

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201901155

# 矩形高层建筑风荷载气动导纳研究

陈水福, 刘 奕

(浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

**摘 要:** 为探究深宽比对矩形高层建筑风荷载气动导纳的影响, 本文对深宽比为 0.11~9 的矩形高层建筑进行了风洞测试试验, 研究了正交风向作用下不同深宽比建筑各立面脉动风压与基底阻力的气动导纳的变化规律, 并与基于准定常假定的 Vickery 模型和 Solari 模型作了比较; 通过拟合分析获得了适用于不同深宽比建筑基底阻力的气动导纳的闭合表达式. 结果表明: 当建筑深宽比小于 0.5 时, 迎风面脉动风压及基底阻力的气动导纳与 Vickery 模型较为接近, 但随深宽比增大, 气动导纳在高频区的衰减速度变缓, Vickery 模型和 Solari 模型较试验值显著偏小; 在建筑背风面和侧风面上, 因流动分离、再附和旋涡脱落等非定常流动的影响, 脉动风压的气动导纳在高频区域会出现大小不等的峰, 此时 Vickery 模型在变化规律和数值大小上均不再吻合. 本文获得的幂函数形式的基底阻力气动导纳拟合式可以较准确地预测不同深宽比矩形建筑的基底阻力气动导纳.

**关键词:** 气动导纳; 高层建筑; 深宽比; 绕流特性; 基底阻力

**中图分类号:** TU973

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2019)12-0079-07

## Aerodynamic admittance of wind loads on rectangular high-rise buildings

CHEN Shuifu, LIU Yi

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** To investigate the effects of depth-to-width ratio on the aerodynamic admittance of wind loads on rectangular high-rise buildings, wind tunnel pressure tests for high-rise buildings with depth-to-width ratios of 0.11–9 were conducted. Patterns of the aerodynamic admittances for fluctuating wind pressures on each wall and base drag were investigated under the orthogonal wind direction, which were then compared with quasi-steady assumption based Vickery’s model and Solari’s model. Closed-form expression for the aerodynamic admittance for base drag of buildings with different depth-to-width ratios was obtained through fitting analysis. Results show that when the depth-to-width ratio is lower than 0.5, the aerodynamic admittances for base drag and fluctuating pressures on the windward wall are close to Vickery’s model. But as the ratio increases, the decay rate of the aerodynamic admittance becomes lower, and Vickery’s model and Solari’s model are significantly lower than the measured values. On the leeward and side walls, due to the effects of body-generated turbulence such as flow separation, reattachment, and vortex shedding, peaks with different sizes appear at high frequencies of the aerodynamic admittances for fluctuating pressures, where the varying pattern and magnitudes of Vickery’s model no longer match. The fitted formula in power function form that obtained in this paper can well predict the aerodynamic admittance for base drag of rectangular buildings with different depth-to-width ratios.

**Keywords:** aerodynamic admittance; high-rise buildings; depth-to-width ratio; flow characteristics; base drag

风荷载是高层建筑的主要侧向荷载. 目前一般认为高层建筑的顺风向脉动风压符合准定常假定, 即假设脉动风压随来流脉动风速的变化而变化<sup>[1]</sup>. Davenport<sup>[2]</sup>在进行风致响应的频域计算中, 通过采用气动导纳将来流脉动风速谱与结构上的气动合力谱联系起来; Vickery<sup>[3]</sup>通过拟合风洞试验数据, 给出了高层建筑脉动阻力系数的气动导纳经验函数; Kareem<sup>[4]</sup>研究了方形截面高层建筑迎风面、背风面上脉动风力谱与来流风速谱的关系, 发现迎风面上

的脉动风压谱可以由来流脉动风速谱线性转化而来, 但是在高频区域相对于风速谱衰减更为迅速, 而背风面靠近侧边处的脉动风压谱则出现由旋涡脱落引起的尖峰; Solari<sup>[5]</sup>推导了风荷载谱的等效形式, 考虑相关性对脉动风速谱进行了修正, 经验证该修正项可视为气动导纳项; Zhou 等<sup>[6]</sup>比较了方形截面高层建筑基底弯矩的气动导纳试验值与规范计算值, 发现二者在高频区存在显著差别; 张建国等<sup>[7]</sup>对不同平面形状的高层建筑层脉动阻力的气动导纳进行了拟合, 并获得了指数形式的经验公式. 在上述研究中, Vickery<sup>[3]</sup>提出的高层建筑气动导纳模型被普遍使用, 但是其未能描述气动导纳随建筑深宽比

收稿日期: 2019-01-22

作者简介: 陈水福(1967—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 陈水福, csf@zju.edu.cn

的变化规律;张建国等<sup>[7]</sup>虽然考虑了深宽比的影响,但其试验模型的深宽比范围仅限于 0.33~3,且指数形式气动导纳的拟合参数的离散性略微偏大;Solari<sup>[5]</sup>给出的气动导纳项为现行美国荷载规范计算顺风向峰值响应的理论基础,但是该气动导纳只考虑了建筑表面脉动风压不完全相关产生的折减,忽略了建筑本身产生的非定常流可能产生的影响。

本文对深宽比为 0.11~9 的矩形高层建筑进行了风洞测压试验,研究了正交风向作用下不同深宽比建筑迎风面、背风面与侧风面上脉动风压的气动导纳及其变化规律,并与 Vickery 模型和 Solari 模型作了比较;探讨了建筑基底脉动阻力的气动导纳随深宽比的变化规律,通过拟合分析获得了适用于不同深宽比建筑基底阻力的气动导纳闭合表达式,并通过算例验证了拟合式的准确性。

## 1 风洞试验及数据处理

### 1.1 风场模拟

本次风洞试验在加拿大西安大略大学(University of Western Ontario, UWO)边界层风洞Ⅱ的高速试验段中进行。该试验段长 30.0 m,宽 3.4 m,高 2.1 m,最大风速可达 40 m/s。

本文风洞试验的来流风场根据工程科学数据库(ESDU)的建议进行。本次试验模拟了开阔地貌风场,风场缩尺比为 1:200,足尺地表粗糙长度  $z_0 = 0.01$  m。其中风场平均风速剖面与湍流度剖面根据 ESDU<sup>[8-9]</sup>的建议进行模拟。图 1(图中  $H$  为模型总高度)给出了试验值与理论值的拟合情况,可见二者吻合良好;同时图 1 还给出了中国荷载 A 类地貌下的风速剖面,可见试验地貌与 A 类地貌较为接近。湍流积分尺度根据 ESDU<sup>[10]</sup>建议的公式进行模拟。湍流积分尺度试验值按下式计算:

$$L_u = \bar{U}_z L_t, L_t = \int_0^{\tau_0} \rho_{uu}(\tau) d\tau. \quad (1)$$

式中:  $L_u$  为湍流积分长度,  $L_t$  为湍流积分时间尺度,  $\bar{U}_z$  为高度  $z$  处平均风速,  $\rho_{uu}(\tau)$  为脉动风速自相关系数,  $\tau$  为时差,  $\tau_0$  为自相关系数收敛至 0 时对应的时差。试验获得的  $z = 0.762 H$  高度处的湍流积分长度为 143.2 m(足尺), ESDU<sup>[10]</sup>理论值为 152.3 m,二者非常接近。目标脉动风速谱模拟采用 ESDU<sup>[10]</sup>建议的 von-Karman 谱:

$$\frac{f S_{uu}(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \hat{f}}{(1 + 70.8 \hat{f}^2)^{5/6}}, \hat{f} = \frac{f L_u}{\bar{U}_z}. \quad (2)$$

式中:  $f$  为频率,  $S_{uu}$  为脉动风速功率谱密度,  $\sigma_u$  为脉

动风速均方根。由图 2 可见,试验值与理论值吻合良好。

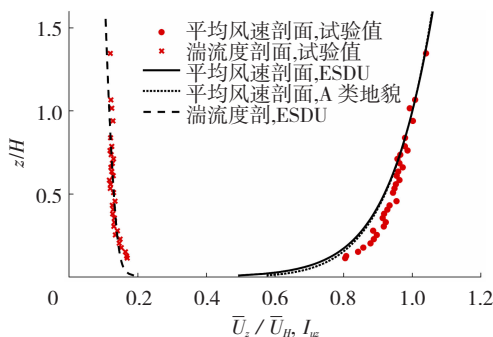


图 1 平均风速剖面与湍流度剖面

Fig. 1 Mean velocity profile and turbulence intensity profile

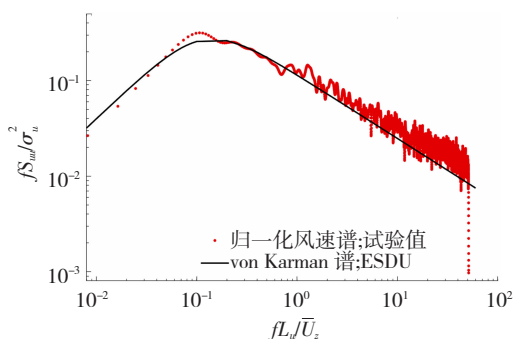


图 2  $z = 0.762 H$  高度处脉动风速谱

Fig. 2 Fluctuating velocity spectrum at  $z = 0.762 H$

### 1.2 模型测压试验

试验采用的缩尺模型为一矩形截面高层建筑刚性模型。模型高 0.5 m,宽 0.06 m,长 0.06~0.54 m,缩尺比为 1:200。试验模型共由 12 段组成,如图 3 所示,其中段 1~段 6 的深宽比为 0.5(按图示风向),段 7~段 12 的深宽比为 1,通过拼接组合及摆放角度调整可获得深宽比为 0.11~9 的共计 22 个不同深宽比的模型工况。模型沿高度方向总共布置了 7 个测点层,测点层高度分别为 0.1  $H$ 、0.3  $H$ 、0.5  $H$ 、0.65  $H$ 、0.8  $H$ 、0.9  $H$ 、0.98  $H$ ,各层布置方式相同。深宽比为 9 的模型工况及平面测点布置如图 3 所示,该深宽比工况测点总数共计 616 个,关于测压管道系统的详细信息可见文献[11]。对每个深宽比工况,进行了不同风向角下的测压试验,获得各测点的风压系数时程,时程采样时长相当于足尺 1 h 以上。风洞试验过程照片见图 4。本文针对正交风向情况进行研究。

### 1.3 数据处理

本文中风压系数采用建筑顶部高度  $H$  处的速度压力进行归一化:

$$C_p(t) = \frac{P(t) - P_\infty}{0.5 \rho \bar{U}_H^2}, \quad (3)$$

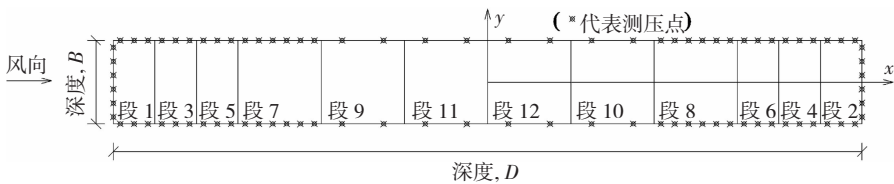


图 3 模型平面示意图与测压点布置

Fig. 3 Plan sketch of the model and layout of pressure taps

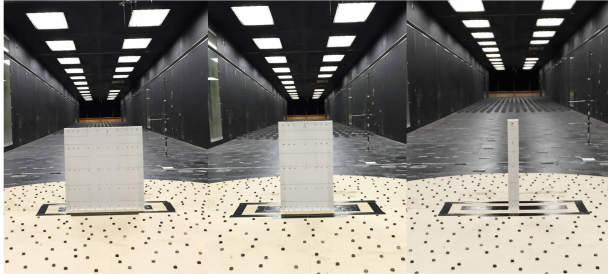


图 4 模型及风洞试验照片

Fig. 4 Photos of the model and wind tunnel tests

式中:  $P(t)$  为测压点总压时程,  $P_\infty$  为静压,  $\rho$  为空气密度,  $\bar{U}_H$  为建筑顶部高度处平均风速. 对测压点的风压系数时程数据沿建筑表面进行积分与面积平均, 获得建筑各表面的整体风压系数时程和基底阻力系数时程:

$$C_F(t) = \sum_{i=1}^N C_{pi}(t) \frac{A_i}{A}, \quad (4)$$

式中:  $C_{pi}$  为测点  $i$  的风压系数,  $A_i$  为测点  $i$  的控制面积,  $A$  为进行计算的建筑表面的面积, 在计算基底阻力系数时取迎风面面积.

本文中, 高层建筑各立面整体风压系数或基底阻力系数的气动导纳按下式计算<sup>[1]</sup>:

$$\chi^2(f) = \frac{\bar{U}_H^2 S_{CF}(f)}{4 \bar{C}_F^2 S_{uH}(f)}, \quad (5)$$

式中:  $\bar{C}_F$  为风荷载合力系数均值,  $S_{CF}(f)$  为脉动风荷载系数功率谱,  $S_{uH}(f)$  为建筑顶部高度处的脉动风速谱.

## 2 各立面脉动风压气动导纳

本文首先对不同深宽比建筑迎风面、背风面与

侧风面上的整体脉动风压系数的气动导纳进行了考察. 试验值与 Vickery<sup>[3]</sup> 模型比较见图 5~7. 此外, 图 5 中还给出了根据 Solari<sup>[5]</sup> 模型绘制的气动导纳曲线.

### 2.1 迎风面

迎风面上, 由图 5 可见, 由于低频阵风完全包围结构表面, 故整个表面的脉动风压可视为近乎完全相关, 气动导纳趋近于 1; 对于高频阵风, 整个迎风面上的脉动风压并非完全相关, 即不可能同步脉动, 因此面积平均后的风压脉动减弱, 气动导纳逐渐衰减至 0. 对于深宽比  $< 0.5$  的建筑, 气动导纳在高频区域显著降低, 与 Vickery 模型呈现一致规律, 但在数值上仍普遍大于 Vickery 模型值. 对于深宽比  $> 0.5$  的建筑, 气动导纳在高频区的衰减速度变缓, Vickery 模型和 Solari 模型之值较试验值显著偏小.

值得注意的是, 图 5 中的 Solari 模型为基于脉动风速相关性而推导获得的气动导纳项, 在推导过程中仅考虑了脉动风压在整个面积上由于非同时作用而引起的总体脉动风荷载的折减<sup>[12]</sup>, 即该气动导纳相当于考虑上述作用而在准定常假定中引入的一个频域内的折减系数; 但忽略了建筑本身产生的非定常流的作用, 势必与实际情况存在一定偏差. 对于迎风面, 准定常假定基本成立, 但是在迎风面侧边及顶边附近, 建筑物受到的流动分离作用显著, 此时 Solari 模型与实际气动导纳间存在一定偏差. 由图 5 可见, 由于上述的建筑本身产生的非定常流(即位于高频区域内的小尺度湍流)的影响, 试验值总体上较未考虑该影响的 Solari 模型明显偏大, 且在高频区域气动导纳的衰减速度明显减弱.

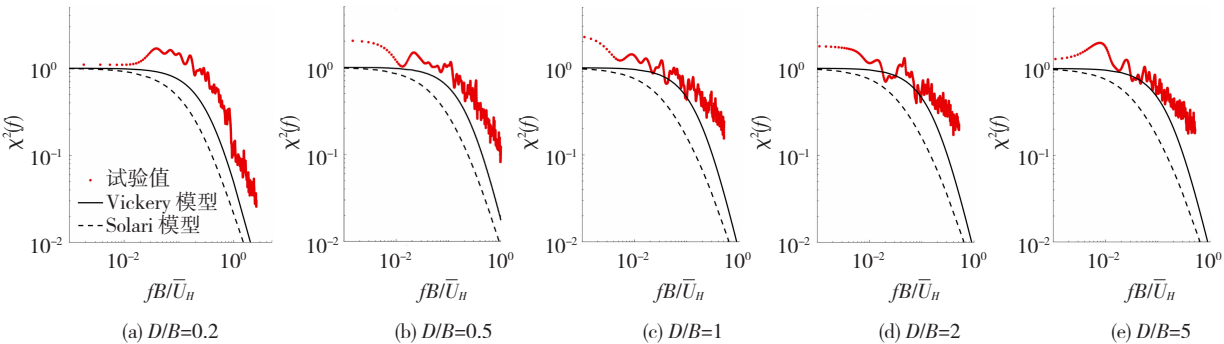


图 5 建筑迎风面脉动风压气动导纳及与 Vickery 模型和 Solari 模型比较

Fig. 5 Aerodynamic admittances for fluctuating pressures on the windward wall and comparisons with Vickery's and Solari's models

## 2.2 背风面

背风面与侧风面上的脉动风压主要由建筑本身引起的非定常流产生,此时准定常假定不再成立.尽管式(5)的推导过程基于准定常假定,但仅从数学关系上讲,将图 6、7 中的气动导纳试验值代入式(5)仍可获得正确的脉动风压谱.此时,气动导纳可视为考虑建筑本身产生的非定常流的影响而在准定常假定中引入的一个频域内的修正系数.

由图 6 可见,对于深宽比很小的建筑,气动导纳随频率增大而显著降低,这是由于建筑尾体很短,背风面上的气动导纳尚未完全体现出下游尾流区中由分离流夹卷与旋涡脱落作用形成的小尺度湍流.随深宽比增大,气动导纳在高频侧出现由旋涡脱落引起的明显尖峰,但其所含能量较侧风面情况(图 7)要小得多,且对应的折算频率也相对要高.气动导纳在尖峰出现后的高频区域仍显著大于 Vickery 模型

型,说明建筑本身产生的小尺度湍流作用明显.对于深宽比为 1.5~2.5 的建筑,高频区存在频带较宽的峰,这是由分离流产生的旋涡脱落以及部分再附的流动于尾缘处再分离形成的涡流共同引起的.对于深宽比为 5 的建筑,将出现分离流完全再附现象,再附流于尾缘处再分离作用较弱,但在尾流中产生了大量小尺度的湍流,因此气动导纳高频区的峰逐渐消失,但仍保持着较大的值.总之,背风面上的气动导纳与 Vickery 模型有明显的不同,且在高频区域通常显著大于 Vickery 模型,可见流动分离、再附和旋涡脱落等建筑本身产生的非定常流对气动导纳的影响非常显著.需要说明的是,Vickery 模型为基于准定常假定获得的针对脉动阻力的气动导纳,故不适用于建筑本身产生的非定常流影响明显的区域(如背风面与侧风面),此处仅用来进行数值上的比较.

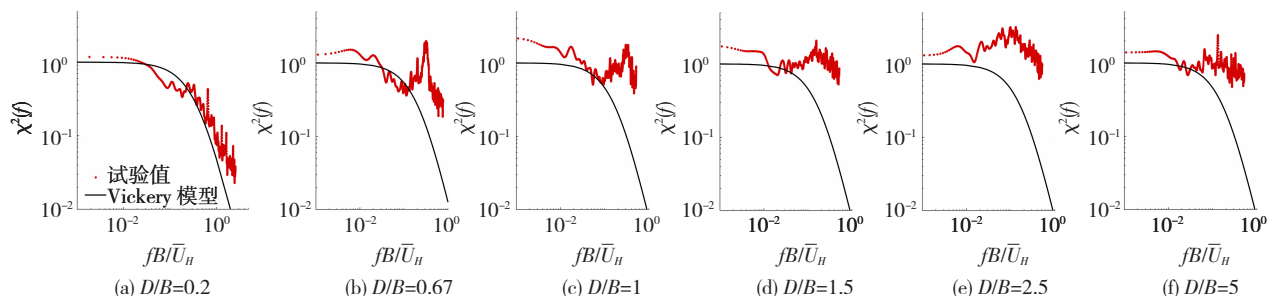


图 6 建筑背风面脉动风压气动导纳及与 Vickery 模型的比较

Fig. 6 Aerodynamic admittances for fluctuating pressures on the leeward wall and comparison with Vickery's model

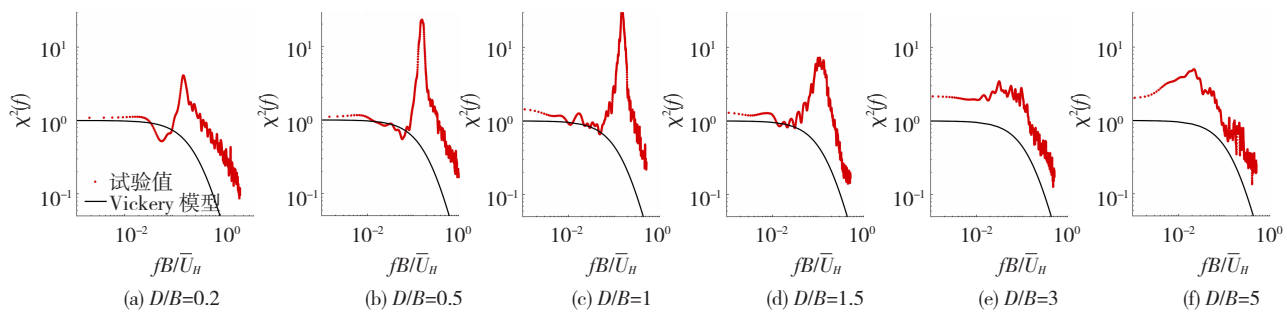


图 7 建筑侧风面脉动风压气动导纳及与 Vickery 模型的比较

Fig. 7 Aerodynamic admittances for fluctuating pressures on the side wall and comparison with Vickery's model

## 2.3 侧风面

与背风面类似,侧风面上的脉动风压同样主要由分离或分离再附流产生.对于深宽比 $\geq 1$ 的建筑,平均流动完全分离,气动导纳在折算频率 $fB/\bar{U}_H$ 为斯托罗哈数附近存在一个明显的由旋涡脱落引起的尖峰,该尖峰在深宽比为 0.5~1 时达到最高.随深宽比增加,流动开始出现再附,尖峰峰值降低、带宽变宽,其对应的折算频率也明显降低,这与文献[13]报道的规律类似.在平均流动再附后,峰逐渐消失,但在折算频率大于斯托罗哈数的高频位置处,出现一个较低的峰,可能由再附后尾缘处的次级旋

涡脱落引起.对于深宽比 $> 2.5$ 的情况,气动导纳整体显著增大,低频区域的气动导纳也明显大于 1.这与前述的低频阵风下整个表面脉动风压完全相关并不冲突.在当前的来流状态下,由于平均流动再附,侧风面远离前缘处的风压绝对值逐渐减小,使得整个侧风面上的总体风荷载相对较小.深宽比建筑要小.由式(5)可见,位于分母上的平均风荷载数值减小将使气动导纳值整体增大.但对于低频阵风,即湍流积分尺度很大的来流风场,平均流动将在较大深宽比建筑的侧风面更晚再附<sup>[14]</sup>,同时使整个侧风面上的总体平均风荷载数值增大,若按此时状态计算,

气动导纳无疑较当前来流状态更趋近于 1。

### 3 基底阻力气动导纳及其拟合

由上节可知, Vickery 模型通常低估了迎风面和背风面上脉动风压的气动导纳。对于背风面与侧风面这种受流动分离、再附或旋涡脱落作用影响明显的区域,脉动风荷载谱难以直接从脉动风速谱通过简单的转化获得。根据文献[4],尽管迎风面与背风面上的单点脉动风压谱均与来流脉动风速谱的形式有所偏差,但是对于脉动阻力,采用脉动风速谱的形式仍能较好地进行估计。

#### 3.1 基底阻力气动导纳

图 8 给出了基底阻力系数的气动导纳与 Vickery 模型和 Solari 模型的比较。由图 8 可见, Vickery 模型和 Solari 模型通常低估气动导纳值。对于深宽比  $<0.5$  的建筑,试验值与 Vickery 模型较为接近,但总体上仍略大于 Vickery 模型之值。随深宽比增大,气动导纳在高频区域的衰减速度逐渐变缓,整体取值明显增大,这是由迎风面与背风面上的脉动风压共同影响导致的。由于建筑本身产生的非定

常流的影响,试验值通常较仅考虑脉动风速相关性的 Solari 模型明显偏大。对于深宽比为  $0.5 \sim 1$  的建筑,气动导纳在折算频率  $fB/\bar{U}_H$  约为  $0.3$  处出现一个较低的尖峰,由流动分离及旋涡脱落引起,这主要是受背风面脉动风压影响导致的。但与图 6、7 进行比较可见,其所含能量较背风面与侧风面气动导纳上出现的尖峰要低得多。此外,对于深宽比为  $0.5 \sim 1$  的情况,图 5、8 中均出现了低频处气动导纳明显大于 1 的现象,这一现象也存在于文献[6-7]的试验结果中。这可能是由于这些深宽比情况下建筑物受到的分离作用更为强烈导致的(见图 7)。对于点状物体,物体本身不会对流动状态产生影响,气动导纳在低频处为 1;但是对于实际建筑,即便在低频阵风下,建筑本身可能也会对其附近的流动状态产生一定影响,从而影响建筑表面脉动风压气动导纳低频区的值。对于迎风面,其侧边及顶边位置处受流动分离作用影响显著,因此较为强烈的分离作用可能也会对迎风面气动导纳产生一定影响。此外,由于不同尺度涡流之间能量的互相传递,强烈的分离及旋涡脱落作用可能对低频阵风所含能量也有一定的增强作用。

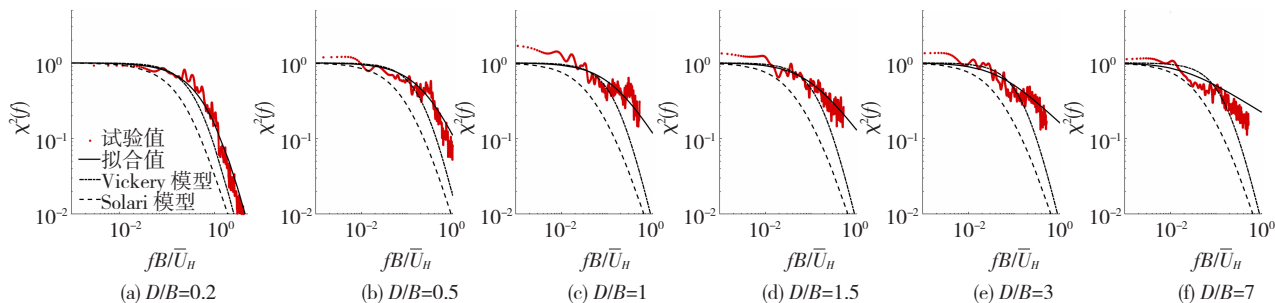


图 8 建筑基底阻力气动导纳及其拟合曲线,及与 Vickery 模型和 Solari 模型的比较

Fig. 8 Aerodynamic admittances for base drag and their fitting curves along with comparisons with Vickery's and Solari's models

#### 3.2 气动导纳拟合公式

根据试验结果,基底阻力气动导纳可用幂函数形式进行表达:

$$\chi^2(f) = \frac{1}{\left(1 + b \frac{fB}{\bar{U}_H}\right)^a}, \quad (6)$$

式中  $a$ 、 $b$  为与深宽比相关的参数。采用最小二乘法进行非线性拟合,获得了各深宽比工况下的参数,如图 9 所示。再对上述参数进行拟合,可获得参数  $a$ 、 $b$  的表达式:

$$a = \left(\frac{D}{B}\right)^{-0.5}, \quad b = 7.5 \left(\frac{D}{B}\right). \quad (7)$$

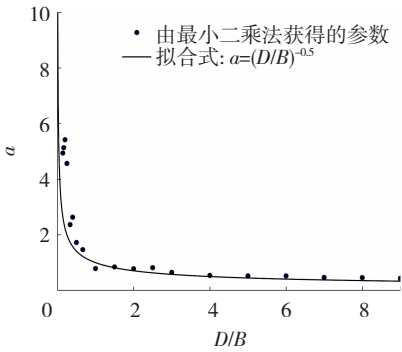
由式(6)拟合得到的气动导纳结果见图 8,可见该表达式较 Vickery 模型和 Solari 模型能更好地对不同深宽比建筑的基底阻力气动导纳进行描述,总

体拟合效果良好。由图 8、10 可见,对于深宽比较小、旋涡脱落作用较为明显的工况,由于幂函数本身的局限性,拟合式难以描述斯托罗哈数附近的尖峰。对于深宽比为 1 的建筑,式(6)没有考虑低频区域气动导纳大于 1 的情况,但由于该部分位于很低的频率范围内,在进行风致计算时几乎可以忽略,这在图 10 给出的线性坐标系下可以更为清楚地观察到。此外,对于深宽比很大的建筑,如图 9(b)与图 8(f)所示,由于参数拟合的偏差,式(6)略微保守估计了高频区域的气动导纳值。但总而言之,对于风工程计算关注的频率范围,本文给出的表达式通常能进行较好的拟合。

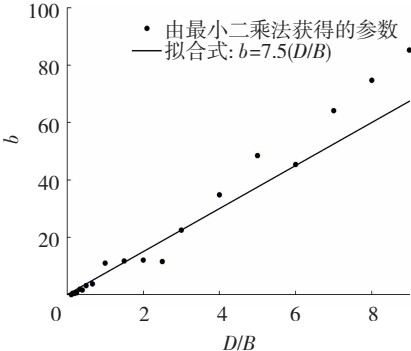
#### 3.3 拟合式的准确性及应用

将式(6)获得的气动导纳与式(2)给出的 Von-Karman 谱代入式(5),可获得建筑基底的脉动阻力系数谱:

$$S_{CF} = \frac{4 \bar{C}_F^2}{\bar{U}_H^2} \cdot \chi^2(f) \cdot S_{uH}(f) = 16 \cdot \bar{C}_F^2 \cdot \chi^2(f) \cdot \frac{I_{uH}^2 L_{uH}}{[1 + 70.8(fL_{uH}/\bar{U}_H)^2]^{5/6}}. \tag{8}$$



(a) 参数  $a$



(b) 参数  $b$

图 9 由最小二乘法获得的参数  $a$ 、 $b$  及其拟合曲线

Fig. 9 Parameters  $a$  and  $b$  obtained from least squares and their fitting curves

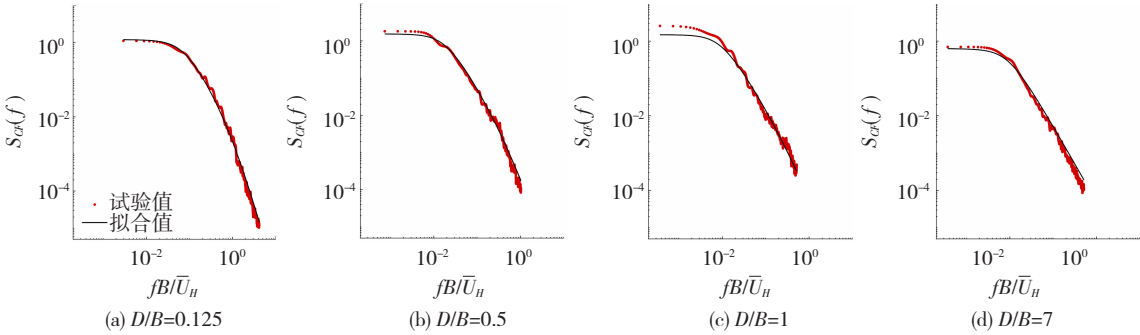


图 11 建筑基底阻力谱拟合结果

Fig. 11 Base drag spectra from fitted aerodynamic admittances

此外,通过拟合式还可对建筑基底阻力系数的均方根值和极大值进行估计. 对式(8)进行积分,可获得阻力系数均方根值:

$$\sigma_{CF} = \int_0^\infty S_{CF}(F) \mathrm{d}f. \tag{9}$$

对于刚性结构,不考虑脉动风荷载的共振分量,结构基底顺风向的等效静力风荷载  $F_E$  可按下式进行估计:

$$F_E = \hat{C}_F \cdot 0.5\rho \bar{U}_H^2, \quad \hat{C}_F = \bar{C}_F + g\sigma_{CF}. \tag{10}$$

由于脉动阻力系数近似服从高斯分布,上式中峰值因子  $g$  可取为 3.

为验证拟合式的准确性,以下对由拟合式计算

式中:建筑顶部高度处的平均风速  $\bar{U}_H$ 、湍流强度  $I_{uH}$ 、湍流积分尺度  $L_{uH}$  和平均阻力系数  $\bar{C}_F$  均可根据相关标准或规范获得. 图 11 给出了根据式(8)计算获得的基底阻力系数谱,其中风场参数根据 ESDU<sup>[8-10]</sup> 获得,平均阻力系数采用试验值. 由图 11 可见,拟合值与试验值差距很小,式(8)能较为准确地估计建筑基底的脉动阻力谱. 在具有阻力谱及结构质量、刚度等信息的情况下,可按照 Davenport<sup>[2]</sup> 给出的方法计算结构风致响应.

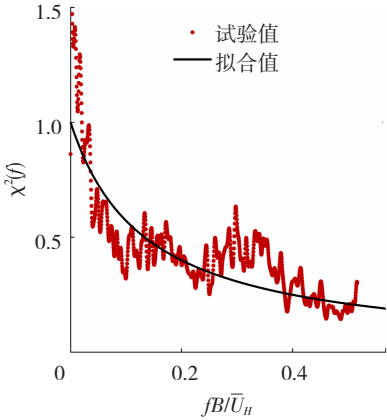


图 10 线性坐标系下  $D/B=1$  的建筑基底阻力气动导纳

Fig. 10 Aerodynamic admittance for base drag of building with  $D/B=1$  under linear coordinates

得到的建筑基底阻力系数均方根值作进一步的考察. 图 12 给出了由式(9)计算得到的均方根值随深宽比的变化曲线. 由图 12 可见,对于深宽比较小和较大的情况,拟合值与试验值有较好的吻合;但当深宽比介于 0.67~1 时,二者有一定的偏差,这可能是由于拟合式未能描述旋涡脱落引起的较低尖峰导致的. 从总体上看,拟合值能较为准确地对基底阻力系数均方根值进行估计.

最后需要说明的是,尽管本文未考察建筑高宽比对气动导纳的影响,但由文献[1]可知,相较于深宽比对高层建筑绕流特性影响的显著性,高宽比的影响通常体现在对建筑顶部绕流的影响上,其总体

影响相对较小.此外,本文与文献[6-7]中的试验结果均未明显体现出顶部绕流的影响.当然,对于低矮房屋等高宽比很小的建筑,顶部绕流的影响不可忽略,本文给出的气动导纳拟合式势必会存在一定误差.但是,对于常见的矩形高层建筑,本文给出的气动导纳拟合公式有较好的适用性.

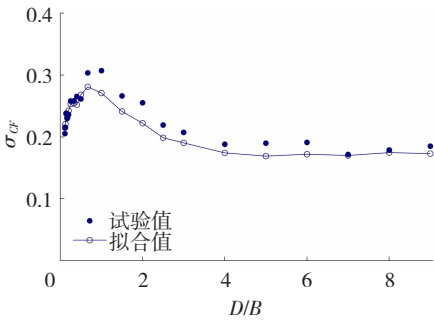


图 12 由拟合气动导纳获得的基底阻力系数均方根值

Fig. 12 RMS base drag coefficients calculated from the fitted aerodynamic admittances

4 结 论

本文基于风洞测压试验,研究了正交风向作用下深宽比为 0.11~9 的矩形高层建筑各立面和基底脉动风荷载的气动导纳,与现有文献中的模型进行了比较;通过拟合分析获得了适用于不同深宽比建筑基底阻力的气动导纳闭合表达式.由以上研究可获得如下结论:

1)气动导纳在低频范围趋近于 1,随阵风频率增大而逐渐衰减至 0.对于迎风面上的脉动风压,Vickery 模型和 Solari 模型均在一定程度上低估了气动导纳值.随深宽比增大,气动导纳在高频区的衰减速度变缓,上述模型较试验值显著偏小.

2)由于流动分离、再附和旋涡脱落等建筑本身产生的非定常流的影响,基于准定常假定的 Vickery 模型对建筑背风面和侧风面上脉动风压的气动导纳不具较好的适用性.对于深宽比较小的建筑,因旋涡脱落效应,侧风面的气动导纳在高频侧存在一个明显尖峰;随深宽比增大到 0.5~1 时,该尖峰达到最高,背风面的气动导纳在高频区的尖峰也变得明显;随深宽比继续增大,流动开始再附,尖峰峰值降低,带宽变宽,侧风面的峰对应的折算频率明显减小;对于深宽比较大的建筑,平均分离流在侧面再附,侧风面和背风面气动导纳的峰逐渐消失,但由于流动再附及于尾缘处的再分离作用产生了大量的小尺度湍流,侧风面与背风面的气动导纳在高频区的值仍然较大.

3)当建筑深宽比 < 0.5 时,建筑基底阻力气动导纳与 Vickery 模型较为接近.但随深宽比增大,气

动导纳在高频区的衰减速度明显变缓,整体取值明显大于 Vickery 模型和 Solari 模型,这是由迎风面与背风面上的脉动风压共同影响导致的.对于深宽比为 0.5~1 的建筑,基底阻力气动导纳在高频侧存在一由旋涡脱落引起的较低尖峰,但其所含能量较背风面与侧风面明显要小.

4)本文获得的幂函数形式的基底阻力气动导纳拟合式可以较准确地预测不同深宽比矩形高层建筑的基底阻力气动导纳.

参考文献

[1] HOLMES J D. Wind loading of structures [M]. London: Spon Press, 2015: 86

[2] DAVENPORT A G. Gust loading factors [J]. Journal of the Structural Division, 1967, 93(3): 11

[3] VICKERY B J. Load fluctuations in turbulent flow [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1968, 94(1): 31

[4] KAREEM A. Synthesis of fluctuating along wind loads on buildings [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1986, 112(1): 121

[5] SOLARI G. Gust buffeting. I: Peak wind velocity and equivalent pressure [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(2): 365

[6] ZHOU Y, KAREEM A. On the aerodynamic admittance functions of tall buildings [R]. Notre Dame: NatHaz Modeling Laboratory, 2002

[7] 张建国, 顾明. 高层建筑顺风向荷载气动导纳研究 [J]. 建筑结构学报, 2017, 38(10): 102

ZHANG Jianguo, GU Ming. Aerodynamic admittance of along-wind loads on tall buildings [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(10): 102

[8] Strong winds in the atmosphere boundary layer, Part 1: Mean-hourly wind speeds: ESDU - 82026 [S]. London, U. K.: Engineering Sciences Data Unit, 1982

[9] Characteristics of atmosphere turbulence near the ground, Part II: Single point data for strong winds (neutral atmosphere): ESDU - 85020 [S]. London, U. K.: Engineering Sciences Data Unit, 1985

[10] Characteristics of atmosphere turbulence near the ground, Part II: Single point data for strong winds (neutral atmosphere): ESDU - 74031 [S]. London, U. K.: Engineering Sciences Data Unit, 1974

[11] HO T C E, SURRY D, MORRISH D, et al. The UWOC contribution to the NIST aerodynamic database for wind loads on low buildings: Part 1. Archiving format and basic aerodynamic data [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93(1): 1

[12] SOLARI G, KAREEM A. On the formulation of ASCE 7 - 95 gust effect factor [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 77: 673

[13] LIANG S, LIU S, LI Q S, et al. Mathematical model of acrosswind dynamic loads on rectangular tall buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12/13/14/15): 1757

[14] LI Q S, MELBOURNE W H. The effect of large-scale turbulence on pressure fluctuations in separated and reattaching flows [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83(1/2/3): 159

(编辑 赵丽莹)