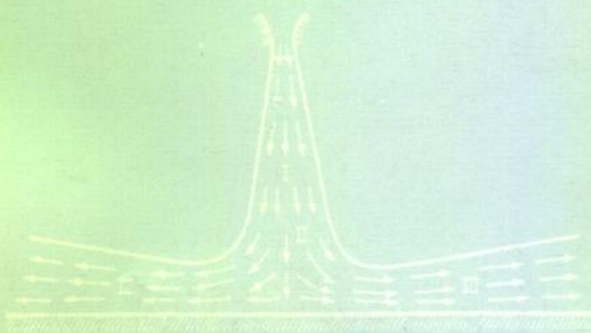


冲击射流

IMPINGING JETS

董志勇 著



海洋出版社



C358

D76

412619

冲击射流
IMPINGING JETS

董志勇 著

海洋出版社

1997年·北京

内 容 简 介

本书系统地阐述了冲击射流的基本理论及研究方法,主要包括:紊动自由射流、单股和多股冲击射流的流动特性、冲击压力、物质(热)扩散、壁面射流、掺气、相干结构及数值模拟。本书内容丰富,既介绍了经典理论,又论述了最新研究成果。

本书可供水利水电、海洋、航空航天、化工、环保、冶金、煤炭、机械、食品及医药等领域的研究生、教师、科研人员及工程技术人员参考。

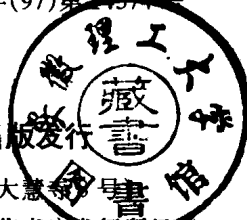
1298/2
图书在版编目(CIP)数据

冲击射流/董志勇著. —北京:海洋出版社,1997.9
ISBN 7-5027-4335-9

I. 冲… II. 董… III. 冲击(压力)—射流 IV. 0358
中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 14371 号

海洋出版社

出版发行



(100081 北京市海淀区大慧寺路)

北京通县兰空印刷厂印刷 新华书店及各行所经销
1997年9月第1版 1997年9月北京第1次印刷

开本:850×1168 1/32 印张:9.87

字数:264千字 印数:0—1000册

定价:15.00元

海洋版图书印、装错误可以随时退换

前 言

冲击射流在许多工程技术领域得到广泛的应用,如水利水电泄水工程中的挑、跌流水舌冲击水垫塘、水跃、井式或虹吸溢洪道及强迫掺气设施;航空航天领域的垂直起飞和着陆(VTOL)飞行器;海洋学中的海气相互作用;环境工程中的复氧射流;化工中的搅拌射流;冶金工业中浇铸的金属熔液;煤炭工业中的水力采煤;节水灌溉中的微喷灌;自动控制方面的射流元件;动力方面的蒸汽泵、汽轮机;工程热物理方面的燃烧室。此外,在石油、食品、医药、化妆品及油漆等工业中亦有广泛的应用。

一般地讲,冲击射流按其流动特性可划分为三个典型的流动区域,即自由射流区、冲击区和壁面射流区,对于多股冲击射流还存在上喷流区。迄今,国内外已有射流方面的几部专著,多限于论述自由射流,而对冲击射流则论述较少。大量的关于冲击射流方面的研究成果则散见于各种学术期刊及会议文集中。鉴于此,早在作者攻读博士学位期间,就萌发了写一本这方面专著的念头,目前这本拙著就是作者几年心血的结晶。

全书共分十章,第一章介绍了冲击射流的实际应用及流动分区,以使我们对冲击射流有一初步认识;第二章着重讨论紊动自由射流的特性及基本的研究方法;第三章主要讨论实际应用中经常遇到的平面和圆形紊动冲击射流的时均特性及紊动结构;第四章论述了冲击射流作用于底板上的压力特性;第五章讨论射流的物质(热)扩散特性;壁面射流是冲击射流的重要组成部分,在第六章中着重论述了这个问题;在前几章讨论单股射流的基础上,第七章论述了多股冲击射流的特性;冲击射流掺气是许多领域的重要研究课题,第八章着重讨论了这个问题;在第九章我们主要讨论冲击射流的数学模型及其

数值计算方法;最后一章论述了冲击射流的相干结构(拟序结构)。在每一章末附有详细的参考文献,中文以姓氏笔划为序,西文和俄文以字母顺序为序。

本书承蒙著名水力学家、四川联合大学吴持恭教授审阅,吴老在百忙中审阅了全部书稿,并提出了许多宝贵的修改意见,谨此表示衷心的感谢。四川联合大学杨永全教授、戴光清博士、许唯临博士惠赠作者部分宝贵的资料并给予作者很大的帮助。中国科学技术大学韩肇元教授、西南水运工程研究所王平义研究员、厦门大学胡国清博士后、成都军区帅青红博士、美国 Mississippi 大学张云博士等曾给予作者热情的鼓励和帮助,作者谨向他们表示真诚的谢意。书中作者的研究成果曾得到吴持恭教授的指导和国家自然科学基金的资助,本书的出版得到南京水利科学研究所的资助,谨此表示诚挚的感谢。本书还得到南京水利科学研究所前院长须清华教授的鼓励和支持,另外还得到钱炳法教授及课题组其他成员以及院、所领导的关心和热情支持,本书的出版得到海洋出版社的配合和支持,在此一并表示衷心的感谢。作者还要感谢赵玉英同志,在本书的写作和出版过程中,她帮助整理资料、绘图、誊清和校对等工作。最后,作者感谢在本书写作和出版过程中所有关心、支持和帮助的人们。

由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

作者

1996年8月于南京水利科学研究所

目 录

第一章 绪论	
第一节 冲击射流的实际应用·····	(1)
第二节 冲击射流分区·····	(3)
第二章 紊动自由射流	
第一节 紊动射流基本方程·····	(7)
一、粘性流体运动的基本方程·····	(7)
二、紊流基本方程·····	(8)
三、定常紊流边界层方程·····	(9)
第二节 紊流的半经验理论·····	(10)
一、普朗特混合长度理论·····	(11)
二、普朗特自由紊流新假说·····	(13)
三、泰勒涡量传递理论·····	(14)
第三节 紊动自由射流的一般特性·····	(16)
一、断面流速分布的相似性·····	(17)
二、射流边界线性扩展·····	(18)
三、动量通量守恒·····	(19)
第四节 平面射流·····	(19)
一、Tollmien 解·····	(20)
二、Görtler 解·····	(23)
三、平面射流的主体段·····	(26)
四、平面射流初始段·····	(29)
第五节 轴对称射流·····	(30)
一、Tollmien 解·····	(30)
二、Schlichting 解·····	(31)

三、轴对称射流主体段·····	(34)
四、轴对称射流初始段·····	(37)
第六节 自由射流的紊动特性·····	(37)
第七节 三维紊动射流·····	(41)
一、CD 区轴线速度衰减·····	(43)
二、半宽边界·····	(43)
三、速度剖面的相似性·····	(44)
四、接近轴对称·····	(45)
参考文献·····	(46)
第三章 冲击射流基本流动特性	
第一节 引言·····	(49)
第二节 平面紊动冲击射流·····	(50)
一、自由射流区——冲击区·····	(50)
二、冲击区——壁面射流区·····	(53)
三、若干理论分析·····	(54)
第三节 圆形紊动冲击射流·····	(58)
一、速度剖面与速度比尺·····	(58)
二、压力剖面与压力比尺·····	(60)
三、壁面切应力·····	(60)
四、理论分析·····	(61)
第四节 冲击射流紊动结构·····	(62)
一、紊动强度·····	(63)
二、冲击区能量分量的谱分布·····	(64)
三、两点双重速度相关·····	(66)
四、耗散导数和微尺度·····	(68)
五、积分尺度·····	(69)
六、紊动能平衡·····	(71)
参考文献·····	(75)

第四章 底板冲击压力	
第一节 动水压力分布	(76)
一、时均压力分布	(76)
二、压力脉动强度分布	(79)
第二节 最大动水压力变化规律	(81)
一、最大时均压力变化规律	(81)
二、最大压力脉动强度变化规律	(83)
第三节 掺气对动水压力影响的理论分析	(84)
一、掺气对时均压力的影响	(84)
二、掺气对压力脉动的影响	(85)
第四节 压力脉动的频谱相关特性	(86)
一、压力脉动的频谱特性	(86)
二、压力脉动的积分尺度	(88)
第五节 点、面压力脉动转换关系	(91)
一、点、面脉动壁压相关分析	(91)
二、点脉动壁压互相关系数	(93)
三、面脉动壁压计算	(95)
参考文献	(96)
第五章 冲击射流物质(热)扩散	
第一节 紊动扩散方程	(98)
一、分子扩散	(98)
二、紊动扩散	(100)
第二节 紊动 Schmidt 数和紊动 Prandtl 数	(101)
第三节 冲击射流扩散	(104)
一、自由射流若干扩散特性	(104)
二、冲击射流横断面浓度分布	(105)
三、冲击射流轴线浓度衰减规律	(109)
参考文献	(110)

第六章 壁面射流	
第一节 概述	(112)
第二节 Glauert 壁面射流理论	(114)
一、相似性解	(115)
二、速度分布	(116)
三、普朗特假说应用	(119)
四、壁面效应	(121)
五、解的匹配	(124)
六、积分结果	(126)
七、相似指数值	(129)
第三节 径向壁面射流	(130)
一、理论考虑	(130)
二、实验结果	(134)
第四节 三维壁面射流	(139)
一、三维壁面射流的平均流特性	(139)
二、三维壁面射流的紊动特性	(145)
参考文献	(147)
第七章 多股冲击射流	
第一节 双股射流的基本特性	(149)
一、会聚区	(150)
二、联合区	(165)
第二节 双股冲击射流的平均流和紊动特性	(175)
一、射流冲击流动	(176)
二、上喷流相似性	(178)
三、上喷流的增长和衰减特性	(180)
第三节 多股冲击射流入射方式对底板动压的影响	(182)
一、射流间距对塘底动水压力的影响	(183)
二、射流冲击角对动水压力的影响	(183)
三、三股射流排列方式对动水压力的影响	(184)

参考文献	(185)
第八章 冲击射流掺气	
第一节 冲击射流掺气过程	(187)
一、射流直径对掺气最小速度的影响	(187)
二、液体粘性对掺气最小速度的影响	(189)
三、掺气最小速度相关分析	(189)
四、射流速度对气泡大小及气泡形成频率的影响	(190)
五、紊动强度对掺气最小速度的影响	(191)
六、冲击射流掺气机理	(192)
七、冲击点掺气特性	(196)
第二节 冲击射流掺气量	(201)
一、掺气量的一般描述	(201)
二、冲击射流破碎长度	(204)
三、水垫深度对掺气量的影响	(207)
四、射流速度对掺气量的影响	(208)
第三节 气泡离散输运特性	(213)
一、气泡大小	(213)
二、气泡最大穿透深度	(214)
三、物质输运	(215)
第四节 冲击射流掺气对河床冲刷的影响	(217)
参考文献	(219)
第九章 冲击射流数值模拟	
第一节 紊流模型	(223)
一、准确的雷诺应力方程、 k 方程和 ϵ 方程	(223)
二、单方程模型	(225)
三、标准 $k - \epsilon$ 模型	(226)
四、代数应力模型	(227)
第二节 流函数—涡量法	(230)
一、Wolfshtein 方法	(231)

二、Agarwal—Bower 方法	(237)
第三节 原始变量法	(247)
一、数值方法	(248)
二、流场模拟结果	(259)
参考文献	(282)
第十章 冲击射流相干结构	
第一节 反馈现象和噪声产生	(286)
一、聚集交合	(286)
二、通过周期的概率密度分布	(288)
三、噪声产生	(288)
第二节 相干结构的数学描述	(294)
一、连续性方程、运动方程	(295)
二、能量方程	(296)
三、压力脉动方程	(300)
四、涡量方程	(302)
参考文献	(304)

第一章 绪 论

第一节 冲击射流的实际应用

冲击射流(impinging jets 或 plunging jets)系指自由射流对固体壁面或液体表面等的冲击流动,在许多工程技术领域得到广泛的应用。

在水利水电泄水工程中,自鼻坎挑出的空中水舌冲击水垫塘、高水头拱坝的溢流水舌跌入水垫塘等,就是典型的冲击射流现象,如图 1-1 所示。由于射流携带的巨大能量主要是在水垫塘的紊动扩散和冲击塘底的过程中被消散,因此,人们关心冲击射流作用于塘底的

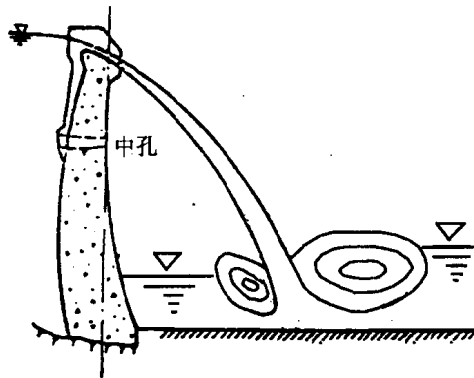


图 1-1 拱坝跌落水舌冲击水垫塘

动水压强是否可能引起河床严重冲刷、护坦失稳破坏以及建筑物振动等问题;此外,由鼻坎挑出或拱坝溢流的高速水射流在空中扩散过程中掺入大量的空气,形成高浓度的水气二相流,并且在射流入水处

还要卷入大量的空气,如此大量的掺气对射流冲击水垫塘的水力特性有何影响,亦是值得探讨的课题。据已有研究资料表明,国内外有关挑流冲刷的 30 多个计算公式,若与实测资料对比,其最大误差可达 400%,最小亦有 30%。典型的例子是位于赞比亚与津巴布韦的赞比西河上的 Kariba 坝,其坝高 127m,投入运行以来,下游冲深已达 86m,仍不见有稳定的趋势,实际冲深远远超过当初预测的 26m。虽然该例与地质条件有关,但冲击射流的作用是其主导因素。因此,掌握冲击射流理论,对解决水利水电工程实际问题,具有重要的意义。

在航空、航天领域,随着垂直起飞和着陆 VTOL(vertical - take - off - and - landing)飞行器(军用飞机)和航天器(在月球或其他星球上着陆)的兴起,人们关心起落射流(lifting jets,如图 1-2 所示)诱导的下吸力以及壁面射流相互碰撞后形成的上喷流对机身的冲击等问题。

在其他领域,如煤炭工业中的水力采煤、节水灌溉中的微喷灌,自动控制方面的射流元件,动力方面的蒸气泵、汽轮机,工程热物理方面的燃烧室以及各种喷洒设备等,亦存在冲击射流方面的问题。

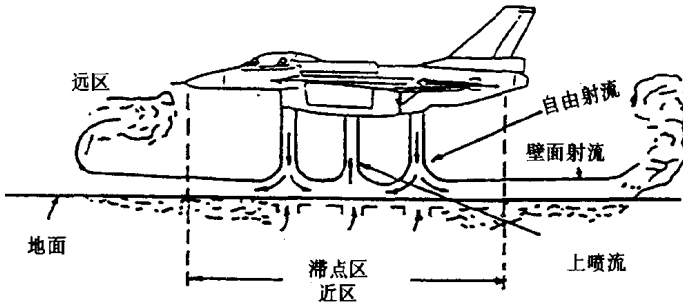


图 1-2 VTOL 飞行器起落射流

在许多工业部门,巧妙而有效地利用自由射流冲击壁面后形成的壁面射流,进行冷却、加热、烘干(如纺织品、纸等)、沥滤固体以及

钢化玻璃等。

冲击射流掺气(air entrainment by plunging jets)在诸多工程技术部门有着重要的应用,如图 1-3 所示。不仅如此,在自然界中亦广泛存在冲击射流掺气现象,如众所周知的乳白色天然瀑布、海洋中鹰嘴形巨浪对水面的冲击等。在水利工程中,如挑、跌流水舌冲击水垫塘、水跃、井式溢洪道、虹吸溢洪道以及强迫掺气设施等;在环境工程中,使污染水体复氧的堰流水舌掺气;在冶金工业中,浇铸的高温金属熔液;在化工中,使气体溶解在液体中的搅拌射流。此外,在石油工业、核工业以及食品、医药、化妆品、油漆等工业中亦会遇到冲击射流掺气问题。

在实际应用中,除了常见的平面和轴对称射流之外,还会遇到从方形、矩形(有限高宽比)、椭圆形及三角形等喷咀出射的三维自由射流和三维壁面射流问题;冲击射流的传热、传质亦是工程技术中关注的问题。已有研究资料表明,射流的浓度、温度扩散比动量扩散快;在冲击射流的噪声和反馈问题研究中,人们发现,射流相干结构对平板的冲击是射流噪声、反馈回路的主要机制。

按射流股数来划分,有单股(single jet)、双股(twin jets 或 dual jets)乃至多股(multijets)冲击射流。多股射流在许多领域得到应用,如家用燃气灶、热水器、VTOL 飞行器的多股起落射流、高水头泄水工程中的多层射流等;此外,还会遇到单股、多股射流对横流(cross-flow)的冲击问题,如烟囪中的废气排入大气、污水排入河流、透平叶片的薄膜冷却、火山爆发以及燃烧室中射流的混合等。

第二节 冲击射流分区

自喷咀出射的流体射入流体特性相同的无限空间中,称之为淹没自由射流(submerged free jet);若射流是层流的,即为层流射流(laminar jet);若射流为紊流,则称之为紊动射流或湍射流(turbulent jet)。由于层流射流的不稳定性,实际情形中紊动射流居多。实验研究表明,紊动自由射流一般分为三个区段(见第二章),即初始段

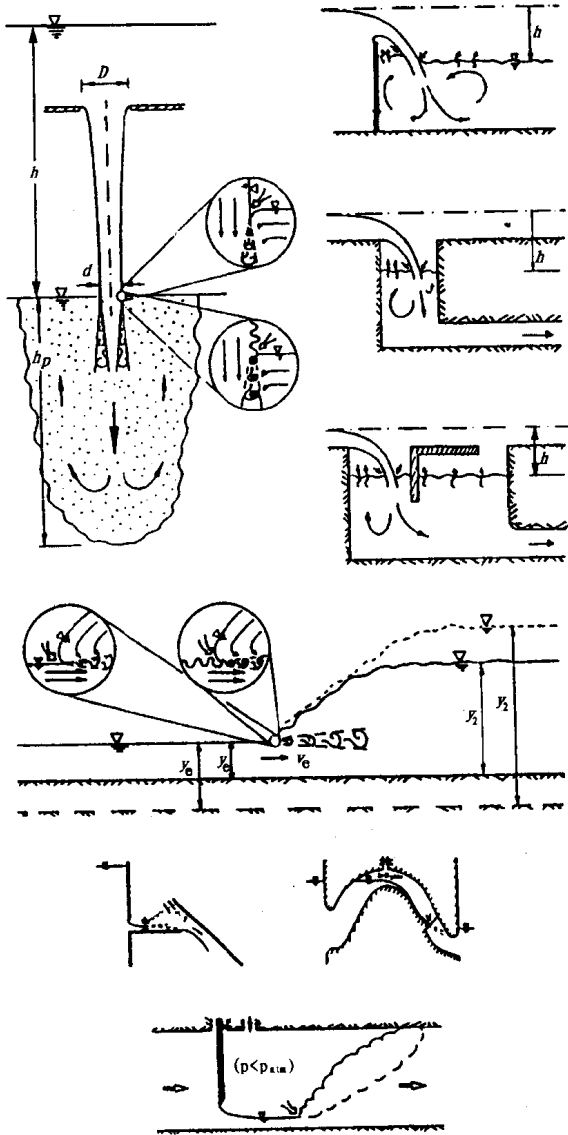


图 1-3 冲击射流掺气

(zone of flow establishment)、过渡段及主体段(zone of established flow)。初始段由势流核(potential core)和剪切层(shear layer)或称之为混合层(mixing layer)组成,在势流核内,其速度保持射流原来的出射速度,边界逐渐向射流轴线收缩直至相交;在剪切层内,其速度分布具有误差函数形式,并自入射点逐渐向侧扩展,即边界层的扩展。实验观察表明,剪切层内存在相干结构(见第十章)亦称拟序结构(coherent structures)。这种有组织结构向下运动时,有一种成对合并的现象,称之为涡旋配对(vortex pairing)。射流的断面扩展及其对周围流体的卷吸就是涡旋配对的结果。在自由射流主体段,边界层充分发展,其速度、浓度(温度)等均服从高斯分布;射流的过渡段很短,一般在分析中常予以忽略。另外,对于三维紊动射流,按其轴线速度衰减状况,可分为三个明显的流动区域(见第二章第七节,第六章第四节),即势流核心区、特征衰减区及轴对称(径向型)衰减区。

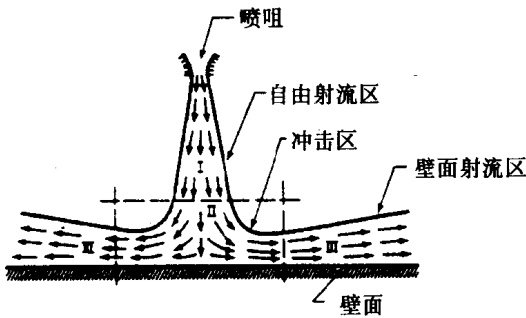


图 1-4 单股冲击射流分区

冲击射流流场按其流动特性可分成三个区域(见图 1-4):(1)自由射流区(free jet region),该区流动特性与自由射流相同;(2)冲击区(impingement region),该区流动改变方向,并且有很大的压力梯度;(3)壁面射流区(wall jet region),

即图 1-4 中的 III 区。对于紊动壁面射流,可分成内层(inner layer)和外层(outer layer),见第六章第二节,内层具有壁面边界层的特性,外层则具由自由射流的特性。

对于多股冲击射流(见第七章),除了单股冲击射流的基本流动区域外,还存在上喷形成区(fountain formation region)和上喷流区

(fountain upwash flow), 如图 1-5 所示, 即由相邻两股或多股壁面射流相互碰撞所形成。

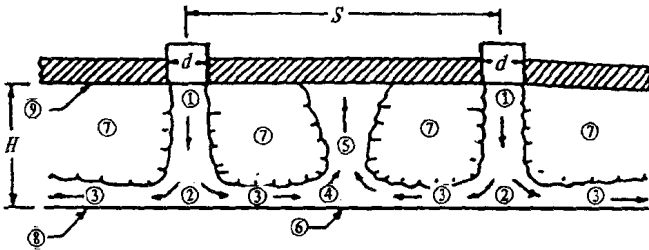


图 1-5 双股冲击射流分区

- ①起落射流; ②冲击区; ③壁面射流区; ④上喷形成区; ⑤上喷流;
- ⑥壁面射流相互干扰滞止线; ⑦旋涡区; ⑧地面; ⑨上壁面

从下章起, 根据冲击射流的流动分区、射流的类型、冲击射流的运输扩散特性、冲击特性及其研究方法等, 我们将进行详细的讨论。