



工业自动化仪表系列丛书

# 流量测量技术及仪表

主编 梁国伟 蔡武昌  
编写人 盛健 郑建英 程峰



工业自动化仪表系列丛书

# 流量测量技术及仪表

主 编 梁国伟 蔡武昌  
编写人 盛 健 郑建英 程 峰



机械工业出版社

本书是工业自动化仪表系列丛书之一。书中全面、系统地介绍了当代流量测量技术及仪表的基本概念和基础知识；常用的流量测量仪表，如差压式流量计、容积式流量计、浮子流量计、叶轮式流量计、电磁流量计、旋涡流量计、超声流量计、质量流量计、插入式流量计，以及其他流量测量技术与仪表的工作原理、结构、特性及安装使用方面的问题；最后还介绍了流量仪表的校验和流量标准装置。

本书可作为流量测量技术及仪表专业的工程技术人员、大专院校师生的参考书，也可作为相关专业部门的培训教材。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

流量测量技术及仪表/梁国伟, 蔡武昌主编. —北京: 机械工业出版社, 2002.5

(工业自动化仪表系列丛书)

ISBN 7-111-10147-2

I. 流… II. ①梁…②蔡… III. ①流量测量②流量仪表  
IV. TH814

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 020936 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 周娟 张沪光 版式设计: 冉晓华

责任校对: 张佳 封面设计: 姚毅

责任印制: 付方敏

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 6 月第 1 版 第 1 次印刷

850mm × 1168mm  $1/32$  · 17 印张 · 453 千字

0 001 - 4 000

定价: 32.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527  
封面防伪标均为盗版

**“工业自动化仪表系列丛书”  
编辑委员会**

**主任委员：**张继培

**副主任委员：**史美纪（常务） 吴钦炜 王璐璐

罗命钧 秦起佑 周 娟 张沪光

张永江

**委 员：**薛生虎 杜水友 梁国伟 蔡武昌

高克成 于世南 陈晓竹 李铁桥

周有海 吴 哈 彭 瑜 张雪申

俞金寿 汪克成 缪学勤 刘建侯

徐建平

## 编写说明

工业自动化仪表是国民经济各部门重要的现代技术装备之一，广泛用于冶金、电力、石油、化工、轻工、纺织、交通、建筑、食品、医药、农业、环保以及日常生活等各个领域。

工业自动化仪表是对物质世界的信息进行自动测量与控制的基础手段和设备，是信息产业的源头和组成部分。

为了认真总结国内外工业自动化仪表的先进经验，提高我国工业自动化仪表的科技、生产、应用水平，经中国仪器仪表学会、上海工业自动化仪表研究所、机械工业信息研究院和中国仪器仪表学会过程检测控制仪表分会共同研究，决定组织编写、出版“工业自动化仪表系列丛书”。

目前，首先将陆续出版以下 12 种：《温度测量技术及仪表》、《压力测量技术及仪表》、《流量测量技术及仪表》、《物位测量技术及仪表》、《机械量测量技术及仪表》、《物性分析技术及仪表》、《显示调节技术及仪表》、《可编程序控制器及其应用》、《过程控制系统和应用》、《执行器》、《仪表可靠性工程和环境适应性技术》、《仪表本安防爆技术》。

本系列丛书内容完整，系列齐全，基本上反映了工业自动化仪表技术与产品的全貌；文字力求深入浅出，通俗易懂。系列丛书既可作为从事工业自动化仪表专业的工程技术人员及广大用户的参考书籍，也可作为大专院校教材及科研、设计、制造、使用单位工程技术人员的培训教材。

编写出版“工业自动化仪表系列丛书”，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希望广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

“工业自动化仪表系列丛书”编辑委员会

# 前 言

本书为“工业自动化仪表系列丛书”之一。

随着现代工业生产的飞速发展，人们对流量测量的要求越来越高，对流量测量技术和仪表的研究和开发也不断深入，流量测量方法和仪表的种类也越来越多。尤其是近年来流量测量技术和仪表得到了长足的发展。

由于流体种类极其繁多，流体物性参数和使用状态参数差异极大，每一种流量测量方法和仪表只能适用某一种或某一类流体在某特定条件下的测量。世界上并不存在一种十全十美的流量仪表，各种仪表都有其优缺点和使用上的局限性。

本书总结了近年来国内外流量测量技术和仪表的最新发展，对各种类型的流量仪表的测量原理、适用范围、使用方法及注意事项作了较为系统、全面的论述。内容共分14章，第1章为绪论；第2章阐述了流体和流量测量基础知识、流量测量基本概念和流量仪表的大致分类；第3~12章的内容分章叙述了目前国内外十大类常用流量仪表的工作原理、仪表结构、使用方法和大致分类，并对其优缺点、仪表性能和应用范围进行述评。这些仪表绝大部分均可在国内市场上购得，属于较常用的流量仪表。书中还以一定的篇幅讨论选用时应考虑的要点和安装使用注意事项。第13章简要介绍了没有分类到前面10章内容的流量仪表，如靶式流量计、冲量式流量计、标记法流量测量技术、相关流量计及核磁共振流量计等流量仪表。这样的分类并没有什么特殊的原因，只是从系统性考虑无法归入前面10章内容而另起一章。第14章介绍了各种流量校验装置和流量仪表的校验方法等。附录部分主要列出了各不同取压方式下标准孔板、标准喷嘴和长径喷嘴的流出系数 $C$ 和膨胀系数 $\epsilon$ 的值。

本书内容详细充实，是流量测量方面的实用图书。可作为准备从事流量测量和仪表科研、生产和应用的工程技术人员的入门性读物，也可作为从事流量测量和仪表的工程技术人员的有价值的实用参考书，还可作为教学科技人员的教学和培训用书。

本书由中国计量学院梁国伟和上海光华仪表厂蔡武昌主编，中国计量学院盛健、程峰和浙江省质量技术监督检测研究院郑建英参编。其中第1章由蔡武昌编写；第2章和第3章、第5章至第7章、第10章和第11章由梁国伟编写；第4章由梁国伟和盛健共同编写；第8章由梁国伟和郑建英共同编写；第9章由郑建英编写；第12章和第13章由程峰编写；第14章由蔡武昌和梁国伟共同编写。全书由梁国伟、蔡武昌统稿。

在本书的编写过程中，得到了有关科研院所、流量仪表厂家的帮助并提供了有关资料。浙江省质量技术监督检测研究院的张太丰、沈文新高级工程师、开封仪表厂王自和高级工程师、浙江大学李海青教授，尤其是中国仪器仪表学会过程检测控制仪表分会史美纪高级工程师对本书的编写提供了无私的帮助，对此表示衷心的感谢。

限于作者水平，书中难免存在缺点和错误，敬请读者批评指正，以便再版或重印时及时改进。

编著者

2001年12月

# 目 录

编写说明

前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
<b>第 2 章 流量测量技术基础</b> .....	4
2.1 流量测量基本概念 .....	4
2.1.1 流量与流量计 .....	4
2.1.2 流量的单位 .....	5
2.2 流量测量仪表的分类 .....	6
2.2.1 按测量对象分类 .....	6
2.2.2 按测量目的分类 .....	6
2.2.3 按输出信号分类 .....	6
2.2.4 按测量原理分类 .....	7
2.2.5 按测量方法和结构分类 .....	8
2.3 流量测量中常用物性参数 .....	13
2.3.1 流体的体积质量 (密度) .....	13
2.3.2 流体的粘度 .....	17
2.3.3 流体的压缩性和膨胀性 .....	20
2.3.4 气体的等熵指数 .....	21
2.3.5 液体对空气的溶解度 .....	23
2.4 管内流动基本知识 .....	24
2.4.1 层流与湍流 .....	24
2.4.2 速度分布与平均流速 .....	25
2.4.3 流动基本方程 .....	28
2.4.4 空化和空蚀 (气穴和气蚀) .....	30
2.5 流量仪表的测量特性 .....	31
2.5.1 流量仪表正常工作条件 .....	32



2.5.2 流量仪表的静态特性 .....	32
2.5.3 流量仪表的动态特性 .....	37
<b>第3章 差压式流量计 .....</b>	<b>39</b>
3.1 概述 .....	39
3.2 理论基础和流量公式 .....	41
3.2.1 测量原理和流动情况 .....	41
3.2.2 节流装置的流量公式 .....	43
3.3 标准节流装置 .....	46
3.3.1 标准节流件 .....	47
3.3.2 取压方式和取压装置 .....	52
3.3.3 标准节流装置的管道条件 .....	56
3.4 标准节流装置系数的确定和误差估计 .....	62
3.4.1 标准孔板的 $C$ 和 $\epsilon$ 及其不确定度 .....	63
3.4.2 标准喷嘴的 $C$ 和 $\epsilon$ 及其不确定度 .....	64
3.4.3 长径喷嘴的 $C$ 和 $\epsilon$ 及其不确定度 .....	65
3.4.4 文丘里管和文丘里喷嘴的 $C$ 和 $\epsilon$ 及其不确定度 .....	66
3.4.5 流量测量的不确定度估计 .....	67
3.5 标准节流装置的计算 .....	69
3.5.1 计算命题和计算公式 .....	69
3.5.2 第一类命题计算步骤 .....	70
3.5.3 第二类命题计算步骤 .....	72
3.5.4 计算实例 .....	76
3.6 差压计和差压变送器 .....	81
3.6.1 双波纹管差压计 .....	81
3.6.2 电动膜片式差压变送器 .....	84
3.6.3 电容式差压变送器 .....	86
3.7 节流式流量计的安装与使用 .....	88
3.7.1 节流装置的安装 .....	88
3.7.2 差压信号管路的安装 .....	91
3.7.3 节流式流量计的使用 .....	95
3.8 其他差压式流量计 .....	96
3.8.1 非标准节流装置 .....	97

3.8.2	定值标准节流装置 .....	104
3.8.3	楔形流量计 .....	106
3.8.4	皮托管和均速管流量计 .....	108
3.8.5	弯管流量计 .....	114
3.8.6	层流流量计 .....	118
3.8.7	V锥体流量计 .....	120
<b>第4章</b>	<b>容积式流量计 .....</b>	<b>122</b>
4.1	概述 .....	122
4.2	容积式流量计的测量原理与结构 .....	123
4.2.1	转子型流量计 .....	124
4.2.2	刮板型流量计 .....	128
4.2.3	活塞型流量计 .....	132
4.2.4	其他型流量计 .....	134
4.3	容积式流量计的特性与影响因素 .....	138
4.3.1	容积式流量计的误差特性 .....	138
4.3.2	容积式流量计的压力损失特性 .....	141
4.3.3	物性参数对流量计特性的影响 .....	143
4.3.4	容积式流量计误差特性的调整 .....	145
4.4	容积式流量计的选择、安装、使用和维护 .....	149
4.4.1	容积式流量计的选择 .....	149
4.4.2	容积式流量计的安装 .....	153
4.4.3	容积式流量计的使用与维护 .....	154
<b>第5章</b>	<b>浮子流量计 .....</b>	<b>156</b>
5.1	结构原理与流量公式 .....	157
5.1.1	结构原理 .....	157
5.1.2	流量公式 .....	158
5.2	浮子流量计的刻度换算 .....	160
5.2.1	液体流量的刻度换算 .....	160
5.2.2	气体流量的刻度换算 .....	161
5.2.3	浮子流量计的量程换算 .....	164
5.2.4	刻度换算计算实例 .....	165
5.3	浮子流量计的结构分类 .....	168

5.4	浮子流量计的特性和特点 .....	175
5.4.1	浮子流量计的特性 .....	175
5.4.2	浮子流量计的特点 .....	177
5.5	浮子流量计的安装和使用 .....	178
5.5.1	浮子流量计的选型 .....	178
5.5.2	浮子流量计的安装 .....	181
5.5.3	浮子流量计的使用 .....	182
<b>第6章</b>	<b>叶轮式流量计 .....</b>	<b>184</b>
6.1	涡轮流量计的结构原理 .....	184
6.1.1	涡轮流量计的工作原理 .....	184
6.1.2	涡轮流量传感器的结构 .....	185
6.1.3	涡轮流量传感器的分类 .....	195
6.2	涡轮流量计特性分析 .....	197
6.2.1	涡轮流量计理论模型的建立 .....	197
6.2.2	涡轮流量计的特性分析 .....	201
6.3	涡轮流量计的特点和安装使用 .....	204
6.3.1	优点 .....	204
6.3.2	局限性 .....	205
6.3.3	安装使用和维护 .....	206
6.4	分流旋翼流量计 .....	215
6.4.1	原理和结构 .....	215
6.4.2	分流旋翼流量计的优缺点 .....	217
6.4.3	分流旋翼流量计的分类 .....	218
6.4.4	分流旋翼流量计的主要技术参数 .....	219
6.5	水表 .....	220
6.5.1	叶轮式水表的工作原理及结构 .....	221
6.5.2	水表特性以及水表的检定、安装、使用和维护 .....	223
<b>第7章</b>	<b>电磁流量计 .....</b>	<b>224</b>
7.1	概述 .....	224
7.2	电磁流量计的测量原理 .....	226
7.3	电磁流量计的励磁方式 .....	227
7.3.1	直流励磁技术 .....	227

7.3.2	工频正弦波励磁技术 .....	228
7.3.3	低频矩形波励磁技术 .....	230
7.3.4	励磁技术的新发展 .....	232
7.4	电磁流量计的结构和分类 .....	234
7.4.1	电磁流量传感器 .....	234
7.4.2	电磁流量转换器 .....	239
7.4.3	电磁流量计的分类 .....	243
7.4.4	特殊结构电磁流量计 .....	245
7.5	电磁流量计的选用、安装、运行和维护 .....	251
7.5.1	电磁流量计的选用 .....	251
7.5.2	电磁流量计的安装 .....	254
7.5.3	电磁流量计的运行和维护 .....	259
<b>第8章</b>	<b>旋涡流量计 .....</b>	<b>262</b>
8.1	涡街流量计测量原理 .....	263
8.2	涡街流量计的结构与分类 .....	266
8.2.1	涡街流量计的结构 .....	266
8.2.2	涡街流量计的分类 .....	271
8.3	涡街流量计的主要参数 .....	277
8.4	涡街流量计的选型和安装使用 .....	281
8.4.1	类型和结构的选择 .....	281
8.4.2	被测流体的适应性 .....	282
8.4.3	流量范围和口径的确定 .....	284
8.4.4	涡街流量计安装使用 .....	284
8.5	涡街质量流量计 .....	287
8.5.1	升力式涡街质量流量计 .....	287
8.5.2	差压式涡街质量流量计 .....	288
8.6	其他旋涡流量计 .....	289
8.6.1	旋进旋涡流量计 .....	289
8.6.2	射流流量计 .....	299
8.6.3	空腔振荡气体流量计 .....	301
<b>第9章</b>	<b>超声流量计 .....</b>	<b>303</b>
9.1	超声流量计的测量原理 .....	304

9.1.1	传播速度差法	305
9.1.2	多普勒法	306
9.1.3	波束偏移法	307
9.1.4	噪声法	308
9.1.5	旋涡法	308
9.1.6	相关法	309
9.1.7	流速-液面法	309
9.2	传播速度差法超声流量计	310
9.2.1	速度差法的信号测量方法	311
9.2.2	流量的测量方式	316
9.2.3	仪表的安装与调校	321
9.3	多普勒超声流量计	328
9.3.1	测量原理	328
9.3.2	多普勒超声流量计结构形式及测量方式	331
<b>第10章</b>	<b>质量流量计</b>	<b>334</b>
10.1	科里奥利质量流量计	335
10.1.1	工作原理和基本结构	336
10.1.2	科里奥利质量流量计的特点	342
10.1.3	科里奥利质量流量计的应用	343
10.1.4	科里奥利质量流量计的标定	347
10.1.5	科里奥利质量流量计的安装使用	348
10.2	热式质量流量计	350
10.2.1	托马斯流量计	352
10.2.2	浸入型热式质量流量计	353
10.2.3	热分布型热式质量流量计	358
10.2.4	边界层流量计	365
10.3	间接式质量流量计	367
10.3.1	组合式质量流量计	367
10.3.2	补偿式质量流量计	369
10.3.3	间接式质量流量计的特点和选用	371
10.4	其他质量流量测量方法	373
10.4.1	差压式质量流量计	373

10.4.2	叶轮式质量流量计 .....	375
10.4.3	其他直接式质量流量计 .....	376
<b>第 11 章</b>	<b>插入式流量计 .....</b>	<b>378</b>
11.1	插入式流量计的原理与分类 .....	378
11.1.1	插入式流量计的分类 .....	378
11.1.2	插入式流量计的测量原理 .....	379
11.2	插入式流量计的特点 .....	388
11.2.1	插入式流量计的优点 .....	388
11.2.2	插入式流量计的缺点 .....	388
11.3	插入式流量计的校验和安装使用 .....	389
11.3.1	插入式流量计的校验方法 .....	389
11.3.2	插入式流量计的安装使用 .....	393
<b>第 12 章</b>	<b>明渠流量测量技术 .....</b>	<b>398</b>
12.1	流量堰测量技术 .....	398
12.1.1	概述 .....	398
12.1.2	薄壁堰式流量计的一般工作原理 .....	399
12.1.3	几种薄壁堰的实用流量计算公式 .....	401
12.1.4	薄壁堰流量计的使用条件 .....	410
12.1.5	薄壁堰的构造和设置 .....	413
12.1.6	淹没堰及其他流量堰 .....	416
12.2	流量槽测量技术 .....	417
12.2.1	概述 .....	417
12.2.2	一般文丘里水槽的测量原理 .....	417
12.2.3	巴歇尔水槽 .....	420
12.2.4	帕尔默·玻鲁斯水槽 (P-B 槽) .....	425
12.3	其他明渠测量技术 .....	427
12.3.1	流速-面积法 .....	428
12.3.2	平均流速公式法 .....	432
12.3.3	潜水型电磁流量计测量明渠流量 .....	432
12.3.4	水位-流量曲线法 .....	436
<b>第 13 章</b>	<b>其他流量测量技术与仪表 .....</b>	<b>437</b>
13.1	靶式流量计 .....	437

13.1.1	靶式流量计的工作原理	437
13.1.2	靶式流量计的流量系数及压力损失	439
13.1.3	靶式流量计的种类及测量精度	442
13.2	冲量式流量计	442
13.2.1	冲量式流量计的工作原理	443
13.2.2	冲量式流量计的种类、测量范围及测量精度	444
13.3	标记法流量测量技术	444
13.3.1	概述	444
13.3.2	盐水速度法	446
13.3.3	其他的标记法流量测量方法	448
13.4	核磁共振流量计	449
13.4.1	核磁共振流量计的测量原理	449
13.4.2	核磁共振流量计的使用范围和测量精度	451
13.5	相关流量计	451
13.5.1	相关流量测量技术的原理	452
13.5.2	相关流量计的应用以及存在的问题	453
<b>第 14 章</b>	<b>流量仪表校验和流量标准装置</b>	<b>455</b>
14.1	概述	455
14.1.1	流量仪表的校验方法	455
14.1.2	流量标准装置的分类	457
14.1.3	流量标准装置的作用	459
14.2	液体流量标准装置	460
14.2.1	液体流量计量器具传递系统	460
14.2.2	静态容积法液体流量标准装置	461
14.2.3	静态质量法液体流量标准装置	464
14.2.4	动态容积法液体流量标准装置	466
14.2.5	动态质量法液体流量标准装置	467
14.2.6	标准体积管流量标准装置	469
14.2.7	标准流量计法	472
14.2.8	非稳压大型流量标准装置	475
14.2.9	现场在线流量校验装置	480
14.2.10	液体流量标准装置的量值传递和精度检定	483

14.3 气体流量标准装置 .....	487
14.3.1 气体流量标准装置分类 .....	487
14.3.2 钟罩式气体流量标准装置 .....	488
14.3.3 PVT <sub>t</sub> 法气体流量标准装置 .....	491
14.3.4 Mt 法气体流量标准装置 .....	493
14.3.5 标准流量计法气体流量标准装置 .....	494
14.3.6 皂膜气体流量标准装置 .....	496
14.3.7 其他气体流量标准装置 .....	497
14.4 其他流量标准装置 .....	499
附录 流出系数和膨胀系数表 .....	500
参考文献 .....	516



# 第 1 章 绪 论

数千年前，人们为适应农业灌溉和水利的需要，就已开始关注着流量测量问题，古埃及就已出现了堰的雏形，而我国都江堰在那时也已经知道利用宝瓶口岩壁上所刻“水则”，来观察水位，以进行控制。到 19 世纪中叶，从节流式流量计开始，逐渐建立了近代流量计的理论基础。现代各类流量仪表也相继出现，如商用的水表、煤气表和文丘里管差压式流量计等。20 世纪 20~30 年代，又出现了孔板和喷嘴差压式流量计、浮子流量计、容积式流量计以及示踪法和稀释法等流量测量方法。20 世纪 50 年代以后，随着电子技术，材料和加工技术的飞跃发展，以流程工业为先导的各工业部门和公用事业大量使用流量仪表，促使各种实用新颖的流量仪表相继问世和发展，如涡轮式、电磁式、超声式和涡街式流量计等。当代应用的流量仪表的主要品种，很多是这一阶段开发的。20 世纪 70 年代后期又出现了科里奥利质量流量计。

流量测量的主要任务有两类：其一为流体物资贸易核算储运管理和污水废气排放控制的总量计量；其二为流程工业提高产品质量和生产效率，降低成本以及水利工程和环境保护等作必要的流量检测和控制。

流量仪表应用最贴近人民生活的是量大面广的家用燃（煤）气表和家用水表。在流程工业中检测和控制的温度、压力、流量、物位和成分分析诸参数的仪表中，流量仪表约占总台数的 20%，费用则为 35% 左右。20 世纪 90 年代中期全球流量仪表（不包括家用燃气表和家用水表）年产量在 250 万~350 万台之间；1989 年 R. Furness 估计全球装用量为 1500 万台左右<sup>⊙</sup>。

---

⊙ Furness R. Creating the Right Vibes. Control and Instrumentation, 1989 (4)