

SIMULATION TECHNIQUES AND
APPLICATIONS FOR ESTUARINE AND
COASTAL WATER AND SEDIMENT

河口海岸水沙 模拟技术及应用

夏云峰 闻云呈 吴道文 等 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书出版规划项目

长江黄金水道建设关键技术丛书

河口海岸水沙模拟技术及应用

夏云峰 闻云呈 吴道文 杜德军 著
徐 华 章卫胜 张世钊



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书针对物理模型模拟技术问题,从模型试验相似理论出发,系统回顾和探讨了潮流泥沙物理模型、波流共同作用下泥沙物理模型和整治建筑物水工模型设计中相似条件问题,阐述了模型设计与制作中关键问题的控制处理方法以及试验水沙条件的选取等关键技术。同时从河口海岸水沙数学模型、波流共同作用下水沙数学模型和风暴潮数学模型等方面论述了河口海岸水沙数值模拟技术问题,探讨了数学模型关键参数确定、水沙条件的选取等关键技术问题。在此基础上选取典型河口海岸工程研究实例,详细阐述物理模型和数值模拟技术在工程研究中的应用。

本书主要对河口海岸物理模型和数学模型模拟技术问题做了较为全面的总结与探讨,可供河口海岸工程相关研究人员参考使用。

Abstract

Aiming at problems of physical model simulation, based on model test similar theory, this book systematically reviews and discusses physical model of tidal and sediment, physical model of sediment with wave-current interaction and similar conditions in hydraulic model design of regulating structures. It also describes control and treatment methods for key issues in model design and construction, as well as key techniques for experimental water and sediment conditions selection. Meanwhile, according to mathematical models of estuarine and coastal water and sediment, water and sediment with wave-current interaction, storm tide and so on, it discusses numerical simulation techniques of estuarine and coastal water and sediment movement and explores determination and selection of mathematical model parameters and water and sediment conditions. After that, this book selects some typical estuarine and coastal engineering projects as example to make detailed descriptions about applications of physical models and numerical simulations in practical engineering.

This book comprehensively discusses and summarizes issues about estuarine and coastal physical model and mathematical model in certain level, which can be served as reference for researchers related to estuarine and coastal engineering.

图书在版编目(CIP)数据

河口海岸水沙模拟技术及应用 / 夏云峰等著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.12
(长江黄金水道建设关键技术丛书)
ISBN 978-7-114-12675-8

I. ①河… II. ①夏… III. ①河口泥沙—模拟—技术
②海岸—泥沙—模拟—技术 IV.TV148

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 300305 号

长江黄金水道建设关键技术丛书

书 名: 河口海岸水沙模拟技术及应用

著 者: 夏云峰 闻云呈 吴道文 等

责任编辑: 刘 君 丁润铎

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 26.75

字 数: 631 千

版 次: 2015 年 12 月 第 1 版

印 次: 2015 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12675-8

定 价: 80.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

《长江黄金水道建设关键技术丛书》 审定委员会

主 任 赵冲久

副主任 胡春宏

委 员 (按姓氏笔画排列)

王义刚	王前进	王 晋	仇伯强	田俊峰	朱汝明
严新平	李悟洲	杨大鸣	张 鸿	周冠伦	费维军
姚育胜	袁其军	耿 红	蒋 千	窦希萍	裴建军

《长江黄金水道建设关键技术丛书》

主要编写单位

交通运输部长江航务管理局
交通运输部水运科学研究院
南京水利科学研究院
交通运输部长江口航道管理局
交通运输部天津水运工程科学研究院
中交第二航务工程勘察设计院有限公司
武汉理工大学
重庆交通大学
长江航道局
长江三峡通航管理局
长江航运信息中心
上海河口海岸科学研究中心

《长江黄金水道建设关键技术丛书》

编写协调组

组 长 杨大鸣（交通运输部长江航务管理局）
成 员 高惠君（交通运输部水运科学研究院）
裴建军（交通运输部长江航务管理局）
丁润铎（人民交通出版社股份有限公司）

序

(为《长江黄金水道建设关键技术丛书》而作)

河流,是人类文明之源;交通,推动了人类不同文明的碰撞与交融,是经济社会发展的重要基础。交通与河流密切联系、相伴而生。在古老广袤的中华大地上,长江作为我国第一大河流,与黄河共同孕育了灿烂的华夏文明。自古以来,长江就是我国主要的运输大动脉,素有“黄金水道”之称。水路运输在五大运输方式中,因成本低、能耗少、污染小而具有明显的优势。发展长江航运及内河运输符合我国建设资源节约型、环境友好型社会以及可持续发展战略的要求。目前,长江干线货运量约 20 亿 t,位居世界内河第一,分别为美国密西西比河和欧洲莱茵河的 4 倍和 10 倍。在全面深化改革的关键期,作为国家重大战略,我国提出“依托长江黄金水道,建设长江经济带”,长江黄金水道又将被赋予新的更高使命。长江经济带覆盖 11 个省(市),面积 205.1 万 km²,约占国土面积的 21.4%。相信长江经济带的建设将为“黄金水道”带来新的发展机遇,进一步推动我国水运事业的快速发展,也将为中国经济的可持续发展提供重要的支撑。

经过 60 余年的努力奋斗,我国的内河航运不断发展,内河航道通航总里程达到 12.63 万 km,航道治理和基础设施建设不断加强,航道等级不断提高,在我国的社会经济发展中发挥了不可估量的作用。长江口深水航道工程的建成和应用,标志着我国水运科学技术水平跻身国际先进行列。目前正在开展的长江南京以下 12.5m 深水航道工程的建设,积累了更多的先进技术和经验。因此,建设长江黄金水道具有先进的技术积累和充足的实践经验。

《长江黄金水道建设关键技术丛书》围绕“增强长江运能”这一主题,从前期规划、通航标准、基础研究、航道治理、枢纽通航,到码头建设、船型标准、安全保障与应急监管、信息服务、生态航道等方面,对各项技术进行了系统的总结与著述,既有扎实的理论基础,又有具体工程应用案例,内容十分丰富。这套丛书是行业内集体智慧之力作,直接参与编写的研究人员近 200 位,所依托课题中的科研人员超过 1 000 位,参与人员之多,创我国水运行业图书之最。长江黄金水道的建设是世界级工程,丛书涉及的多项技术属世界首创,技术成果总体处于国际先进水平,其中部分成果处于国际领先水平。原创性、知识性

和可读性强为本套丛书的突出特点。

该套丛书系统总结了长江黄金水道建设的关键技术和重要经验，相信该丛书的出版，必将促进水运科学领域的学术交流和技術传播，保障我国水路运输事业的快速发展，也可为世界水运工程提供可资借鉴的重要经验。因此，《长江黄金水道建设关键技术丛书》所总结的是我国现代水运工程关键技术中的重大成就，所体现的是世界当代水运工程建设的先进文明。

是为序。

南京水利科学研究所所长
中国工程院院士
英国皇家工程院外籍院士



2015年11月15日

我国海岸线长,入海河流众多,水动力和泥沙条件均十分复杂,工程泥沙问题突出。随着我国经济的进一步发展,对水利开发、港口航道建设等诸多方面提出了更高的要求,有不少工程技术问题需要去认识、研究和解决,这些问题的解决大都需要河口海岸物理模型、数学模型等手段来进行研究。目前,关于水工与河工模型等方面的介绍不少,河口海岸模型在模型设计与制作等方面与之有相似的地方,但由于受到潮汐、波浪的影响,河口地区还受径流、潮流共同作用,在模型自动控制、数据测量、糙率和模型沙等诸多方面还存在不一致的地方。本书从模拟技术发展状况、物理模型和数学模型模拟技术及其在工程实际中的应用等方面对河口海岸模拟进行了详细介绍。

本书共分为5章,第1章主要介绍了河口海岸水沙模拟技术发展状况、模拟技术类型、研究意义及内容,由夏云峰、徐华、闻云呈负责编写。第2章从物理模型试验理论基础、潮流泥沙物理模型试验、波流共同作用下泥沙物理模型试验、整治建筑物水工模型试验、物理模型设计、制作、仪器设备、模型验证与水沙条件选取等方面介绍了河口海岸水动力泥沙输移物理模型模拟技术,由吴道文、夏云峰、杜德军、张世钊、徐华等负责编写。第3章从一维水流泥沙数值模型、平面二维水流泥沙数值模型、三维水流泥沙数值模型、波浪数值模型、砂质海岸泥沙运动的数值模拟、波流共同作用二维水流泥沙数值模型、风暴潮数值模型、数学模型率定、验证及其计算边界的选取等方面介绍了海岸水动力泥沙输移数值模拟技术,由夏云峰、闻云呈、章卫胜负责编写。第4章主要针对物理模型模拟技术在实际工程中的应用进行了详细的论述,由杜德军、吴道文、徐华、张世钊等负责编写。第5章主要针对河口海岸数学模型在实际工程中的应用进行了详细的论述,由闻云呈、章卫胜、王晓俊负责编写。

本书的出版得到了国家出版基金项目的资助，在此表示衷心感谢！限于作者的学识及写作水平，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2015 年 10 月

1 绪论	1
1.1 河口海岸水沙模拟技术发展状况	1
1.2 河口海岸水沙模拟技术类型	10
1.3 河口海岸水沙模拟技术研究的意义及内容	12
2 河口海岸水动力泥沙输移物理模型模拟技术	13
2.1 物理模型试验理论基础	13
2.2 潮流泥沙物理模型试验	35
2.3 波流共同作用下泥沙物理模型试验	39
2.4 整治建筑物水工模型试验	45
2.5 物理模型设计、制作与仪器设备	50
2.6 物理模型验证试验与水沙条件选取	84
3 河口海岸水动力泥沙输移数值模拟技术	88
3.1 一维水流泥沙数值模型	88
3.2 平面二维水流泥沙数值模型	99
3.3 三维水流泥沙数值模型	109
3.4 波浪数值模型	113
3.5 砂质海岸泥沙运动的数值模拟	123
3.6 波流共同作用二维水流泥沙数值模型	126
3.7 风暴潮数值模型	130
3.8 数学模型率定、验证及其计算边界的选取	137
4 物理模型模拟技术的应用	140
4.1 大连新港 30 万吨级码头工程潮流定床模型试验	140
4.2 长江河口段潮流泥沙物理模型试验	148
4.3 毛里塔尼亚友谊港模型试验	192
4.4 汕头海港外航道淤积问题	207
4.5 苏北灌河口外航道整治模型试验	218
4.6 波潮共同作用下京唐港外航道淤积模型试验	234

4.7 航道整治建筑物局部冲刷防护试验 241

4.8 新型消能护滩结构水槽试验 251

4.9 长江南京以下深水航道工程新型堤身构件水流力试验 262

5 河口海岸数学模型应用实例分析 269

5.1 长江感潮河段大通至长江口一维水沙数学模型研究 269

5.2 长江下游福姜沙水道 12.5m 深水航道整治二维水沙数学模型研究 287

5.3 非正交非交错曲线网格三维水流泥沙数值模型在长江南京河段的应用 308

5.4 基于 FVCOM 的三维水沙数学模型 326

5.5 波浪数学模型计算实例——渤海湾台风浪场计算 347

5.6 风暴潮数学模型计算实例——江苏沿海风暴潮数学模型 361

5.7 江苏盐城射阳港区航道整治工程波流共同作用下二维水沙数学模型 386

参考文献 402

索引 415

1.1 河口海岸水沙模拟技术发展状况

我国是一个大陆国家,幅员辽阔、江河密布,又是一个海洋大国,有着 1.8 万 km 的海岸线。河口和海岸地带历来是人类生存和发展最为重要的区域,世界上 60% 的人口居住在距离海岸附近 100km 的河口海岸地区。河口与沿海地带受波浪、潮流、风力等多种动力交汇作用,形成一个复杂的动力系统,其中波浪和潮流是该系统中最为常见和主要的两种动力。我国大型河口主要有长江口、黄海口、珠江口、钱塘江口等。长江口为我国第一大河口,属于三角洲河口类型,主要受上游大径流和下游中等强度潮汐共同作用,上游来沙量大,近年来受上游梯级水库开发利用等影响,来沙量减小明显。黄河口属于弱潮多沙而摆动频繁的堆积性三角洲河口,河口区河床演变非常剧烈,摆动频繁、多次改道入海,泥沙淤积严重。珠江口水网发达,水丰沙少,多级分汊,最终通过八大口门入海,属于弱潮河口三角洲类型。钱塘江口属于三角港河口,上游来水较少,下游潮汐动力强劲,常形成涌潮壮观景象。按照海岸海床物质组成和泥沙运动特性,可把海岸划分为淤泥质海岸、粉沙质海岸和沙质海岸三种基本类型。目前,海岸工程界通常习惯定义淤泥质海岸海床泥沙中值粒径小于 0.03mm,沙质海岸海床泥沙中值粒径大于 0.125mm,而粉沙质海岸海床泥沙中值粒径介于两者之间。在我国 1.8 万 km 绵长的大陆海岸线中,粉沙质海岸分布较为广泛,主要分布在我国辽宁东部、河北东部、山东沿海、江苏北部、浙江东部等区域;淤泥质海岸约占全国海岸线长度的 1/4,主要分布在河北、天津、山东、江苏、上海、浙江、福建、广东等省市;沙质海岸相对较少,主要分布在辽宁、山东、海南以及一些岛屿区域。

如今海洋经济作为经济发展新的增长点,已上升为我国国家经济发展战略层次。而港口建设、航道整治、大型桥梁建设、滩涂开发利用等涉水工程的实施是海洋经济发展的必要条件和基础,水动力泥沙问题作为这些涉水工程建设成败的关键技术问题之一,关系到港口航道开发利用效果、港工建筑物结构稳定和围填造陆工程后期开发利用等,已经成为海洋经济发展的一个重要前提。目前,物理模型、数学模型和原型观测是研究河口海岸工程问题的三个主要技术手段。物理模型就是运用河流、河口和海岸动力学知识,根据水流和泥沙运动的力学相似原理,模制与原型相似的边界条件和动力学条件,研究河流、河口和海岸在天然情况下或在有水工建筑物的情况下的水流结构、河床演变过程以及工程方案

治理效果的一种试验方法。目前,物理模型试验是我国研究重大复杂工程问题的重要可靠技术手段,例如长江三峡工程、葛洲坝水利枢纽工程、西煤东运重要港口黄骅港泥沙淤积问题、长江口深水航道整治工程和长江黄金水道建设等。数学模型是将已知的水沙动力学的基本定律用数学物理方程进行描述,在一定的初始条件和边界条件下求解数学方程,从而达到模拟某个水沙动力学的理论和工程实际问题。数学模型可以自由改变流体运动的性质和运动参数、可以进行全尺度试验、可以对整个河段大范围区域进行试验研究,具有模型运转费用低、耗时短等优点,随着水沙理论研究的不断发展,数学模型应用研究领域不断拓展。原型观测就是在河口海岸现场借助先进测量设备,获取典型水文泥沙条件下研究区域水沙实测资料,并进行相关分析研究。由于原型观测只能获得特定水沙和边界条件下现场水沙运动资料,不能完全满足工程应用研究需要,原型观测成果主要为物理模型和数学模型建立提供验证资料。为更好地了解当前国内外河口海岸模拟技术发展状况,下面主要针对物理模型和数学模型技术发展状况以及模拟技术类型问题展开分析。

1.1.1 物理模型技术发展历程

相似理论是物理模型试验研究的重要理论基础。1686年,牛顿发现了流体内摩擦的基本规律,同时提出了动力相似的普遍定律,由此奠定了物理模型试验的理论基础。1870年,弗劳德(W. Froude)进行了船舶模型试验并提出了著名的佛汝德相似定律,这标志着人类已开始科学地进行模型试验。1885年雷诺(O. Reynold)第一个应用佛汝德数进行摩塞河(Mersey)河工模型试验,研究潮汐河口的水流现象。1898年恩格斯在德国的德累斯顿科技大学(Dresden)创建了世界上第一个河流动力学试验室,从事天然河流的模型试验研究。不久,费礼门创建美国标准局水工试验室,从事水工建筑物的模型试验。模型相似重要的理论基础和方法手段之一就是因次分析方法。1914年,布金汉(J. Buckingham)提出了相似理论量纲分析中应用最普遍的 π 定理,在流体力学和模型试验中得到广泛应用,通过 π 定理决定相似准数。模型试验的依据便是在两种水流现象中保持相似准数相同值。模型试验中要求所有作用力同时保持相似的比例关系是很困难的,只能抓住对水流运动起主要作用的力的相似。例如,原型和模型中对水流运动起主要作用的力为重力,则必须按重力相似准则设计模型。但当水流主要受阻力作用,则必须按阻力相似准则设计模型。当研究潮波传播和水流运动等问题时,需要同时考虑重力和阻力的作用,所以在模型试验时,原型和模型必须同时满足重力和阻力这两种作用力的相似。

(1) 模型相似理论

近几十年来,国内外科研人员针对泥沙输移、河道治理、航道整治等问题开展了大量研究工作,取得了许多重要的成果。作为泥沙研究的重要手段之一,实体模型模拟技术得到了迅速发展,建立了一整套河工模型的相似理论、设计方法和试验技术。泥沙实体模型试验的理论基础是相似理论。从20世纪50年代开始,由于理论研究和工程建设的需要,开展了大量的泥沙实体模型试验,模型相似理论也有很大的发展。到20世纪70年代末,国内关于相似理论的主要成果有爱因斯坦-钱宁(Einstein, H.A.)的动床泥沙模型律、李昌华动床泥沙模型律、窦国仁的全沙模型律、屈孟浩的动床泥沙模型律和武汉水利电力

学院的动床泥沙模型律等。

1957年,钱宁提出了爱因斯坦—钱宁河工模型相似律,在水流运动方面必须满足重力相似及阻力相似,在推移质运动相似方面必须满足输沙量及河床冲刷性相似的条件。对于细沙在满足上述条件的同时还必须满足沙粒雷诺数相等条件。该模型律对模型沙的选择提出了很严格的限制,而根据后来的研究显示,这个条件是允许放宽的。

1964~1977年李昌华在总结国内外经验的基础上提出了动床泥沙模型律。李昌华认为在动床河工模型试验中,要达到河床变形相似应满足水流运动、泥沙运动和输沙沿程变化相似。其中,水流运动相似需满足重力相似和阻力相似;泥沙运动相似则需满足泥沙起动和输沙能力相似,对于输沙能力计算尚不成熟,需针对各个研究河段选用合适的输沙能力计算公式进行估算,最终通过冲淤验证试验进行确定;输沙沿程变化相似要求满足输沙连续相似和沿程运动变化相似两个相似条件,输沙连续相似要求模型按照河床冲淤变形时间比尺确定模型放水持续时间,而输沙沿程运动变化相似对于不同性质的动床模型要求则不同,对于底沙运动模型一般满足泥沙起动相似条件,就可保证输沙沿程运动变化相似,对于悬沙运动模型则还要求满足泥沙沉降、悬浮等相似条件。

为了同时模拟天然河道中悬沙、底沙、异重流形成的各种泥沙输移,窦国仁提出了全沙模型相似律,除了满足重力和阻力相似外,还要满足泥沙起动、输沙能力、悬浮、沉降和异重流发生条件等相似,最终达到底沙、悬沙和异重流的冲淤时间比尺统一。另外,窦国仁研究了波浪和潮流共同作用下的泥沙运动理论和模型相似理论,提出了河口海岸全沙模型相似理论。刘家驹总结提出了以悬沙落淤为主的港口、航道回淤计算方法,该方法经过20多年的应用获得了比较满意的结果,已列入交通运输行业规范。近年来该方法进一步发展,在考虑破波区含沙量的基础上,经考虑综合泥沙特性,将计算方法推广到粉沙质及沙质海岸航道回淤预报中。黄建维等开展了汕头港波流泥沙动床模型试验,采用单导堤成功解决了拦门沙和外航道泥沙回淤问题,为汕头港建成大型港区提供了保障。这是我国最早解决河口海岸地区沙质海岸拦门沙航道整治工程实例之一,其突出的整治功效和系统研究手段已被众多类似港口借鉴。

针对黄河泥沙输移运动规律,结合模型实践经验,1978年屈孟浩根据黄河模型试验的经验提出了一套动床泥沙模型律,主要满足底沙运动、悬沙运动、挟沙能力、河床冲淤等相似条件,但底沙运动满足起动切应力相似,悬沙运动满足悬浮相似。武汉水利电力学院认为,对于平原河流而言,天然河流悬移质输沙占输沙总量的绝大部分,沙质推移质经常与悬沙中床沙质发生交换,该部分推移质可近似地概括在悬移质之内,悬移质动床模型相似律主要包括悬移、起动、挟沙、河床变形等相似,推移质动床模型相似律主要包括起动、挟沙、河床变形等相似。

(2) 模型试验研究

世界各国对水利港航工程试验研究都十分重视,已建立了许多规模宏大、设备先进的试验室,如荷兰的代尔夫特(Delft)水利试验室、丹麦的水利研究所、美国陆军工程兵团水道试验站和海岸研究中心、日本的港湾技术研究所、英国的铁林福特水利研究公司、加拿大的国家研究委员会水利试验室等。我国第一个水工试验室建于1933年。随后,1935

年在南京筹建了中央水工试验所,即现在南京水利科学研究院的前身。新中国成立后,为适应大规模水利和港航工程建设需要,我国水利和港航工程试验研究机构不断发展壮大,试验设施和测量技术越来越先进,试验研究队伍也越来越壮大。目前国内专门从事水利和港航工程试验研究的中央机构和科研院校有二十余个,先后建造了先进的水利工程、港航工程、海岸动力和海岸工程等试验室。这些试验研究基地为解决水利和港航工程中遇到的技术问题提供了许多极有价值的试验成果,为发展我国水利和港航工程的基础理论和设计方法做出了巨大贡献,促进了水利和港航工程的科技进步。

国外 18 世纪已开始进行定动床河工模型试验研究,兴盛于 20 世纪 50~80 年代,主要有德国、苏联、加拿大等国,而有关潮汐河口模型试验研究在 19 世纪末也已开始进行,到 20 世纪初进行了很多有关河口整治、航道整治的模型试验,如 1885 年进行默尔西河(Mersey)模型,1886 年进行塞纳河(Seine)模型的研究;1932 年进行仰光(Rangoon)模型,1934 年进行哥伦比亚(Columbia)河口模型,20 世纪初叶英国泰晤士河口不能继续靠疏浚获得更大水深时,开始通过模型试验来研究河口的航道整治。荷兰代尔夫特水利实验室在 20 世纪 60~70 年代进行物理模型研究,在动床模型中,主要采用单级流量模拟河床冲淤问题。20 世纪 40~70 年代,美国陆军工程兵团水道实验站(WES)进行物理模型试验。自 1956 年南京水利科学研究院首次进行推移质动床泥沙模型以来,我国泥沙物理模型研究发展迅速,建立了全国第一个潮汐河口模型,提出了第一个潮汐水流阻力及不平衡输沙的计算公式,在国内首创了全沙模型及波浪和潮流共同作用下的浑水动床泥沙模型相似律,在泥沙运动规律、物理模型相似理论和试验技术等方面取得了丰富的研究成果。

(3) 模型量测手段

随着科学技术的不断进步,水利和港航工程试验研究中的量测技术也飞速发展,随着电子技术、激光技术、超声技术、自动控制和计算机应用技术的引入,量测设备越来越电子化、自动化,量测精度也越来越高。激光测速仪、超声测速仪、粒子图像测速仪和质点迹线测速仪等设备的应用使得水利和港航工程试验研究工作者可以清晰地获得空间流场图像及其内部结构,从而使得流场量测显示技术出现质的飞跃。大存储量、高速运算的计算机的出现以及计算方法的创新,一方面使许多问题可以通过数学方法来解决,另一方面又使物理模型试验得以深化。新的测试技术及电子计算机在计算、自动控制、数据采集和处理方面的应用发展很快,也进一步丰富了物理模型试验研究的内容。南京水利科学研究院主要研制水工、河工、港工模型试验中的量测仪器设备(主要包括水位仪、流速仪、含沙量量测仪、波高仪、六分量仪、模型地形仪、表面流场测量系统等)、自动控制和数据采集与处理系统、现场水文测验仪器等设备,不断提高模型试验研究水平,促进学科理论发展,为我国水利、水电、水运工程的重大基础研究、高技术发展和社会公益研究提供可靠的科研保障。2011 年以来,南京水利科学研究院以国家重大仪器专项“我国大型河工模型试验智能测控系统开发”为契机,着重研究新一代的河工模型试验量测仪器和智能测控系统。量测仪器以标准化、智能化、无线化、小型化和方便更换即插即用为开发目标,研制了一批新型量测仪器。河工模型试验测控系统以标准化、规范化、智能化、网络化以及

远程操作和无人值守为研究目标,研制了基于河工模型试验全过程管理和集成地理信息系统的下一代控制系统。

1.1.2 水沙数学模型技术发展历程

数学模型自出现以来,发展很快,流场计算从一维、二维到三维,从单纯的流场计算到浓度计算,从恒定流到紊流,乃至波流相互作用等,均取得了巨大进展,出现了许多算法,其中不乏成功算例。其发展过程大致可分三个阶段:20世纪50~60年代,该时期是水流数学模型发展的起点,曾进行了大量基础性和探索性的研究工作,建立了许多一维数学模型,也出现了一些简单的二维模型,主要研究水流运动规律。与此同时,数值方法,主要是有限差分法得到迅速发展,较为著名的有:特征线法、ADI法、Lax-Wendroff格式等。20世纪70年代,二维模型得到深入研究和广泛应用,对三维问题的研究也已起步。在这期间,Leendertse发展了半隐格式,巴特勒(Buttle)提出了一种全隐格式,许多学者在他们的研究和应用中提出了各自有效的数值方法。同时,二维的应用性研究也得到发展,解决了许多实际问题。由纯粹水流运动的研究到盐水入侵、泥沙运移和污染物扩散的探讨,大大丰富了数值试验的研究内容,提高了研究水平。20世纪80年代以后,随着计算机的发展和二维数学模型的研究和应用日臻完善,三维数学模型由简单到复杂,由理论研究到实际应用均得到了迅速发展。

(1) 水沙数学模型(一、二、三维)

一维水流数学模型模拟的是变量沿河流纵向的平均值,它也是至今使用最为广泛的一种模型。马斯克尔(Maskell)于1989年采用一维数学模型对英国柏瑞河(Parrett)河口的水流及泥沙运动进行了模拟计算,发现由于涨落潮的不对称性引起河口内悬沙含量比口门外高出10倍,同时也发现悬沙在垂向上浓度梯度可以降低水流对底床的切应力,减弱悬沙的再悬浮作用。Unnikrishnan等人于1997年对曼多菲-祖阿里(Mandovi-Zuari)河口的潮流传播过程及特性进行了观测,并建立了一维数学模型对潮波特性进行研究。Castro等人于2001年建立了适用于一维浅水方程的守恒型自适应网格算法,该算法适应于非恒定水流运动。采用守恒形式的插值方法以保证变量的守恒,结果表明,采用该方法可使模拟误差降低。雷尼尔(Regnier)等于1998年提出包括潮波波动的一维数学模型,用于Ythan模拟强潮河口的正压动力及溶解物的传播。结果表明,在强潮河口,一般有相当长时间的余流流动,余流流动与径流有明显的区别,在河口边界上由波动引起的溶解物的动力主要受水流流动历时影响,线性盐度特征图可由瞬时的系统特征获得。吉利布兰德(Gillibrand)等人于1998年建立了一维盐水入侵模型,用于河口的水文调查研究工作。该模型模拟水位、盐度及总氧化氮的纵向分布,模型的上边界为径流量,下边界为潮位,发现由于河口地形概化及其他原因的影响,中潮的盐度最大值小于观测值。

二维数学模型是从研究河口、海岸水流泥沙运动开始的,汉森(Hanson)最早进行了这一研究。二维水流数学模型,分深度平均的平面二维和侧向平均的垂向二维水流模型两种。Sinha等人于1999年采用垂向二维数学模型对胡格利(Hooghly)河口进行了计算。Kurup等人于1998年利用垂向二维数学模型对强潮性的斯旺(Swan)河口水流季节

性变化对盐水楔位置的影响进行了计算。Kurup 等人于 2000 年也对用于 Swan 河口的两个垂向二维数学模型进行了比较。结果表明, TISAT 模型的时间步长受柯郎-弗里德里希斯-列维 (Courant-Friedrichs-Lewy) (CFL) 准则的限制, 而二维纵向横向平均水动力学和水质 (CE-QUAL-W2) 模型通过半隐半显差分格式避免了这个限制。为了解切萨皮克 (Chesapeake) 海湾的水质, Park 等人于 1996 年采用垂向二维数学模型进行了模拟计算。Inoue 等人于 2000 年采用平面二维数学模型对 Louisiana 湾的宽浅型河口进行了研究, 其流速计算值与实测值的相关程度为 0.89~0.95。Heniche 等人于 2000 年采用二维有限元模型模拟计算河流及河口的具有自由表面的水体的流动。模型考虑了自然边界的特性, 用每个单元的水位的正、负来区别该单元是水还是干地, 采用六节点单元和隐式欧拉方法对数学模型进行时间及空间的离散。Tattersall 等人于 2003 年利用平面二维潮流及悬沙浓度数学模型对 Tamer 河口的实测悬沙浓度进行了分析研究。Gleizon 等人于 2003 年采用二维数学模型研究里本河 (Ribble) 河口的环流及泥沙输移。计算了潮位、流速、密度及泥沙含量的分布, 并对一维、二维及三维数学模型进行了比较。Mead 于 1999 年分别利用平面二维和垂向二维数学模型对河口内挖槽区的淤积问题进行了计算, 发现平面二维数学模型可以反映底质供给程度对结果的影响, 而垂向二维数学模型可以反映垂向流场的辐聚和辐散对挟沙力的影响。

国内自 20 世纪 70 年代初开始用数值模拟的方法对河口水流泥沙运动进行研究, 并于 70 年代末期取得了大量成果。林秉南等人于 1980 年根据二维潮汐水动力方程, 按特征理论推导出特征差分格式, 对杭州湾潮流进行了数值计算。张廷芳等人于 1992 年提出一种数值求解二维潮流的任意多边形单元显式模式, 便于计算具有复杂地形和边界条件的潮流场问题, 并成功地用于长江口的潮流数值计算。根据潮流河段的特点, 基于 SIMPLE 算法, 董耀华等人于 1995 年建立了一套河口潮流段平面二维非恒定流数学模型, 并用于长江口南通河段狼山~四号坝河段全日潮过程的计算。采用正交曲线坐标系, 张华庆等人于 2002 年建立了珠江口平面二维潮流模型, 并就伶仃洋治导线规划方案的实施对海区流场及冲淤变化的影响进行了分析。为研究东中国海潮流动力机制, 诸裕良、宋志尧等人于 1998 年分别利用平面、二维和三维数学模型进行了东中国海的潮流数值模拟。结果表明, 在潮流流速的分布方面, 涨潮流以南偏东为主, 落潮流大多为西北向, 往复流特征明显在潮波向岸传播的过程中, 受到地形摩擦及反射的影响, 潮波产生变形余流主要受到径流、沿岸流、密度流、风场和水下地形因素的影响。

国外自 20 世纪 70 年代中期开始了三维水动力数值模拟的研究工作。以 A.F.Blumberg 及 G.L.Mellor 教授为首的普林斯顿 (Princeton) 大学海洋动力环境数值模拟小组从 20 世纪 70 年代开始就一直致力于这方面的研究, 其代表性的河口海岸与海洋模型为 ECOM (Estuary, Coast and Ocean Model)。该模型在垂直方向采用 σ 坐标系, 水平方向采用正交曲线网格及 Arakawa 格式。ECOM 模型包含了一个先进的紊流模块并由此模块提供垂直方向的混合系数。该系数直接关于当地的流速梯度及其密度梯度, 能较为客观地反映河口流动的实际情况。在世界上许多国家得到了广泛的应用并获得良好的声誉。菲顿纳多 (Fortunato) 等人于 1997 年利用三维斜压潮流模型研究了塔霍河 (Tagus) 河口的复杂环流。