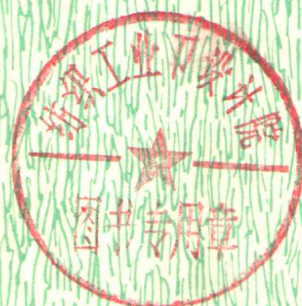


944/48
42784

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

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

本书阐述透平压缩机试验中基本参数测量的原理,并对探针的设计、仪表的正确选择和使用以及测量误差的分析等作了简要的叙述。全书共分十三章,内容以空气动力测量为主。其中第一章至第五章是空气动力参数的测量;第六章至第九章是一些机械量的测量;第十章是误差分析;第十一章至第十三章是介绍一些特殊测量技术。

本书是高等学校透平压缩机专业试用教材,也可供从事透平机械工作的工程技术人员参考。

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

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $12 \frac{1}{2}$ · 字数 303 千字

1981年9月北京第一版·1981年9月北京第一次印刷

印数 0,001—4,000 · 定价 1.30 元

*

统一书号: 15033·5192

12784

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、苗永淼、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

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:

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

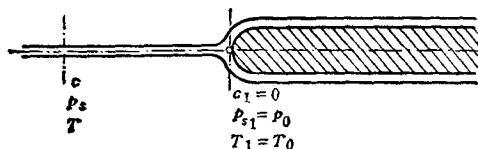


图1-1 测量原理图

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:

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

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);
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。

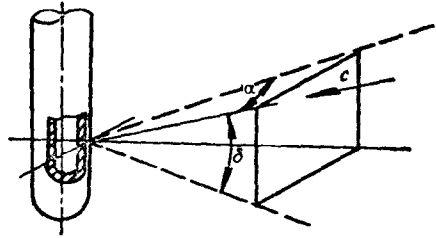


图1-2 气流偏斜角

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, 不同于沿法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。

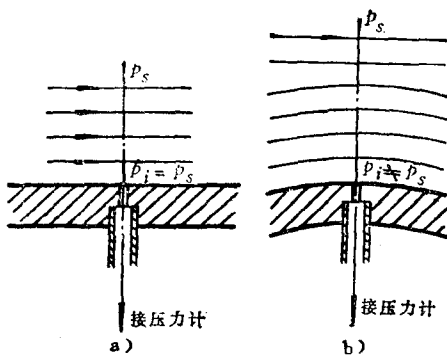


图1-3 壁面形状对测量静压的影响

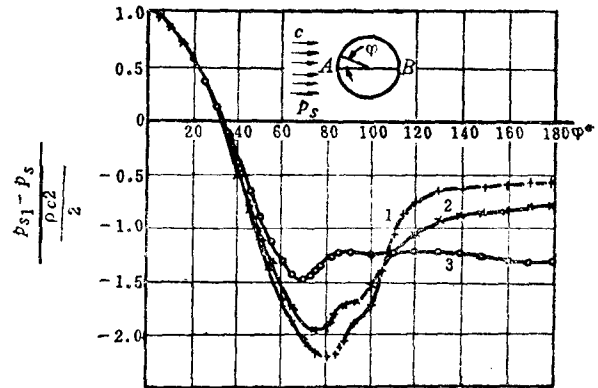


图1-4 沿圆柱表面压力分布

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

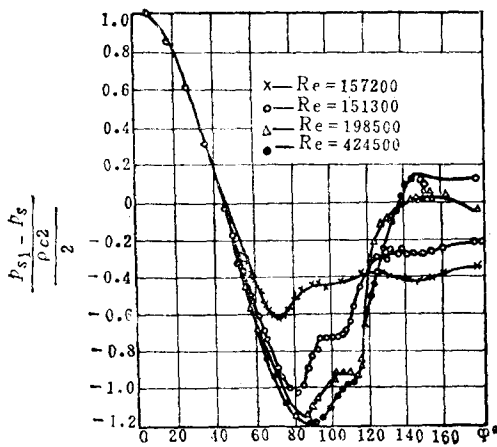


图1-5 沿球形表面压力分布

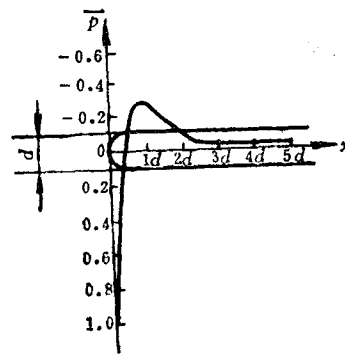


图1-6 半球形表面压力分布

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

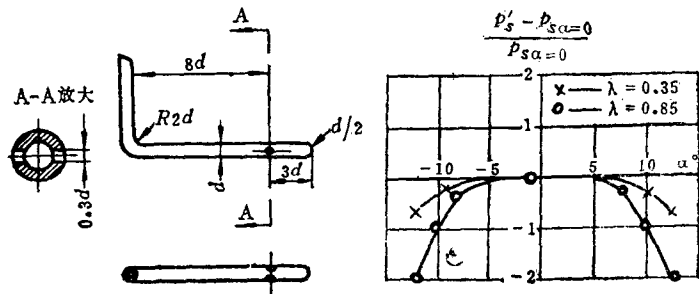


图1-7 L形静压探针

寸的限制，而且气流的旋绕也不大。

图 1-7 中速度系数 λ 为：

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

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。

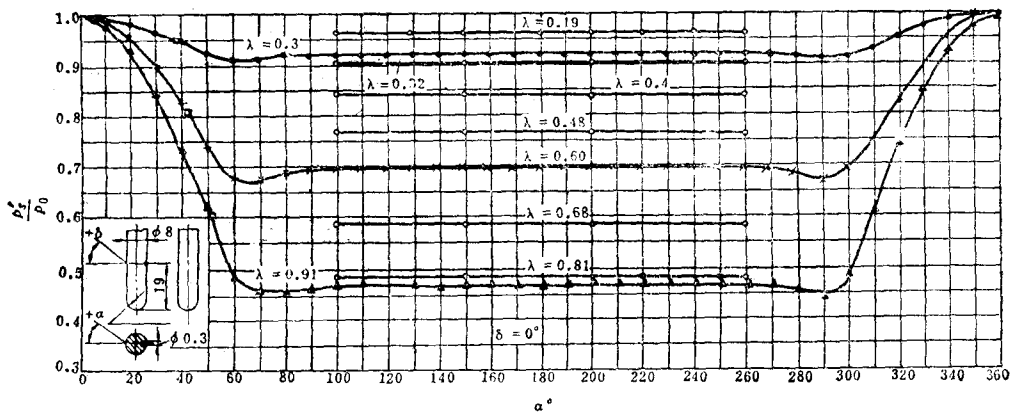


图1-8 圆柱形探针

从图上可以看出：在一定的 λ 数时，由探针测量的压力 p' 在 $100^\circ < \alpha < 270^\circ$ 的范围内都保持不变，并且仅仅随 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 角的灵敏性高（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 $\alpha = \pm 30^\circ$ ， $\delta = \pm 20^\circ$ 。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。

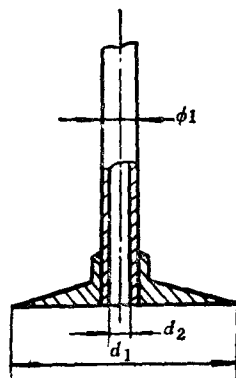


图1-9 盘形探针

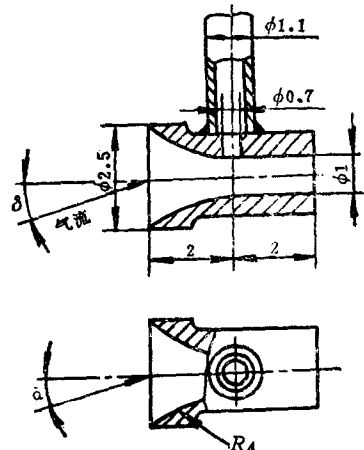


图1-10 导管式探针

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_{s1} ，就与未扰动气流压力 p_s 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。

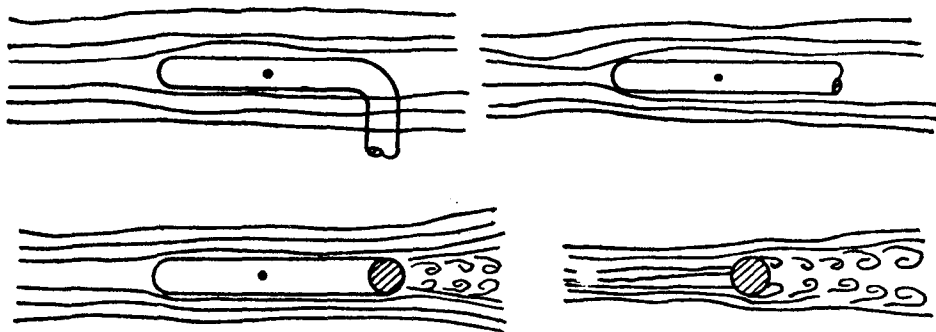


图1-11 探针头部和支杆引起的扰动

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

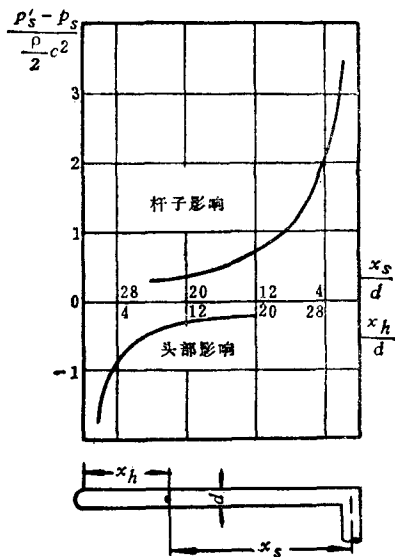


图1-12 静压测量的固有误差

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。

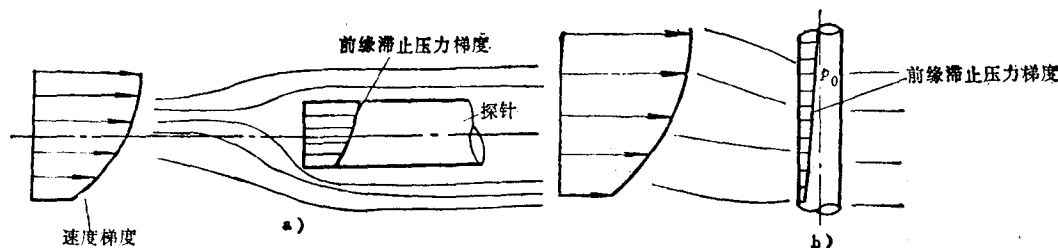


图1-16 速度梯度的影响

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形总压探针对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 $p_{01} - p_0$ 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。

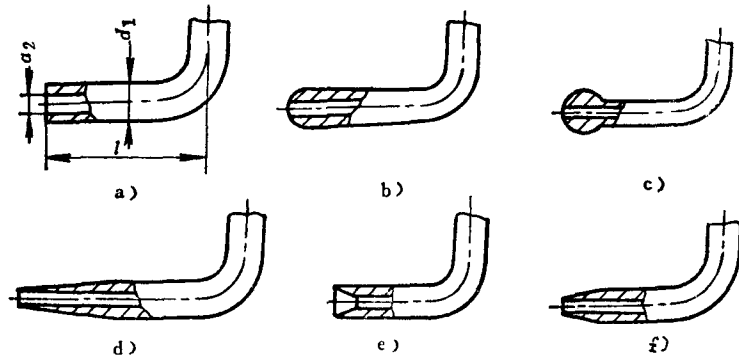


图1-17 L形总压探针

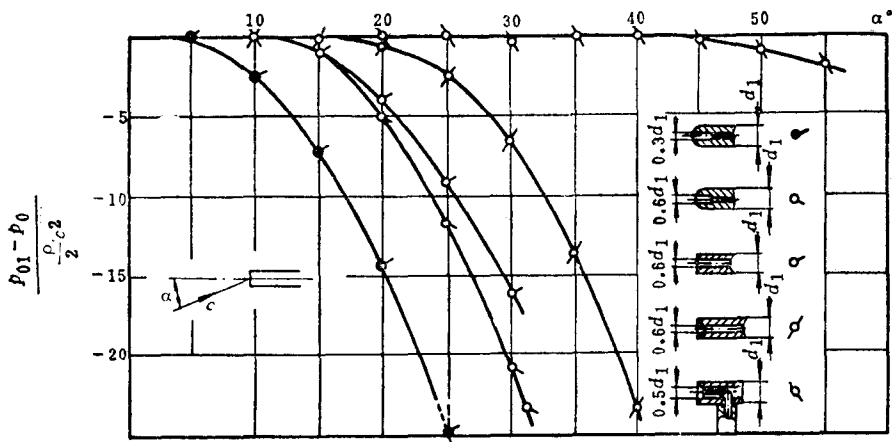


图1-18 不同总压探针对气流偏斜的灵敏性

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

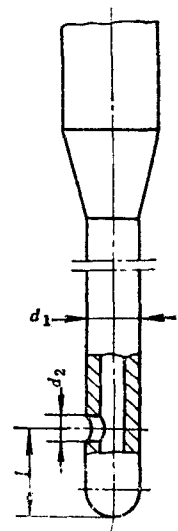


图1-19 圆柱形总压探针

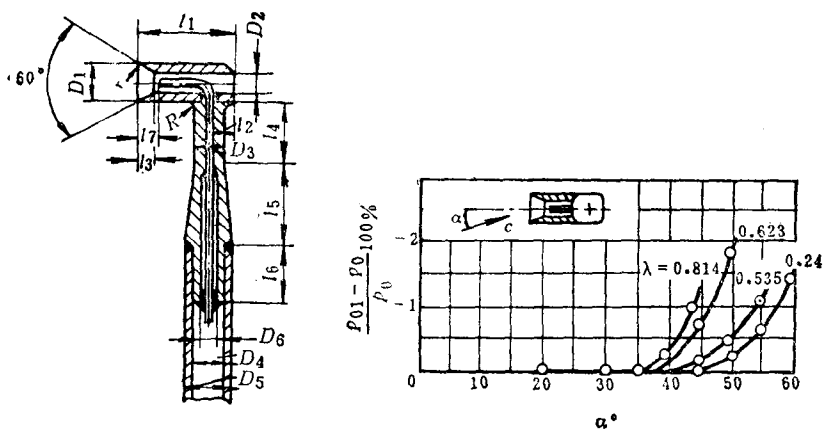


图1-20 套管式总压探针

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。

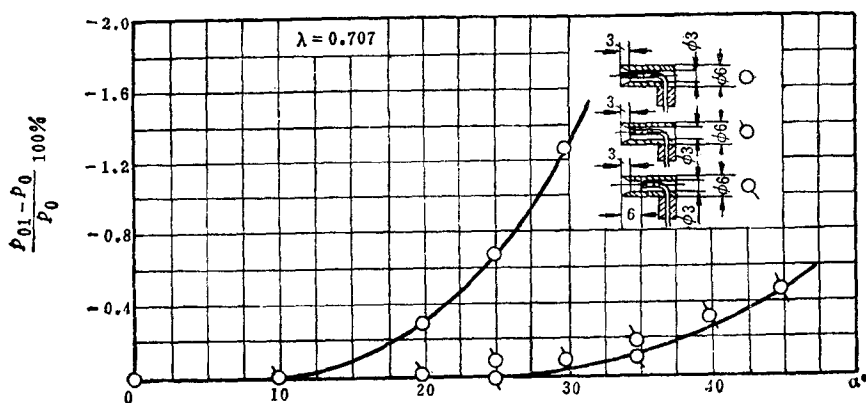


图1-21 总压管在套管内深度的影响

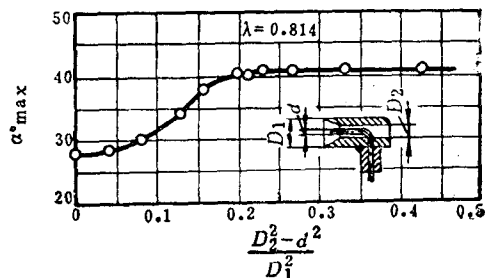


图1-22 进出口孔面积比的影响

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。

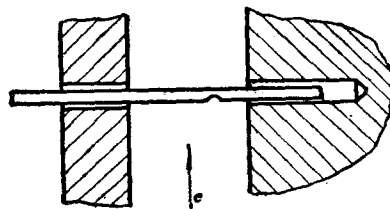


图1-23 在壁面附近测量总压时探针的安装

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:

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

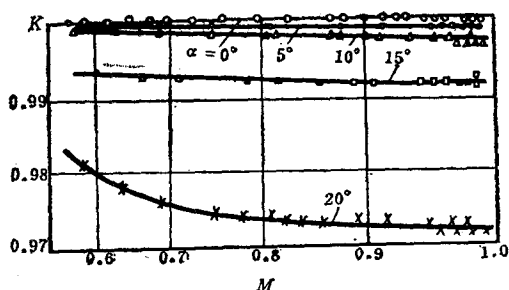


图1-24 M 数对总压探针读数的影响

$$Re = \frac{\rho Cr}{\mu}$$

式中 r ——总压孔半径。

系数 C_1 , C_2 对不同形状的物体是不同的:

物体形状	C_1	C_2
半球形	2.0	0.398
球形	1.5	0.455
圆柱形	1.0	0.457

当 Re 较大时, 无因次压力系数 $\bar{p}_0$ 与 Re 的关系表示在图 1-25。

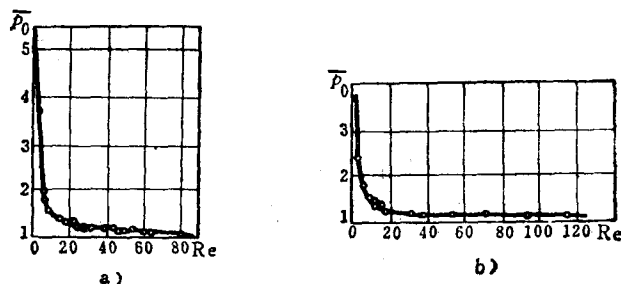


图1-25 $\bar{p}_0$ 与 Re 的关系

a) 球形 b) 圆柱形

第四节 压力指示仪器

在选择了适当的测量压力的探针以后, 就需要选择适当的压力指示仪器。因为测量气流参数的误差, 在很多方面都与压力指示仪器有关。由压力指示仪器所产生的误差, 要比探针所引起的误差大, 而这些误差由于分散在最后的数据中, 没有显示出来。

对压力指示仪器提出的要求:

- 1) 在较宽的测量气流参数的范围内, 都有足够的精度;
- 2) 测量和读数方便, 这对缩短试验时间以及减少在大量测点时的观测次数尤其重要;
- 3) 使用安全、可靠, 特别是在较高的压力测量时;
- 4) 安装、使用方便;
- 5) 惯性小;
- 6) 随时间和周围介质温度变化时, 没有“零点漂移”。

在一般情况下, 压力指示仪器所测量的是被测气体与大气压之差 (表压), 而绝对压力则根据压力指示器的读数, 加上由大气压力计所测得的大气压力值得求。在压缩机的试验中, 测量压力的范围非常广, 可以由真空到几百个大气压, 测量压差可以由几十个牛/米²到几个兆牛/米²。在这样宽的压力范围内, 要想采用一种通用的压力指示仪器实际上是不可能的。

根据工作原理, 目前所采用的压力指示仪器主要分: 液体的、弹簧的、电的等, 并且每种又有各种各样的结构形式。

一、液体压力计

在透平压缩机的试验研究中, 为了测量小压差, 广泛采用液体压力计。它的基本原理是

流体静力学定律。属于这一类的有单管压力计和双管压力计（U形管）。

1. U形管压力计（图 1-2 b）

压力差（ $p_1 - p_2$ ）由管子中液柱高度表示：

$$p_1 - p_2 = hg(\rho_l - \rho) = hg\rho_l\left(1 - \frac{\rho}{\rho_l}\right) \quad (1-13)$$

式中 ρ_l 、 ρ ——分别为压力计中工作液体的密度和左边管子中被测气体的密度（公斤/米³）；
 h ——液柱高度（米）。

当气体的密度与液体的密度之比小于 0.002 时， $\frac{\rho}{\rho_l}$ 可以忽略，
 上式可写成：

$$p_1 - p_2 = hg\rho_l \quad (1-14)$$

式中 p_1 、 p_2 ——分别为压力计两边气体压力（牛/米²）。

在透平压缩机试验中，一般采用这个公式决定所测量的压力。
 但是，在某些情况下，当工质为重气体或工质虽为空气但压力较高时，就要对气柱高度进行修正。

U形压力计测量压差的范围很广，它的测量上限决定于工作液体的密度。例如，当管子的长度为 5 米时，对水银，测量上限为 6×10^5 牛顿/米²（ ≈ 6 公斤/厘米²），对酒精，测量上限则为 0.4×10^5 牛顿/米²。下限由测量精度的要求决定，不应小于 2000 牛/米²。

U形压力计的测量精度决定于下列一些因素：

1) 管子内孔的均匀性：沿着 U 形管，内径的变化，对于在一定的压差作用下而产生的两个液面之间的高度差没有影响。但是管子中的流体容积是一定的，由于管子内径的变化，就使得液体柱的总长度发生变化，因而改变了仪器的零点。为了得到高的准确性，压力计的两个管子都应读数，以消除这个误差。

2) 毛细管现象：由于毛细管现象在压力计的工作液体表面产生弯月面形状，它与重力、液体分子之间的内聚力和液体分子与容器壁之间的附着力等有关。

对于浸润液体如水、酒精等，弯月形的凹面向上，这时附着力是主要的。对于不浸润液体如水银等，则弯月形凹面向下，这时内聚力是主要的（如图 1-27 所示）。当液体沿管子上下移动时，弯月面的形状变化，因而在决定液柱高度就产生误差。为了减小这个误差，在决定液柱高度时，可以取在弯月面中心。

弯月面形状也是管子内径的函数，随着管子内径的增加，这个误差就减小。因此，管子内径应不小于一定的值，对于工作液体为酒精的管子，最小内径应为 3 毫米；对于有较大表面张力的液体，如水、油、水银等做为工作液体的管子，最小内径应不小于 8~12 毫米。

毛细管现象不仅引起弯月面形状，而且也引起管子内整个液柱升高或下降（图 1-28）。对于较小的管子，这个值可以由下面的近似公式决定：

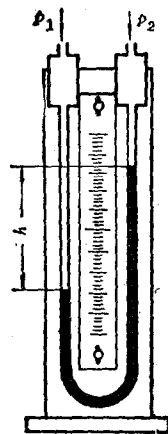


图1-26 U形管压力计

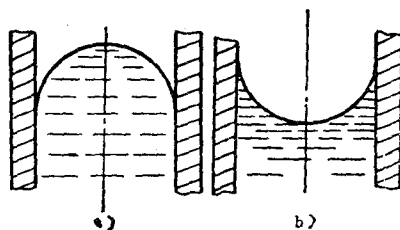


图1-27 弯月面形状

a) 不浸润液体 b) 浸润液体