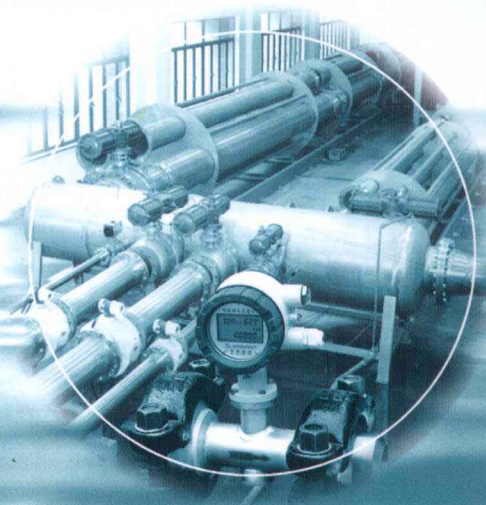


流量检测技术

● 苏彦勋 杨有涛 编著

LIULIANG JIANCE JISHU



 中国质检出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

流量检测技术/苏彦勋, 杨有涛编著. —北京: 中国质检出版社, 2012
ISBN 978-7-5026-3591-6

I. ①流… II. ①苏…②杨… III. ①流量测量 IV. ①TH814

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 055178 号

内 容 提 要

本书主要阐述了流量计量基础理论知识、各种流量计及检测装置的结构、工作原理、特点、检测方法、不确定度评定以及对检测装置的工艺要求和关键部件设计计算原则等, 并列举各种类型的应用实例。

本书适合于从事流量计量、检测、维修的工程技术和管理人员使用。

中国质检出版社出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100013)

北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: www.spc.net.cn

总编室: (010)64275323 发行中心: (010)51780235

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 23.75 字数 580 千字

2012 年 8 月第一版 2012 年 8 月第一次印刷

*

定价 68.00 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

节能降耗是当今社会和时代发展的迫切要求。开展节能降耗，首先要求量化能量和损耗，即采用计量器具准确地计量能源消耗，要依据计量器具所提供的数据来计算和考核能耗，依靠计量结果来科学管理，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手段。

据目前国内调研分析和科技人员的反映，计量科研企事业单位急需充实有关流量检测技术方面的系统知识。但目前这方面的书籍还非常匮乏，因此，我们撰写了《流量检测技术》一书，希望能够满足读者的实际需求，对他们的日常工作能有所帮助。

本书内容包括与流量测量仪表和装置有关的基础知识、结构原理、计量检测方法、检测项目注意事项、型式评定试验、安装使用及维修等内容。还对相关检测装置的工艺设计和相关关键部件的设计计算方法作了重点的论述，可以说书中大部分内容是对作者多年来从事科研测试设计、教学实践成果的总结概括、继承和发展，深入浅出、通俗易懂、针对性和指导性较强，是从事计量、测试工作的技术人员和设计院所科研人员的一本实用技术书籍。

本书由中国计量科学研究院苏彦勋、北京市计量检测科学研究院杨有涛编著。其中，第一章，第七章，第三章第七、八节和第四章第八节由杨有涛撰写，其余各章节均由苏彦勋撰写。全书由杨有涛统稿，苏彦勋审定。

本书可供从事流量检测工作的技术人员，高等院校自动化、化工等专业师生，以及科研院所、厂矿企业的工程技术人员参考使用。

本书在编写过程中，得到了作者所在单位、中国质检出版社、北京鑫敏恒汽车销售总公司、中国流量网以及各方面同仁们的耐心帮助和支持，在此一并致谢。

由于作者水平所限，书中难免有不妥之处，恳请读者斧正。

编著者

2012年2月

目 录

第一章 流量检测技术基础	(1)
第一节 流量基本概念	(1)
第二节 流量检测基础	(4)
第二章 流量计检测技术	(18)
第一节 概述	(18)
第二节 流量计的分类	(18)
第三节 流量计检测条件的选择	(19)
第三章 差压式流量计的检测	(21)
第一节 概述	(21)
第二节 标准节流装置的结构和技术要求	(26)
第三节 标准节流装置的安装要求	(36)
第四节 标准节流装置系数的确定及其不确定度	(54)
第五节 差压式流量计的检测	(60)
第六节 浮子流量计的检测	(80)
第七节 V 锥流量计的检测	(98)
第八节 临界流流量计的检测	(103)
第四章 容积式流量计的检测	(108)
第一节 容积式流量计的检测原理和结构	(108)
第二节 凸轮式刮板流量计	(111)
第三节 往复活塞式流量计	(112)
第四节 容积式流量计的特性	(113)
第五节 容积式流量计性能的选择、安装、使用和维护	(117)
第六节 容积式流量计的检测	(122)
第七节 容积式流量计的常见故障及其原因和排除措施	(131)
第八节 气体流量计的检测	(132)
第九节 燃油加油机的检测	(153)
第五章 速度式流量计的检测	(172)
第一节 涡轮流量计的检测	(172)
第二节 电磁流量计的检测	(200)

第三节	超声流量计的检测	(210)
第四节	涡街流量计的检测	(226)
第六章	质量流量计的检测	(251)
第一节	科里奥利力质量流量计的工作原理和结构	(251)
第二节	科里奥利力质量流量计的特点	(252)
第三节	质量流量计的检测方法	(253)
第四节	检测实例	(257)
第七章	水表的检测	(259)
第一节	水表的工作原理和结构	(259)
第二节	水表的检测方法	(272)
第八章	液体流量标准装置的工艺要求和关键部件的设计方法	(277)
第一节	概述	(277)
第二节	水流量标准装置的台位、口径、流速、称量（或容量） 及检测时间	(281)
第三节	液体流量标准装置建立的工艺设计原理图	(283)
第四节	水池（油池）容积的设计确定方法和工艺要求	(285)
第五节	液体流量标准装置泵房土建设计和工艺要求	(287)
第六节	液体流量装置稳压方式的工艺设计和计算方法	(289)
第七节	液体流量装置试验段有关问题的工艺要求和计算	(301)
第八节	换向器有关问题的工艺要求和设计计算方法	(305)
第九节	计量器具的工艺要求和设计理论基础	(313)
第十节	电控的工艺设计和数据采集处理	(321)
第十一节	液体装置的检测方法	(323)
第十二节	液体装置的不确定度评定	(332)
第九章	气体流量标准装置的工艺要求和关键部件的设计方法	(338)
第一节	概述	(338)
第二节	临界流喷嘴法气体流量标准装置	(340)
第三节	pVTt 法气体流量标准装置	(355)
第四节	mt 法气体流量标准装置	(367)
参考文献		(374)

第一章 流量检测技术基础

第一节 流量基本概念

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。当时间很短时，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合。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（ M ）：单位时间内流过某截面的流体的质量，单位： kg/s 。 q_m 表示瞬时质量流量。

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

体积流量（ Q_n ）：换算到标准的压力和温度下的体积流量（标准状态下）。

流量的国际单位是千克/秒（ kg/s ）、立方米/秒（ m^3/s ），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；总量的国际单位是千克（ kg ）、立方米（ m^3 ），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 3%。因此，在测量气体流量时，必须同时测量流体的温度和压力。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、流量检测中常用的流体物理性质

流量检测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，密度是流量检测中较重要，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，则可以表示为

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

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、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）

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

式中 ρ_{20} ——20℃时液体的密度， kg/m^3 ；

α_v ——液体的体膨胀系数， $1/^\circ\text{C}$ ；

t ——液体的工作温度， $^\circ\text{C}$ 。

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， 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。

工作状态下，湿气的密度计算公式为

$$\rho = \rho_n \frac{p - \varphi p_{\max}}{p_n} \frac{T_n}{T} \frac{z_n}{z} + \varphi \rho_{\max} \quad (1-4)$$

式中， φ 、 $p_{\max}$ 、 $\rho_{\max}$ 分别为工作状态下气体的相对湿度、水蒸气最大可能的压力、水蒸气最大可能的密度。

在实际应用中还会经常用到相对密度，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，过去常称作“比重”，事实上比重一词不确切，易混淆单位制，国际和国家相关标准中不使用此术语。

2. 黏度

流体的黏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

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

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/平方米 ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)，即帕斯卡秒 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)；运动黏度的单位为平方米/秒 (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，用式 (1-9) 和式 (1-10)

表示。

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 ——流体的压力变化，Pa；

ΔV ——流体的体积变化， m^3 ；

V ——流体的体积， m^3 。

当流体压力不变时，流体的体积随温度的升高而增大，为流体的膨胀性，用 β 表示：

$$\beta = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1-10)$$

式中 ΔV ——流体的体积变化， m^3 ；

Δt ——流体的温度变化， $^{\circ}\text{C}$ 或 K 。

4. 比热容与比热比

比热容是流体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容积不变的条件下，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 等于气体的比定压热容 c_p 与气体的比定容热容 c_v 的比值。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

如果流体质点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。

第二节 流量检测基础

一、流体静力学

(一) 流体静力学的基本方程式

$$p = p_0 + \rho gh \quad (1-11)$$

式中 p ——静止液体中，任意点的静压力，Pa；

p_0 ——自由表面的压力，Pa；

h ——自由表面的深度，m；

ρ ——液体的密度, kg/m^3 ;

g ——重力加速度, m/s^2 。

式(1-11)只适用于不可压缩流体。用它可求静止液体中任一点的静压力。它表明,在重力作用下的静止液体中,任一点的静压力 p 等于自由表面上的压力 p_0 加上该点距自由表面的深度 h 与液体重度 ρg 的乘积。某点的位置越深,静压力也就越大。

对于一般气体,式(1-11)也完全适用。由于气体密度 ρ 很小,只要高度 h 变化不大, ρgh 就可忽略不计。这时可认为在整个平衡的气体中,压力处处相等。

(二) 阿基米德原理及其实例

1. 阿基米德原理

作用在物体封闭表面上的压力 P 为

$$P = \rho g V \quad (1-12)$$

式中, P 、 ρ 、 V 分别表示作用在物体封闭表面的合力、液体密度、液体中物体的体积。

由式(1-12)可知,该力等于与物体同体积的液体重量,与物体下沉深度无关。 P 永远垂直向上,其作用线通过物体的几何中心。垂直向上的总压力 P 称为浮力。

2. 实例

例1-1:用称量法测量金属量器的容积时,在现场称出水箱内水的质量为 $m_{\text{空}}$ (kg),水温 $t_{\text{水}}$ ($^{\circ}\text{C}$),空气温度 $t_{\text{空}}$ ($^{\circ}\text{C}$)。求水在真空中的质量 $m_{\text{真}}$ (kg)是多少?

解:平衡水箱重量后,测水的重量,衡器平衡时,有

$$m_{\text{空}} g = m_{\text{真}} g - P$$

式中 P ——水箱中水受到的空气浮力, N。

由式(1-12)得

$$P = \rho g V = \left(\frac{m_{\text{真}}}{\rho_{\text{水}}} \right) \rho_{\text{空}} g$$

则

$$m_{\text{空}} g = m_{\text{真}} g - \left(\frac{m_{\text{真}}}{\rho_{\text{水}}} \right) \rho_{\text{空}} g$$

$$m_{\text{真}} = m_{\text{空}} \left(\frac{\rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{水}} - \rho_{\text{空}}} \right) = m_{\text{空}} \left(1 + \frac{\rho_{\text{空}}}{\rho_{\text{水}}} \right)$$

二、流体动力学

(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

由于实际流体有黏性,任一截面上各点流速大小不等,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

$$q_{m1} = q_{m2} \quad (1-13)$$

或

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad (1-14)$$

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

$$p = \frac{2}{3} n \frac{\bar{m} \bar{w}^2}{2} \quad (1-15)$$

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;

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

又知道

$$\frac{\overline{mw^2}}{2} = BT \quad (1-16)$$

式中 T ——热力学温度；

B ——比例常数。

因为 $\rho = \frac{m}{V}$ ，所以由式 (1-14) ~ 式 (1-16) 得

$$\frac{p}{\rho} = \frac{2}{3} \frac{N}{m} BT = \frac{2}{3} N' BT \quad (1-17)$$

式中 N' ——1kg 气体的分子数目。对于一定的气体， N' 为常数。

设 $\frac{2}{3} N' B = R$ ，则

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-18)$$

式中 R ——通用气体常数。

$$R = \frac{pV_m}{T} = \frac{101325 \times 22.414}{273.15 \times 10^3} = 8.31447 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

式中 $V_m = 22.414 \text{ m}^3/\text{kmol}$ (各种气体千摩尔容积)。

式 (1-18) 就是理想气体的状态方程。

若已知气体的摩尔质量 M ，可以证明：

$$R_m = \frac{R}{M} \quad (1-19)$$

式中 R_m ——气体常数， $R_m = 287.08 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

(2) 实际气体的状态方程

对实际气体，将式 (1-18) 写成

$$\frac{p}{\rho} = zRT \quad (1-20)$$

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：

$$\frac{p}{\rho_i} = RT \quad (1-21)$$

按实际气体对待时：

$$\frac{p}{\rho} = zRT \quad (1-22)$$

上两式相除，得

$$z = \frac{\rho_i}{\rho} \quad (1-23)$$

式(1-23)表明:气体压缩系数是一定质量气体的实际体积与“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

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

$$h = u + p/\rho \quad (1-24)$$

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,这是因为比内能是气体温度的单值函数,而 $p/\rho = R_m T$ (状态方程)。对于闭口系统,焓没有除定义式以外的意义。对于开口系统,流动气体的焓可以看作随气体转移的能量,它由两部分组成:一部分是气体的内能;一部分是由气体所在系统作为推动功而支出的能量,有时可把这部分能量称为压力势能或压力能。

3. 热量

仅仅由于温度不同,在系统和外界之间穿过边界而传递的能量称为热量。它是两物体间通过微观的分子运动发生相互作用而传递的能量。

4. 熵

加热、冷却、膨胀和压缩都是热力过程。热力过程可分为可逆过程和不可逆过程。实际进行的热力过程都是不可逆过程。为了研究的方便,取一个理想化的过程,即为可逆过程。该过程具有使一切恢复原状的性质。如传热温差趋于无穷小或作功中摩擦力趋于无穷小时,均可视为可逆过程。

熵是一个由热量和温度导出的状态参数。系统在可逆过程中的微小换热量 δQ 与换热时的热力学温度 T 之比等于熵 S 的全微分,即

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (1-25)$$

所谓等熵流动,就是气体在流动过程中,熵的增量等于零或熵不变化。若在气体流动过程中,是绝热的并且没有或不考虑摩擦生热,就可认为是等熵流动或等熵过程。

以上几个名词,只能说它们的变化量,而不能说它们的绝对量,比如平时说焓多少,是相对于某状态下的焓而言焓的变化量。

5. 方程

取截面1到截面2一段管道为控制面的气流为一个开口系统,根据热力学第一定律,对单位质量的气体:

$$q = \left(\frac{p_2}{\rho_2} - \frac{p_1}{\rho_1} \right) + g(Z_2 - Z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + (u_2 - u_1) + gh_w \quad (1-26)$$

式中 q ——传递进系统的热量；

g ——重力加速度；

Z ——位置高度；

v ——气体流速；

h_w ——摩擦损失水头。

式(1-26)中等号右端第1项为压力能的增加，第2项为位能的增加，第3项为动能的增加，第4项为内能的增加，第5项为摩擦作的功。此式可不考虑过程是否可逆，但应是定常流。

将式(1-26)写成微分形式，并忽略摩擦功，得

$$\delta q = d\left(\frac{p}{\rho}\right) + g dZ + v dv + du \quad (1-27)$$

在流量检测中，常忽略动能项或认为流速不变，即 $dv = 0$ ；位能也常被忽略或认为位置高度不变化。这样，结合式(1-24)，式(1-27)可以写成

$$\delta q = d\left(\frac{p}{\rho} + u\right) = dh \quad (1-28)$$

$$q = h_2 - h_1 \quad (1-29)$$

或

$$Q = mq = m(h_2 - h_1) \quad (1-30)$$

式中 m ——气体质量。

对理想气体，焓是温度的单值函数，所以

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT = c_p dT \quad (1-31)$$

或

$$Q = mc_p(T_2 - T_1) \quad (1-32)$$

式中 c_p ——气体的比定压热容。

由熵的定义式、能量方程和状态方程可以推导出熵与其他状态参数的关系式，但因流量检测中很少用到，此处省略。

例1-2：有一房间，用饱和蒸汽取暖，已知房间暖气管的进口温度为120℃，出口温度为100℃，饱和蒸汽流量计的质量流量为288kg/h。求1h房间获得的热量，并求功率。

解：式(1-30)是热进入系统（系统吸热），而暖气管是放热，所以应变成

$$Q = m(h_1 - h_2)$$

1h流过的蒸汽质量 $m = 288\text{kg}$ 。查饱和蒸汽的焓值表，120℃下， $h_1 = 2706\text{kJ/kg}$ ；100℃下， $h_2 = 2676\text{kJ/kg}$ 。

将以上数据代入上式，算得1h房间获得的热量为

$$Q = 288 \times (2706 - 2676) = 8640\text{kJ}$$

功率为

$$W = \frac{8640}{3600} = 2.4 \text{ kW}$$

(四) 伯努利方程

1. 紊流

与黏性力相比, 惯性力起主要作用的流动称为紊流, 也称湍流。紊流是时间和空间上不规则 (随机) 的速度波动叠加在平均流速上的流动。在气体流量检测中大多属于此种流动。

2. 层流

与惯性力相比, 黏性力起主要作用的流动称为层流。层流是流体的质点作分层运动, 在流层之间不发生混杂的流动。

3. 雷诺数 Re

表示惯性力与黏性力之比的无量纲参数:

$$Re = \frac{vl}{\nu} \quad (1-33)$$

式中 v ——流速, m/s ;

l ——特征尺寸, 对管道常取直径 d 作为特征尺寸, m ;

ν ——运动黏度, m^2/s 。

当管道的直径雷诺数 $Re < 2320$ 时为层流, $Re > 2320$ 时为紊流。

4. 方程

对未压缩流体, 伯努利给出下面的方程:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 + gh_w \quad (1-34)$$

对理想气体, 因无摩擦作功, 则

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 \quad (1-35)$$

此方程的各项分别为压力能、动能、位能, 统称为机械能, 所以此方程可以说是机械能守恒的一种表示式, 它是能量方程中的一种。

式 (1-34) 可以改成

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_w \quad (1-36)$$

式中 $p/\rho g$ ——压力水头 (压头);

$v^2/2g$ ——速度水头 (速度头);

Z ——位置水头 (位头);

h_w ——损失水头。

这是伯努利方程的几何意义。

对水平管道, 式 (1-36) 可以改写成

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_w \quad (1-37)$$

式中 p ——静压；
 $\rho v^2/2$ ——动压；
 $(p + \rho v^2/2)$ ——全压；
 $\rho g h_w$ ——压力损失。

式(1-37)常被称为实际气体的伯努利方程，常用作气体流路的水力计算。
 与液体流量检测中一样，总水头损失等于沿程损失与局部损失之和，即

$$h_w = \sum h_f + \sum h_j \quad (1-38)$$

式中 $\sum h_f$ ——管路中各段沿程损失之和；
 $\sum h_j$ ——管路中各个局部损失之和。

$$h_f = \frac{\lambda L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (1-39)$$

式中 L ——管段的长度；
 d ——管段的直径；
 λ ——沿程阻力系数。

$$h_j = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (1-40)$$

式中 ξ ——局部阻力系数。

ξ 有表可查，这里不再列出。 λ 有几种计算公式，常用的有：
 对层流

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

对紊流

$$\lambda = 0.11 \times \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25}$$

式中 Δ ——管道的当量绝对粗糙度。

例1-3：如图1-1为离心水泵安装示意图。已知数据：吸水管直径 $d = 10\text{cm}$ ，吸水管长度 $l = 20\text{m}$ ；流量 $q_v = 15\text{L/s}$ ，水泵的最大允许真空值 $h_v = 6\text{mH}_2\text{O}$ ，不带阀的滤水网局部阻力系数 $\xi_1 = 6$ ，弯头一个 (90°) $R = 100\text{mm}$ ，摩擦阻力系数 $\lambda = 0.03$ 。求：离心泵安装高度 H ？

解：以水池水面为基准面，列出1-1，2-2断面的伯努利方程：

$$0 + \frac{p_a}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = H + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \left(\lambda \frac{l}{d} + \xi_1 + \xi_2 \right) \frac{v_2^2}{2g}$$

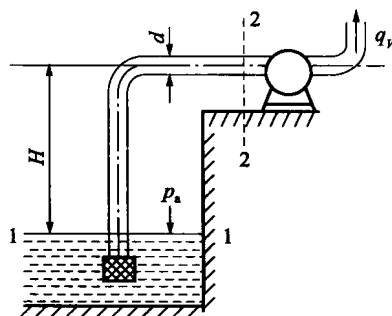


图1-1 离心水泵安装示意图

$$H = \frac{p_a - p_2}{\rho g} - \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \xi_1 + \xi_2 \right) \frac{v_2^2}{2g} + \frac{v_1^2}{2g}$$

由于水池面积很大, v_1 很小, 故可令 $v_1 \approx 0$, 弯头 $\theta = 90^\circ$, $d/R = \frac{100}{100} = 1$, 查表可得 $\xi_2 = 0.291$ 。断面 2-2 处的真空值为

$$h_v = \frac{p_a}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} = 6 \text{ mH}_2\text{O}$$

管中流速为

$$v_2 = q_v / A = 15 \times 10^{-3} / \left(\frac{\pi}{4} \times 0.1^2 \right) = 1.91 \text{ m/s}$$

将数值代入得

$$H = 6 - \left(1 + 0.03 \times \frac{20}{0.1} + 6 + 0.291 \right) \times \frac{1.91^2}{2 \times 9.81} = 3.5 \text{ m}$$

故水泵最大安装高度 H 不得超过 3.5m, 否则将抽不上水或产生气穴空蚀现象。

例 1-4: 在北京有一条用薄钢板制作的圆形通风管道, 内直径为 300mm, 长度为 30m, 管内风速为 15m/s, 空气的运动黏度为 $15.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 密度为 1.20 kg/m^3 。试求沿程阻力系数 λ 、沿程水头损失和压力损失。

解: 将已知数据代入雷诺数定义式:

$$Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{15 \times 0.300}{15.7 \times 10^{-6}} = 2.87 \times 10^5 > 2320$$

气体为紊流。取 $\Delta = 0.15 \text{ mm} = 0.15 \times 10^{-3} \text{ m}$, 则

$$\begin{aligned} \lambda &= 0.11 \times \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} \\ &= 0.11 \times \left(\frac{0.15 \times 10^{-3}}{0.300} + \frac{68}{2.87 \times 10^5} \right)^{0.25} \\ &= 0.0181 \end{aligned}$$

由式 (1-39), 并查得北京的重力加速度为 9.8015 m/s^2 , 得沿程水头损失为

$$h_f = \frac{\lambda L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = \frac{0.0181 \times 30}{0.300} \times \frac{15^2}{2 \times 9.8015} = 20.8 \text{ m}$$

沿程压力损失 p_f 为

$$p_f = \rho g h_f = 1.20 \times 9.8015 \times 20.8 = 245 \text{ Pa}$$

(五) 绝热方程

对于闭口系统, 其系统内的气体质量是不变的, 不管什么变化过程, 前述的状态方程是成立的。如果是等压、等容或等温过程, 从状态方程可以直接获得更简单的关系式。这里只介绍绝热过程。

闭口系统热力学第一定律的解析式: