

80-34

变截面高耸结构满足人舒适要求的抗风计算

徐贵章
(武汉城市建设学院)

瞿伟廉
(武汉工业大学) 74973.32

摘要 提出了变截面高耸结构满足人舒适要求的抗风设计计算方法,建立了一般高耸结构顺风向短周期风振加速度最大值的计算公式和圆截面高耸结构横风向共振加速度最大值的计算公式,并根据试验所得感觉舒适度的控制界限,得到了变截面高耸结构满足人舒适要求的二维抗风计算公式。

关键词 高耸结构, 舒适要求, 抗风计算, 变截面

中图分类号 TU312.1, TU973.32

风是高耸结构的主要设计荷载,随着高耸结构高度的不断增加及结构材料的高强化,结构在风荷载作用下的摆动将加大,以至引起高耸结构上的人感觉不舒适,甚至到无法忍受的地步,为此,在高耸结构满足强度和刚度要求的同时,如何进行满足人舒适要求的抗风设计,以保证高耸结构正常使用,已成为一个迫切需要解决的问题。

根据国内外医学、心理学和工程学专家的试验研究可知,影响人体感觉不舒适的最主要因素是振动频率、加速度幅值和持续时间。其中持续时间取决于阵风作用本身,而振动频率的调整又比较困难,因此本文采用限制结构振动加速度以避免人产生不舒适感觉的方法。根据变截面高耸结构风振反应的特点,建立了一般高耸结构上人能感觉到的顺风向短周期风振加速度最大值的计算公式,按照国内外人体振动暴露的舒适性评价准则,本文得到了满足人舒适要求的变截面高耸结构二维抗风设计的经验公式。

1 抗风计算的基本公式

高耸结构主要有构架式和实截面式两种,根据大量结构风振反应的实测记录分析可知,构架式和一般实截面高耸结构只存在顺风向的脉动风振反应和横风向的旋涡脱落干扰风振反应。

对于结构顺风向的脉动风振反应,许多学者提出了采用圆频率(对应于结构自振周期)的平方乘以最大风振位移反应的方法来求取最大风振加速度,这种方法的最主要错误是它忽略了结构顺风向的风振位移反应是由长周期成分和迭加在此成分之上的短周期成分所组成,只有短周期成分相应的加速度才能用基本圆频率的平方乘以其短周期位移来求取,而长周期成分相应的加速度只能用风的卓越圆频率的平方乘以长周期成分的位移来求取,由于

* 收稿日期:1995-01-19

徐贵章,男,1944年生,副教授,武汉城市建设学院建工系(430074)

风的卓越圆频率很小,故长周期成分相应的加速度可以忽略,这样,结构顺风向主要应考虑短周期风振加速度。

对于圆截面结构横风向的旋涡脱落干扰风振反应,从实测记录和理论分析的结果可知,它主要包含随机振动和变频简谐振动及其引起的共振反应。由于共振反应大大地超过了其它的反应,因此结构横风向的旋涡脱落干扰反应可只考虑共振加速度。

据此,根据结构顺风向的横风向反应是近似统计独立的假定,变截面高耸结构满足人舒适要求抗风设计计算的基本方程为:

$$[a_L(z) + a_C(z)]^{1/2} < [a] \quad (1)$$

式中: $a_L(z)$ 为结构顺风向短周期风振加速度最大值; $a_C(z)$ 为圆截面结构横风向共振加速度最大值; $[a]$ 为人舒适度的控制界限。

考虑到高耸结构的顺、横风向反应都是以第一振型为主,故其振动主频率的变化主要在 1.3~3 s 内变化。根据国内外学者对人体感觉的试验结果可知,此范围频率变化对人体感觉的影响并不明显,因此可近似将加速度控制界限取为与频率无关,这样,根据 Chang 提出的振动感觉程度的标准, $[a]$ 的具体数值见表 1。

表 1 人感觉程度控制界限

等级	使人烦恼	非常烦恼	不能忍受
$[a]$	15 gal	50 gal	150 gal

显然,必须根据工作和旅游层的具体功能来选择相应的控制界限。

2 顺风向短周期风振加速度最大值

由上述可知,高耸结构顺风向只考虑短周期风振加速度,可表示为

$$a_L(z) = w_1^2 x_S(z) \quad (2)$$

式中, w_1 为结构基本自振频率; $x_S(z)$ 为结构风振位移反应最大值的短周期成分。

那么,应该如何来求取结构风振位移反应最大值中的短周期成分呢?根据有关文献的分析结果可知,由于结构风振反应以第一振型为主,因此,在一定保证率下结构顺风向风振最大位移反应可表示为:

$$x(z) = \frac{1}{w_1} \xi_1 \mu_1 \varphi_1(z) W_0 \quad (3)$$

$$\text{式中: } \xi_1 = w_1^2 \sqrt{\int_0^\infty |H_1(w)|^2 S_f(w) dw} \quad \text{为风振动力系数}$$

$$\mu_1 = \frac{\int_0^H \mu_f(z) \mu_s(z) \mu_z(z) l_z(z) \varphi_1(z) dz}{M_1^* \eta_{s1}}$$

$\varphi_1(z)$ 为结构顺风向第一振型函数; W_0 为相应舒适度设计的基本风压; $S_f(w)$ 为脉动风谱形状函数; $|H_1(w)|^2$ 为传递函数模的平方; μ_f, μ_s, μ_z 分别为脉动系数,风载体型系数和风压高度变化系数; η_{s1} 为第一振型空间相关性折算系数; M_1^* 为第一振型广义质量。

考虑到 $x(z)$ 中各频率成分的多少主要取决于风振动力系数 ξ_1 , 而 ξ_1 的性态又决定于 $|H_1(\omega)|^2 S_f(\omega)$, 因此, 若将 $|H_1(\omega)|^2 S_f(\omega)$ 与 ω 的关系表示在图 1 之中 (其中 ω^* 为阵风卓越频率), 那么就可发现, 曲线中的两个峰分别对应于结构风振位移反应中的长周期成分和短周期成分, 这样, 若将短周期成分看成在结构基频 ω_1 附近, 带宽为 Δ 的窄带白噪声的共振响应所引起, 其中带宽 Δ 可近似取代 $|H_1(\omega)|^2$ 谱下的方差与窄带白噪声的方差相等求得

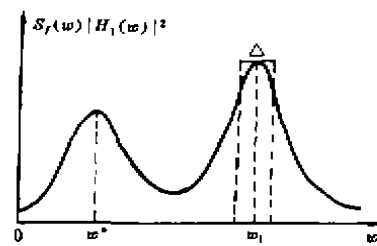


图 1

$$\Delta = \omega_1 \xi_1 / z \tag{4}$$

式中, ξ_1 为结构第一振型阻尼比。

那么, 对应于风振短周期成分的动力系数为

$$\xi_1^* = \sqrt{\frac{\pi X_1^2}{6 \xi_1 (1 + X_1^2)^{4/3}}} \tag{5}$$

式中, $X_1 = 30 / (\sqrt{W_0} \cdot T_1)$, 其中 T_1 为结构基本周期。

由此, 若取钢结构阻尼比 $\xi_1 = 0.01$, 钢筋混凝土结构阻尼比 $\xi_1 = 0.05$, 那么就可得到表 2 所示 ξ_1^* 的数表, 这样, 结构顺风向短周期风振加速度最大值为:

$$a_L(z) = \xi_1^* u_1 \varphi_1(z) W_0 \tag{6}$$

表 2 相应于短周期成分的风振动力系数 ξ_1^*

$W_0 T^2$	0.010	0.020	0.040	0.060	0.080	0.100	0.200	0.400	0.600	0.800	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	20.0	30.0
钢结构	1.08	1.21	1.36	1.46	1.53	1.59	1.77	2.00	2.13	2.24	2.32	2.61	2.92	3.12	3.27	3.39	3.77	4.01
钢混结构	0.48	0.54	0.60	0.64	0.68	0.71	0.79	0.89	0.95	1.00	1.03	1.17	1.31	1.39	1.46	1.52	1.68	1.80

对于变截面高耸结构, 若设 $m(z)$ 和 $l_x(z)$ 沿高度作有规则连续变化, 那么按照与文献 [2] 中相同的思路, 可以求得顺风向短周期风振加速度最大值的修正公式为:

$$a_L(z) = \xi_1^* \lambda_1 \theta_M \varphi_1(z) \frac{l_x(0)}{m(0)} \mu_s W_0 \tag{7}$$

式中 $m(0), l_x(0)$ 分别为结构底部剪面处分布质量参数和迎风面宽度值;

θ_M 为考虑结构连续化质量分布变化的折算系数, 当迎风面宽度变化但深度不变时,

$\theta_M = 1$, 当宽度和深度按相同规律变化时, 可查文献 [2] 中有关表格求取;

$$\theta_M = \frac{\int_0^H m(z) \varphi_1^2(z) dz}{\int_0^H m(z) \varphi_1^2(z) dz + \sum_{i=1}^n M_i \varphi_1^2(z)}$$

为结构上集中质量折算系数, 其中 M_i 为集中质量值。

3 圆形横截面结构横风向共振加速度最大值

对于变圆横截面高耸结构, 由于其高宽比较大, 因此随着截面直径沿高度的减小和风速

随高度的增加,在其上层因雷诺数 R_c 的不同而产生三种横风向力的作用^[2],对于雷诺数进入跨临界范围的区段,则因尾流旋涡的周期脱落而产生周期沿高度变化的简谐荷载,且当旋涡脱落频率 w_s 与结构自振频率 w_1 一致时(即结构某高度处风速达到共振临界风速时),则在此风速以上的一个锁定区域内引起结构横风向的共振反应,考虑到结构横风向的共振响应一般是远远大于另两种横风向力所引起的结构反应,故为了简化计算,对变圆截面高耸结构,在此仅考虑因横风向共振响应所引起的结构横风向风振加速度的最大值。

3.1 共振锁定区域的确定

当旋涡脱落频率与结构自振频率一致,引起结构横风向振动时,自共振临界风速所在高度向上的一个区段内,横风向简谐风力的频率 w_s 将始终等于 w_1 而保持不变,此区段称为共振锁定区域,显然,结构横风向共振是锁定区域上的简谐风振力所引起,为此确定共振锁定区域的范围是十分重要的。

考虑到圆截面的斯脱罗哈数 S ,可取为 0.2,故根据风压随高度变化规律及临界风速公式,文献[3]已求得共振锁定区域的下界 H_1 满足如下方程

$$H_1^2 = \frac{10^{2\alpha}}{64W_0'} \cdot \frac{D^2(H_1)}{T_1^2} \quad (8)$$

式中, α 为地面粗糙度系数; T_1 为结构基本周期。

显然, H_1 必须用迭代的方法才能求得,根据试验资料可知,锁定区域的上界常取 1.3 倍临界风速处,据此可得:

$$H_2 = 1.69^{1/2\alpha} H_1 \quad (9)$$

但这里必须注意,对于多阶变圆截面高耸结构,若 H_2 的高度已超过截面突变处,则锁定区域就取至此突变处。

3.2 横风向共振加速度最大值的计算

由振型分解法,文献[3]中已研究了因共振引起的横风向共振最大位移的计算公式,考虑到共振时,加速度为共振频率的平方乘以共振位移,故横风向共振加速度最大值的计算公式可表示为

$$a_c(z) = \xi_c \lambda_c \bar{\varphi}_1(z) \frac{\mu_L \mu_z(H_1) D(0) W_0'}{m(0)} \quad (10)$$

式中 $\xi_c = 1/2\xi_1$;

λ_c 为取决于 $D(H)/D(0)$ 和 $\theta = H_2/H$ 的参数,文献[3]已制成计算用表(其中 H 为结构总高度), $\bar{\varphi}_1(z)$ 为横风向第一振型向量。

4 工程实例计算

应用本文方法,我们对江苏某地钢结构电视塔的微波机房进行了满足人舒适要求的抗风计算,此电视塔总高 135 m,其中塔身部高 95 m,桅杆天线高 40 m,塔身由圆钢管组成,分 16 个节间层,为正方形截面的塔架。在第 14 层处设置一微波机房,电视塔所受满足舒适度基本风压取为 $W_0' = 0.25 \text{ kN/m}^2$,现验算微波机房是否满足人的舒适性要求。

考虑到此电视塔为塔架(基本周期 1.754 s),故只考虑顺风向反应,这样,满足人舒适度的设计计算只需按(7)式计算出 $a_L(z)$,并按公式(1)验算即可,据此,在求得塔架的折算迎风

面宽度 $l_x(z)$ 和分布质量 $m(z)$ 之后,得到(7)中各项参数列于表3。

表3 计算参数

ξ_1^2	λ_1	θ_1	θ_n	$\varphi_1(z)$	$l_x(0)$	$m(0)$	μ_a
1.50	0.89	2.58	0.671	0.414	1.275	1.294	1.2

由此可算得微波机房的风振加速度最大值为

$$a_L(z)|_{z=48m} = 1.50 \times 0.89 \times 2.58 \times 0.617 \times 0.414 \times \frac{1.275}{1.294} \times 1.2 \times 0.25 \\ = 0.26 \text{ ms}^{-2} = 26.5 \text{ gal}$$

根据表1中的控制界限 $[a]$ 可知,它介于15~50 gal之间,显然在微机房中会出现使人烦恼的情况,因微机房只是工作层,故可认为符合要求。

由上述计算过程可见,本文方法简明实用,是方便设计的一种计算方法。

参 考 文 献

- 1 王光远. 建筑结构的振动. 北京: 科学出版社, 1978
- 2 张相庭. 结构风压和风振计算. 上海: 同济大学出版社, 1988
- 3 张相庭. 高耸结构的极限状态及极限风压的研究. 上海: 同济大学情报站, 1987

(编辑: 刘家凯)

WIND RESISTANCE CALCULATION OF VARIABLE CROSS-SECTION TOWERING STRUCTURE FOR SATISFYING MAN' S CONFORTABLE DEMAND

Xu Guizhang

(Wuhan Urban construction Institute)

Qu Weilian

(Wuhan Technology University)

ABSTRACT This paper presents calculation methods of wind resistant design of variable cross-section towering structures for of variable cross-section towering structures for satisfying man' s comfortable demands. The calculation formulas of maximum values on vind vibration acceleration of shorten period in follwing wind direction for general towering structures and resonance acceleration in cross wind direction for towering structures with circular cross-section are founded. According to the control limit of the comfortability of man' s feeling gained by the test two-dimensional wind resistant calculation formulas for satisfying man' s comfortable demand from variable cross-section twoering structures are obtained.

KEYWORDS towering structure, comfortable demand, wind resistant calculation