

特高压钢管塔微风振动稳态幅值估计方法研究

冯立言, 王彤, 霍仕康, 江文强*
(华北电力大学 机械工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 钢管塔在我国特高压输电线路中得到广泛应用。在微风作用下圆形截面构件会形成稳定的卡门旋涡, 导致构件发生微风振动, 极易造成螺栓松动、连接疲劳等问题, 危及特高压钢管塔结构安全。针对特高压钢管塔, 建立了斜材的力学模型, 得到了斜材微风振动的弯曲振动微分方程, 提出了其固有频率的计算方法, 研究了轴力和连接刚度对斜材横向弯曲振动频率的影响。运用能量平衡法, 考虑风输入能量和螺栓滑移耗能, 提出了斜材稳态幅值计算方法。针对SJ3021型特高压钢管塔斜材, 研究了风速和连接刚度对斜材振动稳态幅值的影响, 提出了减少斜材微风振动影响的建议, 为保障特高压输电线路安全提供理论基础。研究成果有利于特高压钢管塔斜材微风振动防控工作, 对提高输电杆塔的安全性及可靠性具有重要意义。

关键词: 特高压钢管塔; 卡门旋涡; 微风振动; 斜材; 振动频率; 能量平衡法; 稳态幅值

中图分类号: TM753

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)03-0066-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231017001

Study on Steady-State Amplitude Estimation Method of Breeze Vibration of UHV Steel Tubular Towers

FENG Liyan, WANG Tong, HUO Shikang, JIANG Wenqiang*

(Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

*Corresponding author: wenqiang.jiang@ncepu.edu.cn

Abstract: Steel tubular towers are widely used in ultra-high voltage (UHV) transmission lines in China. Circular section members are prone to forming stable Von Karman vortex under the influence of gentle breezes, resulting in vibration of the components and potentially inducing bolt loosening and connection fatigue, which endanger the structural safety of UHV steel tubular towers. In this paper, the mechanical model of the diagonal member in the UHV steel tubular tower is established, and the differential equation of flexural vibration of the diagonal member is derived. The natural frequency calculation method is provided, and the influence of axial force and connection stiffness on the transverse flexural vibration frequency of the diagonal member is investigated. The steady-state amplitude of the diagonal member is calculated using the energy balance method, considering wind input energy and bolt slip energy dissipation. The effects of wind speed and connection stiffness on the steady-state amplitude of vibration of SJ3021 UHV steel tubular tower are studied, and the design recommends are put forward to reduce the impact of breeze-induced vibrations on diagonal members. This study contributes to the prevention and control of breeze vibrations in diagonal members of UHV steel tubular towers and has great significance for enhancing the safety and reliability of transmission towers.

收稿日期: 2023-10-17

基金项目: 河北省“三三三人才工程”资助项目(C20231056), 保定市科技计划项目(2463P028)

作者简介:

冯立言(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事输电结构强度及失效分析方面的研究。E-mail: liyanfeng0812@163.com。

王彤(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事输电结构安全性分析方面的研究。

通信作者:

江文强(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事输电工程失效及灾害预防方面的研究。E-mail: wenqiang.jiang@ncepu.edu.cn。

Keywords: UHV steel tubular tower; Von Karman vortex; breeze vibration; diagonal member; vibration frequency; energy balance method; steady-state amplitude

作为架空输电线路系统的重要组成部分,输电杆塔承担着重大的责任。随着材料、结构设计技术的不断发展,杆塔结构型式也向着更高的承载性能、更好的选材经济性以及更优的加工、安装便利性而不断优化,钢管塔应用的优越性已引起关注^[1]。钢管塔具有各方向受力均匀、挡风面积小、塔重小、杆塔整体外形美观等优点,在我国特高压输电线路中得到了广泛应用^[2]。然而输电塔属于风敏感结构^[3],在风速较低时,圆形截面构件更容易发生卡门旋涡而引起微风振动。在长期动态荷载作用下螺栓容易出现连接松动甚至脱落^[4],影响钢管塔正常运行,这也是目前钢管塔出现事故的重要原因之一^[5],如图1所示。



图1 输电塔灾害实例^[6]

Fig. 1 Example of a transmission tower disaster^[6]

针对特高压钢管塔构件微风振动问题,夏谦等^[7]研究了输电塔钢管的涡激振动特性,进行了输电塔钢管风洞试验,验证了输电塔钢管涡激振动临界风速和最大振幅的预测公式的正确性。李正良等^[8]研究了交叉斜材在拉-压受力情况下的稳定承载力与破坏模式,并基于分析结果得到了压杆承载力随拉压力变化规律。邓洪洲等^[9]采用数值模拟方法对钢管构件涡激振动现象进行研究,针对两端铰支和两端固支钢管构件,提出了钢管构件发生涡激振动时构件中部的最大振幅公式。张广芸等^[10]建立了轴力作用下Bernoulli-Euler梁自由振动偏微分方程并获得了通解和精确形函数,给出了梁横向振动固有频率影响系数的高精度表达式。GANI等^[11]评价了风荷载作用下输电线路拉线塔动力响应分析的重要性,并给出了静态分析方法和简化方法。文献[12-14]针对钢管塔结构采用不同类型连接节点,研究了输电钢管塔K形

节点的半刚性特性。

学者们对于输电塔微风振动问题进行了大量深入的研究,然而现有文献大多采用有限元仿真和试验的方法,鲜有学者从理论分析的角度进行研究。对于结构构件的横向弯曲振动问题,现有研究采用的方法主要有有限元法^[15]、能量法^[16]和积分求解法等。已有研究建立了欧拉-伯努利梁和铁木辛柯梁的精确特征值方程、振型形函数、刚度矩阵^[17]和解析型欧拉梁动力单元的解析形函数、刚度矩阵^[18],虽然都为精确的形函数和刚度矩阵,但均未考虑螺栓连接滑移耗能对振动幅值的影响。

本研究针对特高压钢管塔斜材构件,建立其力学模型,分析轴力和连接刚度影响下梁横向弯曲运动微分方程和振动固有频率,考虑螺栓滑移耗能,利用能量平衡法研究不同风速和连接刚度对稳态振幅的影响。研究成果有利于特高压钢管塔斜材微风振动防控工作,对提高输电杆塔的安全性与可靠性具有重要意义。

1 理论研究

1.1 微风振动的频率分析

风垂直于圆形截面构件轴线方向作用时,构件的背风面会出现旋涡,旋涡上下交替地产生又不断离开构件向后延伸逐渐消失,使得圆形截面构件受到上下交变的激励,当这个交变的激励频率与圆形截面构件的固有频率相等时,构件将在垂直平面上发生谐振,形成有规律的上下波浪状的往复运动,这种现象就是微风振动。

1.1.1 梁弯曲振动运动微分方程

梁是由支座支撑的承受弯曲变形的构件,理论研究中通常把输电铁塔斜材简化为梁进行研究。为准确描述微风振动时梁的受力情况,首先对梁微段进行受力分析,为了方便表达定义坐标系为: x 轴与梁的轴线方向重合且向右为正, y 轴竖直向上为正, z 轴根据右手螺旋法则确定正方向,因此荷载与坐标轴方向一致为正,挠度、转角方向与坐标轴方向一致为正^[19]。受压梁微段的受力简图,如图2所示,其中 N 为受压梁轴力, $V(x,t)$ 为 x 处 t 时刻受压梁截面上的横向内力, $M(x,t)$ 为 x 处 t 时刻受压梁截面上的弯矩内力, $f_v(x,t)$ 、 $p(x,t)$ 分别为受压梁单位长度上的惯性力和分布力。

(1) 几何方程

假设梁的刚度和张力沿梁长度方向不变。梁弯曲作用下产生的变形较小,挠度变形的二阶微量可忽略不计。梁在轴向压力作用下产生的横向位移较大,二阶效应不

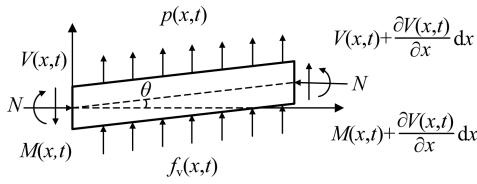


图2 受压梁微段受力简图

Fig. 2 Simplified force diagram of micro-section of compressive beam

可忽略,则受压梁弯曲变形的几何方程如式(1)~(2)所示。

截面弯曲转角 $\theta(x,t)$ 为:

$$\theta(x,t) = \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} \quad (1)$$

式中: $v(x,t)$ 为节点处挠度。

截面曲率 $\kappa(x,t)$ 为:

$$\kappa(x,t) = \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \quad (2)$$

(2) 平衡方程

横向力 $V(x,t)$ 平衡方程为:

$$\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = m(x) \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} - p(x,t) \quad (3)$$

力矩 $M(x,t)$ 平衡方程为:

$$\frac{\partial M(x,t)}{\partial x} = N \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} - V(x,t) \quad (4)$$

弯矩-横向力平衡方程为:

$$m \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} - p(x,t) = N \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 M(x,t)}{\partial x^2} \quad (5)$$

式中: m 为单位长度上受压梁的质量。

(3) 物理方程

弯矩内力与挠度之间的关系为:

$$M = EI\kappa = EI \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \quad (6)$$

式中: E 为梁的弹性模量; I 为梁的截面惯性矩。

(4) 综合方程

综合式(1)~(6),可得均布质量下梁弯曲振动刚度平衡方程为:

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} - N \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = p(x,t) \quad (7)$$

1.1.2 微分方程求解

当只考虑均布惯性力和节点荷载来研究受压梁的自由振动时,可只求微分方程的通解,不考虑特解的大小。令外荷载为0,则有:

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} - N \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (8)$$

由于等截面梁质量均布,采用分离变量法如式(9)

所示。

$$V(x,t) = \varphi(x) Y(t) \quad (9)$$

则有:

$$EI\varphi^{(4)}(x)Y(t) - N\varphi^{(2)}(x)Y(t) + m\varphi(x)Y^{(2)}(t) = 0 \quad (10)$$

进一步变换为:

$$\frac{\varphi^{(4)}(x) - \frac{N}{EI}\varphi^{(2)}(x)}{\varphi(x)} = -\frac{mY^{(2)}(t)}{EY(t)} \quad (11)$$

可以看出得到的方程左侧式子与 t 无关,右侧式子与 x 无关。假设方程左右两边相等,等于同一常数 ξ^4 ,则有:

$$\frac{\varphi^{(4)}(x) - \frac{N}{EI}\varphi^{(2)}(x)}{\varphi(x)} = -\frac{mY^{(2)}(t)}{EY(t)} = \xi^4 \quad (12)$$

由此可以得到两个常微分方程:

$$\begin{cases} \varphi^{(4)}(x) - \frac{N}{EI}\varphi^{(2)}(x) - \xi^4\varphi(x) = 0 \\ Y^{(2)}(t) + \xi^4 \frac{EI}{m} Y(t) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\omega = \xi^2 \sqrt{EI/m}$ 为梁的振动固有频率。

求解式(13)可得:

$$Y(t) = c_1 \sin(\omega t) + c_2 \cos(\omega t) \quad (14)$$

式(14)为单自由度体系无阻尼振动方程,这说明轴向力作用时梁的自由振动为简谐振动。

定义 $n^2 = |N|/(EI)$,则有如下微分方程:

$$\varphi^{(4)}(x) + n^2\varphi^{(2)}(x) - \omega^2 \frac{m}{EI}\varphi(x) = 0 \quad (15)$$

如式(16)所示定义 α, β 且 $\alpha^2 - \beta^2 = n^2$,即可求得受压梁横向弯曲振动位移的一般格式如式(17)所示。

$$\begin{cases} \alpha = \sqrt{[\omega^2 m/(EI) + n^4/4]^{\frac{1}{2}} + n^2/2} \\ \beta = \sqrt{[\omega^2 m/(EI) + n^4/4]^{\frac{1}{2}} - n^2/2} \end{cases} \quad (16)$$

$$\varphi(x) = b_1 \sin \alpha x + b_2 \cos \alpha x + b_3 e^{\beta x} + b_4 e^{-\beta x} \quad (17)$$

式中: b_1, b_2, b_3, b_4 为常系数。

1.1.3 边界条件

考虑梁两端不同的约束条件:刚接、铰接和半刚性连接。当梁两端为固定约束时,挠度和转角为0;两端铰接约束时,挠度和弯矩为0;两端半刚性连接时,认为两端弹性支撑力与剪力相等进行分析。将上述位移边界条件代入式(17)中消去待定常数即可确定梁振动模态的实常数。

1.2 微风振动的幅值估计

微风对结构的作用过程实际上就是能量的输入转化

及耗散的过程,结构吸收风输入能量,一部分以可恢复的动能和应变能的形式储存起来,另一部分则以结构的阻尼和非弹性变形的形式耗散掉^[20]。当输入的能量和消耗的能量达到平衡时,就会保持在一定的最大振幅下振动。利用能量平衡原理估计平衡时的振动幅值是工程中经常采用的方法。螺栓连接具有施工安装方便、成本低廉的特点^[21],被广泛应用于输电铁塔中各类结构连接^[22],本文考虑连接节点消耗能量为两部分,斜材端部连接螺栓滞回耗能和轴力作用下梁端振动转角变形耗能。基于风输入给斜材的能量和连接节点消耗能量相等这一条件,就可以推导出稳态振幅表达式。

1.2.1 风输入能量

考虑引起钢管塔构件振动风速通常在 $0.5\sim 10.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内,当圆柱形构件处于具有一定速度的风速环境中时,会在后方形成交替脱落的旋涡,构件背风侧气流旋涡脱离时,在构件上会产生随时间变化的升力 F_y ,该升力由流体力学可写为:

$$F_y \sin \omega t = C_L \left(\frac{1}{2} \rho V^2 D \right) q \sin \omega t \quad (18)$$

式中: ρ 为空气密度; V 为风速; D 为圆截面构件外径; ω 为升力频率; C_L 为动态升力系数,与风速 V 有关。

$$C_L = \frac{1.7}{1 + 0.07(1 - V)^2} \quad (19)$$

假设圆柱体振动的垂直位移为:

$$y = -A_0 \cos(\omega t - \varphi) \quad (20)$$

式中:负号是为了保证力与加速度方向相同, φ 为升力与位移之间的相位差。

可以得到半个周期内风输入功率的平均值为:

$$P_w = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \left(F_y \sin \omega t \frac{dy}{dt} \right) dt = \frac{1}{2} F_y \omega A_0 \cos \varphi \quad (21)$$

考虑升力 F_y 和位移 y 为 x 、 t 的函数,可以写为:

$$F(x, t) = F(x) \sin \omega t \quad (22)$$

$$y(x) = A_0 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (23)$$

由于 $\omega = 2\pi f$,当谐振时 $\cos \varphi = 1$, $y_0 = 2A_0$,代入 F_y 可算得风输入功率为:

$$P_w = \pi F_y A_0 f = 32.5 C_L f^3 D^4 \left[\frac{A_0}{D} + 1.2 \left(\frac{A_0}{D} \right)^2 \right] \quad (24)$$

即可求得风输入能量为:

$$W = 16.25 C_L f^2 D^4 \left[\frac{A_0}{D} + 1.2 \left(\frac{A_0}{D} \right)^2 \right] \quad (25)$$

1.2.2 连接节点消耗能量

输电杆塔中螺栓连接节点包括螺栓螺母和被连接

件,被连接件主要承受法向荷载和轴向荷载。轴向荷载会导致接触面之间的水平滑动和构件变形,法向荷载主要由螺栓预紧力产生,根据紧固件的破坏扭矩标准,由于螺栓预紧力较小,且连接件与被连接件之间存在构造间隙,因此在螺栓连接部位极易发生连接件与被连接件之间的相对滑动^[23],从而消耗外界输入的能量。

螺栓滑移耗能通常用滞回曲线反映^[24],滞回曲线表示重复循环荷载下结构的荷载-变形关系,如图3所示, DAB 段表示加载阶段, BCD 段表示卸载阶段。滞回曲线包围的面积即为荷载正反交变一周时结构所吸收的能量,滞回曲线包围面积越大,结构的耗能能力越强,越有利于结构抵抗振动。

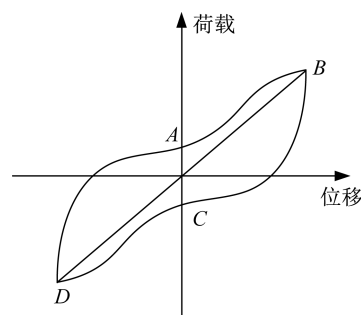


图3 螺栓节点滞回曲线

Fig. 3 Hysteretic curve of bolted joint

滞回曲线的面积可以通过定积分进行求解,即利用曲面的左(右)端点对应值作为矩形的高,每个区间的宽作为矩形的底,通过累加一系列矩形的面积近似得到滞回曲线所围成的面积。

$$\begin{aligned} W_{S1} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n f \left[a + \frac{i}{n}(b-a) \right] \frac{b-a}{n} \\ &= \int_a^b f(x) dx \end{aligned} \quad (26)$$

螺栓滑移总耗能可以通过螺栓单位距离滑移耗能与螺栓滑移距离的关系得到。根据螺栓节点滞回曲线中单个螺栓滑移耗能 W_{S1} ,可以求得螺栓滑移总耗能为:

$$W_s = n \Delta W_{S1} \quad (27)$$

式中: n 为螺栓个数; Δ 为梁端缩短量。

梁端缩短量由两部分组成,在轴力作用下梁构件两端在荷载作用下的缩短方式有两种:(1)梁截面在轴向应力作用下产生应变从而使得梁产生压缩变形 Δ_1 ;(2)梁发生弯曲变形使得连接梁两端的弦长缩短 Δ_2 ^[25]。对两端铰接受压梁有初始弯曲时的轴压刚度进行分析推导,设初始弯曲为:

$$y_0 = A_0 \sin \frac{\pi x}{l} \quad (28)$$

受压梁挠曲线斜率可以表示为:

$$y' = A \cos kx + B \sin kx + C \quad (29)$$

$$\Delta_1 = \frac{Pl}{EA} \quad (30)$$

若受压梁存在初始弯曲,梁的挠度会随着荷载的增加不断增大,支座间的相互距离缩短包含了因弯曲而引起的缩短,受压梁两端位移为:

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= \frac{1}{2} \int_0^l [(y' + y_0')^2 - y_0'^2] dx \\ &= \frac{\pi^2 A_0^2}{2l} \frac{P \left(P_E - \frac{1}{2} P \right)}{(P_E - P)^2} = c A_0^2 \end{aligned} \quad (31)$$

式中: c 为螺栓耗能系数。

由此可得到梁端缩短量 Δ 为:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{Pl}{EA} + \frac{\pi^2 A_0^2}{2l} \frac{P \left(P_E - \frac{1}{2} P \right)}{(P_E - P)^2} \quad (32)$$

即可求得螺栓滑移总耗能 $W_s = n\Delta W_{s1}$ 。

轴力作用下梁端振动转角消耗能量,可根据式(1)求得受压梁弯曲变形时截面弯曲转角为:

$$\theta_1 = \frac{M}{EI} \quad (33)$$

轴向力引起的附加转角为:

$$\theta_2 = \frac{Fl}{EA} \quad (34)$$

因此得到受压梁弯曲变形时两端转角总和为:

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 = \frac{M}{EI} + \frac{Fl}{EA} \quad (35)$$

根据式(24)消耗能量与力和力矩之间的关系,即可求得梁端振动转角变形消耗能量为:

$$W_a = \int \left[\int \frac{M(\theta)}{l} dt \right] dt \quad (36)$$

因此求得受压梁横向弯曲振动消耗总能量:

$$W = W_a + W_s \quad (37)$$

1.2.3 幅值计算

本文主要从幅值估计方法的角度开展研究,考虑风输入能量与螺栓滑移耗能相等。通过能量平衡法,可得到斜材微风振动时的稳态振幅关系式为:

$$16.25 C_L f^2 D^4 \left[\frac{A_0}{D} + 1.2 \left(\frac{A_0}{D} \right)^2 \right] = n \Delta W_{s1} \quad (38)$$

2 单螺栓节点耗能特性试验研究

本文选用6.8级M16标准六角螺栓,螺栓孔直径为17 mm,孔壁与螺杆间隙为1 mm,螺栓连接节点详细尺寸如图4所示。为了更加准确地模拟实际情况,将两块和斜材相同材料的钢材固定在试件两端,以保证加载时试件始终处于垂直方向,从而减小螺栓连接处的附加弯矩。

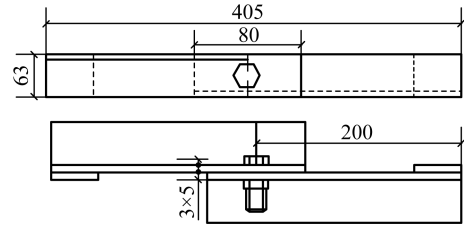


图4 螺栓连接节点尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Dimensions of bolted joint (unit: mm)

为了研究螺栓连接节点的耗能规律,本文设置加载频率为1 Hz的单孔单螺母连接。采用如图5所示的液压驱动HT-9711型疲劳试验机(落地型)进行加载,该设备可以直接将荷载和位移的数据记录在计算机中。根据相关规范^[26-27]中对螺栓预紧力的规定,杆塔连接螺栓应逐个紧固,6.8级M16螺栓的扭紧力矩不应小于80 N·m。因此本文将试件组装完成后,使用扭矩扳手对试件螺栓施加80 N·m的拧紧力矩,随后在疲劳试验机上对各试件进行位移幅值为1 mm的循环加载,循环次数为50次。为了使螺栓处弯矩为0,同时为了试验机夹持方便,制作试件时在钢材上下夹持部分各加焊了一块钢板,以保证上下夹具在加载过程中能够使试件始终保持垂直状态^[28]。

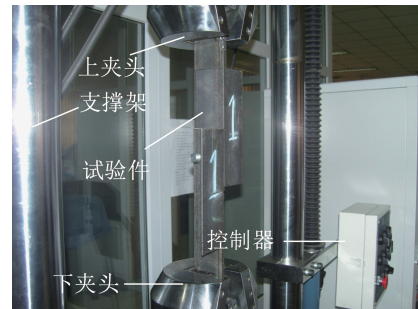


图5 单螺栓连接节点试验

Fig. 5 Single-bolt joint test

提取试件循环荷载作用后端面的荷载-位移曲线,从第1次开始每隔10次循环绘制一次,结果如图6所示。

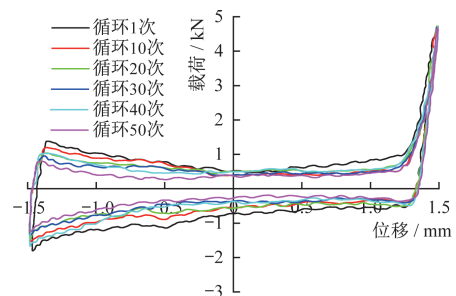


图6 不同循环次数下试件荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of specimen under different cycle times

从图6可以看出,随着循环次数增加,螺栓经历了螺栓滑移阶段和弹性变形阶段,螺栓连接节点处的滑移荷载逐渐降低,每一循环周期后所得滞回曲线的环形面积不断缩小,这是因为加载后螺栓出现了松动。

通过对比研究不同循环荷载作用后节点耗能特性变化情况,耗能能力是衡量结构构件在循环荷载作用下吸收耗散外力输入能量的指标,循环荷载作用下结构的滞回曲线越饱满,滞回环面积越大,表明节点的耗能能力越强^[29]。根据试件的荷载-位移曲线,计算单次循环荷载作用下节点滞回曲线面积,即为节点在一次循环荷载作用后所消耗的能量。根据试验结果计算得到单位滑移距离对应的单次循环耗能为4.71 J。

3 实例分析

SJ3021型特高压塔如图7a)所示。本文以塔身斜材为研究对象,钢材牌号为Q235,弹性模量为210 GPa,密度 ρ 为 $7.85 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,斜材几何参数如图7b)所示。

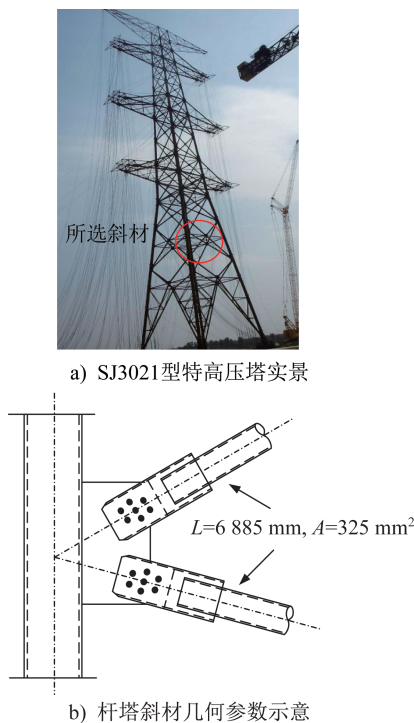


图7 SJ3021型钢管塔斜材

Fig. 7 Diagonal members of SJ3021 steel tubular tower

运用截面法来计算斜材轴力,将杆塔自重荷载、塔头风荷载、塔身风荷载及导线荷载简化的点荷载施加到结构上并进行静力分析^[30],以主材延长线的交点为矩点建

立平衡方程,由于塔身处的斜材相互对称,可以认为两根斜材的轴力相等,方向相反。选取年均气温工况,求得不同风速下杆塔斜材轴力如表1所示。

3.1 振动频率

为了探究轴力和连接刚度对斜材振动频率的影响,风速为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,按0%、25%、50%、75%、100%的顺序依次在梁两端施加轴向压力,边界条件分别选取为两端固支、两端半刚接、两端铰接,得到轴力和连接刚度影响下梁的振动频率如表2所示。

从表2中可以看出,施加风速逐渐增大,梁端连接刚度采用两端固支时,振动频率变化范围为 $140.70\sim 140.87 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$,两端半刚接时梁的振动频率变化范围为 $93.02\sim 93.15 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$,两端铰接时梁的振动频率变化范围为 $61.73\sim 62.23 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 。当施加风速每次增大25%时,振动频率仅减小0.45%,可见振动频率的减小趋势较为平缓。

根据表2,在施加不同风速时,两端固支梁的振动频率保持在 $140.79 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,两端半刚接的梁振动频率保持在 $93.07 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,两端铰接的梁振动频率保持在 $61.99 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。即两端固支时梁振动频率最大,两端半刚接梁的振动频率其次,两端铰接梁振动频率最小。

可见,在相同连接刚度的情况下,随着施加风速增大,斜材振动频率逐渐减小且变化速率缓慢。连接刚度是影响斜材振动频率的关键因素,在风速一定的情况下,连接刚度越大,振动频率越大。

3.2 振动幅值

根据式(32)可得到螺栓滑移距离,当风速为 $0.5\sim 10.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,可得螺栓耗能系数 c 如表3所示。

3.2.1 不同风速的影响

为了探究风速对斜材振动幅值的影响,选定风速为 $0.5\sim 10.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,根据式(38)计算出不同风速下梁的稳态振幅如表3所示。另选取SJ3021型特高压塔中两根分别长5678 mm、4578 mm的斜材作为对照,模型参数如表4所示。不同风速影响下斜材稳态振幅曲线如图8所示。

从图8中可以看出,当风速从 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到 $10.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,模型1振幅变化范围为 $2.64\sim 20.65 \text{ mm}$,模型2振幅变化范围为 $2.45\sim 18.45 \text{ mm}$,模型3振幅变化范围为 $0.40\sim 2.59 \text{ mm}$,3根斜材振幅均处于安全振动范围内。

表1 不同风速下杆塔斜材轴力

Table 1 Axial forces of diagonal member under different wind velocities

风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
斜材轴力/kN	10.27	10.82	13.02	16.68	21.80	28.39	36.45	45.97	56.95	69.40	83.31

表2 不同连接条件下梁振动频率

Table 2 Beam vibration frequencies under different connection conditions

设计风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	轴力/kN	梁振动频率/($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)		
		两端固支	两端半刚接	两端铰接
0.0	0.00	140.87	93.15	62.23
2.5	20.83	140.82	93.11	62.11
5.0	41.66	140.79	93.07	61.99
7.5	62.48	140.74	93.04	61.87
10.0	83.31	140.70	93.02	61.73

表3 不同连接条件下斜材稳态振幅

Table 3 Steady-state amplitudes of diagonal member under different connection conditions

设计风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	c/m^{-1}	斜材稳态振幅/mm		
		两端固支	两端半刚接	两端铰接
0.5	14.02	0.39	0.90	2.64
1.0	14.78	0.39	0.88	2.60
2.0	17.79	0.39	0.90	2.64
3.0	22.83	0.45	1.02	3.00
4.0	29.91	0.63	1.44	4.22
5.0	39.07	0.82	1.87	5.48
6.0	50.32	1.06	2.42	7.12
7.0	63.73	1.36	3.10	9.18
8.0	79.34	1.71	3.90	11.79
9.0	97.21	2.11	4.83	15.26
10.0	117.42	2.57	5.92	20.65

表4 斜材的模型参数

Table 4 Model parameters of diagonal members

斜材长度/mm	模型1	6 885
	模型2	5 678
	模型3	4 578
截面面积/ mm^2	325	
弹性模量/GPa	206	
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	7.85	

根据图8,模型1和模型2的振幅相差不大且均大于模型3的振幅。当风速从 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 逐渐增大到 $4.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,模型1、2振幅曲线变化平缓,施加风速每增大20%时,振幅只增大2%。当风速从 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 逐渐增大到 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,模型1、2振幅变化陡峭,施加风速每增大20%时,振幅增大10%。模型3的振幅在风速加载过程中的变化始终平

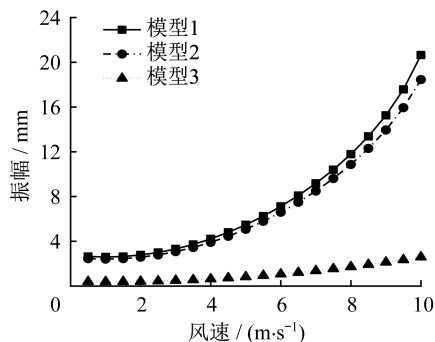


图8 不同风速下的斜材振幅

Fig. 8 Amplitudes of diagonal member under different wind velocities

缓,施加风速每增大20%时,振幅只增大2%。

可见,随着风速增大,斜材振幅随之增大。钢管塔中较长斜材振幅在风速较小时的增长速率较小,在风速较大时振幅增长速率较大,说明风速较低时钢管塔越长斜材越不易发生振动。钢管塔中较短斜材在风速加载过程中变化始终平缓,说明钢管塔中较短斜材适合在微风环境下使用。

3.2.2 不同连接刚度的影响

为探究连接刚度对斜材振动幅值的影响,根据式(38)计算出不同连接刚度的梁稳态振幅如表3所示。不同连接刚度影响下斜材稳态振幅曲线如图9所示。

从图9a)中可以看出,随着风速增大,两端固支梁的振幅在 $0.39\sim 2.57\text{ mm}$ 的范围内,两端半刚接梁的振幅在 $0.90\sim 5.92\text{ mm}$ 的范围内,两端铰接梁的振幅在 $2.64\sim 20.65\text{ mm}$ 的范围内。即两端固支梁的振动稳态幅值最小,两端半刚接斜材振幅其次,两端铰接梁的稳态幅值最大。根据图9a),当风速从 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 逐渐增大到 $4.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,两端铰接梁的振幅曲线变化较为平缓,风速每增大20%时,振幅增大2%。当风速从 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 逐渐增大到 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,振幅变化剧烈,风速每增大20%时,振幅增大10%。两端固支梁振幅和两端半刚接梁振幅在风速增大过程中的变化始终平缓,风速每增大20%时,振幅只增大2%和3%。

从图9b)~c)中可以看出,模型1和模型2不同连接刚度的振幅相差不大,且均大于模型3的振幅。模型2和模型3振幅曲线的变化规律与模型1振幅曲线的变化规律类似,连接刚度越大,斜材振幅越小。模型2和模型3中的两端铰接梁振幅最大,两端半刚接梁振幅其次,两端固支梁振幅最小,且风速较大时两端铰接梁振幅变化越剧烈,两端半刚接梁和两端固支梁振幅变化较为平缓。

可见,在相同风速条件下,连接刚度越小,斜材振幅

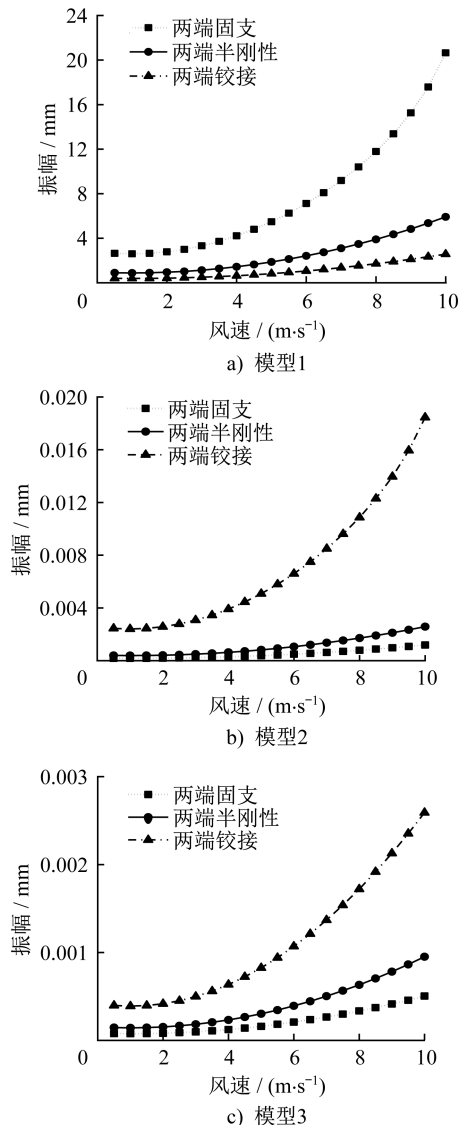


图9 不同斜材连接刚度下的稳态振幅

Fig. 9 Steady-state amplitudes of diagonal member under different connection stiffness

越大,振幅变化越剧烈。两端铰接斜材振幅远大于两端固支和两端半刚接斜材振幅,且振幅增大速率随风速增大而逐渐增大。两端固支斜材和两端半刚接斜材振幅相差不大,振幅增速较小。在不同连接刚度下,较长斜材振幅均远大于较短斜材振幅,说明钢管塔中斜材长度越短越不易发生振动。

4 结论

本文以特高压钢管塔斜材构件为研究对象,建立了受压梁的力学模型,给出了梁弯曲振动微分方程以及振动频率;考虑螺栓滑移耗能影响,研究了不同风速、不同约束条件下特高压钢管塔斜材稳态振幅计算方法,可以得到如下结论:

(1) 连接刚度是影响斜材振动频率的关键因素,在

风速一定的情况下,连接刚度越大振动频率越大。在连接刚度相同的情况下,随着风速增大,斜材振动频率有减小的趋势且变化较缓慢。

(2) 风速增大,斜材振幅随之增大。在风速较大时,钢管塔中较长斜材的振幅增长速率较大,较短斜材的振幅在风速增大过程中的变化始终较为平缓。在相同风速条件下,连接刚度越小,斜材振幅越大,振幅变化速率越大。钢管塔中风速越小、斜材长度越短,越不易发生振动。

参考文献:

- [1] 邵帅,杨风利,程永锋,等.大跨越输电高塔发展历程及其结构承载性能研究综述[J].中国电机工程学报,2022,42(增刊1):313-331.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.221479. SHAO Shuai, YANG Fengli, CHENG Yongfeng, et al. Development of long-span high-rise transmission towers and research on structural bearing capacity: a review [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(Suppl.1): 313-331. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221479. (in Chinese)
- [2] 杨靖波,李喜来,段松涛,等.输电塔钢管构件涡激风振防振锤抑制方法研究[J].建筑结构,2016,46(14):30-35.DOI:10.19701/j.jzjg.2016.14.007. YANG Jingbo, LI Xilai, DUAN Songtao, et al. Study on suppression method with dampers against vortex-shedding induced wind vibration of transmission steel tubular tower members [J]. Building Structure, 2016, 46(14): 30-35. DOI: 10.19701/j.jzjg.2016.14.007. (in Chinese)
- [3] 胡常胜,孙成,程峰,等.考虑实际风速的输电塔疲劳寿命分析[J].建筑钢结构进展,2019,21(2):115-120.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2019.02.013. HU Changsheng, SUN Cheng, CHENG Feng, et al. Fatigue life analysis of transmission tower based on the actual wind speed [J]. Progress in Steel Building Structures, 2019, 21(2): 115-120. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2019.02.013. (in Chinese)
- [4] 江文强,墨泽,安利强,等.考虑螺纹柔性的螺栓连接临界松动载荷计算方法[J].机械工程学报,2020,56(15):238-248. DOI:10.3901/JME.2020.15.238. JIANG Wenqiang, MO Ze, AN Liqiang, et al. Computing method of bolted joint critical loosening load with flexible thread [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(15): 238-248. DOI: 10.3901/JME.2020.15.238. (in Chinese)
- [5] AN L Q, WU J, JIANG W Q. Experimental and numerical study of the axial stiffness of bolted joints in steel lattice transmission tower legs [J]. Engineering Structures, 2019, 187: 490-503. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.02.070.
- [6] JIANG W Q, MO Z, YANG L Q, et al. Theoretical study on early stage self-loosening of bolted joint in lattice transmission tower under transverse load [J]. Advanced Steel Construction,

- 2022, 18(2): 574-584. DOI: 10.18057/IJASC.2022.18.2.6.
- [7] 夏谦, 杜海, 冯衡, 等. 输电塔钢管涡激振动控制措施的风洞试验研究[J]. 空气动力学学报, 2023, 41(2): 90-97. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2021.0377.
- XIA Qian, DU Hai, FENG Heng, et al. Wind tunnel test on suppressing vortex-induced vibrations of steel tubes in power transmission towers [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2023, 41(2): 90-97. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2021.0377. (in Chinese)
- [8] 李正良, 韩宜航, 刘超, 等. 基于半刚性连接节点的输电塔塔腿承载力研究[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(4): 25-31. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.04.004.
- LI Zhengliang, HAN Yihang, LIU Chao, et al. A study on the bearing capacity of the transmission tower-leg with semi-rigid joints [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2021, 23(4): 25-31. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.04.004. (in Chinese)
- [9] 邓洪洲, 赵张峰. 输电塔钢管构件涡激振动数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 9-15, 22. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2017.01.002.
- DENG Hongzhou, ZHAO Zhangfeng. Numerical simulation of vortex-induced vibration of steel tubular members in transmission tower [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(1): 9-15, 22. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2017.01.002. (in Chinese)
- [10] 张广芸, 张宏生, 陆念力. Bernoulli-Euler梁横向振动固有频率的轴力影响系数[J]. 工程力学, 2011, 28(10): 65-71.
- ZHANG Guangyun, ZHANG Hongsheng, LU Nianli. The axial load influence coefficient of natural frequencies for lateral vibration of a Bernoulli-Euler beam [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(10): 65-71. (in Chinese)
- [11] GANI F, LÉGERON F. Dynamic response of transmission lines guyed towers under wind loading [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2010, 37(3): 450-465. DOI: 10.1139/109-160.
- [12] TANG Z Q, LI Z L, WANG T. Direct prediction method for semi-rigid behavior of K-joint in transmission towers based on surrogate model [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2023, 23(3): 2350027. DOI: 10.1142/s021945542350027x.
- [13] 俞登科, 杨靖波, 李正良, 等. 考虑节点半刚性的输电塔钢管构件稳定承载力分析[J]. 钢结构(中英文), 2022, 37(5): 36-43. DOI: 10.13206/j.gjgS2112301.
- YU Dengke, YANG Jingbo, LI Zhengliang, et al. Analysis on stability bearing capacity of steel tubular members considering semi-rigid joints in transmission towers [J]. *Steel Construction (Chinese & English)*, 2022, 37(5): 36-43. DOI: 10.13206/j.gjgS2112301. (in Chinese)
- [14] 李正良, 唐正奇, 杨靖波, 等. 输电塔半刚性连接钢管构件轴压稳定性能研究[J]. 工程力学, 2025, 42(1): 175-188. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.10.0911.
- LI Zhengliang, TANG Zhengqi, YANG Jingbo, et al. Study on axial compression stability of steel tubular member with semi-rigid connections in transmission tower [J]. *Engineering Mechanics*, 2025, 42(1): 175-188. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.10.0911. (in Chinese)
- [15] CORRÊA R M, ARNDT M, MACHADO R D. Free in-plane vibration analysis of curved beams by the generalized/extended finite element method [J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2021, 88: 104244. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2021.104244.
- [16] CHEN Z L, YANG Z C, GUO N, et al. An energy finite element method for high frequency vibration analysis of beams with axial force [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 61: 521-539. DOI: 10.1016/j.apm.2018.04.016.
- [17] LUO J, ZHU S Y, ZHAI W M. Exact closed-form solution for free vibration of Euler-Bernoulli and Timoshenko beams with intermediate elastic supports [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 213: 106842. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106842.
- [18] 聂睿, 李天匀, 朱翔, 等. 基于能量变分原理的梁-圆柱壳耦合系统振动特性分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(7): 1-10. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.07.001.
- NIE Rui, LI Tianyun, ZHU Xiang, et al. Vibration characteristics of beam-cylindrical shell coupled system based on energy variational principle [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(7): 1-10. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.07.001. (in Chinese)
- [19] 邓婷, 姜旭瞳, 丁敏, 等. 温室风振分析中的压杆弯曲振动动态刚度矩阵模型[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(1): 120-125. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2018.01.15.
- DENG Ting, JIANG Xutong, DING Min, et al. Dynamic stiffness matrix model for the flexural vibration of compression bar in greenhouse wind vibration analysis [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(1): 120-125. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2018.01.15. (in Chinese)
- [20] 邵天晓. 架空送电线路的电力学计算[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2003: 312-329.
- SHAO Tianxiao. *Mechanical calculation of overhead transmission lines* [M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2003: 312-329. (in Chinese)
- [21] 江文强, 王璋奇, 安利强. 螺栓连接滑移的不确定性对输电铁塔结构内力的影响研究[J]. 结构工程师, 2016, 32(4): 42-50. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2016.04.007.
- JIANG Wenqiang, WANG Zhangqi, AN Liqiang. The uncertainty of bolted joint slippage effects on the inner force of lattice transmission towers [J]. *Structural Engineers*, 2016, 32(4): 42-50. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2016.04.007. (in Chinese)
- [22] 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. DOI: 10.

