

基于虚功原理的输电线路景观塔变形分析

廖邢军, 何松洋, 何文俊, 刘洪昌

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 成都 610056)

摘要: 为方便安装, 输电铁塔螺孔直径一般要求比螺杆直径大 1.5 mm, 螺栓受力后存在滑移现象。现行的铁塔设计软件一般采用空间桁架模型进行分析, 未考虑螺栓滑移影响, 不能准确反映输电铁塔实际变形情况, 导致变形计算值一般远低于实测值, 进而影响到结构内力分析的准确性和安全性。目前关于螺栓滑移对变形的影响主要是通过有限元软件结合弹簧等单元进行分析, 由于输电铁塔杆件较多, 结构复杂, 这种处理方式效率较低, 一般仅用于真型试验的验证分析。考虑螺栓滑移和残余变形影响, 基于虚功原理对铁塔变形计算公式进行改进和优化, 总结影响螺栓滑移变形大小的关键因素, 提出各类节点模型快速识别方法。同时首次对牦牛造型景观塔变形开展足尺真型试验研究, 并对试验结果、理论计算值和改进公式计算值进行多工况对比分析, 验证改进公式的有效性。此外, 根据分析结果和影响因素, 提出减少螺栓滑移变形的措施。研究成果对铁塔结构优化设计、变形控制和滑坡、沉降等地基变形情况下的承载力评估具有一定的参考价值。

关键词: 景观塔; 螺栓滑移; 结构变形; 真型试验; 虚功原理

中图分类号: TM754 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)15-0088-07

角钢塔因单个构件轻, 易于制造、运输和安装, 成为输电线路最常用的铁塔形式。角钢塔组成构件较多, 尤其是对 500 kV 及以上线路, 一基铁塔构件多达上千余根, 节点多达数百个, 构件之间主要通过螺栓进行连接, 除地脚螺栓、法兰螺栓和挂点螺栓外, 大部分螺栓主要承受剪切荷载作用。为确保顺利安装, 角钢塔常用的 M16、M20 和 M24 普通螺栓螺孔直径一般要求为螺栓直径加 1.5 mm, 法兰螺栓孔为螺栓直径加 2~3 mm, 地脚螺栓为螺栓名义直径的 1.25~1.35 倍。然而受国内加工水平的影响, 实测螺栓间隙多大于 1.5 mm^[1-2], 故一般取受剪螺栓空隙为 1.5~2.0 mm^[3]。由于角钢塔螺栓主要受剪, 这种构造特点决定了当剪切力大于连接构件之间的摩擦力后, 螺栓连接的构件之间会发生滑移。

现行的铁塔通用设计软件 (Smart Tower、道亨等) 计算分析时采用空间桁架模型或空间梁桁模型, 未考虑螺栓滑移对铁塔变形和受力的影响。由于螺栓滑移和二阶效应影响, 铁塔整体变形实测值远大于软件计算分析值, 杆件内力也会与计算值有较大差异^[4], 甚至对构件承载力也有影响^[5]。同时,

螺栓滑移特性也增强了铁塔的变形协调能力和滞回性能^[6], 能在一定程度上减小基础不均匀沉降对铁塔结构的影响。

针对螺栓滑移理论问题, 学者们已开展了一系列研究。Kitipornchai 等^[7]基于简单桁架结构的试验研究, 提出了瞬间滑移模型和连续滑移指数模型。Ungkurapinan 等^[8]通过试验分析了 M16 螺栓数量对连接滑移的影响 (孔隙 1.6 mm), 提出了一种采用分段多项式表达的螺栓连接滑移模型, 但并未考虑不同螺栓直径和孔隙的影响。杨风利等^[9]对由 1~3 个 M20 螺栓连接的构件进行了螺栓节点拉伸试验, 分析了初始间隙、螺栓预紧力、镀锌与否等因素影响, 基于拉伸试验结果和仿真分析, 对 Kitipornchai 指数模型和 Ungkurapinan 多项式模型进行了改进。刘光辉等^[10]基于试验方法对影响输电铁塔螺栓紧固特性的关键因素进行了研究, 研究了螺栓在不同振幅、频率、初始预紧以及润滑条件下的松动规律。

结合螺栓滑移的指数模型和多项式模型, 学者们先后展开了输电铁塔的变形、内力和动态特性影响分

收稿日期: 2025-01-17

基金项目: 国家电网公司科技项目 (SGXZJG00JCWT2200083)

作者简介: 廖邢军 (1987—), 男, 四川宣汉人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为输电线路勘察设计与施工; 何松洋 (1995—), 男, 贵州铜仁人, 硕士, 工程师, 研究方向为输电线路结构计算理论和设计技术; 何文俊 (1986—), 男, 四川广元人, 工程师, 研究方向为输电铁塔和基础设计; 刘洪昌 (1987—), 男, 山东新泰人, 高级工程师, 研究方向为输电线路设计和管理。

析。杨风利^[11]建立了考虑节点螺栓连接滑移特性的塔身节段三维有限元模型,结合弹簧单元和多项式模型,分析了螺栓连接节点类型、荷载类型和螺栓滑移距离对塔身节段杆件内力和变形的影响。姚宽等^[12]建立了猫头塔有限元模型,结合指数模型、多项式模型和连接单元,分析了螺栓滑移对变形的影响,并提出加强输电铁塔底部一定范围内的螺栓连接节点的建议。胡剑等^[13]结合三维塔身节间有限元模型,采用多项式模型对螺栓连接节点的转动滑移和其对输电塔塔身内力的影响进行了分析。蒋锐等^[4]建立了特高压耐张塔整塔有限元模型,结合弹簧单元和指数模型分析了螺栓滑移对整体变形和内力的影响,建议采用螺栓连接滑移模型进行结构分析。

综上所述,目前对螺栓滑移问题的研究已取得一定成果,但研究对象多为简单的塔身结构,多需借助 ANSYS 或 ABAQUS 等有限元软件进行建模分析,也很少进行真型试验对比分析。由于输电铁塔结构复杂,有限元模型处理难度大,导致在工程设计时难以采用。本文基于虚功原理,考虑预紧力和孔壁变形影响,对《电力工程设计手册》^[3]的变形计算公式进行了改进,并以 ZNC33153B 牦牛造型景观塔为研究对象,结合试验数据对改进公式在复杂空间桁架结构的变形计算的有效性进行对比验证。

1 变形计算公式

根据《电力工程设计手册》^[3],桁架结构变形由两部分组成:杆件受力变形和螺栓滑移变形,可由虚功原理计算:

$$\Delta = \Delta_P + \delta = \sum \frac{\bar{N}_1 N_P L}{EA} + \sum \frac{n}{2} \bar{N}_1 e \quad (1)$$

式中: Δ 为变形值; Δ_P 为杆件受力变形值; δ 为螺栓滑移引起的变形值; \bar{N}_1 为所求变形方向单位力作用下各杆件虚内力; N_P 为荷载 P 作用下各杆件内力; L 为各杆件长度; E 为弹性模量; A 为各杆件横截面积; n 为每一根杆件的连接点数; e 为螺栓孔径与螺栓直径的差值,一般为 1.5~2.0 mm。

从式(1)可以看出,螺栓滑移值计算假定加载前螺栓位于螺孔正中,不存在偏心,虽然考虑了孔隙的影响,但并未考虑杆件轴力、预紧力、孔壁挤压变形和各节点孔隙初始值的影响。因此需要对式(1)进行修正如下:

$$\Delta = \Delta_P + \delta = \sum \frac{\bar{N}_1 N_P L}{EA} + \sum \frac{n}{2} \bar{N}_1 \Delta_s \quad (2)$$

式中: Δ_s 为构件接头在荷载 P 作用下螺栓滑移量,

可采用指数模型或多项式模型进行计算。

由于预紧力的影响,螺栓滑移后调整荷载大小或方向,若构件轴力小于滑移荷载,孔壁弹性变形会消失,螺栓仅发生较小的弹性变形,间隙变形将不会恢复,呈锁定状态。因此,螺栓滑移引起的变形值受加载历史的影响,故建议进一步对式(2)进行如下修正:

$$\Delta = \Delta_P + \delta + \sum \Delta_c = \sum \frac{\bar{N}_1 N_P L}{EA} + \sum \frac{n}{2} \bar{N}_1 \Delta_s + \sum \Delta_c \quad (3)$$

式中: Δ_c 为构件接头在加载前的螺栓滑移残余变形。修正后的公式可用于复杂空间桁架结构的变形计算。

输电杆塔日常运行中主要受风和覆冰荷载作用,由于风速大小、风速方向、覆冰厚度呈随机性,故一般难以准确计算残余变形值。但对一些主要控制工况,在设计荷载作用下,主要构件受力较大,理论上大部分螺栓均会发生滑动,可较为准确地进行变形计算。下文将结合实例进行分析。

2 螺栓滑移计算模型选取

由前文分析可知,螺栓滑移计算模型主要有 Kitipornchai 指数模型和 Ungkurapinan 多项式模型。其中 Kitipornchai 指数模型以及国内修正后的指数模型,仅适用于 M16、M20 螺栓,对 M24 螺栓,计算塔身主材滑移变形时会存在位移值严重偏大的现象。鉴于 500 kV 铁塔大量使用 M24 螺栓,本文螺栓滑移计算采用 Ungkurapinan 多项式模型^[8]。

$$P = \begin{cases} 27.51\Delta_s, & 0 \leq \Delta_s \leq 0.34 \\ 9.29, & 0.34 \leq \Delta_s \leq 1.19 \\ 20.34(\Delta_s - 1.19) + 9.29, & 1.19 \leq \Delta_s \leq 3.39 \\ 0.17(\Delta_s - 3.93)^3 - 3.23(\Delta_s - 3.93)^2 + \\ \quad 20.39(\Delta_s - 3.93) + 65.03, & 3.93 \leq \Delta_s \leq 9.97 \end{cases} \quad (4)$$

$$P = \begin{cases} \theta_1 \Delta_s, & 0 \leq \Delta_s \leq \frac{A}{\theta_1} \\ A, & \frac{A}{\theta_1} \leq \Delta_s \leq \frac{A}{\theta_1} + 0.85 \\ (B - A)(\Delta_s - \frac{A}{\theta_1} - 0.85)/Q + A, & \frac{A}{\theta_1} + 0.85 \leq \Delta_s \leq \frac{A}{\theta_1} + 0.85 + Q \\ B + (C - B)(\Delta_s - \frac{A}{\theta_1} - 0.85 - Q)/R, & \frac{A}{\theta_1} + 0.85 + Q \leq \Delta_s \leq \frac{A}{\theta_1} + \\ \quad 0.85 + Q + R \end{cases} \quad (5)$$

当连接螺栓数 $m=1$ 时,荷载 P 与螺栓滑移量 Δ_s 的关系可由式(4)确定;当 $m>1$ 时,荷载 P 与螺栓滑移量 Δ_s 的关系可由式(5)确定。其中 $\theta_1 = 36.343m + 0.44$; $A = 12.212m - 4.115$; $B = 36.488m + 29.68$; $C = 34.6m + 82.86$; $Q = -0.2m + 2.68$; $R = -1.501m + 6.735$ 。

需要指出的是,Ungkurapinan 提出的多项式模型是基于 M16 螺栓、1.6 mm 孔隙提出的,用于 M24 螺栓和其他孔隙时需要修正。输电杆塔 M16、M20 螺栓预紧力为 25.0 kN, M24 螺栓预紧力为 52.1 kN^[14],取摩擦系数为 0.15, M16、M20 螺栓滑移荷载为 7.5 kN, M24 螺栓滑移荷载为 15.63 kN,故需要对 M24 螺栓的 A 值进行修正。假定接头螺栓均匀受力,则可推出 $A = 15.63m - 8.30$ 。另一方面,单个 M16、M20 螺栓理论滑移荷载比式(4)中 9.29 kN 小,可能原因是国内输电杆塔的螺栓预紧力小于国外规范,由于差异不大,本文后续分析不做修订。同时考虑到现行设计方法,螺栓连接一般均留有裕度,在 100%设计荷载作用下,螺栓孔壁挤压变形一般不会发生塑性变形,本文后续分析过程中只考虑多项式的前 3 项。

3 整塔试验

在 ZNC33153B 足尺真型试验中^[15],为了考察景观塔的变形性能,在塔头和塔身前侧共设置了 11 个位移观测点,如图 1 所示。

ZNC33153B 试验塔根据工况控制情况选取了 8 个典型工况,并选取了荷载最大、控制杆件最多的 60°大风工况进行超载试验。实际加载顺序和各工况控制杆件情况见表 1,试验过程中对各工况各测点位移进行了观测和记录。

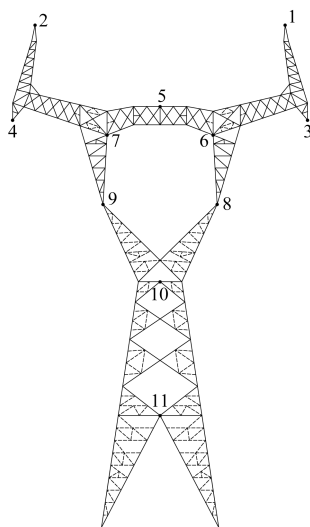


图 1 测点布置

表 1 试验工况及控制构件

加载顺序	工况说明	控制构件
1	断左导线	边横担主材、交叉材
2	断左地线	地线支架主斜材和边相横担交叉材
3	左地线正锚	地线支架交叉材
4	2 倍吊装	横担少量构件
5	90°风,正常覆冰	头部少量杆件
6	90°大风	塔头主材和正面交叉材
7	90°风,不均匀扭	身部交叉材
8	60°大风	身部主材

4 变形计算与分析

为验证式(2)、式(3)的有效性,采用铁塔通用设计软件 SmartTower 对 ZNC33153B 塔非对称建模后进行内力分析,提取各杆件内力进行螺栓滑移和受力变形计算,选取部分主要工况对比分析。

4.1 构件类别与连接点数识别

从式(2)中可以看出,滑移变形大小与杆件接头数、虚内力大小成正比。由于铁塔组成构件众多,500 kV 及以上线路铁塔组成构件常多达上千余件,在计算分析前除了需准确识别接头连接螺栓数量和规格外,还需对构件类别与连接点数进行准确识别。以 ZNC33153B 试验塔为例,铁塔构件可主要分为 8 类(表 2)。

表 2 构件类别与连接点数

序号	构件类别	连接点数	说明
1	仅一端有接头主材	1	当中间增加接头时,每增加一处接头,连接点数加 2
2	两端均有接头主材	2	
3	无接头主材	0	
4	直接搭在主材上的斜材、交叉材	2	
5	两端通过节点板连接斜材、交叉材	4	
6	一端通过节点板连接的斜材、交叉材	3	
7	辅助材	0	
8	塔脚板	2	

4.2 不考虑残余变形的对比分析

图 2 为主要工况下的各测点实测位移、按桁架模型计算位移以及考虑螺栓滑移计算位移的对比情况,其中,实测位移为各测点变形后的坐标相对组立后的坐标差值。受铁塔施工工艺、自重等影响,部分杆件在组立后即发生螺栓滑移现象,本次分析时未考虑,即假定组立后各节点螺栓均处于各螺孔中心。

从图 2 中可以看出,按桁架模型计算的各方向变形值与实测值差异较大,考虑螺栓滑移后,工

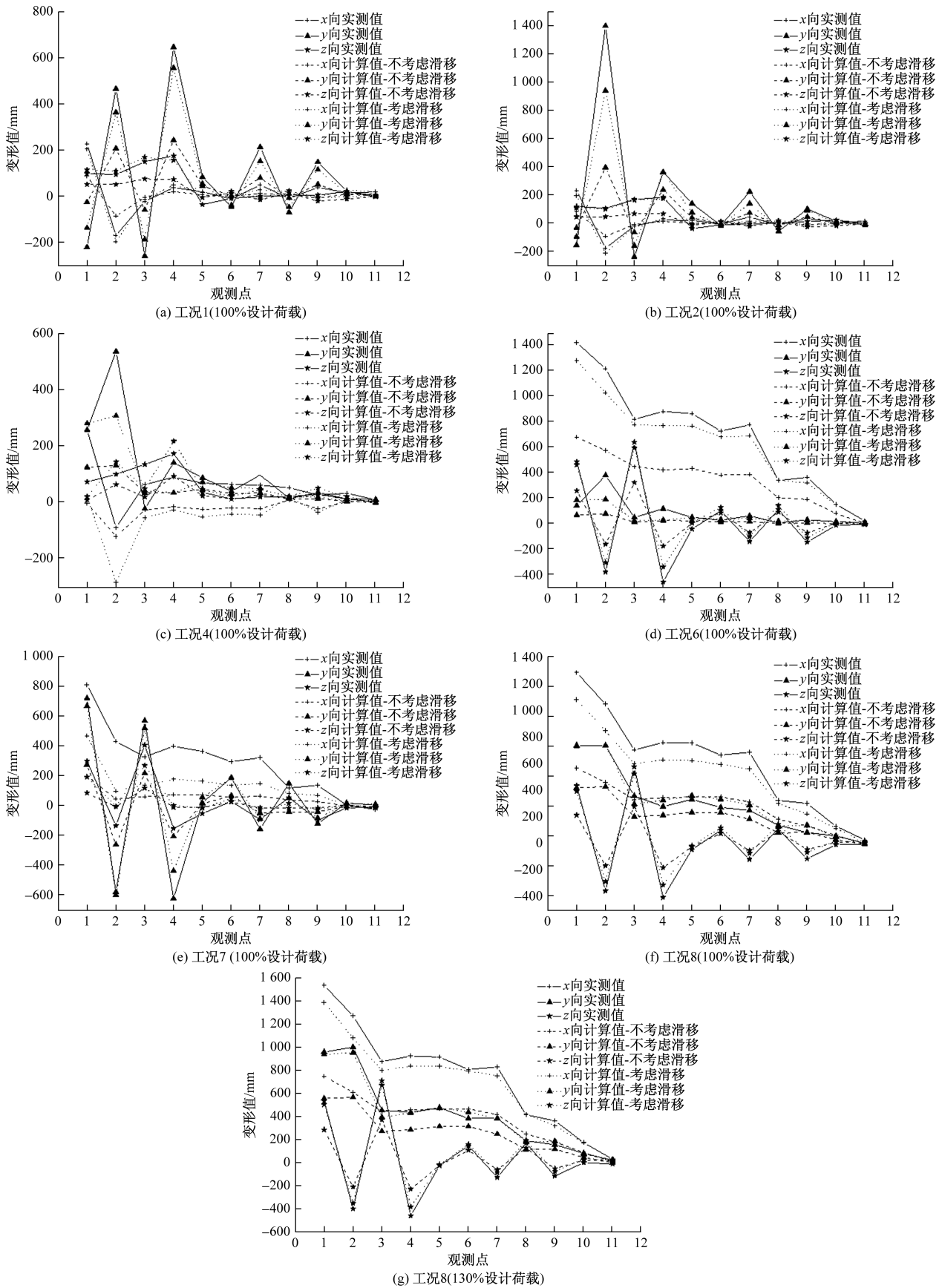


图2 主要工况下的位移对比

况 1、工况 6、工况 8 的计算值与实测值比较接近,总体差异较小,但工况 2、工况 4 则差异较大。工况 1、工况 6、工况 8 整体上偏小的原因可能是由于螺栓孔隙比采用的多项式模型中 1.6 mm 要大。

进一步分析发现,工况 2、工况 4 设计荷载作用下,ZNC33153B 塔大部分杆件内力较小,接头螺栓剪力小于滑移荷载,难以滑动,因此滑移变形受加载前的残余变形影响显著。工况 1、工况 6、工况 8 设计荷载作用下,大部分杆件内力较大,接头螺栓剪力大于滑移荷载,均会产生滑动变形,故滑移变形受加载前的残余变形影响相对较小。

表 3 为工况 2、工况 7 加载前的残余变形情况,可以看出,残余变形不可忽略。非控制工况下的螺栓滑移变形应考虑残余变形的影响。

表 3 工况 2、工况 7 加载前的残余变形

测点	残余变形/mm					
	工况 2			工况 7		
	x 向	y 向	z 向	x 向	y 向	z 向
1	148	-150	-64	801	282	-252
2	-62	455	-30	660	148	222
3	-7	-165	-92	411	108	-343
4	32	315	-56	437	-211	258
5	22	38	11	445	21	45
6	11	-41	-3	361	67	-26
7	30	116	1	385	-20	93
8	5	-49	-9	131	54	-42
9	20	71	-7	164	-35	92
10	4	8	-20	40	5	2
11	9	-4	0	6	5	12

4.3 考虑残余变形的对比分析

从图 2 可以看出,工况 2y 向和工况 7x 向变形计算值与试验值差异较大,对此,考虑上一工况的残余变形,位移计算修正如下。

考虑预紧力锁紧效应,上一工况卸载后假定螺栓孔孔壁变形快速恢复,孔隙变形维持不变。后续工况加载时,若杆件内力方向与上一工况相同,则节点螺栓滑移变形量取上一工况与本工况的较大值;若杆件内力方向与上一工况相反,则螺栓滑移变形量应取上一工况的孔隙变形值与本工况滑移值之和。

图 3 为考虑残余变形后的位移计算值与实测值的对比情况。可以看出,考虑残余变形后,位移计算值普遍增大,与实测值差异较小。

杆塔结构主要受随机风冰荷载作用,且各节点的螺栓松紧状态也有一定随机性,在实际工程中,很难准确计算风冰荷载引起的残余变形。即使是

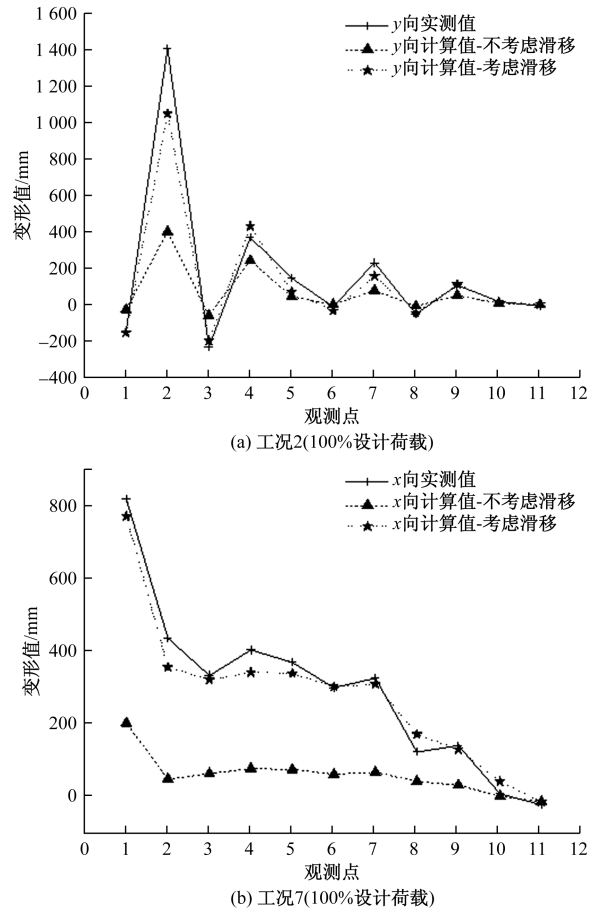


图 3 考虑残余变形修正后的位移对比

试验塔,因受天气、时间等影响,各工况也非连续加载,在加载间隔过程中受风荷载等作用,其残余变形也会有所变化,因此滑移残余变形存在一定的随机性,难以准确计算。

4.4 基于螺栓滑移变形分析的设计优化

由于螺栓松紧程度,风、冰荷载作用的随机性,导致较难计算非控制工况下的整体变形,但对控制工况下的变形计算具有较好的精度。而工程设计主要关心控制工况下的变形,因此,在铁塔设计过程中,可采用本文推荐公式进行变形计算分析,查看每根构件的变形情况并进行优化调整,以便改善变形性能,提高结构安全性。

从式(2)~式(5)可以看出,铁塔滑移变形随着受力杆件数量、连接数量、螺栓孔隙的增大而增大,随着预紧力的增加而减小。因此应重点从优化杆件数量、连接数量、螺栓孔隙和螺栓防松性能入手。

以工况 2 为例,左侧地线支架 y 向变形较大,且实测值比计算值大约 350 mm,如图 3 所示。分析发现,在断线工况下,左侧地线支架滑移变形主要受地线支架下端连接、边相横担主材连接、塔身主

材连接、塔身侧面斜材、横隔面斜材,以及横担正面斜材和水平面交叉材影响。其中,由于构造要求,一些影响因素如边相横担主材连接,塔身主材连接数量等优化空间有限,但对于斜材和交叉材的端部连接,建议尽量直接搭接在主材上,以减少节点板数量和连接数量,如图4所示。

地线支架下端与横担连接处采用节点板单面连接,平面外刚度差,在纵向荷载作用下容易变形,故建议增设卷边或加劲肋,以提高平面外刚度,如图5所示。

又以工况7为例,右侧地线支架 x 向变形较大,如图3所示。分析发现,左侧地线支架 x 向螺栓滑移变形主要受地线支架下端连接、边相横担主材连接、塔顶主材连接和正面斜材连接,以及塔身主材连接影响。故可通过减小主材开断数量、提高开断位置高度等措施来减小变形。

螺栓孔隙的优化则需要铁塔厂家严格控制加工精度,避免螺孔孔径偏大;螺栓防松则可结合一些新技术加强运维,如采用智能化的检测技术等^[16-17],或采用防松性能更好的新型防松螺母^[18-19]。

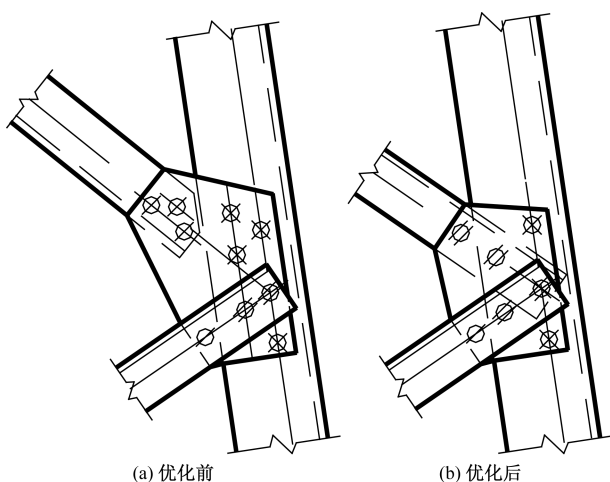


图4 交叉材与主材连接优化

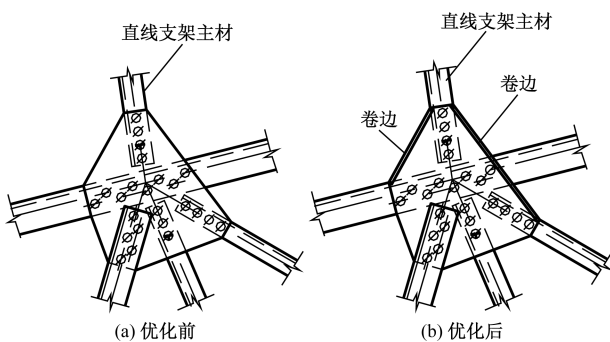


图5 地线支架下端连接优化

5 结论

考虑受剪螺栓连接滑移特性,首次基于虚功原理修正了输电铁塔变形计算公式,提出了各类节点模型快速识别方法,通过结合铁塔通用设计软件进行杆件内力分析,对ZNC33153B牦牛造型景观塔进行了断线、吊装、不均匀冰和大风工况下的变形计算,并与试验值进行了对比分析,得出了以下结论。

(1)与实测值相比,采用传统的桁架模型计算的变形值严重偏小;采用推荐公式计算,在大风、断线等控制工况下,不考虑残余变形修正,计算位移与实测值吻合较好,在非控制工况下误差较大。

(2)对非控制工况,考虑前序工况的残余变形影响修正,改进公式计算值误差较小。

(3)控制工况下,大部分受力杆件内力值大于滑移荷载,受残余变形影响小,铁塔变形可以准确计算。由于螺栓松紧程度,和风、冰荷载的随机性,以及预紧螺栓的自锁效应,导致螺栓滑移具有一定的随机性,非控制工况下的铁塔变形计算较为困难。

(4)推荐计算方法可结合铁塔通用设计软件内力分析结果进行螺栓滑移计算,可计算每根构件的变形情况,并快速识别变形控制因素,方便设计时优化设计方案,改善变形性能,提高结构安全性。

(5)因变形计算考虑了螺栓滑移影响,在地基变形下的内力分析将更加准确,可在滑坡区和采空区的铁塔承载力评估和加固工程推广应用。

参考文献

- [1] 辜良雨,李林,刘翔云,等.角钢塔曲臂K节点变形原因分析及对策研究[J].四川电力技术,2022,45(3):66-72.
- [2] 常建伟,王兴安,张磊,等.特高压输电铁塔监造过程发现的主要质量问题及防治[J].焊接技术,2019,48(S1):26-32.
- [3] 中国电力工程顾问集团有限公司,中国能源建设集团规划设计有限公司.电力工程设计手册[M].北京:中国电力出版社,2019.
- [4] 蒋锐,刘翔云,何松洋,等.±800kV特高压直流重冰区输电铁塔真型试验及螺栓连接滑移影响分析[J].建筑结构,2021,51(16):51-57.
- [5] 江文强,陈欣阳,刘景立,等.含螺栓连接输电铁塔主材的承载性能研究[J].中国工程机械学报,2021,19(6):471-476.
- [6] 张博,伍川,戴鑫,等.输电铁塔主材节点滞回性能研究[J].科学技术与工程,2020,20(35):14579-14585.
- [7] KITIPORNCHAI S, AI-BERMANI F G A, PEYROT A H, et al. Effect of bolt slippage on ultimate behavior of

- lattice structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(8): 2281-2287.
- [8] UNGKURAPINAN N, DES CHANDRAKEERTHY S R, RAJAPAKSE R K N D, et al. Joint slip in steel electric transmission towers [J]. Engineering Structures, 2003, 25(6): 779-788.
- [9] 杨风利, 朱彬荣, 邢海军. 输电铁塔螺栓节点连接滑移特性及模型参数研究[J]. 工程力学, 2017, 34(10): 116-127.
- [10] 刘光辉, 伍川, 吕中宾, 等. 输电铁塔螺栓紧固特性影响因素试验研究[J]. 现代制造工程, 2022(3): 84-91.
- [11] 杨风利. 考虑螺栓连接滑移影响的输电铁塔塔身结构分析[J]. 工程力学, 2018, 35(S1): 193-199.
- [12] 姚宽, 张骞, 蔡建国, 等. 螺栓连接滑移对输电铁塔结构变形的影响研究[J]. 钢结构(中英文), 2019, 34(5): 39-44.
- [13] 胡剑, 张贵祥, 刘红军, 等. 考虑螺栓滑移的输电塔结构内力分析[J]. 特种结构, 2020, 37(5): 18-28.
- [14] 鄢秀庆, 何松洋, 王健钟, 等. 紧固扭矩对输电塔普通螺栓受剪性能的影响研究[C]//2021年工业建筑学术交流会议论文集(下册). 北京: 中国建筑学会工业建筑分会, 中国中元国际工程有限公司, 2021: 488-491.
- [15] 廖邢军, 甘小平, 黄兴, 等. 藏东南地区输电线路景观塔真型试验研究[J]. 特种结构, 2023, 40(4): 53-60.
- [16] 刘杰, 王向东, 贾伯岩, 等. 基于振动特性的铁塔螺栓完全松动检测方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(32): 14213-14220.
- [17] 赵希超, 张子谦, 张艳燕, 等. 基于约束配准的电力杆塔变形检测方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(6): 257-262.
- [18] 方子帆, 祖双朱, 朱畅, 等. 输电塔横担螺栓铝合金防松垫片的防松性能研究与改进设计[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2022, 44(3): 74-78.
- [19] 李新梅, 张忠文, 李文, 等. 架空输电线路杆塔螺栓松动现状分析及治理对策[J]. 山东电力技术, 2023, 50(3): 44-47.

Deformation Analysis of Transmission Line Landscape Tower Based on Virtual Work Principle

LIAO Xingjun, HE Songyang, HE Wenjun, LIU Hongchang

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of CPECC, Chengdu 610056, China)

Abstract: For the convenience of installation, the bolt hole diameter in the transmission tower is generally required to be 1.5 mm larger than the diameter of the bolt, and there is sliding phenomenon after the bolt is subjected to force. The current tower design software generally uses a spatial truss model for analysis, without considering the influence of bolt slip, which cannot accurately reflect the actual deformation of transmission towers. As a result, the calculated deformation values are generally much lower than the measured values, which affects the accuracy and safety of structural internal force analysis. At present, the analysis of the impact of bolt slip on deformation is mainly carried out through finite element software combined with spring elements. Due to the large number of transmission tower members and complex structure, this processing method has low efficiency and is generally only used for verification analysis of tests. Based on the principle of virtual work, considering bolt slip and residual deformation, the calculation formula for tower deformation is improved, and fast identification methods for various joint models are proposed. At the same time, a full-scale real type experimental study was conducted for the deformation of the yak shaped landscape tower for the first time, and the experimental results, theoretical calculation values, and improved formula calculation values were compared and analyzed to verify the effectiveness of the improved formula. In addition, the measures to reduce bolt slip deformation are proposed. The research results have certain reference value for the optimization design of transmission tower, deformation control, and evaluation of bearing capacity under foundation deformation conditions such as landslides and settlements.

Keywords: landscape tower; bolt slip; structure deformation; full-scale test; virtual work principle