

# 超大型冷却塔随机风振响应分析

朱佳宁, 徐亚洲, 李 旭

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:**针对某超大冷却塔(250 m 高),通过虚拟激励法对钢筋混凝土双曲冷却塔在风载作用下的随机动力响应进行了分析,获得了风振响应的分布规律,并计算了位移风振系数.分析表明冷却塔前 100 阶振型频率集中在 0.5~2.5 Hz,均以环向谐波振动的模式形式出现.低阶振型的模态响应对结构位移风振响应的贡献最大;平均位移在喉部附近 0°迎风角位置达到最大值.超大型冷却塔的位移风振系数在塔中间部分较小,底部和顶部较大.

**关键词:**冷却塔;虚拟激励法;风振系数

**中图分类号:** TU 347

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2013)06-0808-05

冷却塔在大型火力发电厂与核电站中使用十分广泛.大型冷却塔作为一种空间薄壳的高耸结构,其主体结构由旋转壳体、支柱和环梁三大部分组成,通常情况下 100 m 高的冷却塔壳体最小厚度仅十几厘米.随着高度增加,结构质量轻、柔性大、阻尼小、自振频率低等特点,使风荷载成为控制该类薄壳旋转结构设计的主要荷载.1965 年 11 月 1 日,英国渡桥(Ferry bridge)电厂冷却塔群(共 8 座)在时速 137 km 的大风中 5 座塔严重受损,3 座塔倒塌.该事故使得设计人员对脉动风和塔群之间相互干扰效应有更为深刻的认识.现行的规范<sup>[1-2]</sup>中只针对高度小于 165 m 的冷却塔提出了规定,对高于 165 m 的冷却塔风荷载参数则没有提及.因此,针对这类超限冷却塔的抗风设计值得特别关注.本文考虑风荷载随机性,采用虚拟激励法对超限冷却塔结构的风振响应展开分析.

## 1 冷却塔动力性能分析

### 1.2 有限元建模

本文研究的双曲冷却塔结构<sup>[3]</sup>高 250 m,喉部直径 113 m,下部采用 60 对 X 型柱支撑.冷却塔主体采用 C40 钢筋混凝土结构,混凝土弹性模量为  $3.25 \times 10^4$  N/mm<sup>2</sup>,泊松比取 0.2.结合有限元技术<sup>[4]</sup>,冷却塔结构上部塔身壳体选用 shell163 壳体单元(四节点六自由度),底部 X 形钢筋混凝土柱选用 beam188 梁单元(两节点六自由度),底部均用固定支座约束,建立 ANSYS 有限元整体模型如图 1 所示.

### 1.2 模态分析

采用 ANSYS 软件对超大型冷却塔结构整体模型进行了模态分析,冷却塔前 4 阶振型如图 2 所示,图 3 给出了冷却塔前 100 阶振型频率的分布曲线.

从图 2~3 可以发现:(1)冷却塔结构前 100 阶主要集中在 0.5~2.5 Hz,自振频率十分密集;(2)最小几阶频率主要集中在环向谐波个数为 3~5 个,与张相庭<sup>[5]</sup>所述相符;(3)在低阶振型中,多以刚度较弱的塔顶振动为主.

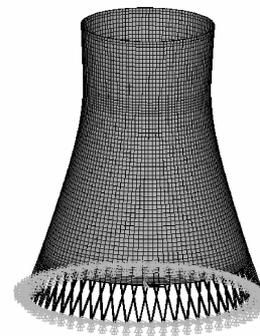


图 1 冷却塔有限元分析模型  
Fig. 1 FEM modal of cooling tower

收稿日期:2013-03-04 修改稿日期:2013-11-15

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20126120120011);西安市科技计划项目(CX12187⑥)

作者简介:朱佳宁(1975-),男,山东济宁人,博士,讲师,主要从事工程结构抗震、组合结构研究.



图 2 冷却塔结构前 4 阶振型

Fig.2 First four modals of cooling tower

## 2 冷却塔静风效应

在静风作用下冷却塔结构的振动方程可表示为

$$[M]\{\ddot{y}(t)\} + [C]\{\dot{y}(t)\} + [K]\{y(t)\} = \{P\} \quad (1)$$

式中,  $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$  分别为结构的质量、阻尼和刚度矩阵;  $\{\ddot{y}(t)\}$ 、 $\{\dot{y}(t)\}$ 、 $\{y(t)\}$  分别为结构的加速度、速度和位移向量矩阵;  $\{P\}$  为冷却塔静风荷载矩阵。

本文研究的双曲冷却塔结构计算模型基本风压取为  $0.55 \text{ kN/m}^2$ , B 类地貌. 通过有限元软件 ANSYS, 将静力风荷载施加在冷却塔各个节点上计算获得冷却塔的静风响应。

图 4 为冷却塔整体位移响应的云图, 图 5 为冷却塔整体位移响应的等值线图. 分析表明, 指向冷却塔轴心相反方向的正向位移最大值位于喉部附近风向角为  $72^\circ$  处, 与实际工程经验相符; 指向冷却塔轴心方向的位移负值最小值大致位于喉部附近风向角为  $0^\circ$  处。

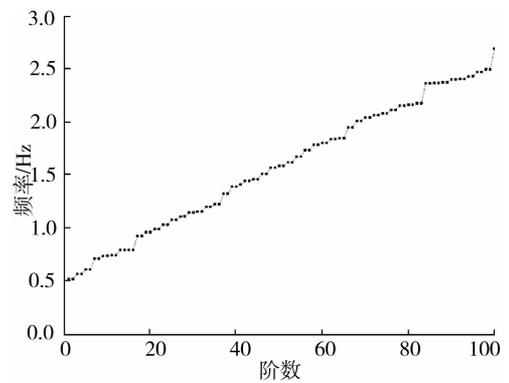


图 3 冷却塔的频率分布

Fig.3 Frequency distribution of cooling tower

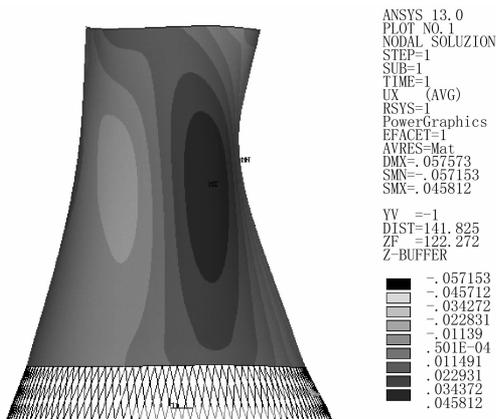


图 4 冷却塔整体位移响应分布云图

Fig.4 Overall displacement response contours of cooling tower

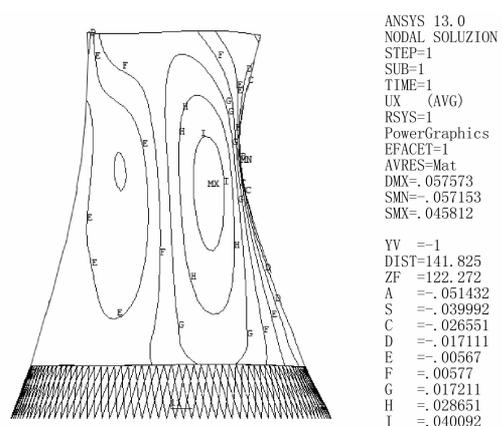


图 5 冷却塔整体位移响应分布等值线图

Fig.5 Displacement response contour map of cooling tower

冷却塔在塔底(30 m)、喉部(190 m)和塔顶(250 m)三个高度处径向位移平均值沿圆周方向的分布

情况如图6所示. 其中塔底(30 m)处的平均位移分布形状与冷却塔的体型系数沿圆周方向的分布曲线恰好方向相反,平均位移在 $0^\circ$ 附近达到最大值,位移方向指向冷却塔轴心;正向位移在 $72^\circ$ 附近最大;喉部(190 m)处的位移在 $0^\circ$ 和 $75^\circ$ 之间的趋势与塔底相同.

### 3 冷却塔响应谱计算

根据虚拟激励法<sup>[6-7]</sup>,冷却塔喉部(190 m)处不同圆周角处的径向位移响应功率谱密度曲线如图7~9.

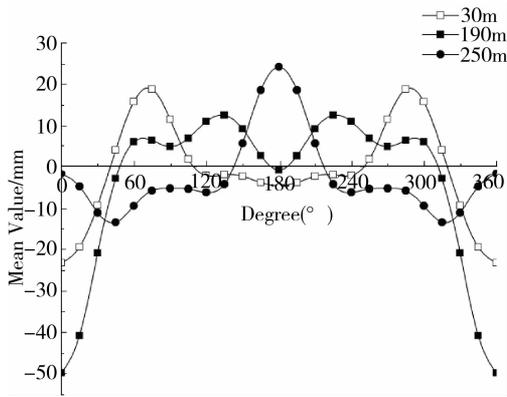


图6 冷却塔在30 m、190 m和250 m处径向位移响应平均值

Fig.6 Radial displacement response average value at 30 m,190 m and 250 m

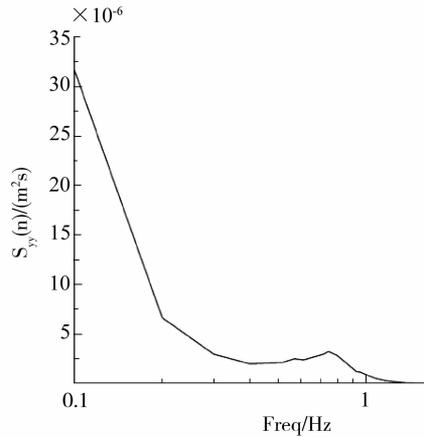


图7 冷却塔喉部(190 m)圆周角 $0^\circ$ 处径向位移响应功率谱

Fig.7 Radial displacement response power spectrum of circumferential angle  $0^\circ$  at 190 m

从图7~9中可以看出,结构的背景响应与共振响应在频谱上明显分离. 虽然冷却塔迎风面的谱值较侧风面大,但迎风面和侧风面的位移响应功率谱形状比较接近. 冷却塔结构振型十分密集,响应共振区的能量主要集中在 $0\sim 1.2$  Hz,峰值位于 $0.74$  Hz处,与第9~12阶模态频率很接近,对总响应贡献很大;而背风面的共振响应区域比前两者要大,峰值的频率位于 $0.57$  Hz和 $0.8$  Hz处. 三者的共同特点就是小于 $1.2$  Hz的低频区域响应占总响应的主要部分,而大于 $1.2$  Hz的高频区域部分响应接近于零;分析表明低阶振型对190 m高度处结构总响应的贡献远大于高阶振型.

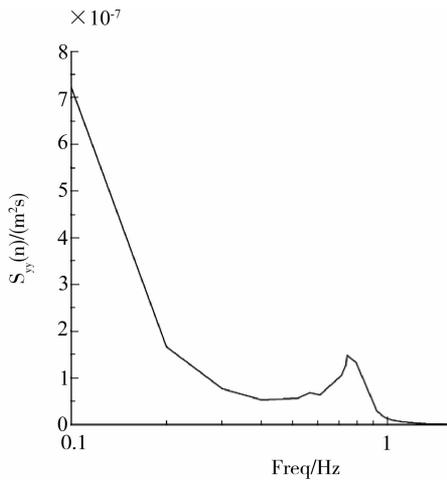


图8 冷却塔喉部(190 m)高度圆周角 $90^\circ$ 处径向位移响应功率谱

Fig.8 Radial displacement response power spectrum of circumferential angle  $90^\circ$  at 190 m

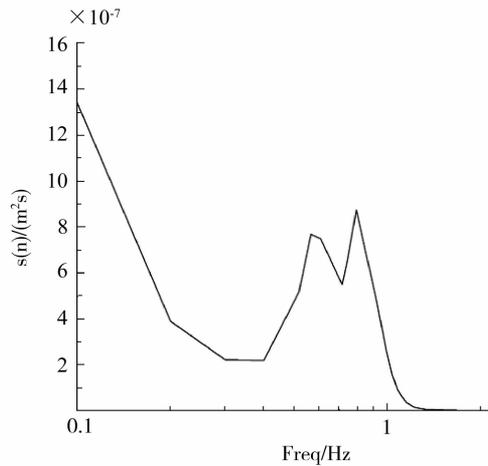


图9 冷却塔喉部(190 m)高度圆周角 $180^\circ$ 处径向位移响应功率谱

Fig.9 Radial displacement response power spectrum of circumferential angle  $180^\circ$  at 190 m

图 10 给出了冷却塔在 30 m、190 m 和 250 m 三个高度的径向位移响应标准差沿环向的分布曲线。从图 10 中可以发现三条曲线的变化趋势相同,均在 0° 风向角和约 72° 风向角位置有两个极大值,在 30 m 和 190 m 的两条曲线基本重合。塔顶标准差数值比塔底和喉部的数值大近一倍,喉部比塔底的数值略微大一点。

### 4 风振系数计算

#### 4.1 荷载风振系数

根据荷载规范<sup>[1]</sup>定义,结构高度  $z$  处的荷载风振系数可由同一高度处的静风荷载和脉动风荷载产生对结构产生的总效应与静力风荷载产生的效应的比值来表示,即:

$$\beta(z) = \frac{\hat{F}(z)}{\bar{F}(z)} = 1 + g \frac{\sigma_{F_1}(z)}{\bar{F}(z)} \quad (2)$$

式中:  $\beta(z)$  为结构高度  $z$  处的荷载风振系数;  $\hat{F}(z)$  为结构高度  $z$  处总荷载;  $\bar{F}(z)$  为结构高度  $z$  处的静力荷载;  $g$  为峰值因子;  $\sigma_{F_1}(z)$  为脉动风荷载标准差。

对于峰值因子  $g$  有着以下的计算公式

$$g = \sqrt{2 \ln \nu T} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln \nu T}} \quad (3)$$

式中:  $\nu$  一般取为结构固有频率  $n_1$ ;  $T$  为最大值相应的时距,按我国荷载规范规定取为 10 min,即取  $T=600$  s。

#### 4.2 位移风振系数

与荷载风振系数的定义类似,位移风振系数是一种效应风振系数,按照动态风载产生的最大位移等于等效静风载产生的位移的等效原则,它可以采用结构最大位移反应与平均位移反应之比来表示,这些位移反应可以通过有限元分析得到,即

$$G = \frac{\bar{y} + \hat{y}_d}{\bar{y}} = 1 + \frac{g \sigma_y}{\bar{y}} \quad (4)$$

式中:  $\bar{y}$  为平均风引起的结构位移;  $\hat{y}_d$  为脉动风引起的结构位移;  $g$  为位移峰值因子;  $\sigma_y$  为脉动风引起的结构位移标准差。

由表 1 可见位移风振系数在塔的中部区域数值较小,向塔底和塔顶附近的区域逐渐增大。

表 1 冷却塔位移风振系数

Tab. 1 Displacement wind vibration coefficient of cooling tower

高度/m	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250
位移风振系数	1.45	1.39	1.37	1.35	1.33	1.32	1.32	1.31	1.30	1.34	1.68	1.73

### 5 结 论

本文通过二次开发采用虚拟激励法对超大冷却塔进行了随机风振响应分析,计算了冷却塔的位移风振系数。模态分析表明冷却塔前 100 阶振型频率集中在 0.5~2.5 Hz,模态都是以环向谐波振动的形式出现,平均位移在喉部附近 0° 迎风角位置达到最大值。

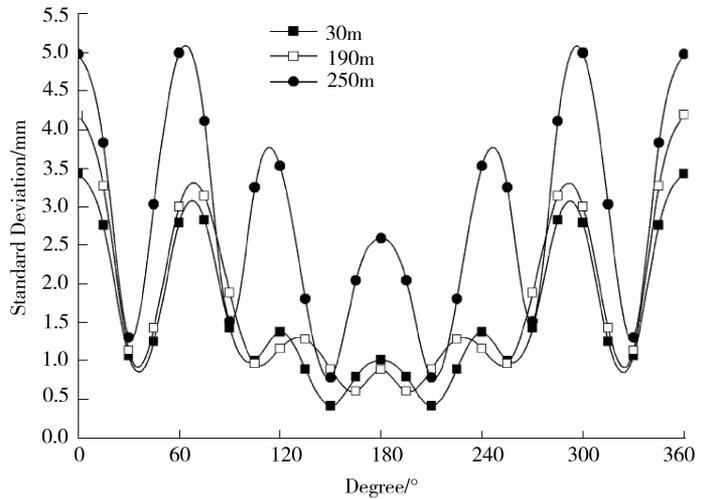


图 10 冷却塔不同高度径向位移响应标准差沿环向分布

Fig. 10 The standard deviation distribution of the radial displacement response of different heights along the ring

结构位移响应谱和标准差分布分析表明,低阶振型的模态响应对结构位移风振响应的贡献最大.超大型冷却塔的位移风振系数在塔中间部分较小,底部和顶部较大.其最大值 1.73 比规范中的 1.9 数值略小.

### 参考文献 References

- [1] GB50009-2012 建筑结构荷载规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.  
GB50009-2012 Load code for the design of building structures[S]. Beijing:China Building Industry Press,2012.
- [2] DL/T5339-2006 火力发电厂水工设计规范[S].北京:中国电力出版社,2006.  
DL/T5339-2006 Code for hydraulic design of fossil fuel power plants[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [3] 李旭. 考虑风场相关性的冷却塔随机风振响应分析[D].西安:西安建筑科技大学,2011.  
LI Xu. Stochastic dynamic wind-induced dynamic response analysis of cooling tower with spatial correlativity [D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2011.
- [4] 王勖成. 有限单元法[M].北京:清华大学出版社,2003.  
WANG Xu-cheng. Finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2003.
- [5] 张相庭. 结构风工程 [M].北京:中国建筑工业出版社,2006.  
ZHANG Xiang-Ting. Structural wind engineering [M]. Beijing:China Building Industry Press,2006.
- [6] 林家浩,张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M].北京:科学出版社,2006.  
LIN Jia-hao, ZHANG Ya-hui. The pseudo-excitation method of random vibration [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [7] 陈贤川,赵阳,董时麟. 基于虚拟激励法的空间网格结构风致抖振响应分析[J]. 计算力学学报,2006,26(3):684-689.  
CHEN Xian-chuan, ZHAO Yang, DONG Shi-lin. Buffeting analysis of space lattice structures based on pseudo excitation method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2006, 26(3):684-689.

## Stochastic wind-induced dynamic response analysis of large hyperbolic cooling tower

ZHU Jia-ning, XU Ya-zhou, LI Xu

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In this paper, the stochastic wind-induced dynamic response analysis of a large hyperbolic cooling-tower(250 meters higher) is conducted on the basis of the secondary development of the Pseudo Excitation Method(PEM), receiving a distribution of wind-induced response and calculating the modal and the displacement wind vibration coefficient of the cooling tower. The results show that the bottom and throat of tower are the higher parts of displacement wind vibration coefficient, which should be in focus.

**Key words:** large hyperbolic cooling tower; PEM; wind vibration coefficient