

超高冷却塔风振响应特性研究*

叶俊辰¹ 侯宪安² 牛华伟^{1†} 李红星²

(1. 湖南大学 土木工程学院 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室,长沙 410082)

(2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院,西安 710075)

摘要 以一座 242.4 m 高的钢筋混凝土双曲线自然通风冷却塔为研究对象,开展刚性模型风洞测压试验,并通过表面粗糙度控制实现雷诺数模拟,获得与《工业循环水冷却设计规范》中光滑塔与 K1.0 有肋塔的体型系数设计曲线高度一致的风压分布.将测得风压时程按相似关系换算至原型结构,建立包含壳体与人字柱体系的有限元模型,计算冷却塔在基准风作用下的风振位移响应与风振系数.结果表明,超高冷却塔沿高度方向的风振系数呈单调增大趋势,喉部区域约为 1.48,显著低于规范取值 1.9;当阻尼比由 5% 降至 2% 时,风振系数增幅不足 1%,结构风振响应主要受脉动风主导,对阻尼变化不敏感;考虑电厂周边建筑后,风压分布与风振系数整体变化较小,但在部分风向角下风振系数显著增大至 1.66.

关键词 超高冷却塔, 风洞试验, 雷诺数模拟, 风压分布, 风振响应

中图分类号: TU33

文献标志码: A

Wind-Induced Response Characteristics of a Super High Cooling Tower*

Ye Junchen¹ Hou Xianan² Niu Huawei^{1†} Li Hongxing²

(1. State Key Laboratory of Bridge Safety and Resilience, College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

(2. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China)

Abstract A 242.4 m high reinforced concrete hyperbolic natural-draft cooling tower is taken as the engineering prototype. Rigid-model wind tunnel pressure tests are conducted, and Reynolds number effects are simulated by controlling the surface roughness of the model. With an appropriate roughness arrangement, the measured shape coefficients agree very well with the design curves for the smooth tower and the K1.0 ribbed tower specified in the Code for Design of Industrial Circulating Cooling Water. The measured pressure time histories are then converted to the prototype scale according to similarity laws and applied to a finite element model that includes both the shell and the V-shaped concrete-filled steel tube columns. The wind-induced radial displacement responses and wind vibration coefficients of the cooling tower under the basic wind action are obtained. The results show that the wind vibration coefficient increases monotonically along the height, reaching about 1.48 near the throat, which is significantly lower than the code value of 1.9. When the structural damping ratio decreases from 5% to 2%, the increase in wind vibration coefficient is less than 1%, indicating that the response is mainly governed by buffeting produced by turbulent wind and is not sensitive to damping within this range. Considering the surrounding buildings of the power plant, the overall changes in wind pressure distribution and wind vi-

2025-12-19 收到第 1 稿,2025-12-28 收到修改稿.

* 国家重点研发计划项目(2025YFF0519700),湖南省科技创新计划资助(2023RC1036);National Key R&D Program of China (2025YFF0519700), the Science and Technology Innovation Program of Hunan Province(2023RC1036).

† 通信作者 E-mail: niuhw@hnu.edu.cn

bration coefficients are small, and only for several unfavorable wind directions does the maximum wind vibration coefficient increase slightly to about 1.66.

Key words super high cooling tower, wind tunnel test, reynolds number simulation, wind pressure distribution, wind-induced response

引言

冷却塔是火力发电厂和大型工业装置中广泛采用的高耸薄壁结构. 该类结构具有体型庞大、自重相对较小、壳体厚径比极小以及开口复杂等特点, 在风荷载作用下表现出明显的柔性壳体动力特性^[1-3]. 与重力荷载和温度荷载相比, 风荷载通常为控制性荷载, 既影响结构的承载安全, 又直接关系到正常运行工况下的服务性能^[4-7]. 工程实践表明, 冷却塔在强风作用下可能产生较大侧移和振动, 甚至发生局部屈曲和整体失效, 风致效应问题需进行专门研究.

从风工程角度看, 冷却塔风效应具有以下显著特征: 第一, 高度与壳底直径之比通常在 1.2 至 2.0 范围内, 整体为空间双曲面薄壳, 在风压作用下的变形与振动呈明显三维耦合特征^[8]; 第二, 壳体厚度与直径比值很小, 为典型薄壁壳体结构, 局部稳定性对外压分布极为敏感^[9]; 第三, 塔体截面为圆形或近圆形, 其外表面绕流特性强烈依赖雷诺数及表面粗糙度, 风压分布随流态转变出现显著变化^[10].

冷却塔风致事故早在 20 世纪 60 年代已经引起工程界广泛关注^[11]. 1965 年英国 Ferrybridge 电厂三座冷却塔在一次中等重现期的风暴中倒塌, 事故调查表明, 风压分布不利组合与结构薄弱部位叠加是重要原因之一. 此后, 德国、英国等国家相继开展冷却塔风洞试验与现场实测研究, 形成了 VGB、BS 等相关设计规范. 我国也先后制定了《火力发电厂水工设计规范》(SDGJ-78) 和《工业循环水冷却设计技术规范》(GBJ102-87) 等, 对常规高度冷却塔的体型系数和风振系数给出建议取值^[12-14].

然而, 随着大型火电及超超临界机组的建设需求增加, 冷却塔高度不断增大, 部分工程已超过 220 m, 进入超高冷却塔范畴. 现行规范主要基于中等高度冷却塔的试验与工程经验, 对 240 m 量级超高冷却塔的适用性尚缺乏系统验证. 一方面, 超高冷却塔的几何尺度与动力特性与常规塔存在差

异, 其风压分布与风振响应可能展现新的规律^[15]; 另一方面, 规范中给定的风振系数通常取值较大, 对于超高塔结构是否偏于保守尚不明确^[16]. 这些问题均需要结合高精度风洞试验和数值分析进行专门研究.

由于冷却塔为圆形薄壳结构, 表面风压对雷诺数高度敏感. 工程原型所对应的雷诺数往往远高于常规风洞试验可达到的范围. 如果直接以光滑模型进行低雷诺数试验, 则背风侧负压峰值可能明显高于原型, 导致体型系数偏大. 为获得接近工程实际的风压分布, 必须采取表面粗糙度模拟方法^[17,18], 使模型绕流在较低风速下进入超临界或高超临界流态, 从而在可控雷诺数范围内再现原型风压特性. 因此, 如何针对具体冷却塔几何和规范体型系数曲线, 设计合理的粗糙度布置与参数, 是开展风洞试验的关键环节.

关于冷却塔风振响应, 多数研究侧重于中等高度冷却塔, 对塔身一阶弯曲模态主导的顺风向振动和局部屈曲问题开展分析^[19-23]. 针对超高冷却塔的系统风振系数计算和高度分布规律研究较少. 同时, 电厂周边建筑物对塔体风压和风振的干扰效应在实际工程中不可忽略^[24-27], 其影响程度与建筑物高度、间距及布置形式密切相关, 也亟须通过试验和数值分析进行量化评估.

针对上述问题, 本文以某高度 242.4 m 的钢筋混凝土双曲线自然通风冷却塔为研究对象, 依托刚性模型测压风洞试验, 采用多层纸带粗糙元实现雷诺数模拟, 并将测得风压时程数据按相似律换算至原型结构; 在此基础上, 建立包含壳体与人字柱体系的有限元分析模型, 开展瞬态风振响应分析, 获得超高冷却塔沿高度的风振系数分布, 并进一步考察阻尼比与周边建筑干扰的影响. 研究成果可为超高冷却塔抗风安全评估和规范风振系数取值提供参考.

1 工程概况

研究对象为某火电厂钢筋混凝土双曲线自然

通风冷却塔,塔高 242.4 m,属特大型超高冷却塔。塔体由双曲面钢筋混凝土薄壳、52 对钢管混凝土人字支柱以及基础三部分组成。塔体主要特征尺寸如图 1 所示。

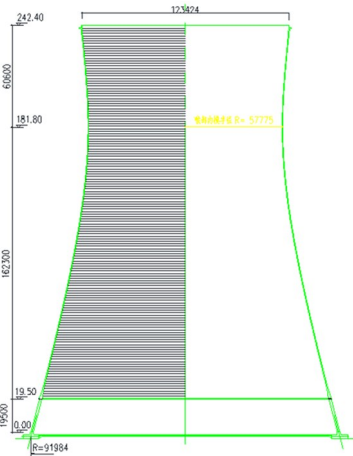


图 1 超高冷却塔的特征尺寸图(单位:m)

Fig. 1 Diagram of super high cooling tower (unit :m)

冷却塔采用钢筋混凝土薄壳结构,壳体厚度自塔底向塔顶逐渐减小,进风口处与支柱顶部通过环梁和刚性节点实现整体工作。人字支柱采用钢管混凝土构件布置成 52 对,均匀分布在塔周边,为壳体提供竖向和水平支撑。基础采用环形或筒形基础形式,人字支柱在基础顶面固结。冷却塔结构特征参数如表 1 所列。

表 1 冷却塔结构特征参数

Table 1 Structure characteristic parameters

| 参数名称 | 参数取值 | 参数名称 | 参数取值 |
|--------|----------|------------|-----------|
| 支柱底处直径 | 182.50 m | 出风口直径 | 123.424 m |
| 进风口高度 | 19.50 m | 人字支柱的数量 | 52 对 |
| 进风口直径 | 170.80 m | 塔高与壳底直径比 | 1.328 |
| 喉部高度 | 181.80 m | 喉部面积与壳底面积比 | 0.44 |
| 喉部直径 | 121.00 m | 喉部高度与塔高的比 | 0.75 |
| 出风口高度 | 242.40 m | | |

2 风洞试验与雷诺数模拟

2.1 刚性测压模型与试验装置

为研究超高冷却塔表面风压分布规律,采用一次成型 3D 打印技术制作冷却塔刚性测压模型,模型严格满足几何相似要求,并具有足够的刚度和强度,在试验风速范围内变形可忽略。结合风洞试验段截面尺寸以及紊流风场模拟条件,确定模型缩尺

比为 1 : 400,对应模型高度 0.606 m。

在塔体外表面沿子午向布置 20 层测点,布置原则为中上部加密、下部相对稀疏,以更好地反映喉部附近风压梯度变化;每一测层沿环向每 10° 布置一个测压孔,共 36 个测点。全塔共布置 720 个测压点,可较为全面地反映塔体各高度、各风向角的风压分布。测点布置如图 2 所示。

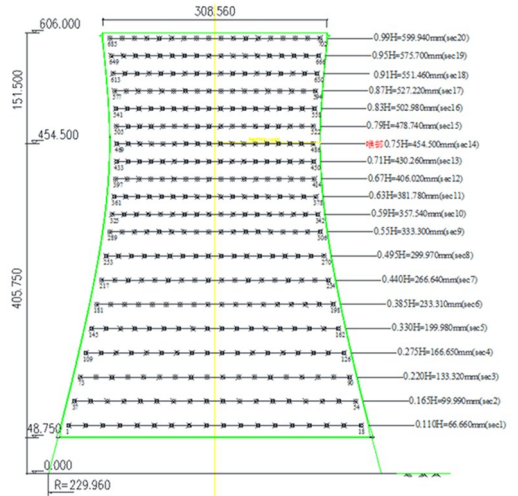


图 2 测压模型测点布置图(单位:mm)

Fig. 2 Layout drawing of measuring points (unit: mm)

试验在湖南大学 HD-2 风洞高速边界层风洞试验段进行,采用澳大利亚 TFI 公司眼镜蛇探针测量来流平均风速和湍流度,利用美国 PSI 公司 ESP-64 型电子压力扫描阀系统进行同步风压测量。压力传感系统量程约 0.36 psi,对应 2480 Pa,测量精度优于满量程的 $\pm 0.05\%$ 。每个通道采样频率设为 325 Hz,单次采样时长约 30 s,可满足冷却塔结构风振分析对时间分辨率与样本长度的要求。采用 B 类地貌边界层风场,参考高度取塔顶高度对应的模型高度。

2.2 风压系数与体型系数定义

为便于结果分析与规范对比,对于结构某一点的受力,定义模型表面 i 点的风压系数 C_{pi} 如下:

$$C_{pi} = \frac{P_i(\theta, z) - P_0}{\rho V_\infty^2(H)/2} \quad (1)$$

式中, P_i 为作用在建筑物表面 i 点处的压力,以指向塔体表面为正; P_0 为无穷远处参考高度处的静压; $V_\infty(H)$ 为无穷远处相同高度的来流风速; ρ 为空气密度,取 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 。

为考查某一截面的整体受力,定义截面体型系数 $C_{D,Sec}$ 如下:

$$C_{D,Sec} = \frac{\sum_{i=1}^N C_{p_i} L_i \cos\theta_i}{D} \quad (2)$$

式中, L_i 为测点 i 代表的弧长; D 为测点 i 所在圆截面的直径。

2.3 雷诺数模拟方法与粗糙度设计

冷却塔为圆形薄壳结构,其表面绕流流态及风压分布对雷诺数高度敏感.若以光滑模型在常规风洞风速下进行试验,往往对应于亚临界区间,背风侧负压峰值较大,难以代表工程原型在高雷诺数流态下的真实风压分布.为在风洞可实现的风速范围内模拟原型高雷诺数绕流特性,通过在模型表面粘贴纸带粗糙元以增大表面粗糙度,诱导边界层提前转捩,使绕流进入超临界或高超临界流态。

根据《工业循环水冷却设计规范》(GBT 50102—2014)中光滑塔与 K1.0 有肋塔给出的体型系数设计曲线,沿塔体子午线方向均匀布置 36 条粗糙纸带,单条纸带宽度约 10 mm,如图 3 所示.通过调节纸带层数与布置高度,改变等效粗糙度高度与分布,从而影响分离点位置和背风侧负压峰值,最终使试验所得体型系数曲线与规范目标曲线相匹配。

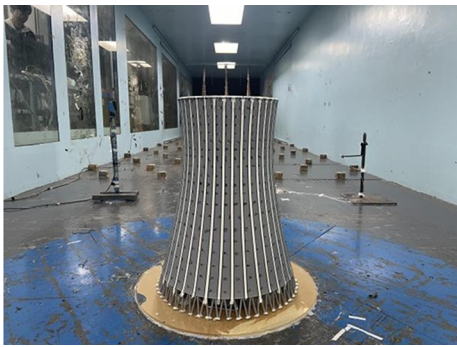


图 3 单层 3D 打印模型粘贴粗糙纸带

Fig. 3 3D printed model glued rough paper tape

2.4 风压分布特性与规范对比

对各高度测层的体型系数进行统计,如图 4、图 5 所示.由图可以发现 0.44H、0.495H 和 0.55H 处体型系数分布较为接近,变化趋势基本一致,可将这三层的平均体型系数曲线作为冷却塔中部的代表性曲线,与规范光滑塔和 K1.0 有肋塔的设计曲线进行对比。

经大量试验发现,在模型表面子午向均匀粘贴 36 条 5 层和 9 层的 10 mm 宽度纸胶带,试验风速 $V=10.0$ m/s 时,平均体型系数分布曲线与规范光

滑塔和 K1.0 有肋塔曲线基本一致,如图 6、7 所示。

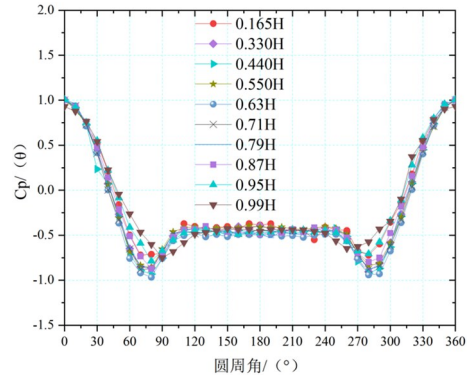


图 4 K1.0 塔各高度处体型系数分布曲线

Fig. 4 Shape coefficient curve at all heights of K1.0 tower

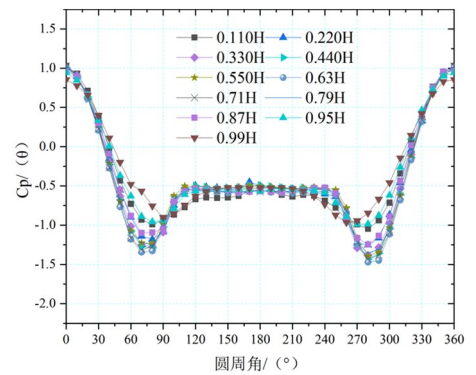


图 5 光滑塔各高度处体型系数分布曲线

Fig. 5 Shape coefficient curve at all heights of smoothing tower

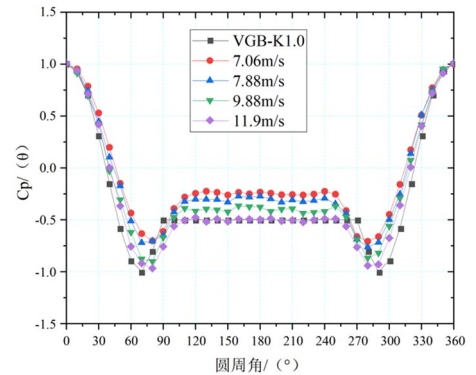


图 6 K1.0 塔不同风速下体型系数分布曲线

Fig. 6 Shape coefficient curve at different wind speeds of K1.0

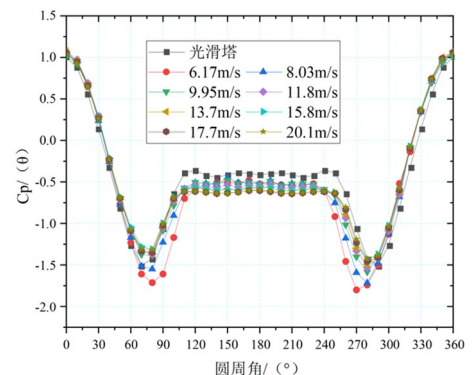


图 7 光滑塔不同风速下体型系数分布曲线

Fig. 7 Shape coefficient curve at different wind speeds of smoothing tower

对比结果表明, 试验测得的体型系数分布与规范曲线高度吻合, 验证了通过纸带粗糙度控制进行雷诺数模拟的有效性. 为了量化评估模拟效果, 本文提取了体型系数曲线的关键特征点进行误差分析.

如图 6 所示, 对于 K1.0 有肋塔, 当试验风速达到 11.9 m/s 时, 体型系数曲线与规范值高度重合. 定量分析表明, 控制结构风荷载设计的最大负压峰值(约 75°处)为 -0.97, 与规范值 -1.00 的相对误差仅为 3.0%; 尾流区(120°~180°)的平均风压系数更是与规范值完全一致(-0.50). 对于光滑塔(图 7), 低风速(6.17 m/s)下的负压峰值深达 -1.70, 呈现典型的亚临界流态特征; 而通过粗糙度控制后, 在 20.10 m/s 风速下, 负压峰值回升至 -1.38, 与规范值 -1.45 的偏差控制在 5.0% 以内. 这表明试验采用的粗糙度布置方案成功实现了雷诺数效应的模拟, 获得的表面风压分布真实可靠.

此外, 随着风速增加, 各工况下的体型系数曲线趋于重合, 表明结构表面的绕流特性已稳定在高超临界状态, 进一步验证了粗糙度布置方案的合理性.

3 周边建筑干扰效应

3.1 干扰工况布置与风向角定义

考虑冷却塔所在电厂区域的实际布置情况, 选取厂内 50.0 m 高度以上主要建筑物作为干扰体, 在风洞中按相同缩尺比制作简化建筑模型, 并保持与冷却塔距离及相对位置与工程一致. 试验中分别测试无干扰单塔工况与有干扰工况下的塔体表面风压分布, 风向角定义见图 8.

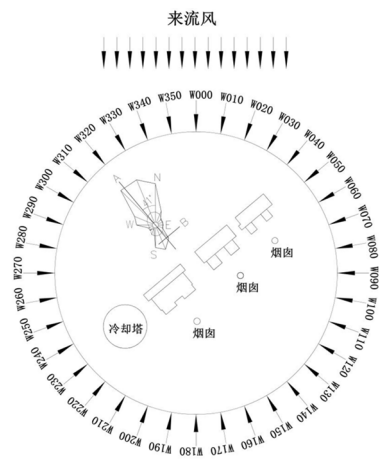


图 8 有干扰工况风向角定义

Fig. 8 Wind direction angle under interference conditions

首先测试了单塔无周边干扰工况下的压力分布, 此时由于不存在周边建筑物的干扰, 只测试一种风向角; 然后逐步测试有干扰状态时的冷却塔表面的风压分布. 塔体模型均已进行了雷诺数模拟. 所有工况采用 B 类紊流风场, 参考风速选取塔顶处 10.0 m/s. 有干扰工况试验照片如图 9 所示.



图 9 有干扰工况试验照片

Fig. 9 Photos of tests under interference conditions

3.2 有无干扰状态风压分布对比

根据单塔工况试验结果, 中部 0.550H 至喉部区域各测层体型系数分布较为一致, 常以该高度范围内各层体型系数平均值作为单塔代表性曲线. 对于有干扰工况, 可同样计算该高度范围内体型系数平均曲线, 并与单塔工况进行比较. 将周边有干扰塔测试中 K1.0 塔、光滑塔的体型系数平均曲线与单塔体型系数平均曲线比较, 分别见图 10 与图 11.

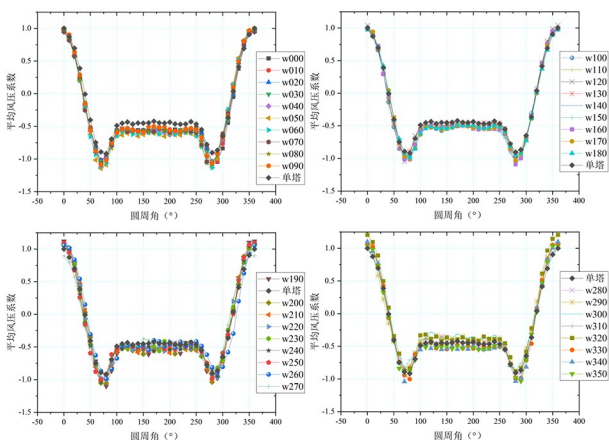
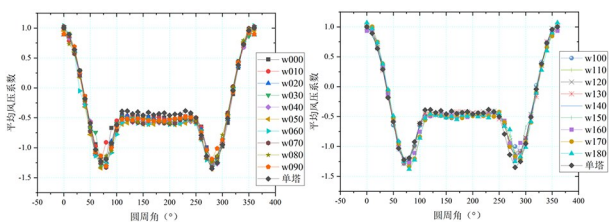


图 10 K1.0 塔有干扰状态平均风压系数

Fig. 10 Average wind pressure coefficient of K1.0 tower with and without interference



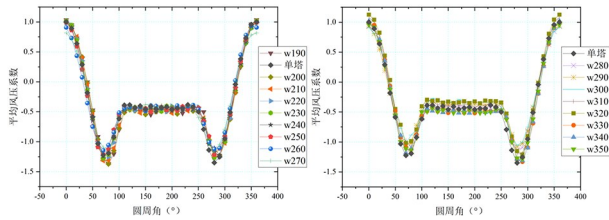


图 11 光滑塔有干扰状态平均风压系数

Fig. 11 Average wind pressure coefficient of smoothing tower with and without interference

结果表明,周边建筑存在时,冷却塔中部测层的体型系数总体变化较小,顺风侧正压区与背风侧负压区的体型系数曲线整体形状与单塔情况基本一致,说明由于周边建筑高度相对冷却塔较低、间距与塔体特征尺寸的比值较大,整体干扰效应有限.仅在少数风向角下,特别是在塔与周围建筑物串列、斜列和并列状态时,受遮挡或引流作用影响,局部最大正压和最小负压绝对值略有减小,风压分布出现一定不对称性.

整体而言,考虑电厂周边建筑以后,冷却塔塔身中上部区域的风压分布仍可近似按单塔体型系数进行设计,采用单塔代表性曲线进行结构设计在本工程中偏于安全.

4 有限元模型与风振响应分析方法

4.1 冷却塔有限元建模

采用通用有限元分析软件 ANSYS 建立冷却塔空间整体模型.考虑到本研究主要关注线弹性范围内的小变形风振响应,且不涉及大转动或复杂的接触非线性问题,Shell63 单元的计算精度足以满足本研究的要求,因此塔筒采用 Shell63 模拟,人字支柱采用 Timoshenko 梁单元 Beam188 模拟.人字支柱上端节点与壳体底部环梁上的对应节点采用共节点处理,以保证支柱与壳体之间的力学协调.壳体厚度沿高度分段赋值,以反映实际结构的厚度变化与刚度分布.

基础部分对风振响应的影响主要体现在整体刚度与边界约束.考虑到冷却塔基础刚度较大,且本研究关注塔体风致响应,有限元模型中将人字支柱底端节点视为固结约束.模型中同时考虑塔顶环梁的刚度贡献,以更准确地模拟塔筒上端边界条件.采用上述方法建立冷却塔的有限元模型,如图 12 所示.



图 12 冷却塔有限元模型

Fig. 12 Finite element model of cooling tower

4.2 动力特性分析

通过模态分析可获得冷却塔模态频率与振型,验证模型刚度与质量分布的合理性,采用 Lanczos 方法求解模态,前四阶结果如图 13 所示.

由图可知,冷却塔前四阶频率非常接近,各阶模态频率依次约为 0.61 Hz、0.66 Hz、0.72 Hz 和 0.78 Hz,可见结构整体属于典型的低频柔性高耸薄壳体系.从振型形态看,壳体呈现典型的“壳鼓型”振动特征,振幅分布高度局部化,主要集中在塔身中上部若干局部区域,支柱和基础几乎不参与变形.振型中在喉部附近出现明显的振幅集中以及沿高度方向的多波形态,反映出塔筒中上部壳体的高阶弯曲振动.

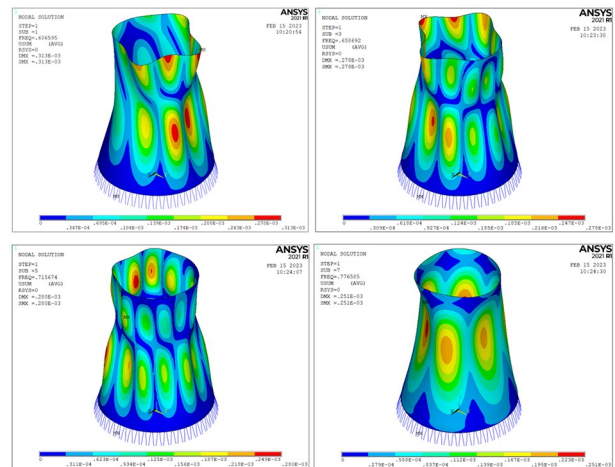


图 13 冷却塔前四阶模态

Fig. 13 The first four modes of cooling tower

4.3 风压时程相似换算与荷载输入

风洞试验中测得的数据为模型表面风压时程.为了进行原型结构风振响应分析,需要按照相似准

则将模型风压时程换算为原型风压时程. 有限元模型时程响应计算参数见表2.

表2 响应计算参数表
Table 2 Response calculation parameters

| 参数名称 | 参数取值 | 参数名称 | 参数取值 |
|--------|----------|--------------|--------|
| 冷却塔外表面 | 光滑塔 | 缩尺比(L模型/L实际) | 1:400 |
| 地貌类型 | B类 | 风速比(V模型/V实际) | 1:4.54 |
| 基本风压 | 382.8 Pa | 时间比(t模型/t实际) | 1:88 |
| 计算风速 | 22.9 m/s | 阻尼比 | 0.005 |

通过上述相似参数换算可得到各测压点在原型尺度下的风压时程, 并将其投影至有限元模型对应壳单元的节点或面积荷载上, 以实现时程荷载输入.

4.4 阵风荷载因子法与风振系数计算

采用以 Davenport 提出的顺风向阵风响应理论为基础的方法, 将冷却塔风致位移的峰值响应分解为静力响应与脉动响应^[28]. 此时, 风振系数即阵风荷载因子, 定义为结构峰值响应与平均响应的比值, 即:

$$\beta = \frac{\dot{y}}{\bar{y}} = \frac{\bar{y} + \dot{y}_d}{\bar{y}} = 1 \pm \frac{g\sigma_y}{\bar{y}} = 1 + \left| \frac{g\sigma_y}{\bar{y}} \right| \quad (3)$$

式中, 峰值响应 \dot{y} 包括静力风致响应 \bar{y} 和动力风致响应 \dot{y}_d , 而动力风致响应 $\dot{y}_d = g\sigma_y$, g 为峰值因子, 取值一般为 2.5; σ_y 为响应标准差. 峰值响应也可根据响应时程直接统计得到.

5 风振响应结果与讨论

5.1 单塔风振位移与风振系数

在考虑 B 类地貌和基本风压条件下, 对光滑表面单塔工况进行瞬态响应分析. 提取 $0.110H$ 至 $0.990H$ 沿高度 20 个典型截面上迎风向子午线节点的径向位移时程, 统计其均值、均方差和极值, 并汇总于图 14.

计算结果表明, 塔身中上部区域径向位移较大, 喉部附近位移均值与极值均达到全塔最大值, 结构设计中应重点关注. 沿高度方向, 径向位移均值随高度增加而单调增大, 在接近塔顶处趋于稳定; 位移极值趋势与均值基本一致, 说明风振响应主要由低阶弯曲模态控制, 且顺风向位移与风压分布变化规律一致. 根据位移均值和极值计算得到单

塔工况下不同高度的风振系数, 如图 15 所示.

结果显示: 塔底附近风振系数约为 1.39, 沿高度逐渐增加, 在喉部附近约为 1.48, 在接近塔顶处最高约为 1.51. 总体而言, 超高冷却塔风振系数由下至上呈单调递增趋势, 上部风振系数略大于中部和下部. 值得注意的是, 本文计算结果仅代表理想线弹性模型下的动力放大效应, 并未涵盖施工几何缺陷、材料非线性以及长期荷载效应等因素. 规范值(1.9)与本文计算值的差值, 实际上构成了工程设计中的安全冗余储备.

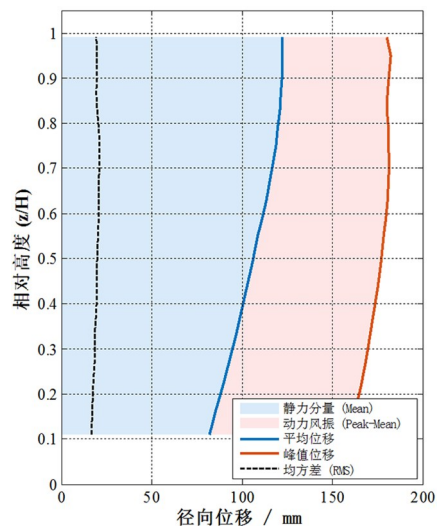


图 14 单塔位移响应

Fig. 14 Displacement response of single tower

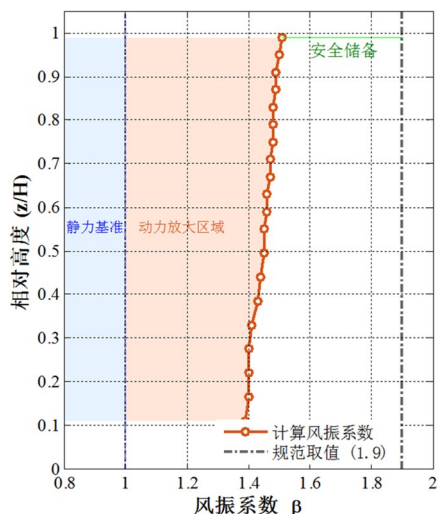


图 15 单塔位移风振系数

Fig. 15 Displacement wind vibration coefficient of single tower

5.2 阻尼比对风振响应的影响

为考察阻尼比变化对冷却塔风振响应的影响, 将结构阻尼比由 5% 调整为 2%, 在相同风场条件下重新进行单塔工况的瞬态分析. 位移响应结果如

图 16 所示。

结果表明,各高度截面径向位移的均值几乎不变,均方差和极值略有增加.喉部附近位移极值相对 5% 阻尼工况仅增加 1~2 mm. 进一步计算两种阻尼比工况下的风振系数,如图 17 所示.

可以看到,2% 阻尼比工况下沿高度风振系数整体略大于 5% 阻尼比工况,最大风振系数约为 1.52,较 5% 阻尼工况的 1.51 略有增加,喉部风振系数约由 1.48 增至 1.49,增幅不足 1%. 这表明,对于该类超高冷却塔,在研究风速范围内风振响应主要受脉动风能量输入控制,阻尼变化在 2% 至 5% 范围内对风振系数的影响有限.

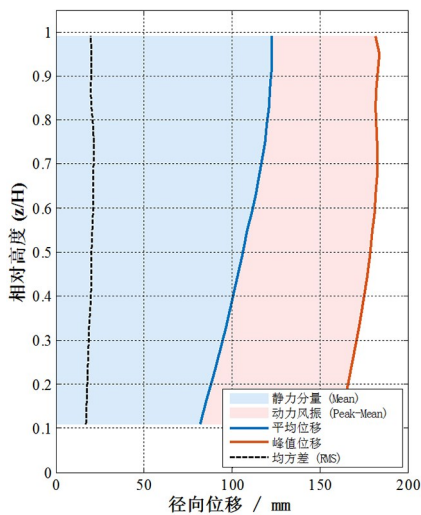


图 16 2% 阻尼比下单塔位移响应

Fig. 16 Displacement response of single tower at 2% damping ratio

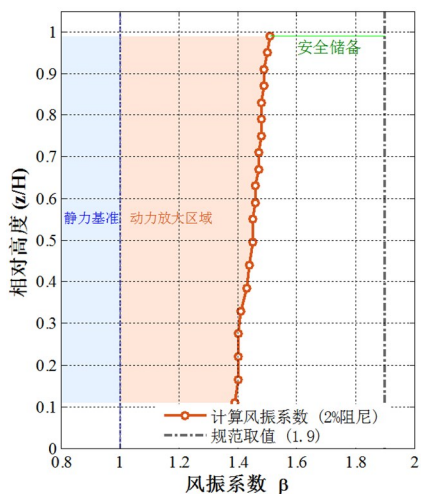


图 17 2% 阻尼比下单塔位移风振系数

Fig. 17 Displacement wind vibration coefficient of single tower at 2%

5.3 干扰工况风振响应

在考虑周边建筑干扰的风洞工况基础上,将对应风压时程换算为原型结构荷载,分别对多个风向

角下有干扰工况进行风振响应分析,风振系数沿高度变化曲线汇总于图 18.

结果表明,若将各高度风振系数进行平均,在干扰工况不同风向角下的整体风振系数最大值约为 1.60. 不同风向角下冷却塔沿高度风振系数总体仍呈单调增加趋势,但由于建筑物遮挡和引流效应,部分截面风振系数较单塔工况略有增大或减小. 以喉部附近截面为例,在多数风向角下,有干扰工况的风振系数与单塔工况相差不大,变化幅度一般不超过 5%. 在 W310 风向角下,建筑物对来流形成明显扰动,导致冷却塔中上部风振响应略有放大,沿高度最大风振系数约为 1.66,相比于无干扰工况增幅约为 12%,说明周边建筑的干扰效应会显著降低结构的抗风安全储备,需引起设计重视.

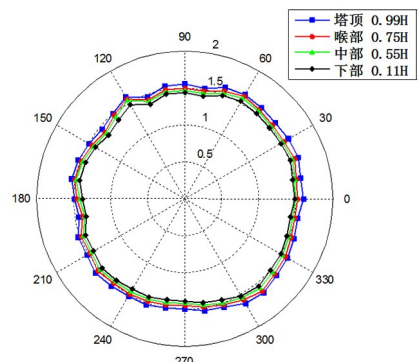


图 18 有干扰不同风向角工况风振系数沿高度变化曲线

Fig. 18 Variation curve of wind vibration coefficient along height under different wind direction angles with interference

6 结论

以高度 242.4 m 的钢筋混凝土双曲线超高冷却塔为研究对象,结合刚性模型测压风洞试验、雷诺数模拟以及有限元瞬态风振分析,系统研究了超高冷却塔风压分布与风振响应特性. 主要结论如下:

(1) 采用子午向均匀布置多层粗糙纸带的雷诺数模拟方法,可以有效诱导冷却塔表面绕流在较低风速下进入高雷诺数稳定流态. 经参数化试验,获得的中部截面体型系数分布与《工业循环水冷却设计规范》(GBT 50102-2014)中光滑塔和 K1.0 有肋塔设计曲线高度一致,表明该粗糙度布置方案切实可行,为超高冷却塔风洞试验提供了一种有效的雷诺数模拟路径.

(2) 超高冷却塔沿高度方向的风振系数呈单调增大趋势,喉部附近风振系数约为 1.48,塔顶附近最大风振系数约为 1.51,均明显低于规范建议值 1.9. 说明现行规范在超高冷却塔高度范围内风

振系数取值存在较大安全储备,在满足安全的前提下,存在优化设计和节约材料的潜力。

(3) 将结构阻尼比由5%降低至2%后,冷却塔风振位移标准差和极值略有增加,风振系数最大增幅不足1%。这说明在研究风速范围内,超高冷却塔风振响应主要由脉动风动能主导,结构阻尼变化在合理范围内对风振系数影响有限。

(4) 在考虑电厂主要周边建筑干扰时,冷却塔塔身中上部区域的体型系数与单塔工况总体一致,干扰对风压分布影响较小。仅在部分风向角下,由于建筑物遮挡和引流,冷却塔沿高度最大风振系数约为1.66,对应整体风振系数约为1.60。在类似建筑布置条件下,采用单塔体型系数进行设计总体偏于安全,但对不利风向可进行附加校核。

参考文献

- [1] LI W J, KE S T, YANG J, et al. Wind-induced collapse mechanism and failure criteria of super-large cooling tower based on layered shell element model [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2022, 221: 104907.
- [2] ZHAO X L, ZHAO L, QIAN J H, et al. Wind-induced collapse mode and mechanism of super-large hyperbolic steel reticulated shell cooling tower with stiffening rings [J]. *Engineering Structures*, 2024, 321: 118985.
- [3] CHEN X, WU Y, ZHU Z H, et al. Wind-induced response characteristics of reduced-scale aeroelastic models for cooling towers: Comparative analysis of shell model and beam-net model [J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37(7): 077127.
- [4] LIANG Y P, REN X D. Failure analysis and curvature-based failure criterion of super large cooling tower under strong equivalent static wind load [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 142: 106801.
- [5] ZHANG J F, XIA Y H, LI J, et al. Failure process simulation of RC hyperbolic cooling towers under fluctuating wind loads [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2025, 25(5): 263.
- [6] SONG G Q, SHI D X, LI Z, et al. Influence of wind pressure patterns on the buckling resistance of hyperboloid steel cooling towers [J]. *Structures*, 2024, 59: 105787.
- [7] WU H X, KE S T, WANG H, et al. Mechanisms of wind-induced vibration fatigue fracture in large cylindrical-conical steel cooling towers [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2025, 48(8): 3240—3254.
- [8] ABBASI M, ALIGHANBARI F, SARVESTANI A B, et al. The effect of crosswind and installation of wind-break deflector on the performance of natural draft dry cooling tower (NDDCT) [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2022, 229: 105146.
- [9] 石昊. 初始几何缺陷对双曲线型冷却塔筒壁受力性能影响的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
SHI H. The study of hyperbolic cooling tower with initial geometrical imperfections and its effects on mechanical behavior of the shell [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [10] DONG X, ZHAO L, CHEN X, et al. Tornado-induced load distribution patterns and structural effects of a super large cooling tower [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2025, 133: 104275.
- [11] 王品. 自然通风冷却塔在风荷载作用下极限承载力分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
WANG P. Limit bearing capacity analysis of the natural ventilation cooling tower under wind load [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [12] 邹云峰, 牛华伟, 陈政清. 超大型冷却塔单塔外表面风荷载三维效应及其设计取值[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(24): 76—82.
ZOU Y F, NIU H W, CHEN Z Q. Three-dimensional effect and design values of outer surface wind loading for a single super-large cooling tower [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(24): 76—82. (in Chinese)
- [13] 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, 42(1): 24—30.
ZOU Y F, HE X H, TAN L X, et al. Three-dimensional effect and design values of inter surface wind loading for single super-large cooling tower [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(1): 24—30. (in Chinese)
- [14] 周旋, 牛华伟, 陈政清, 等. 大型冷却塔风荷载干扰系数的取值方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(10): 3637—3644.
ZHOU X, NIU H W, CHEN Z Q, et al. Discus-

- sion on different methodologies for calculating interference factor of large cooling towers [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(10): 3637—3644. (in Chinese)
- [15] CHENG X X, ZHAO L, GE Y J, et al. Wind loading interference effects among eight grouped large cooling towers with rectangular arrangement [J]. *Structures*, 2024, 67: 107017.
- [16] 赵林, 陈旭, 柯世堂, 等. 大型冷却塔结构风致稳定和风振效应研究进展[J]. *振动测试与诊断*, 2022, 42(1): 1—10, 190.
- ZHAO L, CHEN X, KE S T, et al. Review on wind-induced stability and vibration effect of large cooling towers [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2022, 42(1): 1—10, 190. (in Chinese)
- [17] 黄东梅, 何世青, 朱学, 等. 表面粗糙度对超高层建筑风荷载与风振响应的影响[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(9): 41—51.
- HUANG D M, HE S Q, ZHU X, et al. Influence of surface roughness on wind load and wind-induced response of super-tall building [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(9): 41—51. (in Chinese)
- [18] 沈国辉, 余关鹏, 孙炳楠, 等. 模型表面粗糙度对冷却塔风荷载的影响[J]. *工程力学*, 2011, 28(3): 86—93.
- SHEN G H, YU G P, SUN B N, et al. The influence of modal surface roughness on wind loads of cooling towers [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(3): 86—93. (in Chinese)
- [19] 柯世堂, 侯宪安, 赵林, 等. 超大型冷却塔风荷载和风振响应参数分析: 自激力效应[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(12): 45—53.
- KE S T, HOU X A, ZHAO L, et al. Parameter analysis of wind loads and wind induced responses for super-large cooling towers: self-excited force effect [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(12): 45—53. (in Chinese)
- [20] 陈旭, 黄珑霆, 丁福祥, 等. 超大型冷却塔龙卷风作用塔筒内表面风荷载特性研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(21): 31—38.
- CHEN X, HUANG L T, DING F X, et al. Characteristics of wind load on inner surface of super large cooling tower under tornado action [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(21): 31—38. (in Chinese)
- [21] 邹云峰, 何旭辉, 陈政清, 等. 超大型冷却塔内表面风荷载风洞试验与数值模拟研究[J]. *空气动力学学报*, 2015, 33(5): 697—705.
- ZOU Y F, HE X H, CHEN Z Q, et al. Wind tunnel test and numerical simulation study on internal wind loading for super large cooling tower [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2015, 33(5): 697—705. (in Chinese)
- [22] 沈国辉, 余关鹏, 孙炳楠, 等. 考虑内外压共同作用的大型冷却塔风荷载分析[J]. *空气动力学学报*, 2011, 29(4): 439—446.
- SHEN G H, YU G P, SUN B N, et al. Analysis of wind load on large hyperbolic cooling tower considering interaction between internal and external pressure [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2011, 29(4): 439—446. (in Chinese)
- [23] 董国朝, 张建仁, 蔡春声, 等. 运行状态下超大型冷却塔内表面风荷载的数值模拟研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(1): 17—23.
- DONG G C, ZHANG J R, CAI C S, et al. Numerical simulation of the internal surface wind load of super large cooling tower under operating conditions [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(1): 17—23. (in Chinese)
- [24] 柯世堂, 王浩, 余玮. 典型四塔组合特大型冷却塔群风荷载干扰效应[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(10): 1421—1428.
- KE S T, WANG H, YU W. Interference effect of wind loads for super large cooling tower under typical four towers combinations [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(10): 1421—1428. (in Chinese)
- [25] 张军锋, 葛耀君, 赵林. 群塔布置对冷却塔整体风荷载和风致响应的不同干扰效应[J]. *工程力学*, 2016, 33(8): 15—23, 44.
- ZHANG J F, GE Y J, ZHAO L. Interference effects on global wind loads and wind induced responses for group hyperboloidal cooling towers [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(8): 15—23, 44. (in Chinese)
- [26] 鲍侃袁. 三塔干扰下冷却塔的风荷载和风致响应分析[J]. *建筑结构*, 2013, 43(15): 91—96.
- BAO K Y. Analysis of wind load and wind-induced response of three large hyperbolic cooling towers [J]. *Building Structure*, 2013, 43(15): 91—96. (in Chinese)
- [27] 顾晓庆, 束加庆, 曾赛男, 等. 周边密集建筑对超

大型冷却塔风荷载的干扰效应研究[J]. 特种结构, 2025, 42(2): 1-6, 15.

GU X Q, SHU J Q, ZENG S N, et al. Research on the wind load interference effect of surrounding dense buildings on super-large cooling towers [J]. Special Structures, 2025, 42(2): 1-6, 15. (in Chinese)

[28] 赵林, 陈旭, 展艳艳, 等. 基于时变内力加权指标

的大型冷却塔等效静风荷载[J]. 振动工程学报, 2021, 34(5): 922-933.

ZHAO L, CHEN X, ZHAN Y Y, et al. Equivalent static wind loads of large cooling towers based on weighted combinations of time-variant internal forces [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(5): 922-933. (in Chinese)