

# 中国水利水电工程 技术进展

主 编

邵维文 赵文谦

梁在潮 董曾南 雷志栋



海洋出版社

1010772

# 中国水利水电工程技术进展

主 编

邵维文 赵文谦

梁在潮 董曾南 雷志栋

海洋出版社

1999年·北京

## 内容简介

本书主要反映近 20 年来我国在水工水资源、泥沙工程、海岸和江河治理、水工建筑、水利施工、环境保护等方面所取得的一些成就,可供广大科研、教学人员和研究生参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

中国水利水电工程技术进展/邵维文等主编—北京:  
海洋出版社,1999.4  
ISBN 7-5027-3513-5

I. 中… II. 邵… III. 水利工程-工程技术-进展-中国  
IV. TV-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 10125 号

---

责任编辑:方菁

海洋出版社 出版发行

(100081 北京市海淀区大慧寺路 8 号)

上海交通大学印刷厂印刷 新华书店发行所经销

1999 年 4 月第 1 版 1999 年 4 月上海第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:55

字数:900 千字 印数:1—450 册

定价:100.00 元

海洋版图书印、装错误可随时退换

# 前 言

中国改革开放已经走过 20 年的光辉历程,在这艰苦奋斗、励精图治的 20 年里,我国的水利水电界取得了一大批具有国际国内先进水平的研究成果。为了推广优秀科研成果和先进设计、施工经验,促进水利水电工程界的学术交流,让全社会更加深入、全面地了解我国水利水电事业的辉煌成就,我们组织编写了这部有代表性的大型学术论文集——《中国水利水电工程技术进展》。本文集从理论和实践等侧面全方位反映了我国水利水电工程所取得的辉煌成就的方方面面。主要内容包括:水文水资源、泥沙工程、海岸和江河治理、水工建筑、土地地基、农田水利、水利经济;水工程建设与运行管理中有关应用技术与基础研究的科研成果;新材料、新结构、新工艺、新设备、新技术的开发与应用等。其中有一些论文是获省、部级以上科技奖或基金资助项目的成果,有一些论文论述的是水利水电工程重大项目的关键技术,还有一些论文是学术上有特色、代表学科前沿并为学术界关心的最新科技研究成果,特别是高新科技领域内各种复杂问题的有独特见解,对推动国民经济发展有明显的社会效益和经济效益的研究成果。

在世纪之交的今天,我国的水利水电事业正面临难得的发展机遇。如果本书的出版能为我国水利水电事业再创辉煌尽绵薄之力,并真正为广大读者构筑起交流信息的桥梁,我们将感到由衷的欣慰。

本文集的出版得到各有关单位领导、专家和广大科研、教学人员的关心和支持,在此谨向他们表示衷心感谢!

编者

1998. 12

# 目 次

葛洲坝、三峡工程建设与现代施工技术 .....	杨光照 (1)
三峡工程施工概况和若干关键技术问题 .....	戴会超 张超然 (11)
三峡工程大江截流设计专题研究与论证 .....	高黛安 周良景 (18)
长江三峡永久船闸高边坡施工技术研究 .....	谢向荣 苗胜坤 (23)
三峡水利枢纽一期土石围堰设计与施工 .....	夏仲平 周良景 (29)
隔河岩大坝混凝土浇筑缆机布置设计 .....	翁永红 (37)
漫谈三峡工程建设中的水力学问题 .....	时启燧 (43)
三峡工程泄水建筑物的布置 .....	周胜 郭军 刘学斌 (51)
开辟长江口北支 5 万吨级航道的设想 .....	黄志良 仇锦梅 陆伟等 (60)
开发崇明岛滩涂对长江南支的影响及其意义 .....	金忠贤 刘锡铭 卞为民 (66)
黄河三门峡至花园口区间实时遥测洪水预报系统的开发与建设 .....	许雨新 崔家骏 辛国荣等 (74)
黄河下游断流影响、原因及对策 .....	张俊华 张红武 陈书奎等 (82)
南水北调中线穿黄工程施工研究 .....	卢学东 (88)
黄河防洪工程调度决策方法应用研究 .....	刘学工 高新平 单伟等 (92)
小浪底库区泥沙淤积及下游减淤作用研究 .....	张俊华 张红武 (98)
小浪底水库拦沙运用期下游京广铁路桥以上游荡性河段河道整治初步试验研究 .....	姚文艺 赵业安 曹文忠等 (104)
小浪底工程外部变形测量水平固定点控制网设计及观测精度分析 .....	丁万庆 刘豪杰 杨丽娟 (111)
发展节水型农业是解决黄河流域水资源紧缺的重要途径 .....	.....
.....	杨汉颖 刘志宏 钱云平等 (114)
联合调度是根治海河的有效方法 .....	彭瑞善 (119)
海河堤防对杂填土地层的基础处理 .....	刘振湖 须振伟 (123)
浙江淤泥质海湾口门汊道底床冲淤及对围垦工程的响应 ...	夏小明 李伯根 谢钦春 (126)
上海市滩涂使用情况调查分析 .....	金忠贤 苏德源 周俊德等 (132)
上海浦东三甲港水闸南侧围滩工程的影响分析研究 .....	金忠贤 赵安昌 张全根 (140)
互花米草植物工程在风暴潮中护岸的作用 .....	卢声明 (146)
江河实测垂线水沙因子分布的规律性 .....	惠遇甲 (152)
河流泥沙二维平衡运动的机理及规律 .....	王志良 (158)
河流推移质输沙率的计算公式 .....	张俊华 张红武 (163)

弯曲河道泥沙悬移质扩散方程及含沙量分布的研究·····	许建林 曹叔尤 黄尔等(169)
江河中悬移质运动规律的研究·····	王志良(175)
水库高含沙水流泥沙数学模型·····	曹如轩 王新宏 程文等(182)
波浪、潮流联合作用下二、三维嵌套悬沙数学模型·····	朱之夏 王尚毅 赵子丹(189)
利用风力计算水体含沙量的方法研究·····	孙连成(196)
输沙管流流速分布及浓度分布的研究·····	徐根海 张兴荣(202)
粘性泥沙起动流速的探讨·····	张兰丁(208)
河床下切整治研究·····	程禹平(214)
河道整治工程对断面流速分布的影响·····	李贞儒(219)
回水对挟沙水流流速分布及紊动特性影响的初步研究·····	冯伶亲 李运来 周磊等(223)
水—沙两相流基本方程·····	魏良琰 李贞荣(232)
调压室短暂漏空气液两相瞬变流的数学模型·····	杨开林(243)
双重孔隙介质中水平井两相渗流·····	刘慈群(250)
潮汐河流闸基非恒定渗流解法初探·····	王亦勤(256)
土坝渗流分析的非恒定流方法·····	刘子芳(262)
渗流方程的加权因子方法·····	梁栋 赵卫东(268)
层流向紊流过渡时的速度分布·····	赖天华 黄瑞瑶 唐永洁等(274)
紊流阻力统一规律及过渡区水工模型律·····	王学功(279)
以流体自控振荡射流促进河道输沙水体增氧与航道浚深 ·····	孙厚钧 宋锡铭 曾庆华等(289)
二元射流作用下点面脉动壁压的幅值计算·····	林继镛 练继建(300)
三维离散涡丝模拟射流场涡结构的研究·····	林建忠 朱丽兵 秦学工(308)
小扩散角扩散管内有限空间射流流动的混合有限分析解·····	龙新平 陈文学(314)
潮汐河口排取水口布置及其水力热力特性·····	李瑞生 柴方昆 刘长贵等(320)
潮汐河口悬移质动床实物模型·····	熊绍隆 胡玉棠(329)
涌潮作用下丁坝护面板水动力试验研究·····	黄世昌 林炳尧 杨永楚等(335)
显式迎流 FEM 在河口近海研究中的应用·····	倪勇强 耿兆铨 朱军政等(345)
自由面重力流动的数值模拟·····	潘存鸿 许学咨 林炳尧(351)
潮汐河流改善水流污染的试验研究·····	邢福璘 王淑玲 邓家泉(358)
河流洪水中的动量传递和能量损失·····	庞炳东(367)
泄洪风险计算方法的比较·····	王惠民 王长新 徐祖信等(373)
白山水电站泄洪消能试验研究·····	刘仁山 高树华 孙思惠(379)
景洪市防洪初探·····	毛革(391)
长兴县泗安水库上游水位闸门开度泄流量关系曲线延长分析·····	王正祥(396)

溢流曲面的多目标优化·····	汪树玉 彭明祥(402)
北京地区管井降水若干问题分析·····	王奎(408)
浅水河道型水域水电厂温排水数值预报·····	陆敬荣 徐欣渡(414)
大型泵站进水池中涡流的不可避免性和有害旋涡的消除·····	方平 蒋觉先(420)
有关漫湾水电站表孔弧形闸门原型静态应力观测的试验研究 ·····	····· 王洪 沈东 王时越等(426)
天生桥一级水电站混凝土面板堆石坝设计 ·····	方大风(433)
水电站拦污栅结构栅—坝耦合振动分析·····	张立翔 喻军华(443)
抽水蓄能电站公众参与工作的特点、方法 ·····	吴春旭 陈永清 麦达铭(449)
从十三陵抽水蓄能电站浅谈实施环境监理的重要性·····	金卉 麦达铭 黄火键等(456)
广州抽水蓄能电站蚀变岩的工程处理措施·····	廖建强(462)
中型抽水蓄能机组的制造与采购方式探讨·····	田树棠(468)
琅琊山抽水蓄能电站尾水事故闸门底板动水压力模型试验研究 ·····	刘德有 索丽生 刘启钊(474)
琅琊山抽水蓄能电站上、下库进出水口可行性阶段水工模型试验研究 ·····	张兰丁 陈文 曹嘉军(482)
毕节地区的渠道防渗·····	周亚驰(486)
高压水射流除垢机理的研究·····	李少华 张卫会 李泓源等(489)
射流泵—离心泵装置特性及其设计方法·····	刘景植(495)
三峡换流站直流绝缘子的研究及选型·····	梁波(502)
BC30 液压铰特点及在三峡成槽试验 ·····	李军 蒋振中 胡迪煜等(507)
大型垂直升船机塔楼结构动力分析研究·····	扈晓雯 黄泰仁 熊立刚(513)
水闸闸室底板设置齿墙时抗滑稳定计算方法探讨·····	俞根新(518)
无反射造波数值波浪水槽·····	王永学(526)
利用 Cokerlet 理论分析平缓岸坡的波浪变形及破碎 ·····	崔丽芳 李玉成 滕斌(534)
非线性波浪 0—1 混合元方法的三维数值模式 ·····	孙大鹏 李玉成(541)
滑波三角浪的数值计算·····	汪定扬 明道华 周建华等(547)
三维潮汐流的混合有限分析数值解·····	槐文信 小松利光(555)
具有自由表面流动的数值模拟—ALE 方法的应用 ·····	陈大宏 Gerhard Rouve(561)
一二维非恒定流连接计算数学模型·····	袁欣(567)
杭嘉湖南排工程南台头闸水动力学试验研究·····	吴子荣 包中进(573)
低噪声低空化数的重力式水洞及其应用·····	柴恭纯 刘春阳(579)
关于初生空化的试验技术·····	杨志明(588)
高坝挑流消能研究综述·····	潘瑞文(593)

宽尾墩联合消能工在我国的研究和发展	谢省宗 李世琴 李桂芬(600)
水工水力学中的高速水流与超高速水流	柴恭纯(624)
网栅工消能工水力学问题	刘思光 刘健 吕良等(635)
筛网消能工的应用及其目前设计与研究中几个问题的商榷	凌传威 凌江(643)
水垫塘三元流态及消能特征的数值和实验研究	许唯临 廖华胜 杨永全等(649)
雾化水流理论	梁在潮(656)
水利枢纽泄洪雾化问题研究	刘士和 梁在潮(676)
挑流水舌雾化的研究	胡敏良(683)
高浊度水管道混凝试验研究	张红武 李远发 张俊华等(688)
双向水流月牙肋岔管水力特性研究	蔡付林 索丽生 胡明(695)
于桥水库流动特性的数值模拟	吴致敏 曲华林(701)
用模糊综合评判方法确定新疆北疆油田乌伦古河引水工程多方案选择	雷小牛(707)
海底管线油气混输关键装备的实验研究	郑之初 吴应湘 李东晖(712)
中子活化示踪技术的研究及其应用	孙连成 尹毅(717)
马俐奥特水箱理论应用技术开发	于兰发 王俊华 曹志超(721)
气流模型在怀洪新河河道整治中的应用	虞邦义 吕列民 王久晟(725)
大坝安全监测自动化技术的新进展	储海宁(731)
白河堡水库大坝防渗体反滤层的设计与施工	冉星彦(740)
基于随机泛函的变分原理及其石坝可靠度中的应用	杨绿峰 麻荣永 李桂青(746)
广义参数有限元法计算薄拱坝	杨绿峰 麻荣永 李桂青(752)
拱坝优化的健壮性约束与合理体型研究	刘国华 汪树玉(757)
水利水电工程岩质边坡开挖爆破技术研究	苗胜坤 谢向荣(763)
长隧道水下岩塞爆破泄流研究	罗惠远 丁贤文 李其军(769)
天荒坪电站地下厂房爆破震动控制	刘兴昌 周四平(778)
高压透水衬砌隧洞的边界元与有限元分析	卢兆康(783)
涵洞 CAD 的设计及在工程中的应用	冯新权 徐之甫 陈英(790)
浅议高层建筑深基坑边坡支护工程的成败	吴长敏(795)
山西太原一电厂汾河一坝西干渠改扩建工程及效益分析	张灵璞 王静 姜丽丽(798)
试论沙棘在砒砂岩地区沟道治理中的特殊功能	毕慈芬 李桂芬(802)
干旱地区沟道植物坝的壅水计算及其合理坝距	拾兵 曹叔尤 毕慈芬等(816)
干旱、半干旱地区抽水蓄能电站环境影响评价的特点	黄火键 麦达铭 陈永清等(822)
韶山灌溉工程环境影响研究	秦林(826)
模拟技术在区域干旱分析中的应用	顾颖 刘培(832)
毕节山区的旱地灌溉	常瑜(838)



毕节附廓水库滑坡机制分析及工程治理.....	陈大新(843)
论岩溶地区人为地质灾害.....	赵孝珊(847)
非岩溶地区土坝防渗处理——以毛栗水库大坝防渗处理为例.....	陈明贵(850)
冰温度胀压力理论计算与实测的若干问题.....	岳前进 毕祥军 李洪升(853)
明渠冰盖输水观测研究.....	李善征 李为民 丁贤文(859)
一点多址微波通信系统在城市供水系统中的应用.....	许小华(871)
时变灰色模型在城镇用水量预测中的应用——时变灰元参数的动态选择初探 .....	柳景青 张土乔 程朴(877)
2000年全国乡镇需水量及乡镇供水发展预测模型 .....	沙鲁生 蔡守华(883)

# 葛洲坝、三峡工程建设与现代施工技术

杨光照

(长江水利委员会设计院, 武汉 430010)

**摘要** 长江葛洲坝水利枢纽、三峡水利枢纽分别为我国已建、在建的最大水利水电工程。本文从导截流工程、土石方工程、混凝土施工、金属结构与机电安装四个方面, 论述采用的现代施工技术、国防及国内先进水平。表明特大型水利水电工程必须采用配套的、大容量的施工设备、高度机械化施工、现代施工技术和科学的施工管理, 才能优质高速完成建设任务。

**关键词** 葛洲坝工程 三峡工程 施工新技术 先进水平

## 1 前言

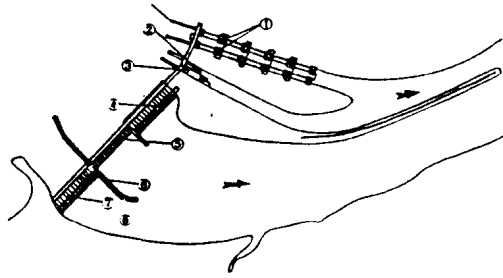
葛洲坝水利枢纽工程(图1)是我国已建成的最大水利水电工程(表1), 装机容量 271.5 万 kW。分两期施工。第一期围在左岸二、三江。建造二江泄水闸、二江电站、三江的 2 号及 3 号船闸、冲砂闸, 利用大江通航和宣泄施工流量。第二期大江截流, 围主河床, 建造大江电站、大江冲砂闸及 1 号船闸。利用二江已建的 27 孔泄水闸宣泄施工流量, 利用 2 号、3 号船闸及三江航道通航。1974 年 10 月 20 日开始浇二江主体工程混凝土, 1981 年元月 4 日大江截流成功, 同年 7 月二江第一台 17 万 kW 机组并网发电, 12 月 18 日大江基坑开浇混凝土。1986 年 5 月 31 日大江第一台 12.5 万 kW 机组发电。1988 年完建。1991 年 11 月 27 日通过国家竣工验收。

表 1 葛洲坝及三峡水利枢纽工程量及施工强度

项 目		土石方开挖	土石方填筑	混凝土	金属结构安装	钢筋
主体建筑物工程量	葛洲坝	5 799	3 088	1 042	7.29	17.7
	三峡	10 259	4 149.2	2 714.6	28.08	32.7
年最大强度	葛洲坝	1 259	274	202.9	2.22	
	三峡	2 251	787	410.9	4.6	
月最大强度	葛洲坝	226	116	24.5		
	三峡	268	300	46.0		

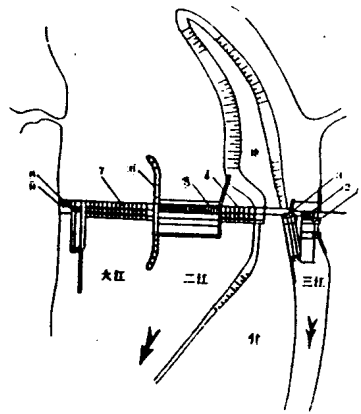
表注: 葛洲坝工程均为实际值, 三峡工程均为设计值。

三峡水利枢纽(图2)是世界上最大的水利水电工程(表1), 装机容量 1 820 万 kW。分三期施工。第一期围右岸, 开挖导流明渠、建造混凝土纵向围堰及三期碾压混凝土围堰基础部分, 利用主河床通航和宣泄施工流量, 位于左岸山间的永久船闸、临时船闸同时开始施工。第二期围主河床, 建造泄洪坝段、左岸厂房坝段及电站厂房(14 台 70 万 kW 机组)。江水由导流明渠宣泄, 船只由导流明渠及临时船闸通过。第三期围右河床, 抢筑三期上游碾压混凝土围堰, 以后靠其与下游土石围堰全年挡水, 建造右岸厂房坝段及电站厂房(12 台 70 万 kW 机组)。江水由主



- ①永久船闸;②升船机;③临时船闸;④左厂房(14台)坝段;  
⑤泄洪坝段;⑥混凝土纵向围堰;⑦右厂房坝段(12台);⑧导流明渠

图1 葛洲坝水利枢纽平面布置图



- ①三江3号船闸;②三江冲砂闸;③三江2号船闸;  
④三江电站厂房;⑤二江泄水闸(27孔);⑥钢板桩围堰;  
⑦大江电站厂房;⑧大江1号船闸;⑨大江冲砂闸;  
⑩防淤堤;⑪西坝

图2 三峡水利枢纽平面布置图

河床内已建的 22 个  $6\text{m} \times 9\text{m}$  ( $\nabla 56.5\text{m}$ ) 导流底孔宣泄, 船只由临时及永久船闸、升船机通过。

1992 年 11 月 12 日, 葛洲坝水利水电工程集团公司首批千余名职工开进三峡坝区, 开始施工准备工程。一期土石围堰于 1993 年 10 月 24 日开始下河填筑, 1994 年 7 月 6 日完工。同年 12 月 6 日开始浇筑混凝土纵向围堰, 比原计划提前 10 个月。位于左岸坡以上的临时及永久

表2 世界三大立堵截流特性比较

项 目	截流方式	截流时间及标准	截流	龙口	龙口护	龙口	最大或	最大	龙口	抛投	日最大	
			流量	宽	底或垫	水深	最终	流速	抛投量	历时	抛投	
			(m <sup>3</sup> /s)	(m)	底高程	(m)	落差	(m/s)	万 m <sup>3</sup>	(h)	(m <sup>3</sup> /d)	
三 峡	长江 截流 设计 情况	不垫底 单线 立堵	11月下旬至 12月上旬, 旬5%最大 日平均流量	14000 至 9010	180		41.98 至 60.0	0.67 至 0.29	2.95 至 1.91	46.16	240 (10d)	69200
		垫底至 ▽40m 单线 立堵	11月中旬至 下旬5%最 大日平均 流量	19400 至 14000	130	40	27.4 至 28.5	1.24 至 0.8	4.23 至 3.29	20.8	96 (4d)	70000
三 峡	实际 垫底	第一 阶段 单线 立堵	1997年10月 26日8时 至次日 6时30分	10600 至 11600	130 至 40	40 至 45	22.4	0.66	4.22	12.09	22.5 (h)	120900
		第二 阶段 单线 立堵	1997年11月 8日8时 52分至 15时30分	8480	40 至 0	40 至 45	21.0	0.35	3.0	1.92	6.5 (h)	19176
三 峡	明星截流 实际情况	单线 立堵	2002年12 月上旬5% 最大日平均 流量	9010	100	在钱坝 下游设 混凝土 齿板	22.8	3.5	6.13	16.37	120 (5d)	49000
葛 洲 坝	大江截流 设计情况	单线 立堵	12月下旬 及1月 上旬,5% 日平均流量	7300 及 5200	220	34	10.8	2.72	6.06	13.25	312 (13d)	26300
	大江截流 实际情况	单线 立堵	1981年1月3日 7时至1月 4日19时53分	4720 至 4190	203	33.2	10.7	3.23	7.1	10.6	36.4 (h)	73000
伊 太 普	设计情况	双线 立堵	10月5%日 平均流量	17000				7.0 (双钱)			528 (22d)	46000 (双钱)
	实际情况	双线 立堵	1978年10月 23日 至 10月30日	8100	上钱 160 下钱 153		上钱 25 下钱 40	上钱 1.98 下钱 1.76	6.1	77.0 双钱	168 (7d)	147000 上下钱 合计

续表 2 世界三大立堵截流特性比较

项目	小时最大 大抛投 车次 (车/h)	小时最大 抛投 强度 (m <sup>3</sup> /h)	小时平均 抛投 强度 (m <sup>3</sup> /h)	抛投块体	投入施工机械	备注
三峡				块径 0.2~0.3m 的块石含量 >50%,最大块 径 0.6m	77t 自卸汽车 69 辆 180~710hp 推土机 18 台,4~9.6m <sup>3</sup> 挖装机械 9 台	
				块径 0.1~0.3m 石渣,0.4~0.7m 中石,0.8~1.1m 大石最大 1.5t	32,45 及 77t 自卸汽 车各 34,30 及 24 辆 180~710hp 推土机 14 台,4~10m <sup>3</sup> 挖 装机械 17 台	
三峡	303	6375	5373	石渣、中石、 大石、特大石 (间歇期防冲)	自卸汽车 119 辆, 推土机 14 台, 挖装机械 22 台	戽堤顶宽 30m。上 下游预进占最大抛 投强度合计达 194 000m <sup>3</sup> /d、 17 100m <sup>3</sup> /h
	180	3718	2950	石渣、 中石、 大石	32,45 及 77t 自卸 汽车各 31,24 及 44 辆、推土机 6 台 挖装机械 13 台	开始抛投施工时,导 流明渠分流比 94.8% 龙口落差为 0.29m 戽堤顶宽 25~28m
三峡				块石(最大粒径 1.8m)、 30t 混凝土四面体	77t 自卸汽车 40 辆、 320~710hp 推土机 10 台 8m <sup>3</sup> 挖掘机 5 台 5.4~9.6m <sup>3</sup> 装载机 15 台,起重机械 30 台	戽堤顶宽 25m
葛洲坝	96	800		块石、重 25t 混凝土四面体	20~45t 自卸汽车 152 辆、180~410hp 推土机 14 台,4~ 6.9m <sup>3</sup> 挖装机械 12 台,起重机械 25 台	
	234	3600	2930	块石,特大石、重 25t 混凝土 四面体	24~45t 自卸汽车 220 辆,180~410hp 推土机 28 台,4~ 6.9m <sup>3</sup> 挖装机械 40 台、起重机械 32 台	戽堤顶宽 25~28m
伊太普				块径 0.6~1.2m 块石、重 10t 混 凝土四面体	35,55 及 77t 自 卸汽车各 35,45 及 40 辆、推土机 46 台、 挖装机械多台	
				块径 1.2~1.5m 块石,个别重 10t 块石	32~35,52 及 75t 自 卸汽车各 32,44 及 34 辆,推土机 33 台 10m <sup>3</sup> 挖装机械 22 台	戽堤顶宽 30~35m

hp 是废止单位,1hp≈735.5w

船闸、厂房 1~6 号机组坝段同时进行大规模土石开挖工程。1996 年 10 月完成导流明渠堰内段开挖,开始拆除一期围堰。1997 年 10 月 6 日开始明渠通航。11 月 8 日长江截流成功,开始

二期工程建设。一期施工中完成的主体建筑物工程量:土石方开挖 9 265 万  $m^3$ 、土石方填筑 2 215 万  $m^3$ 、混凝土浇筑 348 万  $m^3$ 。

在葛洲坝及三峡工程的施工组织设计及施工中,大量开拓和采用现代施工技术成果达数百项。葛洲坝工程建成,标志着我国水利水电施工技术发展,步入世界先进水平。三峡工程建设,是我国水利水电事业的空前壮举,标志我国水利水电工程施工技术处于世界领先水平。

## 2 大江大河导截工程

### 2.1 截流

葛洲坝工程于 1981 年元月 3 日正式开始大江立堵截流,次日合拢。实测截流量 4 720~4 190  $m^3/s$ ,仅次于三峡、伊泰普水电站截流规模(表 2);截流最大落差 3.25m,历时 36h23min。

三峡工程二期长江截流设计流量为 11 月中、下旬 5%最大日平均流量 19 400~14 000  $m^3/s$ ,居世界首位。由于龙口水深达 42~60m,龙口抛投量大、抛投强度大,截流落差却不大(表 2),着重研究解决深水高强度抛投施工技术及堤头稳定措施,已于 1997 年 11 月 8 日截流成功。三期明渠截流设计流量为 12 月上旬 5%最大日平均流量 9 010  $m^3/s$ ,截流落差 3.5m,最大单宽能量达 314  $t \cdot m/(s \cdot m)$ 。

### 2.2 围堰

葛洲坝二期纵向围堰挡水后需要拆除,在我国首次采用格型钢板桩围堰。由日产一字型钢板桩构成直径达 19.87m、高 19.5m 的圆筒 31 个,圆筒间用半径 5.1m 的连弧段钢板桩连接,共用钢板桩 7 151t,筒内回填砂砾石 22.57 万  $m^3$ 。拆除后的钢板桩,1988 年又转用于龚嘴水电站消力塘整治工程的钢板桩围堰。

葛洲坝大江上游围堰最大堰高 49m,填筑量 282.6 万  $m^3$ ,采用两排共计 4.18  $m^2$  混凝土防渗墙作为堰体及砂砾地基防渗体。月最大土石填筑强度 105.6 万  $m^3$ ,日最大填筑强度 11.0 万  $m^3$ ,防渗墙造孔月最大进尺 12 245m,日最大进尺 558m(墙厚 0.8m)。

葛洲坝大江下游围堰填料,主要是水下抛投的含泥量为 30%~50% 的砂卵石与粘石岩石渣组成的混合物。第一年汛后迎水侧坡脚淤积泥层厚 2~8m,第二年汛后增为 5~10m,最厚达 16m,直接依靠混合物及淤积泥砂防渗。

三峡一期土石围堰地基上淤积有 4~8m 厚的粉细砂,若全部挖去,工期不允许。采用围封、盖重及防渗墙截渗措施,迎水侧采用水下抛投形成块石防冲堤。经 1994~1996 年汛期考验,渗水量很小,取得了在深厚粉细砂地基上直接建造围堰、土石坝的宝贵经验。

三峡二期上游围堰高达 82.5m,填筑量达 691.9 万  $m^3$ ,最大施工水深 60m,主要利用石渣及花岗岩风化砂作为填料。堰体水下部分及其砂砾地基深槽部位采用两道塑性混凝土防渗墙防渗,槽孔两侧各 2m 范围采用 75 及 150kW 振冲器振冲加密。堰体水上部分采用复合土工膜防渗。二期下游围堰高 68.5m,填筑量 549.6 万  $m^3$ ,上、下游围堰均要求在一个枯水期内完成,月最大填筑强度达 282 万  $m^3$ ,(其中上游围堰 146.6 万  $m^3/d$ ),为世界围堰工程首位。伊泰普上游围堰高 80m、下游围堰高 75m,填筑量分别为 577.6 及 383.5 万  $m^3$ ,两年建成,月最大填筑强度 200 万  $m^3$ 。在土石坝填筑中,仅次于塔贝拉坝(月最大填筑强度 450 万  $m^3$ )。我国密云土坝曾达 276 万  $m^3/月$ 。

## 3 土石方工程

葛洲坝及三峡工程土石方施工不仅工程时大、施工强度高、开挖面质量要求高、必须做好

挖填平衡,且既有干地又有水下开挖,贯穿整个施工过程,施工干扰大;施工难度也是水利水电工程中所罕见的。

### 3.1 爆破技术

葛洲坝工程地基岩性软弱,夹层多,岩层倾角平缓,开挖爆破对边坡及基础保护措施要求严。为此,在严格限制最大一段起爆药量前提下,采用梯段多排毫秒爆破。后来采用塑料导爆管,使分段有受限制。

1973年首次在葛洲坝工程中采用预裂爆破技术,在粘土岩和粘土质粉砂中,最大预裂深度,一期工程为26m,二期工程达38m,砾岩中达21m。一次预裂最大面积6800m<sup>2</sup>。共完成预裂壁面25万m<sup>2</sup>,节约投资2500万元。

葛洲坝大江上游围堰两道混凝土防渗墙,要求爆破拆除长度712m,拆除深度23m,墙体混凝土量2.4万m<sup>3</sup>,爆破后块体尺寸不大于300mm。一次爆破总装药量47.79t,装药孔数3548个。采用耦合间断的装药结构324段,双复式交叉串联非电起爆网路爆破技术。在距永久建筑物不到200m条件下,1998年元月17日一次爆破成功。

三峡工程爆破开挖深度大、石方爆破工程量大,且在强度高花岗岩层中爆破。主要采用深孔梯段爆破,以提高爆破率、改善爆破块度,选用爆破孔径100~110mm、药包直径80~90mm;梯段高度10m,不超过15m;孔距3.0~5.5m之间,最小抵抗线2.5~4.5m。为了保护建基面的完整性和高边坡稳定性,必须降低爆破振动强度,为此采用多段孔间微差爆破技术。临近开挖边线时,辅以预裂、光面、缓冲爆破等控制爆破技术。沿设计开挖轮廓面布置预裂孔,采用不耦合药包进行预裂爆破,形成预裂缝防震。光面爆破的爆破孔前方有自由面,其线装药密度较预裂爆破小,用于岩体较破碎不易形成预裂缝,或岩体坚硬形成预裂缝较窄部位。由于光面爆破消减松动爆破振动影响效果较差,必须采用多段微差爆破技术,严格控制单段药量。在光面爆破及预裂爆破孔前的2~3排深孔爆破采用缓冲爆破,进一步消减爆破振动强度。

为确保三峡主体工程底部基面及其下卧岩体的天然结构不因爆破振动影响而被破坏,我院先后在葛洲坝、万安、隔河岩等工程进行了10余年的保护层一次爆破的试验研究工作。表明只要对保护层创造临空面,采用宽孔距、小抵抗线、小药卷的梯段毫秒爆破,孔底设置柔性垫层;或采用水平预裂的爆破技术(须先掏先锋槽),可以一次爆除保护层。与常规的“层层剥皮”方式爆破保护层相比,工期可缩短一半,单价降低一倍左右。

### 3.2 土石方开挖

葛洲坝工程土石方开挖量5799万m<sup>3</sup>,其中岩石开挖900万m<sup>3</sup>,最大开挖深度54m,主要采用4m<sup>3</sup>电铲及6.9m<sup>3</sup>装载机装料,20.32及45t自卸汽车出渣。三峡工程土石方开挖量10259万m<sup>3</sup>,其中岩石开挖4208.8万m<sup>3</sup>,最大开挖深度176.5m,主要采用全液压、高压压钻孔设备及乳化混装药罐车进行钻爆作业,8~10m<sup>3</sup>挖掘机装料,32.45及77t自卸汽车出渣。

(1) 凿裂法开挖:工艺简单、施工安全、有效工作时间长。用于开挖三峡工程的全风化及强风化花岗岩。采用带有高温不软化裂土器的大功率,(250kW以上)拖拉机将岩体翻松成碎块,用推土机集料;也可用斗容不小于6m<sup>3</sup>全液压挖掘机直接开挖。

(2) 高边坡开挖:三峡永久船闸边坡开挖高度一般在120m以下,最高达176.5m;其中直立墙开挖最高达60m。要求在施工期不能局部失稳、掉块和产生较大位移。首先要合理安排开挖程序:洞挖应先于明挖工程进行,每个梯段的开挖与加固工程基本同步结束,再转入下一梯段开挖,以利应力释放和边坡稳定。在边坡开挖后的减缓变形阶段及时采用锚杆(挂网锚杆、系统锚杆)、预应力锚束或喷混凝土支护。在边坡施工中采用摄像计算机快速编录成图新技术,及时反映开挖边坡的地质信息,以指导喷锚支护快速施工。形成的上部坡面尽可能采用Netlon网及三维植被网快速绿化。

(3) 水下开挖:葛洲坝工程大江航道水下开挖量 240 万  $m^3$ ,最大开挖水深 30m,15m 以内水深,采用  $4m^3$ 铲扬式挖石船开挖。水深超过 15m 时,采用  $4m^3$ 索铲上趸船开挖;并将  $4m^3$ 铲扬式挖石船改装成多功能的抓扬式挖石船,用斗容为  $5m^3$ 的六瓣抓斗进行深水开挖。二期围堰体水下开挖量 26.7 万  $m^3$ ,要求在 1986 年 4~5 月内完成,采用两艘  $4m^3$ 铲扬式挖石船和 1 艘  $750m^3/h$ 链斗式采砂船,配  $280m^3$ 泥驳出渣。

三峡工程水下开挖量达 1 952.6 万  $m^3$ (包括淤泥淤沙清除量 756.4 万  $m^3$ )。淤泥淤沙采用绞吸式挖泥船清除。水深在 8m 以内的覆盖层,主要采用  $8m^3$ 全液压反铲开挖;8m 以下,采用链斗式采砂船开挖,石驳运往弃渣场。水下岩石开挖水深一般在 9.5m 以内,采用水上钻爆船钻孔装药爆破, $4m^3$ 铲扬式挖石船配 500~1 000t 石驳出渣。深水部位采用  $8m^3$ 抓斗清渣。

#### 4 混凝土施工

三峡工程主体建筑物绝大部分属大体积混凝土,工程量及其施工强度均居世界首位(表 3)。葛洲坝工程的主体建筑物多属墩板梁柱、孔洞多,结构复杂,过流面积大,混凝土标号高,混凝土施工组织与管理亦十分复杂。

表 3 主体工程混凝土浇筑规模与强度比较表

工 程	三峡	伊泰普	葛洲坝	大古力	古比雪夫	德沃夏克 (Dworsha)
混凝土总量(万 $m^3$ )	2714.6	1315	1042	800	734	543
年最大浇筑强度(万 $m^3/a$ )	410.9	304	202.9	270	314	221
月最大浇筑强度(万 $m^3/月$ )	46.0	34.8	24.5	37.8	38.9	18.4
月平均浇筑强度(万 $m^3/月$ )	26.7	20.5	16.9	22.5		10.1
日最大浇筑强度(万 $m^3/d$ )	1.89	1.39	1.88		1.9	

葛洲坝工程天然砂石骨料年开采能力达 315 万~350 万  $m^3$ ,配备 8 座混凝土拌和楼,月拌和混凝土总能力 35.5 万  $m^3$ 。拌和楼出料以准轨火车运输为主(配  $3m^3$ 及  $6m^3$ 立罐),汽车运输为辅(配  $3m^3$ 卧罐)。主要采用起重能力为 20t 的 MQ1260/60 型高架门机(外伸臂长 62m、起吊高度 60m)及 10t 门机、塔机浇筑混凝土。采用 50MPa 级冲毛机处理施工缝、柔性吸盘真空混凝土工艺、内锚式 300t 级预应力锚束、超声波和回弹仪无损检测等新技术。采用硅粉混凝土、苯乙烯-甲基丙烯酸甲酯浸渍混凝土提高闸孔混凝土的抗冲刷耐磨性能。

三峡主体及临建工程的混凝土总量达 2 815.5 万  $m^3$ ,共需骨料 4 171.3 万  $m^3$ (其中包括砂 1142.8 万  $m^3$ )。设计砂石骨料年供应能力达 630 万  $m^3$ 。右岸设置两个混凝土系统,4 座拌合楼;左岸为 4 个混凝土系统,8 座拌合楼。生产常规混凝土总能力 2 160 $m^3/h$ 。拌和楼的出料以  $6m^3$ 汽车式侧卸料罐车,无轨运输为主。主体建筑物混凝土浇筑采用 6 台塔带机为主,辅以 10 台高架门机和两台摆塔式缆机和综合施工方案。TC2400 型自升固定式塔带机,将塔机与宽 762mm 皮带机结合在一起,吊高 94m,浇筑混凝土最大幅度 100m,每台每小时浇筑能力 420 $m^3/h$ 。国产 MQ2000 型高架门机,吊高 100m,幅度 70m 时起吊能力 20t。两台摆塔式缆



机控制承重索间距离不小于 10m, 跨度 1416m, 浇筑混凝土起吊能力 20t, 塔架高 120m、摆幅 ±25m, 吊钩扬程 120m。平仓振捣机的振捣深度为 0.75m、振动棒直径 150mm, 生产能力 90~120m<sup>3</sup>/h。

#### 4.1 混凝土制备

葛洲坝工程采用日产 750 万 m<sup>3</sup>/h 及国产 250 万 m<sup>3</sup>/h 的大型采砂挖掘河床砂卵石制备混凝土骨料。在我国首次实现夏季混凝土出机口温度 7°C, 采取的措施有: 设置皮带机保温预冷廊道, 向运往拌和楼的骨料喷洒 3~4°C 冷水, 在拌和楼冷却仓内通 -14~-15°C 冷风, 每立方米混凝土加 50kg 片冰拌和。一期、二期工程制冷容量分别达 32.2 及 71.2GJ/h。

三峡工程系我国首次采用散装罐式 20 英尺标准集装箱(有效容积 17.3~18.5m<sup>3</sup>) 运输水泥及粉煤灰, 在长江上首次采用全直立钢管桩集装码头。二期工程采用的人工骨料加工系统生产能力 3 050t/h, 居世界首位(伊泰普人工骨料加工能力 2 160t/h)。其中下岸溪为世界最大的人工制砂加工系统, 设计生产能力 780t/h, 采用适于中、细、超细碎的高效能 HP 系列改进型锥式破碎机和当代最先进的 Bar Maca 冲击式超细碎破碎机, 可以严格控制人工砂质量的筛分—破碎闭路生产系统。古树岭人工碎石加工系统设计生产能力 2 540m<sup>3</sup>/h, 选用中、细碎的 Omnicone 锥式破碎机, 采用冲击挤压破碎及料间研磨, 能有效地防止产生针片状骨料。左岸 98.7m 高程混凝土拌和系统选用两座自动化控制的日产 2×4.5m<sup>3</sup> 强制式拌和楼, 每座生产能力 324 m<sup>3</sup>/h。在总结葛洲坝工程成功地制备 7° 低温混凝土经验的基础上, 进一步研究采骨料二次风冷系统、砂冷却、肋片管蒸发器制冷水、负压式气力输送片冰、附壁式高效空气冷却器等新技术。采用我国最大的 9 万 t/d 级水上水厂船供水。制冷总容量 167.5GJ/h。

#### 4.2 模板

葛洲坝工程全面推广使用规格化、定型化钢模板。采用的组合式悬臂钢模板最大达 6~8m<sup>2</sup>。在二期工程中, 钢模板使用面积 143.32 万 m<sup>2</sup>, 占立模面积的 81%。大江电站尾水管模板由实腹式整装木结构, 改为分层空芯式钢木结构, 分层组装、立模, 浇筑混凝土, 每套泥水管木材耗量降到 78m<sup>3</sup>, 不到二江电站的 1/4, 安装和拆除工效提高到 1 倍以上。将常规浇筑二期混凝土形成闸门槽方式, 改为采用预制混凝土闸门槽, 简化了施工程序, 提高了门槽质量。

三峡工程大量采用适用于大体积混凝土浇筑的仓内无拉条的全悬臂式整体大型钢模板: 组合柱式悬臂钢模板及桁架式悬臂钢模板。升船机塔柱等墩柱、墙, 采用滑升模板。钢模板使用比例在 85% 以上, 周转次数 50 次。

#### 4.3 温度控制与施工分缝

葛洲坝工程的船闸和溢流坝段采用灌浆直缝或宽槽, 柱状块浇筑, 纵缝间距 20~36m。电厂段以错缝为主, 辅以宽槽和直缝。二江电厂进水口段与主机室段之间、蜗壳边墙以下采用宽槽; 进水口段与主机室段及主机室段与尾水管段之间高程较高部位, 采用直缝不灌浆, 其余采用错缝。大江电厂将进水口段与主机室段底板间的宽槽改为灌浆直缝, 不仅满足结构整体性要求, 且便于施工, 加快了进度。

为解决葛洲坝大型径流式电站的厚截面框架结构施工期温度应力, 尾水管弯管段和排沙孔以设封闭块为主。尾水管扩散段在低温季节整浇, 其他季节设封闭块。蜗壳顶板和胸墙采用严格温控措施整浇。

葛洲坝工程采用发热量低的大坝纯熟料 525 号及大坝矿渣 425 号水泥制备混凝土, 掺用木质素磺酸钙等外加剂, 减少水泥用量。夏季采用低温混凝土, 薄层浇筑, 加强气温骤降时的仓面保温(聚氯乙烯泡沫塑料、草袋保温)。由于温度控制严格, 二期工程已达到深层温度裂缝控制在 160 万 m<sup>3</sup> 混凝土才发生一条的水平, 避免了危害严重的基础贯穿裂缝。

三峡最大坝高 180m。泄洪坝段分三层布置有导流底孔、深孔和表孔; 厂房坝段布置有直