

不同组立状态下特高压酒杯塔力学特性分析

王 爽^{1,2}, 刘 铃^{1,2}, 唐 波^{1,2}, 马天缘^{1,2}, 韩启云³, 吴明春³

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002;
3. 安徽送变电工程有限公司, 合肥 230036)

摘要: 特高压大跨越酒杯塔因其较大的塔头尺寸、特殊的曲臂结构, 使得该类铁塔的组立工程相比一般铁塔的组立施工, 难度更大、要求更高。为保障此类铁塔组立工程的安全高效开展, 文中以某 1 000 kV 单回路大跨越酒杯型钢管塔为研究对象, 建立模块化铁塔有限元模型, 对组立至不同状态时的铁塔结构进行模态分析, 获取其固有力学特性; 考虑高度对风速的影响, 对铁塔风荷载进行精确计算, 研究风荷载及重力荷载共同作用下不同组立状态时铁塔结构的力学特性。结果表明: 整塔的前 6 阶振型主要表现为塔头及塔身弯曲和扭转的特点, 且随着铁塔组立高度的增加, 结构自振频率值逐渐降低, 其最大位移和应力总体呈增大的趋势。铁塔组立至塔头 K 节点部位时, 结构最大位移、应力出现激增, 应力最大值为 189.6 MPa, 出现在塔头 K 节点处(上、下曲臂构件连接位置), 施工过程中应对该工况予以高度重视。组装完成的铁塔能抵御 12 级风荷载(34.8 m/s)的作用, 其薄弱杆件部位为塔身第一、二节主材连接处和塔头上、下曲臂构件连接处, 需在铁塔组立及后期运行维护工作中对其重点监测, 确保整塔的安全稳定。

关键词: 特高压酒杯塔; 组立施工; 模块化建模; 风荷载; 力学特性

Analysis of Mechanical Properties of UHV Cup Tower Under Different Assembly States

WANG Shuang^{1,2}, LIU Ling^{1,2}, TANG Bo^{1,2}, MA Tianyuan^{1,2}, HAN Qiyun³, WU Mingchun³

(1. School of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 3. Anhui Electric Power Transmission & Transformation Co., Ltd., Hefei 230036, China)

Abstract: Because of its large tower head size and special crank arm structure, the assembly construction of UHV large span cup tower is more difficult and more demanding than that of general tower. In order to ensure the safe and efficient development of such tower assembly projects, this paper takes a 1 000 kV single-circuit large-span cup-shaped steel pipe tower as the research object, establishes a modular tower finite element model, and performs modal analysis on the tower structure when it is assembled to different states to obtain its inherent mechanical properties. Considering the influence of height on wind speed, the wind load of the tower is accurately calculated, and the mechanical properties of the tower structure under different assembly states under the combined action of wind load and gravity load are studied. The results show that the first six vibration modes of the whole tower are mainly characterized by bending and torsion of the tower head and tower body. With the increase of the height of the tower, the natural frequency of the structure decreases gradually, and the maximum displacement and stress show an increasing trend. When the tower is set up to the K-joint of the tower head, the maximum displacement and stress of the structure increase sharply, and the maximum stress is 189.6 MPa, which appears at the K-joint of the tower head (the connection position of the upper and lower crank members). This working condition should be highly valued in the construction process. The assembled tower can resist the action of 12-level wind load (34.8 m/s). The weak parts of the tower are the joints of the first and second main members of the tower body and the joints of the upper and lower crank arm members of the tower head. It is necessary to focus on monitoring in the tower assembly and later operation and maintenance work to ensure the safety and stability of the whole tower.

Key words: UHV cup tower; erection construction; modular modeling; wind loads; mechanical characteristics

基金项目: 湖北省重点研发计划(2020BAB110); 湖北省输电线路工程技术研究中心(三峡大学)开放基金(2022KXL04).
Project Supported by Key Research and Development Projects of Hubei Province(2020BAB110), Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University(2022KXL04).

0 引言

特高压输电线路是中国电力能源的大动脉,作为其重要组成部分,特高压铁塔的施工组立直接关系到电网建设的安全性和运行的可靠性^[1]。特高压铁塔与常规铁塔相比,高度更高、尺寸更大、质量更重;同时,风荷载对其结构的影响亦更加严重,发生毁坏事故的概率大幅提升^[2]。特高压酒杯塔常被应用于单回大跨越线路,因其塔头尺寸大、曲臂部分较薄弱等结构特点,使得该类铁塔的施工组立难度和安全风险显著增大^[3]。因此,考虑特高压酒杯塔的结构特点,分析风荷载及重力荷载作用下铁塔的力学特性,为铁塔组立技术方案的制定提供关键力学参数和依据,进而提高特高压输电线路施工的安全可靠性,具有重要的理论研究意义和工程应用价值。

目前,已有诸多学者对外荷载作用下输电铁塔结构的力学性能进行了研究。张顺^[4]等人采用计算流体力学数值模拟方法研究龙卷风作用下特高压输电塔的力学特性,分析了风场中不同位置 and 不同风向角下输电塔各塔段的体型系数。文屹^[5]等人利用有限元法,建立某 500 kV 塔线体系模型,设定不同风速、不同导线覆冰厚度等工况,对铁塔力学性能进行分析,找寻出输电铁塔的薄弱点位置。张宏杰^[6]等人对台风与常规风两类风场作用下输电杆塔的受力进行计算,细致分析了台风风场各参数对输电杆塔力学性能的影响。杨风利^[7]等人通过建立特高压酒杯塔曲臂结构的缩比模型并进行风洞试验,获得更为准确的曲臂结构迎风面与背风面体型系数、风荷载降低系数等数据,为酒杯型输电铁塔曲臂角度风荷载的设计提出建议。刘成峰^[8]等人使用 UG 软件建立某 110 kV 直线杆塔的三维模型,采用 Ansys Workbench 平台的 CFX 模块模拟风场,获得输电杆塔表面风压分布,之后将风荷载导入静态结构模块,完成对直线塔力学特性的分析。

从目前的研究现状来看,大多文献的研究对象为常规塔型的完整铁塔结构,针对不同施工组立状态的特高压酒杯塔力学特性研究较少。而在特高压酒杯塔

组立过程中,特别是组立至塔头曲臂部位的 K 节点附近时,铁塔结构在风荷载作用下的安全稳定风险极大。为实现对特高压酒杯塔组立施工全过程安全性的精准把控,制定完善的施工与监测方案,亟需考虑风荷载及重力荷载的共同作用,对不同组立状态的铁塔结构的力学特性进行研究,掌握铁塔的危险组立状态及结构薄弱部位,进而采取有效措施,避免发生铁塔结构失稳和倒塌事故^[9-10]。

文中以某 1 000 kV 单回路大跨越酒杯型钢管塔为研究对象。首先,采用 ANSYS APDL 参数化设计语言,建立模块化酒杯塔模型。然后,运用有限元方法对不同组立状态下的铁塔结构进行模态分析。最后,考虑不同风速、角度风荷载的作用,对完整铁塔结构的力学特性进行分析;并在最不利风速情况下对不同组立状态时铁塔结构的力学特性进行研究,获取其关键力学特性参数,为组塔施工方案的制定提供指导和依据,进而提升铁塔组立施工全过程的安全和效率。

1 酒杯型钢管塔模型建立

1.1 结构尺寸与材料参数

该基 1 000 kV 单回路大跨越酒杯型钢管塔塔高 169 m, 呼称高 155 m, 根开 38.08 m, 两端地线支架间距 79 m, 横担总长度 74 m, 上、下曲臂构件高度分别达到 18.5 m 和 22.5 m。铁塔主材、斜材、辅材所用材料分别为 Q420B 型钢、Q355B 型钢、Q235 型钢, 单根管材最大重量达到 9t, 铁塔所有材料(包括角钢、管材、螺栓、爬梯、平台等)总计重 970.42 t。铁塔正视单线图及结构尺寸参数见图 1, 图 1 中, 序号 1 至 16 表示将铁塔划分为 16 个小段, 用于分段计算铁塔不同高度处所受风荷载, 并在相应位置施加风荷载^[11-12]。铁塔所用材料的材料特性参数见表 1。

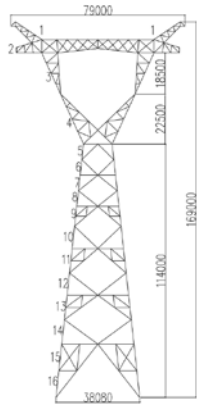


图 1 铁塔尺寸参数及分段示意图 mm

Fig. 1 Tower size parameters and segmented schematic diagram

表 1 材料特性参数

Table 1 Material property parameter

型号	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
Q420B	7 850	2.06×10 ⁵	0.3	420
Q355B	7 850	2.06×10 ⁵	0.3	355
Q235	7 850	2.06×10 ⁵	0.3	235

1.2 铁塔几何建模与简化处理

在建模过程中,将铁塔各连接板位置按单节点处理,不考虑螺栓紧固率的影响,根据图 1 所示的图纸尺寸,利用 ANSYS APDL 参数化设计语言,按 1:1 比例建立模块化铁塔几何线框模型,共计 301 个关键点,942 根线,见图 2。为保证铁塔力学特性分析的准确性,同时兼顾建模和计算的可行与高效,未建立螺栓、连接板、爬梯、平台等结构。运用文[13-14]提出的质量增大系数法对螺栓、连接板、爬梯、平台等结构进行质量等效,保证铁塔模型的质量分布与实体结构具有较高的吻合度。具体等效方法为:将铁塔各段包含螺栓、连接板、爬梯、平台等结构的质量与该段所有管材质量之比定义为该段的质量增大系数,在进行材料密度设置时,将各段铁塔材料的密度乘以对应的质量增大系数 K_1 、 K_2 、...、 K_{15} 、 K_{16} ,从而更加准确地反映铁塔各段的质量分布,减弱未建模部分对整体结构的影响^[15]。

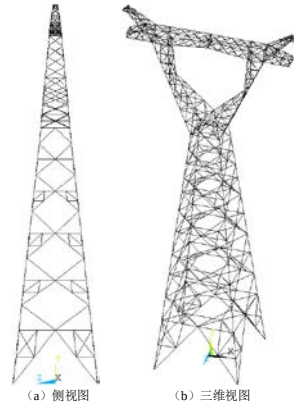


图 2 酒杯型钢管塔线框模型

Fig. 2 Wire frame model of cup-shaped steel pipe tower

1.3 梁杆单元混合有限元模型

针对铁塔类高耸结构的建模分析方法主要有刚架法和桁架法,桁架法又细分为平面桁架法和空间桁架法。由于空间桁架法建模方便且计算简单,因而被广泛应用。空间桁架法采用杆单元建立铁塔杆件,但杆单元未能模拟部分铁塔杆件承受弯矩的情况,与实际铁塔结构的受力不符,使用梁单元模拟则可以解决此问题^[16]。因此,在几何建模的基础上,文中采用 BEAM188 梁单元模拟铁塔主材、斜材,采用 LINK8 杆单元模拟铁塔辅助材,建立更为合理的梁杆单元混合有限元模型。通过 SECTYPE 以及 SECDATA 命令设置梁单元的截面形状与尺寸参数;通过定义实常数设置杆单元的截面面积参数。本文建立的特高压酒杯型钢管塔有限元模型共有 53 种圆管截面,17 种角钢截面,共计 4 304 个节点,4 945 个单元,见图 3。

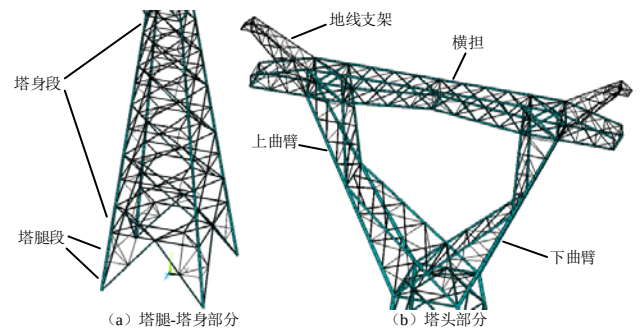


图 3 酒杯型钢管塔有限元模型

Fig. 3 Finite element model of cup-shaped steel pipe tower

2 模态分析

2.1 模态分析原理

针对不同组立状态下的铁塔结构进行模态分析，获得其自振频率、振型等模态信息，掌握其固有力学特性，可以为制定铁塔组立施工措施提供参考和依据。

自振频率作为结构的本征特性，仅与结构自身的质量分布和刚度有关，与其他因素无关。它决定结构在受到荷载作用下的变化情况，当受到与结构自振频率相近的荷载作用时就会发生共振现象^[17]。

振型是指弹性体或弹性系统自身固有的振动形式。常见结构多为多自由度系统，多自由度对应多种振型，其中，与一阶自振频率对应的振型称为第一振型。铁塔结构为典型的多自由度系统，忽略阻尼的影响，其自振运动可以用方程(1)描述

$$[M]\{\ddot{u}\}+[K]\{u\}=0 \tag{1}$$

式(1)中： $[M]$ 为系统质量矩阵； $[K]$ 为系统刚度矩阵； $\{\ddot{u}\}$ 为节点加速度向量； $\{u\}$ 为节点位移向量。

铁塔结构的自振频率可由方程(2)求解得到，进而得到各阶自振频率对应的振型

$$([K]-\omega^2[M])\{\phi\}=0 \tag{2}$$

式(2)中： ω 为自振频率； $\{\phi\}$ 为振型特征向量。

2.2 铁塔的自振频率与振型

对图 2 所示的完整铁塔结构进行模态分析，并利用 Block Lanczos 法^[18]，提取铁塔的前 6 阶自振频率及其对应的振型，见表 2 和图 4、5。其中，X 轴正向为垂直线路方向，Z 轴正向为顺线路方向，Y 轴正向为塔高方向；各阶振型图中，黑色轮廓为铁塔的初始形态，彩色轮廓为铁塔产生位移后的形态。

表 2 铁塔的自振频率与振型特点

Table 2 The natural frequency and vibration mode characteristics of the tower

阶数	自振频率/Hz	振型特点
1	0.799	塔头沿 X 轴正向弯曲
2	0.915	塔头沿 Z 轴正向弯曲
3	1.084	塔头绕 Y 轴扭转
4	2.012	全塔沿 X 轴正向弯曲
5	2.417	全塔沿 Z 轴负向弯曲
6	3.766	塔头沿 X 轴正向、塔身沿 X 轴负向弯曲

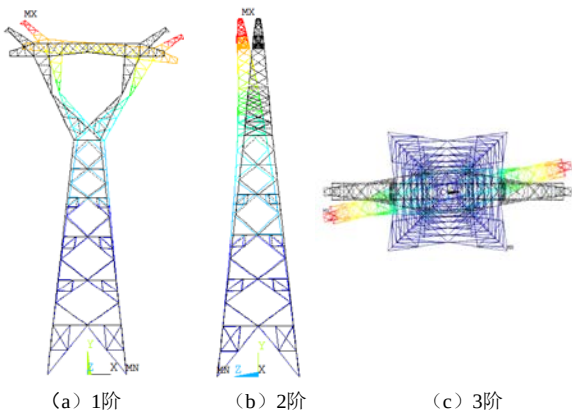


图 4 酒杯塔的 1~3 阶振型图

Fig. 4 The 1~3 order vibration mode diagram of the cup tower

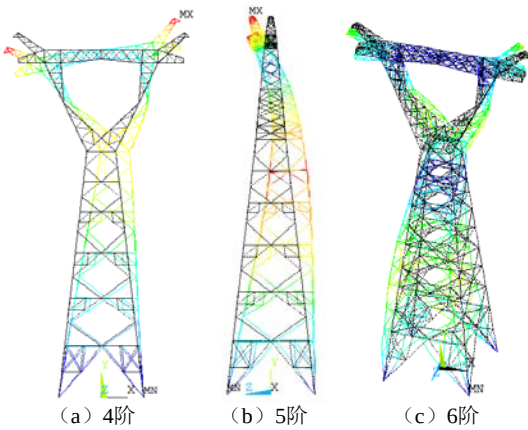


图 5 酒杯塔的 4~6 阶振型图

Fig. 5 The 4~6 order vibration mode diagram of the cup tower

由图 4、5 可知，该酒杯塔的第 1~3 阶振型表现为塔头部位发生较大程度的弯曲与扭转，而第 4~6 阶振型表现为整塔出现较大程度的弯曲与扭转。

根据 GB 50009—2012 建筑结构荷载规范^[19]中给出的结构基本自振周期经验公式计算该铁塔的基本

自振周期,并与有限元仿真计算值进行对比,验证模型的准确性^[20]。结构基本自振周期计算公式为

$$T = (0.007 \sim 0.013)H \quad (3)$$

式(3)中: T 为结构的基本自振周期, s; H 为结构的高度, m。

由式(3)计算可知,该特高压酒杯塔的基本自振周期为 1.183~2.197 s, 自振频率为 0.455~0.845 Hz。对比可知,有限元仿真计算所得自振频率值(0.799 Hz)在规范公式的计算值范围以内(0.455~0.845 Hz), 证明了文中铁塔建模和模态分析的准确性。

2.3 铁塔各组立状态的自振频率

在特高压酒杯塔的组立施工过程中,铁塔组立至不同状态时其几何形状不同、质量分布各异,对应自振频率不同。通过分析和掌握每种铁塔组立状态下结构的自振频率,可以据此采取有效措施,避免发生风激共振现象,确保铁塔施工全过程的安全稳定。

按照图 1 所示铁塔分段情况,自上而下定义 16-1 至 16-15 共 15 种铁塔组立状态,对各铁塔组立状态有限元模型的自振频率进行求解。3 种典型铁塔组立状态见图 6: 图 6(a)为铁塔塔身组立完成(16-5); 图 6(b)为铁塔组立至上曲臂构件(16-3); 图 6(c)为铁塔组立完成(16-1)。计算所得各铁塔组立状态的一阶自振频率值见图 7, 其中,红星处为图 6 三种典型铁塔组立状态的一阶自振频率值。

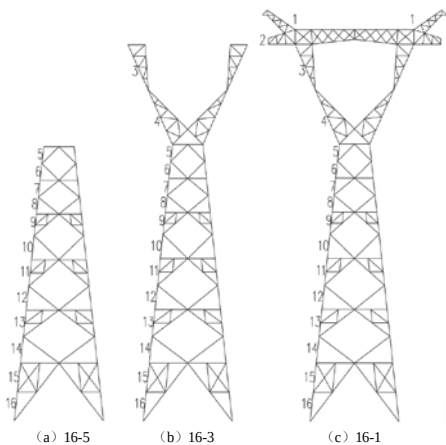


图 6 3 种典型铁塔组立状态

Fig. 6 Three typical tower assembly states

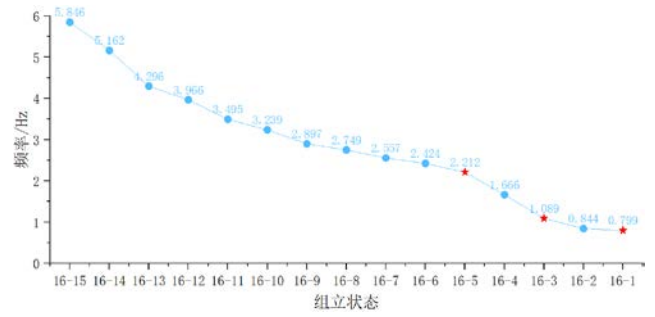


图 7 铁塔各组立状态的一阶自振频率值

Fig. 7 The first-order natural frequency value of each assembly state of the tower

由图 7 可知,随着铁塔组立高度的增加,结构自振频率值逐渐降低。从 16-5 号组立状态到 16-3 号组立状态,结构的自振频率值由 2.212 Hz 降低为 1.089 Hz, 频率变化量相对较大;其原因主要是:相对图 6(a), 图 6(b)增加了上、下曲臂这类质量大且形状不规则的构件,对整塔的质量分布与刚度产生了较大影响。从 16-3 号组立状态到 16-1 号组立状态,结构自振频率值由 1.089 Hz 降低为 0.799 Hz, 频率变化量相对较小;其原因主要为:与图 6(b)相比,图 6(c)增加的横担与地线支架结构质量较小,对整塔的质量分布与刚度影响相对更小。

3 力学特性分析

研究风荷载作用下特高压输电铁塔的力学特性,对优化铁塔组立施工措施、保障施工安全、提高施工效率具有重要意义^[21]。本节对不同铁塔组立状态在风荷载及重力荷载作用下的力学特性进行分析,确定结构薄弱杆件部位,进而为铁塔施工组立过程中的风险管控提供参考。

3.1 等效静风荷载

结构风效应分为静力效应和动力效应^[22]。根据周期长短、风强随时间变化与否将风分为周期较长、风强不随时间变化的平均风和周期较短、风强随时间变化的脉动风。对特高压输电铁塔这类桁架结构而言,其刚度较小,由脉动风为主导引起的结构风效应更为严重。因此,在进行输电铁塔的风荷载计算时,要考虑脉动风的作用^[1]。现行 DL/T 5551—2018 架空输电

线路荷载规范^[23]已有此规定：铁塔在进行抗风设计时应采用风振系数对基本风压进行调整，从而将风的随机作用转化为等效静力荷载进行计算。规定任意高度处静风荷载与对应高度风振系数的乘积作为结构在此高度受到的等效静风荷载。

根据 GB 50009—2012 建筑结构荷载规范和文[24]里的风荷载标准值计算公式，计算得到铁塔不同高度段所受等效静力风荷载。风荷载计算为

$$W_s = W_0 \mu_z \mu_s B \beta_z A_f$$

(4)

式(4)中： W_s 为风向与结构物表面垂直的风荷载标准值，kN； W_0 为基准风压标准值，kN/m²； μ_z 为风压高度变化系数； μ_s 为构件体形系数； B 为覆冰时风荷载增大系数，5 mm 冰区取 1.1，10 mm 冰区取 1.2； β_z 为杆塔风荷载调整系数； A_f 为构件承受风压的投影面积，m²。

按照地面粗糙度的不同，规范^[19]将所有的地形分为 A、B、C、D 四类，各类地区对应不同的风压高度变化系数取值。考虑该特高压大跨越酒杯塔实际所处环境和位置，根据规范规定，应按 B 类地区进行考虑。风向角的规定见图 8，规定 0° 风向为顺线路方向，90° 风向为垂直线路方向。规范规定^[25]：使用荷载标准值校验结构杆件是否产生变形或裂缝；使用荷载设计值即荷载标准值乘分项系数校验结构的强度。对于可变荷载(如风荷载)，其分项系数取 1.4；对于永久荷载(如重力荷载)，其分项系数取 1.2。因此，在对铁塔模型加载时，风荷载为计算值的 1.4 倍，重力荷载为计算值的 1.2 倍，荷载施加情况见图 9。

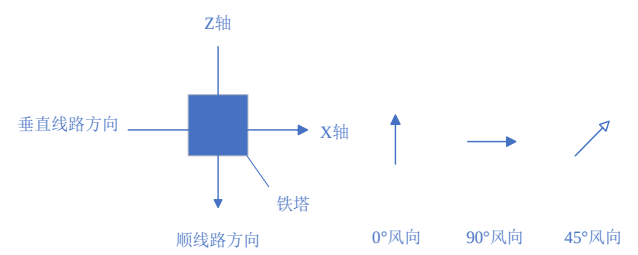


图 8 风向角示意图

Fig. 8 Wind direction angle diagram

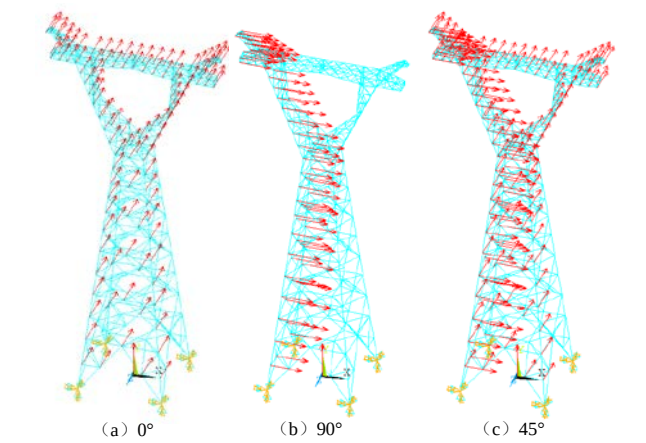


图 9 模型各角度风荷载施加图

Fig. 9 The wind load application diagram of each angle of the model

3.2 铁塔的力学特性分析

设定两种风速条件：10 m 高 50 年一遇 10 min 平均最大风速为 12.3 m/s(6 级风)和 34.8 m/s(12 级风)，均考虑 3 种风向角工况，分析完整铁塔结构在风荷载及重力荷载共同作用下的力学特性。仿真计算所得最大位移、应力见表 3。12 级风荷载作用下铁塔的位移、应力分布情况见图 10-12。

表 3 两种风速条件计算结果对比

Table 3 Comparison of calculation results of two wind speed conditions

参数		conditions		
		0°	90°	45°
最大位移/mm	6 级风	77.5	72.3	89.3
	12 级风	630.1	534.3	680.7
最大冯·米塞斯应力 /MPa	6 级风	45.2	44.4	50.2
	12 级风	163.4	108.5	182.3
最大拉应力/MPa	6 级风	25.4	21.2	24.1
	12 级风	105.3	76.7	117.7
最大压应力/MPa	6 级风	33.8	30.4	38
	12 级风	120.5	89.3	151.9

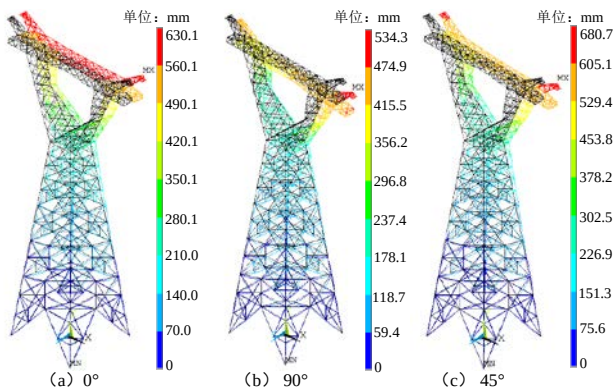


图 10 12 级风荷载作用下铁塔位移分布图

Fig. 10 The displacement distribution of the tower under

12-level wind load

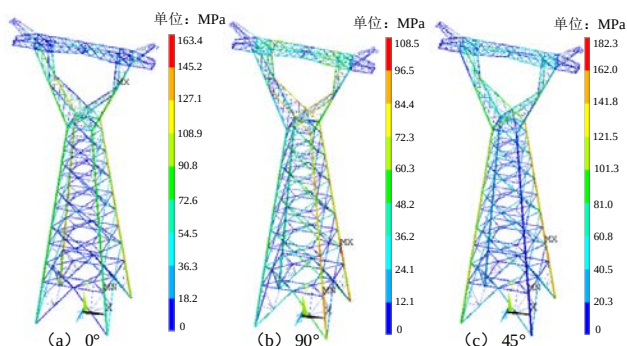


图 11 12 级风荷载作用下铁塔冯·米塞斯应力分布图

Fig. 11 Von Mises stress distribution of the tower under

12-level wind load

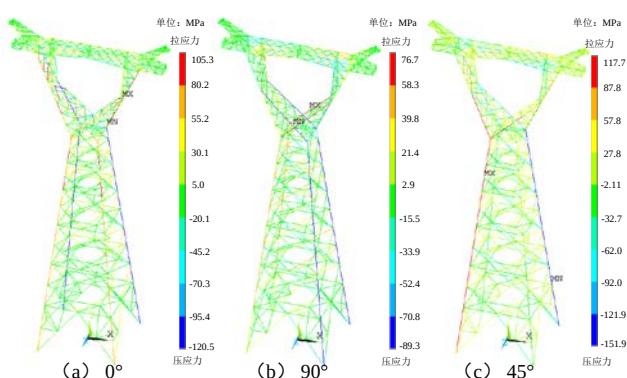


图 12 12 级风荷载作用下铁塔拉、压应力分布图

Fig. 12 The tensile and compressive stress distribution of the tower under 12-level wind load

由表 3 可知,风速的增大使得铁塔结构的位移与应力均随之增大。由图 10 可知,45°风荷载作用下铁塔位移最为严重,达到 680.7 mm,出现在塔头右侧地线支架处。规范规定^[26]:50 m 及以上高度交流线路直线钢管塔倾斜度应小于塔高的千分之五,计算得

到该酒杯塔允许位移值为 845 mm。对比可知,仿真计算值小于规范限值,证明铁塔结构在该工况下安全。

由图 11 可知,45°风荷载作用下铁塔的冯·米塞斯应力值最大,为 182.3 MPa,出现在铁塔塔身右后侧 14 号段与 13 号段主材连接处。0°风荷载作用下铁塔最大冯·米塞斯应力值出现在塔头 K 节点处,为 163.4 MPa;90°风荷载作用下铁塔最大冯·米塞斯应力值出现在铁塔塔身右后侧 14 号段与 13 号段主材连接处,为 108.5 MPa。

可以发现,冯·米塞斯应力较大的部位有铁塔主材、上曲臂构件、下曲臂构件、中横担构件等,对应各杆件相对更危险;而铁塔横隔面、边横担、地线支架等部位冯·米塞斯应力较小,对应各杆件相对更安全。铁塔结构最为薄弱的部位为塔头 K 节点位置(上、下曲臂构件连接位置)与塔身第一、二节主材连接位置,需采取相应措施对这些位置处的杆件着重监管。

由图 12 可知,铁塔迎风面主材受拉(红色),背风面主材受压(蓝色),与实际受力情况相符。45°风荷载作用下铁塔的拉、压应力值最大,最大拉应力值出现在铁塔斜对角线前侧 7 号段主材处,为 117.7 MPa;最大压应力值出现在铁塔斜对角线后侧 14 号段主材处,为 151.9 MPa。

可以发现,铁塔塔身迎风面上端的主材承受较大的拉应力,而背风面下端的主材承受较大的压应力。仿真计算所得冯·米塞斯应力值、拉压应力值均远小于杆件材料允许强度值(235 MPa),证明铁塔结构在该种工况下能够安全稳定运行。

3.3 铁塔各组立状态的力学特性分析

以风速 12 级、45°风荷载及重力荷载作用的工况为例,运用有限元方法,计算不同铁塔组立状态的力学特性,得到各组立状态下铁塔的最大位移与冯·米塞斯应力,见图 13。几种典型铁塔组立状态的位移与应力分布情况见图 14、15。

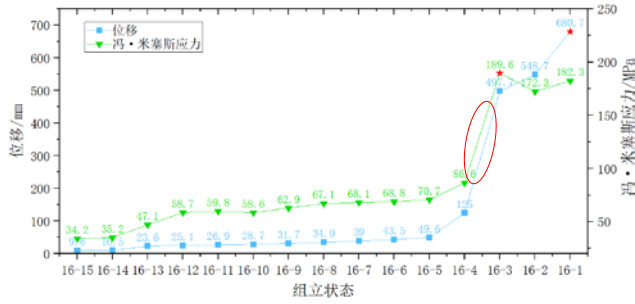


图 13 铁塔各组立状态的最大位移与冯·米塞斯应力

Fig. 13 The maximum displacement and von Mises stress of each vertical state of the tower

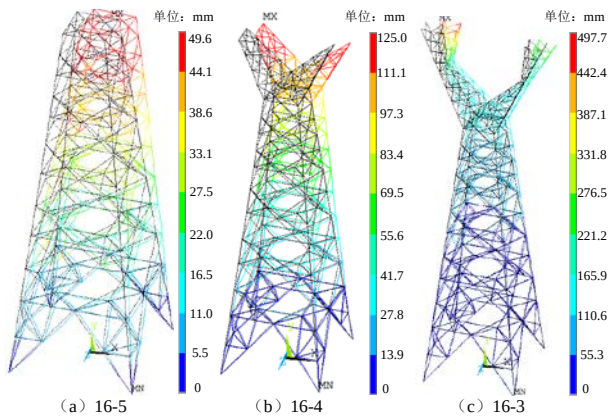


图 14 几种典型铁塔组立状态位移分布图

Fig. 14 Displacement distribution diagram of several typical tower assembly state

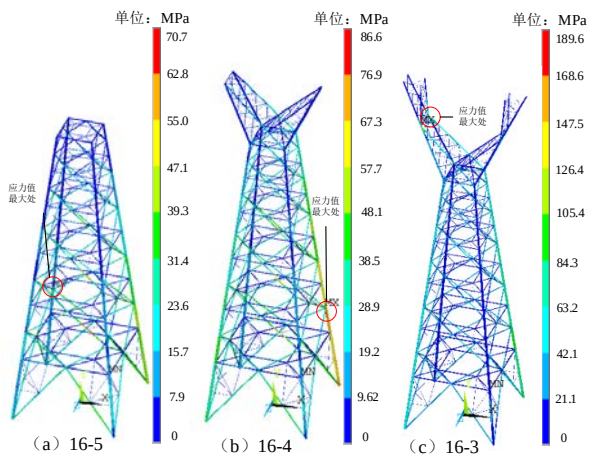


图 15 几种典型铁塔组立状态冯·米塞斯应力分布图

Fig. 15 Von Mises stress distribution diagram of several typical tower assembly states

由图 13 可知,随着铁塔的组立完成,其最大位移与冯·米塞斯应力总体呈增大的趋势。铁塔组立完成时(16-1),结构位移达到最大。这是因为,随着铁塔高度的增加,其所受风荷载也逐渐增大。而在所有

的铁塔组立状态中,铁塔上下曲臂构件组装完成、横担尚未组装时(16-3),其应力达到最大值 189.6 MPa。最大应力值出现在塔头 K 节点处(上、下曲臂构件连接位置),见图 15(c)。这是由于该状态下塔头 K 节点处相对薄弱,在风荷载及自重荷载作用下,该位置容易发生较大的局部变形,从而造成应力集中和显著增大。因此,在铁塔施工组立至该状态时,应通过增设拉线或加大拉线钢丝绳型号等方式对曲臂部位进行固定和加强,防止 K 节点附近因应力过大发生屈服变形和结构失稳。

由图 14、15 可知,几种典型铁塔组立状态下,其最大位移与应力有较大差异,但整体分布规律类似。最大位移均出现在结构顶端,应力较大值均出现在铁塔塔身 14 号段与 13 号段主材连接处、塔头 K 节点等位置。相较 16-4 号组立状态(塔头下曲臂构件组装完成),16-3 号组立状态(塔头上、下曲臂构件组装完成)的最大位移与应力均出现了激增的现象,如图 13 中红色椭圆处所示。这是由于安装上曲臂后,塔头迎风面积增大,风荷载增加;且 K 节点处相对薄弱,结构稳定性差,进而导致位移与应力的激增。

结合图 13-15 可知,在铁塔组立施工过程中,相较塔腿和塔身的组装,塔头部位的组装(上、下曲臂组装环节)风险系数更大,为一铁塔危险组立状态,应加强对铁塔组立至此种状态时安全风险的把控。

4 结论

文中采用 APDL 参数化设计语言,建立某单回路特高压大跨越酒杯型钢管塔的精细化模型,对不同组立状态下的铁塔结构进行模态分析,分析其在风荷载及重力荷载共同作用下的力学特性,得出如下结论:

1)铁塔的自振频率随组塔高度的增加而逐渐降低,完整铁塔的一阶自振频率为 0.799 Hz。完整铁塔的一阶振型表现为沿垂直线路方向弯曲、二阶振型表现为沿顺线路方向弯曲、三阶振型表现为绕垂直方向扭转,振型的多样性表明该酒杯塔的动力特性复杂。

2)铁塔的位移随组塔高度的增加而逐渐增大。在 45°角 12 级风荷载及重力荷载的共同作用下,结构最

大位移出现在塔头右侧地线支架处,为 680.7 mm,低于规范限值。同时,构件最大应力为 182.3 MPa,低于材料的允许强度值(235 MPa),表明铁塔结构安全,此特高压酒杯型钢管塔能够抵御 12 级风荷载的作用。

3)铁塔组立至上曲臂构件时为铁塔的危险组立状态,此时结构的最大位移、应力均显著增大,且应力达到最大值 189.6 MPa,出现在塔头 K 节点处。此外,多数铁塔组立状态下应力最大值出现在塔身第一、二节主材的连接处。因此,在施工过程中应对塔头 K 节点、塔身一二节主材连接处等部位予以重视;可通过布置应力、位移传感器实时监测这类薄弱杆件的运行状态,确保铁塔组立工作的安全顺利开展。

参考文献:

- [1] 赵云龙. 微地形下特高压输电铁塔风振响应特性研究[D]. 福州: 福州大学, 2021.
ZHAO Yunlong. Research on wind-induced vibration response characteristics of UHV transmission tower in micro terrain[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2021.
- [2] 杨荆秋, 朱全军, 冉启鹏, 等. 输电塔-线体系脉动风振耦合分析[J]. 力学季刊, 2023, 44(2): 435-443.
YANG Jingqiu, ZHU Qianjun, RAN Qipeng, et al. Coupling analysis of fluctuating wind pressure response for transmission tower-line system[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2023, 44(2): 435-443.
- [3] 赵 晔. 特高压交流线路铁塔组立工艺研究及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
ZHAO Ye. Research and application of UHV AC transmission tower construction process[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [4] 张 顺, 王振国, 姜文东, 等. 特高压输电塔龙卷风荷载特性的数值模拟[J]. 中国电力, 2023, 56(10): 153-163.
ZHANG Shun, WANG Zhenguo, JIANG Wendong, et al. Numerical study of ultra-high voltage transmission Tower wind loads characteristics against tornado[J]. Electric Power, 2023, 56(10): 153-163.
- [5] 文 屹, 陈易飞, 毛先胤, 等. 500 kV 输电铁塔覆冰风险评估与加固措施[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 250-257.
WEN Yi, CHEN Yifei, MAO Xianyin, et al. Icing risk assessment and reinforcement measures of 500 kV transmission tower[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2023, 42(2): 250-257.
- [6] 张宏杰, 杨靖波, 杨风利, 等. 台风风场参数对输电杆塔力学特性的影响[J]. 中国电力, 2016, 48(2): 41-47.
ZHANG Hongjie, YANG Jingbo, YANG Fengli, et al. Study on the influence of typhoon wind parameters on mechanical characteristics of transmission tower[J]. Electric Power, 2016, 48(2): 41-47.
- [7] 杨风利, 牛华伟, 杨靖波, 等. 酒杯型输电铁塔曲臂风荷载风洞试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(24): 170-176.
YANG Fengli, NIU Huawei, YANG Jingbo, et al. Wind tunnel tests for wind loads of crank arms of cup-type transmission towers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(24): 170-176.
- [8] 刘成峰, 曾广众, 许智贤, 等. 强风下直线杆塔力学特性与加固方法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 106-115.
LIU Chengfeng, ZENG Guangzhong, XU Zhixian, et al. Research on mechanical characteristics and reinforcement method of linear tower under strong wind[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 106-115.
- [9] 宋 玉. 1 000 千伏特高压铁塔组立施工中的抗风能力研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2017.
SONG Yu. Study on wind resistance of 1 000 kV tower erecting construction[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2017.
- [10] 伍 川, 杨晓辉, 赵鹏飞, 等. 基于塔线体系的风荷载作用下输电铁塔薄弱杆件分析[J]. 中国工程机械学报, 2022, 20(6): 504-509.
WU Chuan, YANG Xiaohui, ZHAO Pengfei, et al. Analysis on weak element of transmission tower under wind load based on tower line system[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2022, 20(6): 504-509.
- [11] 段辉顺, 刘生奎, 张玲玲, 等. 门字型输电塔风振响应分

- 析及风振系数的确定[J]. 应用力学学报, 2019, 36(3): 618-624.
- DUAN Huishun, LIU Shengkui, ZHANG Lingling, et al. Study on elastic flexural-torsional buckling of simply supported steel beam under antisymmetric transverse loads[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(3): 618-624.
- [12] 杨子焯, 邓洪洲. 长横担输电塔扭转向等效静力风荷载[J]. 振动与冲击, 2021, 40(3): 125-132.
- YANG Ziyue, DENG Hongzhou. Equivalent static wind load in torsional direction of long cross arm transmission tower[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(3): 125-132.
- [13] 吴新桥, 彭 康, 耿 力, 等. 台风下输电塔风振响应有有限元分析及测试试验[J]. 应用力学学报, 2018, 35(2): 328-332.
- WU Xinqiao, PENG Kang, GENG Li, et al. Reduced-order model for unsteady aerodynamic forces of a variable thickness airfoil and influence analysis[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(2): 328-332.
- [14] 孟遂民, 杨 暘, 康渭铎, 等. 基于 ANSYS 的输电铁塔试验仿真研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(1): 142-145.
- MENG Suimin, YANG Yang, KANG Weihua, et al. Research on experimental simulation of transmission tower based on ANSYS[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(1): 142-145.
- [15] 汪 江, 杜晓峰, 张会武, 等. 淮蚌线淮河大跨越输电塔有限元建模和修正研究[J]. 钢结构, 2009, 24(1): 21-24.
- WANG Jiang, DU Xiaofeng, ZHANG Huiwu, et al. Parametric finite element modeling and updating of EHV power transmission Tower[J]. Steel Construction, 2009, 24(1): 21-24.
- [16] 张 成. 风载作用下输电塔—线体系结构安全性研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- ZHANG Cheng. Safety analysis of transmission tower-line system under wind loadings[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [17] 闫安志, 智晓晓, 段巧巧. 鼓型输电塔的固有模态及地震荷载下的动力学响应分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2014, 33(4): 510-515.
- YAN Anzhi, ZHI Xiaoxiao, DUAN Qiaoqiao. Modal analysis and dynamic response analysis of drum type transmission Tower under seismic load[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2014, 33(4): 510-515.
- [18] ARRANZ F, ABAD J, RAMOS P, et al. On identifying natural frequencies in the JAST80 telescope and validation with a simplified 3-D model[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023(72): 1-13.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [20] 王 飞, 李 正, 杨风利, 等. 特高压酒杯型铁塔地震反应谱分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 968-975.
- WANG Fei, LI Zheng, YANG Fengli, et al. Seismic response spectrum analysis of UHV cup-type steel Tower[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 968-975.
- [21] 王 剑, 王璋奇, 冯砚厅. 在役高压输电铁塔结构振动实测与分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2016, 43(2): 62-65.
- WANG Jian, WANG Zhangqi, FENG Yanting. Measurement and analysis of structure vibration of In-service high voltage transmission Tower[J]. Journal of North China Electric Power University, 2016, 43(2): 62-65.
- [22] 严 锋, 陈正豪, 黄涣青. FPSO 火炬塔风激振动与数值计算方法研究[J]. 广东造船, 2021, 40(6): 32-35.
- YAN Feng, CHEN Zhenghao, HUANG Huanqing. Wind-induced vibration and numerical calculation method of FPSO flare Tower[J]. Guangdong Shipbuilding, 2021, 40(6): 32-35.
- [23] 国家能源局. 架空输电线路荷载规范: DL/T 5551—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- National Energy Bureau of the People's Republic of China. Load code for the design of overhead transmission line:

DL/T 5551—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018.

[24]陈祥和,刘在国,肖琦,等. 输电杆塔及基础设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

CHEN Xianghe, LIU Zaiguo, XIAO Qi, et al. Power transmission tower and its foundation design[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.

[25]中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构可靠度设计统一标准: GB 50068—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Unified standard for reliability design of building structures: GB 50068—2018[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2018.

[26]国家能源局. 架空输电线路运行规程: DL/T 741—2019[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.

National Energy Bureau of the People's Republic of China. Operating code for overhead transmission line: DL/T 741—2019[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2019.

王爽(1987—),男,博士,讲师,主要从事输变电设备智能运维和健康管 理 相 关 研 究 (E-mail : wangshuang@ctgu.edu.cn)。

刘 铃(1999—),男,学士,主要从事输电线路运维和施工技术研究工作(E-mail: liuling19991216@163.com)。