

T/AMET

烟台先进制造工程技术学会团体标准

T/AMET XXXX—XXXX

压力测量

Pressure measurement

征求意见稿

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

烟台先进制造工程技术学会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	2
3 术语和定义	3
3.1 压力	3
3.2 压力单位	3
3.3 绝对压力	4
3.4 表压力	4
3.5 大气压力	4
3.6 运动流体中的压力	4
4 仪器设备	6
4.1 静压力计	6
4.2 活塞式压力计	6
4.3 液体式压力计	7
4.4 机械压力计	9
4.5 压力传感器	10
4.6 压力变送器	12
5 运动流体中的压力测量	13
5.1 静态压力测量	13
5.1.1 测压孔	13
5.1.2 静压管	15
5.1.3 圆盘形探头	16
5.2 总压测量	17
5.3 总压与静压组合测量	20
5.4 压力场的测量	23
6 校准	25
7 不确定度评定	26
7.1 测量不确定度评定的步骤	26
7.2 评定方法	26
7.2.1 不确定度分量的A类评定	26
7.2.2 不确定度分量的B类评定	27
7.2.3 合成不确定度的计算	29
7.2.4 扩展不确定度的确评定	30
7.3 不确定度评定实例	30
7.3.1 精密压力表测量精密压力表示值误差测量不确定度评定	30
7.3.2 精密液体压力计示值误差测量不确定度评定	32
8 壁面静压孔测量误差的评估	35

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是T/AMET 4604《压力测量》的第1部分。T/AMET 4604已发布了以下部分：

- 第1部分：压力测量；
- 第2部分：质量测量；
- 其他。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件修改采用ASME PTC19.2, ESDU12003。本文件对ASME PTC19.2, ESDU12003进行了技术性修改，以适应我国的实际情况。

本文件由烟台先进制造工程技术学会提出并归口。

本文件起草单位：烟台先进制造工程技术学会。

本文件主要起草人：

本文件首次发布。

压力测量

1 范围

本文件给出了测量流体压力、可选用的各类仪器、不确定度、外部影响和校准等内容。基于不同技术的特点，给出了测量方式的选择，仪器的构造、安装、校准和使用的指导。

本文件涵盖静态和动态流体中的压力测量，未覆盖现实应用中所有可能的压力测量。

本文件规定的试验方法适用于工业过程控制、实验室检测、设备校验及科研应用场景。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1226 一般压力表

GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定

GB/T 17614.3 工业过程控制系统用变送器 第3部分：压力变送器的性能评定方法

CNAS GL054 测量设备校准周期的确定和调整方法指南

JB/T 6803.1 液体压力计 一般杯形、U形压力计

JJF 1008 压力计量名词术语及定义

JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示

JJG 52-2013 弹性元件式一般压力表、压力真空表和真空表检定规程

JJG 172-2011 倾斜式微压计检定规程

JJG 241-2022 精密杯形和U形液体压力计检定规程

JJG 518-2023 皮托管

JJG 540-2019 工作用液体压力计

JJG 882-2019 压力变送器检定规程

JJG 2023-1989 压力计量器具检定系统表

ISO 5167-1 封闭管道中流体流量的测量用差压装置

ASME PTC19.2 Pressure Measurement Instruments and Apparatus Supplement

ESDU 12003 Pressure and Flow Measurement

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 压力 pressure

垂直并均匀作用在单位面积上的力；

注：压力在物理学上称为“压强”。[JJF 1008-2008 1.1]

在重力场的作用下处于静止状态的流体没有剪切应力，会对任何固体边界或表面施加一个纯粹的静压作用力。流体的静压 P 定义为当面积 δA 趋近于零时，作用在面积 δA 上的静压力 δF 的极限值：

$$P = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\delta F}{\delta A} \right) = \frac{dF}{dA} \quad (3.1)$$

对于容器中处于静止状态且具有自由表面（与大气接触）的液体，压力与高度 h （流体中位于液面以下某一点的深度）之间的关系为：

$$\frac{dP}{dh} = -\rho g \quad (3.2)$$

对于密度恒定为 ρ 的流体，（3.2）式子进行积分，得出压力分布情况：

$$P = P_a + \rho gh \quad (3.3)$$

其中 P_a 是基准海拔（ $h=0$ ）处的大气压力。

对于处于封闭空间内的气体，其密度通常较低，以至于高度变化所引起的压力变化可以忽略不计。而在无封闭限制的空间中，如自由大气层，高度的大幅变化会导致压力发生显著变化，其变化遵循公式（3.2）。通过公式（3.2）来确定两个高度之间的压力差时，应考虑密度的变化，因为密度既受温度影响，也受压力影响。对于实际气体而言：

$$\frac{P}{\rho} = ZRT \quad (3.4)$$

对于任何特定气体而言：

R 值均为常数，即 $R = \frac{\bar{R}}{M}$ ，

式中：

\bar{R} 是通用气体常数；

M 是该气体的摩尔质量；

T 是绝对温度；

Z 是压缩因子。

对于在低压力下的常见气体，压缩因子 $Z \approx 1$ 。即 $\frac{P}{\rho} = RT$ 。对于具有复杂分子结构的气体，或接近相变边界的情况，压缩因子 Z 可能与1有显著差异。

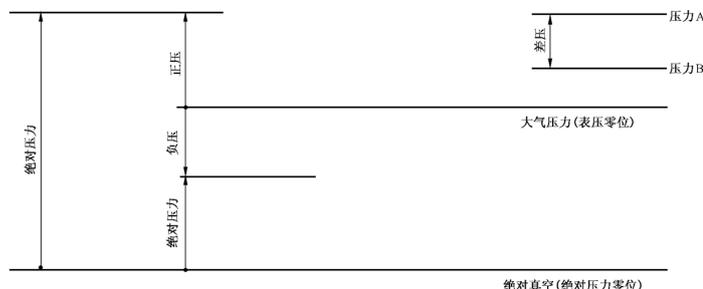


图3.1 压力定义

3.2 压力单位 pressure unit

国际单位制中的压力单位是 N/m^2 ，又称帕斯卡，简称“帕”（以 Pa 表示）。它的物理意义是：1牛

顿的力垂直均匀地作用于1平方米面积上所产生的压力。[JJF 1008-2008 1.10]

表1压力单位及换算

	帕斯卡	巴	标准大气压	托	磅每平方英寸	毫米汞柱 (0℃时)	英寸汞柱 (0℃时)
	Pa	bar	atm	torr	psi	mm Hg	in Hg
1 Pa	1	10^{-5}	9.8692×10^{-6}	7.5006×10^{-3}	145.04×10^{-6}	7.5006×10^{-3}	2.9530×10^{-4}
1 bar	10^5	1	0.98692	750.06	14.50377	750.06	29.52999
1 atm	101325	1.01325	1	760	14.69595	760	29.92126
1 torr	133.322	1.3332×10^{-3}	1.3158×10^{-3}	1	19.337×10^{-3}	1	3.937×10^{-2}
1 psi	6894.76	68.948×10^{-3}	68.046×10^{-3}	51.71493	1	51.71493	2.03603
1 mm Hg	133.322	1.3332×10^{-3}	1.3158×10^{-3}	1	19.337×10^{-3}	1	3.937×10^{-2}
1 in Hg	3386.39	3.3864×10^{-2}	3.3421×10^{-2}	25.4	0.49115	25.4	1

3.3 绝对压力 absolute pressure

以完全真空作参考点的压力 [JJF 1008-2008 1.3]

绝对压力是指相对于零基准压力（即真空状态）所测量的压力。测量绝对压力的传感器通常只有一个压力接口，为单端式或单口式传感器。绝对压力只能是正。

3.4 表压力 gauge pressure

以大气压力为参考点，大于或小于大气压力的压力。[JJF 1008-2008 1.5]

单位面积上流体对容器壁施加的相对于局部环境压力的法向力。表压可以是正的，也可以是负的。通常将负表压称为真空。

3.5 大气压力(又称：气压) atmospheric pressure

地球表面大气层空气柱重力所产生的压力。[JJF 1008-2008 1.4]

通常当地的大气压也称环境压力，pressure, ambient

国际标准大气压是760毫米汞柱，在0℃(32°F)。

在SI单位中，101.325 kPa (14.69551 bf/ In)。

标准重力加速度为9.806650 m/s²

3.6 运动流体中的压力 pressures in moving fluids

总压力、静压力和动压力

在运动的流体中，在某一特定时刻某一特定点所出现的压力，即被称为静压的p值，流体在等熵、绝热过程中滞止到零时的压力，即被称为总压的值。总压与静压之间的压力差是由流体运动引起的，称为动压。

3.6.1 静态压力 static pressure

在所研究的领域内，不随时间变化或随时间变化而缓慢变化的压力。[JJF 1008-2008 1.8]

3.6.2 总压力 total pressure

气流速度等熵滞止到零时的压力，又称驻点压力。[GB/T 16638.1-2008 3.1.64]

在运动的流体中，与流向垂直的平面上的压力。它是压力在某一点方向函数的最大值。它等于静态压力和动态压力的总和。当运动流体在仪器处相对静止时，表示总压。

3.6.3 动态压力 dynamic pressure

在所研究的领域内，随时间变化而变化的压力。[JJF 1008-2008 1.9]

3.6.4 雷诺数 Reynolds number

表征流体惯性力和黏性力相对大小的一个无量纲相似参数，即

$$R_e = \frac{\rho V l}{\mu} = \frac{V l}{\nu} \quad (3.5)$$

式中：

ρ —流体的密度；

V —为流场中的特征速度；

l —为特征长度；

μ —为流体的 [动力] 黏度；

ν —为流体的运动黏度。

3.6.5 马赫数 Mach number

流场中某点的速度 V 与当地声速 c 之比，即

$$M_a = \frac{V}{c} \quad (3.6)$$

马赫数是衡量压缩性对空气流动影响的最重要参数。

4 仪器设备

用于压力测量的仪器和传感器，通常可以分为：

静压表：用于测量流体中的静压；

机械表：依靠在施加压力下元件的变形来测量压力；

电传感器：通过将施加的压力转换为电信号来测量压力。

表 4.1 压力测量仪器概述

仪器	测量范围 (Pa)	准确率 (%)	重复性 (%)	频率响应 (Hz)
静压力计 (使用时防止工作液与压力感应液混合)				
活塞式压力计 (常用于仪器校准)	$10^2 \sim 10^8$	0.01~0.05		
U 形管压力计	$10^2 \sim 10^6$	0.02~0.02		
倾斜式微压计	$10 \sim 10^4$	0.02~0.02		
单管[杯形]液体压力计	$10 \sim 10^5$	0.02~0.02		
机械压力表				
弹簧管式压力计	$10^2 \sim 10^6$	0.1~1		
隔膜压力计	$1 \sim 10^6$	0.1~1		
波纹管压力计	$10 \sim 10^6$	0.1~1		
压力传感器				
应变式压力传感器 非导电、清洁的液体适用。	$1 \sim 10^6$	0.5	0.1	10^5
电容式压力传感器 (仅适用于清洁液体。对电磁场不敏感。 具有高温耐受能力)	$1 \sim 10^6$	1.0	0.1	10^3
压电式压力传感器	$1 \sim 10^5$	1.0	0.25	10^5
电感式压力传感器	$1 \sim 10^5$	0.5	0.1	10^3
线性可变差动式传感器	$1 \sim 10^5$	0.5	0.2	10^5
电位器式压力传感器	$1 \sim 10^5$	1.0	0.1	10^3

4.1 静压力计 hydrostatic gauges

静压力计通过测量流体单位面积上的静压力来测量压力。

静压力计的测量结果与所测流体的类型无关，静压力计具有线性度高的特性。可用作压力参考标准。由于压力的变化通常会导致机械运动或流体的运动，静压力计不适用于不稳定压力的测量。

4.2 活塞式压力计 piston gauge

利用活塞及其连接件和专用砝码加载在活塞有效面积上的重力与被测压力作用在活塞下端面产生的力相平衡的原理而制成的测量压力的仪器，如图 4.1所示。[JJF 1008-2008 2.1]

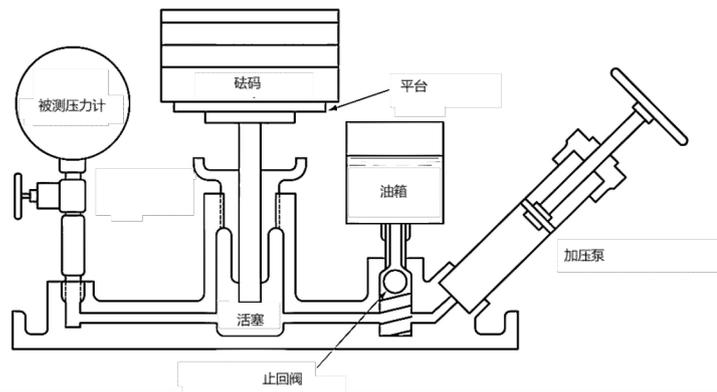


图 4.1 活塞式压力计

4.3 液体式压力计 liquid manometer

利用液体自重产生的压力与被测压力相平衡的原理制成的压力计。[JJF 1008-2008 3.1]

液体式压力计是以液体静力学原理为基础的。一般用水银或水作为工作液，用于测量低压、负压和压力差。液体压力计多用于测量气体的压力。液柱式压力计结构简单，使用、维修方便。可以测量 10^2 到 10^6 Pa (10^{-3} 到10bar)范围内的压力，精度为示值的0.02-0.2%。

4.3.1 U型管压力计 U-tube manometer

示值管为U形结构,用于测量压力的液体式压力计。[JJF1008—2008,定义3.2]

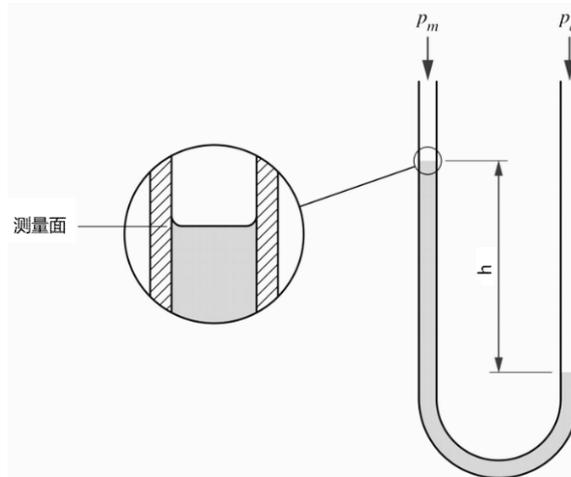


图 4.2 U型管压力计

U 形管压力计原理，如图 4.2 所示，是一个部分充满液体的 U 形管。其中一侧与待测压力 P_m 相连。另一侧施加一个参考压力 P_a （可以是大气压）。液面的高度差代表了所施加的压力差，这依据流体静压定律可以得出。

$$\Delta P = P_m - P_a = \rho gh \quad (4.1)$$

式中：

h表示液位的差值；

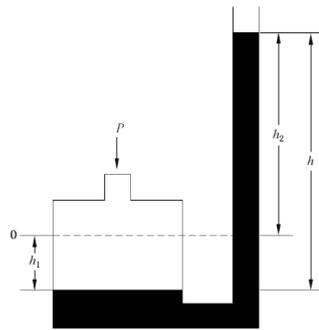
ρ 表示液体的密度；

重力会对测量精度产生影响。纬度每变化 10° ，读数就会出现0.1%的误差。海拔升高1524 米（5000 英尺）也会导致读数出现0.1%的误差。环境温度会密度产生影响，为了进行准确测量，需要对环境温度进行测量。

4.3.2 单管[杯形]液体压力计 one-tube liquid manometer

U 形管的一边示值管做成杯形容器，并将单管与杯形容器的内径保持一定比例的液体式压力计。[J

JF1008—2008 3.4]



图：4.4单管[杯形]液体压力计

单管液柱式压力计如图4.4所示，左边杯形容器的内径 D 远大于右边管子的内径 d 。由于左边杯形容器内工作液体体积的减小量始终是与右边管内工作液体体积的增大量相等，所以右边液面的下降量将远小于左边液面的上升量(即 $h_1 \ll h_2$)。

$$\text{因 } \frac{\pi}{4} D^2 h_1 = \frac{\pi}{4} d^2 h_2$$

$$\text{则 } h_1 = \frac{d^2}{D^2} h_2$$

$$p' = \rho g h = \rho g (h_1 + h_2) = \rho g \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \right) h_2 \quad (4.2)$$

由于 $d \ll D$ ，故 $\frac{d^2}{D^2}$ 可以忽略不计，则 $p' = \rho g h_2$ 。若工作液体的密度 ρ 一定，则测量管内的工作液体上升的高度，即可以得知被测压力的大小。

4.3.3 倾斜式微压计(又称：斜管微压计)tilting-tube (micro-manometer)

将单管压力计的单管做成与水平面成一定倾斜角度的结构，用于测量微小压力的液体式压力计。[JF1008—2008 3.4]。

在测量微压的时候，为了提高灵敏度，可将单管液柱式压力计的测量管倾斜放置，但倾斜角 α 一般要小于 15° ，否则液柱易冲出，读数较困难，误差增大。它可以测到0.98 Pa的微压。为了进一步提高微压计的精确度，应选用密度小的酒精作为工作液体。如图4.3示。

液柱长度 L 与测量管测出的垂直液柱高度 h_2 和液柱的实际高度 h 之间的关系为：

$$h_2 = L \sin \alpha \text{ 和 } h = h_1 + h_2 = L \left(\sin \alpha + \frac{d^2}{D^2} \right), \text{ 若 } P > B, \text{ 则表压力}$$

$$p' = \rho g h = \rho g L \left(\sin \alpha + \frac{d^2}{D^2} \right) \quad (4.3)$$

$$\text{令 } A = \rho g \left(\sin \alpha + \frac{d^2}{D^2} \right), \text{ } d, D, \rho \text{ 为定值,}$$

$$p' = AL \quad (4.4)$$

若倾斜角 α 也一定，则 A 为常数，所以读出 L 值即可求出压力值。改变 α 值可改变 A 值，以适应不同的测量范围，倾斜式微压计的使用范围为100~2500 Pa。

大气压力、重力加速度、工作液体密度 ρ 和标尺分度等均可影响其测量准确度，在测量中应进行修正，以提高测量精度。

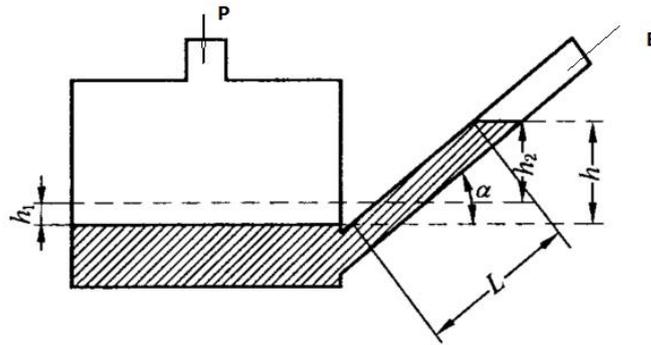


图 4.3 倾斜式微压计

4.3.4 多管压力计 multi-tube manometers

多管压力计是一种便于同时测量多个大小相近压力的仪器。每个单独的压力感应点都连接到单独压力计管的上端，而所有下端则连接到一个与大气压或参考压力相通的公共端上。在进行测量之前，必须将容器内的液面高度调整到一个固定的基准点。多管压力计也可以倾斜设置以提高其分辨率，但会相应地缩小测量范围。

4.4 机械压力计 mechanical Gauges

以弹性敏感元件为感压元件的测量压力的仪表，又称弹性敏感元件式压力表（elastic element pressure gauge）。[JJF1008—2008 4.1]

机械压力计，又称无液压力计，其工作原理是基于一个弹性压力感应元件（又称弹性元件），弹性元件受压后产生的弹性变形，可以通过传动机构直接带动指针指示压力（或压差），也可以通过某种电气元件组成变送器，实现压力（或压差）信号的传输。

这类压力计可用于测量液体和气体的压力，常用的弹性元件有弹簧管（单圈和多圈式）、波纹膜片、波纹膜盒和波纹管等。其中弹簧管可用于高、中、低压直到真空度的测量，其他几种多用于微压和低压测量。

4.4.1 弹簧管式压力计 bourdon tube pressure gauge

用弹簧管作敏感元件的测量压力的仪表。[JJF1008—2008 4.2]

弹簧管式压力计的压力传感元件是一个薄壁封闭的盘绕管，连接到感应压力的腔室或管道中。施加压力的变化会导致管子盘绕和解绕。这种动作通过机械联动装置传递到指示针，该指示针的运动显示压力值，如图4.4所示。

弹性形变原理可知，中心角的相对变化值 $\Delta\gamma/\gamma_0$ 与被测压力在弹性限度内成比例关系，即

$$\Delta\gamma/\gamma_0 = \frac{\gamma_0 - \gamma}{\gamma_0} = Kp \quad (4.5)$$

式中：

γ_0 ——原始中心角；

γ ——任一压力作用下的中心角；

p ——被测压力；

K ——与弹簧管材料、壁厚和几何尺寸等有关的系数，弹簧管的材料有铜、磷青铜、不锈钢等。

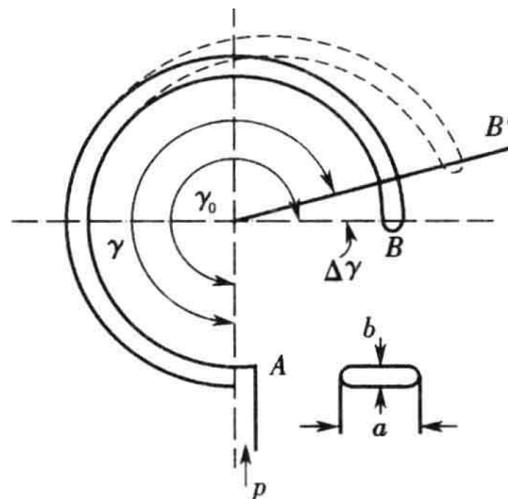


图4.4弹簧管压力传感器

4.4.2 隔膜压力计 diaphragm gauge

用隔膜装置使弹性敏感元件中的介质与测量压力介质隔离的压力表。[JJF1008—2008, 定义4.18]

隔膜压力计利用一个可弯曲的膜片来测量不同压力区域之间的压力。通常使用陶瓷或金属膜片，膜片的变形程度取决于膜片两面之间的压力差。膜片的变形量可以通过机械、光学或电学等技术进行测量。

4.4.3 波纹管压力计 bellows pressure gauge

用波纹管作敏感元件的测量压力的仪表。[JJF1008—2008, 定义4.5]

波纹管压力计由一个封闭且密封的波纹管腔体组成。被测压力从外部施加，并使腔体发生变形。变形情况通过将腔体机械连接至指针或通过传感器进行测量。波纹管压力计仅适用于测量与密封腔体内的压力（通常是大气压）相差不大的压力，图4.5所示

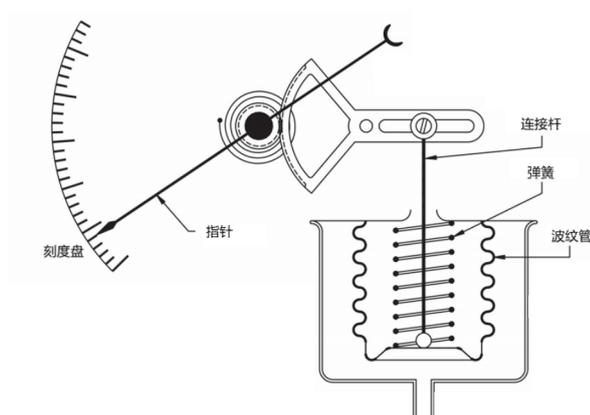


图4.5一种典型波纹管压力计

4.5 压力传感器 pressure transducer

能感受压力信号，并能按照一定的规律将压力信号转换成可用的输出电信号的器件或装置。[JJF1008—2008, 定义5.1]

压力传感器会根据所施加的压力产生相应的电信号输出。与机械式压力仪表相比，它们更容易与数据记录和记录设备相连接。压力传感器一般无法直接读数。压力传感器使用时要考虑环境因素影响，如温度、电磁辐射、测量液体中的固体颗粒、振动、噪声等。

4.5.1 应变式压力传感器 strain pressure transducer

用电阻应变片作敏感元件、粘贴在弹性元件上而制成的压力传感器。[JJF1008—2008, 定义5.6]

应变计传感器通过测量附带应变计的柔性膜片的变形来感知压力，在小型传感器中，应变计通常与膜片材料融为一体。应变计通常与电桥式连接，当膜片未受力时（即膜片两侧的压力相等），输出信号接近于零，如图 4.6 所示。

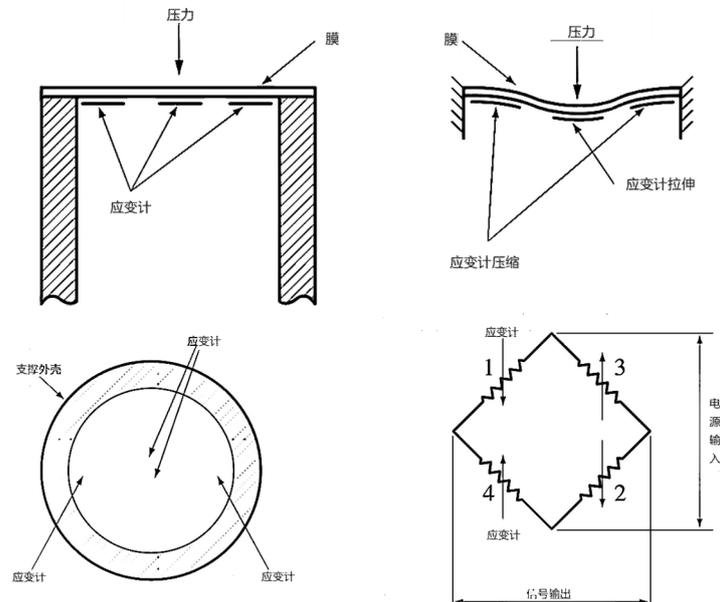


图 4.6 应变式压力传感器

4.5.2 电容式压力传感器 capacitance pressure transducer

利用力与电容量变化的关系制成的压力传感器。[JJF1008—2008, 定义5.9]

电容式压力传感器，是由一个安装在两块平行金属板之间的隔膜构成，隔膜的两侧各有一个带电电极，其电容分别为 C_1 或 C_2 。间隙约为 0.05 毫米。工作介质可以是液体或气体，当对传感器施加压力差时，电容 C_1 和 C_2 会发生变化，从而导致所测量输出值的变化。

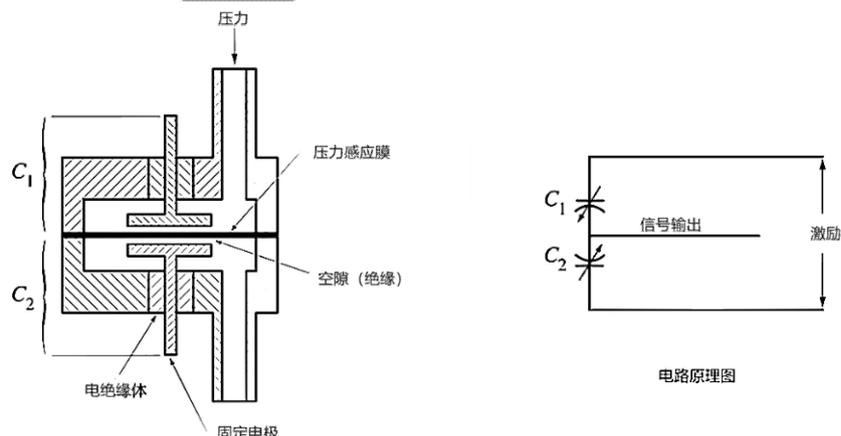


图 4.7 电容式压力传感器

4.5.3 压电式压力传感器 piezoelectric pressure transducer

利用压电晶体材料在一定方向上受压力后，在其两个表面上产生符号相反电荷的效应制成的压力传感器。[JJF1008—2008, 定义5.10]

压电材料在受到机械应力作用时会产生电位差，通过放大器放大，在放大器输出端会出现与输入成

正比的输出信号，如图4.8所示。

压电传感器通常坚固耐用，具有较高的固有频率，具有较好的线性度。压电技术对电磁场和辐射不敏感，能够在恶劣条件下进行测量。一些材料（如磷酸镓或电气石）具有极高的温度稳定性，使传感器的工作温度可高达1200K。

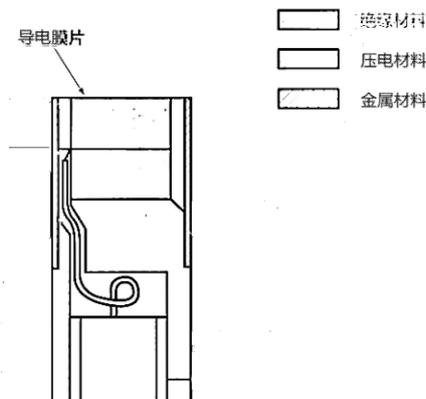


图4.8 压电传感器

4.5.4 电感式压力传感器 inductance pressure transducer

在压力变化条件下，利用线圈的自感和互感变化制成的压力传感器。[JJF1008—2008, 定义5.11]。

电感式压力传感器的基本原理如图4.9所示。铁金属膜片放置在两个电感线圈之间，当施加压力差时，膜片会发生偏转，从而改变电感。

图4.10所示为线性可变差动变压器传感器。金属片放置在变压器的初级和次级线圈之间，并在初级线圈上施加交流电压。当通过施加压力差移动膜片时，会发生相应的输出电压变化。

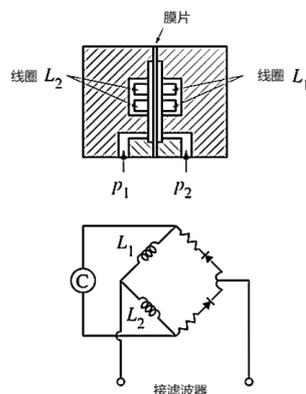


图4.9

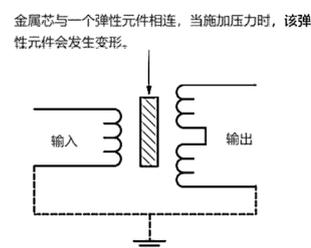


图4.10

4.5.5 电位器式压力传感器 potentiometer pressure transducer

用电位器和压力敏感元件制成的压力传感器。[JJF1008—2008, 定义5.8]。

这种传感器的基本元件是一个电位器，其中电压分压器与一个膜片相连。压力差会使膜片变形，从而移动电压分压器，并导致设备输出电压发生变化。

4.6 压力变送器 pressure transmitter

能将压力变量转换为可传输的标准化信号的仪表，其输出信号与压力变量之间有一给定的连续函数关系（通常为线性函数）。[JJF1008—2008, 定义7.1]。

压力变送器能够感知压力，并输出与压力成比例的电流信号。根据工作原理不同，压力变送器包括电阻式传感器、晶体硅谐振式传感器、电容式传感器、压电式传感器等。压力变送器常配有外接放大器和滤波电路。

5 运动流体中的压力测量

5.1 静态压力测量

运动流体的静压可以通过三种不同的方式来测量：

- 在流体流动的边界表面上，开设孔洞并将其与压力检测装置相连。通常被称为测压孔或静态测压孔。测压孔的位置和形状应不干扰流体的流动。静态测压孔只能提供关于测压孔所在表面各点静态压力的信息。
- 使用静压传感器（静压管）测量，安装在流体的内部，与流动方向一致。静压管上游端密封，在静压管表面开孔，感应局部静压，并使静压管在流场中所造成的流线弯曲和其他影响可以自行补偿。
- 使用流体内部探头测量，根据流场的性质和安装要求，静压探头的形状有球体、圆柱体、楔形体、锥体及其他形状。

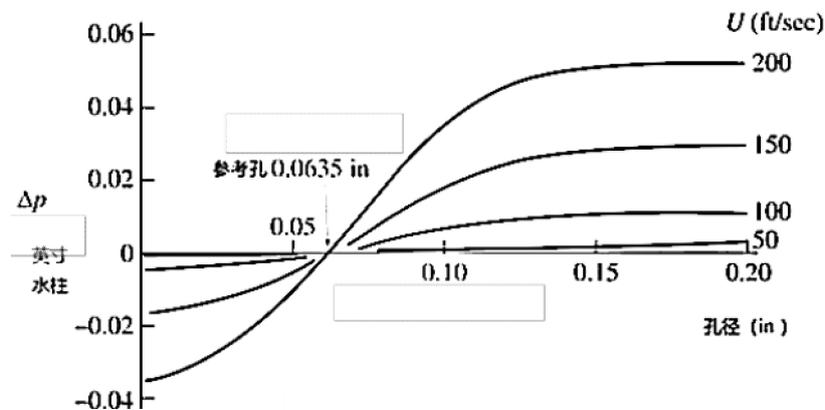
5.1.1 测压孔

5.1.1.1 孔径的影响

为了消除对流体流动的干扰，测压孔应设计得尽量小，测压孔应与流体边界表面垂直。

测压孔对流体的干扰随着孔径的增大而增加，测压孔对传感器压力变化的响应时间随着孔直径的减小而减小，随孔长度的增加而增加。

图示5.1列举了孔径对压力测量的影响。（除孔径外还可能受到动压、雷诺数、马赫数等的影响）



图示5.1 $1.5 < L/d < 6.0$ 孔径对压力测量的影响

测压孔的孔径带来的测量误差是由测压孔附近边界层的扰动引起的，与局部剪应力相关。

测压孔的孔径带来的测量误差 Δp 与壁面剪应力 τ_w 的关系如图5.2所示，

L/d 为测压孔长径比；

d 为测压孔直径；

Re_d 为雷诺数。

$$Re_d = \left(\frac{d}{\nu}\right) \left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{1/2}$$

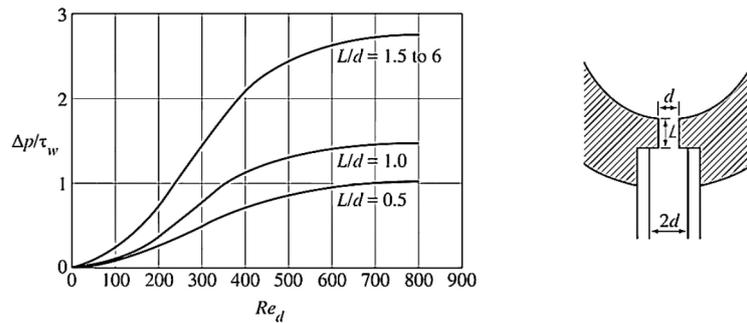


图5.2 静态压力测压孔的相对误差 $\Delta p/\tau_w$ 与孔的雷诺数以及长度/直径比关系图。

- 通过选择小的孔径 d ，可以降低测量误差。但小孔径会增加压力传感器适应压力的响应时间。
- 为了避免测量误差对 L/d 的依赖性， L/d 应超过1.5。较大的 L/d 也会增加响应时间。
- 当 $Re_d \geq 800$ 时，孔径带来的测量误差是恒定的。

5.1.1.2 测压孔方向和表面粗糙度的影响

壁面测压孔的钻取对所测量的压力有显著影响。若壁面测压孔未完全垂直于表面，不仅能感知静态压力，还能感知到动态压力的一个分量。边缘倒圆的小孔引入正误差，而边缘倒角的小孔则引入负误差，如图5.3所示。

测压孔表面粗糙度较大时，表面凸起毛刺等可带来动态压力的15%~20%的负误差。

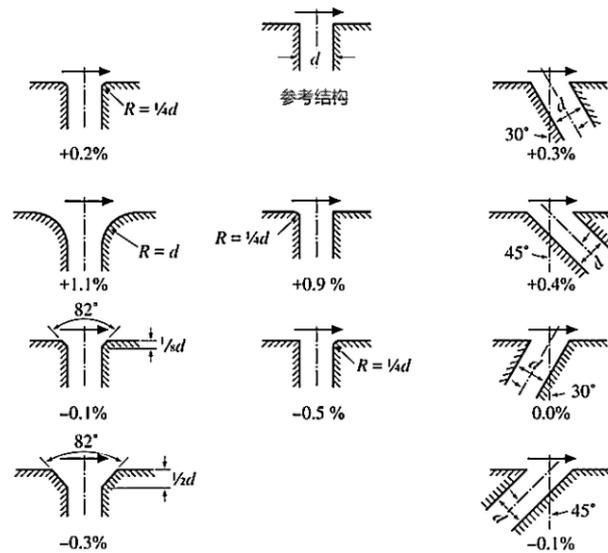


图 5.3 测压孔几何形状对静压测量的影响

5.1.1.3 管道截面测量连接配置

当在同一管道段上会设置多个压力传感器，并将测量结果取平均值以得出平均静压值时。因管道中的压力微小波动会导致流体通过管道流动，测量时应使集流管应尽可能靠近管道的边缘，图示5.4所示，(b)比(a)更为准确。

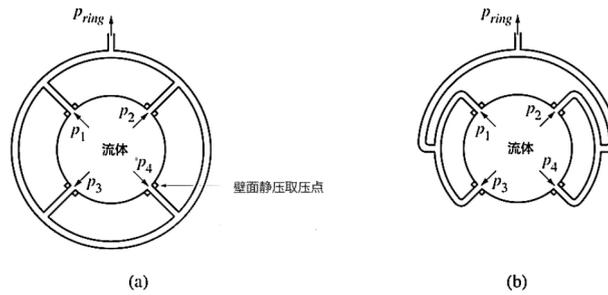


图5.4 多个压力传感器连接图

5.1.2 静压管

静压管用于测量流体内部的静压。由一根带有密封且呈圆弧形端部的管子组成，该端部形成一个尖头并指向流体方向，如图 5.5 所示。静压接头位于管子的圆柱形表面上，距离尖端有一定距离。测量的精度取决于孔相对于尖端和支撑杆的位置。

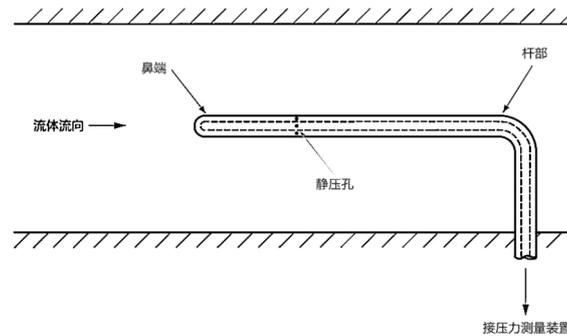


图 5.5 静压管

5.1.2.1 静压管头部和杆部的影响

静压管测量静压的精度主要取决于测压孔相对于鼻端和杆部的位置。由鼻端引起的加速效应使测压孔的压力趋向于降低，而杆部引起的滞止效应使测压孔的压力趋向于提高。在具有适当补偿的测压管中，这两种效应在测压孔平面上可以刚好抵销

测压孔不应位于鼻端下游四倍直径的以内的位置，鼻端和杆部对局部静压的影响如图 5.6 所示。

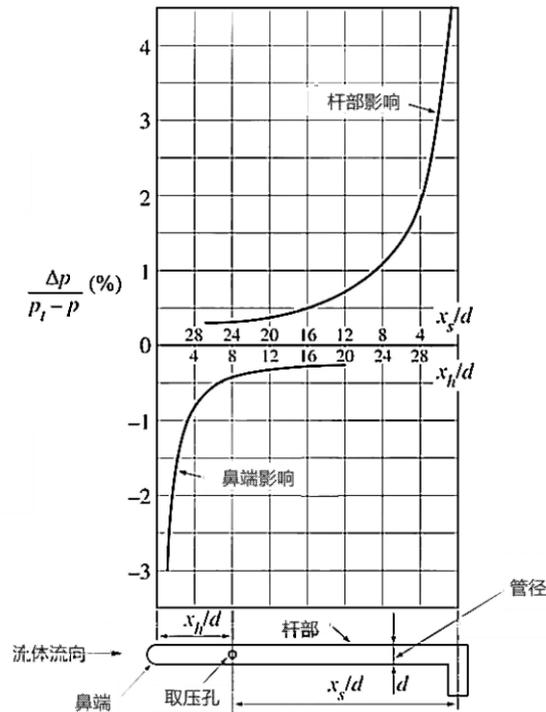


图 5.6 静压管特性，鼻端和杆部对局部静压的影响

5.1.2.2 安装的影响

静压管应与流体保持对齐。对于与气流方向偏差 $<10^\circ$ ，动态压力的误差小于 0.05%。静态探头不应用于流线曲率较大的流场中，会导致沿探头方向垂直的压力梯度，影响静态压力的测量。

在马赫数 <0.7 时，静压管对马赫数的敏感度较低。在马赫数 >0.7 ，探头周围的流体局部加速会导致形成激波，引入的误差较大，可达动态压力的6%。

5.1.3 圆盘形探头

采用圆盘前沿所引起的流线弯曲由测压孔平面内的凹陷面进行补偿局部加速和减速效应的原理来测量静态压力，圆盘两侧的一对相对的开口连接到一个单一的出口管，圆盘探头对圆盘平面内的流动方向不敏感，并可在事先不知道流动角度的情况下使用，圆盘探头对俯仰角（即垂直于圆盘平面的流动角度）极其敏感且呈非线性。

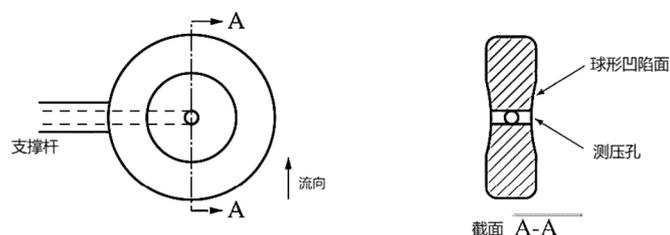


图5.8 圆盘形探头

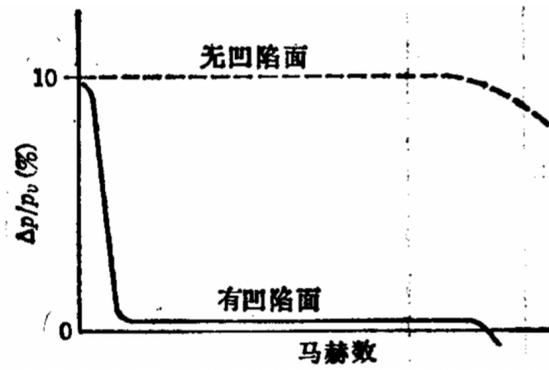


图5.9 圆盘形探头特性

5.2 总压测量

通过皮托管实现测量运动流体的总压，在皮托管是一端开口与流体流动方向对齐，另一端连接到压力测量仪器或传感器，如图5.9所示。

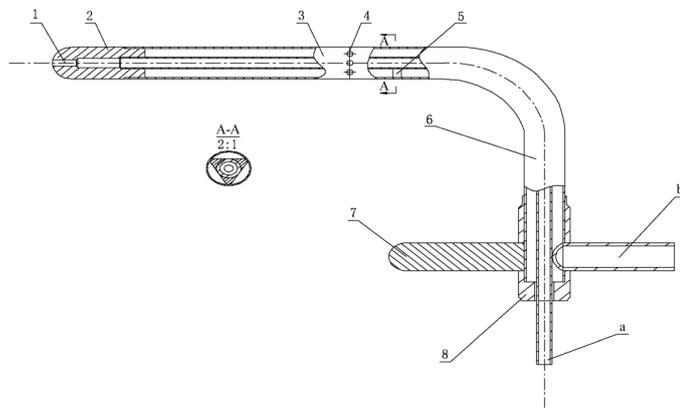


图5.9L型皮托管结构示意图

1—总压孔；2—鼻端；3—测头；4—静压孔；5—隔离圈；6—支杆；7—定位杆；8—压力表接头；a—总压；b—静压

探头的鼻端可使用不同几何形状，方头的、半球形的或椭圆形的。在有限空间场所，可使用球形或圆柱形探头，如图5.10所示，取压口应与流向对齐。

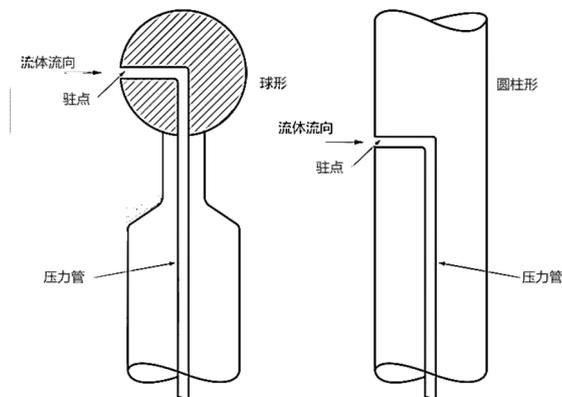


图5.10 球形和柱形总压测量探头

5.2.1 影响测量的误差

皮托管探头的角度灵敏度取决于其探头的形状。如图5.11所示。仅适用于流体倾斜角度小于探头中心线轴约 5° 的情况。

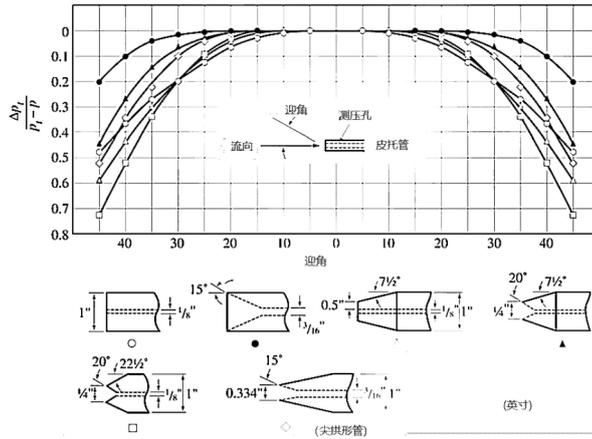


图 5.11 不同头部形状 of 皮托探头对迎角的响应情况

圆柱形探头对与探头杆轴垂直的角度灵敏度也较高，如图 5.12 所示。

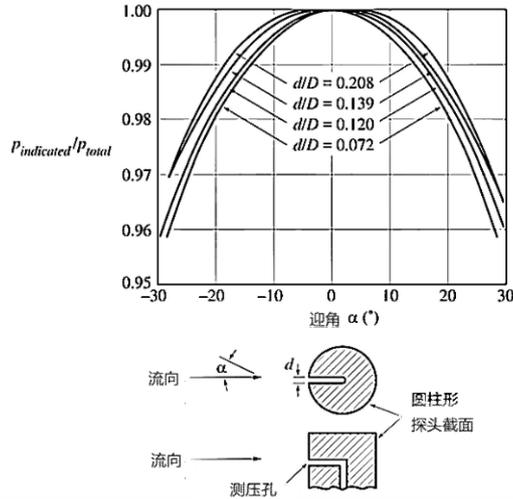


图 5.12 垂直于流动方向的圆柱形探头的指示总压随迎角和测压孔尺寸的变化

5.2.2 基尔探头

如果流动方向未知，或者已知测量点的流动方向随运行条件变化很大，使用基尔探头来测量总压力。如图 5.13 所示，基尔探头由一个皮托管和一个带有内斜面的圆形护罩组成，护罩位于探头前端的前方。该护罩的作用是引导气流在大角度下沿着更接近皮托管的方向流向皮托管。角度响应如图 5.14 所示。俯仰角在+40° ~ -30°，偏航角在±40° 范围内响应不敏感。

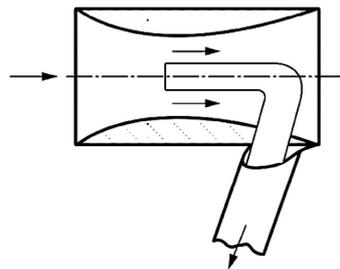


图 5.13 基尔探头

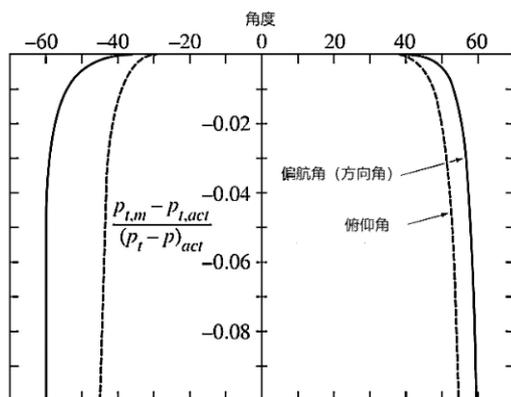


图 5.14 基尔探头对偏航角和俯仰角的响应

相比皮托管相比，基尔探头的头部大3到4倍。限制了它在狭小空间和/或具有大速度梯度的流体中的使用。

探头的雷诺数是基于皮托管的外径和局部流速而确定的。粘性效应仅在探头雷诺数小于约 50 时才会显著，如图 5.15 所示。 C_{pitot} 是皮托系数，其定义为

$$C_{pitot} = \frac{P_{t,m} - P}{P_t - P} \quad (5.3)$$

式中：

$P_{t,m}$ ——测得的总压力

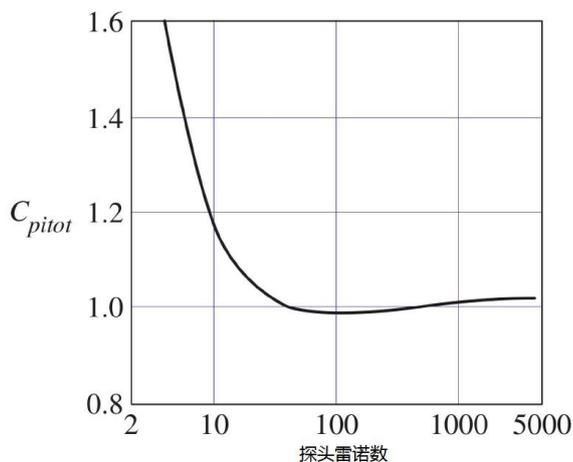


图 5.15 探针雷诺数皮托探头对探头雷诺数的响应

5.2.3 马赫数的影响

常规的皮托探头在马赫数不超过0.85时不受其影响。当马赫数大于0.85，当探头阻塞面积较大时，探头周围的气流可能会出现局部超音速加速，会对探头的响应产生较大的影响。当马赫数 ≥ 1.2 时，探头头部前方会出现一个激波，而探头本身的气流则会处于亚音速状态。

将皮托探头与气流对齐，即激波在局部与感应头垂直，就可以根据标准气体动力学方程充分确定激波中的总压力损失，并因此对皮托读数进行修正。

对于高亚音速或低超音速的气流，必须对探头进行校准。对于亚音速气流，可以通过将探头置于光滑收缩管道的喉部来进行校准。对于超音速气流，将探头置于收敛-扩散喷管的下游位置，并将其响应与位于管道入口处、流速明显较低的类似皮托探头的响应进行比较来进行校准。

对于圆柱形、球形和基尔探头，马赫效应与常规皮托探头的效果相似。对于基尔探头，护罩的作用是使皮托平面处的流体速度高于自由流速度，因此线性响应的极限亚音速马赫数可能低于常规皮托探头。

对于所有在超音速条件下使用的探头，因为探头头部和杆部形状的任何不对称性都可能改变上游激波的位置，并使其与探头不平行，应进行校准后使用。

对于圆柱形和锥形探头，在马赫数为0.26~1.62范围内，响应基本保持恒定的入射角度范围会随着马赫数的增加而增大。对于基尔探头，在0.26~0.9马赫数范围内，入射角度的范围会减少约10%，在超音速流动中则会更小。

5.2.4 横向压力梯度的影响

当测量平面内存在与流线垂直的压力梯度时，皮托管的存在会导致探头的有效中心（即测量压力实际作用的点）从几何中心向总压较高的区域偏移（图 5.16）。有效位移 δ 与探头直径 D 的比为梯度参数

$$K \text{ 的函数: } K = \frac{D(du/dy)}{2u} \quad (5.4)$$

其中 du/dy 是横向速度梯度。几种常见探头几何形状的相关性见表 5.1。

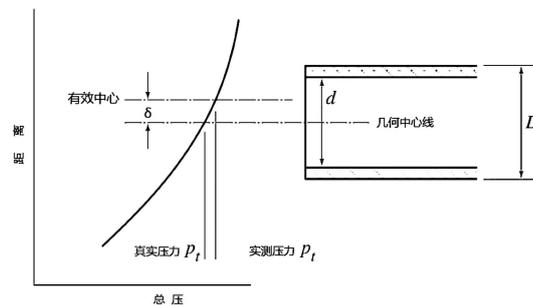


图 5.16 横向压力梯度中的皮托探头。距离探头中心线 δ 处测量到的总压力高于真实总压力中心线。

表5.1 皮托管探头的横向压力梯度相关性，
K 是在公式 (5.4) 中定义的压力梯度参数。

探头几何形状	相关性
圆形	$\frac{\delta}{D} = 1.025 - 4.05K^3 \quad K < 0.3$ $\frac{\delta}{D} = 0.195 \quad K > 0.3$
球形	$\frac{\delta}{D} = 0.62K - 0.5876K^3$
圆柱形	$\frac{\delta}{D} = \sqrt{\frac{1 + K^2}{2K}}$
锥形	相同尺寸的方刃皮托管

5.3 总压与静压组合测量

图5.9所示，皮托静压管用于组合测量总压和静压。鼻端测量总压的皮托管和在鼻端后面一定距离测量静压的静压管的组合。探头周围的静压场接近于图5.7中所示的静压管的静压场，可以在稳定流动中进行精确的静压测量。也可以测量同一平面内流动流体的总压和静压。

5.3.1 探头未对准误差

若探头头部足够长可以避免杆部效应，使偏航角和俯仰角对读数的影响方式非常相似。总压和静压

的误差随着迎角 $> 5^\circ$ 时迅速增加，压力响应曲线如图 5.18 所示。

曲线显示了探头的测量总压和静压 $P_{t,m}$ 和 P_m 与真实总压和静压 P_t 和 p 的关系。

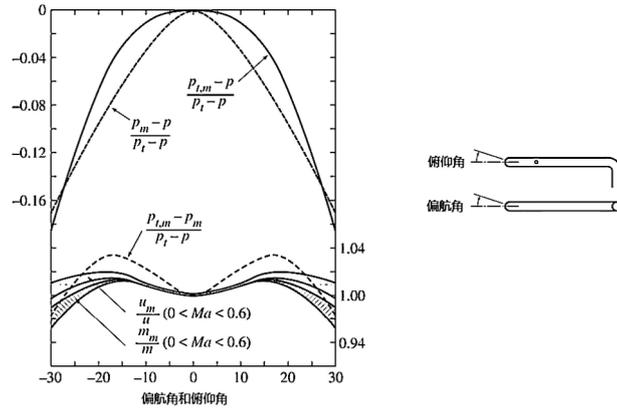


图 5.18 探头的角响应

5.3.2 马赫数的影响

对于圆鼻探头而言，在马赫数不超过0.95的范围内，总压读数的影响是线性的，而静压读数的影响则在马赫数为0.7时达到极限（图5.19）。对于马赫数小于或等于0.5的情况，静压读数的精度可达0.5%；对于 $0.5 \leq \text{马赫数} \leq 0.7$ 的情况，其精度则在1.5%以内。对于更高的马赫数，由于探头尖端及其周围区域的局部激波的形成，响应会出现偏差，在流动状态下、与固体边界接近程度和接近角度发生微小变化时，偏差可高达10%（图5.20）。

对于马赫数大于1.0的情况，总压和静压读数都会与真实值有很大偏差，此时应使探头与流体对齐，使用正常激波上总压变化的标准关系来进行修正。

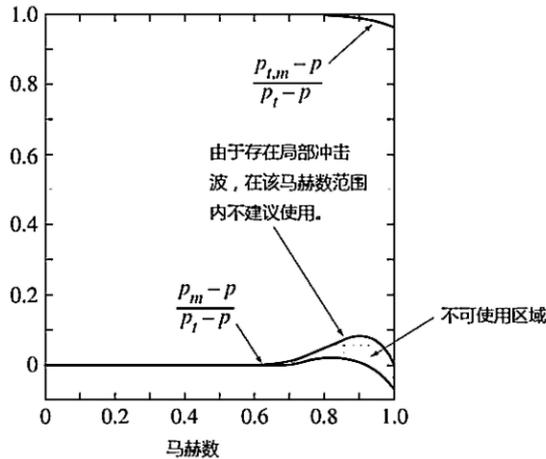


图5.19 皮托-静压探头对马赫数的响应

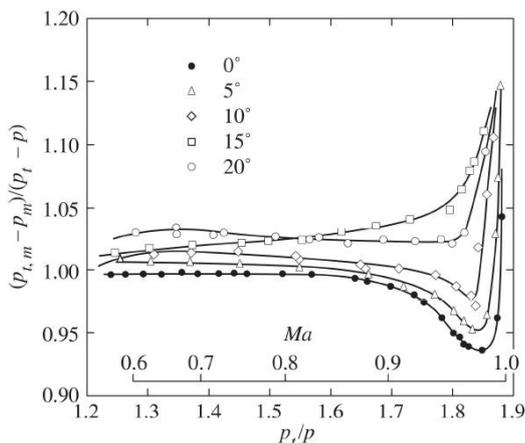


图5.20 皮托-静压探头对马赫数和流向角的响应

5.3.3 边界位置的影响

静态压力和总压力读数都对固体边界的接近程度敏感。探头和固体边界形成一个文丘里通道，会加速流动并降低一侧的静压。图5.21中的曲线表明，在马赫数=0.25时，压力采集位置应在距离固体边界大于10倍管径的位置。

无论是静态压力读数还是总压力读数，都对固体边界的位置十分敏感。探头与固体边界共同构成一个文丘里通道，该通道会加速气流并使一侧的静态压力降低。图5.21中的曲线表明，在马赫数=0.25时，理想的静态压力读数应距离固体边界至少10个管径，最好不小于5个管径（对于1%的误差范围而言）。

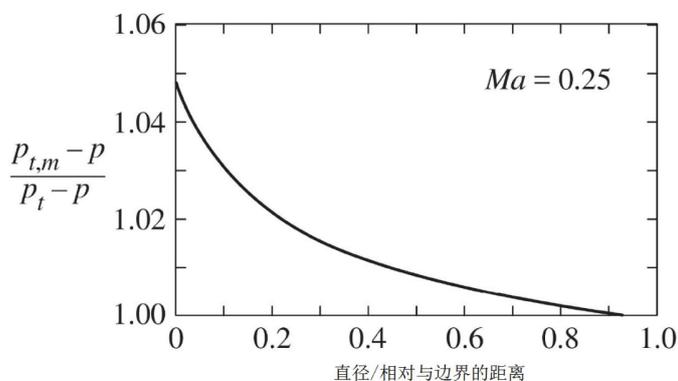


图5.21 探头与固体边界之间距离的影响

5.3.4 探测管雷诺数的影响

除流体速度极低外，皮托静压管探头不受探头雷诺数的直接影响。对于总压测量，最小的探头雷诺数约为30。低于30时，由于粘性效应，测量得到的总压会明显高于真实总压。

5.3.5 湍流的影响

在典型条件下，皮托管-静压管对各向同性湍流不敏感。对于极高强度、大尺度的湍流，探头处的迎角可能会在很大范围内变化，且探头测量的压力会产生一个误差，该误差对应于湍流产生的平均偏航角或俯仰角。

5.3.6 压力探头的响应时间

探头的响应时间取决于探头内部压力通道的长度和直径、连接到压力测量装置的压力管的长度和直

径，以及该装置的内部体积。

对于任何标准管径，时间常数都非常小；对于较小的直径，时间常数会快速增加。在日常测量中，皮托静态管最小直径为1.5mm。连接到普通压力计时，需15至60秒达到平衡压力。对于直径小至0.8毫米的管子，时间常数长达15分钟。

5.4 压力场的测量

在运动的流体中，经常需要测量绘制压力场的空间变化，该压力场横截面垂直于流线。

5.4.1 总压

若流体的流动是均匀且稳定的，那么在某个平均点进行一次测量即可，对于总压力测量，在稳定流动的情况下，总压力从来都不是完全均匀的。在与流动中的流体接触的任何固体表面上，都会形成一个边界层。总压力会从边界层外部的自由流值 ($P_t = P_{t,\infty}$) 变化到与固体表面处的局部静压相等的值 ($P_t = P$)，此时流体相对于表面处于静止状态（见图 5.22）。

对于简单（稳定、平静表面、零压力梯度）的情况，可用标准流体力学来估算边界层的厚度。其他压力不均匀性可能源于上游物体的尾流、射流、涡旋、旋转流、管道或导管的流线弯曲、两股流体的混合等。

测量压力场所需的总压测量数量和位置根据待测流场的情况来确定。如待测流场未知，应全面地在不同位置进行多次的测量。

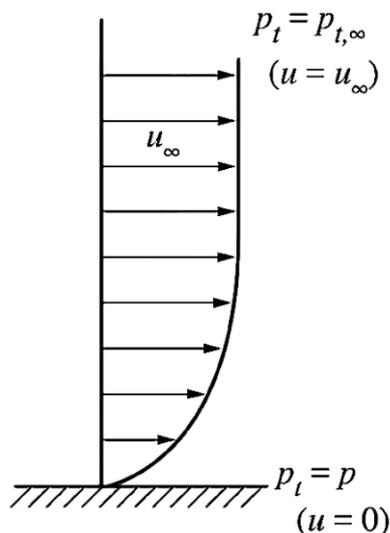


图 5.22 边界层内总压力的变化

5.4.2 静压

垂直于流线的静压变化是由于流线曲率造成的，在内部流动中，是由于管道的弯曲或涡流造成。可以使用简化的欧拉方程来估计静压场中的变化，该方程垂直于流线：

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \rho \frac{u^2}{r} \quad (5.5)$$

方程给出了垂直于流线的静压梯度（y方向），用流向速度分量u和流线的局部曲率半径r表示。对于没有大流向速度梯度的稳定流动，该方程可以很好地估计预期静压的变化。

测量时应将多个探头放置在测量平面上（至少三个），取测量平均值。

5.4.3 液体流动中的汽蚀现象

在含有溶解气体的流动液体中进行测量时，需要防范汽蚀的可能性。液体在流动过程中由于局部压力降低至饱和蒸汽压以下时，液体中的溶解气体析出形成气泡。如果这种情况发生在探头周围，会影响

测量。这时应考虑改变压力测量方法，用壁面测压孔代替静态压力探头，改变探头几何形状以减少探头头部周围的局部压力变化，将直端皮托管探头更换为圆端探头。改变被测流体的性质以降低汽蚀的可能性，增加绝对压力或降低流速等。

5.4.4 时变流动中的压力测量

时变流中的压力测量比稳态流中的压力测量复杂得多。为了测量时变压力，应注意：

- a) 压力传感器的响应速度远高于流体中压力的变化速度。
- b) 由于测量点与压力传感器的传感元件之间存在气动或液压连接，可能会导致信号传播出现的延迟，测量时应尽量与侧壁齐平。

时间响应通过选择合适的传感器来解决。对于稳态测量，应考虑使用液压和机械压力表。对于电传感器，传感器的极限频率响应应至少比压力变化的最大频率高出一个数量级。

对于壁面静态取压，将传感器的感应元件安装在测量点，与侧壁齐平，可较好地解决时间延迟问题。

图5.24展示了一个传感器安装方式，传感器与侧壁齐平。使用弹性材料密封安装，既能固定传感器，又能将传感器与壁本身的振动隔离，尤其是在应变计传感器的情况下。

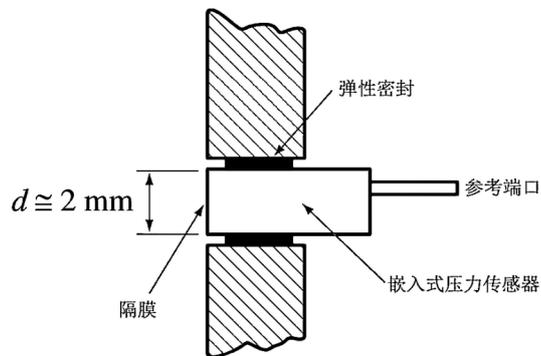


图5.24 传感器与侧壁齐平安装方式

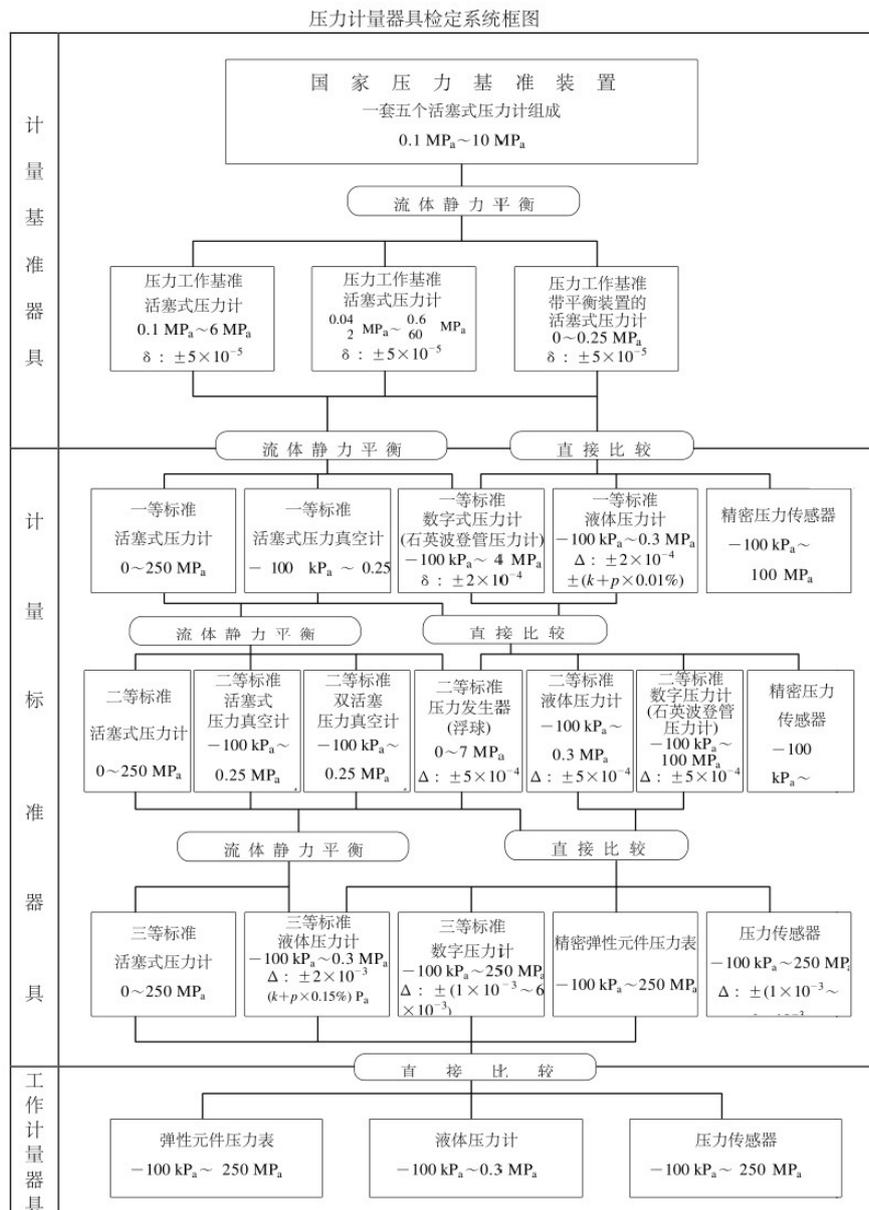
在大多数传感器中，传感元件都非常精密且容易损坏。通常使用保护罩来屏蔽传感器头部。对于齐平安装或探针安装的传感器，由于保护罩和传感器之间的体积，使用此类保护罩会在测量中引入时间延迟。

如无保护罩，未屏蔽传感器，则应仅限在非常清洁的流体中使用，没有液滴的气体或没有气泡的液体，并且要进行精细过滤以去除任何固体颗粒。

如无法使用齐平安装或探头安装的传感器，通过气动或液压管线连接到测量点。在不稳定压力场中进行测量时，应确认所测量的平均压力是否准确？所测量的压力波动是否准确？

6 校准

在压力测量前应对使用的计量器具进行检定校准，并使计量器具在有效的检定校准周期内。
如图所示是国家压力计量器具检定系统图。



[JJG2023-2008]

7 不确定度评定

7.1 测量不确定度评定的步骤

- a) 确定被测量和测量方法此处的测量方法包括测量原理、测量仪器以及测量和数据处理程序等。
- b) 建立满足测量不确定度评定所需的测量模型并找出所有影响测量不确定度的输入量建立测量模型也称测量模型化。
- c) 确定各输入量的标准不确定度

根据各输入量标准不确定度评定方法的不同,可以分为测量不确定度的A类评定和测量不确定度的B类评定两类。A类评定是对在规定测量条件下测得的量值用统计分析的方法进行的测量不确定度分量的评定;用不同于测量不确定度A类评定的方法进行的测量不确定度分量的评定为B类评定。

- d) 确定对应于各输入量的不确定度分量 u_i

若输入量 x_i 的标准不确定度为 $u(x_i)$,则标准不确定度分量为 u_i

$$u_i = c_i u(x_i) = \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i)$$

式中, c_i 为灵敏系数,它可由测量模型对输入量 x_i 求偏导数得到。 c_i 也可以由实验测量得到,在数值上它等于当输入量 x_i 变化一个单位量时,被测量 y_i 的变化量。

- e) 对各不确定度分量进行合成得到合成标准不确定度 u_c

根据方差合成原理,当N个不确定度分量 u_i 彼此之间独立无关时,合成标准不确定度 u_c 为

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2}$$

- f) 确定被测量 y 可能值分布的包含因子

根据被测量 y 分布情况的不同,所要求的包含概率以及对测量工作具体要求的不同,应采用不同的方式来确定包含因子 k 。

- g) 确定扩展不确定度 U

扩展不确定度 $U = k u_c$ 当包含因子 k 由所规定的包含概率 p 得到时,扩展不确定度用 U 表示。

- h) 给出测量结果报告

给出测量结果及其不确定度,以及如何由合成标准不确定度得到扩展不确定度。

7.2 评定方法

不确定度依据其评定方法可以分为“**A**”、“**B**”两类,“**随机**”与“**系统**”表示误差的两种不同的性质;“**A**”类与“**B**”类表示不确定度的两种不同的评定方法。

7.2.1 不确定度分量的A类评定

对在规定测量条件下测得的量值用统计分析的方法进行的测量不确定度分量的评定称为测量不确定度的A类评定。

在压力测量中,测量不确定度的A类评定方法主要有贝塞尔公式和极差法,其中贝塞尔法为主要方法。

7.2.1.1 贝塞尔公式法

在重复性条件或复现性条件下对同一被测量独立重复观测 n 次,得到 n 个测得值 x_i ($i=1, 2, \dots, n$),被测量 X 的最佳估计值是 n 个独立测得值的算术平均值 \bar{x} ,按公式(8)计算:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

单个测得值 x_k 的实验方差 $s^2(x_k)$,按公式(9)计算:

$$s^2(x_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

单个测得值 x_k 的实验标准偏差 $s(x_k)$,按公式(10)计算:

$$s(x_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

这就是贝塞尔公式,自由度 ν 为 $n-1$ 。实验标准偏差 $s(x_k)$ 表征了测得值 x 的分散性,测量重复性用 $s(x_k)$ 表征。被测量估计值 \bar{x} 的A类标准不确定度 $u_A(\bar{x})$ 按公式(11)计算:

$$u_A(\bar{x}) = s(\bar{x}) = s(x_k)/\sqrt{n} \quad (11)$$

A类标准不确定度 $u_A(\bar{x})$ 的自由度为实验标准偏差 $s(x_k)$ 的自由度,即 $\nu = n - 1$ 。实验标准偏差 $s(\bar{x})$ 表征了被测量估计值 \bar{x} 的分散性。

7.2.1.2 极差法

一般在测量次数较少时,可采用极差法评定获得 $s(x_k)$ 。在重复性条件或复现性条件下,对 X_i 进行 n 次独立重复观测,测得值中的最大值与最小值之差称为极差,用符号 R 表示。在 X_i 可以估计接近正态分布的前提下,单个测得值 x_k 的实验标准差 $s(x_k)$ 可按公式(12)近似地评定:

$$s(x_k) = \frac{R}{C} \quad (12)$$

式中:

R —极差;

C —极差系数;

极差系数 C 及自由度 ν 可查表1得到。

表1极差系数 C 及自由度 ν

n	2	3	4	5	6	7	8	9
C	1.13	1.69	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97
ν	0.9	1.8	2.7	3.6	4.5	5.3	6.0	6.8

被测量估计值的标准不确定度按公式(13)计算:

$$u_A(\bar{x}) = s(\bar{x}) = s(x_k)/\sqrt{n} = \frac{R}{C\sqrt{n}} \quad (13)$$

格拉布斯测量异常值剔除法:适用于一组测得值中只有一个粗差的情况,且被剔除的测得值的置信水平为5%。则若测得值符合式(1-22),测得值被剔除。

$$|x_k - \bar{x}| > sG \quad (1-22)$$

式中 s —单点测量实验标准差;

G —统计学中的格拉布斯数,其值见表1-2。

表1-2试验次数与格拉布斯数 G 的关系

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
G	1.155	1.481	1.715	1.887	2.020	2.126	2.215	2.290	2.355	2.412

7.2.2 不确定度分量的B类评定

7.2.2.1 B类评定的方法是根据有关的信息或经验,判断被测量的可能值区间假设被测量值的概率分布,根据概率分布和要求的概率 p 确定 k ,则B类标准不确定度 u_B 可由公式(21)得到:

$$u_B = \frac{a}{k} \quad (21)$$

式中: a —被测量可能值区间的半宽度。

注: 根据概率论获得的 k 称置信因子,当 k 为扩展不确定度的倍乘因子时称包含因子。

标准不确定度的B类评定的一般流程见图3。

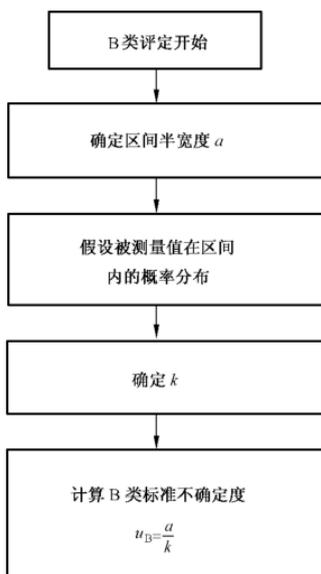


图3 标准不确定度的B类评定流程图

7.2.2.2 区间半宽度 a 一般根据以下信息确定:

- 以前测量的数据;
- 对有关技术资料 and 测量仪器特性的了解和经验;
- 生产厂提供的技术说明书;
- 校准证书、检定证书或其他文件提供的数据;
- 手册或某些资料给出的参考数据; f) 检定规程、校准规范或测试标准中给出的数据;
- 其他有用的信息。

7.2.2.3 k 的确定方法

- 已知扩展不确定度是合成标准不确定度的若干倍时,该倍数就是包含因子 k 。
- 假设为正态分布时,根据要求的概率查表2得到 k 。
- 假设为非正态分布时,根据概率分布查表3得到 k 。

表2正态分布情况下概率 p 与置信因子 k 间的关系

p	0.50	0.68	0.90	0.95	0.9545	0.99	0.9973
k	0.675	1	1.645	1.960	2	2.576	3

表3常用非正态分布的置信因子 k 及B类标准不确定度 $u_B(x)$

分布类别	p (%)	k	$u_B(x)$
三角	100	$\sqrt{6}$	$a/\sqrt{6}$

梯形 ($\beta=0.71$)	100	2	$a/2$
矩形 (均匀)	100	$\sqrt{3}$	$a/\sqrt{3}$
反正弦	100	$\sqrt{2}$	$a/\sqrt{2}$
两点	100	1	a

7.2.2.4 以“等”使用的仪器的不确定度

有些测量仪器的证书上给出准确度“等”别，如压力标准装置的检定证书等。此时，不确定度计算采用正态分布或t分布。由于在进行测量结果的不确定度分析时已包含了上一级标准引起的不确定度，因此在按“等”使用标准装置时，不需考虑上一级标准不确定度的影响；应考虑长期稳定性的影响，通常把两次检定或校准周期之间的差值，作为不确定度的一个分量。如使用时的环境条件偏离检定或校准时的环境条件，则要考虑环境条件引起的不确定度分量。

7.2.2.5 以“级”使用的仪器的不确定度

有些测量仪器的证书上给出准确度级别，如工作用压力计的检定证书等。此时，可按检定规程规定的该级别的最大允许误差进行评定。假定最大允许误差为 $\pm A$ ，一般采用矩形分布，得到示值允差引起的标准不确定度：

$$u(x) = \frac{A}{\sqrt{3}}$$

7.2.2.6 B类标准不确定度的自由度

B类标准不确定度的自由度可按公式(22)近似计算：

$$v_i \approx \frac{1}{2} \frac{u^2(x_i)}{\sigma^2[u(x_i)]} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta[u(x_i)]}{u(x_i)} \right]^{-2}$$

根据经验，按所依据的信息来源的可信程度来判断 $u(x_i)$ 的相对标准不确定度 $\Delta[u(x_i)]/u(x_i)$ 。表4列出了按公式(22)计算出的自由度 v 值。

表4 $\Delta[u(x_i)]/u(x_i)$ 与 v_i 关系

$\Delta[u(x_i)]/u(x_i)$	v_i
0	∞
0.10	50
0.20	12
0.25	8
0.50	2

7.2.3 合成不确定度的计算

常用的合成标准不确定度计算流程

根据测量模型列出 $u_c(y)$ 的表达式

求灵敏系数 $c_i = \partial f / \partial x_i$;

计算 $u_i(y) = |c_i|u(x_i)$;

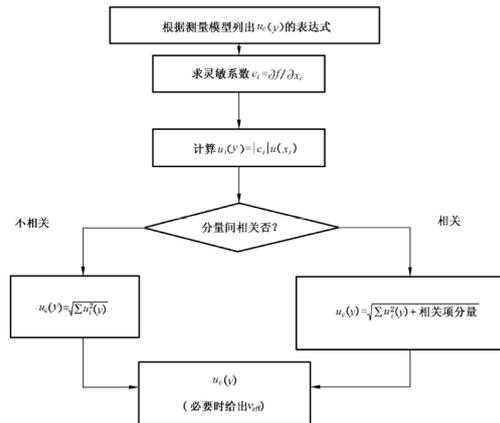
不相关分量间相关否?相关

$$\text{不相关} \quad u_c(y) = \sqrt{u_i^2(y)}$$

$$\text{相关} \quad u_c(y) = \sqrt{u_i^2(y) + \text{相关项分量}}$$

(必要时给出 v_{eff})

常用的合成标准不确定度计算流程见图4。



7.2.4 扩展不确定度的确评定

扩展不确定度是被测量可能值包含区间的半宽度。扩展不确定度分为U和 U_p 两种。在给出测量结果时，一般情况下报告扩展不确定度U。

7.2.4.1 扩展不确定度U

扩展不确定度U由合成标准不确定度 u_c 。乘包含因子k得到，按公式(40)计算：

$$U = k u_c$$

测量结果可用公式(41)表示：

$$Y = y \pm U$$

y是被测量Y的估计值，被测量Y的可能值以较高的包含概率落在 $[y-U, y+U]$ 区间内，即 $y-U \leq Y \leq y+U$ 。被测量的值落在包含区间内的包含概率取决于所取的包含因子k的值，k值一般取2或3。

当y和 $u_c(y)$ 所表征的概率分布近似为正态分布时，且 $u_c(y)$ 的有效自由度较大情况下，若 $k=2$ ，则由 $U = 2u_c$ 所确定的区间具有的包含概率约为95%。若 $k=3$ ，则由 $U = 3u_c$ 所确定的区间具有的包含概率约为99%。

7.2.4.2 扩展不确定度 U_p

当要求扩展不确定度所确定的区间具有接近于规定的包含概率p时，扩展不确定度用符号 U_p 表示，当p为0.95或0.99时，分别表示为 U_{95} 和 U_{99} 。

U_p 由公式(42)获得：

$$U_p = k_p u_c \quad (42)$$

k_p ，是包含概率为p时的包含因子，由公式(43)获得：

$$k_p = t_p(v_{eff}) \quad (43)$$

根据合成标准不确定度 $u_c(y)$ 的有效自由度 v_{eff} 和需要的包含概率，查《t分布在不同概率p与自由度v时的 $t_p(v)$ 值(t值)表》(见附录B)得到 $t_p(v_{eff})$ 值，该值即包含概率为p时的包含因子 k_p 值。

扩展不确定度 $U_p = k_p u_c(y)$ 提供了一个具有包含概率为p的区间 $y \pm U_p$ 。在给出 U_p 时，应同时给出有效自由度 v_{eff} 。

7.3 不确定度评定实例

7.3.1 精密压力表测量精密压力表示值误差测量不确定度评定

测量条件

a) 计量标准器：选用测量范围为(0~25) MPa，准确度等级为0.1级的精密压力表。

- b) 工作用计量器具：测量范围为（0~25）MPa，准确度等级为0.4级的精密压力表。
c) 测量条件：环境温度为20.5℃，相对湿度为65%RH。

7.3.1.1 不确定度分量的评定

7.3.1.1.1 不确定度分量的A类评定

重复性测量引起的不确定度分量 u_1 ：

对精密压力表的压力测量点20MPa示值进行10次重复独立测量，得到10个压力测得值：

20.02MPa, 20.02MPa, 20.02MPa, 20.02MPa, 20.04MPa, 20.04MPa, 20.04MPa, 20.04MPa, 20.04MPa, 20.04MPa

求得平均值为

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{10} p_i = 20.0 \text{MPa}$$

单次测量的标准差采用贝塞尔公式计算，即

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}{n-1}} = 0.01 \text{MPa}$$

测量结果取平均值，则该被测量估计值的A类标准不确定度 u_1 为

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{10}} = \frac{0.01}{\sqrt{10}} = 3.2 \times 10^{-3} \text{MPa}$$

7.3.1.1.2 不确定度分量的B类评定

- a) 精密压力表示值估读引入的不确定度分量 $u_2(p_m)$

精密压力表的最小分度值为0.2MPa，检定规程规定，精密压力表的估读误差为最小分度值的1/10，半宽 $a=0.02$ MPa，服从均匀分布，则由精密压力表估读误差所引入的标准不确定度 $u_2(p_m)$ 为

$$u_2(p_m) = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 1.15 \times 10^{-2} \text{MPa}$$

- b) 计量标准器引入的不确定度分量 $u_3(p_s)$

上一级计量标准器0.1级精密压力表在20MPa测量点引入的最大允许误差为 $\pm 0.1\% \times 25 = \pm 0.025$ MPa，即半宽 $a=0.025$ MPa，服从均匀分布，则标准不确定度 u_4 为

$$u_3(p_s) = \frac{0.025}{\sqrt{3}} = 1.4 \times 10^{-2} \text{MPa}$$

- c) 环境温度变化引入的不确定度分量 u_4

由于测量时的环境温度为20.5℃，没有温度变化，在检定规程要求的环境温度范围内，环境温度引入的有关数字压力计示值变化不确定度分量可忽略不计，即

$$u_4 \approx 0$$

7.3.1.2 计算合成标准不确定度

根据评定大纲，在合成标准不确定度时，比较重复性和示值估读(分辨力)引入的不确定度分量值的大小，两者中舍去小值，只取大值作为合成标准不确定度的分量，因此，舍去重复性测量引入的标准不确定度分量 u_1 。

由于各不确定度分量互不相关，合成标准不确定度 $u_c(\Delta p)$ 为

$$u_c(\Delta p) = \sqrt{u_2^2(p_m) + u_3^2(p_s) + u_4^2} = 1.9 \times 10^{-2} \text{MPa}$$

7.3.1.2.1 确定扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度 U 为

$$U = k \cdot u_c(\Delta p) = 0.04 \text{MPa}$$

7.3.1.3 测量结果报告

测量结果：精密压力表在20MPa测量点的示值误差为+0.03MPa。测量结果的扩展不确定度：U=0.04 MPa, k=2。

7.3.2 精密液体压力计示值误差测量不确定度评定

测量条件：

测量条件：t=21.0℃

被测仪器工作介质的密度： $\rho = 997.991 \text{ kg/m}^3$

测量地点重力加速度： $g = 9.79663 \text{ m/s}^2$

测量环境下的空气密度： $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$

测量模型： $p = (\rho + \rho_a)gh$

式中：

p--被测量压力，Pa；

g--被测量地点重力加速度， m/s^2 ；

h--液柱高度示值，m；

ρ --测量温度下液体密度， kg/m^3 ；

ρ_a --测量温度下空气密度， kg/m^3 ；

方差和灵敏度系数，

$$u_c^2 = c_1^2 u^2(h) + c_2^2 u^2(\rho) + c_3^2 u^2(g) + c_4^2 u^2(\rho_a)$$

$$c_1 = \frac{\partial p}{\partial h} = (\rho - \rho_a)g = 9765 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^2$$

$$c_2 = \frac{\partial p}{\partial \rho} = gh = 5.88 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$c_3 = \frac{\partial p}{\partial g} = (\rho - \rho_a)h = 598 \text{ kg/m}^2$$

$$c_4 = \frac{\partial p}{\partial \rho_a} = -gh = -5.88 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

7.3.2.1 不确定度分量的评定

7.3.2.1.1 液面高度差测量不准引入的标准不确定度分量u(h)

液面高度差测量不准引入的不确定度分量u(h)主要包括测量重复性的标准不确定度u(h₁)和读数不准引入的不确定度u(h₂)。

测量重复性引入的不确定度分量u(h₁)

测量时，在标准器示值为6kPa(614.19mm)的条件下，进行10次重复性测量，测量结果如下(单位为m)：

614.42, 614.50, 614.48, 614.62, 614.68, 614.58, 614.40, 614.46, 614.48, 614.66

测量结果的算术平均值h为

$$h = \frac{\sum_{i=1}^{10} h_i}{n} = 614.53\text{mm}$$

根据贝塞尔公式，其单次测量的实验标准差为

$$s(\bar{h}) = 0.09\text{mm}$$

测量的重复性为其平均值的标准不确定度，也就是平均值的标准差，即

$$u(h_1) = s(\bar{h})/\sqrt{10} = 0.09/3.16 = 0.028\text{mm} = 2.8 \times 10^{-5}\text{m}$$

读数不准引入的不确定度分量 $u(h_2)$

被测液体压力计由于读数不准带来的误差为 $\Delta h = 0.02\text{mm}$ ，服从均匀分布，即 $k = \sqrt{3}$ ，因此读数不准引入的不确定度分量 $u(h_2)$ 为

$$u(h_2) = 0.02/\sqrt{3} = 1.2 \times 10^{-2}\text{mm} = 1.2 \times 10^{-5}\text{m}$$

液面高度差引入的不确定度分量 $u(h)$

根据评定大纲，在合成标准不确定度时，比较重复性和分辨力引入的不确定度分量值的大小，两者中含去小值，只取大值作为合成标准不确定度的分量，因此，舍去读数不准引入的不确定度分量 $u(h_2)$ ，即液面高度差引入的不确定度分量 $u(h)$ 为

$$\begin{aligned} u(h) &= u(h_1) = 2.8 \times 10^{-5}\text{m} \\ |c_1|u(h) &= 9765 \times 2.8 \times 10^{-5} = 0.27\text{Pa} \end{aligned}$$

7.3.2.1.2 液体密度变化引入的标准不确定度分量 $u(\rho)$

液体密度变化引入的标准不确定度分量 $u(\rho)$

液体密度的变化主要是由检测环境温度的变化和环境温度测量的不准而造成的。(1)温度波动影响引入的不确定度分量 $u(\rho_1)$

按要求温度波动 $\Delta t \leq 0.5^\circ\text{C}$ ，工作介质水的热膨胀系数 $\beta = 2 \times 10^{-4}^\circ\text{C}^{-1}$ ；水的密度 $\rho \approx 1 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，则

$$\Delta\rho_1 = \rho\beta\Delta t = 1 \times 10^3 \times 2 \times 10^{-4} \times 0.5 = 0.1 \text{kg/m}^3$$

属均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u(\rho_1) = \Delta\rho_1/\sqrt{3} = 6 \times 10^{-2} \text{kg/m}^3$$

温度测量不准对液体密度的影响引入的不确定度分量 $u(\rho_2)$ 假设温度计的测量误差为 $\Delta t_2 = 0.2^\circ\text{C}$ ，同理：

$$\Delta\rho_1 = \rho\beta\Delta t_2 = 4 \times 10^{-2} \text{kg/m}^3$$

属均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u(\rho_2) = \Delta\rho_2/\sqrt{3} = 2 \times 10^{-2} \text{kg/m}^3$$

7.3.2.1.3 液体密度变化引入的不确定度分量 $u(\rho)$

液体密度变化引入的不确定度分量 $u(\rho)$ 由上述两项合成得到，即

$$\begin{aligned} u(\rho) &= \sqrt{u^2(\rho_1) + u^2(\rho_2)} = 6.2 \times 10^{-2} \text{kg/m}^3 \\ |c_2|u(\rho) &= 5.88 \times 6.2 \times 10^{-2} = 0.37\text{Pa} \end{aligned}$$

7.3.2.1.4 重力加速度变化引入的标准不确定度分量 $u(g)$

由重力加速度表得知重力加速度的测量误差 $\Delta g = 5 \times 10^{-5}\text{m/s}^2$ ，属均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则

$$\begin{aligned} u(g) &= \Delta g/k = 2.9 \times 10^{-5} \text{m/s}^2 \\ |c_3|u(g) &= 598 \times 2.9 \times 10^{-5} = 0.02\text{Pa} \end{aligned}$$

7.3.2.1.5 空气密度变化引入的标准不确定度分量 $u(\rho_a)$

空气密度变化主要是因为大气压力变化引起的，当大气压力变化 1kPa (7mmHg)时，空气密度变化 $\Delta\rho_a$ 为 0.01kg/m^3 ，此误差分布为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u(\rho_a) = \Delta\rho_a/\sqrt{3} = 6 \times 10^{-3} \text{kg/m}^3$$

$$|c_4|u(\rho_a) = 5.88 \times 6 \times 10^{-3} = 0.04\text{Pa}$$

7.3.2.2 合成标准不确定度的计算

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u^2(h) + c_2^2 u^2(\rho) + c_3^2 u^2(g) + c_4^2 u^2(\rho_a)} = 0.46\text{Pa}$$

7.3.2.3 扩展不确定度评定

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为

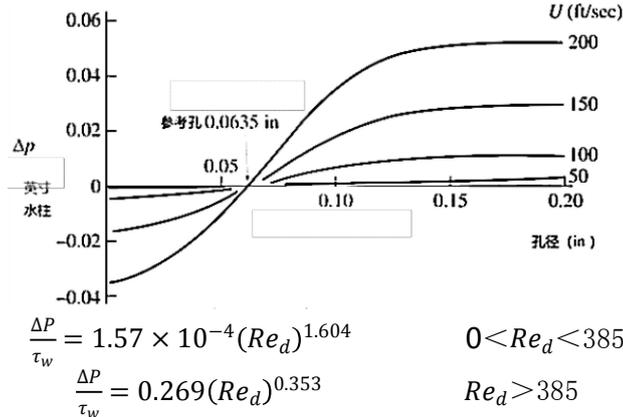
$$U = 0.46 \times 2 = 0.92\text{Pa}$$

7.3.2.4 测量结果报告

测量范围为（0~10000）Pa的0.05级液体压力计，经对6000Pa的测量，其测量结果为 $h=614.53\text{mm}$ ，其扩展不确定度 $U=0.92\text{Pa}$ （ $k=2$ ）。

8 壁面静压孔测量误差的评估

壁面静压测孔测量误差的数据， $\Delta P/\tau_w$ ，如图 5.1 所示，与孔雷诺数 Re_d 相关联，如下



其中 Δp 表示压力测量的误差， τ_w 为局部壁面剪应力， $Re_d = (d/v)(\tau_w/\rho)^{1/2}$ 为基于孔径 d 的雷诺数。

如图 5.1 所示，对于长度与直径之比 L/d 大于约 1.5 的压力取压结构，压力测量误差与 L/d 无关。

局部壁面剪切应力和孔口雷诺数都可以用表面摩擦系数 f 来表示，因此孔口压力误差可以表示为局部动压 $p_v = \frac{1}{2}\rho u^2$ 的比值形式。

$$\frac{\Delta p}{p_v} = \left(\frac{\Delta p}{\tau_w}\right) \left(\frac{f}{4}\right)$$

雷诺数可以替换为管道雷诺数 $Re_d = UD/v$ ，其中 D 代表管道直径（对于非圆形管道，则为流体的惯性直径）， U 代表平均流速：

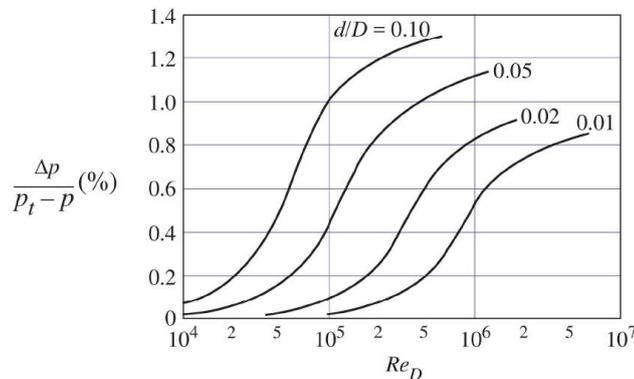
$$Re_d = Re_D \left(\frac{d}{D}\right) \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2}$$

将公式 (B. 3) 代入 (B. 1a) 和 (B. 1b)，然后再代入公式 (B. 2)，得到：

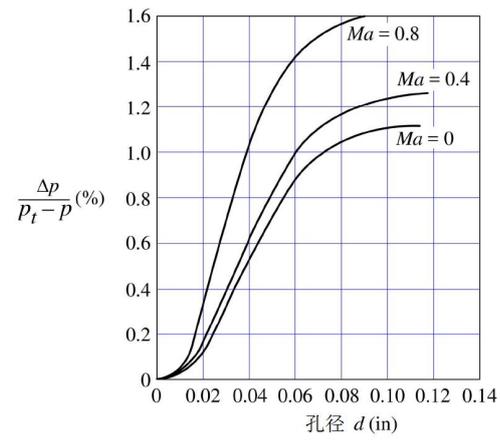
$$\frac{\Delta p}{p_v} = \begin{cases} 1.57 \times 10^{-4} \left[Re_D \left(\frac{d}{D}\right) \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} \right]^{1.604} \left\{ \frac{f}{4} \right\} & 0 < Re_d < 385 \\ 0.269 \left[Re_D \left(\frac{d}{D}\right) \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} \right]^{0.353} \left\{ \frac{f}{4} \right\} & Re_d > 385 \end{cases}$$

摩擦系数可以通过经验关系式确定，例如光滑管道流动的经验公式，

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(Re_D \sqrt{f}) - 0.8$$



图B. 1: 静态压力测压孔误差与管道雷诺数的关系；



图B. 2: 静态压力测压孔误差与孔径和马赫数的关系

表A.1中国部分城市重力加速度

地点	重力加速度 $g/m/s^2$	地点	重力加速度 $g/m/s^2$
北京	9.8015	乌鲁木齐	9.8015
上海	9.7946	吐鲁番	9.8024
天津	9.8011	哈密	9.8006
重庆	9.7914	拉萨	9.7799
哈尔滨	9.8066	成都	9.7913
佳木斯	9.8079	昆明	9.7836
牡丹江	9.8051	贵阳	9.7868
齐齐哈尔	9.8080	南宁	9.7877
长春	9.8048	柳州	9.7885
吉林	9.8048	郑州	9.7966
沈阳	9.8035	洛阳	9.7961
大连	9.8011	开封	9.7966
丹东	9.8019	武汉	9.7936
锦州	9.8027	宜昌	9.7933
石家庄	9.7997	长沙	9.7915
阜新	9.8032	衡阳	9.7907
保定	9.8003	广州	9.7883
唐山	9.8016	海口	9.7863
张家口	9.8000	南昌	9.7920
承德	9.8017	九江	9.7928
太原	9.7970	福州	9.7891
大同	9.7984	杭州	9.7936
包头	9.7986	南京	9.7949
乌兰浩特	9.8066	徐州	9.7967
海拉尔	9.8081	合肥	9.7947
西安	9.7944	蚌埠	9.7954
延安	9.7955	安庆	9.7936
宝鸡	9.7933	芜湖	9.7944
兰州	9.7926	济南	9.7988
西宁	9.7911	青岛	9.7985
银川	9.7961	德州	9.7995

注：

1以上主要城市重力加速度值来自JJG 59—2022《液体活塞式压力计检定规程》；

2本表未列城市的重力加速度值，可用下面公式近似计算出：

$$g = \frac{9.80665 \times (1 - 0.00265 \times \cos 2\varphi)}{1 + \frac{2h}{R}}$$

式中：

R—地球半径，约 $6371 \times 10^3 m$ ；

h—测量地点海拔高度，m；

φ —测量地点纬度。