

王自和

范砧 编著

气体流量标准装置

(修订版)



中国计量学会
China Metrology Society



气体流量标准装置

(修订版)

王自和 范 砧 编著

中国计量出版社

10
W4520

图书在版编目(CIP)数据

气体流量标准装置/王自和,范砧编著.—2版(修订本).
北京:中国计量出版社,2005.8

ISBN 7-5026-2174-1

I.气… II.王… III.气体流量计 IV.TH814

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 064073 号

内 容 提 要

本书简要阐述气体流量计量基础知识,各种气体流量标准装置的结构、原理、特点、检定和误差处理方法等,并列举各种实例供读者参考使用。

本书可供从事流量计量工作的工程技术人员、检修人员及管理人员参考使用。

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

*

787mm×1092mm 32 开本 印张 10.5 字数 236 千字

2005 年 9 月第 2 版 2005 年 9 月第 2 次印刷

*

印数 1 501—3 500 定价:30.00 元

再版说明

本书这次再版,原版的主要内容没有改动,对新的技术法规涉及的内容进行了更新,还订正了一些印刷上的错误和某些疏漏。由于本书初版以来,随着技术的发展,我国的气体流量标准装置新添了活塞式和标准表法两种,特别是后者,近几年使用很普遍,因此在这次再版中,在书的最后补充了第五节“活塞式气体流量标准装置”和第六节“标准表法气体流量标准装置”。

本书初版时,我国流量计量专业对检定结果处理还只是使用误差分析。1999年我国颁布了JJF1059—1999《测量不确定度评定与表示》。有关测量不确定度的内容,读者可参阅中国计量出版社出版的这方面的专著《流量测量不确定度分析》。

这次再版,错误仍然难免,敬请读者指正。

编 者

2005年4月

初版前言

我国已经颁布或即将颁布各种有关气体流量标准装置的检定规程,这些气体流量标准装置有:钟罩式、 $pVTt$ 法、皂膜式、速度面积法和称量法等。因为流量是导出量,流量计量是动态计量,气体流量计量由于受其压缩性和热膨胀性影响大是较液体更为复杂的计量,所以,要保证气体流量标准装置的准确、可靠,以统一全国气体流量量值,就要求计量检定人员有较深的基础知识和较高的技术水平,才能准确理解检定规程并严格执行检定规程。为了帮助广大计量检定人员深刻理解和正确贯彻执行相关检定规程和标准,我们编写了这本书。

在编写过程中,我们遵循着两个原则。第一个原则是理论与实际相结合,本书既不写纯理论,又不只罗列实际应用。第二个原则是内容新,这又包含两种意义,一是本书围绕着检定规程的内容,而不重复检定规程的内容;二是在前人成就的基础上,尽量写出我们几十年的工作经验和研究成果,其他书有的内容,本书尽量简炼或加进自己的见解,其他书没有的内容,才详尽介绍。按照这两个原则,我们在第一章中介绍了气体流量计量常用的几个方程,如状态方程、能量方程等。本书只写出这些方程,而不写理论推导,以避免重复各有关教科书。在第二章中,介绍了气体流量计量和其标准装置的特点、要求和类型等。在第三章到第五章中,介绍了各种气体流量标准装置,特别对我国目前大量使用的钟罩式和较多使用的 $pVTt$ 法,有详细的介绍,内容包括结构、原理、检定、设计要求、各种问题的分析和检定规程中各规定的由来等。我们的意图是:使读者不仅知其然,还要知其所以然,不仅计量检定

人员能读,有关科研人员、大专院校师生、工程设计技术人员也能读。为了帮助读者加深理解,书中列举了适量的例题。书后附有本书使用的符号表,以方便阅读。

本书由国家水大流量计量站王自和高级工程师和华北石油管理局范砧高级工程师编写,其中第一章由范砧执笔编写,其他均由王自和执笔编写。全书由王自和统稿。

本书在编写过程中,始终得到国家技术监督局李洪岭高级工程师的指导和帮助,也得到编者所在单位和各方面的支持,我们谨在此一并致谢。

我们都长期在计量科学研究单位从事流量计量工作,希望这本书对我们所热爱的流量计量事业有所贡献。不过,由于我们水平有限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

1993年2月

目 录

第一章 气体流量计量基础知识	(1)
第一节 连续性方程	(1)
第二节 未压缩气体能量方程	(5)
第三节 状态方程	(15)
第四节 绝热方程	(21)
第五节 可压缩气体能量方程	(32)
第二章 气体和气体装置	(40)
第一节 气体和气体装置的特点	(40)
第二节 检定用气体	(42)
第三节 对气体装置的一般要求	(43)
第四节 气体装置的种类	(47)
第三章 钟罩式气体流量标准装置	(48)
第一节 典型装置的结构和工作原理	(48)
第二节 检定时气流方向	(53)
第三节 钟罩内压和压力补偿	(59)
第四节 钟罩容积的读出方法和读数机构	(72)
第五节 密封液和液槽	(78)
第六节 气体参数和检定时间检测	(82)
第七节 钟罩标准容积的标定	(83)
第四章 pVT_t 法气体流量标准装置	(109)
第一节 概述	(109)
第二节 高压进气式 pVT_t 法装置的结构	(115)
第三节 高压进气式 pVT_t 法装置的工作原理	(138)
第四节 常压进气式 pVT_t 法装置	(172)

第五节	排气式 pVT_t 法装置	(183)
第六节	检定方法	(196)
附 录	第四章实用公式汇总表	(240)
第五章	其他气体流量标准装置	(246)
第一节	皂膜式气体流量标准装置	(246)
第二节	速度面积法气体流量标准装置	(263)
第三节	称量法气体流量标准装置	(285)
第四节	蒸汽流量标准装置	(301)
第五节	活塞式气体流量标准装置	(305)
第六节	标准表法气体流量标准装置	(312)
附录	本书使用的主要符号表	(322)
参考文献		(325)

第一章 气体流量计量基础知识

本章重点介绍气体连续性方程、能量方程和绝热方程的形式、意义和应用,为下面各章奠定基础。

第一节 连续性方程

一、基本概念

(一)流体

不能保持一定的形状、具有很大流动性的液体和气体,统称为流体。服从牛顿内摩擦定律^①的流体,称作牛顿流体。一般说来,液体的分子距很小,能形成自由表面;而气体分子距很大,不能形成自由表面。在气体流量计量中,经常遇到的是空气、煤气和天然气。这些气体的组份中,主要是氮气、氢气和甲烷。氮气、氢气和甲烷是纯气体,而空气、煤气和天然气则是混合气体。

(二)连续性

就是将真正的流体看成是由无限多流体质点所组成的稠密而无间隙的连续介质,这就叫做流体的连续性。它是欧拉(Euler)于1753年首先提出的基本假设,其真实性是相对的。例如,在0℃和101 325Pa下在1mm³的气体中有 2.7×10^{16} 个

^① 牛顿内摩擦定律:牛顿(Newton)于1686年阐述流体作层状运动时,其内摩擦力与速度梯度和接触面积成正比;与流体性质有关,而与接触面上的压力无关。

分子,而在 1mm^3 的液体中有 3×10^{21} 个分子,由此可见分子本身和分子距是极其微小的,忽略分子间隙是有根据的。但在高真空的真空泵中,当温度为 20°C ,绝对压力为 $133.336 \times 10^{-3}\text{Pa}$ (即为 $1 \times 10^{-3}\text{Torr}$)时,其分子距约为 4.5mm ,这当然就不能把真空泵中的气体看成是连续介质了。

(三)定常流

充满运动流体的空间是流场。流体的速度、加速度、密度和粘度等统称为运动参数。如果流动场中流体的运动参数只随位置改变而与时间无关,即在流场中的某一确定点流体的运动参数不随时间而显著变化,则把这种流动称为定常流,也叫恒定流或稳定流。

(四)总流

流场中流体质点在一段时间内运动的轨迹线是迹线。流场中某一瞬间的一条空间曲线,在该线上各点的流体质点所具有的速度方向与曲线在该点的切线方向重合,这条空间曲线称为流线。定常流中同一点的流线始终保持不变,且流线上质点的迹线与流线重合,即定常流中流线上的质点是沿流线运动的。流线不能相交,也不能折转。在流场中画一封闭曲线 C (不是流线),经过 C 上的每一点作流线,由这许多流线所围成的管就称为流管。定常流的流管形状不随时间改变,流体不能穿出或穿入流管表面。充满在流管中的运动流体(即管内流线的总体)称为流束。横断面无穷小的流束称为微小流束或元流。

总流是无数微小流束的总和,如水管及风管中的水流总体及气流总体。

与微小流束或总流各流线相垂直的横断面,称为有效断面,也叫过流断面。在实际运用上,对于流线呈平行直线的情况,有效断面可定义为与流体运动方向垂直的横断面,该断面

为平面。

(五)流量、平均流速与密度

1. 流量

单位时间内流过管道横截面或明渠断面的流体量,称为流量。流体量以质量表示时称为“质量流量”,流体量以体积表示时称“体积流量”。

2. 平均流速

由于实际流体有粘性,任一有效断面上各点速度大小不等。由实验可知:总流有效断面上速度分布呈曲线图形,边界处速度为零,管轴处速度最大。流量与有效断面面积的比值就是平均流速。工程上就用平均流速代表管道中流体的速度。

3. 密度

均质流体的质量与其体积之比值,称密度。气体的密度取决于其种类、温度和压力。常用气体的密度与温度、压力的关系可用数表、图形或经验公式表示。

二、气体连续性方程

在大多数实际气体流动中,介质是连续的。在定常流的条件下,根据所研究气流在一定空间中的质量平衡,可先得到元流的连续方程式,再将其积分,即得总流的连续方程

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

$$\text{或} \quad \rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad (1-2)$$

式中: q_m —— 气体质量流量, kg/s;

ρ —— 气体密度, kg/m³;

v —— 气体平均流速, m/s;

A —— 有效断面面积, m²。

脚标 1 和 2, 分别表示有效断面 1-1 和 2-2(下同)。

式(1-1)及(1-2)表明:气流为定常流时,在各有效断面处的质量流量均相等。

例 1-1 如图 1-1 有一圆形气管,在断面 1-1 处,内直径 $d_1 = 300\text{mm}$,平均流速 $v_1 = 0.15\text{m/s}$;在断面 2-2 处,内直径 $d_2 = 280\text{mm}$,假定密度不变,求在断面 2-2 处的平均流速 v_2 。

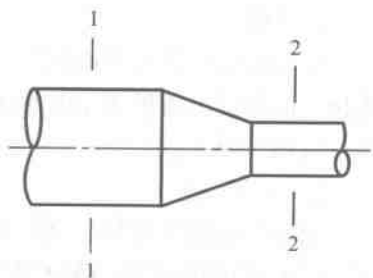


图 1-1 变径气管

解:由式(1-2)

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2$$

且

$$\rho_1 = \rho_2$$

所以

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

$$\begin{aligned} v_2 &= \frac{v_1 A_1}{A_2} = v_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \\ &= 0.15 \times \left(\frac{0.301}{0.280} \right)^2 = 0.17 (\text{m/s}) \end{aligned}$$

例 1-2 有一圆形通风管道,直径 $d = 0.4\text{m}$,若管内风速 $v = 5.0\text{m/s}$,空气密度 $\rho = 1.29\text{kg/m}^3$ 。试求管内空气的质量流量。

解:由式(1-1)和(1-2)得

$$\begin{aligned} q_m &= \rho v A = 1.29 \times 5.0 \times \left(\frac{0.4}{2} \right)^2 \pi \\ &= 0.81 (\text{kg/s}) \end{aligned}$$

例 1-3 如图 1-2 所示,高压蒸汽

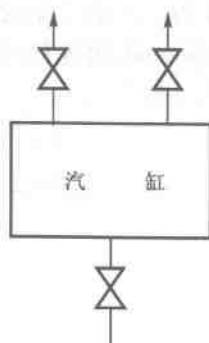


图 1-2

沿汽缸的两支管流出,质量流量 $q_{m1} = 0.14\text{kg/s}$, $q_{m2} = 0.42\text{kg/s}$, 流速 $v_1 = v_2 = 25\text{m/s}$, 蒸汽密度 $\rho = 2.62\text{kg/m}^3$ 。试求两支管的直径。

解:在第 1 支管内

$$\rho_1 v_1 A_1 = q_{m1}$$

$$\rho_1 v_1 \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 \pi = q_{m1}$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } d_1 &= 2 \sqrt{\frac{q_{m1}}{\rho_1 v_1 \pi}} = \sqrt{\frac{0.14}{2.62 \times 25 \pi}} \times 2 \\ &= 0.052(\text{m}) \end{aligned}$$

对第 2 支管,有

$$\begin{aligned} d_2 &= 2 \sqrt{\frac{q_{m2}}{\rho_2 v_2 \pi}} = 2 \sqrt{\frac{0.42}{2.62 \times 25 \pi}} \\ &= 0.090(\text{m}) \end{aligned}$$

第二节 未压缩气体能量方程

流动时没有粘滞性的一种抽象流体,称作理想流体。客观存在的、不能忽略粘滞性的流体,称作实际流体。

如图 1-3 所示,在 A, C 区,流线为接近平行的直线,流体各点只受重力作用的流体,称作渐变流;而在 B 区,流线离开边界且明显弯曲,流体各点除受重力作用外,还受向心力作用,这种流动称作急变流。

流动能量方程也叫伯努利

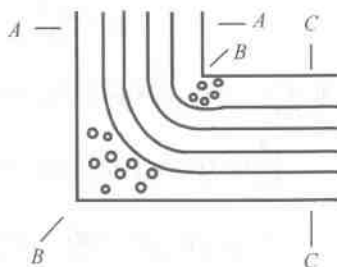


图 1-3 渐变流与急变流

(Bernoulli)方程,推导未压缩(忽略密度随压力的变化)实际气体定常总流能量方程的思路:在理想定常渐变流流段上,任取两个有效断面及水平基准面,从功能原理出发,考察该未压缩元流段动能的变化,所有外力(重力和压力,暂不考虑阻力)对该元流段做功的总和,从而得到理想流体元流的能量方程式。进一步考虑粘性力对实际流体作的负功,可得到实际流体元流的能量方程式。将实际流体断面1-1及2-2之间的所有元流段在时间间隔 dt 内的动能变化积分,同时将作用于这些元流段上的所有外力作的功也积分,两个积分结果相等,从而推导出实际流体总流的能量方程式。再忽略气体作的重力功和有效断面上流速分布的不均匀性,最后得到实际未压缩气体总流的能量方程式:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_w \quad (1-3)$$

式中: p ——有效断面处的绝对静压力,Pa;

h_w ——有效断面1-1及2-2之间的气体粘滞损失水头,m;

g ——当地重力加速度, m/s^2 。

如将式(1-3)变为

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_w \quad (1-4)$$

则, $\frac{p}{\rho g}$ 称为有效断面上该点的压强水头;

$\frac{v^2}{2g}$ 称为有效断面上该点的流速水头。

在通风工程中常称 p 为静压, $\frac{\rho v^2}{2}$ 为动压, $(p + \frac{\rho v^2}{2})$ 为全压, $\rho g h_w$ 为压头损失。

上述能量方程的适用条件:所研究的有效断面须处在定

常流的渐变流中,且注意两有效断面间沿程各处的质量流量、重力加速度和密度不得改变。

式(1-3)表明:有效断面 1-1 处压强水头与流速水头之和等于有效断面 2-2 处压强水头、流速水头及两断面间粘滞损失水头三者总和。

式(1-4)则表明:有效断面 1-1 的全压等于有效断面 2-2 处全压与压头损失之和。

例 1-4 有一水平输气圆管,内径为 300mm,气体密度为 1.29kg/m^3 。在断面 1-1 处绝对压力为 0.15MPa,流速为 3.0m/s;在断面 2-2 处的绝对压力为 0.14MPa,若不考虑压头损失,求该断面处气体的体积流量。

解:由式(1-4)

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_w$$

代入已知数据,得

$$\begin{aligned} 0.15 \times 10^6 + \frac{1.29 \times 3.0^2}{2} \\ = 0.14 \times 10^6 + \frac{1.29 v_2^2}{2} + 0 \end{aligned}$$

$$v_2 = 125(\text{m/s})$$

$$q_{V2} = v_2 A_2 = 125 \times \left(\frac{0.300}{2} \right)^2 \pi = 8.8(\text{m}^3/\text{s})$$

例 1-5 有一由细渐变粗的水平通风管道,已知在断面 1-1 处,静压力为 1470Pa,流速为 15m/s,密度为 1.27kg/m^3 ;在断面 2-2 处,静压力为 1373Pa,流速为 10m/s,密度仍为 1.27kg/m^3 。当地重力加速度为 9.80096m/s^2 。计算克服阻力的压头损失和粘滞水头损失。

解:代入
$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_w$$

$$101\,325 + 1470 + \frac{1.27 \times 15^2}{2}$$

$$= (101\,325 + 1373) + \frac{1.27 \times 10^2}{2} + \rho g h_w$$

所以 $\rho g h_w = 177 \text{ Pa}$

$$h_w = \frac{177}{1.27 \times 9.800\,96} = 14.2 (\text{m}) (\text{气柱})$$

压头损失为 177Pa; 粘滞水头损失为 14.2m。

总水头损失: 在均匀流管段内, 总水头损失等于沿程水头损失 ($\sum h_f$) 与局部水头损失 ($\sum h_j$) 之和。即

$$h_w = \sum h_f + \sum h_j \quad (1-5)$$

沿程水头损失可按下式计算:

$$h_f = \frac{\lambda L}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (1-6)$$

式中: h_f ——圆管压力均匀流段的沿程水头损失(气柱), m;

L ——流段的长度, m;

d ——流段的直径, m;

v ——流速, m/s;

λ ——沿程阻力系数。

λ 值的计算方法较多, 这里只介绍一种常用的方法, 先提出粘度和雷诺数两个概念作为准备。

从牛顿内摩擦定律知道, 流体作层状运动时, 其内摩擦力与流体的性质有关, 体现流体这种性质的物理量就称为动力粘度, 它的单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。气体的动力粘度取决于气体种类、温度与压力。在常压下, 当温度 $T(\text{K})$ 已知时, 纯气体的动力粘度 $\mu_T (\text{Pa} \cdot \text{s})$, 可按下面的经验公式计算:

$$\mu_T = \mu_0 \left(\frac{T}{273.15} \right)^m \quad (1-7)$$

式中: μ_0 ——在 273.15K 时介质的动力粘度 $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

m ——经验指数。

表 1-1 常压下纯气体的 μ_n 和 m 值

气体	H ₂	CH ₄	N ₂	CO	CO ₂	O ₂	空气
$\mu_0 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$	8.355	10.395	16.671	16.573	14.024	19.417	17.162
m	0.678	0.76	0.68	0.695	0.82	0.693	0.683

常压下混合气体的动力粘度 $\mu_{\text{混}}$ (Pa·s)按下式计算:

$$\mu_{\text{混}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu_i (M_i)^{1/2}}{\sum_{i=1}^n x_i (M_i)^{1/2}} \quad (1-8)$$

其中,

$$x_i = \frac{\frac{V_i}{z_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{z_i}}$$

式中: μ_i ——组分 i 在常压下的动力粘度, Pa·s;

x_i ——组分 i 的分子份数;

V_i ——组分 i 在 0℃、101 325 Pa 下的分体积, m³;

z_i ——组分 i 在 0℃、101 325 Pa 下的压缩因子(将在后面介绍);

M_i ——组分 i 的千摩质量, kg/k mol。

流体运动粘度等于动力粘度与流体密度的比值:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

式中: ν ——流体的运动粘度, m²/s。

混合气体的运动粘度可仿照式(1-8)计算,只是用 ν 替代 μ 即可。

观察流体流动,若流体质点互不干扰,有条不紊地向前流动,称这种流型态为层流;若流体质点互相掺混,杂乱无章地向前流动,称这种流型态为紊流。定量判定流态是层流或是