

某高层建筑风致振动惯性力的试验研究

李会知 樊友景 吴义章 郑 冰

(郑州大学土木工程学院 河南 郑州 450002)

摘要 利用高频天平 ,通过缩尺比为 1:500 的模型风洞试验 ,测量了在 16 个来流风向下某高层建筑模型底部的风荷载 .根据试验结果 ,计算了该高层建筑的风致动态响应 .结合当地的气象风速资料 ,并通过概率分布计算 ,给出了 50 a 重现期风速下的风致振动惯性力最大值 ,从而为该高层建筑的设计提供了风荷载依据 .

关键词 高层建筑 ;惯性力 ;风致振动 ;高频天平

中图分类号 :TU973.213 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2004)03-0304-04

风荷载是高层建筑结构设计的侧向控制荷载之一 ,正确考虑风力的作用 ,关系到结构的经济性、安全性和舒适性 .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 (a)平均风压产生的平均力(静态荷载) (b)脉动风压产生的随机动态力 (c)由于脉动风力引起建筑物振动产生的惯性力 .对于高层建筑 ,由于高度较高 ,固有频率相对较低 ,这种风致振动惯性力往往不容忽视 .利用高频天平可以预测高层建筑的风致振动惯性力^[1~3] .

某地拟建的一座高层建筑由一座 35 层(高 128.4 m)的办公大楼和一座 27 层的住宅楼组成 ,办公大楼为钢结构 ,住宅楼为钢筋混凝土结构 .由于钢结构的阻尼小 ,柔性大 ,因此设计建造者非常关心办公大楼的风致振动惯性力 .本文利用高频天平通过缩尺模型风洞试验 ,研究了办公大楼的风致振动惯性力 .通过把风洞试验数据和建筑场地的风统计特性数据结合起来 ,直接给出了该办公大楼沿楼层分布的 50 a 一遇的风致振动惯性力的最大值 ,为该高层建筑提供了风致振动惯性力的设计依据 .

1 高频天平试验原理

高层建筑的风致振动通常用一阶振动来描述 ,在这前提下 ,风振方程

$$M[\ddot{q}(t) + 2\zeta\omega_0\dot{q}(t) + \omega_0^2 q(t)] = F(t) \tag{1}$$
$$M = \int_0^H m(z)\varphi^2(z)dz \qquad F(t) = \int_0^H \varphi(z)p(z,t)dz$$

式中 : M ——广义质量 ; q ——广义位移 ; ζ ——阻尼比 ; ω_0 ——固有圆频率 ; $F(t)$ ——广义力 ; $m(z)$ ——沿高度分布的质量 ; $p(z)$ ——沿高度分布的脉动风荷载 ; H ——建筑物高度 ; $\varphi(z)$ ——振型函数 .

建筑物实际脉动位移为 $u(z) = \varphi(z)q(t)$.通常假设振型为线性振型 ,即 $\varphi(z) = z/H$ 时 ,

$$F(t) = \frac{1}{H} \int_0^H p(z,t)zdz = \frac{M_w(t)}{H}$$

式中 $M_w(t)$ 是脉动风力对建筑物底部的动态倾覆力矩 .这样 ,可以通过天平测量出底部弯矩 ,计算建筑物的脉动位移和加速度 ,并进一步求出风致振动惯性力 .因为风力是脉动随机荷载 ,所以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

$$S_f(n) = \frac{1}{H^2} S_M(n) \tag{2}$$

根据功率谱密度性质 ,可得广义动态风荷载的均方值

$$\sigma_f^2 = \int_0^\infty S_f(n)dn \tag{3}$$

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

$$S_q(n) = \frac{1}{K^2} |H_\omega(n)|^2 S_f(n) \tag{4}$$

$$|H_\omega(n)|^2 = \frac{1}{[1 - (n/n_0)^2]^2 + 4\zeta^2(n/n_0)^2}$$
$$K = M\omega_0^2 = M(2\pi n_0)^2 \tag{5}$$

式中: n_0 ——结构的基阶固有频率; K ——广义刚度。

在实际数据处理中,由于式(4)得不到响应功率谱,因此也就不能直接积分求响应均方值,一般将响应分为背景响应和共振响应两部分。脉动风往往是由不同尺度的漩涡随机混合形成的,一般建筑物的固有频率远远超过大漩涡的频率,因此,在大漩涡激励下,结构产生非共振形式的响应,称作“背景响应”,其均方值为

$$\sigma_{qb}^2 = \frac{\sigma_f^2}{K^2} \tag{6}$$

而小漩涡频率较高,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

$$\sigma_{qre}^2 = \frac{1}{K^2} \frac{\pi}{4} \frac{n_0 S_f(n_0)}{\zeta} \tag{7}$$

因此,响应的均方根值 σ_q 与广义力均方根值 σ_f 之间可用下式来描述:

$$\sigma_q = \frac{\sigma_f}{K} \left[1 + \frac{\pi}{4\zeta} \frac{n_0 S_f(n_0)}{\sigma_f^2} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

所以,建筑物的位移响应均方根值为

$$\sigma_u(z) = \frac{z}{H} \sigma_q \tag{9}$$

惯性力是因振动产生,由加速度和质量而决定的。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

$$\sigma_a(z) = \omega_0^2 \sqrt{\frac{1}{K^2} \frac{\pi}{4} \frac{n_0 S_f(n_0)}{\zeta}} \frac{z}{H} = \sqrt{\frac{1}{M^2} \frac{\pi}{4} \frac{n_0 S_f(n_0)}{\zeta}} \frac{z}{H} \tag{10}$$

惯性力均方根

$$\sigma_a(z) = m(z) \sigma_a(z) \tag{11}$$

最大加速度在楼顶,均方根数值为 $\sqrt{\frac{1}{M^2} \frac{\pi}{4} \frac{n_0 S_f(n_0)}{\zeta}}$,最大值为 $g \sqrt{\frac{1}{M^2} \frac{\pi}{4} \frac{n_0 S_f(n_0)}{\zeta}}$, g 称为峰值因子,一般取 3.5。可根据最大加速度值判断居住者的舒适度。

显然,结构风致响应 σ_q 是脉动风特性 $S_f(n)$ 、 σ_f 和结构特性 n_0, K, ζ 综合作用的结果。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 $\sigma_f, S_f(n)$ 。再结合结构参数,按照上述方法计算风响应 σ_q 、结构位移响应和惯性力。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 (a)设计高固有频率、高灵敏度的天平 (b)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,可从风洞模型的风荷载参数得到实际建筑物的风荷载参数

$$\frac{n_p}{n_m} = \frac{1}{\lambda_l} \frac{v_p}{v_m} \quad \frac{\sigma_{fp}}{\sigma_{fm}} = \lambda_l^2 \left(\frac{v_p}{v_m} \right)^2 \quad \frac{S_{fp}}{S_{fm}} = \lambda_l^5 \left(\frac{v_p}{v_m} \right)^3 \tag{12}$$

式中:下标 m ——模型;下标 p ——原型(实际建筑物); v ——速度; λ_l ——原型与模型几何比。根据式(12),可从模型底部力矩得到的风荷载参数 σ_{fm}, 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(6)中的 σ_f 和式(7)中的 $S_f(n_0)$,从而计算出结构响应,进一步可求出惯性力等数据。

2 试验概况

试验在 $1.4\text{ m} \times 1.4\text{ m}$ 风洞中进行。该风洞试验段断面为高 1.4 m 、宽 1.4 m 的切角正方形,试验段长为 6.3 m 。在模型试验前先在试验段模拟得到了风速剖面幂指数 $\alpha = 0.3$ 的大气边界层。试验采用一台 5 分量高频动态天平(可测量水平顺风向、横风向剪力、 β 方向力矩)测量模型底部风荷载,天平的固有频率: $n_x = 265\text{ Hz}$, $n_y = 228\text{ Hz}$ 。安装了几何比为 $1:500$ 的模型后,模型-天平系统固有频率 $n_x = 132\text{ Hz}$, $n_y = 116\text{ Hz}$,满足高固有

频率的要求.为了考虑周围临近建筑的干扰影响,模拟了直径 300 m 范围内的其它建筑物,模型的风洞安装见图 1.为了考虑风向的影响,共测量了 16 个来流工况(等间隔 22.5°)的建筑物底部风荷载.为了准确地从总体荷载中分解出动态分量,测量中采用分离器将动、静态信号在一级放大后进行分离,并将动态信号进行第二级放大,然后交计算机处理.

3 数据处理及结果

3.1 天平数据

在模型试验中,天平测量的是风在建筑物基底产生的气动力,包括剪力、弯矩的平均值及其脉动量.根据试验原理,由天平测得的基底弯矩可以估算高层建筑的风致振动位移及其引起的惯性力.所以,处理数据时首先给出天平的基底弯矩系数和无量纲化的基底弯矩功率谱密度曲线



图 1 风洞模型
Fig.1 Model in wind tunnel

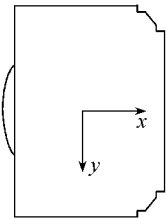


图 2 坐标定义
Fig.2 Coordinate system

$$\frac{nS_{M_x}(n)}{\sigma_{M_x}^2} \sim \frac{nB}{V_H}$$
$$\frac{nS_{M_y}(n)}{\sigma_{M_y}^2} \sim \frac{nB}{V_H}$$

x 和 y 方向的基底平均弯矩系数和基底脉动弯矩根方差系数分别定义为

$$C_{M_x}^m = \bar{M}_x / (\rho V_H^2 B H^2 / 2)$$
$$C_{M_y}^m = \bar{M}_y / (\rho V_H^2 B H^2 / 2)$$

$$C_{M_x}^r = \sigma_{M_x} / (\rho V_H^2 B H^2 / 2)$$
$$C_{M_y}^r = \sigma_{M_y} / (\rho V_H^2 B H^2 / 2)$$

式中: $\bar{M}_x, \bar{M}_y$ —— x 和 y 方向的气动力产生的基底平均弯矩; $\sigma_{M_x}, \sigma_{M_y}$ —— x 和 y 方向的气动力产生的基底脉动弯矩根方差; ρ ——空气密度; V_H ——模型顶部的平均风速; B, H ——模型的宽度和高度.在模型俯视图上的坐标系如图 2 所示.

3.2 风统计特性

用风洞模型试验获得的基底弯矩来计算实际建筑物的惯性力时,还应该对建筑物场地的风统计特性做合理的研究.如果直接用 16 个风向下测到的基底弯矩参数,并根据《建筑结构荷载规范》^[4]给出的 50 a 一遇的最大风速值计算高层建筑的动态位移响应和惯性力,那么结果很可能会显得保守.因为这种处理方法中隐含着各个方向 50 a 一遇的风速都相等这一假设,而事实上,各风向下的 50 a 一遇的风速是不可能一样的,规范给出的 50 a 一遇的最大风速值只可能出现在某一风向下,在该风向下单位风速所对应的风荷载可能不是最大值,或者说单位风速所对应的风荷载为最大值的风向,其 50 a 一遇的最大风速可能远小于规范推荐值.因此应对建筑场地各风向的风速做合理的概率分布计算,给出各风向下 50 a 一遇的最大风速结果,然后结合风洞试验结果,计算出各风向下 50 a 一遇的最大风速所产生的风荷载,取其最大者作为设计风荷载.

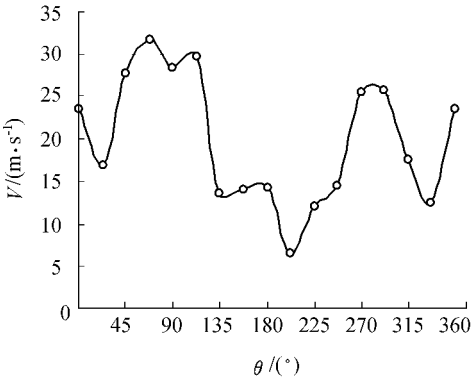


图 3 10 m 标高各风向 50 a 一遇最大风速
Fig.3 Extreme wind speed for a recurrence interval of 50 years at 10 m element

各风向下的年最大风速符合极值 I 型分布,即

$$P(V_{\theta}) = \exp\{-\exp[-\alpha(V_{\theta} - u)]\}$$

通过概率计算方法得到 θ 风向下 50 a 一遇的最大风速为 $V_{\theta} = \bar{V}_{\theta} + 2.59\sigma_{\theta}$,其中 $\bar{V}_{\theta}, \sigma_{\theta}$ 是年最大风速样本的平均值和均方差.根据设计者提供的气象风速资料,得出了各风向下 10 m 标高 50 a 一遇的最大风速 $V_{10}(\theta)$,如图 3 所示.那么根据风速剖面的分布特征,该高层建筑顶部 50 a 一遇的最大风速为

$$V_H(\theta) = V_{10}(\theta) \left(\frac{H}{10} \right)^{0.3}$$

3.3 试验分析计算及结果

根据基底平均弯矩能够计算出建筑物的平均位移,根据基底脉动弯矩能够计算出建筑物的动态位移、加速度和惯性力.根据广义力与基底弯矩的关系,由式(10)可得 x 和 y 方向上沿高度分布的加速度根方差

$$\sigma_{ax} = \frac{C_{M_x}^r \rho V_H^2 B z}{2 M} \sqrt{\frac{\pi}{4 \zeta} \frac{n_{0x} S_{M_x}(n_{0x})}{\sigma_{M_x}^2}}$$

$$\sigma_{ay} = \frac{C_{M_y}^r \rho V_H^2 B z}{2 M} \sqrt{\frac{\pi}{4 \zeta} \frac{n_{0y} S_{M_y}(n_{0y})}{\sigma_{M_y}^2}}$$

式中： n_{0x} 、 n_{0y} —— x 和 y 方向上的固有频率，对于本高层建筑， $n_{0x} = 0.24$ ， $n_{0y} = 0.26$ 。根据相似原理，将该建筑的几何参数、质量参数、试验得到的参数代入，即可求出加速度根方差。求出加速度后，不难求出惯性力，在 x 和 y 方向上沿高度分布的最大惯性力为

$$f_x = g m(z) \sigma_{ax}$$

$$f_y = g m(z) \sigma_{ay}$$

式中 g 取 3.5。在 16 个风向中，每一个风向下均可求出该风向 50 a 一遇的最大风速所对应的最大惯性力，各风向中的最大者再行比较，取其最大者。为方便设计者应用，将所得的按楼层分布的最大惯性力列于表 1。设计时建筑物不仅要能抵抗平均风荷载的作用，还要抵抗由于风致建筑物振动产生荷载的作用。

表 1 沿楼层分布的惯性力

Table 1 Distribution of inertial loads on different stories												kN
楼层	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
f_x	23.02	32.89	69.25	96.60	129.12	104.01	123.02	141.38	159.81	178.68	196.63	214.74
f_y	14.16	20.23	42.30	59.42	79.43	63.98	75.68	86.97	98.30	109.91	120.95	132.10
楼层	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
f_x	233.47	251.01	321.47	287.37	304.03	320.46	338.80	356.01	373.70	391.95	408.90	425.73
f_y	143.61	154.41	197.74	176.77	187.02	197.12	208.41	218.80	229.88	241.10	251.53	261.89
楼层	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
f_x	443.87	465.09	476.29	494.28	510.62	527.69	545.60	561.68	577.64	595.42	613.22	
f_y	273.04	286.10	292.99	304.06	314.10	324.61	335.62	345.50	355.32	366.27	377.21	

4 结 束 语

通过几何缩尺比为 1:500 的模型风洞试验，研究了某高层建筑的风响应及惯性力，结合当地风统计数据，直接给出了该建筑 50 a 一遇的最大惯性力，为设计者提供了动态风荷载参数。本文结合建筑场地各风向的风统计特性数据分析建筑结构的荷载，比简单地按照规范提供的 50 a 一遇的最大风速值计算更为合理。

参考文献：

[1] COOK N J. A sensitive 6-component high —frequency-range balance for building aerodynamics[J]. Phys E Sci Instrum , 1983 ,116 : 390—393.

[2] TSCHANZ Z , DAVERPORT A G. The base balance technique for the determination of dynamic wind load[J]. J Wind Engineering & Industrial Aerodynamics , 1983 ,13 :429—439.

[3] 顾明 ,周印 ,张锋 ,等. 用高频动态天平方法研究金茂大厦的动力风荷载和风振响应[J]. 建筑结构学报 2000 2(4) 55—61.

[4] GB 50009—2001 建筑结构荷载规范[S].

Experimental study on wind-induced vibration inertial force for a high-rise building

LI Hui-zhi , FAN You-jing , WU Yi-zhang , ZHENG Bin

(College of Civil Engineering , Zhengzhou Univ. , Zhengzhou 450002 , China)

Abstract : Wind tunnel tests are performed on the model of a high-rise building with a scale of 1:500 , and the wind loads on the base of the model are measured under 16 wind regimes by use of the high-frequency balance . Based on the measured data , the wind-induced dynamic response of the high-rise building is calculated , and in combination with the local meteorological and wind velocity data , the maximal value of the wind-induced vibration inertial force is predicted for a recurrence interval of 50 years through probability analysis , providing a basis for determination of wind loads for high-rise building design .

Key words : high-rise building ; inertial force ; wind-induced vibration ; high-frequency balance