

第 1 章 - 差压流量

1.1 差压流量简介

差压流量测量（差压流量）是测量封闭式管道内流量的最常见技术之一。

差压流量技术广泛使用的原因很多。

- 该技术以众所周知的物理定律为基础，尤其是关于流体动力学和质量传递现象的物理定律
- 悠久的历史还促进了差压流量计制造和使用标准的发展。
- 制造商为通用和专用仪表及安装选项提供了丰富的选择
- 差压流量技术可实现高准确度和重复性

图 1.1.a - 现代差压流量计。



1.2 差压流量历史

流量测量起源于数千年前，那时候埃及人开始根据尼罗河春洪的相对高度对收成进行大概预测。后来，罗马人设计了沟渠，为城市提供饮用水，因而监控稳定流量的需求就变得很重要。操作员利用流经节流孔或障碍物水井的流量粗略测量流量。流体介质壁上的标记、流经节流孔的流动强度等给出一个粗略的流量测量。牛顿于 1687 年发现了万有引力定律，这使得物理学家和数学家提出了关于运动和力的理论，最后促进了量化流量的发展。

伯努利原理

丹尼尔·伯努利是研究流体力学的瑞士数学家。他的工作以能量守恒为中心，在流量测量技术的发展中第一次实现了关键性突破。他发现了伯努利原理，原理指出无论条件如何流量中的能量总和一定保持不变。这意味着上游和下游的静能（压力）、动能（流速）与势能（海拔）之和相等，尤其是差压流量。

雷诺数

奥斯鲍恩·雷诺不是物理学家，而是一名力学家，最著名的就是他对管道内流体流动的研究，更具体的说就是层流与紊流间的流动转换条件。雷诺数是惯性力与粘性力之比在数字上的量化。简言之，雷诺数描述了流体的流动特性。雷诺数是设计流量计的关键概念，可以用作流量计适用范围的约束条件。

1.3 压力

什么是压力？压力是指作用在规定面积上的力大小（等式 1.1）。

- 力增大或面积减小时，压力增大
- 力减小或面积增大时，压力减小

- 测量压力有助于防止设备压力过大，导致损坏
- 测量压力有助于防止意外压力或压力释放，造成人身伤害

$$P = \frac{F}{A}$$

P=压力
F=力
A=面积

(1.1)

为何测量压力？

过程工业测量压力最常见原因有：

图 1.3. a - 过程测量更精确的多参量流量计



- 安全性
- 过程效率
- 节约成本
- 其他过程变量的测量

安全性：压力测量有助于防止管道、储罐、阀门、法兰和其他设备上产生超压，将设备损坏可能性降到最低，控制液位和流量，并有助于防止意外压力或者压力释放和人身伤害。

过程效率：多数情况下，当压力（和其他过程变量）保持在特定数值或在较小的数值范围内时生产效率最高。

节约成本：压力或真空设备（例如，泵和压缩机）消耗大量能量。可通过压力优化降低能量成本节省开支。

其他过程变量的测量：许多生产过程均采用压力测量。诸多应用中频繁使用压力变送器，包括：

- 流经管道的流量
- 储罐中的液位
- 物质密度
- 液体界面测量

1.4 流量 101

流体理论是对运动流体的研究。流体的定义可以是流动的任何物质，因此液体和气体都是流体。需要深入了解技术知识以便对流经管道的流体进行准确测量和控制，这点几乎在所有的过程工业中都极为重要。

流经管道的关键因素。 理解管道流动有 6 个关键的因素：

1. 管道的物理配置
2. 流体流速
3. 沿管壁的流体摩擦
4. 流体密度
5. 流体粘度
6. 雷诺数

管道配置：管道的直径和横截面面积可用于确定规定管道长度的流体体积，也可用于确定应用的雷诺数。流速：取决于驱使流体进入管道的压力或真空度。

摩擦：没有绝对光滑的管壁，所以流体与管壁接触时会产生摩擦，因此与中心处相比，管壁附近的流速较慢。管径越大、越光滑或者越干净，流量受到的影响越小。

密度：密度会影响流量，因为流体越粘稠，达到规定流量所需的压力就越大。由于液体（从实际应用考虑）不可压缩而气体可压缩，所以需要采用不同方法测量各自的流量。

粘度：定义为流体的分子摩擦，通常粘度越高，达到所需流量所需的功就越大，所以粘度会影响流量。温度会影响粘度，但并不总是产生直观影响。例如，较高的温度会降低多数流体的粘度，但当温度高于一定值时有些流体的粘度实际上会增加。

雷诺数：通过将其归入到指定系统的各种因素关系中，可计算雷诺数以描述流体流动剖面类型。在选择适合的流量测量方法时这点很重要。

不同的雷诺数范围定义了三种不同的流体流动剖面。层流是一种流体在平行层内流动的平滑流，特点是雷诺数低于 2000。通常流体流速小、混合极少，有时流体粘度较高。流体流动剖面的雷诺数介于 2000 和 4000 之间时，视为处于过渡区。雷诺数高于 4000 时被称为紊流。特点是流体流速高、粘度小、流体混合快速而充分。

紊流差压流量计量最为准确。因为在紊流中流体与节流元件边缘的分离点更易于预测且保持不变。这种流体分离在节流元件的下游侧形成低压区，因而可将节流元件用作差压流量计的一次元件。根据节流元件类型和流量计设计，特定流量计运行的最小管雷诺数可远高于 4000。

流体连续性

当液体流经变径管时，流经所有横截面的体积相同。这表示直径减小时流速必定增加，相反直径增大时流速减小。等式 1.2 突出了这种关系。

体积流量等于流体体积除以时间：

$$Q = \frac{V}{t} \quad \begin{array}{l} \mathbf{Q=体积流量} \\ \mathbf{V=体积} \\ \mathbf{t=时间} \end{array} \quad (1.2)$$

体积可以分解为面积 A 乘以长度 s。因此，体积流量可以表示为：

$$Q = \frac{A * s}{t} \quad (1.3)$$

可以进一步简化等式 1.3，因为长度 l 除以时间等于速度 v。现在可用速度代替术语 s/t，等于：

$$Q = A * v \quad (1.4)$$

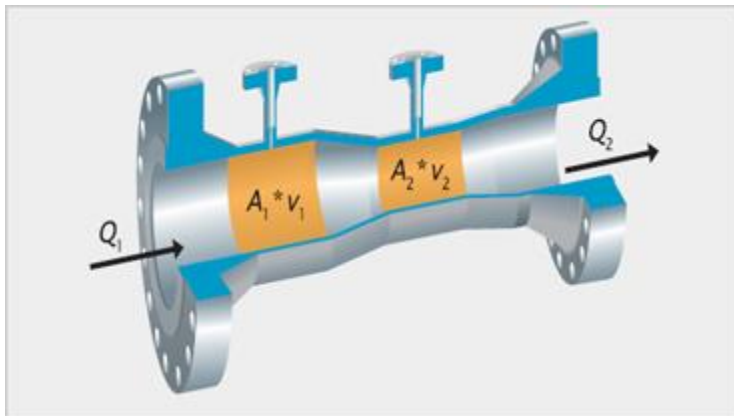
由于流经所有横截面的体积流量相同：

$$Q_1 = Q_2 \quad (1.5)$$

将等式 1.4 带入等式 1.5：

$$\begin{aligned}
 Q_2 &= A_2 * v_2 \\
 Q_1 &= A_1 * v_1 \\
 A_1 * v_1 &= A_2 * v_2
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

图 1.4.a - 流动定律的图形表示，其中 $Q_1 = Q_2$ 。



上述流体连续性的衍生公式描述了基本的能量守恒原理。将在第 3 章中对伯努利方程式进行更详细的介绍，该方程式建立在能量守恒原理的基础之上，定义了适于流动流体的能量守恒。

差压流量计

通过在管道中引入节流元件，一次元件在流量计两端形成压降。由二次元件差压变送器测量压降。第三方元件包括仪表工作所需的所有零件，其中包括导压管以及将上游和下游压力引入变送器的接头。

图 1.4.b 一体式差压流量计



通过在管内设置节流元件，可以利用伯努利方程式计算流量，因为通过节流元件的差压的平方根与流量成比例。

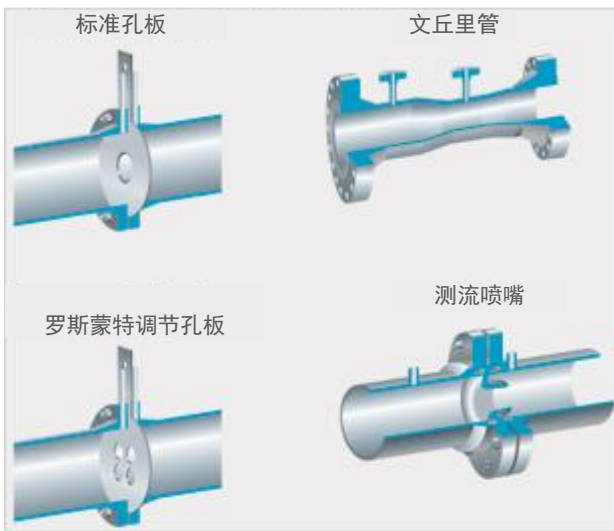
关于差压流量计量有一些重要的注意事项，包括：

1. 确保导压管未被微粒或沉积物堵塞
2. 导压管定向正确（这些管需倾斜放置以防液体应用中出现气体聚集或气体应用中出现液体聚集）
3. 确保定期校准不会降低准确度（使用高准确度校准设备避免这种情况）

一次元件类型

一次元件有很多类型，包括图 1.4.c 显示的元件。示例包括：

图 1.4.c - 一次元件类型



- 单孔和调节孔板
- 单孔和多孔皮托管
- 文丘里管
- 测流喷嘴
- V 锥体
- 楔块

变送器选项

有两种主要类型的压力变送器，利用差压计算流量。第一种为传统差压型，只测量差压，没有其他功能。第二种为多参量变送器。多参量变送器是一种能够测量多个过程变量（包括差压、静压和温度）的多参量变送器。用作质量流量变送器时，这些独立的数值可用于补偿密度、粘度和其他流量参数变化。

1.5 差压流量测量应用

产品一致性：按批次生产的产品依赖于成分的精确比例，差压流量计有助于确保液体和气体的准确输送。

生产效率：从批次控制到清除副产品再到排放监测，流量的计量和测量在与效率相关的大量过程控制变量中不可或缺。

过程变量控制：过程通常包括多个变量输入。对这些变量（包括流量）的控制是优质生产的关键。

安全性：差压流量有助于防止对安全性造成各种威胁，包括加注过满、反应器控制等等。

内部料单和资源分配：对库存和过程速率的严格控制直接有助于盈利能力的提高。对于许多富有经验的生产者而言，过程成本的内部料单直接影响生产力。

贸易交接：流量计量对于按体积或重量出售的产品而言不可或缺。输出端的准确测量要精确到每一滴，而接收端的准确测量有助于将溢出可能性降到最低。

1.6 流量计的安装

传统安装

如图 1.6. a 所示，传统安装法需要三种不同的部件类别。

图 1.6. a - 传统的差压流量安装包括独立的一次元件、二次元件和第三方元件。



1. 一次元件（差压产生装置）
2. 二次元件（变送器）
3. 第三方元件（引压管、连接硬件、管道、接头、阀门等）

传统形式可使部件间的设计满足各种应用，可专为满足贸易交接标准而设计。

传统安装存在自身限制或问题。包括接头、单独/错误的引压管和阀组装置上存在多处可能的泄漏点；长导压管造成的精度问题。另外，安装极为复杂，需要较长的直管段（取决于所使用的一次元件）和精心的部件配置。多年以来，人们通过大量工作解决了其中一些问题，因而扩展了差压流量设备的实用性和价值。

一体化安装

一体化流量计将一次元件和变送器集成为一个整体的流量计。在很大程度上，这是为了将老式传统流量计的安装问题降到最低。因此，安装所需的部件和人力比传统流量计安装要少。

一体化流量计与传统流量计的工作方式极为相似。采用相同的测量计算方式，与相同的一次元件配合工作，而且拥有相同的变送器（差压变送器和多参量变送器）。

一体化流量计的优点：

- 不再使用接头、导压管、阀门、适配器、阀组和安装支架
- 潜在泄漏点减少（出厂泄漏检查）
- 流量测量误差源减少
- 订购和安装程序简化
- 降低冻结和堵塞的可能性
- 设计更加紧凑

罗斯蒙特一体化流量计结合了行业领先的变送器与创新的一次元件技术和连接系统。一个流量计集成了传统的 10 个零件，简化了设计、采购和安装程序。

图 1.6. b - 传统式差压流量计结构对比一体化多参量差压流量结构。



1. 流量计算机
2. 一次元件
3. 热套管
4. 温度传感器
5. 温度变送器
6. 传感器接线
7. 压力变送器
8. 差压变送器
9. 阀组
10. 连接法兰

1.7 其他流量技术

差压流量仍然是行业内最常用的流量测量形式。

除了基于压力的技术之外，还有各种流量测量技术。其中包括明渠、机械、超声、电磁、科氏、光学、热式和涡街流量计。

电磁流量计要求使用导电流体和将磁能引入流量的方法，该流量计使用电极来感应磁通量的电流感应。

顾名思义，科氏流量计利用科氏效应，驱动振动管变形。

光学流量计使用光电探测器测量被照亮流体中的微粒运动。

涡街流量计使用电脉冲发生器—通常为压电晶体—测量已校准发生体周围的流体扰动（涡流）。

如今各种不同的流量测量技术均有其理想的应用范围。但是，因其悠久的历史、易用性和广泛的应用范围，差压流量仍然是行业内最常用的流量测量形式。

2 - 流体基础知识和概念

2.1 简介

本章节概述了流体的物理属性，列出了一些基本概念，并提供了了解第3章所介绍的流量测量理论所需的基础知识。

必须了解五种关键的流体特性，以使用大小合适的 DP 流量计：密度或比重，静压、温度、等熵指数和粘度。这些属性是 DP 流量计算中的因素。

流体是一种受到剪应力时会持续发生变形的物质。流体可以是液体、蒸气或气体。对于大多数流体而言，有些流体属性可通过已知的其他属性来计算。

2.2. 力、质量和重量

属性	符号	单位
质量	m	lb_m, kg
力	F	lb_f, N

当处理流动的流体时，回顾了解力、质量和重量概念背后的物理属性很重要。DP 流量计采用能量转换概念，通过测量压力下的物理属性差异确定管道中的流速。

质量的美制单位为 lb_m ，国际单位制单位为千克。其关系如下：

$$1 \text{ kg} = 2.204622 lb_m$$

牛顿第二运动定律将力、质量和加速度之间的关系描述为：

$$F = ma \quad (2.1)$$

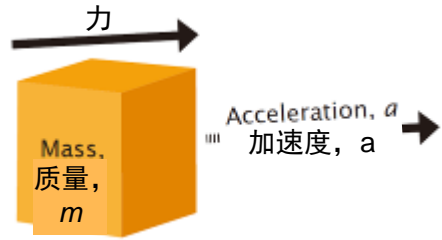


图 2.2.a - 牛顿第二定律定义力等于质量乘以加速度。

其中：

F = 施加到物体上的力或物体所施加的力

m = 物体的质量

a = 物体产生的加速度

为解释重力，需要使用重力转换常数 g_c 。因此，牛顿第二定律为：

$$F = \frac{1}{g_c} ma \quad (2.1)$$

力的国际单位制单位为牛顿 N，是指以 $1m/s^2$ 的加速度移动质量为 1kg 的物体所需力。因此：

$$1 \text{ Newton} = kg \frac{m}{s^2} \quad (2.2)$$

在国际单位制中， $g_c = 1kg \cdot m / (N \cdot s^2)$ 。由于 g_c 的值为 1，所以采用公制系统的力计算中通常不考虑此因数。

在美制单位中，力的单元为磅 lb_f ，是指以 32.174 ft/s^2 的加速度将质量为 1 磅 lb_m 的物体移动一英尺所需的力。因此：

$$1 \text{ lb}_f = \frac{1}{g_c} lb_m \frac{ft}{s^2} \quad (2.3)$$

其中：

$$g_c = 32.174 \frac{lb_m ft}{lb_f s^2}$$

2 - 流体基础知识和概念

物体的重量可定义为：

$$W = \frac{g_i}{g_c} m \quad (2.4)$$

其中：

W = 以力为单位的重量

g_i = 本地重力加速度

由于地球自转，地球两极的重力值稍微偏高，赤道处的重力值偏低。纬度 45° 处， $g_i = g_c$ ， Lb_m 产生的力为 Lb_f 。

这一概念用于解释能量方程式中的流体重量（例如，伯努利流量方程式中的海拔或“z”项），以及在流体静力学中将重力压头转换成压力，测压计就是基于这一工作原理。

2.3 密度

属性	符号	单位
密度	ρ	$lb_m/ft^3, kg/m^3$

流体密度是指单位体积的质量。请注意，对于相同的质量，该质量所占体积因温度和压力而异（参见 2.9 质量和体积流量）。液体的密度波动通常较小，而气体的密度波动非常大。中等温度和压力波动下密度变化较小的流体被认为是不可压缩的。如果不同压力和温度下的密度变化显著，则认为是可压缩流体。

对于工业气体测量应用，通常采用真实气体定律或理想气体定律。理想气体定律适用于中等温度和低压条件。不考虑气体分子间的相互作用。如果有关理想气体定律的假设不适用时，则采用真实气体定律。有关密度和压缩性注意事项的更多信息，请参见第 4 章。

2.4 比重

比重(SG)是一种物质密度与另一种（或参考）物质密度的比值。液体的参考物质通常为 $68^\circ F$ ($20^\circ C$) 温度下的水。 $68^\circ F$ 温度下的蒸馏水密度为 $62.316 lb_m/ft^3$ ，或者 $20^\circ C$ 温度下为 $998 kg/m^3$ 。因此，比重只是一个指示液体比水重或比水轻的数值。

通常使用液体比重计获取液体比重，该比重计是一种刻度读数为比重波美度($^\circ B$)或 API（美国石油组织）度的仪器。

气体比重的参考流体是空气。气体比重被定义为目标气体分子量与空气分子量的比值（规定为 28.9644）。这种方法避免了根据温度和压力计算气体密度以及考虑气体非线性特性的难度。只要气体成分不变，无论温度、压力或位置如何，分子量与参考气体的分子量比值保持不变。

2.5 压力

属性	符号	单位
压力	p	psi, Pa

压力是指单位面积上沿法向（即垂直方向）作用在表面上的力（图 2.2.4.a）。压力的美制单位关系：

$$psi = \text{磅力} / in^2$$

其中 lb / in 是指力而非质量。

压力的国际单位制单位为帕斯卡，等于：

$$Pa = N/m^2$$

其中：

N = 牛顿，单位为 $kg \cdot m/s^2$

2 - 流体基础知识和概念

帕斯卡是一个非常小的压力单位，通常表示为 kPa（千帕）或 MPa（兆帕）。其他常见的压力国际单位制单位为 bar，其等于 100 kPa。

2.5.1 绝对压力和表压

绝对压力是指相对于理想真空的压力。表压是相对于大气压力的压力。因此：

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{gage}} - P_{\text{atm}} \quad (2.5)$$

绝对压力用于计算气体密度。由于表压与大气压力相关，所以用于确保承压零件（即，管道或安装在管道上时承受压力的流量计零件）保持在安全工作限值内。

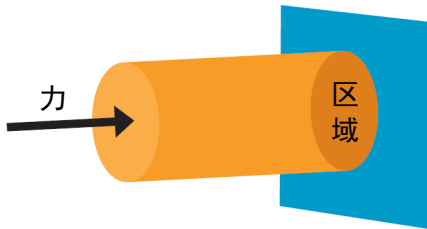


图2.5.1.a - 压力是指垂直作用在该面积上的力。

标准大气压力通常被定义为 1atm、14.69595 psi 或 101.325 kPa。指定位置的实际大气压力取决于该位置的海拔高度以及每天的天气情况。计算绝对压力时通常不采用因天气导致的大气压力变化。但是，为了测量流量，会采用根据海拔所调整的本地标准大气压力来确定大气压力。

流量计应用中的压力值用于为两项独立的重要工程任务提供信息：

- 流体参数计算 - 尤其是气体或蒸气密度和气体膨胀系数
- 检查安装硬件的兼容性和安全系数

2.5.2 差压

属性	符号	单位
差压	ΔP 或 DP	inH ₂ O @ 68° F, inHg*, kPa, mbar

*英寸汞柱；还可以是水、乙醇、机油或其他液体柱英寸数

要求确定两个压力之间的差值，则需进行差压流量计算，称为差压或 DP（图 2.5.2.a）

DP 的国际单位制单位为 Pa 或 kPa。

规定温度下 DP 的美制单位为 psi 或英寸水柱（inH₂O）。英寸水柱单位是历史产物，当时是使用测压计来测量流量，它表示在特定温度下特定高度水柱底部的压力。例如，在 68° F 温度下的 DP 为 25 英寸水柱，表示这是水温为均匀 68° F 时 25 英寸高水柱底部的压力。该单位有两种常用版本：68° F 温度下的英寸水柱（用于美国过程控制工业）和 60° F 温度下的英寸水柱（用于美国天然气行业）。其中以 psi 为单位的换算因子有：

$$1 \text{ psi} = 27.72976 \text{ in H}_2\text{O @ } 68^\circ \text{ F}$$

$$1 \text{ psi} = 27.70727 \text{ in H}_2\text{O @ } 60^\circ \text{ F}$$

两个参考温度间的差值为 0.08%，因此了解参考温度很重要。

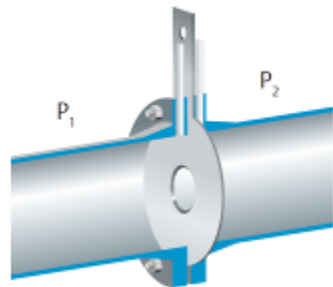


图2.5.2.a - 差压。P₁压力高于P₂。

2 - 流体基础知识和概念

可以利用简单的关系式计算差压：

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (2.6)$$

测压计是用于测量较小压差的最简单仪器。测压计采用一个U形管或在底部连接两个垂直管，管中加注部分液体（图 2.5.2.b）。在各管顶部施加两种压力时，两个管内的液体高度发生变化，测压计上的刻度用于测量高度或高度差 h 。然后利用关系式计算差压：

$$\Delta P = \frac{g_l}{g_c} (p_m - p_f) h \quad (2.7)$$

其中：

- ΔP = 差压，使用合适的单位
- g_l = 本地重力加速度
- g_c = 质量与力之间的单位转换常数
- P_m = 测压计流体密度
- P_f = 传送压力的流体密度
- h = 测量点的高度差或流体高度

气体流量 DP 测量所使用的标准测压计流体是水，其中高度以英寸为单位，DP 以“英寸水柱”为单位。当然，如果测量水或其他液体，则需使用密度较大的测压计流体。通常使用汞 (S.G.= 13.5) 或溴基液体 (S.G.= 2.5 至 3.0)。比重重的所有液体均可使用，但必须“不溶于水”或无法与测压计接触的流体混合。

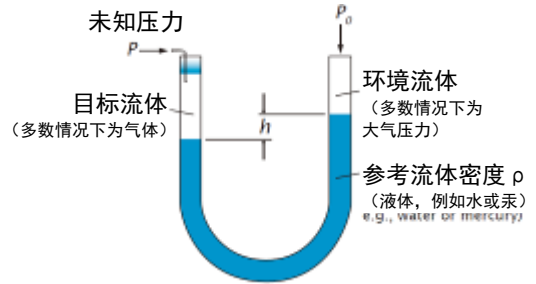


图 2.5.2.b - 测压计工作方法示例。

请注意，测压计和机械压力表属于老式技术。当前最佳技术是采用电子差压变送器和静压变送器（图 2.5.2.c）。这些变送器可在

极大的压力范围内或 DP 范围内提供极为准确的读数，可以在较大的环境温度范围内工作而无需外部校正。易于将电子信号输出输入到微处理器中，用于计算流量或记录数据。



图 2.5.2.c - 新式差压变送器。

2.6 温度

属性	符号	单位
温度	T	$^{\circ}C, ^{\circ}F, ^{\circ}K, ^{\circ}R$

¹可以在文档编参考号为 00805-0106-1036 的罗斯蒙特《工业温度测量工程师指南》中查阅更多深层信息，或者访问 Rosemount.com/temperature。

2 - 流体基础知识和概念

温度测量的工业方法基于电阻会随温度而变化的物质，如 RTD（电阻式温度探测器）或者根据温度变化会在不同金属结合点产生的电压的热电偶。

除了工程界，通常使用相对华氏与摄氏温标执行温度测量，华氏与摄氏温标原本用于测量地球的温度范围。但是，流量工程问题需要一种代表绝对温度的不同温标。绝对温度的国际单位制单位为开尔文，美制单位为兰金。绝对温度与常用单位 °F 和 °C 之间的关系为：

$$K = ^\circ C + 273.15 \quad (2.8)$$

$$^{\circ}R = ^\circ F + 459.67 \quad (2.9)$$

计算流体属性（例如，密度、粘度和等熵指数）时需要采用绝对温度。热膨胀效应的计算涉及到温差，所以常使用 °F 或 °C。

绝对零兰金等于绝对零开尔文。兰金温标增量为华氏度数，而开尔文温标增量为摄氏度数。

2.7 粘度

属性	符号	单位
绝对粘度	μ	厘泊 (μ_{cp}), lbm/ft-s, kg/m-s
动态粘度	ν	厘沲

绝对粘度定义为流体移动的阻力(图2.7.a)。它衡量的是流体分子在剪应力的作用下，需要发生流速变化而受到的阻力。换言之，粘度有阻碍一个粒子比相邻粒子更快移动的趋势。绝对粘度的定义为：

$$\mu = \tau / \frac{\delta v}{\delta y} \quad (2.10)$$

其中：

τ = 流体中的剪应力或者在单位面积的表面上移动流体所需的力

$\frac{\delta v}{\delta y}$ = 流速变化或者壁面或表面与自由流速度间的“张力”

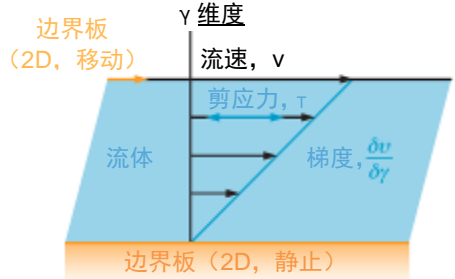


图 2.7.a - 粘度定义为流体移动的阻力。

所有实际流体均具有粘度，其主要随着温度变化。因此，通常需要绘制流体粘度和温度曲线图，建立方程式，在知道温度后就能计算粘度。液体粘度随着温度升高而降低；气体粘度随着温度升高而增加。

运动粘度为绝对粘度除以相同温度下的流体密度，或者：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.11)$$

按照流体应力（克服粘度所需的力）和张力的（流体流速）间的关系对流体进行分类。图 2.7.b 显示了基于 μ 特性的各类流体图。DP 流量计仅限于“牛顿”型流体，或者流体应力/应变曲线斜率 (μ) 恒定的流体。剪切稀化流体粘度随着剪应力的增加而降低；

例如蕃茄酱、火山岩浆或者高分子溶液和熔融聚合物。剪切增稠（粘度随着剪应力增加而增加）流体包括悬浮液，例如水中的玉米淀粉。宾汉塑性流体在超出临界应力限值前不会流动；这种流体类型包括牙膏。

2 - 流体基础知识和概念

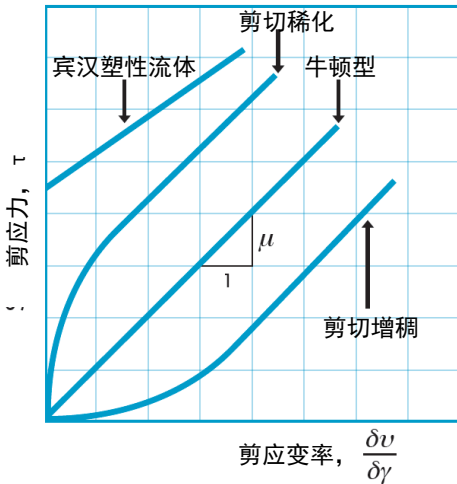


图 2.7.b - 基于粘度特性的流体分类, m 。

2.8 流体速度

属性	符号	单位
流速	v	ft/s, m/s

流速不属于流体属性，但可用于预测运动流体的行为和确定 DP 流量计的应用。总之，流速是物体位置相对于参考物的变化率，即规定了物体的速度和运动方向。在流体动力学中，流速定义为流体粒子相对于静止参考物的速度，如管道。流体在物体周围流动或流经管道时，流体粘度会导致形成流速剖面。如果没有粘度，管道中横截面上的流体速度均匀一致。即使是最小的粘度，也会导致相邻流体粒子间的剪应力在管中产生不均匀流速剖面，其中管壁上的流速为零，管道中心线流速最大，从而形成流动。

管中流动的液体还定义了流速场。人们对管中流体的流动进行了广泛的研究，知道流量和流体属性就可以预测流速场。

2.9 质量与体积流量

属性	符号	单位
体积流量	Q_v	1/hr, m^3/hr
质量流量	Q_m	lb/hr, kg/hr

体积流量即按体积测量流量，顾名思义，反映的是流过给定面积的流体体积，如下所示：

$$Q_v = \text{流动面积} * \text{流体速度} \quad (2.12)$$

如下所示，质量流量取决于密度和体积流量：

$$Q_m = \text{密度} * Q_v \quad (2.13)$$

体积流量和质量流量关系如下：

$$\begin{aligned}
 Q_m &= \frac{\text{质量}}{\text{单位时间}} : \frac{Q_m}{\text{参考密度}} \\
 &= \frac{\text{质量/单位时间}}{\text{质量/单位体积 @ 参考条件}} \\
 &= \frac{\text{体积 @ 参考条件}}{\text{单位时间}} \quad (2.14)
 \end{aligned}$$

换言之，质量流量（质量单位/单位时间）除以参考条件下的密度时，如果将流动时的压力和温度条件调整为参考条件，流量就等于流体所占体积。如果流动压力为 146.96 psia，温度为 68 ° F 而且参考条件为 14.696 psia 和 68 ° F，当质量流量转换成标准体积流量（除以参考条件下的流体密度）时，数值将增加 10 倍。质量保持不变，但为了使压力保持在 14.696 psia，其所占用体积必须为流动条件下的 10 倍。

2 - 流体基础知识和概念

对于给定的液体量，质量不变，但体积会随着压力和温度发生变化（图 2.9.a）。

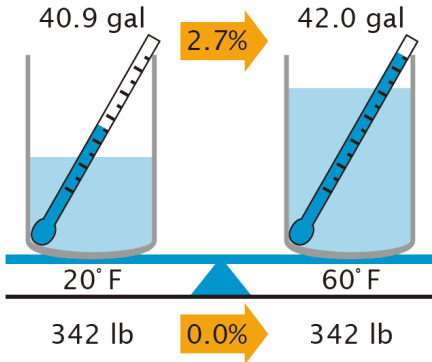


图 2.9.a - 质量不会随着压力和温度的波动而改变，但体积会。该图举例描述了随温度变化的体积量。

多数气体和液体首选质量流量测量，而稳定的液体也可接受体积流量。适合于质量流量的流计包括多变量 DP 流量计或科里奥利氏流量计。体积流量计包括 DP 流量计、涡轮流量计、涡街流量计、电磁流量计或可变截面流量计。

2.10 等熵指数

气体流过管内限流位置时，密度因压力变化而改变。假设气体膨胀是一个等熵过程，对于某些限流类型，可以从理论上确定密度变化对流量产生的影响，而对于其他限流类型，则可根据经验确定。相关的流体属性为气体等熵指数（称为 k 或 g ），主要是温度的函数。通常的做法是在标称温度下确定 k 并将该值用于所有流量。 k 的典型值范围介于 1.0 和 1.4 之间。

第 3 章 - 流量理论

3.1 简介

第 3 章涵盖了差压流量的理论细节和计算细节。目的有两个：

- 向行业用户介绍一些流体流量的基本情况，重点是差压流量技术
- 解释[罗斯蒙特差压流量产品](#)工程的基本假设和方法

最重要的是要知道即使是最简单的应用也存在着极大的复杂性。

请注意，深入了解影响差压流量的物理特性对于技术人员掌握特定应用工程中的各个方面很有帮助，但差压流量计的安装和日常操作不需要了解这些。最重要的是要知道即使是最简单的应用也可能存在着极大的复杂性。

可用资源

有许多现成的可用资源可供工程师解决复杂问题。

其中包括：

- 可从指定产品供应商获取的应用和销售工程资源
- 行业培训以及专家和同行在用户会议和正式研讨会上的讨论
- 供应商提供用于简化指定应用工程的软件工具箱和实用工具
- 关于该课题的大量技术文献和书籍

以下章节从实用的角度讲述了差压流量 — 推荐应用类型（气体、液体、蒸汽）采用的技术、从硬件和软件角度分析可用产品（变送器、一次元件）以及安装和使用注意事项。

3.2 流体和流量的物理特点和工程

差压流量理论和计算中所采用的概念主要源于流体力学的两个方面：**流体运动学**（对运动流体的研究）和**流体动力学**（对流体运动引起力效应的研究）。基本的差压流量方程以能量守恒为基础，几乎适用于工业或商业应用中所有流体类型的测量。

使用差压装置测量流量的优点有：简化感测系统、多类型的一次元件、能够验证测量结果和差压流量技术广泛的适用范围。

通过熟悉差压流量测量装置的理论 and 操作，可以克服差压流量计使用过程中的挑战。

3.3 展开流和未展开流

评估流量计性能及其在潜在应用中的使用时，应考虑测量平面上的流速剖面状况。如果流经下游时流速剖面未发生明显变化，则认为流动已“展开”。得到展开流需要足够的直管长度或者在上游安装装置消除过大紊流或稳流。由于流量计主要在展开流中接受测试，所以如果测量点发生在未展开流情况下，则必须单独考虑对流量计性能的可能影响。

如果流经下游时流速剖面未发生明显变化，则认为流动已“展开”。

未展开流对不同类型的流量计影响不同。测量位置上游安装的管道配件和阀门类型导致管内产生额外的紊流，从而形成未展开流。因此，制造商通常会提供一张流量计装置安装图，以实现规定性能。

3.4 雷诺数

雷诺数是流体力学中使用的一个重要的无量纲参数。定义为流体惯性力与粘性力的比值。借助雷诺数可以模拟流体流动，以便将特定的流动特性转换为通用值。在流量计量中，雷诺数用于规定所有流体类型的通用测量范围。这极大地简化了流量计的评估、尺寸选择和使用。

对于管内流动，雷诺数等于：

$$R_D = \frac{\rho D \bar{V}}{\mu} \quad \begin{array}{l} \rho = \text{流体密度} \\ D = \text{管内径} \\ \bar{V} = \text{平均流体流速} \\ \mu = \text{流体动态粘度} \end{array} \quad (3.1)$$

管内流动以雷诺数范围为特点。通过科学家和工程师对管内流动流体在高速和低速间转换的大量理论研究识别这些范围或流动状态。这种转换导致管内的流速剖面发生变化，对流体动力学和测量流速的能力产生了极大影响。

雷诺数极低时的流动状态被称为“层”流，或流体位于各个层的流量。从管壁到管轴，流速持续提高。层流的流速剖面成抛物线形状。这种情况下，流体粘度在使流型保持在稳定层方面起着重要作用。

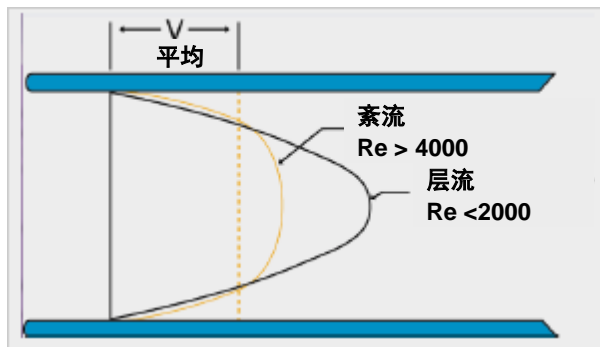
随着流速的增大，这种层流状态开始发生变化，流动发生转换。流速剖面的抛物线形状开始变平时，各层分解为更小的涡流。流速较大时，层流区仅存在于管壁部分而且非常薄。

流经管内其他部分的流体变为紊流。尽管流速剖面变平，但中心部位的流速仍然最高。图 3.4.a 显示了两种流动类型的剖面。雷诺数值与流动状态的关系如下：

- $Re < 2000 =$ 层流
- $2000 \leq Re \leq 4000 =$ 过渡流
- $Re > 4000 =$ 紊流

紊流态中包含了工业和商业管道中所用流体的大部分流速范围。除非流体粘度较高，否则很少遇到管道尺寸使流动处于层流状态的情况。因此，差压流量计技术的应用仅限于紊流，也就是说紊流可用于大部分应用中。

图 3.4.a - 层流和紊流的流动剖面。



管道雷诺数的计算

流速、管内径、流体密度和粘度描述了基本的雷诺数方程式。由于雷诺数为无量纲数，所以质量、体积/长度和时间单位必须保持不变。需要使用以下基本单位计算美制单位和国际单位制单位的管道雷诺数：

表 3.4.1: 雷诺数基本单位

参数	美制基本单位	国际单位制基本单位
流速	<i>ft/s</i>	<i>m/s</i>
密度	<i>lbm/ft³</i>	<i>kg/m³</i>
直径	<i>ft</i>	<i>m</i>
粘度	<i>lb_m/ft•s</i>	<i>kg/m•s</i>
体积流量	<i>ft³/s</i>	<i>m³/s</i>

泊是动态粘度的测量单位。粘度的测量单位通常采用美制单位的厘泊(cP)和国际单位制中的Pa·s。要想转换成上述粘度单位,需使用:

$$100\text{cp} = 1 \text{ 泊} = 0.1 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} = 0.067197 \frac{\text{lb}_m}{\text{ft} \cdot \text{s}} \quad (3.2)$$

尽管可以查到密度和粘度,但流速通常不在流量计的规格表中。但是会给出期望的最小流量和最大流量。可以利用流量(而非流速)来计算雷诺数。首先从圆管的面积开始:

$$A = \pi \frac{D^2}{4} \quad (3.3)$$

对于基本单位以外的单位,需要使用换算因数。以下即为转换管平均流速和计算雷诺数所用关系式:

表 3.4.2: 不同类型流量的雷诺数关系式

流量类型	基本关系式	Re_D	关键项
实际 体积流量	$\bar{V} = \frac{Q_v}{(\pi D^2/4)}$	$R_D = 4 \frac{Q_v \rho}{\mu \pi D}$	Q_v =实际体积流量 ρ =流体密度
质量流量	$V = \frac{Q_m}{(\rho_f \pi D^2/4)}$	$R_D = 4 \frac{Q_m \rho}{\mu \pi D}$	Q_m =实际体积流量 ρ =流体密度
标准 体积流量	$V = \frac{Q_s \rho_b}{(\rho_f \pi \mu D^2/4)}$	$R_D = 4 \frac{Q_s \rho_b}{\mu \pi D}$	Q_m =实际体积流量 ρ_b =标准条件下的密度

*在所有关系式中, μ 表示流体的动态粘度, D 表示管内径。

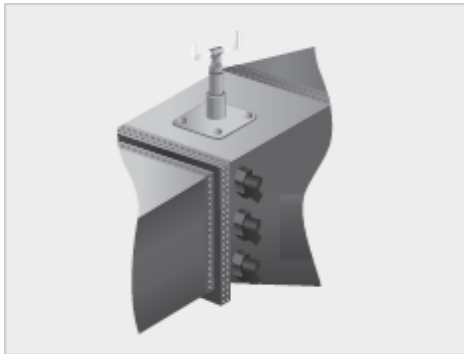
特殊情况: 非圆形管道

对于非圆形管道(图 3.4. b), 用水力直径代替管径。它的定义是横截面面积乘以 4 除以湿周。等式为:

$$D_H = \frac{4A}{P} = \frac{4HW}{2H + 2W} \quad (3.4)$$

D_H	=	水力直径
A	=	管道浸湿面积
P	=	管道湿周
H	=	管道高度 (跨距)
W	=	管道宽度

图 3.4.b - 远程安装在非圆形管道上的罗斯蒙特阿牛巴一次元件。



3.5 伯努利原理

在流体动力学中，伯努利原理以及衍生出的方程式是能量守恒方程的一种特殊形式。更具体地说，这些方程式是一般流体流动能量守恒方程的特殊形式，1757 年莱昂哈德·欧拉第一次以数学的方式对其进行了说明。该原理实际上是相关等式的一个集合，其形式因不同的流动类型而异。稳定的不可压缩流所使用的基本伯努利方程为：

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V_s^2}{2} + gz = \text{constant} \quad (3.5)$$

ρ	=	流体密度
P	=	流体压力
g	=	当地万有引力常数
z	=	相对于基准面的高度
V_s	=	流线上的流体流速

该等式适用于沿“流线”（定义为“s”）移动的流体，流线是指流体移动时所经过的一条连续路径。流体的所有变化都发生在流线上，没有流体进出流线。这一概念运用于流量计时，流量计中的流体进入管道，那么现在管道就是流线。对于稳定状态的展开流，这种一维模型足以描述管内的流场。

伯努利方程可作为差压流量的运算式 — 即输入（流量和流体状态）和输出（差压）间的传递函数。伯努利方程的优点就是简单、明确，是工程领域中一种可行的流体流量测量方法。

在流量计量过程中，必须认为流体流量处于“稳态”，也就是执行测量作业时速率或状态不会发生显著变化。但这些条件可能会受到限制，实际上多数流体系统都设计为在变化微小的稳态下运行，以防止系统内压力瞬变过大或发生振动。

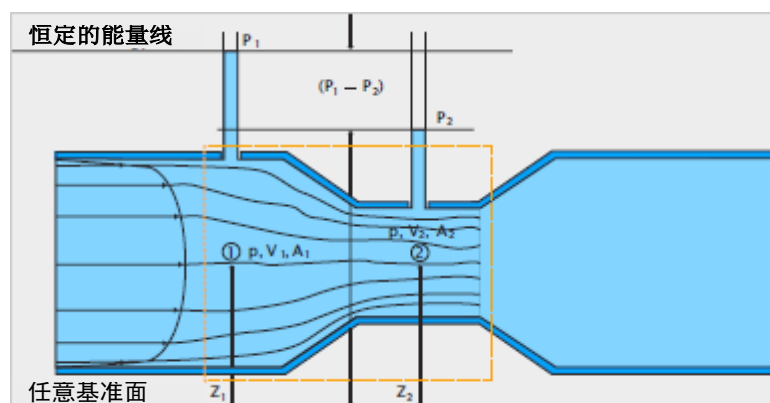
为实现能量平衡，假设未对系统加热且未对系统做功或系统未做功。实际上，泵和风扇都在对流体做功—否则就不需要泵和风扇了。但是，当系统边界设在流量计周围时，这种近似处理方式就能很好地消除系统能量项。在流体流量的应用形式中，伯努利方程体现的是流体液流两点间的能量差。在此描述中，由于势能（压力）与动能（流速）间的能量转换，点 1 显示高压；点 2 显示低压（图 3.5. a）。

如果伯努利方程用于同一流线上的两点，方程和能量平衡用于管内的面积变化或限流位置时，等式变为：

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} V_1^2 + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} V_2^2 + gz_2 \quad (3.6)$$

等式 3.6 表明进入点 1 限流位置的能量项总和必须与点 2 限流位置之后的能量项总和相等。

图 3.5. a - 管内限流位置的典型能量流量图。



为确定以质量/时间或体积/时间为单位的流量，必须采用连续方程以确保质量守恒（等式 3.7）：

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (3.7)$$

对于不可压缩流体， $\rho_1 = \rho_2$ ，连续方程为：

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (3.8)$$

为了实现上述形式的连续方程和伯努利方程，应假设：

- **稳定流** – 等式表示恒定的流速
- **可忽略的粘滞效应** – 代表流动时具有理想均匀性的流体和不变的流动剖面
- **未对系统做功** – 根据流量计周围系统边界的能量平衡导出伯努利方程。因此，简化后的等式形式（如等式 3.9 所示）不适用于涉及泵、涡轮机、风扇或其他机械的流体部分，因为这些机械会干扰流线，并最终导致能量和流体相互作用
- **不可压缩流体** – 假设穿过流线的密度保持不变
- **可忽略的传热效应** – 简化后的伯努利能量平衡不包括摩擦效应，这种效应以热量的形式进行局部能量传递

导出差压流量方程

从伯努利方程（等式 3.5）开始，其中 $z = h$ （高度），改写后等式变为（关于能量项分类，参见图 3.5.b）：

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \rho g h_2 \quad (3.9)$$

图 3.5.b – 伯努利方程中的能量项分类。

The diagram shows the Bernoulli equation: $P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + pgh_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + pgh_2$. Brackets and lines group the terms into three energy categories: '动能' (Kinetic Energy) for the velocity terms, '势能' (Potential Energy) for the height terms, and '压力能' (Pressure Energy) for the pressure terms.

假设流体水平流动且高度不变时，势能项相等。结合连续方程（等式 3.9），两点的压力变化表示为：

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 - \frac{1}{2} \rho V_1^2 \quad (3.10)$$

对于不可压缩流体，等式 3.8 成立。点 1 的流速乘以横截面面积与点 2 的流速乘以横截面面积相等。

圆管和圆形限流装置（例如孔板）的横截面面积为：

公式错误，以下为正确公式：

$$A_1 = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (3.11)$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (3.12)$$

D = 管内径

d = 限流装置内径

改写等式 3.10 并用等式 3.11 和 3.12 分别取代 A_1 和 A_2 ，

$$V_1 = V_2 \frac{A_2}{A_1} \rightarrow V_1 = V_2 \frac{d^2}{D^2} \quad (3.13)$$

结合等式 3.9、连续方程和等式 3.13，所得出的等式表现出限流位置上的流速与差压间的关系：

$$V_2 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)}} \quad (3.14)$$

若要计算体积流量，等式两边需同时乘以限流位置的面积：

$$Q_v = \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)}} \quad (3.15)$$

若要计算质量流量，流速等式两边需同时乘以密度：

$$Q_m = \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta P \rho}{1 - \frac{d^4}{D^4}}} \quad (3.16)$$

等式 3.15 和 3.16 采用的是理论质量，而体积流量等式则以第 3.5 节所列的假设条件为基础。这些并不代表实际的流体相互作用。因此，使用了两个校正系数：流量系数和气体膨胀系数。

流量系数用于校正以下假设：

- 无粘滞效应
- 无热传递
- 理想位置的测压孔

比压

这种类型的流量计取代了“限流位置”，由于基于面积的变化，所以也称作“截面”流量计。为方便起见，“d/D”被简称为“Beta”或“β”。这样，项“d⁴/D⁴”就变成了“β⁴”。由Beta定义孔板或文丘里管等截面流量计，并根据截面流量计的类型对校准结果进行分类。为进一步简化流量方程，用Beta项取代直径比：

$$Q_m = \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta P \rho}{1 - \beta^4}} \quad (3.17)$$

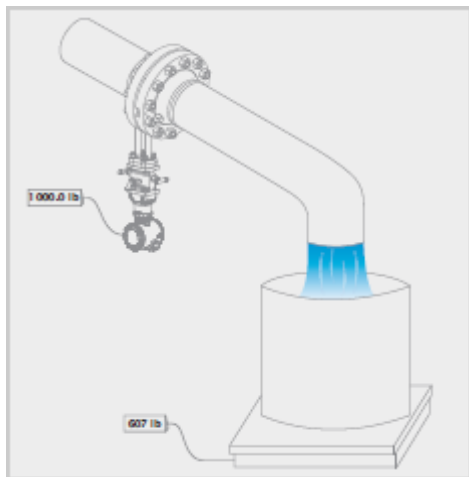
参数： $\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$ 定义为“E”，因此等式简化为：

$$Q_m \text{ (理论)} = \frac{\pi}{4} E d^2 \sqrt{2\Delta P \rho} \quad (3.18)$$

这仍然是不可压缩流的“理论公式”，因为其不考虑实际流体的能量损失。当等式中增加流量系数时，称为“不可压缩流的实际质量流量方程”，表示为：

$$Q_m \text{ (实际)} = \frac{\pi}{4} C_d E d^2 \sqrt{2\Delta P \rho} \quad (3.19)$$

图 3.5. c - 用于确定某一流量系数数据点的流量实验室装置。



假设流量实验室内安装了孔板，则可在称量桶中收集稳定的水流。基于理论公式的流量计算表明测试期间共有 1000 磅的水流经节流孔并收集到称量桶内。

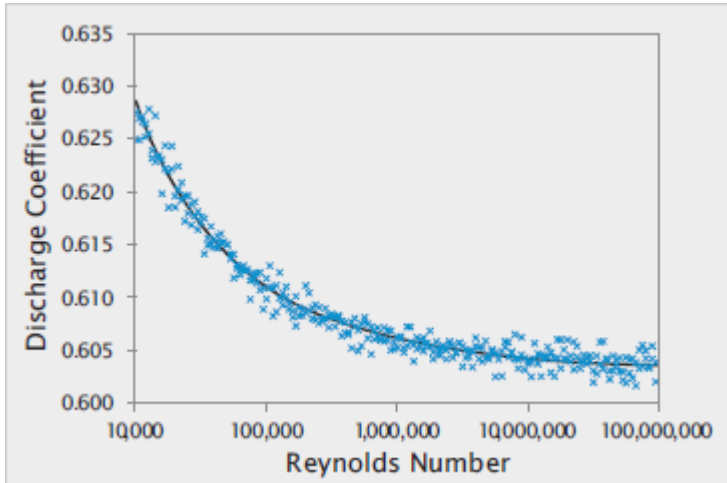
但是，同一时间段内，称量桶实际收集到 607 磅的水（图 3.5. c）。这说明该孔板在所观察的稳定流量下的流量系数（等式 3.20）为 0.607。该流量系数只能代表图 3.5. d 中的一个数据点。

$$C_d = \frac{\text{实际流量}}{\text{理论流量}} = \frac{607}{1000} = 0.607 \quad (3.20)$$

由于多数一次元件的流量系数因雷诺数而异，所以对一系列雷诺数执行了本测试以确定 C_d 和 Re 曲线，或者流量计特性。对于截面流量计，也可以确定不同比压的曲线。该数据汇总描述了大量面积比或 $Beta$ 下各种可能流动状态下的流量系数特点。根据受测参数的范围，将产生成百上千个数据点。

收集所有数据后，可以建立数据曲线的拟合方程，如图 3.5. d 中的黑线所示。然后利用该等式预测几何形状相似的一次元件的流量系数。这样，等式即可用作校准常数，所以不需要在实验室内分别校准结构相似的一次元件。然后可以根据图 3.5. d 中橙色虚线确定该变量的不确定性。利用标准误差估计 (SEE) 确定数据拟合曲线的不确定性，标准误差估计是以计算（曲线）值为参考的数据采样标准偏差。

图 3.5. d - 所采集流量系数数据的曲线拟合不确定性。



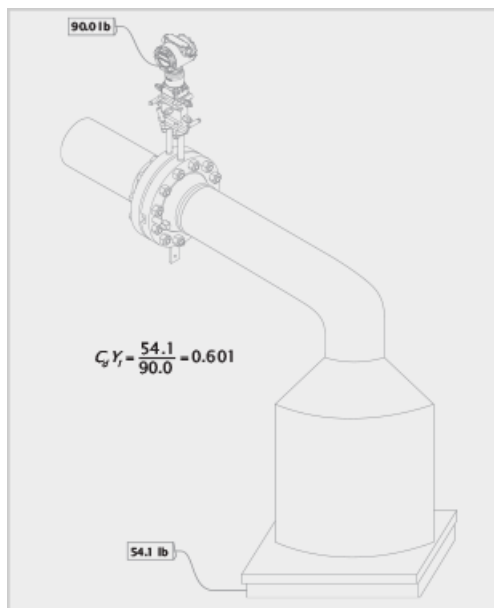
气体膨胀系数 (Y_1)

气体膨胀系数也来自于实验室测试，在该测试中可以使用气态流体（通常为空气）产生已知流量。它不适用于实际流动状态的原因是因为气体流经限流位置时，压力下降，从而导致气体膨胀，密度减小，所以 $\rho_1 \neq \rho_2$ 。密度减小后，流速将稍微高于理论流量方程计算的预测值。

已知：

$$C_d Y_1 = C_d Y_1 \quad (3.21)$$

图 3.5.e - 用于确定某一气流气体膨胀数据点的流量实验室装置。



可以确定 Y_1 。例如，气体膨胀系数实验室测试确定，按照理论公式应收集 90 lbs，实际收集 54.1 lbs。54.1 lbs 表示包含流量系数和气体膨胀系数的质量流量。

因此：

$$C_d \cdot Y_1 = \frac{54.1}{90.0} = 0.601 \quad (3.22)$$

由于本测试中采用了相同的管道和比压，所以 $C_d = 0.607$ 。

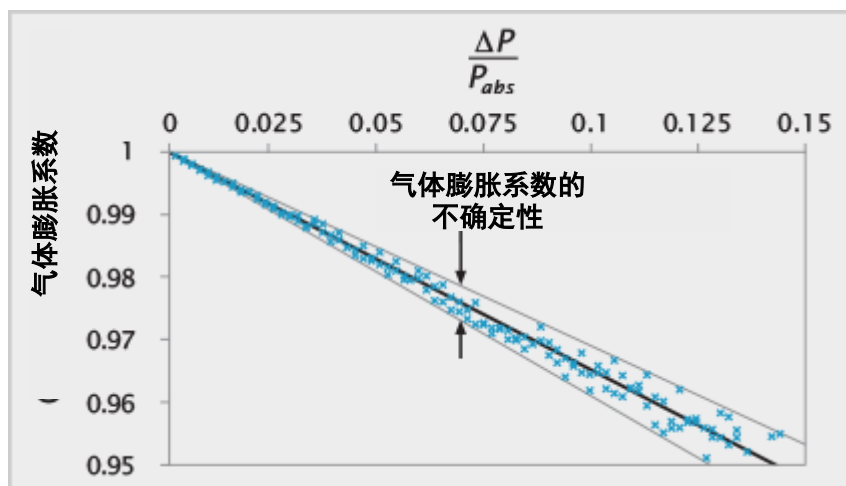
现在可以计算 Y_1 。

$$Y_1 = \frac{C_d Y_1}{C_d} = \frac{0.601}{0.607} = 0.990 \quad (3.23)$$

在上游测压孔确定气流或蒸气流的密度。对于液体流， $Y_1 = 1.000$ 。下图 3.5. f 显示了膨胀系数和比率 ΔP 的关系图：典型的直角边缘同心孔板上比热比为 1.4 的气体 P_{abs} 。以这种方式绘制气体膨胀系数，因为密度的轻微变化与管道压力的百分比变化成比例。

由于计算的流量取决于 C_d 和 Y_1 ，而这两个系数取决于流量，所以必须重新计算流量，然后计算新的 C_d 和 Y_1 值，重复该操作直到后续计算结果差异变小。

图 3.5. f - 采集数据后绘制线条，确定气体膨胀系数的不确定性。



3.6 差压流量方程

增加流量系数和气体膨胀系数后，现在流量方程可准确计算流量应用。调用理论质量流量

$$Q_m = \frac{\pi}{4} C_d Y_1 d^2 \sqrt{\frac{2\Delta P \rho}{1 - \frac{d^4}{D^4}}} \quad (3.24)$$

公式：

代入项：

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{d^4}{D^4}}} \quad (3.25) \quad N = \frac{\pi}{4} \sqrt{2} \quad (3.26)$$

流量方程简化为：

$$Q_m = N C_d E Y_1 d^2 \sqrt{\Delta P \rho} \quad (3.27)$$

N =	单位转换系数
C _d =	流量系数
Y ₁ =	气体膨胀系数
E =	临近流速
d ² =	差压产生器的孔径
ΔP =	差压
ρ =	密度

根据伯努利方程和能量平衡（连续方程），这是一个采用上述流体物理性质的基本流量方程。d²和E是根据一次元件几何结构确定的几何项。C_d和Y₁是利用测试导出方程计算的经验项，用于固定的流量方程参数集，或者在使用微处理器流量计算机时连续计算得出。差压和ρ随着流量、温度和压力等过程条件的变化而变化。

经验项和几何项间的差异

如上所述，d₂和E是依赖于一次元件几何结构变化的几何项。孔板、文丘里管和喷嘴被认为是可变截面一次元件或喉道流量计。均速皮托管采用由滞流压力测量计算得出的流速（有关细节，请参见第3.8节）。

图 3.6. a - 截面流量计的类型，也称作喉道流量计，其中包括调整型孔板和标准孔板、测流嘴和文丘里流量计。

文丘里管

各流量计都存在不同程度的能量损失，所以流量系数值也不同。图 3.6. b 显示了根据管道雷诺数绘制的三种节流一次元件的C_d值。工作范围内的主要流量计校准系数图又称作流量计的“特性曲线”。请注意，图中所示的文丘里管与流量流线的路径接近。因此，能量损失较小，流量系数值接近 1.00。测流嘴的流线跟管壁分离，因此能量损失较大，但孔板的能量损失最大，因为面积突变导致流体形成更多的紊流。

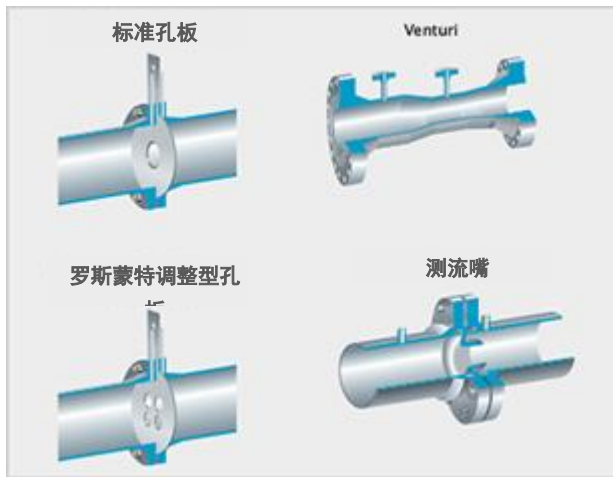
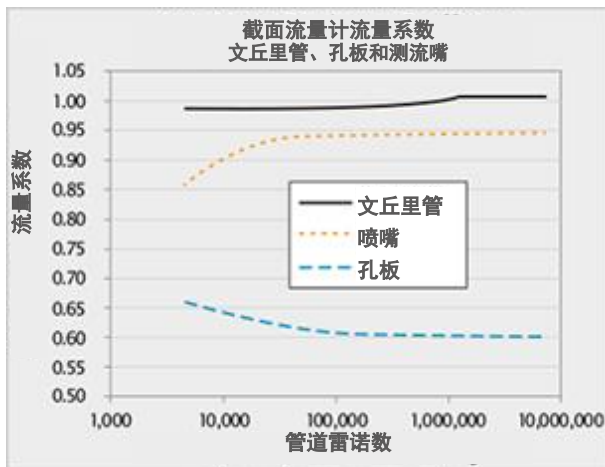


图 3.6. b - 三种差压流量计类型的流量系数曲线。



3.7 截面流量计类型

上述四种类型的一次元件存在多种设计上的变化。这些变化可使差压流量装置应用于可能不符合标准设计的各种流体条件。在各种情况中，标准设计的修改将采用相同的伯努利方程基本形式，但流量系统和膨胀系数已经过修改。这些类型的一次元件包括罗斯蒙特调整型孔板、标准孔板、文丘里管和喷嘴。

图 3.7. a - 标准孔板。

差压流量计有两种主要设计驱动因素：

1. 流量计的几何结构 - 包括管、读取差压信号的开口位置和大小（也称作“取压孔”）以及组成流量计的部件状态。
2. 对应于流量计几何结构的流量系数。

一百多年以前就对图 3.6. a 中所示的孔板或文丘里管等一次元件进行了测试，目前已有多个标准可用于确定流量系数值以及各类流量计的制造和安装设计要求。通过这些工作从大量管尺寸和 beta 值的一系列校准中建立了方程，从而计算流量系数。建立了不同类型的 C_d 预测方程并取得不同程度的成功。由于孔板最简单、成本最低而且最易于改进和保养，所以在上述四种类型的一次元件中，孔板使用最为广泛。各类一次元件的流量系数稍有差别，但用于计算流量的方程是相同的。

正如第 1 章中所讨论，孔板工业中是最常用的流量计类型（图 3.7. a）。孔板孔径



或喉部的直径小于管径，因此会在节流时形成差压。与所有的差压流量计一样，孔板流量计的基本理论就是伯努利方程，而实际流量的计算取决于 C_d 和 Y_1 。

请注意，下一节中所讨论的内容全都适用于直角边缘同心孔板。

ISO、ASME 和 AGA 标准为流量系数计算提供了依据

目前已制定了三个主要标准，它们详细说明了 C_d 和 Y_1 系数以及具体结构、安装要求和不确定因素。分别是国际标准组织的 ISO 5167 第 1-4 部分；美国机械工程师学会的 ASME MFC-3M；和美国天然气协会的天然气与烃气 3 号 AGA 报告。

许多独立的公共和私人检测实验室提供了许多测试数据，有助于建立雷诺数、流量系数和气体膨胀系数之间的关系。

得到更多数据或者完成原始数据的最新分析后，各标准组织通常会对其标准所采用的方程结构进行不断检查。例如，ASME MFC-3M 委员会于 2004 年更新了一个几乎与 ISO 5167 相同的方程结构。

罗斯蒙特调整型孔板

罗斯蒙特调整型孔板的设计为一板四孔（图 3.7. b）。这类孔板的主要目的是为了调节面积内所测量的流量。这种自调节不再需要安装单独的流动调节器，或者某些情况下在流动扰动位置后不需要安装直径 40+ 的直管。

图 3.7. b - 罗斯蒙特调整型孔板，显示出四个孔正交排列在中心周围的特点。

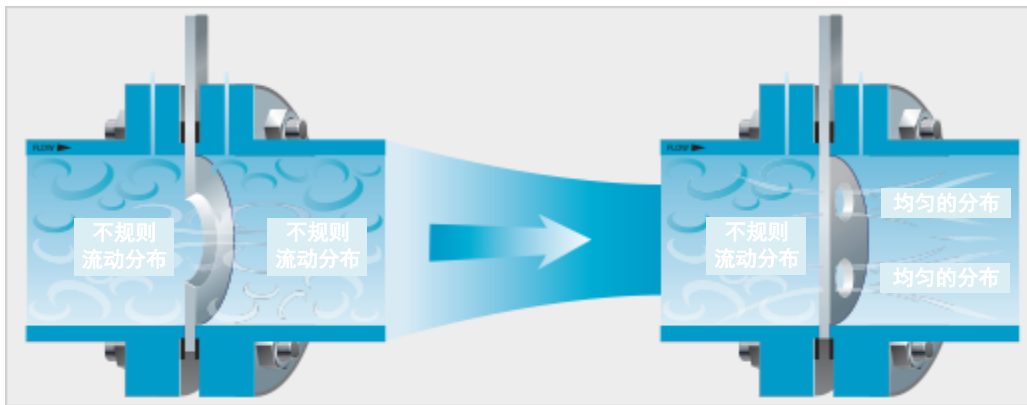
罗斯蒙特调整型孔板 (COP) 技术与标准孔板采用相同的伯努利方程。因此，调整型孔板采用的一般流量系数与雷诺数之间的关系与标准孔板相同，但存在较小数值变化，具体取决于比压。

孔板上的四个孔围绕孔板中心等距排列。调整型孔板保持动能平衡且采用



连续方程时，结果要求能量守恒或流经四个孔的流量必须相同。这种模式强制分配流经孔的流量，即使上游流体流速分布极为不对称或产生环流也可形成稳定的下游动力。由于多数孔板差压信号形成于下游，所以当安装位置极其靠近典型的管道部件或安装在长直管中时，调整型孔板 COP 能提供等效结果。这样在短直管段就不需要使用流动调节器并提供出色的性能。

图 3.7.c - 该示意图显示了罗斯蒙特调整型孔板上的四个孔如何调节不规则流动剖面，以使短直管能够准确测量流量。



罗斯蒙特调整型孔板流量计符合 ISO 5167/ASME MFC 3M 和 3 号 AGA 报告三大主要标准的要求。有关是否符合标准的详细情况，请参见表 3.7.1。

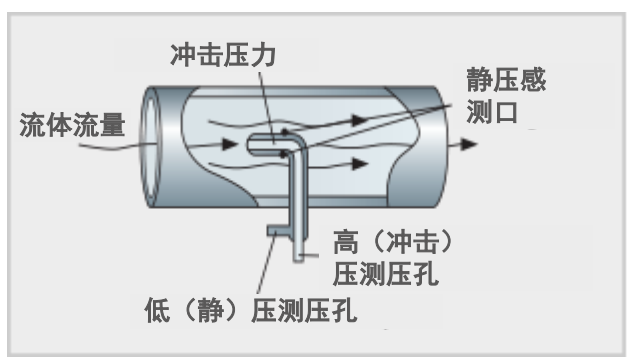
表 3.7.1 - 罗斯蒙特调整型孔板与单孔同心孔板的对比。

类别	1595 和 405C 调整型孔板技术			
直管段的总直径	1595 和 405C	ASME MFC 3M	3 号 AGA 报告	ISO 5167
上游 (管内径)	2	高达 54	高达 95	高达 60
下游 (管内径)	2	高达 5	高达 4.2	高达 7
整流器	不需要。有时三种标准均要求使用整流器缩短所需直管段长度。			
取压孔	符合三种标准			
法兰式接头	符合 ASME 和 ISO。3 号 AGA 报告中不包括角接头			
角接头	发展中			
D 和 D/2	发展中			
0 形板厚度	符合三种标准			
2" 至 4"	符合三种标准			
6"	符合 ASME 和 ISO。比 3 号 AGA 报告要求厚度厚			
8" 至 20"	符合三种标准			
Beta	4 个孔的面积 = 三种标准中标准孔板相同 β 的面积。 ¹			

其他所有孔板尺寸（包括斜角角度、孔厚度（e）等）	符合三种标准
表面光洁度	符合三种标准
流量系数不确定性	符合 ISO 5167。 ²
膨胀系数	符合 ISO 5167。
¹ 规程标准	
² 符合 ISO 5167，有一些偏差 - 根据之前的测试或请求的实验室校准确定偏差	

3.8 均速皮托管

图 3.8. a - 单点皮托管的压力点。



皮托管通过测量滞流压力或流体流速形成的压力计算流速。冲击压力处的压力称为总压力或滞流压力（图 3.8. a）。如果低静压测压孔上的压力被认为是管道静压，则差压被称作该点流体的动态压力。这种形式由亨利·德·皮托发明并于 1784 年首次使用，主要用于皮托管。用于测量流量的典型的现代皮托管就是均速皮托管或 APT。APT 的目的是为了通过测量管直径上的动压并求取平均值来测量管道上的流量。

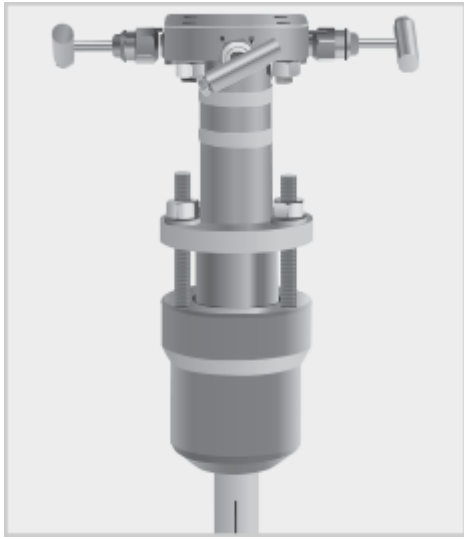
皮托管仅测量点流速。除非已知流速剖面或认为流动充分展开，否则一次流速测量不能代表准确计算流量所需的平均流速。因此，可进行皮托管横移，即取样时在管道半径方向上移动皮托管。可以根据这些取样值计算平均流速。管道中的取样位置有助于获得平均流速。

APT 提供了一种更快获取平均流速的方法。图 3.8. b 显示了罗斯蒙特 485 均速皮托管。喷嘴或孔板等传统截面流量计上 APT 的主要优点：

- 通过管接头可安装 APT，这样所需的焊接作业较少且费用较低
- 可在管路带压情况下“带压开孔”或安装 APT
- APT 的永久压损比典型的截面流量计少很多

图 3.8. b - 罗斯蒙特阿牛巴 485 均速皮托管的设计。与单点皮托管相比，以下是 APT 的主要区别：

1. 安装在管道平面上，皮托管前部布置了槽口或孔，可通过采样确定流速剖面。这相当于“持续的皮托管横移”。



2. 停留（或停滞）在各槽口或孔前部的流体形成压力，反映了流场内该点的流速。另外，皮托管前部的开口必须垂直于流体流速矢量，以获得合适的滞留压力。
3. 如果设计得当，在 APT 前室顶部感测的压力即为取样槽口或孔的平均滞留压力。
4. 后室测量皮托管后部的压力或吸入压力。对于处于紊流状态中的实际流体，流体从皮托管上分离，因此该压力小于管静压。这种情况很有利，因为差压信号高于标准皮托管所获取的信号。但是，如果 APT 设计不得当，在所有工作流量下底面压力都不可预测。

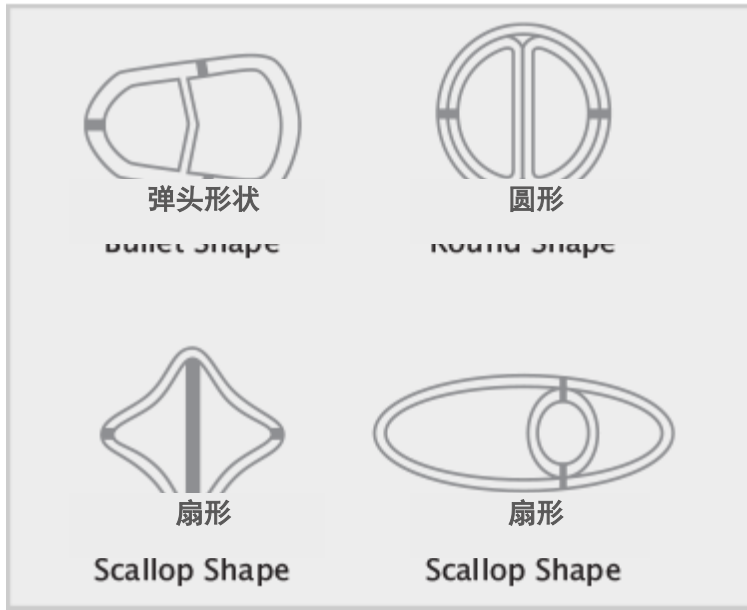
尽管在后室顶部感测的压力即为平均吸入压力，但是多数情况下，由于展向涡旋脱落或流动的流体沿管长与 APT 管表面分离，皮托管后的压力几乎与管直径上的压力相同。

图 3.8. c - 罗斯蒙特阿牛巴传感器的涡流脱离示意图。罗斯蒙特阿牛巴 T 形设计的上游表面平整，从而形成固定分离点，相比于其他 APT 传感器设计，这可在较大流量范围内提高性能并稳定低压测量。



图 3.8. d - 各种不同的均速皮托管传感器形状。由于缺少分离点，所以上述形状会产生较弱的差压信号强度。

均速皮托管的传感器形状设计因制造商不同而具有极大差别。传感器形状可对性能产生很大影响。通常弹头形状、圆形、扇形或椭圆形的传感器形状（图 3.8. d）在特定流量范围内的性能较差，尤其是雷诺数较低时，

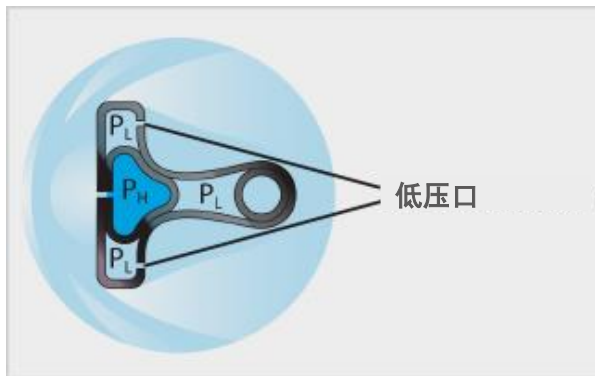


因为在没有固定分离点时差压信号强度较弱。

像罗斯蒙特 485 阿牛巴 T 形设计这样的传感器形状，上游表面平整，可形成固定分离点（图 3.8. c），从而产生较强的差压信号。另外，T 形设计包括可采集更详细流动剖面的前槽（图 3.8. f），从而求取更全面的平均值并获得更高的精确度。固定分离点还会在 T 形后面形成停滞区（图 3.8. c），稳定了低压测量，从而降低了整体信号噪声。

图 3.8. e - 罗斯蒙特阿牛巴 T 形传感器剖面图。罗斯蒙特 485 阿牛巴 T 形传感器后面的孔可平均分配低压测量。

图 3.8. f - 485 阿牛巴 T 形 APT 设计包括求取高压侧测量平均值的前槽



均速皮托管流量方程

假设为横管时调用伯努利方程：

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (3.28)$$

皮托管式差压流量计感测口处的流速停滞，这表示流速 V_2^2 实际上为零。

$$P_1 - P_2 = \Delta P = \frac{1}{2} \rho V_1^2 \quad (3.29)$$

求解流速值：

$$V_1 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3.30)$$

将流速乘以管的横截面面积得出体积流量的理论公式：

$$Q_v = A_1 V_1 = \frac{\pi}{4} D^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3.31)$$

乘以流动密度，获得质量流量的理论公式：

$$Q_m = \rho Q_v = \rho A_1 V_1 = \rho \frac{\pi}{4} D^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3.32)$$

变成：

$$Q_m = \frac{\pi}{4} D^2 \sqrt{2\Delta P \rho} \quad (3.33)$$

理论公式以下列假设为基础：

- 无粘滞效应
- 无热传递
- 不可压缩流体

校正下列假设条件下的均速皮托管流量系数(K)：

- 可忽略的粘滞效应
- 可忽略的热传递
- 理想位置的测压孔

校正不可压缩流体假设的气体膨胀系数。

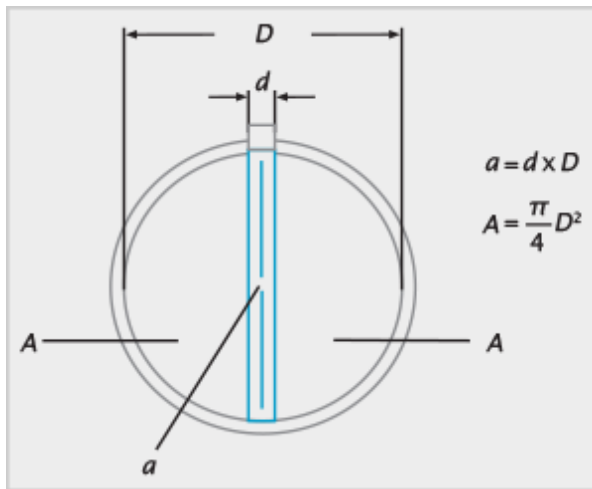
因此，均速皮托管的完整流量方程为：

$$Q_m = NKY_1 D^2 \sqrt{\Delta P \rho} \quad (3.34)$$

N =	单位转换系数
K =	APT 流量系数
Y ₁ =	APT 气体膨胀系数
D =	管内径
ΔP =	差压
ρ =	密度

均速皮托管的流量 K 系数

图 3.8. g - 安装 APT 时的管截面，显示了阻塞方程的各项



K 系数可通过大量的实验室测试确定，类似于孔板的流量系数。建立经验方程以根据测试数据计算 K 系数。若要计算均速皮托管的 K 系数，需调用阻塞函数。阻塞系数是皮托管与管道的面积比。

$$B = \frac{a}{A} \quad (3.35)$$

替代图 3.8. g 中显示的项 (B 为阻塞系数，没有单位)

$$B = \frac{4d}{\pi D} \quad (3.36)$$

已知阻塞系数后可计算出 K 系数。

阻塞系数 $B \leq 0.25$ 时，使用以下 K 系数方程以及表 3.8.1 中的 C_1 和 C_2 值：

$$K = \frac{1 - C_2 B}{\sqrt{1 - C_1 (1 - C_2 B)^2}} \quad (3.37)$$

阻塞系数 $B > 0.25$ 时，使用以下方程 3.38 和表 3.8.1：

$$K = \frac{1 - C_2 B}{\sqrt{1 - C_1 (1 - C_2 B)^2}} (1 - C_3 (B - 0.25^2)) \quad (3.38)$$

表 3.8.1 - 确定罗斯蒙特 485 阿牛巴一次元件流量系数的常数。

传感器尺寸	探针宽度	C_1	C_2	C_3
1	0.59 in	-1.515	1.4229	5.3955
2	1.06 in	-1.492	1.4179	—
3	1.935 in	-1.5856	1.3318	—

均速皮托管的气体膨胀系数

计算的均速皮托管气体膨胀系数与孔板等截面流量计稍有不同。它取决于阻塞情况、差压、管道静压和比热比。根据实验室测试确定该系数。

气体膨胀系数方程如下所示 - 注意，该形式要求压力和差压的单位相同，所以 Y_a 没有单位。

$$Y_a = 1 - (Y_1 (1 - B)^2 - Y_2) \frac{\Delta P}{P_f \gamma} \quad (3.39)$$

Y_a = APT 气体膨胀系数

Y_1 = 绝热气体膨胀系数

Y_2 = 压力比系数

B = 阻塞系数

ΔP = 差压

P_f = 管路静压

γ = 比热比

γ = Ratio of Specific Heats

(3.39)

3.9 注意事项

计算软件

流量计算机通常利用差压流量装置或其他测量点的变量计算流量。配置流量计算机，以便根据流体性质和安装细节计算流量，例如管路尺寸以及各压力和温度测量或多参量变送器（如罗斯蒙特 4088）的过程变量。

另一个选择是使用能够计算流量的多参量变送器，即罗斯蒙特 3051SMV。Rosemount **Engineering Assistant** 是一款 PC 软件程序，用于配置罗斯蒙特 MultiVariable™ 装置的质量流量输出。除了能够配置和校准装置外，Engineering Assistant 还能配置变送器内部的质量流量方程。本软件使补偿流量方程的创建比控制系统内流量方程的手动创建更简单。这是因为流量方程的配置全在 Engineering Assistant 内完成，而流量计算则由变送器执行。用户只需输入基本的流量计和过程信息，以配置变送器的完全补偿质量或能量流。

Engineering Assistant 可用作“独立”窗口程序，或者 AMS 的 SNAP-ON。SNAP-ON 版本在 AMS 内运行，而独立版本可以在未安装 AMS 的情况下运行。

差压流量装置中的常见错误就是执行两次平方根计算或者求取变送器和控制系统流量方程中的差压平方根。无论是控制系统还是变送器，只可求取一次平方根。

标准销售条款见以下网址：www.rosemount.com/terms_of_sale.
艾默生标识是艾默生电气公司的商标和服务标志。
罗斯蒙特和罗斯蒙特标识是罗斯蒙特公司的注册商标。
其他所有标志归其各自所有者所有。

© 2015 罗斯蒙特公司保留所有权利。

www.rosemount.com.cn

文献参考号：00805-0106-1041 Rev AA，2015 年 3 月

ROSEMOUNT™

