

实验空气动力学

(第二册)

南京航空学院六〇一教研室
西北工业大学五〇三

一九八三年十二月

实验空气动力学

第二册 目 录

第三章 气流参数测量

§ 3 - 1	压强测量	3-1
(一)	静压测量	3-1
(二)	总压测量	3-7
(三)	压强显示仪表	3-10
(四)	测压传感器	3-14
(五)	压强传递	3-18
§ 3 - 2	温度测量	3-20
(一)	风洞稳定段总温测量	3-20
(二)	高速气流总温测量	2-22
(三)	复温系数	3-22
§ 3 - 3	流速、流向及紊流度测量	3-23
(一)	流速测量	3-23
(二)	马赫数测量	3-29
(三)	气流方向测量	3-31
(四)	气流紊流度测量	3-38
§ 3 - 4	数据采集系统简介	3-42
(一)	低电平低速数据采集系统	3-43
(二)	数据采集系统的主要部件	3-44
	问题和习题	3-46

第四章 空气动力天平

§ 4-1	天平的分类	4-1
§ 4-2	模型支架和角度机构	4-2
§ 4-3	机械式天平	4-4
(一)	力和力矩的分解系统	4-7
(二)	力和力矩的传递	4-8
(三)	力和力矩的测量显示系统	4-8
(四)	机械式天平的传动比	4-9
§ 4-4	电阻应变式天平	4-12
(一)	电阻应变片的工作原理	4-13
(二)	测量电桥的特性	4-18
(三)	电阻应变仪及显示记录仪器	4-20
(四)	应变式天平的测量元件	4-21
§ 4-5	天平性能指标及影响因素	4-29
§ 4-6	天平的调整与校准	4-32
§ 4-7	坐标轴系及其转换关系	4-35
	问题和习题	4-38

第三章 气流参数测量

在空气动力学中，通常是以密度、速度和长度作为基本物理量，运用相似律来处理有关物理量和气动力的。其中除长度以外，密度和速度一般都是通过测量气流的压强和温度等气流参数，计算出来的。通过对风洞流场的气流参数测量还可以确定无模型时的风洞流场的品质（流场校测）、有模型时的模型周围的绕流情况和模型上所承受的气动力。

本章着重介绍关于测量定常气流的压强和温度的基本原理和方法。此外，对气流的速度、方向和紊流度的测量方法也作了简要的介绍。最后，简单地介绍了测量大量的气流参数时的数据采集问题。

§ 3-1 压强测量

(一) 静压测量

1. 壁面静压测量

通常是在气流管道的壁面或模型的表面沿法线方向开一小孔来感受当地的静压，如图 3-1 所示。如果测压孔直径 d 在 $0.5 \sim 2$ 毫米范围内， L/d 大于 2，测压孔的轴线与壁面垂直，孔内壁光滑，孔口无毛刺或倒角，以及孔口附近的物面光滑无凹坑或凸出物，顺流动方向物面上的压强变化梯度不是很大时，则可获得测量精度较高的壁面上该点处的静压。

图 3-2 示出一组实验结果，说明孔口倒角、圆角及孔轴线倾斜对静压测量的影响。图中孔口外的箭头表示气流流动方向，百分数表示该形状的孔测得的静压与孔口光滑无毛刺、无倒角、直径相同的垂直孔测得的静压之差占动压的百分数。气流流过静压孔口时，孔的前

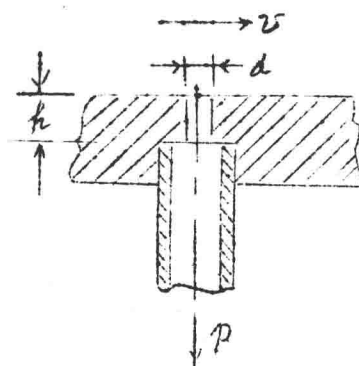


图 3 - 1 壁面静压孔

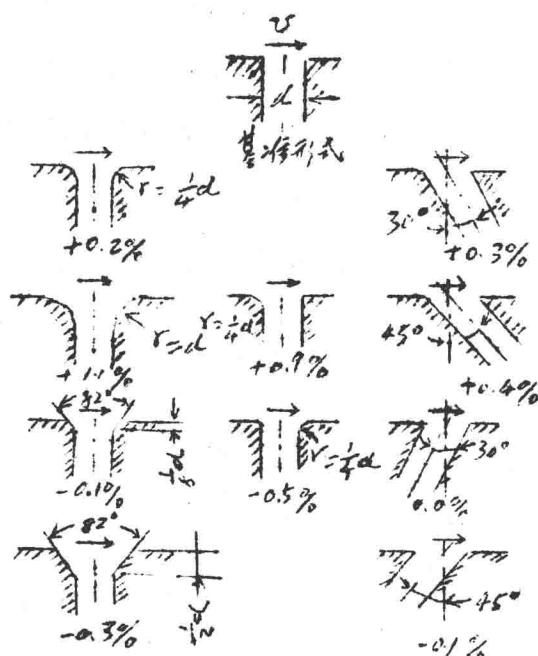


图 3 - 2 孔口倒角及倾斜对静压测量的影响

缘会使气流产生局部分离，使测得的静压偏小；孔的后缘起阻滞作用，使测得的静压偏高。图 3 - 2 给出了孔的几何形状影响所产生的误差的量级。如果孔口加工粗糙，有毛刺，或孔口附近物面凹凸变形，或孔内壁粗糙不平，或有灰尘堵塞，则会产生更大的误差。

此外，壁面静压测量还受到孔直径及气流 M 数的影响。图

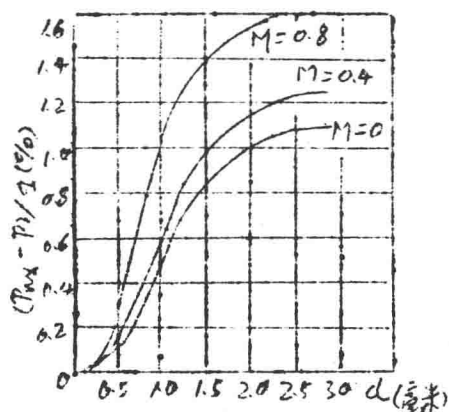


图 3 - 3 静压测量误差与
孔径及 M 数的关系

3 - 3 中 p_{wx} 为测量得到的静压, p 为真实静压, q 为动压。静压测量误差与孔径 d 及 M 数的关系, 如图 3 - 3 所示。由图可见, 静压孔径应小一些, 但孔径太小不但加工困难, 使用时容易被灰尘堵塞, 而且会引起测量反应迟缓, 延长实验时间。一般取孔径为 $0.5 \sim 1.0$ 毫米。由图 3 - 3 可看出, 用孔径 0.5 毫米的小孔测量静压, 在 $M = 0.8$ 以下的亚音速范围内, 测量误差可能达到动压值的 $0.1\% \sim 0.3\%$ 。在物体表面沿法向开小孔测量当地静压的方法对气流的扰动较小, 测量精度较高, 简单方便, 故在空气动力实验中应用甚广。

2. 气流静压测量

需测量气流中某一点的静压时, 可在该点置放一静压管。亚音速流场用的静压管的典型结构如图 3 - 4 (a) 所示。它是一根前端封闭并呈半球形的管子, 在管的前端和后支杆之间的管壁上开有若干个小孔 (或小缝), 用以测量静压。

实验证明, 在静压孔处的气流会受到头部和后支杆的影响。气流流经半球形头部时, 流速增加, 静压下降, 使测量到的静压 p_{wx} 比

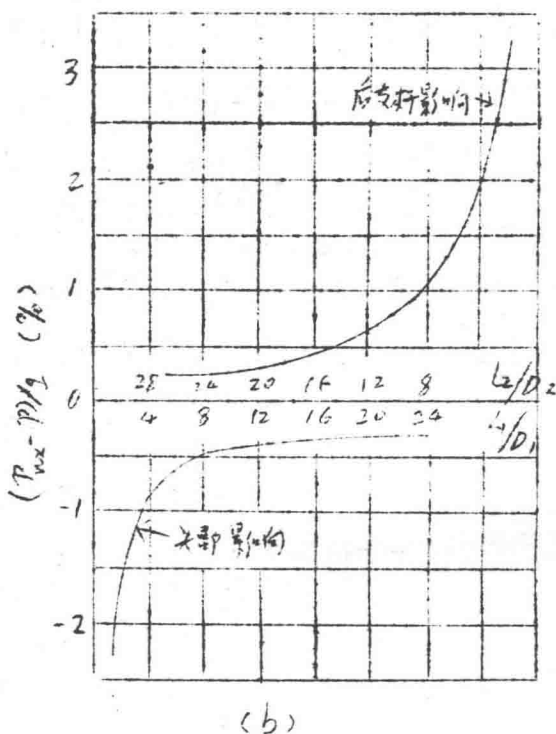
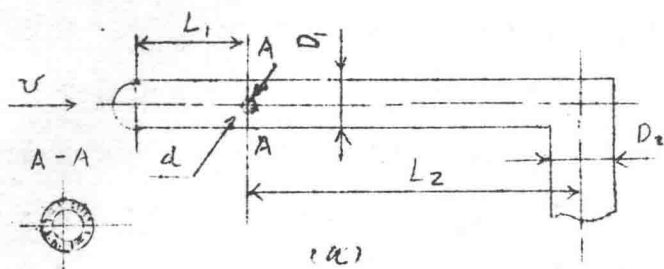


图 3-4 静压管

气流的实际静压 P 要低，产生负误差；而后支杆对气流有减速作用，使静压增高，产生正误差。图 3-4 (b) 中的两条实验曲线就表明了这种相反的影响。图 3-4 (b) 表明，随着相对距离 L_1 / D_1 和 L_2 / D_2 的增加，头部及后支杆对静压测量的影响将减小。若适当选取静压孔的位置，就可以使这两种影响相互抵消，较准确地测量出气流的静压。一般取 $L_1 = (3 \sim 8) D_1$ ； $L_2 = (8 \sim 20) D_2$ 。在

静压管上开静压孔的基本要求与开壁面静压孔相同。但由于静压管的直径较小，故静压孔的直径一般取 $0.3 \sim 0.5$ 毫米左右。

静压管的轴线应与气流流动方向一致。为减少偏角（气流方向与静压管轴线之间的夹角）的影响，一般在静压管上开有 $4 \sim 8$ 个小孔，且均匀地分布在开孔处的同一截面上。对图 3-4 (a) 所示的结构形式，气流偏角可达 $\pm 5^\circ$ 仍不致产生显著的影响。

对图 3-4 (a) 所示的那种静压管，在雷诺数 ($Re = vD_1 / \nu$) 从 500 到 3×10^6 范围内，可以不考虑粘性对静压测量的影响。

直到 $M < 0.7$ 的范围内，用上述典型的静压管来测量气流的静压都是适用的。但在跨音速流场中，那种半球形头部的静压管在头部将会出现局部超音速区，给静压测量带来很大的影响。为了减少压缩性的影响，可采用尖锥形头部的静压管，如图 3-5 (a) 所示。

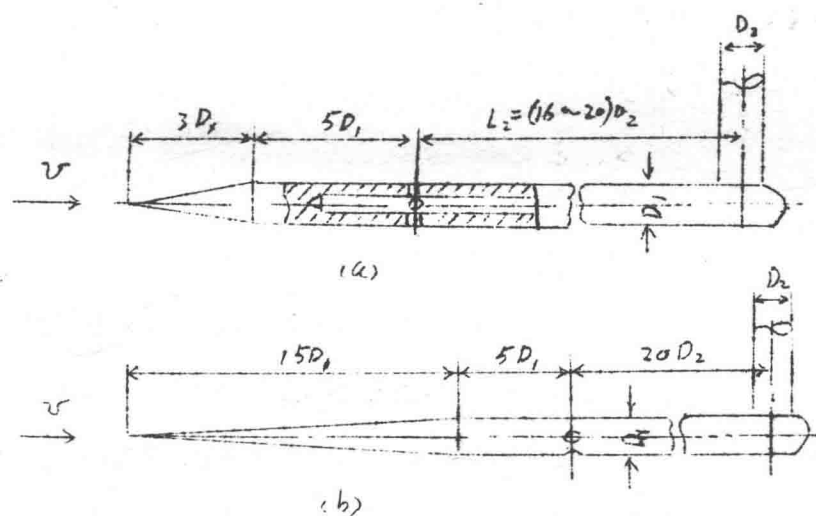


图 3-5 跨音速和超音速静压管

在超音速流场中，静压管的头部会出现激波。为了减小头部激波的干扰，超音速静压管的头部做成细长的尖锥形（锥角一般为 10° ），其形状和相对尺寸如图 3-5 (b) 所示。

由于静压管的几何形状，开孔位置以及加工制造误差等影响，因而测量出的流场中，某一点的静压 p_{wx} 与该点的真实静压 p 之间存在一定的误差，在使用之前应对静压管进行校准，以确定其修正系数。

3. 多点静压测量

有时为了测量流场的静压场，也可把几根静压管安装在同一支架上，组成梳状静压排管，如图 3-6 所示。

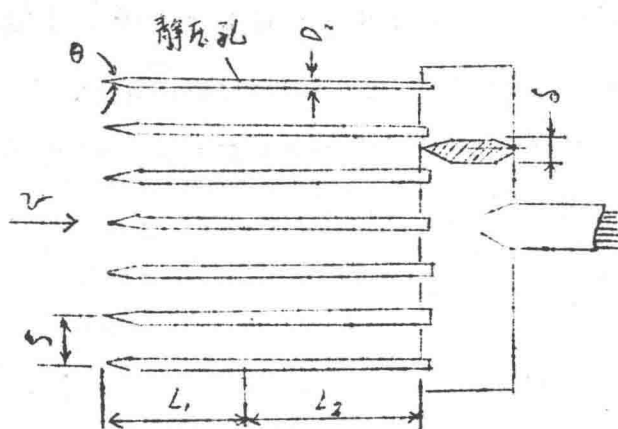


图 3-6 梳状静压排管

在设计静压排管时，除了参照前面所述的单支静压管的尺寸及形状要求以外，还要考虑每根静压管之间的相互影响。低速时一般取 $s \geq 5D_1$ 。随着气流 M 数的增加，相邻各管之间的干扰也会增大。用适当加大各静压管之间的距离 s 、减小探头顶角 θ 以及增加 L_1 / D_1 值等方法来减少静压测量误差。

同单支静压管一样，静压排管的性能也会受到排管支架的影响。在低速流场中，测压孔到支架的距离 $L_2 \geq 12D_2$ （或厚度 δ ）。随着气流 M 数增加，支架对静压测量的影响亦随之严重，应适当增大 L_2 / D_2 值。在超音速流场中，支架的存在也会通过静压管的管壁

附面层而对静压的测量产生影响。通常将排管支架的横截面设计成流线形或菱形，以减少排管支架的影响。

由于用静压排管作多点静压测量时，受影响因素较多，因此在使用之前必须对每根静压管进行校测。

(二) 总压测量

1. 气流总压测量

需测量气流中某一点的总压时，可在该点置放一总压管（皮托管）。最简单的总压管是一根开口端正对着气流方向的管子，如图 3-7 所示。管的另一端用导管与压强计相联接气流进入孔口后，因不能再流动而被阻滞，从而感受出管口处的局部总压。

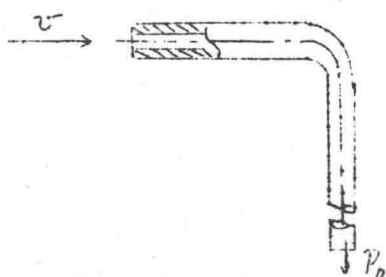


图 3-7 总压管

如果气流比较均匀，总压管轴线和气流流动方向之间的偏角小于 $\pm 3^\circ$ ，则总压管头部形状、测压孔径的大小以及后支杆与测压孔之间的距离等几何因素对总压测量的影响很小，可较准确地感受出总压。

如果气流方向与总压管轴线之间的偏角较大，则会引起总压的测量误差。图 3-8 为几种典型的总压管对气流偏角的实验曲线。图中 p_{0wx} 表示各总压管在测压仪表上的总压测量值； p_0 为气流的真实总压值； β 为总压管的轴线与气流方向之间的夹角。从图中可以看出：

①孔口无倒角时，气流偏角对总压管的读数影响是随着孔的直径 d 与管的外径 D 的比值 d/D 的增大而减小的；②孔口加倒角可以减

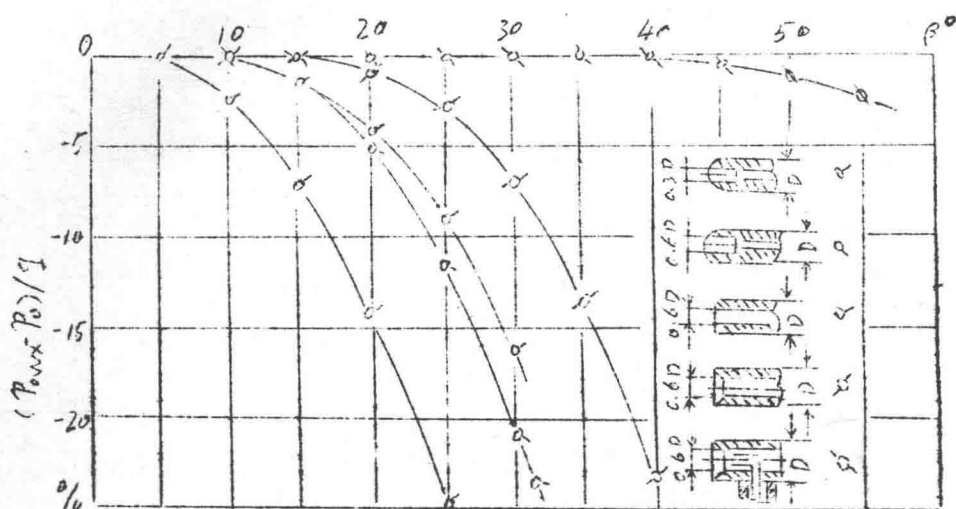


图 3-8 总压管的气流偏角特性曲线

小对气流偏角的敏感性；③在总压感受孔外加上一个套管，可以显著地减少气流偏角的影响，直到 $\beta \approx \pm 40^\circ$ 时，仍能准确地感受到气流的总压；④当气流偏角为零度时，不论何种类型的总压管，其总压读数均为最大值，即总压测量误差最小。因此，在使用总压管测量气流总压时，可将总压管对着气流方向来回偏转一下，找出总压读数的最大值作为气流总压的测量值。

在高亚音速气流中用总压管测量总压与 M 数无关。在超音速气流中，总压管的前面会出现弓形脱体激波，因而总压管所测到的是激波后面的亚音速流的总压，需经过换算才能得到激波前的超音速气流的总压。在计算中，通常假定总压感受孔前面的激波是正激波，按正激波关系式进行计算。

在一般的流动中，以总压感受孔的直径为特征量的雷诺数 ($Re = vd/\nu$) 大于 500 时，总压测量值与雷诺数的变化无关。

当气流中存在较大的横向速度梯度时（如尾流区），流场中的横向速度梯度会对总压的测量产生影响。因为总压感受孔不论其直径 d

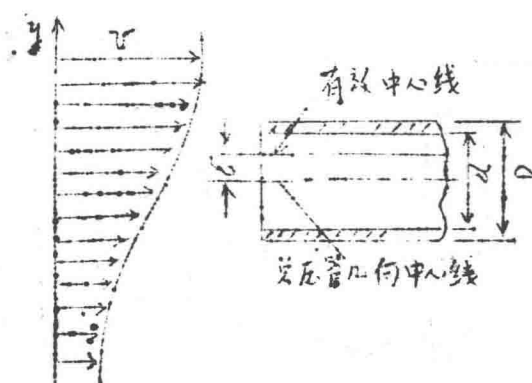


图 3 - 9 横向速度梯度对
总压测量的影响

有多大，它总具有一定的面积。当气流中存在横向速度梯度时，总压感受孔截面上各点的流速是不相等的，因此所感受的压强值相当于这些点上的局部总压的面积分平均值。该值高于总压感受孔几何中心点上所对应的局部总压值。如图 3 - 9 所示，总压管感受出的压强值实际上相当于距离几何中心线 δ 处的有效中心线上的总压。对平头型总压管的经验公式为：

$$\delta / D = 0.13 + 0.08 d / D \quad (3-1)$$

式中 δ ——总压管几何中心线与有效中心线之间的距离；

d ——总压感受孔直径；

D ——总压管外径。

此式适用范围为 $0.1 < (D/q)(dq/dy) < 1.2$ 。 q 为动压。

在一般情况下，只要合理地选择和安装总压管即可较准确地测量出气流的总压。如果对测量精度要求较高，则需对总压管进行校测。

2. 多点总压测量

若要同时测量流场中几个点上的总压（如作尾流测量），可把

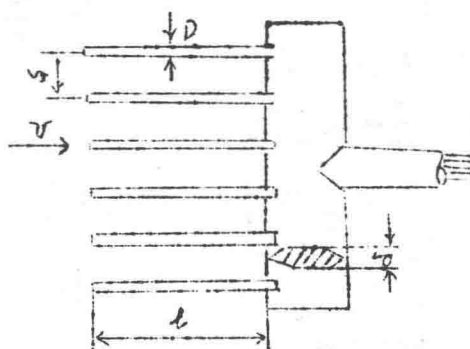


图 3-10 总压排管

几根总压管安装在一个支架上组成梳状总压排管，如图 3-10 所示。

在设计和加工总压排管时：①可根据测量点的分布情况来确定总压管的根数和相邻两管之间的距离。一般取 $s/d = 1.5 \sim 10$ 。加工时应注意保证间距 s 的精度，因为在测量尾迹等总压变化较大的流场中，总压感受孔的位置稍有不准，就会使实验结果产生较大的误差。②总压管的长度 L 也可根据测量情况而定，一般取 $L/d > 25$ 。各总压管的长度应相等，即总压感受孔的位置应在同一截面上。

总压排管的性能受排管支架等的影响不是很严重，在一般测量中不经校测就可使用。如果对各点的总压测量精度要求较高，则需对每一根总压管进行校测，并对测量数据作相应的修正。

二 压强显示仪表

在空气动力实验中，静压管或总压管所感受到的压强需用压强显示仪表来进行量度，以确定其压强值。应注意的是：通常的压强显示仪表都是用被测压强与某一已知的参考压强相比较的原理工作的。最常用的参考压强为大气压强。相对于大气压强的被测压强在压强显示仪表上的读数值称之为表压强。我们在作气动力计算时，应把表压强换算成绝对压强。

1. 液柱式压强计

(1) U型管压强计

图 3-11 为 U 型管压强计原理图。U 型管压强计是最简单的液柱式压强计。在它的两根玻璃管上分别接入被测压强 p_1 和参考压强 p_2 ，达到稳定后，可根据下列关系式确定被测压强的大小：

$$p_1 - p_2 = \rho_{\text{液}} g \Delta h \quad (3-2)$$

式中 $\rho_{\text{液}}$ ——量液的密度；

g ——重力加速度；

Δh ——两玻璃管内液面之间的高度差。

常用的量液有水，酒精或水银。

(2) 单管压强计

图 3-12 为单管压强计原理图。图中虚线为测压前液面的初始位置。导入压强 p_1 和 p_2 后，液壶中液面下降 h_1 ，玻璃管中液面升高了 h_2 ，于是

$$\begin{aligned} p_1 - p_2 &= \rho_{\text{液}} g \Delta h \\ &= \rho_{\text{液}} g (h_1 + h_2) \end{aligned} \quad (3-3)$$

设液壶截面积为 A_1 ，玻璃管内壁截面积为 A_2 ，由于壶内流出的量液等于玻璃管内增加的量液，即

$$h_1 A_1 = h_2 A_2$$

则式 (3-3) 可改写成

$$\begin{aligned} p_1 - p_2 &= \rho_{\text{液}} g h_2 (1 + A_2 / A_1) \\ &= \rho_{\text{液}} g K h_2 \end{aligned} \quad (3-4)$$

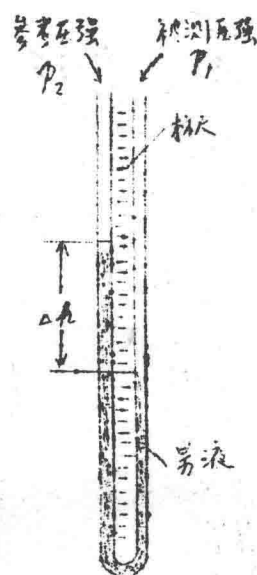


图 3-11 U 型管压强计

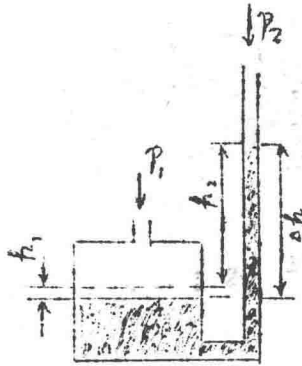


图 3-12 单管压强计

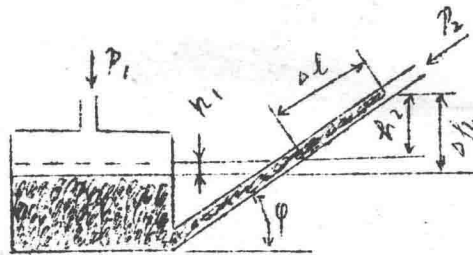


图 3-13 斜管微压计

式中 K ——压强计修正系数， $K = 1 + A_2 / A_1$ 。

通常用校测方法确定 K 值。

(3) 斜管微压计

如果把单管压强计的玻璃管倾斜一 φ 角（见图 3-13），于是在相同的压差 $P_1 - P_2$ 下，虽则液面的垂直高度差 Δh 是相等的，但玻璃管内液面的位移量却为：

$$\Delta L = h_2 / \sin \varphi \quad (3-5)$$

提高了压强测量的灵敏度，可以用来测量很小的压差，故这种压强计称之为“斜管微压计”。同理，斜管微压计也存在着压强计修正系数 K ，需通过校测的方法来确定 K 值。

(4) 多管压强计

在空气动力实验中，常用多管压强计来同时测量很多点上的压强。

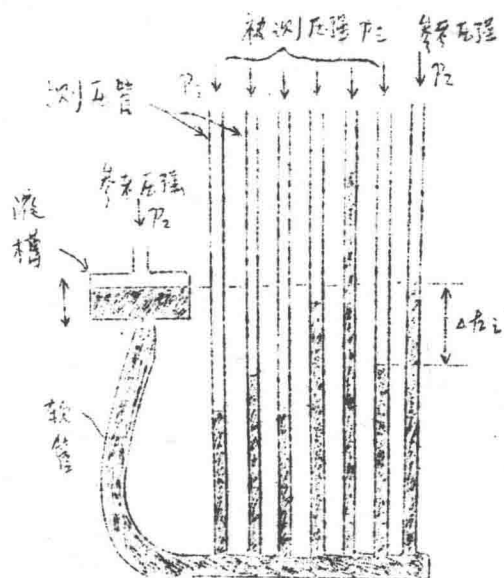


图 3-14 多管压强计

图 3-14 为多管压强计原理图。通常在众多的测压管中留出 1~2 根与液槽共同接通参考压强，作为液面高度测量的基准点。同斜管微压计一样，为提高测量灵敏度，可将玻璃排管板倾斜 ϕ 角。

液柱式压强计具有结构简单，可测量很小的压差和测量精度较高的优点，曾广泛地得到应用。但液柱式压强计是以液柱的高度差来显示压强值，而长度是一个非电量，不便于自动记录和控制。并且液柱式压强计的体积较大，反应较慢，使用时须水平置放，抗震性能很差以及易受环境温度变化的影响等缺点，故液柱式压强计的应用已逐渐减少。

2. 机械式压强计（压力表）

机械式压强计的核心部分是一金属弹性元件——膜盒或包端管。在弹性元件的内部导入被测压强后，弹性元件变形，经杠杆、齿轮、指

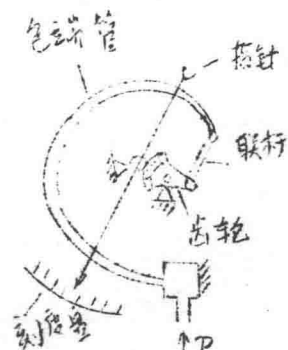


图 3-15 包端管压强计

针等机械装置把这种变形放大并指示出来。在量程范围内，弹性元件的变形与被测压强之间呈线性关系，可以在标度盘上直接读出压强值。如图 3-15 为包端管压强计的结构示意图。

机械式压强计具有读数方便，量程大等优点。但这类压强显示仪表的精度较低，用人工读数，并需进行定期校验，故主要用于监测超音速风洞气源系统的压强。

(四) 测压传感器

测压传感器是将压强信号转换为与压强成一定关系的电信号的装置。

1. 应变测压传感器

应变测压传感器有各种不同的结构型式，但其原理相仿，都是被测压强作用在弹性元件上使之变形，导致电阻应变片随之应变而产生电阻值的变化，由电阻应变片构成的电桥电路输出与压强成一定关系的输出电压，从而可确定被测压强值。

常用的弹性元件是圆形平膜片和圆形应变筒。图 3-16 是平膜式测压传感器结构原理图。弹性平膜片可以看作是周边固支的圆形平

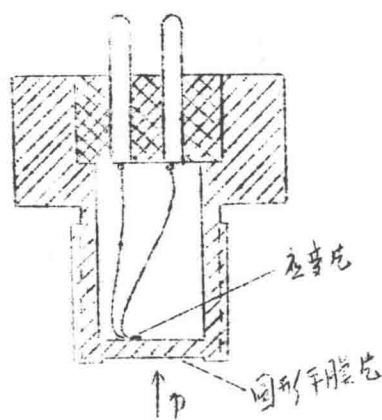


图 3-16 平膜式测压传感器