

高等学校试用教材

热工测试技术 及 研究方法

宋 崑 蒋欣之 编



中国建筑工业出版社

本书是为高等学校无机非金属材料专业热工工程研究方向研究生必修课程《测试技术及研究方法(B)》而编写的,可作为试用教材或教学参考书。内容包括热工测试技术及热工研究方法两部分。本书全面系统地介绍现代热工科研应用的各种新型测试仪表和技术以及三种热工研究方法,着重介绍流速及温度的测试技术及电子计算机数字模拟方法。本书也可供有关专业的研究、设计和生产单位在科学研究及技术开发工作中参考。

高等学校试用教材
热工测试技术及研究方法
宋 嵩 蒋欣之 编

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 16 1/2 字数: 405 千字
1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷
印数: 1—3,200 册 定价: 2.25元
统一书号: 15040·5084

编 者 的 话

1982年6月在武汉召开的无机非金属材料专业研究生培养经验交流会议上决定开设热工工程研究方向研究生必修课程《测试技术及研究方法(B)》。本书是为该课程编写的教学参考书,也可作为试用教材。考虑到读者已学过数值分析、硅酸盐工业热工过程及设备、化工传递过程、化工仪表及自动化以及算法语言等有关课程,因此本书凡涉及这些课程内容的地方只扼要陈述,不作详细讲解。为了便于读者了解有关热工测试技术及研究方法更详细的内容,本书各章提供了较多的参考文献目录,以供读者查阅学习。

本书由天津大学材料科学与工程系宋嵩主编。各部分编写分工如下:第一部分热工测试技术,由浙江大学材料科学与工程系蒋欣之编写;第二部分热工研究方法,由宋嵩编写。

本书由华南工学院无机材料系刘振群主审。参加审阅的有:华南工学院数学系刘永清,华东化工学院无机材料系孙承绪,建筑材料科学研究院水泥科学研究所赵正一。

刘振群、羊淑子和胡国林,以及孙承绪和李会平,为本书的编写热心地提供了有关资料,在此表示衷心的感谢。

热工研究应用的新型测试仪表及技术以及现代热工研究方法内容涉及面很广,限于编写者水平,缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

第一部分 热工测试技术

第一章 静压强、速度及速度场的测试技术	2
§ 1.1 流体静压强的测量	2
1.1.1 静压测试技术	2
1.1.2 运动流体静压强的测量	4
§ 1.2 二维测压管测量二维速度场	5
1.2.1 圆柱三孔型测压管	6
1.2.2 三管型测压管	7
1.2.3 楔型测压管	8
1.2.4 两管型方向管	8
1.2.5 二维测压管的应用	8
§ 1.3 三维测压管测量三维速度场	9
1.3.1 球型五孔测压管	9
1.3.2 五管三维测压管	12
1.3.3 球型七孔三维测压管	12
§ 1.4 热线风速仪	12
1.4.1 热线风速仪的探头及型式	13
1.4.2 工作的基本原理	14
1.4.3 热线风速仪测量流体平均速度的依据	14
1.4.4 流体平均速度和方向的测量	16
§ 1.5 激光多普勒测速技术	19
1.5.1 激光多普勒测速的特点	19
1.5.2 激光多普勒测速的基本原理	20
1.5.3 双光束激光测速仪的测量系统	21
1.5.4 激光测速与直接摄影测量系统	23
§ 1.6 激光全息摄影法	24
1.6.1 造图过程	24
1.6.2 建像过程	25
§ 1.7 流体流量的测量	25
1.7.1 涡轮流量计	27
1.7.2 涡街流量计	30
§ 1.8 流动显示技术	33
1.8.1 水流显示技术	34
1.8.2 一般流速下的气流显示技术	34

第二章 二相流(流体、固体)的测试技术	38
§ 2.1 光学测试方法	38
2.1.1 高速连续摄影——二重曝光法	38
2.1.2 光和放射线的衰减法	39
2.1.3 图像传感器法	41
2.1.4 光反射法	42
2.1.5 激光法	43
2.1.6 光纤激光多普勒流量计	44
§ 2.2 示踪法与超声波法	45
2.2.1 示踪法	45
2.2.2 超声波法	45
§ 2.3 相关测试法	46
2.3.1 相关法	46
2.3.2 静电电容式相关流量计	47
第三章 温度及温度场的测试技术	51
§ 3.1 气体温度的测量	51
3.1.1 热电偶测温的误差及其改进措施	51
3.1.2 高温气体温度的测量	53
3.1.3 气体非稳态温度的测量	57
3.1.4 高速气体温度的测量	59
§ 3.2 表面温度的测量	59
3.2.1 热电偶表面温度计	59
3.2.2 比色高温计	61
3.2.3 红外测温仪	63
§ 3.3 温度场的测量	66
§ 3.4 热流量的测试	68
3.4.1 导热热流量的测试	68
3.4.2 辐射热流量的测试	69
第四章 气体浓度及浓度场的测试技术	71
§ 4.1 热导式气体分析器	71
4.1.1 混合气体导热系数与组分的关系	71
4.1.2 发送器工作原理	72
4.1.3 热导式气体分析仪的测量电桥原理	74
§ 4.2 热磁式氧量分析仪	74
4.2.1 气体的磁性及氧量分析仪的基本原理	75
4.2.2 热磁式氧量分析仪发送器原理	76
4.2.3 烟气取样系统	77
4.2.4 热磁式氧量分析仪误差分析	78
§ 4.3 氧化锆氧量计	79
4.3.1 氧化锆氧量计的工作原理	79
4.3.2 测量系统	81
4.3.3 氧化锆管的基本技术要求	81

4.3.4 氧量计正确测试的条件	81
§ 4.4 红外线气体分析仪	82
§ 4.5 微处理机工业气相色谱仪	83

第二部分 热工研究方法

第五章 实体模型及相似模拟方法	88
§ 5.1 概论	88
§ 5.2 理论基础	89
5.2.1 相似的概念	89
5.2.2 相似准数	90
5.2.3 相似三定理	95
5.2.4 建立实体模型的规则	95
5.2.5 近似模型方法	97
5.2.6 相似模拟的可用范围及可靠性	104
§ 5.3 实体模型相似模拟方法的应用	105
5.3.1 回转窑燃烧带的流体动力过程相似模拟	106
5.3.2 火焰隧道窑对流换热过程相似模拟	112
5.3.3 玻璃制品压制过程的非稳态导热过程相似模拟	120
第六章 数学模型及比拟模拟方法	133
§ 6.1 概论	133
§ 6.2 直接比拟模拟	134
6.2.1 电-热比拟模拟原理	135
6.2.2 电-热比拟模拟应用实例	141
6.2.3 对流传质-对流传热比拟模拟原理	146
6.2.4 对流传质-对流传热比拟模拟的应用实例	147
§ 6.3 间接比拟模拟	149
6.3.1 电子比拟计算机	149
6.3.2 间接比拟模拟方法的应用	150
6.3.3 比拟-数字混合计算机	152
第七章 数学模型及数字模拟方法	155
§ 7.1 概论	155
7.1.1 概述	155
7.1.2 热工工程中有关数学模型数字模拟的基本概念	156
§ 7.2 数学模型的分类	157
7.2.1 机理模型及经验模型	158
7.2.2 确定性模型与随机性模型	159
7.2.3 稳态模型及非稳态模型	159
7.2.4 线性模型及非线性模型	160
7.2.5 连续变量模型及离散变量模型	160
7.2.6 数学模型的数学表达式	160
§ 7.3 数学模型的建立过程	161
7.3.1 原型识别及明确数学模型所要解决的问题	162

7.3.2	数学模型的确定及分析.....	163
7.3.3	数学分析及重新列式.....	167
7.3.4	数值分析及计算机算法研究.....	169
7.3.5	数学软件.....	172
7.3.6	计算机程序设计、改进及检验.....	173
7.3.7	模型的验证、调整及使用.....	174
§ 7.4	数学模型数字模拟方法.....	175
7.4.1	代数方程的数值求解方法.....	175
7.4.2	常微分方程的数值求解方法.....	193
7.4.3	偏微分方程的数值求解方法.....	207
§ 7.5	数学模型数字模拟方法的应用.....	219
7.5.1	玻璃池窑供料道玻璃液非等温流体动力过程的数字模拟.....	219
7.5.2	窑炉火焰空间热交换过程的数字模拟.....	232
7.5.3	火焰隧道窑预热带热工过程的综合数字模拟.....	241

第一部分 热工测试技术

科学技术的发展是和测量技术的发展密切联系在一起的。测量技术是研究有关测量方法和测量工具的科学技术。

在无机非金属材料科学和工程技术领域中所进行的一切研究活动，无非是探求客观事物与量的变化关系。而在探讨和研究质与量的关系过程中均需要进行测量工作。

测量是按照被测对象的特点和要求，采用某种方法和仪器获得被测量数值的全过程。只有通过测量才能获得表征物理或化学现象和过程的定量信息。在研究热工设备或过程以及寻求理论热分析模式中，往往通过对不同参数的调试和测量导出一些信息化的定量结果，从而更为切合实际地反映其客观真实性。因此测量是用以分析判断事物质量指标的重要手段。任何质量指标均要通过一定的数量来表示。例如对无机非金属材料所用热工设备中的热效率、燃烧效率和传热效率等，就是借助于测量所获得的各参数的数值来评价事物质量的高低。

在无机非金属材料科学和工程领域中，研制新材料、新结构的热工设备和制订生产新工艺的热工过程，必须借助于测量以获得必要的参数，来了解热工过程的状况并加以调节和控制，从而保证最佳工艺过程的实现，获得尽可能高的质量指标和经济指标。

随着无机非金属材料科学和工程领域中的热工研究和生产过程的日益深入和发展，对热工测量的要求也愈来愈高。并促使采用新原理、新技术和新结构的热工测试仪表不断涌现，无疑将推动热工测试与研究，从而进一步为探讨热工过程中多因素的内在联系与相互影响的热分析模式提供了有力的前提条件。因此作为无机非金属材料科学和工程的科技人员，正确掌握测试技术进行必要的测量是非常重要的。

应指出的是在这里所提及的测试技术是在讲过有关测量仪表的基础上进行的。故凡在有关测量仪表课中提及的测量方法和仪表，在这里不再赘述。

第一章 静压强、速度及速度场的测试技术

压强、速度是表明热工设备中工质运动状态最重要的参数之一。要确切地掌握热工设备的运行情况以及深入研究其内部工作过程的规律，必须对有关区域中的流场——压强或速度分布进行试验测定，例如各型窑炉中的压强分布、燃烧室或炉膛的气体动力场等，为此需要较精确地掌握压强、速度的测试技术。

测压、测速的方法日益增多，但目前最常用的方法还是气体动力测压法。它的典型仪器就是测压管。常规的测压管难以适应动态过程的测量，因之出现了各类型的压强传感器，特别是近代技术的发展，传感器的尺寸越做越小，以致可以置于测压管内部以适应动态过程压强场的测定。

为了深入研究流体流动的性质，特别是湍流中的一些特性，热线风速仪是一种非常适宜的仪器。通过热线技术可测得湍流流态及脉动速度等。

许多场合需要显示流动的物理图象，这就是所谓的可见流动研究法，应用光学系统可以很好地完成这个任务。

近年来激光技术的高速发展及广泛应用，使激光多普勒测速已成为科学研究和实验室中一种无接触的流场测试重要手段，并取得了良好的效果。

§ 1.1 流体静压强的测量

压强测量是一项最基本的测量技术。压强本身不但是表征流体流动过程的重要参数，而且矢量流速和流量等参数的测量，也常常转换为压强测量的问题。

流动状态下的流体压强分为静压与总压。总压与静压的差值称为动压。

从被测压强的性质来看，压强测量可分为稳态压强（静态压强）和非稳态压强（动态压强）的测量。前者是指流体压强不随时间变化，或者变化很慢，它是实验室或工业生产中经常进行的测量项目。非稳态压强是指流体压强随时间作快速变化或周期性变化，它是在研究非稳态流动和湍流等流动特性时，必须进行的特殊测试项目。

1.1.1 静压测试技术

静压的测量是流体流动测试中最基本的一项测试技术。按其定义是当测压仪器对流场无干扰，或与流速同样的速度随流体一道运动条件下，在某点上所测出的压强称为静压。但事实上如按照静压的定义，不可能测得运动流体中某定点上静压的真实值。因此，在实际测试中只能采用相对来说对流场干扰最小的方法以测得静压。亦即采用特殊结构的测压仪器——压强探针或探头，使其在测点周围流场的流线变形达到最小。

无论对于运动流体或静止流体，均存在静压的概念。所以通常把静压简称为压强。静压的测量分为两种情况，一是流道壁面静压或流线体表面压强分布的测量；另一是运动流

体中静压和静压分布的测量。前者是利用在流道壁面或流线体表面开静压孔，以及安装压强传感器的方法用以进行测量某定点处的静压。后者是利用具有一定形状，尺寸较小的特制静压探头或探针，将其放入运动流体中，且不改变压强测量区域的流态，从而进行流体静压的测量。对运动流体中静压的测量难于壁面静压的测量。在某些条件下如水平直管中运动流体的静压值，可利用流道壁面静压的测值来代替。如把壁面静压和流体中的静压混淆起来，可能会引起一定的误差（1~3%）。

在测量流场空间某点的压强时，首先设法感受出该点的压强量，然后利用压强指示仪表进行测量。这种感受压强量的装置被称为压强探头。它的外形结构多是一根细长的管子，因而又称为测压管或压强探针。在流场中放入压强探头后，会引起对流场扰动，因此需要设计一种对流场扰动最小的压强探头。

用压强探头测量流体压强是测量位于流场中的压强探头表面上一定点的压强值，并以其代表流场空间中某点的压强值。压强探头的这种测量原理是根据伯努利方程式，即理想流体绕流物体的位流理论。在低速水平流动时，不考虑流体的可压缩性，并认为流体的密度 ρ 是常数。未扰动的压强 p ，速度 w 与绕流物体附近的压力 p_1 、速度 w_1 ，根据伯努利方程式可得到它们之间的关系：

$$\frac{1}{2} \rho w^2 + p = \frac{1}{2} \rho w_1^2 + p_1 \quad (1-1)$$

在任何被流体绕流的物体上，均有这样一些点，在这些点上流体完全滞止，即速度等于零。这些点被称为临界点或驻点。这些点上的压强就是临界压强或驻点压强。对于通过这些点的流线，式（1-1）可写成

$$\frac{1}{2} \rho w^2 + p = p_0 = \text{常数} \quad (1-2)$$

驻点压强 p_0 等于未扰动压强 p 与动压头 $\frac{1}{2} \rho w^2$ 之和，因而又称为总压。式（1-2）说明总压 p_0 沿流线是不变的，这是测量不可压缩流体的压强和速度的基础。

在被绕流物体上任意点的压强 p_1 与未扰动流体压强 p 之差相对于未扰动流体动压头之比值即为该点的压强系数，即

$$C_1 = \frac{p_1 - p}{\frac{1}{2} \rho w^2} \quad (1-3)$$

在驻点上

$$C_0 = \frac{p_0 - p}{\frac{1}{2} \rho w^2} \quad (1-4)$$

据式（1-4）的基本原理，可设计制成各种型式的测量流体总压的探头。总压探头的测压孔就开设在探头正前方的中心点上，当总压探头的轴线平行于流体来流方向时，则此中心点上的流体速度等于零，该点就是驻点。因而该点的测压孔所感受的压强就是流场空间中在该点的总压值。

在某点的压强系数为零时，则

$$C_1 = C_0 \quad (1-5)$$

亦即被绕流物体上某点的压强等于未扰动流体的压强。据这一基本原理，可设计制成各种

型式的测量流体静压的探头。静压探头的测压孔一般开设在探头侧面某个位置上，这一位置要由实验确定。在这一位置上的测压孔经过实验，它应满足压强系数等于零的条件，也就是说流动状态扰动最小，在该点所感受的压强就是流场空间中该点的压强值。

在流体流动的测试技术中，主要是用各种压强探针进行压强、流速、流向以及流量等流动参数的常规测量。压强探针虽有多种型式和结构，但其基本要求是相同的，在选用时应注意。

1. 探针的外形尺寸要小，以减少由于探针存在对流体流态的影响。在附面层内测量压强和流速时要选用微型探针。

2. 测量压强和速度以及流量的探针要求对流动方向的变化不敏感，以减少探针放置不准确而引起的测量误差。但是对于测量流向的探针，则要求对流动方向的变化具有很高的敏感性，以便提高流向测量的精度。

3. 探针的材料和结构要保证具有较好的强度和刚度以及较高的测量精度，在有流速脉动和气流温度急剧变化的情况下，能够进行正常测量，不致于引起过大的误差。

1.1.2 运动流体静压强的测量

静压是气流未被扰动时的压强，当探针与气流同速运动时，不论采用何种型式的探针及探针如何放置，由于对流场没有干扰，所测出的压强均是气流的静压。但实际上不能用这种方法来测量静压，而是设法满足在不干扰流场的条件下进行测量。常用的方法是平行于气流的壁面上开静压孔，使孔的轴线垂直气流方向，此时静压孔所感受的压强即为气流静压。静压探针的型式和大小也有多种，可根据使用条件和测量要求进行选定。

一、L型静压探针

L型静压探针是一端封闭的L型弯管。端部做成半球形，管壁的某一圆周上均布2~7个小孔，小孔的轴线与管轴线严格垂直。小孔距端部及杆部的距离对所测静压值有很大的影响。具有最佳几何关系的L型静压探针如图1-1所示。其最佳的几何关系是：由前缘到静压孔轴线的距离不小于3~4倍探针外径，由静压孔轴线到支杆轴线的距离不小于8~10倍探针外径，静压孔的直径为探针外径的1/10~3/10。

把探针放入气流中测量静压时，由于探针的存在或多或少总是要扰动原来的流态，产生附加的气体动力场，迭加到原来的流场上，使流线发生弯曲，改变了局部的气流压强。这种由探针所引起的扰动是探针几何尺寸的函数。因此探针的尺寸应做得足够小，使它对气流的扰动达到最小。

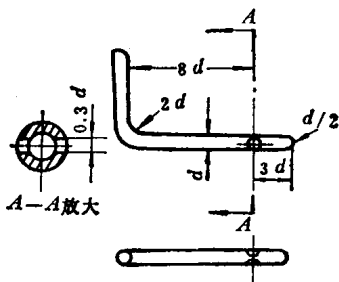


图 1-1 L型静压探针

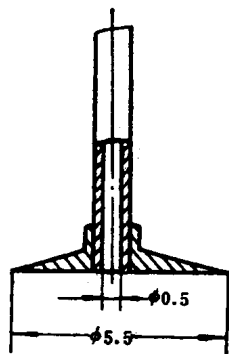


图 1-2 圆盘型静压管

二、圆盘型静压管

除了L型静压探针外，圆盘型静压管也属常见。图1-2所示是典型的圆盘型静压管，将其垂直放入气流中，圆盘中心的测压孔感受到的压强即是气流静压。这种静压管的优点是它的静压读数与偏斜角无关。但对气流在垂直于圆盘端面的平面内偏斜时却极敏感，圆盘直径愈小则其测量误差愈大。圆盘直径一般取15~20mm。这种静压探针要求支杆与圆盘尽量垂直，放入气流中也要保证圆盘端面与来流方向平行。

在低速流场中，可先测量流体总压 P_0 和静压 P ，然后根据伯努利方程式确定速度探针所在位置的流速 w ，即

$$w = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_0 - P) K_w} \quad (1-6)$$

式中 K_w ——速度探针的校正系数。

为了测量动压 $(P_0 - P)$ 或单独测量总压 P_0 和静压 P ，可采用下述三种方法。

1. 利用壁面静压孔测量平均静压，利用总压探针测量总压。

在均匀的低速流场中，静压沿着垂直于流速向量的截面内保持不变（无横向静压梯度）的情况下，利用这个方法测量管道横断面上任意一点的速度，可得到较满意的结果。

2. 利用总压探针和静压探针分别测量气流的总压和静压，如图1-3所示。

3. 利用专门设计的速度探针——皮托管，同时测量总压和静压、或两者之差——动压。

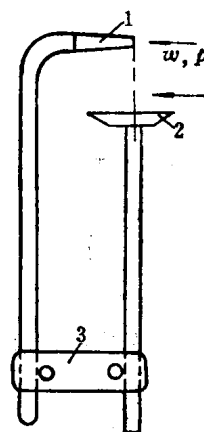


图 1-3 分别测量总压和静压的速度探头
1—L型总压探针，2—圆盘型静压探针，3—支架

§1.2 二维测压管测量二维速度场

气流的速度是一个矢量，它具有大小和方向，所以测量气流速度也应包括其大小和方向。速度的大小可在被测点上分别测得总压和静压后计算求得，也可将总压和静压管结合在一起组成所谓的测压管来进行测量。气流的方向可用方向管进行测量。根据气流速度的二维性或三维性，可设计制成二维方向管和三维方向管。如在研究燃烧器（燃烧室）出口气流速度场时，需要测量三维空间的气流速度，既要测试流速的大小，又要确定流速的方向，此时需采用特殊的测试装置。事实上如果将总压、静压和方向管组成一体，组装成组合测计，如此就可将气流的总压、静压、速度大小和方向同时测得。

根据流体力学原理，如果在规则形状的物体表面开两个对称的小孔，气流流向正对其对称轴，则两孔所感受的压强相等；如果气流相对于对称轴有一偏角，则两孔感受的压强不等。根据这一原理设计出各类型的方向管以测量气流的方向。若在方向孔的对称轴上开一测孔，则此孔感受的即为气流总压，而方向孔上感受的压强应为气流总压与静压间的某一压强值。因此，只要事先对测压管经过标定，开有三个测孔的测压管可同时测量出平面气流中的总压、静压、气流速度的大小和方向。此测压管被称为二维测压管。常用的二维测压管见图1-4。

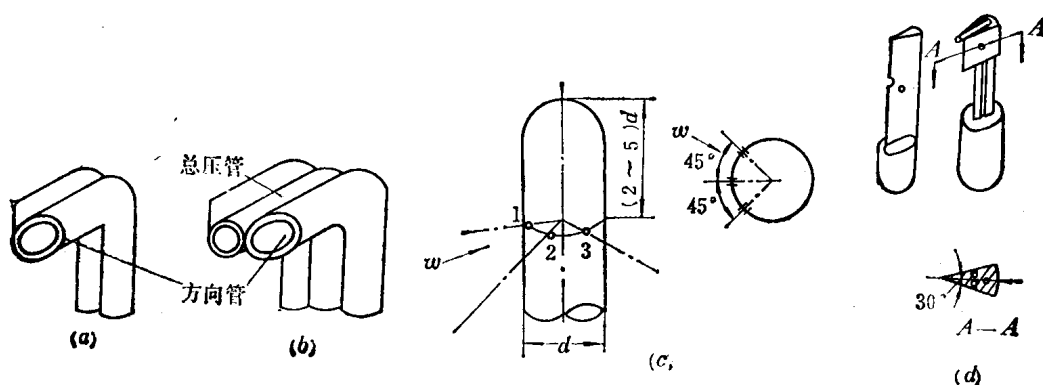


图 1-4 二维测压管

(a) 二管型; (b) 三管型; (c) 圆柱三孔型; (d) 模型

1.2.1 圆柱三孔型测压管

在圆柱体上按一定角度开设三孔, 组成圆柱三孔型测压管 (见图1-4、c)。测压管两个方向孔的开孔要求是当气流方向与这两个孔的中心分角线有微小偏差时, 此两孔间的压强差为最大值。亦即与总压管和静压管相反, 方向孔应该对气流的方向性愈敏感愈好。

据理想不可压缩流体绕流无限长圆柱体, 求得的沿圆柱表面压强分布可知: 当两方向孔在同一平面内呈 90° 时, 对方向性最为敏感。在两方向孔 (1 和 3) 的中心开以总压孔 2, 组成了圆柱三孔测压管。孔 2 应尽可能设在 1、3 孔的中心位置, 孔的表面要光滑, 使孔尽可能与圆柱表面垂直。为了消除测压管末端绕流对测孔的影响, 末端至少留设的长度应为管径的 2~5 倍。

在测量时将测压管置入气流中, 转动测压管使两方向孔 1 和 3 所感受的压强相等。此时总压孔 2 所感受的压强 p_2 即为气流总压 p_0 , 方向孔 1 或 3 所感受的压强 p_1 或 p_3 与 p_0 相配合, 即测得气流速度 w 和静压 p 。根据不可压缩流体属绕流无限长圆柱体, 其流速

$$w_r = 0$$

与轴线成 φ 角的流速

$$w_\varphi = -2w \sin \varphi$$

利用不可压缩流体的伯努利方程, 可得沿圆柱表面压强分布

$$p_\varphi = p + \frac{1}{2} \rho w (1 - 4 \sin^2 \varphi) \quad (1-7)$$

当 $\varphi = 45^\circ$, 则此条件下

$$p_0 - p = p_1 - p = \frac{w^2}{2} \rho (1 - 4 \sin^2 45^\circ) = -\frac{w^2}{2} \rho$$

又因

$$p_2 - p = \frac{w^2}{2} \rho$$

所以

$$p_2 - p_1 = \rho w^2$$

从而

$$w = \sqrt{\frac{p_2 - p_1}{\rho}} \quad (1-8)$$

读得测压管某原始位置到转动至最后位置间的角度, 即测得气流的方向。

事实上由于制造上的原因, 各孔的几何尺寸会产生一些误差, 也有一些无法避免的随

机因素。所以孔 2 测得的压强 p_2 不能严格代表 p_0 , ($p_2 - p_1$) 更不是直接求得的气流速度与静压, 亦即每只测压管在使用前必须经过标定, 且每只测压管均有其自己的校正曲线。

测压管的校准是在标准风洞中进行的, 为应用方便, 将各种角度正负方向及孔号统一规定如图 1-5 所示。为了在测压管上规定一原始位置, 一般在管上焊上一方向块, 以方向块上的平面孔中心线 (沿长度方向) 作为测压管的几何轴线。当然, 在焊接方向块时应尽可能使其与总压孔 2 的方向一致。

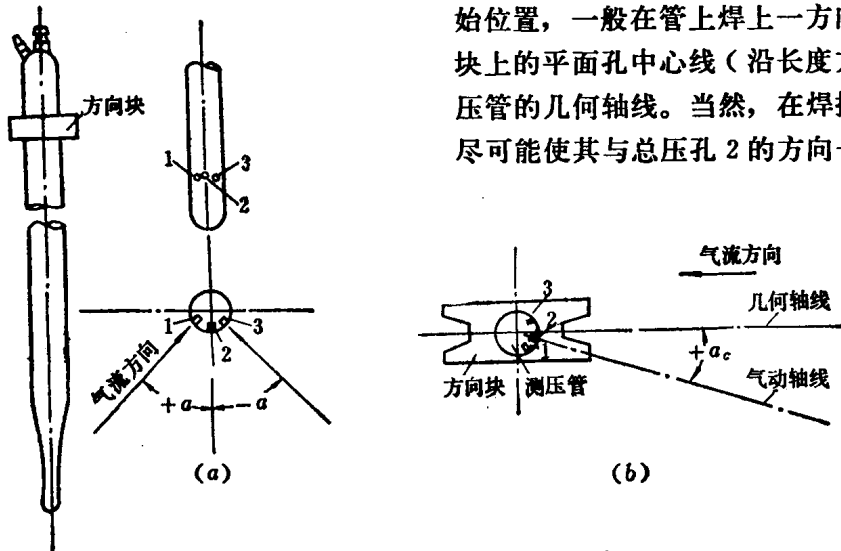


图 1-5 测压管孔号及其校准角
(a) 孔号及 α 符号; (b) 校准角

测压管的校准曲线有各种表示法, 但均基于同一基本原理。校准曲线应有方向特性、总压特性和速度特性。

一、方向特性

$$X_\alpha = \frac{p_3 - p_1}{2p_2 - p_1 - p_3} = f(\alpha) \quad (1-9)$$

可以证明, 对一只已制成的测压管, 其方向特性 X_α 只是方向偏角 α 的函数。

二、总压特性

$$X_0 = \frac{p_0 - p_2}{2p_2 - p_1 - p_3} = f_2(\alpha) \quad (1-10)$$

三、速度特性

$$X_w = \frac{p_0 - p}{2p_2 - p_1 - p_3} = f_3(\alpha, M) \quad (1-11)$$

式中 p_0 和 p 是校准风洞中的总压和静压, 由其它方法测得。而 p_1 、 p_2 和 p_3 是被校准测压管 1、2、3 孔中感受的压强。速度特性 X_w 与气流 M (马赫数) 关系甚大, 在使用中如 $M > 0.3$, 建议应用

$$\begin{aligned} \alpha > 0 \text{ 时} & \quad p_3/p_2 = f(p/p_0, \alpha) \\ \alpha < 0 \text{ 时} & \quad p_1/p_2 = f(p/p_0, \alpha) \end{aligned}$$

理论和实验表明, M 数对测压管的校准曲线有影响, 特别是当气流偏角 α 较大时, 应在可能条件下由实验作出 M 数修正以备应用。

1.2.2 三管型测压管

圆柱三孔型测压管头部是由机械加工而成, 故表面形状比较规则且质量较有保证。其

角度误差值随着感受头直径缩小而减小。感受头外径一般是3~5mm, 最小可作到2.5mm, 但其外径仍较大, 易干扰气流。为避免这些缺点可采用三管型测压管。

三管型测压管是将三根小管焊接在一起而组成, 见图1-6。其两侧方向管应尽可能地保持相等的斜角, 斜角可以是外斜也可以是内斜, 总压管可以作成在两方向管中间, 也可焊接在两方向管的下方或上方。但要求小孔一定要保持锐边并力求光洁。为增加感受头的刚度, 可在其上焊以加强筋。为避免杆柄及加强筋对测压的影响, 测孔距杆柄和加强筋的距离分别是管径的6倍和12倍。

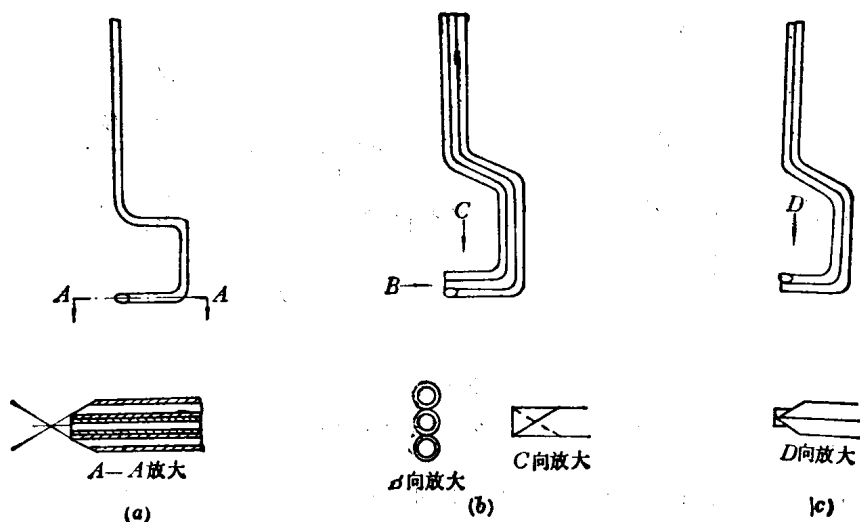


图 1-6 三管型测压管的型式
(a) 横三孔, (b) 竖三孔, (c) 下三孔

三管型测压管的性能及校准曲线与圆柱三孔测压管相类似。由于其头部较小, 更适应于高马赫数及气流压强梯度较大的气流测量。它的缺点是刚性较差, 且方向管斜度较大(一般为45°), 气流较易脱流, 在偏角 α 较大的场合其测量值不太稳定。

1.2.3 楔型测压管

在跨音速区为避免测压管前产生波阻大的脱体激波, 可应用楔型感受头的测压管, 见图1-4、d。楔角要尽量小(一般 $\leq 30^\circ$)。由于尖劈尺寸小, 气流不易受堵塞, 适合于跨音区总压、静压和速度方向的测量。

1.2.4 两管型方向管

有时气流流场中只需测量方向, 可用两管型方向管。方向管的斜角为45°, 两管要尽量对称。

方向管的校准曲线其纵座标为 $(p_1 - p_s) / \frac{w^2}{2} \rho$, 横座标为偏角 α 。

1.2.5 二维测压管的应用

在工程实践或科学试验中, 经常应用二维复合测压管以测量气流的总压、静压、速度大小和方向。应用时有直接测量法和间接测量法两种。在应用前均需有校准曲线。

一、直接测量法

将测压管置入被测气流中, 使三孔平面与气流平面一致。记录下方向块在某一特定位置

置下测压管夹具（又称座标架）的刻度，此时的角度称为 α_0 。

转动测压管使方向管的指示值 $p_1 = p_2$ ，此时记下座标架的刻度，以 α_c 表示，此时气流方向相对于 α_0 转动了 $(\alpha_c - \alpha_0)$ 。同时记录 p_2 和 $p_1 (= p_3)$ ，按总压特性线求得

$$p_c = X_{\alpha_c, \alpha_0}(2p_2 - p_1 - p_3) + p_2$$

再按速度特性线求得静压

$$p = p_c - X_{\alpha_c, \alpha_0}(2p_2 - p_1 - p_3)$$

此直接测量法比较准确。但是在测量中需反复转动测压管以调整 $p_1 = p_3$ ，因此花费时间较多，增加试验费用。有时在结构上或其它原因不允许在测试中转动测压管，这就需要应用间接测量法。

二、间接测量法

将测压管置入气流，使两方向孔的中心线尽可能地与气流方向一致，记录三个孔的压强值 p_1 、 p_2 和 p_3 。

根据测压管的方向特性线求得被测气流与测压管气动轴线间的夹角 $\alpha (X_{\alpha} \rightarrow \alpha)$ 。

根据总压特性及偏角 α 求得气流总压 $(\alpha \rightarrow X_{\alpha} \rightarrow p_c)$ 。

最后根据偏角 α ，总压 p_c 及压比 p_1/p_2 或 p_3/p_2 求得静压 $p(\alpha, p_1/p_2 \rightarrow p/p_c \rightarrow p)$ 。

气流的方向首先确定方向块的几何轴线与气动轴线间的夹角 α_c ，这是在校准风洞中进行的（其方向正负号见图1-5），实际气流相对于方向块基准（又称几何轴线）的夹角应为 $\alpha + \alpha_c$ 。当然也可以绕过 α_c 直接按几何轴线进行标定和测量。

间接测量法可缩短测试时间，对座标架要求可降低。其缺点是在反复查对特性曲线时易造成误差，特别是气流方向的测量误差较大，一般要达到 1° 左右。

§1.3 三维测压管测量三维速度场

测量空间气流的速度大小和方向以及气流压强可用球型五孔测压管、五管三维测压管、楔型五孔三维测压管。在气流方向变化不大时还可用球型七孔三维测压管。

三维测压管实质是用两个二维测压管相互垂直地组合在一起，共同利用一个中间小孔，所以共有五个孔，可用来确定气流速度在两个相互垂直平面内的大小和方向。

1.3.1 球型五孔测压管

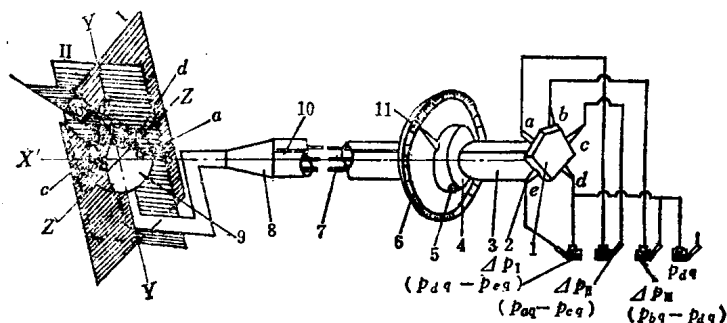


图 1-7 五孔球头测速管原理图

I—子午面，II—赤道面；

1—分配器；2—接头；3—干管；4—导向套管；5—锁紧螺丝；6—测角器；7—传压管；8—过渡接管；9—球型探头；10—键槽；11—指针

球型五孔测压管是由球型探测头、干管和测角器三个主要部分组成,图1-7所示为此球型五孔测压管的测量原理图。

球型探头 9 由两个半球壳合成,迎向气流的半球上钻有五个孔 a 、 b 、 c 、 d 、 e , 它们位于两个相互垂直的平面上,孔 b 位于球体正中心。如果以干管 3 的轴线转动为基准,则孔 a 、 b 、 c 在球体赤道面上;孔 d 、 b 、 e 在球体子午面上。孔 a 、 c 及孔 e 、 d 与中心孔 b 对称,并成 45° 。为减少过渡接管 8 对气流产生干扰作用,将其作成弯曲的 U 型与干管相接。干管中心线通过球体的正中心,其另一端与带五个接头的分配器 1 相接,分配器上的每一个接头均刻有与测孔相应的标号。

当空间气流流向球型探头时,对球面不同方位产生不同的压强,各测孔感受的压强为:

$$\left. \begin{aligned} p_{a,q} &= p + k_a \frac{w^2}{2} \rho \\ p_{b,q} &= p + k_b \frac{w^2}{2} \rho \\ p_{c,q} &= p + k_c \frac{w^2}{2} \rho \\ p_{d,q} &= p + k_d \frac{w^2}{2} \rho \\ p_{e,q} &= p + k_e \frac{w^2}{2} \rho \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

式中 $p_{a,q} \sim p_{e,q}$ ——相应于各测孔的总压, Pa;
 p ——测点处静压, Pa;
 w ——流向测点的气流速度, m/s;
 ρ ——气体密度, kg/m³;
 $k_a \sim k_e$ ——相应于各测孔的系数。

转动测速管,使 $p_{d,q} = p_{c,q}$ ($\Delta p_{ii} = 0$), 此时球型探测头的子午面必迎向气流(气流

流速矢量在子午面内)。因为指针 11 与干管 3 是连在一起的,所以通过指针在测角器 6 上的转动,可测得 α 角,即气流与某一基准子午面角的角度。如此只要再测得 δ 角就可把气流速度的方向确定(图1-7)。并读出 Δp_{ii} 与 Δp_{iii} 值,又因

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_{ii} &= p_{a,q} - p_{c,q} = (k_a - k_c) \frac{w^2}{2} \rho \\ \Delta p_{iii} &= p_{b,q} - p_{d,q} = (k_b - k_d) \frac{w^2}{2} \rho \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

$$K_\delta = \frac{p_{a,q} - p_{c,q}}{p_{b,q} - p_{d,q}} = \frac{k_a - k_c}{k_b - k_d} \quad (1-14)$$

式中 k_δ 为 δ 角系数,它是气流与赤道面之间夹角 δ 的函数,即 $K_\delta = f(\delta)$, 所以 δ 角

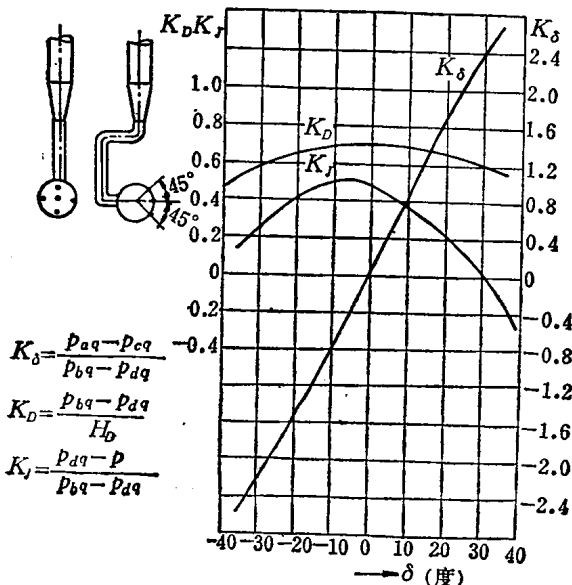


图 1-8 球型五孔测压管特性曲线