

低速实壁风洞测压实验洞壁 干扰修正研究

中国气动力研究与发展中心 江桂清

摘 要

本文用壁压信息矩阵法对不同绕流特性的测压数据进行修正, 均获满意结果。文中证明了洞壁对模型驻点的压力不产生干扰; 分析了测压实验洞壁干扰特性与规律, 对不同修正公式作了对比; 进而说明不能用对速压修正的方法消除洞壁干扰

关键词 压力测量, 洞壁干扰, 实验空气动力学。

一、引 言

在低速测力实验中, 洞壁干扰是影响实验结果准确度的主要因素之一。在大攻角情况下, 洞壁干扰尤为严重, 例如当模型阻塞度在15%以上时, 洞壁干扰量可达真值的100%。尽管洞壁干扰如此大, 用壁压信息矩阵法修正, 仍可获得满意的结果^[1]。以往对洞壁干扰无适当修正方法的风轮机风洞实验, 用壁压信息矩阵法修正, 也取得成功^[2]。

测压是风洞三大常规实验项目之一, 对模型测压实验, 以往国内不作洞壁干扰修正或用常规方法对速压作阻塞干扰修正。对风工程的洞壁干扰, 至今国内外还没有适当的修正方法。因此国外有人建议把实验模型的阻塞度限制在2%以内; 即使这样, 洞壁干扰量也常达10%。W.H. Melbourne曾强调风工程中的洞壁干扰难以用理论方法修正, 只能用经验与半经验的方法修正, 并给出一套半经验的修正公式与图线^[3]。由于修正公式中的常数取决于实验模

型、风洞及流动特性三个因素^[3]。因此半经验或经验修正法的普遍适用性受到很大限制, 在很多情况下难以采用。目前国内对风工程的洞壁干扰, 或不修正, 或用 Maskell 方法^[4]修正速压。

为了探索低速风洞测压实验的洞壁干扰修正问题, 用两组共8个模型在 FL-11(1.4×1.4m²)风洞中进行了测压洞壁干扰实验和修正计算研究。

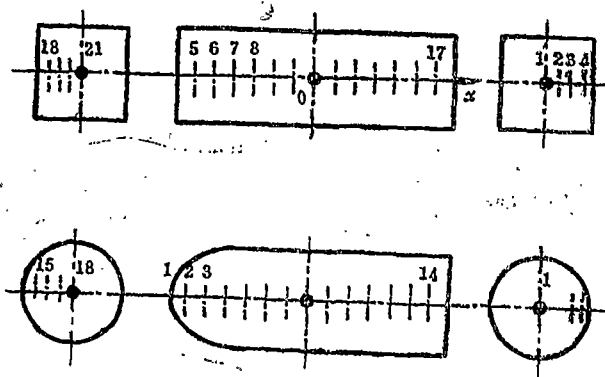


图1 模型外形及测压孔布置

1978年9月21日收到

二、实验模型与方法

1. 模型

有长细比为2.66的钝头方截面柱体与长细比为3.0的流线型头部圆柱体两组, 每组由阻塞度为4.4%, 6%, 12%和17.5%四个几何相似的模型组成。模型为木结构, 其外形及测压孔布置见图1。

2. 实验方法

实验雷诺数各模型基本相同。方柱体均为 $Re=0.68 \times 10^6$, 圆柱体均为 $Re=0.77 \times 10^6$ 。模型姿态均为 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$, 实验均重复测量一次。

在测模型的压力分布时, 同时测量风洞顶壁中心线上的压力分布。用多管压力计测压, 人工判读, 脱机处理数据。

三、实验数据处理与修正

1. 模型压力系数

$$C_{p,r} = p - p_\infty / q_\infty = K\gamma(\Delta h - \Delta h_\infty) / q_\infty \quad (1)$$

2. 洞壁压力系数

$$\Delta C_{p,i} = C_{p,i} - C'_{p,i} \quad (2)$$

$$\text{其中 } C_{p,i} = K\gamma(\Delta h_i - \Delta h_\infty)_{\text{有模型}} / q_\infty \quad (3)$$

$$C'_{p,i} = K\gamma(\Delta h_i - \Delta h_\infty)_{\text{无模型}} / q_\infty \quad (4)$$

3. 洞壁干扰修正

根据壁压分布, 用壁压信息矩阵法算出洞壁阻塞干扰轴向速度分布 $\Delta \bar{u}(x) = \Delta u(x) / U_\infty$, 模型压力分布修正为^[1]

$$C_p(x) = \frac{C_{p,r}(x) - 1.0}{(1 + \Delta \bar{u}(x))^2} + 1.0 \quad (5)$$

为了比较, 并用小扰动速度与压力系数关系

$$C_p(x) = C_{p,r}(x) + 2\Delta \bar{u}(x) \quad (6)$$

对模型压力分布进行了修正。

四、实验结果与分析

本次实验, 同次开车压力系数测定的重复性标准误差为0.03。图2给出了不同模型的壁压系数分布曲线。由模型压力系数修正结果(图3)可得下面结论:

1. 洞壁对模型驻点的压力不产生干扰。本次实验两个最大模型的阻塞度达17.5%, 其驻点压力系数测定值均为1.016, 与1.0的差值远比实验误差小。文献[3]给出的大量实验结果, 驻点压力系数测定值均为1.0, 不随模型的阻塞度改变。对于这一点理论上也可证明:

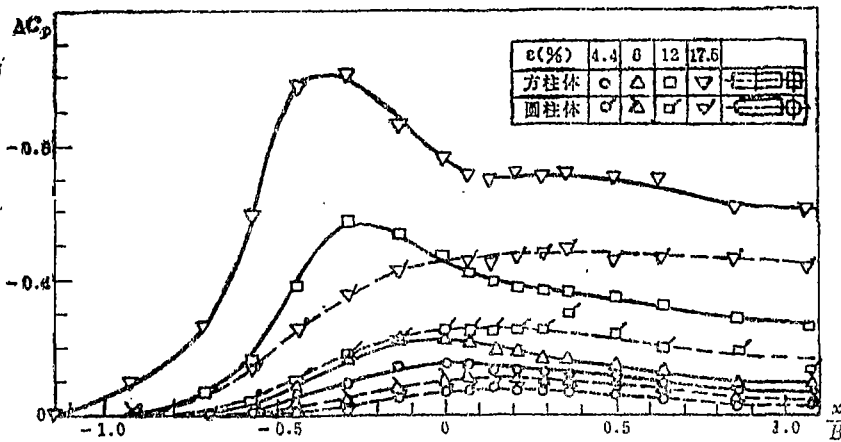


图 2 柱体实验壁压分布曲线

考虑来自远前方的一条流线，不计粘性，在模型与洞壁干扰作用下的Bernoulli方程可写成

$$p_{\infty} + \frac{\rho}{2} U_{\infty}^2 = p_u + \frac{\rho}{2} |\vec{v} + \Delta \vec{v}|^2 \tag{7}$$

无洞壁干扰时有

$$p_{\infty} + \frac{\rho}{2} U_{\infty}^2 = p + \frac{\rho}{2} |\vec{v}|^2 \tag{8}$$

根据压力系数定义，并将 (8) 式代入 (7) 式，可导出

$$C_p = C_{p_s} + 2 \left(\frac{U_{\infty} + v_x + \Delta u}{U_{\infty}} \frac{\Delta u}{U_{\infty}} + \frac{v_y}{U_{\infty}} \frac{\Delta v}{U_{\infty}} + \frac{v_z}{U_{\infty}} \frac{\Delta w}{U_{\infty}} \right) - \left(\frac{\Delta u^2}{U_{\infty}^2} + \frac{\Delta v^2}{U_{\infty}^2} + \frac{\Delta w^2}{U_{\infty}^2} \right) \tag{9}$$

其中 v_x, v_y, v_z 为模型引起的扰动速度分量； $\Delta u, \Delta v, \Delta w$ 为洞壁干扰速度分量，且有 $|\Delta v| \ll |\Delta u|, |\Delta w| \ll |\Delta u|$ ，在公式 (9) 中，略去比 $\frac{\Delta u}{U_{\infty}}$ 高一阶的高价小量，(9) 式成为

$$C_p = C_{p_s} + 2 \frac{U_{\infty} + v_x + \Delta u}{U_{\infty}} \frac{\Delta u}{U_{\infty}}, \tag{10}$$

模型压力系的洞壁干扰修正量为

$$\Delta C_p = 2 \frac{U_{\infty} + v_x + \Delta u}{U_{\infty}} \frac{\Delta u}{U_{\infty}} \tag{11}$$

根据固壁条件，在驻点有

$$U_{\infty} + v_x + \Delta u = 0 \tag{12}$$

即在驻点有

$$\Delta C_p = 0 \tag{13}$$

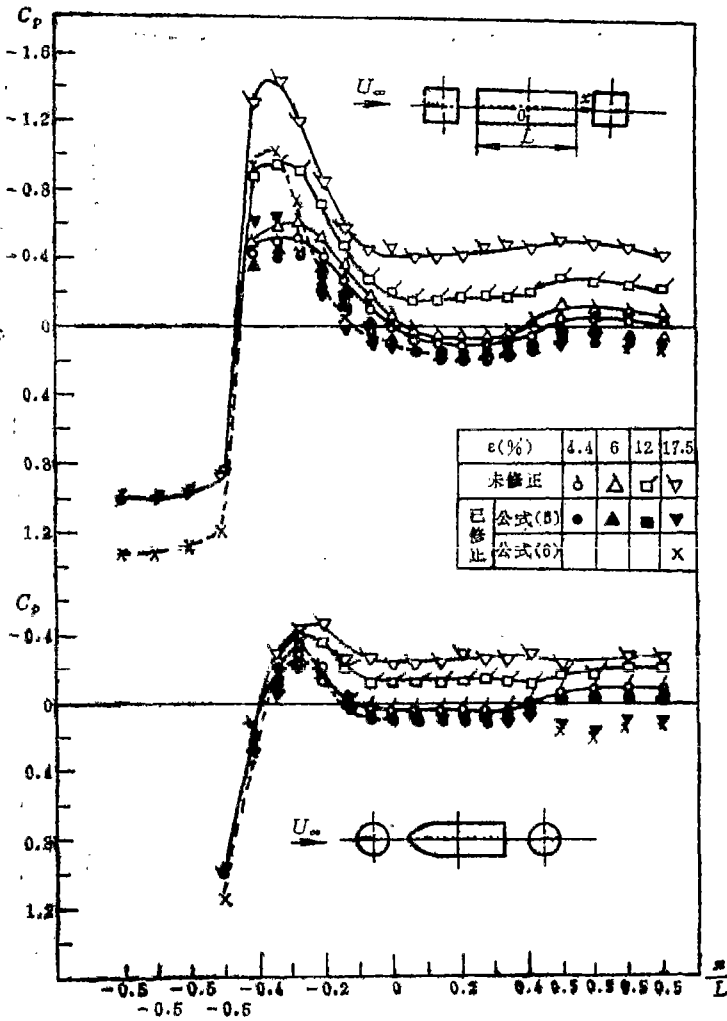


图 3 柱体压力分布洞壁干扰修正结果比较

另外，根据能量守恒律，在模型远前方与其驻点处的总压应保持不变，这样也可得出洞壁对模型驻点的压力不产生干扰的结论。

2. 比较(5)式与(6)式的修正结果(图3)，(5)式在驻点处的洞壁干扰修正量为零，符合洞壁对模型驻点压力不产生干扰的规律，(5)式的修正结果较好。虽然(5)式是在位流中根据圆球或圆柱绕流导出的，通过实验检验表明，具有普遍适用性。

根据(11)式，当模型的扰动速度 v_x/U_∞ 为小量，略去二阶以上小量则得

$$\Delta C_p = 2\Delta u/U_\infty \tag{14}$$

(14)式与(6)式等价。因此(6)式不仅要求洞壁干扰速度是小量，而且要求模型的扰动速度也是小量。显然后一要求在驻点及其邻近区域不成立，所以(6)式在该区域修正结果较差。其余区域这两个小扰动条件均基本成立，所以修正结果也较好，与(5)式的结果一致。这从

另一方面证明了(5)式的可靠性。

另外,用有限基本解方法计算洞壁干扰时,现常采用(14)式计算洞壁干扰,这是不合适的。

3.根据(11)式及图3,压力系数洞壁干扰修正量均为正值;随测量值接近1.0,修正量随之减小,测量值为1.0,修正量为零。最大方截面柱体压力系数测定值在相当大的区域内约为-0.5(图3),经洞壁干扰修正后变为0.1左右,并与相应小模型的修正结果基本一致。流线型头部圆柱体的结果类似。

(5)式及文献〔3〕的大量实验数据表明,在同一轴向测压位置,测点的压力系数不同,洞壁干扰量的绝对值或相对值均不同。如阻塞度为20%的垂直平板中心测点上,迎风面测点的压力,洞壁干扰量为零;而背风面的洞壁干扰量约为真值的3倍〔3〕。如对压力系数修正量沿模型表面积分,一般在迎风区(测量的正压区)的修正量仅占总修正量的百分之几;而背风区(测量的负压区)要占90%,甚至常达95%以上。

由上述洞壁干扰量的分布规律,显然不仅如Melbourne〔3〕所指出的,用Maskell方法〔4〕修正钝体模型的压力分布是不对的〔3〕,且凡用对速压进行修正的各种方法,即使是对流线型模型的压力分布作洞壁干扰修正,也都是错的。在迎风区连方向都修反了。

4.图3表明,两组不同绕流特性的实验模型,一组为钝体,另一组头部为流线体,但修正后的压力系数均基本趋于一致,无明显差异。尽管钝头柱体存在分离再附着(图4),但

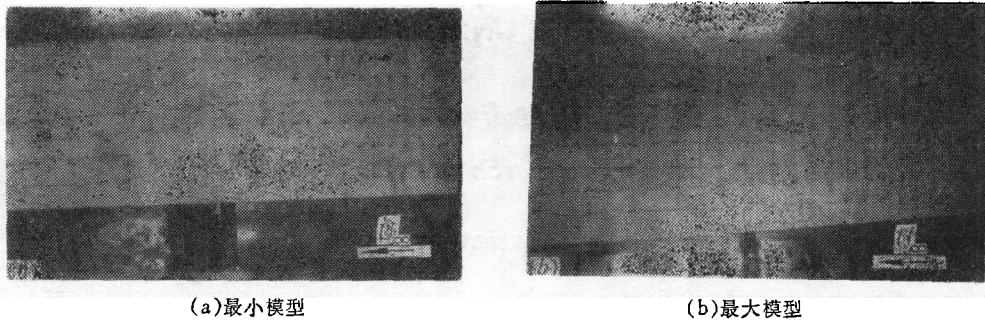


图4 流谱观察典型结果照片

洞壁干扰对再附着点位置无明显影响。因此,其大小模型的压力分布,经修正后仍基本趋于一致,属可修正情况。这表明,风工程钝体模型测压实验,也有大量问题(除本次实验模拟建筑物的方截面柱体外,其它如垂直平板、圆球和圆柱等形体的压力分布)可用理论方法(壁压信息矩阵法)进行洞壁干扰修正,即使存在分离再附着的状况,上述方法也是可行的。因此国际风工程界关于风工程中的洞壁干扰,不能用理论方法修正,只能用经验或半经验的方法修正的论断是欠全面的。

五、结 论

1.对洞壁干扰引起的模型压力分布的误差进行修正时,所有以修正速压为基础的方法都是不对的。洞壁对驻点压力不发生干扰。

2.即使风工程中的钝体模型,仍有很多情况可用理论修正方法(壁压信息矩阵法)修

正洞壁干扰。

3. 用壁压信息矩阵法计算出洞壁干扰速度分布后, 用公式(5)修正可获得满意结果。修正公式(5)具有普遍适用性。在洞壁干扰修正中, 现在普遍采用的公式(6)或公式(14)是不合适的。

参 考 文 献

- 1 江桂清. 洞壁干扰壁压信息矩阵修正法. 低速气动力, 总第19期 1985
- 2 He Dexin, Jang Guiqing. An investigation of blockage corrections for wind turbine tests in CARDC low speed wind tunnel. Paper Presented at European Wind Energy Conference Rome, 7th-9th Oct 1986
- 3 Melbourne W H. The structural and environmental effects of wind on buildings and structures. Monach Universty, Australia, 1982, 201, 206
- 4 Maskall E C. A theory of the blockage effects of bodies and stalled wings in a closed wind tunnel. ARC R&M 3400 1965

AN INVESTIGATION OF WALL INTERFERENCE CORRECTION TO THE PRES SURE MEASUREMENT IN LOW SPEED WIND TUNNEL WITH SOLID WALLS

Jiang Guiqing

(China Aerodynamics Research and Development Center)

Abstract

Pressure measurement was made on a group of cuboids and cylinders with streamlined nose in a low speed wind tunnel. Each group consists models of different sizes with blockage ratio of 4.4%, 6%, 12% and 17.5% respectively. During testing the pressure on the wall of the tunnel was measured. The pressure results corrected by wall pressure sigature matrix method are presented. The results show that although the flow characteristics around the two groups of models are completely different, the pressure coefficients of different models corrected by the method tend to agree with each other.

It has been proved that pressure at the stagnation point on the model is not effected by the wall and the wall blockage interference can not be eliminated by applying dynamic pres,ure correction for the pressure measurement.

Key Words pressure measurement, wall interference, experimental mechanics.