

实验十 五孔探针三维流场测定

一、试验目的

五孔探针是工程研究中研究气体三维流动最常用的测量装置。通过本实验初步了解五孔探针测试三维流动的基本原理，较好地掌握五孔探针测量系统的使用和数据处理方法。

二、五孔探针测量三维流场的原理

空间流场中任一点的速度都具有一定的大小和方向。在任何正交坐标系中(直角坐标系、柱坐标系、球坐标系)。其大小用模表示，而方向则用单位矢量表示(图 1)。

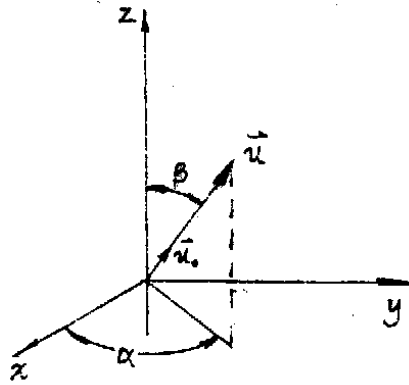


图 1 正交坐标系中速度的表示

在球坐标系中，速度可表示为 $\vec{u}(|\vec{u}|, \alpha, \beta)$ 。而直角坐标系中可表示为：

$$\vec{u} = |\vec{u}|\vec{u}_0 = |\vec{u}|\{\sin \beta \cos \alpha, \sin \beta \sin \alpha, \cos \beta\} \quad (1)$$

式中：

β ： \vec{u} 与 z 轴的正向夹角；

α ： \vec{u} 在 XOZ 平面上的投影与 X 轴的夹角。

可将(1)式简记为：

$$\vec{u} = f(|\vec{u}|, \beta, \alpha) \quad (2)$$

由(2)式可知，测定流体三维流动，就是确定空间各点速度 \vec{u} 的模 $|\vec{u}|$ 和夹角 α, β 。

五孔球形探针的基本测量系统见图 2，它由五孔探头①、干管②、测角器③、水平仪④、压力测量表⑤组成。

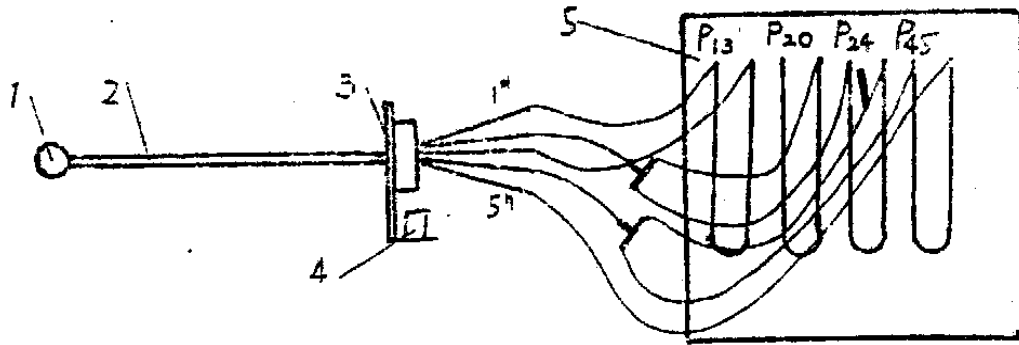


图2 五孔探针测量系统

1—球形探头 2—干管 3—测角器 4—水平仪 5—压力计

球形探头如图3所示,在迎气流的半球面上有五个侧孔,这五个侧孔的压力经皮管引出,编号依次为1、2、3、4、5,孔2位于正中,孔1、2、3在球面的赤道面上,孔4、2、5在球体的子午面。孔1、3、4、5以中心孔2为基准对称排列,各孔与2孔呈45°角排列。

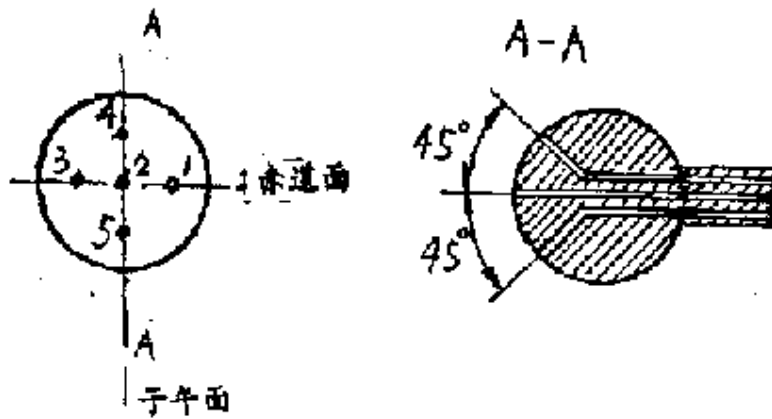


图3 五孔球形探头

根据流体力学中圆球绕流位势理论,球面压力与中心角 ψ 的关系为:

$$P_x = P_s - \left(1 - \frac{9}{4} \sin^2 \psi\right) \frac{\rho |V|^2}{2} \quad (3)$$

$$\bar{p} = 1 - \frac{9}{4} \sin^2 \psi \quad (4)$$

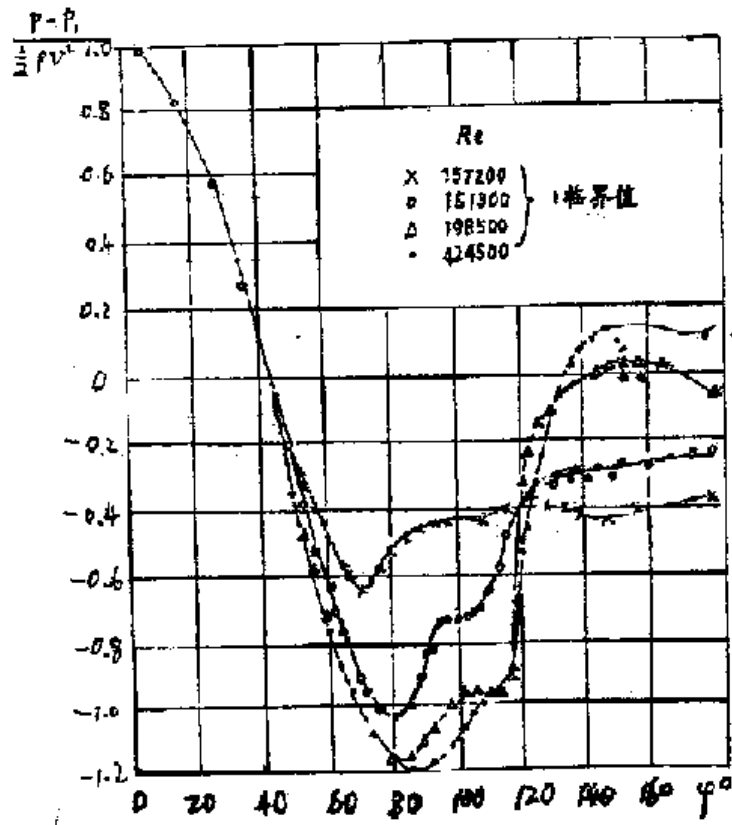


图4 圆球表面压力系数分布

式中:

P_x : 球面中心角 ψ 处的压力, Pa;

P_s : 来源静压, Pa;

$|V|$: 来源速度模, m/s;

\bar{p} : 球面压力系数。

图4给出了球面压力的实验曲线。从图中可以看出在 ψ 小于 45° 的范围内, 实验曲线不随雷诺数 Re_d 变化, 与理论值吻合。因此五孔探针上的侧孔散布的中心孔2的 45° 范围内, 并且要求所测方向也应该在上述范围内。

当空间流体流向球形探头时, 对球面上不同方位的孔产生不同的压力, 各测孔所感受的压力为:

$$P_i = P_s + K_i \frac{\rho |V|^2}{2}, \quad i=1, 2, \dots, 5 \quad (5)$$

式中:

ρ : 气体密度, kg/m^3 ;

K_i : 各测孔的压力系数, 与来流方向和加工精度有关。

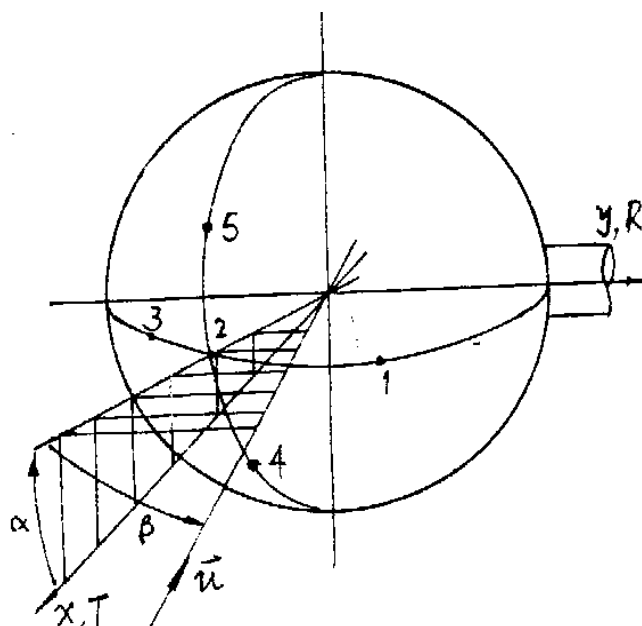


图 5 五孔探针和气流夹角关系

在测试中如果球头能在球壳中任意转动, 则当孔 2 正对气流方向, 由于对称性, $P_1=P_3=P_4=P_5$, $P_1=P_2=P_4=P_6$, 这时 P_2 就为该空间点动压和静压之和, 这种方式称为全对向测量。实际的测试中球头因干管限制而仅能绕干管轴转动, 因此要使 2 孔正对来流方向是很困难的。但可以转动支杆使 $P_4=P_5$, 则来流速度 \vec{V} 在孔 1、2、3 的赤道平面内, 干管转动的角度为 α 角, \vec{V} 与 2 孔轴线的夹角为 β 角。此时, 气流与探头的相互关系为图 5。

由图 5 可知来流方向的 β 角与测孔 1、2、3、4 所感受到的压力有关。这种关系式可由式(4)描述。实验的测孔制造时有偏差, 故通常使用可以通过标定确定压力系数的式(5)。由式(5):

$$P_3 - P_1 = \rho \frac{|\vec{V}|^2}{2} (K_3 - K_1) \quad (6)$$

$$P_2 - P_4 = \rho \frac{|\vec{V}|^2}{2} (K_2 - K_4) \quad (7)$$

由式(6)和式(7)相除得:

$$\frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_4} = \frac{K_3 - K_1}{K_2 - K_4} = K_\beta \quad (8)$$

式中：

K_β ：来流矢量与球子午线的夹角 β 的单值函数。

气流速度的模可由式(6)或式(7)得到：

$$|\bar{u}| = \sqrt{\frac{2(P_3 - P_1)}{\rho(K_3 - K_1)}} = \sqrt{\frac{2(P_2 - P_4)}{\rho(K_2 - K_4)}} \quad (9)$$

气体的静压可由式(5)得：

$$P = P_{20} - K_2 \frac{\rho}{2} |\bar{u}|^2 = P_{20} - K_2 \frac{P_2 - P_4}{K_2 - K_4} (Pa) \quad (10)$$

式中：

P_{20} ：2孔与环境的压差，Pa。

在式(8)、(9)、(10)中的 K_β 、 $K_3 - K_1$ 、 $K_2 - K_4$ 、 K_2 都可由风洞标定得出，其典型标定曲线见图6。

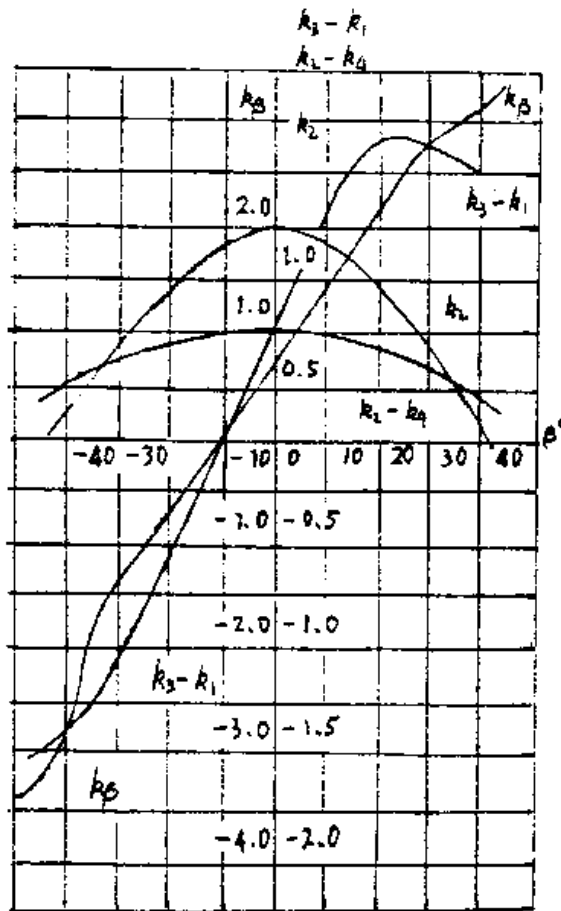


图6 五孔探针校正曲线

测量时转动探针干管使 4 孔和 5 孔压力相等，然后测出 $P_3 - P_1$ 和 $P_2 - p_4$ ，求出 K_β 后查图表得到 β 角，再查出 $K_3 - K_1$ 或 $K_2 - K_4$ 和 K_2 ，分别求出来流速度的模和静压，再由探针上的测角盘读出干管转角 α ，则该点处的速度矢量和静压都确定了。然后再进行坐标转换。

通常测量结果的坐标系是与被测对象的几何轴线重合的。本实验中测量结果的 Z 轴选择为垂直于水平向上为正。而测量时五孔探针是水平放置，即五孔探针的 Z' 轴是水平的，因此需要坐标旋转，按式(1)直接计算是错误的。可按照图 5 直接写出在被测对象坐标中的速度分量。

被测对象为直角坐标系：

$$U_x = |\vec{u}| \cos \alpha \cos \beta \quad (11)$$

$$U_y = |\vec{u}| \sin \beta \quad (12)$$

$$U_z = |\vec{u}| \sin \alpha \cos \beta \quad (13)$$

被测对象的柱面坐标：

$$U_r = |\vec{u}| \cos \alpha \cos \beta \quad (14)$$

$$U_z = |\vec{u}| \sin \alpha \cos \beta \quad (15)$$

$$U_R = |\vec{u}| \sin \beta \quad (16)$$

三、测量装置

流场测量实验装置见图 7，该测量实验由被测对象、五孔探针及其压力测量系统，带标尺的探针支架和风机管道系统组成。

带标尺的探针支架可以使探针沿支架立柱纵向移动，也可沿横架横向移动，其底座有可调螺钉可以调节立柱的垂直度。

五孔探针的压力测量系统采用万用压力测量仪(见图 8)

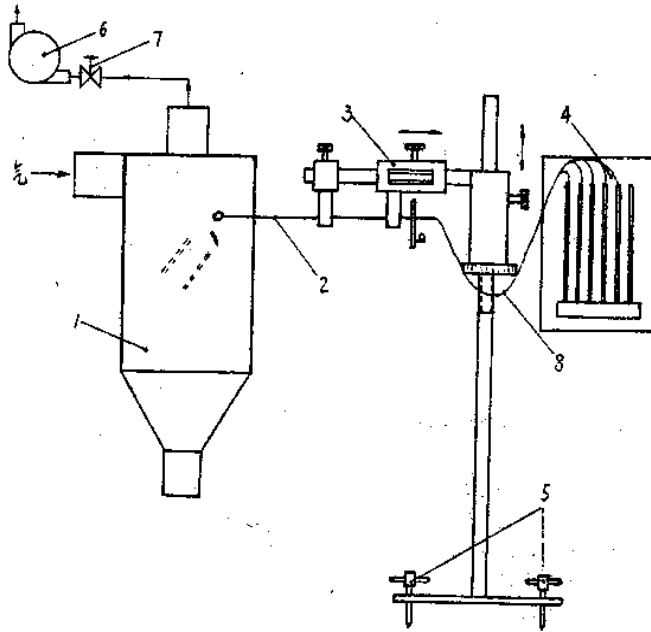


图7 流场测量实验装置

- 1—被测模型 2—探针 3—横向位移支架 4—压力表 5—调节螺钉
6—风机 7—手动闸阀 8—橡胶管

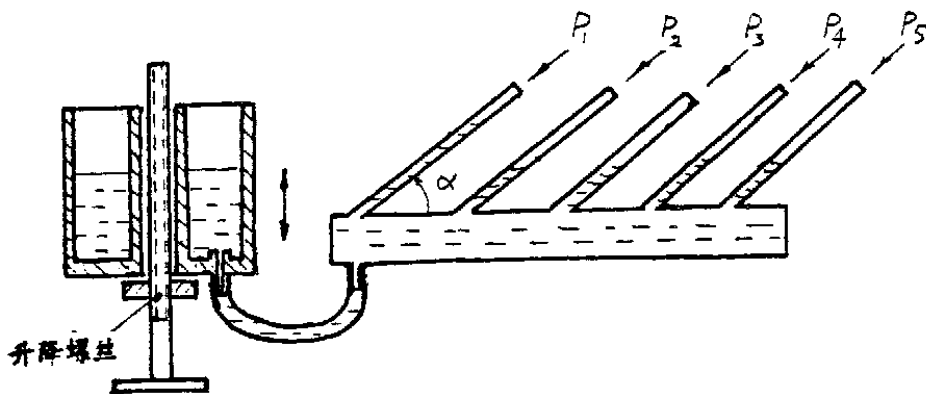


图8 排管压力计

四、实验步骤

1、关上风机阀门，启动风机，当风机完全启动后，达到额定转速之后。慢慢开启阀门到要求刻度。

2、选定测孔，在探针支架上装好五孔探针，并将探针高度调到能放入测孔。再调节支架底座螺钉使探针支杆水平(看水平仪的指示)。

3、将探针放倒测孔边缘，记下支架横杆刻度 l_0 ，注意探针位置是以球心为基准，探针

若以球面对准测孔边缘。则需加上球的半径 r ，即 $l_0 = l_0' + r$ ，这里 l_0' 是探针球面对准边缘时刻度值。

4、根据实际需要选定测点距离。本实验中 15mm 测一个点，测 5 个点。可按照横杆刻度调节 1, $l = l_0 + i \times 15$, $i = 1, 2, 3, 4, 5$ 。插入深度达到后，用橡皮垫封住测孔与探针支杆的间隙，不能漏风。

5、转动支杆，使 $P_4 = P_5$ ，读出 α 角；

6、按下表记录所测数据，表中 h 为排管水柱刻度。

表 2

测点编号	α	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	工况
1							$h_o =$
2							排管斜角 =
⋮							室温 = $^{\circ}\text{C}$
n							

五、数据处理

1、从排管刻度转换为所需的压差值。

例 1：测得排管斜角 60° ， $h_o = 177\text{mm}$ ， $h_1 = 157\text{mm}$ ， $h_2 = 129\text{mm}$ ， $h_3 = 199\text{mm}$ ， $h_4 = 195\text{mm}$ ，室温 10°C 。测压计液体为水，求所需压差值。

解：按照式 (17) 并查 10°C 时水的密度表得

$$P_{20} = P_2 - P_0 = \rho g (h_0 - h_2) \sin \alpha$$

$$999.7 \times 9.81 \times (0.177 - 0.129) \times \sin 60^{\circ} = 407.7 \text{ Pa}$$

$$P_{24} = P_2 - P_4 = 560.5 \text{ Pa}$$

$$P_{31} = P_3 - P_1 = -356.7 \text{ Pa}$$

2、求 K_{β} 和 β 角，各校正值

按照式 (8) 可查图 6，求得 β 角及各校正值。

例 2 用例 1 数据求 K_β

解:

$$K_\beta = \frac{P_{31}}{P_{24}} = \frac{-356.7}{560.5} = -0.636$$

查图 6 得 $\beta = 5.9^\circ$, $K_{21} = -0.461$, $K_2 = 0.965$, $K_{24} = 0.129$ 。

3、求速度的模

按照式(9)可求出速度的模, 在式(9)中气体密度 ρ 可按照下表的干空气密度计算。

表 3 干空气的密度表($P = 1.01 \times 10^5 Pa$)

t(°C)	0	10	20	30	40	50	60	70
ρ (kg/m ³)	1.293	1.247	1.205	1.165	1.128	1.003	1.060	1.029

例 3 按照例 1 数据求速度模

解: 查干空气密度表, 10°C 的干空气密度为 $\rho = 1.247 \text{ kg/m}^3$, 由式(9)

$$|\vec{u}| = \sqrt{\frac{2 \times 356.7}{1.247 \times}} = 35.2 \text{ m/s}$$

4、计算各分速度值

例 4 设测量时探针转角 $\alpha = 5^\circ$, 按例 1 数据求 u_x 、 u_y 、 u_z 值。

解: $u_x = |\vec{u}| \cos \alpha \cos \beta$

$$= 35.2 \times \cos 5^\circ \times \cos 5.9^\circ$$

$$= 34.9 \text{ m/s}$$

$$u_y = |\vec{u}| \sin \beta$$

$$= 35.2 \times \sin 5.9^\circ$$

$$= 3.6 \text{ m/s}$$

$$u_z = |\vec{u}| \sin \alpha \cos \beta$$

$$= 35.2 \times \sin 5^\circ \times \cos 5.9^\circ$$

$$= 3.05 \text{ m/s}$$

5、求出静压

例 5 按例 1 数据求出静压

解：由式(10)

$$\begin{aligned}P_s &= P_{20} - K_2 \frac{P_2 - P_4}{K_2 - K_4} \\&= 407.7 - 0.965 \times \frac{560.5}{0.729} \\&= -334.3 \text{ Pa}\end{aligned}$$

6、计算结果填表

表 4

测点 编号	α	K_β	β	K_{32}	K_{24}	K_2	u	u_x	u_y	u_z	P_s
1	5	-0.636	5.9	-0.461	0.729	0.965	35.2	34.9	3.6	3.05	-334.3
2											
⋮											
n											

六、实验报告主要内容

- 1、简述实验目的、原理。
- 2、叙述测量过程，特别是 α 角的确定过程中的现象，并解释其现象。
- 3、画出所测截面上的三维流场分布图。
- 4、讨论思考题和测量过程的问题。

七、思考题

- 1、如果用理想的五孔球测量一维管流， α 和 β 各为多少？为什么？
- 2、如果用理想五孔球测量脉动流会有什么结果？
- 3、如果图 5 中流场柱面坐标 Z 不是向上，而是沿图 5 的 X 坐标方向，写出类如式(14)、(15)、(16)的速度分量表示式。

(执笔人：周勇敏、简淼夫)