

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201906032

预紧力对输电塔节点承载能力特性研究*

白应华¹, 汤旭¹, 张隽怡¹, 陈波², 沈康¹

(1. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068;
2. 武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要:为探讨风荷载作用下输电塔破坏机理, 本文以实际输电塔体系为例, 通过建立不同螺栓预紧力作用下输电塔节点精细化模型, 用来进行输电塔的螺栓在实际工程中拧紧程度的模拟; 提出了螺栓与输电塔各构件之间的非线性接触力模型, 研究了风荷载作用下输电塔构件之间接触效应的精确模拟。结果表明: 随着预紧力的增大, 斜材螺孔应力、节点板上相对位于斜材处螺孔应力和斜材螺栓应力逐渐增大, 并基本呈线性变化; 而主材螺孔应力、节点板上相对位于主材处螺孔应力和主材螺栓应力基本不变。可见随着外荷载加载比例逐渐增大, 螺栓预紧力对节点承载力性能的影响逐渐减小。

关键词: 输电塔节点; 预紧力; 承载特性; 荷载加载比例

中图分类号: TU398.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1248-06

Study on Influence of Preload on Load Bearing Characteristics of Transmission Tower Joints

BAI Yinghua¹, TANG Xu¹, ZHANG Junyi¹, CHEN Bo², SHEN Kang¹

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
2. Key Laboratory of Roadway Bridge and Structural Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to explore the failure mechanism of transmission tower under wind load, this paper takes the actual transmission tower system as an example, establishes a fine model of transmission tower nodeS under different bolt pretightening forces, and simulates the tightening degree of bolts in the construction process of the transmission tower. A nonlinear contact force model between bolt and transmission tower components is proposed to accurately simulate the contact effect of transmission tower components under wind load. The results show that with the increase of preload, the screw holes stress of the angle steel, the stress of screw holes in the nodal plate matching those in the angle steel and the bolts stress of the angle steel increase gradually and linearly, while the screw holes stress of the main structure, the stress of screw holes in the nodal plate corresponding to those in the main structure and the bolts stress of the main structure remain basically unchanged. With the increase of the external load ratio, the influence of bolt preload on the bearing capacity of the joint decreases gradually.

Keywords: transmission tower joints; Pre-tightening force; Bearing characteristics; Loading ratio

* 收稿日期: 2019-06-11; 修回日期: 2019-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(51678463)、南方电网公司科技项目 GDKJXM20161994(030800KK52160004)资助

作者简介: 白应华(1975—), 男, 副教授, 硕导。主要从事结构工程方向的研究。E-mail: yhbai750608@163.com

通讯作者: 陈波(1976—), 男, 教授, 博导。主要从事结构工程方向的研究。E-mail: cbsteven@163.com

引言

输电塔在强风荷载持续作用下,输电塔节点处螺栓的松动或脱落是塔体倒塌破坏的重要原因之一^[1-2]。我国沿海地区经常发生倒塔事件^[3-4]。因此研究

究输电塔节点承载力性能的变化对于实际工程而言是十分必要的。在过去的几十年中,输电塔的主流研究为不考虑节点各构件之间的非线性接触相互作用,并采用合适的设计标准对输电塔系统进行常规的设计和构建。然而这种分析方法有一定的局限性,并不能对输电塔在风荷载作用下节点各构件之间应力的变化进行深入研究。常星亚^[5]以某输电线路猫头塔为实际工程背景来研究铁塔螺栓连接在风荷载作用下的松动问题,提出螺栓在连接过程的松垮造成塔体拼接后刚度不足是强风倒塔的一个重要原因。本文利用基于精细化有限元模型的非线性接触分析方法,对塔式节点进行性能评估,建立一个利用非线性相互作用接触关系来描述的输电塔节点的数学模型。基于精细化模型,建立了不同预紧力节点模型,探讨在预紧力作用下节点性能变化特征。

1 输电塔节点特性理论

1.1 输电塔基本理论

对小变形的弹性结构,输电塔结构有限元基本方程可由弹性力学中物理、几何和平衡方程推导出^[6-7]:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = R \quad (1)$$

式中, K 、 C 和 M 分别为输电塔体系整体刚度矩阵、阻尼矩阵和质量矩阵; R 是外荷载向量; x 、 \dot{x} 、 \ddot{x} 分别为节点的位移、速度、加速度向量。

对动力问题,在 $t+\Delta t$ 时刻有:

$${}^{t+\Delta t}M\ddot{x}^k + {}^{t+\Delta t}C\dot{x}^k + {}^{t+\Delta t}Kx^k = {}^{t+\Delta t}R \quad (2)$$

由上式联立方程可解得位移 X^k ,即可得到构件内部各点位移。频率和振型是结构特有的属性,在对结构进行动力特性分析时,需对结构进行模态分析。由于结构阻尼对固有频率影响有限,可忽略阻尼对计算结果的影响,则结构的无阻尼自由振动方程为:

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (3)$$

假定振动是由不同频率的简谐振动组合而成,则其解的形式为:

$$(K - \omega^2 M)\bar{x} = 0 \quad (4)$$

上面的解若非零,则其系数行列式为零,故可得到结构的无阻尼自由振动方程。

1.2 预紧力转换关系

在输电塔建造过程中,为了满足螺栓在承受工作载荷前受到预加作用力的要求,因此在装配时绝大多数螺栓连接都必须保证拧紧,这种预先施加的作用力称为预紧力。预紧力 Q 的数值与载荷性质、连接刚度等相关^[8-9]。在模型中以旋紧螺帽的方式得出所施加的扭矩 T ,从而换算求出所施加的预紧力。

拧紧力矩 T 等于螺旋副间的摩擦阻力矩 T_1 及螺母环形端面与被连接件(或垫圈)支承面间的摩擦阻力矩 T_2 的和,即:

$$T = T_1 + T_2 \quad (5)$$

螺旋副间的摩擦力矩 T_1 为:

$$T_1 = Q \frac{d_2}{2} \tan(\Psi + \rho) \quad (6)$$

其中 Ψ 为螺纹升角:

$$\Psi = \arctan\left(\frac{P}{\pi d_2}\right) \quad (7)$$

ρ 为螺纹当量摩擦角:

$$\rho = \arctan \mu \quad (8)$$

螺母与支承面间的摩擦力矩 T_2 为:

$$T_2 = \frac{1}{2} \mu Q d_m \quad (9)$$

将式(6)与式(9)带入式(5)得:

$$T = \frac{1}{2} \left[\frac{d_2}{d} \tan(\psi + \rho) + \frac{d_m}{d} \mu \right] Qd \quad (10)$$

式中, Q 为预紧力(N); T 为拧紧力矩(N·m); T_1 为螺旋副间的摩擦阻力矩(N·m); T_2 为螺母的环形端面跟被联接件(或垫圈)支承面之间的摩擦阻力矩(N·m); Ψ 为螺纹升角(°); P 为螺纹间距(m); ρ 为螺纹当量摩擦角(°); d_m 为螺母支承面平均直径(m); d_2 为螺纹中径(m); d 为螺栓公称直径(m); μ 为螺母支承面摩擦因数。

2 输电杆塔节点有限元模型的建立

输电塔节点处螺栓因风荷载长期作用,易出现松弛或脱落等现象,故建立输电塔节点模型,深入

研究节点承载力性能变化。

2.1 工程背景

以某输电塔的实际工程为例,构建塔体最薄弱处节点精细化模型如图1所示。针对主材上最早发生破坏的节点进行研究,由图1可知,节点模型中有6根斜材、2块节点板、1根主材和28个螺栓,其中螺栓1~螺栓8为第一组螺栓,螺栓9~螺栓14为第二组螺栓,螺栓15~螺栓22为第三组螺栓,螺栓23~螺栓28为第四组螺栓。节点主材采用Q345钢,斜材及节点板采用Q235钢,螺栓为4.6级普通镀锌粗制螺栓,其屈服强度为240 N/mm²。钢材的杨氏模量为 2.06×10^{11} N/m²,密度为7 800 kg/m³。斜材和主材均为角钢。斜材1与斜材4的倾斜角 θ_1 是40°,长度为300 mm,宽度为100 mm,厚度为8 mm。斜材2与斜材5的长度为300 mm,宽度为90 mm,厚度

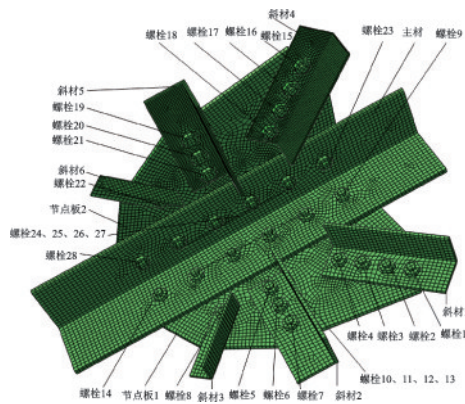


图1 输电塔节点构造

Fig.1 Transmission tower node structure

为7 mm。斜材3与斜材6的倾斜角 θ_2 是49°,长度200 mm,宽度为56 mm,厚度为5 mm。主材的长度1 000 mm,宽度为160 mm,厚度为12 mm。节点板的长度为750 mm,宽度为400 mm,厚度为10 mm。斜材螺栓长度为50 mm,厚度为20 mm。主材螺栓长度为60 mm,厚度为20 mm。其中斜材螺栓和主材螺栓长度分别对应主材螺杆长度和斜材螺杆长度,斜材螺栓与主材螺栓厚度对应螺杆直径,螺母直径与厚度根据《1型六角螺母》选取^[10]。

2.2 输电塔节点边界条件和荷载的施加方式

根据实际情况的边界约束,将构件主材一端按固定支座考虑,另外一端按定向支座考虑,仅有沿杆轴方向位移;斜杆端部边界为定向支座,仅允许沿杆轴线方向移动^[11-13]。加载方式为:各杆端施加沿杆轴方向的均布面荷载,其取值由有限元模型中主材最开始屈服而得到模型相对应的主材、斜材的荷载,荷载大小见表1。螺栓中螺杆上施加预紧力,根据文献[14]拟定4.6级普通螺栓扭矩 T 为100 N·m,经预紧力转换公式(10)得到螺栓预紧力大小为80 MPa。扭矩 T 取不同的值来模拟螺栓的不同拧紧程度,当螺栓未拧紧时,扭矩取50 N·m,即预紧力40 MPa;当螺栓过度拧紧而破坏时,扭矩取250 N·m,即预紧力200 MPa。根据分析,结构自重对螺栓的受力影响很小,故计算时不考虑自重。图2为具体荷载施加方式与边界条件。根据《钢结构设计规范》^[15]确定各构件间摩擦系数为0.3。

表1 构件加载大小

Table 1 Component load size

单位:kN

主材	斜材1	斜材2	斜材3	斜材4	斜材5	斜材6
-935.926	-59.227	61.460	-6.803	-132.602	28.80	-7.565

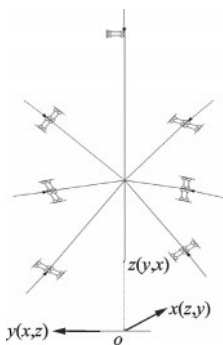


图2 输电杆塔节点边界条件和荷载加载方式

Fig.2 Boundary conditions and load loading mode of transmission tower nodes

3 输电塔节点计算结果分析

根据现场勘查风速,经有限元分析得出临界荷载施加于节点模型,考虑到节点构件的非线性力学性能,根据等向强化理论,可以通过 von-Mises 屈服准则以及相关流动法则来确定材料弹塑性的发展。

3.1 节点应力分析

临界荷载为塔体破坏时刻荷载。在临界荷载作用下,当预紧力为80 MPa、摩擦系数为0.3以及螺

栓直径为 20 mm 时,图 3 为节点各构件和螺栓的应力分布云图。主材最大应力为 349.6 MPa,已经超过主材屈服极限强度,此时主材进入破坏阶段;斜材 4 螺栓孔处应力已经超过斜材屈服极限强度,进入破坏阶段;节点板 2 在与斜材 4 接处下端位置应力集中,并且此时节点板最大应力为 238.6 MPa,已至屈服极限强度;螺栓中螺杆的应力集中是非常明显的,并且主材螺栓中螺栓 9、螺栓 14、螺栓 23 和螺栓 28 应力较大,而其他主材螺栓应力较小,因为主材和斜材之间的内力只能凭借螺栓来传送到节点板上,并且此时螺杆最大应力已经达到螺栓的屈服极限强度。

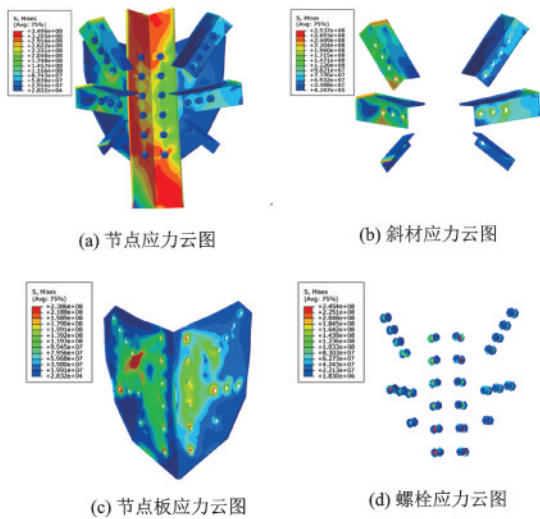


图 3 临界荷载下输电塔节点各构件应力云图

Fig.3 Stress contour of transmission tower nodes under critical load

3.2 预紧力对节点承载力性能探究

临界荷载为塔体破坏时刻荷载。图 4 给出了节点在临界荷载作用下,当摩擦系数为 0.3、螺栓直径为 20 mm 时,节点主材、斜材螺孔应力与预紧力的变化关系图。从图中可以得出斜材螺孔的应力随

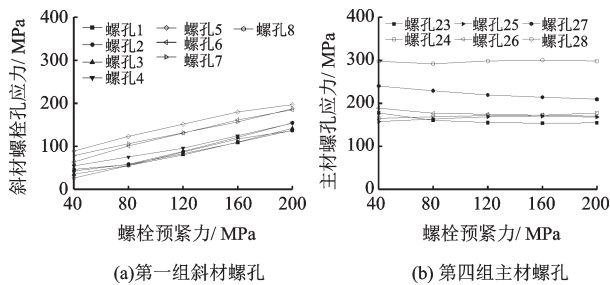


图 4 节点主材、斜材应力随预紧力变化关系

Fig.4 Change of the stress of the main structure and angle steel of the joints with preload

着预紧力的增大而逐渐增大,并基本呈线性变化的结论;位于主材处螺孔和螺栓的应力则基本不变。第一组斜材螺孔中,同一根斜材上的螺孔应力基本一致,当预紧力从 40 MPa 增至 200 MPa 时,斜材上螺孔应力最大增加了 45.38%;在第四组主材螺孔中,螺孔应力不再随着预紧力变化,位于主材下端的螺孔 28 应力最大,达到 300 MPa,而螺孔 23~螺孔 26 的应力基本一致。

图 5 给出了节点在临界荷载作用下,当摩擦系数为 0.3、螺栓直径为 20 mm 时,节点板螺孔应力与预紧力的变化关系图。由图可知,由于预紧力的增大,节点板螺孔应力逐渐增大。第一组节点板螺孔中,当预紧力从 40 MPa 增至 200 MPa 时,节点板上相对位于斜材处的螺孔应力最大增加了 48.23%;在第四组节点板螺孔中,随着预紧力增大,螺孔应力逐渐增大,但增大幅度较小,相对位于主材下端的螺孔 28 应力最大。

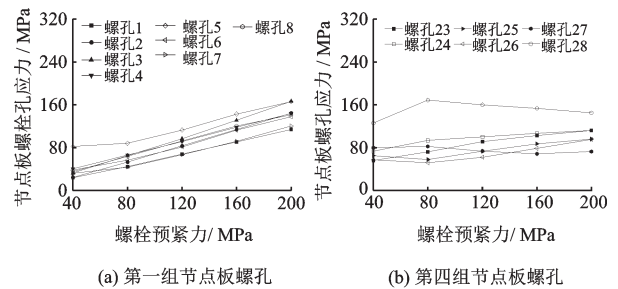


图 5 节点板应力随预紧力变化关系

Fig.5 Variation of nodal plate stress with preload

图 6 给出了节点在临界荷载作用下,当摩擦系数为 0.3、螺栓直径为 20 mm 时,螺栓应力与预紧力的变化关系图。如图所示,由于预紧力的增大,斜材螺栓的应力逐渐增大,主材螺栓应力基本不变。在第一组螺栓中,当预紧力从 40 MPa 增至 200 MPa 时,斜材螺栓应力最大增加幅度为 83.33%。在第四组螺栓中,螺栓 23、螺栓 27 与螺栓 28 的应力已达到屈服极限强度,不再随着预紧力的变化而变化,当

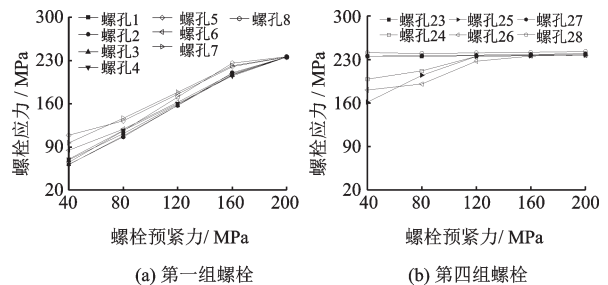


图 6 节点螺栓应力随预紧力变化关系

Fig.6 Change of joint bolt stress with preload

预紧力从 40 MPa 增至 120 MPa 时,螺栓 24、螺栓 25 和螺栓 26 的应力逐渐增大,最大增加幅度为 50.26%,当预紧力从 120 MPa 增至 200 MPa 时,螺栓 24、螺栓 25 和螺栓 26 的应力不再变化,并且与螺栓 23、螺栓 27 与螺栓 28 的应力相同。

分析可知,斜材上的荷载远小于主材上的荷载,相比于外荷载,此时预紧力为斜材上螺孔应力变化的主导因素;相比于预紧力,外荷载为主材上螺孔应力变化的主导因素。故斜材上构件的应力逐渐增大并呈线性变化,主材上构件的应力则基本不变。对于主材上螺栓,两端螺栓最先承受外荷载传递的内力,因此两端螺栓最先达到屈服极限,故不再随着预紧力的变化而变化,由于预紧力的继续增大,中间螺栓开始承受两端螺栓传递的内力,当预紧力为 120 MPa 时,主材上所有螺栓均到达屈服极限,螺栓应力不再变化。

3.3 加载强度对节点承载力性能探究

图 7 给出了在外荷载加载比例逐渐增大时,不同预紧力 P 作用下,节点主材、斜材的应力变化曲线。由图 7 可知,主材单元应力与荷载加载比例呈同向增大。当荷载加载比例为 0 时,即无外荷载时,螺栓预紧力越大,主材单元应力越大,当预紧力为 40 MPa 时,主材单元应力为 20 MPa,当预紧力为 200 MPa 时,主材单元应力为 130 MPa;当荷载加载比例为 1 时,即外荷载为临界荷载时,主材单元应力基本一致,此时预紧力为 40 MPa 的主材单元应力最大,预紧力为 160 MPa 的主材单元应力最小。对于斜材单元,当螺栓预紧力为 200 MPa 时,由于荷载加载比例的增大,斜材单元应力基本不变,而当预紧力为 40、80、120 MPa 和 160 MPa 时,随着荷载加载比例的增大,斜材单元应力逐渐增大。当荷载加载比例为 0 时,即无外荷载时,螺栓预紧力越大,

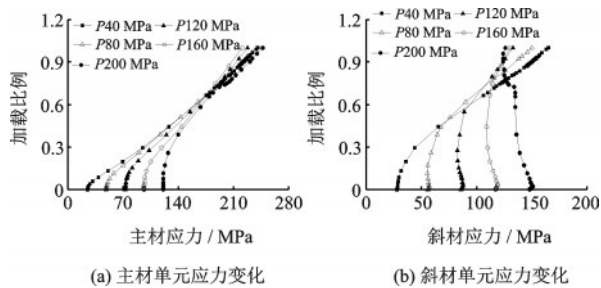


图 7 节点主材、斜材单元应力与荷载加载比例变化关系
Fig.7 Relationship between stress and loading ratio of joint main structural and angle steel elements

注: P 为预紧力,下同

斜材单元应力越大;当荷载加载比例为 1 时,即外荷载为临界荷载时,斜材单元应力差值逐渐减小,并且预紧力越小,斜材单元应力越大。

图 8 给出了在外荷载加载比例逐渐变大时,不同预紧力 P 作用下,节点螺栓的应力变化曲线。对于螺栓单元,在不同预紧力作用下,斜材上螺栓 4 的单元应力基本随着荷载加载比例的增大而增大,当预紧力为 200 MPa 时,螺栓应力不再由于加载强度的增大而变化,此时螺栓 4 因预紧力过大而达到屈服极限,进入破坏阶段;当预紧力增大,螺栓应力的增幅减小。而位于主材上的螺栓 23,在不同预紧力作用下,单元应力先随着荷载加载比例增大而增大,当加载比例增大到一定程度,应力不再随着荷载加载比例变化而变化,表明螺栓已进入破坏阶段,且预紧力越大越早达到屈服极限;当预紧力为 200 MPa 时,螺栓由于预紧力过大已经发生破坏,应力不再随着荷载加载强度变化而变化。

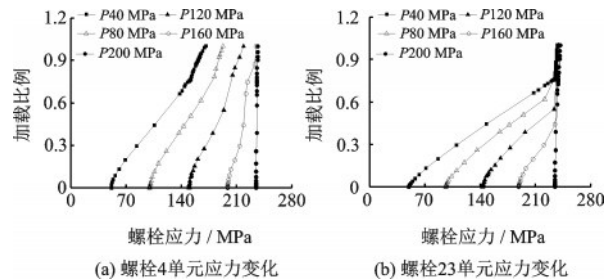


图 8 节点螺栓单元应力与荷载加载比例变化关系

Fig.8 Relation between stress and load ratio of bolt element in joint

4 结论

(1)利用 ABAQUS 软件,凭借精细三维有限元分析的理论,对输电塔主材上节点的受力性能进行了探究。建立了螺栓的精细模型,给出了在风荷载作用下螺栓与构件相互作用的非线性接触力模型。将我国某实际输电塔工程作为研究对象,验证了该联合分析方法的可行性和可靠性。

(2)研究了在临界荷载作用下,螺栓预紧力对输电塔节点的影响。结果表明:随着预紧力的增大,斜材螺孔、节点板相对于斜材位置的螺孔和斜材螺栓的应力逐渐增大,但主材螺孔、节点板相对于主材位置的螺孔和主材螺栓的应力则基本不变,并且此时螺栓已到达屈服极限。

(3)研究了在不同预紧力作用下,不同荷载加载比例对节点承载力性能的影响。结果表明:随着

荷载加载比例的逐渐增大,主材螺栓应力基本不变,斜材螺栓应力逐渐增大,但预紧力越大,节点应力越大,而应力增幅越小;主材与斜材应力随着荷载加载比例的增大而增大,当荷载达到临界荷载时,预紧力越小,主材与斜材的应力反而越大。在预紧力为200 MPa时,螺栓从开始加载便已经破坏;而其他情况下,随着荷载比例的增大,螺栓最先达到屈服极限强度发生破坏,其后主材屈服,斜材破坏。

故在输电塔建造时,必须充分考虑到螺栓的拧紧程度,使螺栓处于合理的受力状态,以保证塔体在风荷载作用下,不会因为螺栓的松弛、脱落或者破坏导致塔体提前进入破坏阶段。

参考文献:

- [1] 陈波, 瞿伟廉, 郑瑾. 输电塔线体系风振反应的半主动摩擦阻尼控制[J]. 工程力学, 2009, 26(1): 221-226. Chen B, Qu W L, Zheng J. Semiactive control for wind-induced responses of transmission tower-line system using friction dampers[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (1): 221-226. (in Chinese)
- [2] Chen B, Guo W H, Li P Y, et al. Dynamic responses and vibration control of the transmission system[J]. The Scientific World Journal, 2014(1): 1-20.
- [3] 陈卫明, 陈卫国, 王鑫. 采动区地表变形对输电塔线体系的影响规律研究[J]. 钢结构, 2015, 30(8): 38-42. Chen W M, Chen W G, Wang X. Study on the influence regularities of ground surface deformation on transmission system in mining subsidence[J]. Steel Construction, 2015, 30 (8): 38-42. (in Chinese)
- [4] 崔磊, 何运祥, 汪大海. 台风“海鸥”的风场实测与输电塔风振响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(6): 965-971, 983. Cui L, He Y X, Wang D H. The wind field measurement in the typhoon "Seagull" and the wind-induced dynamic responses of the transmission tower[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36 (6): 965-971, 983. (in Chinese)
- [5] 常亚星. 风载作用下输电铁塔螺栓连接松动特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015. Chang Y X. Research on loose characteristics of bolted joint used on transmission tower under the action of wind[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015. (in Chinese)
- [6] Chen B, Zheng J, Qu W L. Control of wind-induced response of transmission tower-line system by using magnetorheological dampers [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2009, 9(4): 661-685.
- [7] 刘海卿, 于春艳, 杜岩. 考虑叶片与塔架耦合作用的风电塔架风振响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(增1): 139-142. Liu H Q, Yu Ch Y, Du Y. Analysis of wind vibration response of wind power tower considering the coupling effect of blade and tower[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(Sup 1): 139-142. (in Chinese)
- [8] 陈长盛, 王强, 柳瑞锋. 螺栓连接对结构模态及传递特性影响研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(2): 178-182. Chen Ch Sh, Wang Q, Liu R F. Effect of bolt connection on structural vibration modes and transfer characteristics[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2): 178-182. (in Chinese)
- [9] 谢晓彪. 不同预紧力影响下高强螺栓摩擦型连接的有限元分析及试验研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014. Xie X B. The finite element analysis and experimental study of friction high-strength bolt connection under different preload [D]. Nanchang: Nanchang University, 2014. (in Chinese)
- [10] 1型六角螺母: GB/T 6170—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000. Hexagon nuts, style 1: GB/T 6170—2000[S]. Beijing: Standards Press of China, 2000. (in Chinese)
- [11] 陈怡宏, 黄海斌, 张意, 等. 特高压输电塔KK型节点受力性能有限元分析[J]. 重庆建筑, 2015, 14(11): 51-53. Chen Y H, Huang H B, Zhang Y, et al. Finite element analysis on stress performance of KK-typed-node in UHV transmission towers [J]. Chongqing Architecture, 2015, 14 (11): 51-53. (in Chinese)
- [12] 陈鑫. 钢管塔负偏心K型节点承载力试验与计算方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014. Chen X. Study of ultimate strength experimental and calculation method of steel tubular k-joints considering negative eccentricity [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [13] 赵楠. 特高压输电塔半刚性连接节点受力性能及结构非线性分析研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014. Zhao N. Study on load-bearing performances of semi-rigid joints and structure nonlinear analysis of UHV transmission tower [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [14] 110~500 kV 架空送电线路施工及验收规范: GB 50233—2005[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005. Code for construction and acceptance of 110~500KV overhead transmission line: GB 50233—2005[S]. Beijing: Planning Press of China, 2005. (in Chinese)
- [15] 钢结构设计规范: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.

(本文责编: 苏泽云)