



流量计

刘欣荣编著

水利电力出版社

科技新书目:125-126

书 号: 15143·5403

定 价: 2.65 元

流 量 计

刘欣荣 编著

水利电力出版社

内 容 提 要

本书系统地叙述了工业生产中有关流量测量的基本原理和方法，内容比较全面。全书共十二章，第一章概要介绍流量测量中所涉及的主要参数的物理意义，仪表分类和选型的原则；第二至十章分别讲述工业生产中常用的各种流量计的测量原理、结构、安装和调整注意事项，以及使用中常见故障的现象、分析和处理方法；第十一和十二章叙述流量试验标定装置和试验数据的处理方法。

本书说理清楚，叙述较详，并避免复杂的数学公式推导，适合于热工仪表技术人员和工人自学之用。

流 量 计

刘欣荣 编著

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 11.875印张 314千字 1插页

1984年5月第一版 1986年11月北京第二次印刷

印数 12021—13720册 定价 2.00元

书号 15143-5403

前 言

在现代工业生产中，对工质流量的正确测量和调节，是保证工艺过程处于最佳运行状态下的重要环节。同时，精确的流量测量对于正确评价生产过程的经济性也有十分重要的意义。然而流量计测量的对象是流动的工质，诸如液体、气体、蒸汽或含有固态颗粒的两相流体，其测量精度与流体的物性以及流动状态密切相关。可以说，没有一种流量计能对各种流体在各不相同的流动状态下进行测量。因此，要准确测量流体的流量，不仅要掌握流量计本身的工作原理、结构特点，而且要确切了解被测工质的特性、管路情况、流动状态以及生产工艺过程对测量精度的要求，等等。为此，本书首先讲述流量测量中经常要涉及到的描写物性和流动特性的一些重要物理参数的意义和计算公式。从第二章起才分别介绍目前火力发电厂中常用的或有发展前途的流量计的测量原理、结构、安装和调整注意事项，以及常见故障的现象、分析和处理方法等内容。

近年来，由于世界范围内对节约能源日益重视，所以对流量测量技术和仪表也十分关注，这样就促使它们获得较快发展。许多新颖的流量测量方式和新型仪表相继问世。据统计，目前工业生产上使用的流量计品种已达百余种。因此很有必要对这些表计，从工作原理、结构特点和调整使用要点诸方面进行一番分类系统总结。这也是编写本书的意图之一。但是，鉴于本书篇幅有限，所以仅以电厂中常用的、有代表性的流量计为重点，详加叙述；而对国外新发展的流量计只作适当介绍。例如，对差压式流量计讲解颇为详细，而对质量流量计、超声波流量计等新型仪表只作一般介绍。对单元组合式仪表，除讲述了国内广泛应用的力平衡式外，也介绍了应变式、差动电容式、差动电感式等。对电磁流

量计。除讲述工频正弦波励磁型及其改进情况外，还介绍了低频矩形波励磁型及其发展前景。

流量标定技术及其试验数据处理是流量测量的基础，是评价流量精度的依据。为此，本书也作了一定的介绍。但由于这两方面的内容所涉及的理论知识领域较为宽广，因此对它们的介绍只能是梗概的。介绍这些内容的目的，在于使读者能选用合理的试验方法和装置来标定所使用的流量计；或在获得了大量的标定或现场试验数据后，能有一个正确的处理方法，以取得可信赖的试验结果。

本书主要是为从事现场实际工作的热工仪表技术人员和工人自学用，因此全书力避较深的数学分析和复杂的公式推导，而尽可能给出较简单的、适合于工业测量的公式和由这些公式导出的结论。作者主观意图是，希望读者能比较清晰而直观地理解本书内容，并进而准确分析和处理工业生产中的各种流量测量问题。

《流量计》书稿自1976年收集资料、编写以来，已经历了八个寒暑，其间不断增删，反复修改，现在和读者见面了。它若能使读者在系统了解流量测量知识方面有所收益，在实际选型、调整、使用时有所帮助，将是作者最大的欣慰。由于本人学识有限，书中难免存在缺点、错误，恳请广大读者批评指正。

编写本书过程中，得到作者所在单位——北京电力科学研究所，以及华北地区各发电厂、天津自动化仪表三厂、开封仪表厂、大连仪表厂、北京和上海地区自动化仪表厂及自动化仪表研究所等单位的鼓励和支持；北京大学姜天仕同志，清华大学张宝芬同志，华北电力学院何适生同志，以及中国计量科学研究院苏彦勋、王建中、王自和、翟秀贞等同志给予了不少指导。在此谨向上述单位和同志们表示衷心的感谢。

刘欣荣

一九八三年九月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 流体 流量	1
第二节 流量测量的任务	3
第三节 流量测量中常用的物理参数	3
一、流体的密度和重度 (4) 二、流体的粘度 (5) 三、绝热指数 及等熵指数 (7) 四、可压缩流体的压缩系数 (8) 五、马赫数 (流速比) (9) 六、雷诺数 (11)	
第四节 流量计类型	13
第五节 流量计选型原则	16
第二章 容积式流量计	18
第一节 概述	18
第二节 罗茨流量计	18
一、工作原理 (18) 二、组成及结构 (20) 三、安装和使用 (21)	
第三节 伺服式容积流量计	23
第三章 涡轮流量计	25
第一节 涡轮流量计的工作原理及结构	26
一、测量原理及特性方程式 (26) 二、变送器的基本结构及其 参数 (29) 三、涡轮流量变送器的结构设计及改进原则 (31) 四、特性曲线及压力损失 (34)	
第二节 涡轮流量计的显示仪表	36
一、显示仪表的基本组成 (36) 二、显示仪表的调整和使用 (42)	
第三节 涡轮流量计的安装及使用	44
一、变送器及管路的安装 (44) 二、信号传输线和显示仪表的 安装 (47) 三、涡轮流量计使用中应注意的问题 (48)	

第四节	涡轮流量变送器仪表常数的标定	55
第五节	涡轮流量计的参数修正	56
第四章	差压式流量计	60
第一节	节流装置测量原理及流量公式	60
一、	不可压缩流体的流量公式 (62) 二、可压缩流体的流量公式 (64)	
第二节	标准节流装置	64
一、	节流装置标准化 (64) 二、标准节流装置的结构 (66) 三、使用标准节流装置的管道条件和流体条件 (71) 四、标准节流装置的基本特点、应用范围及选型原则 (74)	
第三节	标准节流装置的设计计算	76
一、	流量公式中各参数的确定 (77) 二、标准节流装置设计计算方法及程序 (84)	
第四节	标准节流装置的流量测量精度	93
第五节	节流装置的检验、安装和使用	97
一、	节流装置的检验 (97) 二、节流装置的安装 (99) 三、不符合“标准”要求的节流装置的误差及处理方法 (99)	
第六节	非标准节流装置	103
一、	圆缺孔板 (103) 二、1/4 圆喷嘴 (106) 三、矩形流量管 (110)	
第七节	差压式流量测量仪表	115
一、	开方器及流量积算器 (115) 二、CW型双波纹管差压流量计 (118)	
三、	差动变压器式电子流量计 (122)	
第五章	靶式流量计	130
第一节	测量原理及公式	130
第二节	靶式流量计的流量系数及压力损失	133
第三节	靶式流量计的选型	138
一、	选型主要步骤 (138) 二、选型举例 (142) 三、仪表校验数据的计算 (144)	
第四节	电动靶式流量计的结构及安装调整	145
一、	工作原理及结构 (145) 二、校验和调整方法 (150) 三、常见故障及原因分析 (153) 四、安装及使用注意事项 (154)	

第五节 气动靶式流量计的结构及调整	158
一、工作原理及结构 (158) 二、调校及故障处理 (160) 三、安装及使用注意事项 (161)	
第六章 转子流量计	164
第一节 概述	164
第二节 玻璃管转子流量计	166
一、工作原理及流量方程式 (166) 二、玻璃管转子流量计的结构及规格 (170)	
第三节 金属管转子流量计	172
一、就地指示型金属管转子流量计 (172) 二、电远传型金属管转子流量计 (173)	
第四节 气动远传型转子流量计	178
一、动作原理及结构 (178) 二、气动远传型转子流量计的调校 (179)	
第五节 转子流量计安装及使用	182
一、转子流量计安装注意事项 (182) 二、转子流量计的使用特点 (184)	
第六节 转子流量计的刻度换算及量程选择	185
一、刻度换算原理及计算方法 (186) 二、刻度换算及量程选择举例 (190)	
第七节 提高转子流量计测量精度问题	192
一、仪表示值摆动原因 (192) 二、解决转子流量计示值摆动的措施 (193)	
第七章 电磁流量计	196
第一节 概述	196
第二节 电磁流量计的工作原理	198
第三节 电磁流量计的结构	200
一、电磁流量变送器 (200) 二、电磁流量转换器 (203)	
第四节 电磁流量计的校验、调整及安装	208
一、校验和调整 (208) 二、安装注意事项 (210)	
第五节 电磁流量计的使用及故障处理	212
一、仪表使用前的检查 (212) 二、仪表投入运行步骤及注意事项 (213)	
三、使用中常见故障及排除方法 (214)	
第六节 电磁流量计的改进及发展动向	215

- 一、交流励磁型电磁流量计的主要改进方面 (215) 二、低频矩形波电磁流量计简介 (217)

第八章 单元组合式仪表	220
第一节 概述	220
第二节 电动差压变送器的类型及特点	222
第三节 机械力平衡式差压变送器	223
一、工作原理 (223) 二、结构及测量线路 (226) 三、安装校验与调整 (234)	
第四节 应变式差压变送器	238
一、工作原理 (238) 二、结构及测量线路 (239) 三、仪表使用中的一些问题 (242)	
第五节 差动电容式差压变送器	245
一、工作原理 (245) 二、结构及测量线路 (248) 三、安装及调整注意事项 (252)	
第六节 差动电感式差压变送器	253
第七节 差压流量变送器	254
一、差压信号的开方线路 (254) 二、流量变送器的调校及故障处理 (260)	
第九章 超声波流量计	265
第一节 超声波流量计的基本原理及类型	266
第二节 频差法超声波流量计	269
一、工作原理及特点 (269) 二、主要参数及基本方程式 (270) 三、频差法超声波流量计的典型结构及测量线路 (277) 四、仪表的安装、调校及故障处理 (281)	
第十章 质量流量计	288
第一节 直接式质量流量计	289
第二节 推导式质量流量计	292
一、容积流量-密度计组合式 (292) 二、 ρQ^2 变送器与 Q 变送器组合式 (295)	
第三节 温度、压力补偿式质量流量计	296
一、工作原理及补偿方式 (296) 二、液体密度的温度补偿 (298) 三、	

气体密度的温度、压力补偿 (304) 四、过热蒸汽密度的温度、压力补偿 (308) 五、发电厂主蒸汽流量测量温度、压力补偿实例 (313)	
第十一章 新型流量测量方式及仪表	320
第一节 固体粉粒料介质的流量测量	320
一、冲量式流量计的工作原理及结构 (321) 二、冲量式流量计的调校及使用 (323)	
第二节 利用汽轮机第一速度级后压力测蒸汽流量	326
一、利用汽轮机第一速度级后压力测量蒸汽流量的依据 (327) 二、流量测量系统 (328) 三、流量测量精度问题 (328)	
第三节 低参数大管径流量测量	329
一、均速管 (331) 二、翼形测速管 (333) 三、双重喇叭管 (335) 四、几种测速装置的使用及比较 (335)	
第四节 漩涡流量计	338
一、概述 (338) 二、漩涡流量计的测量原理及构成 (339) 三、超声波检测型漩涡流量计 (342)	
第十二章 流量试验装置及测试数据处理	345
第一节 水流量试验装置	345
一、水流量试验装置的组成 (345) 二、水流量试验装置的类型 (346)	
第二节 气体流量试验装置	349
一、气体表法 (349) 二、气体容积法 (350) 三、置换法 (351) 四、风洞试验装置 (351) 五、音速喷嘴法 (352)	
第三节 粘性液体流量试验装置	355
第四节 实验误差及其性质	358
一、疏忽误差(粗大误差) (358) 二、偶然误差(随机误差) (359) 三、系统误差 (360)	
第五节 测试数据处理	361
一、检验及剔除坏值 (361) 二、系统误差的修正 (363) 三、测试结果及精度的表达 (364)	
第六节 标定及测试数据处理实例	364

第一章 绪论

第一节 流体流量

通俗地说，流体就是能流动的物质，一般可认为是液体和气体的总称。但在实际生产中也有固态流动的情况，如火电厂中用空气输送煤粉，就是气体和固体的混合流动，称为气固两相流。流体和固体的不同，在于它容易变形(流动)。流体受任何微小剪切力后，即连续变形，直至外力消除，这就是流体流动性的特征。在电力工业中，不论是水电站、火电站，还是核电站、地热电站，它们的工作介质大都是流体，如水、汽、空气、烟气等。

工业上通常讲的流量，是指在单位时间内通过管道或通道中某一截面的流动介质的量，可用容积、质量、重量来计算。因此，流量可分别用容积流量(用 Q 表示，单位为厘米³/秒、升/分或米³/时)、质量流量(用 M 表示，单位为克/秒、千克/时或吨/时)、重量流量(用 G 表示，单位为克重/秒、千克重/时或吨重/时)表示。

容积流量、质量流量和重量流量三者的关系是：

$$M = \rho Q \quad (1-1)$$

$$G = \gamma Q \quad (1-2)$$

$$G = gM \quad (1-3)$$

式中 ρ ——流体的密度(单位体积的质量)；

g ——当地重力加速度值；

γ ——流体的重度(单位体积的重量)， $\gamma = \rho g$ 。

在生产和科研中，有时需要知道某一段时间内流过流体的总量，称为累积流量，它等于该时间内流量对时间的积分。与累积流量相对应的流量又称瞬时流量。

在表示和比较流量大小时，要注意其单位和量纲。还应特别注意质量流量中的克、千克(公斤)、吨是质量单位；重量流量中的克力、千克力、吨力是重量(力)单位，二者不可混淆。

重量流量的数值不仅与流体的密度有关，还与当地的重力加速度值有关，而质量流量只与流体的密度有关，不受重力加速度的影响，所以质量流量是表示流量大小的较好尺度。在重力加速度为标准值($g = 9.80665 \text{米/秒}^2$)的地方测量流量时，若用相应的单位表示流量，则重量流量与质量流量数值相等。例如，用千克力/时表示的重量流量和用千克/时表示的质量流量在数值上相等。^①但是，随着科学技术特别是宇宙测量技术的发展，重量流量这个单位逐渐被淘汰，现在国际上通用的国际单位制(SI)中已不采用重量流量这一单位。

由于流体的体积受压力和温度等状态参数的影响，所以用容积流量 Q 表示流量大小时，应同时标明相应的流体压力和温度值。为便于比较不同状态参数下容积流量的大小，往往把所测得的容积流量换算成标准状态下的值，称为标准容积流量 Q_N ，单位用标准米³/小时、标准升/分等。所谓标准状态，一般是指温度为20℃，压力为760毫米汞柱的状态。

常用容积流量以及质量流量单位的换算，见表1-1和表1-2所列。

表 1-1 常用容积流量单位的换算

米 ³ 秒	分米 ³ (升) 秒	升 分	米 ³ 时	分米 ³ (升) 时	美加仑 秒
1	1000	60×10^3	3600	3.6×10^6	264.2
0.001	1	60	3.6	3600	0.2642
16.7×10^{-6}	0.0167	1	0.06	60	4.41×10^{-3}
278×10^{-6}	278×10^{-3}	16.7	1	1000	73.5×10^{-3}
278×10^{-9}	278×10^{-6}	16.7×10^{-3}	0.001	1	73.5×10^{-6}
3.785×10^{-3}	3.785	227	13.6	13.6×10^3	1
0.159	159	9.54×10^3	572	572×10^3	42

① 按定义，1千克质量的物质在重力加速度值是9.80665米/秒²的地方所具有的重量为1千克力(kgf或kgW)，即对于1千克质量的物体施加作用力使它产生9.80665米/秒²的加速度，则该作用力称为1千克力。

表 1-2

常用质量流量单位的换算

千克(公斤) 时	千克(公斤)/分	千克(公斤)/秒	吨/时	磅/时	磅 秒
1	16.7×10^{-3}	278×10^{-6}	0.001	2.205	612×10^{-6}
60	1	16.7×10^{-3}	0.06	132.3	36.7×10^{-3}
3600	60	1	3.6	7.94×10^3	2.205
1000	16.7	278×10^{-3}	1	2205	612×10^{-1}
0.454	7.56×10^{-3}	126×10^{-6}	0.454×10^{-3}	1	278×10^{-6}
1633	27.2	0.454	1.633	3600	1

第二节 流量测量的任务

随着工业生产的不断发展,生产过程中流动工质的品种增加,数量越来越大。为确保工业生产的安全、经济,必须对流动工质进行可靠而准确的测量,并要求能及时地发出反映流量大小的信号,以进行控制和自动调节。

在电力工业生产中,对液体、气体、蒸汽等介质流量的测量和调节占有重要的地位。它不仅对保证电厂在最佳参数下运行具有很大的经济意义,而且随着高温高压大容量机组的发展,流量测量已成为保证发电厂安全运行的重要环节。如在火电厂中,主蒸汽流量累积误差若为 2~3%,则将引起煤耗计算误差 10 克/度左右,这对评价电厂的经济性会有很大影响;又如大容量锅炉瞬时给水流量终断或减少,都可能造成严重的干锅或爆管事故。这就要求流量测量装置不但应做到能准确计量,而且要及时地发出信号。这就是现代工业生产对流量测量提出的任务。

第三节 流量测量中常用的物理参数

对工业管道流体流动规律的研究、流量测量计算以及仪表选型时,都要遇到一系列反映流体属性和流动状态的物理参数。这些参数,常用的有流体的密度、重度和粘度,绝热指数和等熵指数,体积压缩系数以及雷诺数,流速比(马赫数)等。这些物理

参数都与温度、压力密切相关。流量测量的一次元件的设计以及二次仪表的校验，都是在一定的压力和温度条件下进行的。若实际工况超过设计规定的范围，即需作相应的修正。

一、流体的密度和重度

流体的密度 (ρ) 和重度 (γ) 是流体的重要属性，它分别表示单位体积内流体的质量和重量。一般工业生产中，流体都被视为均匀流体。流体的密度和重度及其关系的计算如下：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-4)$$

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1-5)$$

因为
所以

$$W = mg$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = \frac{\gamma}{g} \\ \gamma = \rho g \end{array} \right. \quad (1-6)$$

式中 m ——流体的质量，公斤；

W ——流体的重量，公斤力；

g ——重力加速度 (米 秒²)，在北纬45度海平面上为 9.80665 米 秒²；

V ——流体质量为 m 或重量为 W 时所占的体积，米³。

由于重力加速度值在地球上各点并不相同，所以单位体积的重量也随地点不同而异。因此，精密计量中均采用密度这个物理参数。密度单位的换算，见表 1-3 所列。

表 1-3 密度单位换算

克 厘米 ³ 或 吨 米 ³	公斤 米 ³ 或 克 升	磅 英寸 ³	磅 英尺 ³	磅 英加仑	磅 美加仑
1	1000	0.03613	62.43	10.02	8.345
0.001	1	3.613×10^{-5}	0.06243	0.01002	0.00835
27.68	27680	1	1728	277.42	231
0.01602	16.02	0.00058	1	0.1605	0.1337
0.0998	99.8	0.0036	6.2288	1	0.8327
0.1198	119.8	0.004329	7.48	1.201	1

各种流体的密度、重度都随温度、压力改变而变化。在低压及常温下，压力变化对液体密度的影响很小，所以工程计算上往往可将液体视为不可压缩，即可不考虑压力变化的影响。但这只是一种近似计算。而气体，温度、压力变化对其密度、重度的影响较大，所以表示气体密度及重度时，必须严格说明其所处的压力、温度状况。

工业测量中，有时还用“比容”这一参数。比容是密度的倒数，单位为米³公斤。

二、流体的粘度

流体的粘度是表示流体内摩擦力的一个参数。各种流体的粘度不同，表示流动时的阻力也各异。粘度也是温度、压力的函数。一般说来，温度上升，液体的粘度就下降，气体的粘度则上升。在工程计算上，液体的粘度，只需考虑温度对它的影响，仅在压力很高的情况下才需考虑压力的影响。水蒸汽及气体的粘度与压力、温度的关系十分密切。表征流体的粘度，通常采用动力粘度(η)和运动粘度(ν)，有时也采用恩氏粘度($^{\circ}E$)。

流体动力粘度也称粘性动力系数，即当该流体的速度梯度等于1时，接触液层间单位面积上的内摩擦力。流体的动力粘度，也可理解为两个相距1米、面积各为1米²的流体层以相对速度1米/秒移动时相互间的作用力，即

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{dv}{dh}} \quad (1-7)$$

式中 τ ——单位面积上的内摩擦力，公斤力·米²；

v ——流体流动速度，米/秒；

h ——两流体层之间的距离，米；

$\frac{dv}{dh}$ ——速度梯度，1/秒。

在米·千克·秒工程单位制(M·K·S单位制)中， η 的单位为公斤力·秒/米²或公斤/(米·秒)。

在厘米·克·秒单位制 (C.G.S单位制) 中, η 的单位为达因·秒/厘米², 称为泊(P)。实际应用时, 往往取其百分之一为单位, 称厘泊 (cP), 或百万分之一为单位, 称微泊 (μ P)。

流体的运动粘度也称动粘度。由于流体的粘度和密度有关, 将动力粘度与流体密度之比作为粘度的另一个参数, 称为运动粘度或粘性运动系数。

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-8)$$

在工程单位制中, ν 的单位为米²/秒; 在厘米·克·秒单位制中, ν 的单位为厘米²/秒, 称为沱。实际应用时, 取沱的百分之一为单位, 称厘沱 (cst)。

流体的恩氏粘度也称条件粘度。它是基于流体的粘性越大, 流动时表现的阻力也越大的原理, 按下列方式测定的: 取一定容积的被测流体 (例如200毫升), 在一定的温度 ($t^{\circ}\text{C}$) 下, 测定其从恩格勒粘度计流出的时间 (τ_t), 以秒为单位。然后, 与同体积的蒸馏水在20 $^{\circ}\text{C}$ 时流出恩格勒粘度计的时间 (τ_{20}^{1120}) 对比, 其比值称该流体在 $t^{\circ}\text{C}$ 时的恩氏粘度 ($^{\circ}\text{E}$)。

$$^{\circ}\text{E} = \frac{\tau_t}{\tau_{20}^{1120}} \quad (1-9)$$

粘度单位的换算, 见表 1-4、1-5 和 1-6 所列。

表 1-4 运动粘度单位换算

米 ² ·秒 (m ² ·s)	厘米 ² ·秒 (沱) (st)	毫米 ² ·秒 (厘沱) (cst)	米 ² ·时 (m ² ·h)	码 ² /秒 (yd ² /s)	英尺 ² /秒 (ft ² /s)	英尺 ² ·时 (ft ² /h)
1	10 ⁴	10 ⁶	3600	1.196	10.76	38.75 × 10 ³
10 ⁻⁴	1	100	0.36	119.6 × 10 ⁻⁶	1.076 × 10 ⁻³	3.875
10 ⁻⁶	0.01	1	3.6 × 10 ⁻³	1.196 × 10 ⁻⁶	10.76 × 10 ⁻⁶	38.75 × 10 ⁻³
277.8 × 10 ⁻⁶	2.778	277.8	1	332 × 10 ⁻³	2.99 × 10 ⁻³	10.76
0.836	8.36 × 10 ³	836 × 10 ³	3010	1	9	32400
92.9 × 10 ⁻³	929	92.9 × 10 ³	334.57	0.111	1	3600
25.8 × 10 ⁻⁶	0.258	25.8	92.9 × 10 ⁻³	30.9 × 10 ⁻⁶	278 × 10 ⁻⁶	1