

文章编号:1673-2049(2011)02-0052-10

# 双曲冷却塔结构规范风荷载标准值对比

张军锋, 葛耀君, 赵 林

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**以参数分析为基础,对中、英、德双曲冷却塔结构设计规范风荷载标准值的取值原则和计算思路进行了对比,研究了基本风速、风剖面、内外表面静风风压环向分布、脉动效应系数、干扰效应系数等参数的取值和相互影响,并介绍了中、英、德双曲冷却塔设计规范与其荷载规范相关条款的差异;以 3 座不同高度的双曲冷却塔为例,对比分析了中、英、德规范的脉动效应系数取值,并对 1 座双曲冷却塔分别采用中、英、德规范计算等效风荷载标准值及其荷载效应。结果表明:受设计基本风压剖面 and 脉动效应系数控制,中、德规范的荷载标准值剖面较为接近,但明显小于英国规范;受荷载标准值剖面 and 环向压力分布影响,塔筒中下部区域子午向拉力和环向弯矩的极值分别对应于英、德规范,而喉部位置英国规范得到的子午向拉力和环向弯矩的极值分别为中、德规范的 1.4 倍和 1.1 倍。

**关键词:**双曲冷却塔;规范;风荷载标准值;脉动效应系数;干扰效应系数

**中图分类号:**TU312.1

**文献标志码:**A

## Comparisons of Nominal Values of Wind Loads on Hyperboloidal Cooling Towers

ZHANG Jun-feng, GE Yao-jun, ZHAO Lin

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

**Abstract:** Based on the comparative study of parameters, DL/T 5339—2006 (China), BS 4485-4: 1996 (British), VGB-R 610Ue:2005 (Germany) were selected as the representative codes and the calculation principles and methods of nominal value of wind load on hyperboloidal cooling tower were surveyed. The analysis considered the definition of basic wind velocity, wind profile, internal and external static wind pressure latitude distribution, gust effect factor, interference effect factor and also the interaction among them. Three representative hyperboloidal cooling towers were taken as examples to assess the gust effect factor from different codes, and a detail example was presented to illustrate the overall comparison of the nominal value of equivalent static wind load and the load effects. Results show that the nominal value profile of load of DL and VGB are close but much less than BS owing to differences from the design basic wind pressure profile and the gust effect factor. The meridian tension and latitude moment extreme values in middle-lower part of the shell originate from BS and VGB respectively; on the other hand, the meridian tension and latitude moment extreme values from BS are 1.4 times and 1.1 times of those from DL and VGB.

**Key words:** hyperboloidal cooling tower; code; nominal value of wind load; gust effect factor; interference effect factor

收稿日期:2011-01-16

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

作者简介:张军锋(1983-),男,河南平顶山人,工学博士研究生,E-mail:brilliantshine@163.com。

## 0 引言

冷却塔作为火电厂和核电厂冷却系统的重要设施,因冷却工艺性能的需要,自诞生以来就基本沿用双曲线或类似双曲线的多段曲线作为其子午线型,因此也统称为双曲冷却塔。冷却塔所受荷载种类较少,在运营阶段仅有自重、风荷载、温度荷载和地震荷载4类。作为高耸空间薄壁结构,风荷载是其主要的设计控制因素,在风激作用下的安全性历来受到工程界的高度重视。历史上多次出现冷却塔因风荷载、施工误差、地基下沉、施工等因素引发的倒塌事故<sup>[1]</sup>,这些事故引起了各国的普遍关注,也曾多次召开专门会议研究冷却塔的结构性能<sup>[2]</sup>,世界各国也均制定了相关设计规范以保证冷却塔在施工和运营过程中的安全性<sup>[3-7]</sup>。

近年来,随着中国电力事业的发展,许多地区超大型、高密度布置的冷却塔群不断兴建,建筑规模频频超出现行规范 GB/T 50102—2003、DL/T 5339—2006 的要求,结构柔性 and 风振效应愈加突出,冷却塔的风振响应和风致稳定性成为亟待解决的问题。为保证结构设计安全,有必要对中国冷却塔结构设计规范与其他国家规范进行对比,尤其是风荷载取值的比较。同时,随着各国建筑市场的开放以及工程设计国际化趋势的发展,了解其他国家规范所使用的荷载参数取值原则和计算方法是必要的,对中国规范的改进也有重要的借鉴意义。

本文中笔者以具有国际工程背景的印度 Punjab 邦 Mansa 区 TSPL 火力发电厂的冷却塔<sup>[8]</sup>(以下简称 TSPL 冷却塔)为例,分别采用中国 DL/T 5339—2006、英国 BS 4485-4:1996、德国 VGB-R 610Ue:2005 冷却塔设计规范(以下分别简称中国规范、英国规范和德国规范)计算对比各自的风荷载标准值及特征响应,对关键的脉动效应系数还以另2座冷却塔进行计算对比。由于冷却塔结构特殊,英、德两国规范对风荷载取值与各自的荷载规范 BS 6399-2:1997<sup>[9]</sup>、DIN 1055-4:2005<sup>[10]</sup>亦有不同,对其差异也进行了介绍。

## 1 冷却塔基本设计参数

选取的3座冷却塔高度分别为155.002、166.960、177.146 m,是现阶段中国冷却塔设计的主流尺度,也在现行规范限制高度附近。另外,其相关设计基本风速分布在 $24 \sim 33.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,涵盖了大部分冷却塔的设计基本风速。因此,三者结构尺度和风荷

载都具有较高的代表性,可以作为典型结构用于不同规范间的对比,结构尺度如图1所示,其中, $R_B$ 、 $R_S$ 、 $R_T$ 、 $R_H$ 分别为下支柱下端、塔筒下缘、塔筒喉部和塔筒顶部的半径; $Z_B$ 、 $Z_S$ 、 $Z_T$ 、 $Z_H$ 分别为下支柱下端、塔筒下缘、塔筒喉部和塔筒顶部的标高; $H_T$ 、 $H$ 分别为从下支柱下端算起的塔筒喉部高度和整个冷却塔高度; $H_{ST}$ 、 $H_S$ 分别为从塔筒下缘算起的塔筒喉部高度和整个冷却塔高度,即 $H=Z_H-Z_B$ ;  $H_T=Z_T-Z_B$ ;  $H_S=Z_H-Z_S$ ;  $H_{ST}=Z_T-Z_S$ 。此外,由于冷却塔所处工程场地复杂多变,为使规范对比具有一致性,计算中不包括基础,下支柱下端固接。表1为冷却塔结构及风荷载参数,其中, $T_0$ 为喉部壁厚; $f_{\min}$ 为基频; $V_0$ 为基本风速; $\varphi$ 为脉动效应系数。

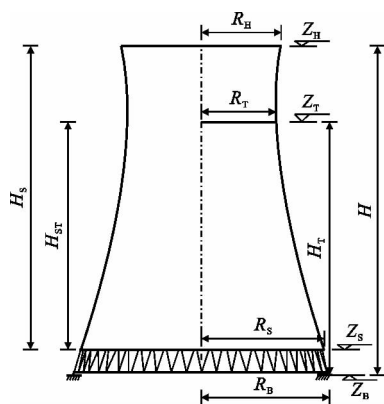


图1 冷却塔结构尺度定义

Fig. 1 Definitions of Dimensions of Cooling Tower Structures

## 2 风荷载参数取值对比

由于自然风的脉动性对结构是一种典型的动力作用,且幅值随体位置变化,为保证结构设计的安全和设计过程的简洁,与普通高层结构一致,各国规范对冷却塔结构上风的这一随机动力作用都采用等效静风荷载,即风荷载标准值来表达,包括基本风速(风压)、风速(风压)剖面、内外表面静风风压环向分布、脉动效应系数以及考虑相邻冷却塔和其他建筑的干扰效应系数等参数,见表2、3,其中, $\mu_z$ 为风速风压剖面参数; $w(Z, \theta)$ 和 $w_m(Z, \theta)$ 、 $w_g(Z, \theta)$ 与 $w_e(Z, \theta)$ 、 $w_i(Z, \theta)$ 分别为中国规范风荷载标准值、英国规范的平均风和阵风风荷载标准值、德国规范的风荷载外压和内压标准值,并且都是塔筒高度 $Z$ 和环向角度 $\theta$ 的函数; $S_{m, Z}$ 、 $S_{g, Z}$ 分别为英国规范的平均风和阵风风速剖面调整系数,两者都是高度 $Z$ 的函数; $q_b(Z)$ 为德国规范风压剖面参数; $L$ 为相邻冷却塔的中心距离, $D$ 为冷却塔塔底直径, $D_m$ 为塔筒

表 1 冷却塔结构特征及风荷载参数

Tab. 1 Characteristics of Cooling Tower Structures and Parameters of Wind Loads														
项目 编号	项目名称	$Z_H/m$	$Z_T/m$	$Z_S/m$	$Z_B/m$	$R_B/m$	$R_S/m$	$R_T/m$	$R_H/m$	$T_0/m$	$f_{\min}/\text{Hz}$	$V_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	场地 类别	$\varphi(\text{VGB})$
CT1	印度 TSPL 电厂冷却塔	155.002	118.801	10.600	-0.254 0	60.355 0	57.128	34.357	36.666	0.275	1.06	33.8	B	1.05
CT2	江苏彭城电厂冷却塔	166.960	130.170	11.500	-0.500 0	66.297 0	63.120	38.506	40.523	0.220	0.81	24.0	B	1.07
CT3	浙江宁海电厂冷却塔	177.146	141.133	12.216	-0.153 6	71.443 6	67.347	39.108	39.860	0.271	0.93	31.0	B	1.07

表 2 各国规范风荷载标准值计算方法

Tab. 2 Calculation Methods of Wind Load Nominal Values in Different Codes				
规范		中国	英国	德国
风荷载标准值		$w(Z,\theta)=\beta C_{Pe}(\theta)\mu_Zw_0$	$w_m(Z,\theta)=C_P(\theta)0.613(V_sS_{m,Z})^2\varphi$ ; $w_g(Z,\theta)=C_P(\theta)0.613(V_sS_{g,Z})^2\varphi$	$w_e(Z,\theta)=C_{Pe}(\theta)\varphi F_1q_b(Z)$ ; $w_i(Z,\theta)=C_{Pi}F_1q_b(H)$
风速指标及时距		基本风速 $V_0(10\text{ min})$	基本风速 $V_b(1\text{ h})$ , $V_b:V_0=0.94$ ; 场址风速 $V_s(1\text{ h})$ ;有效风速 $V_e(3\text{ s})$	基本风速 $V_0(10\text{ min})$ ,阵风风速 $V_g(3\text{ s})$ ; 沿海: $V_g:V_0=1.4$ ;内陆: $V_g:V_0=1.5$
设计 参考 风速	普通结构	$V_{0,Z}(10\text{ min})$ ,平均风剖面	有效速度 $V_e(3\text{ s})$ ,阵风剖面(BS 6399-2:1997)	$V_{0,Z}(10\text{ min})$ ,平均风剖面(DIN 1055-4:2005)
	冷却塔		场址平均风速 $V_{m,Z}(1\text{ h})$ ,平均风剖面; 场址阵风风速 $V_{g,Z}(3\text{ s})$ ,阵风剖面	$V_{g,Z}(3\text{ s})$ ,阵风剖面
外压系数 $C_{Pe}(\theta)$		Fourier 级数 8 项式, 区分无肋塔和加肋塔	Fourier 级数 8 项式, 不区分无肋塔和加肋塔	分段函数式,按表面粗糙度区分
内压系数 $C_{Pi}$		无明确取值	取 $C_{Pi}=-0.4$ ,仅对阵风计算考虑风剖面; 同时计入动力放大效应和干扰效应	取 $C_{Pi}=-0.5$ ,不考虑风剖面,以塔顶风压为 参考;不计动力放大效应但仍计入干扰效应
脉动效应系数		$\beta$ ,仅分场地类别给出经验取值	$\varphi$ ,考虑阵风效应、结构动力特性和干扰效应	$\varphi$ ,考虑阵风效应和结构动力特性
干扰 效应	相关规定	仅在文献[3]中给出了 最小塔距要求	体现于脉动效应系数,且仅有 1.5D 塔距时的 取值;塔高超过 120 m 时,应进行气弹风洞试验	$L/D_m\geq 4$ , $F_1=1.0$ ; $L/D_m=2.5$ , $F_1=1.1$ $L/D_m=1.6$ , $F_1=1.3$ ; $L/D_m<1.6$ , 风洞试验
	适用性	无明确说明	均适用于相邻冷却塔和相邻建筑且适用于多个冷却塔组合	

表 3 各国规范风荷载参数

Tab. 3 Parameters of Wind Loads in Different Codes				
规范	基本风速确定方法	风速区划	场地类别	风剖面
中国	10 m 高度开阔平坦场地下 50 年 一遇 10 min 平均最大风速	给出全国的基本 风速区划图	A、B、C、D	仅有平均风剖面幂指数 $\alpha$ : 0.12、0.16、0.22、0.30
英国	10 m 高度开阔平坦场地下 50 年 一遇 1 h 平均最大风速	同中国规范	海洋、农村 和城镇	给出平均风和阵风剖面 相关计算系数表
德国	同中国规范	只有 4 个基本 风速区划	沿海和内陆	平均风和阵风剖面 $\alpha$ (沿海为 0.085、 0.110;内陆为 0.120、0.160)

下缘直径和喉部直径的平均值;  $F_1$  为德国规范的干扰效应系数。但相比普通高层结构与大跨结构,冷却塔结构特殊,设计理论亦不完善,因此其等效静风荷载取值所涉及的风特性参数也较少。

2.1 基本风速和风剖面

基本风速和风剖面是结构风致响应计算的基础,但各国荷载规范的取值原则多有不同。中、英、德三国冷却塔设计规范对基本风速和风剖面的取值均依各自的荷载规范。对于基本风速  $V_0$ ,中国规范 GB 50009—2001、德国规范 DIN 1055-4:2005 的确定方法一致,而英国荷载规范 BS 6399-2:1997 基本风速  $V_b$  的风速统计时距为 1 h,并在结构设计中不

直接使用  $V_b$  而是使用了经海拔  $S_a$ 、季节  $S_s$ 、风向  $S_d$  和概率保证率  $S_p$  这 4 个因素修正得到的场址风速  $V_s$ 。中、英荷载规范的风速样本及分布都采用年最大风速和极值 I 型分布。

在普通结构设计中,英、德荷载规范分别以阵风风速  $V_e$  和平均风速  $V_0$  为基准;但在冷却塔结构设计中,英国规范则是以场址平均风速  $V_{m,Z}$  为基准,只是在脉动效应系数的计算中使用了场址阵风风速  $V_{g,Z}$ ,而德国规范以阵风风速  $V_g$  为基准;中国规范对普通结构和冷却塔的参考风速均为平均风速  $V_0$ ,因此,英、德规范还给出了阵风剖面。

由于英、德国土面积较小且都临近海洋,尤其是

英国受海洋性气候影响显著,对基本风速区划和场地类别的划分与中国有较大差别。英国荷载规范的基本风速区划与中、美、日等国的方法接近,均给出了基本风速区划图,而德国荷载规范把全国仅分为 4 个基本风速区。对于场地类别,中、德荷载规范均划分为 4 类,英国荷载规范区分为海洋、农村和城镇 3 类,但其海洋类并无工程意义,农村与城镇类场地亦不同于中国的 A、B 两类场地。中、英冷却塔设计规范对场地划分与各自的荷载规范一致,德国冷却塔设计规范的场地划分不同于其荷载规范,仅根据距离海洋远近划分为沿海和内陆 2 类,这或许因为冷却塔一般建于郊外而非城市。

对于各类场地的风剖面,中、德冷却塔设计规范直接给出了风剖面幂指数  $\alpha$ :德国规范两类场地的平均风剖面分别与中国 A、B 两类场地一致,阵风剖面则与美国荷载规范 ANSI ASCE 7-05<sup>[11]</sup>接近。英国荷载规范中并无明确的风剖面幂指数,而是给出了不同高度  $Z$  处平均风速和阵风风速的相关计算参数  $S_c$ 、 $S_{t,H}$ 、 $T_c$ 、 $T_{t,H}$ 。上述参数的确定也与场地距海洋远近有关:对于农村场地,直接根据场址距海洋的距离确定;对于城镇场地,除考虑与海洋的距离外,还要考虑场址上游城镇区域的宽度,也即城镇场地对来流风速和湍流度的影响,相当于给出了更为细致的渐变式的场地类别划分。另外,英国冷却塔规范对平均风压  $S_{m,Z}$  的取值与其荷载规范相同,而对阵风风压  $S_{g,Z}$  的取值不同于其荷载规范:为得到合理的冷却塔脉动效应系数,采用了并不体现实际风特性的阵风剖面。

英国规范  $V_s$ 、 $V_{m,Z}$ 、 $V_{g,Z}$ 、 $S_{m,Z}$ 、 $S_{g,Z}$  的计算公式分别为

$$V_s = V_b S_a S_s S_d S_p \tag{1}$$

$$V_{m,Z} = V_s S_{m,Z} \tag{2}$$

$$V_{g,Z} = V_s S_{g,Z} \tag{3}$$

$$S_{m,Z} = S_c T_c (1 + S_h) \tag{4}$$

$$S_{g,Z} = S_c T_c [1 + 3.5 S_{t,H} T_{t,H} (\frac{Z}{H})^{0.5} + S_h] \tag{5}$$

式中:对于农村场地,取  $T_c = 1$ ,  $T_{t,H} = 1$ ;  $S_h$  为场地地形修正系数。

在下面对比中,忽略  $V_b$  和  $V_s$  的差异,取  $V_b = V_s$ ,并且不计场地地形的影响,取  $S_h = 1$ ,  $S_c T_c$  也即平均风剖面。

为使英国规范的场地选取与中、德规范一致,以中国规范平均风剖面为参照,得到英国规范中对应的 A、B、C 三类场地(表 4、图 2)。需要说明的是,由

表 4 中、英规范场地类别对应关系

Tab. 4 Same Wind Terrains in GB and BS Codes

规范	中国	英国
场地类别	A(GB-A)	农村场地,距海洋 3 km(BS-A)
	B(GB-B)	农村场地,距海洋 100 km(BS-B)
	C(GB-C)	城镇场地,距海洋 100 km 且距城镇边缘 10 km(BS-C)

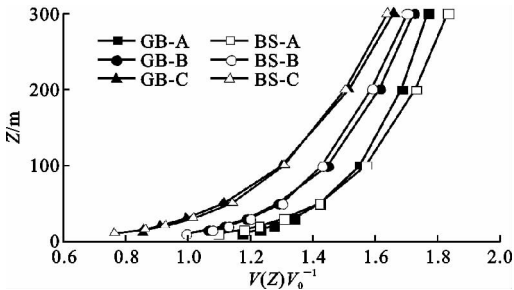


图 2 中、英规范平均风剖面对比

Fig. 2 Comparisons of Mean Wind Velocity Profiles Between GB and BS Codes

于国土狭长,英国很少有距海洋超过 100 km 的地区,但作为典型场地却有代表意义,因此仍以其与中德规范对应;对于阵风剖面,因英、德规范的表达方式不同,且英国规范与其荷载规范的表达也不一致,故不再进行一致性比较。另外,在英、德荷载规范中,结构风压沿高度分布并非简单地按风剖面变化,而是考虑上下端部效应呈阶梯状分布。对于冷却塔结构,中、德规范的风压高度变化均直接使用各自的平均风和阵风风压剖面,英国规范的分布模式与其荷载规范一致,但实际上可对  $V_{m,Z}$  直接使用塔顶风压(图 3)。图 3 中,  $H$ 、 $B$  分别为结构的高度和迎风面宽度,  $h$  为计算点高度,  $Z_e$  为英国规范中计算点风压的有效参考高度,  $q$  为沿高度分布的风压,模式 A 包括 BS 4485-4: 1996, BS 6399-2: 1997, DIN 1055-4: 2005, 模式 B 包括 GB 50010—2002, DL/T 5339—2006, VGB-R 610Ue: 2005。

由于中、英、德规范设计参考风速时距各不相同,故参考文献[12]得到英国和中国(德国)基本风速之比  $V_s : V_0 = 0.94 : 1$ ;德国规范对风速时距调整还考虑了场地类别的影响:沿海场地和内陆场地 10 m 高度的阵风风速  $V_g$  与基本风速  $V_0$  比值分别为 1.4、1.5。由此根据中、英、德规范的风速风压剖面参数  $\mu_z$ 、 $S_c$ 、 $T_c$ 、 $q_b(Z)$  得到其规范设计参考风速下的风压沿高度分布,如图 4 所示,其中,  $W(Z)$ 、 $W_0$  分别为高度  $Z$  处的风压与基本风压,BS-A-150 为英国规范 A 类场地 150 m 高度风压曲线,以此类推。中、英规范因风速时距引起的风压差异并不显著,但

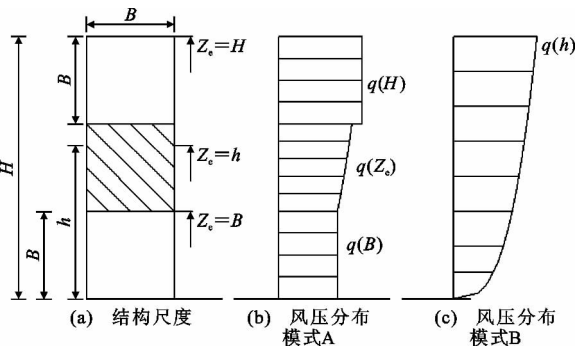


图 3 各国规范的风压剖面模式

Fig. 3 Modes of Wind Pressure Profiles in Different Codes

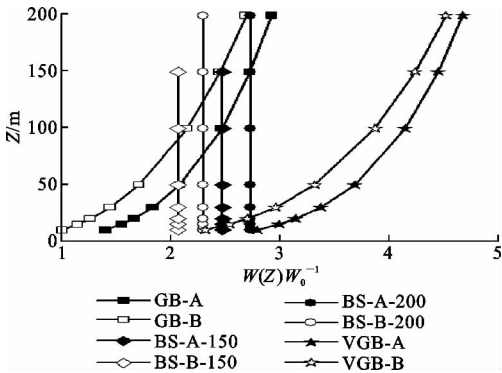


图 4 各国规范设计参考风速下的风压分布

Fig. 4 Wind Pressure Distributions for Design Reference Velocities in Different Codes

英国规范直接使用了塔顶风压,风压取值沿高度分布均匀并与冷却塔高度有关;德国规范因使用了阵风风压,风压取值远大于中、英规范。

2.2 内外表面静风风压环向分布

内外表面静风风压环向分布是冷却塔结构设计的基本参数。实际上,冷却塔内外表面风压均有脉动性,但受条件所限,大多实测和试验研究均局限于静风风压。作为圆截面结构,冷却塔外表面静风风压环向分布系数  $C_{pe}(\theta)$  受雷诺数效应影响显著,其原型结构在设计风速下雷诺数约为  $Re=1.5 \times 10^8 \sim 3.5 \times 10^8$ ,绕流形态在普通物理风洞中难以再现,因此各国规范和学者对冷却塔  $C_{pe}(\theta)$  的取值不尽相同(图 5、表 5):除侧风区外,中、英规范的风压分布基本一致,阻力系数也极为接近;而德国规范的背风区风压幅值偏大,阻力系数也较中、英规范大约 27%。对于内压系数  $C_{pi}$ ,由于实测和试验数据不足,中、英、德规范均认为内表面静风风压环向分布均匀,但取值亦不相同。

中国规范中的外表面静风风压环向分布曲线是经 20 世纪 70 年代广东茂名实塔观测和风洞试验修

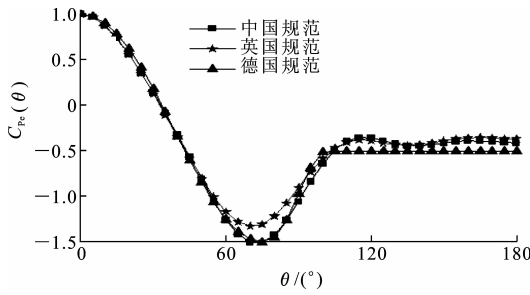


图 5 各国规范外表面静风风压分布

Fig. 5 External Static Wind Pressure Distributions in Different Codes

正<sup>[13]</sup>得到的,并区分无肋塔和加肋塔单独给出,但并未给出内压取值。1965 年渡桥电厂发生事故后,英国做了详细的调查和相关风洞试验,并完全根据试验得到了静风风压环向分布曲线。为便于使用,其风压分布同时计入了内压效应,但并未给出具体的内压取值。如果取迎风子午线外压系数  $C_{pe}(\theta) = 1.0$ ,则相当于取内压系数  $C_{pi} = -0.4$ 。由此可以看出,英国规范对内压也考虑了风剖面效应,但是,英国规范并未考虑冷却塔表面纵肋对外压环向分布的影响。

德国规范中的  $C_{pe}(\theta)$  是在 20 世纪 70 年代德国和美国多个实塔观测及风洞试验的基础上<sup>[14]</sup>给出的,相比中、英规范,其  $C_{pe}(\theta)$  的规定也最为详细。对无肋塔和加肋塔的  $C_{pe}(\theta)$  都是通过表面粗糙度系数来确定的,各类粗糙度系数主要影响侧风区风压取值:表面越光滑,侧面最小风压系数  $C_{pe,min}(\theta)$  幅值越大,出现的位置角度也逐渐后移;背风区始终取  $C_{pe}(\theta) = -0.5$ 。对于内压,德国规范取内压系数  $C_{pi} = -0.5$ ,但参考风压为塔顶风压而非英国规范的计算点风压,即认为内压沿高度均匀分布。

内外压作用下 TSPL 冷却塔塔筒的双向应力和内力极值分布见图 6、7。图 6 中外压子午向分布均以中国规范为准,内压均以塔顶风压为参考取  $C_{pi} = -0.5$ ,图 7 中仅计入图 5 所示外压。从图 6、7 可以看出:风荷载作用下,塔筒的轴力完全由子午向轴力  $F_{22}$  控制,相对外压,内压的影响可以忽略;由于内压分布均匀,其在塔筒中的弯矩效应亦可忽略;外压单独作用下,塔筒受力由子午向拉力  $F_{22T}$  和环向弯矩  $M_{11}$  控制,两者在各高度的环向极值( $F_{22T,LE}, M_{11,LE}$ )分别出现在迎风点和侧风区附近。因子午向拉力和压力环向极值( $F_{22T,LE}, F_{22C,LE}$ )的幅值和子午向分布较为接近,所以仅给出子午向拉力环向极值  $F_{22T,LE}$  的结果。

表 5 各国规范外表面压力分布相关参数

Tab. 5 Relevant Parameters for External Wind Pressure Distribution in Different Codes

规范	环向风压分布系数 $C_{pe}(\theta)$ 及相关参数			阻力系数
中国	$\sum_{k=0}^7 \alpha_k \cos(k\theta)$ , $\alpha_k$ : -0.442 6, 0.245 1, 0.675 2, 0.535 6, 0.061 5, -0.138 4, 0.001 4, 0.0650			0.385
英国	$\sum_{k=0}^7 \alpha_k \cos(k\theta)$ , $\alpha_k$ : -0.000 71, 0.246 11, 0.622 96, 0.488 33, 0.107 56, -0.095 79, -0.011 42, 0.045 51			0.387
德国	$0^\circ < \theta < 75^\circ$	$75^\circ \leq \theta < 102^\circ$	$102^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$	0.492
	$1 - 2.5[\sin(6\theta/5)]^{2.104}$	$-1.5 + \sin[90^\circ(\theta - 75^\circ)/27^\circ]^{2.395}$	-0.5	

注:  $\alpha_k$  为  $C_{pe}(\theta)$  第  $k$  个计算系数, 中、英两国规范都取  $k=1\sim7$ , 对英国规范, 减去 0.4 的内压系数; 对德国规范, 取  $K-1.5$  曲线,  $K$  为度量表面粗糙度系数的指标, 与最小负压有关,  $K-1.5$  表示本曲线的最小负压系数为 -1.5。

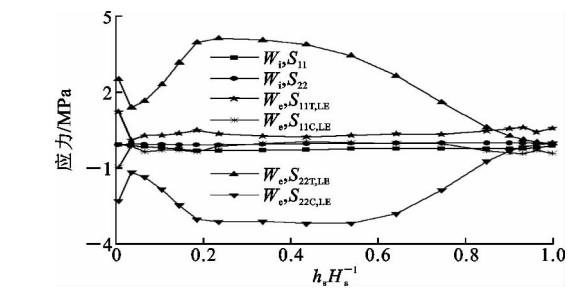


图 6 内外压作用下的双向应力分布

Fig. 6 Stress Distributions for Internal and External Pressures

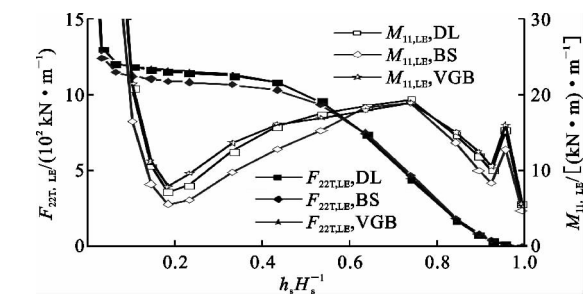


图 7 不同外压分布下的内力极值分布

Fig. 7 Extreme Value Distributions of Inner Forces for Different External Pressures

从图 7 还可以看出,  $C_{pe}(\theta)$  对  $F_{22T,LE}$  和  $M_{11,LE}$  的影响主要来自于迎风区和侧风区压力分布, 尤其是  $C_{pe,min}(\theta)$  取值, 而与背风区风压取值关系不大; 中、德规范  $C_{pe}(\theta)$  分布仅在背风区不同, 但  $F_{22T,LE}$  和  $M_{11,LE}$  分布基本一致; 英国规范因侧风区  $C_{pe,min}(\theta)$  幅值偏小, 其  $F_{22T,LE}$  和  $M_{11,LE}$  亦小于中、德规范。另外,  $M_{11,LE}$  对  $C_{pe}(\theta)$  和  $C_{pe,min}(\theta)$  的敏感性要大于  $F_{22T,LE}$ ; 英国规范冷却塔塔筒中下部的  $F_{22T,LE}$  和  $M_{11,LE}$  基本为中、德规范的 90% 和 70%, 且  $F_{22T,LE}$  还受上部荷载累积的贡献, 而  $M_{11,LE}$  主要与本高度处风压环向分布和  $C_{pe,min}(\theta)$  取值有关。在喉部区域, 中、英、德规范的  $F_{22T,LE}$  和  $M_{11,LE}$  取值基本一致。

2.3 脉动效应系数

由于自然风的脉动性和冷却塔的风敏感性, 对风荷载标准值的计算必须考虑其阵风效应和共振效应。由于兼具高耸、空间、大跨结构的特点, 相比典型的高层结构, 冷却塔脉动效应的研究还不甚完善, 各国规范对脉动效应系数的计算原则和取值各不相同, 也较高层结构简略。中国规范对冷却塔风荷载标准值的计算方法与建筑结构荷载规范类似, 都采用风振系数进行荷载放大, 但前者的风振系数  $\beta$  只是区分场地类别直接给出了经验取值: A、B、C 三类场地的  $\beta$  分别取 1.6、1.9、2.3。由于以平均风压作为设计指标,  $\beta$  相当于同时考虑了风压的脉动性以及所引起结构的共振效应, 这也与英国规范类似。

英国规范对脉动效应系数  $\varphi$  的规定最为复杂, 其条款同样来自于渡桥电厂事故的调查研究以及相关连续介质气弹模型风洞试验<sup>[15]</sup>。其脉动效应系数  $\varphi$  综合考虑了阵风脉动效应、结构共振效应和周边建筑干扰效应, 是根据风洞试验、结构分析得到的一个经验表达式, 与设计风速、结构基频、周边建筑等有关, 并以迎风子午线上子午向应力指标为参照进行脉动效应系数  $\varphi$  的计算: 根据设计平均风压  $q_m$ 、阵风风压  $q_g$  和式 (6) 计算冷却塔塔筒迎风子午向的平均应力  $N_{\varphi,m}$ 、峰值应力  $N_{\varphi,g}$  和共振应力分量  $N_{\varphi,r}$ , 通过式 (7)、(8) 计算用于塔筒局部屈曲设计、塔筒及下支柱承载力设计的  $\varphi_1$ 、 $\varphi_G$ 、 $\varphi_F$

$$N_{\varphi,r} = B'K \frac{V_s^4}{f_{min}t} \tag{6}$$

$$\varphi_1 = 1 + \frac{\sqrt{(N_{\varphi,g} - N_{\varphi,m})^2 + N_{\varphi,r}^2}}{N_{\varphi,m}} \tag{7}$$

$$\varphi_G = \varphi_F = 1 + \frac{\sqrt{(C_G N_{\varphi,g} - N_{\varphi,m})^2 + (C_D N_{\varphi,r})^2}}{N_{\varphi,m}} \tag{8}$$

式中:  $B'$  为系数,  $B'$  对塔筒上中下 3 个部分分别取 900、1 200、1 800;  $K$  为经有限数量的连续介质气弹

模型风洞试验得到的经验系数,对于普通逆流式冷却塔, $K$ 取 1/6 000,但在试验中并未考虑诸如塔筒厚度渐变、上下刚性环、不同的场地粗糙类别等因素; $t$  为计算点处的壁厚; $C_G$ 、 $C_D$  分别为用于  $N_{\varphi,g}$  和  $N_{\varphi,r}$  考虑周边干扰效应的修正系数,同样对塔筒上中下 3 个部分分别取值。

可见,英国规范的动力放大系数对于承载力设计实际上包含了干扰效应而对局部屈曲设计却没有包含干扰效应。另外,对于  $\varphi_l$  和  $\varphi_r$ ,以距塔筒下缘特定高度处的子午向应力为指标进行计算,即分别对整个塔筒和下支柱取常量,这一高度为下支柱的支撑间距;而对  $\varphi_G$  则以各高度处的子午向应力为指标进行计算,其取值将随高度变化。

由表 1 并依据英国规范式(6)~(8)得不计干扰效应(取  $C_G=1$ 、 $C_D=1$ )时 TPSL 冷却塔的应力分布和 3 座冷却塔的  $\varphi_G$  分布(图 8、9)。在同一场地下 3 座冷却塔  $\varphi_G$  分布基本一致,塔筒中下部区段,共振应力分量  $N_{\varphi,r}$  相对较小, $\varphi_G$  取值由  $N_{\varphi,m}$  和  $N_{\varphi,g}$  决定,从塔筒底部到  $0.85H_s$  高度, $\varphi_G$  变化较为平缓;塔筒顶部  $0.15H_s$  高度范围内, $N_{\varphi,m}$  和  $N_{\varphi,g}$  急剧减小而  $N_{\varphi,r}$  相对不变,因此  $\varphi_G$  急剧增大,甚至超过 100。如忽略  $\varphi_G$  沿高度的变化,取  $0.75H_s$  高度处  $\varphi_G$  为参考,不同场地的  $\varphi_G$  取值分别为 1.81、2.10、2.34,A、B 两类场地的  $\varphi_G$  取值比中国规范高约 0.2,C 类场地基本一致。冷却塔 A、B、C 三类场地下用于塔筒局部屈曲设计的  $\varphi_l$  分别取 1.60、1.81、2.00,略小于中国规范。在下面的对比中,当  $\varphi_G > 3$  时,取  $\varphi_G=3$ 。

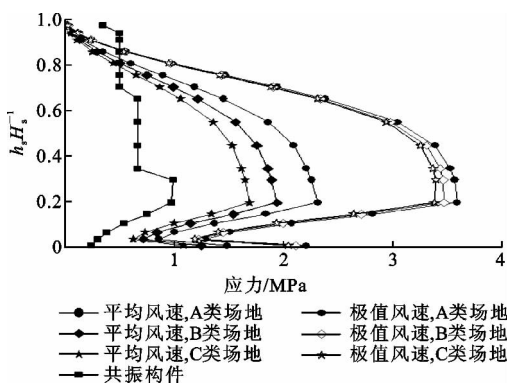


图 8 TPSL 冷却塔的应力分布

Fig. 8 Stress Distributions for TSPL Cooling Towers

与英国规范相同,德国规范同样采用应力指标进行脉动效应系数  $\varphi$  的计算,并给出了考虑结构尺度和基频的表达式

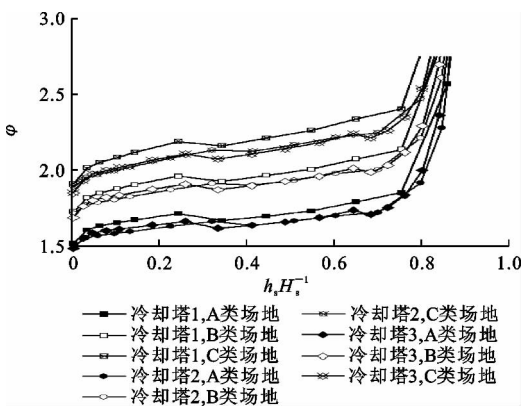


图 9 不同场地下单塔  $\varphi_G$  随高度的分布

Fig. 9  $\varphi_G$  Distributions vs Heights of Single Towers for Different Terrains

$$\varphi=f(R_1)$$
$$R_1=\frac{D_T}{2(H_s-H_{sT})}\frac{q_b(H)}{(D_Tf_{\min})^2}\times10^4\quad\quad(9)$$

式中: $R_1$  为反映结构共振效应的参数。

实际上,其参照指标为塔筒下部 1/3 高度范围内的最大拉应力,并且德国规范认为:相比其他部位的膜应力和弯曲应力,由此得到的  $\varphi$  值偏于保守,故可用于整个塔筒。由于德国规范所取设计风速为阵风风速,其脉动效应系数  $\varphi$  实际上仅有结构的共振分量,因此取值也较中、英规范偏小(表 6)。

表 6 德国规范脉动效应系数取值

Tab. 6 Values of Gust Effect Factors for VGB Code

$R_1$	0	2	4	6	8	10
$\varphi$	1.00	1.02	1.05	1.08	1.12	1.17

2.4 干扰效应

由于冷却塔多以双塔和多塔组合形式出现,且周边常有高大的电力厂房,流场的相互干扰改变了单塔表面动静态压力分布,可能导致结构响应的增加,因此,冷却塔的风致干扰效应也是各国研究者关注的问题之一。

中国规范并未对干扰效应给出明确的规定,仅在文献[3]中指出:相邻的逆流式自然通风冷却塔的净距不应小于塔的进风口下缘的塔筒半径;根据冷却塔的通风要求,与其他建筑物的净距不应小于塔的进风口高的 2 倍。实际上,相邻塔距的要求并未表明是出于冷却通风需要或是为减弱风荷载的干扰效应。

英国规范的干扰效应体现于脉动效应系数  $\varphi$  而未单独给出,且只给出了适用于特定塔距群体组合布置下的  $C_G$ 、 $C_D$ ,对于其他塔距及组合并无说明。为便于对比,由式(8)分别得到计入和不计入  $C_G$ 、 $C_D$

时的  $\varphi_G$ , 并使两者相比得到纯粹的干扰效应系数  $F_1$ 。图 10 中给出了典型 TPSL 双塔和多塔布置下的干扰效应系数  $F_1$  以及  $C_G$ 、 $C_D$  取值。在塔筒中下部区段, 因  $N_{\varphi,r} < N_{\varphi,g} - N_{\varphi,m}$ , 其对  $\varphi_G$  的贡献并不显著; 当计入  $C_G$ 、 $C_D$  时, 相比  $C_G N_{\varphi,g} - N_{\varphi,m}$ ,  $C_D N_{\varphi,r}$  的影响更小, 下部区段的  $F_1$  基本与  $C_G$  一致; 仅在塔筒上部 0.2  $H_s$  区段,  $C_D N_{\varphi,r}$  的贡献因  $N_{\varphi,m}$  的急剧下降而凸现。另外,  $F_1$  取值基本不受场地类别影响, 3 座冷却塔  $F_1$  的取值差异亦可忽略。从图 10 可以看出, 英国规范相当于对干扰效应按照  $C_G$  取值, 取值范围约为 1.2~1.5。

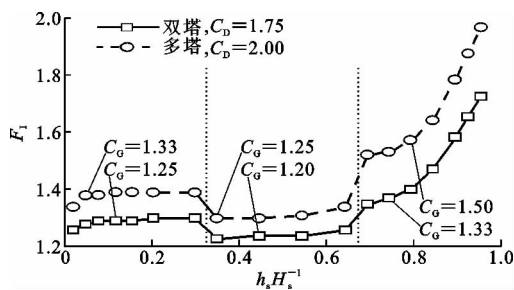


图 10 TPSL 冷却塔的  $F_1$  分布

Fig. 10  $F_1$  Distributions for TSPL Cooling Towers

德国规范在之前的 1990、1997 版中, 只给出了不考虑干扰效应的最小塔距, 并建议当塔距不满足要求时须通过风洞试验确定干扰效应; 现行 VGB-R 610Ue:2005 规范参考文献[16]中的连续介质气弹模型试验结果给出了干扰效应的取值(表 2)。

由于中国规范对  $F_1$  取值缺失, 现有工程多由风洞试验确定。经多个工程项目试验分析<sup>[17]</sup>, 干扰效应不仅与塔距有关, 还与冷却塔数量、周边建筑和场地条件有关; 对塔距为 1.5D 的群塔组合,  $F_1$  取值基本在 1.1~1.4 之间, 相比英、德规范有所偏小。

另外, 英国规范的风压分布同时包含了内外压, 其考虑了干扰效应的放大系数, 同时对内压进行了放大; 德国规范中将内压单独列出, 不计动力放大效应但仍计入干扰效应; 德国规范的最小配筋率亦受塔距影响。

## 2.5 其他因素

中国规范 GB/T 50102—2003、DL/T 5339—2006 中并未给出所适用的冷却塔高度范围, 仅指出其风振系数  $\beta$  适用于高度不大于 165 m 高度以下的冷却塔。英国规范适用于高度不超过 170 m 的双曲线型和类似线型冷却塔的设计施工, 对于 120 m 以上的冷却塔, 当有下列情况时, 须进行风洞试验以确定塔筒应力: ①多塔布置; ②周边有大型建筑; ③

可能受地形效应影响; ④具有特殊的结构特点。德国规范只说明应用于普通尺度和形状的钢筋混凝土冷却塔, 未给出详细的尺度限制, 但德国已经建成高 200 m 的冷却塔。中、德规范同时适用于无肋塔和加肋塔, 德国规范还明确表示, 塔筒增设加劲环可以提高结构的稳定性; 而英国规范并不涉及加肋塔, 其规范也是一种指导性和建议性的条文, 而非强制规定。另外, 受地形、气候等因素影响, 英国荷载规范 BS 6339-2:1997 中明确规定, 风荷载取值仅适用于英国地区, 因此也难以对英国以外的冷却塔工程借用英国规范进行设计。

## 3 风荷载标准值及其效应对比

风荷载标准值作为一个多参数表达式, 是作为一个独立量参与结构设计的, 其内部参数之间的相互联系使得单个参数的差异并不能真实反映荷载标准值的差异。为综合评价中、英、德规范风荷载标准值的大小及其对塔筒的作用效应, 以 TSPL 冷却塔为例, 分别采用 3 种规范进行对比分析。因各国规范对干扰效应规定不一, 各工程场地布置亦不相同, 因此在对比中仅以单塔为例而不计干扰效应。

图 11 为计入脉动效应系数后得到的迎风子午线风荷载标准值。中、德规范基本接近, 相比中国规范, 德国规范风荷载因风剖面幂指数不同而塔筒下部偏大、上部偏小, 因此对于 120 m 以下的冷却塔, 德国规范的取值将明显偏大; 英国规范由于使用塔顶风压且  $\varphi_G$  在塔顶取值明显偏大, 荷载取值明显大于中、德规范, 塔筒上下端附近风荷载分别达到中国规范的 1.3 倍和 1.7 倍, 中部区域也达到中国规范的 1.1 倍。

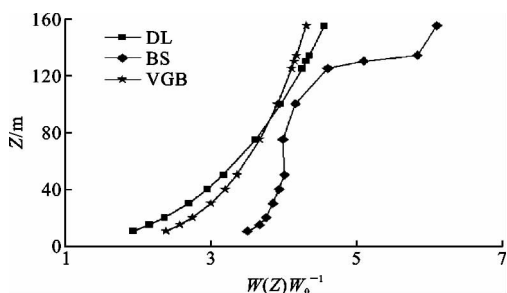


图 11 迎风子午线风荷载标准值(不含内压)

Fig. 11 Nominal Value of Wind Load in Meridian (Internal Pressure Excluded)

风荷载标准值作用下的内力极值分布如图 12 所示。英国规范因荷载标准值子午向剖面取值较中、德规范偏大, 尽管其  $C_{pe,min}(\theta)$  取值略小, 但塔筒



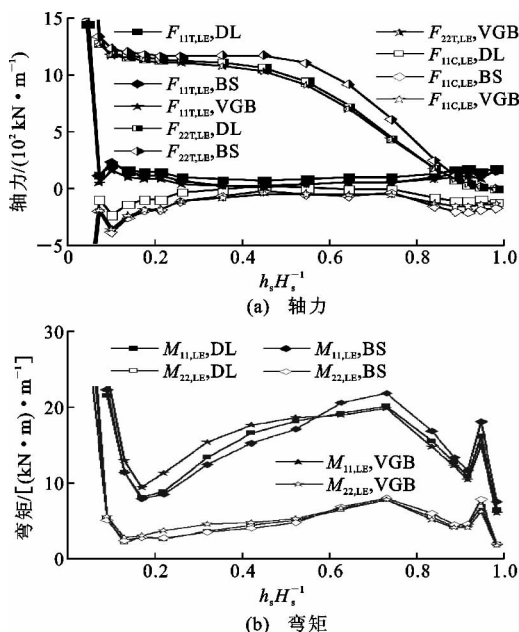


图 12 风荷载标准值作用下的内力极值分布

Fig. 12 Extreme Value Distributions of Internal Forces from Nominal Value of Wind Load

的  $F_{22T,LE}$  仍达到中、德规范的 1.0~1.5 倍,塔筒中下部的  $M_{11,LE}$  与中、德规范的差距也较图 7 有所减小。在塔筒最为薄弱的喉部区域,英国规范的  $F_{22T,LE}$  和  $M_{11,LE}$  分别为中、德规范的 1.4 倍和 1.1 倍。中、德规范的  $F_{22T,LE}$  仍然接近,  $M_{11,LE}$  的对比分布与图 11 的荷载分布基本一致。这也说明,当荷载剖面较为平缓时,  $M_{11,LE}$  的取值主要受本高度处的计算风压和风压环向分布尤其是  $C_{Pe,min}(\theta)$  的控制而受其他区域的荷载取值影响不大;但当荷载剖面剧烈变化时,  $M_{11,LE}$  的取值亦受相邻区域荷载取值的影响:英国规范因塔顶区域风压远大于中、德规范而使塔筒中上部的  $M_{11,LE}$  取值略大于中、德规范。对于环向压力  $F_{11T,LE}$ , 因英、德规范均计入内压而小于中国规范。另外,风荷载作用下的最大位移同样是英国规范取值最大,为 0.071 m,中、德规范均为 0.067 m。

## 4 结 语

(1)中、英、德规范对风荷载标准值的取值原则基本一致,但所涉及各参数如基本风速的统计时距、场地类别划分、风剖面、内外表面静风压环向分布、内压以及脉动效应系数和干扰效应系数的取值均不相同,但作为多参数表达的计算式,其内部参数之间是相互联系的,单个参数的差异并不能反映荷载标准值的差异。另外,英、德冷却塔规范对风荷载取值原则与其各自的荷载规范均有一定差异,英

国规范对场地类别和风剖面的规定也较中、德规范复杂,参阅时需要特别注意。

(2)对于双曲冷却塔结构,中、德国规范对风压高度分布均直接使用其平均风和阵风剖面,英国规范的分布模式与其荷载规范一致,但实际上可对  $V_{m,z}$  直接使用塔顶风压。在不计脉动效应系数时,中、英规范因风速时距和参考风压引起的风压差异并不显著,但均小于德国规范直接使用的阵风风压。

(3)中、英、德规范的脉动效应系数所考虑的效应各不相同:中国规范计入阵风效应和共振效应;英国规范把干扰效应也包含其中,取值也随位置而变化;德国规范因使用阵风风压,其脉动效应系数只有共振效应且不包含干扰效应,所以取值也最小。即使不计英国规范的干扰效应,本文中 3 个不同高度冷却塔在各场地类别下  $0.75H_s$  高度处的  $\varphi_G$  分别为 1.81、2.10、2.34, A、B 两类场地  $\varphi_G$  取值比中国规范高约 0.2, C 类场地则基本一致。

(4)对设计参考风压计入脉动效应系数后得到的荷载剖面,中、德规范基本接近而英国规范最大。相比中国规范,德国规范风荷载因风剖面幂指数不同而下部偏大、上部偏小;英国规范由于使用塔顶风压且  $\varphi_G$  在塔顶取值明显偏大,塔筒上下端附近风荷载分别达到中国规范的 1.3 倍和 1.7 倍,中部区域也达到中国规范的 1.1 倍。

(5)风荷载作用下塔筒承载力设计由  $F_{22T}$  和  $M_{11}$  控制,两者在各高度的极值分别出现在迎风点和侧风区  $C_{Pe,min}(\theta)$  附近。在相同风压剖面下考虑 3 种外压分布  $C_{Pe}(\theta)$ , 中、德规范的  $F_{22T,LE}$  和  $M_{11,LE}$  分布基本一致,而英国规范塔筒中下部  $F_{22T,LE}$  和  $M_{11,LE}$  基本为中、德规范的 90% 和 70%。  $C_{Pe}(\theta)$  对  $F_{22T,LE}$  和  $M_{11,LE}$  的影响主要来自于迎风区和侧风区压力分布,尤其是  $C_{Pe,min}(\theta)$  的取值,而与背风区风压取值关系不大,或者说冷却塔内力基本由环向风压的不均匀性控制。  $M_{11,LE}$  对  $C_{Pe}(\theta)$  和  $C_{Pe,min}(\theta)$  的敏感性要大于  $F_{22T,LE}$ , 且  $F_{22T,LE}$  还受上部荷载累积的贡献,而  $M_{11,LE}$  主要与本高度处环向风压分布和  $C_{Pe,min}(\theta)$  的取值有关。另外,内压对于子午向轴力和环向弯矩的贡献可以忽略。

(6)风荷载标准值作用下,受荷载标准值剖面和风压环向分布  $C_{Pe}(\theta)$  的影响,英国规范的  $F_{22T,LE}$  达到中、德规范的 1.0~1.5 倍,而后两者基本接近;对于  $M_{11,LE}$ , 德国规范在塔筒中下部取值最大,英国规范因塔顶区域风压远大于中、德规范而使塔筒中上部的  $M_{11,LE}$  取值略大于中、德规范。在塔筒最为薄

弱的喉部区域,英国规范的  $F_{22T,LE}$  和  $M_{11,LE}$  分别为中、德规范的 1.4 倍和 1.1 倍。

(7)尽管英国对于干扰效应的规定较为复杂,但除塔顶区域, $F_1$  取值与  $C_G$  相当,取值范围约为 1.2~1.5,场地类别和冷却塔规模对  $F_1$  的影响可以忽略。对于常见塔距为  $1.5D$  的群塔布置,中国现有工程案例对  $F_1$  取值基本在 1.1~1.4 之间,相比英、德规范有所偏小。

(8)经对比分析,相比英、德规范,中国冷却塔设计规范对风振系数  $\beta$  取值偏小,得到的荷载标准值和荷载效应也多小于英、德规范。考虑到基础对动力特性的影响,英、德规范的脉动效应系数仍有一定提高。因此,对于中国规范的风振系数建议取英国规范  $0.75H_s$  高度处的脉动效应系数,即 1.81、2.10、2.34。另外,对于干扰效应系数的确定亦需进一步研究。

参考文献:

References:

[ 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.  
WU Ji-ke. Review and Expectation of Structure Analysis for Large Cooling Tower[J]. Mechanics and Practice,1996,18(6):1-5.

[ 2 ] MUNGAN I,WITTEK U. Natural Draught Cooling Towers[M]. London:Balkema A A,2004.

[ 3 ] GB/T 50102—2003,工业循环水冷却设计规范[S].  
GB/T 50102—2003,Code for Design of Cooling for Industrial Recycled Water[S].

[ 4 ] DL/T 5339—2006,火力发电厂水工设计规范[S].  
DL/T 5339—2006,Technical Specification for Hydraulic Design of Thermal Power Plant[S].

[ 5 ] BS 4485-4;1996,Water Cooling Towers. Part 4:Code of Practice for Structural Design and Construction [S].

[ 6 ] VGB-R 610Ue; 2005, Structural Design of Cooling Towers[S].

[ 7 ] GB 50009—2001,建筑结构荷载规范[S].  
GB 50009—2001,Load Code for Design of Building Structures[S].

[ 8 ] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室.印度 TAL-

WANDI 煤电站冷却塔抗风抗震性能研究报告[R].上海:同济大学,2010.

SLDRCE of Tongji University. Report of Seismic and Wind Resistance Performance for Cooling Tower in TALWANDI Power Plant[R]. Shanghai:Tongji University,2010.

[ 9 ] BS 6399-2;1997,Loading for Buildings. Part 2:Code of Practice for Wind Loads[S].

[10] DIN 1055-4;2005,Action on Structures. Part 4:Wind Loads[S].

[11] ANSI ASCE 7-05,Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures[S].

[12] 张相庭.结构风工程:理论·规范·实践[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.  
ZHANG Xiang-ting. Wind Engineering of Structures: Theory,Specification and Practice[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2006.

[13] 孙天风,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(4):68-76.  
SUN Tian-feng,ZHOU Liang-mao. A Full-scale and Wind-tunnel Study of Wind Pressure Distribution Around a Ribless Hyperbolic Cooling Tower[J]. Acta Aerodynamica Sinica,1983(4):68-76.

[14] HARNACH R,NIEMANN H J. Influence of Realistic Mean Wind Loads on the Static Response and the Design of High Cooling Towers [J]. Engineering Structures,1980,2(1):27-34.

[15] ARMITT J. Wind Loading on Cooling Towers[J]. Journal of the Structural Division,1980,106(3):623-641.

[16] NIEMANN H J,KOPPER H D. Influence of Adjacent Buildings on Wind Effects on Cooling Towers[J]. Engineering Structures,1998,20(10):874-880.

[17] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室.江苏徐州电厂排烟冷却塔抗风抗震性能研究初步试验研究报告[R].上海:同济大学,2009.  
SLDRCE of Tongji University. Preliminary Report of Wind Tunnel Test for Cooling Tower in Xuzhou Power Plant of Jiangsu Province [R]. Shanghai: Tongji University,2009.