

周庆 王磊 R.Haag 编著

实用流量仪表的原理 及其应用

SHIYONG LIULIANG YIBIAO
DE YUANLI JIQI YINGYONG



國防工業出版社

实用流量仪表的原理 及其应用

周庆 王磊 R. Haag 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

实用流量仪表的原理及其应用/周庆等编著. —北京:
国防工业出版社, 2003. 8

ISBN 7-118-03082-1

I. 实... II. 周... III. 流量仪表 IV. TH814

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 110630 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850/1168 1/32 印张 5½ 139 千字

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月北京第 1 次印刷

印数: 1—4000 册 定价: 15.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

内 容 简 介

本书主要介绍当前工业现场常用于液体、气体和蒸汽测量的流量仪表。这些流量仪表包括转子流量仪表、电磁流量仪表、涡街流量仪表、超声波流量仪表和科氏质量流量仪表。流体流量的测量技术是流体物理量测量中最为复杂的一种。从目前国际潮流来看,体积流量的测量采用超声波流量仪表是发展的主流,该流量仪表的销售增长率为同类流量仪表之最。同样,在质量流量测量方面,科氏质量流量仪表与同类流量仪表相比占有绝对的优势。本书用了较大的篇幅对这两种流量仪表进行重点阐述。本书还引入了国外最新的一些流量测量方法,在电磁流量仪表中有电容测量方法、未开管道的流量测量方法和批处理式方法等。在超声波流量仪表中有 3 通道和 5 通道波束的测量方法。在质量流量计中着重介绍单管科氏质量流量仪表的一些具体实施方法。以上这些在国内同类书籍中很少论述。

本书内容:第 1 章是基础知识;第 2 章至第 6 章分别叙述上述几种流量测量仪表的特点、工作原理、流量仪表的结构、选用和实际安装流量计时应注意的问题以及仪表的应用范围,并列举了一些具体应用的实例。本书在选材上吸收了国外的一些最新仪表实例,具有较高的实用价值。

本书可供大专院校和中专学校测量专业的师生参考,特别适用于从事工业过程设计的仪表人员和需使用流量仪表的企业的技术人员和操作人员阅读。

序

在我们日常生活的所有方面,几乎都会遇到对液体、气体以及蒸汽和颗粒状流体的体积流量与质量流量的检测。但在过程控制领域,如化工工业、石油工业、食品和日用品工业、冶金工业和环境保护,流量测量更具有特别重要的含义。在所有这些过程中,要传送液体、气体和颗粒状流体(主要是管道传送),并必须对流过的体积或重量进行连续测量或用容器计量。每个过程在测量精度、分辨率和重复性方面对系统的测量仪器都有一定的要求。这些要求通常用百分比来表示;但对灵敏要求高的过程控制以及贵重的或有毒的材料的计测量必须达到千分之几的精确程度。

另一个重要的应用领域是国家的标准计量,国际上称为“custody transfer”,它对测量和可靠性要求相当苛刻。由于材料的性能(如密度、粘度或导电能力)和环境条件(如温度和错误测量引起结果的不准确)时刻都在变化,要精确地获取测量结果有很大的难度。因此,在应用中选择正确的测量方法具有决定性的作用。

虽然当今的科研人员还在寻找着新的测量原理和方法;或对已有的方法加以改进,以提高测量的精度和降低干扰因素对测量的影响。但是,实践证明现有的标准测量方法都是十分有效和可靠的。

本书是同济大学和生产流量测量仪表的德国 Krohne 测量有限公司共同合作的结晶。它的内容特别适用于两类不同的读者:一类是高等院校的工科学生;另一类为厂矿企业的工程师、技术人员和现场操作人员,尤其是规划、设计和制作过程控制设备的主管工

程师。

通常,根据性能条件和投资成本等因素,要实现对必需的测量系统进行优化选择实属不易,对此,本书可提供一些建议和帮助。

德国波鸿鲁尔大学

电子测量和电子技术教研室

J. Winfried Klein 博士教授

前 言

流体的流量测量已在工业生产中得到广泛的应用,特别是石油化工、食品、医药、煤炭等,并逐渐向民用方向发展,如汽车加油站计量、供水供气和供暖、环境保护等。目前的市场上,按照测量原理、制造工艺和测量用途的不同,已有品种繁多的流量计量仪可供选择。“实用流量仪表的原理及其应用”一书就是为读者在选择流量仪表的类型和了解相应流量计原理和应用实例方面提供一些帮助。

本书共分6章。第1章阐述流体流量测量的基础知识。第2章至第6章分类介绍按不同测量原理设计的流量仪表,包括转子流量计、电磁流量计、涡街流量计、超声波流量计以及科氏质量流量计。书中不但从原理和工艺上对各种流量计加以叙述,而且还指出具体应用中应注意的实际问题,并介绍一些国内外的应用实例。从目前国际潮流来看,体积流量的测量采用超声波流量仪表是发展的主流,该流量仪表的销售增长率为同类流量仪表之最。同样,在质量流量测量方面,科氏质量流量仪表与同类流量仪表相比占有绝对的优势。本书使用了较大的篇幅对这两种流量仪表重点进行阐述。本书还引入了国外最新的一些流量测量方法,在电磁流量仪表中有电容测量方法、未满管道的流量测量方法和批处理式方法等。在超声波流量仪表中有3通道和5通道波束的测量方法。在质量流量计中着重介绍单管科氏质量流量仪表的一些具体实施方法。以上这些内容在国内同类书籍中很少论述。

本书着重理论与实践相结合,以目前较为先进的和在工业界使用广泛的产品为原形,并在选材方面更多采用国外的新产品和新理念,有较高的实用价值。

全书内容通俗易懂,可使读者对流量仪表从理论到实践有系统的了解。本书可供大专院校和中专学校测量专业的师生参考,特别适合于从事工业过程设计仪表人员和需使用流量仪表企业的技术人员和操作人员阅读。

本书在编写过程中得到了德国 KROHNE 测量技术有限公司的支持和帮助,对此谨表衷心的感谢。

限于作者水平,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编著者

2002 年 11 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 流体流量的基础知识	1
1.1.1 流体的一些物理参数	1
1.1.2 流量的基本方程	3
1.1.3 流体的流动形式和流速分布	8
1.2 流量计的主要参数	9
1.3 流量计的分类	12
1.4 流量计的选择和性能比较	13
第2章 转子流量计	18
2.1 引言	18
2.1.1 历史发展状况	19
2.1.2 主要性能	20
2.1.3 应用范围	21
2.2 基本原理	21
2.2.1 流量与密度的关系	21
2.2.2 浮子几何形状对测量的影响	25
2.2.3 流量和显示的关系	26
2.2.4 大雷诺系数时的换算	28
2.2.5 粘度的影响	29
2.3 仪器的实现	31
2.3.1 玻璃测量管道的转子流量计	31
2.3.2 小流量玻璃测量管道转子流量计(DK 系列)	32
2.3.3 塑料测量管道的转子流量计	33
2.3.4 金属测量管道的转子流量计	34

2.3.5 小流量金属测量管道的转子流量计(DK 金属系列)	34
2.3.6 采用导杆浮子的转子流量计(H 系列)	35
2.3.7 短程转子流量计	39
2.4 应用实例	40
2.4.1 轿车车身油漆准备工序的超渗滤设备	40
2.4.2 VA 20 测量水溶液流量	41
2.4.3 应用 PROFIBUS-PA 工业现场总线技术的 H250 转子流量计	42
第 3 章 电磁流量计	43
3.1 引言	43
3.1.1 简史	43
3.1.2 基本要求和性能	45
3.1.3 应用范围	47
3.2 基本理论	48
3.2.1 电磁感应原理	48
3.2.2 交变磁场的电磁流量测量	49
3.2.3 电容传感器的电磁流量测量	50
3.2.4 三角波磁场的电磁流量测量	52
3.2.5 方波磁场的电磁流量测量	52
3.3 流量计的实现	54
3.3.1 满管式电磁流量计的结构	54
3.3.2 特殊的电磁流量计	64
3.4 流量计的选择和规划	69
3.4.1 满管式电磁流量计的选择	69
3.4.2 结构形状选择	71
3.5 选择变送器的安装位置(电子部分)	74
3.5.1 重点要求	74
3.5.2 电磁流量计的接地	75
3.6 应用实例	76

3.6.1	Phoenix 化学公司应用电磁流量计测量化学 过程中的连续流量·····	76
3.6.2	电磁流量计在造纸工业中的应用·····	77
3.6.3	在化工测量泵标定系统中电磁流量计的应用·····	78
3.6.4	雨水溢出处理装置 TIDALFLUX ·····	79
3.6.5	DWM 2000 电磁流量计替代板孔式流量计 在饮用水和废水处理中的应用·····	80
3.6.6	电磁流量计在汽水和果汁灌装时的应用·····	80
3.6.7	最现代化的生态技术在美国加州水处理中的 应用·····	82
第 4 章	涡街流量计 ·····	84
4.1	引言·····	84
4.1.1	涡街流量计的特性·····	84
4.1.2	涡街流量计的发展过程·····	85
4.2	基本原理·····	86
4.3	仪器的实现·····	90
4.4	应用实例·····	95
第 5 章	超声波流量计 ·····	96
5.1	引言·····	96
5.1.1	性能和特点·····	97
5.1.2	应用范围·····	98
5.2	超声波流量计的原理·····	98
5.2.1	声学基础·····	98
5.2.2	超声波多普勒测量原理·····	99
5.2.3	超声波时差测量原理 ·····	101
5.3	仪器的实现 ·····	110
5.3.1	夹持式流量计 ·····	110
5.3.2	串接式超声波流量计 ·····	112
5.3.3	串接时差式气体超声波流量计 ·····	115
5.3.4	可焊接的测量探头 ·····	117

5.3.5 可用于计量标准标定的 5 声道超声波体积 流量计	119
5.4 应用实例	121
5.4.1 液体测量	121
5.4.2 气体测量	123
5.4.3 传感器固定于传输管道上的流量计应用	124
5.4.4 5 声道超声波流量计的应用	128
第 6 章 科氏质量流量计	132
6.1 引言	132
6.1.1 质量流量计的发展过程	133
6.1.2 科氏质量流量计的优缺点	138
6.2 科氏流量计的基本原理	139
6.2.1 科氏力的形成	139
6.2.2 弯管流量计的原理	143
6.2.3 单直管流量计的测量原理	146
6.3 流量计的实现	151
6.3.1 双弯管质量流量计	151
6.3.2 单弯管质量流量计	152
6.3.3 单直管流量计	153
6.3.4 测量变换和信号处理电路	155
6.4 应用实例	157
6.4.1 功能参数和可选要求	157
6.4.2 气体测量	158
6.4.3 液体测量	159
参考文献	163

第 1 章 绪论

随着社会的发展,人们对流体的应用愈加广泛。尤其是工业界愈来愈多的生产需要检测和控制流体(气体和液体等)的物理参数。有关流体的测量主要有 3 个物理参数:流量、压力和温度。对于一定的流体,只要知道这 3 个物理参数就可计算其具有的能量。同样,在能量转换时,必须检测这 3 个参数。由于流体压力和温度的测量方法相对简单,所以过程的流量测量就显得尤为重要。

1.1 流体流量的基础知识

1.1.1 流体的一些物理参数

1) 密度和重度

单位体积流体所具有的质量称为密度,用符号 ρ 来表示。在均质的流体中取体积 ΔV 的流体,其含有 Δm 的质量,该流体相应的密度定义为

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.1)$$

密度的单位是 kg/m^3 。

重度是单位体积流体所具有的重力,即

$$\gamma = \frac{\Delta m \cdot g}{\Delta V} \quad (1.2)$$

重度的单位是 N/m^3 。

2) 粘度

当流体在外力作用下发生流动时,由于流体分子之间的内聚

力作用,会造成分子的相对运动,并形成内摩擦力。这种由流体流动产生内摩擦力的性能称之为粘度。粘度与流体的温度和压力有关;当温度和压力变化时,粘度也产生变化。粘度的表示方法有多种:动力粘度、运动粘度、恩氏粘度和国际赛氏粘度。由于计算粘度方法的不同,这些粘度的量纲都不同。这里介绍 3 种粘度。

(1) 动力粘度

动力粘度又称为绝对粘度,定义为

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} \quad (1.3)$$

式中 μ ——动力粘度($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = \text{Pa} \cdot \text{s}$);

τ ——剪切应力($\text{N}/\text{m}^2 = \text{Pa}$);

dv/dy ——速度梯度(L/s)。

由于式(1.3)是牛顿内摩擦的表达形式,通常把满足该式的流体称为牛顿流体,其余的称为非牛顿流体。

动力粘度的国际单位是 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = \text{Pa} \cdot \text{s}$;工程单位是 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

(2) 运动粘度

运动粘度 ν 是动力粘度与密度之比,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.4)$$

运动粘度的国际单位是 m^2/s ;工程单位是 mm^2/s 。在雷诺系数的计算中采用运动粘度。

(3) 恩氏粘度

由于动力粘度和运动粘度难以直接测量,通常仅能用于理论分析和计算。在实际应用中常用特定的粘度计在规定的条件下直接测量液体的粘度。恩氏粘度计就是这样一种仪器。它测量的结果称为恩氏粘度 $^\circ\text{E}$,也称为相对粘度。其定义为在某一特定温度(20°C 、 50°C 或 100°C)下,取用 200ml 的被测液体,该液体流过恩氏粘度计所需时间 t 与在 20°C 温度下蒸馏水流过该粘度计的时

间 t_0 相比,即

$$^{\circ}E = \frac{t}{t_0} \quad (1.5)$$

工业上把 20℃、50℃ 和 100℃ 的恩氏粘度分别定义为 $^{\circ}E_{20}$ 、 $^{\circ}E_{50}$ 和 $^{\circ}E_{100}$ 。恩氏粘度和运动粘度 ν (mm²/s) 的换算关系为

$$\left. \begin{aligned} \nu &= 7.94^{\circ}E - \frac{8.22}{^{\circ}E} & ^{\circ}E &= 1.2 \sim 4.1 \\ \nu &= 7.66^{\circ}E - 1 & ^{\circ}E &= 4.1 \sim 12 \\ \nu &= 7.576^{\circ}E & ^{\circ}E &> 12 \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

3) 气体的等熵指数和绝热指数

当气体流过节流装置时,气体的热力过程假设为等熵过程。压力和体积满足关系式

$$pV^{\kappa} = \text{常数} \quad (1.7)$$

式中 p ——压力;
 V ——体积;
 κ ——等熵指数。

当被测气体服从理想气体定律时,等熵指数就等于绝热指数。这时,由于 $c_v = c_p - 8.3143 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$,等熵指数为

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1}{1 - \frac{8.3143}{c_p}} \quad (1.8)$$

式中 c_p ——定压比热;
 c_v ——定容比热。

等熵指数与流体种类、压力和温度等都有关系。到目前为止,许多气体还没有相应的等熵指数,只能采用绝热指数来近似代替。

1.1.2 流量的基本方程

1) 流量的概念和单位

在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

$$\text{体积流量} = \frac{\text{体积}}{\text{时间}} \text{ 或 } q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} \text{ 和 } q_v = \frac{dV}{dt} \quad (1.9)$$

$$\text{质量流量} = \frac{\text{质量}}{\text{时间}} \text{ 或 } q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \text{ 和 } q_m = \frac{dm}{dt} \quad (1.10)$$

体积流量的国际标准单位是 m^3/s , 由于该单位很大, 工程上通常采用 m^3/h 或 l/min 。质量流量的国际标准单位是 kg/s 或 kg/h 。

体积流量定义为, 设流体流过某一小体积 $d^2 V = ds \times dA$ 的微流量为 dq_v , 其中 dA 是流体通过的微截面积元, ds 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

$$dq_v = \frac{d^2 V}{dt} = \frac{ds}{dt} dA = v \cdot dA \quad (1.11)$$

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到

$$q_v = \int_A dq_v = \int_A v \cdot dA \quad (1.12)$$

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

$$q_v = v \cdot A \quad (1.13)$$

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 $v = q_v/A$, 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

$$q_m = \rho \cdot q_v \quad (1.14)$$

上述的 q_v 和 q_m 流量称为瞬态流量; 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

$$V = \int_V q_v dt \quad (1.15)$$

$$m = \int_V q_m dt \quad (1.16)$$

当流体的流速稳定和密度不变时,总体积和总质量为

$$V = q_v T \quad (1.17)$$

$$m = \rho V \quad (1.18)$$

2) 连续性方程

连续性方程是质量守恒定律在流体力学中的一种表达形式。方程表达的含义是一根管道无论两端的截面积如何,流进该管道的流体质量流量和流出的质量流量应相等。

根据这个定律,连续性方程定义为

$$\begin{aligned} q_{m1} &= \rho_1 \frac{dV_1}{dt} = \rho_1 v_1 A_1 = \\ q_{m2} &= \rho_2 \frac{dV_2}{dt} = \rho_2 v_2 A_2 \end{aligned} \quad (1.19)$$

式中 q_{m1} 和 q_{m2} ——分别为管道入口和出口的质量流量;
 v_1 和 v_2 ——分别为管道入口和出口的平均流速;
 A_1 和 A_2 ——分别为管道入口和出口的截面积;
 ρ_1 和 ρ_2 ——分别为管道入口和出口流体的密度。

对可压缩流体(气体) 计算公式为

$$q_m = \rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 = \text{常数} \quad (1.20)$$

对不可压缩流体(液体), $\rho_1 = \rho_2$, 计算公式为

$$q_v = v_1 A_1 = v_2 A_2 = \text{常数} \quad (1.21)$$

由此可见,连续性方程满足管道上任意位置的条件,而且就不可压缩流体而言,当管道的截面增大时,会使其平均流速减小。