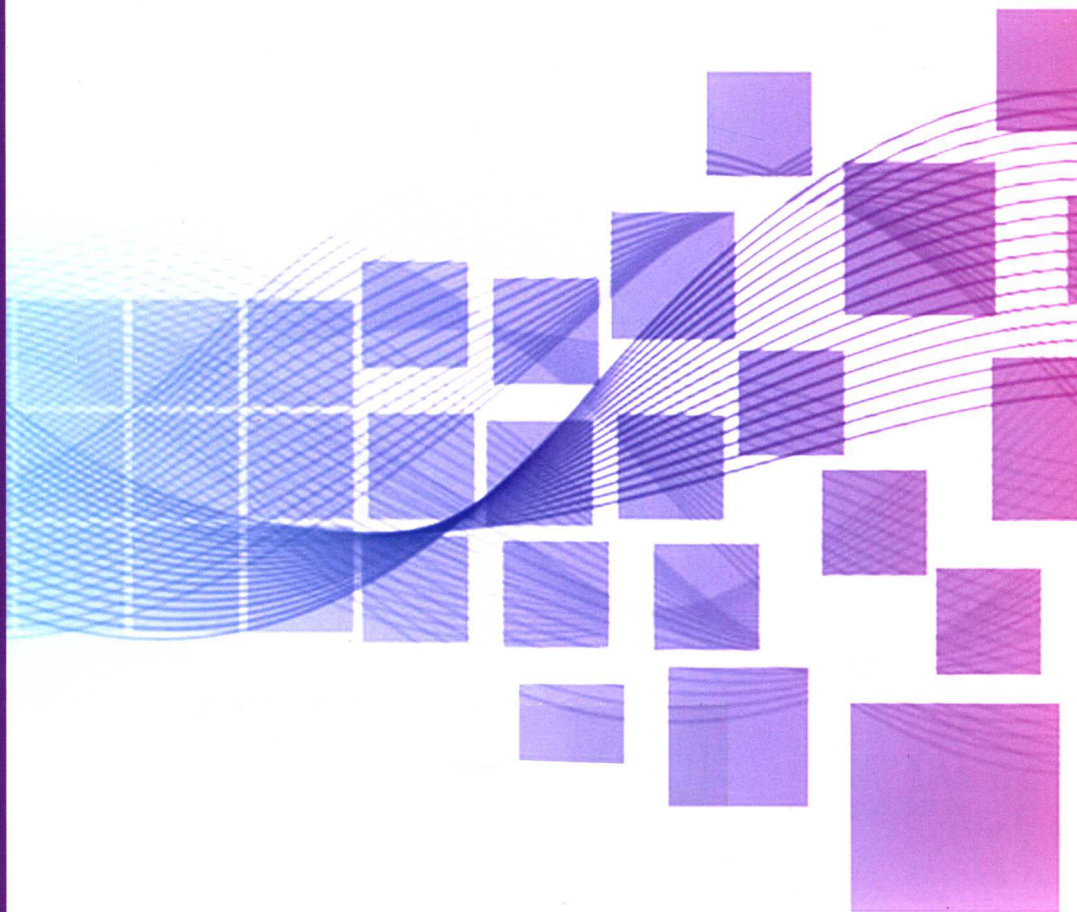





气体流量计

◎ 杨有涛 叶 朋 主编



 中国质检出版社
中国标准出版社

气体流量计

杨有涛 叶 朋 主编



中国质检出版社

中国标准出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

气体流量计/杨有涛, 叶朋主编. —北京: 中国质检出版社, 2016. 6

ISBN 978-7-5026-4311-9

I. ①气… II. ①杨…②叶… III. ①气体流量计
IV. ①TH814

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 126040 号

中国质检出版社 出版发行
中国标准出版社

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100029)

北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: www.spc.net.cn

总编室: (010)68533533 发行中心: (010)51780238

读者服务部: (010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 24.5 字数 581 千字

2016 年 6 月第一版 2016 年 6 月第一次印刷

*

定价 69.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话: (010) 68510107

前 言

气体流量计是专门用于测量气体流量的一种计量器具，其用途主要是定量计量气体流量，保证供气方和用户方的公平贸易、合理结算。国际社会十分重视气体流量计，国际法制计量组织（OIML）为气体流量计专门编写了国际建议 R137 - 1&2: 2012 Gas meters。我国作为 OIML 成员国，有义务而且也应该认真地学习并执行国际建议。2015 年 12 月 10 日，国家质量监督检验检疫总局、国家标准化委员会发布 GB/T 32201—2015 《气体流量计》。该国家标准等效于国际法制计量组织 OIML 国际建议 R137 - 1&2: 2012 《气体流量计》，和国际标准接轨。该标准规范了我国气体流量计的设计研发和生产。

但是，目前比较缺乏有关气体流量计专业方面的参考资料，本书的出版弥补了这一不足。为了满足 GB/T 32201—2015 《气体流量计》宣贯培训需求，帮助大家更好地理解气体流量计，保证流量量值的准确和统一，我们组织编写了这本《气体流量计》。本书的作者都是设计、生产和计量检定第一线的有丰富经验的工程师，体现“先进性、实用性”，内容新颖实用，对于读者了解目前气体流量计的最新技术动态大有裨益。

本书在对 GB/T 32201—2015 全面解读的基础上，主要介绍各种不同工作原理的气体流量计，从各种气体流量计结构特点及基本测量工作原理、检定装置及检定方法、测量不确定度分析、安装使用等方面进行了详细阐述。

发展天然气是我国今后能源发展的重点，西气东输沿线及周边大小用户都安装有各种不同类型的气体流量计。目前所提倡的节能降耗，首先就要量化能源和损耗，要采用流量计量仪表准确计量能源的消耗。正确使用和检定气体流量计，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，而且与人民利益密切相关。如果气体流量计计量不准确，会直接影响到国家和消费者的利益，同时还会影响到人民的生命、财产安全。因此，气体流量计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。

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。

本书分为七章，每章内容相对独立，读者可以根据自己需要选择阅读。

在此，对给予本书支持的单位及人员，表示诚挚的谢意！

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

编著者

2016年3月于北京

yangyt@bjjl.cn

目 录

第一章 概述	1
第一节 引言	1
第二节 流量基本概念	5
第三节 流量计量基础	8
第四节 气体流量计分类	17
第五节 GB/T 32201—2015《气体流量计》编制说明	19
第二章 GB/T 32201—2015《气体流量计》条文解读	27
第一节 前言	27
第二节 正文	28
第三节 附录	89
第三章 速度式气体流量计	116
第一节 超声波气体流量计	116
第二节 涡轮流量计	132
第三节 旋进旋涡流量计	151
第四节 涡街流量计	158
第五节 体积修正仪	163
第六节 射流流量计	185
第四章 容积式气体流量计	191
第一节 概述	191
第二节 腰轮流量计	192
第三节 湿式气体流量计	199
第四节 膜式燃气表	210
第五节 GB/T 6968—2011《膜式燃气表》与 GB/T 32201—2015《气体流量计》 的差异对比	234
第五章 差压式气体流量计	244
第一节 节流式差压流量计	244
第二节 孔口流量计	283
第三节 临界流流量计	293

第四节 浮子流量计·····	306
第六章 气体质量流量计·····	325
第一节 热式气体质量流量计概述·····	325
第二节 热式气体质量流量计工作原理与结构·····	331
第三节 科里奥利质量流量计·····	336
第七章 气体流量标准装置·····	341
第一节 概述·····	341
第二节 钟罩式气体流量标准装置·····	344
第三节 pVt 气体流量标准装置·····	363
第四节 标准表法流量装置·····	376
第五节 临界流文丘里喷嘴法气体流量标准装置·····	380
参考文献·····	383

第一章 概述

第一节 引言

2015年12月10日,国家质量监督检验检疫总局、国家标准化管理委员会发布2015年第38号国家标准的公告,其中包括GB/T 32201—2015《气体流量计》。该国家标准等效于国际法制计量组织OIML国际建议R137-1&2:2012《气体流量计》,和国际标准接轨。该标准规范了我国气体流量计的设计研发和生产。

一、概述

流量测量具有很强的理论性和实践性。长期以来,人们往往忽略了一个基本宗旨:流量计的应用、计量原则、计量设备和装置是高质量测量体系的关键。而流量标准装置则是体系中的重要环节之一,这包括了由训练有素、经验丰富人员的定期保养和维护装置的稳定性。同时作为流量测量设备,装置更多承担了复现和传递流量标准的责任,实现了在参比条件下对其他流量测试仪表的校验和检定的功能。从这种意义来说,它成为联系基础理论与实践应用之间的纽带。

流量测量的产生最早可以追溯到古代的水利工程和城市供水系统。如凯撒时代,罗马人已经采用槽测量居民的饮用水水量;中国古人在卤盐生产中,用盐盆等器皿控制盐水量;著名的都江堰水利工程应用宝瓶口的水位观测水量大小等。经过数千年发展,尤其是工业革命以后,流量测量逐级发展形成成为一门综合性很强的学科,已经广泛应用于国民经济各个领域,包括:工业生产、能源计量、环境保护、交通运输、生物制药等。同时,大量新学科的融合和交叉学科的产生,大量新技术和新方法应用到流量测量,包括:力学、电学、声学、热学和光学等诸多测量原理类型,形成了五花八门的流量测量手段和仪表。

二、流量测量技术的发展

在古埃及的尼罗河三角洲地区,每年定期的洪水到来时,人们移居到高处,洪水会淹没河两岸,并带来肥沃的土壤。当洪水退去,人们在肥沃土壤上耕作和收获。洪水水位的测量就控制在法老手中的水尺棒,依靠这根棒,法老们对土地征税。如果当年的预算紧张时,法老们往往会重新校准这个水尺。这个校准棒可能就是人类最早的流量标准装置了。

流量测量成为一门基础试验科学,还是近代的事情。在17世纪初,卡斯特里(Castelli)和托里拆利(Tonicelli)发明了差压式流量计,他们用流速乘以面积换算得到流量,并发现通过小孔的流量与水头(压力损失或差压)的平方根成正比。18世纪初,Poleni教授提供了认识孔板流量的相关工作。同一时期,伯努利(Bernoulli)推导出水力学方程及其理论,并用以描述差压式流量计的工作。

在 18 世纪 30 年代,皮托 (Pitot) 发表了一篇关于他研制的流量计的论文。文丘里 (Venturi) 在 18 世纪 90 年代后期做了相同工作, Herschel 在 1887 年重复了该项工作,并在 18 世纪 90 年代后期进行了修正。在伦敦,在 19 世纪中叶,正排量 (PD) 流量计开始用于商业用途。在 20 世纪初,美国的燃气计量 (巴尔的摩气灯公司) 开始出现。

20 世纪初,回转式流量计开始出现。在此同时,在俄亥俄州立大学教授罗宾逊 (Robinson) 用皮托管来测量气井的气体流量。Weymouth 采用法兰盘校准了一系列方边的薄孔板。他的工作发表在 1912 年给美国机械工程协会的一篇论文中,题目为“天然气计量和天然气测量研究”, Pugh 和 Cooper 用孔板做了相似测量工作,这个时期,出现了储罐测量原油的方法,从原料到成品都是采用这种方法批量测量。

也在这同一时期,俄亥俄州立大学的贾德 (Judd) 教授主导了孔板的同心、偏心和断面测量的工作。先前的流量测试工作是由一些流量计制造公司完成的,包括米制金属工程 (后来的美国仪表公司)、Foxboro 公司和匹兹堡公平公司 (后来的洛克韦尔 Rockwell 和 Equimeter 公司)。为了研究和分析这些数据,美国天然气联合协会 AGA (1925 年) 开始了余下的测试工作。并在 1930 年达到巅峰,代表是当年出版的 AGA No. 1 报告,随后工作是 AGA 的 No. 2 报告,发表于 1935 年,和 No. 3 报告发表于 1955 年。这些早期工作作为后来的标准化工作奠定了重要基础。

进入 20 世纪后,原有的测量原理逐渐走向成熟,人们不再将思路局限在原有的测量方法上,而是开始了新的探索。1910 年时,美国人开始了槽式流量计的研究工作,这种流量计是用来测量明渠中水流量的。1922 年,帕歇尔将帕歇尔水槽用于水槽测量。同期,美籍匈牙利人卡门正在研究涡街理论,1911 年到 1912 年,他提出了卡门涡街新理论。到了 20 世纪 30 年代,又出现了探讨用声波测量液体和气体的流速的方法,声波测量流量的方法。但到第二次世界大战为止未获得很大进展,直到 1955 才有了应用声循环法的马克森流量计的问世,用于测量航空燃料的流量。1945 年,科林用交变磁场成功地测量了血液流动的情况。20 世纪的 60 年代以后,测量仪表开始向精密化、小型化等方向发展。例如,为了提高差压仪表的精确度,出现了力平衡差压变送器和电容式差压变送器;为了使电磁流量计的传感小型化和改善信噪比,出现了用非均匀磁场和低频励磁方式的电磁流量计,此外,具有宽测量范围和无活动检测部件的实用卡门涡街流量计也在 70 年代问世。

随着集成电路技术的迅速发展,具有锁相环路技术的超声 (波) 流量计也得到了普遍应用,微型计算机的广泛应用,进一步提高了流量测量的能力,如激光多普勒流速计应用微型计算机后,可处理较为复杂的信号。

三、气体流量计量特点

20 世纪 70 年代开始,随着能源和天然气工业的迅速发展,热值计量技术因其较体积和质量计量更能体现科学公平原则,故在西欧和北美日益普遍,已成为当今天然气计量技术的发展方向。从流量计发展看,也分别出现了孔板流量计、涡轮流量计和超声流量计应用热潮。目前,从使用现状看,国际上商品天然气作为结算依据的计量方式仍然有质量计量、体积计量和能量计量,其中体积计量和能量计量在北美和西欧地区的大规模交接计量中普遍使用;从流量计的选型来看,主要有孔板压差式流量计、腰轮流量计、涡轮流量计和气体超声流量计等。其中涡轮流量计、腰轮流量计和孔板流量计在荷兰、加拿大、美国

等国的使用率已占到了80%~90%。当前,天然气计量技术发展趋势呈现以下特点:

(1) 科技进步推动天然气计量向着在线、实时、智能化方向发展。包括,SCADA系统可以实现远程通信、计量数据采集、控制和动态管理。近几年通过对传统孔板流量计二次仪表的改进,现场逐步采用智能压力变送器、温度变送器和补偿功能完善的流量计算机,实现了计量自动化,利用系统变送器的通信功能可进行在线故障诊断、组态和校验,大大提高了测量结果的精确度和稳定性。

(2) 新型流量计的研发促使流量计的性能和适应范围不断提高,可供用户选择的流量计类型日益增多。如在中小流量和中低压情况下,可选择各种智能型速度式流量计;在高压、大流量情况下可选择气体超声流量计。最近又出现了一种新型内文丘里管式流量计,该流量计适用于流量变化范围大的中低流量工况。

(3) 目前在美国、加拿大、英国、法国、德国、意大利等国家的天然气贸易交接计量中普遍采用能量计量的方式,这些国家都制定了比较完备的天然气能量计量的法规、政策和标准体系。在确定天然气发热值时,国外普遍采用组分分析计算法,同时以直接测量法为基准进行校核。美国在20世纪70年代使用水流式直接测量天然气发热值,80年代后采用准确度和灵敏度更高的气流式取代了水流式。

(4) 天然气计量管理工作从单一数据管理向计量系统管理方向发展,并从影响测量结果的各个方面、各个环节进行全程、动态、科学的管理,既对现场计量器具的使用及相应人员进行管理,又从事后计量纠纷解释向加强事前仪表的采购选型、安装使用、质量监督、过程控制、数据管理、实流检定的管理转变和发展。

四、天然气涉及的主要国际和国家标准

天然气计量涉及管道设计、施工、投产运行、维修、检验、检定及安全环保等各个方面,在天然气计量的相关标准中,流量计量标准尤为重要。近几年,随着质量计量和能量计量方法的逐步推广,有关天然气密度、组分、发热值、压缩因子等相关参数的测量和计算标准也包括在计量标准体系中。

目前,制定天然气计量标准的组织主要有,国际标准化组织(ISO)的TC30 封闭管道流体流量测量技术委员会、TC193 天然气技术委员会和TC28 石油与润滑油技术委员会、国际法制计量组织(OIML)的TC8 流体量的测量技术委员会、美国气体协会(AGA)报告、美国材料与实验协会(ASTM)、美国仪器协会(ISA)、欧洲标准化委员会(CEN)等。近几年,国外天然气计量标准的主要发展趋势如下。

1. 天然气物性参数及分析测试的标准

ISO的TC193委员会围绕天然气热值计算和能量计量的要求,先后制定出版了26项天然气物性分析测试标准,主要有ISO 13443《天然气标准参比条件》、ISO 6976《天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算》、ISO 6975《天然气延伸分析气相色谱法》、ISO 10715《天然气取样导则》、ISO 12213《天然气压缩因子计算》等。此外,美国ASTM也制定了类似的相关标准,如ASTM D1945-91《用气相色谱法的天然气分析方法》、ASTM D3588-89《计算气体燃料发热量及比重的试验方法》等。

2. 孔板流量计的计量标准

近几年,随着差压变送器、流量计算机、定值节流件和标准喷嘴等在孔板流量计上的

配套使用,其量程、准确度、压损等主要技术性能得到了极大的改善。在此基础上,美国和欧洲都进行了大规模的孔板流量计研究试验,刷新了基础数据,建立了高质量的数据库。孔板流量计主要有两大标准,即 ISO 5167《用差压装置测量流体流量》和美国 AGA No. 3/ANSI/API 2530 报告《孔板流量计测量天然气及其他烃类流体》。

近年来,这两大标准各自条款中规定的现场安装条件进行了实质性的修正。特别是对 AGA No. 3 号报告中,使用标准孔板流量计,大量利用天然气做实验介质,可以无须实流校准(干校)而确定差压与流量的关系等相关问题,进行了深入细致的试验研究。通过对几十项研究成果的总结和对 AGA No. 3 报告的多次修订,已使得该标准更趋完善。

3. 涡轮流量计的计量标准

在欧洲和北美(如加拿大和美国),气体涡轮流量计是仅次于孔板流量计的天然气流测量仪表。从 20 世纪 60 年代开始,国际上对涡轮流量计应用于天然气测量进行了大量的试验研究及实践检验,制定了国际标准、国际建议和工业发达国家的标准规范,主要有 ISO 9951: 1993《封闭管道中气体流量测量—涡轮流量计》,OIML R6《气体体积流量计一般规范》和 OIML R32《旋转活塞式气体流量计和涡轮气体流量计》,AGA No. 7《涡轮流量计测量燃气》,欧共体标准(CEN) pr EN(标准草案)涡轮气体流量计等。

4. 气体超声流量计的计量标准

气体超声流量计在天然气管道上的应用始于 20 世纪 90 年代,它是继孔板流量计、涡轮流量计之后第三类适用于高压、大口径天然气管道的高准确度天然气流测量计,至今,已有美国、荷兰、加拿大、英国、德国等 12 个国家的政府机构批准将它作为贸易结算的法定计量器具。近年来,随着高速数字信号处理技术和先进的压电陶瓷技术的发展,使气体超声流量计测量天然气的技术有了突破性进展,其研发呈加速发展之势。但由于气体超声流量计的发展历史较短,有许多实用问题仍在探索中,因此,欧美各国都在加快有关气体超声流量计的国家标准研究制定工作。目前,已颁布的气体超声流量计测量标准主要有 ISO/TR 12765《封闭管道中流体流量测量—用传播时间法超声流量计》和美国 AGA 在总结阶段研究成果的基础上发布的 No. 9 号草案《用多声道超声流量计测量气体的流量》等标准。

5. 天然气能量计量的标准

天然气计量由体积计量转变为能量计量并非只是计量技术的进步,它与一个国家能源开发政策和价格政策有密切的关系,同时还涉及一系列技术标准,如 ISO/CD15112 和 ISO/WD15112 等有关能量计量基本要求及其实施方式的标准。ISO 5167, ISO 9951 和 ISO/TR 12765 等有关天然气体积(或质量)计量的标准,ISO 10715, ISO 6974, ISO 6976, ISO/DIS 15971-1, ASTM D3588 等有关天然气组分、发热量、相对密度、压缩因子等物性参数直接测定和计算的标准。此外,还有一些通用基础标准,如取样准则、确定 P2V2T 关系的参比条件、确定发热量的燃烧参比条件、不同仪器的溯源性准则和操作评价准则等。

美国是世界上在交接计量中实施能量计量最早的国家,20 世纪 80 年代,美国天然气加工者协会(NGPA)就提出了天然气交接计量和结算的发热量准则(BTU Rule),其基本点是,在井口气销售和其他“第一次销售”中应以天然气的发热量为基准进行计价。由于天然气的能量计量是通过两个不相干的测量来完成的,即流量和发热量的测量,因

此, 国际标准化组织天然气技术委员会 (ISO/TC193) 将这两种测量合成定义为: 交接的总能量为天然气的单位发热量与其总流量的乘积, 即:

$$Q = V \times H \quad (1-1)$$

式中: Q ——交接的总能量;

V ——总体积流量;

H ——体积单位发热量。

从式 (1-1) 可以看出, 除流量测量外, 天然气单位发热量的测定是一个关键。美国在能量计量的实施过程中提出了供出能量原则, 即式 (1-1) 中的 H 是指单位量的天然气在燃烧过程中实际释放的能量, 而不是以其中可燃组分含量在规定条件下计算的能量。目前, ISO 标准规定了二类确定天然气发热量的方法, 一类是使用热量计的直接燃烧测定法 (简称直接法), 另一类是利用气相色谱仪得到的组成分析数据进行计算的方法 (简称间接法)。

第二节 流量基本概念

一、流量的定义

根据国家计量技术规范 JJF 1004—2004 《流量计量名词术语及定义》及国家标准 GB/T 17611—1998 《封闭管道中流体流量的测量术语和符号》中对流量的定义, 流体流过一定截面的量称为流量。流量也是瞬时流量和累积流量的统称。

在一段时间内流体流过一定截面的量称为累积流量, 也称总量。流体流过一定截面的量与时间的比称为瞬时流量。流量用体积表示时称为体积流量, 用质量表示时称为质量流量。

流量 (瞬时流量): 单位时间内流过管道某一截面的流体的数量。瞬时流量一般用符号 q 表示。

累积流量 (总流量): 某一时段内流过的流体的总和。瞬时流量在某一时段的累积量。累积流量一般用 Q 表示。 Q_m 表示累积质量流量; Q_v 表示累积体积流量。

质量流量: 单位时间内流过某截面的流体的质量。单位如 (kg/s)。 q_m 表示瞬时质量流量。

体积流量: 单位时间内流过某截面的流体的体积。(工作状态下) 单位如 (m^3/s)。 q_v 表示瞬时体积流量。

体积流量 (Q_n): 折算到标准的压力和温度下的体积流量。(标准状态下)

流量的国际单位制单位是千克/秒 (kg/s)、立方米/秒 (m^3/s)。此外, 常用的还有吨/小时 (t/h)、千克/小时 (kg/h)、立方米/小时 (m^3/h) 等; 总量的国际单位制单位是千克 (kg)、立方米 (m^3)。此外, 常用的总量单位还有吨 (t)。

对于气体, 密度受温度、压力变化影响较大, 如在常温常压附近, 温度每变化 10°C , 密度变化约为 3%; 压力每变化 10kPa, 密度约变化 10%。因此在测量气体流量时, 必须同时测量气体的温度和压力。为了便于比较, 常将在工作状态下测得的体积流量换算成标准状态下 (温度为 20°C , 压力为 101325Pa) 的体积流量, 用符号 Q_n 表示, 单位符号为 m^3/s 。

二、流量计量中常用的流体物理性质

流量计量中常用的流体物性参数主要有密度、黏度、压缩系数、比热比和气体绝热指数。

1. 密度

在流量计算、装置设计或进行体积流量与质量流量的换算时，都可能要用到密度这个流体的物性参数，可以说，密度是流量计量中较重要，也是最常用的流体物性参数之一。密度是单位体积内的流体质量，如果流体可以认为是均匀的介质，则它可以表示为：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

式中： ρ ——流体密度， kg/m^3 ；

m ——流体的质量， kg ；

V ——流体的体积， m^3 。

各种流体的密度都随流体的状态而变化，但在低压和常温下，压力对液体的密度影响很小，所以在工程上往往可将液体视为不可压缩流体。对于气体，温度 t 、压力 p 对其密度的影响很大，所以当描述气体密度时，应同时描述气体所处的温度和压力状态。

液体的密度计算公式如下（假设压力不变）：

$$\rho = \rho_{20} [1 - \alpha(t - 20)] \quad (1-3)$$

式中： ρ_{20} ——20℃时液体的密度， kg/m^3

α ——液体的体膨胀系数， $1/^\circ\text{C}$

应注意的是，虽然一般情况下压力对液体的密度的影响很小，但是对于原油等碳氢化合物，压力对液体密度的影响不可忽略。

气体的密度通用计算公式为：

$$\rho = \rho_n \frac{p \cdot T_n \cdot z_n}{p_n \cdot T \cdot z} \quad (1-4)$$

式中： ρ_n ， T_n ， p_n ， z_n 分别为标准状态下的气体密度、气体热力学温度、气体绝对压力和气体压缩系数，单位分别为 kg/m^3 、 K 、 Pa 、无量纲。

在实际应用中还会经常应用到相对密度，定义：在标准状态下物质密度与参考物质密度的比值。密度参考物质一般指较易获得、物理性能稳定、纯度高，而且密度已经知道的物质，常用的如干空气、纯水等。关于相对密度，过去经常叫“比重”，事实上比重一词不确切，易混淆单位制，故此术语现已废弃。

2. 黏度

流体的黏度是表示流体内部摩擦力大小的一个参数。各种流体在流动时所受的阻力是不同的，所以各种流体在同一状态下也会有不同的黏度。黏度是流体温度和压力的函数。通常情况下，温度上升，液体的黏度就会下降，而气体的黏度上升。

在一般工程计算中，液体的黏度只需考虑温度对它的影响，只有在压力很高的情况下才考虑压力的修正。而气体和水蒸气的黏度与温度、压力的关系十分密切，应时刻注意修正。黏度主要有动力黏度和运动黏度。

流体运动过程中阻滞剪切变形的黏滞力与流体的速度梯度和接触面积成正比，并与流

体黏性有关，其数学表达式为：

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

式中： F ——黏滞力；

A ——接触面积；

du/dy ——流体垂直于速度方向的速度梯度；

μ ——表征流体黏性的比例系数。

式(1-5)称为牛顿黏性定律。

动力黏度的物理概念是流层间发生相对滑移所产生的内摩擦力与单位流层距离上的流层间速度梯度的比值。数学表达式为：

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{du}{dh}} \quad (1-6)$$

式中： η ——流体的动力黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

τ ——单位面积上的内摩擦力， Pa ；

u ——流体流动速度， m/s ；

h ——流体流层间距离， m 。

运动黏度是从动力黏度推导出来的表征黏度的另一参数，流体的动力黏度与流体密度的比值称为运动黏度，其关系式如下：

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-7)$$

式中： ν ——运动黏度， m^2/s ；

ρ ——密度， kg/m^3 。

注意：动力黏度的单位为（牛顿·秒）/米²（ $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ），即帕斯卡秒（ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ）；运动黏度的单位为（ m^2/s ）。

3. 压缩因子（又称压缩系数）与体积弹性系数

压缩因子是在给定温度和压力下，真实气体与理想气体定律不一致的修正系数。压缩因子的定义如下：

$$z = \frac{p \times M}{\rho \times R \times T} \quad (1-8)$$

式中： M ——摩尔质量， kg/mol ；

R ——通用气体常数， $\text{J}/\text{mol} \cdot \text{K}$ 。

理想状态下的压缩因子等于1，压缩因子受压力的影响很大，压力较高时，压缩因子偏离1的程度越明显。

值得注意的是，压缩因子与体积弹性系数是两个概念（虽然体积弹性系数有时也称为压缩系数），体积弹性系数表征流体体积随压力变化的性质。

当流体温度不变，所受压力变化时的体积相对变化率 k 为：

$$k = -\frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-9)$$

式中： Δp ——压力变化，Pa；
 ΔV ——流体的体积变化， m^3 ；
 V ——流体的体积， m^3 。

4. 比热容与比热比

比热容是流体的重要热力学参数之一。为了计算在某一测量过程或其他过程加入或放出的热量，需要了解这一性质。在工程上，常用的比热容有定压比热容、定容比热容。

定压比热容用符号 c_p 表示，为单位质量的流体在压力不变的条件下，单位温度变化时所吸收或释放的能量；定容比热容用符号 c_v 表示，为单位质量的流体在比容不变的条件下，单位温度变化时所吸收或释放的能量。

比热比是针对气体而言的，比热比 γ 等于气体的定压比热容 c_p 与气体的定容比热容 c_v 之比值。在绝热过程中，比热比称为绝热指数；理想气体的比热比等于等熵指数。

比热比可以用测量的方法得到。也可以查物性参数表，它与气体的种类、气体温度、气体压力都有关。近似地，一般单原子气体， $\gamma = 1.66$ ，双原子气体及空气， $\gamma = 1.41$ ，三原子气体 $\gamma = 1.31$ ，多原子气体 $\gamma = 1.13$ 。

5. 气体绝热指数

如果流体介质在状态变化的某一过程中不与外界发生热交换，则该过程称为绝热过程。在气体流量测量中，有时需要计算气体的膨胀系数，在计算过程中又需要知道气体绝热指数。气体绝热指数可以通过查相关的数据表来获得。

第三节 流量计量基础

流体力学理论是流量计量的基础，所有的流量计工作原理要遵循流体力学理论。

一、连续性方程

1. 连续性

欧拉于 1753 年提出：把流体看成是由无限多流体质点所组成的无间隙的连续介质，这就叫做流体的连续性。当然这只是假设，但一般情况下可把气体看成连续介质。

2. 定常流

流体在管道中流动，如果其流动参数（如速度、密度等）只随位置改变而与时间无关，即在管道中某一确定截面上流体的流动参数不随时间而显著变化则称为定常流。

3. 平均流速

由于实际流体有黏性，任一截面上各点流速大小不等，特别是在层流状态下，管道轴心处最大，管壁处为零，呈曲线分布。体积流量与截面面积的比值叫做平均流速。

4. 方程

连续性的流体在管道中作定常流流动时，流过截面 1 和截面 2 的质量流量相等（质量守恒），即

$$q_{m1} = q_{m2} \quad (1-10a)$$

或

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad (1-10b)$$

式中： q_m ——流体质量流量；
 ρ ——流体密度；
 v ——流体平均流速；
 A ——有效截面面积。

二、状态方程

1. 状态参数

在任一平衡状态下，某气体基本状态参数之间的关系是确定的。气体状态变化时，初、终状态参数之间的差值，仅与初、终状态有关而与状态变化的途径无关，即与变化过程无关。压力、温度、密度、内能、焓和熵都是状态参数。

2. 理想气体

理想气体有两个定义：

定义1：完全符合理想气体状态方程式的气体称为理想气体。

定义2：可以看成分子没有体积且分子间没有内聚力的气体称为理想气体。这两个定义是一致的。

3. 方程

(1) 理想气体状态方程

由物理学知道，理想气体作用在边界上的压力为：

$$p = \frac{2}{3} n \frac{\overline{m\bar{w}^2}}{2} \quad (1-11)$$

式中： p ——绝对压力；

n ——分子浓度， $n = \frac{N}{V}$ ；

V ——容器容积；

N ——容器内气体分子总数；

\bar{m} ——单个分子的质量；

\bar{w} ——分子平移运动均方根速度；

$\frac{\overline{m\bar{w}^2}}{2}$ ——每个分子做平移运动的平均动能。

又知道：

$$\frac{\overline{m\bar{w}^2}}{2} = BT \quad (1-12)$$

式中： T ——热力学温度；

B ——比例常数。

因为 $\rho = \frac{m}{V}$ ，所以由式(1-10)~式(1-12)得：

$$\frac{p}{\rho} = \frac{2}{3} \frac{N}{m} BT = \frac{2}{3} N' BT \quad (1-13)$$

式中： N' ——1kg 气体的分子数目，对于一定的气体 N' 为常数。

设 $\frac{2}{3} N' B = R_m$ ，则：

$$\frac{p}{\rho} = R_m T \quad (1-14)$$

式中： R_m ——气体常数。

式(1-14)就是理想气体的状态方程。

若已知气体的摩质量 M ，可以证明：

$$R_m = \frac{R}{M} \quad (1-15)$$

式中： R ——通常气体常数， $R = 8.31451 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = 8314.51 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

(2) 实际气体的状态方程

对实际气体，将式(1-15)写成：

$$\frac{p}{\rho} = z R_m T \quad (1-16)$$

式中： z ——压缩系数，又称压缩因子。

(3) 压缩系数

令 ρ_i 表示理想气体的密度，则在相同的 p 、 T 状态下，按理想气体对待时：

$$\frac{p}{\rho_i} = R_m T \quad (1-17)$$

按实际气体对待时：

$$\frac{p}{\rho} = z R_m T \quad (1-18)$$

上两式相除，得：

$$z = \frac{\rho_i}{\rho} \quad (1-19)$$

式(1-19)表明：气体压缩系数乃为一定质量的气体，实际体积与“理想体积”之比。对理想气体， $z=1$ 。 $z=1$ 就是理想气体定义1的另一表述法。实际气体 z 可能大于1或小于1。

各种气体的压缩系数，有表可查，有的有计算公式。

三、能量方程

1. 内能

内能即气体本身内部的能量。按照气体分子运动学说，气体内能的微观实质是气体分子和原子运动动能和由相互间引力形成的位能。单位质量的内能称为比内能。内能是状态参数，是气体温度的单值函数。

2. 焓

1kg 气体的焓称为比焓，其定义式为：

$$h = u + p/\rho \quad (1-20)$$

式中： h ——比焓；

u ——比内能；

p ——绝对压力。

焓是一个状态参数。对于理想气体，焓仅是气体温度的单值函数，这是因为比内能是