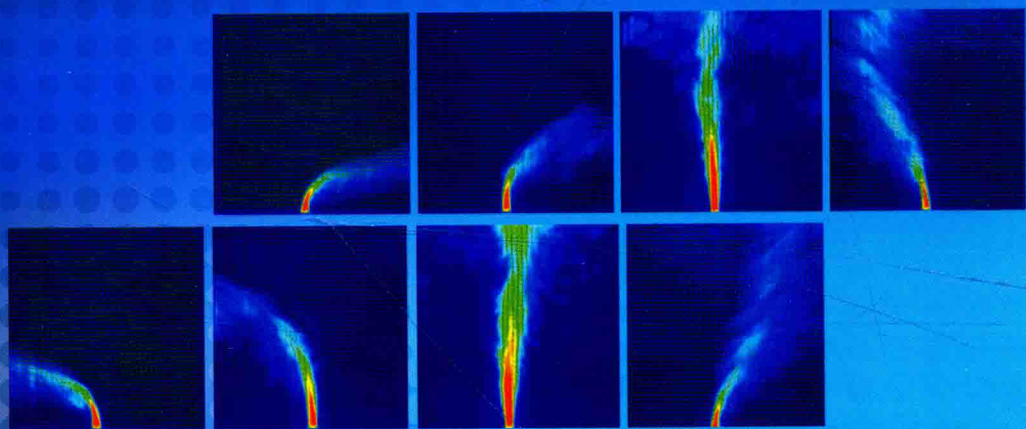


潮流环境下 垂直浮射流实验研究 与三维数值模拟

赵懿珺 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

潮流环境下 垂直浮射流实验研究 与三维数值模拟

赵懿珩 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

浮射流是环境水力学中的重要研究分支。潮流环境中的浮射流属于三维非恒定紊动射流,作用机理复杂,一直缺乏系统性研究。本书介绍了 PIV-PLIF 同步测量技术、潮流环境下垂直浮射流的实验与三维数值模拟成果。主要内容涉及三个方面:研发了大范围、高帧频 PIV-PLIF 同步测量系统,提出了基于列处理的浓度场校正技术;深入研究了完整潮周水流的紊动特性;采用实验与三维数值模拟相结合的方法系统研究了潮流环境中垂直浮射流的演变过程和掺混稀释特性,揭示了涡流结构、浓度结构、分叉现象、射流轴线的随潮变化规律,提出了射流轴线与稀释度的计算公式。

本书可供从事环境流体力学、流动测量等相关研究的科研人员、设计人员、高校教师与研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

潮流环境下垂直浮射流实验研究与三维数值模拟 /
赵懿珺著. — 北京:中国水利水电出版社, 2015.12
ISBN 978-7-5170-4000-2

I. ①潮… II. ①赵… III. ①环境水力学—研究
IV. ①X52

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第321339号

书 名	潮流环境下垂直浮射流实验研究与三维数值模拟
作 者	赵懿珺 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 9.75印张 196千字 8插页
版 次	2015年12月第1版 2015年12月第1次印刷
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



沿海经济高速发展带来的海洋环境污染问题日益突出。海洋污染的来源主要包括工业废水与电厂温排水,二者多以浮射流的运动形式排入环境海域。潮流作为河口及海洋中水流最为普遍的运动形式,是污染物输运的主要载体。系统掌握潮流中浮射流的初始稀释特性,对于有效控制废水、废热排放,减小污染物对海洋环境的影响具有重要意义。

潮流中浮射流的运动受初始动量、浮力与潮流共同影响,问题比较复杂。受模拟技术与测量技术发展水平的限制,一直缺乏系统深入的研究。本书在国家自然科学基金(No.51309257)资助下,研发了大范围、高帧频 PIV-PLIF 同步测量系统,采用实验与数学模型相结合的方式,深入研究了潮流环境下浮射流的演变过程、掺混稀释规律和紊动扩散特性,提出了具有工程指导意义的射流轴线无量纲计算公式。研究成果不仅为潮汐水域污水处置工程的设计与生态环境影响评估提供了科学支撑,而且对于推动海洋环境中污染物的输运规律研究、促进环境水力学中射流理论的发展具有重要意义。

本书共分为 5 章。第 1 章:绪论。总结和回顾潮流紊动特性、垂直射流实验与数值模拟以及流场、浓度场测量技术的相关研究成果,凝练了潮流环境下垂直浮射流研究拟解决的关键问题,介绍了本书的主要研究工作。第 2 章:大范围、高帧频 PIV-PLIF 同步测量系统的研发。介绍了 PIV 流场测量与 PLIF 浓度场测量的基本原理,分析了系统研发过程拟解决的关键问题与技术路线,介绍了该系统的硬件、软件构成,总结了系统的主要特点与技术参数。第 3 章:潮流紊动特性实验研究。阐述了实验潮型的设计原则与思路,介绍了潮流模拟控制系统与测量仪器,提出潮流时均流速随潮变化

过程的计算方法,详细分析了完整潮周过程中时均流速与脉动流速、紊动强度、雷诺应力、纵向流速概率分布的变化规律,给出了潮流的紊动能谱。第4章:潮流环境下垂直浮射流实验研究。介绍了潮流环境下垂直浮射流的模型设计原则,研究了浮射流纵轴面浓度场与流场的随潮演变过程。结合量纲分析,从射流边界、射流轴线、轴线稀释度以及射流轴线的垂线浓度分布深入研究了潮流条件下垂直浮射流的掺混稀释规律,探讨了射流的紊动扩散特性。第5章:潮流环境下垂直浮射流三维数值模拟。介绍了 Realizable $k-\epsilon$ 三维紊流模型的控制方程、计算区域、计算网格、初边条件、数值算法与模型参数;在与射流纵轴面实验成果相互印证的基础上,深入分析了整个射流空间的流场结构、浓度场结构、射流轨迹、分叉现象以及轴线稀释度变化规律。

本书源于作者在中国水利水电科学研究院完成的博士学位论文,研究工作得到导师吴一红教授、贺益英教授、纪平教授的悉心指导。北京尚水公司在仪器研制过程中给予了有力的技术支持。此外,还感谢陈惠泉教授、黄真理教授、张东生教授、方红卫教授以及曾利博士、谭水位高级工程师等给予的帮助与支持!

限于作者水平,本书难免存在不妥和错误之处,诚请读者批评指正。

作者

2015年7月于北京



前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 研究进展	2
1.2.1 潮流紊动特性	2
1.2.2 垂直射流实验	3
1.2.3 射流数学模型	8
1.2.4 PIV-PLIF 测量技术	11
1.3 本书主要研究工作	14
1.3.1 关键技术问题	14
1.3.2 主要研究工作	15
第 2 章 大范围、高帧频 PIV-PLIF 同步测量系统的研发	17
2.1 测量原理	17
2.1.1 PIV 流场测量原理	17
2.1.2 PLIF 浓度场测量原理	17
2.2 关键技术与技术路线	18
2.2.1 关键技术	18
2.2.2 技术路线	19
2.3 硬件系统	24
2.3.1 激光器与冷却水系统	24
2.3.2 光学系统	24
2.3.3 流场示踪粒子与荧光物质	27
2.3.4 图像数据采集、传输与存储系统	28
2.4 流场与浓度场算法	30
2.4.1 PIV 流场算法	30
2.4.2 PLIF 浓度场算法	31
2.5 软件系统	33
2.5.1 图像采集模块	34

2.5.2	标定模块	36
2.5.3	流场与浓度场计算模块	37
2.5.4	紊动参数计算模块	39
2.6	小结	40
第3章	潮流紊动特性实验研究	41
3.1	潮型设计	41
3.2	实验系统	42
3.2.1	实验水槽与供水系统	42
3.2.2	生潮控潮系统	43
3.2.3	测量仪器	44
3.3	潮位与潮流瞬时流速过程	44
3.4	紊流处理方法	45
3.4.1	移动平均法	46
3.4.2	最小二乘法拟合	47
3.5	紊动特性实验成果分析	47
3.5.1	时均流速与脉动流速	47
3.5.2	相对紊动强度	48
3.5.3	雷诺应力	50
3.5.4	纵向流速概率分布	51
3.5.5	脉动流速紊动能谱	52
3.6	小结	53
第4章	潮流环境下垂直浮射流实验研究	54
4.1	模型设计	54
4.2	控制条件与测量断面	54
4.3	实验系统	56
4.3.1	浮射流控制系统	56
4.3.2	测量仪器	58
4.3.3	PIV-PLIF 系统标定	58
4.4	实验成果分析	61
4.4.1	量纲分析	61
4.4.2	射流浓度场与流场随潮演变过程	62
4.4.3	射流边界	64
4.4.4	射流轴线	68
4.4.5	射流轴线稀释度变化规律	78

4.4.6 射流轴线的垂线浓度分布	79
4.4.7 射流物质紊动扩散特性	82
4.5 小结	83
第5章 潮流环境下垂直浮射流三维数值模拟	84
5.1 控制方程	84
5.2 计算区域、网格、初边条件、数值算法及模型参数	86
5.2.1 计算区域	86
5.2.2 计算网格	87
5.2.3 初边条件	87
5.2.4 计算软件与模型参数	89
5.3 模型验证	89
5.3.1 流场验证	89
5.3.2 浓度场验证	89
5.4 计算结果分析	94
5.4.1 流场结构	94
5.4.2 浓度场结构	109
5.4.3 射流分叉特性	123
5.4.4 射流轴线位置	128
5.4.5 射流轴线稀释度	130
5.5 小结	132
参考文献	134

绪 论

1.1 研究背景及意义

我国作为发展中的海洋大国,拥有长达 1.8 万 km 的大陆海岸线。沿海人口集中、工业密集,依靠海洋的区域和资源优势,经济一直呈现高速发展的态势,但随之而来的环境生态影响问题也日益严峻。国家海洋局 2014 年公布的中国海洋环境公报指出,我国入海排污口邻近海域环境质量状况总体较差,80% 以上无法满足所在海域海洋功能区的环境保护要求^[1]。海洋是潜力巨大的资源宝库,也是支撑未来发展的战略空间。随着今后海洋开发利用程度的不断提高,海洋的环境生态保护将面临更大挑战。

海洋环境污染的主要来源包括工业废水与电厂温排水。根据环境保护部发布的统计数据^[2],2013 年我国沿海地区年工业废水排放量 36.1 亿 t,主要集中在纺织业、造纸业、石油化工、电力等行业。与工业废水相比,电厂温排水的排放量更加可观。温排水一般高于环境水温 6~11℃,单台百万千瓦直流冷却机组的温排水流量约 35~60m³/s^[3],一年的排水量可达 11 亿~19 亿 t。2013 年我国火电与核电的发电装机容量分别为 87009 万 kW 与 1466 万 kW^[4],其中约 13% 的火电机组以及全部核电机组布局在河口及沿海地区。据此估算每年至少有上亿吨的热水排入环境海域。火电厂、核电厂为防止海生物阻塞循环水管道,通常采用在循环水中加氯的处理方法,由此产生的余氯也随温排水一起排出。对于核电厂,温排水排放还伴有一定浓度的放射性核素。海洋生态系统常年受到工业废水与温排水的影响,不仅水体理化特性会发生改变,富营养化加重、自净能力降低,而且生态结构和功能还可能受到损害,甚至造成鱼类畸形、保护物种消失。因此,科学有效地控制工业废水及温排水对海域环境的影响对于海洋经济发展至关重要。

沿海地区的工业废水与电厂温排水,往往从排放口以一定速度排入海域,并且排水密度通常小于环境水体,表现为浮射流的运动形式,即射流受到初始动量和浮力的共同作用。排放口污染物浓度或排水温度通常超过环保标准限值。为将超标区域控制在较小范围,环境部门在排放口局部区域设置了“监管混合区”。浮射流在海域中的稀释扩散大致经历初始稀释和后续稀释两个阶



段^[5]。初始稀释效果决定了废水或温排水能否在“监管混合区”范围内高度稀释,尽快达标。因此,浮射流的初始掺混能力成为决定排放口设计成功与否的关键因素。开展浮射流稀释特性研究对于科学合理地设计排放口及其他环境保护工程措施具有重要的指导意义。

浮射流作为排污、排热过程中常见的物理现象,是环境水力学研究领域的重要问题,也一直是关注的热点问题。迄今为止,关于静止水体或恒定流中浮射流的研究成果已经非常丰富,并被广泛用于环境工程实践。海洋中的浮射流受波浪、潮汐影响,属于三维非恒定紊动射流,其紊动机理与稀释扩散规律比静水条件和恒定流条件更加复杂。波浪条件下的射流在近些年得到广泛关注,研究成果普遍认为波浪有利于促进射流与环境水体的掺混稀释。潮流是河口及海洋中水流最为普遍的运动形式,也是物质输运的主要载体,对污染物的稀释扩散具有重要作用。与波浪相比,潮流周期较长,模拟与控制有难度,相关研究成果很少,浮射流随潮演变过程与掺混稀释规律、紊动扩散特性缺乏深入研究。随着海洋开发利用程度逐渐提高,环境生态保护除了关注排污、排热短期局部影响外,必须关注潮流这种长周期、大尺度水流条件下污染物的输运规律。开展潮流环境下垂直浮射流研究,不仅可以丰富对潮汐水域紊流、射流的认识,有助于促进环境水力学中射流理论及海洋相关学科发展,而且通过深入揭示垂直紊动浮射流的随潮演变规律和掺混稀释特性,可为潮汐水域污水处理工程的设计与生态环境影响评估提供技术支撑。

1.2 研究进展

潮流是河口、海洋中最为常见的水流运动形式,具有周期长、水深及流速随潮变化,水流方向在涨落潮过程中发生转变的特点。潮流环境下的浮射流受初始动量、浮力以及潮流共同影响,表现为复杂的三维非恒定紊动射流,目前相关研究成果较少。

1.2.1 潮流紊动特性

潮流的紊动特性与潮汐水域污染物的输运机理密切相关,但对其系统研究很少。Anwar 和 Atkins (1980) 在试验水槽内模拟了潮汐的加速和减速过程,分别采用热线流速仪和标准 Preston 管测量紊动流速和剪切切应力。研究结果表明,减速阶段的紊动强度、紊动动能与雷诺切应力大于加速阶段^[6]。一些零星的原体观测研究成果发现潮流的紊动强度、雷诺应力等紊动参数的时空分布均与恒定流有明显差异^[7-10]。

水流的紊动特性一直是流体力学研究领域的重点与难点,由于紊动机理复杂,难以获得各紊动参量的解析解,通常采用实验方法进行研究。从严格意义



上来讲,由于紊流具有随机性质,瞬时流速随时间变化。紊流运动中所谓的恒定流动,是指流动中物理量的时均值恒定不变^[11]。

从20世纪70年代开始,针对矩形明渠中的恒定均匀流开展了大量紊动特性实验研究^[12-22],后来又陆续进行了弯道^[23,24]、渐扩段^[25]、复合渠道^[26]等边界条件比较复杂的恒定非均匀流紊动特性研究。恒定流条件下的相关紊流研究成果已在环境、水利等工程实践中得到广泛应用。

自然界中更多的流动呈现非恒定特征,如洪水、波浪、潮汐等水流运动,其紊动特征随时间变化,属于非平稳随机过程。近20多年,非恒定流的紊动特性引起许多学者关注,并取得比较丰富的成果。Nezu等(1995,1997)、Song和Graf(1996)分别采用二维LDV、ADVP测量了明渠洪水过程中水流的紊动特性,发现涨水段紊动强度和雷诺应力大于落水段;流速及紊动参量随水位涨落表现出绳套变化^[27-29]。Gualtieri和Chanson(2011)对水槽中正向涌浪的实验研究成果表明,随着水位上涨纵向流速迅速下降,雷诺应力在波峰与波谷处出现大值^[30]。Hu等(2012)研究了来流量正弦变化时水槽内的非恒定流动过程,但仅关注波速、波浪变形率等参数,未开展紊动特性研究^[31]。已有非恒定流研究成果,研究对象多为洪水或波浪,而且仅水位及流速值随时间变化,流向不改变。

时间平均法和统计平均法是分离紊流各种物理量平均值与脉动值的两种主要方法。恒定流可看作平稳的、各态历经的随机过程,时间平均法和统计平均法均适用。非恒定流的流动特性随时间变化,属于非平稳随机过程,严格意义上只有统计平均法适用。统计平均法虽然在理论上具有普适性的优势,但实际工作中由于很难做到足够多次的严格重复试验,故实施很困难^[11,32]。为此,学者们也摸索了很多关于非恒定流条件下紊流的处理方法,归纳起来有三类:①移动平均法。用实测瞬时流速序列中某点及与之相邻的若干点的算术平均值作为该点的平均值^[33]。②滤波法。将实测瞬时流速序列从时域转换到频域,借助滤波的方法剔除掉高频部分的脉动值,从而得到平均值。常用的滤波法有Fourier变换法^[28,29]、直接滤波法^[34]以及功率谱滤波法^[35,36]。③统计平均法。通过进行多次重复试验,把每次试验采集的瞬时序上对应相位的值平均得到该相位的平均值^[37]。这种方法物理意义明确,但要求每次试验的重复性非常好。

1.2.2 垂直射流实验

射流是环境水力学研究领域的经典问题,实验手段是探索射流运动规律的重要途径。由于射流的排放方式与接纳环境水体的条件千差万别,射流的种类十分多样。工程中遇到的射流基本都属于紊动射流。依据射流形成的动力不同,可将射流分为三大类:①单纯受初始动量作用的纯射流或动量射流;②单



纯由于喷口流体与环境流体密度差形成浮力作用的羽流；③同时受初始动量与浮力作用的浮射流^[5]。环境水体的流态也直接影响射流特性，相同型式的射流在不同环境流条件下表现出不同的运动规律。根据水动力特点，环境流一般可分为静水、恒定流、潮流、波浪和波流。本书重点总结垂直射流的主要研究成果。

(1) 静水中的垂直射流。静水中的垂直紊动射流是最基本的射流形式。研究成果主要集中在射流的势流核心区长度、流速和浓度的时均量及相关紊动参数沿轴线及射流横断面的分布形态等方面。

根据射流的产生与发展过程，射流可分为起始段与主体段。射流起始段内中心流速未受到掺混影响、保持射流的出口流速，称为势流核心区。对于圆形纯射流排入静止环境水体，Fischer 等（1979）从理论分析和实验研究得出势流核心区长度为 $6.2D$ ， D 为喷口直径^[38]。黄真理（1993）将 PLIF 技术引入圆形紊动射流浓度场的测量，发现浓度分布核心区的长度明显短于流速分布核心区长度^[39]。早期一些研究给出的射流核心区长度忽略了射流源到喷口的距离。Antoine 等（2001）通过总结简单射流和微弱同流环境中的射流研究成果，发现射流源到喷口最大可达 $5D$ ^[40]。Or 等（2011）依据 PIV 测量结果并考虑了射流源与喷口的距离，得出雷诺数 $Re=4130$ 时势流核心区末端距离喷口约 $2.7D$ ^[41]。

对于浮射流而言，射流的原动力既有动量也有浮力，与表征惯性力与浮力相对作用的密度弗劳德数有关。浮射流问题很难用解析方法求解，大多根据量纲分析结合实验进行研究。Papanicolaou 和 List（1988）对圆形浮射流进行了总结，并采用 LDV 和 LIF 对流速和浓度进行了测量，发现流速分布与浓度分布具有相似性，基本呈高斯分布；射流轴线流速与浓度沿程衰减，但轴向与径向的相对流速紊动强度、相对浓度紊动强度保持不变^[42]。Wang 和 Law（2002）基于 DPIV 和 PLIF 的测量结果也得出了相似的规律^[43]。槐文信等（2002）对静止均匀浅水中的铅垂紊动射流进行实验研究，得到水面隆起高度与射流出口单位能量和相对水深的函数关系，验证了隆起高度具有自相似性、满足高斯分布的结论^[44]。Roberts 等（1997）采用 PLIF 和微型电导仪对高密度射流垂直向上排入静水水体进行了研究，发现在射流跌落区域浓度紊动强度较大^[45]。杨中华（2007）总结了静止环境中负浮射流的特征量，给出垂直射流最大上升高度与密度弗劳德数的关系^[46]。Ahmad 和 Baddour（2012）研究了热射流垂直向下排入静水水体的温度场特性，结果表明垂直方向射流穿透高度有较大的脉动^[47]。

(2) 恒定横流中的垂直射流。由于横流环境下射流与环境流相互作用，射流的卷吸掺混机理比静水条件下复杂得多。作为工程中应用较多的射流型式，



横流中的射流一直受到广泛关注。研究成果主要集中在射流结构、射流轨迹、流速与浓度分布及紊动特性等方面。

横流中射流的喷口流速与环境来流呈 90° 夹角, 当横流遇到射流阻碍时将产生绕流。从环境流与射流的相互作用分析, 可将射流分为三段^[5,32]: 初始段、射流弯曲段与顺流贯穿段。初始段射流弯曲程度很小, 射流特性与静止水体比较类似; 弯曲段主要由环境流绕流造成的射流迎流面与背流面压强不相等所引起, 在该区域射流断面形状由扁卵石形逐渐变为肾形, 并在横断面形成反向涡对, 且浓度呈现出肾形两头各有一峰值的对称分布; 顺流贯穿段射流流动方向基本与横流一致, 浓度场发展主要表现为随流扩散。Fric 和 Roshko (1994) 定义了横流射流近区的四种涡结构 (图 1.1): 射流与横流流速差异引起的射流主体边缘的剪切型旋涡、马蹄形涡、尾涡以及射流横断面上的反向涡对 (CVP) ^[48]。CVP 的存在使得环境流体不断被卷吸掺混进入射流, 射流展宽增加并被沿程稀释, 是目前研究最多的射流涡结构^[48-56]。黄真理 (1993) 在实验中发现由于横流作用射流弯曲段水平截面发展为马蹄形, 并且当马蹄的两翅被绕流拉得较长时, 流动出现分叉现象^[39]。Haven 和 Kurosaka (1997) 采用 LIF 和 PIV 技术系统研究了横流中射流的肾形旋涡结构, 认为射流喷口形状对于肾形旋涡结构的形成和发展有较大影响^[51]。姜国强等 (2002) 利用 PIV 对湍射流初始区、横流和射流的相互掺混区进行测量, 通过分析流动结构图像, 指出横流中射流尾迹的涡结构与圆柱绕流尾涡有很大区别^[57]。Diez 和 Bernal 等 (2005) 将 PIV-PLIF 技术用于研究横流中圆形浮射流的自保性结构, 发现射流断面上反向涡对的轴与横流方向基本一致^[49]。射流流速与环境流的比值 R 是横流中射流发展的重要参数, Smith 和 Mungal (1998) 通过 PLIF 实验研究了流速比在 $5 \sim 25$ 范围内横流中的射流, 发现低流速比时射流出现分叉现象和尾涡^[52]。Meyer 等 (2007) 采用立体 PIV 研究了两种流速比条件下横流中的射流, 结果表明当流速比为 3.3 时, 尾涡起主导作用, 而当流速比为 1.3 时, 剪切涡起主导作用^[56]。

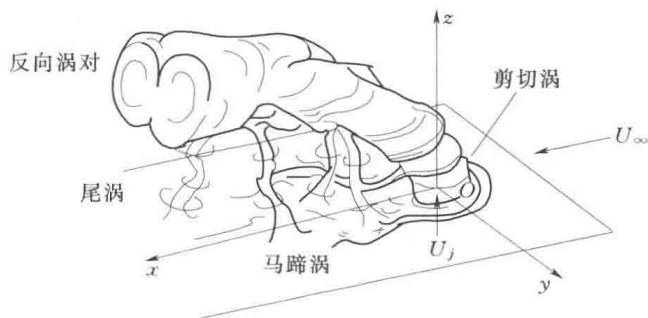


图 1.1 横流中射流近区常见的旋涡结构 (Fric 和 Roshko, 1994)



射流轴线轨迹是横流中紊动射流首先关注的问题。射流轴线可以按照射流各断面上最大流速点的连线以及最大浓度点的连线来确定。早期理论认为横流作用于射流的压差阻力是引起射流弯曲的原因,因此可以根据绕流阻力系数推导射流轨迹^[32]。后来多数研究认为绕流阻力系数随射流沿程变化,并且出口断面的阻力系数 C_D 随着流速比 R 的增大而降低^[32]。已有实验表明,依据射流断面最大流速确定的轴线轨迹与按照断面最大浓度确定的轨迹有所差异^[58,59]。

在描述射流轨迹线时往往需要引入一些无量纲参数。Wright (1977) 引入流量特征长度、动量特征长度等四个特征长度来描述横流中垂直浮射流的变化^[60],将浮射流分为动量作用近区、动量作用远区、浮力作用近区与浮力作用远区。在动量作用近区与远区,射流轴线轨迹分别被描述为无量纲数 z/l_m 关于 x/l_m 的 $1/2$ 与 $1/3$ 次方指数形式;在浮力作用近区与远区,射流轨迹描述为 z/l_b 关于 x/l_b 的 $3/4$ 与 $2/3$ 次方指数形式,其中 z 为高度、 x 为顺流方向与喷口的距离、 l_m 为由起始动量引起的射流轴线流速衰减到与环境流速为同一量级时射流所达到的高度、 l_b 为由浮力作用引起的射流轴线流速衰减到与环境流速为同一量级时射流所达到的高度;但不同实验所得关系式中的系数差别较大^[59-61]。对于横流中的圆形射流,也有很多研究将射流直径 D 作为特征长度,并将射流比 R 引入来描述射流轨迹,轨迹方程一般为 $z/D - f(x/D, R)$ ^[57,39]。姜国强等(2002)采用PIV对横流中不同流速比的垂直向上湍射流流场进行测量,发现射流的弯曲程度随流速比增大而减小^[57]。Meftah等(2004)对比研究光滑床面与波浪形床面下横流中的垂直圆浮射流流场,发现床面粗糙度对于射流轨迹有着明显的影响^[62]。

除了射流结构与射流轨迹研究外,关于横流中射流的掺混稀释规律及紊动参数也有不少研究成果。肖左庭(1987)研究横流中水平热射流的扩散特性,发现横流作用下射流核心区变短^[63];Hodgson和Rajaratnam(1992)通过实验给出射流混合区最小稀释度与距离的指数形式关系式 $C_m/C_0 = 1.09 (\alpha x/D)^{0.56}$,其中 α 为流速比^[64]。杨中华(2004)比较了横流中平面负浮射流不同位置的紊动特性,发现实验条件下横流来流断面紊动强度较小、喷口断面上离喷口较近的区域紊动强度最大、在涡心及分离点断面紊动强度也比较大^[46]。王鹏等(2008)采用ADV测量了不同来流条件下,温排水从单喷口垂直向上入射环境流的流场分布,得出随流速比增大,射流初始段长度增加、轴线流速衰减变缓的结论^[65]。Kikkert等(2010)利用光衰减技术研究了横流中水平浮射流的三维轨迹线,对浓度峰值的跟踪结果表明,射流发展过程在弱对流向强对流转化的时候出现分叉,横剖面浓度呈现双峰^[66]。Or等(2011)将PIV-PLIF技术用于测量不同横流流速下垂直圆射流的流场和浓度场,发现随着横流由弱变强,势流核心区长度单调递减、轴线流速衰减变快^[41],其规律与前人研究相同。



(3) 潮、波环境下的垂直射流。波浪对射流的影响很早就引起学者的关注。20 世纪 70 年代,就有学者发现驻波和前进波作用下,射流的稀释能力明显增强^[67,68]。LAM 和 XIA (1998) 基于流动显示技术研究了垂直圆射流在非恒定流中的扩散特性,发现非恒定流的影响使垂直入射的流体存在局部堆积,形成较大尺度的流团^[69]。近十年来,波浪中的射流研究得到越来越多学者的关注。Abdel-Rahman 和 Eleshaky (2004) 采用激光测速仪对比研究了平面垂直射流在恒定流和波流环境下的流速特性,结果表明波浪作用下射流建立区长度缩短、射流发展加快^[70]。Mossa (2004)、陈兴伟等 (2004) 对射流垂直入射波浪的流场测量结果显示,波浪作用有利于增强射流的紊动和扩散能力^[71,72]。周丰和孙昭晨 (2007) 使用 PIV 技术研究了不同规则波周期条件下有限水深圆形垂直射流的特性,发现随着波周期增大,射流垂向平均速度分布中的双峰沿喷口轴线出现提早、射流扩展变宽^[73]。Tam 和 Li (2008) 研究了随机波浪下垂直紊动射流的射流流动特性,结果表明波浪对射流的影响明显,主要体现在射流宽度增加、轴线流速衰减变快、射流核心区长度缩短^[74]。陈永平等 (2008, 2009) 对不规则波作用下的垂向圆管射流进行实验研究,根据射流和波浪相互作用的强弱对射流区域进行划分,用代表射流初始动量与波浪动力相对强弱的特征长度 $l_m = M_0^{1/2} / u_w$ 建立了经验公式^[75,76]。Hsiao 等 (2011) 采用 PIV 技术研究了规则波条件下紊动圆射流的瞬时流速场,并基于整体和相位平均法分析射流的紊动和平均特性,得出与前人一致的结论^[77]。徐振山等 (2013, 2014) 利用三维 ADV 分别测量了规则波和不规则波条件下的垂向圆管射流流场,发现规则波条件下,靠近自由表面的射流垂向速度横剖面出现比较明显的“双峰”现象,而不规则波条件下能够保持较好的高斯分布,“双峰”现象不明显^[78,79]。各种波浪作用下的射流研究成果表明,射流动量与波浪动量的比值是横向射流与波浪相互作用强弱的指标;波浪有助于加强射流与环境水体间的卷吸掺混。

潮流环境下射流的紊动卷吸掺混特性研究开展得比较晚。Brocard (1985) 研究了水池内表面热浮射流进入回荡水流中的温度分布,得到热水团随流速变化的关系及热水团厚度的变化规律,但并没有涉及射流附近区域紊动特性的研究^[80]。陈道毅 (1988) 首次在玻璃水槽采用激光测速仪对潮流中的垂直平面窄缝射流进行了测量,实验中潮流周期取 96s、192s 以及 384s,每组实验测量点数约 200 个,通过各点在相同相位处的流速值组成流场,从而得到不同潮时的全流场平均流速分布。研究结果表明在一个潮周内射流交替折向上下游,涨落潮阶段的射流流速分布与相同速度比的恒定流类似,研究肯定了天然潮汐流中紊动射流可看作准恒定的假设^[81]。王立新 (1990) 将图像处理技术用于潮流中底部和岸边线源排放的浓度场测量,共进行了三种潮周期 128s、256s 和



386s 的研究,发现憩流时存在污染物云团现象,提出在憩流阶段准恒定假设不适用、排放近区浓度场由于具有叠加性不宜按准恒定简化计算的结论^[82]。Nash 和 Jirka (1996) 在 $6\text{m} \times 8\text{m} \times 20\text{cm}$ 的水池内用 PLIF 测量了环境流速在 $\pm 6\text{cm/s}$ 之间、加速度在 $0.005 \sim 0.02\text{cm/s}^2$ 范围变化的潮流中的表面热浮射流温度场^[83]。陈朝泉 (1997) 采用自主开发的 PLIF 系统测量了潮流中多孔垂直射流的浓度场,实验选择两种潮周期 270s 与 200s,通过力平衡关系推导了潮流中射流的轨迹线方程。研究成果指出潮流作用下射流的发展受潮流加速度和横流流速比的共同作用;加速段潮流加速度越大,射流浓度衰减越快^[84]。由于潮流周期长、模拟控制难度大,污染物在涨落潮过程中影响区域大,潮流环境下射流的研究受到生潮控潮技术以及流场、浓度场测量技术水平的制约,研究成果比较少。

综上所述,波浪环境下的射流研究近些年涌现了较为丰富的成果,并取得一定共识。潮流环境下的射流研究比较少,已有成果存在的问题主要有:①限于研究手段,没有同步研究完整潮周过程中射流流场与浓度场的随潮演变规律;②模拟潮流周期比较短,最短为 270s、最长不到 390s,不能反映天然海域潮流的基本特性;③研究对象多为纯射流,未考虑浮力影响。

1.2.3 射流数学模型

数值模拟是研究潮流条件下射流混合区特性的另一种重要手段。射流数值模拟方法主要包括三类:直接数值模拟、大涡模拟、雷诺平均模拟。

直接数值模拟就是不引入任何湍流模式,直接求解瞬时 $N-S$ 方程。直接数值模拟的优点在于能准确分辨湍流的多尺度涡结构与脉动特性。当前,射流直接数值模拟研究主要集中于两方面:①探索射流涡结构的产生、演化机制^[85-89];②为射流大涡模型、雷诺平均模型的验证提供基本数据与机理支撑^[90-91]。由于直接数值模拟不仅要分辨整个流动区域内所有尺度的涡结构,而且要分辨湍流在时间方向的脉动,因而计算的空间网格尺度和时间步长都非常小,计算量非常大。受计算速度与内存空间的限制,目前射流的直接数值模拟仍然局限于恒定流情形,对潮流情形几乎难以实现,即便是恒定流条件,大多数射流模拟的雷诺数仍停留在 10^3 量级。

大涡模拟是计算量介于直接数值模拟与雷诺平均模拟之间的模拟方法。其思想是将湍流运动分解成大尺度涡运动和小尺度涡运动,用滤波函数滤掉小尺度涡,建立大尺度涡的输运方程。对滤掉的小涡,则通过在大涡运动方程中添加亚格子尺度应力项来反映。由于大涡模拟计算量较直接数值模拟小,同时还能给出雷诺平均模拟无法给出的紊流信息,近年来在射流数值模拟研究中获得了较多关注。当前射流大涡模拟主要用于时空尺度较小的射流研究,研究成果



集中在两方面：①探索射流近区的输运机理^[92-103]；②比较大涡模型与雷诺平均模型在模拟射流时的优缺点^[104-106]。大涡模拟与雷诺平均模拟相比，计算量仍然很大。就目前计算条件而言，并不适合模拟潮流环境中射流演化的全过程。

对工程应用而言，往往感兴趣的是时均速度场、温度场以及脉动量的时均特性。雷诺平均模拟结果一般能够满足工程应用要求，在实际中得到了广泛应用。雷诺平均模拟的思想是求解时均化的 $N-S$ 方程，并采用雷诺应力项来反映紊动对时均量的影响。雷诺平均法的核心是建立雷诺应力项 $\overline{\rho u_i' u_j'}$ 与时均流动的关系，即湍流模式。目前常用的湍流模式可分为两大类：①雷诺应力模型，②涡黏模型。在雷诺应力模型中，直接构建描述雷诺应力的输运方程。在涡黏模型中，将雷诺应力表述为湍流黏性系数的函数。对于涡黏模型，根据确定涡黏系数的微分方程数目，涡黏模型可分为零方程、一方程与两方程模型。在基于零方程、一方程模型的射流模拟研究方面，代表性工作包括：Tang 等（2008）采用混合长度模型模拟了实际工程中多喷口扩散器的热水输运^[107]；Wang 等（2012）采用 Spalart-Allmaras 模型模拟了横流中射流的分叉现象^[108]。零方程模型采用代数表达式来建立湍流黏性系数与时均值的关系，比如普朗特混合长度模型。该模型忽略了对流—扩散对雷诺应力的作用，不能用于模拟带有分离与回流区的流动。一方程模型虽然考虑了对流—扩散对紊动的影响，但存在模型参数特征长度难以确定的问题。目前，射流雷诺平均模拟主要采用两方程涡黏模型，代表型模型主要包括标准 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型与 Realizable $k-\epsilon$ 模型。

针对静水条件和恒定流条件下的射流，不少学者采用两方程湍流模拟开展了大量研究。在射流的标准 $k-\epsilon$ 模型模拟研究方面：槐文信等（1998）数值再现了单孔圆形射流的分叉现象与马蹄涡结构^[109]。Kuang 等（2006）模拟了静水中交替排放型射流的相互作用，发现射流边界交叉点位置与密度弗劳德数、喷口直径、喷口间距等因素有关^[110]；曾玉红、槐文信（2005）模拟了横流条件下的圆形垂直浮射流，数值发现基于射流流场和射流温度场的轨迹线并不重合^[111]。由于标准 $k-\epsilon$ 模型难以处理高应变率与流线弯曲程度较大的流动，一些研究者采用改进的 $k-\epsilon$ 模型来模拟射流运动，这些模型主要有 RNG $k-\epsilon$ 模型与 Realizable $k-\epsilon$ 模型。在基于 RNG $k-\epsilon$ 模型的射流模拟研究方面，主要工作包括：Huai 和 Fang 等（2006）模拟了静水环境中有障碍方形浮射流，发现横断面温度等值线为星形状，且受密度弗劳德数影响^[112-113]；El-Amin 等（2010）模拟了浮射流的轴向流速，中心线流速以及温度场，发现垂向 Richardson 数会先减小后增大^[114]；Huai 等（2010）数值模拟了水平浮射流的横断面轨迹线、稀释度，数值结果与实验结果吻合较好，并发现 z 平面速