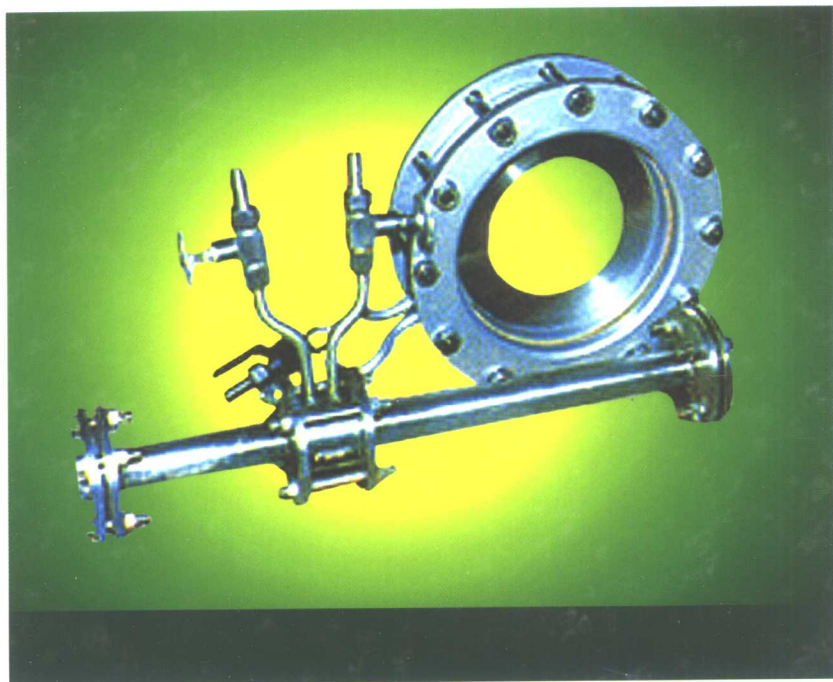


孙淮清 王建中 编著

流量测量节流装置 设计手册

第二版



Chemical Industry Press



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

流量测量节流装置设计手册

第二版

孙淮清 王建中 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

流量测量节流装置设计手册/孙淮清, 王建中编著.
2 版. —北京: 化学工业出版社, 2005. 4
ISBN 7-5025-6952-9

I. 流… II. ①孙…②王… III. 流量测量-节流
装置-设计-技术手册 IV. TH814-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 032416 号

流量测量节流装置设计手册

第二版

孙淮清 王建中 编著

责任编辑: 刘 哲

责任校对: 陈 静

封面设计: 于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 26 $\frac{3}{4}$ 字数 667 千字

2005 年 6 月第 2 版 2005 年 6 月北京第 2 次印刷

ISBN 7-5025-6952-9

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

京化广临字 2005—07 号

第二版前言

1980 年 ISO 颁布节流装置国际标准 ISO 5167, 它是节流装置发展史上的第一个里程碑, 它总结了 20 世纪 70 年代以前节流装置的试验研究。2003 年 ISO 颁布 ISO 5167 : 2003 (E), 是节流装置发展史上的第二个里程碑, 它总结了 20 世纪 80、90 年代国际上对孔板流量计的大规模的试验研究。新版 ISO 5167 : 2003 (E) 内容有实质性的重大变化, 它反映节流装置的几个品种 (孔板, 喷嘴和文丘里管) 当代的科学与生产的技术水平。

本书 2000 年版前言中曾提过由于 1999 年 7 月在美国丹佛 (Denver) 举行的标准审查会议没能把 ISO 5167 修订版的 CD 文件转变为 DIS (标准草案), 本版只能引用 CD 文件的有关内容。嗣后 ISO 在 2000 年完成 ISO/DIS 5167, 2002 年完成 ISO/FDIS 5167, 直至 2003 年正式公布出版 ISO 5167 : 2003 (E)。虽然 ISO/CD 5167 (1999) 与 ISO 5167 : 2003 (E) 内容基本上是一样的, 但有一些修改 (不是主要的), 作者认为还是应该根据 ISO 5167 : 2003 (E) 对本书进行修订, 使之完全符合新版的内容。另外, 在本书发行的几年中, 从读者反映的意见及作者的再核查中感觉有些内容应该进行修改与补充, 以使本书更完善些。

如果说今后本书仍有重新修订的机会, 届时非标准节流装置将是主要修订的内容了。

在本书编写过程中, 上海工业自动化仪表研究所高级工程师邵瑞华和上海光华仪表厂教授级高级工程师蔡武昌给予大力的支持帮助, 在此表示衷心的感谢。

编著者

2005 年 4 月

第一版前言

以节流装置为检测件的差压式流量计，是历史悠久、理论与实践资料丰富、使用成熟、用量巨大的一类流量计，迄今它仍在不断地发展，以适应使用者的各种需求。本手册是一本实用手册，全书分为三部分。第一篇原理和基础：第一、二章简介流量计的工作原理，较详尽地分析流量计方程中各参数的确定方法；第三章到第六章介绍标准节流装置的结构形式、安装要求、使用及设计计算方法，是本书的主要内容；鉴于现场工况极为复杂，标准节流装置往往难以完全满足要求，第七章及第八章收集偏离标准的处理及各类非标准节流装置的应用资料，同时这二章的内容反映了节流装置的发展趋向。第二篇汇编通用性及流体物性方面的有关资料，它是节流装置设计计算及使用不可缺少的资料。第三篇制造安装图，可供使用者自行设计制造节流装置之用。

30 余年前，作者曾编著过一本节流装置手册（流量测量节流装置设计手册，孙淮清、张宝鑫编著，机械工业出版社，1966 年），并在国内广泛使用，直至我国第一部节流装置国家标准（GB 2624，1981 年）的问世。鉴于该手册内容体例备受使用者的欢迎，本手册汲取其特点，仍然包括实用的三部分。

30 余年来节流装置发生了巨大的变化。首先，1980 年颁布第一部 ISO 5167 节流装置国际标准，是节流装置发展史上的一个里程碑。紧接着整个 80 年代国际上进行了大规模的孔板流量计研究试验，它为 ISO 5167 的修订打下了坚实的基础，虽然从标准节流装置的角度看，可以认为流量计的成熟程度已居各类流量计之首，但作为一大类差压式流量计，它的发展是无限的，其他（非标准）节流装置的不断出现及晋升为标准型就是明证。现场实际工况复杂及需求的增加，都有力地推动着节流装置迅速地向前发展。

正值本书即将付梓之时，ISO 5167 的修订工作已进入最后阶段，本次修订是 80 年代以来，国际上对孔板流量计大规模研究试验的总结，它与第一部节流装置国际标准（1980 年）有实质性的变化。遗憾的是，1999 年 7 月在美国丹佛（Denver）举行的标准审查会议，并没能把 CD 文件转变为 DIS（标准草案）文件，据说其中有一些问题（不是主要的）尚需商榷，为此，作者只能引用 CD 文件的有关内容。

本书第一、二篇由孙淮清编写，第三篇由王建中撰写。限于水平，书中不免存在缺点和错误，衷心希望读者批评指正。在本书编写过程中，得到上海工业自动化仪表研究所标准化室邵志勇高级工程师、程思秉高级工程师的鼓励 and 大力支持，在此表示衷心感谢。

编著者

2000 年 3 月

内 容 提 要

以节流装置为检测件的差压流量计是使用成熟、用量巨大的一类流量计，手册分三部分概述了节流装置使用中需要的资料。此次修订核心内容主要是流出系数公式和直管段长度的规定。修订后，手册完全符合标准 ISO 5167:2003 (E)。

手册第一篇介绍了标准节流装置的结构形式、安装要求、使用及设计计算方法，并收集了偏离标准的处理，以及各类非标准节流装置的应用资料。第二篇汇编了通用性及流体物性方面的有关资料。第三篇是制造安装图，可供读者自行设计制造节流装置时使用。

手册可供化工、石油化工、炼油等工业部门从事节流装置使用、设计、安装的工程技术人员阅读和参考。

目 录

第一篇 原理和基础

第一章 基本原理	1	一、ISA1932 喷嘴	61
第一节 概述	1	二、长径喷嘴	63
第二节 节流装置测量原理	2	第四节 经典文丘里管的结构形式和 技术要求	64
一、流体通过节流装置的流动情况	2	一、经典文丘里管的结构形式	64
二、流量方程式	2	二、各种类型经典文丘里管的廓形特性	65
三、标准节流装置的测量原理	5	三、取压装置	66
第二章 流量方程式中各参数的确定方法	6	第五节 文丘里喷嘴的结构形式和技术 要求	66
第一节 概述	6	一、文丘里喷嘴的几何廓形	66
第二节 流出系数	7	二、文丘里喷嘴的取压装置	67
一、孔板、喷嘴的流出系数特性	8	第四章 标准节流装置的安装	68
二、标准孔板的流出系数	8	第一节 概述	68
第三节 可膨胀性系数	13	第二节 阻流件的影响	68
第四节 被测介质的物性参数	14	一、速度分布畸变和旋涡角	68
一、密度	15	二、弯头	68
二、黏度	40	三、渐扩管和突扩管	69
三、等熵指数 κ	49	四、渐缩管和突缩管	70
第五节 雷诺数	51	五、阀门	70
第六节 压力、温度和密度的测量	53	第三节 标准节流装置的安装要求	71
一、压力测量	53	一、概述	71
二、温度测量	54	二、测量管及其安装	71
三、密度测量	55	三、节流件的安装	87
第七节 材料的热膨胀系数	55	四、差压信号管路的安装	89
第八节 流体通过节流装置时的压力损失	56	第五章 标准节流装置与差压计的使用	98
一、孔板和喷嘴的压力损失	56	第一节 概述	98
二、文丘里喷嘴和经典文丘里管的压力 损失	56	第二节 标准节流装置的使用条件	98
三、能耗计算式	58	第三节 制造节流装置的材料	99
四、耗能费(年)	58	第四节 孔板的强度计算	99
第九节 差压上限值的确定	58	第五节 标准节流装置的选择原则	100
第三章 标准节流装置的结构形式和技术 要求	59	第六节 标准节流装置的检验方法	101
第一节 概述	59	一、几何检验法	101
第二节 孔板的结构形式和技术要求	59	二、系数检验法	105
一、孔板的结构形式	59	第七节 差压计(差压变送器)的检验	107
二、孔板的取压装置	60	一、差压计(差压变送器)的技术要求	107
第三节 喷嘴的结构形式和技术要求	61	二、差压计(差压变送器)的检验 条件	108
		三、差压计(差压变送器)的检验项	

目和方法	108
第六章 标准节流装置的设计计算	111
第一节 概述	111
一、节流装置设计计算的命题	111
二、计算用公式	111
三、迭代计算法	112
四、节流装置设计计算要点	113
五、计算机计算程序	114
第二节 常用设计计算命题的计算方法	114
一、命题①（计算流量）的计算方法	114
二、命题②（计算孔径）的计算方法	115
第三节 设计计算实例	116
一、实例之一（命题①） 被测介质 为水	116
二、实例之二（命题①） 被测介质 为天然气	117
三、实例之三（命题②） 被测介质 为水	120
四、实例之四（命题②） 被测介质 为过热水蒸气	123
五、实例之五（命题②） 被测介质 为空气	126
六、实例之六（命题②） 被测介质为 高炉煤气	129
七、实例之七（命题②） 被测介质 为天然气	133
八、实例之八（命题③） 被测介质 为焦炉煤气	136
九、实例之九（命题③） 被测介质 为过热水蒸气	138
第七章 标准节流装置偏离标准规定的 处理和测量的附加误差	141
第一节 概述	141
第二节 节流装置结构不符合标准要求	143
一、孔板开孔直角入口边缘锐利度	143
二、孔板厚度 E	144
三、取压口位置和质量	144
四、排泄孔和放气孔	147
五、实际管道内径和节流件孔径与 设计值不符时的处理	148
六、环室有台阶	148
七、节流件安装偏心	149
八、孔板的偏移	149
九、节流装置结构不符合标准要求时	

影响的倾向	151
第三节 管道布置不符合标准要求	152
一、节流件上下游侧安装异径管	152
二、节流件上游侧直管段长度不足	153
三、流动情况不符合标准要求时影响的 倾向	154
第四节 使用条件不符合标准要求	154
一、孔板挠曲	154
二、孔板上游端面沉积脏物	154
三、孔板上游侧测量管沉积脏物	155
四、文丘里管内壁沉积脏物	156
五、经典文丘里管使用条件偏离标准的 影响	156
第五节 管道粗糙度不符合标准要求	158
一、角接取压标准孔板的糙管流出 系数	158
二、ISA1932 喷嘴的糙管流出系数	159
三、降低管道粗糙度的影响	159
第八章 其他（非标准）节流装置	161
第一节 概述	161
第二节 低雷诺数用节流装置	161
一、1/4 圆孔板	162
二、锥形入口孔板	164
三、双重孔板	165
第三节 脏污介质用节流装置	166
一、圆缺孔板	166
二、偏心孔板	169
三、楔形孔板	171
四、耐磨孔板	175
五、环形孔板	176
六、弯管	177
第四节 低压损用节流装置	178
一、矩形文丘里管	179
二、道尔管	180
三、罗洛斯（Lo-Loss）管	181
四、通用文丘里管	182
第五节 小管径节流装置	182
第六节 端头节流装置	183
一、由大的空间（无上游管线）至管线 或至另一大的空间	183
二、由管线至大的空间（无下游管线）	184
三、吸入式端头节流件	184
第七节 宽范围度节流装置	186
第八节 脉动流节流装置	187

一、概述	187	12. 功、能及热量单位换算表 (表 2.1.12)	224
二、脉动流流量测量的误差源	188	13. 英寸与毫米单位换算表 (表 2.1.13)	225
三、脉动流平均流量的确定方法	189	14. 毫米与英寸换算表 (表 2.1.14)	225
第九节 临界流节流装置	192	15. 管道内流速常用值 (表 2.1.15)	226
一、概述	192	16. ANSI (美国国家标准) 和 DIN (德国国家标准) 的标准管径 (表 2.1.16 和表 2.1.17)	227
二、工作原理	193	17. 节流件与管道常用材料的热膨胀 系数 $\lambda \times 10^6$ (表 2.1.18)	229
三、临界流文丘里喷嘴的结构形式和 安装要求	197	18. 差压式流量计示值修正公式 (表 2.1.19)	229
四、临界流文丘里喷嘴的应用与设计 计算	198	19. 气体流量换算公式 (表 2.1.20)	230
第十节 混相流节流装置	202	20. 孔板与阻流件之间所要求的直管段 长度 (无流动调整器) (表 2.1.21)	230
一、概述	202	21. 喷嘴和文丘里喷嘴所要求的直管段 长度 (无流动调整器) (表 2.1.22)	232
二、气液两相流	203	22. 经典文丘里管所要求的直管段 长度 (表 2.1.23)	232
三、气固两相流	205	23. 孔板与 19 根管束流动整流器 (1998) 之间所 允许的直管段长度 (阻流件与孔板的距离为 L_1) (表 2.1.24)	233
四、液固两相流	206	24. 迭代格式 (表 2.1.25)	234
第九章 流量测量的不确定度	208	25. 差压变送器的基本特性 (表 2.1.26)	234
第一节 概述	208	26. 计算机计算框图——求质量流量 q_m (图 2.1.1)	235
一、术语	208	27. 计算机计算框图——求节流孔直径 d_{20} (图 2.1.2)	236
二、测量误差的组成	208	28. 计算机计算框图——求差压 Δp (图 2.1.3)	237
三、测量的可能结果	209	29. 计算机计算框图——求管道内 径 D_{20} (图 2.1.4)	238
四、测量的不确定度	209	30. 节流件压力损失图 (图 2.1.5)	240
第二节 流量测量不确定度的计算式	211	31. 流量-管道内平均流速关系图 (图 2.1.6)	241
一、流量测量不确定度的计算式	211	第二章 气体的物理性质图表	242
二、流量测量误差源的分析	212	1. 气体性质表 (表 2.2.1)	242
三、流量测量不确定度计算式各不确 定度分量的估算	213	2. 空气的压缩系数 (表 2.2.2)	243
第三节 流量测量不确定度计算举例	215	3. 氮的压缩系数 (表 2.2.3)	244
		4. 氧的压缩系数 (表 2.2.4)	244
第二篇 设计计算用图表			
第一章 通用图表			
1. 节流装置设计计算任务书 (表 2.1.1)			
2. 地区气象表 (表 2.1.2)			
3. 体积单位换算表 (表 2.1.3)			
4. 质量单位换算表 (表 2.1.4)			
5. 体积流量单位换算表 (表 2.1.5)			
6. 质量流量单位换算表 (表 2.1.6)			
7. 密度单位换算表 (表 2.1.7)			
8. 压力单位换算表 (表 2.1.8)			
9. 温度单位换算表 (表 2.1.9)			
10. 动力黏度单位换算表 (表 2.1.10)			
11. 运动黏度单位换算表 (表 2.1.11)			

5. 氩的压缩系数 (表 2.2.5)	245
6. 氢的压缩系数 (表 2.2.6)	245
7. 甲烷的压缩系数 (表 2.2.7)	246
8. 一氧化碳的压缩系数 (表 2.2.8)	246
9. 二氧化碳的压缩系数 (表 2.2.9)	246
10. 水蒸气的压缩系数 (表 2.2.10)	247
11. 空气的临界流函数 C_c . (表 2.2.11)	248
12. 氮的临界流函数 C_c . (表 2.2.12)	248
13. 氧的临界流函数 C_c . (表 2.2.13)	249
14. 氦的临界流函数 C_c . (表 2.2.14)	249
15. 甲烷的临界流函数 C_c . (表 2.2.15)	249
16. 水蒸气的临界流函数 C_c . (表 2.2.16)	250
17. 二氧化碳的临界流函数 C_c . (表 2.2.17)	250
18. 甲烷和天然气的 a_c 与 b_c 值 (表 2.2.18)	250
19. 甲烷和天然气的 a_z 与 b_z 值 (表 2.2.19)	252
20. 理想气体的比定压热容 c_p (表 2.2.20)	253
21. 气体的比热容比 c_p/c_v (表 2.2.21)	254
22. 不同压力和温度下甲烷 c_p 及 c_v 值表 (表 2.2.22)	255
23. 饱和气体的水分含量 (表 2.2.23)	256
24. 求气体黏度的 X 、 Y 值表 (表 2.2.24) 和一般气体在常压下的黏度 μ 图 (图 2.2.1)	257
25. 空气的压缩系数图 (图 2.2.2)	259
26. 氮气的压缩系数图 (图 2.2.3)	260
27. 氧气的压缩系数图 (图 2.2.4)	261
28. 氢气的压缩系数图 (图 2.2.5)	262
29. 氦气的压缩系数图 (图 2.2.6)	263
30. 甲烷的压缩系数图 (图 2.2.7)	264
31. 一氧化碳的压缩系数图 (图 2.2.8)	265
32. 二氧化碳的压缩系数图 (图 2.2.9)	266

33. 氮气的压缩系数图 (图 2.2.10)	267
34. 氨气的压缩系数图 (图 2.2.11)	268
35. 氯气的压缩系数图 (图 2.2.12)	269
36. 乙炔的压缩系数图 (图 2.2.13)	269
37. 乙烯的压缩系数图 (图 2.2.14)	270
38. 乙烷的压缩系数图 (图 2.2.15)	271
39. n -丁烷的压缩系数图 (图 2.2.16)	271
40. i -丁烷的压缩系数图 (图 2.2.17)	272
41. 丙烯的压缩系数图 (图 2.2.18)	272
42. 丙烷的压缩系数图 (图 2.2.19)	273
43. 一氧化氮的压缩系数图 (图 2.2.20)	274
44. 氢氮气体的压缩系数图 (图 2.2.21)	275
45. 焦炉煤气的压缩系数图 (图 2.2.22)	275
46. 天然气的压缩系数图 (图 2.2.23)	276
47. 气体的压缩系数与对比参数关系图 (图 2.2.24)	277
48. 空气的等熵指数图 (图 2.2.25)	282
49. 氮气的等熵指数图 (图 2.2.26)	282
50. 氧气的等熵指数图 (图 2.2.27)	283
51. 氢气的等熵指数图 (图 2.2.28)	284
52. 二氧化碳的等熵指数图 (图 2.2.29)	284
53. 氨气的等熵指数图 (图 2.2.30)	285
54. 甲烷的等熵指数图 (图 2.2.31)	285
55. 水蒸气的等熵指数图 (图 2.2.32)	286
56. 天然气的等熵指数图 (图 2.2.33)	286
57. 碳氢气体的比热容比 c_p/c_v 图 (图 2.2.34)	289
第三章 液体的物理性质图表	290
1. 液体的性质表 (表 2.3.1)	290
2. 液体黏度的实验值和计算系数 (表 2.3.2)	291
3. 求液体黏度的 X 、 Y 值表 (表 2.3.3) 和一般液体在常压下的黏度图 (图 2.3.1)	305

12. 文丘里喷嘴制造安装图 (二)	(图 3.12)	385
12.1 取压法兰 (图 3.12.1)		386
12.2 喷嘴 (图 3.12.2)		387
12.3 后扩管 (图 3.12.3)		388
13. 经典文丘里管 (图 3.13)		389
第二章 非标准节流装置制造安装参考图		390
1. 偏心孔板节流装置制造安装参考图	(图 3.14)	390
2. 双重孔板 (环室取压) 节流装置制造	安装参考图 (图 3.15)	392
3. 双重孔板 (钻孔取压) 节流装置制造	安装参考图 (图 3.16)	394
3.1 取压环 (图 3.16.1)		395
3.2 中间垫环 (图 3.16.2)		396
4. 1/4 圆孔板、锥形入口孔板节流装置制造	安装参考图 (图 3.17)	397
5. 端头孔板节流装置制造安装参考图	(图 3.18)	399
5.1 端头孔板 (图 3.18.1)		400
5.2 取压环室 (图 3.18.2)		401
6. 临界流文丘里喷嘴节流装置制造	安装参考图 (图 3.19)	402
7. 楔形孔板节流装置制造安装	参考图 (图 3.20)	404
8. 法兰取压圆缺孔板节流装置制造	安装图 (图 3.21)	405
第三章 差压信号管路的安装示意图		407
1. 测量无腐蚀性液体流量的安装示	意图 (图 3.22)	407
2. 测量腐蚀性液体流量的安装示意图	(隔离液密度大于被测液密度)	
	(图 3.23)	408
3. 测量腐蚀性液体流量的安装示意图	(隔离液密度小于被测液密度)	
	(图 3.24)	409
4. 测量腐蚀性液体流量的安装示意图	(液体双隔离, 中间隔离液的密度小	
	于被测液体的密度, 并且小于隔离液	
	的密度) (图 3.25)	410
5. 测量腐蚀性液体流量的安装示意图	(液体双隔离, 中间隔离液的密度大	
	于被测液体的密度, 并且大于隔离液	
	的密度) (图 3.26)	411
6. 测量腐蚀性液体流量的安装示意图	(利用喷吹管, 隔离液密度大于被测	
	液密度) (图 3.27)	412
7. 测量腐蚀性液体流量的安装示意图	(利用喷吹管, 隔离液密度小于被测	
	液密度) (图 3.28)	412
8. 测量无腐蚀性气体流量的安装示意图	(图 3.29)	413
9. 测量腐蚀性气体流量的安装示意图	(液体隔离) (图 3.30)	413
10. 测量腐蚀性气体流量的安装示意图	(利用喷吹管, 隔离气密度大于被测	
	气密度) (图 3.31)	414
11. 测量腐蚀性气体流量的安装示意图	(利用喷吹管, 隔离气密度小于被测	
	气密度) (图 3.32)	415
12. 蒸汽流量测量管路安装示意图	(图 3.33)	416
参考文献		417

(1) 节流装置 节流装置按其标准化程度,可分为标准型和非标准型两大类。所谓标准型是指只要按照标准文件(如 GB/T 2624 或 ISO 5167)设计、制造、安装和使用,无需实流校准即可确定输出信号(差压)与流量的关系,并估算其测量误差。非标准型是成熟程度较低,尚未列入标准文件的。

(2) 差压变送器 差压变送器经历长期的发展, 20 世纪 80 年代后技术上有新的突破, 新产品称为智能式变送器 (或称灵巧式变送器), 产品为内置微处理器的固态变送器, 其可靠性、测量准确度及功能多样化都是较完善的。

(3) 流量显示仪 流量显示仪大致经历四个发展阶段, 即机械运算记录图表式、模拟运算机械计数式、简单逻辑运算数显式和程控微处理器运算及多功能数字显示式。目前内置微处理器的显示仪对流量测量工程问题考虑周到, 功能齐全, 又称为流量计算机。

表 1.1.1 差压式流量计分类表

分 类 原 则	分 类 类 型
按产生差压的作用原理分类	①节流式; ②水力阻力式; ③离心式; ④动压头式; ⑤动压增益式; ⑥射流式
按结构形式分类	①标准孔板; ②标准喷嘴; ③经典文丘里管; ④文丘里喷嘴; ⑤1/4 圆孔板; ⑥锥形入口孔板; ⑦偏心孔板; ⑧圆缺孔板; ⑨楔形孔板; ⑩道尔管; ⑪罗罗斯管; ⑫环形孔板; ⑬端头孔板; ⑭端头喷嘴; ⑮小管径孔板 (内藏孔板); ⑯弯管, 环形管; ⑰均速管; ⑱皮托文丘里管; ⑲线性孔板; ⑳射流式差压件; ㉑可换孔板节流装置
按用途分类 (节流式差压流量计)	①标准节流装置; ②低雷诺数节流装置; ③脏污流用节流装置; ④低压损节流装置; ⑤小管径节流装置; ⑥宽范围度节流装置; ⑦临界节流装置

节流式差压流量计应用范围广泛, 至今尚无任何一类流量计可与之比拟, 所有单相流体, 包括液、气、蒸汽等皆可测量, 部分混相流, 如气固、气液、液固等亦可应用, 一般工业生产过程的管径、工作状态 (压力、温度) 皆可测量。为适应广泛的使用需要, 检测件节流装置已开发数十种之多, 但大多数检测件仍研究得并不充分, 只有有限品种 (孔板、喷嘴和文丘里管) 曾进行过深入的试验研究, 并形成标准节流装置。标准节流装置是全世界通用的, 并得到国际计量组织的认可, 对标准节流装置的试验研究是国际性的, 其他流量计一般只限于个别厂家或科研群体进行, 因此其研究的广度和深度不可同日而语。标准节流装置积累了极其丰富的资料, 使得它无需实流校准而可预估流量与输出信号的关系及其测量误差, 在全部流量计中是唯一的。

第二节 节流装置测量原理

一、流体通过节流装置的流动情况

流体通过节流装置 (以孔板为例) 的流动情况如图 1.1.2 所示。在 I-I 截面前, 流体尚未受节流件的影响, 管道内流速分布同节流件前较长直管段形成的规则速度分布 (称为充分发展管流), 管道轴心处的静压与管壁处的静压相等; I-I 截面后 (约 $0.5D \sim 2D$), 流体开始受节流件的影响, 靠近管壁的流体向中心加速, 平均流速 v_1 逐渐升高, 直至 II-II 截面 (孔板开孔后一定距离), 流束收缩到最小, 平均流速达最大值 v_2 , 这是因为流体的惯性使得流束经孔口后有射流现象; 自 II-II 截面后, 流束开始膨胀, 直至 III-III 截面, 又恢复到 I-I 截面前的情况, 此时平均流速由 v_2 逐渐降低至 v_3 , 与平均流速相对应的静压 p 亦经历由低到高再恢复到低值。在流体进入节流件前、后的管壁附近形成涡流, 流体微团不仅有横向脉动, 而且还有逆向运动, 是一种非常复杂的流动状态, 孔板 (或喷嘴) 的压力损失很高, 就是这些涡流能量耗散造成的。

二、流量方程式

1. 连续性方程和伯努利方程

(1) 连续性方程 连续性方程是质量守恒定律应用于运动流体的一种数学表达式。它是运动学方程，既适用于理想流体，亦适用于实际流体。

封闭管道的连续性方程如下。

(a) 可压缩流体非定常流动

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 = q_m(t) \quad (1.1.1)$$

(b) 可压缩流体定常流动

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 = q_m = \text{常数} \quad (1.1.2)$$

(c) 不可压缩流体定常流动 ($\rho_1 = \rho_2$)

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = q_v = \text{常数} \quad (1.1.3)$$

式中 A ——过流断面面积；
 v ——过流断面上的平均流速；
 ρ ——过流断面上的平均密度；

脚标 1, 2 代表不同断面；

$q_m(t)$ ——随时间变化的质量流量；

q_m, q_v ——分别为不随时间变化的质量流量和体积流量。

(2) 伯努利方程 伯努利方程是能量守恒定律应用于运动流体的一种数学表达式。

(a) 不可压缩流体定常流的伯努利方程

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho_1} + K_1 \frac{v_1^2}{2} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho_2} + K_2 \frac{v_2^2}{2} + \xi \frac{v_2^2}{2} \quad (1.1.4)$$

式中 $Z, \frac{p}{\rho}, K \frac{v^2}{2}$ ——分别表示单位质量流体在过流断面上的位能、压力能及动能的平均值；

$\xi \frac{v^2}{2}$ ——单位质量流体的平均能量损失；

脚标 1, 2 代表不同的过流断面。

(b) 可压缩流体定常流的伯努利方程

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_2}{\rho_2} \quad (1.1.5)$$

式中 κ ——等熵指数；

其余符号同上。

2. 流量方程式

流量方程式是从伯努利方程和连续性方程推导出的。

(1) 不可压缩流体流量方程式 设由 I - I、II - II 截面建立流量方程式，由式 (1.1.2) 及式 (1.1.4) 得

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{K_2 + \xi - K_1 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho_1} (p_1 - p_2)} \quad (1.1.6)$$

式中 p_1, p_2 ——分别为 I - I、II - II 截面管轴中心的静压。

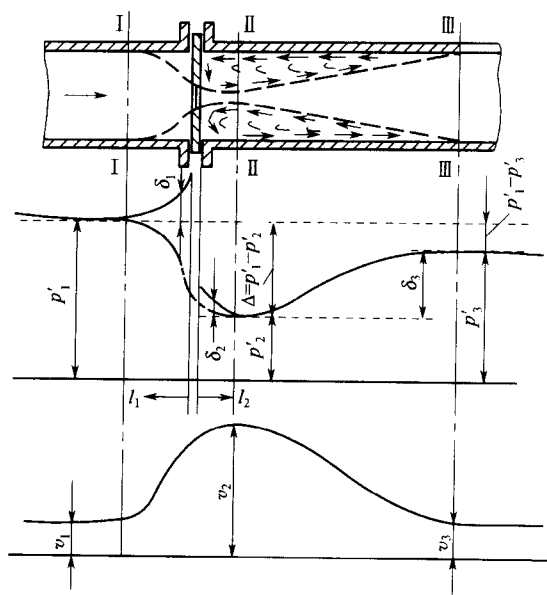


图 1.1.2 孔板附近的流速和压力分布

——管壁上的压力变化；- - - 管道轴线上的压力变化

设
$$\psi = \frac{p'_1 - p'_2}{p_1 - p_2}, \quad (\text{直径比}) \beta^2 = \frac{A_0}{A_1}$$

式中 p'_1, p'_2 ——分别为节流装置取压处的静压, 差压 $\Delta p = p'_1 - p'_2$;

A_0 ——孔板开孔面积;

A_1 ——管道横截面面积。

设 $\mu = \frac{A_2}{A_0}$ 为流束收缩系数; A_2 为流束收缩最小截面处面积。因

$$q_v = A_2 v_2$$

故

$$q_v = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{K_2 + \xi - K_1 (\mu \beta^2)^2}} A_0 \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_1}} \quad (1.1.7)$$

设 $\alpha = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{K_2 + \xi - K_1 (\mu \beta^2)^2}}, C = \alpha / E, E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$ 为渐近速度系数, 则

$$q_v = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho_1} \Delta p} \quad (1.1.8)$$

$$q_m = q_v \rho_1 = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} A_0 \sqrt{2 \rho_1 \Delta p} \quad (1.1.9)$$

由上式推导过程可见, 流量方程的使用条件为:

- ① 流体流动为定常流;
- ② 流体为不可压缩, 即密度为常数;
- ③ 质量力只有重力;
- ④ 流体为连续流动, 即流量为常数;
- ⑤ 水平管道。

(2) 可压缩流体流量方程式 可压缩流体是指流动过程流体密度不能视为常数, 因此除伯努利方程外, 尚需采用热力学过程的绝热过程方程式。

绝热过程方程

$$\frac{p}{\rho^\kappa} = \text{常数} \quad (1.1.10)$$

式中 κ 为等熵指数。

由式 (1.1.5)

$$v_2^2 - v_1^2 = \frac{2\kappa}{\kappa - 1} \left(\frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2} \right) \quad (1.1.11)$$

由式 (1.1.2)

$$v_1 = \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) v_2$$

代入式 (1.1.11) 得

$$v_2^2 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 v_2^2 = \frac{2\kappa}{\kappa - 1} \left(\frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2} \right)$$

再代入式 (1.1.10) 得

$$v_2^2 \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{2/\kappa} \right] = \frac{2\kappa}{\kappa - 1} \left(\frac{p_1}{\rho_1} \right) \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\kappa} \left(1 - \frac{p_2}{p_1} \right)}} \sqrt{\frac{2}{\rho_1} (p_1 - p_2)} \quad (1.1.12)$$

$$\begin{aligned} q_m &= A_2 v_2 \rho_2 = A_2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/\kappa} \rho_1 \sqrt{\frac{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\kappa} \left(1 - \frac{p_2}{p_1} \right)}} \sqrt{\frac{2}{\rho_1} (p_1 - p_2)} \\ &= \mu \sqrt{\frac{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\kappa} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \frac{\kappa}{\kappa-1}}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\kappa} \left(1 - \frac{p_2}{p_1} \right)}} A_0 \sqrt{2 \rho_1 (p_1 - p_2)} \\ &= \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \left\{ \sqrt{\frac{1 - \mu^2 m^2}{1 - \mu^2 m^2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\kappa}}} \sqrt{\frac{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\kappa} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}{(1 - p_2/p_1)}} \right\} \times \\ &\quad A_0 \sqrt{2 \rho_1 \Delta p} \end{aligned} \quad (1.1.13)$$

将式 (1.1.13) 与式 (1.1.9) 比较得到同样公式形式

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \epsilon A_0 \sqrt{2 \rho_1 \Delta p}$$

则

$$\epsilon = \left\{ \sqrt{\frac{1 - \mu^2 m^2}{1 - \mu^2 m^2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\kappa}}} \sqrt{\frac{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\kappa} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}{(1 - p_2/p_1)}} \right\} \quad (1.1.14)$$

式中 ϵ 为可膨胀性系数。

对于喷嘴和文丘里管, ϵ 可由上述理论计算式计算, 但对于孔板需由经验公式求得。

三、标准节流装置的测量原理

标准节流装置是假设未经校准的节流装置与已经过充分实验校准的节流装置几何相似和动力学相似, 亦即符合标准文件 (GB/T 2624 或 ISO 5167) 的全部要求, 则在标准所规定的测量误差内, 质量流量与差压的关系可由上述流量方程确定。达到几何相似的条件主要有: 节流装置结构形式、取压装置、节流件上下游测量管, 以及直管段长度等的制造及安装符合标准的各项规定。动力学相似的条件为雷诺数相等。

标准节流装置的工作条件应为参考工作条件 (参考工作条件见第五章第二节)。