

高等学校试用教材

透平压缩机测试技术

西安交通大学透平压缩机教研室 编著

机械工业出版社

前 言

随着透平压缩机的发展,在分析改进原有机器设备,研究设计新型机器时,熟悉和掌握透平压缩机试验中基本参数的测量是非常重要的方面。为了适应四个现代化发展的需要,根据透平压缩机专业教学计划的要求,并总结了过去教学和科研中的实践经验,在我校《透平压缩机试验技术》一书的基础上,经过修改、补充,编写了本书。

本书目的是通过对透平压缩机试验中基本参数测试技术的讲述,使读者能初步掌握它的基本原理,并对探针的设计、仪表的选择和使用,以及减少测量误差等有一定的了解。但是限于编者的水平、掌握的资料不全以及篇幅的限制,不可能介绍得十分详尽。

参加本书编写的有姜桐、苗永森、朱复中同志。曹淑珍同志参加了校对工作。全书由华中工学院压缩机教研室负责审稿,他们对编写工作提供了宝贵的意见。在编写过程中,也得到一些单位的支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于我们业务知识有限,书中难免存在缺点和错误,恳切希望广大读者批评指正。

西安交通大学透平压缩机教研室

1979年11月

目 录

前言

第一章 压力的测量	1
第一节 测量压力的基本原理	1
第二节 气流压力的测量	3
一、不同情况的气流压力测量	3
二、常见的测量静压的探针	4
三、影响静压测量的一些因素	6
第三节 滞止压力的测量	8
一、常见的测量总压的探针	8
二、总压探针的选用	11
三、影响总压测量的一些因素	11
第四节 压力指示仪器	12
一、液体压力计	12
二、弹性元件压力计	16
三、自动记录仪	16
第二章 气流速度和方向的测量	18
第一节 气流速度的测量	18
一、速度探针	18
二、可压缩性对气流速度测量的影响	20
第二节 测向器及平面气流方向的测量	22
一、旗式测向器	22
二、空气动力测向器——方向探针	22
三、平面流动中气流方向的测量	24
第三节 空间气流方向的测量	33
一、测量方法	33
二、测量探针	33
第三章 温度的测量	43
第一节 几个概念	44
一、气流温度(静温) T_s	44
二、滞止温度(总温) T_0	44
三、热感受器温度 T_p	44
四、热感受器温度与气流参数的关系	45
第二节 测量温度感受器	46
一、液体温度计	46
二、热电偶总温探针	48
三、电阻温度计	57
第四章 空气动力探针的校正	58

第一节 校正目的	58
一、总压探针的校正	58
二、静压探针的校正	59
三、速度探针的校正	60
四、方向探针的校正	62
五、二元探针的校正	62
六、不对向探针的校正	63
第二节 校正设备	63
一、吸入式校正风管	63
二、射流式(吹式)校正风管	65
三、吸入射流式校正风管	67
第三节 校正方法	68
一、在吸入式校正风管中校正探针的方法	68
二、在射流式校正风管中校正探针的方法	69
三、校正角的确定	70
四、有关校正的一些问题	71
第五章 流量的测量	73
第一节 流量节流装置	73
一、基本原理与流量计算公式	73
二、流量系数的确定	75
三、标准节流装置	77
四、流量节流装置在管道中的安装	78
五、流量节流装置的设计计算问题	80
第二节 利用测量气体的速度确定流量	82
第三节 转子流量计	83
第六章 转速的测量	86
第一节 计数式转速计	86
一、钟表式转速表	86
二、机械计数式转速表	87
三、数字式转速计	87
第二节 瞬时式转速计	89
一、离心式转速表	89
二、发电机式转速表	90
第三节 同步式转速计	92
一、频闪式测速仪	92
二、利用日光灯测量转速	93
第七章 功率的测量	95
第一节 测量扭矩	95
一、扭力架测功法	95
二、扭力测功器	96
第二节 压缩机耗功的确定	100
一、利用测量电动机的电功率确定压缩机耗功	100

二、用热平衡法确定压缩机的耗功	102
第三节 试验台活动部分的校正	104
第八章 振动的测量	107
第一节 振动测量方法	107
一、质量——弹簧型测振器	107
二、机械振动的电测法	108
第二节 振动分析	114
一、振动频率、周期和相位的确定	114
二、频谱分析	115
三、基本测量系统	118
第九章 噪声的测量	119
第一节 噪声的基本物理量及其计算	119
一、声压与声压级	119
二、声强与声强级	120
三、声功率、声功率级和比声功率级	120
四、声压级等的合成、分解与平均值计算	121
五、不同声场中的声功率与声压级之间的关系	123
第二节 噪声的频谱与噪声的评定	124
一、噪声的频谱	124
二、噪声的评定	125
三、噪声测量仪器	127
第三节 透平压缩机械的噪声性能试验	128
一、透平压缩机组的噪声性能测定	128
二、通风机噪声性能测定	130
第十章 测量误差	134
第一节 测量误差及其分类	134
一、系统误差（固定误差）	134
二、过失误差	135
三、偶然误差（或然误差）	135
四、误差的表示方法	136
五、间接测量中误差的确定	137
第二节 测量误差分析	138
一、测量压力时的误差	138
二、确定气流方向的误差	138
三、测量温度的误差	139
四、测量流量的误差	141
五、功率测量的误差	143
六、模型级特性的误差	144
第十一章 相对运动中气流参数的测量	147
第一节 气压法	147
一、气压法的基本原理	147
二、在相对运动中测量气流参数的压力感受元件	148

三、测压密封器	149
四、离心力对压力测量值的影响	151
第二节 电测法	152
一、测量系统	152
二、传感器	152
三、引电器	153
四、记录器	156
第十二章 不稳定气流参数的测量	157
第一节 热线风速仪	158
一、基本原理	158
二、工作方法	160
三、热惯性	161
四、基本电路和特性	162
五、热线风速仪的方向特性	164
六、探针结构	165
第二节 不稳定压力的测量	166
一、压力传感器的基本特性	166
二、压力传感器的型式	168
三、压力传感器的校正	171
第十三章 激光多普勒技术测量流速简介	175
一、激光的特性	175
二、激光多普勒效应测量流速	175
三、激光多普勒风速仪与热线风速仪简单比较	180
主要参考文献	181
附图 标准节流件的计算图	183
附录	184
I 国际单位制及其换算	184
II 气体动力函数表	190
III 常用热电偶的热电性质	193

第一章 压力的测量

压力就是单位面积上的力（牛顿/米²）。它是通常称为“接触力”的一种形式，而不同于力场作用下的力，例如重力或磁力。压力是一个有势的力，在一个过程中，压力的变化只决定于过程的始终，而不决定于过程本身的性质。所以，压力是决定气体状态的一个参数。

对理想气体而言，压力的大小是下述因素的函数：分子运动的平均速度；在任意给定的时间内，撞击在一定面积上的分子数。

分子运动的速度是绝对温度的函数。撞击的分子数则是气体密度的函数。因此，压力可以表示成：

$$pv = RT$$

或

$$p = \rho RT \quad (1-1)$$

式中 ρ —— 气体密度（公斤/米³）；

v —— 气体比容（米³/公斤）；

R —— 气体常数（焦耳/公斤·K）；

T —— 绝对温度（K）。

压力的单位：在国际单位制（SI）中，采用牛顿/米²（N/m²）作为压力的单位，或称为帕斯卡，并用符号 Pa 表示。也可以用毫米水柱（mmH₂O）和毫米汞柱（mmHg）表示。

在空气动力学中，压力是非常重要的参数。它不仅决定气体的状态，而且决定位于气流中的物体表面上的“接触力”的大小。在透平压缩机试验中，经常需要测量通流部分中任意一点的压力。

在空气动力学的试验研究中，必须把气流静压与滞止压力区别开来。

气流静压 p ，是在气流中某一点的气体，作用在通过该点并顺流线方向的无限小和薄的壁面上的压力，也就是在一个流动气体中的真实压力。

滞止压力 p_0 ，是指如果一束气流在没有外功的情况下，可逆地、绝热地减速到速度等于零而产生的气体压力，也就是气体的动能全部变为压力能。

第一节 测量压力的基本原理

在试验空气动力学测量气流速度和压力的各种方法中，使用最广泛的是“气压”法。它是基于测量位于气流中的感受器表面上一定点的压力，而这种感受器就叫做压力探针。压力探针的基本原理是根据伯努利方程式，即理想流体绕物体流动的位流理论。

根据一元稳定流动的微分方程式，可以写出下面的式子：

$$c dc + \frac{dp}{\rho} = 0 \quad (1-2)$$

在等熵流动的情况下，沿流管的两个任意截面 1-1，2-2 将上式进行积分，得到伯努利方程的一般表达式：

$$\frac{c_1^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{c_2^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho_2} \quad (1-3)$$

因为 $\frac{p}{\rho} = RT, \quad c_p = \frac{k}{k-1} R, \quad a^2 = kRT$

所以, 式 (1-3) 可以写成下面的形式:

$$\frac{c^2}{2} + \frac{a^2}{k-1} = \frac{c^2}{2} + c_p T = \text{常数} \quad (1-4)$$

式中 c —— 气流速度 (米/秒);
 a —— 音速 (米/秒);
 c_p —— 等压比热 (焦耳/公斤·K);
 T —— 气流温度 (K);
 k —— 绝热指数;
 ρ —— 气体密度 (公斤/米³)。

在气流速度较小时, 可以不考虑气体的可压缩性, 并认为密度 $\rho = \text{常数}$ 。那么将式 (1-2) 积分, 可以得到:

$$\frac{c_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{c_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} = \text{常数} \quad (1-5)$$

即 $p_0 = \frac{\rho}{2} c^2 + p_s = \text{常数} \quad (1-6)$

方程式 (1-6) 说明总压力沿流线不变。

把它应用于未扰动气流的压力 p_s 和速度 c , 以及浸没于气流中的任意物体附近的压力 p_{s1} 和速度 c_1 (如图 1-1 所示), 它们之间的关系是:

$$\frac{\rho c^2}{2} + p_s = \frac{\rho c_1^2}{2} + p_{s1} \quad (1-7)$$

在任何被气体绕流的物体上, 都有这样一些点, 在这些点上气流完全滞止, 即速度等于零, 这些点即称为临界点。这些点上的压力也就是滞止压力。对于通过这些点的流线, 式 (1-7) 可以写成:

$$\frac{\rho c^2}{2} + p_s = p_0 \quad (1-8)$$

方程式 (1-8) 就是测量不可压缩气流压力和速度的气压法的基础。

被绕流物体上任意点的压力 p_{s1} 与未扰动气流压力 p_s 之差, 相对未扰动气流速度头之比值称为压力系数。

$$\bar{p} = \frac{p_{s1} - p_s}{\frac{\rho c^2}{2}} \quad (1-9)$$

在临界点:

$$\bar{p} = \frac{p_0 - p_s}{\frac{\rho c^2}{2}} = 1 \quad (1-10)$$

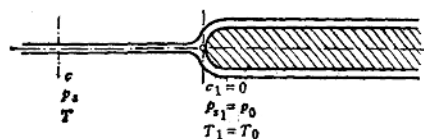


图1-1 测量原理图

当 $\bar{p} = 0$ 时, 则被绕流物体上某点的压力等于未扰动气流的压力。

根据上述基本原理, 就可以设计制作各种各样测量气流压力 (静压), 滞止压力 (总压) 以及它们之差的空气动力探针。

对测压探针的要求如下:

1. 在惯性不大的情况下, 探针感受部分的尺寸要求尽量小;
2. 对气流偏斜角 α , δ 的不灵敏度要求最大 (图 1-2);

大 (图 1-2);

3. 探针的校正系数随时间稳定, 在气流 M 数变化较大的范围内, 校正系数不改变;

4. 探针感受孔到探针转轴的距离应当最小;

5. 探针应有足够的强度;

6. 工艺性好, 制造简单。

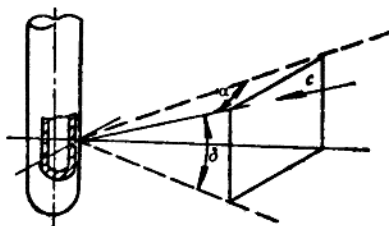


图1-2 气流偏斜角

第二节 气流压力的测量

一、不同情况的气流压力测量

气流压力的测量通常称作静压测量。在测量静压时应当区分两种情况: 一是测量被绕流物体表面上某点的压力或流道壁面上气流的压力; 二是确定气流中某点的压力, 也就是运动气流的压力。

第一种情况, 可以利用在通道壁面或被绕流物体表面开静压孔的方法进行测量。为了得到可靠的结果, 开孔时应当满足下列条件:

1. 壁面开孔的直径不应超过 1.5 毫米, 最好是 0.5 毫米;
2. 孔的边缘不应有毛刺和突出部;
3. 测量孔的轴线应当垂直于壁面。

对于第二种情况, 可以利用一些具有一定形状, 尺寸较小的探针插入气流中, 而且不改变压力测量区域的流线, 进行气流压力的测量。

如果把壁面静压与气流压力 (气流中的静压) 混淆起来, 可能引起 1 ~ 3 % 的误差, 这与气流速度有关^[19]。

如果不考虑由孔引起的微小扰动, 以及由附面层所产生的扰动影响, 那么测量未扰动气流静压的孔, 最好开在具有直线形壁面处。因为在这里全部流线都是直的, 横向速度梯度并不改变测量孔处静压的大小 (图 1-3 a)。

如果流线是弯曲的, 那么在垂直于未扰动气流方向、静压是变化的。在一般情况下, 由静压孔所测量的压力, 不同于沿流线方向其它点的压力 (图 1-3 b)。

图 1-4、图 1-5、图 1-6 分别表示气流绕圆柱形、球形、半球形物体流动时, 沿表面的压力分布曲线。分析这些曲线可以看出: 圆柱形、球形、半球形可以用来测量气流压力和滞止压力。实际上, 在具有圆柱形、球形、半球形的探针表面上, 在压力系数 $\bar{p} = 0$ 的点, 测量得到的是气流的真实压力, 即未扰动气流的压力。而在 $\bar{p} = 1$ 的临界点, 测量得到的则是总压。

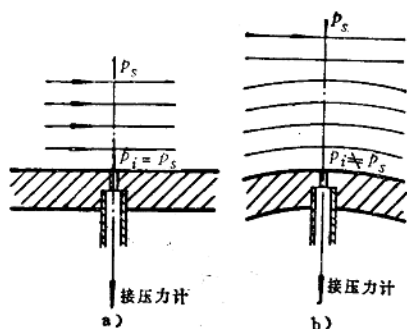


图1-3 壁面形状对测量静压的影响

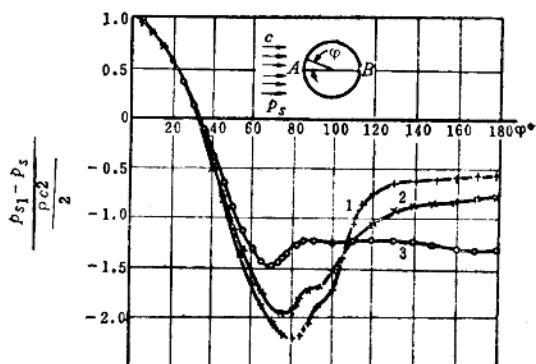


图1-4 沿圆柱表面压力分布

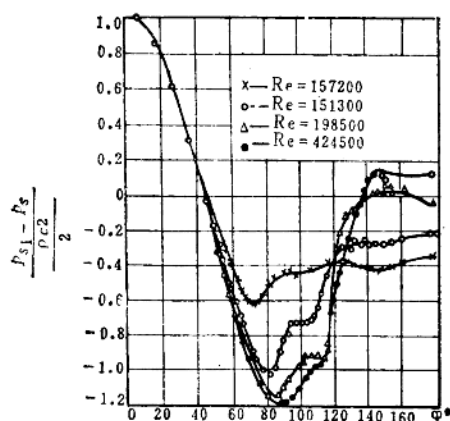
1— $Re = 2.12 \times 10^5$ 2— $Re = 1.66 \times 10^5$ 3— $Re = 1.06 \times 10^5$ 

图1-5 沿球形表面压力分布

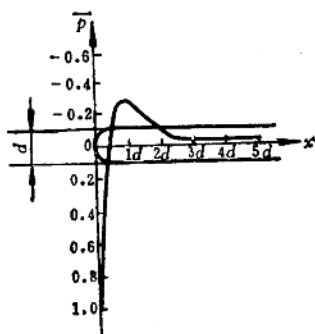


图1-6 半球形表面压力分布

二、常见的测量静压的探针

1. L形探针

这是最简单的测量静压的探针。如图 1-7 所示，探针是用细的圆管弯成 L 形，头部做成半球形，测量压力的孔布置在探针的侧表面，距离端部三个管径的地方。孔的中心离支杆的距离为 8 个管径。这种探针感受部分的轴向尺寸较大，对气流方向变化的不灵敏性当 $\lambda \leq 0.85$ 时，在 $\alpha = \pm 6^\circ$ 的范围。所以，它适用于在压缩机进口和出口测量气流静压，因为在这里，探针的布置不受尺

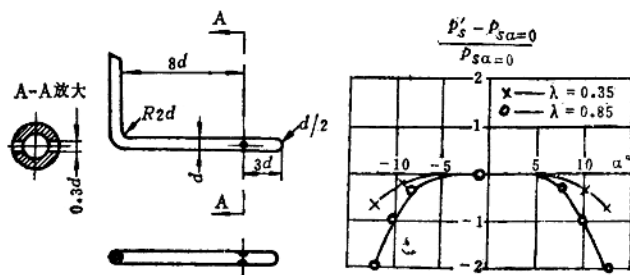


图1-7 L形静压探针

寸的限制, 而且气流的旋绕也不大。

图 1-7 中速度系数 λ 为:

$$\lambda = \frac{c}{a_*} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

式中 a_* ——临界速度。

2. 圆柱形探针

它是在圆柱形管子上背气流方向的一面, 开了一个测静压的孔, 如图 1-8 所示。

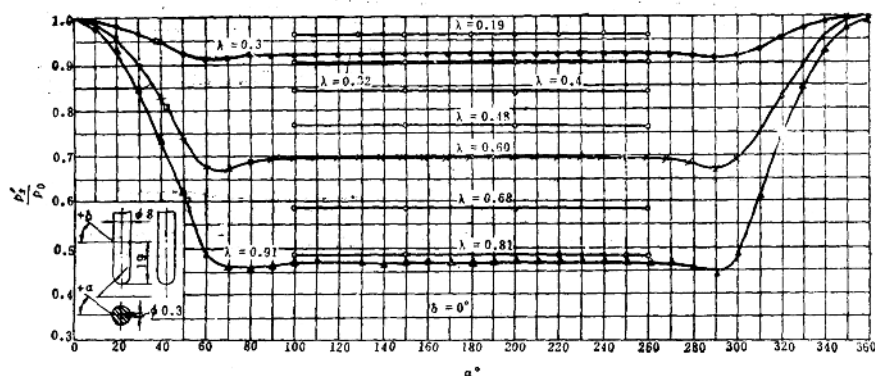


图1-8 圆柱形探针

从图上可以看出: 在一定的 λ 数时, 由探针测量的压力 p_i 在 $100^\circ < \alpha < 270^\circ$ 的范围内都保持不变, 并且仅随 λ 数的增加而减小。由于探针的这两个特性, 可以用在二元气流中测量静压。当 $\lambda \leq 0.9$ 时, α 角在 100° 到 270° 的范围内, 压力的绝对值与气流方向的变化无关。

3. 盘形探针

盘形探针如图 1-9 所示。优点是它的读数与 α 角无关。缺点是加工精度和准确性要求高, 对 δ 角的灵敏度高 (对 δ 角的不灵敏范围为 $\pm 1.5^\circ \sim 2^\circ$)。所以使用时必须格外小心, 以免损坏探针盘, 否则, 即使轻微的损坏都要影响测量。

4. 导管式探针

导管式探针如图 1-10 所示。这种探针主要用在三元气流中测量静压, 它对气流方向的不灵敏度是 α

$= \pm 30^\circ$, $\delta = \pm 20^\circ$ 。由于在导管内从收敛段过渡到圆柱形部分的加工比较复杂, 探针的尺寸不能做得太小, 因而使它的应用受到限制。

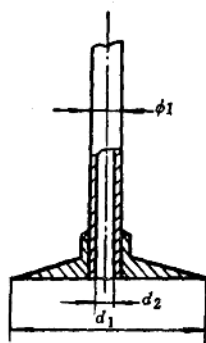


图1-9 盘形探针

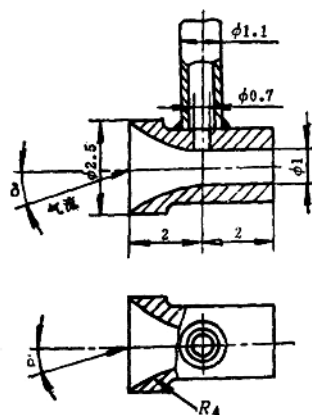


图1-10 导管式探针

三、影响静压测量的一些因素

1. 固有误差

把探针插入气流中测量静压时, 由于探针的存在, 多少总是要扰动原来的流动状态, 产生附加的空气动力场, 叠加到原来的流场上, 使流线发生弯曲, 改变了局部的气流压力。这样, 由探针所测量的气流压力 p_{11} , 就与未扰动气流压力 p_1 不同。这种由探针所引起的扰动 (因而影响测量气流压力的正确性) 是探针几何尺寸的函数。图 1-11 表示探针头部和支杆对流线的扰动情况。因此, 测量静压的探针应当做得尺寸足够小, 使得它对气流的扰动最小。

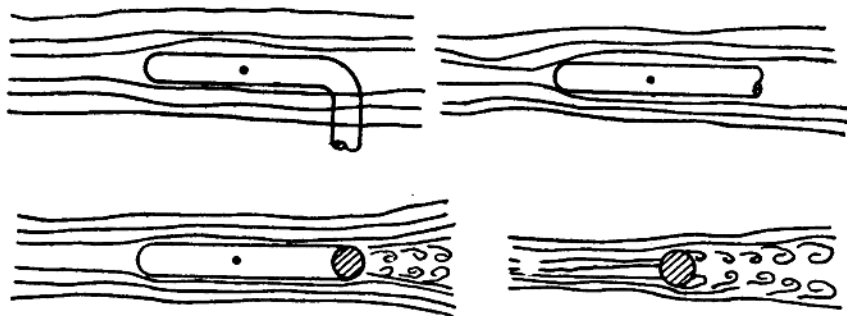


图1-11 探针头部和支杆引起的扰动

实际上, 对任何一定尺寸的探针, 当气流流过它的前缘时, 都要把流线分开, 改变了局部的压力。前缘的影响在几个探针直径的地方 (下游) 还可感觉到, 探针杆子的存在, 引起压力局部的变化并扩大到它的前面 (上游)。从图 1-12 可以看出这些因素对气流压力测量的影响。根据这个图也可以估计测压孔位置的误差。探针头部和支杆对半球体表面压力孔测量的影响是相反的。由头部影响所产生的误差总是负的, 而由杆子的影响所产生的误差总是正的。利用这一点, 就可以合理地布置静压测量孔的位置, 使得头部和杆子所产生的影响最小。许多资料推荐, 对于 L 形静压探针, 最佳的几何关系: 由前缘到测压孔中心的距离 $x_h \geq (3 \sim 6.5)d$, 由测压孔中心到杆子中心的距离 $x_s \geq (3 \sim 6)d$, 测压孔直径 $d_1 \approx (0.1 \sim 0.3)d$ 。 d 是探针外径。

2. 压力孔引起的误差

在透平压缩机的通流部分中, 我们可以找到一些截面, 在这里气流压力 (静压) 的变化很小。例如, 在离心压缩机的具有平行壁面的扩压器中, 在级、级组和压缩机的进口和出口截面等。这时, 测量静压比较简单而方便的方法是在壁面开静压孔, 而不需要任何其它的探针。

但是, 由于孔本身对流动的影响, 产生了另外一种现象: 由静压孔测量的压力与气流的真实压力不同。原因是当壁面开孔后, 气流流过时使流线有一些弯曲 (如图 1-13 所示)。流线

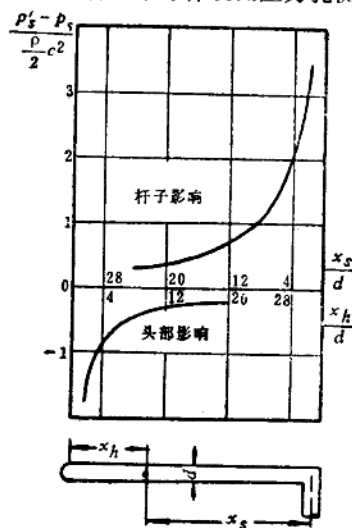


图1-12 静压测量的固有误差

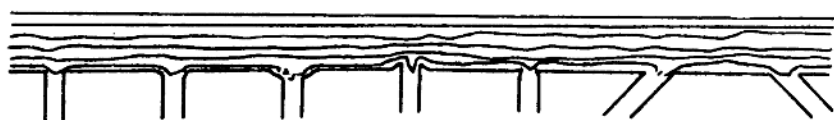


图1-13 不同形状的孔对流动的影响

沉到一个孔里产生离心力场并增强了孔的压力，因而超过气流压力。超过的值决定于气流速度和孔的几何形状。在某些情况下，气流从孔口的前缘分离，就使得孔内的压力低于气流压力。图1-14表示孔的形状对静压测量的影响。测压孔的直径应当在0.5~1.0毫米的范围内选择。小于0.5毫米不推荐，因为孔易于堵塞，而且惯性增大；孔径大于1毫米也不推荐，因为这时测量的不仅仅是静压，而且还有部分速度头。根据文献[18]介绍：当孔径由0.15毫米增加到1.5毫米时，由速度头所引起的测量误差由0增加到1.1%。而进一步增加孔径到3毫米时，测量误差增加不大。随着 M 数的增加，测量误差同样增大。

图1-15给出了水和空气在直径为25.4毫米的经过研磨的光滑管内流动时，测量静压的误差与孔径的关系。图中纵座标表示测量静压的误差占气流速度头的百分比。

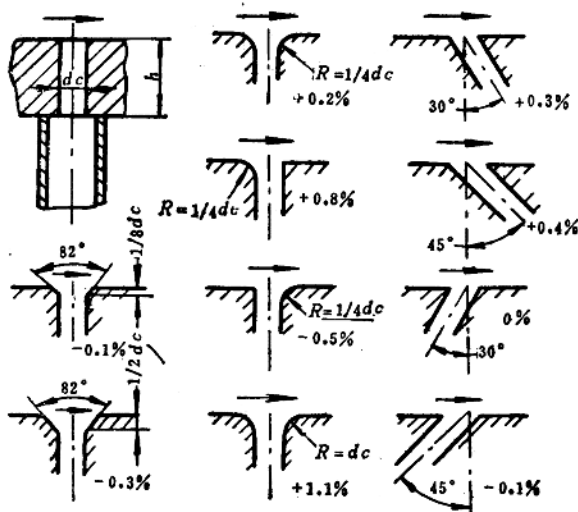


图1-14 孔的形状对静压测量的影响

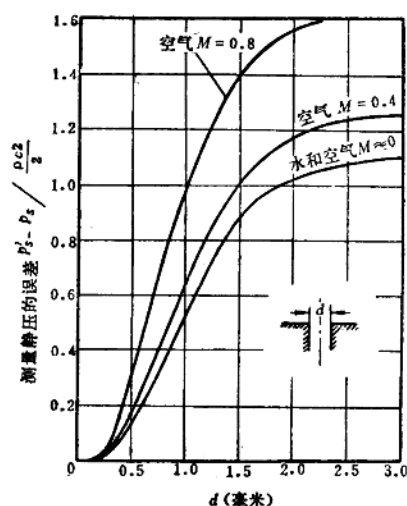


图1-15 孔的尺寸对静压测量误差的影响

上面所讨论的压力孔的形状和孔的尺寸对静压测量的影响，同样适用于探针上的静压测量孔。

3. M 数的影响

以L形探针而言， $M \leq 0.7$ 时，测量静压所产生的误差，都只是由于上面所讨论的一些原因引起的。但是，当 M 数超过0.7时，情况就发生了变化。 M 数在0.7~1.0之间，探针上就产生了局部冲波，改变了局部的气流压力。这时，由探针测量的静压取决于冲波的位置，并且可能产生6% ($p_0 - p_1$)的误差。

4. 速度梯度的影响

现在讨论在一个有横向速度梯度的气流中, 利用探针测量静压时所引起的误差。这时, 可以把探针的头部和支杆的影响分开讨论。

假定流动是均匀的, 流线是直的而且平行, 没有静压梯度, 但是有横向速度梯度, 因而导致一个滞止压力梯度。

把探针放在气流中(探针的轴线与气流平行), 在探针前缘滞止的气流, 就产生一个向高速区增加的滞止压力梯度(图 1-16 a)。这种表面的压力梯度就在前缘边界层内引起流动, 并在探针附近导致气流轻微的下冲。此外, 沿探针表面的粘性在高速区较强, 这个影响也帮助了向低速区的“下冲”。气流的这种“下冲”作用对静压测量的影响, 类似于在均匀气流中探针稍微偏斜一个角度的影响。

在探针支杆的前缘, 也产生一个滞止压力梯度, 并沿探针支杆的前缘向低速区下冲(图 1-16 b)。这个影响使得压力孔附近的流线偏斜, 因而引起测量误差。

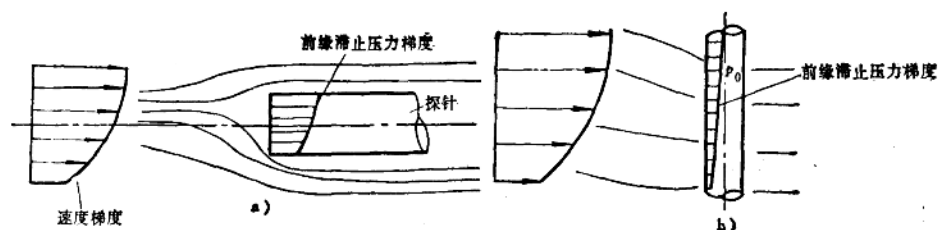


图1-16 速度梯度的影响

a) 对探针头部的影响 b) 对探针支杆的影响

如果把压力孔开在离支杆足够远, 使其影响达不到的位置, 就可以消除这个影响。所以, 有的资料中建议压力孔离支杆中心的距离为 $16d$ 。

第三节 滞止压力的测量

滞止压力 p_0 也称为“总压”或“全压力”。为了简便起见, 在以后的章节中均用总压。

滞止压力可以利用插入气流中的一个物体, 并在其滞止点(临界点)开压力孔的方法进行测量。这个物体的形状和尺寸可以是各种各样的, 决定于对它提出的要求。

一、常见的测量总压的探针

1. L形总压探针(图 1-17)

这是一种使用最广泛, 结构最简单的总压探针。

理论和试验都证实, 如果总压孔的周边加工足够精密, 而且处在垂直于气流速度矢量的平面内, 那么, 在亚音速气流中, 当气流偏斜角为零时, L形总压探针的修正系数与探针头部形状、压力孔直径以及由前缘到支杆的距离无关。

L形总压探针气流偏斜角的灵敏性, 在很大程度上决定于管子外径 d_1 与压力孔直径 d_2 之比, 以及探针头部的形状。图 1-18 是对不同形式总压探针的研究结果。图中 $p_{s1} - p_0$ 相应于由气流偏斜所引起的误差。头部为半球形的总压探针(图 1-17 b), 对 α 角的不灵敏度在 $\pm(5^\circ - 15^\circ)$ 的范围内, 并随 d_2/d_1 的增大而增加。

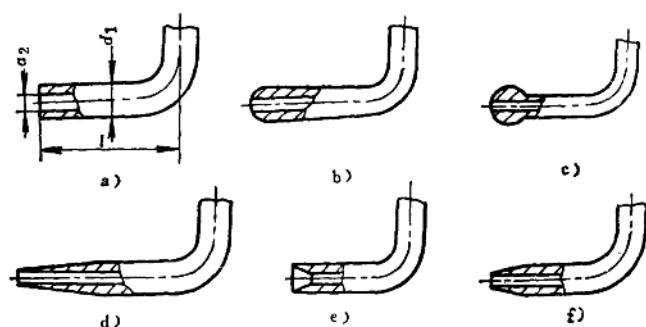


图1-17 L形总压探针

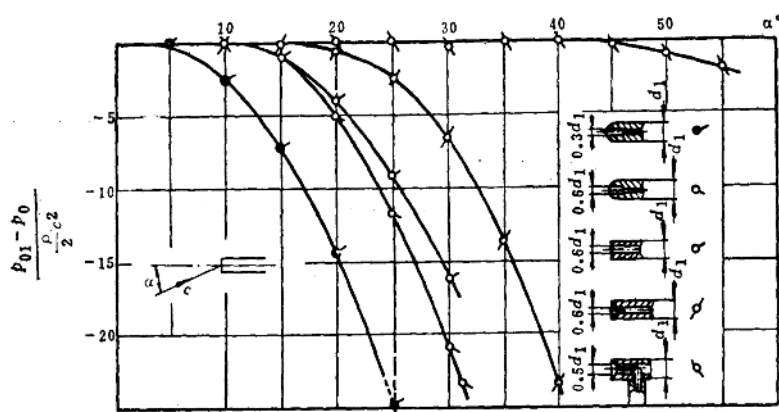


图1-18 不同总压探针对于气流偏斜的灵敏度

在有总压梯度的气流中，利用L形总压探针进行测量时，可以得到比较高的准确度。因为这时压力孔离开支杆的表面较远，后者的影响很小。

2. 圆柱形总压探针 (图1-19)

当 $l/d_1 \geq 1.5$ 时，探针的修正系数等于1.0。对气流偏斜角 α 的不灵敏性不是 l/d_1 的函数，而是随 d_2/d_1 的增加而增加。在 d_2/d_1 由 0.4~0.7 的范围内，对气流偏斜 α 角的不灵敏性为 $\pm(10^\circ \sim 15^\circ)$ 。对 δ 角的不灵敏性在 $l/d_1 \geq 2 \sim 20$ 时，不决定于 l/d_1 ，而取决于 d_2/d_1 。在 $d_2/d_1 = 0.4 \sim 0.7$ 的范围内，对 δ 角的不灵敏性是 $\pm(2^\circ \sim 6^\circ)$ 。当 $l/d_1 \leq 2$ 时，对 δ 角的不灵敏性下降。

这种探针可以做成很小的尺寸，而且惯性不大，工艺性好，制造容易，使用起来方便。

3. 套管式总压探针 (图1-20)

在 M 数变化较大的范围内 (近音速)，这种探针对于气流偏斜角 α 、 δ 的不灵敏度达到 $\pm(40^\circ \sim 50^\circ)$ 。在 $M = 0 \sim 1.0$ 的范围内，修正系数都等于1.0。

这种探针对于气流偏斜的不灵敏度高，是由于在套管的内腔有一

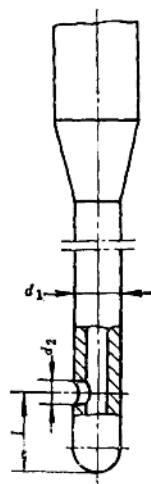


图1-19 圆柱形总压探针

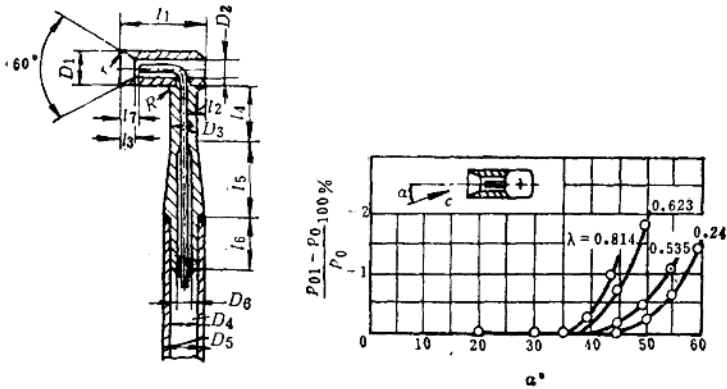


图1-20 套管式总压探针

个进口收敛器和气流导管，使得套管内的气流方向保持不变。

对气流偏斜的不灵敏度，决定于套管内总压管的孔口相对套管端面的位置。最佳的位置应当是 $l_7 = l_3$ 。如果进一步把总压管孔口向内移，即 $l_7 > l_3$ ，那么，在对气流偏斜不灵敏性方面并不能再得到好处（见图 1-21）。图中纵座标 $\frac{p_{01} - p_0}{p_0}$ 为测量误差。

在图 1-22 中表示出套管总压探针进出口的面积比，对气流偏斜角不灵敏性的影响。当出口孔的面积减小到进口孔面积的 20% 时，不会引起气流偏斜角的不灵敏性下降。

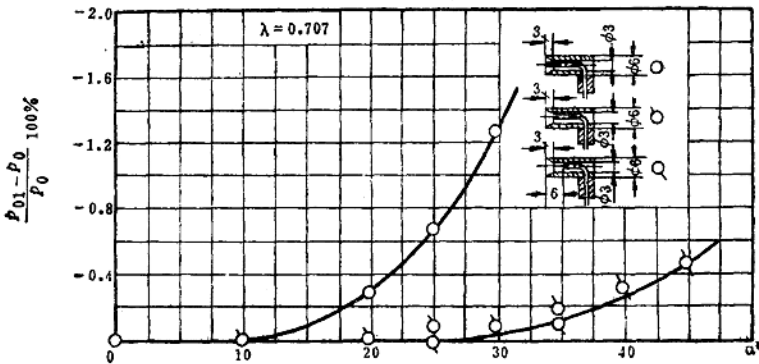


图1-21 总压管在套管内深度的影响

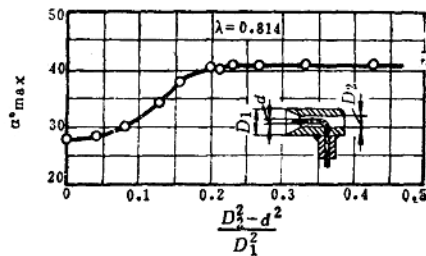


图1-22 进出口孔面积比的影响

二、总压探针的选用

根据已有资料的分析,为了在压缩机通流部分的静止元件中测量总压,可以按照以下的考虑选用总压探针:

1. 在 $\delta \leq 15^\circ$ 的空间气流中,适当地选用比较简单的 $l/d_1 \geq 2 \sim 3$, $d_2/d_1 = 0.7$ 的 L 形总压探针;

2. 在 $\delta \leq 35^\circ \sim 45^\circ$ 的空间气流中,应当选用套管式总压探针;

3. 在 $\delta \leq \pm(4^\circ \sim 6^\circ)$ 的平面气流中,应当选用工艺性好,尺寸小和使用方便的 $l/d_1 \geq 1.5$, $d_2/d_1 = 0.7$ 圆柱形总压探针。特别是在通道壁面附近测量总压时,使用这种探针很方便。如图 1-23 所示,可以直接测量接近壁面的总压。

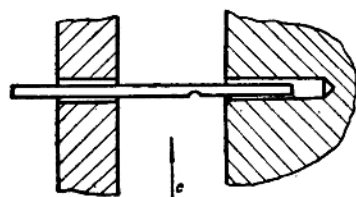


图1-23 在壁面附近测量总压时探针的安装

三、影响总压测量的一些因素

1. 可压缩性—— M 数的影响

当 $M \geq 1$ 时,由于在探针前面产生正冲波,这个冲波是非等熵的,于是就改变了测量的滞止压力。由总压探针所测量的是冲波后面的滞止压力,而与冲波前面的滞止压力值不同。这个差别的大小决定于冲波的强度和 M 数。

$$\frac{p_0}{p'_0} = \left[\frac{2k}{k+1} M^2 - \frac{k-1}{k+1} \right]^{\frac{1}{k-1}} \cdot \left[\frac{(k-1)M^2 + 2}{(k+1)M^2} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (1-11)$$

$M > 1.0$

式中 p_0 ——冲波前的滞止压力;

p'_0 ——冲波后的滞止压力;

M ——未扰动气流的马赫数。

对于 M 数小于 1.0 时,没有影响。

头部为半球形的 L 形总压探针,当 $d_2/d_1 = 0.3$, α 角比较小时,在亚音速气流中这种探针的读数与 M 数无关(图 1-24)。图中 K 为气流的真实总压与探针测量的总压之比。

2. 粘性——雷诺数的影响

公式(1-10)是在假定为理想气体的情况下得到的。但是,当粘性气体绕探针流过时,沿它的表面的压力分布就与 Re 数有关(见图 1-4, 图 1-5)。因而,由探针压力孔所测量的压力,在一般情况下就应与粘性有关。

根据一些资料介绍,当雷诺数较大时($Re >$

30),公式(1-10)仍然正确, Re 数对临界点所测量的压力值没有影响,这时可以不考虑粘性的影响。当 Re 数比较小时($Re < 30$),粘性对所测量的滞止压力值的影响就很重要。粘性的影响可以用理论和试验的方法决定。

在临界点的无因次压力系数 $\bar{p}_0$ 与 Re 数的关系,可以用下面的方式表示:

$$\bar{p}_0 = 1 + \frac{4C_1}{Re + C_2\sqrt{Re}} \quad (1-12)$$

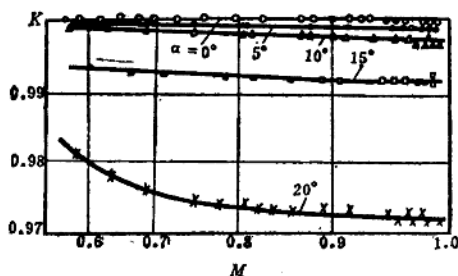


图1-24 M 数对总压探针读数的影响