

内外压分别作用下冷却塔风振系数对比研究*

杜凌云^{1,2}, 柯世堂¹, 侯宪安³

(1. 南京航空航天大学土木工程系 南京, 210016)

(2. 远景能源(江苏)有限公司 上海, 200050)

(3. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院土木工程技术部 西安, 710075)

摘要 现有冷却塔规范和文献中关于风振系数的研究和取值建议均针对外表面风荷载作用, 并认为内压作用下风振系数与外压作用下的数值一致, 这无法真实反映冷却塔内压引起的风振效应。为对比研究内、外压分别作用下超大型冷却塔结构的风振特性及风振系数, 以国内某在建超规范限值高 210m 间接空冷却塔为研究对象, 首先, 进行刚体同步测压风洞试验获取内、外表面平均和脉动风荷载; 其次, 建立塔筒-支柱-环基一体化有限元模型, 采用完全瞬态法对超大型冷却塔在内、外压分别作用下的塔筒风振响应和风振系数进行了精细化计算分析, 探讨了以塔筒径向位移、子午向轴力、Von Mises 应力和环向弯矩 4 种典型目标响应下的风振系数取值标准, 提炼出超大型冷却塔内、外压作用下的一维、二维和三维风振系数分布规律; 最后, 分别给出了此类超大型冷却塔内、外压作用下风振系数的取值建议和二维拟合公式。主要结论可为此类超大型冷却塔风振系数的精细化取值提供科学依据。

关键词 超大型冷却塔; 风洞试验; 内外压分别作用; 风振系数; 拟合公式

中图分类号 TU279.7

引言

为了适应火/核电产业的迅速发展趋势, 超过现行规范^[1] 190m 高度限值的超大型冷却塔陆续兴建, 相比常规冷却塔其阻尼更小、柔度更大, 因此风振动力放大效应尤为显著。已有研究^[2-3] 表明, 冷却塔内表面风压脉动幅值不容忽视, 而现有结构稳定性验算及荷载组合中均直接以规范成塔单一外荷载风振系数 1.9 计入内表面风荷载的动力放大作用, 并不能真实反映内压风振系数的三维分布模式。此外, 国内外冷却塔规范^[1, 4-7] 及相关研究^[8-14] 均缺乏对内压风振系数的探讨和规定, 因此对比探讨内、外压作用下此类超大型冷却塔的风振系数分布特性和精细化取值具有重要的理论和工程意义。

针对大型冷却塔风振系数研究, 文献^[8] 通过一致耦合法对比分析了某核电超塔的风振系数取值与分布特征, 发现风振系数在塔底和喉部背风区域出现峰值。文献^[9-10] 基于时域法和虚拟激励法对超大型冷却塔进行风振响应计算, 结果表明位移风振系数在塔筒中部最小, 分别向塔顶和塔底逐渐增大。

文献^[11] 针对双塔布置与周边山地环境下冷却塔的动态响应进行分析, 得知山地和群塔干扰均使结构风振系数增大。文献^[12-14] 基于气弹测振风洞试验研究了不同高度和塔型大型冷却塔三维风振系数分布特性, 获得了一些对设计有指导意义的结论。然而, 已有的研究成果均针对冷却塔外压作用下的风振系数, 忽略了内压作用引起的风振效应和风振系数差异化取值影响, 更缺乏对不同等效目标下内压风振系数的对比研究, 这也成为现有超大型冷却塔风荷载精细化取值与降低施工成本的制约因素。

鉴于此, 以国内某在建 210m 高间接空冷冷却塔为研究对象, 通过刚体同步测压风洞试验分别获取冷却塔内、外表面脉动风压时程, 并将外压曲线与国内外相关规范进行对比以验证试验结果的可靠度。基于塔筒-支柱-环基一体化有限元模型对超大型冷却塔进行内、外压分别作用下的时域动力计算, 对比研究塔筒径向位移、子午向轴力、Von Mises 应力和环向弯矩 4 种典型目标响应下的一维、二维和三维内、外压风振系数分布模式, 给出了内、外压作用下风振系数的取值建议与二维拟合公式。

* 江苏省优秀青年基金资助项目(BK2016003); 国家自然科学基金资助项目(U1733129, 51208254, 51878351); 博士后科学基金资助项目(2013M530255, 1202006B); 江苏高校青蓝工程联合资助项目
收稿日期: 2017-05-20; 修回日期: 2017-09-06

1 工程简介

本试验结构原型采用内陆某在建大型间接空冷

塔,塔高为 210m,喉部标高为 157.5m,中面直径为 110.37m,进风口标高为 32.5m,塔底直径为 180m。塔筒分段等厚,最大厚度为 2m,最小厚度为0.37m。表 1 具体列出了该工程冷却塔结构的主要结构尺寸。

表 1 超大型冷却塔主要结构尺寸列表

Tab. 1 The main structure sizes of super large cooling tower

| 结构 | 标高/m | 半径/m | 壁厚/m | 材料等级 | 结构示意图 |
|----|--------------------------|-------|------|------|-------|
| | 32.28 | 80.46 | 2.00 | | |
| | 49.73 | 75.39 | 0.55 | | |
| | 67.24 | 70.48 | 0.46 | | |
| | 84.85 | 65.91 | 0.42 | | |
| 塔筒 | 120.43 | 58.41 | 0.39 | C40 | |
| | 138.46 | 56.08 | 0.38 | | |
| | 156.61 | 55.19 | 0.38 | | |
| | 174.79 | 55.77 | 0.37 | | |
| | 191.66 | 56.83 | 0.37 | | |
| | 208.51 | 58.05 | 0.50 | | |
| 支柱 | 52 对长 1.8m、宽 1.2m 的 X 型柱 | | | C45 | |
| 基础 | 宽 12m、高 2.5m 的环板基础 | | | C35 | |

2 风洞试验与结果分析

2.1 刚体测压风洞试验

测压试验所用风洞为大气边界层闭口回流式 5.0 m×4.5 m 矩形截面风洞,刚体模型按 1 : 400 缩尺比制作,外压试验在塔筒外表面沿子午向和环向布置 12×36=432 个测点,内压试验在塔筒内表面布置 10×20=200 个测点,图 1 给出了试验模型内、外压测点布置示意图,内、外压以 30% 透风率考虑百叶窗工作开启状态^[3]。

地面粗糙元置于来流前部用以模拟 B 类地貌的大气边界层风场,风速与湍流度剖面如图 2 所示,由图可见风场模拟效果较好。由于物理风洞的局限性,需要通过调整试验风速和改变表面粗糙度的方法来补偿模型缩尺导致的雷诺数不匹配问题。通过比较知道,采用表面贴粗糙纸带(沿圆周均匀分布二、三间隔宽 5mm,计 36 条竖向通长粗糙纸带)和来流风速 10m/s 手段模拟效果最好。图 3 将冷却塔喉部断面外表面体型系数与规范推荐曲线进行对比(其中体型系数为无量纲单位),可知试验曲线与各国规范趋势较为吻合,数值与中国水工规范^[1]最为接近。

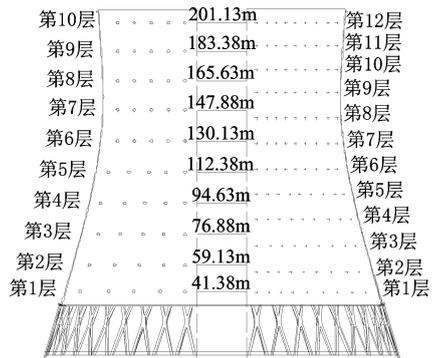


图 1 刚体测压模型内、外压测点布置示意图

Fig. 1 Layout diagram of wind pressure model internal and external pressure measuring point

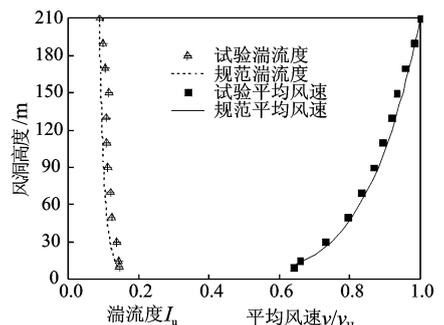


图 2 平均风速和湍流度剖面

Fig. 2 Profiles of mean velocity and turbulence intensity

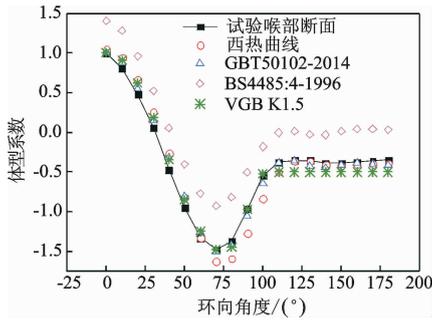


图 3 雷诺数效应模拟体型系数与规范对比曲线

Fig. 3 The simulation of reynolds number effect results

2.2 结果分析

图 4 给出了内、外表面体型系数均值在子午向 0~50m, 50~100m, 100~150m 和 150~210m 高度区间内随环向角度变化的对比曲线。分析可知:

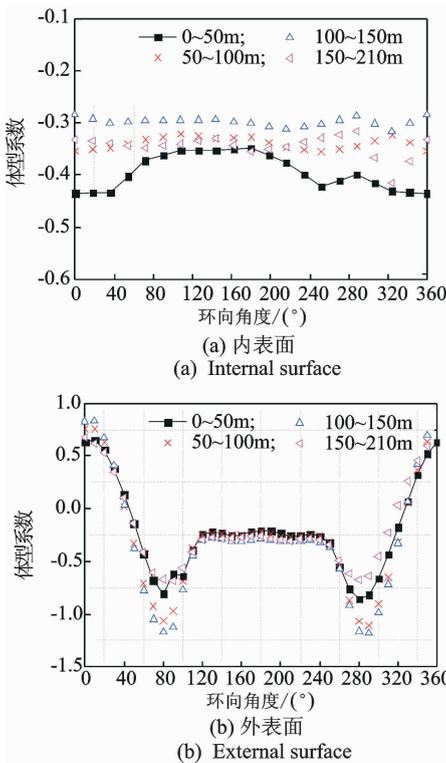


图 4 内、外表面不同高度体型系数均值对比曲线

Fig. 4 Mean shape factor of internal and external surface at different height range

- 1) 内表面体型系数均值沿环向和子午向分布并未呈现出单一分布, 三维特征显著;
- 2) 0~50m 高度区域内体型系数沿环向分布相对其他区域较不均匀, 来流经百叶窗进入塔筒内部, 在至塔筒背风区域内表面附着流动上升, 导致其风压绝对值显著减小;
- 3) 50~100m, 100~150m 和 150~210m 高度区域内表面体型系数沿环向角度变化平缓, 其值分

别在 -0.35, -0.30 与 -0.35 左右波动;

4) 4 个高度区域在塔筒迎风面分布曲线较为吻合, 到达负压极值区后 50~100m 和 150~210m 高度区域外表面体型系数值明显增大, 背风面风压平台处数值相对其他高度区间略大。

图 5 给出了内、外表面体型系数均方根在子午向 0~50m, 50~100m, 100~150m 和 150~210m 高度区间内随环向角度变化的对比曲线。

对比得出: 内表面体型系数脉动值沿环向分布比较均匀, 但受塔顶出风口气流的影响, 塔筒上部内表面体型系数脉动较大; 0~50m 和 150~210m 高度区间外表面体型系数脉动值沿环向角度分布较为吻合, 50~100m 和 100~150m 分布趋势相似, 在迎风面与侧风面体型系数脉动值相对塔筒下部和上部偏离较大, 最大为 40.96%。

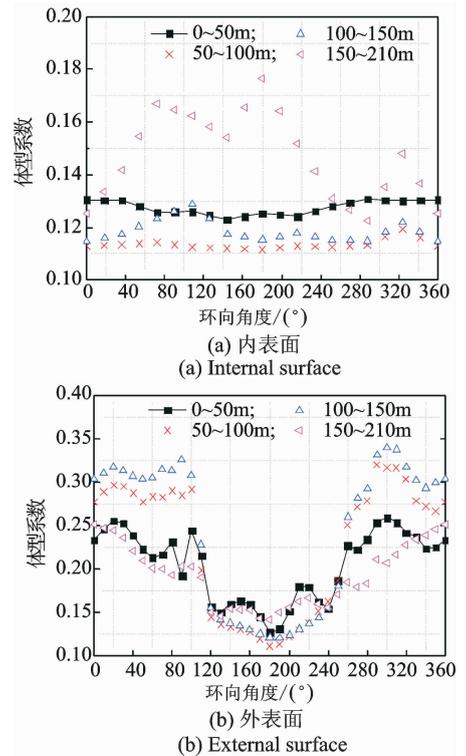


图 5 内、外表面不同高度体型系数均方根对比曲线

Fig. 5 Root mean square shape factor of internal and external surface at different height range

3 风振系数对比分析

3.1 自振特性分析

基于有限元软件 ANSYS 建立仿真分析模型, 塔筒、支柱和环基、弹性地基分别采用空间壳单元、梁单元以及弹簧单元, 共计 29 640 个, 环基与塔筒和支柱分别通过多点约束耦合和刚性域进行连接。采用分块 Lanczos 法^[15]进行动力特性计算, 表 2 给

出了典型阶模态信息。分析可知:突破性塔高使得结构基频低于普通冷却塔,降至 0.58Hz,柔性更强;频率分布相对密集,振型多变,具有不固定的环向和

竖向谐波;整体结构在 30 阶发生倾覆,此时自振频率增幅较大。

表 2 冷却塔结构典型阶振型信息

Tab. 2 The vibration mode of typical steps

| 阶数 | 振型等势线图 | f/Hz | 谐波数 | | 阶数 | 振型等势线图 | f/Hz | 谐波数 | |
|----|--------|------|-----|----|-----|--------|------|-----|----|
| | | | 环向 | 竖向 | | | | 环向 | 竖向 |
| 1 | | 0.58 | 4 | 1 | 30 | | 1.27 | 倾覆 | 倾覆 |
| 5 | | 0.65 | 5 | 2 | 50 | | 1.77 | 9 | 3 |
| 10 | | 0.86 | 5 | 2 | 80 | | 2.47 | 12 | 1 |
| 20 | | 1.03 | 6 | 3 | 100 | | 2.84 | 4 | 6 |

3.2 计算参数定义

该冷却塔位于 B 类地貌,100 年一遇最大风速为 23.7m/s,结构阻尼比取为规范值^[16]5%。将风洞试验获取的冷却塔内、外表面风压时程分别输入有限元模型结构体系,采用完全瞬态法进行风致动力特性分析,并选择 4 种响应等效目标进行节点风振系数计算,如表 3 所示。响应风振系数计算公式^[17]为

$$\beta_{R_i} = R_i / \bar{R}_i = 1 + g\sigma_i / \bar{R}_i \quad (1)$$

其中: β_{R_i} 为节点 i 的响应风振系数; R_i, \bar{R}_i 和 σ_i 分别为节点 i 的总响应、平均响应和脉动响应; g 为节点 i 的峰值因子,取为 3.0^[17]。

表 3 响应等效目标分类

Tab. 3 The classification of response equivalent targets

| 简称 | A | B | C | D |
|------|------|-------|------|----------|
| 响应目标 | 径向位移 | 子午向轴力 | 环向弯矩 | Mises 应力 |

3.3 三维风振系数

图 6~9 给出了内、外压作用下以 A,B,C 和 D 为响应目标的风振系数三维分布图(其中风振系数为无量纲单位)。由图可知:塔筒表面节点风振系数沿环向和子午向差异显著,内、外压作用下分别以等

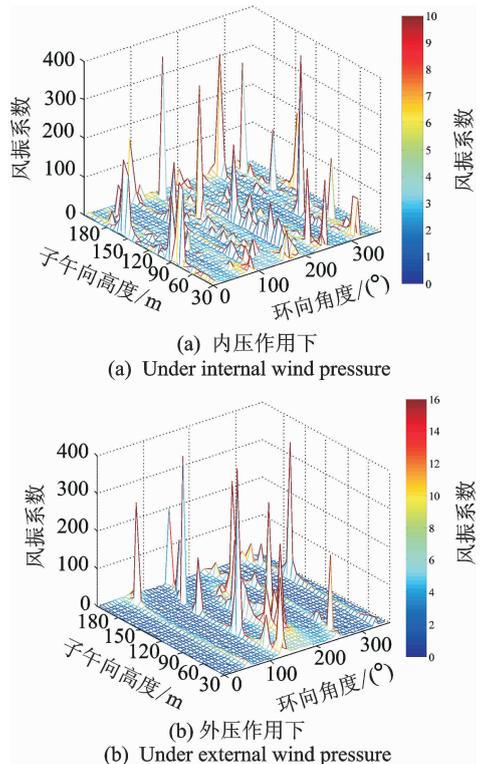


图 6 内、外压作用下响应目标 A 节点风振系数三维分布示意图

Fig. 6 The three-dimensional distribution of node wind vibration coefficient under A response target

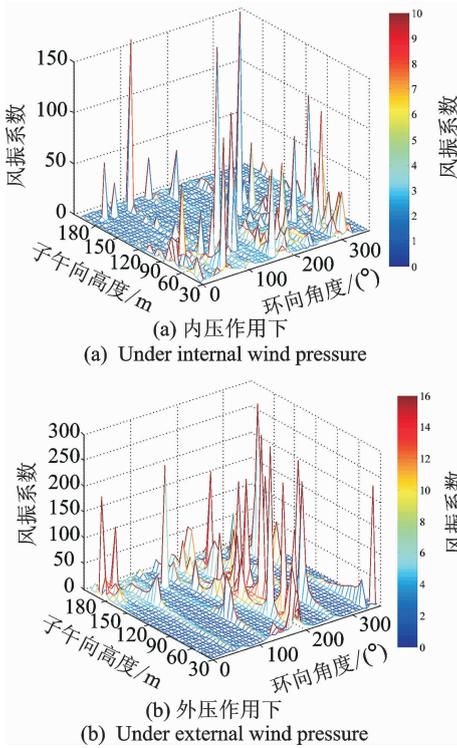


图 7 内、外压作用下响应目标 B 节点风振系数三维分布示意图

Fig. 7 The three-dimensional distribution of node wind vibration coefficient under B response target

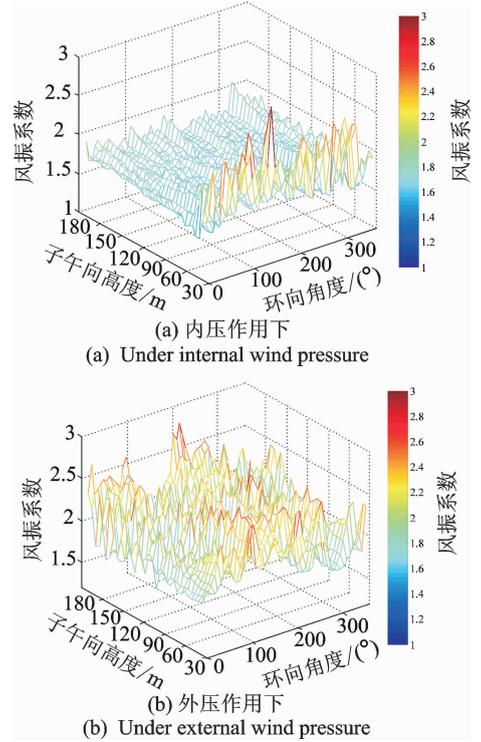


图 9 内、外压作用下响应目标 D 节点风振系数三维分布示意图

Fig. 9 The three-dimensional distribution of node wind vibration coefficient under D response target

效目标 D 下的风振系数分布最为均匀,其他 3 种等效目标局部节点风振系数失真较为严重;外压作用下节点风振系数分布相对内压作用波动较为显著,且失真主要发生于背风面,而内压作用下风振系数失真区域主要集中在塔底和塔顶部位。

3.4 二维子午向风振系数

分别采用 0°子午线和平均响应绝对值的最大值(分别简称为等效目标 1 和 2)两种取值等效目标计算不同响应等效目标下的冷却塔结构二维子午向风振系数,如图 10 所示。对比分析可得,以取值等效目标 2 为依据选定二维子午向风振系数的数值范围相对较为合理,等效目标 1 下的风振系数值和趋势均波动较大。综合比较可得,内压作用下的塔筒二维子午向风振系数相比外压作用下数值较小,且层风振系数沿子午向高度波动较小。

3.5 二维环向风振系数

将塔体沿子午向划分为 0~50m, 50~100m, 100~150m 和 150~210m 4 个区域,研究二维风振系数沿环向角度变化规律,如图 11 所示,给出了响应目标 A, B, C 和 D 下的不同高度区域二维环向风振系数分布曲线。对比分析表明:a. 外压作用下塔

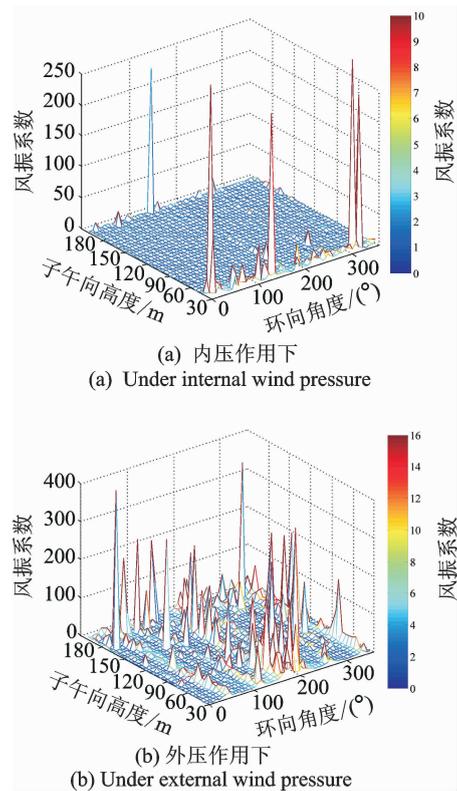


图 8 内、外压作用下响应目标 C 节点风振系数三维分布示意图

Fig. 8 The three-dimensional distribution of node wind vibration coefficient under C response target

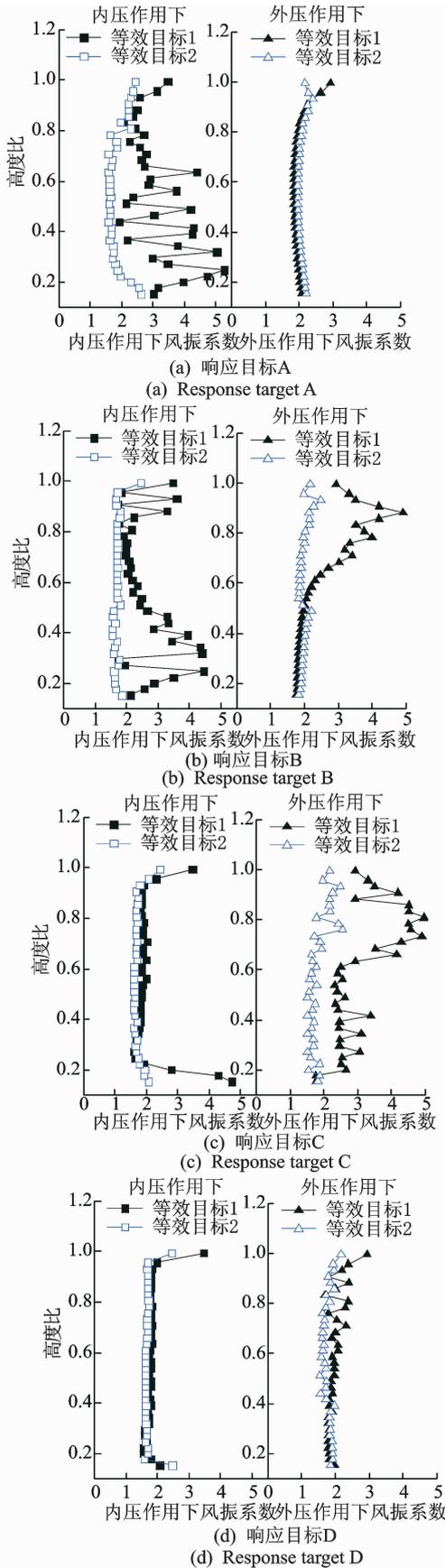


图 10 内、外压作用下不同响应目标二维子午向风振系数分布曲线示意图

Fig. 10 The distribution of two-dimensional meridional wind vibration coefficient under different response targets

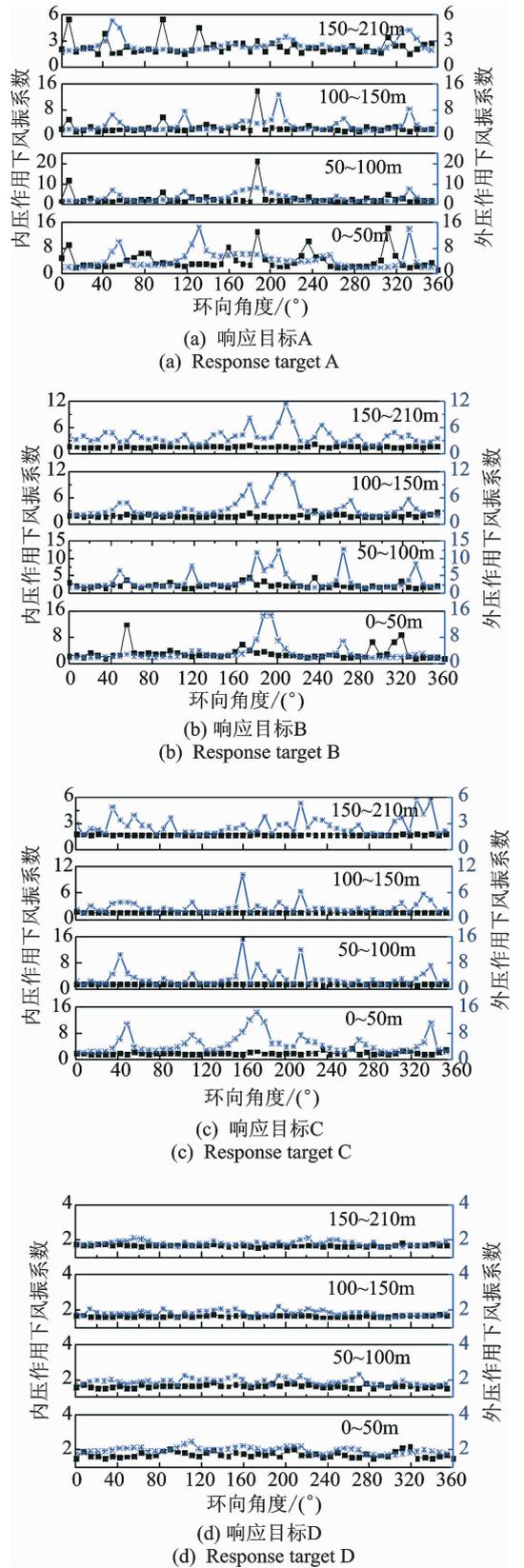


图 11 不同响应目标下不同高度断面二维环向风振系数分布曲线示意图

Fig. 11 The distribution of two-dimensional ring wind vibration coefficient under different response targets

筒二维环向风振系数与内压作用下相比较,除响应目标 A 外,内压作用下风振系数沿环向角度分布更为稳定;b.塔筒下部和上部受进风口和出风口气流影响使得沿环向出现较大风振系数,塔筒中部风振系数沿环向分布趋势较为平稳;c.以响应目标 A 作为风振系数取值标准可能导致失真风振系数范围较大,推荐以规范规定的子午向轴力和平稳分布的 Mises 应力两个响应目标下的风振系数作为冷却塔结构真实风振系数参考依据。

3.6 风振系数二维拟合公式

以子午向高度比为变量,拟合给出内、外压作用下冷却塔风振系数估算公式,如式(2)所示,其系数取值见表 4

$$\beta(h) = a_1 \sin(b_1 h + c_1) + a_2 \sin(b_2 h + c_2) + a_3 \sin(b_3 h + c_3) + a_4 \sin(b_4 h + c_4) + a_5 \sin(b_5 h + c_5) \quad (2)$$

将内、外压风振系数拟合曲线与计算值进行对比,见图 12。由图可见:拟合效果相对较好,但塔底和塔顶风振系数失真,与拟合曲线吻合较差;内压风振系数小于外压风振系,且沿高度分布较为稳定。

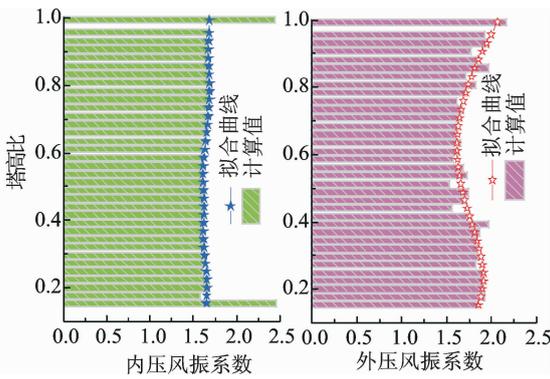


图 12 内、外压风振系数计算值与拟合曲线对比示意图
Fig. 12 Internal and external wind vibration coefficient of fitted and calculated values

3.7 整体风振系数

基于上述三维、二维子午向以及二维环向风振系数计算结果,给出内、外压作用下以 4 种响应为目标的结构整体风振系数建议取值,如表 5 所示。由表可知,不同等效目标下内压整体风振系数均小于外荷载整体风振系数,且以响应目标 B 和 D 均值作为整体风振系数推荐取值,分别为 1.69 和 1.89,小于规范风振系数 1.9。

表 5 整体风振系数取值建议

Tab. 5 The recommended values of overall wind vibration coefficient

| 响应目标 | 整体取值 | |
|------|------|------|
| | 内压 | 外压 |
| A | 1.89 | 2.01 |
| B | 1.69 | 1.99 |
| C | 1.73 | 1.86 |
| D | 1.69 | 1.78 |
| 推荐值 | 1.69 | 1.89 |

4 结束语

系统研究了内、外压分别作用下超大型冷却塔风振系数一维、二维与三维分布特性,主要涉及风洞试验、动力特性分析、风振响应计算、参数分析和公式拟合等内容。结果表明,内表面体型系数三维分布特征显著,其脉动性相对外压较小但不可忽略,采用真实内压风振系数更能精确反映冷却塔内压引起的风振效应。本研究采用的风洞试验方法与完全瞬态算法可有效解决冷却塔内压风振系数取值问题。外压作用下的风振系数相比内压风振系数波动较强且数值较大,内、外压分别作用下整体风振系数均小于规范 B 类地貌推荐取值,建议取为 1.69 和 1.89。

参 考 文 献

表 4 冷却塔内外压风振系数拟合公式参数取值表
Tab. 4 Parameters of internal surface shape coefficient of cone and cylinder section

| 类别 | 内压风振系数 | | | 外压风振系数 | | |
|----|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | a_i | b_i | c_i | a_i | b_i | c_i |
| 1 | 10.650 | 2.24 | 0.44 | 3.84 | 2.60 | -0.40 |
| 2 | 9.030 | 2.47 | 3.47 | 10.40 | 4.92 | 1.10 |
| 3 | 0.010 | 14.56 | -2.25 | 8.23 | 5.16 | 4.06 |
| 4 | 0.010 | 22.49 | -2.49 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0.004 | 32.74 | -6.40 | 0 | 0 | 0 |

[1] GB/T50102—2014 工业循环水冷却设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2014.
 [2] 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 Yunfeng, He Xuhui, Chen Zhengqing, 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)
 [3] 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.
- [4] DL/T 5339—2006 火力发电厂水工设计规范[S]. 北京:中国电力出版社, 2006.
- [5] 孙天凤, 周良茂. 无肋双曲线型冷却塔风压分布的全尺寸测量和风洞研究[J]. *空气动力学学报*, 1983, 12(4): 12-17.
Sun Tianfeng, Zhou Liangmao. Without ribs the elliptic wind pressure distribution of the cooling tower full size measurement and wind tunnel study [J]. *Journal of Air Dynamics*, 1983, 12(4): 12-17. (in Chinese)
- [6] BS4485(Part 4)—1996 Code of practice for structural design and construction-water cooling tower[S]. London: British Standard Institution, 1996.
- [7] VGB-R610Ue VGB-guideline structural design of cooling tower-technical guideline for the structural design, computation and execution of cooling towers[S]. Essen: BTR Bautechnik Bei Kühlturmen, 2005.
- [8] 柯世堂, 陈少林, 赵林, 等. 超大型冷却塔等效静风荷载精细化计算及应用[J]. *振动、测试与诊断*, 2013, 33(5):824-830.
Ke Shitang, Chen Shaolin, Zhao Lin, et al. Refined theory method and application of equivalent static wind loads for super large cooling tower[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2013, 33(5): 824-830. (in Chinese)
- [9] 柯世堂, 余文林. 高度 200m 特大型冷却塔二维风振系数取值方法及分布规律研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(10):78-87.
Ke Shitang, Yu Wenlin. Research for value obtained methods and distribution of two-dimensional wind vibration coefficient of super large cooling towers with 200m height level[J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(10):78-87. (in Chinese)
- [10] 朱佳宁, 徐亚洲, 李旭. 超大型冷却塔随机风振响应分析[J]. *西安建筑科技大学学报:自然科学版*, 2013, 45(6):808-812.
Zhu Jianing, Xu Yazhou, Li Xu. Stochastic wind-induced dynamic response analysis of large hyperbolic cooling tower[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition*, 2013, 45(6):808-812. (in Chinese)
- [11] 周旋, 牛华伟, 陈政清, 等. 双冷却塔布置与山地环境风干扰作用效应研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(12):140-148.
Zhou Xuan, Niu Huawei, Chen Zhengqing, et al. Study on interference effect of cooling towers under condition of tower-tower and hilly surroundings[J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(12): 140-148. (in Chinese)
- [12] 柯世堂, 夏逸鸣, 王法武, 等. 考虑气弹效应的超大型冷却塔脉动风压非高斯特性研究[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2013(8):3302-3309.
Ke Shitang, Xia Yiming, Wang Fawu, et al. Non-Gaussian features on fluctuating wind pressure for super large cooling towers with aero-elastic effect [J]. *Journal of Central South University :Science and Technology*, 2013(8): 3302-3309. (in Chinese)
- [13] 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(12):45-53.
Ke Shitang, Hou Xian'an, Zhao Lin, 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(12):45-53. (in Chinese)
- [14] 许林汕, 赵林, 葛耀君. 超大型冷却塔随机风振响应分析[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(4):180-184.
Xu Linshan, Zhao Lin, Ge Yaojun. Wind-excited stochastic responses of super large cooling towers [J]. *Journal of Vibration & Shock*, 2009, 28(4):180-178. (in Chinese)
- [15] 沈国辉, 王宁博, 楼文娟, 等. 渡桥电厂冷却塔倒塌的塔型因素分析[J]. *工程力学*, 2012, 29(8):123-128.
Shen Guohui, Wang Ningbo, Lou Wenjuan, et al. Analysis of tower shape factor in the collapse of the ferrybridge cooling towers [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(8):123-128. (in Chinese)
- [16] JGJ3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [17] Ke Shitang, Ge Yaojun. Extreme wind pressures and non-Gaussian characteristics for super-large hyperbolic cooling towers considering aero-elastic effect[J]. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 2015, 141(7): 04015010.



第一作者简介:杜凌云,女,1993年1月生,硕士、工程师。主要研究方向为结构抗风与抗震。曾发表《基于 ANSYS 二次开发冷却塔施工全过程风致极限承载性能研究》(《振动与冲击》2013年第35卷)等论文。

E-mail: dlynuua@163.com

通信作者简介:柯世堂,男,1982年11月生,博士、教授。主要研究方向为结构抗风与抗震。

E-mail: keshitang@163.com

