

常用热工仪表原理及检测技术丛书

流量及分析

Liuliang Ji Fenxi
Yibiao

仪表

● 徐英华 杨有涛 主编
王自和 主审



中国计量出版社
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

常用热工仪表原理及检测技术丛书

流量及分析仪表

徐英华 杨有涛 主编

王自和 主审

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

流量及分析仪表/徐英华, 杨有涛主编. —北京: 中国计量出版社, 2008. 5
(常用热工仪表原理及检测技术丛书)
ISBN 978-7-5026-2884-0

I. 流… II. ①徐…②杨… III. 流量仪表 IV. TH814

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 123313 号

内 容 提 要

本书为《常用热工仪表原理及检测技术丛书》的流量及分析仪表分册。书中介绍了常用的流量及分析仪表, 包括: 差压式流量计、临界流流量计、电磁流量计、涡轮流量计、超声波流量计、涡街流量计、容积式流量计、浮子流量计、质量流量计、热能表、水表、热导式气体分析器、电导式气体分析器、红外线气体分析器、氧自动式分析器的结构原理、检测技术、安装和使用维修等内容。

本书可供热工计量、自动化、冶金、化工等行业中从事流量及分析仪表的设计制造、使用、维修、检定的人员及高等学校有关专业师生参考使用。

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

*

787 mm×1092 mm 16 开本 印张 27.75 字数 638 千字

2008 年 5 月第 1 版 2008 年 5 月第 1 次印刷

*

印数 1—2 000 定价: 69.00 元

本册编审委员会

主 编 徐英华 杨有涛

主 审 王自和

编 委 (按姓氏笔画顺序排列)

王子钢	王东伟	王韞韬	韦 晨	朴奇焕
孙定浩	李 然	张加力	张立谦	张 涛
肖 强	应为忠	吴 海	杨有涛	金美兰
孟 涛	段慧明	徐英华	郭爱华	詹志杰
薛一鸣				

序 言

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。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。能源可分为一次能源，像煤炭、原油和天然气等；二次能源，如电力、人工煤气、成品油和蒸汽等。能源计量是实现能源资源节约、能源科学管理、节能降耗的重要手段。

提倡开展节能降耗，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。要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手段。

随着社会的发展和科学的进步，热工仪表和检测技术在国民经济和科技发展中占有特殊地位。热工仪表参数包括压力测量、温度测量、流量测量和分析仪器参数等。热工仪表检测技术涉及到国防、科研、工农业生产、能源管理、环境保护等各个领域，与我国国民经济发展息息相关。其中的压力、温度、流量和标准物质分析仪器等计量检测技术是能源计量的重要组成部分。

热工仪表是仪器仪表的一个重要组成部分，应用于信号信息的采集，是信息工业的末端、源头。热工仪表的准确性关系到相关产品的质量和产量，对于保证生产正常连续运行，实现安全、高效生产具有重要意义。热工计量不仅涉及到千家万户老百姓的生活，也涉及到供需双方的贸易结算。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。

正确使用和检定热工仪表，保证量值的准确和统一，不仅对于节约能源、提高经济效益具有重要作用，而且与人民利益密切相关。如果热工仪表计量不准确，会直接影响到国家和消费者的利益，同时还会影响到人民的生命、财产安全。

本套丛书分两册，分别为流量及分析仪表分册和温度及压力仪表分册，内容包括热工仪表的分类及测量常识，较全面、系统地介绍了与热工仪表生产测

量中大量应用的温度、压力、流量和成分分析仪表相关的基础知识、结构、工作原理和计量检定方法，检定规程项目注意事项，型式评价试验，热工仪表的优缺点、适用范围及场合，安装、使用及维修等方面的知识，还有相关的热工仪表标准装置及测量不确定度分析等内容。对于近年来生产中采用的新的测量方法和仪表，也作了相应介绍。书中大部分都是取自生产实践中的工作总结，具有较强的指导性和实用性，且通俗易懂。

本书对从事热工仪表研究、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，也可作为有关专业大专院校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

A handwritten signature in black ink, consisting of two characters, '宣' and '海', written in a cursive style.

2008年2月

前 言

随着社会的发展和科学的进步，热工仪表和检测技术在国民经济和科技发展中占有特殊的地位。热工仪表参数包括压力测量、温度测量、流量测量和分析仪器等。热工仪表计量检测技术深入到国防、科研、工农业生产企业、能源管理、环境保护等各个领域，与我国国民经济发展息息相关。其中的压力、温度、流量和标准物质分析仪器等计量检测技术也是能源计量的重要组成部分。能源问题在我国已成为经济发展中的一个突出问题，节约能源已成为重要国策之一。可以说热工参数的计量不仅涉及到千家万户老百姓的生活，也涉及到供需双方的贸易结算。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。因此，对我国国民经济的有效发展，有着极其重要的社会效益和经济效益。

本书主要分为两个部分，第一篇为流量仪表，第二篇为成分分析仪表。该书包括常用仪表的结构原理、检测技术、安装、使用维修等内容，是一本比较系统、全面、实用的计量参考书。适合于从事热工计量、自动化、冶金、化工等行业的工程人员、厂矿企业技术人员等使用。

本书的作者都是设计、生产和计量检定第一线的有丰富经验的高级工程师，书中内容突出了“先进性、实用性”的特点，新颖实用，对于读者了解目前热工仪表的最新技术动态大有裨益。

本书由徐英华、杨有涛统稿，王自和主审。

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

本书可供从事热工仪表科研设计、制造使用、计量检定、安装维修等相关工程技术人员阅读参考。也可作为科研单位从事气体计量检定、维修及热工仪表有关操作人员培训参考教材。

编 者

2008 年 2 月

目 录

第一篇 流量仪表

第一章 流量计量基础 (1)

第一节 流量基本概念 (1)

第二节 流量计量基础 (3)

第三节 流量计量常用的专用 术语 (15)

第二章 差压流量计 (17)

第一节 概述 (17)

第二节 差压流量计的工作原理 (18)

第三节 标准节流装置的结构形 式和技术要求 (20)

第四节 标准节流装置的直管段 要求 (33)

第五节 非标准节流装置 (38)

第六节 各种主要节流装置的性 能比较 (44)

第七节 定制差压流量计的基本 过程 (46)

第八节 差压流量计的维护 (47)

第九节 差压式流量计的检定 ... (52)

第十节 配套仪表维修 (67)

第三章 临界流流量计 (71)

第一节 概述 (71)

第二节 临界流文丘里喷嘴的 结构 (72)

第三节 测量原理 (74)

第四节 临界流文丘里喷嘴的理 想流量公式 (79)

第五节 临界流文丘里喷嘴的实 际流量公式 (81)

第六节 参数修正 (87)

第七节 临界压力比和最大允许 背压比 (91)

第八节 安装要求 (95)

第九节 检定 (98)

第四章 电磁流量计 (101)

第一节 概述 (101)

第二节 电磁流量计工作原理 ... (102)

第三节 结构及功能 (105)

第四节 电磁流量计的检测 (110)

第五节 常见故障及维护 (119)

第五章 涡轮流量计 (121)

第一节 概述 (121)

第二节 测量原理和结构 (122)

第三节 涡轮流量计的数学模型 及流量方程 (130)

第四节 基本参数和性能指标 ... (135)

第五节 涡轮流量计的选型与 安装 (137)

第六节 涡轮流量计的检定 (141)

第七节 涡轮流量计测量不确定 度评定 (150)

第六章 超声流量计 (155)

第一节 概述 (155)

第二节 时差法超声流量计 (160)

第三节 多普勒超声流量计 (166)

第四节 超声明渠 (非满管、暗 渠) 流量计 (168)

第五节 超声气体流量计 (171)

第六节	超声流量计的选型与应用	(173)	第二节	测量原理和流量方程 ...	(281)
第七节	超声流量计故障诊断及处理流程图	(177)	第三节	浮子流量计的结构形式	(283)
第八节	超声流量计的检定	(180)	第四节	浮子流量计的刻度换算和量程换算	(286)
第七章	涡街流量计	(186)	第五节	浮子流量计的特性及选型	(291)
第一节	工作原理	(186)	第六节	浮子流量计的准确度等级	(293)
第二节	结构	(187)	第七节	浮子流量计的检定	(293)
第三节	涡街流量计分类	(190)	第八节	浮子流量计的测量不确定度评定	(301)
第四节	旋涡发生体分类	(190)	第九节	浮子流量计的安装和使用	(305)
第五节	传感器分类及对应流量计介绍	(191)	第十节	浮子流量计的保养和维修	(306)
第六节	涡街流量计优缺点分析	(194)	第十章	质量流量计	(309)
第七节	涡街流量计的选用	(195)	第一节	量热式质量流量计及控制器	(309)
第八节	涡街流量计的安装	(198)	第二节	热功耗式气体质量流量计	(320)
第九节	涡街流量计使用的注意事项	(200)	第三节	科里奥利力式质量流量计	(331)
第十节	旋涡发生体锐缘磨损对测量结果的影响	(201)	第十一章	热能表	(342)
第十一节	涡街流量计的检定 ...	(202)	第一节	概述	(342)
第十二节	涡街流量计的测量不确定度评定	(208)	第二节	组成与工作原理	(343)
第八章	容积式流量计	(213)	第三节	结构和特点	(344)
第一节	概述	(213)	第四节	检测	(345)
第二节	椭圆齿轮流量计	(217)	第五节	安装及故障处理	(352)
第三节	刮板式容积流量计	(220)	第六节	测量结果的不确定度评定	(353)
第四节	腰轮流量计	(225)	第十二章	水表	(364)
第五节	双转子流量计	(236)	第一节	概述	(364)
第六节	活塞式流量计	(238)	第二节	水表的工作原理和结构	(367)
第七节	湿式气体流量计	(240)	第三节	水表的检测	(385)
第八节	膜式燃气表	(243)	第四节	水表示值误差的测量结果不确定度评定	(395)
第九节	气体容积式流量计的检定	(270)			
第十节	液体容积式流量计的检定	(276)			
第九章	浮子流量计	(281)			
第一节	概述	(281)			

第五节 常见故障及维护	(398)	第一节 热导式气体分析器	(403)
		第二节 电导式气体分析器	(408)
		第三节 红外线气体分析器	(411)
		第四节 氧自动式分析器	(419)
第十三章 成分分析仪表	(402)	参考文献	(424)

第二篇 成分分析仪表

第一篇 流量仪表

第一章 流量计量基础

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。

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，则它可以表示为下式：

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

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):

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

式中 ρ_{20} —— 20℃ 时液体的密度, kg/m³;

α —— 液体的体膨胀系数, 1/℃。

应注意的是,虽然一般情况下压力对液体密度的影响很小,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/m³、K、Pa、无量纲。

2. 黏度

流体的黏度是表示流体内部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。

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

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

式中 η —— 流体的动力黏度, Pa·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,其关系式为

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

式中 ν —— 运动黏度, m²/s;

ρ —— 密度, kg/m³。

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:

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

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, 用式 (1-7) 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

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

式中 Δp ——压力的变化, Pa;

ΔV ——体积的变化, m³;

V ——流体的体积, m³。

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, 需要了解这一性质。在工程上, 常用的比热容有定压比热容、定容比热容。

定压比热容用符号 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; 定容比热容用符号 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 γ 等于气体的定压比热容 c_p 与气体的定容比热容 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

如果流体的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。

第二节 流量计量基础

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, 这就称作流体的连续性。当然这只是假设, 但一般情况下可把气体看成连续介质。

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

由于实际气体有黏性，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称作平均流速。

4. 连续性方程

连续性的气体在封闭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（质量守恒定律），即

$$q_{m1} = q_{m2} \quad (1-8)$$

或

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad (1-9)$$

式中 q_m ——气体质量流量；

ρ ——气体密度；

v ——气体平均流速；

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、密度及后面介绍的内能、焓和熵都是状态参数。

2. 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

$$p = \frac{2}{3} n \frac{\bar{m} \cdot \bar{w}^2}{2} \quad (1-10)$$

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；

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

且有：

$$\frac{\bar{m} \cdot \bar{w}^2}{2} = BT \quad (1-11)$$

式中 T ——热力学温度；
 B ——比例常数。

因为
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-12)$$

所以，由式 (1-10) ~ 式 (1-12) 得

$$\frac{p}{\rho} = \frac{2}{3} \frac{N}{m} BT = \frac{2}{3} N' BT \quad (1-13)$$

式中 N' ——1kg 气体的分子数目，对于一定的气体 N' 为常数。

设 $\frac{2}{3} N' B = R_m$ ，则

$$\frac{p}{\rho} = R_m T \quad (1-14)$$

式中 R_m ——气体常数。

式 (1-14) 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：

$$R_m = \frac{R}{M} \quad (1-15)$$

式中 R ——通用气体常数， $R = 8.31451 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = 8314.51 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

(2) 实际气体的状态方程

对实际气体，将式 (1-14) 写成

$$\frac{p}{\rho} = z R_m T \quad (1-16)$$

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：

$$\frac{p}{\rho_i} = R_m T \quad (1-17)$$

按实际气体对待时：

$$\frac{p}{\rho} = z R_m T \quad (1-18)$$

上两式相除，得

$$z = \frac{\rho_i}{\rho} \quad (1-19)$$

式 (1-19) 表明: 气体压缩系数乃为一定质量的气体, 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及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

$$h = u + p/\rho \quad (1-20)$$

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, 另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做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

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (1-21)$$

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. 能量方程

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

$$q = \left(\frac{p_2}{\rho_2} - \frac{p_1}{\rho_1} \right) + g(Z_2 - Z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + (u_2 - u_1) + gh_w \quad (1-22)$$

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 (1-22) 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 项摩擦作的功。此式可不考虑过程是否可逆, 但应是定常流。

式 (1-22) 写成微分形式, 并忽略摩擦功, 则

$$\delta q = d\left(\frac{p}{\rho}\right) + g dZ + v dv + du \quad (1-23)$$

在流量计量中, 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 (1-20) 和式 (1-23) 可以写成

$$\delta q = d\left(\frac{p}{\rho} + u\right) = dh \quad (1-24)$$

$$q = h_2 - h_1 \quad (1-25)$$

$$\text{或} \quad Q = mq = m(h_2 - h_1) \quad (1-26)$$

式中 m ——气体质量。

对理想气体, 焓是温度的单值函数, 所以

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p dT = c_p dT \quad (1-27)$$

$$\text{或} \quad Q = mc_p(T_2 - T_1) \quad (1-28)$$

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, 但因流量计量中很少用到, 此处省略。

例 1-1 有一房间, 用饱和蒸汽取暖, 已知房间暖汽管的进口温度为 120°C , 出口温度为 100°C , 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 (1-26) 是热进入系统 (系统吸热), 而暖汽管是放热, 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°C 时, $h_1 = 2706\text{kJ/kg}$;