

文章编号:1673-2049(2011)03-0062-05

## 双曲冷却塔结构规范静风稳定对比

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静风稳定条款进行了对比,比较了整体稳定公式参数取值的差异和影响;以多座不同高度的双曲冷却塔为例,分别采用中、英、德规范计算整体稳定和局部稳定因子。结果表明:当中国规范采用塔顶迎风点风荷载标准值作为整体稳定参考风压时,中、英、德规范得到的整体稳定因子才基本一致,整体稳定和局部稳定因子也在同一水平。

**关键词:**双曲冷却塔;规范;静风稳定;整体稳定;局部稳定

**中图分类号:**TU312.1

**文献标志码:**A

## Comparison of Aerostatic Stability of Hyperboloidal Cooling Tower Structures in Different Codes

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 aerostatic stability of hyperboloidal cooling tower structures were surveyed, especially for the differences of parameters for global stability and their influences. Several representative hyperboloidal cooling towers were taken as examples to assess the final distinction in global and local stability. The results show that the global stability factors agree well with each other and the factors from the global and local stability can also be in conformity if DL/T 5339—2006 takes the nominal value at the top of windward meridian as the reference wind pressure for global stability.

**Key words:** hyperboloidal cooling tower; code; aerostatic stability; global stability; local stability

## 0 引言

双曲冷却塔作为高耸空间薄壁结构,风荷载是其重要的设计控制因素,它在风激作用下的安全性历来受到工程界的高度重视<sup>[1]</sup>。作为典型的壳体结构,冷却塔设计在保证结构强度之外,更要保证结构的稳定性。随着冷却塔高度的不断增加,静风稳定也逐渐成为冷却塔塔筒壁厚的控制因素。限于技术

条件和试验本身的难度,冷却塔结构稳定试验的例证很少,仅有 Der 等<sup>[2]</sup>和 Mungan<sup>[3-4]</sup>分别做了系统的试验研究,给出了冷却塔静风整体稳定和局部稳定的检算方法,这也反映在许多国家的冷却塔设计规范中<sup>[5-7]</sup>。鉴于中国鲜有其试验概况的介绍,文献[8]中对 Mungan 的一系列试验进行了详细的介绍,并对局部稳定计算公式中的应力符号和各参数取值原则进行了说明。尽管各国规范对整体稳定和局部

收稿日期:2011-06-05

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。

稳定的检算方法基本一致,但对相关计算参数和风荷载取值却各有不同,最终得到的稳定因子也存在差异。

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 3 座不同高度的典型双曲冷却塔为例,对中国 DL/T 5339—2006、英国 BS 4485-4: 1996、德国 VGB-R 610Ue: 2005(以下分别简称中国规范、英国规范和德国规范)的稳定检算条款进行了对比。

### 1 冷却塔基本设计参数

选取的 3 座冷却塔高度分布在 155~178 m(表

1),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 24~33.8 m·s<sup>-1</sup>,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大小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。详细结构特征和相关风荷载参数如表 1 所示,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。另外,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 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	$f_{\min}$ / Hz	$V_0$ / (m·s <sup>-1</sup> )	场地 类别	$\varphi$ (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

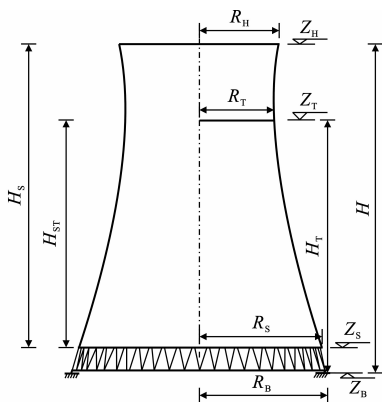


图 1 冷却塔结构尺度定义

Fig. 1 Definitions of Dimensions of Cooling Tower Structures

### 2 整体稳定

中、英、德规范都参照文献[2]中的试验结果给出了临界屈曲风压  $q_{cr}$  和参考风压  $q_{re}$ [式(1),表 2],并取安全因子  $\gamma_B=5$ 。尽管表达形式一致,但对于  $q_{cr}$  和  $q_{re}$  的取值及使用原则却不尽相同(表 2)。各国规范基本风压和风压剖面的对比参见文献[9]

$$q_{cr}=0.052E_c(t_0/r_0)^m$$
$$q_{cr}/q_{re}\geqslant\gamma_B$$

(1)

表 2 各国规范静风整体稳定参数取值

Tab. 2 Values of Parameters for Static Wind Global Stability in Different Codes			
规范	中国	英国	德国
混凝土弹性模量 $E_c$	未说明龄期	取早期弹性模量,但未给出具体龄期	未说明龄期
参考壁厚 $t_0$	喉部壁厚	最小壁厚	施工高度壁厚
参考半径 $r_0$	喉部半径	喉部半径	施工高度半径
指数 $m$	2.3	7/3	2.3
参考风压 $q_{re}$	塔顶设计风压,无说明	喉部阵风风压	施工高度阵风风压
本文中参考风压 $q_{re}$ 取值	$\beta\mu_H\tau w_0$	$0.95q_{g,H}$	$q_b(H)$
临界屈曲风压 $q_{cr}$ 对比	$q_{cr,DL}:q_{cr,BS}:q_{cr,VGB}=1:(0.84\sim0.86):(0.89\sim1)$		
本文中参考风压 $q_{re}$ 对比	场地 A: $q_{re,DL}:q_{re,BS}:q_{re,VGB}=1:(1.21\sim1.36):(0.98\sim1.04)$		
	场地 B: $q_{re,DL}:q_{re,BS}:q_{re,VGB}=1:(0.78\sim0.92):(0.86\sim0.94)$		
安全因子 $\gamma_B$ 对比	场地 A: $\gamma_{B,DL}:\gamma_{B,BS}:\gamma_{B,VGB}=1:0.67:0.94$		
	场地 B: $\gamma_{B,DL}:\gamma_{B,BS}:\gamma_{B,VGB}=1:1.01:1.06$		

注:安全因子  $\gamma_B$  的对比计算中,对  $q_{re}$ 、 $q_{cr}$  取表中的均值。

$$q_{g,Z}=0.613(V_S S_{g,Z})^2$$
$$S_{g,Z}=S_c T_c [1+3.5 S_{t,H} T_{t,H} (\frac{Z}{H})^{0.5} + S_b]$$

(2)

式中: $S_c$ 、 $S_{t,H}$ 、 $T_c$ 、 $T_{t,H}$ 分别为不同高度  $Z$  处平均风速和阵风风速的相关计算参数; $V_s$  为场址风速; $S_b$  为场地地形修正系数; $S_{g,Z}$  为阵风风压。

中、英规范仅侧重于施工完成状态的稳定性,英国规范虽然要求对  $E_c$  采用早期弹性模量,但未给出具体龄期。对于施工完成状态,中、英规范都应取 28 d 弹性模量。德国规范实际上侧重于冷却塔的施工全过程的稳定性,但亦未给出混凝土龄期,因此,在下面对比中认为中、英、德规范的  $E_c$  取值相同。

一般来说,冷却塔最小壁厚与喉部壁厚相同,中、英规范对  $q_{cr}$  取值的差别实际仅在于式(1)中的指数  $m$ :中、德规范均依 Der 等试验结果取  $m=2.3$ ;而英国规范取  $m=7/3$ ,这实际上是 Ewing 按照线性分支点理论忽略泊松比得到的理论值<sup>[10]</sup>。因冷却塔  $t_0/r_0$  取值较小,一般为  $1/200 \leq t_0/r_0 \leq 1/100$ ,指数  $m$  的微小差异也使英国规范的  $q_{cr}$  明显小于中国规范(表 3)。表 3 中英国规范计算参数选取如下:农村场地场址上游距海边大于 100 km;城镇场地场址上游距海边大于 100 km 且上游城镇场地宽度大于 30 km,以使湍流充分发展;2 种场地均不计地形影响。由于英国国土狭长,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,这样得到 2 个高度的风压差异也最大。

表 3 各国规范塔顶风压  $q_n$  与喉部风压  $q_{nt}$  的比值  
Tab. 3 Ratios of Top Wind Pressure  $q_n$  and Throat Wind Pressure  $q_{nt}$  of Towers in Different Codes

规范	场地类别	风压类别	$\frac{q_n}{q_{nt}}$	
			$HH_T^{-1}=1.15$	$HH_T^{-1}=1.35$
英国	农村	阵风风压	1.04	1.09
	城镇	(塔高 100 m)	1.05	1.12
	农村	阵风风压	1.04	1.08
	城镇	(塔高 200 m)	1.05	1.10
德国	I(A)	阵风风压	1.02	1.05
	II(B)		1.03	1.07
	I(A)	平均风压	1.03	1.07
	II(B)	(同中国规范)	1.05	1.10

由于侧重于冷却塔施工全过程的稳定性,德国规范的  $q_{cr}$  随施工高度而变化。但实际上,冷却塔壁厚随高度的变化较半径更为剧烈,在  $q_{cr}$  的计算中壁厚起控制作用,且参考风压  $q_{re}$  亦随高度增加。因此,德国规范的最小  $\gamma_B$  将出现在壁厚最小区段的上缘,也即冷却塔顶部加厚区段的下缘。加厚范围一般小于  $0.1H$ ,此处的壁厚也等于喉部壁厚  $T_0$ ,半径却较喉部有所增加,一般小于  $1.05r_0$ ,由此得到的  $q_{cr}$  亦小于中国规范。

尽管英、德规范的  $q_{re}$  对所取参考位置并非塔顶风压,但考虑到塔顶高度与喉部高度的比值一般约为  $H/H_T=1.18 \sim 1.33$ ,对于英国规范,依式(2),两高度处阵风风压差别基本在 10% 以内,并随冷却塔高度  $H$  的增加和  $H/H_T$  的减小而减小;对于德国规范,加厚区的下缘更接近塔顶,因此与塔顶风压的差异更小。由此可见, $q_{re}$  因参考位置不同所引起的差异并不显著。为便于对比,下面对英、德规范的  $q_{re}$  分别取塔顶阵风风压的 0.95 倍和 1.0 倍。

中国规范仅说明对参考风压  $q_{re}$  取塔顶设计风压,但未给出明确的表达式。实际上,塔顶设计风压只是以设计基本风压  $w_0$  按风剖面变化得到  $\mu_H w_0$ ,使用中也常以此取值<sup>[11-12]</sup>,但得到的  $\gamma_B$  远大于规范要求,和英、德规范的结果;如果对  $w_0$  计入风振系数  $\beta$  和风荷载分项系数  $\gamma_w$  ( $\gamma_w=1.4$ ) 得到塔顶迎风点风荷载设计值  $\gamma_w \beta \mu_H w_0$ ,则得到的  $\gamma_B$  可能无法满足规范要求,因  $\gamma_B$  已是安全度的表达,也无需在稳定计算中计入  $\gamma_w$ ;如仅对  $w_0$  仅计入风振系数  $\beta$  得到塔顶迎风点风荷载标准值  $\beta \mu_H w_0$ ,则  $\gamma_B$  与英、德规范较为接近(表 4)。因此,在下面的对比中,对中国规范的  $q_{re}$  取  $\beta \mu_H w_0$ 。实际上,由于英、德规范均使用阵风风压,中国规范也只有对平均风压计入风振系数  $\beta$  才能与英、德规范对比。

表 4 各国规范安全因子  
Tab. 4 Safety Factors in Different Codes

冷却塔名称	中国规范			英国规范	德国规范
	$\mu_H w_0$	$\gamma_w \beta \mu_H w_0$	$\beta \mu_H w_0$	$0.95 q_{g,H}$	$q_b(H)$
TSPL 冷却塔	14.82	5.57	7.80	7.68	7.84
彭城冷却塔	12.55	4.72	6.60	6.50	6.78
宁海冷却塔	12.12	4.56	6.38	6.36	7.02

由于中、英、德规范参考风压  $q_{re}$  的时距及参考高度不同,为便于统一对比,以中国规范的基本风速、场地类别为准,参照文献[10]计算得到中、英、德规范参考风压  $q_{re}$ (图 2,其中,DL-A、DL-B 分别为中国规范的 A、B 类场地;VGB-A、VGB-B 分别为德国规范的 A、B 类场地;BS-A、BS-B 分别为英国规范的 A、B 类场地);A、B 两类场地下中、英、德规范的  $q_{re}$  取值有较大差别,A、B 两类场地下最大参考风压  $q_{re}$  分别来自英国规范和中国规范;A 类场地下中、德规范  $q_{re}$  基本相同,但仅约为英国规范的 75%,且差距随塔高的增加而减小;英国规范 A、B 两类场地下下的  $q_{re}$  相差不大,B 类场地下下的  $q_{re}$  分别约为中、德规范的 85%、95%,且差距随塔高的增加而增加。

综上所述,尽管中、英、德规范对式(1)的参数取

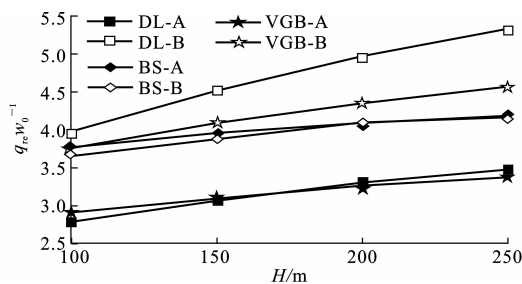


图2 各国规范参考风压

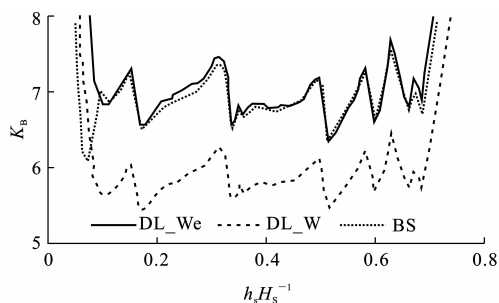
Fig.2 Reference Wind Pressures in Different Codes

值不一,但最终得到的  $\gamma_B$  与英、德规范的基本一致,只有英国规范 A 类场地的  $\gamma_B$  较中、德规范明显偏小,这可能是由于英国规范场地划分和风剖面参数不同于中、德规范,且其阵风剖面亦非实际风特性的体现。因此,为合理判定冷却塔的整体静风稳定性,应明确采用塔顶迎风点风荷载标准值  $\beta_{\mu H} w_0$  作为中国规范的参考风压  $q_{re}$ 。

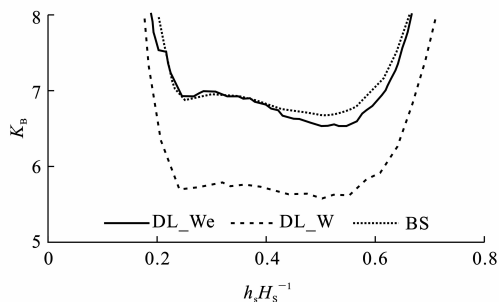
### 3 局部稳定

中、英规范都明确给出了基于 Mungan 试验结果的屈曲应力状态 (Buckling Stress State, 简称 BSS) 方程作为局部稳定的判别公式[式(3)],参数取值也完全一致,德国规范中仅说明可以借鉴 BSS 方程,但并未作为条文给出。

对式(3)中双向应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  的符号,中国规范中并无说明,但英国规范中明确指出,进行局部屈曲检算时,对壳体中的压应力取正值,拉应力取0,也即忽略壳体中拉应力的存在,但这也相当于忽略了其拉应力对刚度的贡献。Mungan 主要进行了双向受压荷载组合下壳体屈曲的试验研究,其双曲壳体的 BSS 拟合公式[式(3)]尽管没有明确说明,但实际上只能用于双向受压荷载作用下的临界屈曲应力判别。另外,在文献[3]、[4]中,Mungan 对于应力正、负的规定与习惯方法相同,即膜应力以受拉为正,受压为负,试验描述及结果图、表均按此表达,但所给出的临界应力公式和量纲一的拟合公式及相关图示则是以受压为正[式(3),图3],这也给公式的应用带来了一定的误解。图3中,DL\_We、DL\_W 分别表示中国规范外压作用和内外压作用下的稳定因子,BS 表示英国规范的稳定因子。冷却塔结构在自重和风荷载作用下的应力状态随位置而不同,既有双向受压状态也有拉压组合状态。因此在下面对比中,应力符号采用英国规范的规定。



(a) 宁海冷却塔



(b) TSPL冷却塔

图3 不同高度  $h_s$  的环向最小局部稳定因子

Fig.3 Minimal Latitude Local Stability Factors

Distributions Along Different Heights  $h_s$ 

$$\left. \begin{aligned} &0.8K_B\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}}+\frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}}\right)+0.2K_B^2\left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}}\right)^2+\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}}\right)^2\right]=1 \\ &\sigma_{cr1}=\frac{0.985E_c}{(1-\nu^2)^{3/4}}\left(\frac{t}{R_T}\right)^{4/3}k_1 \\ &\sigma_{cr2}=\frac{0.612E_c}{(1-\nu^2)^{3/4}}\left(\frac{t}{R_T}\right)^{4/3}k_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分别为环向和子午向的应力; $\sigma_{cr1}$ 、 $\sigma_{cr2}$  分别为环向和子午向的临界应力; $t$  为壁厚; $\nu$  为混凝土的泊松比; $k_1$ 、 $k_2$  分别为环向和子午向考虑结构尺度的修正因子; $K_B$  为稳定计算所需的稳定因子。

在局部稳定检算中,中、英规范对自重和风荷载均取标准值。但英国规范对风荷载放大系数  $\varphi_1$  的取值与承载能力计算中的系数  $\varphi_G$  却有不同:对  $\varphi_1$  以距塔筒下缘特定高度处的应力为指标进行计算,即对整个塔筒取常数,这一高度为下支柱的支撑间距;而对  $\varphi_G$  则以各高度处应力为指标进行计算,其取值将随高度变化。

图3中给出了2座冷却塔局部稳定因子,不管是否计入内压,各高度的最小局部稳定因子  $K_B$  大多出现在侧风区,也即侧面最小风压系数  $C_{Pe, min}$  附近。巧合的是,英国规范的  $K_B$  分布与中国规范不计内压效应的结果极为接近,这是由于:①风荷载作用下,内压效应的计入使得英国规范的环向压应力远大于中国规范不计内压的结果,但英国规范对

$C_{Pe, \min}$  和  $\varphi_1$  的幅值均小于中国规范, 因此侧风区子午向压应力小于中国规范; ②自重作用下, 冷却塔双向基本均为压应力, 幅值与风荷载效应相当甚至偏大, 自重效应的计入也弱化了双向应力的差异, 因此, 两者的  $K_B$  分布基本一致。因中国规范只说明在局部稳定计算中要计入内压, 但未给出内压取值, 如参照德国规范以塔顶风压为参考取内压系数  $C_{Pi} = -0.5$ , 则  $K_B$  将显著下降。对比文献[10]可知, 内压取值对结构承载能力计算并无影响, 但对局部稳定检算影响显著。

另外, 对于冷却塔稳定的 2 种判别方法, Mungan 在文献[3]中的试验基础上认为两者得到的冷却塔最小壁厚非常接近。对比图 3 和表 4 可知, 对于中国规范, 也只有在整体稳定检算中使用塔顶迎风点风荷载标准值  $\beta_{\mu H} w_0$  作为  $q_{re}$ , 得到的  $\gamma_B$  才与最小局部稳定因子  $K_B$  一致。

## 4 结 语

(1) 为保证电厂冷却工艺需要, 大型双曲冷却塔不断涌现, 静风稳定也逐渐成为冷却塔塔筒壁厚的控制因素。为保证结构设计安全, 借鉴其他国家的设计规范和适应工程设计国际化发展趋势, 以多座冷却塔为例, 对中、英、德冷却塔设计规范的整体稳定和局部稳定相关条款进行了对比。

(2) 对于整体稳定, 中国规范没有给出明确的参考风压取值, 实际中多采用塔顶平均风压, 而英、德规范均采用阵风风压, 因此中国规范得到的  $\gamma_B$  远大于规范要求, 和英、德规范的结果, 检算结果明显偏于危险。如果中国规范采用计入风振系数的塔顶迎风点风荷载标准值作为整体稳定的参考风压, 则尽管中、英、德规范的参数取值各不相同, 得到的安全因子也将基本一致。因此建议中国规范取塔顶迎风点风荷载标准值作为整体稳定的参考风压, 这样整体稳定和局部稳定因子也在同一水平。对于局部稳定, 即使中国规范不计内压效应, 得到的  $K_B$  也与英国规范基本一致, 内压的计入将使  $K_B$  明显下降。因此, 必须合理确定冷却塔内压取值, 尽管其对结构承载能力计算并无影响。

## 参考文献:

## References:

[1] MUNGAN I, WITTEK U. Proceedings of the Fifth International Symposium on Natural Draught Cooling Towers[M]. London: Balkema A A, 2004.

[2] DER T J, FIDLER R. A Model Study of the Buckling Behavior of Hyperbolic Shells[C]//ICE. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. London: ICE, 1968: 105-118.

[3] MUNGAN I. Buckling Stress States of Hyperboloidal Shells[J]. Journal of the Structural Division, 1976, 102(10): 2005-2020.

[4] MUNGAN I. Buckling of Reinforced Concrete Cooling Tower Shells: BSS Approach[J]. ACI Structural Journal, 1982, 79(5): 387-391.

[5] 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].

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

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

[8] 张军锋, 葛耀君. 现行规范中双曲壳体冷却塔静风局部稳定公式来源[J]. 建筑结构, 2011, 41(3): 100-109.

ZHANG Jun-feng, GE Yao-jun. Origin of Specifications About Local Buckling of Hyperboloidal Cooling Towers in Current Codes [J]. Building Structure, 2011, 41(3): 100-109.

[9] 张军锋, 葛耀君, 赵 林. 双曲冷却塔结构规范风荷载标准值对比[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(2): 52-61.

ZHANG Jun-feng, GE Yao-jun, ZHAO Lin. Comparisons of Nominal Values of Wind Loads on Hyperboloidal Cooling Towers[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(2): 52-61.

[10] COLE P P, ABEL J F, BILLINGTON D P. Buckling of Cooling-tower Shells: State of the Art[J]. Journal of the Structural Division, 1975, 101(6): 1185-1203.

[11] 李佳颖, 任春玲, 黄志龙. 自然通风冷却塔的试验及有限元分析[J]. 力学季刊, 2007, 28(3): 443-447.

LI Jia-ying, REN Chun-ling, HUANG Zhi-long. Experiment Study and Finite Element Analysis of a Natural Draft Cooling Tower[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2007, 28(3): 443-447.

[12] 王 铭. 拟广义哈密顿系统的随机稳定性及自然通风冷却塔的稳定性[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

WANG Ming. Stochastic Stability of the Generalized Hamiltonian System and Stability of Natural Draft Cooling Tower [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.