

液体流量标准装置和 标准表法流量标准装置

段慧明 主编
王自和 主审

中国计量出版社

前 言

为了配合 JJG 164—2000《液体流量标准装置》、JJG 643—2003《标准表法流量标准装置》国家计量检定规程的实施，帮助大家理解其技术要求和检定方法，正确开展液体流量标准装置和标准表法流量标准装置的检定，我们编写了本书。

在本书中，按 JJG 164—2000《液体流量标准装置》国家计量检定规程包括的液体流量标准装置类型，分别介绍了静态质量法液体流量标准装置、动态质量法液体流量标准装置、静态容积法液体流量标准装置、动态容积法液体流量标准装置和启停法液体流量标准装置的原理、结构和检定。

标准表法流量标准装置包括的类型较多，本书以常见的电磁流量计为标准表的液体流量标准装置，临界流流量计为标准表的气体流量标准装置，涡街流量计为标准表的空气流量标准装置为例详细讲述了这一类装置的原理、结构及检定方法。

同时，在本书中介绍了流量计量的基础知识，编者结合个人工作实践中累积的经验，就流量标准装置的相关问题做出相应的归纳和总结。

本书第一章、第二章由徐瑞丰编写，第三章至第七章及第十章由段慧明编写，第八章和第九章由李芳和段慧明共同编写，全书由段慧明统稿。编写过程中得到了开封仪表厂王自和高级工程师的大力帮助，他投入大量的时间和精力，对书稿做了认真的审阅，提出了很多宝贵和中肯的意见。在此，我们对王自和高级工程师深表感谢，对他严谨的作风表示敬佩。正是他的工作，使本书更加严谨，保证了本书的质量和水平。本书编写还得到了中国进出口商品检验总公司张

云鹏高级工程师及北京市计量测试所谢纪绩高级工程师的帮助，中国计量科学研究院热工处王池处长对本书的编写也给予了大力支持，对本书内容和结构安排提出了指导意见，在此一并对他们表示衷心的感谢。

我们在编写过程中尽量保持前后章节间的连贯性和一致，单位和符号使用的统一，说明方法和格式的一致，另外在书末附有有关流量稳定性及相对标准不确定度的符号表，希望对读者阅读使用本书有所帮助。

由于流量标准装置的种类较多，各种装置间差别较大，本书只对几种规程涉及的使用范围较广的典型装置进行了介绍和分析，其他类型装置请读者参照典型装置的方法进行分析。

本书在编写过程中难免有所疏漏，恳请读者批评指正，也欢迎读者就本书内容涉及的问题与我们共同探讨。

作者
2004年4月

目 录

第一篇 流量计量

第一章 概论	(3)
第二章 流量计量基础	(5)
第一节 流体的主要性质	(5)
第二节 流体力学的基本概念	(12)
第三节 流量计量	(22)
第四节 流量标准装置概述	(26)

第二篇 液体流量标准装置

第三章 静态质量法液体流量标准装置	(33)
第一节 静态质量法液体流量标准装置的结构	(33)
第二节 静态质量法液体流量标准装置的工作 原理及试验方法	(41)
第三节 静态质量法液体流量标准装置使用中 相关量的测量和修正	(43)
第四节 静态质量法液体流量标准装置的检定	(46)
第四章 动态质量法液体流量标准装置	(62)
第一节 动态质量法液体流量标准装置的结构、 工作原理和试验方法	(62)
第二节 动态质量法液体流量标准装置的特点	(64)
第三节 动态质量法液体流量标准装置的检定	(64)
第五章 静态容积法液体流量标准装置	(71)
第一节 静态容积法液体流量标准装置的结构、 工作原理和试验方法	(71)

第二节	静态容积法液体流量标准装置的检定·····	(74)
第六章	动态容积法液体流量标准装置 ·····	(86)
第一节	动态容积法液体流量标准装置的结构、 工作原理和试验方法·····	(86)
第二节	动、静态容积法液体流量标准装置的 比较·····	(88)
第三节	动态容积法液体流量标准装置的检定·····	(88)
第七章	启停法液体流量标准装置 ·····	(93)
第一节	水表检定装置的结构和工作原理·····	(93)
第二节	水表检定装置的检定·····	(95)
第八章	标准表法液体流量标准装置 ·····	(103)
第一节	标准表法水流量标准装置的结构·····	(103)
第二节	标准表法水流量标准装置的工作原理·····	(104)
第三节	标准表法水流量标准装置的检定·····	(105)

第三篇 标准表法气体流量标准装置

第九章	临界流流量计为标准表的气体流量标准 装置 ·····	(115)
第一节	标准装置的结构·····	(115)
第二节	标准装置的工作原理·····	(117)
第三节	标准装置的检定·····	(119)
第十章	涡街流量计为标准表的空气流量标准 装置 ·····	(129)
第一节	空气流量标准装置的结构·····	(129)
第二节	空气流量标准装置的工作原理·····	(130)
第三节	空气流量标准装置的检定·····	(131)
附录	有关流量稳定性及相对标准不确定度的符号 ·····	(138)

第一篇 流量计量

本篇第一章介绍了流量计量的发展历程，流量计量在社会生活中的重要性。在第二章中，我们简单介绍了流量计量的相关基础知识，包括流体力学的基础知识，流量计量的基本体系以及流量计和流量标准装置的基本原理和分类。

第一章 概 论

在我们的日常生活中，随时随地都可以见到计量直接或间接起到的重要作用。两千年前，中国第一次达到大一统的时候，中央政府所制定的基本国策中就有统一文字、货币、度量衡（就是现在计量的概念）的说法。可见，计量具有与文字在文化生活中，货币在经济生活中同等重要的地位，它直接关系到人民生活的方方面面，对国家的稳定和繁荣至关重要。

随着社会的不断进步，出现了越来越细致的分工，流量计量作为计量的一个分支，也逐渐建立了自己的理论和标准，成为计量工作的一个重要组成部分。在国外，早在凯撒时代的罗马，就有了使用孔板测量各家各户用水量的记录。

流量计量是一件十分专业化的工作，同时又是一项应用广泛的工作。在现今的世界中，流量计量正延伸至社会的每一个角落，从国际间的石油、天然气贸易到西气东输、南水北调等重点工程，再到各企业的水、气、蒸汽、油料的生产、购买和消耗，以至于每个居民家庭中的饮水、燃气的使用，都直接与流量计量密切相关。如果没有准确可信的流量计量工作，不要说国际贸易中的公开、公平、公正，就是每一个人在日常生活中也会感到无所适从。

所以，建立健全流量计量的国际、国内标准，加强各种流量计量设备的检定和校准，加强流量计量相关人员的培训工作，普及流量计量的基本知识，建立相关的法律法规是十分重要和紧迫的事情。

如今，人类已经进入了信息时代，数字化和全球化的发展要求现代企业具有更高的效率。我国加入世界贸易组织（WTO）后，企业面对的是来自全世界的竞争和机会，无论哪一种壁垒也无法保护我们免于冲击，惟一的途径是加强自己的实力。在企业的现代化过程中，加强流量计量工作、增加流量计量方面的投入十分重要。流量计量对提高物流效率，降低成本，提高劳动生产率，减少不必要的浪费起到关键的作用。

第二章 流量计量基础

第一节 流体的主要性质

在进行流量计量时，流体的各种物理参数会对流动状态判断、体积流量与质量流量换算产生很大影响。通常若不确定流体的相关物理参数，很难得到准确的流量测量值。下面对流量计量中所涉及的常用物理参数作一个简单的介绍。

一、热膨胀系数

流体的体积随温度变化而变化。在大多数情况下，温度升高，流体的体积膨胀，我们用热膨胀系数来表征流体的这种属性。

热膨胀系数：在一定压力下，流体温度每升高 1°C ，流体体积的相对增加量。

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta \theta} \quad (2-1)$$

式中： β ——流体的热膨胀系数， $1/^{\circ}\text{C}$ ；

V ——流体的原有体积， m^3 ；

$\Delta \theta$ ——流体的温度增量， $^{\circ}\text{C}$ ；

ΔV ——流体的体积增量， m^3 。

二、压缩系数

当作用于流体上的压力增加时，流体所占有的体积将缩

小。我们用流体的压缩系数来表征流体的这种属性。

压缩系数：在一定温度下，单位压力增量作用于流体时，流体体积的相对缩小量。

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (2-2)$$

式中： κ ——流体压缩系数， $1/\text{Pa}$ ；

V ——压力 p 时的流体体积， m^3 ；

ΔV ——压力增加 Δp 时流体体积的变化量， m^3 。

当 Δp 为正值时， ΔV 是负值，所以在式(2-2)中有负号，使 κ 为正值。 κ 值的大小反映了流体可压缩性的大小。

三、压缩因子

在规定压力和温度下，任意质量气体的体积与该气体在相同条件下按理想气体定律计算的气体体积的比值：

$$Z = V_{\text{m实际}} / V_{\text{m理想}}$$

$$V_{\text{m理想}} = RT/p$$

$$Z(p, T, y) = pV_{\text{m实际}} / RT$$

式中： p ——绝对压力， Pa ；

T ——热力学温度， K ；

y ——表征气体的一组参数（可以是摩尔全组成，或是一组特征的相关物化性质，或者两者的结合）；

V_{m} ——气体的摩尔体积， m^3/mol ；

R ——通用气体常数， $8.31441 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ；

Z ——压缩因子。

四、密度

对于均匀流体，单位体积内含有的真空质量称为流体的密度。所谓真空质量，是指在空气中称得的流体质量经过空气浮力修正后所得的质量值。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-3)$$

式中： ρ ——流体在工况状态下的密度， kg/m^3 ；
 m ——流体在真空中的质量， kg ；
 V ——流体在工况状态下的体积， m^3 。

对于任意流体，流体内任意点的密度 ρ 为该点流体质量 Δm 与体积 ΔV 之比，即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (2-4)$$

密度的倒数称为比容，含义是单位流体的质量所占的体积，用符号 v 表示。

(一) 液体密度计算

当压力不变，温度不同时：

$$\rho = \rho_{20} [1 - \beta(\theta - 20)] \quad (2-5)$$

式中： ρ ， ρ_{20} ——分别为工况温度时和 20°C 时液体的密度， kg/m^3 ；

β ——液体的热膨胀系数， $1/^\circ\text{C}$ ；

θ ——液体的温度， $^\circ\text{C}$ 。

当温度不变，压力不同时：

$$\rho = \rho_0 [1 + \kappa(p - p_0)] \quad (2-6)$$

式中： p_0 ——标准状态下的压力， 101325Pa ；

ρ ， ρ_0 ——分别为工况压力时和压力为 p_0 时的液体密度， kg/m^3 ；

κ ——液体的体积压缩系数, 1/Pa;

p ——液体的压力, Pa。

当压力变化对流体密度的影响可忽略不计时, 可认为此状态下的液体为不可压缩流体。但在计量准确度要求高时, 不能轻易忽略液体压缩性对流体密度的影响。

(二) 气体密度计算

已知标准状态下的干气体密度, 由气体状态方程可导出在其他工况状态下的干气体密度:

$$\rho = \rho_n \frac{p}{p_n} \frac{T_n Z_n}{T Z} \quad (2-7)$$

式中: ρ, ρ_n ——分别为工况状态下和标准状态下 (293.15K, 101325Pa) 干气体的密度, kg/m^3 ;

p_n, p ——分别为标准状态和工况状态下气体的绝对压力, Pa;

T_n, T ——分别为标准状态下和工况状态下气体的热力学温度, K;

Z_n, Z ——分别为标准状态下和工况状态下的气体压缩因子。

干空气是在标准状态下的理想化空气, 实际工作环境中的空气都是含有一定湿度的空气, 湿空气密度计算公式为

$$\rho = \frac{p_a M_a}{RTZ} \left[1 - X_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (2-8)$$

式中: ρ ——湿空气的密度, kg/m^3 ;

p_a ——实际工作状态下大气压, Pa;

T ——环境热力学温度, K;

R ——通用气体常数, $8.31441 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

M_a ——干空气摩尔质量, $0.0289635 \text{ kg}/\text{mol}$;

M_v ——水蒸气摩尔质量, 0.018015 kg/mol;

X_v ——湿空气中水蒸气的摩尔百分比, %;

Z ——工况下的空气压缩因子。

煤气、天然气等, 是多种气体成分构成的混合气体, 混合气体标准状态下的密度计算:

$$\rho_n = \sum_{i=1}^m \rho_{ni} X_i \quad (2-9)$$

式中: m ——混合气体成分数;

ρ_{ni} ——第 i 种气体成分在标准状态(293.15 K, 101325 Pa)下的密度, kg/m³;

X_i ——第 i 种气体占混合气体的容积比, %。

混合气体其他状态下密度按式(2-7)计算。

五、粘度与运动粘度

流体本身阻滞其质点相对滑动的性质称为流体的粘性。当流体在管道内流动时, 紧贴管壁的流体将被粘附于管壁上, 而管中心的流体则以一定速度流动。所以, 由于粘性力的作用, 管内流体将形成一定规律的速度分布。

在流体运动中, 阻滞剪切变形的粘性力与流体的速度梯度和接触面积成正比, 且与流体的性质有关:

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (2-10)$$

式中: F ——流体的粘性力, N;

$\frac{du}{dy}$ ——流体垂直于速度方向的速度变化率, 1/s;

A ——接触面积, m²;

μ ——流体的动力粘度(简称粘度), Pa·s。

流体的动力粘度 μ 与密度 ρ 的比值称为运动粘度。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

式中： ν ——流体的运动粘度， m^2/s 。

对于液体，通常温度上升，因液体内聚力减小而粘度减小，粘度只有在很高压力下才需要进行压力校正。

液体粘度 μ 与温度 T 之间的关系为

$$\mu = a \cdot e^{\left(\frac{b}{T-c}\right)} \quad (2-11)$$

式中： a, b, c ——均由流体性质确定的常数。

在 $(20 \sim 80)^\circ\text{C}$ 温度范围内，液体粘度与温度的关系式为

$$\mu_t = \mu_{20} \cdot e^{-\lambda(\theta - \theta_{20})} \quad (2-12)$$

式中： θ ——工况状态下的介质温度， $^\circ\text{C}$ ；

θ_{20} ——标准状态下的介质温度， $^\circ\text{C}$ ；

μ_t —— θ 时的介质粘度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ；

μ_{20} —— θ_{20} 时的介质粘度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ；

λ ——介质的粘温系数， $1/^\circ\text{C}$ 。

对于气体，当温度上升时，因气体分子运动加剧而粘度增大，粘度与压力关系十分密切。

气体的粘度通常是随着绝对温度的平方根成正比增加的。对于混合气体的粘度，可在已知各成分气体的摩尔百分比及相应粘度下计算：

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i X_i \sqrt{M_i})}{\sum_{i=1}^n (X_i \sqrt{M_i})} \quad (2-13)$$

式中： μ ——混合气体的粘度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ；

μ_i ——第 i 成分的气体粘度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ；

X_i ——第 i 成分的气体摩尔百分比, %;

M_i ——第 i 成分气体的摩尔质量, kg/mol。

六、比热容

比热容描述单位质量流体温度变化 1°C 所吸入或放出热量。

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad (2-14)$$

式中: c ——比热容, J/(kg·K);

m ——流体质量, kg;

dQ ——吸入或放出的热量, J;

dT ——物体温度的变化量, K。

流体的比热容与热力学状态改变的过程有关。在工程上常用的有定压比热容和定容比热容。

(一) 定压比热容

在压力不变的条件下, 单位质量流体发生单位温度变化时吸收或放出的热量。

(二) 定容比热容

在容积不变的条件下, 单位质量流体发生单位温度变化时吸收或放出的热量。

七、气体的等熵指数

设气体的热力过程为等熵膨胀的过程, 则压力 p 与体积 V 的关系式为

$$pV^\kappa = C \quad (2-15)$$

式中: κ ——等熵指数;

C ——常数。

当被测气体服从理想气体定律时, 等熵指数 κ 等于定

压比热容 c_p 与定容比热容 c_v 之比。

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (2-16)$$

实际气体的等熵指数 κ 按下式计算。

$$\kappa = \frac{\rho}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s \quad (2-17)$$

式中： ρ ——密度， kg/m^3 ；

p ——压力，Pa；

S ——等熵过程。

第二节 流体力学的基本概念

一、层流、紊流、雷诺数

流体在管道中通常呈现两种截然不同的形态。当流体流速缓慢时，流体质点互不干扰，有条不紊地向前流动。此时，流体在管道中沿管轴方向流动，质点没有径向交换的运动，此时的流体形态称为层流。在层流中，流体流量与压力降成正比。

当流体流速逐渐增大时，流体横向脉动加剧，质点互相掺混，杂乱无章地向前运动。流体质点此时有大量的极不规则的交换掺混，运动极为复杂，质点速度的大小和方向都随时间而改变，此时的流体形态称为紊流。在紊流中，流量与压力降的平方根成正比。

研究表明，对于不同的流体，从层流状态到紊流状态转变的界限不仅与流体的流速有关，而且与流体的粘度和管径有关。为此，我们引入一个无量纲量——雷诺数，作为判断的依据。当流体在圆形管路流动时，雷诺数用下式表示：