

文章编号: 1672-9897(2010)04-0007-06

大型双曲冷却塔表面脉动风压随机特性 ——风压极值探讨

柯世堂, 赵林, 葛耀君

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:针对风压信号呈现的非高斯特性和传统极限估计方法的局限,首次提出基于保证率和相关性的极值估方法——全概率迭代法进行冷却塔表面脉动风荷载极值分析,并和传统的峰值因子法及改进的 Sadek-Simiu 法计算结果进行对比验证。结果表明:全概率迭代法避开了对随机过程的高斯分布假定,相比传统的极值估计方法其结果更加真实可靠;表达风压极值中脉动分量的峰值因子数值沿着环向和子午向变化显著,如取为同一数值则偏于危险或过于保守;采用全概率迭代法得到的表面风压系数极值分布曲线与规范取值相比,迎风面和负压峰值区域极值偏小,背风区域极值偏大,且最小值对应角度相差约 10°。

关键词:峰值因子法; Sadek-Simiu 法; 全概率迭代法; 峰值因子; 关系数; 极值风压; 冷却塔

中图分类号: TU279.7+41 **文献标识码:** A

Features of fluctuating wind pressure on large hyperbolic cooling tower: discussions on extreme wind pressure

KE Shi-tang, ZHAO Lin, GE Yao-jun

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

Abstract: Peak factor method and Sadek-Simiu method based on Gauss distribution are introduced in detail, the method of estimating extreme value based on reliability theory is optimized, and the total probability convergence method which is applied for single sample is proposed. The results of pressure test for ultra large-scale cooling tower calculated by these methods are discussed. The analysis results show that the total probability convergence method avoids the assumption of Gauss distribution and can gain better results for non-Gauss distribution. Because of the effect of turbulent flow and vortex shed its extreme value of wind responses in different areas of surface of tower is different, the same value to consider its pulse wind's effect should not be taken. In this paper, the distribution rule about sectional drag force coefficients along the tower height is analyzed based on probability correlation technique, then the Fourier serious fitting curves of wind pressure extreme value distributions along the circumferential direction for each section are also proposed.

Key words: peak factor method; Sadek-Simiu method; total probability convergence method; peak factor; related coefficient; extreme wind pressure; cooling tower

0 引言

大型双曲冷却塔作为一种空间薄壁高耸结构,其振型复杂,对风荷载作用极为敏感,表面风压分布和塔间气流干扰十分复杂,风荷载作用下的安全性历来受到工程界的高度重视^[1-4]。在验算冷却塔风荷载作用下的强度和局部稳定性时,需采用体型系数极值结

果,而规范中只给出了体型系数均值分布,这就需要通过风洞试验结果和极值估计方法来确定极值风载体形系数进行分析,所以正确选用极值风荷载,对冷却塔结构安全至关重要。风洞试验中,壳体表面的风荷载通常用风压或风压系数来表示。由于近地风可分为平均风和脉动风两部分,其中脉动风的强度是随机变化的,以及气流在壳体表面分离、再附着和旋涡

收稿日期: 2009-07-03; 修订日期: 2009-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(50978203)和科技部重大科技项目(2008ZX06004-001)联合资助

脱落的影响,在模拟大气边界层的风洞试验中,测得的建筑物表面各点的压力系数也是一条随机变化的曲线。对于这样的压力系数时程曲线,如何在安全保证和经济原则下恰当地得到一定保证率下的设计最大(最小)压力系数值具有重要的工程意义。

当前通常采用峰值因子法^[5]来得到极值风压系数,但由于这种方法假定压力系数时程曲线为高斯过程来考虑,在某些情况下(如建筑物外形复杂,周围建筑干扰显著等)取值偏低。随后有学者提出了改进了峰值因子法和Sadek-Simiu法,但是这些方法都存在一些自身的问题^[5-8]。笔者在第一篇试验和非高斯特性研究工作的基础上,进一步优化了文献[5-7]中传统的可靠度理论极值估计方法,首次提出基于保证率和相关性的极值估计方法-全概率迭代法计算其表面极值风荷载,通过与传统极值估计方法的计算结果进行比较,验证了全概率迭代法是一种更为合理和可靠的极值估计方法,并将拟合结果与规范风压系数曲线对比得到了一些有参考价值的结论,对今后类似大型双曲冷却塔工程的设计具有一定指导作用。

1 极值估计方法

1.1 传统极值估计方法

1.1.1 峰值因子法

早期以Davenport(1964年)为代表的风工程研究人员为了分析方便,假设脉动风压服从高斯分布,并利用基于高斯过程的零值穿越理论给出一峰值因子,以该峰值因子乘以脉动风压的均方根值再加上平均风压得到风压峰值(下文简称峰值因子法),峰值因子表达如下:

考虑一个零均值的平稳高斯过程 $x(t)$,标准高斯过程所有极大值和极小值的概率密度函数为:

$$p(x) = \frac{1}{2\pi} \left[\epsilon \exp\left(-\frac{x^2}{2\epsilon^2}\right) + \sqrt{1-\epsilon^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \int_{-\infty}^{\frac{x^2}{4}} \exp\left(-\frac{\zeta^2}{2}\right) d\zeta \right] \quad (1)$$

式中, $\epsilon = (1 - m_2/m_0 m_4)^{1/2}$ 是高斯过程 $x(t)$ 的带宽参数, 取值范围 $(0, 1)$, 当 ϵ 接近 1 时为宽带随机过程, 当 ϵ 等于 0 时为窄带随机过程。 m_i 为单侧谱密度的谱矩。

对于大于 N 个极大值的极值 x 的泊松模型分布函数为:

$$F_{x_e}(x) = \exp\left[-\frac{1}{2\pi} \sqrt{m_2/m_0} T \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)\right] \quad (2)$$

这个就是标准高斯过程 $x(t)$ 的极值 x_e 的概率分

布函数。令: $dF_x(x) = \exp(-\psi) d\psi$, $\psi = v_0 T \exp(-x^2/2)$, $v_0 = 1/2\pi \sqrt{m_2/m_0}$, 所以极值的均值可表达为:

$$\bar{x}_e = \int_0^\infty x dF_x(x) = \int_0^\infty x \exp(-\psi) d\psi \quad (3)$$

联合上面几式, 整理可得:

$$x = \sqrt{2 \ln v_0 T - 2 \ln \psi} = \sqrt{(1 \ln v_0 T) \left(1 - \frac{\ln \psi}{\ln v_0 T}\right)} = \sqrt{2 \ln v_0 T} - \frac{\ln \psi}{\sqrt{2 \ln v_0 T}} - \frac{1}{2} \frac{\ln^2 \psi}{\sqrt{(2 \ln v_0 T)^3}} + \dots \quad (4)$$

应用标准极值积分:

$$\int_0^\infty \ln \psi \exp(-\psi) d\psi = -\gamma \quad (5)$$

式中 $r=0.5772$, 为欧拉常数。由此平均极值可以近似地表示为:

$$g = \bar{x}_e = \sqrt{2 \ln(v_0 T)} + \frac{\gamma}{\sqrt{2 \ln(v_0 T)}} \quad (6)$$

以上关系为不少西方国家的荷载规范所引用, 但对于时间 T 的取值方式略有不同, 美国和加拿大规范中取 $T = 3600s$ 而没做说明, 而 AIJ1996 则取为 600s 且明确 T 为观察时间, 故 T 应理解为基本风压的平均时距, 中国规范和 AIJ1996 的风压时距都为 10min, 所以 T 应该取为 600s。由式(6)估算峰值因子, 按照此法得到的峰值因子偏小, 约在 3.0~3.5 之间。

1.1.2 Sadek-Simiu 法

而随着统计学的发展以及在工程上的应用, Sadek & Simiu(2002 年)在零值穿越理论的基础上提出了非高斯过程的极值计算方法(下文简称为 Sadek-Simiu 法)^[7]。时距 T 内, 时程 $y(t)$ 的极值 $y_{pk,T}$ 的概率分布函数为:

$$F_{Y_{pk,T}}(y_{pk,T}) = \exp[-v_{0,y} T \exp(-y_{pk,T}^2/2)] \quad (7)$$

根据上式可以得到指定概率 $F_{Y_{pk,T}}^i$ 下的极值:

$$y_{pk,T}^{max,i} = \sqrt{2 \ln \frac{-v_{0,y} T}{\ln F_{Y_{pk,T}}^i}} \text{ 或} \\ y_{pk,T}^{min,i} = \sqrt{2 \ln \frac{-v_{0,y} T}{\ln 1 - F_{Y_{pk,T}}^i}} \quad (8)$$

式中 $v_{0,y}$ 为高斯过程 $y(t)$ 的零值穿越率, 与峰值因子法的含义相同。因为在映射过程中并不能得到实际的高斯时程 $y(t)$, 因此上式在计算时仍然由 $x(t)$ 的谱 $S_x(n)$ 代入计算。

一旦峰值累积分布函数 $F_{Y_{pk,T}}(y_{pk,T})$ 由公式(7)得到, 那么将高斯过程映射到非高斯过程上, 就可以将非高斯分布的时间历程的峰值累积分布估计出来, 见图 1。

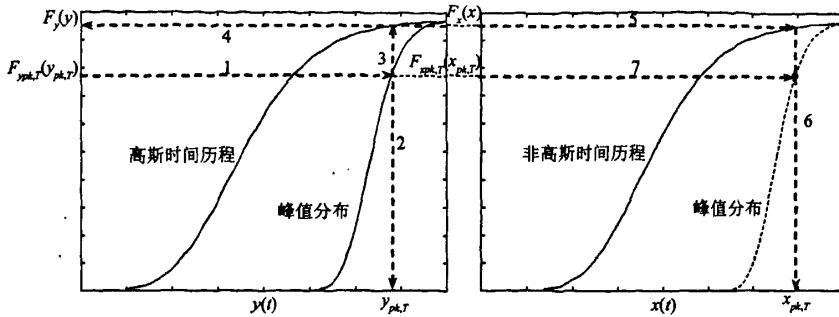


图1 高斯过程映射到非高斯过程的过程
Fig. 1 Graph of process from Gaussian to non-Gaussian

由于转换过程没法获得实际的标准高斯时程,概率分布函数中的零值穿越率必须由原非高斯时程获得,但是从非高斯过程中获得基于高斯假定的零值穿越率存在很大误差,这就是 Sadek-Simiu 法最大的遗憾。

1.2 全概率迭代法

冷却塔相关规范中只给出了体型系数均值分布,并规定在 B 类湍流场中用风振系数 1.9 来考虑阵风效应。为了与规范规定的体型系数极值进行比较,对各测点体型系数的试验值及其分布规律进行分析。由于风压信号存在的这种典型非高斯特性,使得传统极值估计方法不再适用。考虑到壳体表面风荷载强三维空间效应和明显的非高斯特性,提出基于相关性和保证率的全概率迭代法极值计算公式:

$$\mu_p = \mu_m + \sigma_\mu \times g \times \rho \quad (9)$$

式中, μ_m 和 σ_μ 为体型系数均值和根方差, g 为峰值因子, 是计算极值的关键参数, 由于测点风压信号不满足高斯分布假定, 故不能简单地采用经验值, 下文会给出笔者提出的基于保证率的计算方法; ρ 为相关系数。用 ρ_D 表示各测点体型系数时程与结构阻力或升力时程的相关系数, 则与结构阻力或升力时程相关的压力系数极值分别为:

$$\mu_{pD} = \mu_m + \sigma_\mu \times g \times \rho_D \quad (10)$$

测点间的互相关系数按下式计算:

$$\rho_{xy} = \frac{E[(x - Ex)(y - Ey)]}{\sigma_x \sigma_y} \quad (11)$$

式中, $E[\cdot]$ 代表数学期望, Ex 、 Ey 和 σ_x 、 σ_y 分别是气动力随机序列 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的期望和方差。

1.3 基于保证率的峰值因子计算方法

文献[7-8]提出了基于可靠度理论的极值估计方法, 尽管避开了对于风压概率为高斯分布的假定, 但是其得到的保证率是在整个样本下的统计, 显然对于采样时程中极小值以下的样本是不合适的, 并且是偏于危险的, 文中提出的基于保证率的峰值因子计算方

法是对整个采样时程中的极大(小)值样本进行分析, 然后进行极值 I 型分布拟合, 这样就可以在保证安全、经济的原则下恰当地得到一定保证率的设计极值风压。其原理为: 通过设定的概率为目标, 用逐步逼近法求得满足规定保证率的 g 值作为该测点的风压峰值因子。

令 P_{obj} 为工程上设定的目标保证率, 如 85%、99% 等; $C_p(i)$ 为某测点的风压系数时程值, $i=1, 2, \dots, N$, N 为样本总数; $C_p(i)$ 为该采样时程中的极大(小)值, C_{pa} 为该极大(小)值风压系数平均值; C_{pr} 为该极大(小)值风压系数均方根值; 令 C_{probj} 为该极大(小)值风压系数时程值满足目标保证率时的风压系数极值, 有下式成立:

$$P\{|C_p(i) - C_{pa}| \leq |C_{probj} - C_{pa}|\} = P_{obj} \quad (12)$$

令 $C_{probj} = |C_{probj} - C_{pa}|$, 即为风压系数极值脉动量。上式变为:

$$P\{|C_p(i) - C_{pa}| \leq C_{probj}\} = P_{obj} \quad (13)$$

采用逐步迭代法进行逼近。先对 C_{probj} 给定一个较小的初值 C_{probj0} , 得到一个初始保证率 P_{obj0} , 即:

$$P\{|C_p(i) - C_{pa}| \leq C_{probj0}\} = P_{obj0} \quad (14)$$

然后对 C_{probj0} 按增量 δ (δ 取均方根值的 $1/10000$ 倍可满足计算要求) 的倍数 k 不断增大, 从而得到不断增大的保证率 C_{probjk} , 即

$$P\{|C_p(i) - C_{pa}| \leq C_{probj0} + k\delta\} = P_{objk} \quad (15)$$

当 k 增大到某个数 M 时, $|P_{objM} - P_{obj}| \leq \epsilon$ (ϵ 为设定的精度指标, 一般取 10^{-5} 可满足计算要求), 即可认为 $C_{probjM} \approx C_{probj}$ 。则有:

$$C_{probj} = |C_{probj} - C_{pa}| = |C_{probj0} - C_{pa}| = \\ |C_{probj0} + M\delta| = gC_{pr} \quad (16)$$

从式(16)可得出峰值因子 g 的取值如下:

$$g = \frac{C_{probj}}{C_{pr}} = \frac{|C_{probj} - C_{pa}|}{C_{pr}} = \frac{|C_{probj0} + M\delta|}{C_{pr}} \quad (17)$$

从式(17)即可求出满足工程上规定的保证率下

的峰值因子,然后再代入全概率迭代极值拟合公式(10)中求取其极值。

为了验证基于保证率和相关性的全概率迭代极值估计方法的可靠性和优越性,采用全概率迭代法、Sadek-Simiu 法和峰值因子法分别计算冷却塔中部 7、8、9 断面(中部断面气动参数变化更有规律,利于和规范值进行比较,断面位置见图 2(a))各测点峰值因子数值,给出了各个测点的体型系数均值和根方差,图 4 给出了环向各测点与阻力及升力相关系数的数值变化规律,并用公式 10 对 3 个断面的极值进行计算,极值统一取 3 个断面的平均,图 5 给出了每种极值估计方法所对应的保证率,并将 3 种算法下的极值结果与规范极值进行比较(如图 6)。

2 计算结果讨论

2.1 峰值因子取值探讨

从图 3 可以看出,对于 3 种不同的估计方法,计

算得出的结果差异还是比较大的,特别是基于高斯分布假定的峰值因子法和后两种方法之间的差异较大。

为了更进一步地对比 3 种算法的优越性,图 4(a)给出了 3 个断面的同一测点的峰值因子平均值及其对应的保证率,峰值因子法算出的风压极值普遍偏低,计算得到的保证率基本都在 80% 上下,最大保证率为 88%,这对于工程来说显然是偏于危险的,而由 Sadek-Simiu 法和笔者改进的全概率收敛法得出的结果比较可靠安全,Sadek-Simiu 法得出的极值结果保证率基本在 90% 以上,由于全概率收敛法是基于一定的保证率下算出风压极值和峰值因子,所以可以根据工程的重要性相应的调整保证率的大小,这一算法的优点是其他方法不具有的。从数值上看,全概率收敛法基于 95% 的保证率下的结果比较接近 Sadek-Simiu 法计算的结果,进一步验证了这种方法的适用性。

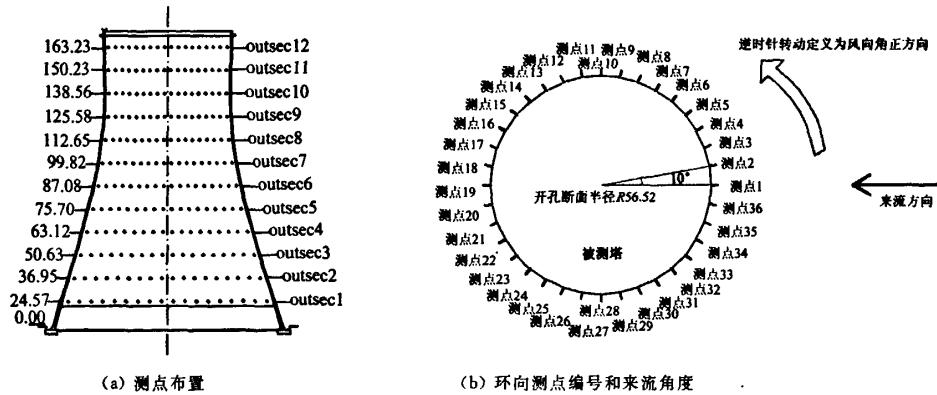


Fig. 2 Model of cooling tower for wind tunnel test

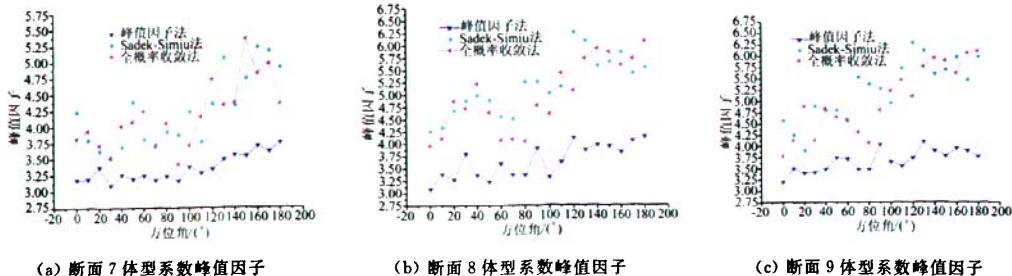


Fig. 3 3 种方法计算的不同断面体型系数峰值因子
Fig. 3 Value of peak factor under different methods

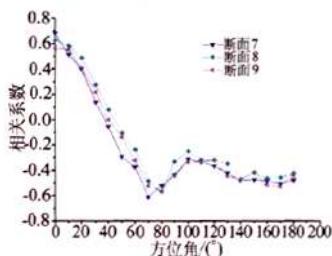
对于冷却塔 3 个不同的断面测点,计算出的峰值因子也相差较小,最大值都出现在背风区,主要是因为背风区测点压力系数时程均值的绝对值较小,而其对应脉动值相对较大。从 3 种方法计算出的峰值因子可以看出,从迎风面到背风区域其峰值因子呈现逐

渐增大的趋势,可见不论用什么方法,对于超大型冷却塔组合结构的塔筒表面进行风载作用分析时,最好可以在表面不同区域分别考虑极值脉动效应。

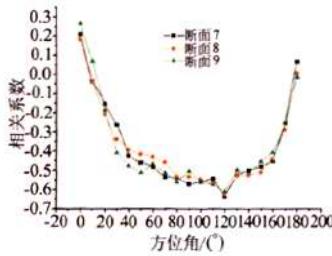
2.2 断面相关系数取值探讨

从图 4(a)中不同断面测点与整体阻力相关系数

变化数值可以看出,迎风面测点相关系数较大,达到0.6以上,随着环向角度的增加其数值迅速衰减,在负压极值区域其相关性最强,进入背风区后相关系数比较稳定,基本都在0.45左右。而从升力相关系数的变化图中发现,在分离点附近其相关性达到最强,随着向两边环向角度的增加其相关性逐渐变弱。由于背风区测点的风压均值较小,而脉动性能显著,与升力相关系数结果在背风区极小,不适合用于极值计算,故笔者基于相关性的极值估计方法采用与整体阻力相关系数的结果进行计算。



(a) 3个断面测点与阻力相关系数



(b) 3个断面测点与升力相关系数

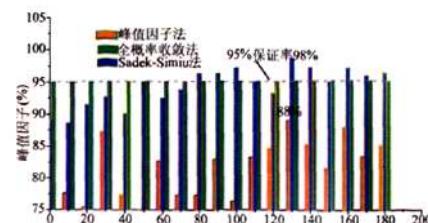
Fig. 4 Related coefficients of coefficients of wind pressure under different sections and drag force

2.3 风荷载极值对比研究

为了更好地和中国规范及风洞经验取值(常取值为3.5)进行比较,用全概率迭代法对塔底、喉部和塔顶3个断面测点基于80%保证率下峰值因子取值计算,从图5(b)中可以看出,将3个不同断面在80%保证率下的峰值因子平均,其值为2.475。规范取 g 等于2.2相对应的保证率大约为80%,明显不能满足工程的高保证率需求,其结果可能是偏于不安全的,建议在冷却塔这类高耸结构中使用时要慎重对待。

从图6(c)可以看出,3种极值估计方法计算出的体型系数极值分布与规范结果相差较大,峰值因子法估算的极值明显小于规范值和其他两种方法的数值,而3种方法极值在迎风区域都低于规范值,在负压峰值区域内其绝对值也小于规范值,但在背风面尾流区Sadek-Simiu法和全概率迭代法估算的体型系数绝对

值大于规范极值,而峰值因子法估算的极值要小于规范值。



(a) 不同方法估算的峰值因子对应的保证率

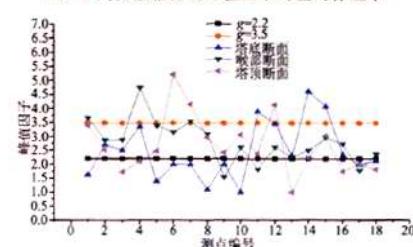
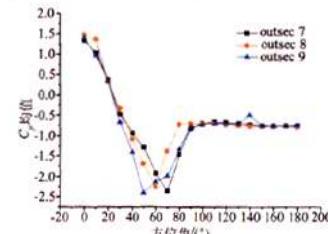
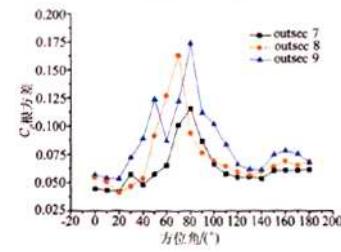
(b) 不同断面基于80%保证率取值与规范及经验取值对比
图5 3种估算方法对应的保证率

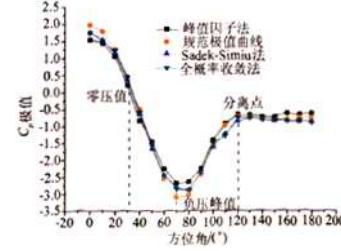
Fig. 5 Fraction of different evaluation methods



(a) 体型系数均值



(b) 体型系数根方差



(c) 体型系数极值与规范比较

Fig. 6 Characteristic parameters of coefficients of wind pressure under different section

3 结论

通过传统的峰值因子法、Sadek-Simiu 法和全概率迭代法对冷却塔壳体表面风压系数进行极值分析, 得出以下结论:

(1) 峰值因子法对于风荷载极值的估计结果其保证率偏低, 改进的 Sadek-Simiu 法极值估计结果保证率在 90%~95% 之间, 能满足工程安全性要求, 但考虑到全概率迭代法具有根据工程重要性预先设定保证率的优点, 是一种更为合理的极值估计方法;

(2) 表达风压极值中脉动分量的峰值因子数值沿着环向和高度变化差异明显, 如取固定的一个值时, 不能准确的反映表面的真实极值压力系数, 而且在有些区域是偏于不安全的;

(3) 采用基于保证率和相关性的极值拟合方法得到的表面风压系数极值分布曲线数值与规范取值相比, 迎风面和负压峰值区域极值偏小, 背风区域极值偏大, 且最小值对应角度相差约 10° 左右;

(4) 我国荷载规范给出的峰值因子取值有待商讨, 其对应的保证率大约在 80% 左右。

该项研究是以单个冷却塔不受周边建筑和群塔干扰效应影响下刚体测压试验为例进行表面脉动风压随机分布特性和极值研究, 结果表明我国规范在单体冷却塔表面环向风压系数极值分布条款有待商榷和补充规定, 而对于干扰效应下的冷却塔表面风压特性和极值研究需要进一步展开相关研究。

参考文献:

- [1] 武际可. 大型冷却塔结构分析的回顾与展望[J]. 力学与实践, 1996, 18(6): 1-5.
- [2] 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): 60-67.
- [3] 赵林, 葛耀君, 许林汕, 等. 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): 79-86.
- [4] 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(): 177-184.
- [5] DAVENPORT A G. Gust loading factors[J]. Journal of Structural Division, 1967, 93(ST3): 11-34.
- [6] SADEK F, SIMIU E. Peak non-Gaussian wind effects for database-assisted low-rise building design[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128: 530-539.
- [7] KASPERSKI M. Specification of the design wind load based on wind tunnel experiments[J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2003, 91: 527-541.
- [8] Li Q S, CALDERONE I, MELBOURNE W H. Probabilistic characteristics of pressure fluctuations in separated and reattaching flows for various free-stream turbulence [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 82: 125-145.
- [9] DL/T 5339-2006, 火力发电厂水工设计规范[S].
- [10] GB/T 50102-2003, 工业循环水冷却设计规范[S].
- [11] GB50009-2001, 中华人民共和国国家标准[S].
- [12] 黄鹏, 顾明, 施宗城. 风洞模型试验中峰值因子的讨论[J]. 结构工程师, 1997, (4): 16-19.
- [13] 张建胜, 武岳, 沈世钊. 结构风振极值分析中的峰值因子取值探讨[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(1): 28-31.
- [14] 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论文集, 2003: 177-182.

作者简介:



柯世堂(1982-), 男, 安徽省池州市人, 博士生, 从事结构与桥梁抗风研究。通讯地址: 上海市四平路 1239 号同济大学桥梁馆 302 室(200092), E-mail:keshitang@163.com