

水利水电工程

水流精细模拟理论与应用

Theories and Applications of Flow Refined Simulation
for Hydraulic and Hydropower Engineering

戴会超 槐文信 吴玉林 许唯临 等 著



科学出版社
www.sciencep.com

水利水电工程水流精细模拟 理论与应用

Theories and Applications of Flow Refined
Simulation for Hydraulic and
Hydropower Engineering

戴会超 槐文信 等 著
吴玉林 许唯临



科学出版社

北 京

内 容 简 介

水利水电工程中涉及大量的水力学问题,主要包括水工水力学、河道水力学、废水排放工程水力学、水电站水力学、水力学反问题等。本书以三峡、溪洛渡、向家坝、二滩和小湾等大型水电工程为依托,解决实际工程中水流的精细模拟问题,并着力提高工程水力学反问题理论与成果的工程实用性。研究成果包括:水工水力学紊流数值模拟方法研究、溢洪道及消能工水流的精细数值模拟、水垫塘及河道水流的精细模拟、高紊动气液两相流的数值模拟、污水排放工程中近区污染及水流的精细模拟、电站水轮机水流的精细模拟、工程水力学的反问题研究等。该项研究成果内容丰富,在理论和方法的诸多方面有多项创新。

本书可作为水利水电工程、港口海岸及近海工程、环境工程、流体机械工程等专业的研究生教材,也可供相关领域科研人员、设计人员、工程管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水利水电工程水流精细模拟理论与应用/戴会超等著. —北京:科学出版社, 2006

ISBN 7-03-016796-1

I. 水… II. 戴… III. ①水利工程-水流模拟-研究 ②水力发电工程-水流模拟-研究 IV. TV135

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 004142 号

责任编辑:罗 吉 李久进/责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 4 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006 年 4 月第一次印刷 印张:49 1/4

印数:1—1500 字数:1144 000

定价:160.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序

远在几千年前，古人对水流运动即开始有了朴素的认识。从古埃及灌溉渠系到我国都江堰水利工程的修建，透射出古人兴水利、除水害艰难而辉煌的历程。18 世纪以后，随着经典力学的发展，对水流运动的研究开始形成自己的理论体系。20 世纪初，随着现代工业技术的进步，水流实验技术迅速发展，为水流运动理论的工程应用开辟了广阔的天地。进入 20 世纪下半叶以后，计算机技术的不断进步带动了水流精细模拟技术的迅速发展。

水流精细模拟研究的主要任务是解决水流的数值计算方法问题。通过数十年的研究，水流精细模拟在理论模型、数值方法、前后处理等方面均已发展到相当高的水平。目前在水流模拟中占主导地位的数值计算方法是紊流数值模拟，包括以紊流模式理论为基础的各种紊流数学模型，以及紊流的大涡模拟和直接模拟等所谓的紊流高级模拟技术，此外也包括其他各种水力学数值计算方法。

然而，水利水电工程中的水流现象十分复杂，这使得科研和设计人员长期依赖物理模型试验来解决工程中遇到的水流运动问题。虽然物理模型试验有其自身的优势，并且也仍将继续发挥其重要的作用，但是数值模拟技术以其高效、便捷和成果全面等优点正在日益为人们所重视。

近几十年来，我国修建了数万座水库、大坝和水电站。特别是目前我国一大批已建、在建和设计中的大型水利水电工程已经在许多指标上位居世界前列，如世界最大水电站的长江三峡工程、世界最高双曲拱坝的小湾水电站以及世界最高泄洪功率的溪洛渡水电站等，都表明了我国的设计水平、施工技术及解决复杂技术问题的能力已跻身于世界先进行列。这些工程以及其他大量的水利水电工程的设计和建极极大地促进了水流精细模拟技术在水利水电工程中的应用，越来越多的水利水电工程复杂水流现象不断得到成功的数值模拟。与此同时，水流运动反问题研究也在逐渐走向成熟。这些形成了我国在该领域的研究特色。

水利水电工程中涉及的水流现象几乎都是紊流，为了确定水工建筑物的合理布置、掌握坝下游的流态、分析河床的冲刷、研究坝下水流的消能防冲措施，需对紊流进行专门研究。以往水工建筑物设计基本上以模型试验为依据，不仅费时耗物，而且受比尺效应的影响，不能完全反映真实的紊流流动情况。相比之下，数值模拟具有花费少、适应能力强、能提供详细的流场资料、便于方案比较等优点。人们愈来愈重视运用数值模拟手段预测各种复杂的水流现象及流场的内部结构，国际上一些享有盛名的研究所也由过去的以模型试验为主要研究手段转化为以数值模拟为主要研究手段。该书作者结合重大工程课题和多项国家自然科学基金课题，建立了水利水电工程水流精细模拟大型的数值实验室软件包，具有模拟水利水电工程复杂水流的能力。数值计算结果通过动态显示技术以形象的图形输出，从而可以人机对话的方式灵活地修改模型或原型的形状和参数，方便地进行系列数值试验或不同的方案比较，为方案选择和设计提供足够精细和准确的

数据，有助于数学模型逐步地或部分地取代费时耗物的物理模型试验。作者已在国内外核心刊物上发表了 200 多篇高质量的学术论文，形成了一定的特色，研究成果已应用于三峡、溪洛渡、向家坝、二滩和小湾等大型水电工程建设和运行，产生了巨大的经济效益和社会效益。

该书是作者对水利水电工程中水力学问题的数值模拟技术长期研究的成果结晶，也是对近年来我国水利水电领域水流数值模拟和反问题研究成果的一个集成。全书内容涵盖了水工水力学、河道水力学、废水排放工程水力学、电站水力学等水流问题的数值模拟理论、方法和应用，具有理论与工程应用相结合、普遍性与特殊性相结合的特点。相信该书的出版对于促进我国水利水电工程水流精细模拟和水力学反问题研究水平的进一步提高，以及促进我国水利水电工程科研和设计手段的丰富与发展将发挥重要的作用。

中国长江三峡工程开发总公司总工程师

中国工程院院士



2005 年 4 月于三峡工地

前 言

水利水电工程中涉及大量的水力学问题,包括水工水力学、河道水力学、废水排放工程水力学、水电站水力学等。目前常用的方法为物理模型试验及数值模拟方法。长期以来,复杂流场的研究均以物理模型试验为主要手段。物理模型试验不仅费时耗物,而且受尺度效应的影响,不能全面地反映真实的流动特性。相比之下,数值模拟具有花费少、适应能力强、提供流场资料详细、速度快、便于进行多方案比较优选等优点,因而愈来愈受到人们的重视。本书作者对水利水电工程中水力学问题的数值模拟技术进行了长期的研究,旨在提高紊流精细模拟的工程实用性,针对我国大型水利水电工程联合攻关,以求有效地解决水利工程中的实际紊流模拟问题。

水工水力学中存在着大量复杂的紊流流动现象。国外开展紊流数值模拟研究较我国早,但国外的紊流数值模拟研究主要在高坝水力学以外的领域。高坝水力学问题的数值模拟有其自身的特点,因此,解决我国水电工程中的紊流数值模拟问题主要靠我国学者自己来完成。水工水力学中高坝水垫塘和高水头泄洪洞等泄洪安全问题迄今仍是坝工研究中的难题之一。

随着经济的快速发展,废水排放工程水力学问题逐渐成为国内外的研究热点。目前国内外的研究多集中于纯射流的研究,即不考虑污染物对水流的作用。本研究考虑了因浓度差异引起的浮力作用对水流的影响,成功地模拟了浮力作用下各种排放形式的近区水流和稀释特性,对影响排放效果的多种因素(如排放口形状、排放角度、射流比、浓度差等)进行了综合系统地研究,这在同类的研究中是很少的。另外,研究还分析了流场的紊动结构,对紊流模型的验证和改进做出了贡献。

本书在水电站水流精细模拟方面,对三峡水轮机进行了三维定常或非定常紊流精细模拟,计算域为水轮机全流道,一次完成计算;在三维非定常精细模拟中采用了真实时间法;针对水轮机中空化流动的模拟,提出高浓度固-液两相紊流的动理学模型和两相空化流双流体模型。对水轮机的全流道进行了三维紊流数值模拟,模拟方法精细,研究手段综合,对水轮机中多相流和空化流紊流模型有较深入研究,模拟仿真结果全面等,与国内外同类研究成果相比,有创新之处。三峡水电站在单机容量和总装机容量上均居世界之首,因此本模拟技术居领先水平。

长期以来,水利水电工程领域提出了不同类型的反问题。然而,从总体上看,反问题理论现有成果侧重于解决微分方程反问题提法的正确性,解决非适定问题的计算稳定性和收敛性,这些成果与实际的工程应用还有相当的距离。因此提高反问题理论的工程实用性成为各工程技术领域亟待解决的问题,同时也是具有极大理论意义和技术难度的研究课题。本书着力将数值离散技术应用于求解实际的工程水力学反问题中,取得了一系列有意义的成果。

作者们经过十几年的研究,改进并发展了水利水电工程紊流数值模拟中适合多类流动问题的紊流模型及模拟方法,包括三维复杂边界的数学模型、水气两相流的数学模型

计及浮力效应的紊流模型、大涡模拟方法、自由面模拟方法等；建立了高浓度固-液两相紊流的动理学模型和两相空化流双流体模型及相应的处理气泡流的数值计算方法；提出了通度系数的概念和数值处理方法，这些成果已直接应用于三峡、溪洛渡、向家坝、二滩和小湾等大型水电工程的建设中，产生了显著的经济和社会效益。

本书共分为七篇。第一篇为水工水力学精细模拟方法研究；第二篇为泄洪及消能工的精细模拟；第三篇为水垫塘及河道中水流的精细模拟；第四篇为高紊动气液两相流的数值模拟；第五篇为污水排放工程中近区污染及水流的精细模拟；第六篇为水电站混流式水轮机水流的精细模拟；第七篇为工程水力学的反问题研究。

参加本书编写的人员有戴会超、槐文信、吴玉林、许唯临、高季章、王玲玲、魏文礼、王晓松、夏庆福、刘树红、张晓东、杨中华、王伟、孙双科、吴伟章、戴江等。陆佑楣院士、张勇传院士、文伏波院士、郑守仁院士、张超然院士、胡四一教授、王光谦教授、郭生练教授、张瑞凯教授、周创兵教授、谈广鸣教授、曹叔尤教授都提出了很好的建议，在此一并致谢。由于本书涉及内容多、范围宽，加之时间仓促，不妥之处在所难免，敬请广大读者提出宝贵意见和建议。

戴会超

2005年4月

目 录

序

前言

绪论	1
第一节 研究问题的必要性	1
第二节 与当前国内外同类研究、同类技术的综合比较	1
第三节 研究成果的主要内容	2
第四节 研究成果的特色	11
第五节 研究成果的创新点	11
参考文献	12

第一篇 水工水力学精细模拟方法研究

第一章 引言	17
第一节 现代水力学	17
第二节 水力学数学模型的发展概况	19
第三节 研究方法的主要成果	20
参考文献	21
第二章 紊流模型理论	23
第一节 紊流模型理论概述	23
第二节 雷诺时均方程法	23
第三节 紊流直接数值模拟	35
第四节 紊流的大涡模拟	35
第五节 紊流分形理论研究	40
第六节 小结	45
参考文献	46
第三章 水工水力学紊流数值模拟关键性技术研究	47
第一节 数值离散方法	47
第二节 自由表面的追踪	49
第三节 不规则边界的处理	51
第四节 科学计算可视化与动画制作	53
参考文献	64
第四章 直角坐标系二、三维带自由表面强紊动水流数值模拟	66
第一节 二维水流运动的控制方程	66
第二节 二维数值离散格式	67

第三节	二维数值稳定条件	74
第四节	二维计算程式及框图	74
第五节	三维水流运动控制方程	76
第六节	三维数值离散格式	77
第七节	自由表面的处理及数值稳定性条件	80
第八节	算例	80
参考文献		93
第五章	曲线坐标系垂向二维带自由表面强紊动水流数值模拟	95
第一节	正交曲线网格生成	95
第二节	正交曲线坐标系下水流控制方程	97
第三节	数值离散格式	99
第四节	自由表面的处理	102
第五节	计算步骤	102
第六节	算例	102
参考文献		106
第六章	曲线坐标系三维带自由表面紊流的数值模拟	107
第一节	引言	107
第二节	控制方程	107
第三节	通用微分方程的离散	109
第四节	离散方程的求解	111
第五节	计算中若干问题的处理	113
第六节	算例	114
参考文献		121
第七章	用通度系数法处理非规则边界及其在紊流模型中应用	122
第一节	引言	122
第二节	考虑通度系数后水流的控制方程	122
第三节	考虑通度系数后控制方程离散格式	124
第四节	算例	127
参考文献		132
第八章	结论	133

第二篇 泄洪及消能工的精细模拟

第九章	引言	137
第一节	泄洪与消能技术发展概述	137
第二节	数值模拟在高速水流中的应用	139
参考文献		139
第十章	竖井旋流式泄洪洞数值模拟	141
第一节	概述	141

第二节	数值模拟	145
第三节	不同泄量下竖井边壁压强与空化数变化规律的研究	170
第四节	小结	177
第五节	讨论	178
参考文献		178
第十一章	龙抬头式泄洪洞数值模拟	181
第一节	概述	181
第二节	工程简介	182
第三节	模型设计	182
第四节	结果分析	187
第五节	竣工体型数值模拟	199
第六节	讨论	201
参考文献		202
第十二章	轴对称洞塞消能的数值模拟	203
第一节	洞塞消能工的简介	203
第二节	应用程序 FAST-2D 的简介	205
第三节	单级轴对称洞塞的数值计算结果	207
参考文献		219
第十三章	多级洞塞消能工的布置优化	220
第一节	不同面积比下二级洞塞消能的数值计算结果	220
第二节	布置优化	230
参考文献		234
第十四章	三维非轴对称洞塞的消能计算	235
第一节	程序介绍	235
第二节	三维单级洞塞消能的计算与分析	236
第三节	多级非轴对称洞塞消能的计算与分析	239
参考文献		244
第十五章	结论与展望	245
第一节	总结	245
第二节	进一步的工作	247

第三篇 水垫塘及河道中水流的精细模拟

第十六章	引言	251
参考文献		252
第十七章	挑流冲坑数值模拟研究	253
第一节	研究的现状	253
第二节	三维紊流控制方程	254
第三节	控制方程的离散及数值方法	256

第四节	计算域的确定及网格剖分	258
第五节	边界条件及初始条件	259
第六节	数值模拟结果的实验验证	261
第七节	结果分析	263
第八节	结语	270
参考文献		270
第十八章	水垫塘紊流精细模拟	271
第一节	水垫塘复杂流场紊流数学模型开发研究	271
第二节	反拱型水垫塘三维紊流数值模拟与分析	271
第三节	水垫塘水气两相流的数值模拟	275
第四节	向家坝水电站消力池三维流场数值模拟	280
第五节	小湾水电站水垫塘二维流场数值模拟	286
参考文献		293
第十九章	复杂河道水流精细模拟	294
第一节	复式顺直河道漫滩水流计算方法	294
第二节	复式游荡型河道漫滩水流上层流动的基本方程	298
第三节	金马河复式河道漫滩水流计算	303
参考文献		305
第二十章	渠首枢纽河段水流流场计算	306
第一节	研究目的	306
第二节	计算域的确定	306
第三节	数值计算方法	306
第四节	计算结果分析	310
参考文献		313
第二十一章	溢流堰过流的数值模拟	314
第一节	溢流堰过流的数值模拟	314
第二节	控制方程的离散及数值方法	314
第三节	算例	314
参考文献		315
第二十二章	淹没丁坝的大涡模拟	316
第一节	三维水流运动控制方程	316
第二节	大涡模拟(LES)	317
第三节	预测校正算法	318
第四节	算例	319
参考文献		319
第二十三章	尾水河道清淤数值模拟研究	320
第一节	数值计算的目的	320
第二节	泥沙数学模型的基本方程	321

第三节	计算域的确定及边界条件	322
第四节	计算情况	323
第五节	结果分析	323
第六节	结语	328
参考文献		329
第二十四章	总结和展望	330

第四篇 高紊动气液两相流的数值模拟

第二十五章	引言	335
第一节	问题的提出	335
第二节	双流体理论及研究途径	335
第三节	数值模拟方法	336
参考文献		337
第二十六章	气液两相流的基本控制方程	338
第一节	基本假定	338
第二节	双流体理论模型及其基本控制方程	341
第三节	气液两相之间的相互作用力	346
参考文献		350
第二十七章	气液两相紊流的紊动特点及其控制方程	351
第一节	紊流中颗粒——流体的互相作用极其度量准则	351
第二节	气液两相紊流的控制方程	352
参考文献		355
第二十八章	高紊动气液两相流的数值模拟	356
第一节	基本解法	357
第二节	不同流型的处理	368
第三节	初边值条件、稳定性条件和计算步骤	369
第四节	数值试验	370
第五节	掺气减蚀的数值计算	372
参考文献		378
第二十九章	单体型挑坎后的掺气水流数值模拟	379
第一节	模型设计	379
第二节	二维计算	382
第三节	三维计算	392
第四节	讨论	399
参考文献		400
第三十章	结论	401

第五篇 污水排放工程中近区污染及水流的精细模拟

第三十一章 引言	405
参考文献	407
第三十二章 污水排放的数值模拟分析方法和紊流模型	408
第一节 研究方法概述	408
第二节 紊流的计算模型	409
第三节 数值计算方法	413
参考文献	425
第三十三章 射流和卷流的数值模拟	427
第一节 横流中单孔射流	427
第二节 横流中多孔射流	436
第三节 同流中的单孔表面射流	441
参考文献	446
第三十四章 流动环境中正浮力排放的数值模拟	447
第一节 模型和定解条件	447
第二节 同流中单孔淹没浮力射流的近区特性	451
参考文献	456
第三十五章 负浮力排放的数值模拟	458
第一节 静止环境中负浮力排放	458
第二节 流动环境中负浮力排放	482
参考文献	501
第三十六章 结论	504

第六篇 水电站混流式水轮机水流的精细模拟

第三十七章 引言	509
第一节 概述	509
第二节 水轮机数值模拟分析方法和紊流模型	510
第三节 水轮机流动数值模拟的进展	515
第四节 水轮机三维紊流模型和计算研究的发展	516
参考文献	517
第三十八章 混流式水轮机的三维定常紊流计算和性能预估	520
第一节 绪论	520
第二节 水轮机内部流动的计算及分析方法	521
第三节 混流式模型水轮机三维定常紊流计算结果及分析	541
第四节 混流式模型水轮机的数值计算与模型试验对比	554
第五节 混流式原型水轮机三维定常紊流计算	556
第六节 不同叶型水轮机的 CFD 计算结果比较	568

第七节 结论	580
参考文献	581
第三十九章 大型混流式水轮机的非定常紊流数值模拟和压力脉动预测	582
第一节 绪论	582
第二节 混流式水轮机内的涡旋	585
第三节 非定常流动基本方程和数值计算方法	588
第四节 混流式模型水轮机三维非定常紊流计算	602
第五节 原型水轮机的非定常紊流计算结果及分析	613
第六节 减小尾水管脉动的措施研究	633
第七节 结论	641
参考文献	642
第四十章 混流式水轮机空化流动计算	644
第一节 引论——水轮机中空化现象	644
第二节 三维混合流体完整空化紊流模型	653
第三节 数值求解方法	658
第四节 混流式水轮机三维空化紊流数值模拟	665
第五节 结论	677
参考文献	678
第四十一章 大型混流式水轮机水力设计——流体力学反问题基础	680
第一节 绪论	680
第二节 大型混流式水轮机的参数选择	681
第三节 水轮机水力设计	687
第四节 转轮叶片设计——X形叶片与传统叶片	694
第五节 三峡右岸水轮机水力设计	701
第六节 结论	715
参考文献	716
第四十二章 结论	717

第七篇 工程水力学的反问题研究

第四十三章 引言	723
第一节 反问题概述	723
第二节 反问题研究的发展简史	725
第三节 工程水力学反问题的分类	726
参考文献	732
第四十四章 工程水力学反问题的求解方法	733
第一节 解析法	733
第二节 脉冲谱法	735
第三节 离散-优化法	737

第四节	摄动法	738
第五节	控制论解法	739
参考文献		741
第四十五章	工程水力学反问题求解实例	742
第一节	用脉冲谱法确定承压含水层非均质导水系数	742
第二节	地下水污染问题分布参数系统控制论求解方法	749
第三节	脉冲谱-优化法求解源项控制反问题	757
第四节	离散-优化法求解 Poisson 方程参数控制反问题	763
参考文献		767
第四十六章	结论	768
附录	积分方程所描述的分布参数系统的最大值原理	769

绪 论

第一节 研究问题的必要性

泄洪消能问题、废水排放问题和电站水轮机流道设计等问题,都是水利水电工程十分重要的研究内容。以往对这类问题的研究主要依赖于实体模型试验。随着紊流数值模拟技术的发展,进行上述问题的紊流数值模拟研究成为可能,它为水利水电工程相关问题的研究开辟了一条新途径。废水排放工程中的水力学问题一直是国内外研究的热点,随着工农业生产的发展,大量生活污水和工业废水排入水体,给环境带来污染,尤其是近年来火电、核电等的开发利用,大量的温水排入江河、湖泊。有效且经济地处置热污水就要求合理选择扩散器的形式和尺寸,以达到保护环境的目的。要深入解决这一问题,物理模型和数学模型的结合是十分必要的,两者互补才能更好地获得足够的信息用于多方案的选择。由于数值模拟的方便性和经济性,工程水力学流场的精细模拟成为主要的研究手段。水利水电工程泄洪研究直接关系到工程的安全,而河道中洪水演进的研究则关系到自然灾害的防治,后者同样需要进行深入的水流精细模拟研究。

在水电站水力学研究方面,机组运行中常出现严重的振动和叶片断裂现象。水力稳定性成为大型混流式水轮机设计的又一标准。流道内的压力脉动是影响水轮机稳定的主要因素之一。然而,因水轮机结构复杂,对模型进行全流道压力脉动测量,工作量大、成本高,所以应在设计中预测水轮机中的压力脉动,以得到稳定性较好的水力模型;同时,在压力脉动问题上,模型与原型之间还没有完整的相似律,模型的测量不能完全作为原型水轮机稳定性的判断依据。因此开展水轮机内的三维非定常紊流计算、三维空化紊流和多相紊流计算等成为重要的研究课题。

对水轮机进行三维非定常紊流数值模拟,以预测水轮机的压力脉动是流动模拟的前沿课题。同时,进行水轮机三维定常紊流数值模拟,以预测水轮机的性能,完成三峡水轮机水流的精细模拟,为进一步完成大型电站水轮机的水力设计将起到很大的推进作用。

水利水电工程领域提出了不同类型的反问题。然而,从总体上看,反问题理论现有成果侧重于解决微分方程反问题提法的正确性和非适定问题的计算稳定性问题。而这些成果与实际的工程应用还有相当的距离。因此,提高反问题理论的工程实用性,成为各工程技术领域亟待解决的问题,同时也是具有极大理论意义和技术难度的研究课题。

第二节 与当前国内外同类研究、同类技术的综合比较

一、水工水力学研究方面^[1~8]

虽然国外开展紊流数值模拟研究较我国为早,但是国外的紊流数值模拟研究主要在

高坝水力学以外的领域。高坝水力学问题的数值模拟有其自身的特点，因此，解决我国水电工程中的紊流数值模拟问题主要靠我国学者自己来完成。如对水垫塘紊流数值模拟研究的成果查新表明：“国内外有关水垫塘的研究主要针对物理模型和经验方法”，“水垫塘的数值模拟研究成果较少，而水垫塘的三维数值模拟研究此前在国内外还未见文献报道”。

二、废水排放工程水力学方面^[9~16]

目前国内外的研究多集中于纯射流的研究，即不考虑污染物对水流的作用。本研究考虑了由浓度差异引起的浮力作用对水流的影响，成功地模拟了浮力作用下各种排放形式的近区水流和稀释特性。对影响排放效果的多种因素，如排放口形状、排放角度、射流比、浓度差等进行综合系统研究，在同类的研究中是很少的。另外，本研究还分析了流场的紊流结构，对紊流模型的验证和改进做出了贡献。

三、电站水力学方面^[17, 18]

对三峡水轮机进行三维定常及非定常湍流精细模拟，计算域为水轮机全流道，一次完成计算。在三维非定常精细模拟中采用了真实时间法。针对水轮机中空化流动的模拟，提出高浓度固-液两相湍流的动力学模型和两相空化流双流体模型，对水轮机中多相流和空化流进行模拟仿真，模拟方法精细。与国内外同类研究成果相比，有创新之处。三峡水电站单机容量和总装机容量均居世界之首，本项研究成果在三峡电站流道设计中起到了决策支持作用。

四、反问题研究方面^[19~21]

国内外关于工程水力学反问题的文献少有报道。本项成果构建了工程水力学反问题的框架，将传统的反演参数的反问题推广到五大类。该分类构架，不仅适用于工程水力学，而且适用于其他学科和工程领域。传统的反问题的求解方法为“试错法”。本项研究提出了一系列新的求解方法，并首次将现代控制论的理论与方法引入反问题的研究中。

第三节 研究成果的主要内容

本研究对紊流模型理论进行了详细的分析、比较和评述，提出水利水电工程紊流数值模拟中适合多类流动问题的紊流模型及模拟方法。包括三元复杂边界数学模型、水气两相流数学模型、计及浮力效应的紊流模型、大涡模拟方法、自由面模拟方法等。模拟获得了水垫塘复杂紊流场水力特性和消能机理及孔板泄洪洞、洞塞泄洪洞、竖井旋流式泄洪洞和龙抬头式泄洪洞的流场细观特征，形成了较为完整的泄洪洞消能体系理论。建立了一套复式游荡型河道漫滩水流计算方法及洪水演进数值计算模型。获得了静止环境