

射流工程学

[日] 原田正一 尾崎省太郎 编

科学出版社

射 流 工 程 学

〔日〕原田正一 尾崎省太郎 编

陆 润 林 郭 秉 荣 译

科 学 出 版 社

内 容 简 介

本书对射流技术的理论知识、元件特性分析、应用及实验技术作了比较全面的叙述,并尽可能提供了理论计算。

本书适用于从事自控技术、射流技术的科学技术人员,亦可作高等院校有关专业或射流技术训练班的教学参考书。

原 田 正 一 共 編
尾 崎 省 太 郎

流 子 工 学

養賢堂, 1969

射 流 工 程 学

〔日〕 原田正一 尾崎省太郎 编

陆 润 林 郭 秉 荣 译

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1977 年 5 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1977 年 5 月 第 一 次 印 刷 印张: 13 1/2

印数: 0001—17,000 字数: 304,000

统一书号: 13031·472

本社书号: 705·13—2

定 价: 1.30 元

译 者 的 话

射流技术是六十年代发展起来的一门新技术。它与电子技术相辅相成、互为补充,已在工业各部门得到较为广泛的应用。作为一种有效的控制手段,目前它已渗透到航空、船舶、车辆、机械、原子能及医疗器械等方面。我国工人阶级和广大工程技术人员遵照毛主席关于“**中国人民有志气,有能力,一定要在不远的将来,赶上和超过世界先进水平**”的教导,自力更生,奋发图强,经过一段时间的努力,也使这项新技术在国内得到广泛的发展,并且取得一定的成绩。通过多方面的实践证明,从一定的意义上说,射流元件具有稳定可靠、工作频率较高、可以集成化和成本较低的优点,特别是在电子控制不适宜的恶劣环境,如高温、辐射、振动以及有磁性影响的地方,采用射流技术就会突出地显示其优越性。如在炼钢过程中存在高温、热冲击、机械冲击、振动及污染空气等,因此在国外已将射流技术比较好地用于轧钢工艺。在国内已将射流技术用于船舶主机遥控,也是考虑为适应船舶振动、高温、潮湿等不良环境。这些都是针对矛盾的特殊性解决矛盾的正确途径。

射流技术发展的时间不长,理论和应用方面的研究都还不充分,存在的问题也不少,如动力损耗、信号失真、噪音、频率响应、负载能力及多级连接的阻抗匹配等。为了进一步研究和解决这些问题,迄今已在(1)元件构造与线路设计的基础理论,(2)特性数据的完备,(3)元件的低压化、微型化和集成化,(4)附配件,(5)测试技术等方面开展了一系列工作。特别

是元件构造的基础理论研究近几年来在国内外受到广泛的重视,因为元件性能的改进、提高和新元件的研制必须是以了解元件内部流动的规律为基础的。在附壁型元件、比例型元件及涡流型元件方面已得到一些理论和实验研究结果。利用原有的流体力学方法单纯地从理论分析的角度解决射流元件的内部流动问题其范围是极为有限的。因此相应的实验研究得到了发展。

本书是编者在《机械研究》杂志连载的“射流元件解说丛书”为基础发展而来,它搜集了截止1968年底日本国内外射流技术理论和应用方面的最新成果,整理编写而成。全书共分六篇:Ⅰ基础篇,概述了目前认为与射流技术有关的流体力学基本知识;Ⅱ射流篇,介绍了自由射流与附壁射流,从此可以了解在自由射流的基础上,着手解决附壁射流问题的途径的一个方面,当然这里介绍的附壁射流研究结果是极为有限的;Ⅲ模拟篇,只着重介绍了射流偏向型元件;Ⅳ数字篇,只着重介绍了计数触发元件。这两篇的特点是重点突出,就两类元件讲得比较全面,详细;Ⅴ应用篇,它不是罗列介绍射流技术应用在各种项目的具体线路,而是对构成这种线路的典型组件进行分析说明。具备了这些知识,有助于在逻辑线路的设计工作中,见一斑而窥全豹;Ⅵ实验技术篇,包括液压模拟和流动的观察法两部分。液压模拟的基本思想早在1938年就提出来了,但是这里将其介绍用于射流元件的水槽模型实验,指出应注意的问题并提供三级连接模型实验的例子是有意义的,事实表明,液压模拟的水槽实验目前仍是研究射流元件内部流的有效方法之一。流动的观察法主要介绍日本这方面的工作情况,简要地叙述了各种方法的基本原理。

本书出版以后,射流技术无论理论研究和应用方面都有较迅速的发展,尤其是理论工作进展较大,在应用上,射流技

术用于传感器、调节器、定时器等方面所带来的成效也正引起广泛的重视。所有这些新近的研究成果，当然是本书所无法载入的，从事有关方面工作的读者，可参考相应的文献资料。

可能由于原书编写、出版工作仓促，翻译过程中发现计算、印刷错误较多。译者限于时间和手头掌握的资料，未能就全书计算公式复算校改，仅以力所能及对部分内容作了重算订正。读者利用某些计算结果时，请予注意。

译者专业知识和工作经验都很不够，错误之处尚希读者指正。

宫学惠同志对部分译稿细心审阅并提出宝贵意见，深为感谢。

1972 年 11 月

序

现在人们用手开动大机器,利用电子进行复杂的计算,操作和检查正在逐步由人手转向机械手。人类依赖自然界的空气和水而生存。控制空气和水以创造安全的居住环境是人类一个很大的课题,而如何出色地利用空气和水,使它们发挥作用,这又是一个课题!

不导电的线路、无损耗的继电器、也不用担心电流噪音的系统等都可依靠空气和水来实现,由于打破了所谓电子万能的固有观念,才可能有新的发现!

在这方面有一种有用的技术基础,名为“射流工程学”,所谓“射流工程学”就是纯流体元件工程学。

射流元件是只依赖于流体运动进行信号转换、计数、逻辑、放大、控制等操作的一个单位。在射流元件内部,流体流动与固体壁或流体之间互相干扰产生出所需要的输出。

流体工程学和射流工程学的关系类似于电工学和电子学的关系。而且射流工程学是流体力学与工程控制论的联合产物,射流元件及其用于控制系统的研究是由于很多研究工作者们的共同努力而开展起来的。再者,根据课题,机械与电机的合作也正在有效地进行。

本书是根据1966年1月至1967年5月间在《机械研究》杂志上连载17次的“射流元件解说丛书”发展而来的,是以在机械工程系的学科中进修流体力学与工程控制论的读者为对象而写的。本书虽也部分引用了讲座的内容,但大部分都是新写的,特别是基础编也考虑到了初次学习射流元件的读者。

在编写时所遇到的问题是，由于这一领域正在发展过程中，用语及其定义、符号和元件图示简记法等都尚未标准化，本书尽可能地采用了将来可能成为标准的用语及定义等，但有一部分仍然使用了尚未统一的图版和符号，对此尚希见谅！

前 言

只靠流体的流动而固体部分不随着移动的自动控制，如同电子学对电工学那样，它与油压和空气控制机械相比，具有用较小能量而能得到较高响应速度的特征。这种元件叫做射流元件，使用这种元件可望在有热、煤气、电源噪音等存在的环境中能够进行稳定的操作。

但是，对射流元件本身及其应用方面的分析和技术积累还不够充分。如果说电系统在本质上是线性的，则流体系统是非线性的，加之认为元件内部的流动近似于二维射流，但实际上不能忽略三维流动的影响的情况很多。本书重点放在射流元件的特性及其内部流动的基础方面，引用了国内外的文献，并尽可能地加以系统化的整理。

为了开展与现有流体力学、流体工程学没有多少共同点的这一新领域的技术研究，特搜集了从流体力学基础乃至所应用的基本知识。但由于重点放在基础方面，所以略去了有关各种元件的结构与动作相比较的这样一些内容。

目 录

I 基础编	1
1.1 流体力学基本方程	1
1.1.1 运动基本方程	1
1.1.2 动量定律	5
1.1.3 涡流	8
1.1.4 粘性流动	10
1.1.5 相似定律	12
1.2 管内流动	14
1.2.1 管内速度分布	14
1.2.2 流体流阻	17
1.2.3 各种类型管的压力损失	23
1.3 绝缘问题	29
1.3.1 实验目的与实验装置	30
1.3.2 实验结果及其研究	33
1.4 流体信号的发生	37
1.4.1 背压式	38
1.4.2 贯流式	42
1.4.3 反射式	44
1.4.4 干涉式	45
1.4.5 振荡频率的检测	47
1.4.6 电信号的检测	47
1.5 流体信号的传递	48
1.5.1 流阻 R 、流感 L 、流容 C	49

1.5.2	粗细相同的管道空气压力信号的传递	52
1.5.3	管道末端有负载时空气压力传递特性	59
1.5.4	截面积不连续变化管道的空气压力信号的传递	61
1.6	逻辑线路设计的基础	65
II	射流编	78
2.1	自由射流	78
2.1.1	基本关系	79
2.1.2	不可压缩流体二维紊流射流	81
2.1.3	不可压缩流体二维紊流射流模型	84
2.1.4	不可压缩流体三维紊流射流	93
2.1.5	可压缩流体二维紊流射流	97
2.2	附壁射流	104
2.2.1	射流的附壁与切换	104
2.2.2	附壁结构的分析	106
2.2.3	假设	108
2.2.4	附壁点模型与控制面模型	109
2.2.5	由 Bourque 和 Newman 到 Sher 的分析	112
2.2.6	Perry 对控制面模型的改进	118
2.2.7	位势芯的研究	120
2.2.8	具有非对称速度分布的射流模型	124
2.2.9	可压缩流体的情况	129
2.3	射流的噪音	137
2.3.1	射流的音响输出	138
2.3.2	流体放大元件的射流与噪音	142
2.3.3	有关设计上的主要问题	147
2.3.4	小结	150
III	模拟编	152
3.1	射流偏向型放大元件	152
3.1.1	基本构造与动作原理	152
3.1.2	静态特性	154

3.1.3	增益分析	176
3.1.4	射流偏向型放大元件的设计	179
3.2	射流偏向型放大元件的连接问题	187
3.2.1	图解方法	187
3.2.2	解析方法	191
3.2.3	在流体放大元件的多级连接中多种参数对各级放大特性的影响	195
3.3	射流偏向型放大元件的动态特性	202
3.3.1	控制部分的动态特性	203
3.3.2	射流部分的动态特性	204
3.3.3	输出部分的动态特性	206
3.3.4	综合特性	208
3.3.5	附记 在颈部的不可压缩流体的压力传递特性	210
3.4	碰撞型元件	212
3.4.1	原理	213
3.4.2	加冲调幅器 (SIM)	217
3.4.3	横冲调幅器 (TIM)	218
3.4.4	直冲调幅器 (DIM)	223
3.4.5	平衡冲击调幅器 (BIM)	224
3.4.6	横冲调幅器随动件 (TIMF)	226
IV	数字编	227
4.1	触发器	228
4.1.1	触发器的动作	229
4.1.2	分流劈的位置	232
4.1.3	分流劈的形状	237
4.1.4	射流的流体与周围的流体	239
4.2	触发器的输出特性	240
4.2.1	恢复压力与元件形状的关系	241
4.2.2	带排气孔元件的输出特性	244
4.2.3	实际的输出特性	245

4.2.4	排气孔的形状与输出恢复压力	247
4.3	触发器的输入特性与切换	250
4.3.1	输入静态特性	250
4.3.2	切换压力、切换流量与元件形状	251
4.3.3	控制喷嘴的流阻	253
4.3.4	输出特性与次级输入特性的组合	256
4.3.5	双稳元件的动态特性	258
4.4	逻辑元件	260
4.4.1	“非”元件	260
4.4.2	“或”，“非或”元件	263
4.4.3	“与”元件及“异”元件	267
V	应用编	271
5.1	模拟运算线路	272
5.1.1	用于模拟运算线路的被动型元件	272
5.1.2	运算放大器	275
5.1.3	用碰撞型流体放大元件的运算放大器	280
5.1.4	运算线路	282
5.1.5	流体型模拟计算机	290
5.2	A-D 变换	295
5.2.1	A-D 变换器	295
5.2.2	旋转方向辨别线路	299
5.2.3	可逆计数器	304
5.2.4	D-A 变换器	311
5.3	旋转速度的探测	314
5.3.1	用信号圆盘的方法	311
5.3.2	用涡流检测角速度	322
5.3.3	利用因旋转所生边界层效应的方法	327
5.4	逻辑线路设计	329
5.4.1	二进位十进位变换线路	330
5.4.2	半加法线路	335

5.4.3	加法线路	337
5.4.4	减法线路	339
5.4.5	节拍脉冲发生器	340
5.4.6	移位寄存器	341
5.4.7	比较器	345
5.4.8	逻辑线路设计上的问题要点	346
5.5	计数器	348
5.5.1	环形计数器	348
5.5.2	瓦林式计数器	349
5.5.3	反馈式计数器	350
5.5.4	复反馈式计数器	351
5.5.5	“与”门式计数器及脉冲整形线路	352
5.5.6	不使用延迟元素的计数器	354
5.5.7	用二进位计数器的气-电的模拟计算	355
5.6	振荡线路	357
5.6.1	用射流的振荡	358
5.6.2	用附壁式双稳元件的振荡	362
5.7	调制与反调制	377
VI	实验技术编	389
6.1	液压模拟	389
6.1.1	液压模拟的基础	389
6.1.2	液压模拟的局限性	391
6.1.3	安装及测定法	396
6.1.4	代表性的实验例子	398
6.1.5	液压模拟评价	400
6.2	流动的观察法	401
6.2.1	可视化的意义	401
6.2.2	静止法	402
6.2.3	注入法	403

6.2.4	化学反应法	407
6.2.5	氢气泡法	408
6.2.6	光学的方法	411

I 基 础 编

1.1 流体力学基本方程

1.1.1 运动基本方程

解释流体运动,当然可以不必从运动方程开始。不过考虑到从一般理论基础出发,首先叙述一下运动方程还是必要的。

实际存在的流体大致分为气体和液体两类,气体容易压缩而粘性小。液体在通常使用范围内可以不考虑由于压缩而引起的体积变化。液体粘性也比气体的大,粘性系数可大至数百倍,但除接近固体表面的特定场所外,即使略去粘性的影响,也能观察出运动情况没有多大差别。

因此,这里我们考虑假定没有粘性的理想流体,至于粘性的影响以后另作处理。用矢量表示的一般方程为

$$\frac{d\mathbf{q}}{dt} + \frac{1}{\rho} \text{grad } p = \mathbf{F} \quad (1.1.1)^*$$

其中 $\mathbf{F}$ 表示重力等外力的矢量。此式表示单位质量流体的加速度、压力梯度与外力平衡的关系,当外力仅有重力时,可以不用 $\mathbf{F}$ 而以 $\mathbf{g}$ 表示外力。对于外力,一般虽考虑重力作用的情况较多,但在可以忽略垂直方向运动的流动或气体的流动的大多数情况下,重力的影响可以忽略。一般考虑坐标系

* 公式、图、表的号码是在编、章号码之后加上各章统一号码表示,但在同一章引用时,编、章的号码从略。

时,多采用空间直交坐标系,但考虑更一般的流动时,采用圆柱坐标系,而把直交坐标系看成是它的特殊情况。

若以 V_r, V_θ, V_z 表速度分量,则 (1.1.1) 式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\theta^2}{r} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + F_r, \end{aligned} \quad (1.1.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{V_r V_\theta}{r} \\ = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + F_\theta, \end{aligned} \quad (1.1.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + F_z. \end{aligned} \quad (1.1.4)$$

其次,从质量守恒定律可导出所谓连续方程有

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{q}) = 0, \quad (1.1.5)$$

和运动方程一样,用圆柱坐标系表示的连续方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_r)}{\partial r} + \frac{\rho V_r}{r} + \frac{\partial(\rho V_\theta)}{r \partial \theta} \\ + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0. \end{aligned} \quad (1.1.6)$$

在这些方程中,如改写 $\partial r \rightarrow \partial x, r \partial \theta \rightarrow \partial y$, 并令 $1/r \rightarrow 0$, 即得直交坐标系方程。

此外,和能量守恒定律即表示状态变化的关系式联立起来,即可解出流体运动方程。例如,为绝热变化时,

$$p \rho^{-\kappa} = \text{常数}, \quad (1.1.7)$$

则由 (1.1.2), (1.1.3), (1.1.4) 三式及 (1.1.6) 和 (1.1.7) 式,