

# 高层建筑风洞试验阻塞效应修正的尾流面积法

黄 剑, 顾 明

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 基于合理的假定和流场模式, 利用动量守恒定理和连续性方程, 以尾流面积比作为主要参数, 推导了高层建筑风洞试验阻塞效应修正方法——尾流面积法, 并通过试验结果对该修正方法进行验证. 最后, 将尾流面积法与 Maskell 方法的修正效果进行对比. 结果表明: 试验结果较好地符合尾流面积法的基本假定; 采用尾流面积法修正后的模型平均风压和平均阻力系数较为满意; 在小阻塞比(4.1%和6.1%)时, 尾流面积法与 Maskell 方法的修正效果接近, 但在大阻塞比(8.4%和10.1%)时, 尾流面积法修正效果优于 Maskell 方法.

**关键词:** 高层建筑; 风洞试验; 阻塞效应; 修正方法; 动量定理

**中图分类号:** TU317.1

**文献标志码:** A

## Wake Area Method for Blockage Correction of Tall Building Models in Wind Tunnel

HUANG Jian, GU Ming

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on reasonable assumptions and flow patterns, a blockage correction method for tall buildings was derived using the momentum principle and the continuity equation. The new method called wake area method (WAM) took the wake area ratio as the key parameter. Then, WAM was validated by wind tunnel test results. Finally, WAM was compared with Maskell's method (MM). The results show that test data conform to the basic assumptions of WAM very well. Corrected mean pressure and mean drag coefficients by WAM are basically satisfactory. Corrected results by WAM and MM agree well at low blockage ratios (4.1% and 6.1%), while WAM is better than MM at high blockage ratios (8.4% and 10.1%).

**Key words:** tall building; wind tunnel test; blockage effect;

correction method; momentum principle

风洞试验是研究建筑结构风荷载最为重要的手段之一. 将缩尺模型安装在风洞地面, 并模拟实际来流, 为实际建筑的风荷载设计提供依据. 在实壁风洞中, 阻塞效应不可避免, 且由于建筑外形多为伴随有较宽阔尾流的钝体, 阻塞效应更加显著. 尤其当模型尺寸过大或风洞试验段截面过小时, 将产生较大的阻塞效应. 此时, 流场产生较大畸变, 试验数据将失真. 修正风洞试验阻塞效应的方法主要有试验结果外推法和公式修正方法. 试验结果外推法通常在同一风洞中采用一组几何相似但尺寸不同的模型, 或在不同尺寸风洞中采用同一模型进行试验. 外推试验数据获得阻塞比为零时的试验结果, 即为“真值”. 将某个阻塞比的结果与“真值”对比获得修正关系. 由于该方法工作量较大, 实际操作不便, 所以一般采用公式修正方法. 公式修正方法通常以流体力学理论结合试验结果或一定经验关系推导, 实际应用方便.

19世纪60年代, Maskell<sup>[1]</sup>研究机翼在失速情况下的气动力特性和流场特性时发现, 伴随有大分离尾流的物体的阻塞效应比伴随有再附着流的物体的阻塞效应大得多, 他首次利用动量守恒定理并结合试验数据, 提出了钝体阻塞效应的半经验修正方法. 该方法公式简单, 适用于垂直于来流平板和失速机翼的平均阻力系数修正. 此后, 研究人员将 Maskell 方法及其改进方法广泛应用于钝体阻塞效应的修正. Niemann<sup>[2]</sup>发现, Maskell 方法适用于边界层高度较小时正交于来流的风洞地面上的物体. Takeda 等<sup>[3]</sup>试验验证了 Maskell 方法适用于平板、矩形截面、多孔体、格构式和六边形断面模型.

收稿日期: 2015-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(90715040, 91215302)

第一作者: 黄 剑(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为超高层建筑结构抗风. E-mail: huangjiannt@126.com

通讯作者: 顾 明(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构抗风、数值风洞以及结构振动控制.

E-mail: minggu@tongji.edu.cn

Vickery<sup>[4]</sup>指出,Maskell方法不仅适用于方柱的平均阻力系数修正,还适用于脉动升力系数和斯特劳哈尔数的修正。为扩大Maskell方法的适用范围,众多学者<sup>[5-8]</sup>对其进行了修正。他们多采用高阶多项式来弥补Maskell方法的不足,并通过试验结果的拟合获得相应参数,但在实际使用时仍然受限。Awbi<sup>[9]</sup>研究了低湍流均匀流中二维方柱的阻塞效应,指出模型平均压力的阻塞效应沿流线方向并不一致,因此不能看作是有效动压的增大。他考虑了方柱厚宽比的影响,对Maskell方法进行修正,并提出了平均阻力和斯特劳哈尔数的修正公式。还有一些学者<sup>[10-16]</sup>分别提出了阻塞效应修正方法。

上述修正方法的共同特点在于,修正公式中包含了以试验结果为依据的经验系数或拟合参数。这将大大限制修正公式的适用性。本文从阻塞效应机理出发,基于合理的假定和流场模式,推导了高层建筑风洞试验阻塞效应修正方法——尾流面积法,并利用试验结果对该方法进行验证。

## 1 尾流面积法基本原理

### 1.1 流场模式

图1为有边界二维方柱流场示意图。图中, $B'$ 为风洞宽度; $S$ 为建筑来流方向投影宽度。根据Kirchhoff方法<sup>[17]</sup>,在均匀流中的二维平板试验中,平板背风面各处的平均风压系数 $\bar{C}_{pb}$ 均匀分布,且背压参数 $k$ 与 $\bar{C}_{pb}$ 有如下关系:

$$k = \sqrt{1 - \bar{C}_{pb}} \quad (1)$$

参考Roshko<sup>[17]</sup>对Kirchhoff方法的改进,流线按如下模式发展:在距模型较远的上游 $a$ 点处来流风速为 $U$ ;  $b$ 点为滞点,沿 $ab$ 风速由 $U$ 逐渐减小为零;  $c$ 点为分离点,沿 $bc$ 风速逐渐增大,分离点风速 $U' = kU$ ;沿 $cd$ 来流分离并发展,在此区间保持风速大小不变;在 $d$ 点尾流宽度达到最大值 $B$ ;从 $d$ 点到距模型较远的下游 $e$ 点,尾流宽度不变,由于能量耗

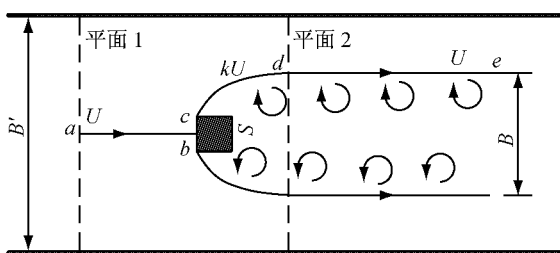


图1 二维方柱流场示意图

Fig.1 Flow schematic around two-dimensional square cylinder

散风速由 $U'$ 减小到 $U$ 。

均匀流中二维方柱尾流中线平均风速和总湍动能的测量结果<sup>[18]</sup>分别见图2和3。图中, $U_x$ 为流场中顺风向平均风速。由图2可见,方柱后部的中线上大约1倍边长范围内平均风速与来流风速相反,随着与方柱背风面距离的增加,平均风速也逐渐增大。由此可见,在距离方柱背风面不远的尾流中,存在尾流内部平均风速为零的位置。由图3可见,随着与背风面距离的增加,方柱后部中线上的湍动能先增大后减小。湍动能增加是由于旋涡的生成,湍动能减小是由于旋涡的耗散。湍动能最大位置约为方柱后部1.2倍边长的位置,在该位置处旋涡最为剧烈,尾流宽度也相应达到最大。对比图2可知,此处的顺风向平均风速约为零。

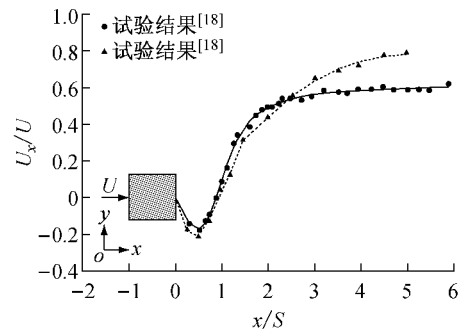


图2 二维方柱尾流顺风向平均风速<sup>[18]</sup>

Fig.2 Mean velocity along centerline behind two-dimensional square cylinder

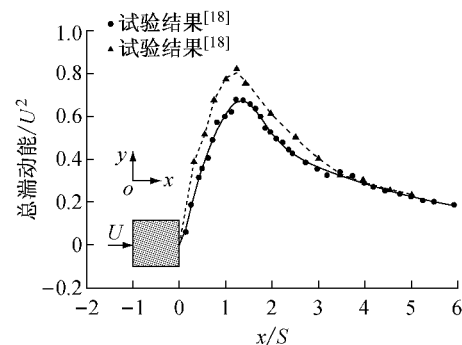


图3 二维方柱尾流总湍动能<sup>[18]</sup>

Fig.3 Total fluctuation energy along centerline behind two-dimensional square cylinder

### 1.2 基本假定

本文研究单体矩形高层建筑均匀流场中的阻塞效应,为便于分析、建立理论公式,按照图1流场示意图并参考Maskell方法<sup>[1]</sup>,认为满足以下基本假定:①模型表面压力分布规律不变;②阻塞效应等效为自由流速的增大;③分离区的背风面压力系数近似为常数,且与尾流边界附近的压力系数相等;④

在距模型一定距离的下游位置,尾流宽度达到最大,尾流内部顺风向平均风速为零,尾流外部顺风向平均风速达到最大,横风向和竖直方向平均风速可忽略.在该处以外的下游,流场趋于对称.

### 1.3 控制方程

根据图1所示的二维流场并参考 Maskell 方法<sup>[1]</sup>,将流场扩展到三维.在三维问题中, $B'$ 为风洞面积, $S$ 为建筑来流方向投影面积, $B$ 为广义的尾流面积.假定下游尾流面积最大平面2处尾流对称,且横风向和垂直方向平均风速较小,可忽略.根据平面1和2的动量守恒定理得到

$$\iint_{B'} (p_1 + \rho u_1^2) dydz = D + p_b B + \iint_{B-B'} (p_2 + \rho u_2^2) dydz \quad (2)$$

式中: $D$ 为建筑平均阻力; $p_b$ 为背风面平均风压; $u_1$ 、 $u_2$ 分别为平面1和2处的顺风向平均风速; $p_1$ 、 $p_2$ 分别为平面1和2处的平均静压; $\rho$ 为空气密度.

根据 Bernoulli 方程

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho u_2^2 \quad (3)$$

仅考虑了顺风向流速,忽略了横风向和垂直方向平均风速.从而,式(2)可变为

$$D = \frac{1}{2} \rho k^2 u_1^2 B + \iint_{B'} \frac{1}{2} \rho u_1^2 dydz - \iint_{B-B'} \frac{1}{2} \rho u_2^2 dydz \quad (4)$$

由于  $p_2 = p_b$  及  $u_2 = k u_1$ ,式(3)可变为

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 = p_b + \frac{1}{2} \rho k^2 u_1^2 \quad (5)$$

根据图2和3的分析,可假定:在尾流宽度最大的平面2,尾流内部的平均风速为零.此时,根据连续性方程,得到平面1和2的平均流速有如下关系:

$$u_1 B' = u_2 (B' - B) \quad (6)$$

将式(5)和(6)代入式(4),并进行整理,得到平均阻力系数

$$\bar{C}_D = m \left[ k^2 - \frac{1}{1 - m \frac{S}{B'}} \right] \quad (7)$$

式中: $m = B/S$ 为尾流面积比; $S/B'$ 即为阻塞比 $R$ .

### 1.4 修正公式

模型气动力特性、旋涡脱落频率与尾流宽度  $B$  密切相关<sup>[17,19]</sup>.所以,可将尾流宽度  $B$  作为评判阻塞效应的指标.众多试验研究表明<sup>[3,9,11,16,20-23]</sup>,建筑迎风面平均风压受阻塞效应的影响很小,而侧面、背风面和顶面平均风压受阻塞效应影响很大.若将阻塞效应的本质归因于风洞壁面对钝体尾流的约束引

起的动压增大,则平均风压系数的阻塞效应可用下式表示:

$$\frac{\bar{C}_{ps}}{\bar{C}_p} = \frac{q}{q_c} = \frac{u_1^2}{u_2^2} = (1 - mR)^2 \quad (8)$$

式中:下标  $c$  表示修正后的量; $\bar{C}_p$  为平均风压系数; $q$  为试验参考动压.式(8)即称为尾流面积法.该方法物理意义明确,认为影响建筑阻塞效应的主导因素实际上是尾流宽度与风洞截面的比值.

## 2 试验验证

### 2.1 风洞试验概况

试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 TJ-2 大气边界层风洞中完成.试验过程中,采用相同的均匀风场,来流平均风速为  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,湍流度约为 1%.由于风洞边界层的影响,在 0.3 m 高度以下,平均风速和湍流度的均匀性较差.试验模型采用同一矩形高层建筑作为原型,模型阻塞比分别为 4.1%、6.1%、8.4% 和 10.1%.模型概况、测压点布置、基本坐标定义等信息可参见文献[23].本文仅涉及在  $0^\circ$  风向角的试验结果.

### 2.2 试验结果

文献[24]给出了模型各面所有测点平均风压系数,主要有以下规律:对于迎风面,由于边界层的影响,在较低位置,阻塞比为 4.1% 的平均风压系数低于其他模型;除迎风面靠近边缘处平均风压系数随阻塞比增加有所降低以外,迎风面其他位置的平均风压系数受阻塞比影响较小,可忽略阻塞效应;对于侧面、背风面和顶面,随阻塞比增加风压明显降低;阻塞效应没有改变各表面平均风压的分布规律.

图4为阻塞效应下模型 1/3 高度和 2/3 高度处测点层的平均风压系数.由图可见,迎风面(A面)平均风压系数的阻塞效应可忽略.侧面(B面和D面)和背风面(C面)平均风压系数随阻塞比增大明显降低,但各层平均风压分布规律没有明显变化.

文献[25]给出了模型各测点层平均阻力系数.在不同阻塞比情况下,平均阻力系数沿高度的分布规律相同.各模型靠近底部和顶部位置的层阻力系数较小,在模型中部位置阻力系数随高度增加而增大.在相同高度处的层平均阻力系数随阻塞比增加明显增大.

由于模型平均风压分布规律基本保持不变,因此满足基本假定①和②.模型背风面各高度处的平均风压系数分布如图5所示.图中, $y$ 为测点距背风面中线的距离; $b$ 为建筑背风面宽度; $z$ 为测点层所

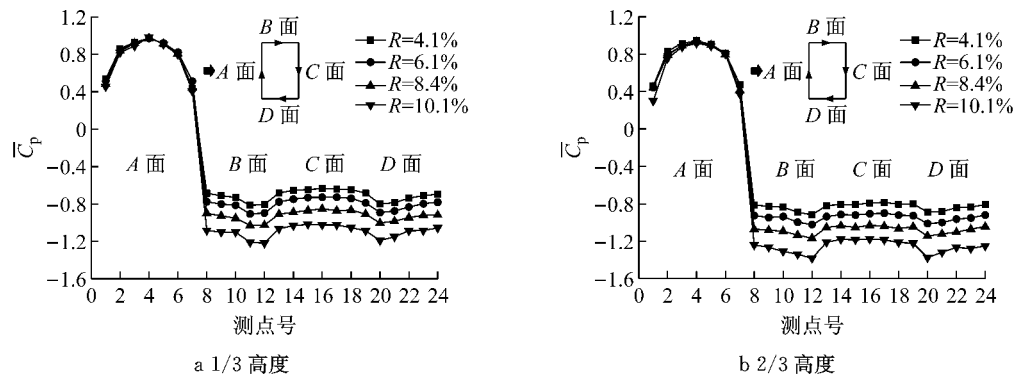


图4 阻塞效应下模型测点层平均风压系数

Fig.4 Blockage effect on mean pressure coefficient at different heights

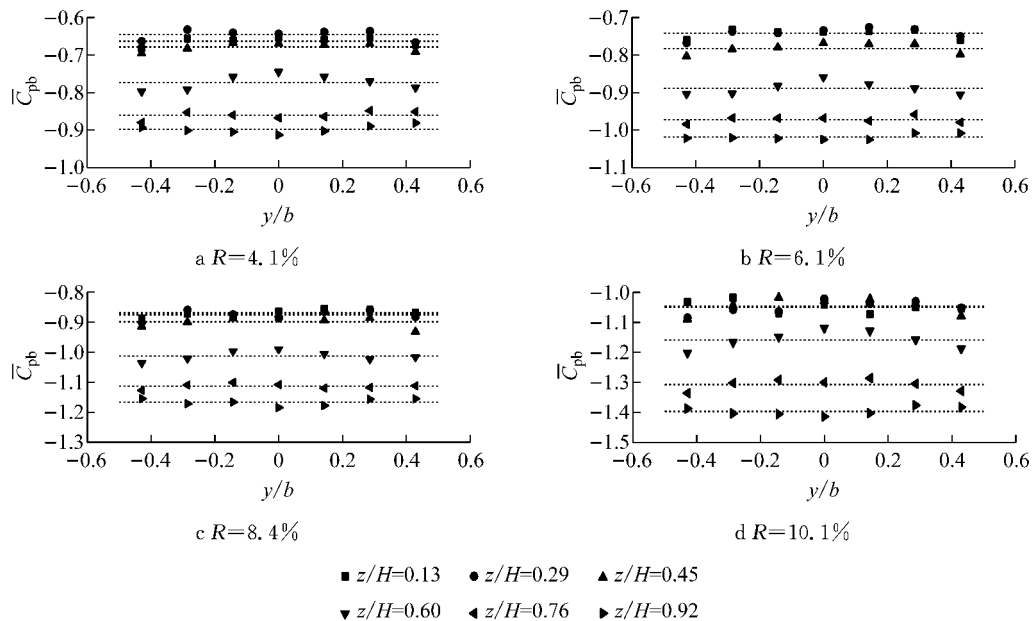


图5 模型背风面平均风压系数分布

Fig.5 Distribution of mean pressure coefficient on leeward surface

在高度; $H$ 为模型高度.由图可见,对于不同阻塞比的模型,虽然在模型不同高度处的背风面平均风压系数数值不同,但在模型同一高度处的背风面平均风压系数接近于均匀分布,所以仍然符合基本假定③.参考上文的流场模式,且由于本试验模型和风向角均对称,所以在足够远的下游处尾流必定趋于轴对称,因此认为满足基本假定④.

### 2.3 试验结果的修正

表1中列出了各阻塞比的尾流面积比 $m$ 的计算结果.当阻塞比为4.1%、6.1%和8.4%时, $m$ 值相同为2.29.当阻塞比为10.1%时, $m$ 值降低为2.07.主要原因是,当建筑处于无边界流场时,尾流没有任何约束,此时 $m$ 值最大.当建筑处于约束流场时,尾流受到壁面的约束, $m$ 将降低,此时的阻塞效应也越显著.当阻塞比为4.1%、6.1%和8.4%时,建筑尾流受风洞壁面约束的程度相同,尾流参数相同,所以

$m$ 值相同;当阻塞比增大到10.1%时,尾流宽度较大,风洞壁面对尾流约束较强.表1除了给出尾流面积比 $m$ 外,还给出了修正后的来流动压与实测来流动压的比值( $q_c/q$ ),以及修正后的背风面整体平均风压系数 $\bar{C}_{pbc}$ 和基底平均阻力系数 $\bar{C}_{Dc}$ .在阻塞比较大(10.1%)时,修正效果略显不足.

表1 尾流面积法修正参数值

Tab.1 Parameters of wake area method

$R/\%$	$m$	$q_c/q$	$\bar{C}_{pbc}$	$\bar{C}_{Dc}$
4.1	2.29	1.22	-0.61	1.33
6.1	2.29	1.35	-0.63	1.35
8.4	2.29	1.53	-0.64	1.35
10.1	2.07	1.60	-0.72	1.41

利用表1中的数据和尾流面积法的公式对试验数据修正.图6为建筑侧面、背风面和顶面( $E$ 面)平均风压系数的尾流面积法修正结果.由图可见,当阻

塞比为 4.1%、6.1% 和 8.4% 时,尾流面积修正法的修正效果较好,但当阻塞比为 10.1% 时,平均风压系

数偏小,比其他阻塞比的修正结果约大 15%。

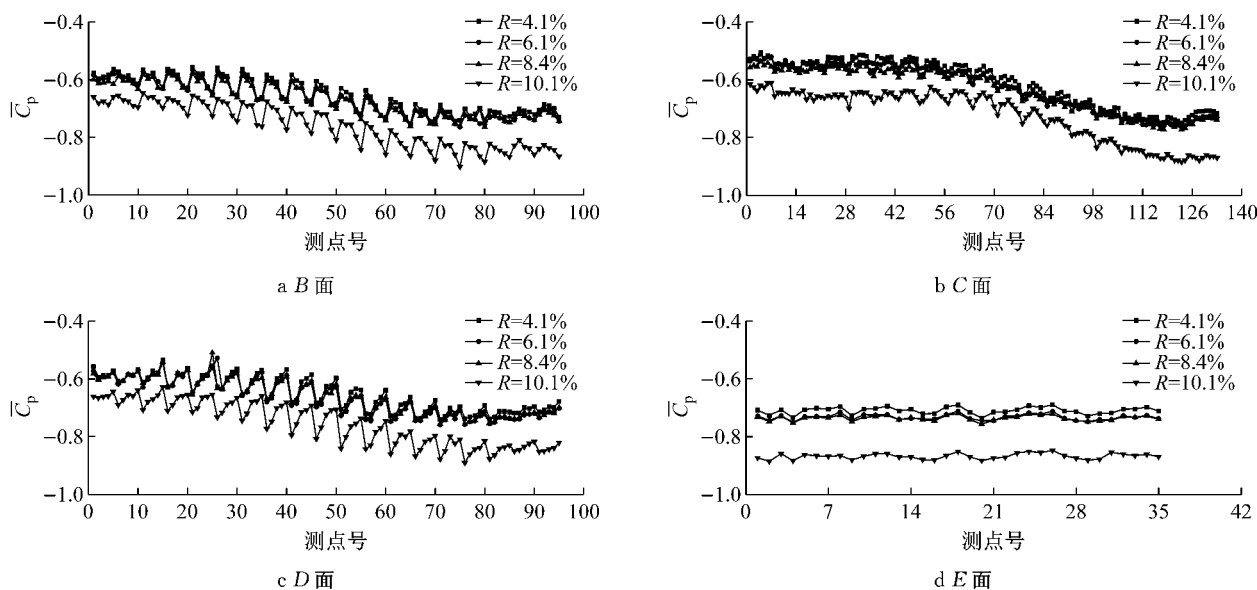


图6 尾流面积法修正的平均风压系数

Fig.6 Mean pressure coefficient corrected by wake area method

### 3 尾流面积法与 Maskell 方法的对比

#### 3.1 Maskell 方法

Maskell 方法<sup>[1]</sup>的适用条件为:①表面压力分布规律不变;②阻塞效应可等效为自由流速的增大;③分离区的背风面压力系数为常数,且与尾流边界的压力系数相等;④尾流在较远的下游处趋向于轴对称。由上述分析可知,本文试验结果基本符合 Maskell 方法适用条件。

图 7 为平均阻力系数  $\bar{C}_D$  与参数  $k^2$  的关系。由图可见,在不同阻塞比时,比值接近于常数 0.85,符合 Maskell 方法中的不变关系式,如下所示:

$$\frac{\bar{C}_D}{k^2} = \text{常数} \quad (9)$$

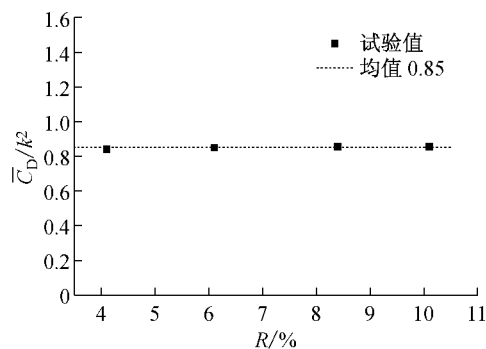


图7 参数随阻塞比的变化

Fig.7 Variation of parameter with blockage ratio

满足上述适用条件后,Maskell 给出了如下阻塞效应修正公式:

$$\frac{\bar{C}_D}{\bar{C}_{Dc}} = 1 + \epsilon \bar{C}_D R \quad (10)$$

$$\epsilon = \frac{1}{k_c^2 - 1} \quad (11)$$

式中: $\epsilon$  为阻塞因子。当为长宽比 1~10 的平板时, $\epsilon$  约为 5/2,且变化很小。

由于理论上无法获得  $\bar{C}_{Dc}$  和  $k_c$ ,可利用下式进行迭代:

$$(k_c^2)_n = k^2 \left( 1 + \frac{1}{(k_c^2)_{n-1} - 1} \bar{C}_D R \right)^{-1} \quad (12)$$

式中:下标  $n$  和  $n-1$  分别表示第  $n$  次和第  $(n-1)$  次迭代。得到  $k_c$  后,即可得到修正后的平均阻力系数  $\bar{C}_{Dc}$ 。不计迎风面平均风压系数的阻塞效应,可计算修正后的背风面平均风压系数

$$\bar{C}_{pbc} = \bar{C}_{pu} - \bar{C}_{Dc} \quad (13)$$

式中: $\bar{C}_{pu}$  为迎风面整体平均的平均风压系数。试验中的来流动压  $q$  与修正后的来流动压  $q_c$  有如下关系:

$$\frac{q_c}{q} = \frac{\bar{C}_{pb}}{\bar{C}_{pbc}} \quad (14)$$

Maskell 方法修正的具体步骤为:①根据试验数据计算平均阻力系数  $\bar{C}_D$  和参数  $k$ ,利用式(12)迭代得到  $k_c$ ;②根据式(10)和式(13)获得修正后的阻力系数  $\bar{C}_{Dc}$  和背风面整体平均风压系数  $\bar{C}_{pbc}$ ;③利用式

(14)修正来流动压,从而修正模型表面负压区所有测点风压试验数据.

### 3.2 修正方法的对比

图8给出了利用 Maskell 方法修正的模型侧面、背风面和顶面平均风压系数.对比图6可见,当阻塞比为4.1%、6.1%和8.4%时,侧面、背风面和

顶面平均风压系数的修正结果比较接近,但平均风压数据没有完全吻合,阻塞比越大平均风压越小,修正效果稍差于尾流面积法;当阻塞比为10.1%时,各表面的平均风压系数修正效果较差,比其他的修正结果均大15%以上,说明当阻塞比较大(10.1%)时,Maskell 方法修正阻塞效应不足.

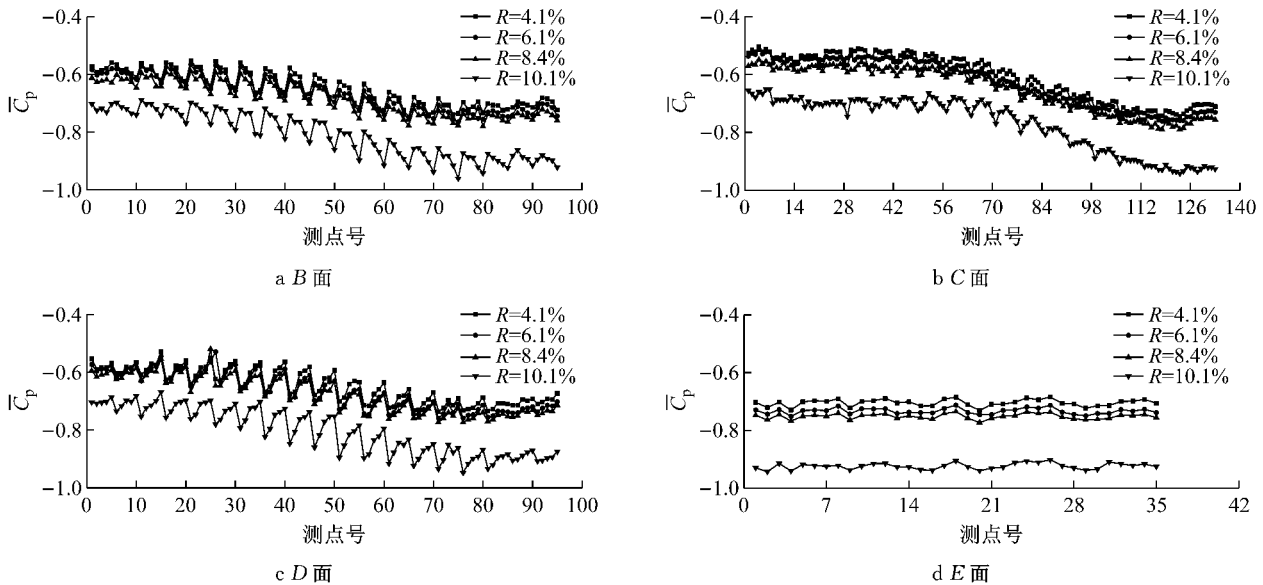


图8 Maskell 方法修正的平均风压系数

Fig.8 Mean pressure coefficient corrected by Maskell's method

图9为2种方法修正后的层平均阻力系数.由图可见,当阻塞比为4.1%、6.1%和8.4%时,2种方法修正的层平均阻力系数吻合较好.当阻塞比为10.1%时,2种方法的修正效果都稍显不足,但尾流面积法仍优于 Maskell 方法.

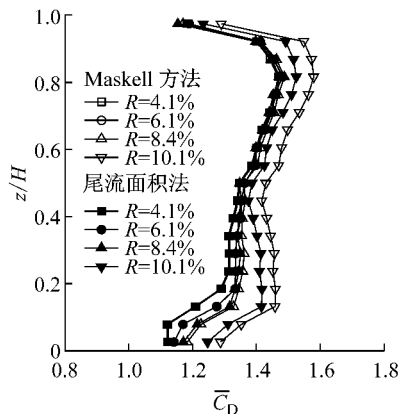


图9 修正后的层平均阻力系数的对比

Fig.9 Comparison of corrected local mean drag coefficients along model heights

图10中列出了2种方法修正后的基底平均阻力系数的对比.由图可见,在较小阻塞比(4.1%和6.1%)时,尾流面积法和 Maskell 方法的修正效果

较为接近;随着阻塞比的增大(阻塞比为8.4%和10.1%),2种方法修正精度略有不足,基底平均阻力系数偏大,但尾流面积法的修正效果优于 Maskell 方法.

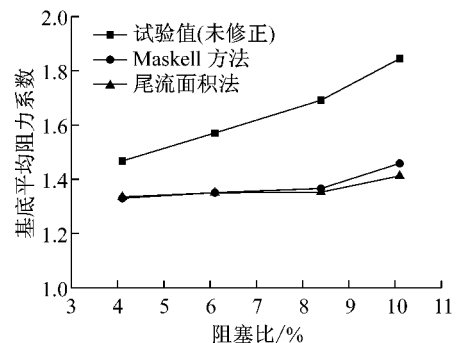


图10 修正后的基底平均阻力系数的对比

Fig.10 Comparison of corrected mean drag coefficients on model base

为方便对比修正效果,将各阻塞比的修正值与阻塞比为4.1%的修正值比较,定义相对差值如下:

$$\Delta_Q = \frac{Q_j - Q_{4.1\%}}{Q_{4.1\%}} \quad (15)$$

式中: $Q_j$  为阻塞比  $j$  时的风压或风力系数的修正结果.

图11为Maskell方法和尾流面积法修正后的层平均阻力系数相对差值的对比.由图可见,在相同阻塞比时,尾流面积法对层平均阻力系数的修正效果均优于Maskell方法.在建筑 $0.2H$ 高度以下处,相对差值较大,主要受边界层影响.在建筑 $0.2H$ 高度以上,当阻塞比为 $6.1\%$ 时,Maskell方法的相对差值小于 $2.0\%$ ,尾流面积法的相对差值小于 $1.7\%$ ;当阻塞比为 $8.4\%$ 时,Maskell方法的相对差值小于 $3.7\%$ ,尾流面积法的相对差值小于 $2.4\%$ ;当阻塞比为 $10.1\%$ 时,Maskell方法的相对差值为 $5.7\%\sim 10.8\%$ ,尾流面积法的相对差值为 $2.0\%\sim 7.3\%$ .

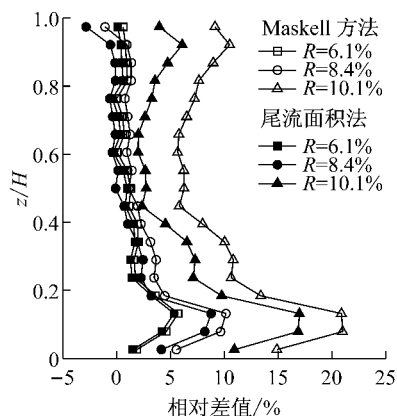


图11 层平均阻力系数修正结果的相对差值

Fig.11 Relative difference of corrected local mean drag coefficients along model heights

表2分别给出了未修正、Maskell方法和尾流面积法修正后基底平均阻力系数相对差值.由表可见,在阻塞效应下基底平均阻力系数明显增大.对比2种修正方法可见,当阻塞比为 $6.1\%$ 时,2种修正方法的修正效果都较好;当阻塞比为 $8.4\%$ 和 $10.1\%$ 时,尾流面积法的修正后基底平均阻力系数的相对差值约为Maskell方法修正后的 $50\%$ ,修正效果优于Maskell方法.对于背风面平均风压系数,虽然在阻塞比为 $10.1\%$ 时,2种方法修正略显不足,但尾流面积法修正效果仍然优于Maskell方法.

表2 基底平均阻力系数相对差值

Tab.2 Relative difference of mean drag coefficients on model base

项目	相对差值		
	$R=6.1\%$	$R=8.4\%$	$R=10.1\%$
试验值(未修正)	7.0	15.2	25.7
Maskell 方法	1.6	2.7	9.7
尾流面积法	1.2	1.3	5.8

值得指出的是,在计算尾流面积比 $m$ 时,尾流面

积法计算值为精确解,而Maskell方法中忽略 $mR$ 的高阶项.所以,当阻塞比较大时,尾流面积法的计算结果更加精确.Maskell方法中 $\bar{C}_D$ 计算公式如下所示:

$$\bar{C}_D = m(k^2 - 1 - mR) \quad (16)$$

相比而言,式(7)可级数展开为

$$\bar{C}_D = m[k^2 - 1 - mR - (mR)^2 - (mR)^3 - (mR)^4 + \dots] \quad (17)$$

按照尾流面积法式(7)和Maskell方法式(16)计算平均阻力系数的比值随 $m$ 和阻塞比 $R$ 的变化如图12所示.由图可见,当模型几何形状( $m$ 和 $R$ )确定时,随阻塞比增大,尾流面积法计算的平均阻力系数与Maskell方法计算结果的比值增大, $m$ 越大比值在大阻塞比时越大.这表明,对于尾流宽阔的钝体,随阻塞比增大,Maskell方法将明显低估平均阻力系数.

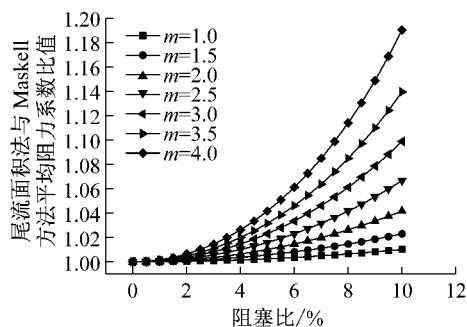


图12 尾流面积法与Maskell方法计算平均阻力系数比值的参数分析

Fig.12 Parameter analysis of ratio between mean drag coefficients by wake area method and Maskell's method

## 4 结语

本文根据动量守恒定理和连续性方程求解尾流面积比 $m$ ,推导了阻塞效应新的修正方法——尾流面积法.采用尾流面积法对均匀流场中4组不同阻塞比的矩形高层建筑测压试验结果进行修正.结果表明,对于平均阻力系数和平均风压系数,尾流面积法在小阻塞比(阻塞比为 $4.1\%$ 和 $6.1\%$ )时的修正效果与Maskell方法的修正效果相同;在大阻塞比(阻塞比为 $8.4\%$ 和 $10.1\%$ )时的修正效果优于Maskell方法的修正效果.当阻塞比较大(阻塞比为 $10.1\%$ )时,尾流面积法与Maskell方法都存在修正不足的共同特点,有待进一步研究,以扩大尾流面积法的适用范围.

## 参考文献:

- [1] Maskell E C. A theory for the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel[R]. London: Her Majesty's Stationery Office, 1963.
- [2] Niemann H. The boundary layer wind tunnel; an experimental tool in building aerodynamics and environmental engineering[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 48(2/3): 145.
- [3] Takeda K, Kato M. Wind tunnel blockage effects on drag coefficient and wind-induced vibration[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 42(1/3): 897.
- [4] Vickery B J. Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1966, 25(3): 481.
- [5] Boak A G, Buckle P R. A study of blockage effects on bluff bodies in a closed wind tunnel[R]. Bristol: University of Bristol, 1968.
- [6] Sprosson P F, Brown C M. A study of blockage effects on flat plates in a closed wind tunnel[R]. Bristol: University of Bristol, 1965.
- [7] Gould R. Wake blockage corrections in a closed wind tunnel for one or two wall-mounted models subject to separated flow[M]. London: Her Majesty's Stationery Office, 1969.
- [8] Modi V J, El-Sherbiny S. Effect of wall confinement on aerodynamics of stationary circular cylinders[C]// *Proceedings of the 3rd International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*. Tokyo: International Conference on Wind Engineering, 1971:365-375.
- [9] Awbi H B. Wind-tunnel-wall constraint on two-dimensional rectangular-section prisms[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1978, 3(4): 285.
- [10] Ramamurthy A S, Ng C P. Effect of blockage on steady force coefficients[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1973, 99(4): 755.
- [11] Raju K G R, Singh V. Blockage effects on drag of sharp-edged bodies[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1975, 1(3): 301.
- [12] Courchesne J, Laneville A. A comparison of correction methods used in the evaluation of drag coefficient measurements for two-dimensional rectangular cylinders[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1979, 101(4): 506.
- [13] Awbi H B. Effect of blockage on the strouhal number of two-dimensional bluff bodies[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 12(3): 353.
- [14] Laneville A, Trepanier J Y. Blockage effects in smooth and turbulent flows; the case of two-dimensional rectangular cylinders[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1986, 22(2/3): 169.
- [15] Laneville A. Turbulence and blockage effects on two dimensional rectangular cylinders[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 33(1/2): 11.
- [16] Noda M, Utsunomiya H, Nagao F. Basic study on blockage effects in turbulent boundary layer flows[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, 54/55: 645.
- [17] Roshko A. On the wake and drag of bluff bodies[J]. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1954, 22(2): 124.
- [18] Bouris D, Bergeles G. 2D LES of vortex shedding from a square cylinder[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 80(1/2): 31.
- [19] Silva D D A H, Girardi R D M. On the mechanism of vortex shedding from bluff bodies[C]// *Proceedings of 19th International Congress of Mechanical Engineering*. Brasília: COBEM, 2007.
- [20] Melbourne W H. Wind tunnel blockage effects and corrections[C]// *Proceedings of International Workshop of Wind Tunnel Modeling*. Maryland: Gaithersburg, 1982: 197-216.
- [21] Chakrabarty D, Brahma R K. Effect of wall proximity in fluid flow and heat transfer from a rectangular prism placed inside a wind tunnel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(3/4): 736.
- [22] Amrouche N, Dizene R, Laneville A. Observations of the wind tunnel blockage effects on the mean pressure distributions around rectangular prisms in smooth and grid turbulent flows[C]// *SMEE'10*. Bou Ismail Tipaza: Revue des Energies Renouvelables, 2010: 21-26.
- [23] Huang J, Gu M. Experimental investigation of blockage effects on an isolated rectangular tall building in the uniform flow[C]// *Proceedings of 14th International Conference on Wind Engineering*. Porto Alegre: International Association for Wind Engineering, 2015.
- [24] 黄剑,顾明. 矩形高层建筑平均风压的风洞阻塞效应试验研究[J]. *空气动力学学报*, 2015, 33(3): 414.  
HUANG Jian, GU Ming. Experimental investigation of blockage effects on mean pressure of rectangular tall buildings in the wind tunnel[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2015, 33(3): 414.
- [25] 黄剑,顾明. 均匀风场中高层建筑平均风力的阻塞效应[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2014, 42(6): 853.  
HUANG Jian, GU Ming. Experimental investigation of blockage effects on mean wind forces on tall buildings in uniform flow[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2014, 42(6): 853.