

三峡工程导截流及深水 高土石围堰研究

戴会超 曹广晶 等 编著
包承纲 杨文俊



科学出版社
www.sciencep.com

三峡工程导截流及深水 高土石围堰研究

戴会超 曹广晶 等 编著
包承纲 杨文俊

科学出版社

北 京

内 容 简 介

三峡工程是治理和开发长江的关键工程,规模宏大,举世瞩目,具有防洪、发电、航运等多种综合功能。三峡工程的控制性工程项目——导截流及深水高土石围堰,面临一系列世界级难题。三峡工程截流包括大江和导流明渠两次截流,截流成功后都面临在一个枯水期内快速修建深水高土石围堰的难题。为做到土石围堰挡水、不漏水,必须做好可靠的防渗结构。1997年11月8日大江截流和2002年11月6日导流明渠截流成功,标志中国大江大河截流技术已跻身世界领先地位。本书对三峡工程导流及通航,深水、大流量、厚覆盖层河床大江截流,综合难度世界第一的明渠截流,以及深水高土石围堰工程进行了介绍。

由于本书具有科学性、权威性、史料性和纪实性,因此,它对于今后的水利枢纽导截流工程及其他相关专业的地下防渗工程具有较高的参考价值和指导作用,可供从事水利水电工程及地下防渗工程建设的广大工程技术人员借鉴,也可供大专院校相关专业的师生教学参考。

图书在版编目(CIP)数据

三峡工程导截流及深水高土石围堰研究/戴会超等编著. —北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-016208-0

I. 三… II. 戴… III. ①三峡工程-导流-研究②三峡工程-截流-研究③三峡工程-围堰-研究 N. ①TV632.71②TV551

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 099115 号

责任编辑:杨家福/责任校对:刘彦妮

责任印制:吕春珉/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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006年1月第一次印刷 印张:34 3/4

印数:1—3 000 字数:800 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<新欣>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA03)

序

世界上最大的水利工程——举世瞩目的长江三峡水利枢纽工程——的建设正进入结尾阶段。现在已没有人怀疑中国人民即将取得建设三峡水利枢纽工程的全面胜利,它将发挥防洪、发电、通航等巨大综合效益,千秋万代为民造福。

三峡工程从设想、研究、论证、决策到实施,经历了漫长的时间,跨越了两个世纪。简单回顾一下这个历程,也很有意义。自1919年孙中山先生设想开发长江三峡水力资源到新中国成立,是提出和幻想的30年;从20世纪50年代到80年代,是勘探、设计、研究、论证和“实战准备”的40年,而且出现了激烈的争论。1992年4月3日,全国人大七届五次会议通过了《关于兴建三峡工程的决议》,标志着三峡工程的前期研究和论证工作的结束,并转入实施阶段。1993年初,首批施工队伍进入坝区,开始施工准备工程和一期导流工程的施工。1994年12月14日,三峡工程正式开工。1997年11月8日,三峡工程胜利实现大江截流,标志着一期工程顺利完成,开始进入二期建设阶段。2002年11月6日导流明渠截流成功,2003年6月1日水库开始蓄水,6月10日水位到达135m高程;6月16日双线五级船闸试通航成功,随即正式向社会船舶开放;同年7月左岸电站首台水轮机发电机组开始投产发电。至此,三峡工程导截流工程全部完成并顺利地实现了蓄水、通航、发电的二期工程的建设目标,转入三期工程。蓄水后各项安全监测数据表明,各建筑物工作性态正常,各项指标均在设计允许范围之内。中华民族几代人梦寐以求的愿望开始成为现实。

三峡工程的最大特点,就是要在我国第一、世界第三大河、而且是国家主要航道的长江干流上修建高坝大库,不但要保证工程建设成功,而且还必须保证施工期间航运畅通,这就面临着一系列世界级难题。首先面对的就是综合解决导流、围堰和通航问题,简言之,就是让长江航道分期改道,在围堰等建筑物的挡水保护下形成基坑,排水后进行干地施工,而同时维持通航。针对三峡工程特点,经长期综合研究,选择了河道右岸有一个中堡岛的三斗坪坝址,采用了“三期导流、明渠通航、围堰挡水发电”的施工方案,终于攻克了这个重大难题。所谓三期导流,就是第一期先围中堡岛以右的后河,将它改建成“导流明渠”——一条“人工长江”,同时在中堡岛上修建纵向围堰;第二期,拆除一期围堰,进行大江截流,立即抢修二期围堰,江水改由明渠宣泄,在大江中修建泄洪坝段(并留设导流底孔)和左岸厂房坝段及厂房,船只通过明渠及临时船闸通航;第三期,拆除二期围堰,再次截断明渠,抢修三期围堰,江水回到大江,通过导流底孔泄放,实现初期蓄水、通航、发电目标,船只从永久船闸过坝,同时建完右岸工程。最后封堵导流底孔,抬高水位转入正常运行。三期工程各需5年、6年、6年,总工期达17年。

当然还有其他的施工方案。有些专家就力主采用“两期半”方案,即在一期工程中就在明渠内建设右岸坝体并留设底孔,在二期工程时江水由右岸坝段的底孔中宣泄。这样做,左右岸厂坝工程可同时上升,也避免了后期再一次在明渠中截流以及抢建和拆除三期围堰的困难,其对后期工程的有利是显而易见的。但我和多数专家认为,这个方案对一期工

程压力大,对施工通航不利,并增加大江截流和抢建二期围堰的难度与风险,而后者正是决定三峡工程施工成败的一个关键。所以几经斟酌,仍决策采用三期导流方案。现在我也不敢说三期方案就是最优方案,只能说实践证明这一方案是可行的,预期的各种难关都被克服,有望提前一年竣工,已取得圆满成功。

尽管采用了三期方案,大江截流和二期围堰难度之大仍是世界工程史上少见:大江设计截流流量达 $11600\text{m}^3/\text{s}$,最大水深 60m ,施工日抛投强度达 $19.4 \times 10^4\text{m}^3$,且存在深水堤头坍塌难题。二期围堰则要在复杂地质条件下通过深水抛填散粒料,在一个枯水期中快速建成一座具有可靠防渗体系的大型土石坝,和第二年长江的凶猛洪水进行一次生死竞赛。其他如明渠截流和三期围堰都是综合难度极大的工程。我们高兴地看到,三峡建设者们能以一丝不苟的科学精神,展开多项科技攻关,并虚心借鉴国外先进经验,反复试验,谨慎决策,终于取得了一系列技术上的重大突破,完成了党和国家交付的任务。

三峡工程建设的经验是弥足珍贵的,它不仅是中国人的宝贵经验,也是世界工程史上的财富。目前中国长江三峡工程开发总公司正在组织三峡工程的总结工作,考虑到三峡工程施工持续时间长,并拟动态进行,在某一工程项目施工完成,主要技术问题得到确切验证,就可以启动单项图书编写工作。关于三峡截流和围堰的研究和施工经验,以前也出过几本总结,笔者都乐于为序。本书是中国长江三峡工程开发总公司和长江水利委员会组织编写的第一本有关导截流及深水高土石围堰研究的专题总结,更较全面,注重工程的纪实性,图、文、表、照片并茂,详细地介绍了三峡工程施工期导流及通航、三峡工程长江截流技术和深水围堰的创新成果。这些经验已在、将在溪洛渡、向家坝等大型水利水电工程中推广应用。我深信本书不仅是一本忠实的历史记录,也将是水利水电工程师们有益的案头工具书。我希望其他专题总结也能陆续问世,为三峡工程留下一部“二十四史”,为中国今后方兴未艾的水利水电建设做出更大贡献。

中国科学院院士
中国工程院院士

潘家铮

前 言

举世瞩目的长江三峡水利枢纽是开发和治理长江的关键性骨干工程,具有防洪、发电、通航等巨大综合功能,对加快我国现代化建设进程、提高综合国力具有重要意义。自1919年孙中山先生提出开发长江三峡水力资源的设想以来,兴建长江三峡工程成为中华民族几代人梦寐以求的愿望。中华人民共和国成立后,在毛泽东、邓小平、江泽民三代领导人的直接关怀下,有关部门和广大科技工作者从20世纪50年代起,对三峡工程进行了长期、大量的勘测、规划、设计和研究。1958年党中央成都会议通过了《中共中央关于三峡水利枢纽和长江流域规划的意见》,提出了“采取积极准备和充分可靠的方针”,随后组织了200多个单位近万名科技人员对三峡工程重大科技问题进行了全国性的协作研究。1970年底,中央决定兴建葛洲坝工程,以缓解华中地区电力紧缺局面,同时也为兴建三峡工程做实战准备。1984年国务院原则批准了三峡工程正常蓄水位150m方案的可行性研究报告,并开始进行工程筹建和准备工作。1986年党中央、国务院决定对三峡工程重新论证,“以求更加细致、精确和稳妥”。经过近3年的深入研究论证,论证领导小组审议并通过了14个专题论证报告。长江水利委员会据此重新编制了《长江三峡水利枢纽可行性研究报告》。1991年8月国务院三峡工程审查委员会通过了对该报告的审查意见,“三峡工程建设是必要的,技术上是可行的,经济上是合理的,建议及早决策兴建三峡工程”。1992年4月3日,全国人大七届五次会议审议了《国务院关于提请审议兴建长江三峡工程的议案》,通过了《关于兴建长江三峡工程的决议》。1993年5月国务院审查通过了《长江三峡水利枢纽工程初步设计报告》,三峡工程开始实施建设。在建设过程中,参建单位进一步深入地进行了大量科学研究工作,解决了一系列的重大技术难题,工程质量、进度和投资都得到有效的控制,2003年胜利实现了二期工程蓄水、通航和发电的目标。

三峡工程规模巨大、技术复杂,面临一系列世界级难题,科技创新贯穿于工程建设的全过程。针对重大技术难题,中国长江三峡工程开发总公司汇集了全国科技精华,充分发挥专家的作用,展开了一系列科技攻关,同时借鉴了国外先进经验,科学决策,取得了一系列技术上的重大突破。它将在工程科研、设计、施工、运行和管理等方面留下宝贵的经验,为将来世界各国治理江河提供有价值的借鉴和参考。三峡工程两次截流及深水高土石围堰技术是三峡工程

中重大技术创新的集中点,导流方案确保了施工期复杂流量条件下航运畅通;深水、大流量、厚覆盖层河床大江截流及综合难度世界第一的导流明渠截流顺利实施保证了整个工程的按期完工;快速建成了 80m 深水高土石围堰,为二期泄洪大坝施工提供了干地施工条件。

本书全面地阐述了长江三峡工程中的导截流及深水高土石围堰工程的科技攻关过程及工程最终的实施方案。本书内容翔实、严谨、科学,对于今后的水利枢纽导截流工程及其他相关专业的地下防渗工程,具有重要的参考价值和指导作用,可供从事水利水电工程及地下防渗工程建设的广大工程技术人员借鉴,也可供大专院校相关专业的师生参考。

限于水平和经验,不足之处在所难免,敬请广大读者指正。

目 录

I 总 论

I.1 概述	3
I.1.1 三峡工程概况	4
I.1.2 三峡工程导截流及深水高土石围堰研究成果简介	7
I.1.2.1 施工导流及施工期通航研究	7
I.1.2.2 大流量深水河道截流技术	9
I.1.2.3 深水高土石围堰关键技术	12
I.2 国内外施工导截流与围堰工程理论、技术进展	14
I.2.1 导截流理论、技术进展	14
I.2.1.1 导截流理论进展	14
I.2.1.2 导截流技术进展	14
I.2.2 施工围堰理论与技术进展	24
I.3 施工导流通航研究	28
I.3.1 运用小尺度自航船模试验解决通航问题的创新技术	29
I.3.2 明渠体型及通航研究	29
I.3.3 特殊情况的明渠通航条件研究	32
I.3.4 导截流明渠水流特性数值实验室研究	33
I.3.5 导流明渠运行实践与分析	34
I.3.6 结论	36
I.4 大江截流研究	37
I.4.1 修建巨型导流明渠,为满足长江航运要求和降低截流难度奠定基础	37
I.4.2 研究深水截流堤头坍塌机理,为安全截流提供技术保障	38
I.4.3 深动水平抛垫底措施的研究及实践,缓解了深水截流难度	39
I.4.4 通过科学试验变换航道,确保截流期间长江航运畅通	43
I.4.5 积极采用高新技术,促进大江截流顺利进展	46
I.4.6 力克施工技术难关,强化施工组织管理,高效实现大江截流	46
I.5 导流明渠截流研究	48
I.5.1 明渠提前截流可行性分析	48
I.5.2 明渠立堵提前截流方案探讨	48
I.5.3 明渠提前截流双戗立堵研究	50
I.5.4 明渠提前截流垫底加糙技术研究	51

1.5.5	明渠提前截流抛投进占块石稳定性研究	51
1.5.6	明渠提前截流与底孔导流分流能力影响因素分析	52
1.5.7	运用枢纽调度减轻截流难度影响数学模型计算研究	53
1.5.8	明渠提前截流水文监测与水力要素分析预报	53
1.5.9	明渠提前截流实践	54
1.6	深水高土石围堰研究	57
1.6.1	围堰断面结构形式研究	58
1.6.2	围堰工程质量调查	58
1.6.3	利用离心模型试验新技术确定 60m 水深下抛填风化沙的密度和 坡角	59
1.6.4	应力应变有限元分析的作用与发展	60
1.6.5	柔性墙体材料的研制和施工控制方法的发展	61
1.6.6	振冲措施在水下风化沙体加密中的应用	62
1.6.7	新淤沙和风化沙的动力特性研究及其综合处理措施	63
1.6.8	粗粒径石料性能的研究	64
1.6.9	新施工设备研制、防渗墙新施工方法和工艺技术开发	64
1.6.10	围堰拆除过程中工程性状的验证分析	65

II 明渠导流及通航研究

II.1	概述	68
II.1.1	明渠导流、通航方案及研究过程	68
II.1.1.1	一期导流(第 2 年底到第 5 年底)围右岸	69
II.1.1.2	二期导流(第 5 年底到第 10 年底)围左部主河床	69
II.1.1.3	三期导流(第 10 年底到第 11 年 6 月)围右岸导流明渠	70
II.1.1.4	后期导流(第 11 年 6 月到第 15 年)	71
II.1.2	研究成果及评价	73
II.1.2.1	创新成果	73
II.1.2.2	社会效益	74
II.1.2.3	经济效益	74
II.2	导流明渠布置研究	76
II.2.1	弯曲河道水流特性	76
II.2.2	试验程序及研究过程	77
II.2.3	船队通过导流明渠时的航线选定	78
II.2.4	纵向围堰首部形式试验	78
II.2.5	明渠断面形式的选定	79
II.2.6	明渠冲刷后对通航的影响	79
II.2.7	减少明渠开挖工程量的进一步探讨	81

I.2.8	初设基本方案的验证及修改	82
I.2.9	混凝土纵向围堰进一步优化	83
I.2.10	小结	83
I.3	二期明渠导流及通航条件研究	85
I.3.1	明渠导流及通航运行跟踪试验	85
I.3.1.1	二期导流水力学试验	85
I.3.1.2	导流明渠泥沙淤积条件通航试验	86
I.3.2	施工期通航设施航线规划及航道整治	88
I.3.3	1997 年明渠实测地形对通航水流条件的影响	88
I.3.4	大江截流期明渠导流及通航	90
I.3.4.1	口门通航试验研究及成果分析	90
I.3.4.2	非龙口段预进占合理口门设置对明渠通航的影响	92
I.3.4.3	龙口段进占合龙明渠通航	93
I.3.5	三期明渠提前截流对明渠通航的影响	93
I.3.6	小结	93
I.4	提高明渠汛期通航能力	95
I.4.1	提高明渠通航能力试验研究及航运能力分析	96
I.4.1.1	三峡工程换推提高明渠通过能力试验	96
I.4.1.2	中型船队过明渠能力试验	96
I.4.1.3	长江三峡工程施工通航运输	97
I.4.1.4	三峡工程施工期通航设施、通航条件	98
I.4.2	明渠汛期通航研究与实船试验	99
I.4.2.1	三峡工程导流明渠汛期通航可行性研究	99
I.4.2.2	明渠汛期通航 4 000kW+2×1 000t 船队可行性研究	100
I.4.2.3	三峡工程明渠汛期换推措施研究	100
I.4.2.4	长江 05001 大功率推轮的研究试验和实航分析	101
I.4.2.5	“4 000kW+2×1 000t 船队可行性研究”实船试验成果和应用	101
I.5	二期导截流明渠水流特性数值实验室的建立	103
I.5.1	导截流明渠水流特性数值模拟现状	103
I.5.2	导截流数值模拟关键性技术	104
I.5.2.1	数值离散方法	104
I.5.2.2	自由表面的追踪	104
I.5.2.3	不规则边界的处理	104
I.5.2.4	科学计算可视化与动画制作	104
I.5.3	明渠水流特性数值实验室的二维数学模型	105
I.5.3.1	控制方程	105
I.5.3.2	正交曲线网格的生成	105
I.5.3.3	曲线坐标系下方程组的数值求解	106

I. 5.3.4	边界条件的处理	107
I. 5.3.5	数模计算结果及数模与物模、原型的相似性比较	107
II. 5.4	明渠水流特性数值实验室的三维数学模型	111
I. 5.4.1	控制方程	111
I. 5.4.2	曲线坐标系下的三维系流控制方程及其求解	112
I. 5.4.3	边界条件处理	112
I. 5.4.4	模型的基本性能	112
I. 5.4.5	数模计算结果及数模与物模、原型的相似性比较	113
II. 5.5	三维施工仿真模型的建立	114
I. 5.5.1	计算机技术的新前沿——可视化及三维图形技术	114
I. 5.5.2	三峡工程导截流三维实体模型的建立	115
I. 5.5.3	关键技术和创新点	116
I. 5.5.4	本系统在三峡工程的应用——以大江截流和明渠通航为例	117
II. 5.6	小结	120
II. 6	明渠导流及通航原型运行实践	121
II. 6.1	水力学观测	121
I. 6.1.1	流态	121
I. 6.1.2	流速	121
I. 6.1.3	水面线	123
I. 6.1.4	水面比降	123
I. 6.1.5	脉动压力	124
II. 6.2	船舶通航观测	124
I. 6.2.1	航迹线	124
I. 6.2.2	对岸航速及通航能力	125
I. 6.2.3	施工通航保障措施的研究	126
II. 6.3	三峡航运管理局 1998 年洪水明渠汛期通航观测及分析	126
I. 6.3.1	1998 年三峡坝区汛期水情特点	126
I. 6.3.2	明渠汛期通航水流条件观测	126
II. 6.4	明渠汛期试航	127
II. 6.5	小结	129
II. 7	船模在导流明渠通航问题研究中的创新和作用	130
II. 7.1	自航船模应用简介	130
II. 7.2	基本原理和应用技术特性	130
I. 7.2.1	船模的比尺	130
I. 7.2.2	尺度效应及其修正	130
I. 7.2.3	自航船模的航行特性	131
II. 7.3	研究方法和测试技术设备	132
I. 7.3.1	研究方法	132

I.7.3.2 测试技术设备	132
II.7.4 创新技术和发展	134
I.7.4.1 船模相似性及相似衡准参数分析	134
I.7.4.2 测控技术的创新和发展	134
I.7.4.3 研究分析方法的发展	134
II.7.5 船模在明渠通航几个关键问题研究中的作用	136
I.7.5.1 试验航线的选择和优化	136
I.7.5.2 提高通航流量标准的研究	137
I.7.5.3 汛期明渠冲淤后碍航情况和防护位置效果的试验研究	138
I.7.5.4 大江截流期明渠通航条件及相互影响	138
II.7.6 模型试验与实航比较	140
I.7.6.1 明渠流速流态及通航流量	140
I.7.6.2 汛期试航	140
II.7.7 小结	140

III 大江截流研究

III.1 概述	145
III.1.1 研究过程	145
III.1.1.1 第一阶段(1957~1978年)	145
III.1.1.2 第二阶段(1982~1992年)	145
III.1.1.3 第三阶段(1993~1997年)	145
III.1.2 研究成果	146
III.1.2.1 水力学方面	146
III.1.2.2 堤头坍塌与平抛垫底	147
III.1.2.3 钱堤进占、合理口门设置及施工通航	147
III.1.2.4 大江截流跟踪试验及预报效果	148
III.1.3 截流试验成果评价	148
III.1.3.1 主要技术成就	148
III.1.3.2 主要创新点	149
III.1.3.3 经济效益与社会效益	149
III.2 截流水力学试验	150
III.2.1 水力学试验	150
III.2.1.1 研究采用的技术路线	150
III.2.1.2 试验条件	150
III.2.2 非龙口段进占水力学问题	151
III.2.2.1 研究内容	151
III.2.2.2 研究成果	151

■.2.2.3 成果分析	153
■.2.3 龙口合龙水力特性	154
■.2.3.1 研究内容	154
■.2.3.2 研究成果及分析	155
■.3 钱堤坍塌与平抛垫底	157
■.3.1 截流钱堤坍塌机理	157
■.3.1.1 水力学特性和钱堤坍塌现象	157
■.3.1.2 坍塌机理的理论研究	157
■.3.2 堤头坍塌计算模型	167
■.3.2.1 无水流冲刷条件下钱堤稳定分析与计算	167
■.3.2.2 水流冲刷作用下围堰钱堤稳定性分析	168
■.3.2.3 截流堤头坍塌预报	170
■.3.3 防坍塌措施	173
■.3.3.1 采用施工措施使抛投材料到位	173
■.3.3.2 小粒径材料截流	173
■.3.3.3 对围堰基础实施平抛垫底	173
■.3.4 平抛垫底的主要技术特性	174
■.3.4.1 预平抛垫底石渣料的漂移特性研究	174
■.3.4.2 平抛垫底沙砾石料漂移特性研究	179
■.3.4.3 平抛垫底料度汛试验研究	187
■.3.5 平抛垫底效果分析	195
■.3.5.1 平抛垫底的作用	195
■.3.5.2 平抛垫底施工水流环境	195
■.3.5.3 平抛垫底施工效果	196
■.3.5.4 度汛效果分析	197
■.4 钱堤进占合理口门设置及施工通航	198
■.4.1 船模缩尺效应	198
■.4.2 河势变迁及其对通航水流条件的影响	200
■.4.3 钱堤汛前预进占合理口门宽度的确定	202
■.4.3.1 上钱堤口门宽度的确定及口门通航研究	202
■.4.3.2 口门通航研究	202
■.4.3.3 上钱堤口门宽度和下钱堤口门宽度的确定及口门通航研究	203
■.4.3.4 原型资料检验	207
■.4.4 非龙口段进占口门宽度	207
■.4.4.1 研究内容	207
■.4.4.2 试验成果及分析	207
■.4.4.3 原型、模型非龙口段进占成果对比	211
■.4.5 截流施工期明渠淤积	211
■.4.5.1 明渠提前分流的水文特征	212

■.4.5.2 明渠淤积状态	212
■.4.5.3 明渠淤积对施工通航的影响	212
■.5 水文预报与观测	215
■.5.1 水情预报	215
■.5.1.1 坝址以上水文特性及站网布设	215
■.5.1.2 预报方案的研究制定与实施	215
■.5.1.3 预报效果评价	222
■.5.2 水文测报	223
■.5.2.1 主要技术路线及站网布设技术	223
■.5.2.2 水文数据采集与发布	226
■.5.2.3 龙口测验技术研究与实施	228
■.5.2.4 水文监测成果及应用	230
■.6 跟踪试验及成果评价	241
■.6.1 跟踪预报技术路线及技术手段	241
■.6.1.1 跟踪预报技术路线	241
■.6.1.2 跟踪预报技术手段	241
■.6.2 跟踪预报试验	242
■.6.2.1 跟踪预报方法的建立	242
■.6.2.2 跟踪预报基础性研究	242
■.6.3 跟踪现场实况预报试验	244

IV 明渠截流研究

IV.1 概述	251
IV.1.1 明渠截流研究过程	251
IV.1.2 主要研究成果	252
IV.1.3 主要研究成果评价	253
IV.1.3.1 社会效益	253
IV.1.3.2 经济效益	254
IV.2 明渠提前截流双戽立堵截流研究	255
IV.2.1 世界水利工程双戽截流的工程实践	255
IV.2.2 双戽截流的水力学条件	257
IV.2.3 双戽截流基本方案及水力学参数	258
IV.2.4 上、下戽堤进占配合落差分配敏感性研究	260
IV.3 明渠提前截流垫底加糙技术研究	262
IV.3.1 加糙拦石坎结构型式	262
IV.3.2 加糙拦石坎施工时机	263
IV.4 明渠提前截流抛投进占块石稳定性研究	265
IV.4.1 块体抗冲稳定的基本关系式	265

IV.4.2	基本关系式在平堵、立堵水流条件下的应用	267
IV.4.2.1	用于平堵截流块体抗冲流速计算	267
IV.4.2.2	三元试验及立堵截流块体抗冲流速的计算	268
IV.4.3	几个问题的讨论	272
IV.4.4	人工块体的抗冲稳定特性	273
IV.4.4.1	不同形状块体的比较	273
IV.4.4.2	块体串连的效果	274
IV.4.4.3	混凝土四面体的抗冲能力和块重的关系	274
IV.5	明渠提前截流与明渠通航影响研究	276
IV.5.1	截流对施工期通航的影响	276
IV.5.2	改善明渠施工期通航条件措施	276
IV.6	明渠提前截流与底孔导流能力影响因素分析	278
IV.6.1	葛洲坝控制水位对截流落差的影响	278
IV.6.2	二期上、下游围堰拆除对截流落差的影响	279
IV.6.3	二期下游围堰拆除对截流落差的影响	280
IV.6.4	上、下游设截流基地时围堰拆除对截流落差的影响	282
IV.7	运用枢纽调度减轻截流难度影响数学模型计算	284
IV.7.1	基本方程及求解方法	284
IV.7.1.1	一维模型的基本方程及求解方法	284
IV.7.1.2	二维模型的基本方程及求解方法	284
IV.7.2	数学模型验证结果	286
IV.7.3	招标方案计算结果	287
IV.7.4	比选方案计算结果	290
IV.7.5	葛洲坝不同运行控制水位对明渠截流影响的计算分析	292
IV.8	明渠提前截流水文及施工风险分析	293
IV.8.1	水文风险分析	294
IV.8.1.1	水文风险的研究思路和方法	294
IV.8.1.2	用历时曲线推求设计流量的水文风险	294
IV.8.1.3	基于 Poisson 过程的截流水文风险分析	295
IV.8.1.4	结果分析	296
IV.8.2	明渠提前截流施工风险分析	298
IV.8.2.1	基于龙口落差的提前截流施工风险率数学模型	299
IV.8.2.2	截流施工风险率的计算成果分析	299
IV.9	截流水文监测与水力要素分析预报	302
IV.9.1	主要任务及内容	302
IV.9.2	明渠截流水文信息系统	303
IV.9.3	高新技术及其应用	304
IV.9.4	明渠截流水文工作	306
IV.9.5	小结	307

IV.10 明渠截流数字仿真系统	308
IV.10.1 虚拟现实与仿真技术概述	308
IV.10.2 集成系统概述	308
IV.10.3 系统构建	309
IV.10.3.1 交互性系统总体设计	309
IV.10.3.2 系统功能	309
IV.10.3.3 系统特点	313
IV.11 明渠提前截流跟踪及预演试验	315
IV.11.1 二期围堰实拆地形对截流终落差及分流能力的影响	315
IV.11.2 明渠截流上游戗堤左岸填筑施工技术方案试验	316
IV.11.3 明渠截流下游戗堤龙口段平抛垫底施工技术方案试验	316
IV.11.4 截流流量 $11\,000\text{m}^3/\text{s}$ 龙口段合龙水力学条件预报	317
IV.11.5 非龙口段和龙口段水力学条件复演及跟踪预报	318
IV.11.5.1 截流水力学条件复演	319
IV.11.5.2 截流水力学条件预报	320
IV.11.6 小结	321

V 深水高土石围堰研究

V.1 概述	325
V.1.1 二期围堰研究过程	325
V.1.2 二期围堰研究成果	326
V.1.3 二期围堰实施和运用情况及其质量评价	329
V.2 围堰填料的基本性质和力学参数研究	331
V.2.1 围堰填料的研究概况	331
V.2.2 填料的物理和力学性质试验	332
V.2.2.1 风化沙物理性质和压实性质	332
V.2.2.2 风化沙的力学性质	333
V.2.2.3 石渣料的一般性质	333
V.2.2.4 混合料的一般性质	335
V.2.2.5 平抛垫底砂砾石料的特性	339
V.2.3 围堰填料的本构关系研究和本构参数	341
V.2.4 60m 水深下风化沙抛填料的密度和水下坡角的研究	345
V.2.5 颗粒破碎对粗粒材料抗剪强度特性的影响	346
V.2.6 关于卸荷模量的讨论	347
V.2.7 大型剪切试验仪的研制和材料的级配模拟	350
V.2.8 二期围堰反滤料的研究	352

V.3 二期围堰的应力应变分析	355
V.3.1 二期围堰数值计算的目的是任务	355
V.3.2 二期围堰计算工作的历程和主要内容	355
V.3.3 技术设计阶段有限元计算工作的安排	357
V.3.4 计算断面、网格和边界条件	358
V.3.5 计算的数学模型	359
V.3.5.1 E- μ 模型	360
V.3.5.2 E-B 模型	361
V.3.5.3 样条函数模型	361
V.3.5.4 南京水利科学研究院模型	361
V.3.5.5 河海大学模型	362
V.3.5.6 应变空间模型	362
V.3.5.7 B-G 模型	363
V.3.5.8 剪胀模型	364
V.3.6 模型的计算参数	365
V.3.7 计算条件和计算方案	366
V.3.8 基本方案的计算结果	367
V.3.8.1 低双墙方案	367
V.3.8.2 高双墙方案	369
V.3.8.3 不同计算模型的基本方案	369
V.3.8.4 “工程法”的计算成果简介	370
V.3.9 比较方案的主要计算成果	370
V.3.10 二期围堰技术设计方案论证的有限元计算	371
V.3.11 施工期的跟踪计算	375
V.3.12 二期围堰在 1998 年洪水期的表现和分析	379
V.3.13 二期围堰的反馈分析研究	381
V.3.14 按实际竣工情况的应力应变分析及优化设计断面的验证	386
V.4 断面结构的离心模型试验验证	392
V.4.1 断面形式的离心模型试验验证及粗颗粒石料相似律研究	392
V.4.2 土工离心模型试验原理及比尺关系	393
V.4.3 模型设计	394
V.4.4 围堰填料的模拟方法研究	395
V.4.5 离心机、位移量测技术及试验条件	397
V.4.6 试验结果及其分析	398
V.4.6.1 试验结果	398
V.4.6.2 模型 No. 5 的有限元计算结果与离心模型试验结果之比较	401
V.4.7 几点认识	401