

适用于采动影响区的新型可调式 钢管桁架设计研究

周建军, 蒋锐, 向越, 车达, 杨昌金

(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)

摘要:随着大量输电线路工程的建设, 线路途径采动影响区的比例日益增高。在开采活动的影响下, 输电铁塔塔基处地表可能产生移动和变形, 造成基础倾斜、杆塔变形等危害。中空防护大板基础已成功应用于特高压直流线路采动影响区, 取得了良好的效果和工程应用经验, 但其适应地形能力差、开方量巨大、水土流失严重。结合钢构件和长短腿的设计经验, 提出将刚性隔面上移、隔面以下设置新型可调式钢管桁架的连接方式, 代替中空防护大板基础, 从而有效提高铁塔抵抗地表变形的能力和铁塔对地形的适应能力。

关键词:采动影响区; 输电铁塔; 基础方案; 可调式钢管桁架

中图分类号: TU 347 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)01-0050-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220111

Research on Design of New Adjustable Steel Pipe Truss Suitable for Mining-affected Areas

ZHOU Jianjun, JIANG Rui, XIANG Yue, CHE Da, YANG Changjin

(CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: With the construction of a large number of transmission line projects, the proportion of mining-affected areas along the line is increasing day by day. Under the influence of mining activities, the ground surface at the foundation of transmission tower may move and deform, resulting in foundation tilt, tower deformation and other hazards. The hollow protective slab foundation has been successfully applied in mining-affected areas of UHVDC transmission lines, and has achieved good results and engineering application experiences. However, it has a poor adaptability to terrain, huge excavation volume and serious soil and water loss. Combined with the design experiences of steel members and long and short legs, a connection mode is proposed to move the rigid partition upward and set a new type of adjustable steel pipe truss below the partition surface so as to replace the hollow protective plate foundation, which can effectively improve the towers' ability to withstand surface deformation and to adapt to the terrain.

Key words: mining-affected areas; transmission tower; foundation design scheme; adjustable steel pipe truss

0 引言

随着输电线路工程的大力建设, 线路走廊日益紧张, 线路途径采动影响区的比例日益增高^[1]。在地下开采的影响下, 采动影响区地表的移动和变形破坏了输电杆塔与地基之间的初始平衡状态。伴着力系平衡的重新建立, 使输电杆塔中产生附加应力, 轻则可造成基础倾斜、开裂、杆塔变形, 重则造成

基础沉陷、杆塔倾倒, 严重威胁输电线路的安全运行^[2-4]。采动影响区的输电线路已有多处铁塔发生基础沉降、杆塔倾斜^[5-9], 如内蒙古乌海伊公线 50 号铁塔。

通过研究采动影响区内的不同基础特性, 文献[10]给出了提高采空区输电线路稳定性的技术措施。文献[11]采用概率积分法对采空区段残余变形进行预测, 也提出了相应的工程防治措施及建议。

目前, 针对采动影响区内输电铁塔面临的问题,

基础设计时主要采用中空防护大板基础^[12]。该基础可有效抵抗下部土体的不均匀沉降,铁塔支座位移和上部结构应力均大幅降低,有效缓解上部铁塔的杆件变形。但中空防护大板基础在山区应用时,地形适应能力差,基面开方量巨大,经常形成5 m以上的永久性边坡,存在一定的安全隐患;若地表变形导致铁塔变形、倾斜,调节铁塔十分困难。

结合钢构架和长短腿的设计经验,提出将刚性隔面上移,隔面以下设置新型可调式钢管桁架的连接方式来代替中空防护大板基础,从而有效提高杆塔抵抗地表变形的能力,同时也增加铁塔对地形的适应能力。

1 新型可调式钢架设计

1.1 设计思路

设计思路是将刚性隔面上移,隔面以下设置新型可调式钢架的连接方式来代替中空防护大板基础,如图1所示。该设计方案通过增加刚性横隔面来缓冲地表变形对上部结构的影响,提高杆塔抵抗地表变形的能力。同时,可调式钢管桁架为长短腿结构,极大地增加了铁塔对地形的适应能力。

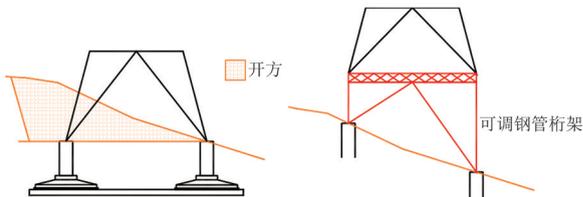


图1 中空防护大板基础和可调式钢管桁架

可调式钢管桁架腿部主材的连接节点设计为可调式球铰,腿部斜材的连接节点设计为单铰。同时,腿部主材和腿部斜材增加可调节结构。地表变形前后可调式钢管桁架变化如图2所示。

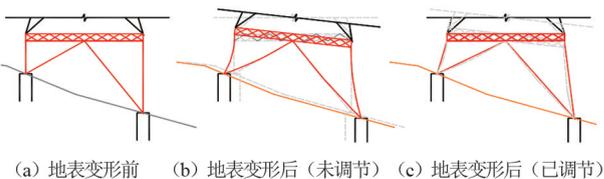


图2 可调式钢管桁架

正常运行时,球铰为刚性节点。当地表变形后,杆塔根开发生变化,此时杆塔受力平衡发生改变,部分构件承受较大的弯矩,若不进行调节,随着变形增大,构件将发生变形破坏。调节时,把球铰设置为杆

件可自由转动的铰接,通过调节腿部主斜材的长短和角度,使杆恢复平衡,释放杆塔的附加弯矩,避免杆塔构件发生变形破坏。调节完成后,球铰恢复为刚性节点。

1.2 设计原理

1.2.1 整体设计

当可调式钢管桁架调节为铰接时,需采用临时拉线等辅助措施,属于静力学问题。需计算两种情况,如图3所示。

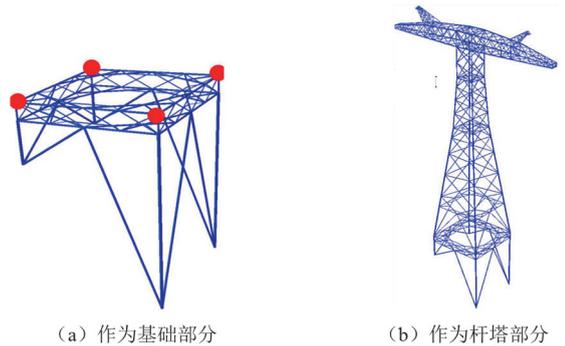


图3 可调式钢管桁架受力模型

情况1:可调式钢管桁架承受塔腿传递的基础作用力,此时可调式钢管桁架的受力为上部结构计算的基础作用力。

情况2:可调式钢管桁架作为杆塔部分,杆塔建模时应加入可调式钢管桁架。

因杆塔通过可调式钢管桁架调节后受力再次达到平衡。设计时,除了计算正常情况,还应计算达到最大调节后再次平衡时模型,如图4所示。

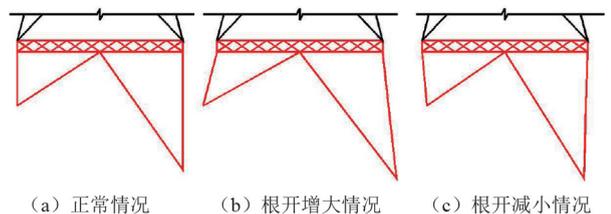


图4 根开变化后的可调式钢管桁架模型

腿部横隔面构件为杆塔变形敏感处,故钢管桁架结构在此处采用刚性横隔面,增大该部分刚度,提高抵抗地表变形的能力,如图5所示。

1.2.2 局部设计

相较于常规塔腿设计,为满足钢管桁架的可调节功能需重点考虑:1)腿部主材可调铰接节点;2)腿部斜材可调铰接节点;3)可伸缩结构。

1) 腿部主材可调铰接节点

腿部主材可调铰接节点采用球铰。由于球铰在

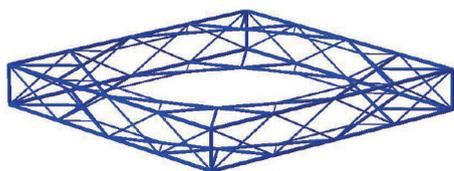


图 5 刚性横隔面

调节时为可转动结构,在运行时为刚性结构,并且需承受较大上拔力,在传统桥梁球铰的基础上进行改良设计。

根据文献[13]对山西省川底乡段收集的测量资料分析表明,水平变形是导致根开变化的主要原因,其值通常在 0~300 mm。球铰按最小转角为 0.01 rad,以 0.01 rad 级差递增,转角 0.02~0.06 rad 进行设计,可调节的根开范围如表 1 所示。

表 1 球铰各级正侧面根开调节范围

转角 θ/rad	调节范围/mm	
	短腿 4 m、长腿 12 m	短腿 5 m、长腿 15 m
0.02	320	400
0.03	480	600
0.04	640	800
0.05	801	1001
0.06	961	1201

注:调节范围=短腿 4(5) $\times\tan\theta$ +长腿 12(15) $\times\tan\theta$ 。

从表 1 可知,球铰转动范围满足 0.02 rad 时可满足绝大多数塔位的调节要求。根据上述要求,改良后的球铰设计如图 6 所示。

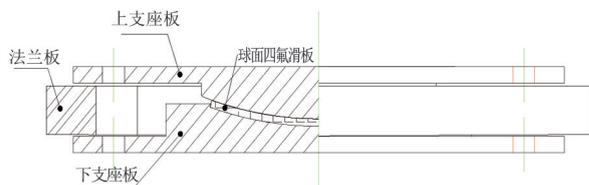


图 6 球铰支座设计

球铰可转动范围为 0.01~0.03 rad。抗拉设计如同法兰,通过螺栓传递。竖向下压设计承载力为 1000~8000 kN,共分为 6 级。为保证在运行时不随意转动,在上下座板之间添加刚性法兰板,即可以保证结构的传递下压力稳定,也对球铰起防尘垫圈的作用,如图 7 所示。

当球铰需要调节时,可用对应坡度的法兰板替换,标准化的法兰板坡度为 0~0.03 rad,其中 0.01 rad 为一级。

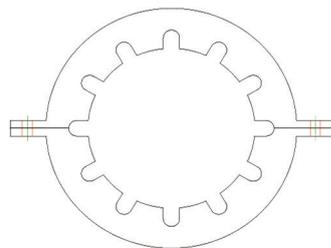


图 7 法兰板结构

腿部主材采用可调球铰与刚性隔面、基础进行连接,达到灵活转动与适应变形后地形的能力。球铰安装位置如图 8 所示,分别为钢管桁架腿部主材的上部和钢管桁架与基础相连接处。

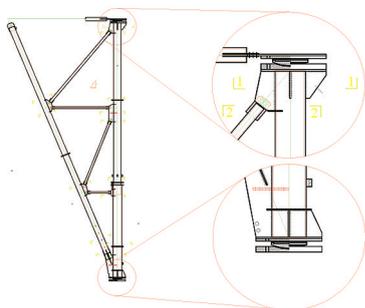


图 8 球铰安装位置

2) 腿部斜材可调铰接节点

考虑腿部斜材受力小,钢管规格小,无需采用球铰,采用单铰即可,位置如图 9(a)所示。即应用一颗螺栓连接,便满足腿部斜材大部分的转角需要,如图 9(b)所示。当地表变形导致铁塔根开变化非常大的时候,可在单铰节点板之间增加垫片或更换新的节点板完成调节。

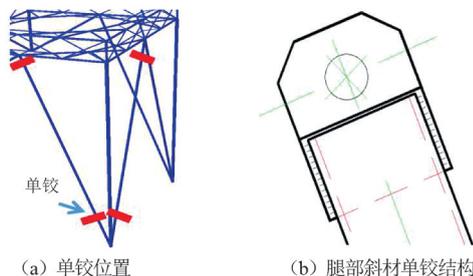


图 9 腿部斜材可调铰接节点

3) 主斜材可伸缩结构

可调式刚性隔面铁塔方案通过可伸缩结构调节腿部主材的长短,从而适应因采动活动导致的铁塔基础间不均匀沉降。

目前,在多条特高压线路的采动影响区中实施加长型地脚螺栓,是可行的腿部主材可伸缩结构方案。具体内容包括:杆塔与基础采用地脚螺栓连接,

基础主柱上的地脚螺栓外露丝扣长度适当加长。加强对塔位进行监测,一旦因地表变形引起基础不均匀沉降,可以先将地脚螺栓放松,利用千斤顶抬升塔腿,调平后在塔脚板下垫钢板,实现杆塔调平。钢垫板厚度可系列化,以适应不同的沉降量,多层使用时可垂直调向进行插垫,如图 10(a)。腿部斜材也存在可伸缩结构,主要通过同管材相连来实现,如图 10(b)所示。

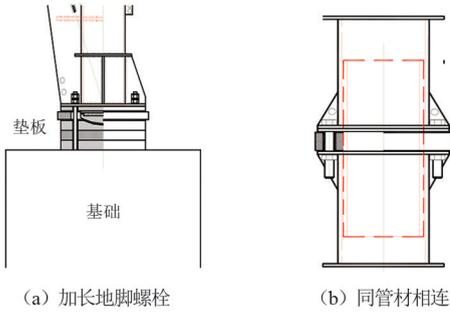


图 10 主斜材可伸缩结构

2 可调式刚性隔面铁塔设计受力研究

以滇西北工程 ZC27102 为例,建模分析可调式刚性隔面铁塔方案的受力。

上部铁塔为 ZC27102,呼高为 60 m,平腿,下部采用可调式刚性隔面钢管桁架结构,如图 11—图 12 所示。

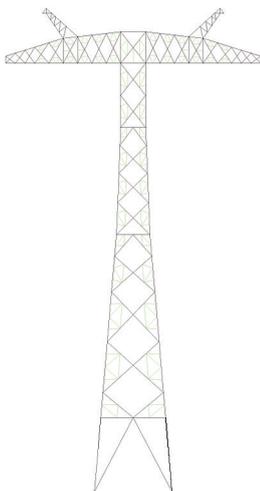


图 11 ZC27102-60 单线

本章主要研究可调式刚性隔面钢管桁架结构主要构件:主材 Z1—Z3 和斜材 X1—X2 的受力情况。其中:Z1 为两横隔面之间的主材,设计长度为 2 m; Z2 为腿部短腿主材,设计长度为 5 m; Z3 为腿部长腿主材,设计长度为 15 m; X1 为短腿腿部斜材; X2

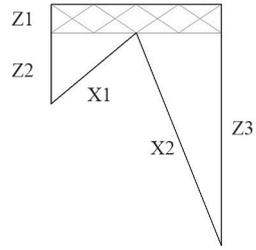


图 12 刚性隔面钢管桁架

为长腿腿部斜材。

2.1 双腿调节

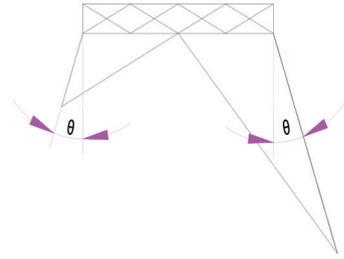


图 13 转角 θ

图 13 是腿部主材转角变化示意图。腿部主材 Z1—Z3 受力情况如图 14 所示。由图可见 θ 角在 $-0.06 \sim 0.06$ rad 变化时 Z1—Z3 受力的情况。

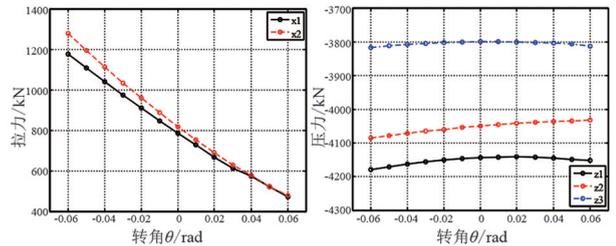


图 14 Z1—Z3 主材受力情况(双腿调节)

主材 Z1—Z3 拉力与压力之比在 0.72~0.73 之间。Z2 受力最大,Z3 最小。Z1—Z3 主材各个角度下压力最大值和最小值之间差异在 1.5% 以内。 θ 角每变化 0.01 rad,受力变化处于 0.3% 以内。所以在设计过程中,若 θ 位于 $\pm 0.01 \sim \pm 0.06$ rad 之间,可简化计算 0° 角时主材受力,乘以 1.5% 的内力增大系数进行选材。

腿部斜材 X1—X2 受力情况如图 15 所示。

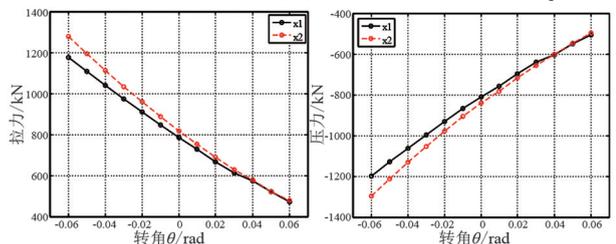


图 15 X1—X2 斜材受力情况(双腿调节)

腿部斜材 X1—X2 拉力与压力之比在的 0.94 ~ 0.98 之间。 θ 角越小时,腿部斜材 X1—X2 受力越大,但考虑到 θ 角越大时,长度增加,因此在计算时,应根据实际情况计算 θ 角最大和最小时构件的承载能力。

2.2 仅调节短腿

实际操作时,若所需调节根开较小时,可能仅利用球铰调节短腿。

腿部主材 Z1—Z3 受力情况如图 16 所示。由图可见 θ 角在 $-0.05 \sim 0.05$ rad 变化时 Z1—Z3 受力的情况。

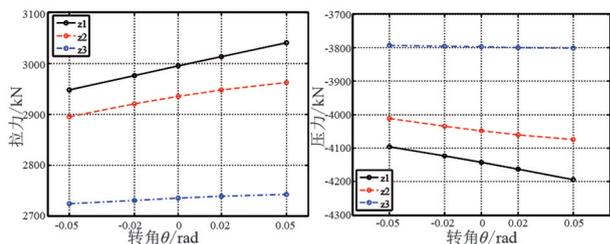


图 16 Z1—Z3 主材受力情况(仅调节短腿)

在这种情况下,腿部主材 Z1—Z3 拉力与压力之比在 0.72 ~ 0.73 之间。Z2 受力最大,Z3 最小。Z1—Z2 主材各个角度下压力最大值和最小值之间差异在 2.5% 以内, θ 角每变化 0.01 rad,受力变化处于 0.3% 以内。 θ 角越大,腿部主材 Z1—Z2 受力越大,Z3 主材内力基本无变化。

腿部斜材 X1—X2 受力情况如图 17 所示。

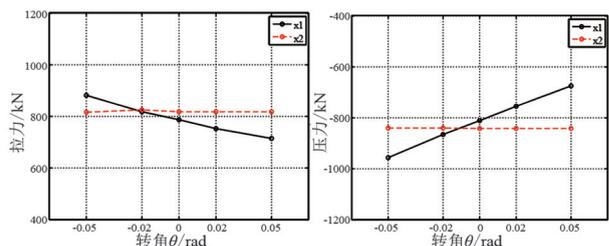


图 17 X1—X2 斜材受力情况(仅调节短腿)

在这种情况下,腿部斜材 X1—X2 拉力与压力之比在 0.92 ~ 1.06 之间。 θ 角越小时,腿部斜材 X1 受力越大,X2 斜材内力基本无变化。

2.3 仅调节长腿

实际操作时,若所需调节根开较小时,也可能仅利用球铰调节长腿。

腿部主材 Z1—Z3 受力情况如图 18 所示。由图可见 θ 角在 $-0.05 \sim 0.05$ rad 变化时 Z1—Z3 受力的情况。

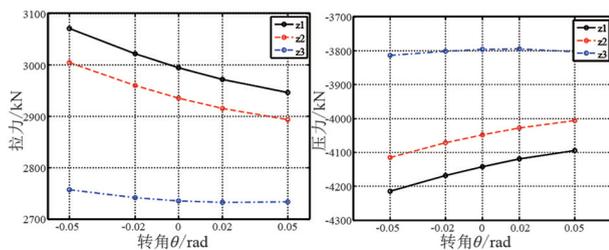


图 18 Z1—Z3 主材受力情况(仅调节长腿)

在这种情况下,腿部主材 Z1—Z3 拉力与压力之比在 0.72 ~ 0.73 之间。Z2 受力最大,Z3 最小。 θ 角每变化 0.01 rad,受力变化处于 0.3% 以内。 θ 角越小,腿部主材 Z1—Z2 受力越大,Z3 主材内力基本无变化。Z2 主材最大受力与双主材同时调节时基本相当。

腿部斜材 X1—X2 受力情况如图 19 所示。

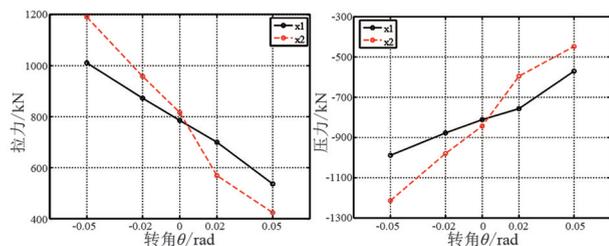


图 19 X1—X2 斜材受力情况(仅调节长腿)

在这种情况下,腿部斜材 X1—X2 拉力与压力之比在 0.94 ~ 1.02 之间。 θ 角越小时,腿部斜材 X1—X2 受力越大。

2.4 不同极差

对 10 m 极差和 8 m 极差下 Z1—Z3 与 X1—X2 构件受力进行对比。其中 10 m 极差中长腿为 15 m,短腿为 5 m;8 m 极差中长腿为 12 m,短腿为 4 m。Z1—Z3 与 X1—X2 在两种极差下的受力情况如图 20—图 24 所示。Z1—Z3 与 X1—X2 不同极差下受力与调节角度的变化规律相同,极差越大,同调节角度下受力越大。

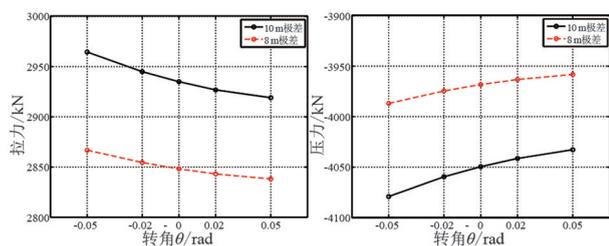


图 20 Z1 不同极差下受力情况

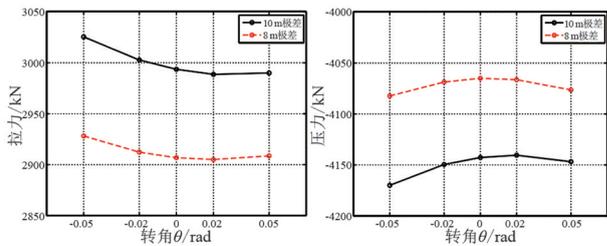


图 21 Z2 不同极差下受力情况

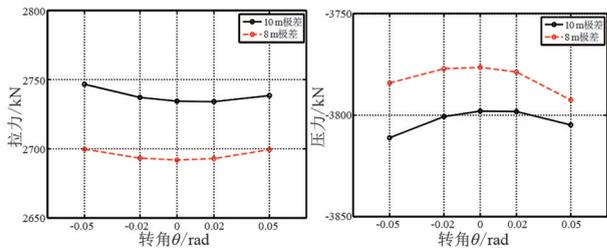


图 22 Z3 不同极差下受力情况

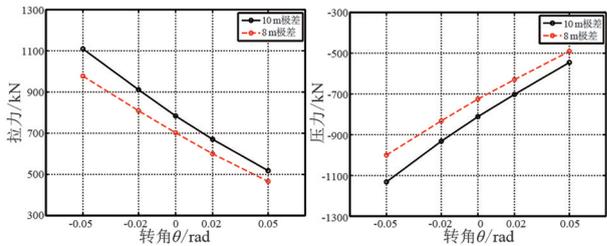


图 23 X1 不同极差下受力情况

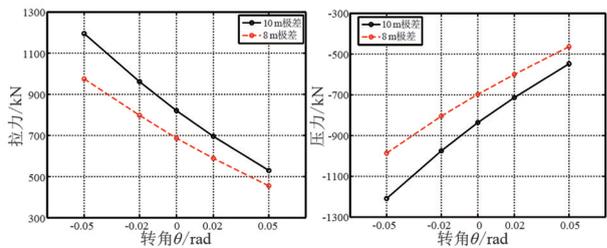


图 24 X2 不同极差下受力情况

上面可对调式刚性隔面主要构件在各种情况下的受力进行了分析,总结了相应的规律。进行可调式刚性隔面主要构件设计时,计算受力应综合考虑在球铰可调角度 θ 为最大值、最小值和 0° 时的受力,选取拉力和压力的最大值。计算长度选取构件在球铰可调角度 θ 为最大值、最小值和 0° 时的最大值。

3 可调式钢管桁架和中空防护大板基础对比

以滇西北工程 ZC27102 为例,对比分析可调式钢管桁架设计和中空防护大板,如图 25 所示。可调

式钢管桁架设计采用 ZC27102-60 m 铁塔+钢管桁架。常见地表坡度 25° 下,若采用传统施工的中空防护大板基础,铁塔需采用 ZC27102-74 m,形成高达 12 m 的永久性边坡;若采用半填半挖方式,铁塔仅需采用 ZC27102-67 m,护坡高度为 6 m,虽然依然形成较高的永久边坡,但优于传统施工。本章将比较可调式钢管桁架设计与半填半挖方式下中空防护大板基础在经济和安全等方面的差异。

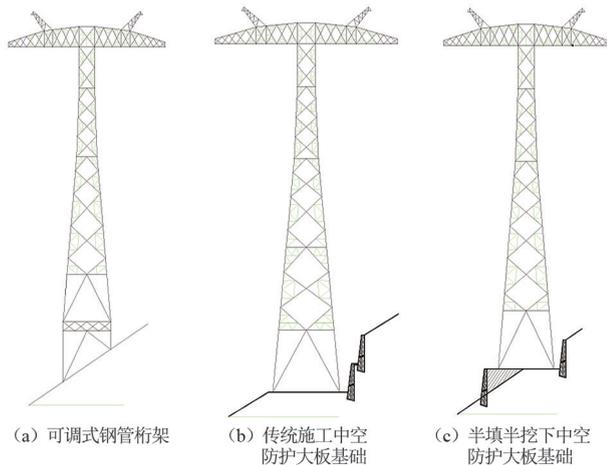


图 25 坡度 25° 下 3 种方式对比

3.1 经济性对比

半填半挖方式下中空防护大板基础与可调式钢管桁架设计综合造价如表 2 所示。根据经济性对比,在山区采用腿长可调式钢管桁架设计,相较于中空防护大板基础,可节省投资约 33%。随着地形坡度增加,投资节约比例将持续增加。

表 2 中空防护大板基础与可调式钢管桁架设计经济性对比

方案	ZC27102-67 m 中空防护大板基础	ZC27102-60 m 可调式钢管桁架设计
所耗钢材/t	88.28	110.16(塔重 79.06+ 钢管桁架 31.10)
可调球铰/万元	—	3.2(0.4 万元/个×8 个)
基础混凝土/ m^3	245.23	137.70
基础钢筋/t	15.94	11.16
基坑土石方/ m^3	1 961.68	151.47
基面土石方/ m^3	590.90	12.00
浆砌块石/ m^3	363.69	—
占地面积/ m^2	324.20	288.39
综合造价/万元	196	131
投资减少/%		33

3.2 安全性对比

根据采动影响区对输电线路的影响,杆塔主要

受地表变形的影响^[14]。当采动影响区水平变形参数为 α (mm/m)、地表曲率为 K (mm/m²) 时,杆塔塔位处为 $L\alpha$ 和 L^2K ,其中 L 为铁塔根开,如表 3 所示。

表 3 中空防护大板基础与可调式钢管桁架设计对比

方案	根开/m	水平变形/mm	曲率变形/mm
ZC27102-67 m 中空防护大板基础	16.9	16.9α	16.9^2K
ZC27102-60 m 可调式钢管桁架设计	15.2	15.2α	15.2^2K

由表 3 可知,由于可调式钢管桁架设计铁塔根开小,故采动影响区对其影响小。同时,相较于可调式钢管桁架设计,中空防护大板方案还存在高边坡稳定性问题。高边坡在开采活动下极易失稳,形成滑坡或崩塌,如表 4 所示。

表 4 ZC27102-67 m 中空防护大板基础永久边坡的采动影响

方案	水平变形/mm	曲率变形/mm
护坡	18α	18α
堡坎	36^2K	36^2K

若考虑护坡和堡坎的采动影响,可调式钢管桁架设计水平变形和曲率变形值为中空防护大板基础的 29% 和 8%。因此,相较于中空防护大板基础,在山区采用腿长可调式钢管桁架设计不仅可以减小铁塔根开,降低采动影响区对铁塔的影响,而且能有效避免采动影响区高边坡问题,提高了输电线路的安全性。

4 结 论

上面提出将刚性隔面上移,隔面以下设置新型环保型可调式钢管桁架的连接方式来代替中空防护大板基础,该方式适应地形能力强,同时具有变形后腿长可调节的特性。通过对整体及局部的设计研究,主要得出以下结论:

1) 根据钢构架设计经验,对可调式钢管桁架的整体、局部和关键节点分别进行设计,研究球铰、可伸缩结构、刚性隔面等主要部件。

2) 进行可调式刚性隔面主要构件设计时,计算受力应综合考虑在球铰可调角度 θ 为最大值、最小值和 0° 时的受力,选取拉力和压力的最大值。计算长度选取构件在球铰可调角度 θ 为最大值、最小值

和 0° 时的最大值。

3) 将中空防护大板基础和可调式钢管桁架设计进行对比,结果表明可调式钢管桁架设计具有更加优越的经济性和安全性。

参考文献

- [1] 季善浩,李勃.煤矿采空区 220 kV 输电线路转角塔基础沉降及处理[J].山东电力技术,2011(2):30-33.
- [2] 史振华.采空区输电线路直线自立塔基础沉降及处理方案[J].山西电力技术,1997,17(3):18-20.
- [3] 刘鸣,李永浩,张厚启,等.地质灾害区输电塔架安全分析[J].中国电力,2012,45(5):34-39.
- [4] 张建强,杨昆,王予东,等.煤矿采空区地段高压输电线路铁塔地基处理的研究[J].电网技术,2006,30(2):30-34.
- [5] 郝梦明.220 kV 四端线 012 号铁塔基础纠偏技术分析[J].广东电力,2002,15(1):67-69.
- [6] 付明翔,韩为民,默增禄.煤矿采空区 500 kV 输电线路设计的探讨[J].电力建设,2004,25(6):30-32.
- [7] 国网北京电力建设研究院.煤矿采空区架空输电线路基础研究报告[R].北京:国家电网公司,2006.
- [8] 杜庆荣.铁塔倾斜原因及纠偏技术的探讨[J].武汉船舶职业技术学院学报,2006,5(3):46-48.
- [9] 张建强,赵凤山,张全录,等.乌海伊临 220 kV 输电线路 50 号塔基地下采空区的稳定性分析[J].工程地质学报,2004,12(增刊):302-306.
- [10] 代泽兵,鲁先龙,程永锋.煤矿采空区架空输电线路基础研究[J].武汉大学学报(工学版),2009(增刊):312-316.
- [11] 康晨阳,刘益平,汤志刚,等.某采空区架空输电线路残余变形预测与防治[J].电力勘测设计,2020,139(5):49-52.
- [12] 秦庆芝,曹玉杰,毛彤宇,等.特高压输电线路煤矿采动影响区铁塔基础设计研究[J].电力建设,2009,30(2):18-21.
- [13] 高文龙.采空区特高压输电杆塔的稳定性研究[D].北京:中国矿业大学,2010.
- [14] ± 800 kV 及以下直流架空输电线路工程施工及验收规程:DL/T 5235—2010[S].北京:中国电力出版社,2010.

作者简介:

周建军(1979),男,硕士,高级工程师,从事线路设计与研究工作。

(收稿日期:2021-04-01)