

国家计量技术法规统一宣贯教材

# 速度式流量计

全国流量容量计量技术委员会 组 编  
国家质量监督检验检疫总局计量司 组织审定

JJG 1029—2007

JJG 1030—2007

JJG 1033—2007

JJG 1037—2008



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

# 速度式流量计

全国流量容量计量技术委员会 组 编  
国家质量监督检验检疫总局计量司 组织审定

中国计量出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

速度式流量计/全国流量容量计量技术委员会组编. 北京: 中国计量出版社, 2008. 10  
国家计量技术法规统一宣贯教材  
ISBN 978-7-5026-2898-7

I. 速… II. 全… III. 速度式流量计—教材 IV. TH814

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 145228 号

## 内 容 提 要

本书是国家计量检定规程 JJG 1030—2007《超声流量计》、JJG 1037—2008《涡轮流量计》、JJG 1033—2007《电磁流量计》和 JJG 1029—2007《涡街流量计》四种速度式流量计的统一宣贯教材。本教材较全面系统、有针对性地解释了规程条文,介绍了四大类速度式流量计的结构、工作原理和计量检定方法、型式评价试验以及相关的流量仪表、流量标准装置和流量测量不确定度分析等内容。

本书可作为规程的宣贯培训使用,可为从事速度式流量计检定、维修及操作人员参考使用,也可作为相关专业工程技术人员、高等学校师生的参考资料。

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>

北京市密东印刷有限公司印刷

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 15.25 字数 362 千字

2008 年 10 月第 1 版 2008 年 10 月第 1 次印刷

\*

定价: 46.00 元

# 编 审 委 员 会

---

---

顾 问 王自和

编 委 (按姓氏笔画顺序排列)

王 池 王子钢 李 旭 李一平 陈 梅

孟 涛 杨有涛 段慧明 魏 华

# 序 言

能源问题在我国经济和社会发展中具有全局性、战略性的地位和作用，并已成为经济发展中的一个突出问题，解决能源问题已成为我国的重要国策之一。能源计量是解决能源问题基本的、重要的基础性工作，是实现能源资源节约、能源科学管理、节能降耗的重要手段。要实施民生计量执法工程、计量节能服务工程，就应该充分发挥计量检测技术在构建社会主义和谐社会、建设资源节约型、环境友好型社会中的技术支撑作用。

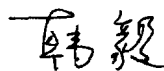
开展节能降耗，首先要求量化能源和损耗，即采用计量仪表准确地计量能源消耗。根据计量仪表所提供的数据来计算和考核能耗，依据计量的结果进行科学管理，提高经济效益，才能实现真正意义上的节能降耗。因此，计量检测是节能降耗、消除贸易结算中双方矛盾所必需的基本技术手段。

随着社会的发展和科学的进步，流量计量检测已经深入到国防、科研、工农业生产、能源管理、环境保护等各个领域，与我国国民经济的发展息息相关。流量计量也是能源计量的重要组成部分。可以说流量的计量不仅涉及千家万户老百姓的生活，也关系到供需双方的贸易公平结算。其计量的准确性不仅会影响到老百姓的利益，也关系到国内、国际贸易双方的经济利益。

为了做好新规程 JJG 1030—2007《超声流量计》、JJG 1037—2008《涡轮流量计》、JJG 1033—2007《电磁流量计》、JJG 1029—2007《涡街流量计》的宣贯和实施工作，满足规程宣贯的需求，帮助流量计量人员更好地理解 and 掌握新规程的内容，正确贯彻和执行规程，保证流量量值的准确和统一，全国流量容量计量技术委员会组织编写了这本《速度式流量计》宣贯教材。本教材对新规程的宣贯，正确检定、使用流量计具有重要的指导意义。

本书对从事流量计量研究以及流量计设计制造、安装使用、计量检定、安装维修等相关工程技术人员有较大的参考价值，也可作为大专院校有关专业师生的教学参考读物。

国家质量监督检验检疫总局计量司 司长



2008年8月

# 前 言

JJG 198—1994《速度式流量计》规程在对速度式流量计检定工作起到了积极的作用。但是由于它包括了多种流量计的检定内容，造成了通用性条款多，专门适用于具体的流量计检定的条款少的局面。近年来，随着速度式流量计技术的快速发展，对检定技术的要求不断提高，JJG 198—1994已不能适应目前速度式流量计的检定。因此，国家质检总局和全国流量容量计量技术委员会将原来的JJG 198分拆成几大类流量计检定规程，针对每一类的速度式流量计制定新的检定规程，使新规程更加具有针对性和可操作性。

为了帮助流量计量人员在进行计量检定中正确地理解JJG 1030—2007《超声流量计》、JJG 1037—2008《涡轮流量计》、JJG 1033—2007《电磁流量计》和JJG 1029—2007《涡街流量计》计量检定规程的内容，保证流量量值的准确和统一，也为了配合规程的宣贯，全国流量容量计量技术委员会组织编写了这本《速度式流量计》宣贯教材。

本书特点：主要为了配合上述规程宣贯，达到使大家能够真正理解、正确执行规程的目的。既明确介绍新规程的技术要求，又详述了各种流量计的测量原理、检定方法和检测技术，使整个知识框架结构具有一定的系统性，而且还兼顾新技术的实际应用，达到实用性的要求。因此是从事流量专业计量检定的工程技术人员、制造厂商、使用者的必备技术资料。

本书分为五章，每章相对独立，具有较强的灵活性、针对性和独立性，读者可以有针对性和取舍性地阅读相关章节。第一章第1~5节由王子钢、杨有涛编写；第6节由王池编写；第二章由王池、魏华编写；第三章由李旭编写；第四章由孟涛编写；第五章由段慧明、杨有涛、陈梅、李一平编写。

本书特邀国家水大流量计量站王自和老师为顾问。王自和老师对书稿进行了认真仔细的审阅，提出了宝贵的修改意见，保证了本书的质量和水准，在此表示衷心的感谢。

国家质检总局计量司量传处陈红处长从书稿的整体构架、宣贯教材的特点要求、法制计量要求及文字等方面，进行审查并提出了宝贵的修改建议；还有其他单位和人员对本书的编写和出版给予了支持和关心，谨在此一并表示诚挚的谢意！

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

《速度式流量计》编写组

2008年8月

# 目 录

<b>第一章 流量计量基础</b> .....	(1)
第一节 概 述.....	(1)
第二节 流量测量的基本概念.....	(3)
第三节 流体力学基础理论.....	(6)
第四节 流量计量常用的专用术语 .....	(20)
第五节 流量测量不确定度评定 .....	(22)
第六节 流量量值比对和能力验证 .....	(28)
<b>第二章 超声流量计</b> .....	(42)
第一节 相关说明 .....	(42)
第二节 规程正文条文解析 .....	(44)
第三节 规程附录条文解析 .....	(58)
第四节 测量不确定度评定 .....	(79)
附 录 声速计算方法 .....	(84)
<b>第三章 涡轮流量计</b> .....	(92)
第一节 概 述 .....	(92)
第二节 涡轮流量计的工作原理和结构 .....	(92)
第三节 涡轮流量计的数学模型和特性曲线 .....	(97)
第四节 涡轮流量计的特点和安装使用.....	(106)
第五节 涡轮流量计的检定方法.....	(110)
第六节 型式评价.....	(117)
第七节 测量不确定度评定.....	(126)
第八节 应用例题.....	(130)
第九节 关于新规程的编写说明.....	(138)
<b>第四章 电磁流量计</b> .....	(148)
第一节 概 述.....	(148)
第二节 结构原理.....	(149)
第三节 结构及功能.....	(151)
第四节 新检定规程编写说明.....	(153)
第五节 技术要求及检定方法.....	(154)
第六节 检定实验方法及实验装置.....	(158)
第七节 检定数据的处理.....	(162)

第八节	型式评价	(164)
第九节	测量不确定度分析举例	(171)
第十节	检定注意事项	(173)
第十一节	选型要求和应用	(174)
第十二节	在线检查及常见故障维护	(176)
<b>第五章</b>	<b>涡街流量计</b>	<b>(180)</b>
第一节	工作原理	(180)
第二节	结 构	(181)
第三节	涡街流量计的分类	(183)
第四节	旋涡发生体的分类	(184)
第五节	传感器的分类介绍	(185)
第六节	检定规程编写说明	(188)
第七节	技术要求及检定方法	(191)
第八节	检定装置	(197)
第九节	型式评价	(198)
第十节	涡街流量计优缺点分析	(201)
第十一节	涡街流量计的选型要求与应用	(202)
第十二节	涡街流量计的安装	(211)
第十三节	涡街流量计使用的注意事项	(213)
第十四节	测量结果的不确定度评定	(216)
第十五节	涡街流量计检定的注意事项	(228)
<b>参考文献</b>		<b>(232)</b>



# 第一章 流量计量基础

## 第一节 概述

流量仪表是过程自动化仪表与装置中的大类仪表之一,它被广泛应用于冶金、电力、煤炭、化工、石油、交通、建筑、轻纺、食品、医药、农业、环境保护及人民日常生活等国民经济各个领域,它是发展工农业生产、节约能源、改进产品质量、提高经济效益和管理水平的重要工具,在国民经济中占有重要的地位。在过程自动化仪表与装置中,流量仪表有两大功用:作为过程自动化控制系统的检测仪表和测量物料数量的总量表。据统计,流量仪表的产值约占全部过程自动化检测仪表与装置产值的五分之一。

目前我们提倡节约型社会,开展节能降耗,特别是重点耗能企业加强节能,把能源计量工作不断引向深入围绕“节能降耗”的主题。要节能降耗,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。只有根据计量仪表所提供的准确数据来计算和考核能耗,才能依据能源计量的结果进行科学管理,提高经济效益,实现真正意义上的节能降耗。我们了解各种不同类型流量计的基本工作原理,有助于正确选择、使用合适的流量计。所有的测量流体流量的仪表统称为流量计或流量表。流量仪表一般是以流体体积来反映流体流量的。

我们要实施民生计量执法工程、计量节能服务工程,就应该充分发挥计量在构建社会主义和谐社会、建设资源节约型社会中的技术支撑作用。

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

- (1) 速度式流量计;
- (2) 差压式流量计;
- (3) 容积式流量计;
- (4) 质量流量计。

速度式流量计量仪表有涡轮流量计、电磁流量计、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,而涡街流量计则更多用于蒸汽流量的计量。

容积式流量计量仪表有传统的腰轮流量计、双转子流量计、椭圆齿轮流量计、刮板流量计、膜式燃气表、湿式气体流量计等。

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。

质量流量计由于可以直接得到质量流量,则较多用于生产过程参数计量、检测

和控制。

浮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,较多用于小流量的瞬时流量测量。

在各类流量计中,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。

下面按其结构工作原理不同介绍相关流量计的基本工作原理。

## 一、速度式流量计

此类流量计的输出与流速成正比,其中一种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、叶轮和涡轮表属该类流量计。

电磁流量计在流体流动的管道内装有一对电极,使管道置于磁场中。导电流体在管道内流过时,切割磁场磁力线产生感应电势,该电势通过导线引出。流量大,电势高;反之亦然。测出电势大小,就可得知流体流量。电磁流量计只适用于导电的流体。

超声波流量计的基本原理是超声波在流动的流体中传播时,载上流体流速的信息,因此,通过对接收到的超声波进行测量,就可以检测出流体的流速,从而换算成流量。超声波流量计由超声波换能器、信号处理电路、单片机控制系统三部分组成。在有气体流动的管道中,超声脉冲顺流传播的速度要比逆流时快;流过管道的气体的速度越快,超声顺流和逆流传播的时间差越大。主要分为时差式(测量顺流和逆流传播的时间差)、相差式(测量顺流和逆流传播的相位差)、频差式(测量顺流和逆流传播的循环频率差)、多普勒超声波流量计(以物理学中的多普勒效应为工作原理,适合于对两相流的测量)。

涡街流量计(又称旋涡流量计)是根据“卡门涡街”原理研制成的一种流体振荡式流量测量仪表。所谓“卡门涡街”现象是这样的:在流动的流体中插入一根(或多根)迎流面为非流线型柱状物时,流体在柱状物两侧交替地分离释放出两列规则的旋涡。早在19世纪物理学家斯特劳哈尔和冯·卡门就对涡街现象进行了卓有成效的研究。他们的研究成果表明:旋涡分离频率与介质流速、旋涡发生体的几何形状以及尺寸有着内在的联系。这就是:旋涡分离频率与流速成正比,与柱体宽度成反比。

除上述外,还有利用激光、同位素作媒介的速度式流量计。

## 二、差压式流量计

差压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的函数关系。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。浮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。

## 三、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。在给定量计条件下,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,即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累计流量值。

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、活塞表、齿轮表、腰轮表、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)、计量准确度高、性价比高等优点,多用于燃气、油料等的贸易结算。

#### 四、质量流量计

质量流量计用于计量流过管道流体的质量流量。类型主要有:

##### 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与质量的关系,测量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。一般气体质量流量计主要是以量热式质量流量计为主。

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,但是在小流量计量时准确度低。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。

## 第二节 流量测量的基本概念

### 一、流量的定义

根据 JJF 1004—2004《流量计量名词术语及定义》中对流量的定义,流体流过一定截面的量称为流量。流量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。当时间很短时,流体流过一定截面的量称为瞬时流量。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。

瞬时流量一般用符号  $q$  表示,累积流量一般用  $Q$  表示,相应地,质量流量一般用下标  $m$  表示,而体积流量一般用下标  $V$  表示。即,  $q_m$  表示瞬时质量流量;  $q_v$  表示瞬时体积流量;  $Q_m$  表示累积质量流量;  $Q_v$  表示累积体积流量。

## 二、流量计量中常用的流体物性参数

流量计量中常用的流体物性参数有密度、粘度、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,密度是流量计量中最重要,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

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

式中:  $\rho$ ——流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$m$ ——流体的质量,  $\text{kg}$ ;

$V$ ——流体的体积,  $\text{m}^3$ 。

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、压力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(假设压力不变情况下)

$$\rho = \rho_{20} [1 - \alpha(t - 20)] \quad (1-2)$$

式中:  $\rho_{20}$ —— $20^\circ\text{C}$  时液体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\alpha$ ——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

$$\rho = \rho_n \frac{p \cdot T_n \cdot z_n}{p_n \cdot T \cdot z} \quad (1-3)$$

式中:  $\rho_n, T_n, p_n, z_n$ ——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  $\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $\text{K}$ 、 $\text{Pa}$ 、无量纲。

### 2. 粘 度

流体的粘度是表示流体内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粘度。粘度是流体温度和压力的函数。通常情况下,温度上升,液体的粘度就会下降,而气体的粘度上升。

在一般工程计算中,液体的粘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;而气体和水蒸气的粘度与温度、压力的关系十分密切,应时刻注意修正。

粘度主要有动力粘度和运动粘度。

动力粘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

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{du}{dh}} \quad (1-4)$$

式中： $\eta$ ——流体的动力粘度，Pa·s；

$\tau$ ——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。

运动粘度是从动力粘度推导出来的表征粘度的另一参数，其关系式如下

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-5)$$

式中： $\nu$ ——运动粘度，m<sup>2</sup>/s；

$\rho$ ——密度，kg/m<sup>3</sup>。

### 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

$$z = \frac{p \times M}{\rho \times R \times T} \quad (1-6)$$

式中： $M$ ——摩尔质量，kg/mol；

$R$ ——通用气体常数，J/mol·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

$$k = -\frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-7)$$

式中： $\Delta p$ ——压力变化，Pa；

$\Delta V$ ——体积变化，m<sup>3</sup>；

$V$ ——流体的体积，m<sup>3</sup>。

### 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，需要了解这一参数。在工程上，常用的比热容有比定压热容、比定容热容。

比定压热容用符号  $c_p$  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；比定容热容用符号  $c_v$  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  $\gamma$  等于气体的比定压热容  $c_p$  与气体的比定容热容  $c_v$  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

如果流体工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。气体绝热指数可以查表获得。

## 第三节 流体力学基础理论

各种不同类型流量计的基本工作原理都是建立在流体力学理论的基础上。它对流量计的研究具有指导性的意义。流量计的实践应用又进一步丰富了流体力学理论。

在流体力学的发展中,曾经有与理论流体力学和工程流体力学相近的学科,它们都是流体(包括液体和气体)平衡和运动规律及其应用的科学。理论流体力学偏重于数理分析,是连续介质力学的一个组成部分,属于基础科学范畴;工程流体力学主要是工程应用,是工程力学的一个组成部分,属于应用科学范畴。下面简要介绍基本的概念和基本的定理,详细的数学推导过程可以查阅相关的书籍。

### 一、流体静力学

流体静力学研究平衡流体的力学规律及其应用。平衡流体相互之间没有相对运动,流体粘性在平衡状态下不显示,所以流体静力学中的原理都适用于实际流体。流体静力学是工程流体力学中独立完整而且严密符合实际的一部分。

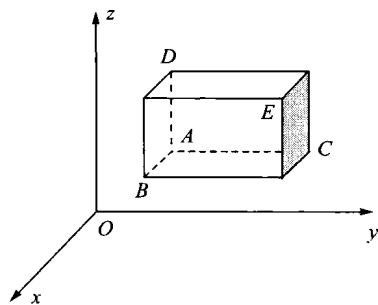


图 1-1 微元六面体

如图 1-1 所示,在平衡流体中任取一个微元六面体  $ABCDE$ ,设  $AB=dx$ 、 $AC=dy$ 、 $AD=dz$  均为无穷小量,  $A$  点密度为  $\rho$ ,压强为  $p$ 。

1755 年欧拉导出流体平衡微分方程式如下,它是平衡流体中普遍适用的一个基本公式

$$\left. \begin{aligned} f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \\ f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

式中:  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  向的质量力分量。无论平衡流体受的质量力的种类,流体是否

可压缩,流体有无粘性,欧拉流体平衡微分方程式都普遍适用。

重力场中平衡流体的力势函数为

$$W = gz \quad (1-9)$$

因为在力学上,  $mgz$  代表质量为  $m$  的物体在基准面以上高度为  $z$  时的位置势能,因而质量力势函数  $W = gz$  的物理意义是单位质量 ( $m=1$ ) 流体在基准面以上高度为  $z$  时的位置势能,  $W$  的坐标为  $(x, y, z)$ 。

流体中各等压强点所组成的平面或者曲面称为等压面,具有三个性质:

- (1) 等压面也是等势面;
- (2) 等压面与单位质量力矢量垂直;
- (3) 两种不相混合平衡液体的交界面必然是等压面。

重力场中的平衡流体是流体静力学的主要研究对象。重力场中的欧拉平衡微分方程可以改写为

$$dp = -\rho dw = -\rho g dz \quad (1-10)$$

对于重力场中连续、均质、不可压缩流体,其密度是恒量,式(1-3)变成

$$dz + \frac{dp}{\rho g} = 0 \quad \text{或者} \quad d\left(z + \frac{p}{\rho g}\right) = 0 \quad (1-11)$$

在流体连续区域内积分,则

$$z + \frac{p}{\rho g} = C \quad (1-12)$$

这是静压强基本公式。

## 二、流体动力学基础

流体动力学主要研究流体运动规律及其在工程实际中的应用。压强、流速、加速度、密度等物理量是流体的运动要素,流体动力学就是要建立它们间的函数关系,建立反映流体运动规律的三大基本方程:连续性方程、能量方程和动量方程。

### 1. 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

$$Re_d = \frac{vd}{\nu} = \frac{\rho vd}{\eta} \quad (1-13)$$

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,  $m/s$ ;

$\rho$ ——流体密度,  $kg/m^3$ ;

$d$ ——特征长度,如在圆管中取管内径值,  $m$ ;

$\nu$ ——流体运动粘度,  $m^2/s$ ;

$\eta$ ——流体动力粘度,  $Pa \cdot s$ 。

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。

## 2. 稳定流动与不稳定流动

流体是由连续分布着的质点所组成的。在运动情况下,一个质点在某一瞬间占据在一定的空间点 $(x, y, z)$ 上,具有一定的速度 $v$ ,压力 $p$ ,密度 $\rho$ 及温度 $T$ 等标志其运动状态的运动要素。一般来说,这些运动要素都是空间坐标和时间的连续函数。

根据流体运动时运动要素是否随时间变化,可以把流体分为稳定流和不稳定流两种。

## 3. 迹线和流线

用拉格朗日法描述流体运动是研究个别质点在不同时刻的运动情况。如果把某一质点在连续的时间过程内所占据的空间位置连成线,就是迹线。迹线就是流体质点在一段时间内运动的轨迹线。

用欧拉法描述流体运动是考察同一时刻各流体质点在不同空间位置上的运动情况。流线的概念是从欧拉法引出的。流线是某一瞬时在场中描绘出的曲线,在这条曲线上所有质点的速度矢量都和该曲线相切。所以,流线表示出瞬时流动的方向。

## 4. 流管、流束和总流

在场中画一封闭曲线,经过曲线的每一点作流线,由许多流线所围成的管称为流管。不稳定流时流管形状随时间而改变;稳定流时流管形状不随时间而改变。由于流管表面是由流线所围成,流线是不能相交的,因此流管内外无流体质点交换。这样流管就好像钢体管壁一样,把流体运动局限在流管之内或流管之外。故在稳定流时流管就像真实管子一样。

充满在流管内部的流体称为流束。断面无穷小的流束为微小流束。无数微小流束的总和称为总流。在分析总流的速度、流量、压力等运动要素变化时,可以认为在微小断面上的各点运动要素相等,这样能利用数学积分方法求出相应的总流断面上的运动要素。

## 5. 有效断面、流量和平均流速

流束或总流上垂直于流线的断面,称为有效断面。单位时间内流经有效断面的流体量,称为流量。有两种表示方法:一种以单位时间通过的流体体积表示,称为体积流量,记为 $q_v$ ,其单位是 $\text{m}^3/\text{s}$ ;另外一种以单位时间通过的流体质量表示,称为质量流量,记为 $q_m$ ,单位是 $\text{kg}/\text{s}$ 。它们之间的换算关系为

$$q_m = \rho q_v \quad (1-14)$$

式中: $\rho$ ——流体密度。

对于微小流束而言,体积流量 $dq_v$ 应等于速度 $u$ 与微小有效断面 $dA$ 之乘积,即

$$dq_v = u dA \quad (1-15)$$

对于总流而言,体积流量 $q_v$ 则是微小流束之流量对总流有效断面 $A$ 的积分,即

$$q_v = \int_A u dA \quad (1-16)$$

由于流体有粘性,任一有效断面上各点速度大小不等,因而需要找出断面上速度分布的函数式才能对式(1-16)进行积分。为了方便计算,通常引入一个断面平均流速的概念,用 $V$ 表示,它的物理意义是假设有效断面上各点流速相等,而按这个各点相等的流速所通过的流体体积与按实际不同分布的流速 $u$ 所通过的流体体积相等。



$$\left. \begin{aligned} vA &= \int_A u dA = q_v \\ v &= \frac{\int_A u dA}{A} = \frac{q_v}{A} \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

根据式(1-17)所确定的流速  $v$  就称为断面平均流速。

### 三、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,但一般情况下可把流体看成连续介质。

#### 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

由于实际流体有粘性,任一截面上各点流速大小不等,管轴处最大,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,流过管道截面 1 和截面 2 的质量流量相等(质量守恒定律),即

$$q_{m_1} = q_{m_2} \quad (1-18)$$

$$\text{或} \quad \rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad (1-19)$$

式中:  $q_m$ ——流体质量流量;

$\rho$ ——流体密度;

$v$ ——流体平均流速;

$A$ ——有效截面面积。

### 四、状态方程

#### 1. 状态参数

在任意平衡状态下,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、密度及以下介绍的内能、焓和熵都是状态参数。

#### 2. 理想气体

理想气体有两个定义: