



普通高等教育“十二五”规划教材

ANSYS Products 有限元 软件及其在水利水电工程 中仿真应用

龚成勇 李琪飞 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

ANSYS Products 有限元软件及其在水利水电工程中仿真应用

龚成勇 李琪飞 编著

图	文	图	文
图 1-1	图 1-1	图 1-1	图 1-1
图 1-2	图 1-2	图 1-2	图 1-2
图 1-3	图 1-3	图 1-3	图 1-3
图 1-4	图 1-4	图 1-4	图 1-4
图 1-5	图 1-5	图 1-5	图 1-5
图 1-6	图 1-6	图 1-6	图 1-6
图 1-7	图 1-7	图 1-7	图 1-7
图 1-8	图 1-8	图 1-8	图 1-8
图 1-9	图 1-9	图 1-9	图 1-9
图 1-10	图 1-10	图 1-10	图 1-10
图 1-11	图 1-11	图 1-11	图 1-11
图 1-12	图 1-12	图 1-12	图 1-12
图 1-13	图 1-13	图 1-13	图 1-13
图 1-14	图 1-14	图 1-14	图 1-14
图 1-15	图 1-15	图 1-15	图 1-15
图 1-16	图 1-16	图 1-16	图 1-16
图 1-17	图 1-17	图 1-17	图 1-17
图 1-18	图 1-18	图 1-18	图 1-18
图 1-19	图 1-19	图 1-19	图 1-19
图 1-20	图 1-20	图 1-20	图 1-20
图 1-21	图 1-21	图 1-21	图 1-21
图 1-22	图 1-22	图 1-22	图 1-22
图 1-23	图 1-23	图 1-23	图 1-23
图 1-24	图 1-24	图 1-24	图 1-24
图 1-25	图 1-25	图 1-25	图 1-25
图 1-26	图 1-26	图 1-26	图 1-26
图 1-27	图 1-27	图 1-27	图 1-27
图 1-28	图 1-28	图 1-28	图 1-28
图 1-29	图 1-29	图 1-29	图 1-29
图 1-30	图 1-30	图 1-30	图 1-30
图 1-31	图 1-31	图 1-31	图 1-31
图 1-32	图 1-32	图 1-32	图 1-32
图 1-33	图 1-33	图 1-33	图 1-33
图 1-34	图 1-34	图 1-34	图 1-34
图 1-35	图 1-35	图 1-35	图 1-35
图 1-36	图 1-36	图 1-36	图 1-36
图 1-37	图 1-37	图 1-37	图 1-37
图 1-38	图 1-38	图 1-38	图 1-38
图 1-39	图 1-39	图 1-39	图 1-39
图 1-40	图 1-40	图 1-40	图 1-40
图 1-41	图 1-41	图 1-41	图 1-41
图 1-42	图 1-42	图 1-42	图 1-42
图 1-43	图 1-43	图 1-43	图 1-43
图 1-44	图 1-44	图 1-44	图 1-44
图 1-45	图 1-45	图 1-45	图 1-45
图 1-46	图 1-46	图 1-46	图 1-46
图 1-47	图 1-47	图 1-47	图 1-47
图 1-48	图 1-48	图 1-48	图 1-48
图 1-49	图 1-49	图 1-49	图 1-49
图 1-50	图 1-50	图 1-50	图 1-50
图 1-51	图 1-51	图 1-51	图 1-51
图 1-52	图 1-52	图 1-52	图 1-52
图 1-53	图 1-53	图 1-53	图 1-53
图 1-54	图 1-54	图 1-54	图 1-54
图 1-55	图 1-55	图 1-55	图 1-55
图 1-56	图 1-56	图 1-56	图 1-56
图 1-57	图 1-57	图 1-57	图 1-57
图 1-58	图 1-58	图 1-58	图 1-58
图 1-59	图 1-59	图 1-59	图 1-59
图 1-60	图 1-60	图 1-60	图 1-60
图 1-61	图 1-61	图 1-61	图 1-61
图 1-62	图 1-62	图 1-62	图 1-62
图 1-63	图 1-63	图 1-63	图 1-63
图 1-64	图 1-64	图 1-64	图 1-64
图 1-65	图 1-65	图 1-65	图 1-65
图 1-66	图 1-66	图 1-66	图 1-66
图 1-67	图 1-67	图 1-67	图 1-67
图 1-68	图 1-68	图 1-68	图 1-68
图 1-69	图 1-69	图 1-69	图 1-69
图 1-70	图 1-70	图 1-70	图 1-70
图 1-71	图 1-71	图 1-71	图 1-71
图 1-72	图 1-72	图 1-72	图 1-72
图 1-73	图 1-73	图 1-73	图 1-73
图 1-74	图 1-74	图 1-74	图 1-74
图 1-75	图 1-75	图 1-75	图 1-75
图 1-76	图 1-76	图 1-76	图 1-76
图 1-77	图 1-77	图 1-77	图 1-77
图 1-78	图 1-78	图 1-78	图 1-78
图 1-79	图 1-79	图 1-79	图 1-79
图 1-80	图 1-80	图 1-80	图 1-80
图 1-81	图 1-81	图 1-81	图 1-81
图 1-82	图 1-82	图 1-82	图 1-82
图 1-83	图 1-83	图 1-83	图 1-83
图 1-84	图 1-84	图 1-84	图 1-84
图 1-85	图 1-85	图 1-85	图 1-85
图 1-86	图 1-86	图 1-86	图 1-86
图 1-87	图 1-87	图 1-87	图 1-87
图 1-88	图 1-88	图 1-88	图 1-88
图 1-89	图 1-89	图 1-89	图 1-89
图 1-90	图 1-90	图 1-90	图 1-90
图 1-91	图 1-91	图 1-91	图 1-91
图 1-92	图 1-92	图 1-92	图 1-92
图 1-93	图 1-93	图 1-93	图 1-93
图 1-94	图 1-94	图 1-94	图 1-94
图 1-95	图 1-95	图 1-95	图 1-95
图 1-96	图 1-96	图 1-96	图 1-96
图 1-97	图 1-97	图 1-97	图 1-97
图 1-98	图 1-98	图 1-98	图 1-98
图 1-99	图 1-99	图 1-99	图 1-99
图 1-100	图 1-100	图 1-100	图 1-100



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

高速发展的计算机科学、先进的设计方法和精细的数值仿真为现代水利水电工程精细化设计提供了重要解决方案,为传统方法提供了有力补充。ANSYS Products 有限元软件在水利水电工程的应用和研究中所起的作用越来越重要。本书介绍到的专业基础包括:结构分析基础、水力学及其计算流体力学、热力学、岩土力学、水工建筑物、钢结构、渗流力学、旋转机械、工程施工、建模方法、数值计算方法与有限元仿真技术等。书中主要模拟研究对象包括:水工地质及边坡工程、水利枢纽重要建筑物(重力坝、土石坝和拱坝)、水电站建筑物和机组及其输水建筑物或结构(水轮机组流道、输水结构、水工隧洞、渡槽、尾水流道)、泄水及其消能建筑物(泄水构筑物、取水结构、消力池)、水工钢结构(厂房网架、钢闸门、压力钢管)等;成果主要集中在水工水力学流场分析、结构有限元分析、热力学分析、流-固耦合有限元和热-固耦合核心问题上。

本书可以作为水利专业的研究生和本科生教材,也适用于 ANSYS Products 软件的使用者以及水利工程相关领域科研人员、设计人员和工程管理人员用作参考资料,还可作为工程技术人员的学习材料。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS Products有限元软件及其在水利水电工程中仿真应用 / 龚成勇, 李琪飞编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 12

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5170-2669-3

I. ①A… II. ①龚… ②李… III. ①水利水电工程—计算机仿真—有限元分析—应用软件—高等学校—教材
IV. ①TV-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第260663号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 ANSYS Products 有限元软件及其在水利水电工程中仿真应用
作 者	龚成勇 李琪飞 编著
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 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 37.25印张 930千字
版 次	2014年12月第1版 2014年12月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	69.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

随着国民经济的发展和清洁能源需求的增加,水利水电工程正在迅猛发展,其发展趋势是不断地大型化与复杂化,工程的设计计算、施工建设和运行管理难度愈来愈大。如今高速发展的计算机科学、先进的设计方法和精细的数值仿真为水利水电工程解决这些困难提供了重要方案,为传统方法提供了有力的帮助。完全依靠传统的设计计算方法去得到更为精确的分析结果的可能性愈来愈小,且数值仿真在一定程度上逐步成为重要的分析和研究的重要手段。本书基于 ANSYS Products 有限元软件能在水利水电工程中普及应用而编写的。

本书在编写过程中充分考虑了 ANSYS Products 软件在水利水电工程应用的客观性、系统性和实用性,注重软件功能的介绍的同时,加强水利水电工程学科的设计方法和仿真实理论的引导培养。力求将软件的适用性、仿真的合理性和工程的客观性融为一体,内容上尽量做到“面要宽,点要实”,既努力做到概念明确、思路清晰,且遵循由易到难,循序渐进的原则,为读者自学或课堂讲授学习提供选择。模拟研究对象主要包括:水工地质及边坡工程、水利枢纽重要建筑物(重力坝、土石坝和拱坝)、水电站建筑物和机组及其输水建筑物或结构(机组流道、输水结构、水工隧洞、渡槽、尾水流道)、泄水及其消能建筑物(泄水构筑物、取水结构、消力池)、水工钢结构(厂房网架、钢闸门、压力钢管)等;主要内容介绍包括结构分析基础、计算流体力学、热力学、岩土力学、钢结构、渗流力学、旋转机械等。全书共计 19 章,共八部分,第一部分为水利水电工程模拟仿真基础及软件介绍;第二部分为水工地质及边坡工程仿真;第三部分为水工结构工程(包括建筑物工程和结构钢结构工程)仿真;第四部分为水工水力学与渗流仿真;第五部分为水工结构与热力学仿真;第六部分为水电站与水力机械仿真;第七部分为流固与热固耦合分析;第八部分为参数化建模与二次开发仿真。各章采用模块式设计,其基本构架模式为:本章摘要→阅读指南→理论基础→模拟对象介绍→仿真分析实现过程讲解。

本书由兰州理工大学副校长李仁年教授规划、审稿。由兰州理工大学能源与动力工程学院水利水电工程系龚成勇和流体机械及工程系李琪飞编著。主要参编人员:赵廷红、韩伟、何香如、张钊、侯慧敏、李桂花、侯燕军。本书的编著得到能源与动力工程学院教师的大力支持,水利水电工程系全系教师的鼎力帮助。编写过程中引用了一些相关资料,对其作者深表谢意。同时对中国水利水电出版社武丽丽主任和李晔韬编辑对本书的出版付出的辛苦表示感谢。

本书可以作为水利专业的研究生和本科生教材,也适用于 ANSYS Products 软件的使用

由于编者学识和水平有限，书中难免有错误和不妥之处，望读者批评指正。

2014 年 8 月于兰州理工大学

目 录

前言

第1章 水利水电工程模拟仿真基础	1
1.1 水利水电工程数学模型基础	1
1.2 水利水电工程模型的特点	2
1.3 水利水电工程建模的思维导向和原则	3
1.3.1 水利水电工程建模的思维导向	3
1.3.2 水利水电工程建模遵循的原则	5
1.4 建立水利水电工程模型的一般步骤和建模方法	6
1.4.1 建立水利水电工程模型的一般步骤	6
1.4.2 水利水电工程模型建模方法	7
1.5 水利水电工程数值模拟复杂度简介	8
1.6 水利水电工程几何建模的经验	10
1.6.1 建模过程中要养成好习惯	10
1.6.2 掌握几种几何建模平台	10
1.6.3 养成坚持不放弃的精神	11
1.6.4 建模实践过程中要总结建模方法	11
1.7 水利水电工程仿真模型选择的建议	11
1.8 水利水电工程仿真建模实例	13
1.8.1 选择建模思维导向	13
1.8.2 分析研究目的	14
1.8.3 分析模型主要因素	14
1.8.4 编制建模整体框架	17
1.8.5 “泥石流运动机理”子系统研究	17
1.8.6 推导控制方程和定解条件	17
1.9 有限元方法简介	19
1.9.1 有限元基本理论简介	19
1.9.2 水利工程中的有限元分析建议	21

1.10	ANSYS Products 简介	23
1.10.1	经典 ANSYS 简介	23
1.10.2	ANSYS Workbench12.1 简介	26
1.10.3	ANSYS ICEM 简介	30
1.10.4	ANSYS CFX 简介	31
1.10.5	ANSYS Fluent 简介	32
第2章	水工结构中的常用结构单元模拟	35
2.1	水工二维结构模拟	35
2.1.1	梁单元 BEAM3 简介	35
2.1.2	分析实例概述	36
2.1.3	ANSYS 的分析二维梁结构	37
2.2	水工三维框架梁结构仿真	45
2.2.1	梁单元 BEAM188 简介	45
2.2.2	分析对象简述	45
2.2.3	ANSYS 的分析框架梁结构	45
2.3	水工三维壳体结构仿真单元 SHELL63	54
2.3.1	壳体单元 SHELL63 简介	54
2.3.2	分析实例概述	55
2.3.3	ANSYS 分析壳体结构	55
第3章	基于 ANSYS 及 ANSYS Workbench 平台水工钢结构仿真	60
3.1	水利工程中桁架模态仿真分析	60
3.1.1	桁架结构简介	60
3.1.2	模态分析基础	63
3.1.3	分析实例概述	63
3.1.4	基于 ANSYS Workbench 模态仿真实现过程	64
3.1.5	基于 ANSYS 平台桁架模态仿真实现过程	69
3.2	水工弧形闸门有限元分析	73
3.2.1	水库弧形闸门基础	73
3.2.2	分析对象简介	74
3.2.3	基于 ANSYS Workbench 平台闸门静力学分析	75
3.2.4	基于 ANSYS 和 ANSYS Workbench 平台弧形闸门瞬态响应分析模拟	79
3.3	引水式水电站有压引水系统动态仿真	89
3.3.1	有压引水系统、调压室(井)及其压力钢管简介	89
3.3.2	流固耦合仿真简介	97
3.3.3	分析对象简介	98

3.3.4	基于 ANSYS CFX 和 ANSYS Workbench 平台模拟仿真	99
第 4 章	水工地质及边坡工程数值模拟	116
4.1	水工地质及其边坡工程简介	116
4.2	水工地质及边坡工程数值模拟分析过程	118
4.3	挡土墙结构设计与仿真计算简介	119
4.3.1	挡土结构计算与仿真简介	119
4.3.2	基于框锚加固技术的重力式挡墙支护结构简介	125
4.3.3	算例物理模型简介	125
4.4	基于 ANSYS Workbench 平台挡土结构仿真模拟实现过程	127
4.4.1	基于 ANSYS Workbench 网格模型建立	127
4.4.2	设置求解边界	128
4.4.3	设置求解输出设置且启动求解	133
4.4.4	后处理及其结果分析	136
第 5 章	水工隧洞施工及运行的 ANSYS 模拟	137
5.1	水工隧洞基础	137
5.1.1	水工隧洞简介	137
5.1.2	水工隧洞的设计模型	139
5.1.3	水工隧洞的数值方法	141
5.1.4	水工隧洞的荷载	141
5.2	基于 ANSYS 平台水工隧洞施工过程模拟	142
5.2.1	ANSYS 单元生死	142
5.2.2	初始地应力的模拟方法	145
5.3	数值模拟对象	146
5.4	有限元建模	146
5.4.1	单元定义和材料定义	147
5.4.2	几何建模	150
5.4.3	网格划分	160
5.4.4	边界条件和初始条件	166
5.5	水工隧洞施工过程模拟	168
5.5.1	初始状态模拟	169
5.5.2	毛洞开挖工况模拟	170
5.5.3	毛洞支护工况模拟	173
5.5.4	查看结果与后处理	176
5.6	水工隧洞运行期模拟	186
5.6.1	运行期内水压力的模拟	186

5.6.2	运行期外水压力的模拟	190
第6章	重力坝的施工及运行 ANSYS 模拟	195
6.1	重力坝简介	195
6.2	ANSYS 混凝土单元 (SOLID65) 简介	196
6.2.1	SOLID65 单元输入数据	197
6.2.2	SOLID65 单元应力输出结构图	198
6.3	数值模拟对象介绍	200
6.4	创建二维几何模型	200
6.4.1	基于 AutoCAD2010 平台创建重力坝二维模型	200
6.4.2	启动 ANSYS 仿真平台并定义仿真文件	201
6.4.3	定义仿真单元和材料属性	206
6.4.4	建立有限元模型	209
6.4.5	添加边界条件及初始条件	215
6.5	施工期及运行期弹性模拟	218
6.5.1	初始状态模拟	219
6.5.2	完建工况模拟	221
6.5.3	运行工况模拟	223
6.5.4	查看结果与后处理	232
第7章	基于 ANSYS 重力坝的弹塑性模拟仿真	242
7.1	弹塑性理论及其仿真基础	242
7.1.1	弹塑性理论与屈服准则	242
7.1.2	混凝土重力坝弹塑性结构有限元分析必要性	245
7.1.3	大坝混凝土结构有限元分析的发展趋势	245
7.1.4	ANSYS 仿真平台下混凝土塑性损伤本构模型理论模型	246
7.2	重力坝的弹塑性模拟分析前期准备	248
7.3	施工期及运行期弹性模拟	251
7.3.1	初始状态模拟	252
7.3.2	完建工况模拟	253
7.3.3	运行工况模拟	256
7.3.4	混凝土重力坝的超载分析	261
7.3.5	结果与后处理	264
第8章	ANSYS 平台下重力坝模态响应分析及其抗震性能模拟	272
8.1	模态响应分析基础	272
8.1.1	模态响应分析基础	272
8.1.2	基于 ANSYS 平台模态响应分析的基本步骤	274

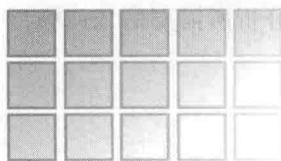
8.2	数值模拟对象	274
8.3	基于 ANSYS 平台的重力坝模态分析	277
8.3.1	激活模态分析模块	277
8.3.2	设置模态分析选项	277
8.3.3	求解计算	277
8.3.4	保存计算结果	278
8.3.5	查看模态分析结果与后处理	279
8.4	基于 ANSYS 平台重力坝谱分析	280
8.4.1	设定谱分析类型	280
8.4.2	设定单点响应谱类型和激励方向	280
8.4.3	设定谱值和频率值	281
8.4.4	求解与保存结果	282
8.5	基于 ANSYS 平台重力坝扩展模态仿真分析	283
8.5.1	扩展模态仿真分析设置	283
8.5.2	求解扩展模态并保存模拟结果	284
8.5.3	合并模态设置	284
8.5.4	求解扩展模态	285
8.5.5	查看结果与后处理	285
8.6	基于 ANSYS 平台重力坝在地震波的瞬态分析	288
8.6.1	建立地震波数据文件	288
8.6.2	读入地震波数据	288
8.6.3	指定分析类型	290
8.6.4	设定瞬态分析选项	291
8.6.5	施加地震加速度荷载	292
8.6.6	求解瞬态	292
8.6.7	加入时间历程后处理与瞬态后处理	293
第 9 章	汛期重力坝泄水过程与结构稳定校核仿真	294
9.1	水电站输水系统和 WES 堰流动仿真基础	294
9.1.1	WES 堰简介	294
9.1.2	水电站取水口系统几何模型设计介绍	296
9.2	基于 ANSYS CFX 泄水水流分析	298
9.2.1	几何模型导入和有限元模型	298
9.2.2	建立流场仿真模型	302
9.2.3	求解单位、求解控制和输出控制	312
9.3	基于 ANSYS Workbench 重力坝结构应力分析	315

9.3.1	模型导入和有限元模型	315
9.3.2	建立结构仿真模型	317
9.3.3	求解与后处理	320
第 10 章	基于 ANSYS Workbench/CFX 平台渡槽结构仿真及其耦合分析	322
10.1	水工渡槽基础与 ANSYS CFX 流场仿真平台的简介	322
10.1.1	水工渡槽简介	322
10.1.2	水工渡槽三维流体—固体动力耦合分析模拟	323
10.1.3	基于 ANSYS Workbench 的 CFX 流场分析流程介绍	327
10.2	数值模拟对象	329
10.3	基于 ANSYS Workbench 渡槽静力学模拟分析实现过程	330
10.3.1	启动仿真系统	330
10.3.2	导入几何模型	330
10.3.3	设置结构模拟材料属性	330
10.3.4	模拟前处理网格划分, 求解设置并求解	332
10.3.5	保存模拟文件	338
10.4	基于 ANSYS Workbench/CFX 渡槽流固耦合分析	338
10.4.1	启动仿真系统	338
10.4.2	流场分析计算	340
10.4.3	结构分析实现过程	348
第 11 章	基于 ANSYS CFX 平台带消能池的多股多层消能数值模拟分析	353
11.1	消能建筑物简介将其仿真基本理论	353
11.1.1	泄水建筑物下游水流的特点及消能形式	353
11.1.2	消力池模拟模型简介	355
11.2	模拟对象简介	357
11.3	基于 ANSYS CFX 平台带消能池的多股多层消能数值模拟	358
11.3.1	创建网格模型	358
11.3.2	创建流场模型	361
11.3.3	求解器控制设置	372
11.3.4	流固双向耦合计算与后处理	373
第 12 章	水轮机整机全流道 CFD 计算仿真	376
12.1	混流水轮机 CFD 基础	376
12.1.1	水轮机 CFD 计算模型简介	376
12.1.2	流动基本方程	377
12.1.3	湍流模型	378
12.1.4	离散方法及压力—速度耦合	378

12.1.5	定义边界条件	379
12.1.6	仿真中几个关键问题的处理	380
12.2	混流水轮机整机全流道几何模型介绍	382
12.3	基于 ANSYS CFX 混流水轮机整机全流道 CFD 模拟分析	383
12.3.1	流道网格划分	383
12.3.2	建立流场仿真模型	385
12.3.3	查看结果与后处理	395
第 13 章	基于 ANSYS Fluent 平台下尾水管内流场仿真分析	397
13.1	尾水管物理模型及其流动特征简介	397
13.2	尾水管内流场仿真分析数学模型	399
13.3	尾水管简介及模拟对象描述	400
13.4	尾水管内流场仿真分析实现过程	401
13.4.1	基于 ANSYS Fluent 平台下尾水管内流场分析	401
13.4.2	查看结果与后处理	415
第 14 章	混凝土拱坝热固耦合仿真分析	416
14.1	热固耦合仿真基础及其技术路线	416
14.2	模拟对象描述	419
14.3	基于 ANSYS Workbench 拱坝热固耦合仿真	419
14.3.1	热力学仿真过程	419
14.3.2	结构仿真过程	424
14.3.3	查看结果与后处理	426
14.4	基于 ANSYS 的拱坝热固耦合分析	428
14.4.1	热力学分析	428
14.4.2	结构应力分析	435
第 15 章	基于 ANSYS Workbench 和 CFX 平台水电站厂房通风仿真	440
15.1	水电站厂房的通风基本概述	440
15.1.1	通风基本概念	440
15.1.2	厂房通风分类及其基本简化方程	441
15.2	水电站厂房的通风模拟的数学模型介绍	444
15.2.1	单方程 (Spalart - Allmaras) 模型	444
15.2.2	对流传热传质模型	445
15.2.3	标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型简介	446
15.2.4	RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型简介	446
15.3	水电站厂房的通风模拟的物理模型简介	447
15.4	基于 ANSYS CFX 平台水电站厂房通风仿真模拟实现过程	449

15.4.1	基于 ANSYS Workbench 平台建立网格模型	449
15.4.2	基于 ANSYS CFX 建立仿真模型	450
15.4.3	求解并查看结果	460
第 16 章 基于 ANSYS 经典平台模拟地下水渗流仿真		462
16.1	水工渗流场模拟基础	462
16.1.1	工程渗流力学简介	462
16.1.2	地下水渗流基本方程	463
16.1.3	地下水渗流方程定解条件	464
16.1.4	渗流力学有限元方程	465
16.1.5	土坝渗流计算方法	469
16.1.6	工程渗流场仿真的基础	471
16.1.7	工程渗流数学模型及其求解条件和 ANSYS 平台仿真渗流的简介	473
16.2	基于 ANSYS 平台水工渗流场模拟实例操作	474
16.2.1	图形用户界面 (GUI) 操作的模拟对象	474
16.2.2	建立渗流有限元模型	474
16.2.3	稳定渗流计算	480
16.3	基于 ANSYS 平台 APDL 土坝渗流模拟算例	486
16.3.1	模拟对象简介	486
16.3.2	模拟仿真准备工作	486
16.3.3	建模方法及其过程	486
16.3.4	定义材料参数	488
16.3.5	创建网格模型并添加初始边界	488
16.3.6	设置迭代次数	488
16.3.7	查看结果与处理	488
16.3.8	分析命令流与说明	490
第 17 章 坝后式水电站输水系统基于双向流固耦合的分析模拟		499
17.1	双向流固耦合理论基础	499
17.1.1	双向流固耦合固体基本方程	499
17.1.2	双向流固耦合流体理论基础	501
17.2	压力引水系统工作原理及其模拟对象	501
17.2.1	压力引水系统工作原理	501
17.2.2	压力引水系统模拟对象	501
17.3	基于 ANSYS Workbench 和 CFX 双向耦合实现过程	502
17.3.1	结构分析设置	502
17.3.2	流体分析设置	508

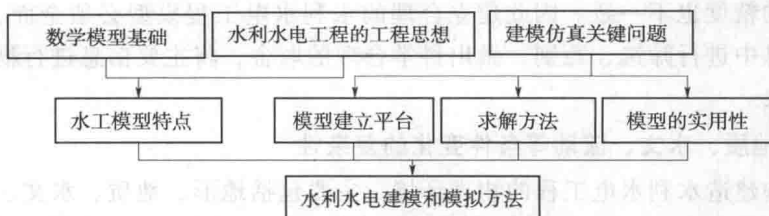
第 18 章 水电站建筑结构综合仿真分析	516
18.1 坝后式厂房概述	516
18.2 基于 ANSYS CFX 平台 3 台水轮机全流道流场模拟过程	520
18.2.1 启动仿真系统导入仿真几何模型	520
18.2.2 建立网格模型	521
18.2.3 建立流场仿真模型	522
18.2.4 求解模型并查看模拟结果	524
18.3 基于 ANSYS Workbench 水电站建筑结构仿真分析	526
18.3.1 添加结构仿真材料	526
18.3.2 建立网格模型	526
18.3.3 设置分析环境	528
18.3.4 添加荷载和边界条件	528
18.4 仿真求解和结果输出说明	529
第 19 章 ANSYS 在水利水电工程上的二次开发及应用	530
19.1 ANSYS 二次开发简介	530
19.1.1 参数化程序设计语言 (APDL)	531
19.1.2 用户界面设计语言 (UIDL)	532
19.1.3 用户程序特性 (UPFs)	532
19.1.4 ANSYS 数据接口	532
19.2 用户界面设计语言 (UIDL) 在水利工程中的应用	533
19.2.1 用户界面设计语言 (UIDL) 基本配置及其操作思路和步骤	533
19.2.2 水利水电工程仿真系统开发实例	534
19.3 基于参数化程序设计语言 (APDL) 拱坝的有限元分析	541
19.3.1 基于 APDL 的拱坝建模与分析方法	541
19.3.2 基于 APDL 的拱坝建模算例	541
19.4 基于参数化程序设计语言 ANSYS 拱坝体形优化	557
19.4.1 优化理论及其拱坝体形优化基础	557
19.4.2 拱坝体形优化的数学模型基础	558
19.4.3 拱坝体形优化的实现过程	562
19.4.4 基于 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 拱坝体型优化设计的命令流	564
参考文献	579



第 1 章

水利水电工程模拟仿真基础

本章摘要：



阅读指南：水利水电工程属于实用性学科，本章从水利水电工程的数学模型基础、模型特点、建模思维导向和建模原则、建模步骤等内容来介绍水利水电工程模拟的基本过程，并揭示水利水电工程的工程思想。为了加深理解，深入剖析了一个实例，为学习本书奠定一定的理论基础。

1.1 水利水电工程数学模型基础

水利水电工程数值仿真需要建立数学模型。如果模型较为复杂或出于数学本身的缺陷或计算机处理的不足，需要对模型进行简化，制定科学合理可行的虚拟模型，即仿真模型。本书中如果不加特别的说明，所陈述的模型均为仿真模型。

水利水电工程数学建模属于一种创新性的过程，不仅需要相当高的观察力、想象力和灵感，而且需要建模者具有一定的数学基础、水利学科知识、计算机科学基础、综合分析应用能力和工程概念。建立一个合理的水利水电工程数学模型，就是对研究对象信息进行分析、提炼、取舍，并用数学语言做出描述，为计算机模拟做充分的准备。好的水利水电模型对该学科理论研究和实际应用有着更为重要的指导性，也是研究人员不断追求的目标。数学建模以及数值仿真已经成为一种研究水利水电工程的重要手段之一。

水利水电工程的模型是水利水电工程被仿真的对象的相似或其结构形式的综合表达。它可以是物理模型或数学模型。与物理模型相比数学模型有其自身的特点。实践证明，并非所有的水利水电工程都能建立其对应的物理模型。例如为了研究坝体的应力特征，不能建立一个同比例水利工程的大坝实测分析（例如三峡水利枢纽模型研究其工程特征研究），但是可

以建立一个按照一定的比例进行缩放的模型进行研究,而数学模型尺度可以与工程尺度一致,甚至可以根据分析目的对研究对象进行修改。

建立水利水电工程特定的仿真模型必须依据工程的自身实际背景、工程信息和工程功能,通过分析其若干参数的逻辑关系、控制主次关系和发展趋势等,简化或忽略次要参数,建立较为科学合理的数学模型,再依据此数学模型的定义特征,建立分析所需要的几何模型作为仿真分析的载体,以便计算机仿真可视化操作处理。

1.2 水利水电工程模型的特点

水利水电工程模型不仅有基本模型的特点,还具有自身的特点,主要表现在以下5个方面。

1. 信息源的复杂性、耦合多源数据特点

水利水电工程的规划、设计、施工建设和运行维护的过程中都需要大量的信息去支撑,而信息的来源渠道比较宽,信息量比较庞大,获取信息的手段可能不同,信息的侧重点也不同,数值信息的精度也不一致。因此建立合理的水利水电工程模型必须全面、系统地考虑,要从海量的信息中进行筛选、甄别,做出科学合理的取舍,将主要信息进行耦合,最终得到令人满意的结果。

2. 地形、地质、水文、流动等条件变化的复杂性

决定或影响建造水利水电工程的物理环境,主要包括地形、地质、水文、空气和水的流动条件等,这些边界条件有的是在漫长的地质历史过程中,由各种不同的地质过程综合作用造成的,有的则形成时间较短,且没有明显的规律。物理边界的复杂性增加了研究对象的数据量,设计量之间的关系错综复杂,最终增加了建模和模拟的难度。

3. 时空尺度的复杂性

水利水电工程研究领域众多,工程设计、工程施工和工程运行管理过程中各工程对象显现出多时空特征,所以描述其研究对象的水利水电工程模型也具有多时空尺度的性质。

(1) 从空间尺度上讲,水利水电工程的研究对象包括流域问题(甚至跨流域问题)、枢纽、枢纽主体工程对象、主体工程主要对象;地上工程问题、地下工程问题;大尺度问题与小尺度复合等。从空间维度上讲,包括一维问题、二维问题和三维问题。

(2) 从时间尺度上讲,水利水电工程的研究对象是水利工程各个阶段的工程作用过程,既包括自然作用过程,又有人为影响过程,其流域作用过程是气候、地理、人为相互作用支配的复杂地理地貌过程,时间尺度可分为地质年代、年、月、天、时、秒不同的时间精度,因此水利水电工程模型的数据也就具有多时间序列,不同的研究目的采用的时间精度不同。

(3) 在特定的水利水电工程实际研究过程中,水利水电工程的空间尺度和时间尺度是紧密相关的。往往在大尺度的水利工程研究中对应着较长时间变化周期。水利工程师和研究人员在单一的时空维度下研究水利水电工程的规律和机理,但这往往不能够满足高精度全方位描述水利工程的真实实际,就要求建立多时空的模型,才能满足研究目的,也能真正深入揭示水利水电工程本身的内在规律。因此,工程师们在特定的条件下,按照工程的时空关系或工程逻辑关系建立具有各种时空尺度特征的水利水电工程模型,对复杂的工程问题进行分析、模拟、仿真、预测和计算。

4. 多学科交渗透系统性

水利水电工程模型的本质就是描述水利工程本身的系统规律、状态,揭示水利工程学科发展结构、工程功能和发展规律,说明水利工程的发展趋势,模拟水利工程运行机制。由于水利水电工程涉及的学科比较多,约束的物理边界比较复杂,因此该学科在理论层面的数学规律比较多,存在很大的差异性,且又归于一个完整的系统状态,建立模型的过程就应该全面考虑,采用分解与合并两种手段,将多学科交渗透系统问题进行合理、科学的简化,创建具有目的各异、形式多样的模型。主要表现在3个方面:

(1) 从不同的学科层面上认识问题、剖析问题以及最终解决问题,更好地揭示水利水电工程内在发展机制和变化演变规律。

(2) 利用各种可靠的工具和方法建立各种模型,以达到研究水利水电工程本质的目的。

(3) 水利水电工程模型综合研究的功能。如果将水利水电工程看成一个系统工程,该系统由多个复杂的子系统构成,多要素、多参数在多尺度、多时空相互作用构成的复杂功能系统,在此基础上建立的模型决定了模型的综合应用的功能。科学研究表明越是复杂的系统,越要发挥模型的优势作用,只有通过模型的合理建立、应用、修正,才能更好地理解、认识和解决好综合性的问题。实际上这个过程就是利用多学科的渗透交叉的方法去研究水利水电工程系统。

5. 模型专用性

水利水电工程模型建立过程是对其抽象简化的过程,模型的基本特征是由其研究目的决定的。水利工程本身研究领域比较广泛,从材料介质上包含多种材料:从力学性能上分为线性、非线性;从材料构成上为混凝土、岩石和土体等;从化学成分上分为金属和非金属;从存在形态上分为气体、流体和固体;从研究的假定上分为连续介质和多孔介质等;研究领域包含各种力学、地质地貌学、岩土工程、流体传动、能量传动传递、水文、气候等,甚至各个学科之间作用影响、相互交叉,所以针对不同的研究目的,模型也是不同的,有自身的功能目的性。例如同是坡面降雨,若研究汇流问题,主要考虑水量而建立汇流模型;若研究降雨对坡面的打击作用,将建立雨水对土体的侵蚀作用模型。再如对水电站而言,若研究机组内水与机组之间的问题,主要建立流体流动与机组过流部件之间的作用耦合关系模型;若研究蜗壳周边的混凝土破坏问题,则主要建立的模型是动水压力作用下混凝土破坏机理模型。

1.3 水利水电工程建模的思维导向和原则

随着社会的发展,解决工程问题的方法、计算机软硬件、数学方法等手段的不断革新,加之水利水电工程学科的发展应用,都会对水利水电工程模型有深远的推动作用。但是,模型的准确性和应用的成效性在一定程度上取决于建模人员对水利水电工程学科的认识深度和概括能力,而这一切均表现出建模人员的建模思维导向和原则。

1.3.1 水利水电工程建模的思维导向

建模的导向归纳起来有3种,即:问题导向思维模式、模式导向思维模式和方法导向思维模式。