

涉外锅炉钢结构的风荷载计算及分析

程东梅¹, 陈 明², 乔洪斌³, 邱长华¹

(1 哈尔滨工程大学 机电学院, 黑龙江 哈尔滨 150004; 2 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036
3 华电能源股份有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150050)

摘 要: 在锅炉钢结构设计中, 基本风速或基本风压是确定设计风压值的基础, 如果基本风速或基本风压取值不正确, 会导致设计的结构不安全或不经济。基于不同国家规范如何进行风速的换算及设计风压如何取值是目前涉外项目风荷载计算的关键问题。以特里尼达和多巴哥余热锅炉项目为例, 对美国 UBC97 规范与中国荷载规范基本风速的含义和设计风压表达式进行了对比, 给出两规范下风速换算和设计风压的计算过程。结果显示, UBC97 规范的基本风压值是中国规范的基本风压值的 1.44 倍, 而前者的设计风压值则是后者的设计风压值 1.5² 倍。

关 键 词: UBC97 规范; 中国荷载规范; 基本风速; 风荷载
中图分类号: TK223 O39 文献标识码: A

引 言

在结构设计中, 基本风速或基本风压是确定设计风压的基础, 如果基本风速或基本风压取值不正确, 会导致设计的结构不安全或不经济。近年来, 随着涉外项目的逐渐增多, 有关风速在不同国家规范(多是美国规范)如何换算及设计风压如何取值的问题越来越多。本研究是以特里尼达和多巴哥余热锅炉项目及巴基斯坦余热锅炉项目为例, 分析美国 UBC97 规范(Uniform Building Code 1997 年版本, 简称 UBC97)与中国荷载规范风速换算及风压取值的差异。同时结合特里尼达和多巴哥余热锅炉项目, 针对规则、封密式锅炉钢结构, 比较了 UBC97 规范与中国荷载规范基本风速的测量、统计标准; 讨论了两规范下设计风速的换算方法; 比较了两规范中设计风压相关参数的取值和含义; 给出了中美规范基本风速和基本风压的换算表, 为涉外锅炉钢结构风荷载的设计和计算提供一些参考和帮助。

1 基本风速测量、统计标准

测量风速时, 由于测量高度不同、地貌不同、时

距不同往往会得到不同的测量结果, 为了比较不同地区风速或风压的大小, 必须对不同地区的地貌、测量风速的高度等有所规定。基本风速即按规定的地貌、高度、时距等条件所统计的平均最大风速值。在测量基本风速时, 通常涉及以下几个方面^[1]:

(1) 标准高度: 由于地表摩擦消耗风能的原因, 通常离地面越近, 风速值越小, 因而标准高度的规定对平均风速有很大的影响。我国将基本风速的测量高度定为 10 m。

(2) 标准地貌: 地表越粗糙, 风能消耗越大, 平均风速也就越小, 所以测量所在区域地表情况也会影响所得的平均风速值。测量基本风速的地貌一般要求空旷平坦, 远离城市。我国荷载规范将地面粗糙度 B 类(指田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区)设定为标准地貌。

(3) 平均风速的时距: 风随时间不断变化, 在测量时通常取某一规定时间内的平均风速作为计算标准, 这一规定时间即为时距, 不同的时距取值可得到不同的平均风速。一般来说, 时距越短, 平均风速越大。中国荷载规范将基本风速的测量时距定为 10 min。

(4) 最大风速的样本时间: 在计算平均风速时, 最大风速的取样可以取日最大风速, 也可以取月最大风速或年最大风速, 根据取样的不同得到的平均风速值也是不同的。目前, 世界各国(包括我国)基本上都是取年最大风速作为统计样本。

(5) 最大风速的重现期: 最大风速并不是经常出现, 需间隔一定时期后再出现, 这个间隔期称为重现期。重现期越长, 保证率也就越高。各国由于标准不同, 重现期的统计也各不相同。我国曾规定基本风速的重现期为 30 年, 现规范(GB50009-2001)将重现期定为 50 年。

2 UBC97 规范与中国荷载规范基本风速比较

由于各国规范测量基本风速标准不同, 在进行

收稿日期: 2009-07-16 修订日期: 2009-11-12

作者简介: 程东梅(1973-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工程大学博士研究生, 现工作在中国船舶重工集团公司第七〇三研究所。

基本风速换算前需要了解美国 UBC97规范与我国荷载规范基本风速定义的差异。

UBC规范主要针对美国西部提供的地方性规范,此规范也被美国之外的其他国家所接受,特里尼达和多巴哥项目及巴基斯坦项目均要求以 UBC规范作为钢结构的设计规范。UBC规范曾将基本风速以最大里风速形式给出,记录时距是水平长度 1.609 34 km(1 英里)的某一体积空气通过风速仪所需要的时间,所以最大里风速对应时距需计算得到;到 97版本时,已将平均风速时距统一为 3 s。

UBC97规范将基本风速定义为“按 C类方位区地面以上 10 m(33 ft)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^[2]”。中国规范基本风速定义为“按当地空旷平坦地面上 10 m高度处 10 min平均风速观测数据,经概率统计得出 50年一遇最大风速^[3]”。比较两规范,UBC97规范与中国荷载规范测量基本风速的测量高度、最大风速样本时间及重现期取值相同,对标准地貌的限定也基本相同,均指较空旷开阔地带。唯有测量时距不同,UBC97规范测量基本风速的时距为 3 s,而中国规范测量基本风速的时距为 10 min,所以按中国规范进行结构设计,需将时距 3 s的设计风速换算为时距为 10 min的设计风速。

表 1 UBC97规范与中国荷载规范基本风速测量条件对比

规范	标准高度 / m	标准地貌	测量时距 / s	样本时间 / y	重现期 / y
美国 UBC97 规范	10	方位 C 适用于空旷地带,地势平坦且通常是开阔的地区。	3	1	50
中国《建筑结构荷载规范》(GB50009-2001)	10	粗糙度 B 指田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区。	600	1	50
两规范比较	相同	基本相同	不同	相同	相同

3 基本风速时距换算方法

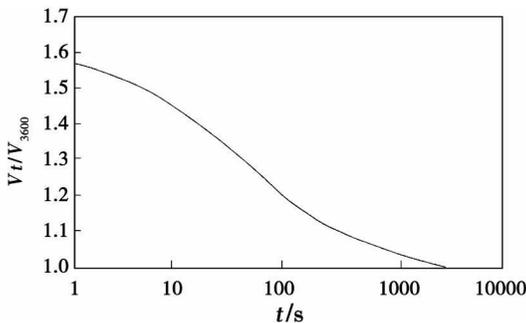


图 1 秒钟平均最大速度与 1 h 平均最大速度之比^[4]

测量风速时,时距不同所测得的平均风速也不相同。由于中美规范测量基本风速时仅测量时距不同,UBC97规范测量时距为 3 s,中国规范测量时距为 10 min,如将 UBC规范下的设计风速换算为中国规范下设计风速需依据时距进行换算。风速依据时距的换算比值可根据美国规范列出的 Durst 报告的风速记录统计分析结果得到,如图 1所示,也可由表 2不同时距与 10 min时距风速比值利用插值法计算得到。

由图 1可得到:

$$\frac{V_{3s}}{V_{600s}} = 1.54 \cdot \frac{V_{10min}}{V_{600s}} = 1.06$$

$$\text{则: } \frac{V_{3s}}{V_{10min}} = \frac{1.54}{1.06} \approx 1.45$$

或根据表 2由插值法计算得到:

$$\frac{V_{3s}}{V_{10min}} = 1.445 \approx 1.45$$

则中美基本风速的换算比为 1.45。

表 2 不同时距与 10 min时距风速换算系数

实测风速时距 / s	时距换算系数
3 600	0.94
600	1.00
300	1.07
120	1.16
60	1.20
30	1.26
20	1.28
10	1.35
5	1.39
瞬时	1.50

4 UBC97规范与中国荷载规范风荷载相关系数及计算方法比较

按 UBC97规范,结构设计风压:

$$P = C_e C_q q I$$

式中: C_e —综合高度、方位和阵风率系数; C_q —压力系数; q —在 10 m(33 ft)标准高度处的静压力; I —

重要性系数。

按中国《建筑结构荷载规范》垂直于建筑物表面上的设计风压:

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0$$

式中: β_z —高度 Z 处的风振系数; μ_s —风荷载体型系数; μ_z —风压高度变化系数; w_0 —基本风压。

表 3 中美规范设计风压相关系数对比

《建筑结构荷载规范》		UBC97
设计风压	w_k	P
基本风压	w_0	q_s
风压高度变化系数	μ_z	C_e
风振系数	β_z	
体型系数	μ_s	C_q

表 4 系数 C_e 与 μ_z 数值对比

高度 /m	C_e			μ_z		
	方位 D	方位 C	方位 B	地面粗糙度 A	地面粗糙度 B	地面粗糙度 C
5	1.41	1.08	0.63	1.17	1.00	0.74
10	1.56	1.25	0.78	1.38	1.00	0.74
15	1.67	1.36	0.89	1.52	1.14	0.74
20	1.75	1.46	0.98	1.63	1.25	0.84
30	1.87	1.60	1.12	1.80	1.42	1.00

UBC97 规范中系数 C_e 综合考虑了阵风、风速离地面高度变化、局部地形和地表粗糙度这些因素引起的综合效应^[9], 相当于中国荷载规范下 β_z 和 μ_z 的乘积, 如果不考虑振风系数 β_z , 仅比较系数 C_e 和 μ_z , 方位 D 与粗糙度 A 的取值接近, 方位 C 与粗糙度 B 取值接近, 方位 B 与粗糙度 C 取值接近, C_e 的各项取值略大于 μ_z 的各项取值, 如表 4 所示。静压力 q 相当于中国规范下的基本风压值 w_0 , 它们的取值均由设计风速确定; 为了便于比较两值关系, 根据中美基本风速的换算比为 1.45 可将 UBC97 规范提供的基本风速和基本风压列表换算为中国规范下基本风速和基本风压列表, 可得到静压力 q 大于基本风压 w_0 的 1.44² 倍, 如表 5 所示。压力系数 C_q 与结构的外部形状有关, 相当于中国荷载规范下的风荷载体型系数 μ_s , 对于封闭式矩形结构两个系数取值相同, 如表 6 所示。此外, UBC97 在计算设计风压 I 时将结构的重要性系数考虑进去, 而中国荷载规范在荷载组合才将重要性系数考虑进去 ($\gamma_0 \leq R$, γ_0 为结构重要性系数, S 为荷载效应组合的设计值; R 为结构构件抗力的设计值), 两规范关于重要性系数的取值基本相同, 如表 7 所示。由此可见,

中美规范计算设计风压的方法基本相同, 均考虑风高度、地表粗糙度和结构外部形状对风压的影响, 仅相关系数取值略有差异。

表 5 UBC97 规范与中国规范基本风速和基本风压转换

UBC97 规范		中国规范		q_s/w_0
基本风速 /m ^o s ⁻¹ (mph)	静压力 q_s /kN ^o m ⁻²	基本风速 /m ^o s ⁻¹	基本风压 w_0 /kN ^o m ⁻²	
70(31 31)	0 603	21 59	0 291	1.44 ²
80(35 78)	0 785	24 68	0 381	1.44 ²
90(40 25)	0 995	27 76	0 482	1.44 ²
100(44 72)	1 225	30 84	0 594	1.44 ²
110(49 19)	1 483	33 92	0 719	1.44 ²
120(53 67)	1 765	37 01	0 856	1.44 ²
130(58 14)	2 071	40 10	1 005	1.44 ²

表 6 封闭式矩形结构体型系数对比

	UBC97	《建筑结构荷载规范》
迎风面	$C_q = +0.8$	$\mu_s = +0.8$
背风面	$C_q = -0.5$	$\mu_s = -0.5$
两侧面	$C_q = -0.7$	$\mu_s = -0.7$

表 7 重要性系数对比

	UBC97	《建筑结构荷载规范》
重要设施	$I = 1.15$	对安全等级为一级或设计使用年限为 100 年及以上的结构构件 $\gamma_0 \geq 1.1$
危险设施	$I = 1.15$	
特殊用房结构物	$I = 1.00$	对安全等级为二级或设计使用年限为 50 年的结构构件 $\gamma_0 \geq 1.0$
标准用房结构物	$I = 1.00$	
其它结构物	$I = 1.00$	

5 示例计算

以特里尼达和多巴哥余热锅炉项目为例, 对方按美国 UBC97 规范提供的设计风速为 120 mph (194 km/h)。按合同条款锅炉钢框架可以按照我国国家标准设计。下面按中美规范分别计算设计风压。

5.1 依据 UBC97 规范计算风荷载

根据设计风速 120 mph (194 km/h), 查 UBC97 规范可得到静压力值 $q = 1.765 \text{ kN/m}^2$ 。由于该项目实施地位于沿海地区, 依据 UBC97 规范地面粗糙度应按方位 D 考虑, 可得到系数 C_e 随高度变化的取值, 如表 8 所示; 为方便计算, 这里压力系数 C_q 取 $+0.8 - (-0.5) = +1.3$ 根据结构用途查表取重要性系数 $I = 1.0$ 计算可得到随高度变化的设计风

压值 P

表 8 设计风压 P 相关参数取值及计算结果

高度 /m	C_e (方位 D)	C_q	q_s /kN·m ⁻²	I	p /kN·m ⁻²
5	1.41	1.3	1.765	1.0	3.235
10	1.56	1.3	1.765	1.0	3.579
15	1.67	1.3	1.765	1.0	3.832
20	1.75	1.3	1.765	1.0	4.015
30	1.87	1.3	1.765	1.0	4.291

的差异是导致计算结果不同的主要原因; 当不考虑风振系数 β_z 和重要性系数 I 对风荷载的影响, 即当 $\beta_z=1.0$ $I=1.0$ 时, 设计风压 P 约为 w_k 的 1.5^2 。

表 10 $\beta_z=1.0$ $I=1.0$ 时, 中美规范设计风压比值

高度 /m	$w_k=\beta_z \mu_z \mu_s w_0$	$P=C_e C_q q_s I$	P/w_k
5	1.302	3.235	1.6 ²
10	1.536	3.579	1.5 ²
15	1.691	3.832	1.5 ²
20	1.814	4.015	1.5 ²
30	2.003	4.291	1.5 ²

5.2 依据中国荷载规范计算风荷载

由于对方是基于 UBC97 规范提供的设计风速值, 需按时距换算为中国荷载规范下设计风速。查表 5 得到中国规范下 10 m 处基本风速为 37.01 m/s; 基本风压 $w_0=0.856$ kN/m²。经计算结构的自振周期为 $T_1=0.627$ s, 根据《建筑结构荷载规范》规定“对于基本自振周期 $T_1>0.25$ s 的工程结构, 如房屋、屋盖及各种高耸结构, 以及对于高度大于 30 m 且高宽比大于 1.5 的高柔房屋, 均应考虑风振脉动对结构发生顺风向风振的影响”, 需按式 $\beta_z=1+\xi \varphi_z / \mu_z$ 计算风振系数 β_z 。根据中国规范, 沿海地区的地面粗糙度为 A 类, 计算 $1.38 w_0 T_1^2=0.46$ 查此规范可得到脉动增大系数 $\xi=2.276$ 脉动影响系数 $\varphi_z=0.48$ 根据风压高度变化系数 μ_z 和振动系数 φ_z 可得到风振系数 β_z 和设计风压 w_k , 如表 9 所示。

表 9 标准风压相关参数取值及结果

高度 /m	w_0 /kN·m ⁻²	μ_z (粗糙度 A)	β_z	μ_s	w_k /kN·m ⁻²
5	0.856	1.17	1.058	1.3	1.377
10	0.856	1.38	1.158	1.3	1.778
15	0.856	1.52	1.273	1.3	2.153
20	0.856	1.63	1.405	1.3	2.548
30	0.856	1.80	1.607	1.3	3.219

6 结 论

(1) UBC97 规范和中国荷载规范基本风速测量、统计标准不同, UBC97 的风速测量时距是 3 s, 而中国规范测量时距是 10 m 存在时距取值差异, 导致 UBC97 基本风速值大于中国规范下基本风速值, 风速换算系数为 1.45; 基本风速不同导致基本风压不同, 按 UBC97 规范得到的基本风压值是按中国规范得到的基本风压值的 1.4² 倍。

(2) 在计算设计风压时, UBC97 规范和中国荷载规范风荷载的计算方法基本相同, 但由于各相关参数取值存在差异, 导致计算结果相差很大, 按 UBC97 规范得到的设计风压值大于按中国荷载规范得到的设计风压值, 如果不考虑风振系数 β_z 和重要性系数 I 对风荷载计算的影响, 对于规则、封闭式钢结构, UBC97 规范得到的设计风压约为中国规范得到设计风压的 1.5² 倍。

参考文献:

- [1] 张相庭. 结构风压和风振计算 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1985.
- [2] UBC97 Standard Uniform Building Code [S], 1997.
- [3] GB 50009-2001 建筑结构荷载规范 [S], 2001.
- [4] ASCE Standard Minimum design loads for buildings and other structures [S].
- [5] BROCKENBROUGH R L, MERRITT F S 美国钢结构设计手册 [M]. 同济大学钢与轻型结构研究室, 译. 上海: 同济大学出版社, 2006.

(本文责任编辑 陈 滨)

5.3 计算结果比较

由于基本风速的差异, 导致静压力 q_s 大于基本风压 w_0 的取值; 系数 C_e 小于风振系数 β_z 和风压高度变化系数 μ_z 的乘积; 设计风压 $P > w_k$, 基本风压值

of the primary air flow of the front and rear arch will exercise a notable influence on NO production. An increase of the primary air speed will lead to a reduction of the NO_x emissions concentration. Key words: flame boiler, air distribution, numerical simulation, NO_x emission

涉外锅炉钢结构的风荷载计算及分析 = Wind Load Calculation and Analysis of a Foreign-related Boiler Steel Structure [刊, 汉] / CHENG Dongmei, QU Changhua (Electromechanical Engineering College, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), CHEN Ming (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), QIAO Hongbin (Huadian Energy Source Shareholding Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150050) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(1), —61~64

In a boiler steel structure design, the basic wind speed or pressure is deemed as a basic condition for determining the design wind pressure. If the basic wind speed or pressure is chosen incorrectly, an unsafe or uneconomic design structure may result. How to convert the wind speed based on different national standards and how to choose the design wind pressure has currently become a key issue for calculating the wind load in a foreign-related project. With Trinidad and Tobago waste heat recovery boiler project serving as an example, after a comparison of the meaning of the basic wind speed and the design wind pressure expression of the American UBC97 standard with that of the Chinese load carrying standard, the calculation process of the wind speed conversion and design wind pressure was given under both load standards. The results show that the basic wind pressure calculated by using UBC97 standard is 1.44² times of that calculated by using the Chinese one while the design wind pressure is 1.5² times of that calculated by using the Chinese standard. Key words: UBC97, basic wind speed, wind load, boiler steel structure, basic wind pressure, standard comparison, structural calculation

燃气轮机余热锅炉过渡烟道的优化设计 = Optimized Design of the Transition Flue Duct of a Gas Turbine-based Waste Heat Recovery Boiler [刊, 汉] / WANG Yongtang, WU Shaohua (College of Energy Source, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), CHEN Ming, WANG Yanbin (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(1), —65~68

In the light of the flow section shape of a transition flue duct of a waste heat recovery boiler, presented were two optimized design schemes, namely 1. change the elevation angle of the top face plate of the flue duct and 2. install guide plates in the flue duct. Moreover, through a simulation calculation of the optimized design schemes, the flue gas velocity distribution on the cross section of the flue duct outlet was obtained. After an analysis and discussion of the simulated results, the best choice of the two optimized design schemes was determined. The calculation results show that to install guide plates can obviously improve the flue gas velocity distribution on the cross section of the flue duct outlet with the averaged velocity increasing from 11.13 m/s to 11.51 m/s, and the mean square deviation of the velocity decreasing from 12.33 m/s to 4.02 m/s. The application of the conclusions in the practical engineering projects has resulted in gaining satisfactory effectiveness. Key words: gas turbine waste heat boiler, transition flue duct, guide plate, flue gas velocity distribution

宝钢 N₂ 炼钢煤气冷却高压水回流系统节能改造 = Energy-saving Modification of a High-Pressure Water Return Flow System Cooled by Baogang N₂ Steelmaking Coal Gas [刊, 汉] / YU Xiaoming, SHEN Wenjun (College of Energy Source and Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), KONG Biaocong (Shanghai General Purpose Machine Technology Research Institute, Shanghai, China, Post Code: 200431) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(1), —69~71