

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.05.019

考虑几何及材料非线性直筒-锥段型钢结构冷却塔风致稳定性研究

柯世堂 朱容宽 王浩

(南京航空航天大学民航学院,南京,211106)

摘要:作为一种新颖的风敏感结构,直筒-锥段型钢结构冷却塔曲面形状和动力特性复杂、结构柔性和风致效应明显增大,整体稳定性是其结构设计的瓶颈之一,尤其是结构几何、材料非线性及其高阶振型的影响。本文采用 CFD 技术数值模拟获得钢结构冷却塔表面风荷载分布模式,基于 ANSYS 软件建立主筒+加强桁架+附属桁架(铰接)耦合的一体化钢结构冷却塔有限元模型,以不同特征值屈曲模态作为初始几何缺陷分布形式,并基于几何及材料双重非线性有限元方法,系统研究了此类钢结构冷却塔在不同风速下低阶和高阶模态的稳定性能,涉及分歧失稳形态、极值失稳形态、临界失稳风速和静风响应。研究表明:考虑几何及材料双重非线性下钢结构冷却塔临界屈曲承载力下降;基阶屈曲波形相对较小,对几何初始缺陷不敏感;随着风速的增大,附属桁架最先发生失稳屈曲,然后依次为加强桁架和主筒。几何初始缺陷系数及阶数的改变对失稳临界风速影响较小,但随着阶数的增加,非线性分析过程中的变形趋势由附属桁架逐渐转移到主筒。所得主要结论可为此类新型钢结构冷却塔的抗风稳定性验算提供参考。

关键词:直筒-锥段型;钢结构冷却塔;数值模拟;材料非线性;几何非线性;风致稳定性

中图分类号:TU33;TU279.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2019)05-0719-09

Wind-Induced Stability of Cylindrical-Cone Steel Structure Cooling Tower Considering Geometry and Material Nonlinearity

KE Shitang, ZHU Rongkuan, WANG Hao

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: As a novel wind-sensitive structure, the shape and dynamic characteristics of the cylindrical-cone steel structure cooling tower is complex, the structural flexibility and the wind-induced effect are significantly increased. Its overall stability is one of the key problems in structural analysis and design, especially the influence of structure geometry, material nonlinearity and high order mode. Firstly, CFD numerical simulation was used to obtain the wind load distribution model. Then, we established a finite element model of the integrated steel structure cooling tower with the main cylinder + stiffening truss + accessory truss (hinged). The buckling modes with different eigenvalues are used as the initial geometric defect distribution. As well as, based on the finite element method of geometric and material dual nonlinearities, we systematically researched the stability of the steel structure cooling tower under different wind speeds, which involves divergent instability, extreme instability, critical wind speed and static wind response. The results show that the critical

基金项目:国家自然科学基金(U1733129,51878351)资助项目;江苏省优秀青年基金(BK20160083)资助项目;博士后科学基金(2013M530255,1202006B)资助项目;江苏省六大人才高峰计划(JZ-026)和江苏高校“青蓝工程”联合资助项目。

收稿日期:2018-01-27;**修订日期:**2018-09-03

通信作者:柯世堂,男,博士,教授, E-mail:keshitang@163.com。

引用格式:柯世堂,朱容宽,王浩.考虑几何及材料非线性直筒-锥段型钢结构冷却塔风致稳定性研究[J].南京航空航天大学学报,2019,51(5):719-727. KE Shitang, ZHU Rongkuan, WANG Hao. Wind-Induced Stability of Cylindrical-Cone Steel Structure Cooling Tower Considering Geometry and Material Nonlinearity[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(5): 719-727.

buckling bearing capacity of steel structure cooling towers is reduced by considering the geometric and material dual nonlinearities. The fundamental buckling waveform is relatively small and is not sensitive to the initial geometric imperfections. With the increase of wind speed, the order of buckling occurs as auxiliary truss, reinforced truss and the main cylinder. The influence of geometric imperfection coefficient and the order number on buckling critical wind speed is small, but with the increase of order, nonlinear analysis in the process of deformation trend by affiliated truss gradually transferred to the main cylinder. The main conclusions can be used as a reference for the verification of wind stability of such new steel structure cooling towers.

Key words: cylindrical-cone; steel structure cooling tower; numerical simulation; material nonlinearity; geometrical nonlinearity; wind-induced stability

随着国内电厂机组容量的不断增大和创新意识的日益凸显,冷却塔的建设朝着超高化、多样化的趋势发展。目前国内已建成的冷却塔大多以钢筋混凝土双曲薄壁结构为主,而钢结构冷却塔作为一种新颖的冷却塔结构形式,由不同截面形式的钢管组成复杂的桁架体系,其构件受力形式与梁单元更为接近。与传统钢筋混凝土冷却塔相比,钢结构冷却塔阻尼更小、频率更低且振型及传力路径复杂,对风荷载更加敏感,其风致振动具有较明显的非线性特征^[1]。

目前,针对大型冷却塔的抗风问题,国内外学者对传统混凝土双曲冷却塔的风荷载^[2-3]、干扰效应^[4-5]、风致响应^[6-7]、整体和局部稳定性^[8-9]等方面进行了大量的研究,相关成果很好地指导了混凝土双曲冷却塔的抗风设计。然而,现有成果鲜有涉及钢结构冷却塔的抗风性能研究,尤其是近年来直筒-锥段型钢结构冷却塔的大量兴建^[10],其风致稳定性是结构安全性的控制因素。因此,考虑几何及材料非线性下直筒-锥段型钢结构冷却塔的风致响应和稳定性影响研究具有重要意义。

鉴于此,以国内拟建的某超大直筒-锥段型钢结构冷却塔(189 m)为研究对象,建立了主筒+加强桁架+附属桁架(铰接)耦合的一体化钢结构冷却塔有限元模型,采用CFD数值模拟获得了直筒-锥段型钢结构冷却塔体系表面风荷载分布模式;在此基础上,分别以不同阶数和系数的特征值屈曲模态作为初始几何缺陷分布形式,考虑几何及材料双重非线性系统研究了此类钢结构冷却塔在不同风速下的稳定性能,涉及分歧点失稳、极值点失稳、临界失稳风速和静风响应,揭示了几何大变形和材料弹塑性对钢结构冷却塔风致稳定性的影响。

1 风荷载数值模拟

1.1 工程概况

以国内西北地区某超大型钢结构冷却塔为背景,该拟建钢结构冷却塔是国内首座采用钢框架内部支承,由主筒、加强桁架和附属桁架组成的直筒-

锥段型钢结构冷却塔。其中,主筒共设置18层钢桁架,加强桁架共5层,均采用Q345钢材;附属桁架共30榀,钢材等级为Q235B。整体塔高189 m,散热器高度29 m,进风口高32.5 m,进风口直径达123.24 m,并在进风口高度以上外覆挡风钢板,表面光滑平整。具体的直筒-锥段型钢结构冷却塔模型示意图如图1所示。

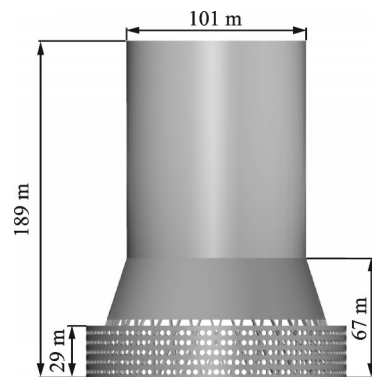


图1 直筒-锥段型钢结构冷却塔模型示意图

Fig.1 Schematic of cylindrical-cone steel structure cooling tower

1.2 参数设置

该超大型直筒-锥段型钢结构为间接空冷却塔,按照实际尺寸建模,以30%透风率考虑正常运行状态下的百叶窗开启效应^[4]。根据该冷却塔实际所处区域确定模拟B类地貌,依据规范^[11]地面粗糙度系数取为0.15,来流风速和湍流度剖面采用指数率形式。

采用CFD技术进行平均风荷载数值模拟,其入口边界条件设为速度入口(Velocity-inlet),计算域出口采用压力出口(Pressure-outlet),相对压力选为零。计算域顶部和侧面采用等效于自由滑移壁面的对称边界(Symmetry);地面及冷却塔表面采用无滑移壁面边界条件(Wall),计算区域及边界条件如图2所示,阻塞率为1.21%。将整个计算域划分为外围区域和局部加密区域以兼顾计算效率和精度,加密区最小网格尺寸为0.5 m,总网格数量约640万,网格质量大于0.4。图3给出了模型网格

划分示意图。图 4 给出了数值模拟的风速和湍流度剖面与规范值对比图。将模拟得到的脉动风谱进行拟合,并和 Davenport 谱、Harris 谱及 Karman 谱进行比较,如图 5 所示。对比分析可认为该风场模拟满足要求。

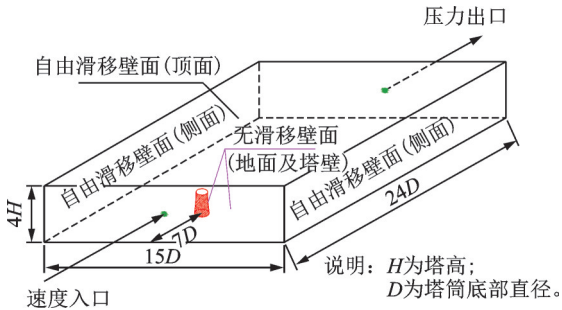


图 2 计算域及边界条件示意图

Fig.2 Sketch of calculation field and boundary conditions

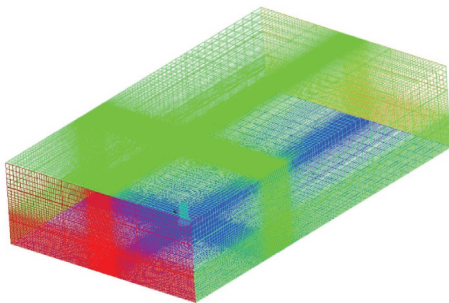


图 3 网格划分示意图

Fig.3 Sketch of mesh generation

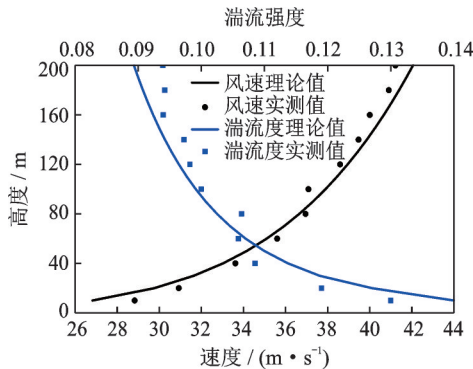


图 4 数值模拟平均风速及湍流度剖面示意图

Fig.4 Vertical profiles of wind speed and turbulence intensity

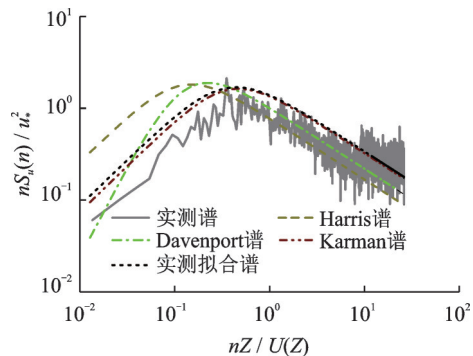
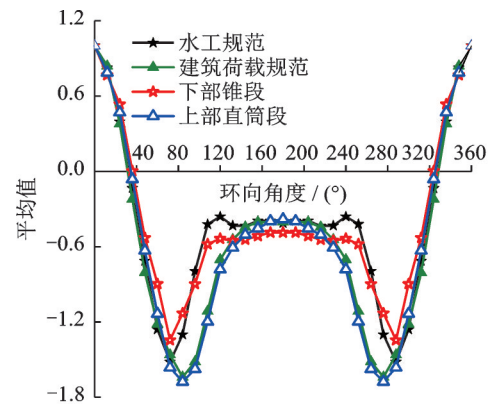


图 5 数值模拟脉动风谱图

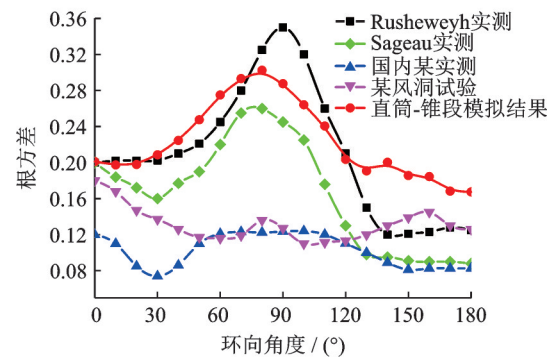
Fig.5 Numerical simulation of fluctuating wind spectrum

1.3 有效性验证

图 6 分别给出了直筒段和锥段外表面体型系数平均值和根方差分布曲线,并分别与水工规范^[12]、建筑结构荷载规范^[11]和国内外双曲冷却塔实测及风洞试验结果^[13-14]进行对比。对比发现:锥段部分体型系数平均值分布曲线的负压极值点和分离点对应角度与水工规范中双曲线冷却塔风压分布曲线较为一致,直筒段体型系数分布曲线与荷载规范中圆截面构筑物分布曲线基本吻合,体型系数根方差沿环向分布规律与国外双曲冷却塔的实测结果吻合较好,总体验证了大涡模拟获得数值结果的有效性。



(a) Average



(b) Root mean square

图 6 大涡模拟与实测及风洞试验结果对比示意图

Fig.6 Comparison of results between large eddy simulation and the measured

1.4 模拟结果

由于直筒-锥段型钢结构冷却塔特殊的气动外形,对其进行平均风压分布特性研究时分为下部锥段和上部直筒段两部分考虑。图 7 给出了各层测点体型系数与相应的规范值的对比数据。其中,上部体型系数直筒段与建筑结构荷载规范圆截面构筑物体型系数分布进行对比;下部锥段体型系数与水工规范双曲线冷却塔体型系数分布进行对比。由图可知:(1)直筒-锥段型冷却塔外表面体型系数分布存在明显的三维效应,直筒段风压分布规律更

接近圆截面构筑物,锥段外表面风压分布规律与双曲线型冷却塔较接近;(2)各测点层尾流区(环向角度 $132^{\circ}\sim 228^{\circ}$)体型系数平均值较为接近,受高度变化影响较小;(3)风压分离点角度随高度的增

大先增加后减小,直筒段中部大多数截面不存在没有明显的风压分离点。后续有限元分析中采用数值模拟得到的直筒-锥段型钢结构冷却塔表面三维风荷载分布模式进行加载计算。

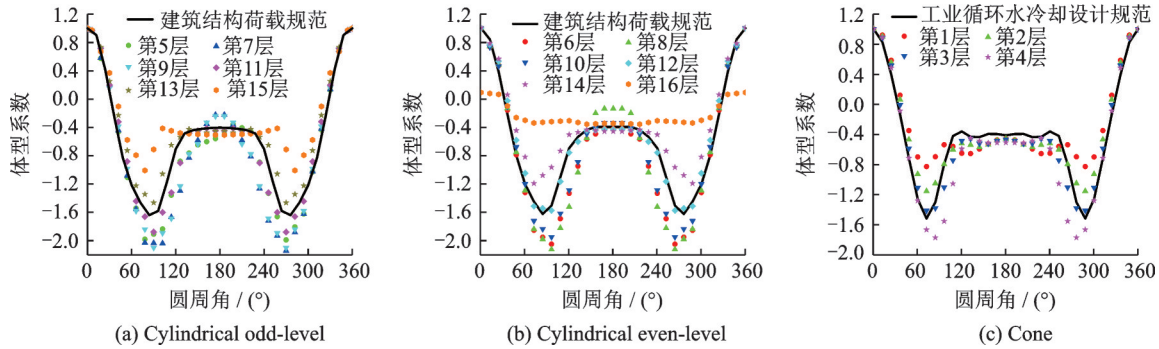


图7 外表面各层体型系数分布曲线与规范曲线对比图

Fig.7 Collation map of figure coefficient of each surface layer

2 有限元建模及模态分析

2.1 模型建立

基于ANSYS的参数化设计语言对钢结构冷却塔进行有限元建模。模型主要包括主筒三角形网格梁柱、刚性加强环桁架、外部附属桁架3部分,附属桁架上部和下部分别与主筒和地面铰接。钢结构冷却塔杆件之间的连接在结构整体分析时简化为刚接节点,采用BEAM188梁单元模拟结构杆件。通过增大桁架构件密度的方法考虑蒙皮的附加质量,将材料密度乘以1.15的系数后作为钢结构冷却塔的整体等效密度^[13]。考虑材料非线性时,根据理想钢材拉伸实验应力-应变曲线的特点,选用双线性等向强化模型^[14]。图8给出该超大直筒-锥段型钢结构冷却塔各组成部分示意图。

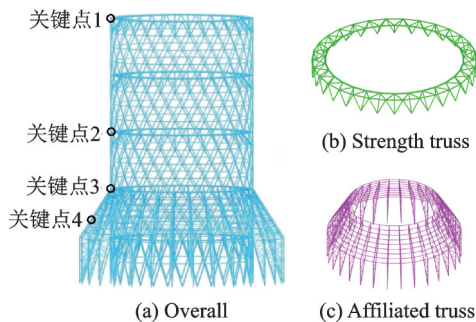


图8 钢结构冷却塔有限元模型示意图

Fig.8 Finite element model of steel structure cooling tower

2.2 模态分析

图9给出了钢结构冷却塔前100阶自振频率变化曲线及典型振型图,由图可见,直筒-锥段型钢结构冷却塔的基阶频为0.75 Hz,在第3~35阶存在一个

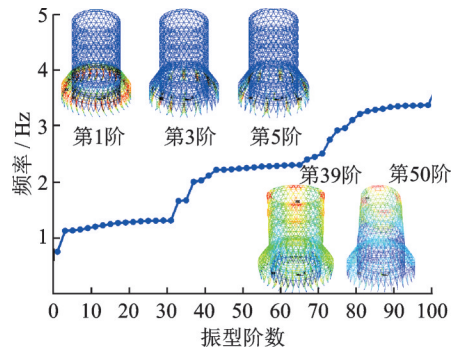


图9 钢结构冷却塔模型前100阶频率图

Fig.9 The former 100 order, frequency diagram of steel structure cooling tower model

频率平缓段,随后频率随阶数的增长出现陡直段;由于附属桁架每榀之间的联系横杆刚度较弱,平缓段的结构振型多呈现为附属桁架的环向扭转,在陡直段中随着阶数的增大结构的主要变形从附属桁架转移至塔顶,在36阶左右出现明显的呼吸振型。

3 风致稳定性分析

3.1 线性特征值屈曲分析

线性稳定性分析可归结为求解线性特征值问题^[15],即

$$[K_e + p(K_u + K_G)]\phi = 0 \quad (1)$$

式中: K_e 为结构的弹性刚度矩阵,为结构的初始位移矩阵; K_G 为初应力矩阵; K_u 为结构的初始位移矩阵; p 为特征值; ϕ 为位移模态。

若忽略 K_u ,则得到经典稳定分析的特征方程

$$(K_e + pK_G)\phi = 0 \quad (2)$$

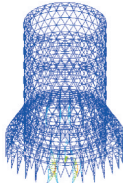
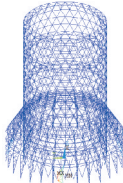
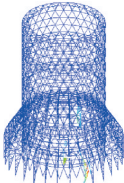
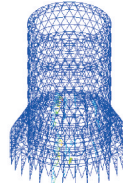
式中: p 可解得一系列特征值 p_1, p_2, p_3, \dots 。最小特征值 p_1 即为结构线性稳定分析的临界载荷,相应的位移模态 ϕ_1 为结构失稳的屈曲模态。

表 1 给出了钢结构冷却塔模型第 1, 5, 8 和 50 阶屈曲模态, 图 10 给出了前 50 阶屈曲系数变化曲线示意图。结合表 1 和图 10 可知, 钢结构冷却塔主筒整体变形均较小, 仅在附属桁架处局部区域

呈波浪状变形且屈曲波形相对较小; 前 50 阶屈曲模态下钢结构冷却塔均未发生明显的整体屈曲, 仅在第 43 阶屈曲模态时附属桁架发生了整体屈曲。

表 1 钢结构冷却塔屈曲模态

Tab.1 Buckling modes of steel structure cooling tower

典型阶数	1 阶	5 阶	8 阶	50 阶
屈曲系数	7.667	8.584	11.580	38.406
临界风速/(m·s ⁻¹)	74.29	78.61	91.30	166.27
屈曲模态				

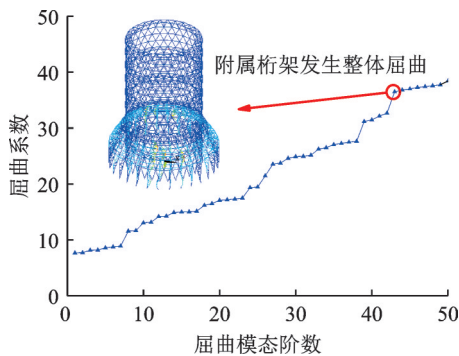


图 10 前 50 阶屈曲系数变化曲线图

Fig.10 The first 50 orders buckling coefficient curve

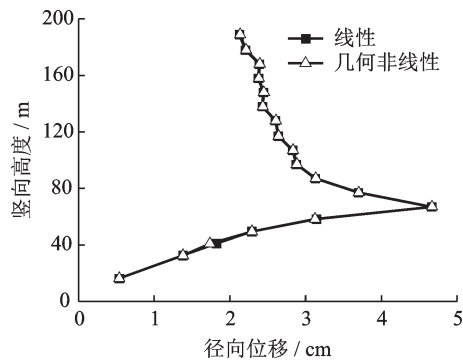


图 11 主筒位移响应示意图

Fig.11 Displacement response of the main cylinder

3.2 非线性屈曲分析

3.2.1 几何非线性影响

钢结构冷却塔几何非线性大变形中结构应变仍为小量, 对其进行几何非线性大变形分析时材料应力-应变关系仍为线性, 其平衡方程由变形后的几何关系描述, 但结构刚度特性需用切线刚度矩阵描述^[16], 即

$$K = K_0 + K_G + K_L \quad (3)$$

式中: K_0 为小位移(弹性)刚度矩阵, 与单元节点位移无关; K_L 为大位移刚度矩阵, 与单元节点位移有关。

图 11—13 分别给出了钢结构冷却塔主筒、附属桁架和加强桁架的位移响应示意图, 从图中可发现: (1) 在迎风面处钢结构冷却塔主筒考虑线性 and 几何非线性径向位移随高度的变化趋势几乎相同, 两者最大径向位移位于锥段顶部(67 m)处, 最大位移对几何非线性影响不敏感。(2) 加强桁架位于主筒内部, 在环向起着约束主筒径向变形的作用。钢结构冷却塔的典型层径向位移大小和变化沿 0° 呈对称分布, 其中最大径向负位移 -0.041 出现在

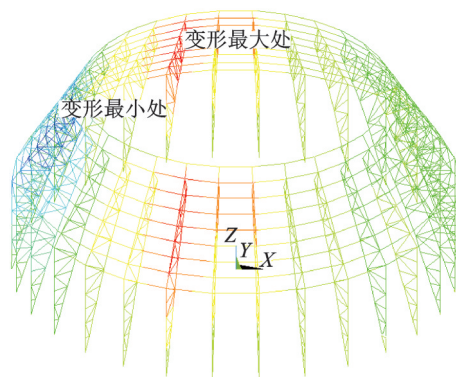


图 12 附属桁架变形示意图

Fig.12 Deformation of the attached truss

正迎风角 0° 处, 最大正位移 0.036 出现在 ±70° 附近; 在 0°~45° 范围内, 径向位移为负, 且逐渐减小; 45°~132° 范围内, 径向位移为正, 先增大后减小; 132°~180° 范围内, 径向位移为负, 逐渐增大且均在迎风面处产生最大位移。

分别选取位于主筒顶部迎风面处、第 3 层加强桁架变形最大处、附属桁架与主筒铰接处及附属桁架变形最大处的 4 个关键点(见图 8(a))进行非线性

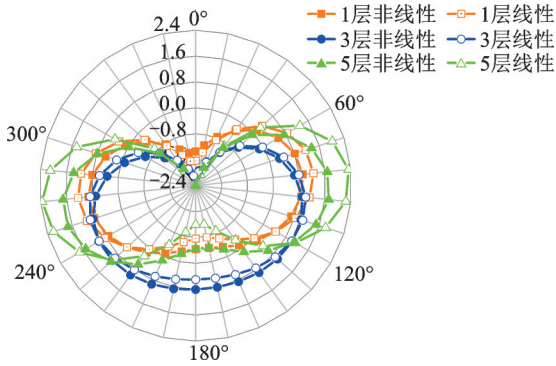


图13 加强桁架典型层位移响应示意图

Fig.13 Schematic of displacement response of a typical truss

分析。采用逐级加载及弧长积分法^[17]对钢结构冷却塔仅考虑几何非线性效应的稳定性分析,由变形位移随风速变化的斜率确定临界风速。图14给出了4个关键点的位移随风速变化示意图。对比可得:附属桁架最先进入非线性状态,即“不稳定平衡状态”,此时,结构刚度显著下降,但承载能力仍可继续上升;当风速在55 m/s时主筒及附属桁架与主筒铰接处出现位移突变,此段风速仍远大于当地50年一遇最大基本风速26.83 m/s,结构偏于安全。

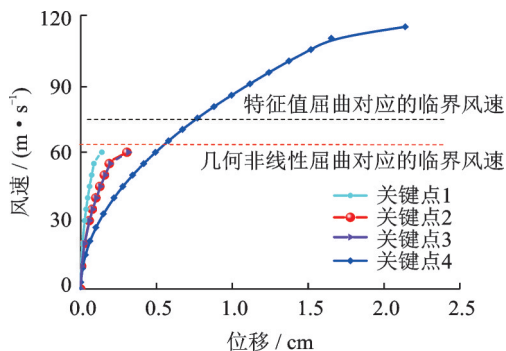


图14 4个关键点的风速-位移曲线

Fig.14 Wind speed vs. displacement curves of four key points

直筒-锥段型钢结构冷却塔在考虑几何非线性下所能承受的临界风速比特征值屈曲分析所得到的临界风速降低了14%。这是由于线性特征值是由线性屈曲方程^[14]计算得到的,受特征值屈曲计算的收敛条件的限制,若钢结构冷却塔局部极小区域内的刚度矩阵发生异常,就默认为达到屈曲。

3.2.2 双重非线性影响

基于共转法^[18]建立空间钢框架结构非线性增量平衡方程为

$$[\mathbf{K}_{\text{EPT}}] \{\Delta \mathbf{U}\} = \{\Delta \mathbf{F}\} \quad (4)$$

$$[\mathbf{K}_{\text{EPT}}] = \sum [\mathbf{R}_g^T] [\mathbf{k}_{\text{EPT}}] [\mathbf{R}_g] \quad (5)$$

式中: $\{\Delta \mathbf{U}\}$ 为位移增量; $\{\Delta \mathbf{F}\}$ 为力增量; $[\mathbf{k}_{\text{EPT}}]$ 为

非弹性切线刚度矩阵; $[\mathbf{K}_{\text{EPT}}]$ 为结构刚度矩阵; $[\mathbf{R}_g^T]$ 为转换矩阵, $[\mathbf{R}]$ 表示任一当前时刻 T 时单元局部坐标系到结构整体坐标系的转换矩阵,可由空间解析几何的相关运算导出。由于 $[\mathbf{K}_{\text{EPT}}]$ 中同时考虑几何与材料非线性,因此用位移增量法进行近极值点和后屈曲分析,以确定结构的极限承载力。

当构件进入弹塑性或塑性阶段,采用一致缺陷模态法^[15]并不能反映整个非线性分析过程中的变形趋势。针对钢结构冷却塔这类体型特殊且受力复杂的结构,有必要进一步探讨不同大小和阶数的初始缺陷对稳定性能的影响,分别取无缺陷结构和初始缺陷为主筒直径的1/300,1/700及1/1000,以上文分析得到的初阶特征值屈曲模态作为结构的初始几何缺陷模态分布模式。4个关键点在不同初始几何缺陷系数下风速随位移的变化曲线如图15所示。由图可知:(1)考虑双重非线性影响使得主筒较早进入非线性状态,且在附属桁架与主筒的铰接点处首先达到极值失稳状态,此时钢结构冷却塔的整体稳定承载力进一步降低;(2)不同初始几何缺陷比例系数对4个关键点的位移变化趋势影响较小,直筒-锥段型钢结构冷却塔的初阶屈曲波形相对较小,以初阶屈曲模态分布的初始几何缺陷对此类钢结构冷却塔影响较弱。

为研究高阶屈曲模态对此类钢结构冷却塔的风致稳定影响,分别以1,5,10,50,100,150阶弹性特征值屈曲模态作为初始几何缺陷分布模式,对直筒-锥段型钢结构冷却塔进行双重非线性分析。图16给出了4个关键点在考虑不同初始几何缺陷形式下位移随风速的变化曲线。

对比可知:(1)初始缺陷阶数的改变对主筒顶部迎风面处(关键点1)位移影响差别较大,在临界风速下50,100,150阶位移与初阶相比分别增大了52.63%,1.05%及1.32%;(2)第3层加强桁架变形最大处(关键点2)在不同初始缺陷形式下的风速位移曲线分布趋势几乎相同,随着阶数的增加,该位置没有出现明显的非线性特征;(3)在低阶初始缺陷影响下附属桁架与主筒铰接处(关键点3)的风速-位移曲线分布趋势几乎相同,而高阶差异较大,但出现屈服平台时的临界风速几乎相同;(4)附属桁架变形最大处(关键点4)在第5阶发生整体曲线下降突变,在第100阶屈曲模态的影响下进入弹塑性阶段的临界风速较其他阶数提高了近25%。

图17给出了不同阶数初始几何缺陷影响下钢结构冷却塔的屈曲失稳位移云图,表2给出了考虑线弹性、几何非线性及双重非线性情况下直筒-锥

段型钢结构冷却塔失稳信息列表。对比可知:(1)考虑几何及双重非线性影响的钢结构冷却塔屈曲临界风速分别仅为不考虑非线性效应冷却塔屈曲临界风速的 14% 及 24%;(2)考虑双重非线性较仅考虑几何非线性效应对钢结构冷却塔主筒迎风面

处影响较大,其他区域影响较小,且随着阶数的变化,位移响应由附属桁架扩展到主筒处;(3)考虑双重非线性影响时冷却塔屈曲失稳机理为材料屈服导致的结构部分构件刚度丧失,进而降低了结构的稳定承载力。

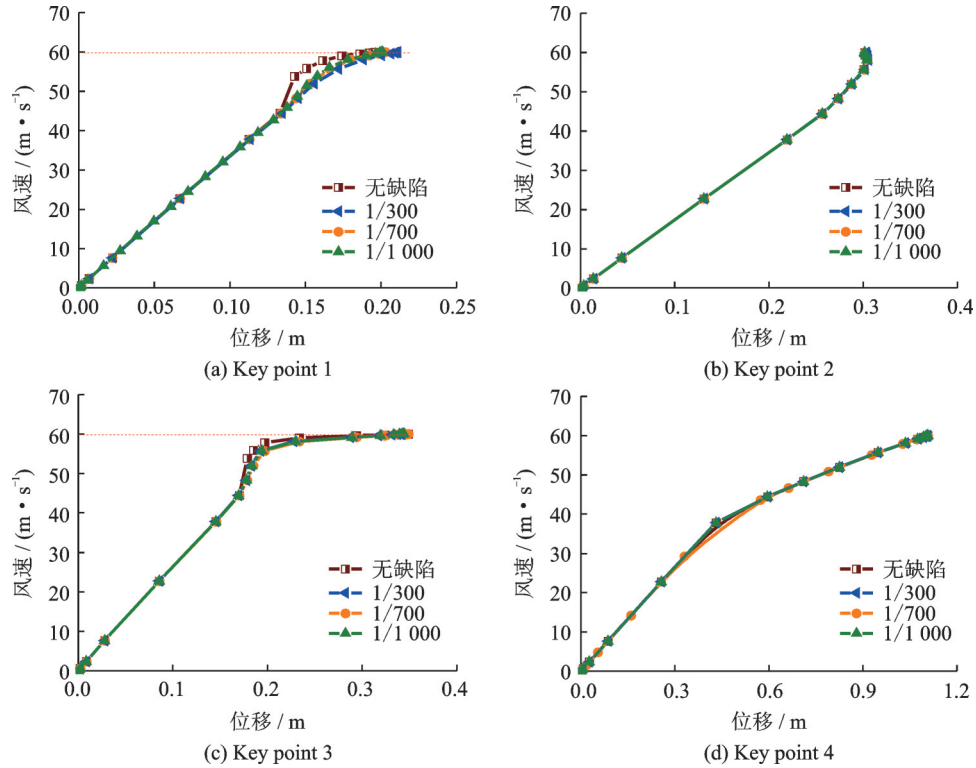


图 15 不同初始缺陷系数下 4 个关键点的位移-风速曲线

Fig.15 Displacement vs. wind speed curves for four key points under different initial defect coefficients

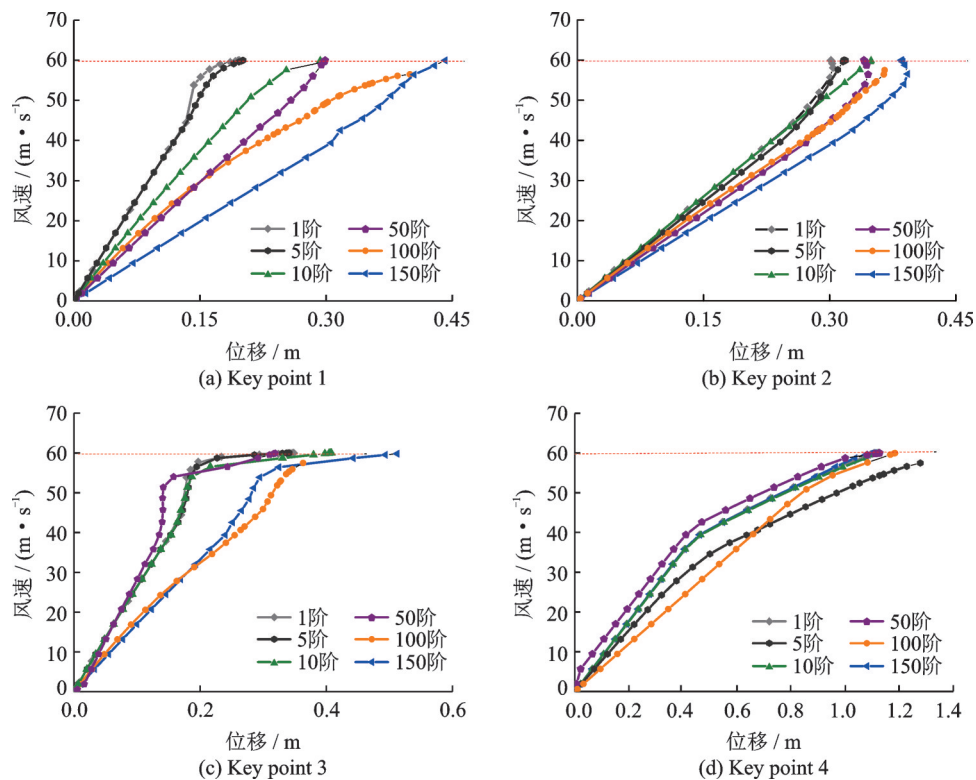


图 16 不同初始缺陷形式下 4 个关键点的位移-风速曲线

Fig.16 Displacement-wind speed curves for four key points under different initial defects

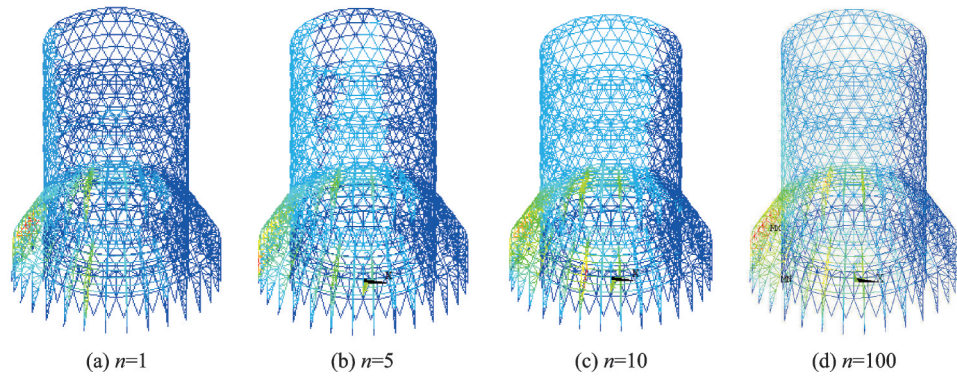


图17 不同阶数初始几何缺陷影响下钢结构冷却塔的屈曲失稳位移云图

Fig.17 Buckling instability of steel structure cooling tower under the influence of initial geometric defects of different orders

表2 考虑线弹性、几何非线性及双重非线性情况下直筒-锥段型钢结构冷却塔失稳信息列表

Tab.2 Instability information list of cylindrical-cone steel structure cooling tower considering linear elasticity, geometric nonlinearity and double nonlinearity

参数	线性	几何非线性	双重非线性
屈曲系数	7.667	5.911	4.998
临界风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	74.29	65.23	59.985
最大位移/m	1.053	1.166	1.123

4 结 论

采用计算流体动力学对新颖的超大型直筒-锥段型钢结构冷却塔进行了风荷载数值模拟,再分别针对考虑线弹性、几何非线性和双重非线性下的风致稳定性进行了系统分析,探讨了此类冷却塔的临界风速与失稳形态及作用机理。得到如下主要结论:

(1)直筒-锥段型钢结构冷却塔体型特殊,受力复杂,屈曲模态波形相对较小,均在附属桁架处产生波浪形屈曲,附属桁架的增设能有效地将主体结构的局部屈曲变形转移到附属桁架上,对钢结构冷却塔主体结构稳定性起到重要的保护作用。

(2)几何初始缺陷系数及阶数的改变对此类直筒-锥段型钢结构冷却塔的临界风速影响较小,但随着阶数的增加,非线性分析过程中的变形趋势由附属桁架逐渐转移到主筒。当初始几何缺陷超过一定范围后,附属桁架已严重偏离原来的曲面形状。

(3)考虑几何和双重非线性效应下钢结构冷却塔的临界屈曲模态在附属桁架处均发生了整体屈曲,且此时变形已扩展到直筒处。附属桁架的局部区域首先发生屈曲,导致结构所受荷载发生转移,但仍能保证整体结构可以继续承载。当结构设计

荷载小于特征值屈曲荷载时,线弹性有限元分析结果偏于危险,此时采用几何及材料双重非线性有限元方法可更真实反映此类结构的风致稳定性能。

参考文献:

- [1] 侯宪安,李霖.伊朗、叙利亚、亚美尼亚电厂冷却塔应用情况调查[C]//中国电力规划设计协会土水专委会水工专业2015技术研讨会.合肥:电力勘测设计,2015.
HOU Xian'an, LI Lin. Investigation of cooling towers in power plants of Iran, Syria and Armenia[C]//China Association of Electric Power Planning and Design of Soil Water of Hydraulic Professional 2015 Technology Seminar. Hefei: Electric Survey Design, 2015.
- [2] 邹云峰,何旭辉,谭立新,等.特大型冷却塔单塔内表面风荷载三维效应及其设计取值[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,32(1):76-82.
ZOU Yunfeng, HE Xuhui, TAN Lixin, et al. Three-dimensional effect and its design value of inter surface wind loading for single super-large cooling tower[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2015, 32(1): 76-82.
- [3] 刘若斐,沈国辉,孙炳楠.大型冷却塔风荷载的数值模拟研究[J].工程力学,2006,23(S1):177-183.
LIU Ruofei, SHEN Guohui, SUN Bingnan. Numerical simulation study of wind load on large hyperbolic cooling towers[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(S1): 177-183.
- [4] KE Shitang, LIANG Jun, ZHAO Lin, et al. Influence of ventilation rate on the aerodynamic interference for two IDCTs by CFD[J]. Wind and Structures, An International Journal, 2015, 20(3): 449-468.
- [5] 柯世堂,赵林,葛耀君.大型双曲冷却塔表面脉动风压随机特性——风压极值探讨[J].实验流体力学,2010,24(4):7-12.

- KE Shitang, ZHAO Lin, GE Yaojun. Features of fluctuating wind pressure on large hyperbolic cooling tower: Discussions on extreme wind pressure[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2010, 24(4): 7-12.
- [6] 赵林, 李鹏飞, 葛耀君. 等效静风荷载下特大型冷却塔受力性能分析[J]. 工程力学, 2008, 25(7): 79-86. ZHAO Lin, LI Pengfei, GE Yaojun. Numerical investigation on performance of super large cooling towers under equivalent static wind load[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(7): 79-86.
- [7] 柯世堂, 赵林, 张军锋, 等. 电厂超大型排烟冷却塔风洞试验与稳定性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(2): 114-118. KE Shitang, ZHAO Lin, ZHANG Junfeng, et al. Wind tunnel test and stability performance analysis of super large cooling towers with gas flue in power plant [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(2): 114-118.
- [8] 张军锋, 赵林, 柯世堂, 等. 大型冷却塔双塔组合表面风压干扰效应试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(4): 81-87. ZHANG Junfeng, ZHAO Lin, KE Shitang, et al. Wind tunnel investigation on wind-pressure interference effects for two large hyperboloidal cooling towers [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(4): 81-87.
- [9] 徐渊函, 沈国辉, 张坚, 等. 表面风压分布对冷却塔风致响应和局部稳定性的影响[J]. 振动与冲击, 2016, 35(19): 63-69. XU Yuanhan, SHEN Guohui, ZHANG Jian, et al. Influence of wind pressure distribution on wind-induced responses and local stability of a cooling tower [J]. The Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(19): 63-69.
- [10] 柯世堂. 钢结构冷却塔数值风洞模拟试验及风振系数研究报告[R]. 南京: 南京航空航天大学工程试验研究中心, 2015. KE Shitang. The study of numerical wind tunnel simulation test and wind vibration coefficient of steel structure cooling tower [R]. Nanjing: Research Center of Nanjing Aerospace University, 2015.
- [11] 中华人民共和国建设部.GB50009—2012, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. The Construction Department of the People's Republic of China. GB50009—2012, Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [12] 中华人民共和国建设部.GB/T 50102—2014, 工业循环水冷却设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. The Construction Department of the People's Republic of China. GB/T 50102—2014, Code for design of cooling for industrial recirculating water [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [13] 王浩. 大型钢结构冷却塔风荷载特性及风振系数研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017. WANG Hao. Large-scale steel structure cooling tower wind load characteristics and wind-induced vibration coefficient [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [14] 郑廷银, 赵惠麟. 空间钢框架结构的改进双重非线性分析[J]. 工程力学, 2003, 20(6): 202-208. ZHENG Tingyin, ZHAO Huilin. Modified dual nonlinear analysis of space steel frame structures [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(6): 202-208.
- [15] 中华人民共和国建设部.JGJ7—2010, 空间网格结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑出版社, 2010. The Construction Department of the People's Republic of China. JGJ7—2010, Space grid structure technology discipline [S]. Beijing: China Architecture Press, 2010.
- [16] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. WANG Xucheng. Finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [17] 潘家英, 张国政, 程庆国. 大跨度桥梁极限承载力的几何与材料非线性耦合分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(1): 5-8. PAN Jiaying, ZHANG Guozheng, CHENG Qingguo. Geometric and material nonlinear coupling analysis of ultimate bearing capacity of large-span bridges [J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 2000, 33(1): 5-8.
- [18] NISHIMURA H, TANIKE Y. Aerodynamic characteristics of fluctuating forces on a circular cylinder[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2001, 89(1): 713-723.