

国家计量技术法规统一宣贯教材

膜式燃气表

审定 国家质量监督检验检疫总局计量司
主编 杨有涛

JJG577-2005

JJG577-2005

JJG577-2005

JJG577-2005

JJG577-2005



中国计量出版社
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

国家计量技术法规统一宣贯教材

膜式燃气表

国家质量监督检验检疫总局计量司 审定

杨有涛 主编

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

膜式燃气表/杨有涛主编. —北京: 中国计量出版社, 2006. 7

国家计量技术法规统一宣贯教材

ISBN 7-5026-2487-2

I. 膜… II. 杨… III. 煤气表—教材 IV. TH814

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 081215 号

内 容 提 要

本书是国家计量检定规程 JJG 577—2005《膜式燃气表》的宣贯教材, 由国家质量监督检验检疫总局计量司审定。本书较全面系统地介绍了膜式燃气表的结构、工作原理和计量检定方法、型式评价试验; 相关的气体流量仪表、气体流量标准装置和测量不确定度评定等内容。

本教材可供 JJG 577—2005《膜式燃气表》规程的宣贯、培训使用; 也可作为相关的计量检定部门、膜式燃气表生产企业、使用及科研单位从事气体流量计量检定、仪表维修及有关操作人员的参考书。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm × 1092 mm 16 开本 印张 9.5 字数 222 千字

2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷

*

印数 1—3 000 定价: 28.00 元

序 言

膜式燃气表是气体流量计中专门用于测量燃气体积流量的一种容积式流量计。其用途是定量计量燃气消耗量,保证供气方和用户方的公平贸易、合理结算。作为量大面广、重要的通用计量器具,膜式燃气表具有计量准确度较高、量程范围很宽、性能价格比高等优点。

正确检定燃气表,保证流量量值的准确和统一,不仅对于节约能源、提高经济效益具有重要作用,而且与人民生活密切相关。如果燃气表失准,会直接影响到国家和消费者利益,同时还会影响到人民的生命、财产安全。为此,燃气表被列入中华人民共和国强制检定的工作计量器具管理范围。

《膜式燃气表》新规程修订依据了国际法制计量组织 OIML 国际建议《COMMITTEE DRAFT OIML Gas meters—Part 1 Requirements》(气体流量计 第一部分 基本要求) 2005 年草案和 OIML 国际建议 R31—1995《Diaphragm gas meters》(膜式燃气表),在主要的技术指标上与国际建议基本等效。

《膜式燃气表》新规程的宣贯,对于膜式燃气表的正确检定、合理使用具有特别重要的指导意义。本书是配合宣贯新规程 JJG 577—2005《膜式燃气表》的培训教材。

本书较全面系统地介绍了与流量测量相关的基础知识,膜式燃气表的结构、工作原理和计量检定方法、检定注意事项、型式评价试验,以及相关的气体流量仪表、气体流量标准装置介绍及测量不确定度分析等丰富的内容。

本书对于相关的技术人员,也是一部有价值的参考书。

国家质量监督检验检疫总局计量司司长
宣 湘

2006 年 6 月

前 言

膜式燃气表是量大面广的通用计量器具,具有计量准确度较高、量程范围很宽、性能价格比高等优点。随着天然气资源勘探开发的不断深入,以及天然气在现代工业和日常生活中应用的日益普及,正确准确地计量直接关系到供需双方的经济利益。为了满足国家计量检定规程 JJG 577—2005《膜式燃气表》宣贯的需求,帮助大家更好地理解 JJG 577—2005 内容,使用 JJG 577—2005 进行正确的计量检定,保证流量量值的准确和统一,我们编写了这本《膜式燃气表》教材。

全书共分五章。第一章介绍了气体流量计的分类、流量基本知识,由北京市计量检测科学研究院王子钢、杨有涛编写;第二章重点阐述了膜式燃气表工作原理、分类和构造设计、选材,上海克罗姆表业有限责任公司的季艳参加了编写;第三章介绍了 IC 卡膜式燃气表的性能及特点,由杨有涛编写;第四章结合计量检定规程 JJG 577—2005《膜式燃气表》介绍了膜式燃气表的技术要求、检定方法及注意事项,由中国计量科学研究院的徐英华、杨有涛编写;第五章介绍了膜式燃气表的型式评价试验、型式批准和 OIML 证书制度,其中的第一节由北京市质量技术监督局姚嫄高级工程师编写,第二节由杨有涛编写,第三节由 OIML 中国秘书处郑华欣编写。

在本书编写过程中,得到了丹东热工仪表有限公司的孙晓东、北京优耐燃气仪表有限公司的夏辉、重庆前卫克罗姆表业有限责任公司的欧阳海黎等人和他们单位的相关部门的大力支持和帮助,并提出了宝贵的修改意见,保证了本书的质量和水平。北京市计量检测科学研究院流量室的黄汝敬、唐蕾参与了校稿工作,在此表示衷心的感谢。

国家质检总局计量司量传处陈红副处长从本书稿的整体构架、宣贯教材的特点要求、法制计量要求及文字等方面进行了审查,并提出了宝贵的修改建议;中国计量科学研究院倪育才老师在测量不确定度评定方面提出了指导性意见;中国计量科学研究院徐英华高级工程师、浙江省质量技术监督检测研究院的沈文新高级工程师对本书给予了支持和关心,在此一并表示感谢。

由于编写时间仓促,编者水平有限,因此书中难免有不完善与遗漏之处,恳请读者批评指正。

本书可作 JJG 577—2005《膜式燃气表》计量检定规程的宣贯、培训教材;可作为相关的计量检定部门、膜式燃气表生产企业参考使用;也可作为科研单位从事气体流量计量检测、仪表维修及燃气流量计量有关检定操作人员的培训教材。

编 者

2006 年 6 月于北京

电话: 010 - 64922642

E-mail: yangyoutao@sina.com

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 流量计的分类	(1)
第二节 流量基本知识	(3)
第三节 常用流量计简介	(12)
第二章 膜式燃气表的结构和原理	(27)
第一节 膜式燃气表工作原理	(27)
第二节 膜式燃气表的联动机构	(33)
第三节 膜式燃气表的分类和构造	(39)
第四节 膜式燃气表的设计、选材	(46)
第五节 膜式燃气表的制造工艺	(48)
第三章 智能 IC 卡膜式燃气表	(53)
第一节 IC 卡膜式燃气表的性能及特点	(53)
第二节 IC 卡燃气表的工作原理及其主要部件	(56)
第四章 膜式燃气表的检定	(63)
第一节 新检定规程编写说明	(63)
第二节 膜式燃气表的技术要求及检定方法	(66)
第三节 膜式燃气表检定装置	(72)
第四节 膜式燃气表检定项目及检定方法	(89)
第五节 膜式燃气表示值误差测量不确定度的评定	(96)
第六节 检定注意事项	(102)
第五章 膜式燃气表的计量管理	(111)
第一节 计量器具的型式评价和型式批准	(111)
第二节 膜式燃气表的型式评价	(117)
第三节 OIML 证书制度介绍	(126)
附录	(132)
附录 1 燃气表的适用介质	(132)
附录 2 强制检定的工作计量器具实施检定的有关规定(试行)	(132)
附录 3 城市燃气	(133)
参考文献	(143)

第一章

概述

天然气、煤气和液化石油气是比较理想的气体燃料，因而被广泛应用于科研、工业、商业和人民生活等各个领域。燃气表是气体流量计中一种专门用于测量燃气体积流量或质量流量的仪表。因此，燃气表也同样广泛应用于各个领域。

正确使用燃气仪表，保证仪表流量量值的准确和统一，不仅对于节约能源，提高经济效益有重要作用，而且与人民生活密切相关。燃气表的失准，直接影响到国家和消费者利益；同时还会影响到人民的生命、财产的安全。燃气表属于《中华人民共和国强制检定的工作计量器具目录》内的计量器具，而且是被列入国家强制检定的与广大群众息息相关的六类重点管理工作计量器具之一项。

燃气表是流量计的一个组成部分。它的用途是定量计量燃气消耗量，保证供气方和用户的公平合理的贸易结算。

第一节 流量计的分类

所有的测量流体流量的仪表统称为流量计或流量表。单位时间内，流体流过管道或设施某处横截面的质量或体积量称为流量。气体流量仪表一般是以气体体积来反映气体流量的。

气体计量，特别是价格昂贵的燃气的准确计量，是用于贸易结算、管网输配管理及用气设备的监控场合，节能降耗、降低运营成本、消除结算双方矛盾等必需的手段。计量气体的主要流量仪表从工作原理上分类主要有：

- a. 差压式流量计；
- b. 容积式流量计；
- c. 速度式流量计；
- d. 质量流量计。

传统的容积式流量计量仪表有膜式燃气表、腰轮流量计等。速度式流量计量仪表有涡轮流量计、涡街流量计、旋进旋涡流量计及近年来快速发展的超声波流量计。随着大管道流量计的发展，超声流量计、电磁流量计以其无可动部件、无压损的特点得到越来越多的应用。涡轮流量计较多用做标准流量计及装置比对。而差压式流量计、涡街流量计则更多用于蒸汽流量的计量。

以节流装置为检测件的差压式流量计，是历史悠久、理论与实践资料丰富、使用成熟的一类流量计，由于其具有结构简单、安装方便、工作可靠、成本低廉且具有一定准确度的特

点，它在大、中口径管道的流量计量中得到广泛的应用。

质量流量计则由于可以直接得到质量流量，较多用于生产过程参数计量、检测和控制的情况。

转子流量计以其结构简单、无直管段要求、压力损失恒定等特点，较多用于较小流量的瞬时流量测量。

在各大类流量计中，又分有很多小类，应该说每种流量计都在某一限定的条件和场合适用，具有其优越性。

流量计的种类很多，分类方法也不少。按其结构工作原理不同可分为以下几种：

1. 容积式流量计

容积式流量计属于定排量类流量计，在流量仪表中是准确度较高的一类。在容积式流量计内部具有构成一定标准体积的空间，通常称其为容积式流量计的“计量空间”或“计量室”。这个空间由仪表壳的内壁和流量计转动部件一起构成。当流体通过流量计时，流体不断充满具有一定容积的计量室，由于在流量计进出口之间存在一定的压力差，流量计的转动部件在这个压力差作用下将产生旋转，并将流体由流量计的入口排向出口。在这个过程中，流体一次次地充满流量计的“计量空间”，然后又不断地被送往出口。在给定流量条件下，该计量空间的体积是确定的，并推动活塞（或转鼓、齿轮、膜片等）往复摆动（或转动）。只要测得转动部件的转动次数，再由计数器累计流体充满计量室的次数就可以得到通过流量计的流体体积的总流量累积值。

这种流量计以被测流体压差作为动力。

该类流量计一般用来测量低压气体、液体流量。

膜式燃气表、旋转活塞流量计、齿轮表、腰轮流量计、湿式流量计等属于容积式流量计。

容积式流量计由于具有对上游流动状态不敏感（不需要安装前后直管段）、计量准确度较高、性价比高等优点，多用于燃气、油料等贸易结算。

2. 速度式流量计

这类流量计利用被测流体流过管道时的速度，冲动流量计叶轮或涡轮，使它们转动。流体速度快，单位时间内叶轮或涡轮转数就多；速度慢，叶轮或涡轮转数就少。叶轮或涡轮的转数与流量有较稳定的函数关系。测得叶轮或涡轮单位时间转数就可获知流体流量。水表、叶轮和涡轮流量计属该类流量计。

3. 差压式流量计

流量计是在流体流动的管道中装有一特制装置（如孔板、喉管等）。流体流过时，该装置前后两部分产生差压，差压大小与流量有一定函数关系。即差压大，流量大；差压小，流量小。测量出差压即可计算出流量。

差压流量计分为：定差压式和节流式（或变差压式）两类。转子流量计属于定差压式流量计；节流装置与差压变送器组成的流量计属于节流式流量计。

4. 质量流量计

质量流量计是用于计量流过管道流体的质量流量，质量流量计主要有：

1) 科里奥利式质量流量计

利用流体在振管内产生的科氏力，采用直接测量科氏力方法而得到流体质量流量。

2) 量热式质量流量计

在流体管壁外设置热源, 利用流动气体传递热量质量的关系, 在其上下游产生温度变化而得到气体的质量流量。

3) 冲量式质量流量计

利用物料流体在一定的高度下落的冲量产生的力, 采用直接测力方法而得到流体质量流量。

质量流量计可以直接得到质量流量, 较多地用于生产过程参数计量、检测和过程控制。

除上述四种外, 还有利用超声波、激光、同位素作媒介的流量计。

各类流量计各有其优缺点。速度式流量计结构简单, 体积小, 成本低, 但是小流量时准确度低, 甚至叶轮 (或涡轮) 不转动, 容易造成“死表”。节流式流量计较适合于高压流体的测量, 通用性强, 易于大批量生产, 但是对于小管径、小流量的流体使用困难, 准确度较低。容积式流量计准确度高, 但体积大, 装配测试的技术要求较高, 对测试环境的条件要求严格, 成本较高。

综上所述, 一般在输配网络的初端使用节流式流量计, 中部使用速度式流量计, 终端使用容积式流量计。所以一般家用燃气表选择使用物美价廉的膜式燃气表, 膜式燃气表属于容积式流量计。

第二节 流量基本知识

一、连续性方程

在流量测量与仪表的设计计算中连续性方程和伯努利方程是用得最广泛的两个基本方程, 它对管道中流体流动变化规律给出了清晰的概念。

连续性方程是质量守恒定律应用于运动流体的数学表达式。对于可压缩流体非定常流动, 认为流体是由无数流体微团连续分布而组成的连续介质, 也就是认为表征流体属性的密度、速度、压力的流体物理量也是连续分布的。对于定常流, 根据质量守恒关系, 在同一管道内, 截面1 (面积为 A_1) 的质量流量 q_{m1} 和截面2 (面积为 A_2) 的质量流量 q_{m2} 应有如下关系:

$$q_{m1} = q_{m2}$$

因为在控制体中流体要遵守质量守恒定律, 要保持流体呈连续状态, 则控制体中流体的质量增加量必须是同一时间内流入与流出的质量差。如果控制体中流体质量不变, 则同一时间内流入与流出的质量永远相等。

dt 时间内由 dA_1 流入的流体质量为 $\rho_1 v_1 dA_1$, 由 dA_2 流入的流体质量为 $\rho_2 v_2 dA_2$ 。因此, 在 dt 时间里实际流入此微小流束的流体质量为

$$dM = \rho_1 v_1 dA_1 - \rho_2 v_2 dA_2 \quad (1-1)$$

根据质量守恒定律可得

$$dM = 0 \quad (1-2)$$

由此导出封闭管道的连续性方程如下:

可压缩定常流动:

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 = q_m \quad (1-3)$$

不可压缩定常流动 ($\rho_1 = \rho_2$):

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = q_v \quad (1-4)$$

式中: ρ ——流体密度, kg/m^3 ;

v ——流体在管道的平均流速, m/s ;

A ——管道横截面积, m^2 ;

q_m ——质量流量, kg/s ;

q_v ——体积流量, m^3/s 。

由计算式可见, 在管道各断面质量流量应保持恒定。断面面积缩小时, 其平均流速一定会相应地增大。

二、伯努利方程

伯努利方程是能量守恒定律应用于流体力学的一种数学表达式, 在工程流体力学基本理论中占有重要位置, 它形式简单、意义明确。在流体运动时, 不同性质的机械能可以相互转换, 且总的机械能守恒 (理想流体没有能量损失)。因此流管中两截面间有如下关系成立 (流体密度不变的前提下):

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\bar{v}_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\bar{v}_2^2}{2g} + h_w \quad (1-5)$$

式中各项物理意义:

z_1 ——单位重量流体在过流断面上的位能 (位置势能); 简称位置水头;

$\frac{p_1}{\rho g}$ ——单位重量流体在过流断面上的压能 (压强势能); 简称压强水头;

$\frac{\bar{v}_1^2}{2g}$ ——单位重量流体在过流断面上的动能; 简称速度水头; $\left(\frac{v^2}{2g} = \frac{1}{2} \frac{mv^2}{mg} \right)$

h_w ——平均单位重量流体从断面 1 流到断面 2 的能量损失。对理想流体, h_w 为零。

这就是实际流体在定常流动、重力场不变、流体不可压缩 (密度不变)的条件下, 在流线上任意两点之间成立的著名的伯努利方程。

对于不可压缩流体定常流动, 在忽略摩擦阻力及热交换情况下, 等熵 (可逆绝热, 或者无粘性绝热过程), 伯努利方程另外一种数学表达式:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{常数} \quad (1-6)$$

式中: p ——静压, Pa ;

ρ ——流体密度, kg/m^3 ;

v ——流体在管道的平均流速, m/s 。

三、管道雷诺数和流态

雷诺数是表征流体惯性力与粘性力之比的无量纲量，即

$$Re_d = \frac{vD}{\nu} = \frac{\rho v D}{\eta} \quad (1-7)$$

式中： Re_d ——管道雷诺数；

v ——流体的特征流速，如在管流中取过流断面上的平均流速，m/s；

ρ ——流体密度，kg/m³；

D ——特征长度，如在圆管中取管内径值，m；

ν ——流体运动粘度，m²/s；

η ——流体动力粘度，Pa·s。

由雷诺数的大小可以判别流动状态，一般管道雷诺数 $Re_d < 2300$ 为层流状态； $Re_d = 2000 \sim 4000$ 为过渡状态； $Re_d > 4000$ 为紊流状态。不同流动状态，管道内流速分布及流体运动方程有不同的形式。

四、气体基本定律和气体状态方程

为便于对气体的流量计量误差的分析与计算，须了解和掌握气体的一般特性，特别是空气的体积与温度、压力的相互关系等。假如气体处于理想条件下，完全由弹性分子组成，处于自由运动中。气体分子本身的体积很小，分子间的空隙很大。因此，气体体积增大或减小是气体分子间的空隙增大或减小，而不是分子本身体积的变化。

1. 波义耳·马略特定律

一定质量的气体在温度不变时，气体的压强与它体积的变化成反比，这称作波义耳·马略特定律，即

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (1-8)$$

式中： p_1 ——变化前气体体积 V_1 时的压强；

p_2 ——变化后气体体积 V_2 时的压强。

从上式中可以看出，当温度不变时，气体的压强与它的体积的乘积也不变。由于气体体积的变化是气体分子间的间隙大小变化，而非气体分子数量的变化，那么温度不变时，气体的密度与它的压强是成正比的函数关系。即

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{p_1}{p_2} \quad (1-9)$$

式中： ρ_1 ——变化前气体压强 p_1 的气体密度；

ρ_2 ——变化后气体压强 p_2 的气体密度。

2. 盖·吕萨克定律

一定质量的气体，当压强不变时，气体体积变化与温度的函数关系是

$$V_t = V_T [1 + \alpha(t - T)] \quad (1-10)$$

式中: V_t ——气体温度为 t 时的体积;

V_T ——气体温度为参考 (或标准) 温度 T 时的体积;

α ——理想气体的膨胀系数, $\alpha = 1/273.15$ 。

这就是说气体的压强不变, 温度每升高 1°C , 气体体积的增加值等于它在 0°C 时的 $1/273.15$ 。这称作盖·吕萨克定律。

3. 查理定律

由于气体是可压缩的, 在一定的温度、压力范围内, 当气体的体积一定时, 温度每升高 1°C , 气体的压强增加值等于它在 0°C 时的 $1/273.15$ 。这称作查理定律。

$$p_t = p_T [1 + \alpha(t - T)] \quad (1-11)$$

式中: p_t ——气体温度为 t 度时的压力, Pa;

p_T ——气体温度为参考温度 (0°C 或标准温度) T 时的压力, Pa。

4. 阿伏加德罗定律

在同温同压下, 同体积的任何气体内所含的分子数相等, 即体积比等于分子数之比。这就是阿伏加德罗定律, 即

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1-12)$$

式中: V_1 、 V_2 ——分别为任何两个气体的体积;

n_1 、 n_2 ——分别为该两个气体体积内的分子数。

5. 理想气体的状态方程

一定质量气体的体积与压力的乘积和它的热力学温度成正比, 此关系用公式表示称为理想气体状态方程。根据波义耳·马略特定律、查理定律和盖·吕萨克定律, 一定质量气体的体积与压力的乘积和它的热力学温度成正比, 此关系用公式表示称为理想气体状态方程:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = mR \quad (1-13)$$

$$p = \rho RT \quad (1-14)$$

式中: p ——气体压力;

V ——气体体积;

T ——气体热力学温度;

ρ ——气体密度;

m ——气体质量;

R ——气体常数。

一切实际气体都不能准确满足理想气体状态方程式。实际气体状态方程式是

$$z = \frac{pV}{RT} \quad (1-15)$$

式中: z ——气体压缩系数。

6. 气体的压缩系数

气体的温度一定时, 压力增大, 体积缩小, 这是气体的可压缩性。用压缩系数来表征气

体的可压缩性, 是实际气体偏离理想气体定律的一个校正系数。对于一些较易液化的气体, 如 CO_2 、 SO_2 、 NH_3 等在一般温度与压力下与理想气体状态方程的偏差较明显, 另外一些气体在高压、低温及接近液态时应用理想气体状态方程会带来较大的偏差。把所有偏差都归为一个系数, 因此, 气体压缩系数的数学表达式是非常复杂的, 它是压力、温度与流体组分的函数。

五、气体等熵指数和绝热指数

当气体流过差压式流量计的节流装置时, 气体的热力过程假设为等熵过程, 由于过程路径很短, 没有热损失。假设理想的等熵膨胀符合实际, 压力与体积的关系式为

$$pV^\kappa = \text{常数} \quad (1-16)$$

式中: p ——气体压力, Pa;

V ——气体体积, m^3 ;

κ ——等熵指数。

当被测气体服从理想气体定律时, 等熵指数等于绝热指数 (即比热容比), 即比定压热容 c_p 与比定容热容 c_v 的比值。

等熵指数与流体种类、压力及温度等有关, 为了计算流量方便, 可以近似地用绝热指数代替等熵指数。

六、绝热和等熵气流的伯努利方程式

气体的质量力较小, 在气体的流动过程中, 位能一般可忽略不计。绝热气体一般分为两种: 可逆的 (称为等熵气流, 实际达不到的理想过程) 和不可逆的绝热气体, 实际气体的流动过程即使绝热, 也永远是不可逆的。

无论可逆、不可逆, 只要绝热, 则有绝热方程成立:

$$\frac{p}{\rho^\gamma} = C \quad (1-17)$$

式中: γ ——绝热指数;

C ——常数。

不可逆绝热气流的伯努利方程为

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + \int f ds = C \quad (1-18)$$

式中 $\int f ds$ 代表作用在单位质量流体上的粘度分力的合力, 沿流线的积分。其物理意义为单位流体沿流线的运动克服粘性力所做的功, 或所损失的能量。

等熵 (可逆绝热) 气流的伯努利方程为

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = C \quad (1-19)$$

由热力学理想气体状态方程 $p = \rho RT$ 得

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} = \frac{\gamma}{\gamma-1} RT \quad (1-20)$$

由声速方程 $c = \sqrt{\gamma RT}$ 得

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} RT = \frac{c^2}{\gamma-1} \quad (1-21)$$

再引用工程热力学的四个基本关系式：

- 1) $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ 为绝热指数，等于比定压热容（定压比热）与比定容热容（定容比热，在体积不变的条件下，单位质量流体温度升高 1 °C 时所吸收的热量）之比。
 - 2) $R = c_p - c_v$ ，气体常数
 - 3) $h = c_p T$ ，单位质量的焓等于比定压热容乘以热力学温度
 - 4) $e = c_v T$ ，单位质量的内能等于比定容热容乘以热力学温度
- 可以得到：

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} RT = \frac{\frac{c_p}{c_v} RT}{\frac{c_p - c_v}{c_v}} = c_p T = h \quad (1-22)$$

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} = \frac{\gamma-1+1}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} = \left(1 + \frac{1}{\gamma-1}\right) \frac{p}{\rho} = \frac{p}{\rho} + \frac{1}{\gamma-1} RT = \frac{p}{\rho} + \frac{1}{\frac{c_p - c_v}{c_v}} RT = \frac{p}{\rho} + c_v T = \frac{p}{\rho} + e \quad (1-23)$$

综上所述，可以将等熵（可逆绝热）气流的基本方程写成以下六个方程式（大括号表示并列关系，可从中任取一项）：

$$\frac{v^2}{2} + \left\{ \begin{array}{l} \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} \\ \frac{\gamma}{\gamma-1} RT \\ \frac{c^2}{\gamma-1} \\ c_p T \\ h \\ \frac{p}{\rho} + e \end{array} \right\} = C \quad (1-24)$$

从最末一式看出物理意义：

$\frac{v^2}{2}$ 、 $\frac{p}{\rho}$ 、 e 分别代表单位质量气体所具有的动能、压能和内能。所以基本方程的物理意

义是沿流线或者管线上单位质量流体的总能量守恒，也称为能量方程。使用该方程时不必要区分理想或者实际流体，但是注意绝热是能量方程的唯一限制条件。

七、气体动力学有关概念

1. 声速

声速是微弱扰动波在介质中的传播速度。气体动力学中的声速概念不仅限于人耳收听范围，只要是介质中的扰动传播速度都称为声速。

$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}$ 是声速方程的微分形式。物理意义： $\frac{d\rho}{dp}$ 代表密度随压强的变化率，可压缩性越大， $\frac{d\rho}{dp}$ 就越大，其倒数则越小， $c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}$ 也就越小。明显地，水中的声速必然大于空气中的声速。

由绝热方程 $\frac{p}{\rho^\gamma} = pV^\gamma = C$ ，热力学理想气体状态方程 $pV = \frac{p}{\rho} = RT$ 可得

$$\frac{dp}{d\rho} = \gamma RT$$

由以上方程可得到声速方程的三种形式：

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\gamma RT} \quad (1-25)$$

声速称当地声速，直接与气体温度相关，代表气体状态的一个参数，不同地点不同温度的气体温度不同，声速是不同的。海拔 0 m，空气温度为 25 ℃ 时声速为 346 m/s；海拔 30 m，空气温度为 -40 ℃ 时声速为 306 m/s。声速是一个坐标和时间的函数，而非简单的“声音传播的速度”。

2. 马赫数

流动运动速度 v 与介质中声速 c 之比，称为马赫数。

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (1-26)$$

声速不是恒定不变的，它与当地温度、压强和密度等状态参数有关，具有当地性，马赫数也是如此。根据马赫数大小可以将气体的流动分为：

$Ma < 1$ ，亚声速流动；

$Ma = 1$ ，声速流动；

$Ma > 1$ ，超声速流动。

八、流体力学理论中两个重要方程在流量计量中的推导

流体力学理论参考资料较多，但是理论具体应用到流量计量上的介绍不多见。现举例说明流体力学理论中两个重要方程（伯努利方程和连续性方程）在流量计量上的经典应用及部分公式推导。

伯努利方程是流体流动的能量方程，应用非常方便，它说明压力能与动能之间存在互相

转换的规律。当压力下降时，流速必定会增加。这就是差压式流量计工作原理的理论基础。皮托管的公式可以直接套用伯努利方程导出。

1. 皮托管

皮托 (PITOT) 管是将流体动能转化为压能、从而通过测压计测定流体运动速度的仪器。十八世纪法国工程师皮托 (PITOT) 首先用来测量水的流速和船的航行速度，这也是皮托 (PITOT) 管名称的由来。

图中所示用弯成直角形状的细管做成最简单的皮托 (PITOT) 管。它的开口端正对着明渠水流的流动方向，水流冲击使皮托管中水柱上升。水流速不变时，水柱上升 $(H + h)$ 后也不变，皮托管中水柱呈现平衡状态。

对皮托管如口前 A (速度为 v ，压强 $p_A = \rho g H$)、口后 B [速度为 0，压强 $p_B = \rho g (H + h)$] 两点列伯努利方程，得到

$$\frac{p_A}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \frac{p_B}{\rho g} \quad (1-27)$$

得到

$$v = \sqrt{\frac{2(p_B - p_A)}{\rho}} \quad (1-28)$$

皮托管可以清楚说明伯努利方程的几何意义。流速和压差是方根的关系，流线不同点上的位置水头、压强水头、速度水头都是变的，但是对理想流体来说，三者之和是不变的。

注：由上式可以明显看出，流速和压差是方根的关系。

用水流量说明比较形象，气体介质也是同样的道理。

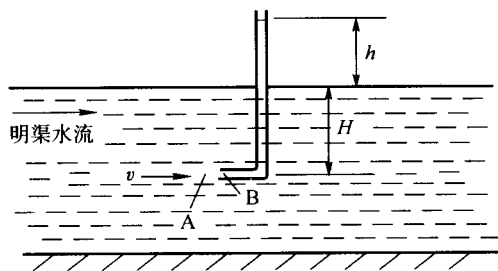


图 1-1 直角形状的细管做成最简单的皮托管

2. 差压式流量计

常见的孔板流量计、喷嘴流量计、文丘里 (Venturi) 临界流流量计、匀速管流量计、弯管流量计、靶式流量计、转子流量计等直接运用伯努利方程和连续性方程推导得出流量方程。

以节流件流量计为例， A_1 为入口处截面积， A_2 为喉部截面积。对 A_1 和 A_2 断面列等熵 (可逆绝热) 气流的基本方程：

$$\frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{\bar{v}_1^2}{2} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{\bar{v}_2^2}{2} \quad (1-29)$$

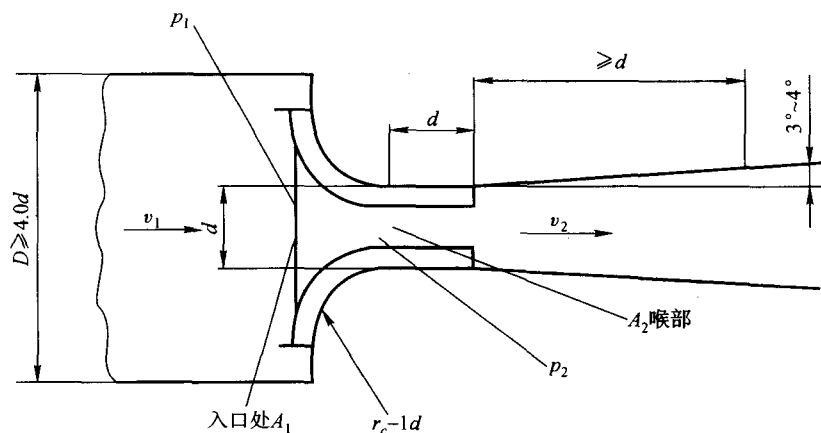


图 1-2 节流件流量计

得到:

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left(\frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2} \right) \quad (1-30)$$

在理想条件下, 有绝热方程:

$$\frac{p_1}{\rho_1^\gamma} = \frac{p_2}{\rho_2^\gamma} = \frac{p}{\rho^\gamma} \quad (1-31)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} = \lambda^{\frac{1}{\gamma}} \quad (1-32)$$

设 $\frac{p_2}{p_1} = \lambda$ 为压力比, 由连续性方程 $v_1 A_1 \rho_1 = v_2 A_2 \rho_2$, 有:

$$v_1 = v_2 \frac{A_2}{A_1} \frac{\rho_2}{\rho_1} = \beta^2 \lambda^{\frac{1}{\gamma}} v_2 \quad (1-33)$$

式中: β ——喉部直径和入口处直径比。

将式 (1-33) 代入方程 (1-30), 则得

$$v_2^2 (1 - \beta^4 \lambda^{\frac{2}{\gamma}}) = \frac{2}{\gamma - 1} \gamma \frac{p_1}{\rho_1} (1 - \lambda^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}) \quad (1-34)$$

显然:

$$v_2 = \left[\frac{2}{\gamma - 1} \gamma \frac{p_1}{\rho_1} (1 - \lambda^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}) / (1 - \beta^4 \lambda^{\frac{2}{\gamma}}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-35)$$

理想条件下的质量流量为