因素,均对 K 节点的位移

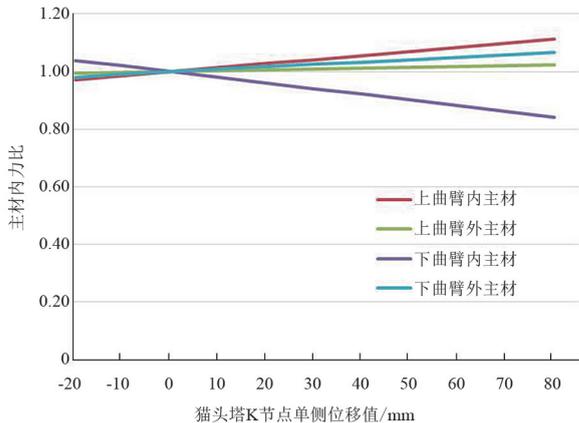


图7 K节点位移对主材内力影响

有一定影响。

由于输电铁塔全部采用粗制螺栓,螺栓孔比螺栓公称直径一般大 1.5~2.0 mm。而实际加工制造时,孔径往往还要偏大,而螺栓实际直径往往比公称直径偏小,这样会进一步加大相关节点的位移。

由于螺栓与螺孔之间的间隙,会造成最大构造间隙为 $2e$ (e 为螺孔与螺杆直径的差值),如图 8 所示。

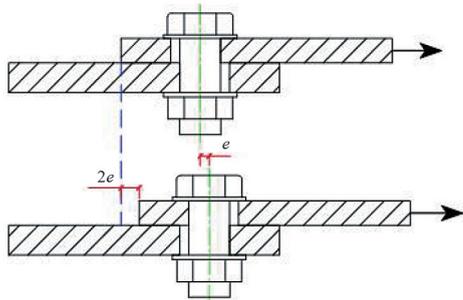


图8 螺栓滑移

根据现场测量数据,螺孔直径平均比螺栓公称直径大 2.17 mm,单个螺栓间隙滑移最大值达 4.34 mm。螺栓与螺孔之间的间隙引起的累积位移往往不可忽略,对 K 节点处位移影响较大。

2.3 施工因素

施工工艺、施工方法和施工习惯,也会对曲臂 K 节点的位移产生影响。从各施工标段提供的数据可以看出,不同标段单侧位移平均值的离散性较大,这说明了位移大小和施工队伍、施工工艺关系较大,良好的施工工艺和组织管理可有效控制曲臂 K 节点相对位移。

在塔头组装时,由于上部未闭合,若未对左右两侧 K 节点进行位移限制,下曲臂和塔身形成一个开口式 Y 型结构,在自重作用下会产生一定位移,如图 9 所示。

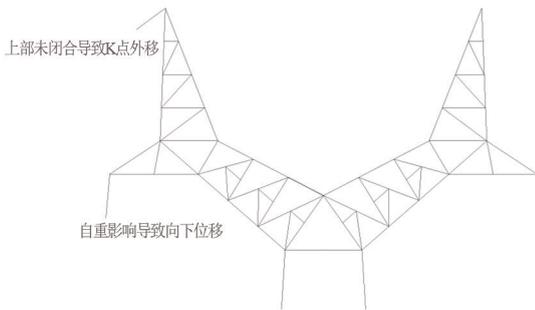


图9 塔头组装

为了验证施工因素对 K 节点的影响,对云南某工程 AN145 塔位铁塔组立过程进行了监测。施工采用内悬浮内拉线方法,组装塔头部位时内拉线打在塔身杆件上,不对塔头杆件施加外荷载,现场组立如图 10 所示。

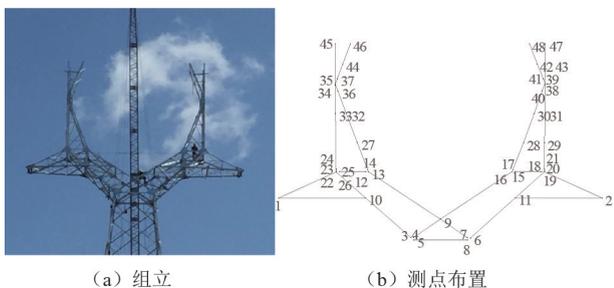


图10 AN145塔位现场组立监测

对塔头部位控制点的坐标进行测量,将测量数据投影到竖直面上,通过与下曲臂上平面主材交点(见图 10 中测点 9)的相对位置关系,研究塔头各点的位移情况,测量数据见表 2、表 3。

表2 垂直位移测量数据

| | 位置 | 测点号 | Z 实测值/mm | Z 设计值/mm | Z 差值/mm |
|----|---------|-----|----------|----------|---------|
| 左侧 | K 节点下端点 | 23 | 2774 | 2843 | -69 |
| | K 节点 | 35 | 7713 | 7793 | -80 |
| | K 节点上端点 | 45 | 10 049 | 10 132 | -83 |
| | 横担端点 | 1 | 1207 | 1279 | -72 |
| 右侧 | K 节点下端点 | 20 | 2785 | 2843 | -58 |
| | K 节点 | 39 | 7760 | 7793 | -33 |
| | K 节点上端点 | 47 | 10 056 | 10 132 | -76 |
| | 横担端点 | 2 | 1213 | 1279 | -66 |

从表 2 可以看出,各测点垂直坐标 Z 的差值均为负,表明曲臂和横担发生向下位移;从表 3 可以看出,各测点水平坐标均为正,表明曲臂和横担向外位移。这是由于塔头上部未闭合,下曲臂和塔身形成一个开口式的 Y 型结构。此时若不采取限制位移的措施,曲臂和横担在自重作用下将产生下坠,导致

K 节点向外鼓曲变形。

表 3 水平位移测量数据

| 位置 | 测点号 | Z 实测值/mm | Z 设计值/mm | Z 差值/mm | |
|----|---------|----------|----------|---------|-----|
| 左侧 | K 节点下端点 | 23 | 5696 | 5650 | 46 |
| | K 节点 | 35 | 5744 | 5650 | 94 |
| | K 节点上端点 | 45 | 5756 | 5650 | 106 |
| | 横担端点 | 1 | 8840 | 8786 | 54 |
| 右侧 | K 节点下端点 | 20 | 5692 | 5650 | 42 |
| | K 节点 | 39 | 5704 | 5650 | 54 |
| | K 节点上端点 | 47 | 5705 | 5650 | 55 |
| | 横担端点 | 2 | 8844 | 8786 | 58 |

如果不对曲臂和横担的下坠进行纠正就组装顶部的水平横担,则需将 K 节点上部左右塔材强行拉近才能组装到位。然而,K 节点刚度相对塔头其他部位较弱,会使得 K 节点主材向外鼓曲,如图 11 所示。

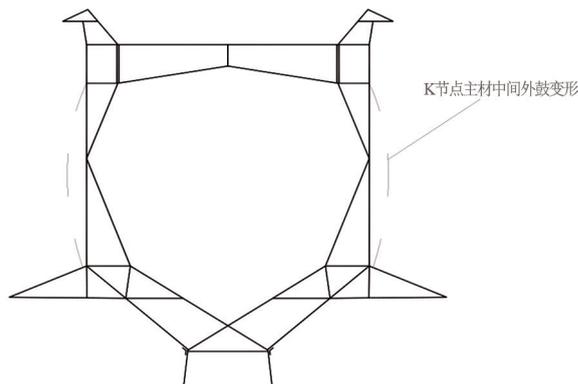


图 11 猫头塔 K 节点变形

2.4 K 节点变形原因小结

通过上述分析可知,曲臂 K 节点向外鼓曲是一种力学现象,经计算,常规 500 kV 猫头塔曲臂 K 节点架线前的理论相对位移约为 2~3 mm,架线后的理论相对位移约为 3~15 mm,理论变形值相对较小。

从典型铁塔组立结果可以看出,施工方法对 K 节点位移影响较大,如果强制组装不对曲臂和横担的下坠进行纠正,将加大鼓曲变形。

因此,K 节点位移主要受施工因素影响,其次为加工因素,再次为设计因素。

3 K 节点变形控制措施

从上述分析结果可以看出,角钢塔曲臂 K 节点

变形是无法彻底避免的客观现象,只能通过采取控制措施减小变形的不利影响。通过有针对性的研究发现,除适当提高铁塔加工精度减小初始变形外,还建议在设计和施工中采取以下措施控制 K 节点的变形。

3.1 设计措施

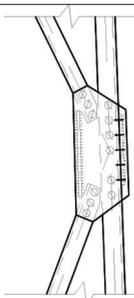
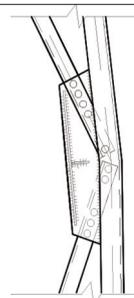
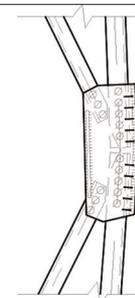
1) 由于酒杯塔中横担和边横担垂直荷载引起的 K 节点变形具有相互抵消的效果,因此在走廊条件允许的情况下,优先采用受力性能更好的酒杯塔。

2) GB 50017—2017《钢结构设计规范》^[6]要求压杆初弯曲不能超过杆长的 1/1000,GB 50233—2014《110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规范》^[7]中规定铁塔组立后,各相邻主材节点间弯曲度不得超过 1/750。这是因为轴心受力杆件的初弯曲会引起 P- Δ 效应,严重降低压杆的极限承载力;但 K 节点是一个节点,它的横向位移并不等同于轴心受力杆件的初弯曲,因此不会引起 P- Δ 效应,也就不会降低压杆的极限承载力^[4]。猫头塔外曲臂主材一般长度不大,以往多采用通长杆件,在工程实践中有的质检单位会采用各相邻主材节点间弯曲度不得超过 1/750 的标准来判断,对工程的验收造成了一定的困难。因此,曲臂 K 节点外主材不宜采用通长杆件,建议开断处理,回避前述验收规定。

此外,曲臂 K 节点外主材不宜设计为直线,建议采用折线设计,降低 K 节点变形后的视觉误差效果。

曲臂 K 节点外主材常见处理方式及推荐方案见表 4。

表 4 曲臂 K 节点外主材方案对比

| 对比项 | 方案 1 | 方案 2 | 方案 3 |
|------|---|--|---|
| 结构 |  |  |  |
| 特点 | 外主材通长(直线) | 外主材通长(火曲) | 外主材开断(折线) |
| 是否推荐 | 不推荐 | 不推荐 | 推荐 |

3) K 节点处内外曲臂主材夹角不宜太小,建议不小于 18°,以确保 K 节点处具有良好的刚度,如图 12 所示。

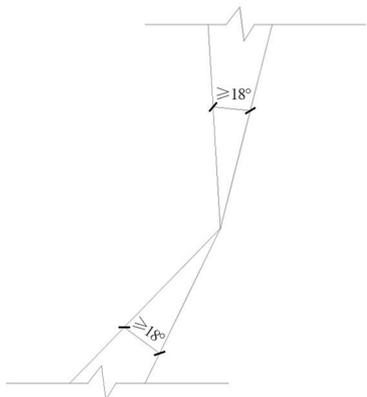


图 12 K 节点处内外曲臂主材夹角控制

4) K 节点发生位移难免会对节点附近的杆件产生附加应力,建议对上下曲臂主材和正侧面节点板加大一级。

3.2 施工措施

1) 施工单位在塔头组装时,应严格按照设计要求在边横担内侧节点及曲臂 K 节点设置对拉钢绳,对曲臂和横担的下坠进行纠正,控制组塔期间的变形,如图 13 所示。

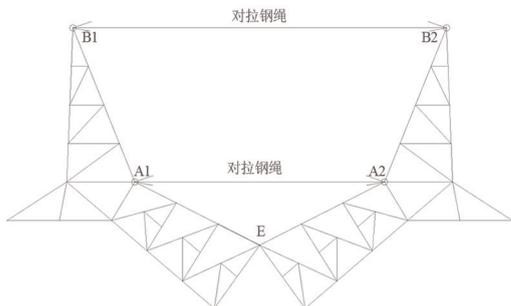


图 13 施工孔及拉线布置

2) 架线完成后应复核 K 节点变形情况,变形较大时,应先松开 K 节点(B1、B2)及边横担内侧节点(A1、A2)连接螺栓,通过对拉钢绳调整到设计值后再紧固螺栓,如图 14 所示。

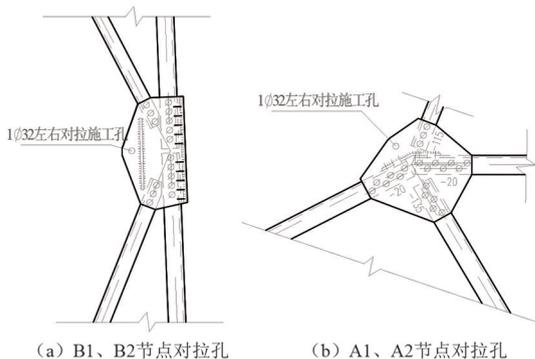


图 14 对拉施工孔

3.3 试组装及工程检验

在后续云南某新建 500 kV 交流输电线路工程

中,对猫头塔采取了以下控制措施:

- 1) 曲臂 K 节点外主材设计为折线,并进行开断;
- 2) 上曲臂内主材与外主材夹角按 25°设计,下曲臂内主材与外主材夹角按 23°设计;
- 3) 上下曲臂主材和正侧面节点板规格见表 5;

表 5 曲臂主材和节点板规格

| 部位 | 计算规格 | 加大后规格 |
|---------|---------|----------|
| 上曲臂内主材 | L80×7H | L90×7H |
| 上曲臂外主材 | L110×8H | L110×10H |
| 下曲臂内主材 | L90×7H | L100×7H |
| 下曲臂外主材 | L110×8H | L110×10H |
| 正面节点板厚度 | 10 mm | 12 mm |
| 侧面节点板厚度 | 10 mm | 12 mm |

4) 在 K 节点及边横担内侧节点设置左右对拉施工孔,在铁塔组立过程中设置对拉钢绳,控制曲臂和横担的下坠以及 K 节点的变形。

对采取了上述控制措施的猫头塔在塔厂进行了立式试装,如图 15 所示。然后进行了现场实测验证,实测数据如表 6 所示。



图 15 猫头塔立式试组装现场

表 6 K 节点位移实测数据

| 检验次序 | 检验时间 | 左右 K 节点水平距离变化 | 检验结果 |
|--------------------|---------------------|---------------|------|
| 第 1 次 (组立完成) | 2020-12-24 17:00 | 无变化 | 满足 |
| 第 2 次 (静置 17 h) | 2020-12-25 10:00 | 增加 1 mm | 满足 |
| 第 3 次 (静置 42 h) | 2020-12-26 11:00 | 无变化 | 满足 |

实测数据表明,K 节点位移值在 0~1 mm 之间,肉眼基本无法看出明显的变形,试验塔满足验收要求。

4 结 论

上面以某 500 kV 交流输电线路工程猫头塔曲臂 K 节点变形统计情况为基础,从设计、加工、施工

三方面对曲臂 K 节点变形进行深入分析后认为,角钢塔曲臂 K 节点变形是一种正常的力学现象,是受力的必然反映,不能彻底避免,且受加工精度和施工方法影响较大。在设计和施工中建议采取以下措施控制 K 节点的变形:

1) 在走廊条件允许的情况下,优先采用受力性能更好的酒杯塔;

2) 曲臂 K 节点外主材不宜采用通长杆件,建议开断处理;

3) K 节点处内外曲臂主材夹角不宜太小,建议不小于 18° ;

4) 在受力计算结果的基础上,对上下曲臂主材和正侧面节点板加大一级;

5) 塔头组装时,在边横担内侧节点及曲臂 K 节点设置对拉钢绳,对曲臂和横担的下坠进行纠正,控制组塔期间的变形;

6) 架线完成后应复核 K 节点变形情况,变形较大时,通过对拉钢绳调整到设计值后再紧固螺栓。

塔头立式组装和工程实践结果表明,采取了所设计的构造措施并规范施工工艺后,曲臂 K 节点在组塔阶段的变形值接近 0,架线后也无明显变形,控制措施效果显著,值得在今后的铁塔设计、施工中借鉴采用。

(上接第 60 页)

采取简化接线后,串抗站内仅有部分视频监控、照明及检修负荷。这些负荷即使长时间停电也不影响串抗站的正常运行,因此采用简化接线的独立串抗站站用电源可采用 1 回外接电源进行供电。

3.5 接地

采取简化接线后的 500 kV 独立串抗站接地方案与常规串抗站也有较大不同。采用简化接线后,站内没有重要的二次及通信设备,仅需满足站内人员安全即可。也就是说,采用简化接线后的 500 kV 独立串抗站接地主要是满足接触电势和跨步电势要求,对串抗站的目标接地电阻值的要求可适当降低。

干式空芯电抗器漏磁较严重,根据调研,已建串抗站多有地网发热的情况发生。因此,串抗站主地网建议采用非铁磁性的扁铜作为主网接地材料。

4 结 论

布置于线路中部的 500 kV 独立串抗站与紧邻

参考文献

- [1] 500 kV 平武线送电线路工程 ZJ10 直线小转角塔试验报告[R].武汉:电力工业部中南电力设计院,1980.
- [2] 国网北京电力建设研究院.1000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程 ZMP2 猫头塔 K 节点位移真型试验验证报告[R].北京:国网北京电力建设研究院,2008.
- [3] 吴庆华,冯德奎.输电铁塔曲臂‘K’节点位移研究[J].电力勘测设计,2010(3):52-55.
- [4] 冯德奎,舒爱强,包永忠.特高压输电塔曲臂变形分析[J].电力建设,2010,31(5):13-16.
- [5] 李强,吴庆华,徐志军.输电铁塔 K 节点变形的数理统计分析[J].华中科技大学学报(城市科学版),2010,27(1):89-92.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [7] 中国电力企业联合会.110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规范:GB 50233—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.

作者简介:

辜良雨(1979),男,工学学士,高级工程师,主要研究方向为输电线路结构设计。

(收稿日期:2021-10-29)

变电站布置的串抗站相比,面临监控信号远传难度大、需设置独立站用辅助系统、设备运行维护困难等难题。如果按照常规 500 kV 串抗站的原则去设计,不但投资增加较大,后期运行维护工作量也会随之增大。若在确保主要功能的前提下,将串联电抗器视为线路的一部分,则可尽量简化接线型式及设计方案,可以大幅节省投资并减轻后期运维难度。

参考文献

- [1] 薛敏,卢波,黄华,等.首台 500 kV 线路串联电抗器在华东电网的应用研究[J].华东电力,2008,36(11):47-50.
- [2] 祝瑞金,蒋跃强,杨增辉,等.串联电抗器限流技术的应用研究[J].华东电力,2005,33(5):18-22.
- [3] 王一,单金华,张淦锋,等.HGIS 限流串联电抗器对线路过电压的影响分析[J].浙江电力,2020,39(7):13-17.

作者简介:

曹尹(1982),男,高级工程师,从事变电站电气一次设计工作。

(收稿日期:2021-10-08)