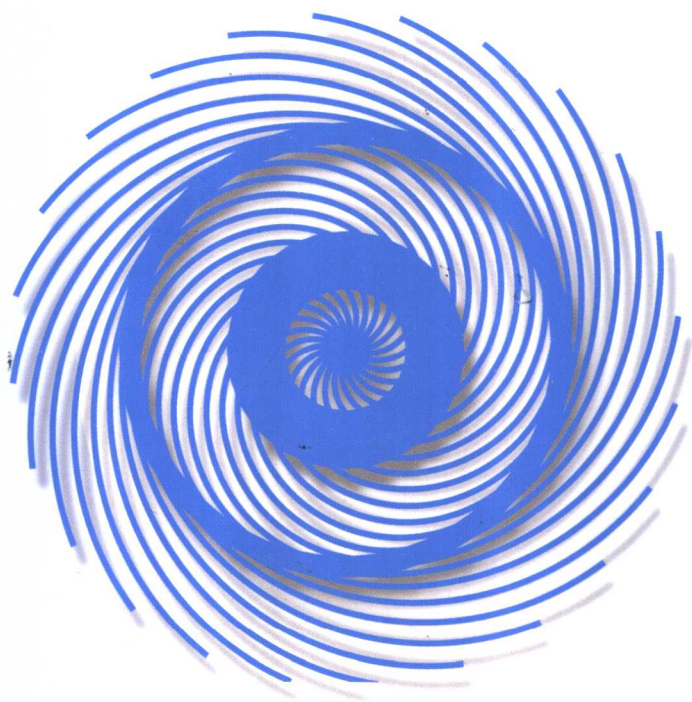


刘沛清 编著



高等学校研究生教材

自由紊动射流理论



035/89

2008

高等学校研究生教材

自由紊动射流理论

刘沛清 编著

北京航空航天大学出版社

内容简介

本书主要涉及自由紊动射流的基本特征、基本理论和计算方法。其中,第1章介绍紊动射流的定义和基本特征;第2章介绍紊动射流的基本方程、紊流模型和直接数值模拟;第3章介绍平面自由紊动射流的基本理论;第4章介绍圆形自由紊动射流的理论;第5章介绍复合自由紊动射流的理论;第6章介绍自由紊动混合层的理论;第7章介绍可压缩二维紊流自由射流;第8章简单介绍合成射流。

本书物理概念清晰,理论推导严谨,可作为高等工科院校流体力学研究生及高年级本科生的教材,也可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自由紊动射流理论/刘沛清编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2008.4

ISBN 978-7-81124-274-4

I. 自… II. 刘… III. 紊动—自由射流—理论 IV. 0358

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 192439 号

自由紊动射流理论

编 著 刘沛清

责任编辑 董 瑞

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpresse@263.net

北京市媛明印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:11.25 字数:288千字

2008年4月第1版 2008年4月第1次印刷 印数:3000册

ISBN 978-7-81124-274-4 定价:26.00元

前 言

该书是作者在北京航空航天大学航空科学与工程学院为硕士研究生开设的《紊流模型与射流理论》讲义的基础上撰写而成,主要是为流体力学专业的研究生介绍紊动射流的基本理论和分析方法。

紊动射流力学是研究喷射流体在各种边界条件和环境下的流动规律,是流体力学的重要分支之一,也是紊流力学研究的基础,而且在各工程领域得到了广泛的应用。全书以自由紊动射流为主线,在系统介绍各种自由紊动射流的基本特征和变化规律的基础上,详细论述了自由紊动射流的基本方程、紊流模型基本理论和计算方法等。其中,第1章介绍紊动射流的定义和基本特征;第2章介绍紊动射流的基本方程、紊流模型、大涡模拟技术和直接数值模拟;第3章介绍平面自由紊动射流的基本理论;第4章介绍圆形自由紊动射流的理论;第5章介绍复合自由紊动射流的理论;第6章介绍自由紊动混合层的理论;第7章介绍可压缩二维紊流自由射流;第8章简单介绍合成自由射流的特征。

本书在内容的取材和论述过程中,力图做到物理概念清晰,理论推导严谨,由浅入深、图文并茂。

在本书的编写过程中,得到靳健博士、徐南波硕士及张政硕士的大力帮助,在此一并致谢。

北京航空航天大学王晋军教授仔细地审阅书稿并提出许多宝贵意见和建议,在此表示感谢。

因本人水平有限,时间仓促,书中错误恳请读者批评指正,本人不胜感谢。

编 者

2007年6月

目 录

第 0 章 绪 论	1
0.1 工程中的射流现象	1
0.2 射流理论的发展及其研究方法	4
第 1 章 紊动射流的基本特征	6
1.1 紊动射流的定义及其类型	6
1.2 紊动射流的涡结构、卷吸与扩散作用	6
1.3 紊动射流的分区结构	8
1.4 紊动射流速度分布的相似性	8
1.5 紊动射流边界的线性扩展规律	10
1.6 紊动射流的等速度线	11
1.7 自由紊动射流的动量守恒	12
1.8 紊动射流的紊动特征	12
第 2 章 紊动射流基本方程与紊流模型	14
2.1 紊动射流的分析方法简介	14
2.2 紊动射流的微分方程组	14
2.3 紊动射流微分方程组的封闭问题与紊流模式	19
2.4 高级数值模拟	28
2.5 紊动射流积分方程	44
2.6 可压缩紊流输运方程	51
2.7 可压缩紊流模型	54
第 3 章 平面自由紊动射流	70
3.1 平面自由射流的扩展厚度和轴向最大速度的衰变规律	70
3.2 平面自由射流时均速度分布理论解	74
3.3 平面自由紊动射流实验结果与分析	79
第 4 章 圆形自由紊动射流	89
4.1 圆形自由射流的扩展厚度和轴向最大速度的衰变规律	89
4.2 圆形自由紊动射流时均速度分布理论解	92
4.3 圆形自由紊动射流实验结果与分析	98

第 5 章 复合自由紊动射流	108
5.1 平面复合射流扩展厚度和轴向最大速度的衰变规律	108
5.2 平面复合强射流时均速度分布理论解	112
5.3 平面复合紊动射流实验结果与分析	117
5.4 圆形复合射流扩展厚度和轴向最大速度的衰变规律	121
5.5 圆形复合紊动射流实验结果与分析	125
第 6 章 自由紊动混合层	127
6.1 平面紊动混合层的相似性分析	127
6.2 平面紊动混合层时均速度分布理论解	129
6.3 平面紊动混合层实验结果与分析	133
6.4 平面复合混合层(剪切层)相似性分析	136
6.5 平面复合混合层(剪切层)时均速度分布规律	137
6.6 环形紊动混合层(剪切层)	142
6.7 复合环形紊动混合层(剪切层)	146
第 7 章 可压缩二维紊流自由射流	151
7.1 可压缩自由射流的基本方程及流速分布	151
7.2 射流主体段的基本方程及流速分布	154
7.3 不完全膨胀自由射流	155
第 8 章 合成射流简介	156
8.1 国内、国外发展现状.....	157
8.2 主动流动控制技术及其应用概述	159
8.3 合成射流技术	159
8.4 合成射流的数值模拟	162
8.5 计算结果与分析	166
参考文献	171

第 0 章 绪 论

紊动射流力学是研究喷射流体在各种边界条件下和环境中的流动规律。它不仅是流体力学的一个分支,而且在各个工程领域都得到了广泛的应用,譬如农田喷灌水射流、消防喷枪水射流、石油化工喷射泵(蒸汽的、液体的、气体的)射流、水力开采的水射流、航空航天器发动机喷气射流、水利工程中大坝各种孔口下泄的水射流等等。下面将分别介绍工程中的各种射流现象与射流理论的发展和研究方法。

0.1 工程中的射流现象

1. 高速喷气射流

在航空航天技术领域中,大量使用火箭发动机、涡轮喷气发动机、冲压喷气发动机等,如图 0.1~0.4 所示。从力学的观点来看,这些发动机所喷出的射流是作为一种受力载体而被使用的。当高压气体离开喷管后,将在喷管后形成高速射流,由此产生的反作用力就是发动机的推力。

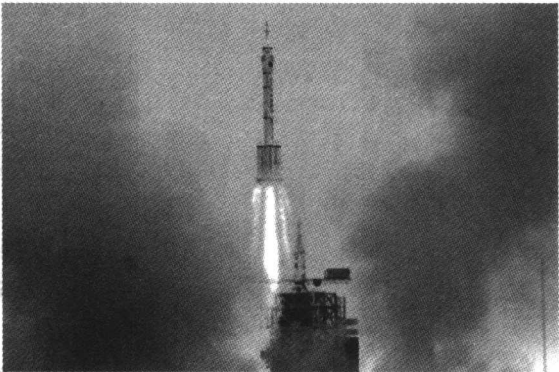


图 0.1 火箭发动机(神 6)

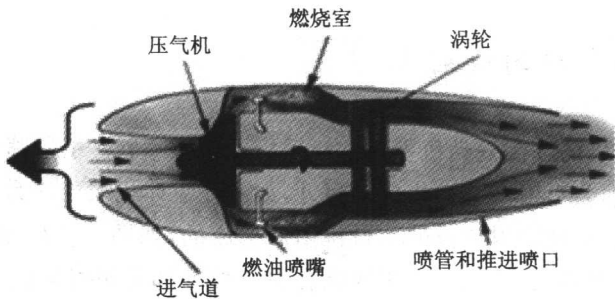


图 0.2 涡轮喷气发动机

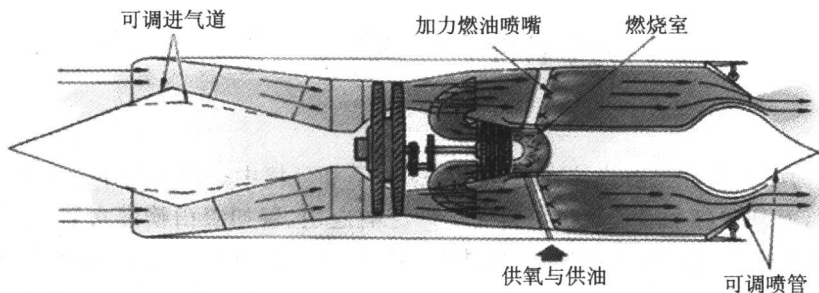


图 0.3 火箭/冲压组合式喷气发动机

2. 高压水射流

在水力开采中,常用高压水射流作为一种剥离岩石或煤层的工具;在许多机械工业生产中,用高压喷射流(空气和水混合液等)来清除油污碎屑;此外,农田喷灌水射流、消防水射流、气焊和气割喷射流以及冶金工业生产中的氧气顶(底)吹射流等均是射流作为一种动力工具。流体在高压室内所承受的压力经管道、喷嘴(口)以较高的速度喷射出去来完成各种工作,如图 0.5 所示。



图 0.4 导弹喷射流

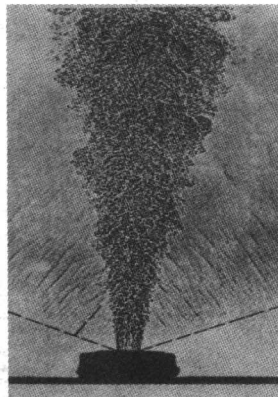


图 0.5 高压水射流

3. 作为引射介质的引射流

在许多高性能飞机的喷气发动机上已广泛采用了引射喷管。引射喷管是利用喷气流作为引射流,并在其外部加装引射套管而构成。另外,如工业流体机械中作为无动力机械的气体增压装置——引射器,也是利用引射流的引射作用而构成的,如图 0.6 所示;航空工业中应用的引射风洞、通风机、吸尘器,石油工业中用的混合引射器等都是用引射流来完成其功能的。就力学的观点而言,这种射流既不同于产生推力的喷气射流,也不同于产生动力的喷射流,它能

将部分能量传递给周围的流体介质,并获得某种效能。此外,在现代飞机的增升装置中(如图 0.7 所示),吹(喷)气襟翼也是利用引射流技术达到在低速下增加升力的目的。当无吹气襟翼放下时,有可能引发机翼尾部的气流分离;而吹气襟翼利用了吹气流的引射卷吸作用,当它放下时可避免气流发生分离。

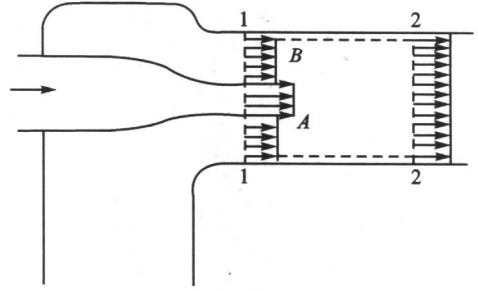


图 0.6 引射器结构原理示意图

4. 旋转雾化射流

在热动力机械中,液体燃料的雾化一般都是将高压液体燃料通过喷嘴形成雾化射流。农药喷雾器的雾化射流是旋转射流,这种雾化射流需要根据特殊要求设计出各型喷嘴才能形成。一种离心式喷嘴示意图如图 0.8 所示。

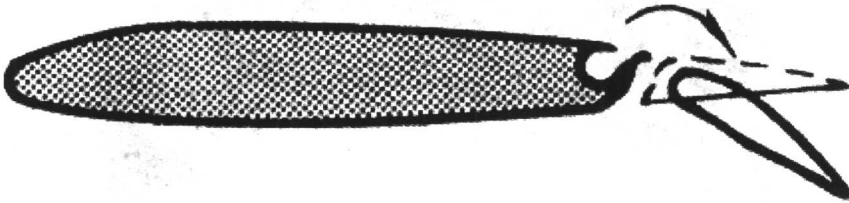


图 0.7 飞机的增升装置——吹(喷)气襟翼(吹气襟翼改善气流、增大弯度)

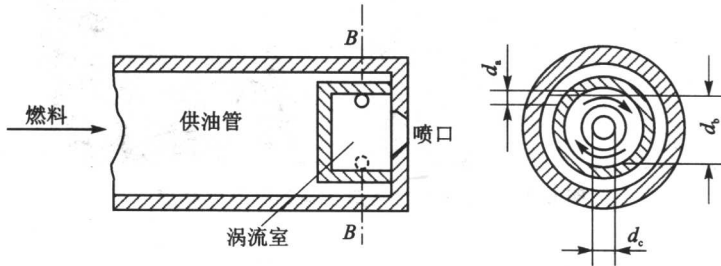


图 0.8 离心式喷嘴示意图

5. 其他射流

在射流应用领域,常见的还有浮射流(如图 0.9 所示)、附壁射流(如图 0.10 所示)、掺气水射流(如图 0.11 所示)、冲击射流等,此处不再赘述。

上述介绍的一些射流现象表明,作为一门学科,射流理论不仅有着广泛的工程应用前景,而且研究内容也是相当丰富的。

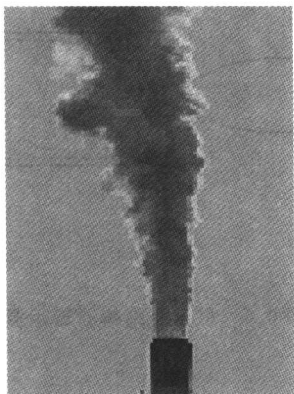


图 0.9 浮射流

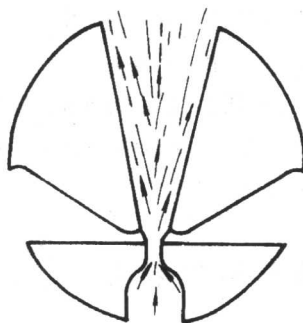


图 0.10 附壁于两侧壁的射流

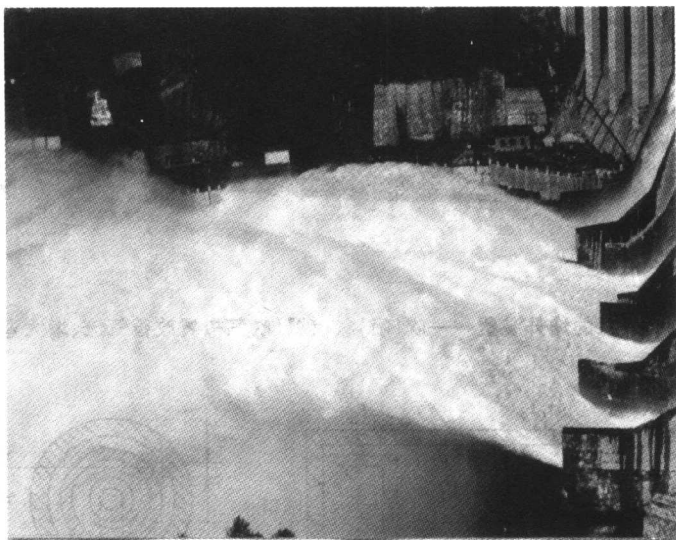


图 0.11 大坝坝身孔口下泄的掺气水射流

0.2 射流理论的发展及其研究方法

从 20 世纪 20 年代起,前人利用实验、理论、数值模拟等手段,对不同的紊动射流进行了广泛深入的研究,现已积累了大量的研究成果,特别是对自由紊动射流所形成的一套较完整的分析方法是研究其他射流的理论基础。

1. 在实验方面

在实验方面,最早是测量射流时均物理量的变化过程,特别是纵向时均速度的分布及其衰变规律(如用皮托管测量射流的纵向时均速度分布)。后来随着量测技术的迅速发展,特别是热线(热膜)测速仪和激光测速仪的问世,人们对射流各种紊动物理量的变化及其分布进行了系统的

研究,从而为揭示射流的扩散规律、卷吸机理和速度衰变等提供了坚实的实验资料。热线风速仪是20世纪30年代后期间世的,其基本原理是在流场中放置一根很细的金属丝,其上通电流加热,由于热交换作用,金属丝产生的热量将传给流体,并被流体带走,当流体速度变化时,这种热交换也会发生变化,金属丝的温度随之改变,从而使电阻值发生变化。若将该金属丝接到电桥的一个桥臂上,电桥将输出电压信号,其大小与流体速度之间存在一定的对应关系。通过测量电桥输出的电压,达到测量流速的目的。由于热线风速仪能测量脉动速度,从而使人们可较全面地了解射流在主体段的动量平衡、能量衰变、脉动特征、间歇性、微分尺度和积分尺度等。

激光测速仪(LDA)是20世纪70年代利用激光的多普勒效应而发展起来的测速技术。由于它具有不干扰流场、不需要标定、精度高、测点极小($<1\text{ mm}$)、动态响应快、方向灵敏性好以及可以测量底部或近壁区域的流速等优点,在现代流体力学的测量中得到广泛应用。前人利用LDA测量了射流的卷吸过程,并由此得到平均速度和湍流强度分布的图像,这是在实验手段上的一大改进。

近年来,计算机技术的发展和高分辨率图形显示设备的出现导致了流场显示从定性研究进入到用计算机进行定量分析的阶段,特别是最近CCD光电面层图像传感器的应用,实现了流谱图的微机实时采集和处理,将流动显示的研究推向更高的水平。目前,流动显示技术在紊动射流的研究中也受到了高度重视。

2. 在理论分析方面

从20世纪20年代起,人们利用各种紊流的半经验理论和相似性假设求解了射流的边界层方程,获得的时均物理量的分布和变化规律(如时均速度、时均温度等)得到了实验资料的证实,由此形成了射流的经典理论。其基本思想是:从实验资料出发,引入普朗特的混合长模型,在假定射流诸参数沿程相似的基础上,将描述射流的连续性方程、动量方程、能量方程转化为一组相应的常微分方程,从而通过积分可求得时均量的分布。如Tollmien基于普朗特1925年建议的混合长理论建立的理论分析方法是分析自由射流的经典理论。

3. 在数值模拟方面

从20世纪70年代中叶起,计算机和流体数值技术的迅速发展以及许多新的精细紊流模型的不断问世,人们利用数值模拟技术直接求解紊动射流成为可能。与经典的积分方法相比,在数值模拟中不需要在积分方法中提出的各种假设。目前,人们已利用不同的数值模拟方法和紊流模型,成功地预报了各种射流的流动特性和物理量的分布规律。如Chen和Nikitopoulos对静止环境中的自由紊动射流近区特性进行了预报,McGrirk和Rodi利用 $k-\epsilon$ 紊流模型预报了静止环境中矩形自由射流的三维特性,McGrirk和Rodi计算了静止环境中的三维自由表面射流,Hossan和Rodi、Li和Chen对局部分层射流的特性进行了数值预报,Li和Huai计算了静止环境中浮力射流的全场特性等。

从现有的研究成果看,虽然人们对各种射流进行了大量的研究,取得了许多有价值的研究成果,但理论方面较成熟的是自由紊动射流理论,这些经典的理论是分析其他射流的基础。为此,作为一本射流理论的基础教材,本书重点论述自由紊动射流的理论和研究成果。

第 1 章 紊动射流的基本特征

1.1 紊动射流的定义及其类型

1. 射流的定义

由各种排泄口喷出,流入到同种或另一种流体域内运动的一股流体,称为射流。

2. 射流的类型

(1) 按流态划分:层流射流和紊动射流。

设射流出口尺度为 L_0 ,出口流速为 u_0 ,则当射流出口 Re 小于 30 时为层流射流;否则为紊流射流。

(2) 按产生射流的原动力划分:纯射流、浮力羽流和浮射流。

纯射流:以射流出口动量作为原动力,也称为动量射流,常见于同种流体中的射流;

浮力羽流:射流出口无动量,形成射流的原动力为浮力(如烟流),射流的形状类似于羽毛状;

浮射流:形成射流的原动力为动量和浮力(如排污口的热水射流)。

(3) 按射流的物理性质划分:不可压缩射流、可压缩射流、等密度射流和变密度射流。

(4) 按射流喷口的断面形状划分:平面射流、圆形射流、矩形或方形射流等。

(5) 按射流周围的环境条件划分:自由射流和非自由射流。

自由射流:在无限空间中的射流;

非自由射流:在有限空间中的射流。

(6) 按射流周围流体的性质划分:淹没射流和非淹没射流。

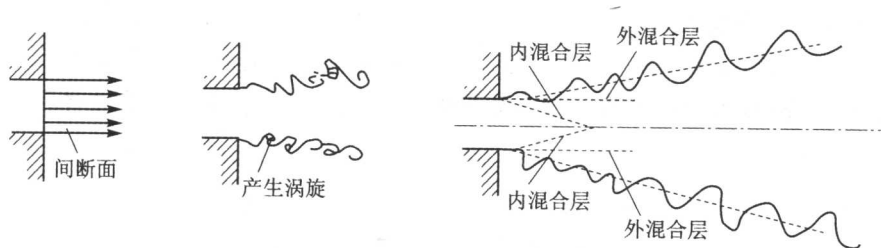
淹没射流:在同种流体中的射流;

非淹没射流:在不同种流体中的射流。

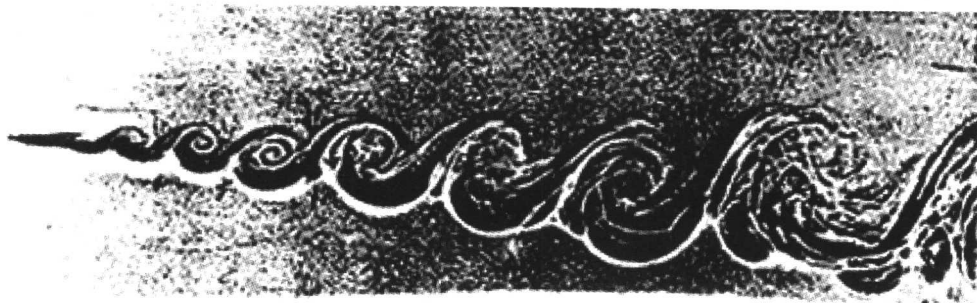
1.2 紊动射流的涡结构、卷吸与扩散作用

研究发现,射流的能量传递、动量输运、流体卷吸和混掺扩散等物理机制与喷管出口处存在的速度间断面所产生的自由剪切层中涡结构的发展和演变过程密切相关。如图 1.1(a)所示,由喷管出口射入静止环境中的流体与其周围流体之间存在着速度间断面,此速度间断面是

不稳定的,一旦受到扰动将失去稳定而产生旋涡。这些旋涡通过分裂、变形、卷吸和合并等物理过程,除形成大量的随机运动小尺度紊动涡体外,还存在一部分有序的大尺度涡结构,即剪切层中的大涡拟序结构,如图 1.1(b)所示。人们发现这些大尺度涡的拟序结构与剪切层的厚度同量级,不仅有明显的涡结构、高度的规律性和重复性,而且对紊流的产生、能量传递、动量输运和紊动混掺等均产生直接的影响。剪切层中的大涡拟序结构由纵向涡和展向涡组成,且剪切层的发展主要由大尺度的展向涡结构控制,而非小尺度涡紊动扩散作用的结果。这些展向涡几乎以不变的速度向下游移动,并通过涡的相互作用、合并和卷吸,使涡的尺度和涡距不断增大,从而控制着剪切层的发展,导致射流断面沿程扩大、流速沿程减小,且通过大涡卷吸作用使流量沿程增大,如图 1.1(c)所示。



(a) 紊动射流剪切层的发展过程



(b) 在剪切层中的大涡拟序结构



(c) 在紊动射流中的涡结构

图 1.1 紊动射流剪切层的发展与大涡拟序结构

1.3 紊动射流的分区结构

射流的整体结构是相当复杂的。为便于分析,常根据不同的流动特征将射流划分为几个区域,如图 1.2 所示。由喷管出口边界起向内外扩展的剪切流动区称为自由剪切层区(shear layer zone)或紊动混合区(turbulent mixing layer zone);中心部分未受紊动混掺影响,并保持喷管速度的区域称为射流核心区(potential core zone);沿着纵向从喷管出口至核心区末端的区域称为射流的初始段(initial region)或射流的发展区(flow developing region);在初始段下游区域绝大部分为充分发展的紊动混掺区,称为射流的主体段(main region)或射流的充分发展区(fully developed flow region);在射流的初始段和主体段之间有过渡段(transitional region)。过渡段较短,在分析中为简化起见常被忽略,仅将射流分为初始段和主体段。

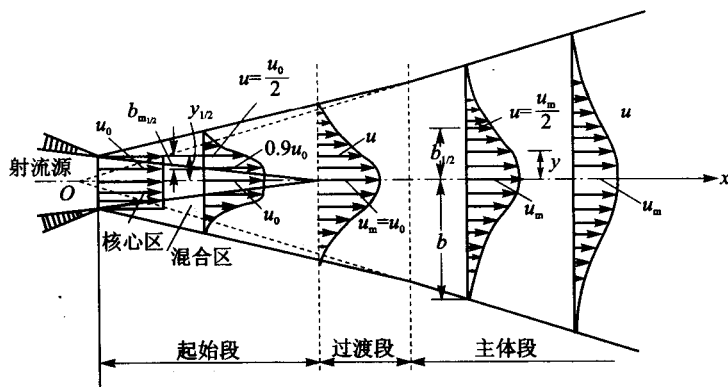


图 1.2 紊动射流分区

1.4 紊动射流速度分布的相似性

紊动射流一个重要的特点是:在射流的主体段,各断面纵向时均速度分布是相似的(similarity)或自保持的,即各断面纵向时均速度分布可用一个函数表示为

$$\frac{u}{u_m} = f\left(\frac{y}{b}\right) \quad (1.1)$$

式中, u 为某断面任一点纵向时均速度; u_m 为断面中心轴线上的纵向最大时均速度; b 为射流的半扩展厚度,也称为射流的理论半扩展厚度。由于射流边界的不规则性,实验上很难确定 b ,故常用其他定义方式给出射流的特征半厚度,也称为射流的各义半扩展厚度。如 $b_{1/2}$ 定义为 $u = \frac{1}{2}u_m$ 时的 y 值, b_e 定义为 $u = \frac{1}{e}u_m$ 时的 y 值, $b_{0.1}$ 定义为 $u = 0.1u_m$ 时的 y 值。图 1.3(a) 为静止流体中平面射流不同断面时均速度分布实验资料,图 1.3(b) 为主体段上各断面量纲为 1 的纵向时均速度分布。实验资料表明: (1) 在射流任一断面上,随着横向坐标 y 的增加,射流纵向时均速度 u 从中心轴处的最大值逐渐地衰减到零值; (2) 随着纵向坐标 x 的增加,射流中心轴线纵向时均速度 u_m 不断减小,纵向时均速度分布也趋于平坦; (3) 在射流主体段,若用 u_m 和

b 或 $b_{1/2}$ 作为量纲为 1 的速度和长度尺度, 则不同断面上的量纲为 1 的纵向时均速度分布可归一在同一条曲线上, 这就是射流速度分布的相似性。

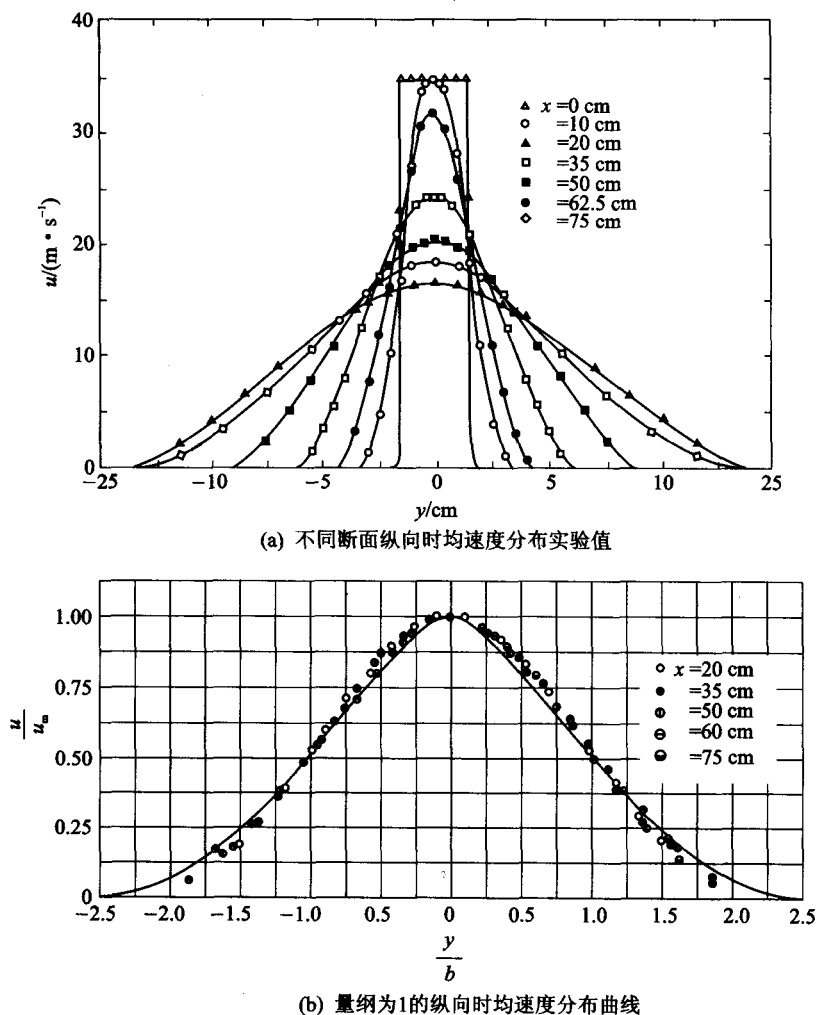


图 1.3 平面淹没射流主体段纵向时均速度分布 (引自 Forthmann 的实验资料)

另外, 实验还表明射流的这种相似性不仅仅针对射流主体段纵向时均速度的分布, 且在射流初始段剪切层区纵向时均速度分布也是相似的, 在远离喷口下游某一位置以后, 射流的某些紊动特征量的统计平均值分布也是相似的。图 1.4 为平面射流初始段剪切层区量纲为 1 的纵向时均速度分布的实验资料, 图中纵坐标为 $\frac{u}{u_0}$, 横坐标为 $\frac{\Delta y_c}{\Delta y_b}$, 量纲为 1 的曲线方程为

$$\frac{u}{u_0} = f\left(\frac{\Delta y_c}{\Delta y_b}\right) \quad (1.2)$$

式中, u_0 为射流出口速度; $\Delta y_c = y_c - y$, y_c 为 $u = 0.5u_0$ 的 y 值; $\Delta y_b = y_{0.1} - y_{0.9}$, $y_{0.9}$ 为 $u = 0.9u_0$ 的横坐标 y 值, $y_{0.1}$ 为 $u = 0.1u_0$ 的 y 值。

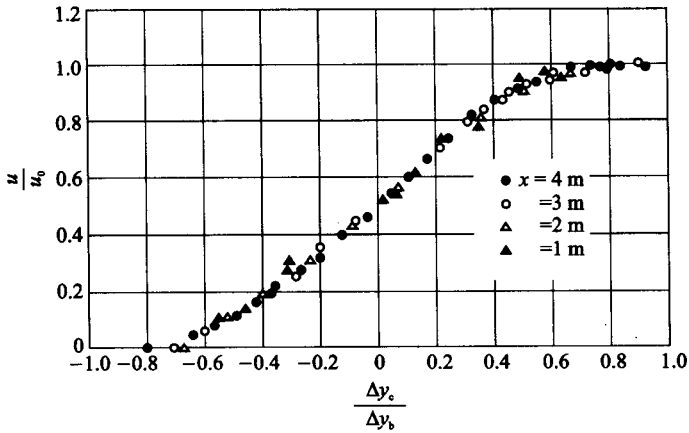


图 1.4 平面射流初始段剪切层区量纲为 1 的纵向时均速度分布
(引自 Albertson 实验资料)

1.5 紊动射流边界的线性扩展规律

严格而言,紊动射流的边界是紊流和非紊流之间的交界面,是有间歇性的复杂流动。此界面由紊流大尺度涡结构决定,并随时间发生极不规则的变化。一些实验资料表明,在 $\frac{u_x}{u_m} = 0.1$ 处,间歇因子(紊流时间占总时间的比值)约为 0.5。但在统计意义上,如设射流的时均厚度为 $2b$ (b 为射流主体段的半厚度),则由实验发现, b 是按线性扩展的,则有

$$\frac{b}{x} = \text{const} \quad (1.3)$$

这一性质可由下面分析得出。

在自由紊动射流情况下,由于质点的脉动不受固体边界的限制,Prandtl 根据射流主体段时均速度分布的相似性,假定在射流任一横断面上质点运动的混合长度 l_m 为常数,且与同一断面上射流的半厚度 b 成正比,即

$$\frac{l_m}{b} = \alpha = \text{const} \quad (1.4)$$

实验表明,紊动射流边界随时间的变化速率与射流的横向脉动速度 v' 成正比。如进一步引入 Prandtl 的混合长度理论(mixing length theory) $v' \propto l_m \frac{\partial u}{\partial y}$,则有

$$\frac{db}{dt} \propto v' \propto l_m \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1.5)$$

在这里,由于 $b=b(x)$,因此

$$\frac{db}{dt} = \frac{\partial b}{\partial t} + u \frac{\partial b}{\partial x} = u \frac{\partial b}{\partial x} \propto u_m \frac{db}{dx} \quad (1.6)$$

以及由射流时均速度分布的相似性质,有

$$l_m \frac{\partial u}{\partial y} \propto l_m \frac{u_m}{b} = \alpha u_m \quad (1.7)$$

现将式(1.7)和式(1.6)代入式(1.5),得

$$\frac{db}{dx} \propto \frac{l_m}{b} = \alpha = \text{const} \quad (1.8)$$

且有

$$b = Cx \quad (1.9)$$

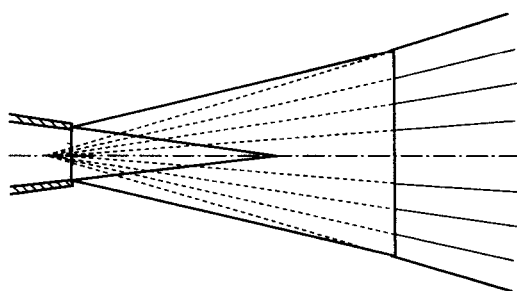
式中, C 为比例常数。这个关系式表明,在统计意义上射流的边界是按线性规律扩展的。紊动射流的这一线性扩展规律具有相当普遍的意义,对于平面射流、轴对称射流的主体段和初始段的剪切层区都是适用的。

1.6 紊动射流的等速度线

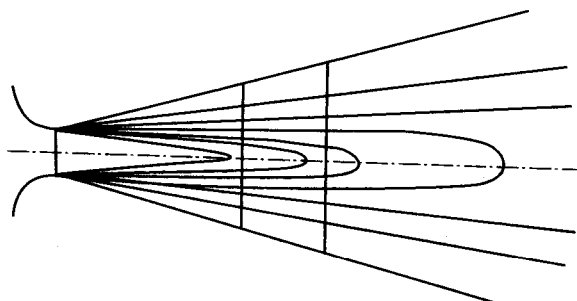
若以紊动射流主体段边界线的延长线与射流轴线的交点作为坐标原点(称为射流源点或极点),则由紊动射流区时均速度分布的相似性和线性扩展规律可知,量纲为1的时均速度可表示为

$$\frac{u}{u_m} = f\left(\frac{y}{b}\right) = f_1\left(\frac{y}{x}\right)$$

上式说明,射流主体段量纲为1的时均速度的等值线是一族通过射流极点的直线,如图1.5(a)所示。如果用喷管出口 u_0 作为量纲为1的射流速度尺度,则量纲为1的时均速度 $\frac{u}{u_0}$ 与有量纲时均速度的等值线是重合的,且也非直线,而是曲线,如图1.5(b)所示。



(a) 在紊动射流主体段量纲为1的时均速度 $(\frac{u}{u_m})$ 等值线



(b) 在紊动射流区量纲为1的时均速度 $(\frac{u}{u_0})$ 等值线

图 1.5 紊动射流区的等速度线