



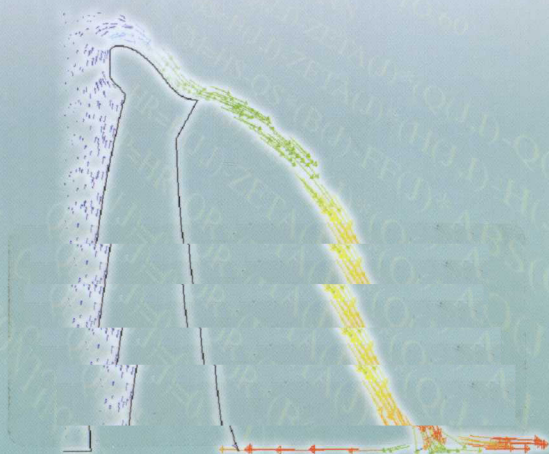
中国水电顾问集团西北勘测设计研究院
HYDROCHINA XIBEI ENGINEERING CORPORATION

水电技术专著系列

工程水力学

数值仿真与可视化

巨江 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



中国水电顾问集团西北勘测设计研究院
HYDROCHINA XIBEI ENGINEERING CORPORATION

水电技术专著系列

工程水力学

数值仿真与可视化

巨江 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书着重介绍了水利水电工程建设中遇到的水力学问题,内容涉及河道水力学、水电站水力过渡过程、水工水力学三部分,详细论述了水流运动的基本方程以及与之对应的初始边界条件、数值分析方法、程序结构设计、实际工程应用举例及其可视化等。

本书理论严谨、叙述简捷、图文并茂、实用性强,可供从事工程水力学科研、设计人员使用,也可供高校相关专业师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

工程水力学数值仿真与可视化 / 巨江著. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2010. 10

(中国水电顾问集团西北勘测设计研究院水电技术专著系列)

ISBN 978-7-5084-7974-3

I. ①工… II. ①巨… III. ①水工建筑物—水力学—
计算机仿真 IV. ①TV135

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第199946号

书 名	中国水电顾问集团西北勘测设计研究院 HYDROCHINA XIBEI ENGINEERING CORPORATION 水电技术专著系列 工程水力学数值仿真与可视化
作 者	巨江 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 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京市兴怀印刷厂
规 格	145mm×210mm 32开本 6.875印张 179千字
版 次	2010年10月第1版 2010年10月第1次印刷
印 数	0001—2500册
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

工程水力学数值仿真与可视化是一门技术科学，主要研究和解决水利水电工程建设中的水力学问题。作者长期从事计算水力学和水工泥沙模型试验研究工作，承担了许多工程案例的分析计算，并结合大量的原型观测及模型试验资料，逐步完善计算细则，验证计算结果，积累了较丰富的经验。本书出版的目的是将作者多年来的经验、教训与读者交流，希望对从事工程水力学的科研、设计人员以及水力学专业的大学生、研究生的工作学习有所帮助，促进大家共同提高解决工程水力学问题的技术水平。

本书内容包括河道水力学、水电站水力过渡过程和水工水力学三部分。

第一篇介绍了明渠非恒定流运动的基本理论及其简化方程形式、差分解法、特征线解法、复式断面特性与阻力规律、天然河道恒定流水面线计算、间断水面线处理、工程应用算例等；第二篇概述了水电站水力过渡过程的起因、研究内容、控制标准及计算条件，详细介绍了控制方程、特征线解法与边界条件、大小波动及水力干扰过程、模型验证与工程算例、调压室特性等，并附有部分子程序和计算框图。第三篇为水工水力学，简述了 Fluent 软件的基本方程和泄水工程常用的初始边界条

件、几何建模与网格划分、自由水面跟踪、恒定非恒定流算法等，案例包含了水利工程中的溢洪道、泄洪闸、底孔、锥形阀、旋流泄洪洞、宽尾墩台阶溢洪道、掺气水流等。

本书撰写过程中得到陈刚教授、李国栋教授以及徐玲君博士的帮助，杨晓池工程师、刘少斌高级工程师也参与了部分研究和制图工作，在此一并感谢。

巨 江

2010年5月20日

目 录

前言

第 1 章 数值仿真绪论	1
1.1 水力学研究的传统方法	1
1.2 什么是数值仿真	5
1.3 数值仿真的意义	6

第一篇 河道水力学

第 2 章 明渠非恒定流运动基本方程	10
2.1 明渠非恒定流基本假设	10
2.2 明渠非恒定流方程积分形式	11
2.3 明渠非恒定流方程微分形式	15
2.4 附属关系	19
第 3 章 明渠非恒定流运动特征线解法	23
3.1 特征线法的物理意义	23
3.2 特征线法离散方程	24
3.3 代数方程系数的确定	28
3.4 边界条件	29
3.5 初始条件	31
3.6 模型验证	31
3.7 水电站长引水渠道水力设计算例	32
第 4 章 明渠非恒定流运动有限差分解法	35
4.1 有限差分法的基本概念	35

4.2	常用差分格式及其方程离散	38
4.3	双扫描法求解方法	46
第5章	非恒定悬移质不平衡输沙	51
5.1	非恒定不平衡输沙基本方程	51
5.2	含沙量时空分布计算方法	53
5.3	非均匀沙的不平衡输沙	55
5.4	工程应用实例	56
第6章	明渠非恒定流方程的简化	60
6.1	明渠非恒定流方程简化的意义	60
6.2	河道洪水演进	61
6.3	明渠恒定均匀流	65
6.4	明渠恒定非均匀流(天然河道水面线)及其解法	67
6.5	水库(沉沙池)溯源冲刷	71

第二篇 水电站水力过渡过程

第7章	水力过渡过程概述	78
7.1	水力过渡过程的概念	78
7.2	水力过渡过程研究目的和内容	79
7.3	水力过渡过程控制标准	80
7.4	水力过渡过程计算条件	81
7.5	几个名词定义	82
7.6	调压室尺寸与涌浪	83
7.7	调压室流态及流速分布	84
7.8	导叶启闭时间 T_s 及机组 GD^2 值选择	84
7.9	蜗壳内水压力、机组流量、转速及其过程线、 隧洞压力分布	85
7.10	调速器的稳定参数	85
7.11	小波动、水力干扰下的动态品质	86

第 8 章 水力过渡过程控制方程	87
8.1 管道瞬变流方程	87
8.2 调压室方程	88
8.3 水轮机过流量、功率与转速关系	89
8.4 调速器方程	92
8.5 恒定流方程	93
8.6 水轮机调节方式	93
第 9 章 特征线解法与边界条件	95
9.1 特征线方程的推导	95
9.2 外部边界条件	98
9.3 内部边界条件	99
9.4 管段划分原则	105
第 10 章 模型验证与工程算例	107
10.1 模型验证	107
10.2 工程算例	111
10.3 几点体会	117
第 11 章 调压室	119
11.1 调压室的功能、要求及设置条件	119
11.2 调压室的基本布置方式及类型	121
11.3 调压室水位波动的差分解法	125
11.4 调压室水位波动的稳定性	132

第三篇 水工水力学

第 12 章 Fluent 软件基本方程与初边条件	136
12.1 基本方程	136
12.2 泄水工程常用的边界条件	137
12.3 几何建模与网格划分	140
12.4 初始条件	141

12.5	恒定与非恒定流算法	141
12.6	自由水面跟踪	142
12.7	壁面粗糙度定义	143
12.8	计算步骤	144
第 13 章	工程应用举例	146
13.1	积石峡溢洪道工程	146
13.2	班多泄水闸工程	149
13.3	拉西瓦底孔工程	152
13.4	锥形阀消能工	155
13.5	水平旋流泄洪洞	157
13.6	其培拱坝表孔工程	160
第 14 章	宽尾墩+台阶坝面+消力池联合消能工	162
14.1	枢纽概况	162
14.2	几何模型建立	162
14.3	网格划分	164
14.4	计算成果	168
第 15 章	掺气水流模拟	177
15.1	掺气水流数值仿真研究内容与模型选择	177
15.2	建模与网格划分	178
15.3	欧拉模型简介	180
15.4	压力计算成果	181
15.5	掺气水流模拟	184
15.5	Fluent 软件使用经验点滴	191
附录	水力过渡过程参考子程序	194
参考文献		208

数值仿真绪论

水利水电工程建设中涉及大量的水力学问题,包括河道水力学、水电站水力学、泄水工程水力学等。长期以来,模型试验是解决工程水力学问题的重要手段,几乎每个工程的规划、设计都离不开物理模型,甚至还要多个科研单位平行试验。近年来,随着计算机的普及和计算技术的迅速发展,数值仿真作为继物理模型试验之后研究水力学问题的又一重要手段越来越受到重视。由于数值仿真使用成本低、效率高、方案筛选快、又能获得详尽的水力信息,必将在水利水电工程中得到广泛的应用。当然,物理模型仍然是不可缺少的,许多复杂的工程水力学问题只有靠物理模型才能解决,物理模型的测量数据又对数值仿真的基本假设、理论、方法以及计算成果的正确性提供了验证,两者相互渗透、相互弥补,为今后水工水力学问题研究指明了方向。

1.1 水力学研究的传统方法

从水力学研究的发展史来看,最早应用的方法应是原型观测法,即在工程现场观测、观察水流的运动特性。原型观测法对指导工程设计,和提高后来的模型试验水平起着重要的作用,它检验了模型试验成果的合理性与正确性,但要找出水流运动规律,往往需要长历时的资料积累,且要付出很大的成本代价。随着科学技术的发展和人们对水力学问题认识的加深,原型观测越来越多地被模型试验所代替,目前仅特殊的建筑物体型才需要做原型



观测，比如旋流泄洪洞或掺气水流等。

1.1.1 模型试验相似原理

室内试验技术开创于15世纪^[1]，那时的物理模型只提供演示结果，即定性地复演原型水流的运动过程，还不能给出定量结果。经过几百年的发展，实验技术在不断完善，直到1870年佛劳德进行船舶模型试验时，提出了著名的佛汝德数定律，即重力相似准则，才把试验成果提升到了定量分析的层面。1930~1940年，雷诺等人应用佛汝德数准则进行河工模型试验，物理模型才被普遍应用到解决明渠水流运动问题中去。18世纪以后，逐渐创立了描述水流运动的微分方程式，即一维河道（或管道）水流运动的圣维南方程，三维水流运动微元结构的N—S方程等，它们更加丰富和完善了模型试验的相似理论和相似准则，也成为今天数值仿真的理论基础。

模型试验相似原理包括了原型与模型的几何相似、运动相似和动力相似等内容。几何相似是指模型流动与原型流动中的固体边界相似，对应线段长度成比例，对应夹角相等；运动相似是指模型流动与原型流动在所有对应点、对应时刻的速度是相似的，也就是同名速度方向相同，大小互成一定比例，即流态相似；动力相似是指模型流动与原型流动在对应时刻的所有对应点上，作用在流体微元上的各种同性质的同名力彼此方向一致，大小成比例。

1.1.2 模型试验相似准则^[2]

物理模型初期的相似准则是由量纲分析法导出的，实际上，用基本方程分析的相似准则更系统、更完善、物理意义更明确。理论上讲，要做到模型流动与原型流体力学相似，其必要条件是模型与原型水流运动必须遵守同一方程，并保证两者的无量纲数相等。无量纲数为流动参数与几何参数的特定组合，在河道水力学中，模型水流与原型水流必须同时遵守圣维南方程：



$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{A}{b} \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g(S_f - S_0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

由此按无量纲数相等导出的河道模型相似准则为：

$$\text{重力相似} \quad \frac{\lambda_u^2}{\lambda_g \lambda_t} = 1 \quad (1.2)$$

$$\text{阻力相似} \quad \lambda_n = \lambda_l^{1/6} \quad (1.3)$$

$$\text{水流运动相似} \quad \frac{\lambda_u \lambda_t}{\lambda_l} = 1 \quad (1.4)$$

式 (1.1) ~ 式 (1.4) 中： h 为水深； u 为流速； x 为流程； t 为时间； n 为糙率系数； g 为重力加速度； S_0 为河道比降； S_f 为能坡。重力相似、阻力相似反映了模型流动与原型流动的力学相似，水流运动相似反映了模型与原型流动的流态相似，它们都是在几何相似的前提下得到的，没有几何相似，上述相似准则也打了折扣。

在水电站水力学中，管道水流运动的动量方程和连续方程为：

$$\left. \begin{aligned} g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{2d} V |V| &= 0 \\ \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial H}{\partial x} - V \sin \alpha &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

由此导出的相似准则为：

$$\text{重力相似} \quad \frac{\lambda_V^2}{\lambda_H} = 1 \quad (1.6)$$

$$\text{阻力相似} \quad \frac{\lambda_l \lambda_n}{\lambda_d^{4/3}} = 1 \quad (1.7)$$

$$\text{弹性波速相似} \quad \frac{\lambda_V}{\lambda_a} = 1 \quad (1.8)$$

$$\text{流态相似} \quad \frac{\lambda_l}{\lambda_a \lambda_t} = 1 \quad (1.9)$$



式 (1.5) ~ 式 (1.9) 中: H 为测压管水头; V 为流速; x 为流程; a 为水击波传播速度; t 为时间; d 为管径; α 为管道倾斜角; g 为重力加速度。事实上, 弹性波速相似准则是很难做到的。研究表明, 模型设计中放弃难以实现的弹性波速相似准则 [式 (1.8)], 其试验结果与原型仍然是相似的^[3]。

在泄水工程中, 过坝溢流、溢洪道、泄洪洞、消力池等泄水建筑物中的水流运动用 N-S 方程来描述, 为了便于分析, 以二维 N-S 方程 (也适应于紊流) 为例:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{1}{\rho} F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= \frac{1}{\rho} F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

由此得到的相似准则为:

$$\text{重力相似} \quad \frac{\lambda_u^2}{\lambda_g \lambda_l} = 1 \quad (1.11)$$

$$\text{黏性相似} \quad \frac{\lambda_u \lambda_l}{\lambda_\nu} = 1 \quad (1.12)$$

$$\text{压力相似} \quad \frac{\lambda_u^2}{\lambda_p} = 1 \quad (1.13)$$

$$\text{流态相似} \quad \frac{\lambda_u \lambda_l}{\lambda_l} = 1 \quad (1.14)$$

式 (1.10) ~ 式 (1.14) 中: u 、 v 代表 x 、 y 两个方向上的流体质点速度; ρ 为流体密度; p 为压强; ν 为动力黏性系数; F 为微元体体积力。

在这四个相似准则中, 式 (1.11) 表征惯性力和重力的比值, 即模型与原型佛汝德数相等; 式 (1.12) 表征惯性力和黏性力的比值, 即模型与原型雷诺数相等; 式 (1.13) 表征惯性力和



压力的比值,即模型与原型欧拉数相等;式(1.14)表征位变惯性力和时变惯性力的比值,即模型与原型线时数相等。一般情况下,模型水流和原型水流都处在充分紊流区,水流黏性力不起作用,所以黏性相似准则[式(1.12)]不必遵守。

1.2 什么是数值仿真

数值仿真就是用计算机和计算数学等相关知识,直接求解上述水流运动的微分方程,以揭示工程问题所涉及的复杂流体运动规律。在计算机没有普及以前,流体力学专家对这些方程经过大量简化假设,得到了一些线性问题的解析解,再结合实测资料的修正,才有了相关水力设计规范中的计算公式。但是,绝大多数实际流动是复杂的非线性问题,且与时间有关,无法再有解析解,大量简化也失去了流体运动的真实面目,甚至出现错误结果。随着计算机与计算技术的迅速发展,人们直接求解控制方程组的梦想变成了现实,从而催生了数值仿真。

数值仿真也称计算流体动力学 CFD (Computational Fluid Dynamic),它综合了计算数学、计算机技术、物理模型、CAD、可视化等多种学科而成为一门交叉学科。CFD 起源于 20 世纪 70 年代,在短短几十年内已经在航空航天、船舶、汽车、空调等领域得到了广泛应用,而在水利水电工程方面还有待于进一步发展。

具体到工程水力学方面,物理模型是依据上述相似准则,在实验室制作模型实体,放水观察流态,测量流量、流速、水位、压力、地形等参数,优化泄水建筑物体型。而 CFD 技术则是利用点、线、面、体空间数据,在计算机上虚拟构建三维几何图形,通过求解描述流体运动的微分方程,得到计算域内的所有物理量的时空分布规律,并用计算机图像动态显示流动场景,同样也达到了优化建筑物体型的目的。



1.3 数值仿真的意义

在水利水电工程设计中,溢洪道、泄洪洞等是最常见的泄水建筑物,为了确保其体型设计的合理性和工程运行的安全性,一般都需要水工模型试验来检验。其中率定闸门全开或局开时的泄流能力,观测堰面、边墙、底板及挑流鼻坎上的压力分布,泄槽流速分布及水深,水流空化数,掺气量以及掺气浓度沿程分布等是水工模型试验的重要内容。因为这些水流参数是设计确定泄水建筑物堰面曲线、边墙高度、底板厚度以及挑流鼻坎结构的重要依据。

目前水工模型试验是优化泄水建筑物设计的重要手段,但模型试验费工、费时,特别是当体型修改后部分观测内容需重复进行,更加大了试验周期和成本。和物理模型相比,仿真计算具有以下特点:

(1) 节省成本。当工程规模较大时,物理模型必须考虑试验成本。如河道范围较大,模型往往占地较大,且放水时间也长,试验场地和设备均难以满足;又如引水式电站的长引水渠道、或长压力引水隧洞系统,一般横断面尺寸最多为10m量级,而长却达到几百米甚至数十公里。即使使用变态模型设计,物理模型仍然规模巨大,成本太高,于是数学模型成为必然的选择。

(2) 克服测量仪器的局限性。某些模型试验观测的内容是常规仪器无法实施的,或者测量精度不满足工程要求。如脉动压力传感器测量的水击压力过程线掺杂着结构振动产生的干扰波;旋流泄洪洞、洞塞、孔板、锥形阀等消能工内部的流速压力分布、空腔直径、风速等;挑射水舌的空中形态、入水角度及对消力塘底板的冲击压力;窄缝、宽尾墩、差动鼻坎局部的流速及压力分布等,常规仪器还无法观测,甚至测量探头的使用会破坏内部水



流结构使之失真。数学模型克服了模型试验受缩尺效应、测量仪器干扰带来的缺陷,比物理模型提供了更全面、更详尽的流场信息。

(3) 预见性。数值仿真使工程人员能够全面、直观地了解物理域内的复杂流动现象,尽可能多地了解其物理本质,这对提高设计水平、改进和优化建筑物设计体型至关重要。利用仿真成果从大量的设计方案中筛选出所需要的方案,从而减少了设计的盲目性,也减少了不必要的设计返工。如在预可研设计阶段,当泄水建筑物体型稍微复杂、或者有压泄洪洞较长甚至下游为淹没出流时,综合流量系数 m 、 μ 通常选取不准。待物理模型试验后才发现设计的泄流能力误差较大,体型尺寸也不尽合理,不得不重新调整孔口大小,修改枢纽布置,造成设计过程及 CAD 出图的许多返工、窝工现象。若预科研阶段能应用 CFD 软件进行数值仿真,这些问题是完全可以避免的。

(4) 高效性。经验表明,CFD 技术的使用,大幅度缩短了设计周期,提高了设计效率和产品质量,降低了设计成本,更重要的是改变了工程师们传统的工作方式。比如,计算会很快地得到天然河道各级流量下的水面线或水位流量关系曲线,1 个月左右就能完成一项水力过渡过程仿真计算。用 Fluent 软件,确定一个溢流坝(或溢洪道、泄洪闸、消力池、掺气槽)的孔口尺寸、堰面体形,计算泄流能力、堰面压力或空化数分布(确定堰面曲线)、水面线(确定边墙和弧门铰高程)等,一般需要 1 周左右。而做一个物理模型,并观测同样的内容至少需要 40 天以上。

另外,数值仿真也是科学技术发展的必然结果。30 年前人们打夯筑坝被今天的大型机械取代了,说明施工机具发生了翻天覆地的变化;过去用绘图板、铅笔、橡皮擦绘图作设计,今天改用 CAD 软件制图,设计手段前进了一大步;过去用计算尺、算盘计算工程量,今天则采用计算机软件来计算,其运算速



度是有目共睹的。那么，在计算机技术和计算数学高速发展的今天，工程水力学就不能再局限于某些规范中的简化公式了。只有推广使用数值仿真的理念，从完整的控制方程入手，才能获得全面、准确的水力参数信息，从而把工程水力学设计水平提升到新的高度。