

文章编号:1671-6833(2004)03-0060-05

高层建筑风响应及等效静态风荷载的研究

李会知¹, 郑 冰¹, 张 伟²

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 郑州东方钢结构工程有限公司, 河南 郑州 450052)

摘 要:从悬臂梁振动理论出发,讨论了高层建筑风响应的计算以及在风洞中利用高频天平测量高层建筑风荷载的原理,并进一步分析讨论了沿建筑物高度分布的平均风力、脉动风力、风致振动惯性力以及建筑结构设计所需要的等效静态风荷载的确定问题,指出了所提方法的局限性和应用范围,可为高层建筑结构设计中的风荷载确定提供参考.分析结果表明,求沿高层建筑高度分布的等效静态风荷载的方法适用于顺风向风力,在应用于横风向风力时由于涡脱落力的影响有理论误差.

关键词:高层建筑; 风荷载; 风响应; 高频天平

中图分类号: TU 312.1 **文献标识码:** A

0 引言

正确考虑风力的作用,关系到高层建筑设计的安全性、经济性和舒适性.我国建筑结构荷载规范^[1]规定:建筑物表面的风荷载标准值 $w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0$.式中: β_z 是风振系数, μ_s 是体型系数, μ_z 是风压高度变化系数, w_0 是按 50 年一遇风速计算的基本风压.这种简捷的处理方法给出的是单位面积的等效静态风荷载,它通过风振系数考虑了风振惯性力的影响,但由于规范只能提供规则外形、特定风环境的体型系数和风振系数,因此,规范方法通常适用于规则外形的单体结构,所以,规范 7.3.1 条规定:对于重要且体型复杂的房屋和构筑物,风载体型系数应由风洞试验确定,规范 7.3.2 条规定群体效应的干扰增大系数宜通过风洞试验得出.

风对建筑物的作用是一个随机过程,因此,建筑物的风荷载包括 3 个部分:①平均风压产生的平均风力(静态荷载);②脉动风压产生的随机脉动风力(动态荷载);③由于风致建筑物振动产生的惯性力(动态荷载).对于高层建筑来说,动态风荷载不容忽视,要比较准确地确定风荷载往往要依赖于模型风洞试验.模型风洞试验测量风荷载及预测建筑物风响应主要有下列 3 种方法:①风压测量试验^[2];②气动弹性模型试验;③高频动态天平试验^[3].它们各有优缺点或者说侧重点.风洞

模型的高频动态天平试验直接测量刚性模型底部的剪力和力矩,得到的是风作用在底部的平均风力和脉动风力及其功率谱,如何从试验中测量得到的刚性模型底部的风荷载数据计算出相应建筑物的位移和加速度响应,如何进一步求出高层建筑设计所需要的沿高度分布的等效静态风荷载,本文做了方法上的探讨.

1 高层建筑风响应计算及高频天平试验原理

悬臂梁剪切变形振动微分方程为^[4]

$$m(z) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c(z) \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(GA(z) \frac{\partial u}{\partial z} \right) = P(z, t) \tag{1}$$

式中: $m(z)$ 、 $c(z)$ 分别是 z 处单位高度上的质量、阻尼系数; $u(z, t)$ 是高度 z 处 x 或 y 方向的水平位移; $P(z, t)$ 是高度 z 处 x 或 y 方向单位高度上的水平风力; $GA(z)$ 是水平面抗剪刚度; k 是剪切断面系数.

悬臂梁弯曲变形振动微分方程为^[4]

$$m(z) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c(z) \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(EI(z) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = P(z, t) \tag{2}$$

式中: $EI(z)$ 是水平面抗弯刚度.上述两个方程(1)、(2)均可用振型分解法求解,即通过 $u(z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(z) Q_i(t)$ 将振动方程化

收稿日期:2004-03-05; 修订日期:2004-06-21

基金项目:河南省青年骨干教师基金资助项目

作者简介:李会知(1965-),男,河南永城人,郑州大学副教授,博士研究生,主要从事力学教学和风工程研究.

为

$$Q_i(t) + 2\zeta\omega_i Q(t) + \omega_i^2 Q(t) = \frac{F_i(t)}{M_i} \quad (3)$$

式中： $\varphi_i(z)$ ， $Q_i(t)$ ， ζ ， ω_i 分别是第 i 阶振型的振型函数、广义坐标、阻尼系数和圆固有频率； $F_i(t) = \int_0^H \varphi_i(z) P(z,t) dz$ 称为第 i 阶广义力； $M_i = \int_0^H m(z) \varphi_i^2(z) dz$ 称为第 i 阶广义质量，其中， H 表示建筑物高度。

高层建筑在风力作用下的水平运动可近似用悬臂梁一阶振动来描述。对于第一振型如用指数型 $\varphi_1(z) = \left(\frac{z}{H}\right)^\gamma$ 拟合，剪切振型幂指数取 $\gamma = 0.5$ ，弯曲振型取 $\gamma = 1.5$ ，而在风力作用下的高层建筑既承受剪力，又承受弯矩，振型属弯剪混合型，如假设取 $\gamma = 1$ 将不失合理性。

在这种前提下，高层建筑风振方程简化为(省略下标 1)

$$Q(t) + 2\zeta\omega_0 Q(t) + \omega_0^2 Q(t) = \frac{F(t)}{M} \quad (4)$$

高层建筑水平振动位移为

$$u(z,t) = \varphi(z) Q(t) \quad (5)$$

其中，广义力为

$$F(t) = \int_0^H \varphi(z) p(z,t) dz \quad (6)$$

广义质量为

$$M = \int_0^H m(z) \varphi^2(z) dz \quad (7)$$

振型函数为

$$\varphi(z) = \frac{z}{H} \quad (8)$$

求解方程式(4)就能利用式(5)得到水平位移，并进而求出惯性力，然而求方程(4)需要先求出广义力式(6)，这就要把脉动风力在高度方向上通过振型函数加权积分，由于脉动风力是分布随机荷载，无论是多点的同时测量上还是积分的数学处理上都存在难以克服的困难，只能另找出路。

先看一看将线性振型 $\varphi(z) = \frac{z}{H}$ 代入广义力表达式(6)是否另有其物理意义，代入后得 $F(t) = \frac{1}{H} \int_0^H P(z,t) z dz$ ，而 $\int_0^H P(z,t) z dz = M_w$ 恰是风荷载对底部的倾覆力矩，这为问题的解决带来了希望，如果能利用天平测量这个力矩，就避免了前述困难，而在风洞中先利用高频天平测量刚性模型底部的风荷载然后再利用相似原理即可得到

实际建筑物底部的倾覆力矩并进而计算出结构风响应。

下面结合风响应计算问题，讨论模型风洞试验的原理及方法。

通常，将风荷载 $P(z,t)$ 看成平均荷载和脉动荷载组成，即

$$P(z,t) = P(z) + p(z,t) \quad (9)$$

对应的广义力可表达为

$$F(t) = F + f(t) \quad (10)$$

$$F = \frac{1}{H} \int_0^H Pz dz$$

$$f(t) = \frac{1}{H} \int_0^H p(z,t) z dz$$

由上述分析，广义力与底部弯矩关系为

$$F(t) = M_w(t) / H \quad (11)$$

$$M_w(t) = M_w + m_w(t) \quad (12)$$

式中： M_w ， $m_w(t)$ 是高频天平测出的建筑物底部的平均弯矩和脉动弯矩。由风作用产生的结构响应 $Q(t)$ 也可相应地表示成平均和动态响应两部分：

$$Q(t) = Q + q(t) \quad (13)$$

$$Q = \frac{F}{M\omega_0^2} \quad (14)$$

于是，建筑物的动态响应 $q(t)$ 满足下列微分方程：

$$\ddot{q}(t) + 2\zeta\omega_0 \dot{q}(t) + \omega_0^2 q(t) = \frac{f(t)}{M} \quad (15)$$

利用天平测量底部脉动弯矩往往测量出其功率谱密度 $S_m(n)$ ，而广义力功率谱密度则为

$$S_f(n) = \frac{1}{H^2} S_m(n) \quad (16)$$

根据功率谱密度性质，可得广义动态风荷载的均方值为

$$\overline{q^2} = \int_0^\infty S_f(n) dn \quad (17)$$

设动态响应 $q(t)$ 和动态广义力 $f(t)$ 的功率谱之间的频响函数或称为结构导纳函数为 $|H_\omega(n)|$ ，这时，力谱和响应谱之间可表述为

$$S_q(n) = \frac{1}{K^2} |H_\omega(n)|^2 S_f(n) \quad (18)$$

式中： $|H_\omega(n)|^2 = \frac{1}{[1 - (n/n_0)^2]^2 + 4\zeta^2(n/n_0)^2}$ ； n_0 为结构的基阶固有频率； ζ 为阻尼比； K 为广义刚度，其表达式为

$$K = M\omega_0^2 = M(2\pi n_0)^2 \quad (19)$$

式中： M 为前述广义质量。

在实际数据处理中很难直接利用式 (18) 得到的响应功率谱积分求响应均方值, 一般用将响应分为背景响应和共振响应两部分^[3]的方式来处理. 脉动风往往是由不同尺度的旋涡随机混合形成的, 一般建筑物的固有频率远远超过大旋涡的频率, 因此, 在大旋涡激励下, 结构产生非共振形式的响应, 称作“背景响应”, 其均方值为

$$\sigma_{\text{qb}}^2 = \sigma^2 / K^2 \tag{20}$$

而小旋涡频率较高, 可以引起结构在其固有频率附近出现动力放大, 称为共振响应, 其均方值为

$$\sigma_{\text{qe}}^2 = \frac{1}{K^2} \frac{\pi n \omega S_f(n \omega)}{4 \zeta} \tag{21}$$

因此, 响应的均方根值 σ_q 与广义力均方根值 σ 之间可用下式来描述:

$$\sigma_q = \frac{\sigma}{K} \left[1 + \frac{\pi n \omega S_f(n \omega)}{4 \zeta} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{22}$$

所以, 建筑物的最大总体响应为

$$Q_{\text{max}} = \bar{Q} + g \sigma_q \tag{23}$$

其中, g 称为峰值因子, 一般取 3.5. 如求最大位移响应时, 将 Q_{max} 代入式 (5) 即可.

显然, 结构风致响应 σ_q 是脉动风特性 $S_f(n)$, σ 和结构特性 $n \omega, K, \zeta$ 的综合作用结果. 可以通过风洞试验利用测力天平测量刚性模型底部的平均力矩、脉动力矩从而得到广义风荷载 σ , $S_f(n)$, 再结合结构参数按照上述方法计算风响应. 为了保证试验得到的是广义风荷载而不是模型的振动响应力 (即含惯性力), 技术上要解决: ①设计高固有频率、高灵敏度的天平. ②设计轻质刚性模型, 以保持天平—模型系统仍有较高的固有频率.

根据相似原理可从风洞模型风荷载参数得到实际建筑物风荷载参数, 公式如下面三式:

$$\frac{n_p}{n_m} = \frac{1}{\lambda_l} \frac{v_p}{v_m} \tag{24}$$

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_m} = \lambda_l^2 \left\{ \frac{v_p}{v_m} \right\}^2 \tag{25}$$

$$\frac{S_{fp}}{S_{fm}} = \lambda_l^5 \left\{ \frac{v_p}{v_m} \right\}^3 \tag{26}$$

式中: 下标 m 表示模型; 下标 p 表示原型 (实际建筑物); v 表示速度; λ 表示原型与模型几何比. 根据式 (24) (25) (26) 可将从模型底部力矩得到的风荷载参数 σ_m, S_{fm} 转换得到实际建筑物的广义风荷载参数, 也就得到了式 (20) 中的 σ 和式 (21) 中的 $S_f(n \omega)$, 从而计算出结构响应.

2 等效静态风荷载的确定

根据高频天平试验结果, 可以求出高层建筑底部的平均风力和脉动风力, 在给出高层建筑结构参数的情况下, 可以计算出位移和加速度响应, 由共振加速度可以进一步求出惯性力. 高层建筑设计不仅要知道底部力矩、剪力以及惯性力, 往往更希望知道这些力沿高层建筑各层的分布, 并以一个等效静态风荷载来简单表达这些力的综合效果. 下面分析给出平均风力、脉动风力和惯性力, 最后给出等效静态风荷载.

2.1 惯性力

惯性力是由振动产生的, 由加速度和质量决定, 根据前述分析, 高层建筑惯性力主要由共振加速度决定, 沿高度分布的加速度均方根 $\sigma_a(z)$ 和惯性力均方根 $\sigma_d(z)$ 可由下式来表达:

$$\begin{aligned} \sigma_a(z) &= \omega_0^2 \sqrt{\frac{1}{N} \frac{\pi n \omega S_f(n \omega)}{K^2 4 \zeta} \frac{z}{H}} \\ &= \sqrt{\frac{1}{N} \frac{\pi n \omega S_f(n \omega)}{M^2 4 \zeta} \frac{z}{H}} \end{aligned} \tag{27}$$

$$\sigma_d(z) = m(z) \sigma_a(z) \tag{28}$$

最大加速度在楼顶, 均方根数值为

$$\sqrt{\frac{1}{N} \frac{\pi n \omega S_f(n \omega)}{M^2 4 \zeta}}, \text{ 一般可据此判断居住者的舒适度.}$$

2.2 平均风力和脉动风力

沿高度分布的风力常可通过下式表达:

$$P(z, t) = \frac{1}{2} \rho V^2(z, t) C_p(z) \tag{29}$$

式中: ρ 为空气密度; $C_p(z)$ 是 z 处单位高度上的力系数, 一般通过风压测量试验确定; $V(z, t)$ 是来流风速. 风速是平均风速与脉动风速的合成, 即

$$V(z, t) = \bar{V}(z) + v(z, t) \tag{30}$$

$$P(z, t) = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^2(z) \left(1 + 2 \frac{\bar{v}}{\bar{V}} + \frac{v^2}{\bar{V}^2} \right) C_p(z),$$

一般来说, 脉动风速相对于平均风速是小量, 忽略二阶小量, 即可得到沿高度分布的平均风力和脉动风力分别如下:

$$\bar{P}(z) = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^2(z) C_p(z) \tag{31}$$

$$p(z, t) = \rho \bar{V}(z) v(z, t) C_p(z) \tag{32}$$

脉动力均方根为

$$\begin{aligned} \sigma_p(z) &= \bar{V}(z) \sigma_v(z) C_p(z) \\ &= \bar{V}^2(z) \frac{\sigma_v(z)}{\bar{V}(z)} C_p(z) \\ &= 2 \bar{P}(z) I_v(z) C_p(z) \end{aligned} \tag{33}$$

其中： $I_u(z) = \frac{q(v)}{V(z)}$ 为沿高度的来流湍流度。

求惯性力要通过高频天平试验，求平均风力和脉动风力要通过风压测量试验，是不是在某一条件下可以节省风压测量试验呢？下面给予讨论。

建筑物底部剪力 Q_d 和弯矩 M_w 是沿高度分布的风力合成的结果，可表达如下：

$$Q_d = \int_0^H P(z,t) dz \tag{34}$$

$$M_w = \int_0^H P(z,t) z dz \tag{35}$$

大气边界层的平均风速剖面可用如下指数律表达：

$$\frac{V(z)}{V_H} = \left(\frac{z}{H}\right)^\alpha \tag{36}$$

其中， V_H 是建筑物高度 H 处的平均风速。如果 $C_P(z)$ 沿高度为常数 C_P ，则由式 (31)、(34)、(35)、(36) 得

$$C_P = \frac{2(1+2\alpha)Q_d}{\pi V_H^2 H} \tag{37}$$

$$C_P = \frac{4(1+\alpha)M_w}{\pi V_H^2 H^2} \tag{38}$$

如果式 (37)、(38) 计算值相等，就基本可以认定 $C_P(z)$ 为常数；如果相差较大，则 $C_P(z)$ 不为常数。虽然仅通过式 (37)、(38) 计算值一致而判定 $C_P(z)$ 为常数的理由尚不够充分，但实际上在式 (37)、(38) 计算值一致而 $C_P(z)$ 不为常数的可能性很小。如果计算结果 $C_P(z)$ 为常数，就可按式 (31)、(33) 计算沿楼层分布的平均风力和脉动风力，高频天平试验本来是要解决动态响应和惯性力问题的，这样还解决了平均风力和脉动风力的楼层分布问题，节省了风压测量试验，当然如果要解决某一局部的风压分布问题还是要依赖风压测量试验。一般来说，几何外形沿高度不变的建筑物，由式 (37)、(38) 计算的 C_P 值相等就可以认定 $C_P(z)$ 为常数，几何外形变化大， $C_P(z)$ 变化也会大，这时应由风压测量试验确定 $C_P(z)$ 才能比较准确地给出平均风力和脉动风力的楼层分布。

2.3 等效静态风荷载

沿高度分布的等效静态风荷载由下式给出：

$$P_{\text{等效}}(z) = P(z) + g \sqrt{q_p^2(z) + q_w^2(z)} \tag{39}$$

式中： g 为峰值因子，可取 3.5。高层建筑底部的等效静态弯矩和剪力分别为

$$M_{w\text{等效}}(z) = M_w + g \sqrt{q_m^2 + \left(\int_0^H m(z) q_a(z) z dz\right)^2}$$

$$= M_w + g \sqrt{\sigma_m^2 + \frac{\pi n_0 S_f(n_0)}{4 \xi} H^2} \tag{40}$$

$$Q_{d\text{等效}} = Q_d + g \sqrt{q_d^2 + \left(\int_0^H m(z) q_a(z) dz\right)^2}$$

$$= Q_d + g \sqrt{q_d^2 + \frac{1}{M^2} \frac{\pi n_0 S_f(n_0)}{4 \xi} \left(\int_0^H m(z) \frac{z}{H} dz\right)^2}$$

$$\tag{41}$$

式中： M_w, Q_d, σ_m, q_d 分别为高层建筑底部的平均弯矩、平均剪力、脉动风弯矩均方根值、脉动风剪力均方根值，可由高频天平试验测得的底部平均弯矩、平均剪力、弯矩均方根值、剪力均方根值按相似原理转换得到。 $S_f(n_0)$ 由高频天平试验测得的广义力谱按相似原理求得。 M, n_0 分别为广义质量和固有频率。

3 结束语

本文从悬臂梁振动理论出发，讨论了利用高频天平测量高层建筑风荷载的原理以及高层建筑风响应的计算和平均风力、脉动风力、风致振动惯性力、等效静态风荷载的确定，对高层建筑结构设计中的风荷载确定有参考价值，但也存在一定的局限性和应用范围。高频天平测量的是建筑物刚性模型底部的平均风力和脉动风力，在应用到实际高层建筑物时就暗含着平均力和脉动力只与高层建筑外形有关，不因结构振动而改变，即假设了无振动反馈气动力。而且，惯性力的计算是建立在线性振型的基础之上，如果实际建筑物的振型偏离线性振型难免产生误差。

本文提出的求沿高层建筑高度分布的等效静态风荷载的方法适用于顺风向风力。在横风向风力中，脉动力由两部分组成，一部分是由来流湍流引起的，一部分是由涡脱落诱导产生的，由脱落涡诱导产生的脉动力对背景分量的贡献部分按本文方法求其等效静态风荷载缺乏理论依据，但从总的等效静态风荷载的构成来说，涡脱落引起的脉动力只是脉动风力中的一部分，只会带来较小的误差，因此，本文提出的求等效静态风荷载的方法应用于横风向风力有理论误差，但应该有限或者说较小。

参考文献：

[1] GB 50009—2001, 建筑结构荷载规范[S].
[2] 李会知. 高层建筑建筑风压试验研究[J]. 实验力学, 2000, 15(2): 157~162.
[3] 李会知, 关 罡, 吴义章. 建筑物风荷载测量技术与

动态响应的研究[J] . 工程力学, 2004, 21(1) : 143~147.

[4] 居荣初, 曾心传. 弹性结构与液体的耦联振动理论[M] . 北京: 地震出版社, 1983. 31~35.

[5] TSCHANZ T, DAVERPORT A G .The base balance technique for the determination of dynamic wind loads[J] .J Wind Engineering & Industrial Aerodynamics , 1983, 13: 429~439.

Study of Wind Response of High-rises and Their Equivalent Static Wind Load

LI Hui-zhi¹, ZHENG Bing¹, ZHANG Wei²

(¹College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; ²Zhengzhou Eastern Steel Structure Engineering Co. Ltd., Zhengzhou 450052, China)

Abstract : This paper discusses the computation of wind response of high-rises based on the vibration theory of cantilever beam and the principle of measuring their wind load in a wind tunnel using a high frequency balance .It further analyzes the height distributions of the mean wind force , fluctuating wind force , wind induced vibrating inertial force , and the determination of the equivalent static wind load required by the structural design of the buildings . This method can be used as a reference for determining the wind load of high-rises in their structural design .The result points out that the method of equivalent static wind load calculation in this paper is suitable for the along-wind wind force but exists theoretical error to across-wind wind force due to the influence of vortex shedding .

Key words : high-rise ; wind load ; wind response ; high frequency balance