

◀ 国家内河航道整治工程技术研究中心系列成果 ▶

# 船闸水动力学

## 数值模拟与工程应用研究

CHUANZHA SHUIDONGLIXUE  
SHUZHIMONI YU GONGCHENG YINGYONG YANJIU

杨忠超 陈 明 著



科学出版社

国家内河航道整治工程技术研究中心系列成果

# 船闸水动力学数值模拟与工程应用研究

杨忠超 陈 明 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书基于 RNG  $k-\varepsilon$  双方程紊流模型, 分别以乌江银盘船闸输水系统充水阀门段、广东北江濠里船闸、西江贵港船闸为研究对象, 进行如下研究: 船闸阀门三维水动力特性和体型优化; 带格栅消能室的环绕短廊道输水系统的三维非恒定水力特性和船闸引航道水动力特性; 格栅消能室的消能特性, 单明沟、双明沟和三明沟的消能特性, 以及明沟和盖板的消能特性; 并基于“船舶-水流”耦合动力响应, 开发研究了一套闸室船舶系缆力数值模拟的并行计算程序。这些研究成果不仅能为实际工程提供可靠的技术支撑, 也可通航枢纽水动力学的教学和研究奠定坚实的基础。

本书适于水利工程领域研究人员、工程设计人员, 以及相关学科的研究生阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

船闸水动力学数值模拟与工程应用研究 / 杨忠超, 陈明著.  
—北京: 科学出版社, 2015.3  
ISBN 978-7-03-043552-1  
I. ①船… II. ①杨… ②陈… III. ①船闸-水动力学-数值模拟-研究 IV. ①U641.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 045964 号

责任编辑: 杨 岭 朱小刚 / 责任印制: 余少力  
责任校对: 葛茂香 / 封面设计: 墨创文化

### 科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号  
邮政编码: 100717  
<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷  
科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16  
2015 年 3 月第一次印刷 印张: 13 1/2 插页: 14 面  
字数: 340 千字  
定价: 78.00 元

## 前 言

船闸是通过水力直接提升船舶过坝以克服航道上的集中水位落差而设置的一种通航枢纽建筑物,设计和建设该类建筑物涉及众多技术问题,其中水动力学是船闸工程建设中的关键技术问题之一,对其处理得好坏直接关系到工程设计和建设的成败。限于船闸输水过程产生非恒定流的复杂性和数值计算的难度,国内外采用的研究方法仍主要以物理模型试验和原型观测为主,但物理模型试验受制于量测手段,不能得到水流细部流动特性,如廊道及消能工的内部流场和压力场、紊动能和耗散率等参数的分布;而且物理模型试验费时、费力,对试验仪器性能及测量环境条件的要求也较高,往往影响到试验周期和测试精度。相比之下,数值模拟具有一定的优势,它不仅可以了解船闸输水过程的整体性质,而且可以了解其局部的细微过程,并可以代替一些危险的、昂贵的,甚至难以实施的实验,或者帮助优化实验方案,因而愈来愈受到人们的重视。

目前,关于船闸水动力学的数值研究已取得一些研究成果,但多散见于期刊、论文集和研究报告中,并未形成一本关于船闸水动力学数值研究的专著。为此,编者在主持和参与的研究项目[交通部西部建设项目“西部超高水头枢纽通航建筑物关键技术研究(200532800030)”、“贵港和西津枢纽二线船闸扩能改造工程关键技术研究(20113283501580)”,交通运输部应用技术研究项目(重点平台)“船闸输水过程消能机理及船舶系缆力计算方法研究(2011329841240)”,重庆市科学技术委员会自然科学基金“超高水头船闸分散式输水系统消能工型式及消能效果物模试验和三维数值模拟研究(CSTC2006EA6008)”,“省水船闸水力特性研究及在山区河流高坝通航中的应用(CSTC2010BB4273)”]的基础上,通过对研究成果的总结、补充、修改和完善,完成了本书。全书共分为7章,依次为绪论、船闸水动力学三维数值模拟的理论基础及方法、船闸阀门水动力特性数值模拟、船闸整体输水系统水动力特性数值模拟、船闸消能工消能特性数值模拟、闸室船舶系缆力数值模拟和船闸引航道水动力数值模拟,基本涵盖了船闸水动力学的关键技术内容。

本书的出版得到国家内河航道整治工程技术研究中心的大力支持。在项目研究和本书的撰写过程中,重庆交通大学陈明栋教授、王多银教授、杨斌教授和杨胜发教授,交通运输部梁应辰院士,南京水利科学研究院宣国祥教高和胡亚安教高,交通运输部和重庆市科学技术委员会以及重庆交通大学各位领导给予了热心指导,重庆交通大学研究生枚龙、施如学、吴继红、张星星、杨震、杜兆辉为本书的文字整理、校稿等工作付出了辛勤的劳动,在此,一并表示衷心的感谢。

鉴于作者水平有限,本书难免有疏漏、谬误之处,敬请有关专家和广大读者批评指正!

# 目 录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                   | 1  |
| 1.1 船闸水动力学研究的主要内容 .....          | 1  |
| 1.2 研究现状 .....                   | 1  |
| 1.2.1 阀门水动力学 .....               | 1  |
| 1.2.2 输水系统水动力学 .....             | 2  |
| 1.2.3 消能工水动力学 .....              | 3  |
| 1.2.4 闸室船舶系缆力 .....              | 3  |
| 1.2.5 引航道水动力学 .....              | 4  |
| 1.3 本书内容 .....                   | 5  |
| 第 2 章 船闸水动力学三维数值模拟的理论基础及方法 ..... | 6  |
| 2.1 紊流基本控制方程 .....               | 6  |
| 2.2 紊流模型 .....                   | 6  |
| 2.2.1 直接数值模拟 .....               | 6  |
| 2.2.2 雷诺时均法 .....                | 7  |
| 2.2.3 大涡模拟 .....                 | 10 |
| 2.3 方程离散 .....                   | 10 |
| 2.3.1 二维情况 .....                 | 11 |
| 2.3.2 三维情况 .....                 | 14 |
| 2.4 压力修正算法 .....                 | 14 |
| 2.5 边界条件 .....                   | 15 |
| 2.5.1 进出口边界条件 .....              | 15 |
| 2.5.2 近壁处理 .....                 | 15 |
| 2.6 自由水面的 VOF 法模拟 .....          | 17 |
| 2.7 动网格技术 .....                  | 18 |
| 2.7.1 弹簧光顺法 .....                | 18 |
| 2.7.2 局部网格重构法 .....              | 19 |
| 2.8 CFD 软件应用 .....               | 20 |
| 2.8.1 GAMBIT .....               | 20 |
| 2.8.2 FLUENT .....               | 20 |
| 2.8.3 TECPLOT .....              | 21 |
| 2.8.4 CFD 软件在船闸水动力学中的应用 .....    | 21 |

|                                           |            |
|-------------------------------------------|------------|
| 2.9 小结 .....                              | 22         |
| <b>第3章 船闸阀门水动力特性数值模拟 .....</b>            | <b>23</b>  |
| 3.1 概述 .....                              | 23         |
| 3.2 几何模型 .....                            | 23         |
| 3.3 计算工况 .....                            | 24         |
| 3.4 网格剖分及边界条件 .....                       | 25         |
| 3.4.1 网格剖分 .....                          | 25         |
| 3.4.2 边界条件 .....                          | 26         |
| 3.5 流量时空演化 .....                          | 26         |
| 3.6 流态及流速时空演化 .....                       | 28         |
| 3.7 压力时空演化 .....                          | 61         |
| 3.7.1 平面阀门方案 .....                        | 61         |
| 3.7.2 设计方案 .....                          | 67         |
| 3.7.3 门型比较 .....                          | 74         |
| 3.7.4 优化方案 .....                          | 74         |
| 3.8 紊流动能 $k$ 、紊流动能耗散率 $\epsilon$ 分布 ..... | 86         |
| 3.9 小结 .....                              | 90         |
| <b>第4章 船闸整体输水系统水动力特性数值模拟 .....</b>        | <b>91</b>  |
| 4.1 概述 .....                              | 91         |
| 4.2 几何模型 .....                            | 91         |
| 4.3 网格剖分及边界条件 .....                       | 93         |
| 4.4 模型验证 .....                            | 93         |
| 4.4.1 水位、流量验证 .....                       | 93         |
| 4.4.2 流速验证 .....                          | 94         |
| 4.4.3 闸室水体紊动特性验证 .....                    | 97         |
| 4.5 闸室水力特性 .....                          | 97         |
| 4.5.1 闸室断面流线、流场分布 .....                   | 98         |
| 4.5.2 闸室自由水面紊动情况 .....                    | 104        |
| 4.5.3 格栅孔出流流量分布 .....                     | 107        |
| 4.6 小结 .....                              | 108        |
| <b>第5章 船闸消能工消能特性数值模拟 .....</b>            | <b>109</b> |
| 5.1 概述 .....                              | 109        |
| 5.2 格栅消能 .....                            | 109        |
| 5.2.1 消能效果 .....                          | 109        |
| 5.2.2 消能水流结构和机理 .....                     | 111        |
| 5.3 明沟消能 .....                            | 116        |

|            |                           |            |
|------------|---------------------------|------------|
| 5.3.1      | 几何模型 .....                | 116        |
| 5.3.2      | 模型验证 .....                | 116        |
| 5.3.3      | 计算工况 .....                | 118        |
| 5.3.4      | 成果分析 .....                | 118        |
| 5.4        | 明沟与盖板消能比较 .....           | 127        |
| 5.4.1      | 几何模型 .....                | 127        |
| 5.4.2      | 模型验证 .....                | 128        |
| 5.4.3      | 流速分布 .....                | 131        |
| 5.4.4      | 流态比较 .....                | 141        |
| 5.4.5      | 流速比较 .....                | 141        |
| 5.5        | 小结 .....                  | 142        |
| <b>第6章</b> | <b>闸室船舶系缆力数值模拟 .....</b>  | <b>143</b> |
| 6.1        | 概述 .....                  | 143        |
| 6.2        | 计算条件 .....                | 143        |
| 6.2.1      | 船体参数 .....                | 143        |
| 6.2.2      | 船舶约束边界 .....              | 143        |
| 6.3        | 计算原理 .....                | 145        |
| 6.3.1      | 船舶纵向和横向受力方程 .....         | 145        |
| 6.3.2      | 船舶运动方程 .....              | 146        |
| 6.4        | “船舶—水流”耦合作用并行计算程序 .....   | 147        |
| 6.4.1      | 并行原理及并行结构 .....           | 147        |
| 6.4.2      | 程序设计与调试 .....             | 148        |
| 6.5        | 数值方法与验证 .....             | 149        |
| 6.5.1      | 数值方法 .....                | 149        |
| 6.5.2      | 船舶位移及系缆力验证 .....          | 152        |
| 6.5.3      | 数值模拟结果分析 .....            | 154        |
| 6.6        | 小结 .....                  | 159        |
| <b>第7章</b> | <b>船闸引航道水动力数值模拟 .....</b> | <b>160</b> |
| 7.1        | 概述 .....                  | 160        |
| 7.2        | 引航道数学模型的建立 .....          | 160        |
| 7.2.1      | 二维水流数学模型 .....            | 160        |
| 7.2.2      | 几何模型及网格剖分 .....           | 163        |
| 7.2.3      | 数模验证 .....                | 165        |
| 7.3        | 计算工况及通航安全指标 .....         | 167        |
| 7.3.1      | 双线船闸运行方式 .....            | 167        |
| 7.3.2      | 特征水位组合 .....              | 167        |
| 7.3.3      | 计算工况与水位组合 .....           | 168        |

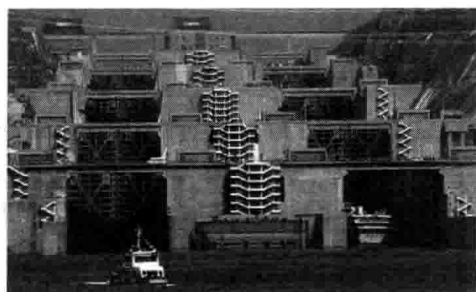
|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 7.3.4 通航安全指标 .....               | 168 |
| 7.3.5 测点布置 .....                 | 168 |
| 7.4 上引航道非恒定流计算成果分析 .....         | 169 |
| 7.4.1 双线船闸同时运行 .....             | 169 |
| 7.4.2 一线船闸单独运行 .....             | 173 |
| 7.4.3 二线船闸单独运行 .....             | 176 |
| 7.4.4 一线船闸先开, 二线船闸后开 .....       | 179 |
| 7.4.5 二线船闸先开, 一线船闸后开 .....       | 183 |
| 7.5 下引航道非恒定流计算成果分析 .....         | 186 |
| 7.5.1 双线船闸同时运行 .....             | 186 |
| 7.5.2 一线船闸单独运行 .....             | 190 |
| 7.5.3 二线船闸单独运行 .....             | 193 |
| 7.5.4 二线船闸先开, 一线船闸后开 .....       | 196 |
| 7.6 船闸灌、泄水对上、下引航道通航条件的影响分析 ..... | 199 |
| 7.6.1 船闸灌水对上引航道通航条件的影响 .....     | 199 |
| 7.6.2 船闸泄水对下引航道通航条件的影响 .....     | 202 |
| 7.7 小结 .....                     | 204 |
| 参考文献 .....                       | 205 |
| 彩色图版 .....                       | 209 |



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 船闸水动力学研究的主要内容

船闸是用于过往船舶通过水利枢纽的一种建筑物(图 1.1), 俗称过船建筑物, 又称通航建筑物。船闸是通航建筑物中历史最悠久和数量最多的型式。早在公元前 214 年(秦始皇三十三年), 就有开凿灵渠, 设置陡门, 用以调整航段的水位落差, 使船舶顺利通过的实例, 陡门即是船闸的雏形。据不完全统计, 目前全世界有船闸 3000 座以上, 约占通航建筑物总数的 97%; 在我国近 900 座通航建筑物中, 船闸约占总数的 90%。船闸水动力学是船闸工程建设中的关键技术问题之一, 主要涉及闸阀门水动力学、船闸输水系统和消能工水动力学以及引航道水动力学等问题。



三峡船闸



京杭运河苏北三线船闸

图 1.1 船闸实景图

## 1.2 研究现状

长期以来, 顾及船闸复杂的紊流场, 研究均以物理模型试验为主, 但物理模型试验受制于量测手段, 不能得到输水系统中的水流细部流动特性。相比之下, 数值模拟具有省时省力且便于进行多方案比选等优点, 因而越来越受到人们的重视。本节基于国内外大量研究资料, 从阀门、输水系统和消能设施、闸室船舶系缆力以及引航道等方面对数值模拟在船闸水动力学中的发展状况予以阐述。

### 1.2.1 阀门水动力学

船闸输水阀门每天频繁操作, 工作条件复杂, 在非恒定高速水流作用下, 极易在阀门段、分流口等部位形成空化, 严重时可能导致阀门及输水廊道空蚀破坏, 威胁建筑物

及通航安全。对于高水头船闸而言,上述复杂的水力学问题更为凸出,一直是船闸设计中的关键技术难题。

目前,针对船闸阀门段的三维水流数值模拟研究,国内外已取得较大发展。鉴于对船闸灌泄水过程阀门井水位变化的考虑,Hammack 和 Stockstill<sup>[1]</sup>通过 RANS 方程,采用自适应水力特性的数值计算方法(ADH 法),对约翰德船闸的输水阀门廊道段水动力学进行了三维数值模拟,得到各个典型阀门开度情况下的流速和压力分布情况。在国内,王玲玲等<sup>[2]</sup>采用  $k-\epsilon$  双方程模型对三峡永久船闸充水系统阀门段进行了二维数值模拟;马峥等<sup>[3]</sup>对三峡永久船闸末级闸首阀门段输水廊道进行了数值模拟,对阀门段输水廊道的内部水流流动特征进行了分析,并研究了阀门后廊道顶部的压力特性等。王智娟等<sup>[4]</sup>运用  $k-\epsilon$  双方程,结合 VOF 模型,对乌江银盘船闸阀门段水力特性进行了三维数值模拟,并通过一系列的体型优化,最终确定了推荐方案。基于输水阀门对流量影响的考虑,杨忠超、李洪奇等<sup>[5-8]</sup>在前人研究的基础上,引进采用了动网格技术,采用 VOF 方法,实现了对输水阀门廊道段的三维水流动态模拟,通过分析阀门段水流急变分离的流态、流速、压力等水力特性参数的时空演化规律,确定出了较优体型,成功解决了高水头船闸阀门水力学难题。不难看出,计算流体力学(CFD)在船闸阀门水力学研究中日趋成熟,为实际工程应用提供了坚实的技术支撑。

### 1.2.2 输水系统水动力学

船闸输水过程是船闸运行的关键环节,而船闸正常运行主要依赖于输水系统设计性能,其核心在于输水系统水动力学的研究。国外在船闸输水系统水动力学数值模拟方面取得了较大发展,美国陆军工程兵团水道试验站于 1975 年提出了预测校正法,并随即开发了 H5320 水力计算程序。在 80 年代,针对高水头分散输水系统,基于 FORTRAN 语言开发编写了 HLOCK 水力计算程序<sup>[9]</sup>。对船闸输水系统多支孔出流情况,Stockstill 等开发研究了一套用于确定廊道及支孔射流流量及压力分布情况的水力计算程序<sup>[10]</sup>。他们通过 RANS 方程,采用自适应水力特性的数值计算方法(ADH 法),对闸室自由表面采用滑移网格技术进行捕捉,对美国某船闸的整体输水系统水动力学进行了三维数值模拟<sup>[11]</sup>。Stockstill 等在船闸输水系统水动力学研究方面虽采用了三维数值模拟计算手段,但并未将输水阀门考虑到计算模型中,即未考虑输水阀门对输水流量的影响,其实并非真正意义上实现了船闸灌泄水过程的动态仿真模拟。在国内,相关研究人员倾注了大量的精力,开发研究了多种船闸输水系统非恒定流数学模型,如带调节水池船闸水力计算数学模型<sup>[12]</sup>和复杂分散输水系统数学模型<sup>[13]</sup>等。通过一维非恒定水流数学模型,郑宝友<sup>[14]</sup>基于 BASIC 语言开发了一套船闸输水系统水力计算程序;宣国祥<sup>[15]</sup>以船闸设计规范为依据,开发了单级船闸输水系统分析及水力计算软件包。为得到输水廊道及闸室内流场情况和计算结果的直观反映,王玲玲<sup>[2]</sup>采用二维水流数学模型,将数值模拟技术和计算机图形处理及可视化技术紧密结合,研制了三峡工程永久船闸输水系统水力特性数值实验室;随着计算机领域的快速发展,已发展到输水系统的三维紊流数值计算水准。张利鹏<sup>[16]</sup>基于乌江银盘船闸,建立了整体输水系统数学模型,选用水气两相流的 VOF 模型追踪模拟闸室自由表面,采用 RNG  $k-\epsilon$  紊流模型对银盘高水头船闸水流进行了三

维数值模拟。黎贤访<sup>[17]</sup>基于  $k-\epsilon$  标准方程、Realizable  $k-\epsilon$  方程和重整化群 RNG  $k-\epsilon$  方程建立闸室水动力学三维数学模型模拟了闸室灌水过程,分析并归纳了闸室水流在流场结构、断面流速分布、沿垂向演变的规律,以及“廊道—侧支孔”区域的水动力学特性,并提出了闸室内船舶系缆力计算模型。卢超<sup>[18]</sup>以短廊道输水系统为研究对象,运用 Flow3D 计算流体力学软件对船闸的灌水过程进行了三维数值模拟,得到详尽的闸室内水流流场与漩涡分布、紊动强度分布、水流对冲消能过程,并得到闸室中的水面波动情况。不难看出,上述研究虽进行了船闸输水系统三维水流数值计算,却没有考虑动阀门的启闭对水力特性的影响,因此尚未实现船闸输水过程的三维水流动态仿真模拟。

### 1.2.3 消能工水动力学

船闸输水时虽大部分能量可消耗在输水系统内,若不采取一定的消能措施,将有一部分剩余能量直接进入闸室,从而影响闸室船舶停泊安全。因此,在输水系统的设计过程中,考虑是否采用消能设施和采取何种消能措施尤为重要。在分散输水系统中,常采用明沟、盖板、格栅等消能措施。在集中输水系统中,现代船闸采用的消能工型式较多,如消能室、消力坎、消力梁、消力墩、消力池等。李凯<sup>[19]</sup>运用紊流计算软件 Fluent,选用水气两相流的 VOF 追踪模拟自由表面,采用 RNG  $k-\epsilon$  紊流模型对闸墙长廊道侧支孔输水系统在使用不同的消能坎布置情况时的消能效果进行了数值模拟,确定了较佳方案。国内目前对于中低水头船闸,在闸室(上闸首侧)内常采用格栅消能室予以消能,同时配有一定的消力坎和消力梁以调整流速流向,但是对格栅消能室的三维数值模拟研究涉及较少。刘保军<sup>[20]</sup>以银盘高水头船闸为研究对象,采用 RNG  $k-\epsilon$  紊流模型,对明沟消能和盖板消能两种型式进行了三维数值模拟,得到两种不同消能型式的流速及压强分布、紊动能及其耗散率分布以及空化空蚀危险区域分布等。综合分析闸室的流速、流态及水流的消能机理,得出在乌江银盘船闸中选用明沟消能型式较好,与物理模型试验结果一致。国内外目前对于船闸消能工尤其是高水头船闸消能工的选型尚以物理模型试验研究为主,数值模拟的研究尚未广泛开展,仍有大量工作需要深入。

### 1.2.4 闸室船舶系缆力

对于闸室船舶系缆力的计算,主要解决的是将船体作为刚体的“浮体—流体”耦合动力响应问题。对该问题的研究,有不少学者做过相关工作,但大多集中在波浪环境下浮体与流体间相互作用的研究,而实际上针对船闸中“船舶—水流”间耦合运动过程中的船舶受力分析,不仅要考虑黏性水流流速及波浪对船体的作用,而且需考虑在闸室水位大变幅的情况下对船体升降运动控制的动力响应。在闸室船舶受水动力作用的研究成果中,Richter<sup>[21]</sup>通过假定船舶是随周边水体做无相对位移的运动,即将船舶视作“柔性船”,建立了一个较简化的数学模型并分析了闸室内波浪的推进过程。Jong 等<sup>[22]</sup>研究了闸室内涌浪对船舶的水动力作用及船舶的运动响应,并根据研究成果开发了闸室内船舶所受纵向力的计算程序,该程序假定船舶所受纵向力是三个分力的叠加,其来源分别为推进波、均匀流和集中灌水形成的射流。Natale 和 Savi 等<sup>[23]</sup>针对闸门上开孔的输水系统

或闸门缓慢开启类型的闸室水力学条件和船舶所受纵向力开展了水力学试验研究和数学模型研究,并模拟了船体单自由度动力学模型在涌浪作用下船舶上升或下降运动。黎贤访<sup>[17]</sup>基于流体动力学控制方程,运用动网格技术,同时根据船舶在闸室中的4点系缆方式,导出了船舶缆绳拉力的计算公式。在已有闸室船舶受力计算的成果中,由于问题的复杂性,很多研究方法和手段都进行了一定的简化。而实际上,船闸输水非恒定过程中船舶与水体存在的是耦合运动关系。为此,对船闸输水过程闸室“船舶—水流”间的耦合动力响应,应作为闸室船舶系缆力的一个重要研究方向。

### 1.2.5 引航道水动力学

引航道是船闸的重要组成部分,其作用在于保证船舶安全、顺利地进出船闸,供等待过闸船舶的安全停泊,并使进出闸船舶能交替避让。单线船闸灌、泄水时引航道内水流条件直接影响船舶的安全停泊、行驶。多线船闸共用引航道时水面波动、水流相互叠加,水力学问题更为复杂,船舶安全隐患更为突出。关于船闸引航道水动力学的数值模拟研究,相关研究成果大多是基于具体工程实例。陈晚华等<sup>[24]</sup>利用数值模拟方法,对昭化航电枢纽不同下泄流量时下引航道及其附近区域的流速分布进行了模拟研究,验证了现有布置形式的合理性,并提出了最大通航流量的建议值。陈阳等<sup>[25]</sup>将二维非恒定流数学模型与船闸灌、泄水的一维数学模型进行联解,模拟了三峡船闸上引航道在灌水过程中产生的水面波动,并得出了水面波动周期及波长的近似计算公式。黄国兵<sup>[26]</sup>在三峡枢纽上引航道特点及各布置方案的基础上,建立了沿水深平均的二维数学模型,对上游引航道中非恒定流水力特性进行计算,并探讨了采取侧向取水、降低取水口附近局部底部高程、错峰灌水等措施,以改善通航水流条件及通航建筑物前的水位波动等问题。黄明海、黄国兵<sup>[27]</sup>采用二维非恒定流数学模型,对不同布置方案及调度管理方式下三峡枢纽上、下引航道内的非恒定水流进行了模拟,并处理了方程离散、不规则边界、动水边界等关键技术问题。李义天等<sup>[28]</sup>建立了模拟三峡下引航道水沙运动规律的一维数学模型,对其下引航道在两种不同布置方案时的水沙运动规律进行了讨论,探讨了削弱水位波动、减小引航道内的泥沙淤积问题,对工程实践有参考价值。周建军<sup>[29]</sup>利用理论分析及数学模型方法,分析得出引航道尺度对水位波幅的影响规律,指出过流面积的增加或隔流堤长度的减小对于减弱引航道内水位波动有利,并提出了设计时应尽量避免外源波的共振对内部水位波动的影响等观点。乔文荃等<sup>[30]</sup>在水工物理模型试验的基础上,建立二维数学模型以及操纵性相似的遥控自航船模对三峡下游引航道水流条件进行了模拟,对比分析了改变泄水方式、隔流堤布置方式等措施对通航水流条件的改善效果。在国外,法国学者将船闸的物理模型和数值模拟结合起来,开发了一种“混合动力模型”,该模型可对结果进行交叉检查,有效减少了计算时间,提高了预测原型水动力性能的能力,具有一定实用意义<sup>[31]</sup>。

## 1.3 本书内容

本书介绍编者近十年来进行的船闸水动力学数值模拟研究成果,共分为7个章节,安排如下:

(1)第1章为绪论部分,介绍船闸水动力学主要涉及的研究内容,同时阐述数值模拟技术在阀门、输水系统、消能设施、闸室船舶系缆力以及引航道水动力学等方面的研究进展。

(2)第2章重点介绍紊流数值模拟中的雷诺时均法,评析3种紊流模型的优缺点,在此基础上选取 RNG  $k-\epsilon$  紊流模型,采用有限体积法对其进行离散,近壁处理采用壁面函数法。通过 SIMPLE 的改进算法 SIMPLEC 来求解离散方程组,以得出流场数据。结合船闸输水全过程的三维流动研究的需要,着重介绍动网格技术在阀门开启过程中的运用,同时采用 VOF 方法对闸室和阀门井自由水面进行捕捉。此外,根据上述理论基础,对本书所采用的 CFD 软件进行相应介绍。

(3)第3章采用动网格技术和 VOF 方法对银盘船闸充水阀门段非恒定流进行三维数值模拟,分析阀门段水流急变分离的流态、流速、压力等水力特性参数的时空演化规律,以及出现空蚀的危险区域和时刻。将平面阀门和反弧阀门分别应用到银盘船闸输水系统阀门段中,通过对数模结果进行详尽的分析后,在建议采用的反弧阀门 1 min 开启方案的基础上对阀门后突扩廊道体型进行了 8 个方案的优化,并作对比分析。此外,也对反弧门 1 min 闭合过程阀门段水流特性进行分析和研究。

(4)第4章选择具有代表性的带格栅消能室的环绕短廊道集中输水系统作为研究算例,基于船闸整体输水系统,采用紊流模拟技术,其中紊流模型采用 RNG  $k-\epsilon$  模型,闸室自由水面采用 VOF 处理技术,输水阀门开启过程采用动网格技术,对船闸灌水全过程进行三维水流流动动态仿真研究。

(5)第5章采用三维紊流数值模拟方法,分别对格栅消能室、明沟和盖板的消能特性进行分析,并比较相同条件下明沟与盖板的消能效果。

(6)第6章基于“船舶-水流”耦合动力响应,建立船舶纵向和横向受力方程及其运动控制方程,采用大型流体计算平台 FLUENT,借助 UDF 自主开发一套适用于闸室船舶系缆力数值模拟的并行计算程序,并进行系缆力数值计算研究。

(7)第7章依托贵港枢纽一、二线船闸工程,采用二维水流数学模型,研究双线船闸在单独、同时或错峰灌泄水时上、下引航道非恒定特性及对通航水流条件的影响。

## 第 2 章 船闸水动力学三维数值模拟的理论基础及方法

船闸灌泄水过程系非恒定流过程,在输水系统和闸室内容易形成复杂的紊动水流和波动现象。通过数值模拟方法研究船闸这一输水过程复杂的流动问题,需采用考虑紊动作用的三维流动数值模拟。

### 2.1 紊流基本控制方程

直角坐标系下的紊流瞬时连续性和动量控制方程如下<sup>[32]</sup>:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) + s_x \quad (2.2a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v}) + s_y \quad (2.2b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{w}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{w}) + s_z \quad (2.2c)$$

其中,

$$s_x = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + f_x \quad (2.3a)$$

$$s_y = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + f_y \quad (2.3b)$$

$$s_z = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + f_z \quad (2.3c)$$

式中,  $\rho$  为流体密度;  $t$  为时间;  $\nabla$  为拉普拉斯算子,  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ ;  $\mathbf{u}$  为瞬时速度矢量,  $\mathbf{u} = (u, v, w)$ ;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的瞬时速度分量;  $p$  为压强;  $\mu$  为动力黏度;  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的单位体积力。

### 2.2 紊流模型

紊流数值模拟的方法主要分为直接数值模拟(DNS)、雷诺时均法(RANS)和大涡模拟(LES)。

#### 2.2.1 直接数值模拟

从式(2.1)和式(2.2)组成的方程组上容易看出,未知参数含有 4 个,分别为  $u$ 、 $v$ 、

$w$  和  $p$ , 方程组是封闭的。理论上, 无需对紊流流动做任何简化或近似, 直接求解方程组, 即可得到紊动尺度所有频谱, 这正是 DNS 法的求解思路和方法。但要真实地模拟出紊流脉动特性, 由于紊流脉动从积分尺度到最小耗散尺度所涵盖的尺度范围很大, DNS 对计算机内存空间及计算速度的要求非常高, 目前还未实现于真正意义上的工程计算中, 只有借助超级计算机的计算功能才能从事这一类研究<sup>[33-36]</sup>。随着计算机技术的发展, 尤其是并行计算技术的飞速发展, 相信在不久的将来, 这种方法付诸于实际工程的计算将成为可能。

### 2.2.2 雷诺时均法

RANS 是将瞬时紊流运动视为时间平均流动和瞬时脉动流动的叠加<sup>[32]</sup>, 若将方程组中任一变量以通量  $\phi$  表示, 则可表示为

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.4)$$

其中,  $\bar{\phi}$  为时均值,  $\phi'$  为瞬时脉动值, 且

$$\bar{\phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \phi(t) dt \quad (2.5)$$

此外, 定义:

$$\bar{\phi}' = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \phi'(t) dt \equiv 0 \quad (2.6)$$

于是可将  $u = \bar{u} + u'$ ,  $u = \bar{u} + u'$ ,  $v = \bar{v} + v'$ ,  $w = \bar{w} + w'$ ,  $p = \bar{p} + p'$ ,  $f_x = \bar{f}_x + f'_x$ ,  $f_y = \bar{f}_y + f'_y$  以及  $f_z = \bar{f}_z + f'_z$  分别替代式(2.1)和式(2.2)中的  $u$ 、 $u$ 、 $v$ 、 $w$  和  $p$ 。

首先考察式(2.1), 根据式(2.5)和式(2.6)可得,  $\nabla \cdot \bar{u} = \nabla \cdot u$ , 于是时均流的连续性方程可表达为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2.7)$$

将同样的方法运用于式(2.2a)( $x$  方向动量方程), 则该方程的各项时均表达式可转化为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} &= \frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t}, \quad \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \overline{u' u'}), \\ -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x}, \quad \nabla \cdot \mu \nabla \bar{u} = \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{u}) \end{aligned}$$

由此, 可得出  $x$  方向的时均动量方程:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \overline{u' u'}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{u}) + \bar{s}_x \quad (2.8a)$$

同理, 可得出  $y$ 、 $z$  方向的时均动量方程:

$$\frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \overline{u' v'}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{v}) + \bar{s}_y \quad (2.8b)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{w})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{w}) + \nabla \cdot (\rho \overline{u' w'}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{w}) + \bar{s}_z \quad (2.8c)$$

其中,

$$\bar{s}_x = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) + \bar{f}_x \quad (2.9a)$$



$$\overline{s_y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial \overline{w}}{\partial y} \right) + \overline{f_y} \quad (2.9b)$$

$$\overline{s_z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \overline{v}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial \overline{w}}{\partial z} \right) + \overline{f_z} \quad (2.9c)$$

时均动量方程与瞬时动量控制方程对比, 容易发现, 由于时均处理产生了一个新项  $\nabla \cdot (\rho \overline{\mathbf{u} \mathbf{u}'})$ , 该项是由于流速的脉动而引起的脉动流速和形成的动量对流输移所产生的。为了更好地表示这些项是作用于时均流速上的附加紊动应力项, 习惯上将它们移至等号右边。同时, 为方便起见, 将时均值的上划线“—”去掉(脉动值除外), 于是, 式(2.7)和式(2.8)可重写为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + \left[ -\frac{\partial(\rho \overline{u' u'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{u' v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{u' w'})}{\partial z} \right] + s_x \quad (2.11a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + \left[ -\frac{\partial(\rho \overline{u' v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v' v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{v' w'})}{\partial z} \right] + s_y \quad (2.11b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{w}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + \left[ -\frac{\partial(\rho \overline{u' w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v' w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{w' w'})}{\partial z} \right] + s_z \quad (2.11c)$$

式(2.10)便是缩黏性流时均形式的连续性方程, 式(2.11)便是缩黏性流 Reynolds 时均 Navier-Stokes 方程, 简称 RANS 方程。

为便于后文叙述和分析, 将式(2.10)和式(2.11)改写成张量形式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) + s_i \quad (2.13)$$

在时间平均过程中给 RANS 引入各种不同脉动量的未知相关量, 即雷诺应力项  $-\rho \overline{u_i' u_j'}$  [32,37], 从而使得 RANS 方程不封闭, 要使 RANS 方程封闭, 就必须借助紊流数学模型。发展至今, 已形成黏多种紊流数学模型。依据对雷诺应力项处理方式或作出的假设不同, 主要有黏涡模型和 Reynolds 应力模型。从使方程封闭所增加的偏微分方程数目分, 黏涡模型包含有零方程模型、单方程模型、双方程模型和多方程模型。Reynolds 应力模型主要包括 Reynolds 应力方程模型(RSM)和代数应力方程模型(ASM) [38]。

将雷诺应力与平均变形率联系起来, 最早是由 Boussinesq [39] 于 1877 提出的。参照剪切应力与变形率的关系式, 雷诺应力可采取类似形式表达:

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.14)$$

其中,  $\mu_t$  称为紊动黏度或涡黏系数 [32]。

基于延伸的 Boussinesq 关系, 可建立雷诺应力与时均流速梯度的表达式 [40,41]:

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (2.15)$$



式中,  $k$  为紊动能,  $k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i}$ ;  $\delta_{ij}$  为克罗内克(Kronecker)符号, 当  $i = j$  时,  $\delta_{ij} = 1$ , 当  $i \neq j$  时,  $\delta_{ij} = 0$ 。

由式(2.15)可见, 要求雷诺应力, 关键在于如何得到紊动黏度  $\mu_t$ 。根据所建立的关于紊动黏度  $\mu_t$  的微分方程数目, 分为零方程模型、单方程模型、双方程模型和多方程模型。目前,  $k-\epsilon$  双方程模型在水利工程中应用最为广泛。 $k-\epsilon$  双方程模型包括标准  $k-\epsilon$  模型、RNG  $k-\epsilon$  模型以及 Realizable  $k-\epsilon$  模型。标准  $k-\epsilon$  模型是 Launder 和 Spalding 于 1972 提出的<sup>[42]</sup>。标准  $k-\epsilon$  双方程紊流模型考虑了紊动速度比尺以及长度比尺的输运, 对大多数的水流问题, 均可获得较为准确的模拟结果, 且具有稳定、经济、简单等优点, 因此, 在实际工程中应用较为广泛<sup>[43-47]</sup>。然而, 在该模型中, 假设了紊动黏度  $\mu_t$  为各向同性的标量, 因而对于存在回流、大曲率和强旋度的流动模拟, 会产生一定的偏差<sup>[38]</sup>。RNG  $k-\epsilon$  模型和 Realizable  $k-\epsilon$  模型是为克服标准  $k-\epsilon$  模型的不足而提出的改进方案。与标准  $k-\epsilon$  模型相比, RNG  $k-\epsilon$  模型是对紊动黏度的修正, 考虑了平均流动中的旋转效应<sup>[48]</sup>。此外,  $\epsilon$  方程中增加了可反映主流时均应变率的项, 即考虑了高应变率或大曲率过流面等因素的影响, 从而提高了该模型在处理旋流和大曲率情况下流动的模拟精度<sup>[49]</sup>。为使流动符合紊流的物理定律, 在紊动黏度的计算中系数  $C_\mu$  不应当是常数, 而应当与应变率联系起来, 从而提出了 Realizable  $k-\epsilon$  模型<sup>[50]</sup>。该模型对于复杂剪切流动(如同向流动条件下的平面射流和圆射流)、包含有射流和混合流的自由射流、腔道流动以及边界层流动等方面的模拟取得了很好的效果<sup>[51]</sup>。由上述分析比较可知, RNG  $k-\epsilon$  模型可以考虑分离流动和漩涡效应, 同时对近壁区流动的模拟具有较高精度。船闸在输水过程中存在旋流、回流及分离流等水流现象, 因此结合船闸水动力学研究的实际需要, 本书采用 RNG  $k-\epsilon$  模型进行船闸灌水过程的复杂流场模拟, 以下将予以重点介绍。

RNG  $k-\epsilon$  模型是由 Yakhot 和 Orzag 提出的<sup>[52]</sup>, 该模型采用了重整化群组理论的统计技术<sup>[53]</sup>, 所得出的 RNG  $k-\epsilon$  模型与标准  $k-\epsilon$  模型较为相似, 只是在  $\epsilon$  方程中出现了附加生成项  $R_\epsilon$ 。

紊动动能  $k$  输运方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (2.16)$$

紊动动能耗散  $\epsilon$  输运方程:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\epsilon} \epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \quad (2.17)$$

式中,  $\mu_{\text{eff}}$  为有效黏性系数;  $\alpha_k$  和  $\alpha_\epsilon$  为有效普朗特数。

RNG  $k-\epsilon$  模型通过对紊动黏度的修正来考虑平均流动中的旋转效应, 其修正形式为

$$\mu_t = \mu_{t0} f \left( \alpha_s, \Omega, \frac{k}{\epsilon} \right) \quad (2.18)$$

式中,  $\mu_{t0}$  是不考虑有旋计算出来的紊流黏性系数;  $\Omega$  是特征旋流数;  $\alpha_s$  是旋流常数, 不同值表示有旋流动的强度不同。流动可以是强旋或者中等旋度的。针对中等旋度的流动问题,  $\alpha_s$  取 0.05; 对于强旋流动,  $\alpha_s$  可以选择较大的值。