

# 中美钢烟囱规范风荷载计算比较和研究

程东梅<sup>1</sup> 李春光<sup>2</sup> 陈 明<sup>1</sup> 季清洲<sup>1</sup>

(1. 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所 黑龙江 哈尔滨 150078; 2. 黑龙江省火电第三工程公司 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 锅炉钢烟囱属于高耸结构, 风荷载计算在结构设计中起着关键作用。针对中美钢烟囱规范存在的差异, 从基本风速、顺向风荷载计算和横向风振判断 3 方面进行了比较和分析; 并以两个工程实例进行了风荷载计算结果比较。比较结果显示: 两国规范的基本风速不能混用需进行换算, 换算比值取 1.45 较为合理, 按此比值计算得到的顺向风荷载基本一致; 针对同一工程案例, 两国规范判断横向风振结果可能会不同, 结构风荷载设计值也会不同; 为保证涉外项目的安全性, 应使结构均满足两国规范相关要求。

**关 键 词:** 钢烟囱; 风荷载; 基本风速; 横向风振; 规范  
中图分类号: TK223; O39 文献标识码: A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2014.06.037

## 引 言

随着工业发展全球化, 涉外工程项目日益增多。在做涉外工程时, 选择哪国规范进行计算和验收成为工程洽谈的关键内容。由于我国国情和历史原因, 不可避免地与国际公认的美国标准或欧洲标准存在差异。所以, 了解中国与其他国家规范的异同, 是确保工程安全和避免盲目设计施工的前提。

烟囱是电力发电项目中的重要组成部分, 而钢烟囱由于施工周期短、安装方便、重量轻等特点得到广泛应用。由于烟囱结构具有高、细、柔的特点, 使得风荷载的确定成为烟囱结构设计的关键点, 而基本风速、顺向风荷载计算和横向风振判断是决定其风荷载值的重要因素。本例将从上述 3 方面入手, 针对中国钢烟囱设计规范 GB50051 - 2013《烟囱设计规范》和美国钢烟囱规范 ASME STS - 1 - 2006《Steel Stacks》风荷载计算的异同进行比较和分析, 为涉外钢烟囱工程设计和计算提供参考和帮助。

## 1 基本风速

基本风速是风荷载计算的基础。决定基本风速主要有如下 5 点: 测量高度、测量地貌、测量时距、测量样本的时间及最大风速的重现期等<sup>[1]</sup>, 上述几点

测量条件不同会得到不同的测量结果。

美国钢烟囱规范中采用的基本风速是 3 s 测得的最大里风速, 此风速测得的条件是“按 C 类方位区(即空旷平坦)地面以上 10 m 处测得的年概率为 0.02(即重现期 50 年)的 3 s 平均最大风速”<sup>[2]</sup>。中国规范采用的基本风速是 10 min 测得的年平均最大风速, 测得此风速的条件是“按当地空旷平坦地面上 10 m 高度处 10 min 平均风速为观测数据, 经概率统计得出 50 年一遇最大风速”<sup>[3]</sup>。

对两国基本风速概念进行比较可知, 两国规范中基本风速的测量高度、测量样本时间、重现期及测量地貌基本一致, 但测量时距不同, 所以两国基本风速值不能混淆、直接使用。

根据美国 ASCE 标准给出的  $t$  s 平均最大风速与 1 h 平均最大速度比值关系(如图 1 所示), 可知两个风速存在换算关系。由图 1 可得:  $V_{3s}/V_{3600s} = 1.54$ ,  $V_{600s}/V_{3600s} = 1.06$ , 则  $V_{3s}/V_{10min} = 1.54/1.06 = 1.45$ 。所以, 按美国规范提供的 3 s 最大里风速是中国规范规定的 10 min 平均年最大风速的 1.45 倍, 即两国规范下基本风速的换算比例为 1.45。

## 2 顺向风荷载计算

钢烟囱属于高耸结构, 风压脉动对结构顺风向风振的影响必须考虑。目前, 风荷载计算主要采用的是平均风压乘以风振系数法和平均风压加上脉动风振等效风压法。中国规范采用的是平均风压乘以风振系数法, 而美国规范采用的则是平均风压加上脉动风振等效风压法。由于两国规范计算方法不同, 为了更好比较这两个规范, 下面将两国规范中顺向风荷载计算公式进行合理转化。

### 2.1 美国钢烟囱规范顺向风荷载计算

根据美国钢烟囱规范 ASME STS - 1 - 2006

收稿日期: 2014 - 04 - 17; 修订日期: 2014 - 08 - 22

作者简介: 程东梅(1973 -)女, 黑龙江哈尔滨人, 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所高级工程师。

《Steel Stacks》结构顺向风荷载计算公式为:

$$\omega(z) = \bar{\omega}(z) + \omega_D(z)$$

其中,  $\bar{\omega}(z) = C_f q_z \bar{D} / (1 + 6.8 I_z)$ ;  $\omega_D(z) = 3z M_0 [G_f(1 + 6.8 I_z) - 1] / h^3$ ;  $q_z = 0.613 V^2 I K_{zt} K_z$ ;  $G_f = 0.925((1 + 1.7 I_z \sqrt{Q^2 + R^2}) / (1 + 1.7 I_z g_r))$ 。

式中:  $\omega(z)$  — 顺向总风压, N/m;  $\bar{\omega}(z)$  — 平均顺向风压, N/m;  $\omega_D(z)$  —  $z$  米高度处的脉动风压, N/m;  $C_f$  — 风压系数;  $q_z$  —  $z$  米处外风压, N/m<sup>2</sup>;  $\bar{D}$  — 烟囱平均直径, m;  $M_0$  —  $\omega(z)$  对烟囱底部累积弯矩, N·m;  $z$  — 计算风压处的高度, m;  $G_f$  — 脉动风振系数;  $h$  — 烟囱总高度, m;  $V$  — 3 s 测量的阵风风速, m/s;  $I$  — 重要系数;  $K_{zt}$  — 地形因素引起风压变化;  $K_z$  — 风压曝露系数;  $I_z$  — 阵风分量或湍流强度;  $I$  — 结构重要系数;  $g_r$  — 脉动风振系数计算参数, 与结构自振频率有关;  $Q$  — 脉动风振系数计算参数, 与结构高度、宽度及地面粗糙度有关;  $R$  — 脉动风振系数计算参数, 与结构高度、宽度、地面粗糙度和结构频率有关;  $g_Q, g_v$  — 脉动风振系数计算参数, 取值 3.4。

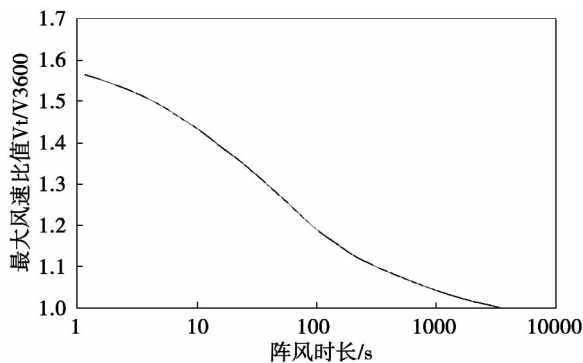


图 1 t s 平均最大风速与 1 h 平均最大风速比值 [2]

Fig. 1 Ratio of the averaged maximum wind speed at t seconds and that at 1 hour

由于美国规范中顺向风荷载计算公式较为复杂, 为了便于与中国规范进行对比, 以如图 2 所示结构模型计算烟囱结构平均顺向风压  $\bar{\omega}(z)$  对烟囱底部累积弯矩  $M_0$  以简化风压公式便于与中国规范进行对比。

模型中, 烟囱总高度为  $h(m)$ , 顶端平均风压为  $\bar{\omega}(h)$ , 则距烟囱底部  $x$  处的风压为  $\bar{\omega}(h) \cdot x/h$ 。积

分可得到烟囱底部累积弯矩  $M_0 = \int_0^h \frac{\bar{\omega}(h)}{h} \cdot x dx = \frac{\bar{\omega}(h)}{h} \cdot \frac{h^3}{3}$ ; 将  $M_0$  带入脉动风压  $\omega_D(z)$  中, 可得到  $\omega_D(h) = C_f q_z G_f D - \bar{\omega}(h)$ ; 则结构单位长度总的顺向风压应为:  $\omega(h) = \bar{\omega}(h) + \omega_D(h) = C_f q_z G_f D = G_f C_f (K_{zt} K_z) (0.613 V^2) I \bar{D}$  (N/m)。

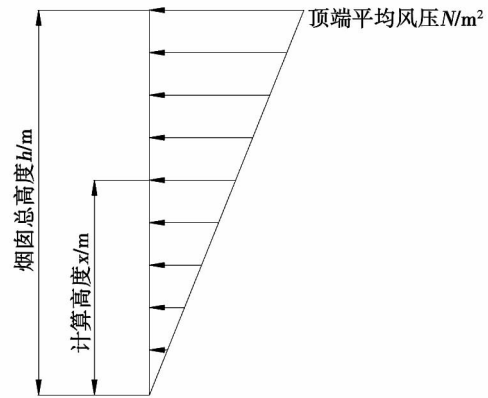


图 2 计算  $M_0$  简化模型

Fig. 2 Simplified model for calculating  $M_0$

### 2.2 中国规范顺向风荷载计算

根据中国规范 GB50009 - 2012 《建筑结构荷载规范》, 顺向风荷载计算公式为:

$$\omega_k = \beta_z \mu_s \mu_z \omega_0$$

其中,  $\beta_z = 1 + 2g I_{10} B_z \sqrt{1 + R^2}$ ;  $\omega_0 = \rho V_0^2 / 2$ , 通常可取空气密度  $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ , 则  $\omega_0 = 0.625 V_0^2$  (N/m<sup>2</sup>)。

式中:  $\omega_k$  — 风荷载标准值, N/m<sup>2</sup>;  $\beta_z$  — 风振系数;  $\mu_s$  — 体型系数;  $\mu_z$  — 风压高度变化系数;  $\omega_0$  — 基本风压, N/m<sup>2</sup>;  $I_{10}$  — 10 m 高度名义湍流强度;  $R$  — 脉动风荷载的共振分量因子;  $B_z$  — 脉动风荷载的背景分量因子。

对于平坦或稍有起伏的地区, 结构的风压高度变化系数可用  $\mu_z$  来确定。但对于非平坦地域(如山建筑物、远海海面和海岛的建筑物), 还应考虑地形条件对风压高度变化的影响, 所以高度风压变化实际值应为  $\mu_z$  乘以地形条件修正系数  $\eta$ 。为与美国规范表示方法一致, 这里考虑结构的重要系数, 则重要系数为  $I$  的钢烟囱沿筒体单位长度所承受的顺向风压应为  $\omega = \omega_k ID = \beta_z \mu_s (\mu_z \eta) (0.625 V_0^2) ID$ , N/m。

经过上述转化之后,中美规范得到的顺向风荷载计算公式基本一致,将相关参数进行比对,可得到

中美钢烟囱顺向风荷载计算公式中各参数的等效关系(如表1所示)。

表1 中美钢烟囱规范风荷载计算各参数等效关系

Tab. 1 Equivalent relationship of various parameters calculated by using the wind load stipulated by China and the United States steel smoke stack specification

国家	参数比对							
美国	脉动风振系数	风压系数	地形因素引起风压变化系数	风压暴露系数	等效基本风压/N·m <sup>2</sup>	3秒测量的阵风风速/m·s <sup>-1</sup>	结构重要系数	烟囱平均直径 m
	$G_f$	$C_f$	$K_{zt}$	$K_z$	$0.613 V^2$	$V$	$I$	$\bar{D}$
中国	风振系数	体型系数	地形修正系数	高度变化系数	基本风压	10分钟测得的最大风速	结构重要系数	烟囱直径
	$\beta_z$	$\mu_s$	$\eta$	$\mu_z$	$0.625 V_0^2$	$V_0$	$I$	$D$

### 3 横向风振判断

由于烟囱属于细柔结构,除考虑结构顺向风荷载之外,涡旋脱落(Vortex shedding)引起的横向风振必须考虑。当横向风振频率与结构自振频率趋于一致时,结构可能会发生频率共振,这对结构产生很大影响。因此验算共振响应对保证高耸结构的安全性起着重要作用。

#### 3.1 美国钢烟囱规范横向风振判断

美国钢烟囱规范横向风振判断仅依据参数:设计风速  $V_{zcr}$  和临界风速  $V_c$  :

$$V_{zcr} = \bar{b} (z_{cr}/10)^\alpha V \sqrt{I}$$

$$V_c = \bar{D}/(T \cdot S)$$

式中:参数  $\bar{b}$ ,  $\alpha$  与地面粗糙度有关;  $z_{cr}$  为结构的临界高度;  $T$  为结构的自振周期;  $S$  为斯脱罗哈数,取值为 0.2。

针对设计风速  $V_{zcr}$  和临界风速  $V_c$  的计算结果,规范对结构横向风振判断结果和处理措施如下<sup>[4]</sup>:

- (1) 当  $V_c < V_{zcr}$ , 结构需计算横向风压,但无需与顺向风压进行组合;需对结构进行疲劳验算。
- (2) 当  $V_{zcr} < V_c < 1.2 V_{zcr}$ , 需计算横向风压,横向风压计算结果可以乘以折减系数  $(V_{zcr}/V_c)^2$ ,无需对结构进行疲劳验算。
- (3) 当  $V_c > 1.2 V_{zcr}$ , 结构不需考虑横向风振。

#### 3.2 中国钢烟囱规范横向风振判断

我国规范在判断横向风振时依据 3 个参数:雷诺数  $Re$ 、结构顶部风速  $V_H$  和临界风速  $V_{cr}$  ;

$$Re = 69\,000 V_{cr} D, V_H = \sqrt{2\,000/\rho}, V_{cr} = D/(T \cdot S)$$

式中:  $\mu_H$  —结构顶部风压高度变化系数;  $\rho$  —空气密度;  $T$  —结构的自振周期;  $S$  —斯脱罗哈数,取值为 0.2。

- 结构横向风振的判断依据<sup>[3,5]</sup>: (1) 当  $Re < 3 \times 10^5$  且  $V_H > V_{cr}$  时,可发生亚临界的微风共振。应在构造上采取防振措施或控制  $V_{cr}$  不小于 15 m/s。
- (2) 当  $Re \geq 3 \times 10^6$  且  $1.2 V_H > V_{cr}$  时,可发生跨临界的强风共振,此时应考虑横风向风振的等效风荷载。
- (3) 当  $3 \times 10^5 \leq Re < 3.5 \times 10^6$  时,则发生超临界范围的风振,可不作处理。

基于上述进行分析可知,两国规范横向风振判断依据存在差异,尽管临界风速计算方法一致,但风速  $V_{zcr}$  和  $V_H$  计算方法不相同;这会导致相同工程项目会得到不同的横向风振判断结果,进而会得到不同的结构形式。

### 4 实例分析

为了更直观地对两国规范进行比对,下面对两个实例的进行计算分析。例 1 是美国钢烟囱规范 ASME STS-1-2006 《Steel Stacks》附录 E-3 提供的计算实例,例 2 是某涉外实际工程项目。

例 1: 某钢烟囱总高为 140ft(42.672 m)<sup>[4]</sup>, 外直径为 8ft(2.4384 m), 壁厚为 0.3125in(8 mm), 设计风速  $V_{3s} = 100$  mph(45 m/s), 结构自振频率为 1.335 Hz, 地面粗糙度为 C 类(相当于中国规范 B 类)。

基于前面分析可知两国规范基本风速存在换算关系,换算比例为 1.45,则中国规范下基本风速  $V_{10\min} = V_{3s}/1.45 = 31\text{ m/s}$ ;基本风压  $\omega_0 = V_{10\min}^2/1600 = 0.6\text{ kN/m}^2$ 。

依据美国钢烟囱规范对实例 1 进行风荷载计

算,得到计算结果与 ASME STS - 1 - 2006 《Steel Stacks》附录 E - 3 提供的计算结果一致,计算结果如表 2 和表 3 所示。依据中国规范计算得到风荷载值和横向风振判断结果如表 4 和表 5 所示。

表 2 顺向风荷载计算(依据美国钢烟囱规范)

Tab.2 Fair wind load calculation ( according to the United States steel smoke stack specification)

编号	Z (m)	$K_z$	$C_f$	$q_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	$G_f$	$\square(z)$ (kN/m)	$M_0$ (i to i+1) (kN.m)	$\omega_D(z)$ (kN/m)	$\omega(z)$ (kN/m)	$M^*$ (i to i+1) (kN.m)	$M^0 + M^*$ (i to i+1) (kN.m)
1	3.048	0.85	0.658	1.0419	0.955	0.7727	3.59	0.1277	0.9004	0.39	3.98
2	6.096	0.9	0.658	1.1032	0.955	0.8182	11.12	0.2554	1.0735	2.77	13.89
3	9.144	0.98	0.658	1.2012	0.955	0.8909	19.91	0.3831	1.2740	7.52	27.43
4	12.192	1.04	0.658	1.2748	0.955	0.9454	29.91	0.5108	1.4562	14.63	44.56
5	15.24	1.09	0.658	1.3360	0.955	0.9909	40.53	0.6385	1.6293	24.13	64.66
6	18.288	1.13	0.658	1.3851	0.955	1.0272	51.61	0.7661	1.7934	35.99	87.60
7	21.336	1.17	0.658	1.4341	0.955	1.0636	63.18	0.8938	1.9574	50.24	113.42
8	24.384	1.21	0.658	1.4831	0.955	1.1000	75.43	1.0215	2.1215	66.85	142.29
9	27.432	1.24	0.658	1.5199	0.955	1.1272	87.99	1.1492	2.2765	85.84	173.83
10	30.48	1.26	0.658	1.5444	0.955	1.1454	100.35	1.2769	2.4223	107.20	207.54
11	33.528	1.29	0.658	1.5751	0.955	1.1682	112.90	1.4046	2.5727	130.93	243.84
12	36.576	1.31	0.658	1.6057	0.955	1.1909	126.08	1.5323	2.7232	157.04	283.13
13	39.624	1.34	0.658	1.6363	0.955	1.2136	139.69	1.6600	2.8736	185.53	325.22
14	42.672	1.36	0.658	1.6670	0.955	1.2363	153.71	1.7877	3.0240	216.38	370.09

注:表中  $M_0$  为  $\square(z)$  对烟囱底部的累积弯矩;  $M^*$  为  $\omega_D(z)$  对烟囱底部的累积弯矩。

表 3 横向风振判断(依据美国钢烟囱规范)

Tab.3 Lateral-wind vibration judgment( according to the United States steel smoke stack specification)

参数	计算结果
5 h/6 高度处的平均风速 $V_{zer}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	35.31
临界风速 $V_{cr}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	16.30
顺向风弯矩( $M^0 + M^*$ ) / (kN·m)	2101.51
横向风弯矩 $M_h$ / (kN·m)	25 466.42
判断结果	由于 $V_c < V_{zer}$ 结构需计算横向风压,但无需与顺向风压进行组合;需对结构进行疲劳分析。经计算,结构疲劳应力 $\sigma_b = 94.34\text{ ksi}$ (650.5 N/m <sup>2</sup> ) 大于结构材料允许应力,结构需加阻尼器或破风圈。

比较两国规范对实例 1 的风荷载计算结果:

(1) 按美国规范计算得到的对烟囱底部顺向风弯矩为 2101.51 kN·m,中国规范计算得到顺向风弯矩为 2101.96 kN·m,两国规范得到的顺向风弯矩一致,可知两国规范基本风速换算比值取 1.45 是合理的。(2) 依据中美钢烟囱规范对结构进行横向风振判断,结果都显示结构无需将横向风压与顺向风压进行组合,但依据美国钢烟囱规范结构需进行疲劳验算,验算结果结构需加阻尼器或破风圈;而依据中国规范则无需添加阻尼器或破风圈。可见中美钢烟囱规范对横向风振判断依据不同,得到结构处理措施可能会不同。(3) 依据两国规范各自验算条件,结构强度、稳定性都满足要求。但基于工程经验,此案例应在筒体顶部填加破风圈以提高结构的安全性。

表 4 风荷载计算(依据中国烟窗规范)

Tab.4 Fair wind load calculation ( according to China steel smoke stack specification)

编号	$z$ (m)	$\mu_s$	$\mu_{s_0}$	$B_z$	$R$	$\varphi_z$	$\beta_z$	$\omega_k$ /kN · m <sup>-2</sup>	$M_{wk}$ ( i to i + 1) /kN · m
1	3.048	1	0.558 3	0.023 8	1.939 3	0.014 3	1.036 4	0.347 2	3.86
2	6.096	1	0.558 3	0.062 0	1.939 3	0.037 1	1.094 7	0.366 7	12.13
3	9.144	1	0.558 3	0.119 3	1.939 3	0.071 4	1.182 2	0.396 0	21.60
4	12.192	1.056 9	0.558 3	0.203 1	1.939 3	0.128 6	1.310 3	0.463 9	34.0 9
5	15.24	1.134 8	0.558 3	0.281 7	1.939 3	0.191 4	1.430 3	0.543 7	51.36
6	18.288	1.195 7	0.558 3	0.365 2	1.939 3	0.261 4	1.557 7	0.624	72.75
7	21.336	1.251 4	0.558 3	0.453 8	1.939 3	0.34	1.693 1	0.709 7	98.19
8	24.384	1.300 1	0.558 3	0.546 9	1.939 3	0.425 7	1.835 3	0.799 4	128.20
9	27.432	1.348 9	0.558 3	0.638 5	1.939 3	0.515 7	1.975 3	0.892 6	162.90
10	30.48	1.396 2	0.558 3	0.739 9	1.939 3	0.618 5	2.130 2	0.996 4	203.26
11	33.528	1.435 8	0.558 3	0.885 7	1.939 3	0.761 4	2.352 8	1.131 7	253.09
12	36.576	1.475 5	0.558 3	0.939 5	1.939 3	0.83	2.435 0	1.203 6	304.19
13	39.624	1.515 1	0.558 3	0.992 1	1.939 3	0.9	2.515 4	1.276 7	351.17
14	42.672	1.546 7	0.558 3	1.079 8	1.939 3	1	2.649 3	1.372 7	405.13

注:表中  $M_{wh}$  表示结构的顺向风弯矩。

表 5 横向风振判断(依据中国规范)

Tab.5 Lateral-wind vibration judgment( according to China steel smoke stack specification)

参数	计算结果
顶端风速 $V_H$	38.53
临界风速 $V_{cr}$ /m · s <sup>-1</sup>	16.30
雷诺数 $Re$	2 749 331
顺向风弯矩 $M_{wh}$ / (kN · m)	2101.96
横向风弯矩 $M_{wv}$ / (kN · m)	0
判断结果	因为 $Re < 3 \times 10^5$ 且 $V_H > V_{cr}$ , 则结构可能发生亚临界的微风共振。由于 $V_{cr} = 16.34$ m/s 大于 15 m/s 构造无需采取防振措施 <sup>[5]</sup> 。

例 2: 某涉外工程项目, 等直径自立式钢烟囱高 60 m, 外径为 5.64 m, 筒体无内衬。烟囱筒体分 3 段: 上段 12 m, 壁厚 10 mm; 中段 18 m, 壁厚为 12 mm; 下段为 30 m, 壁厚为 14 mm。外方提供的 3 s 设计风速为 92 mph(41 m/s) 地形系数为 C 类。计算可得结构自振周期为 0.637 s( 频率为 1.57 Hz)。

经计算, 中国规范下基本风速  $V_{10 \min} = 28.28$  m/s; 基本风压  $\omega_0 = 0.5$  kN/m<sup>2</sup>。根据中美规范对烟囱进行计算, 得到计算结果如表 6 - 表 9 所示。

表 6 顺向风荷载计算(依据美国钢烟窗规范)

Tab.6 Fair wind load calculation ( according to the United States steel smoke stack specification)

编号	$Z$ (m)	$K_z$	$C_f$	$q_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	$G_f$	$\zeta(z)$ (kN/m)	$M_0$ ( i to i + 1) ( kN · m)	$\omega_D(z)$ (kN/m)	$\omega(z)$ (kN/m)	$M^*$ ( itoi + 1) ( kN · m)	$M^0 + M^*$ ( itoi + 1) ( kN · m)
1	3.048	0.85	0.62	0.8818	0.9044	1.4687	6.82	0.1559	1.6247	0.48	7.31
2	6.096	0.9	0.62	0.9337	0.9044	1.5551	21.14	0.3118	1.8670	3.38	24.53
3	9.144	0.98	0.62	1.0167	0.9044	1.6934	37.85	0.4677	2.1612	9.17	47.02
4	12.192	1.04	0.62	1.0789	0.9044	1.7970	56.85	0.6237	2.4208	17.87	74.73
5	15.24	1.09	0.62	1.1308	0.9044	1.8834	77.03	0.7796	2.6631	29.47	106.50
6	18.288	1.13	0.62	1.1723	0.9044	1.9525	98.09	0.9355	2.8882	43.96	142.06
7	21.336	1.17	0.62	1.2138	0.9044	2.0217	120.10	1.0915	3.1132	61.35	181.45
8	24.384	1.21	0.62	1.2553	0.9044	2.0908	143.38	1.2474	3.3383	81.64	225.02
9	27.432	1.24	0.62	1.2864	0.9044	2.1426	167.26	1.4033	3.5461	104.82	272.09
10	30.48	1.26	0.62	1.3071	0.9044	2.1772	190.74	1.5593	3.7365	130.91	321.65
11	33.528	1.285	0.62	1.3331	0.9044	2.2204	214.61	1.7152	3.9357	159.89	374.51
12	36.576	1.31	0.62	1.3590	0.9044	2.2636	239.66	1.8711	4.1348	191.78	431.45
13	39.624	1.335	0.62	1.3850	0.9044	2.3068	265.52	2.0271	4.3339	226.56	492.08
14	42.672	1.36	0.62	1.4109	0.9044	2.3500	292.18	2.1830	4.5331	264.24	556.42
15	45.72	1.375	0.62	1.4265	0.9044	2.3759	318.46	2.3389	4.7149	304.82	623.29
16	48.768	1.39	0.62	1.4420	0.9044	2.4018	344.16	2.4949	4.8967	348.30	692.46
17	51.816	1.41	0.62	1.4628	0.9044	2.4364	371.01	2.6508	5.0873	394.67	765.68
18	54.864	1.43	0.62	1.4835	0.9044	2.4709	399.11	2.8067	5.2777	443.95	843.06
19	57.912	1.445	0.62	1.4991	0.9044	2.4969	427.11	2.9627	5.4596	496.12	923.23
20	60	1.455	0.62	1.5097	0.9044	2.5146	308.59	3.0695	5.5842	371.47	680.06

表 7 横向风振判断(依据美国钢烟囱规范)

Tab. 7 Lateral-wind vibration judgment ( according to the United States steel smoke stack specification)

参数	计算结果
5 h/6 高度处的平均风速 $V_{zcr} / m \cdot s^{-1}$	34.24
临界风速 $V_c / m \cdot s^{-1}$	44.30
顺风向弯矩 $(M^0 + M^*) / (kN \cdot m)$	7784.64
横向风弯矩 $M_h / (kN \cdot m)$	0
判断结果	由于 $V_c > 1.2V_{zcr}$ 结构横向风振可以忽略。

比较中美钢烟囱规范对例 2 计算结果:(1) 按美国钢烟囱规范计算得到的烟囱底部顺风向弯矩为 7 784.64 kN·m,中国烟囱规范计算得到顺风向弯矩为 7 662.70 kN·m,两规范计算得到的顺风向荷

载基本一致。(2) 依据美钢烟囱规范对结构进行横向风振判断,判断结果是结构横向风压可以忽略;而按中国烟囱规范对结构进行横向风振判断,结构属于跨临界的强风共振,应考虑横风向风振引起的等效风荷载。同一工程项目依据两国规范对横向风振判断结果完全不同。(3) 由于依据中美规范得到不同横向风振判断结果,计算得到的风弯矩值也不相同,依据美国规范结构的风弯矩值为 7 784.64 kN·m,而根据中国规范结构风弯矩值为 9 995.05 kN·m。(4) 为保证工程的安全性,此项目按中国烟囱规范进行设计,依据美国钢烟囱规范进行检验,目前结构在国外安装地运行良好。

表 8 风荷载计算(依据中国烟囱规范)

Tab. 8 Wind load calculation ( according to China steel smoke stack specification)

编号	Z (m)	$\mu_z$	$\mu_s$	$B_z$	R	$\varphi_z$	$\beta_z$	$\omega_k$ (kN/m)	$\lambda$	$\omega_{cz}$ (kN/m)	$M_{wh} (itoi + 1)$ (kN·m)	$M_{wv} (itoi + 1)$ (kN·m)
1	6	1	0.52	0.0341	1.7851	0.02	1.0489	0.2728	0.0715	0.0219	27.05	1.11
2	12	1.052	0.52	0.0974	1.7851	0.06	1.1395	0.3118	0.0715	0.0657	89.02	13.33
3	18	1.19	0.52	0.2009	1.7851	0.14	1.2877	0.3986	0.0715	0.1532	180.29	55.55
4	24	1.294	0.52	0.3035	1.7851	0.23	1.4345	0.4829	0.0715	0.2517	313.20	143.88
5	30	1.39	0.52	0.4176	1.7851	0.34	1.5982	0.5778	0.0715	0.3721	484.57	284.98
6	36	1.468	0.52	0.5351	1.7851	0.46	1.7663	0.6744	0.0715	0.5034	699.22	488.86
7	42	1.54	0.52	0.6542	1.7851	0.59	1.9369	0.7759	0.0715	0.6457	957.04	758.29
8	48	1.6	0.52	0.8431	1.7851	0.79	2.2075	0.9187	0.0715	0.8646	1290.25	1149.95
9	54	1.656	0.52	0.8867	1.7851	0.86	2.2701	0.9778	0.0715	0.9412	1636.53	1558.26
10	60	1.71	0.52	0.9985	1.7851	1	2.4302	1.081	0.0715	1.0944	1985.49	1963.24

注:表中  $M_{wh}$  为顺风向风压对烟囱底部累积弯矩;  $M_{wv}$  为横向风压对烟囱底部累积弯矩。

表 9 横向风振判断结果(依据中国规范)

Tab. 9 Lateral-wind vibration judgment ( according to China steel smoke stack specification)

参数	计算结果
顶端风速 $V_H / m \cdot s^{-1}$	36.99
临界风速 $V_{cr} / m \cdot s^{-1}$	44.25
雷诺数 Re	17 228 113
顺风向弯矩 $M_{wh} / (kN \cdot m)$	7 662.70
横向风弯矩 $M_{wv} / (kN \cdot m)$	6 417.48
总风弯矩 $M_w = \sqrt{+} / (kN \cdot m)$	9 995.05
判断结果	由于 $Re \geq 3 \times 10^6$ 且 $1.2 V_H > V_{cr}$ 结构可能发生跨临界的强风共振,应考虑横向风振的等效风荷载。

### 5 结 论

基于上述中美钢烟囱规范的比对和实例分析可知:

(1) 中美钢烟囱规范在计算风荷载时,基本风速存在换算关系,两国基本风速不能混用,美国规范的基本风速值为中国规范基本风速值的 1.45 倍。

(2) 由于中美钢烟囱规范对结构横向风振判断依据存在差异,导致两国钢烟囱规范风荷载计算结果和结构处理形式可能会不同。

(3) 在处理涉外项目时,为提高结构的安全性,应使结构均满足中美钢烟囱规范的相关设计和验算

要求。

参考文献:

[1] 张相庭. 结构风振和风振计算 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1985.  
ZHANG Xiang-ting. Wind-caused vibration of the structure of wind-caused vibration calculation [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1985.

[2] ASCE/SEI 7 - 05, 《Minimum Design Loads for Buildings and

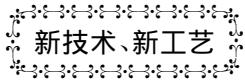
Other Structures》[S].

[3] GB50009 - 2012, 《建筑结构荷载规范》[S].  
GB50009 - 2012, Specification for loads of building structures [S].

[4] ASME STS - 1 - 2006, 《Steel Stack》[S].

[5] GB50051 - 2013, 《烟囱设计规范》[S].  
GB50051 - 2013, Specification for design of smoke stacks [S].

( 陈 滨 编 辑 )



### 用于蒸燃联合装置的乌拉尔汽轮机厂汽轮机

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2014.06.038

《Теплоэнергетика》2013 年 8 月刊提出了 115 - 900 MW 蒸燃联合装置的汽轮机设计方案。较详细地介绍了 ПГУ - 115Т - 40/50 - 8.8 型汽轮机、ПГУ - 410Т - 113/145 - 12.4 型汽轮机和 ПГУ - 900К - 300 - 12.4 型汽轮机的设计理念、结构特点和部件从最初设计到后续设计的发展过程。

К - 300 - 12.4 型汽轮机的蒸汽设计参数:

外部空气温度 / °C	+ 15
高压缸前蒸汽参数:	
压力 / MPa	12.35
温度 / °C	562.6
流量 / t · h <sup>-1</sup>	615.0
中压回路蒸汽参数:	
压力 / MPa	3.26
温度 / °C	379
流量 / t · h <sup>-1</sup>	105.6
中压缸前蒸汽参数:	
压力 / MPa	2.94
温度 / °C	559.6
流量 / t · h <sup>-1</sup>	712.0
低压蒸汽参数:	
压力 / MPa	0.475
温度 / °C	248.3
流量 / t · h <sup>-1</sup>	90.0
与低压蒸汽混合后低压缸前蒸汽参数:	
压力 / MPa	0.477
温度 / °C	315.3
流量 / t · h <sup>-1</sup>	808.0
冷凝器内蒸汽压力( 换热面清洁的管子) / kPa	3.3

( 吉桂明 摘译 )

中美钢烟囱规范风荷载计算比较和研究 = **Comparison and Study of the Methods for Calculating Wind Loads According to Chinese and American Specification for Steel-made Smoke Stacks** [刊, 汉] CHENG Dong-mei, CHEN Ming, JI Qing-zhou (CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(6). - 740 - 746

Boiler steel-made smoke stacks pertain to high-rise structures and the wind load calculation plays a key role in structural design. In the light of the differences existing in American and Chinese specification for steel-made smoke stacks, the basic wind speed, along-the-wind-direction wind load calculation and lateral wind vibration were compared and analyzed. With two engineering projects serving as examples, their wind load calculation results were compared. It has been found that the basic wind speeds stipulated in the specifications of both countries cannot be used at a same time and a conversion is needed, and the conversion factor of 1.45 is considered as relatively sound and reasonable. The along-the-wind-direction wind load as calculated as per this conversion factor is basically identical to that as calculated as per the other specification. For a same engineering project, the lateral wind vibration results judged by using the specifications of both countries may be different and the wind load design value of the structure may also be not identical. To guarantee the safety of foreign-related projects, the structure should meet all relevant requirements stipulated in American and Chinese standards. **Key Words:** steel-made smoke stack, wind load, basic wind speed, lateral wind vibration

300 MW 四角切圆锅炉低氮改造关键技术研究与实践 = **Study of the Key Technologies for Low Nitrogen Reconstruction of 300 MW Tangentially Corner-fired Boilers and Engineering Practice** [刊, 汉] DENG Jun-ci, LI De-bo, DENG Jian-hua (Electric Power Science Research Institute, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou, China, Post Code: 510060) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(6). - 747 - 752

In the light of the status quo of the  $\text{NO}_x$  emissions concentration of No. 1 and 2 boiler in a power plant being high, a low  $\text{NO}_x$  reconstruction was performed. In this connection, the authors systematically analyzed the low nitrogen reconstruction version for the power plant and at the same time evaluated the low nitrogen reconstruction effectiveness of the power plant. They arrived at the main conclusions as follows: the low nitrogen reconstruction adopts a SOFA air staged version, which merits a relatively good reconstruction effectiveness. A part of the secondary air adopts the air deflection technology to obtain an improvement and prevent from the slagging on the water walls and high temperature corrosion accidents and in the meantime, avoid the excessively high temperature of the water walls and tube rupture. At the full load, the  $\text{NO}_x$  concentration at the inlet of the air preheater decreases by 47% and the flue gas temperature of the boilers decreases by 31.8 °C, thus the reconstruction comes to its end with a success being achieved. **Key Words:** tangentially corner-fired, low nitrogen reconstruction, SOFA (separated over-fire air)