

国家计量技术法规统一宣贯教材

浮子流量计

徐英华 沈文新 崔骊水 编著

国家质量监督检验检疫总局计量司 审定

JJG257-2007

JJG257-2007

JJG257-2007



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

浮子流量计

徐英华 沈文新 崔骊水 编著

国家质量监督检验检疫总局计量司 审定

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

浮子流量计/徐英华,沈文新,崔骊水编著. —北京:中国计量出版社,2009.9

国家计量技术法规统一宣贯教材

ISBN 978-7-5026-3151-2

I. 浮… II. ①徐…②沈…③崔… III. 转子流量计—教材 IV. TH814

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 153392 号

内 容 提 要

本书是国家计量检定规程 JJG 257—2007《浮子流量计》的统一宣贯教材。全书共分 8 章,较全面系统地介绍了浮子流量计的结构原理、选型、安装使用方法、检定装置、检定方法以及测量不确定度评定等内容。

本书可作为规程的宣贯培训教材,也可供厂矿企业计量部门从事流量计量检定工作的人员以及使用本流量计的专业技术人员参考使用。

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

*

880 mm×1230 mm 16 开本 印张 12 字数 272 千字

2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

*

印数 1—2 000 定价: 36.00 元

前 言

浮子流量计由于其具有结构简单、制造方便、流量示值直观、使用维护方便、压力损失小等特点，被大量地应用于电力、石化、化工、冶金、医药等行业。近年来，环境保护单位的大气采样器和粉尘采样器的大量生产也给浮子流量计提供了产品利用空间。随着科学技术及制造业的发展，浮子流量计产品的应用领域越来越广，品种规格越来越多，其理论、制造及检测技术日趋成熟。以产品台数论之，在流量仪表的使用中仅次于家用水表和膜式燃气表。据初步统计，2007年我国的浮子流量计产品出口达到30万台，用于纯净水、医用氧气吸入器、焊接设备配套用氧气、氩气、二氧化碳等测量介质的浮子流量计年总产量高达百万余台。

随着时代的发展，浮子流量计国家计量检定规程也历经数次修订，2007年国家质量监督检验检疫总局新颁布了JJG 257—2007《浮子流量计》。新规程进一步规范了浮子流量计的计量性能要求、通用技术要求、计量器具控制、检定方法、流量刻度换算公式，增加了型式评价大纲内容。新规程的颁布实施将使浮子流量计的计量性能和产品质量得到更大的提高和保证。

本书共分为八章。第一章介绍了流量测量基础知识，第二章为浮子流量计简介，第三章介绍浮子流量计的结构和原理，第四章为浮子流量计的设计选型及安装使用，第五章、第六章介绍了浮子流量计的气体检定装置和液体检定装置，第七章介绍浮子流量计的检定，第八章为浮子流量计的不确定度的评定。

本书可作为JJG 257—2007《浮子流量计》的宣贯教材，也可供从事流量计量行业及生产单位等有关部门专业人员参考使用。

由于编写时间仓促，编者水平有限，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2009年5月

目 录

第一章 流量测量基础知识	(1)
第一节 基本概念	(1)
第二节 液体静压力和浮力	(9)
第三节 流量测量基本方程	(11)
第四节 流体在管道中的流动	(21)
第二章 浮子流量计简介	(24)
第一节 概 述	(24)
第二节 浮子流量计的简介	(25)
第三节 浮子流量计的用途	(31)
第三章 浮子流量计的结构和原理	(35)
第一节 浮子流量计的测量原理和流量基本方程式	(35)
第二节 玻璃管浮子流量计的结构型式和基本特点	(37)
第三节 金属管浮子流量计的结构型式及特点	(39)
第四节 浮子流量计的流量特性和流量系数	(44)
第五节 浮子流量计的刻度换算和量程换算	(46)
第六节 影响浮子流量计准确度的主要原因	(51)
第四章 浮子流量计的选用和使用注意事项	(53)
第一节 浮子流量计的设计	(53)
第二节 大雷诺数时的设计换算	(55)
第三节 浮子几何形状对测量的影响	(56)
第四节 粘度对流量示值的影响	(57)
第五节 选型和使用注意事项	(58)

第五章 气体浮子流量计检定装置	(63)
第一节 钟罩式气体流量标准装置	(63)
第二节 皂膜气体流量标准装置	(72)
第三节 临界流文丘里喷嘴法气体流量标准装置	(77)
第四节 标准表法气体流量标准装置	(91)
第六章 液体浮子流量计检定装置的介绍	(92)
第一节 静态质量法液体流量标准装置	(92)
第二节 静态容积法液体流量标准装置	(99)
第三节 动态法液体流量标准装置	(101)
第七章 浮子流量计的检定	(104)
第一节 规程修订说明	(104)
第二节 浮子流量计的检定	(106)
第三节 检定条件和检定方法	(108)
第四节 检定结果的处理	(118)
第五节 型式评价	(119)
第八章 浮子流量计测量不确定度评定	(126)
第一节 测量不确定度基础	(126)
第二节 气体浮子流量计示值校准结果不确定度评定	(134)
第三节 液体浮子流量计示值校准不确定度评定	(138)
附 录	(143)
参考文献	(185)

第1章 地球及其大气的基本特性

气象仪器是测量气象要素和天气现象的一类仪器,要对气象仪器进行试验测试,了解其测量对象的特性是非常重要的。而在对气象仪器进行试验测试时,尤其是动态试验,太阳和地球的状态,云、雨、雷、电及太阳和周围物体的辐射等也对试验结果产生影响。因此,在研究气象仪器的特性及其测试技术时,必须具备地球、太阳、大气环境等基本知识。

1.1 太阳和地球

1.1.1 太阳高度角和方位角

在进行地面和高空探测仪器的辐射误差试验时,必须计算太阳高度角,有时也需要知道太阳方位角。由于地球自转轴与赤道平面成 56° 角,在围绕太阳公转时,太阳的直射位置在北纬和南纬 $23^\circ 27'$ 之间来回变化。在同一地点,即使相同的日期和时间,太阳方位角和高度角也是不同的。

在天文学中,为了简单直观地描述天体与地球的关系,提出了一个天球的概念。太阳方位角和高度角的计算就是基于天球模型的定义来确定的。

天球模型假设以观察者的眼睛为球心,做一个无穷大的正球体,将所有天体包括太阳投影到天球的球面上,这样,天体的具体位置就可以用其在天球上的投影所代替。

基于天球理论,太阳高度角和方位角可以推导为太阳赤纬,观测地点地理纬度和观测时刻太阳时角的函数。

太阳高度角用公式(1.1)计算。

$$h_{\theta} = \arcsin(\sin s_w \sin w + \cos s_w \cos w \cos t) \quad (1.1)$$

式中 h_{θ} 为太阳高度角($^\circ$); s_w 为太阳赤纬($^\circ$), w 为观测地点的地理纬度($^\circ$); t 为观测时刻太阳时角($^\circ$)。

太阳方位角 A 可以用公式(1.2)计算。

$$A = \arcsin\left(\frac{\cos s_w \sin t}{\cos h_{\theta}}\right) \quad (1.2)$$

公式(1.1)和公式(1.2)中的时角 t 可用公式(1.3)进行计算。

$$t = (C_T + L_C + E_Q - 12) \times 15^\circ \quad (1.3)$$

公式(1.3)中, C_T 为地方标准时,又称为时区时。以中国为例,以东经 120° 的地方时为地方标

时，它们之间达到热平衡。人们把这一宏观物理性质称为温度。

从微观上看，温度标志物质分子热运动的激烈程度。对于气体，它是大量分子平移动能平均值的量度，其关系式为

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

式中： T ——热力学温度；

$B = 3/2k$ ， $k = (1.380058 \pm 0.000012) \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ，是玻耳兹曼常数；

\bar{c} ——分子移动的均方根速度。

两个物体接触时，通过接触面上分子的碰撞进行动能交换，能量从平均动能较大的一方（即温度较高的物体），传到了平均动能较小的一方（即温度较低的物体）。这种微观的动能交换就是热能的交换，也就是两个温度不同的物体间进行的热量传递。传递的方向总是从温度高的物体传向温度低的物体。这种热量的传递将持续不断地进行，直至两个物体的温度相等为止。

温度是基本物理量之一，是气体流量计量中的重要状态参数。测量温度的仪器称为温度计，选作温度计的感应元件的物体具备某种物理性质，它随物体的冷热程度不同有显著的变化（如金属丝电阻、封在细管中的水银柱的高度等）。为了给温度确定数值，应建立温标——温度的数值表示法。例如以前摄氏温标规定在标准大气压下纯水的冰点是 0°C ，汽点是 100°C ，其他温度的数值由作为温度标志的物理量（金属丝电阻、水银柱高度等）的线性函数来确定。

由选定的任意一种测量物质的某种物理性质，采用任意一种温度标定规则所得到的温标称为经验温标。由于经验温标依赖于测量物质的性质，因此当选用不同测量物质的温度计、采用不同的物理量作为温度的标志来测量温度时，除选定为基准点的温度（如冰点和汽点外），其他温度的测定值可能有微小的差异。因而任何一种经验温标不能作为度量温度的标准。

国际上规定热力学温标作为测量温度的最基本温标，它是根据热力学第二定律的基本原理制定的。与测量物质的特性无关，可以成为度量温度的标准。热力学温标的温度单位是开尔文，符号为 K（开），把水的三相点的温度，即水的固相、液相、气相平衡共存状态的温度作为单一基准点，并规定为 273.16K 。因此，热力学温度单位“开尔文”是水的三相点温度的 $1/273.16$ 。

1960年，国际计量大会通过决议，规定摄氏温度由热力学温度移动零点来获得，即

$$t = T - 273.15\text{K} \quad (1-2)$$

式中： t ——摄氏温度，其单位为摄氏度，符号为 $^\circ\text{C}$ ；

T ——热力学温度，K。

这样规定的摄氏温标称为热力学摄氏温标。由式（1-2）可知，摄氏温标和热力学温标并无实质差异，而仅仅只是零点取值的不同。我国自1991年7月1日起施行“1990年国际温标（ITS-90）”。气体流量计量规定的标准状态温度为 20°C ，进行体积修正时，则一定采用热力学温度，此时标准状态温度为 273.15K 。

三、流体的压力

单位面积上所受的垂直作用力称为压力（即压强）。物理学分子运动学说指出气体的压力是

大量分子撞击器壁的平均结果。理想气体作用在边界上的压力

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

式中： n ——分子浓度， $n = \frac{N}{V}$ ；

N ——当容器容积为 $V(\text{m}^3)$ 时，容器中气体的分子总数。

气体流量计量中压力也是状态参数。测量压力的仪器称为压力计。由于压力计的测压元件处于其所在环境压力的作用下，因此压力计所测得的压力是被测介质真实压力（或称绝对压力）与环境介质压力之差，叫做表压力或真空度。下面以大气环境中的 U 形管压力计为例，说明介质绝对压力 p 与大气压力 p_b 及表压力 p_e 或真空度 p_v 的关系。

当绝对压力大于大气压力（见图 1-1 (a)）时

$$p = p_b + p_e \quad (1-4)$$

式中 p_e 表示测得的差数，称为表压力。如介质的绝对压力低于大气压力（见图 1-1 (b)），则

$$p = p_b - p_v \quad (1-5)$$

式中 p_v 也表示测得的差数，称为真空度。此时测量压力的仪表叫做真空计。

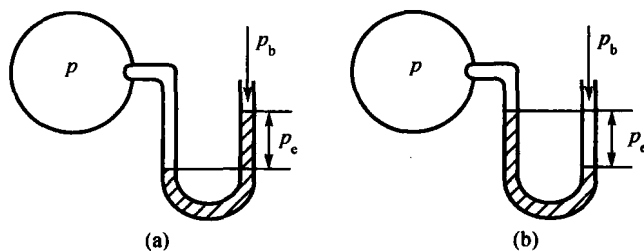


图 1-1 大气压力

绝对压力、表压力、真空度和大气压力之间的关系可用图 1-2 说明。

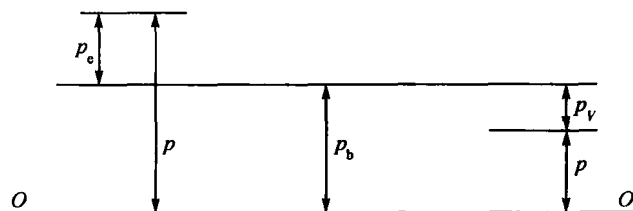


图 1-2 绝对压力、表压力和真空度

作为介质状态参数的压力应该是绝对压力。大气压力是地面上空气柱的重量所造成的，它随着各地的纬度、高度和气候条件而变化，可用气压计测定。因此，即使介质绝对压力不变，表压力和真空度仍有可能变化。在用压力计进行气体流量压力测量时，必须同时用气压计测定当时当地的大气压力，然后才能进行体积或流量修正。

我国法定的压力单位是帕斯卡（简称帕），符号为 Pa

$$1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$$

即 1Pa 等于每平方米的面积上作用 1N 的力。工程上因 Pa 的单位太小，常采用 MPa（兆帕）：
1MPa=10⁶Pa。

流量测量中还经常会遇到其他压力单位，如 atm（标准大气压，也称物理大气压）、bar（巴）、at（工程大气压）、mmHg（毫米汞柱）和 mmH₂O（毫米水柱），它们与帕之间的互换关系如表 1-1 所示。

表 1-1 各压力单位互换表

	Pa	bar	atm	at	mmHg	mmH ₂ O
Pa	1	1×10 ⁻⁵	0.986923×10 ⁻⁵	0.101972×10 ⁻⁴	7.50062×10 ⁻²	0.1019712
bar	1×10 ⁵	1	0.986923	1.01972	750.062	10197.2
atm	101325	1.01325	1	1.03323	760	10332.3
at	98066.5	0.980665	0.967841	1	735.559	1×10 ⁴
mmHg	133.3224	133.3224×10 ⁻⁵	1.31579×10 ⁻³	1.35951×10 ⁻³	1	13.5951
mmH ₂ O	9.80665	9.80665×10 ⁻⁵	9.07841×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁴	735.559×10 ⁻⁴	1

四、流体的密度

流体和其他物质一样，具有质量。质量是物质的基本属性，是惯性的度量。单位体积流体的质量称为密度，用 ρ 表示。密度分布均匀的流体，称均质流体，否则为非均质流体。浮子流量计一般只能用于测量均质流体。设某流体的质量为 m ，体积 V ，则密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-6}$$

对于非均质流体，根据流体是连续介质的模型，某点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \tag{1-7}$$

质量常用的单位是 kg 或 g，密度的单位是 kg/m³ 或 g/cm³。

1. 液体的密度

当压力不变时，液体的密度计算公式为

$$\rho = \rho_{20} [1 - \alpha(t - 20)] \tag{1-8}$$

式中： ρ_{20} ——20℃时液体的密度；

α ——液体的体膨胀系数，1/℃。

当温度不变时，液体的密度计算公式为

$$\rho = \rho_{20} [1 - \beta(p_0 - p)] \tag{1-9}$$

式中： ρ_{20} ——压力为 p 时液体的密度；

β ——液体的体积压缩系数，1/MPa。

对大部分液体计量来说，压力对密度的影响可被可靠地忽略。水在 1000 个大气压力下，近似地被压缩到 1/300 或大约 0.3%。典型的烃的压缩性大约是水的 3 倍，在这样的高压下，若想得到最高的计量精度，应计入压力对密度的影响。

2. 气体的密度

(1) 干气体的密度

干气体的密度在常温常压下可用理想气体公式计算。对于高压低温时的实际气体，不能看作理想气体，通常在理想气体计算公式中增加一个偏离理想气体的校正系数（即气体压缩系数）予以修正。因此其密度计算公式为

$$\rho = \rho_N \cdot \frac{p}{p_N} \cdot \frac{T_N}{T} \cdot \frac{z_N}{z} \quad (1-10)$$

式中： ρ ——工作状态下干气体密度，kg/m³；

ρ_N ——标准状态下（293.15K，101.325kPa）干气体密度，kg/m³；

p ——工作状态下气体绝对压力，kPa；

p_N ——标准状态下气体绝对压力，其值为 101.325kPa；

T ——工作状态下气体热力学温度，K；

T_N ——标准状态下气体热力学温度，其值为 293.15K；

z ——工作状态下气体的压缩系数，K；

z_N ——标准状态下气体的压缩系数，K。

对于像空气这样的常见气体，设计浮子流量计其密度计算可用经验公式更为方便。例如，干空气的密度按式（1-11）计算

$$\rho = 0.0034856896 p / T \quad (1-11)$$

当空气温度在（0~90）℃、压力（0.1~2.0）MPa 之间时所引入的不确定度约为 0.005%，足够浮子流量计设计精度要求。

(2) 湿气体的密度

有些气体常和水蒸气混合成为湿气体，其中水蒸气含量的多少可用湿度的概念来表示。

单位湿气体体积中含有的水蒸气质量，称为湿气体的绝对湿度，单位为 kg/m³。显然，其数值就是在湿气体的温度 t 和水蒸气的分压力 p_v 下的水蒸气密度 ρ_v (kg/m³)。对于未饱和湿气体，可根据 t 和 p_v 在蒸汽表中查得，此时 ρ_v 小于温度 t 所对应的饱和蒸汽密度 ρ_s ；对于饱和湿气体，其绝对湿度就是温度 t 所对应的饱和蒸汽密度 ρ_s 。这是湿气体在该温度下所具有的最大湿度。

绝对湿度只能说明湿气体中实际所包含水蒸气的多少，而不是能说明湿气体所具有吸收蒸气能力的大小。因此，常用相对湿度来说明湿气体吸收水蒸气的能力及其潮湿的程度。湿气体中实际所包含的水蒸气质量与同温度下最大可能包含的水蒸气质量之比，称为湿气体的相对湿

度，它是一个无量纲数，定义为

$$\psi = \frac{\rho_V}{\rho_s} = \frac{p_V}{p_s} \quad (1-12)$$

式中： ρ_V ——水蒸气密度， kg/m^3 ；

ρ_s ——温度为 t 时水蒸气饱和密度， kg/m^3 ；

p_V ——水蒸气的分压力，Pa；

p_s ——温度为 t 时水蒸气的饱和压力，Pa。

有了绝对湿度和相对湿度的概念，工作状态下湿气体的密度可通过式 (1-13) 和式 (1-14) 计算。

采用绝对湿度参数时的湿气体密度

$$\rho = \frac{0.804(\rho_0 + f)}{0.804 + f} \cdot \frac{pT_0}{p_n T_z} \quad (1-13)$$

式中： ρ ——工作状态下湿气体的密度， kg/m^3 ；

ρ_0 ——(273K, 101.325kPa) 下湿气体中干气体部分的密度， kg/m^3 ；

0.804——(273K, 101.325kPa) 状态下水蒸气的密度， kg/m^3 ；

T_0 ——热力学温度，273K；

p, T ——工作状态下绝对压力和温度，kPa, K；

z ——气体的压缩系数；

f ——(273K, 101.325kPa) 状态下，对湿气体中干气体部分而言的气体绝对湿度， kg/m^3 。

采用相对湿度参数时的湿气体密度

$$\rho = \rho_N \frac{p - \psi p_s}{p_N} \frac{T_N z_N}{T z} + \psi \rho_s \quad (1-14)$$

式中， z 是 (273K, 101.325kPa) 状态下的气体压缩系数。

需要注意的是，由于湿气体中包含有一定量的水蒸气，因此当湿气体在定压下冷却到一定温度时，湿气体中将水分开始析出，这个温度称为露点，在数值上它是湿气体中水蒸气分压力所对应的饱和温度。露点在工业生产过程中是一个非常重要的概念，生产过程中所使用或产生的腐蚀性气体应保证其在露点温度以上运行。否则，由于流体结露所造成的对管道和设备的腐蚀将会直接影响生产过程。

五、流体的粘性、粘度

粘性和粘度在一些情况下是可以互换的两个概念，前者反映属性，后者反映量值。浮子流量计是一种对流体粘性变化特别敏感的流量仪表。

1. 粘 性

粘性是流体重要的属性之一，表现为流体在运动过程中会在其内部及接触界面产生摩擦阻力。我们知道流体是一种可以流动的、在平衡时不能承受切向力或剪切力，几乎没有抵抗变形

能力的一种物质，也就是说，流体在剪切力作用下将连续不断地产生变形，但在相同大小的切力作用下，不同的流体会产生不同程度的变形，流体这种抵抗剪切变形的属性称为粘性，抵抗变形所产生的力称为粘性力，单位面积上的粘性力称为粘性应力。

由于粘性，作相对运动的流体各部分之间存在摩擦力，这种摩擦力发生在流体内部，故又称为内摩擦力或粘性摩擦力。阻碍流体作相对运动的内摩擦力来源于：

(1) 分子间的作用力

在分子间相距很小时表现为斥力，相距稍大时表现为引力，引力随分子间距离的增大而迅速减小，流体分子间的作用力为引力，但很微弱。

(2) 分子动量交换

相邻部分的流体作相对运动时，由于分子的无规则运动而不断地交换分子，同时交换分子所携带的动能和动量，这种交换会使速度较大的流体分子失去部分动能而减速，速度较小的流体分子得到动能而加速。

(3) 流体微团动量交换

相邻部分的流体作相对运动时，由于流体微团的紊乱运动而不断地彼此碰撞和交换位置，同时交换它们所携带的动能和动量，这种交换会使速度较大的流体微团失去部分动能而减速，速度较小的流体微团得到动能而加速。

根据以上内摩擦力产生的不同机理，将粘性分为层流粘性和湍流粘性，它们分别是相邻流体分子间和相邻流体微团间相互作用的结果。层流运动时的切应力公式的建立过程如图1-3所示，水平设置的两块平面平板，下平板固定不动，上平板可以水平移动，二板间间距 δ 很小且充满流体。当上平板以速度 U 作水平方向运动时，带动板间流体运动。由无滑动条件（即与固体表面直接接触

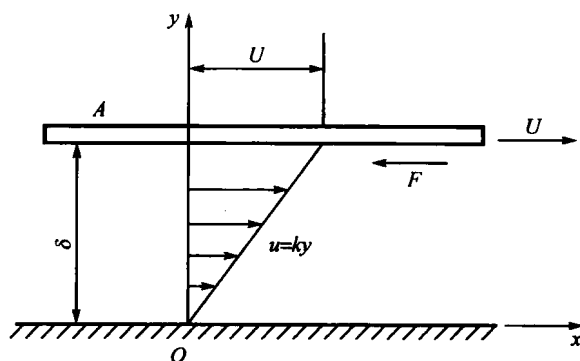


图1-3 流体在平行平板间隙中的直线流动

的流体与固体表面之间无相对运动)，可知紧贴下板的一层流体静止不动，紧贴上板的一层流体跟随上板一起运动；由小的板间距可认为，板间流体跟随速度呈线性分布，即 $u=ky$ ，其中 u 为流速、 y 为与流速垂直的坐标、 k 为比例常数。

流体各层的速度不同引起流体变形，产生内摩擦力，并在上平板接触面产生阻碍运动的粘性切力 F 。实验表明， F 与上平板的运动速度 U 和面积 A 以及板间距 δ 有以下关系，即

$$\frac{F}{A} = \tau = \mu \frac{U}{\delta}$$

式中： μ ——动力粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

τ ——切应力， Pa ；

U/δ ——沿垂直于速度方向单位长度上的速度变化量，即速度梯度。

由于板间流速呈线性分布，所以流体中各处的切应力都相等。一般的流体流动，上式应写

成以下更为通用的形式，即

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-15)$$

式(1-15)由牛顿首先提出，故称为牛顿切应力公式或牛顿内摩擦定律，它揭示了流体在作层流运动时，流体中某点切应力的大小与该点的速度梯度之间成正比的关系。

2. 粘 度

粘度是流体粘性量值的度量。流体的粘度越大就越难以流动，粘度越小则越易于流动。

(1) 动力粘度

将牛顿切应力公式(1-15)变换为 $\mu = \tau / (du/dy)$ ，就得到粘度 μ 的定义式。 μ 的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ，因为该单位中包含力的单位，所以称为动力粘度。

(2) 运动粘度

流体力学分析中常出现动力粘度与密度之比值 μ/ρ ，该比值包含运动学的单位，故称为运动粘度，单位为 m^2/s ，用符号 ν 代表，即 $\nu = \mu/\rho$ 。

(3) 恩氏粘度

用符号 E 表示，其定义为：在某一恒定温度下 200cm^3 的液体流出恩氏粘度计所需要的时间 t 与 20°C 下同体积的纯净水流出同一粘度计所需的时间 $t_0(51\text{s})$ 之比，即 $E = t/t_0$ ，单位用 $^\circ\text{E}$ 表示。恩氏粘度在流量计量工作中较少使用。

粘性是分子引力和分子动量交换在流体作宏观运动时体现出来的物理属性。对于气体，粘度的大小主要取决于分子动量交换的强烈程度，温度上升时分子动量交换加剧，所以气体粘度一般随温度上升而增大；对于液体，粘度主要取决于分子间引力的大小，温度上升时分子间的距离增大、引力减小，所以液体的粘度一般随温度上升而减小。

流体的粘度一般随压强的增大而增大，但只有在大的压强变化下这种影响才比较明显，在常压下可不考虑压力对流体粘度的影响。表1-2和表1-3分别列出了空气和水在一些温度下的粘度值。

表 1-2 空气在一些温度下的粘度值 ($p=101325\text{Pa}$)

温度 $t/^\circ\text{C}$	动力粘度 $\mu/10^{-6}\text{Pa} \cdot \text{s}$	运动粘度 $\nu/10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$	温度 $t/^\circ\text{C}$	动力粘度 $\mu/10^{-6}\text{Pa} \cdot \text{s}$	运动粘度 $\nu/10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$	温度 $t/^\circ\text{C}$	动力粘度 $\mu/10^{-6}\text{Pa} \cdot \text{s}$	运动粘度 $\nu/10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$
0	17.09	13.20	180	25.05	32.20	360	31.46	56.50
20	18.08	15.00	200	25.82	34.60	380	32.12	59.50
40	19.04	16.90	220	26.58	37.10	400	32.77	62.50
60	19.97	18.80	240	27.33	39.70	420	33.40	65.60
80	20.88	20.90	260	28.08	42.40	440	34.02	68.80
100	21.75	23.00	280	28.77	45.10	460	34.63	72.00
120	22.60	25.20	300	28.46	48.10	480	35.23	75.20
140	23.44	27.40	320	30.41	50.70	500	35.83	78.50
160	24.25	29.80	340	30.80	53.50			

表 1-3 水在一些温度下的粘度值及其他物性值 ($\rho=101325\text{Pa}$)

温度 $t/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	动力粘度 $\mu/10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s}$	运动粘度 $\nu/10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$	表面张力 $\sigma/(\text{N}/\text{m})$	汽化压强 p_v/kPa	体积模量 $K/10^9\text{Pa}$
0	999.9	1.792	1.792	0.0762	0.5884	2.04
10	999.7	1.308	1.308	0.0748	1.177	2.11
20	998.2	1.005	1.007	0.0736	2.452	2.20
30	995.7	0.801	0.804	0.0718	4.315	2.23
40	992.2	0.656	0.661	0.0701	7.453	2.27
50	988.1	0.549	0.556	0.0682	12.36	2.30
60	983.2	0.469	0.477	0.0668	19.91	2.28
70	977.8	0.406	0.415	0.0650	31.38	2.25
80	971.8	0.357	0.367	0.0630	47.66	2.21
90	965.3	0.317	0.328	0.0612	70.41	2.16
100	958.4	0.284	0.296	0.0594	101.30	2.07

第二节 液体静压力和浮力

为了更好地设计浮子流量计，需要计算流体作用在浮子上的作用力。因此，掌握流体静力的三个特征：大小、方向和作用点以及浮力知识是十分必要的。

一、液体静压力

在静止液体中，质点之间没有相对运动，不存在切力，同时液体又不能承受拉力，只存在静水压力。它是静止液体相邻两部分之间以及液体与固体壁面相互作用的力。用大写字母 P 表示，单位是 N 或者 kN 。压力 P 的大小与面积 A 成正比。为了研究压力在面积上的分布情况，引进静水压强的概念。在静水压强中任取一点 m ，围绕 m 点取一微小面积 ΔA ，作用在该面积上的静水压力为 ΔP ，如图 1-4 所示。

面积 ΔA 上的平均压强为 $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 。如果将面积 ΔA 围绕 m 点无限缩小，当 ΔA 趋近于零时，比值 $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 的极限称为 m 点的静水压强。压强用小写字母 p 表示，即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A}$$

压强的单位是 N/m^2 (Pa)， kN/m^2 (kPa)。流量计量上常用千帕为压力单位。静水压强具有两个特性：

(1) 静水压强的方向垂直指向作用面，如图 1-4 所示。如果静水压力 ΔP 不垂直于作用面，

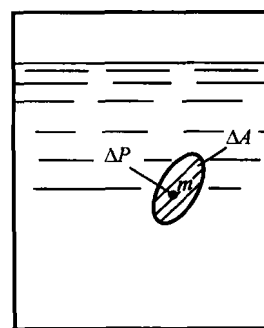


图 1-4

则可将 ΔP 分解为两个分力，一个力垂直于作用面，另一个力与作用面平行。与作用面平行的力即为切力，由于静止液体不能承受切力，所以平行于作用面的切力应等于零，同时液体又不能承受拉力。也就是说，静水压强必垂直指向作用面。

(2) 静止液体中任一点处各个方向的静水压强的都相等，与作用面的方位无关。

显然液体作用在平面面积 A 上的力 P 等于液体的单位重量 ρg 、面积重心（形心）的深度 h 及面积 A 的乘积

$$P = \rho g h A \quad (1-16)$$

注意：单位重量 ρg 和面积重心（形心）的深度的乘积给出面积重心处的压强。

二、浮力

设图 1-5 为一球形浮子潜在静止液体中的情况。作用于球体的总压力 P 可分解为水平力 P_x 、 P_y 和铅垂分力 P_z 。

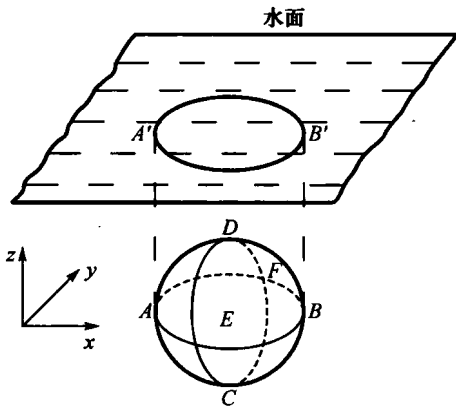


图 1-5

通过球体的最上端和最下端所作的剖面 $CEDF$ ，将球体分为左右两部分。因为左右两部分球体的表面积在铅垂平面 yOz 上的投影面积相等，在液面以下的深度相同，因此作用在球左右两部分表面上的静水总压力沿 x 方向的水平分力 $P_{x左} = P_{x右}$ 。所以水平分力 $P_x = P_{x左} - P_{x右} = 0$ ，同理得 $P_y = 0$ 。

通过球体的最左端和最右端所作的平面 $AEBF$ ，将球体分成上下两部分。作用在上半曲面 $AEBFD$ 上的铅垂分力为 $P_{z上} = \rho g \times$ 压力体 $AADB'B'A'$ 的体积，方向铅垂向下；作用在下半部曲面 $AEBFC$ 上的铅垂分力

为 $P_{z下} = \rho g \times$ 压力体 $ACBB'A'$ 的体积，方向铅垂向上，则作用在球体表面上的铅垂分力为

$$P_z = P_{z下} - P_{z上} = \rho g \times V_{\text{压力体}ACBB'A'} - V_{\text{压力体}AADB'B'A'} = \rho g \times V_{\text{球}ABDC}$$

即

$$P_z = \rho g V \quad (1-17)$$

式中 V 为球体淹没在液体中的体积。

式 (1-17) 表明：作用在物体表面上的静水总压力的铅垂分为 P_z ，等于该物体在液体中排开的同体积的液重，其方向铅垂向上。此处的力 P_z 就是物体在液体中受到的浮力。即物体在静止液体中所受浮力的大小等于它所排开的同体积的液重，这就是著名的阿基米德定律。

该结论虽然是从球体这种特殊情况得出的，但对几何形状不规则的物体，或物体只有一部分浸在液体中的情况仍然适用。总而言之，浸没在流体中或漂浮在液体中的任何重物都受到与它所排开的流体的质量相等的浮力的作用。浮力作用的点，称为浮心，它位于被排开的流体的重心。

液体静压力和浮力的基本概念同样适用于气体。

第三节 流量测量基本方程

一、流量的定义和单位

单位时间内流过管道或设备的流体体积或质量称之为流量。它们有体积流量和质量流量之分。体积流量常用 q_v 表示, 质量流量用 q_m 表示, 即

$$\text{体积流量} = \frac{\text{体积}}{\text{时间}} \quad \text{或} \quad q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \text{和} \quad q_v = \frac{dV}{dt} \quad (1-18)$$

$$\text{质量流量} = \frac{\text{质量}}{\text{时间}} \quad \text{或} \quad q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad \text{和} \quad q_m = \frac{dm}{dt} \quad (1-19)$$

体积流量的 SI 单位为 m^3/s , 由于该单位很大, 流量测量中通常采用 m^3/h 或 L/min 。质量流量的 SI 单位是 kg/s 或 kg/h 。

体积流量定义为, 设流体流过某一微小体积 $d^2V = dl \times dA$ 的微流量为 dq_v , 其中 dA 是流体通过的微截面积元, dl 是流体流过的微长度。这时相应的体积流量是速度和面积的乘积, 即

$$dq_v = \frac{d^2V}{dt} = \frac{dl}{dt} dA = v \cdot dA \quad (1-20)$$

若要求取某一截面上流过的流量, 则可通过对流过截面的积分得

$$q_v = \int_0^A dq_v = \int_0^A v \cdot dA \quad (1-21)$$

这里, v 是截面积位置的函数, 即各点位置上的流速不同。若各点的流速为常数, 那么体积流量可表示为

$$q_v = v \cdot A \quad (1-22)$$

在工业过程中流体在管道内流动的速度各不相同, 但绝大多数流体的流速变化极其缓慢。

据此, 引入平均流速的概念, 即 $v = \frac{q_v}{A}$, 这里的 q_v 是平均体积流量。

质量流量为体积流量和密度的乘积, 即

$$q_m = \rho \cdot q_v \quad (1-23)$$

上述的 q_v 和 q_m 流量称为瞬时流量; 若要求取某一段时间 T 内流经管道的总体积和总质量, 则可由对时间的积分进行累加, 即

$$V = \int_0^T q_v dt \quad (1-24)$$

$$m = \int_0^T q_m dt \quad (1-25)$$

当流体的流速稳定和密度不变时, 总体积和总质量为

$$V = q_v T \quad (1-26)$$

$$m = \rho V \quad (1-27)$$