

三峡船闸水力学数值实验室的研制及应用

王玲玲¹, 戴会超², 王 琼³

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国长江三峡工程开发总公司, 湖北 宜昌 443133;
3. 南京师范大学数学与计算机科学学院, 江苏 南京 210042)

摘要 阐述数值实验室的组成和结构, 拓宽数值模拟的内涵, 介绍相关的计算机图形及可视化技术在水利工程界的应用现状. 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. 利用该数值实验室可以对三峡工程永久船闸输水系统任意运行工况进行实时数值试验, 并以图形、图像、表格、动画等多种可视化方式给出数值试验成果. 该成果表达形象直观, 应用方便快捷. 系统友好的界面使其能直接为工程设计和施工部门服务.

关键词 三峡工程 数值实验室 工程水力学 可视化技术

中图分类号 :U641.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2004)01-0100-04

水利工程中有大量复杂的水流现象, 它们对水工建筑物的设计、施工、运行有着举足轻重的影响. 目前, 工程水力学问题的研究多以物理模型试验为主要手段. 物理模型试验不仅费时耗物, 而且受比尺效应的影响, 不能全面地反映流体真实的流动特性. 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特点, 因而愈来愈受到人们的重视. 然而, 由于数值模拟研究结果数据量浩大, 模拟过程不如物理模型有‘可视、可信、可触摸’的直观感觉, 因此, 长期以来我国计算流体力学(CFD)发展较慢, 尚不能用于重大工程的决策. 如何充分利用计算机快速发展的计算能力和可视化技术来提高数值模拟成果的实际应用价值, 已经成为计算流体力学界亟待解决的问题.

1 计算流体力学的研究进展

计算流体力学是一门通过数值模拟流体所满足的本构关系控制方程从而达到模拟流体流动现象的学科. 由于计算技术的飞速发展, 数值模拟研究方法在地球物理、航空航天等领域已发展成为最重要的研究手段, 一些发达国家的著名水利研究机构也已由过去的以物理模型试验为主要研究手段, 逐渐转化为以数值模拟与物理模型并重或以数值模拟为主要研究手段, 如荷兰的 Delft 水力学实验室、加拿大的 Advanced Scientific Computing Ltd. 等均在数值模拟及其成果可视化方面取得了较好的成果, 他们研制的数值软件已成为可以与物理模型试验室相抗衡的‘数值试验室’, 工程设计和施工单位可以利用‘数值试验室’进行实时的数值试验, 试验成果‘立等可取’, 大幅度提高了数值模拟的应用价值.

2 数值实验室的建立

数值实验室是以复杂的数值计算理论和方法为核心, 利用先进的计算机图形处理及可视化技术设计友好的人机对话界面和成果显示界面, 形成可以对水利、地质勘探、气象观测、航空航天等工程领域中复杂的工程实际问题进行实时数值试验、对模拟结果进行动态显示、为工程决策提供支持的大型软件系统. 其最大的特点是可以对不同工况进行反复试验, 试验结果的取得是实时的, 即‘立等可取’的.

建立数值实验室不仅要研制精度高和通用性好的数值计算软件, 还应当选择良好的软件开发环境, 大量应用计算机图形处理及可视化技术, 以满足用户在实时模拟、动态显示、资料管理等多方面的要求. 可视化技术是将人们在模拟自然现象的过程中所涉及与产生的数字信息, 转换为形象直观、以图形图像形式表示、便于进行交互分析的静态和动态画面的技术. 在香港新机场、英法海底隧道的建设过程中, 应用这一技术, 在建

立施工组织管理系统和决策支持系统,指导工程施工,进行工程进度的监督、工程量的量测及辅助工程结算验收等方面,发挥了重要的作用.然而,国内计算机图形处理及可视化技术的应用只是在建筑界刚刚起步,在水利工程中该技术的应用则基本处于空白状态,所检索到的相关文献^[1~3]也仅限于理论研究或研究对象仅局限于某一小范围的水力现象,因此,研究计算机可视化技术在水利工程中的应用,特别是与性能良好的流体力学数值计算软件的结合,具有重要的理论意义和实际应用价值.

对于一个交互式可视化软件系统来说,友好的人机对话界面是获得用户认可的重要条件.但对于工程水力学数值实验室来说,仅有界面是不够的,更重要的是要保证试验结果具有足够的精确性.因此,数值实验室首先应当包含高精度和高效率的数值计算软件,可以对所研究的水力学问题进行快速准确的数值研究,同时辅以良好的管理环境,对工程的大量文件、数据以及图形图像等资料进行科学管理.一个实用的数值实验室应包括工程概况、文件库、图形库、数据库、数值试验模块、动态显示模块和系统帮助等模块.工程概况模块主要用以简介工程的基本情况,文件库、图形库、数据库组合成为数值实验室的资料库,用以对工程的大量资料进行科学管理.数值试验模块是整个数值实验室的核心模块,用户在输入试验参数后,即可以进行数值试验,利用数值试验室的输出模块和动态显示模块直观地展示试验成果.

数值实验室的结构设计应遵循如下设计思想^[4]:(a)面向用户、操作简便;(b)提高系统的可扩充性、可维护性和通用性;(c)数据文件尽可能共享;(d)增强系统的自我保护性能.各模块接口应按照国际通行的图形支持软件标准设计,以确保数据的可移植性、兼容性和输出设备的无关性.系统各模块还应最大限度地采用开放式结构,支持用户对系统的查询、维护和对系统执行过程的控制.

3 三峡工程永久船闸水力学数值实验室

长江三峡工程永久双线 5 级船闸是当今世界上闸室及闸、阀门数量最多(10 个闸室、12 道工作闸门及 14 对输水阀门)、水头最高(中间级最大水头 45.2 m)、线路最长(线路全长 6 442 m)、运行情况最复杂(单向一次过闸需开关人字闸门 6 次,后闭输水阀门 14 次)、规模最大的船闸工程.由于三峡 5 级永久船闸要满足施工期、永久通航初期及后期的水位变化要求,在有些水位组合下将采用后 3 级或后 4 级运行,有些情况下又必须补水运行,所以船闸的运行情况极为复杂,有必要建立三峡永久船闸水力学数值实验室,对各种运行组合下输水系统的水力特性进行数值研究,为运行方案的制定提供依据.

- 三峡永久船闸输水系统水力学数值实验室由六大模块组成:
- a. 工程概况模块.该模块分若干子项对船闸各级结构、输水管道情况进行简述.
 - b. 数据库管理模块.该模块将与工程招投标、设计、审查、施工相关的各类文件,会议纪要,重要的水力学参数,工况划分参数等资料进行汇总,见图 1.
 - c. 图形库管理模块.该模块对工程的各类设计、施工图、计算机所建立的三维立体图及数值计算的部分成果图等图形、图像资料进行统一管理,模块界面如图 2 所示.数据库及图形库都具有查询和编辑功能.



图 1 数据库界面
Fig.1 Data base interface



图 2 图形库界面
Fig.2 Graph base interface

d. 一维水力学数值试验模块. 该模块主界面见图 3. 选择工况参数(包括输水系统的级数、上下级闸室的初始水位、输水及补水阀门的启闭规律等)和主界面上的模型参数按钮修改一维计算的管道剖分信息和局部阻力系数信息, 确定输入参数正确无误之后, 即可启动相应的计算程序进行数值试验. 数值试验成果如门井水位过程、输水管道沿程各点水头变化过程、流量过程等除以表格形式列出外, 还可以动态图形的形式显示. 例如图 4 中, 以立体直方柱表示输水系统沿程各点水头变化过程, 随着时间滚动条的移动, 各点水头值以直方柱的长短动态表示于图中. 一维计算理论及结果详见文献[5].



图 3 一维水力学仿真主界面

Fig.3 1-D hydraulic simulation interface

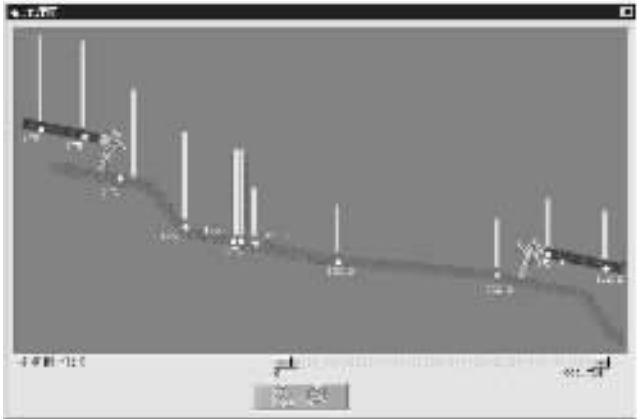


图 4 节点水头变化过程动态演示

Fig.4 Numerical results of water head

e. 二维水力学数值试验模块^[6]. 该模块主界面如图 5, 其功能是对阀门启闭过程中阀门井局部非恒定流场进行数值试验. 试验工况可以为顶扩和底扩方案的恒定流场及非恒定流场. 计算参数可通过图 5 的界面输入, 二维水力学计算结果以图像和列表的形式给出, 如图 6 和图 7 所示. 利用图 6 中的滚动条, 可以实现非恒定流场的动态演示及流场图的放大与缩小. 同时, 还可以利用界面的插值功能(见图 7)对计算区域中任意节点的水力学要素如流速、压力等参量进行插值计算, 计算结果可以任意存盘和打印.



图 5 二维水力学仿真主界面

Fig.5 Main interface for 2-D hydraulic simulation

f. 动画模块. 该模块对三峡永久船闸工程的通航过程进行动画模拟.

在三峡永久船闸输水系统输水特性数值实验室的

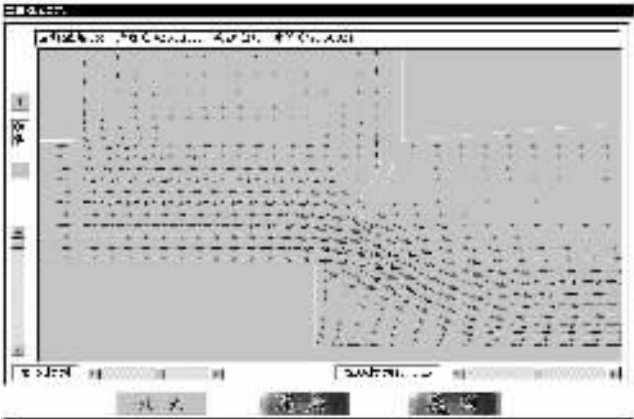


图 6 底扩工况流场

Fig.6 Flow field for bottom expansion scheme



图 7 二维数模结果显示

Fig.7 Results of 2-D numerical simulation

研制过程中,采用了多种计算及图形软件如 Fortran,C,LIST,AutoCAD,VB,VC,3Dmax 等,并充分利用这些软件的各自特点,完成了数值计算、数模成果同步演示、动画制作、界面设置等工作,使得数值实验室界面友好、可操作性强,该系统已经应用于工程设计和施工过程中.数值实验室的研制大大提高了利用数值模拟成果解决工程实际问题的能力.

4 结 语

笔者提出了数值实验室的概念,总结了数值实验室的特点及其组成,并以三峡工程永久船闸输水系统输水特性数值实验室的研制为例,说明水流数值模拟技术只有借助先进的计算机图形及可视化技术,建立数值实验室,才能充分发挥数值计算快速价廉的特点,使数值模拟技术能更好地用于解决重大工程实际问题.

参考文献：

[1] 李铁骊,王言英,林焰. 船舶兴波阻力计算的 Panel 方法及流场的可视化实现[J]. 大连理工大学学报,1997,37(1) 87—90.
[2] 汤方平,周济人. 轴流泵进口断面流速可视化及应用[J]. 农田工程学报,1997,13(1) 225—226.
[3] 林宏,李颖,林保真. 工程应用可视化系统的开发[J]. 计算机工程与设计,1996,17(1) 39—46.
[4] 蔡士杰,张福炎. 三维图形系统 PHIGS 的原理与技术[M]. 南京 南京大学出版社,1993. 69—70.
[5] 王玲玲,高飞. 三峡永久船闸输水系统输水特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2002,30(4) 96—99.
[6] 王玲玲. 复杂紊流场数值实验室研究及其应用[D]. 南京 河海大学,2000.

Development of hydraulics numerical laboratory and its application to Three Gorges Project

WANG Ling-ling¹, DAI Hui-chao², WANG Qiong³

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. China Yangtze River Three Gorges Project development Corporation, Yichang 443133, China ;
3. School of Mathematics & Computer Science, Nanjing Normal Univ., Nanjing 210042, China)

Abstract: Expounded are the composition and structure of the numerical laboratory, which further extends the connotation of numerical simulation. Then, an introduction is given to the current situation of the application of the computer image processing technology and visualization technology to the field of water conservancy. By combination of the simulation technology, computer image processing technology, and visualization technology, a numerical laboratory is developed for simulation of the hydraulic characteristics of the permanent ship lock water conveyance system in the Three Gorges Project. By use of the laboratory, numerical simulation can be made for the water conveyance system for any operational conditions, and the simulated results can be shown with figures, images, forms, and animated drawing. With the characteristics of fast operation, intuitive expression, and friendly interfaces, the laboratory can be widely used for engineering design and construction.

Key words: Three Gorges Project ; numerical laboratory ; engineering hydraulics ; visualization technology