

大型冷却塔结构的等效静力风荷载

柯世堂, 葛耀君, 赵 林, 张军锋

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 采用刚性模型风洞同步多点测压试验获取非正常激励向量, 并结合 POD(经验模式分解) 技术进行预测与重构处理, 然后基于结构动力方程推导出仅广义共振模态位移和弹性恢复力协方差矩阵, 再通过准静力分析方法计算出结构的共振和背景分量, 最后通过线性三分量组合方法得到结构总的等效静风荷载. 本文方法完全考虑了各共振模态间的耦合效应, 且物理意义明确, 从理论上适用于任意复杂结构的 ESWL(等效静风荷载) 计算. 以国内已建成的亚洲最高、最大的冷却塔——宁海电厂超大型冷却塔为例, 进行了该塔的风致响应和 ESWL 的计算, 得出了一些对工程设计有益的结论, 并验证了本文方法的有效性.

关键词: 大型冷却塔结构; 等效静力风荷载; 风致响应

中图分类号: TU 279.7 + 41; TU 312 + .1 **文献标识码:** A

Equivalent Static Wind Load of Large Cooling Tower

KE Shitang, GE Yaojun, ZHAO Lin, ZHANG Junfeng

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A new procedure is presented to calculate the equivalent static wind loads (ESWL) for the large cooling tower. Based on the synchronous multi-pressure measurement on the rigid building model, the generalized resonant modal displacement covariance matrix is obtained from structural equation of motion; then based on inertial wind loading (IML) method, covariance matrix of elastic restoring force containing the resonant components is obtained; the resonant response and equivalent static wind loads are calculated with loads-response correlation method. At last the total ESWL is obtained with linearity combination of background and resonant components. The proposed procedure avoids the integration process of calculating elastic restoring force with a full consideration of the modal coupling effects, which can be used to calculate the ESWL for any complex structures. The calculation of ESWL of the super large

cooling tower of Ninghai Power Plant demonstrates the effectiveness of the present approach.

Key words: large hyperbolic cooling tower; equivalent static wind loads; wind-induced response

大型冷却塔属于薄壁高耸结构, 模态耦合性强, 三维空间特性决定其对风荷载作用极为敏感, 其表面风压分布和塔间气流干扰十分复杂, 风荷载是此类结构设计的主要控制荷载^[1-2], 因此结构风振响应分析也尤为重要, 通常是结合随机振动理论采用数值分析方法来进行风振分析. 然而如果对每个塔都采用随机振动理论来进行结构设计, 计算过程会变得非常复杂, 对于设计人员来说也是不可接受的. 因此, 人们探索采用一种便于工程设计人员接受的方法, 这就是利用等效静风荷载来计算结构的风振响应. 所谓等效静风荷载是指当这组荷载作为静力荷载作用在结构上时它所引起的结构某一响应与实际风荷载作用时该响应的最大值一致.

Davenport 提出的“阵风荷载因子法”(GLF) 和由此发展的我国建筑结构荷载规范^[3] 中采用的惯性风荷载法(IWL) 均是源于等效静风荷载的基本思路, 而且采用 GLF 法提出的等效静力风荷载方法也被编入包括我国在内的许多国家的高层建筑结构设计规范. 由于该方法思路明确、简单快捷, 使整个工程界都在不同程度上使用这种方式来处理其他结构的风振问题. 冷却塔的相关规范^[4-5] 中也是采用该方法给出不同场地的阵风荷载因子来考虑结构的风振和风荷载问题. 然而, 对于大型冷却塔结构, 越来越多的研究^[6-7] 表明其风振问题存在多荷载形态、多振型响应和多目标等效等特点, 且各模态之间的耦合效应均不能忽略, 若还是直接套用高层建筑的研究方法必然会出现设计安全问题, 但国内外对于大型冷却塔等效静风荷载领域的研究几乎处于空白地

收稿日期: 2010-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(50978203, 90715039, 51021140005); 科技部国家重点实验室基础研究项目(SLDRCE08-C-02)

第一作者: 柯世堂(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为结构与桥梁抗风. E-mail: keshitang@163.com

带.因此,进一步探求大型冷却塔的等效风荷载迫在眉睫.

鉴于此,本文采用刚性模型风洞测压试验获取非定常激励,并结合经验模式分解技术(POD)进行降阶处理,基于结构动力方程推导出仅包含共振分量的弹性恢复力协方差矩阵,再通过准静力分析方法(LRC)计算出结构的共振和背景分量,最后通过三分量组合得到结构的等效静风荷载.本文方法完全考虑了各共振模态间的耦合效应.最后以国内已建成的亚洲最高最大的冷却塔——宁海电厂超大型冷却塔为例,进行了风致响应和等效静力风荷载(ESWL)的计算,得出了一些对工程设计有益的结论,并验证了本文方法的有效性.

1 本文方法的提出

图1中给出了冷却塔总等效静风荷载研究的理论框架,可以看出,对于平均分量,可直接通过风洞试验获得的平均风压系数转换确定;背景分量通过准静力的LRC方法来计算,求解关键在于影响系数矩阵的提取.而对于共振分量的计算,重点在于解决主模态的选择及其之间的耦合效应,这部分内容也是本文理论方法的主要创新点,从结构动力方程出发,并结合IWL和LRC法推导出能完全考虑共振耦合项的共振等效静风荷载,下文分别介绍背景和共振分量的求解步骤.

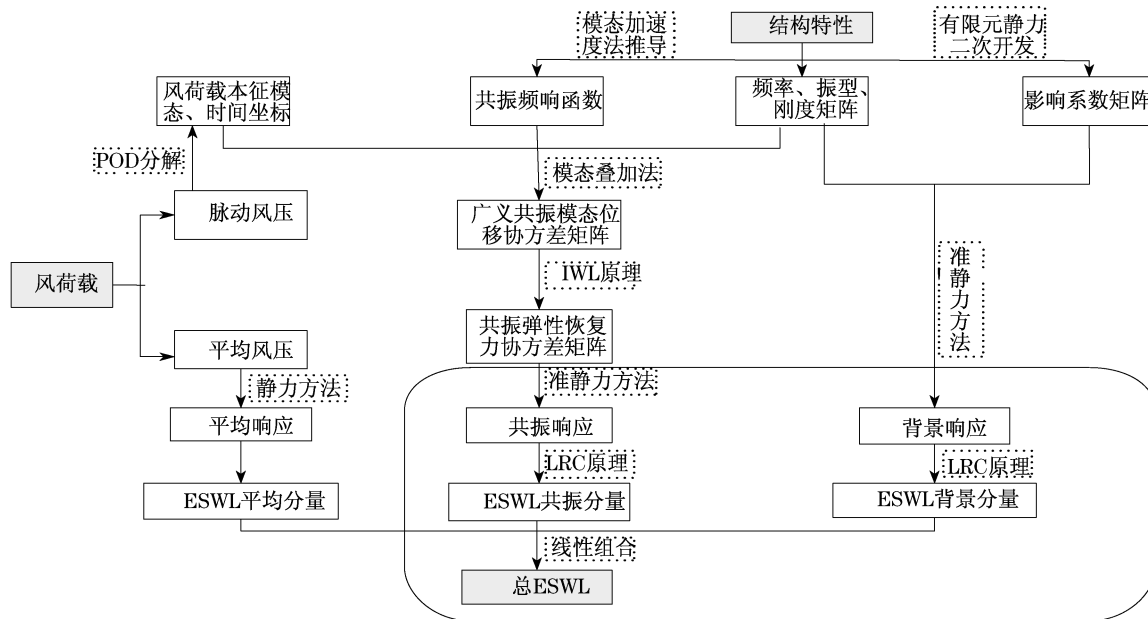


图1 本文方法计算结构等效静风荷载的理论框架

Fig.1 The proposed theoretical framework of the equivalent static wind load study

1.1 ESWL 背景分量分析

LRC方法是Kasperski于1992年提出的一种计算静力等效风荷载背景分量的方法,它利用准静力的方法计算背景响应,能够得到背景风荷载的等效分布形式,它的出现使等效背景风荷载的计算有了坚实的理论基础^[8].

用准静态方法得到 t 时刻结构上某点的瞬态背景响应 $r(t)$ 为

$$r(t) = \int_0^l p(z, t) I_r(z) dz \quad (1)$$

式中: l 为建筑物的高度; $p(z, t)$ 为表面风压激励时程向量; $I_r(z)$ 为响应 $r(t)$ 对应的影响函数.

背景响应标准差 $\sigma_{r,B}$ 为

$$\sigma_{r,B}^2 = \int_0^l \int_0^l \overline{p(z_1, t) p(z_2, t)} I_r(z_1) I_r(z_2) dz_1 dz_2 \quad (2)$$

背景响应和荷载的协方差 $\sigma_{r,p}$ 可以表示为

$$\sigma_{r,p}^2 = \int_0^l \overline{p(z_1, t) p(z_2, t)} I_r(z_1) dz_1 = \rho_{r,p} \sigma_{r,B} \sigma_p(z_2) \quad (3)$$

式中: $\rho_{r,p}$ 为 z_1 位置的背景响应与 z_2 位置处荷载之间的相关系数; $\sigma_p(z)$ 为高度 z 处脉动荷载均方根.那么式(2)可以改写为

$$\sigma_{r,B} = \int_0^l I_r(z_2) \cdot [\rho_{r,p} \sigma_p(z_2)] dz_2 \quad (4)$$

定义

$$P_{\text{eb}}(z) = g_B \rho_{r,p} \sigma_p(z) \quad (5)$$

式中: $P_{\text{eb}}(z)$ 为对应于 $g_B \sigma_{r,B}$ 的等效静力风荷载, g_B 为背景响应的峰值因子. 那么式(4)可写成

$$g_B \sigma_{r,B} = \int_0^l I_r(z) \cdot P_{\text{eb}}(z) dz \quad (6)$$

1.2 ESWL 共振分量分析

首先给出本文理论推导过程中涉及到的参数: n 为结构自由度数, m 为计算所采用的振型数, p 为激励向量的点数, s 为荷载经 POD 重构后采用的阶数, ω 是结构的圆频率, $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ 分别是 n 阶质量、阻尼及刚度矩阵, \mathbf{R} 是由 1 和零组成的 $n \times p$ 矩阵, 即力指示矩阵, $\mathbf{A} = \text{diag}(\omega_1^2, \dots, \omega_m^2)$, \mathbf{q} 是结构广义位移向量, Φ 是结构的特征矩阵, \mathbf{A} 和 \mathbf{D} 是经 POD 分解获得的前 s 阶坐标函数向量和本征模态矩阵, \mathbf{I} 为结构影响系数矩阵.

在随机激励下结构的响应可由式(7)描述:

$$\mathbf{M}\{\ddot{y}\} + \mathbf{C}\{\dot{y}\} + \mathbf{K}\{y\} = \mathbf{R}\{p(t)\} \quad (7)$$

其响应 $y(t)$ 可用全模态振型展开为

$$\begin{aligned} \{y(t)\} &= \Phi\{q(t)\} = \sum_{i=1}^n \phi_i q_i(t) = \\ &= \sum_{i=1}^m \phi_i q_i(t) + \sum_{i=m+1}^n \phi_i q_i(t) = \\ &= \{y\}_d + \{y\}_s \end{aligned} \quad (8)$$

式中: ϕ_i 为第 i 阶振型向量; $\{y\}_d$ 为前 m 阶需要考考虑共振效应的振型贡献响应; $\{y\}_s$ 为只考虑准静力效应的剩余振型贡献的响应.

结构在 $\{p(t)\}$ 荷载作用下的静力响应为 $\mathbf{K}^{-1} \cdot \{p(t)\}$, 也可以用式(9)全部振型表示, 不考虑各阶振型的动力放大作用

$$\begin{aligned} \mathbf{K}^{-1}\{p(t)\} &= \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i\{p(t)\} = \\ &= \sum_{i=1}^m \mathbf{F}_i\{p(t)\} + \sum_{i=m+1}^n \mathbf{F}_i\{p(t)\} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: \mathbf{F}_i 是第 i 阶振型的柔度矩阵. $\{y\}_s$ 可表示为

$$\begin{aligned} \{y\}_s &= \sum_{i=m+1}^n \mathbf{F}_i\{p(t)\} = \mathbf{K}^{-1}\{p(t)\} - \\ &= \sum_{i=1}^m \mathbf{F}_i\{p(t)\} \end{aligned} \quad (10)$$

再结合式(8), 将 $\{y(t)\}$ 用下式表示:

$$\begin{aligned} \{y(t)\} &= \{y\}_d + \{y\}_s = \sum_{i=1}^m (\phi_i q_i(t) - \\ &= \mathbf{F}_i\{p(t)\}) + \mathbf{K}^{-1}\{p(t)\} \end{aligned} \quad (11)$$

这样可以定义共振响应的表达式为

$$\{y(t)\}_r = \sum_{i=1}^m (\phi_i q_i(t) - \mathbf{F}_i\{p(t)\}) \quad (12)$$

第 i 阶广义共振模态响应为

$$\begin{aligned} q_{r,i}(t) &= q_i(t) - \frac{\phi_i^T \{p(t)\}}{\phi_i^T \mathbf{K} \phi_i} = \\ &= q_i(t) - \frac{\mathbf{F}_i(t)}{\mathbf{K}_i} \end{aligned} \quad (13)$$

第 i 阶和第 j 阶广义共振模态响应的互功率谱为

$$\begin{aligned} S_{q_{r,i}, q_{r,j}}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} R_{q_{r,i}, q_{r,j}}(\tau) e^{-i2\pi\omega\tau} d\tau = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} E[q_{r,i}(t), q_{r,j}(t + \tau)] e^{-i2\pi\omega\tau} d\tau = \\ &= \left(\mathbf{H}_i^*(\omega) \mathbf{H}_j(\omega) - \frac{1}{\mathbf{K}_i} \mathbf{H}_j(\omega) - \frac{1}{\mathbf{K}_j} \mathbf{H}_i(\omega) + \right. \\ &= \left. \frac{1}{\mathbf{K}_i \mathbf{K}_j} \right) S_{F_i, F_j}(\omega) = \left(\mathbf{H}_i^*(\omega) - \frac{1}{\mathbf{K}_i} \right) \cdot \\ &= \left(\mathbf{H}_j(\omega) - \frac{1}{\mathbf{K}_j} \right) S_{F_i, F_j}(\omega) = \\ &= \dot{\mathbf{H}}_i^*(\omega) \dot{\mathbf{H}}_j(\omega) S_{F_i, F_j}(\omega) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $q_{r,i}$ 和 $q_{r,j}$ 分别为第 i 和 j 阶广义共振位移向量; \mathbf{K}_i 为第 i 阶广义刚度; $\mathbf{H}_i(\omega)$ 为结构第模态的频响函数向量.

综合以上各式, 广义共振模态响应协方差矩阵 \mathbf{C}_{qq} 可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{qq} &= \int_{-\infty}^{\infty} \dot{\mathbf{H}}^* \mathbf{S}_{FF} \dot{\mathbf{H}} d\omega = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \dot{\mathbf{H}}^* \Phi^T \mathbf{R} \mathbf{D} \mathbf{S}_{AA} \mathbf{D}^T \mathbf{R}^T \Phi \dot{\mathbf{H}} d\omega \end{aligned} \quad (15)$$

式中: \mathbf{S}_{FF} 为结构表面激励向量的互功率谱矩阵; \mathbf{S}_{AA} 为经 POD 分解获得的前 s 阶时间坐标函数 $A(t)$ 互功率谱矩阵, 用作降阶处理.

应用模态展开理论, 可以结构仅包含共振分量的弹性恢复力 P_{eqq} 可表示为

$$\begin{aligned} \{P_{\text{eqq}}\}_r &= \mathbf{K}\{y(t)\}_r = \mathbf{K} \Phi\{q(t)\}_r = \\ &= \mathbf{M} \Phi \mathbf{A}\{q(t)\}_r \end{aligned} \quad (16)$$

结合式(15)和(16), 得到 $\{P_{\text{eqq}}\}_r$ 的互协方差矩阵 \mathbf{C}_{pp}

$$\mathbf{C}_{pp} = \overline{\{P_{\text{eqq}}\}_r \{P_{\text{eqq}}\}_r} = \mathbf{M} \Phi \mathbf{A} \mathbf{C}_{qq} \mathbf{A}^T \Phi^T \mathbf{M}^T \quad (17)$$

从以上的推导容易看出, $\{P_{\text{eqq}}\}_r$ 是仅包含共振分量的弹性恢复力向量, 其精确程度取决于计算 $\{q(t)\}_r$ 时的模态阶数和系统动力特性. 此时求解共振响应及其等效静风荷载转化为求系统在 $\{P_{\text{eqq}}\}_r$ 作用下的准静力响应, 利用 LRC 原理可知

$$\{r(t)\}_r = \mathbf{I}\{P_{\text{eqq}}\}_r \quad (18)$$

当 \mathbf{I} 为柔度矩阵时, $r(t)$ 即为结构的共振响应, 其响应的协方差矩阵 \mathbf{C}_{rr} 为

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{rr} &= \overline{\{r(t)\}_r \{r(t)\}_r} = \mathbf{I} \mathbf{C}_{pp} \mathbf{I}^T = \\ &= \mathbf{I} \mathbf{M} \Phi \mathbf{A} \mathbf{C}_{qq} \mathbf{A}^T \Phi^T \mathbf{M}^T \mathbf{I}^T \end{aligned} \quad (19)$$

则结构的共振响应为

$$\sigma_{R,r} = \sqrt{\text{diag}(C_{rr})} \quad (20)$$

其中: $\text{diag}(\cdot)$ 表示矩阵对角元素组成的列向量. 响应 R_i 的对应的共振等效静风荷载为

$$P_{eRi} = g_R C_{pp} I_i^T / \sigma_{Ri,r} \quad (21)$$

式中: g_k 为共振响应对应的峰值因子.

1.3 总 ESWL 组合分析

采用线性组合方式组合各分量得到总的等效静力风荷载,这样可以保证总等效静力风荷载是真实的荷载分布形式,且在该荷载作用下能确保控制点和非控制点的响应都与峰值响应一致^[9].

$$P_e = \bar{P} + \text{sign}(\bar{R}) \times (W_B P_{eB} + W_R P_{eR}) \quad (22)$$

式中: P_e 为结构的总风荷载; $P_{eB}(Z)$ 为背景等效静力风荷载; $P_{eR}(Z)$ 为共振等效静力风荷载; W_B, W_R 分别为 P_{eB} 和 P_{eR} 的权值系数,由下式确定:

$$W_B = g_B \sigma_{r,B} (g_B^2 \sigma_{r,B}^2 + g_R^2 \sigma_{r,R}^2)^{-1/2} \quad (23)$$

$$W_R = g_R \sigma_{r,R} (g_B^2 \sigma_{r,B}^2 + g_R^2 \sigma_{r,R}^2)^{-1/2} \quad (24)$$

式中: g_B 为背景对应的峰值因子; $\sigma_{r,B}$ 和 $\sigma_{r,R}$ 分别为背景和共振响应的均方根.

2 实例分析

根据本文所提方法采用 MATLAB 语言编制了相应的计算程序,以国内已建成的宁海电厂超大型双曲冷却塔结构为例,采用风洞刚性实验^[10]获得非定常表面风压时程作激励,计算广义共振模态位移矩阵时采用 POD 进行降阶处理.

该塔高 177.15 m,塔顶外半径 41.13 m,喉部中面半径 39.11 m,进风口中面半径 67.35 m,48 对人字柱直径为 1.30 m. 结构建模采用离散结构的有限单元方法,冷却塔塔壁离散为空间壳单元,顶部刚性环及与环基连接的 48 对人字柱采用空间梁单元模拟,人字柱柱底固接(图 2a). 通过模态分析提取了所有模态信息,又进行了二次静力开发获得了结构的影响系数矩阵. 风洞试验在同济大学 TJ-3 号风洞进行,刚性测压模型缩尺比例为 1/200(图 2b),在待测冷却塔外表面沿子午向和环向布置 $12 \times 36 = 432$ 个测压点(图 2c),试验采样频率为 312.5 Hz,采样时间为 19.2 s. 风洞试验的具体内容详见文献^[10].

2.1 本文方法的有效性验证

采用全模态叠加法方法计算结构的风致响应,再对比采用本文方法的计算结果进行误差分析(见图 3);通过加载本文方法计算得到的等效静风荷载进行结构的静力求解和结构的峰值响应进行对比分析(见图 4).

从图 3a 中可见本文方法和全模态完全二次型组

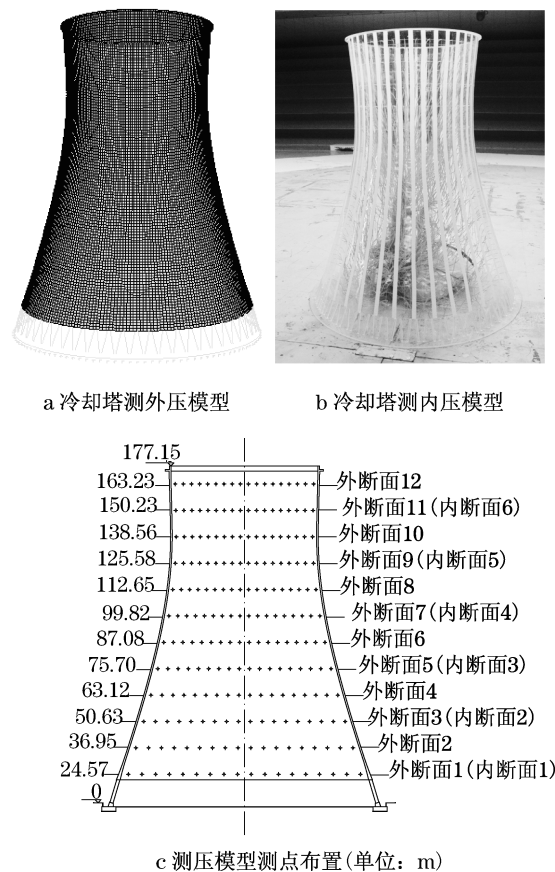


图 2 冷却塔计算与试验模型

Fig.2 Calculation modal and test modal for cooling tower

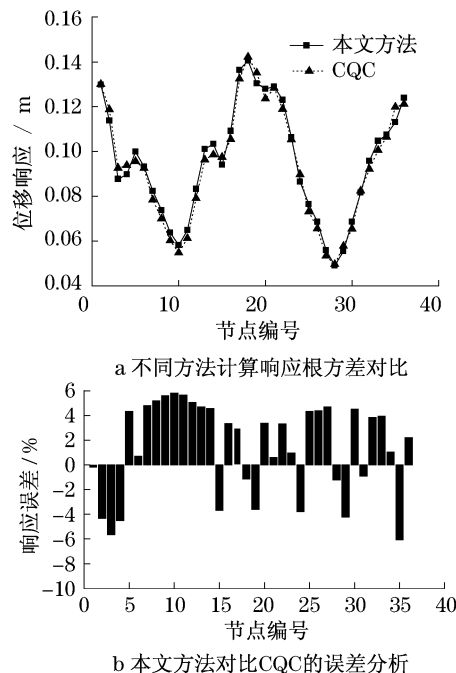


图 3 冷却塔喉部断面节点位移响应根方差和误差分析
Fig.3 RMS error analysis of the displacement in throat section

合法(CQC)计算结果基本一致,说明本文方法很好考虑了模态间的耦合项,再通过图 3b 的误差分析得到本文方法的平均误差为 2.2%. 图 4 为冷却塔喉部环向断面节点最大位移响应值的精确计算结果和按等效静风荷载施加在结构上采用静力求解方式所得到的相应位移值的比较,从结果可见 2 组位移响应完全一致,也更加证明了本文方法的有效性和正确性.

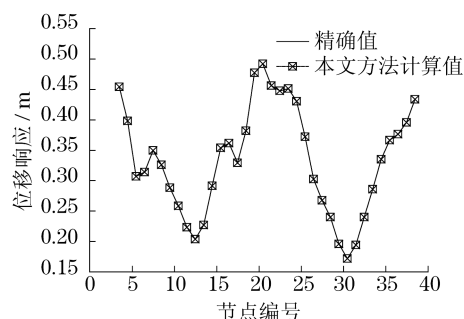


图 4 喉部环向断面节点最大位移

Fig.4 Maximum displacement in throat section

2.2 单一目标冷却塔等效静风荷载

图 5 给出了以冷却塔喉部最大峰值响应为等效目标的不同部位环向断面等效静风荷载绝对值分布图.从 4 条曲线的对比分析可以得到以下结论:①不同部位的环向断面等效静力风荷载分布规律明显不同,且数值差别也较大,塔底和塔顶的 ESWL 分布无规律可循,且数值较塔筒的中部断面小很多;②尽管规范给出的单塔平均风压沿环向是对称分布的,但对于单塔的 ESWL 来说,其环向分布不存在严格的对称特性,分析其原因是由于 ESWL 计算的基础是风洞刚体测压试验获得的非正常荷载,而冷却塔这类圆柱断面结构由于对雷诺数效应的敏感性使得在风洞试验中很难真正获取对称的脉动荷载;③对比可以发现冷却塔的 ESWL 从迎风面到负压极值区逐渐增大,然后到漩涡脱落区又渐渐变小,在背风区达到最小值,这与气弹试验的结论一致^[11].

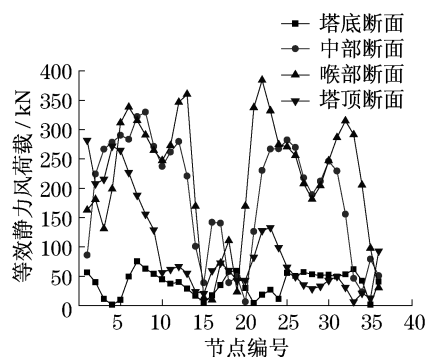


图 5 冷却塔不同部位 ESWL 分布图

Fig.5 ESWL for different sections

2.3 不同目标冷却塔等效静风荷载

对于冷却塔的结构设计人员来说,在不同的设计阶段关心的等效目标是不同的.为此,图 6 给出了针对不同等效目标的塔底、喉部和塔顶断面环向 ESWL 分布图.

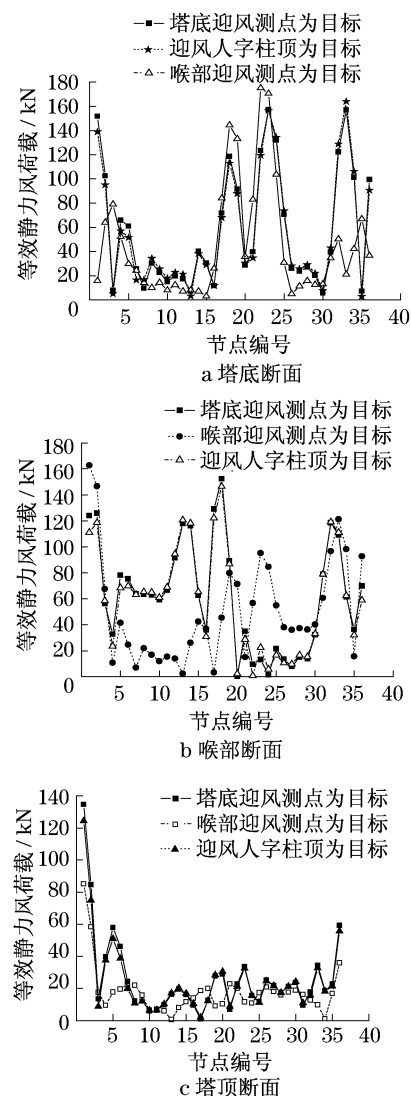


图 6 不同等效目标冷却塔环向 ESWL 分布

Fig.6 ESWL aimed at different equivalent objectives

从图中可以发现,不同目标的等效结果差别较大,但以人字柱顶位移为等效目标和以塔底节点位移为等效目标获得的 ESWL 非常接近,而和喉部迎风点为等效目标获得 ESWL 差别很大.如果采用一个统一的 ESWL 去进行冷却塔所有构件的设计明显是不合理的,这就要求进一步研究针对冷却塔多个等效目标的一致等效静力风荷载.

2.4 对规范风振系数的探讨

冷却塔设计相关规范^[4-5]在考虑风振效应时统

一采用风振系数来表达,但从前面冷却塔不同部位的等效静力风荷载可以发现,对于不同部位的ESWL 其数值大小和变化规律是不同的,如果简单采用一个统一值来表达必然存在一定的不合理性.表 1 给出了按本文方法计算出的 ESWL 换算得到的风振系数,可以发现在塔底部位其风振效应较低,计算获得风振系数也较小,大多在 1.4~1.6 之间,相当于规范给出的 A 类场地 1.6;随着高度的增加,冷却塔的风振系数大致呈现先增大再减小的规律,并且在喉部区域达到最大值;如果像规范那样采用一个统一值去考虑整个冷却塔的结构设计,笔者认为值得思考,建议采用区域划分来考虑风振效应.

表 1 加载 ESWL 得到的冷却塔不同部位风振系数
Tab.1 Wind-excited coefficients obtained by ESWL

塔底		中部		塔顶	
编号	β	编号	β	编号	β
1-1	1.42	8-1	1.89	12-1	1.67
1-12	1.56	8-12	2.28	12-12	1.98
1-24	1.45	8-24	2.53	12-24	2.21
3-1	1.48	9-1	2.36	13-1	2.07
3-12	1.61	9-12	2.28	13-12	2.08
3-24	1.55	9-24	2.00	13-24	1.88
5-1	1.57	10-1	2.60	14-1	2.11
5-12	1.69	10-12	3.15	14-12	2.35
5-24	1.63	10-24	2.86	14-24	2.09

注:编号指断面-结点编号; β 为风振系数.

3 结语

(1) 本文方法可以很好考虑模态间的耦合项,能准确计算大型冷却塔结构的风致响应和等效静力风荷载.

(2) 对于单一目标等效静力风荷载来说,冷却塔不同部位的环向断面等效静力风荷载分布规律和数值差别较大,并且其环向分布不存在严格的对称性.

(3) 不同目标的等效静力风荷载数值和分布差异较大,在设计过程中应针对阶段采用相应的等效静力风荷载.

(4) 随着高度的增加,冷却塔的风振系数大致呈现先增大再减小的规律,并且在喉部区域达到最大值,规范采用对应场地的统一风振系数来考虑冷却塔的风振效应存在一定的隐患,建议在制定风振系数时分区对待.

参考文献:

[1] 陈凯,魏庆鼎. 冷却塔风致振动实验研究[C]//第十一届全国

结构风工程学术会议. 西安:[s. n.],2003:177-182.
CHEN Kai, WEI Qingding. Investigation of wind-induced vibration of cooling towers[C]// The proceedings of 11th Structural Wind Engineering Conference. Xi'an:[s. n.],2003:177-182.
[2] KE Shitang, GE Yaojun, ZHAO Lin. Evaluation of strength and local buckling for cooling tower with gas flue[C]// Proceedings of the International Symposium on Computational Structural Engineering. Shanghai: Tongji University,2009 :545-551.
[3] 中华人民共和国建设部. GB 50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京:建筑工业出版社,2001.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50009—2001 Load code for the design of building structures[S]. Bei jing; China Architecture and Building Press,2001.
[4] 中国电力协会. NDGJ5—1988 火力发电厂水工设计技术规范[S]. 北京:中国电力出版社,1988.
China Power Association. NDGJ5—1988 Technical specification for hydraulic design of thermal power plant[S]. Beijing; China Electric Power Publishing House,1988.
[5] 中华人民共和国建设部. GB/T 50102—2003 工业循环水冷却设计规范[S]. 沈阳:东北电力设计院,2003.
The Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB/T 50102—2003 Code for design of cooling for industrial recirculating water[S]. Shenyang; Northeast Electric Power Publishing House,2003.
[6] 赵林,李鹏飞,葛耀君. 等效静风荷载下超大型冷却塔受力性能分析[J]. 工程力学,2008,25(7):79.
ZHAO Lin, LI Pengfei, GE Yaojun. Numerical investigation on equivalent static wind performance for super large cooling towers [J]. Engineering Mechanics,2008,25(7):79.
[7] 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,2006,23:177.
LIU Ruofei, SHEN Guohui, SUN Bingnan. Numerical simulation study of wind load on large hyperbolic cooling tower [J]. Engineering Mechanics,2006,23:177.
[8] Kasperski M, Niemann H J. The LRC (load-response-correlation)-method, a general method of estimating unfavourable wind load distributions for linear and non-linear structural behaviour[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn,1992,41-44:1753.
[9] Chen X, Kareem A. Equivalent static wind loads on buildings: new model[J]. J Struct Eng,2004,130(10):1425.
[10] 李鹏飞,赵林,葛耀君. 超大型冷却塔风荷载特性风洞试验研究[J]. 工程力学,2008,25(6):60.
LI Pengfei, ZHAO Lin, GE Yaojun, et al. Investigation on wind load characteristics for super large cooling tower in wind tunnel [J]. Engineering Mechanics,2008,25(6):60.
[11] 柯世堂,赵林,葛耀君. 大型双曲冷却塔气弹模型风洞试验和响应特性[J]. 建筑结构学报,2010,31(2):61.
KE Shitang, ZHAO Lin, GE Yaojun. Wind tunnel test on aeroelastic model of large hyperbolic cooling towers and features of wind induced response [J]. Journal of Building Structure,2010,31(2):61.