

# 高层建筑顺风向荷载气动导纳研究

张建国<sup>1,2</sup>, 顾明<sup>2</sup>

(1. 厦门大学 土木工程系, 福建厦门 361005; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 高层建筑顺风向的脉动风荷载通常是基于准定常假设, 由来流风速的功率谱密度函数和相干函数求得, 其中风荷载和风速功率谱密度对气动导纳函数影响较大。依据 10 个典型高层建筑模型的同步测压风洞试验数据, 对高层建筑各层高度处顺风向荷载的功率谱密度函数和气动导纳函数的特性进行分析, 提出了顺风向荷载气动导纳函数的表达式, 并针对公式中的具体参数进行了拟合。采用该表达式对一栋实际高层建筑的顺风向风致动态响应进行计算, 并与其模型的试验结果进行对比。结果表明: 高层建筑顺风向荷载的气动导纳曲线沿高度变化不大, 但与其截面形状关系较大, 曲线整体呈指数分布, 当折减频率小于 0.1 时, 气动导纳数值均接近于 1.0。算例结果表明, 采用所建议的气动导纳拟合式计算出的风致响应结果与风洞试验计算结果较为吻合, 误差在 10% 以内。

**关键词:** 高层建筑; 顺风向; 气动导纳; 风致响应  
**中图分类号:** TU973.213 **文献标志码:** A

## Aerodynamic admittance of along-wind loads on tall buildings

ZHANG Jianguo<sup>1,2</sup>, GU Ming<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;  
2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Along-wind fluctuating loads on tall buildings are usually obtained by power spectra and coherence functions of inflow wind velocity based on the quasi steady theory. In this process, the aerodynamic admittance of along-wind loads plays an important role. Ten tall building models with different section shapes were tested using simultaneous pressure measuring technique in a wind tunnel. According to the test data, the power spectra and aerodynamic admittances of along-wind loads on every layer in the terrain category B and D were analyzed in detail and the fitting formula of the aerodynamic admittances was proposed. Parameters in this formula were given accordingly. The wind-induced responses of an actual high-rise building were calculated by the formula given here and random vibration method based on wind tunnel test data respectively. The results show that the aerodynamic admittances of along-wind loads on different height of the same tall building have little discrepancy and vary with the section shapes. All of the aerodynamic admittances satisfy the exponential law and approach 1.0 when the reduced frequency is less than 0.1. The response using present aerodynamic admittance agrees well with one from the wind tunnel experiment and the error is less than 10%.

**Keywords:** tall building; along-wind; aerodynamic admittance; wind induced response

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90715040 91215302)。

作者简介: 张建国(1974—), 男, 湖北长阳人, 工学博士, 副教授。E-mail: zjianguo@xmu.edu.cn

通信作者: 顾明(1957—), 男, 江苏兴化人, 工学博士, 教授。E-mail: Minggu@tongji.edu.cn

收稿日期: 2016 年 2 月

## 0 引言

在高层建筑顺风向的风致响应计算过程中,通常认为顺风向风力的相干性与来流风速完全相同,而不同高度处的顺风向风力满足准定常假设,风力的功率谱密度函数可由来流风速的功率谱密度函数经过简单变换得到<sup>[1-6]</sup>。

顾明等<sup>[7]</sup>以10个典型高层建筑刚性模型同步测压风洞试验为基础,针对层阻力的竖向相干性进行了分析,认为顺风向阻力的竖向相干性较来流风速相干性大很多,并给出了阻力竖向相干性的数学拟合公式,同时认为阻力的功率谱密度函数与来流风速的功率谱密度函数也有差别,但并未给出定量分析。目前,Vickery<sup>[8]</sup>给出的高层建筑气动导纳公式被广泛采纳,但并未给出针对不同截面形式的高层建筑对应的气动导纳表达式。Peil等<sup>[9]</sup>对一高344 m塔进行了顺风向脉动风速和风力测试,对准定常理论进行了验证,并拟合了该塔顺风向风力气动导纳的闭合公式。Kareem<sup>[10]</sup>的研究认为,虽然高层建筑迎风面和背风面的阻力谱均不符合Davenport谱的形式,但若将两者相结合,仍可近似采用准定常理论来表示。

为此,基于文献[7]中的研究,文中对其中的10个典型高层建筑模型的层脉动阻力进行功率谱密度估计,将其与来流风速的顺风向功率谱密度函数进行比较,得到高层建筑各层阻力的气动导纳曲线,并拟合得到闭合公式。以一栋实际高层建筑作为算例,采用建议的闭合公式进行计算,并与风洞试验的响应结果进行验证。

## 1 风洞试验概况

文献[7]中的试验在同济大学TJ-2风洞进行,风洞试验段的高2.5 m、宽3.0 m、长15 m,风速范围为0.5~68 m/s。按照GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》,分别模拟了缩尺比为1/500的B、D两类风场,两类风场平均风速剖面与理论结果吻合<sup>[11]</sup>。模型顶部高度0.6 m处的B、D类风场纵向湍流度分别为7.5%和14%,符合GB 50009—2012中的要求。各高度处的顺风向风速谱与Davenport谱吻合很好<sup>[11]</sup>,其计算式为

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4f_u^2}{6(1+f_u^2)^{4/3}} \quad (1)$$

式中: $S_u(n)$ 为顺风向来流脉动风速的功率谱密度函数; $\sigma_u$ 为来流脉动风速的根方差; $f_u$ 为无量纲频率, $f_u = 1200n/U_{10}$ , $U_{10}$ 为距地10 m高度处的平均

风速; $n$ 为脉动风频率。

风洞中来流顺风向脉动风速的竖向和水平相干函数分别采用与规范形式相同的表达形式:

$$\text{coh}_u(n, z_1, z_2) = \exp\left(-\frac{nC_{u_z}|z_1 - z_2|}{\bar{U}}\right) \quad (2)$$

$$\text{coh}_u(n, x_1, x_2) = \exp\left(-\frac{nC_{u_x}|x_1 - x_2|}{\bar{U}}\right) \quad (3)$$

式中: $\text{coh}_u(n, z_1, z_2)$ 和 $\text{coh}_u(n, x_1, x_2)$ 分别为竖向和水平相干函数, $z_1$ 、 $z_2$ 、 $x_1$ 和 $x_2$ 分别为点1和点2(风场中任意两点)处的纵坐标和横坐标; $C_{u_z}$ 和 $C_{u_x}$ 分别为竖向和水平衰减指数,下标 $u$ 表示顺风向脉动风速; $\bar{U}$ 为点1和点2两位置平均风速的平均值。模拟得到 $C_{u_z}$ 在7~9之间,与Davenport的建议值7和Simiu<sup>[6]</sup>的建议值10相当, $C_{u_x}$ 在10~16之间。

试验中选取的10个高层建筑模型截面分为矩形(图1a)与多边形(图1b)两类。其中矩形截面模型分别为M1~M7,迎风面的厚度 $d$ 与宽度 $b$ 的比值分别为1:1、1:1.5、1:2、1:3、1.5:1、2:1、3:1。模型M8~M10的截面分别为五边形、六边形和八边形, $d/b$ 分别为0.95:1、0.866:1、1:1。模型高度均为0.6 m,缩尺比为1:500。7个矩形截面模型各布置10层测点(从下至上依次为1~10层),考虑风荷载对响应的影响随高度明显增加,因此,布置测点层上密下疏,各层测点高度分别为43.5、127.5、205.5、277.5、343.5、403.5、457.5、505.5、547.5、583.5 mm。各层每面均匀布置5个测点,每个模型测点总数均为200个。3个正多边形截面模型各布置9层测点(从下至上依次为层1~9),测点高度分别为45.0、132.0、213.0、288.5、358.5、422.5、480.5、532.5、578.5 mm,正五边形、正六边形和正八边形各层每面布置的测点数分别为5个、4个和3个,测点总数分别为225、216个和216个。模型截面和来流风向的示意如图1所示,其中 $b$ 、 $d$ 分别为模型迎风面宽度和厚度方向的投影尺寸。

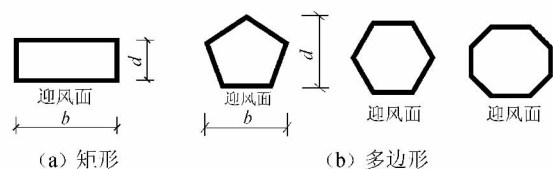


图1 模型截面示意

Fig. 1 Section shapes of models

## 2 顺风向气动导纳

在满足准定常假设的前提下,定义高层建筑各层阻力气动导纳<sup>[2]</sup>为

$$\chi_z^2(n) = \frac{S_{D_z}(n)}{S_u(n)} \cdot \frac{\bar{U}_z^2}{4\bar{F}_{D_z}^2} \quad (4)$$

式中:  $\chi_z^2(n)$  为高度  $z$  处的层阻力气动导纳,  $S_u(n)$  为来流风速的功率谱密度函数, 如式(1)所示;  $\bar{U}_z$  为该层高度处的平均风速;  $S_{D_z}(n)$  为高度  $z$  处的层阻力功率谱密度函数,  $\bar{F}_{D_z}$  为该层阻力的平均值, 其中下标  $D_z$  表示高度  $z$  处建筑顺风向所受阻力。

高层建筑各层顺风向的气动导纳实际上是来流风作用到建筑物表面上时, 迎、背风表面水平方向以及迎、背风表面之间相干性综合作用的结果。因此, 可按照风速水平相干性函数的表达形式, 给出气动导纳的表达形式为

$$\chi_z^2(n) = \exp\left(-C_{D_{z,x}} \frac{nb}{\bar{U}_z}\right) \quad (5)$$

式中,  $C_{D_{z,x}}$  为高度  $z$  处的层阻力气动导纳衰减指数,  $b$  为高层建筑迎风面宽度的投影,  $\bar{U}_z$  为该层所在高度  $z$  处的平均风速。

采用最小二乘法, 根据试验结果, 按照式(5)的表达形式拟合了各高层建筑模型各层的气动导纳曲线, 得到了各层气动导纳衰减指数。图2中仅给出B、D两类风场下模型2、6、9不同高度处的气动导纳曲线。其余模型均有类似的特征, 不再给出。表1给出了所有模型在B、D两类风场下各层气动导纳衰减指数的计算结果。

由图2可以看出, 式(5)表示的气动导纳函数, 其计算结果与试验结果的中心线吻合较好, 根据相似比理论, 将曲线横坐标的最大值取到1.0, 即可满

足绝大部分实际高层建筑风致响应计算的要求。可以发现, 当横坐标折减频率  $nb/\bar{U}_z \leq 0.1$  时, 所有模型各层上的气动导纳均接近1.0, 这说明, 当实际高层建筑的基本频率或者迎风面宽度较小而来流风速较大时, 可不考虑气动导纳的影响, 直接用风速的功率谱密度函数经过简单转换后来代替顺风向风力的功率谱密度函数。

以厦门地区为例, 取基本风压  $w_0$  为0.88 kPa, 假设某高层建筑的高度  $H = 350$  m, 迎风面宽度  $b = 40$  m, 1阶基本频率  $f_1 = 0.15$  Hz, 位于B类地貌。经计算, 在高度  $z = 188$  m处,  $f_1 b/\bar{U}_z = 0.1$ , 由此认为在计算该高层建筑顺风向一阶风致动态响应时, 该处以上楼层可不用考虑气动导纳的影响。

由表1可以看出, 除模型顶部和底部位置存在三维效应, 使结果离散性较大外, 每个模型中部不同层高度处气动导纳衰减指数  $C_{D_{z,x}}$  相差不大, 同时可以看出, D类地貌的衰减指数较B类稍大, 为便于计算, 忽略高度和地貌的影响, 可将  $C_{D_{z,x}}$  的下标  $z$  去掉, 简化为  $C_{D_x}$  表示。但不同模型之间的气动导纳衰减指数差别较大, 经过分析, 针对模型M1~M7, 以  $d/b$  作为变量来描述  $C_{D_x}$  的变化情况; 针对模型M1、M8~M10,  $C_{D_x}$  的离散性较大, 但为简化计算, 仍以模型截面的边数  $a$  作为变量来描述  $C_{D_x}$  的变化情况, 其表达式为

$$C_{D_x} = \begin{cases} -0.8745(d/b) + 2.0554 & (\text{矩形断面}) \\ -0.0447a + 1.4077 & (\text{正多边形截面}) \end{cases} \quad (6)$$

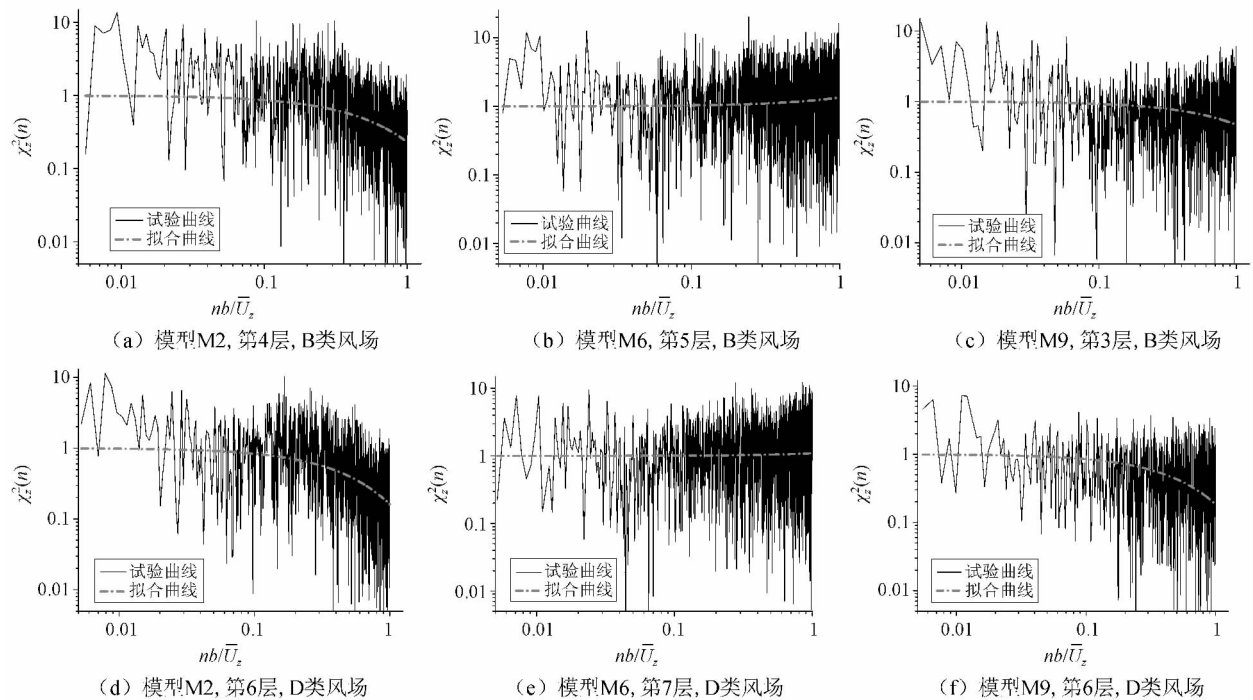


图2 B、D类风场下各模型层阻力气动导纳曲线

Fig.2 Aerodynamic admittances of drag forces on different layers in terrain category B, D

表 1 B、D 类风场下模型层阻力气动导纳衰减指数

Table 1 Decaying exponentials of drag forces of model in terrain category B、D

楼层	风场类别	$C_{D_z}$									
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
1	B	1.008	1.624	1.917	2.743	-0.261	-0.565	-0.755	1.259	1.270	1.190
	D	2.449	2.906	3.285	3.110	1.254	0.435	0.911	2.784	2.824	2.571
2	B	0.871	1.182	1.665	1.977	-0.496	-0.419	-0.783	0.864	0.960	0.878
	D	1.585	1.915	2.567	2.614	0.549	0.689	0.367	2.041	1.902	1.841
3	B	1.043	1.069	1.890	2.064	-0.315	-0.373	-0.421	0.720	0.758	0.786
	D	1.279	1.794	2.125	2.526	0.319	0.091	0.284	1.427	1.462	1.469
4	B	1.516	1.465	1.844	2.426	-0.013	-0.222	-0.333	0.726	1.504	1.009
	D	1.408	1.799	2.029	2.470	0.241	-0.015	0.371	1.154	1.728	1.426
5	B	1.544	1.637	1.887	2.262	-0.110	-0.298	-0.239	1.143	1.639	1.377
	D	1.619	1.830	2.028	2.277	0.097	-0.027	0.129	1.085	1.475	1.316
6	B	1.641	1.826	2.070	2.315	-0.212	-0.208	-0.574	1.147	1.689	0.461
	D	1.734	1.974	2.241	2.368	0.053	0.037	-0.013	1.078	1.691	0.609
7	B	1.768	1.983	1.227	2.220	0.092	-0.277	-0.237	0.986	1.791	0.229
	D	1.650	2.153	1.397	2.237	0.315	-0.091	0.361	1.040	1.778	0.244
8	B	0.589	2.194	1.300	1.785	-0.058	-0.239	-0.412	0.748	1.077	0.568
	D	0.593	2.248	1.337	1.870	0.128	0.100	0.165	0.905	1.027	0.698
9	B	0.389	1.830	0.708	1.146	-0.205	1.327	-0.504	0.107	0.459	0.025
	D	0.407	1.759	0.869	1.264	-0.048	1.378	-0.031	0.394	0.662	0.066
10	B	0.142	1.015	0.116	0.443	-0.690	0.356	-1.124	—	—	—
	D	0.059	0.755	0.079	0.186	-0.562	0.465	-0.781	—	—	—

式中  $a$  为高层建筑多边形截面的边数。

图 3 为试验所获得的 194 个  $C_{D_z}$  值及式 (6) 的拟合曲线, 式 (6) 中的各系数也由最小二乘法求得。

需要说明的是, 表 1 中的气动导纳衰减指数有部分数值为负数, 这与图 2b 和图 2e 所示规律相对

应, 即顺风向气动导纳大于 1.0, 表明在某些情况下, 风荷载的功率谱密度函数较来流风速的功率谱密度函数更大, 这是由于当  $d/b > 1.0$  时, 由旋涡脱落或再附引起的迎、背风面的相干性贡献较大所致。

### 3 算例分析

以一栋实际高层建筑为例, 选择以下三种方法求解风致振动响应, 并进行比较。

1) 方法 1。直接由来流风速的功率谱密度函数和水平、竖向相干性函数, 基于准定常假设, 求得高层建筑的风致动态响应, 采用式 (1) ~ (3) 进行计算, 式中  $C_{u_z} = 8$ ,  $C_{u_x} = 13$ 。

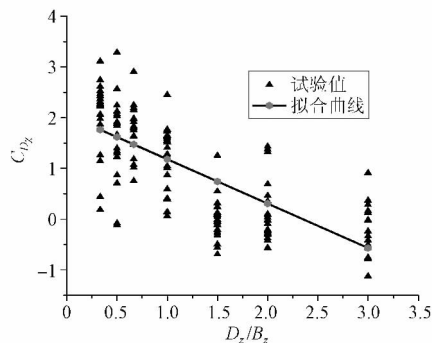
2) 方法 2。文献 [7] 中针对层阻力的竖向相干性进行分析, 其拟合公式为:

$$\text{coh}_D(n, z_1, z_2) = \exp\left(-\frac{nC_{D_z}|z_1 - z_2|}{\bar{z}}\right) \quad (7)$$

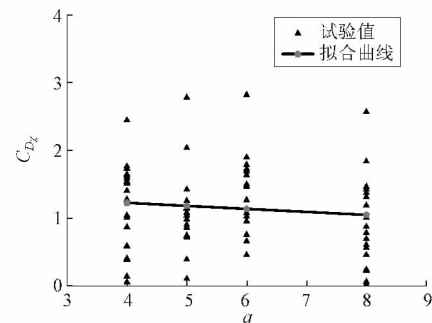
$$C_{D_z} = -2.3 \frac{|z_1 - z_2|}{\bar{z}} + 5.1 \quad (8)$$

式中:  $\text{coh}_D(n, z_1, z_2)$  为高度  $z_1$  和  $z_2$  处阻力的相干函数;  $C_{D_z}$  为阻力竖向相干性衰减指数, 下标  $D_z$  表示顺风向阻力;  $\bar{z}$  为高度  $z_1$  和  $z_2$  连线的中点; 其余参数与式 (1) ~ (3) 中意义相同。

3) 方法 3。根据该高层建筑风洞试验结果, 由随机振动理论直接计算其风致动态响应, 并在方法 1 ~ 3 进行比较时, 将方法 3 作为精确值。



(a) 模型M1~M7



(b) 模型M1、M8~M10

图 3 阻力气动导纳衰减指数

Fig. 3 Decaying exponentials of drag forces

该栋高层建筑的截面形状为方形,其结构几何特性和风环境特性见表2,表中参数 $H$ 、 $b$ 、 $w_0$ 和 $M$ 分别为高层建筑的高度、迎风面宽度、基本风压以及单位长度的质量。结构顺风向的一阶振型、频率和阻尼比见图4。

表2 某高层建筑的结构特性与风环境  
Table 2 Geometric and wind characteristics of a high-rise building

风场类别	$H/m$	$b/m$	$w_0/kPa$	$M/(t \cdot m^{-1})$
B类	230	45	0.65	364.5

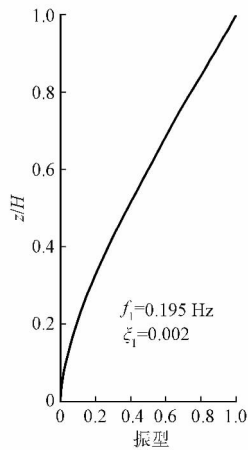


图4 高层建筑顺风向的一阶模态特性

Fig. 4 First mode characteristics of high-rise building in along-wind direction

在同济大学 TJ-2 风洞实验室进行了缩尺比为 1/300 的建筑模型的同步测压风洞试验,限于篇幅,该高层建筑模型的测点布置和风洞试验过程在此不赘述,具体试验方法和试验过程可参考文献[7]和文献[11]。

采用上述三种方法求得该高层建筑顺风向各高度处位移响应的动态响应峰值  $y_d$  曲线,如图5所示。

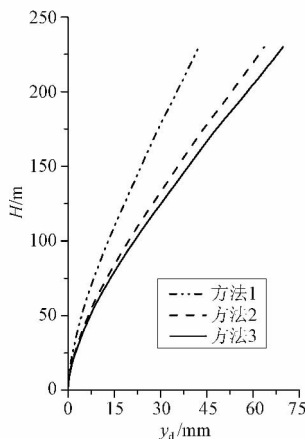


图5 高层建筑顺风向位移动态响应峰值

Fig. 5 Dynamic peak displacement of high-rise building in along-wind direction

表3为相应的顶部位移动态响应峰值及其误差。需要说明的是,在计算中,三种方法均只考虑了第一阶模态的贡献。可以看出,方法2求得的风致响应结果较方法1更接近精确值,误差在10%以内,这说明根据本文中及文献[7]中提出的高层建筑阻力气动导纳函数和竖向相干性函数表达式具有较高的精度。而直接采用风速特性代替风力特性,计算高层建筑顺风向的风致响应,其结果会产生较大的误差。

表3 高层建筑顶部顺风向位移动态响应峰值  
Table 3 Dynamic peak displacement at top of high-rise building in along-wind direction

计算方法	方法1	方法2	方法3
$\hat{y}_d/mm$	42.4	63.7	69.8
$e/\%$	-39.2	-8.74	0.0

注:  $\hat{y}_d$  为顶部位移动态响应峰值;  $e$  为相对误差。

## 4 结论

1) 根据10个高层建筑模型的同步测压风洞试验结果,针对顺风向层阻力的气动导纳进行了分析,拟合了阻力气动导纳的闭合公式,并给出了气动导纳的衰减指数。结果表明,高层建筑沿高度各层阻力的气动导纳函数曲线差别不大,但不同断面形式高层建筑的气动导纳函数曲线则有较大的差别,在折减频率小于0.1时,所有高层建筑各楼层的顺风向气动导纳数值均接近于1.0。

2) 对一栋实际高层建筑风致响应的计算结果表明,按照文中建议的方法,计算结果与风洞试验结果更接近,误差在10%以内。

### 参考文献

- [1] DAVENPORT A G. Gust loading factors [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1967, 93(3): 11-34.
- [2] HOLMES J D. Wind loading of structures [M]. 2nd ed. London: Taylor and Francis, 2007: 101-132.
- [3] MASARU M, HIROMICHI S. Spanwise coherence characteristics of surface pressure field on 2D bluff bodies [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1/2): 155-163.
- [4] KAWAI H. Pressure fluctuations on square prisms: applicability of strip and quasi-steady theories [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 13(1): 197-208.
- [5] HUNT J R C, KAWAI H, RAMSEY S R, et al. A review of velocity and pressure fluctuations in turbulent flows around bluff bodies [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 35(1/2/3): 49-85.

- [6] SIMIU E ,SCANLAN R. 风对结构作用: 风工程导论 [M]. 刘尚培 ,项海帆 ,谢霖明 ,译. 上海: 同济大学出版社 ,1992: 205-218. ( SIMIU E ,SCANLAN R. Wind load on structure: introduction of wind engineering [M]. Translated by LIU Shangpei , XIANG Haifan , XIE Jiming. Shanghai: Tongji University Press ,1992: 205-218. ( in Chinese) )
- [7] 顾明 ,张建国. 高层建筑顺风向脉动荷载相干性研究[J]. 土木工程学报 ,2008 ,41( 11) : 18-22. ( GU Ming ,ZHANG Jianguo. Coherence analysis of along-wind loads on high-rise buildings [J]. China Civil Engineering Journal , 2008 , 41 ( 11) : 18-22. ( in Chinese) )
- [8] VICKERY B J. Load fluctuations in turbulent flow [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division , 1968 , 94( 2) : 31-46.
- [9] PEIL U , BEHRENS M. Aerodynamic admittance models for buffeting excitation of high and slender structures [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics ,2007 ,95( 2) : 73-90.
- [10] KAREEM A. Synthesis of fluctuating along-wind loads on buildings [J] . Journal of Engineering Mechanics , 1986 ,112( 1) : 121-125.
- [11] 黄鹏 ,全涌 ,顾明. TJ-2 风洞大气边界层被动模拟方法的研究[J]. 同济大学学报( 自然科学版) ,1999 , 27( 2) : 136-140. ( HUANG Peng , QUAN Yong , GU Ming. Research of passive simulation method of atmospheric boundary layer in TJ-2 wind tunnel [J]. Journal of Tongji University ( Natural Science) ,1999 , 27( 2) : 136-140. ( in Chinese) )