

· 平 浚 编著 ·

射流理论基础及应用

SHELIU LILUNJICHU JI YINGYONG

宇航出版社



射流理论基础及应用

平 浚 编者

中航出版社

(京)新登字 181 号

图书在版编目 (CIP) 数据

射流理论基础及应用/平浚编著. —北京: 宇航出版社 1995. 8

ISBN 7-80031-801-0

I. 射…… II. 平…… III. ①射流—基础理论②射流技术—应用

IV. ①O358②TP69

中国版本图书馆 CIP 数据该字 (95) 第 14480 号

宇航出版社出版发行

北京市和平里滨河路 1 号 (100013)

发行部地址: 北京阜成路 8 号 (100030)

山西省印刷技术研究所印刷

新华书店经销

1995 年 8 月第 1 版 1995 年 8 月第 1 次印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 7.5 字数: 180 千字

印数: 1000 册 定价: 15.80 元

前 言

射流是流体力学研究的一个重要内容。随着科技的飞跃发展,射流在工程技术中得到了越来越广泛的应用。如航天航空领域中的火箭、喷气发动机及卫星姿态控制技术;动力方面的水轮机、汽轮机、内燃机燃烧室、蒸汽泵及锅炉技术;冶金锻造用的加热炉;60年代发展起来的液压射流控制技术;高压水力采煤;射流切割;气膜隔热和冷却技术;通风和空调技术;消防和农田喷灌技术;化工领域中的混合技术;70年代发展起来的气垫车船及近年出现的水上气垫飞机;水利工程中的引水、排洪及泄流;环境工程中的污水、废气及热水的排放;射流纺纱织布等,无不涉及到射流问题。

国外早些年已有一些关于射流理论及应用的论著,但国内却很少(见参考文献)。而且有的偏重于理论探讨和方法研究,有的偏重于某一领域的应用。在一般流体力学书籍中关于射流的知识介绍得又很少。作者在多年给硕士研究生讲授流体动力学、射流理论以及在研究和应用射流理论的同时,深感需要系统介绍射流理论基础的著作。

本书将对工程上常见的自由射流、附壁射流、旋转射流及贴壁射流的有关理论作系统的阐述。编写时注重物理概念和实用性,叙述力求深入浅出,条理力求清晰,以便初学者阅读。全书共十章。为了读者学习方便,前三章概述了与射流理论相关的流体力学基础知识;第四章介绍了紊流自由射流的基本概念,重点讨论运动方程组的积分求解方法;第五章着重阐述二元和三元不可压

紊流自由射流的速度分布及其扩展规律，同时介绍可压缩二元射流的奥尔森 (Olson) 法；第六章详细讨论了抽吸和输入控制压力流量对附壁射流有关参数的影响，同时介绍了作者提出的空气气垫原理；第七章论述旋转射流的特性、基本方程及其积分方程，并给出弱中旋度情形下旋转射流的速度分布规律；第八章讨论了二元射流和圆形射流的温度分布和浓度分布；第九章阐述了平板上贴壁射流的流速分布和温度分布；第十章论述了横斜穿主流的圆形射流和二元射流的弯曲变形，同时也将作者对平行气流中附壁射流的弯曲变形分析写入。

由于成书时间短，再加上作者水平所限，书中不妥和错谬之处在所难免，敬请读者批评指正。

在编写过程中，曾得到北京航空航天大学吴礼义教授的关怀和指导，尤其是作者写的空气气垫原理一节的内容曾得到钱学森老前辈和国防科工委组织有关专家的论证。作者对钱老、国防科工委、吴礼义教授及有关专家们表示深切的感谢。

本书的附图是由周静卿老师帮助绘制的，作者对她表示谢意。

平 浚

1995 年 5 月 于太原

目 录

第一章 流体的基本性质概述	(1)
§ 1.1 流体的连续介质模型及其物理量	(1)
1.1.1 连续介质模型	(1)
1.1.2 流体的物理量	(2)
§ 1.2 流体的压缩性	(3)
1.2.1 流体的压缩性	(3)
1.2.2 可压缩流体与不可压缩流体	(3)
§ 1.3 流体的粘性	(4)
§ 1.4 流体的比热容和导热性	(6)
1.4.1 比热容	(6)
1.4.2 导热性	(7)
§ 1.5 流体的扩散性	(8)
第二章 流体运动学基础知识	(10)
§ 2.1 研究流体运动的方法	(10)
§ 2.2 流体微团运动的分解	(13)
§ 2.3 连续方程及速度矢量场的散度	(17)
2.3.1 积分形式的连续方程	(17)
2.3.2 微分形式的连续方程	(18)
§ 2.4 流函数	(20)
2.4.1 流函数的定义	(21)
2.4.2 流函数的性质	(22)
§ 2.5 有旋流动	(24)

2.5.1	有旋流动及涡线、涡管、涡管强度	(24)
2.5.2	速度环量	(26)
§ 2.6	不可压无旋流动及速度势函数	(26)
2.6.1	速度势函数	(26)
2.6.2	势函数与流函数的关系	(28)
§ 2.7	点源及点汇	(29)
第三章	流体动力学基础知识	(32)
§ 3.1	积分形式的基本方程	(32)
3.1.1	动量方程和动量矩方程	(32)
3.1.2	能量方程	(38)
§ 3.2	运动流体中的应力状态	(39)
§ 3.3	应力与变形速度的关系	(45)
3.3.1	偏应力张量 D 与变形速度张量 E 之间的关系	(46)
3.3.2	平均压力偏量与变形速度之间的关系	(48)
3.3.3	应力张量与变形速度张量的一般关系式	(49)
§ 3.4	微分形式的基本方程	(49)
3.4.1	连续方程	(49)
3.4.2	运动方程	(50)
3.4.3	能量方程	(51)
§ 3.5	粘性流体动力学基本方程	(52)
3.5.1	连续方程	(53)
3.5.2	运动方程	(53)
3.5.3	能量方程	(56)
§ 3.6	紊流的基本方程	(62)
3.6.1	紊流的平均连续方程	(62)

3.6.2	紊流的平均运动方程(雷诺方程).....	(63)
§ 3.7	普朗特(Prandtl)混合长度理论	(69)
§ 3.8	泰勒(Taylor)涡量交换理论	(72)
第四章	紊流自由射流及其基本方程	(74)
§ 4.1	自由射流的基本概念	(74)
4.1.1	概述	(74)
4.1.2	基本特性	(76)
4.1.3	非定密度体系	(79)
4.1.4	射流的分类	(79)
§ 4.2	不可压紊流射流的基本方程及其积分	(80)
4.2.1	不可压二元紊流射流	(80)
4.2.2	不可压三元紊流射流	(83)
4.2.3	外流中的射流	(86)
§ 4.3	射流特征量的量纲分析	(88)
第五章	紊流自由射流的流速分布	(91)
§ 5.1	不可压二元紊流自由射流主段的流速分布—托尔明 (Tollmien)法	(91)
§ 5.2	不可压二元紊流自由射流主段的流速分布—格特勒 (Göertler)法	(96)
§ 5.3	二元射流的初始段流速分布	(101)
§ 5.4	不可压三元定常紊流自由射流主段的流速分布	(104)
§ 5.5	外流中的二元射流	(108)
5.5.1	二元射流初始段	(110)
5.5.2	顺流二元射流主段	(113)
§ 5.6	外流中圆形射流初始段速度分布	(115)
§ 5.7	可压缩二元紊流自由射流	(119)

5.7.1	自由射流的基本方程及流速分布	(119)
5.7.2	射流主段的基本方程及流速分布	(124)
5.7.3	不完全膨胀自由射流	(126)
第六章	附壁射流	(127)
§ 6.1	射流的附壁现象	(127)
§ 6.2	附壁射流的简化模型	(129)
6.2.1	附壁点模型	(130)
6.2.2	控制面模型	(131)
§ 6.3	具有输入控制流量的二元不可压附壁射流	(133)
6.3.1	流动模型及速度分布	(133)
6.3.2	流量平衡关系及附壁射流有关参数	(134)
6.3.3	派瑞(Perry)对控制面模型的改进	(138)
6.3.4	附壁射流核心区的研究	(139)
§ 6.4	具有抽吸控制流量的二元不可压附壁射流	(140)
6.4.1	流动模型与速度分布	(141)
6.4.2	附壁射流中心线及其有关参数	(142)
6.4.3	控制压力流量	(145)
6.4.4	附壁射流的有关参数	(146)
§ 6.5	空中气垫原理	(148)
6.5.1	空中气垫原理的机理	(149)
6.5.2	气垫室的流动模型	(150)
6.5.3	气幕射流的速度分布	(150)
6.5.4	气幕射流中心线方程及其有关参数	(151)
6.5.5	控制压力流量与气垫压力的关系及附壁点位置	(152)
§ 6.6	可压缩附壁射流	(156)
6.6.1	流动模型、速度分布及密度分布	(157)

6.6.2	附壁射流中心线的曲率半径	(159).
6.6.3	可压缩二元定常附壁射流中心线及其有关参数	(159)
6.6.4	控制压力重量流量及附壁点位置	(161)
第七章	旋转射流	(166)
§ 7.1	旋转射流简述	(166)
§ 7.2	旋转射流的基本方程和积分方程	(168)
§ 7.3	弱旋度射流的流速分布和扩展规律	(172)
§ 7.4	中旋度射流的速度分布和扩展规律	(175)
§ 7.5	实验曲线和经验公式	(177)
第八章	射流的温度分布和浓度分布	(183)
§ 8.1	层流射流边界层的热能散布方程	(183)
§ 8.2	紊流射流边界层的热能散布方程	(185)
§ 8.3	二元射流初始段的温度分布	(188)
§ 8.4	有限宽窄缝或圆形射流主段温差分布	(191)
§ 8.5	紊流射流边界层最大浓度沿轴向的衰减规律 ...	(193)
§ 8.6	二元不可压层流射流浓度扩散方程	(195)
§ 8.7	二元不可压紊流射流浓度扩散方程	(197)
第九章	贴壁射流	(200)
§ 9.1	平板壁贴壁射流初始段	(200)
§ 9.2	贴壁射流主段的流速分布	(204)
§ 9.3	贴壁射流层流气膜的温度分布	(210)
第十章	射流的弯曲变形	(212)
§ 10.1	横穿主流圆形射流的弯曲变形.....	(212)
§ 10.2	斜穿主流二元射流弯曲变形.....	(214)
§ 10.3	斜穿主流圆形射流弯曲变形.....	(216)

§ 10.4 均匀平行主流中附壁射流弯曲变形.....	(218)
10.4.1 附壁射流中心线及其有关参数.....	(218)
10.4.2 控制压力流量.....	(223)
10.4.3 附壁流线的有关参数.....	(225)
参考文献	(227)

第一章 流体的基本性质概述

射流是流体力学研究的一个重要内容。流体是液体和气体的总称，它具有易流动性、可压缩性、粘性及导热性等重要特性。一般流体可抽象化为连续介质模型。在研究射流问题时应对流体的连续介质模型及其重要的物理性质作简要叙述。

§ 1. 1 流体的连续介质模型及其物理量

1. 1. 1 连续介质模型

由物理学知，流体是由大量作不规则的随机热运动的分子所组成。分子相互间通过不断地碰撞来交换能量和动量，而且分子间是有一定间隙的。因此，从微观上来看，流体是不连续的。流体物理量的分布在空间和时间上也都是不连续的。但是流体力学并不研究流体个别分子的微观运动，它注重的是流体的宏观特性。即研究由大量分子组成的流体微团在外力作用下引起的宏观运动规律。流体的宏观物理量（如压强、速度和密度等），都是大量分子运动的平均效果，而且这些宏观物理量，都是可以从实验中实测得到。

1753年欧拉（Euler, W.）首先提出连续介质模型。它将流体视为是由连续分布的流体质点所组成的连续介质，所谓流体质点是指流体的分子微团，在宏观上微团的尺度和所研究问题的尺度相比要充分小，以致小到在数学上可以当作一个点来处理。在微观上微团的尺度和分子运动尺度相比又足够大，以致微团内包

含着大量分子，因而可对微团运动作统计平均以得到表征宏观流体的物理量。

采用流体连续介质模型后，表征流体宏观运动的诸运动物理量（压强、速度、密度及温度等）就是空间坐标和时间的连续函数，从而可用连续函数表达和分析研究。

应该指出，连续介质模型允许在孤立的点、线或面上不连续（如激波）。对于稀薄气体，由于分子间距很大，连续介质模型不再适用。

1. 1. 2 流体的物理量

根据流体连续介质模型，任一瞬时流体所在空间的每一点都被流体质点所占据。所谓某一瞬时空间点上流体的物理量，是指此时此处的流体质点的物理量。譬如，空间一点的流体密度为该点处单位体积流体所具有的质量。即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dM}{dV} \quad (1.1-1)$$

式中 dV ——非均质流体中某一点处微元体体积；

dM ——微元体所含的质量。

当流体的温度和压强改变时，其体积也会变化，故流体的密度是随温度 T 和压强 p 而变化，即 $\rho = \rho(p, T)$ 。由于温度和压强是空间点坐标和时间的函数，所以密度也是空间点坐标和时间的函数，即 $\rho = \rho(x, y, z, t)$ 。于是，密度的全微分应为

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial t} dt + \frac{\partial \rho}{\partial x} dx + \frac{\partial \rho}{\partial y} dy + \frac{\partial \rho}{\partial z} dz \quad (1.1-2)$$

其它物理量类推。

§ 1. 2 流体的压缩性

1. 2. 1 流体的压缩性

流体受到的压强增大时体积将缩小, 这种性质称为流体的压缩性。流体的压缩性可用体积压缩系数 β_p 表示。它表示在流体温度不变时, 增加单位压强引起流体体积的相对减少量, 即

$$\beta_p = - \frac{dV}{V} \frac{1}{dp}$$

式中 dp ——流体的压强增量;

$\frac{dV}{V}$ ——在压强增量 dp 作用下, 流体体积的相对变化量。

β_p 的单位为 m^2/N 。由于压强增大(dp 为正)时, 体积缩小(dV 为负), 比值 dV/dp 为负, 故在式右边加负号, 以使 β_p 为正值。

体积压缩系数的倒数称为体积弹性模量, 即

$$E_v = \frac{1}{\beta_p} = - \frac{V dp}{dV} \quad (\text{N/m}^2 \text{ 或 Pa}) \quad (1.2-2)$$

工程上常用体积弹性模量 E_v 来衡量流体压缩性的大小。 E_v 越大, 流体的压缩性越小。 E_v 值取决于压缩时的热力学条件。当压缩时流体温度保持不变, 此时的 E_v 值称为等温体积弹性模量。若压缩时流体绝热且不存在摩擦, 则对应的 E_v 值称为等熵体积弹性模量。等熵体积弹性模量与等温体积弹性模量之比为 γ , 即流体的定压比热容 c_p 与定容比热 c_v 之比。对于液体该比值约为 1。因此, 除了精确计算外, 一般不作区分。

1. 2. 2 可压缩流体与不可压缩流体

压缩性是流体的基本属性, 不同的流体具有不同压缩性。譬如水的压缩性很小, 常温下, 它的体积弹性模量 $E_v = 2.1 \times 10^9$

N/m^2 , 当压强增加一个工程大气压 ($9.8 \times 10^4 \text{Pa}$) 时, 其密度相

对变化量不到万分之一。其它液体的压缩性也都很小。因此,在研究液体流动时,其密度可视为常数。密度为常数的流体称为不可压流体。对于气体,其压缩性较大,而且密度还与压强和热力过程有关。一般气体常按可压缩流体来处理。

工程问题中是否考虑流体的压缩性,尚需视具体情况而定。对于液体一般情况下以不可压流体对待。对于气体,当流速较高,压强变化较大,体积变化不容忽视时,必须考虑气体的压缩性,这时应将密度作为变化量。当流速不高,压强变化较小时,则可忽略压缩性的影响,将气体视为不可压流体对待。流体的压缩性取决于流速 v 与当地音速 a 之比,该比值称为马赫(Mach)数 Ma 对于一般气体的流动问题,当 $Ma \leq 0.5$ 时,流动过程中密度的变化就可忽略。

§ 1.3 流体的粘性

粘性是表征流体抵抗剪切变形能力和宏观表现流体分子的动量输运性质的一种属性。从微观来看,由于气体分子间距很大,分子间的吸引力对剪切变形的抵抗作用可以忽略。而气体分子间无规则的动量交换则是导致气体粘性的主要原因。对于液体的粘性则是两种机理共同作用的结果,其中分子间的吸引力是引起液体粘性的主要原因,其次是分子间的动量交换。

流体粘性可用流体的动力粘度来度量。根据牛顿粘性平板实验(图 1.3-1),归纳出牛顿内摩擦定律,其中动力粘度 μ 为流体中任一点处单位面积上的剪切力与速度梯度的比值,即牛顿剪切应

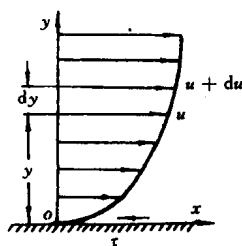


图 1.3-1 牛顿粘性
平板实验

力公式为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.3-1)$$

式中 τ ——剪切应力；

u ——流速；

du/dy ——速度梯度。

μ 的国际单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 或 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

流体的粘性还常用动力粘度 μ 与密度 ρ 的比值来表示，并称为流体的运动粘度 ν ，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.3-2)$$

运动粘度 ν 的单位为 m^2/s 。

动力粘度 μ 与流体的种类有关，同时还与压强和温度有关，但压强影响较小。液体的动力粘度随温度升高而减小，气体的动力粘度随温度升高而增大。流体的动力粘度与温度的关系通常用经验公式来计算。气体的动力粘度可用麦克斯韦 - 瑞利 (Maxwell-Rayleigh) 公式近似计算，即

$$\mu \approx \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \quad (1.3-3)$$

式中 $T_0 = 273.16\text{K}$ ；

μ_0 ——1 个大气压下温度为 T_0 时气体的动力粘度；

n ——温度指数。如空气的 $n = 0.76$ 。

μ_0 和 n 可在有关手册中查到。

水的动力粘度与温度的关系，可用海姆霍兹 (Helmholtz) 公式近似计算，即

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + 0.03368t + 0.000221t^2} \quad (1.3-4)$$

式中 μ_0 ——水在 0°C 时的动力粘度 (单位用 $\text{Pa} \cdot \text{s}$)，

t ——水温的摄氏度数($^{\circ}\text{C}$)。

真实流体都有粘性。在实际流动问题中,多数只是在靠近物面很薄一层(称为附面层)内速度梯度较大,由于该层流体的粘性力较大才需要考虑粘性的影响。而在这一薄层以外的流域,由于速度梯度很小,其粘性力可以忽略不计,即大部分区域可以不计粘性影响。粘度 μ 为零的流体称为理想流体。理想流体是流体力学中的一种简化模型,引入这种模型是为了简化问题。当需要计及粘性影响时,可以对按理想流体分析得到的结果加以修正。本书主要讨论的是紊流射流,必须考虑粘性。

§ 1.4 流体的比热容和导热性

比热容和导热性是流体的两个重要的热力学性质。

1.4.1 比热容

热力学中定义 1kg 流体温度升高或降低 1 $^{\circ}\text{C}$ (K) 所需吸收或放出的热量称为比热容,记为 c 。不同流体的比热容数值不同。对于单位质量流体,若温度增加 dT 时,所需的热量为 dq ,则比热容为

$$c = \frac{dq}{dT} \quad (1.4-1)$$

比热容的单位是 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

对流体加热时,加入的热量会使流体的温度升高,即增加流体的内能 i ,同时还会使流体体积膨胀而对外做功 $p dv$,按热力学第一定律有

$$dq = di + p dv \quad (1.4-2)$$

式中 p ——流体的压强;