

旋转式一孔测压管及其应用¹⁾

王希麟 张会强 马占华 郭世光

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要 由圆柱三孔型二元复合测压管的测速原理出发, 提出用一孔测压管通过旋转实现平面气流速度大小与方向的自动测量, 建立了相应的测试系统. 通过大量实验, 研究了该系统的性能. 在多种回流和旋流流场测量中进行了应用. 结果表明该系统测量原理正确, 重复性好, 精度高.

关键词 一孔测压管, 平面复杂气流场, 速度测量

引言

圆柱三孔型二元复合测压管因其结构简单, 使用方便, 常常用来进行平面气流速度的测量. 它由二个方向孔和一个总压孔构成. 总压孔位于中心, 孔间间隔 45° ; 如图 1(a). 使用时有对向测量和不对向测量两种. 前者要求两个方面孔的压力严格相等, 而后者须三个孔迎着待测来流^[1]. 显然这两种方法均难以实现平面气流速度方向的自动辨识和大小的自动量测. 因此它对流动方向变化较大的流动(如回流)的测量是十分困难的. 为解决这一困难, 实现平面气流速度的自动测量, 本文提出了旋转式一孔测压管法. 测量时, 使一孔测压管绕其轴线间隔 45° 旋转七次而构成一个八孔测压管. 其中每一孔和相邻两孔均构成一圆柱三孔型二元复合测压管. 这样在待测流动中总会有其中一个三孔测压管迎着来流. 应用不对向圆柱三孔型二元复合测压管的测速原理, 即可获得待测气流的方向、速度大小、总压和静压. 本文建立了相应的旋转式一孔测压管的测试系统. 对其性能的实验研究表明其原理正确, 重复性好. 在回流流动和旋流流动测量中的应用表明结果合理可信, 测量简单高效. 该测试系统适用于定常流场测量.

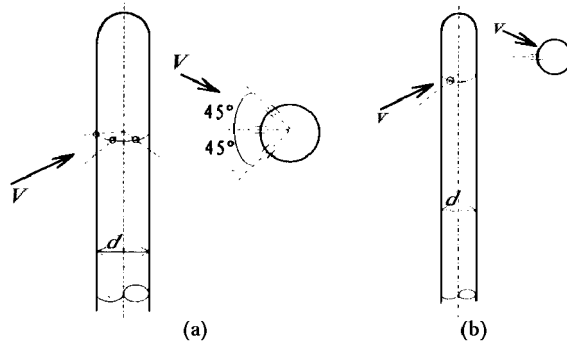


图 1 三孔测压管和一孔测压管
(a) 三孔测压管, (b) 一孔测压管
Fig. 1 Three-hole probe and one-hole probe
(a) Three hole probe, (b) One-hole probe

¹⁾ 清华大学煤的清洁燃烧国家重点开放实验室资助课题

本文系编委姚振汉、周力行先生推荐. 1995-04-21 收到第一稿, 1995-05-30 收到修改稿

1 旋转式一孔测压管自动测速原理

一孔测压管如图 1(b) 所示, 它是在封闭中空的圆柱杆段上距端部一定距离的某截面开一径向小孔而构成, 使用时, 垂直插入待测流场中。在每一测点依某一方向间隔 45° 绕其轴线旋转七次, 顺次得到八个压力值 $p_1, p_2, \dots, p_8$, 找出其中的最大值 $p_{\max}$, 则可判定 $p_{\max-1}, p_{\max}, p_{\max+1}$ ($\max = 1$ 时, $\max - 1 = 8; \max = 8$ 时, $\max + 1 = 1$) 为三个迎风孔的压力值。显然, 待测气流的方向与 $p_{\max}$ 所对应测孔的轴线夹角最小, 记为 α 。假设待测气流的总压和静压为 p^* 和 p 。定义如下三个系数

$$X_\alpha = \frac{p_{\max+1} - p_{\max-1}}{2p_{\max} - p_{\max+1} - p_{\max-1}} \quad (1)$$

$$X_0 = \frac{p^* - p_{\max}}{2p_{\max} - p_{\max+1} - p_{\max-1}} \quad (2)$$

$$X_v = \frac{p^* - p}{2p_{\max} - p_{\max+1} - p_{\max-1}} \quad (3)$$

根据圆柱绕流的规律, α 与 X_α, X_0, X_v 之间具有确定的关系, 这个关系就是一孔测压管的方向特性曲线 (α, X_α), 总压的特性曲线 (α, X_0) 和速度特性曲线 (α, X_v)。这些特性曲线可在已知气流方向、总压和静压的标准流场中获得。图 2 为某一孔测压管的三条特性曲线。在已知一孔测压管的特性曲线之后, 就可根据待测气流对 $p_{\max+1}, p_{\max}, p_{\max-1}$ 三个迎风孔的方向特性系数 X_α (由 (1) 得到), 由一孔测压管的方向特性曲线确定出待测气流相对于 $p_{\max}$ 测孔轴线的偏角 α 。由此偏角 α 可根据一孔测出管的总压特性曲线和速度特性曲线确定出待测气流对 ($p_{\max-1}, p_{\max}, p_{\max+1}$) 三迎风测孔的总压特性系数 X_0 和速度特性系数 X_v 。然后由 (2) 式和 (3) 式可计算得待测气流的总压 p^* 和静压 p , 即

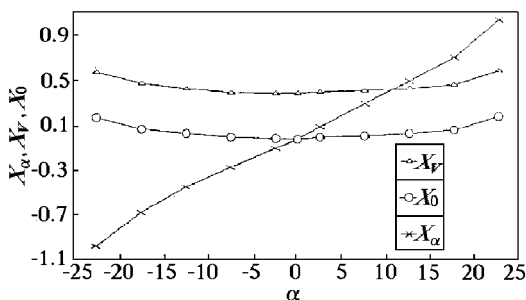


图 2 一孔测压管的特性曲线
Fig. 2 Characteristic curves of one-hole probe

$$p^* = p_{\max} + X_0(2p_{\max} - p_{\max+1} - p_{\max-1})$$

$$p = p^* - X_v(2p_{\max} - p_{\max+1} - p_{\max-1})$$

进一步可求得气流速度的大小 v

$$v = \sqrt{\frac{2X_v(2p_{\max} - p_{\max+1} - p_{\max-1})}{\rho}}$$

其中 ρ 为待测气流的密度

这样就得到了待测气流的方向相对于最大压力测孔的偏角 α , 总压 p^* , 静压 p 和速度的大小 v 。

2 旋转式一孔测压管测速系统

旋转式一孔测压管测速系统如图 3 所示, 它由一孔测压管, 微压差传感器, 步进电机

(旋转机构), A/D, D/A 和计算机构成 它具有测点自动(或手动)移动和一孔测压管自动(或手动)等 45 间隔旋转的功能, 同时通过计算机和 A/D 完成数据的自动采集和处理

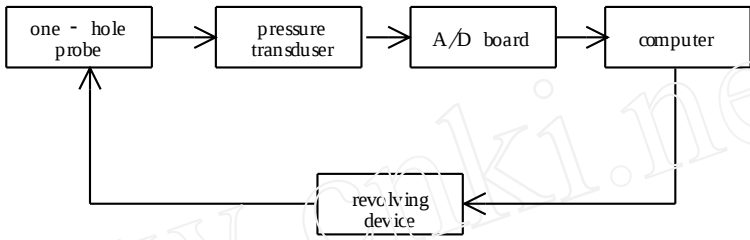


图3 旋转式一孔测压管的自动测速系统
Fig 3 An auto-measurement system of the revolving one-hole probe

3 旋转式一孔测压管测速系统的性能

3.1 测量范围

本系统采用高精度 14 位 A/D 板(系统误差 < 0.5%) 及 CYG2 半导体微压差传感器(灵敏度为 1mV/kPa/V), 从而使本系统可分辨的最小速度达 1.5m/s, 最大速度达 100m/s, 远高于使用微压计的圆柱三孔二元复合测压管的测试系统

3.2 与对向圆柱三孔测压管测量结果的比较

在一钝体后方的回流流动中, 选择有、无回流的一个剖面, 使用对向圆柱三孔测压管和一孔测压管分别测量, 结果见图 4, 比较可见二者相符得很好, 相对误差 10%, 其误差主要在低速区 三孔测压管测量时, 因需人工找平衡和人工读数, 耗费时间长, 读数误差大 而旋转式一孔测压管克服了这一不足 不论对高速待测气流, 还是对低速待测气流, 手动完成一个测点的测量均不超过 1 分钟 在辨识待测气流方向时, 其因快速和准确而

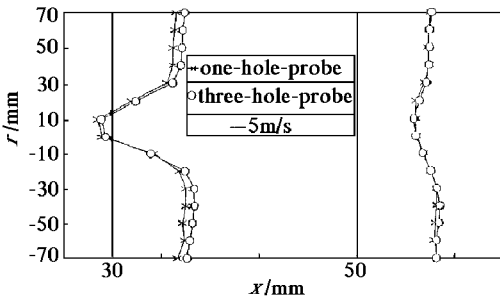


图 4 一孔测压管和三孔测压管的测量结果
Fig 4 The measuremental results of one-hole probe and three-hole probe

明显优于三孔测压管 同时, 一孔测压管的探头体积小于三孔测压管的探头, 对流场的干扰小, 测试精度高(特别在低速区). 旋转式一孔测压管的误差主要来源于一孔测压管的同轴度、旋转间隔的精度及 A/D 转换和压力传感器的性能 这些可以通过精细加工和选择高质量的传感器来改善和克服 因此, 不论是可测量范围, 还是测量精度和效率, 旋转式一孔测压管均显著优于圆柱三孔二元复合测压管

表 1 单点多次重复测量的结果

Table 1 The six measurement results at the same point

No.	1	2	3	4	5	6
Velocity (m/s)	14 766	14 648	14 876	14 794	14 871	14 953
Direction angle (Deg)	12 992	12 471	12 846	12 741	11 912	13 267

3.3 同一点多次测量的结果

在流场中选一点进行多次测量的重复性研究结果如表 1 所示 速度大小在 $\pm 1.1\%$ 的范围内, 方向角在 $\pm 2.7\%$ 的范围内重复 因此, 该测速系统具有良好的重复性

4 旋转式一孔测压管自动测速系统的应用

4.1 对回流流动的测量

用旋转式一孔测压管自动测速系统对钝体后方的回流流动进行测量 测量过程中该系统自动分辨出了回流区, 并给出了定量的结果如图 5

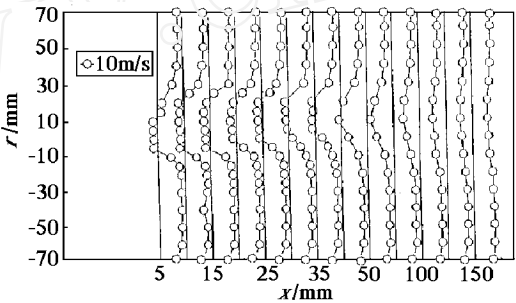


图 5 回流流动的测量结果
Fig 5 The measuremental results of a recirculating flow

4.2 对旋流流动的测量

对切向进口突缩轴向出口的旋风筒内流动进行了测量 结果如图 6 图 6(a) 所示的是切向速度和轴向速度分布, 可以看出流动在切向呈现出典型的似固核加位涡结构, 在轴向具有双峰结构且存在返流区 图 6(b) 所示的总压和静压分布具有典型的旋风筒内旋流流动的特征

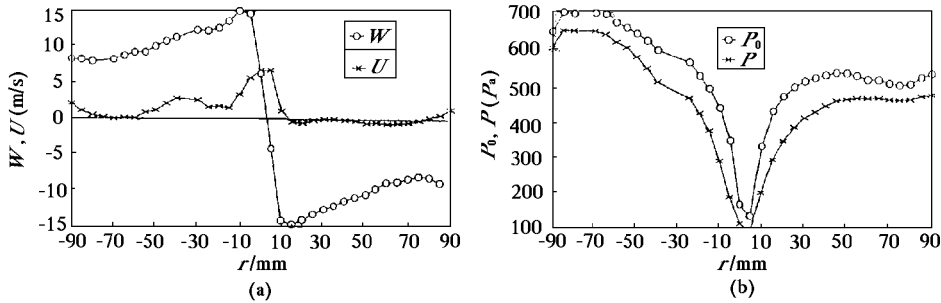


图 6 旋流流动的测量结果
(a) 速度, (b) 压力
Fig 6 The measuremental results of a swirling flow
(a) Velocity, (b) Pressure

在回流流动和旋流流动测量中的应用表明, 旋转式一孔测压管系统特别适合于流动方向变化较大的平面复杂气流的测量 它不仅可以自动分辨方向, 而且还可以给出气流速度大小, 总压和静压的分布

5 结 论

- 1) 测量结果表明: 一孔测压管测量原理正确, 结果合理、重复性好
- 2) 该系统能够实现定常, 有回流(或旋涡)平面气流速度大小、方向、总压和静压的自

动测量

3) 与对向圆柱三孔测压管和热球风速仪等测速手段相比, 该系统量测信息丰富, 量测效率高 对回流等流动方向变化较大的流动的测量尤为显著

4) 该系统的测压管尺寸小, 对流场干扰小 且易于加工制做

5) 该系统成本低, 使用简单可靠 维护容易

参 考 文 献

- 1 吕崇德等 热工参数测量与处理 北京: 清华大学出版社, 1990

A REVOLVING ONE-HOLE PROBE IN 2-D GAS FLOW FIELD

Wang Xilin Zhang Huiqiang Ma Zhanhua Guo Shiguang

(Dept. of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract According to the velocity measurement principle of the three-hole probe, a revolving one-hole probe is proposed in this paper to realize the gas velocity amplitude and direction measurement simultaneously, and the corresponding measurement system is built up. The characteristics of this system is studied by experimental investigation, and find its use in various recirculating flows and swirling flows. The correct measurement principal, good repeatability and high accuracy of this system are verified by the experiments.

Key words one-hole probe, 2-D gas flow field, velocity measurement