

清江隔河岩工程 施工技术

中国葛洲坝集团公司 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

清江隔河岩工程 施工技术

中国葛洲坝集团公司 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

清江隔河岩工程施工技术/中国葛洲坝集团公司编
著. —北京: 中国电力出版社, 2004

ISBN 7-5083-2002-6

I. 清… II. 中… III. 水电站-水力发电工程-
施工技术-湖北省 IV. TV7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 004706 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2004 年 8 月第一版 2004 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.5 印张 464 千字

印数 0001—2500 册 定价 36.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

《清江隔河岩工程施工技术》

编 委 会

顾 问：林善祥 孙瑞兴

主 任：张 野

副 主 任：周厚贵 邓银启

委 员：(按姓氏笔划为序)

王崇勤 王亚文 张 伟 陈木铎 张安平

邹远鹏 杨 权 汪清涛 沈辅邦 张冠生

严兴东 张耀忠 何清云 林正春 姜手虞

郭光文 贺修良 章俊芳 曾振铎 蔡新民

戴西辉

主 编：周厚贵

副 主 编：邓银启 张安平 戴西辉 邹远鹏

参编人员：王章忠 沈 岚 汪 洁 戚燕霞 曹雪菲

李 霞 陈 宏

GP L87/07



序

清江隔河岩水电工程是国家“八五”计划重点能源建设项目之一,是湖北省、原水利电力部合资兴建的以发电为主,兼有防洪、航运等综合利用效益的大型水利枢纽工程。该工程从1987年开工建设到竣工验收历时10年,共完成主体土石方明挖543万 m^3 ,石方洞挖55万 m^3 ,混凝土浇筑345万 m^3 ,帷幕灌浆18万 m ,固结灌浆11.5万 m ,钢筋制安3.4万 t ,金属结构及机电设备安装2.4万 t 。

隔河岩大坝是一座比较独特的上重下拱式重力拱坝,由长江水利委员会设计,该工程设计获得两项国家金奖。工程施工以中国葛洲坝集团公司为主,铁道部第十八工程局、隧道工程局等单位参战,他们年复一年地战严寒、斗酷暑,克服了各种各样难以想象的困难,使工程按计划一年一个台阶不断攀升,创造了一个又一个新记录,最终实现整体工程获得中国建筑工程最高奖——鲁班奖。

隔河岩工程是中国葛洲坝集团公司以总承包形式承建的一座百万千瓦级水电工程,在工程建设中引进、研发并应用了光面和预裂爆破、无线电遥控缆机吊罐、水工隧洞环向预应力锚索、接缝灌浆塑料拔管、大型多卡悬臂模板、针梁钢模台车全断面隧洞衬砌等新技术、新工艺、新材料、新设备,使各个项目都提前和超额完成任务,实现了当年准备、当年开工、当年截流,走在了全国水电施工行业的前列。正是基于上述原由,中国葛洲坝集团公司编著了这本《清江隔河岩工程施工技术》。

本书比较全面地融汇了隔河岩工程各项施工中的实践经验和先进技术,各篇内容都是随着施工过程的逐步进展及时提炼和总结出来的,而且撰写者都是隔河岩工程建设的技术管理人员,更具有直接性和权威性。本书涉及碾压混凝土施工、高边坡开挖及支护、洞室开挖及支护基础处理、混凝土施工、预应力施工、施工监测、金属结构制作与安装、机电设备安装等许多专业和内容,相信此书的出版一定会对推动我国水电事业的发展和水电施工水平的提高发挥较大的作用。

事物总是在不断前进的,水电工程施工的新技术、新工艺、新材料、新设备也在不断涌现,尤其是目前正值水电建设的鼎盛时期,大坝越建越高,施工难度愈来愈大。本书中的一些施工技术和实践经验目前虽然已称不上领先,但隔河岩工程建设中的许多独特之处仍可供其它类似工程借鉴。希望中国葛洲坝集团公司在今后的水电建设过程中再接再厉,继续奋进,不断引领我国水电施工技术跃向新的高峰。

中国工程院院士
长江水利委员会总工程师

郑守仁

2003年12月于武汉



前 言

清江隔河岩水利枢纽是中国葛洲坝集团有限公司在 20 世纪 80 年代末、90 年代初以总承包形式承建的全国首座装机容量百万千瓦级的水电站工程。1987 年 6 月中国葛洲坝水利集团公司进场作施工准备,同年 12 月 15 日实现了上游围堰截流;1988 年 1 月大坝基坑开始开挖;同年 12 月 13 日,大坝混凝土正式开仓浇筑,实现了当年开挖、当年浇筑大坝混凝土的目标。1989 年遭受了 10 次洪水的袭击,为了把洪水耽误的时间抢回来,承担施工任务的葛洲坝集团清江施工局从 1989 年四季度开始,至 1991 年间组织了两次攻坚战。1990 年完成的混凝土浇筑量超过 60 万 m^3 ,1991 年又完成了混凝土浇筑 80.09 万 m^3 。1992 年 1 月实现了导流洞下闸封堵的目标,第一台机组于 1993 年 5 月 25 日并网发电,最后一台即第四台机组于 1994 年 11 月 26 日成功并网,正式投入商业营运。在该工程施工期间,中国葛洲坝集团有限公司在建设、监理、设计单位及地方政府等各方面的支持下,始终高度重视工程施工质量,重视科技创新,在科学求证、大胆实践的基础上,引进、研发并应用了数十多项新技术、新工艺,使整个工程施工工期比计划工期提前了一年,机组实际安装工期比计划工期提前了 52 个台月,受到建设、监理单位及业内专家的好评和湖北省政府的表彰。

清江隔河岩水电工程面对 1998 年超标准洪水的考验,在有关方面的正确调度指挥下,充分挖掘工程设计和施工质量的潜力,成功地超标准拦蓄清江洪水,并使之与长江洪峰错峰近 2d,为保护长江干堤安全、避免荆江分洪区分洪立下了汗马功劳,取得了良好的社会效益和巨大的经济效益。2000 年,清江隔河岩水利枢纽工程荣获了中国建筑工程最高奖——鲁班奖,成为全国水电行业首个获此殊荣的百万千瓦级水电工程。

在历史跨越到新世纪的今天,中国葛洲坝集团有限公司已在清江领域先后建成了隔河岩、高坝洲两座水电工程,目前正在决战水布垭工程。为了全面总结隔河岩工程施工技术的各方面成果,也为后续工程或其他类似工程提供经验和借鉴,我们编著了这本书。

由于清江隔河岩水电工程建设历时较长,值得总结的内容十分丰富,书中难免有许多遗漏或缺憾,再加上我们水平有限,错误之处在所难免,恳请广大读者给以批评指正。

编者

2002 年 12 月

目 录

序

前言

综述

■ 清江隔河岩水利枢纽工程概况	(3)
应用新技术、新工艺加快清江隔河岩工程建设	林善祥 (12)
清江隔河岩水利枢纽工程施工	贺修良 (19)

碾压混凝土围堰施工

■ 隔河岩工程上游围堰碾压混凝土施工	郑少明 (37)
隔河岩工程上游碾压混凝土围堰施工与质量控制	兰智勇 (41)

土石方施工

■ 隔河岩水电站厂房高边坡开挖	王亚文 段浩焰 (49)
预裂爆破技术在隔河岩工程基岩开挖中的应用	段浩焰 (57)
隔河岩水电站安Ⅰ段地锚控制爆破施工	周厚贵 (62)
隔河岩工程下游围堰左岸缺口封堵施工	吴森康 (66)
隔河岩水利枢纽锚喷支护施工	王江涛 (71)
隔河岩水电站厂房高边坡喷锚支护施工	龙胜昌 (78)

基础处理施工

■ 隔河岩工程大坝基础处理	王建夫 (87)
隔河岩水利枢纽基岩固结灌浆	杜珍玉 李守建 (94)
隔河岩水利枢纽高压帷幕灌浆	黄家权 (100)
隔河岩工程混凝土重力拱坝接缝灌浆	田元方 张玉莉 (107)
隔河岩水电站引水隧洞灌浆	杜珍玉 (120)
隔河岩工程通航建筑物中间渠渡槽主墩大口径基础桩施工	郑奇瑞 (127)
湿磨细水泥灌浆在隔河岩大坝接缝中的应用	田 力 (132)

混凝土施工

隔河岩工程重力拱坝混凝土施工及质量控制	张德祥	兰智勇	(141)
隔河岩水电站厂房混凝土施工	姜守虞	马经春	(146)
隔河岩水电站引水隧洞混凝土衬砌施工	傅自义	谢小龙	方开美 (153)
辐射式缆机在隔河岩工程的应用		阳矩国	(159)
隔河岩工程坝体混凝土质量缺陷的检查处理		陈安新	(167)
隔河岩工程主体混凝土砂石骨料生产系统	庞代坤	沈增荫	(175)
隔河岩水利枢纽降低人工骨料爆破超径石率试验		丁焰章	(183)

预应力施工

隔河岩水电站引水隧洞环形预应力施工	孙景振	(193)
隔河岩水电站 3 号引水隧洞预应力锚索试验	谭恺炎	苏登高 (200)
引水隧洞后张预应力混凝土张拉锚固性能试验	宋志鹏	张 科 (215)
隔河岩水电站引水隧洞预应力衬砌段部分堵塞孔道的处理	金志斌	郭德福 (220)
环形锚索穿索导向帽的研制及应用	金志斌	郭德福 (224)
隧洞环锚施工的弧形锚索张拉台车	金志斌	(227)
隔河岩水电站引水隧洞预应力施工工艺	郭德福 孙景振	金志斌 (230)
“绳索”钻具在隔河岩水电站引水隧洞环形波纹管疏通中的应用	褚恩杰	(242)

施工测量与监测

隔河岩工程混凝土坝施工测量	吴光富	(247)
隔河岩水电站水轮发电机组安装测量	常治雷	(252)
隔河岩工程大坝坝内安全监测	谭恺炎	(257)
隔河岩工程大坝变形监测施工与施工期观测	樊哲林	(261)
倒垂孔小口径导向钻进在隔河岩工程的应用	李守建	(269)

金结制安与机电安装

隔河岩水电站 300MW 机组的安装特点	赵仕儒	(275)
隔河岩水电站计算机监控系统安装与调试	王家强	(280)
隔河岩水电站优质高速装机技术	张耀忠 赵仕儒	王家强 (287)
隔河岩水电站水轮机主轴与转轮吊装方案的选择	邢永浩	(293)
隔河岩水电站压力钢管制作与安装	吴彭年	(299)
隔河岩工程升船机主提升机设备安装	杨 龙	(308)
隔河岩水电站主变压器安装	汪 莉	王益民 (315)



综 述



清江隔河岩水利枢纽工程概况

1 隔河岩水利枢纽在清江流域开发中的地位

清江位于湖北省西南部,是三峡以下长江中游南岸的较大支流,干流全长 423km,总落差 1430m,流域面积 17000km²。流域气候温和,是长江中游暴雨中心之一,多年平均年降雨量 1400mm 左右,多年平均年径流量 440m³/s。全流域 80% 以上为山地,山势陡峻,河谷深切,石灰岩广布,多形成悬崖峭壁,奇峰峻岭,溶洞绵延,景色非常壮丽。清江流域资源丰富,除水资源外,还有丰富的铁矿、森林和珍贵的土特产。但由于沿岸工业基础薄弱,交通运输不便,且受洪水威胁,广大土家族人民迫切要求开发清江,加快山区建设。

全流域水力资源可开发装机容量为 3290MW, 每年可开发电能 105 亿 kW·h。清江水力资源开发条件十分优越, 80% 以上的水力资源集中在恩施以下的干流河段上, 且具备建高坝的地质、地貌条件, 地震烈度不高, 河谷两岸农田和居民点少, 适合兴建库容大、调节性能好的水利水电枢纽。经规划研究, 清江开发的任务是发电、防洪、航运并兼顾其他。其开发的重点是干流恩施以下河段, 以分 3 级开发最为有利, 自下而上依次为高坝洲枢纽(正常蓄水位 80m)、隔河岩枢纽(正常蓄水位 200m)、水布垭枢纽(正常蓄水位 400m), 隔河岩水利枢纽地理位置见图 1。合计总库容达 85.7 亿 m³, 有效库容 43.2 亿 m³, 总装机容量达 3292MW, 年设计发电量 78.58 亿 kW·h。三个梯级水库建成后, 可以使恩施以下 270km 河道基本渠化, 成为鄂西南山区物资运输的主要通道, 并可发挥巨大的防洪作用。

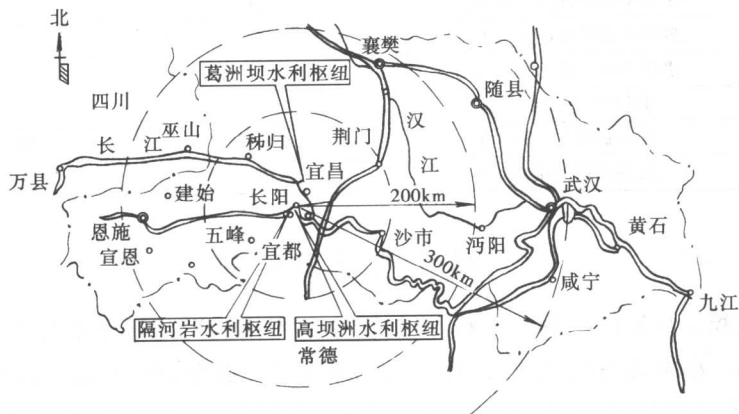


图 1 清江隔河岩水利枢纽地理位置

在清江梯级开发的 3 个枢纽工程中，隔河岩枢纽居于骨干工程的地位。这表现在：①装机容量大，调节性能好，距葛洲坝水电站近，与之联合运行，可以补偿葛洲坝水电站发电年出力不均衡的影响；②控制流域面积大（占全流域面积 85%），水库容积大，调蓄洪水能力强，防洪作用显著；③航运效益大，当高坝洲枢纽建成后，可形成宜都至招徕河之间 150km 的深水航道。

2 坝址处自然条件

2.1 水文气象条件

清江流域地处副热带季风气候区，流域多年平均降水量约 1400mm，多年平均流量为 427m³/s，年径流量为 135 亿 m³。坝址处多年平均年降雨量为 1335.5mm，降雨多集中在 6 月~9 月份，多年平均流量为 403m³/s，年径流量为 127 亿 m³。径流量年内分配与降水量一致，汛期 5 月~9 月份占年径流量的 68%，其中以 7 月份最大，占年径流量的 18.6%。

坝址处多年平均气温为 16.5℃，7 月~8 月份最高，为 27~30℃，12 月~次年 1 月份最低，为 2~8℃。极端最高气温为 42.1℃，极端最低气温为 -12℃。多年平均相对湿度为 80%，多年平均年蒸发量（蒸发皿观测）为 1290.8mm。

清江洪水的季节性变化与降雨量基本一致，5 月~9 月份为汛期，11 月~次年 3 月份为枯水期。年最大洪峰多出现在 6 月、7 月和 9 月份。坝址实测最大洪峰流量为 18900m³/s，实测最小洪峰流量为 29m³/s，洪枯流量变幅较大。坝址处水文气象参数见表 1。

表 1 隔河岩坝址水文气象参数表

序 号	项 目	参 数 值	备 注
1	坝址多年平均流量 (m³/s)	403	
2	年径流量 (亿 m³)	127	
3	最大洪峰流量 (m³/s)	18700	调查值
4	实测最小流量 (m³/s)	29	1983 年
5	多年平均含沙量 (kg/m³)	0.744	
6	多年平均年输沙量 (万 t)	1020	
7	多年平均年降水量 (mm)	1335.5	
8	多年平均气温 (℃)	16.5	
9	极端最高气温 (℃)	42.1	1966 年 8 月 6 日
10	极端最低气温 (℃)	- 12	1977 年 1 月 31 日

2.2 坝址处地质条件

(1) 河谷地貌。坝址位于清江“Z”形河段中部近南北向的一个不对称“U”形峡谷中，枯水位 78m，水面宽 100m 左右，河床基岩面高程一般为 60m 左右，最低 54m。两岸 110~120m 高程以下为陡坡，以上左缓右陡。200m 高程处，河谷宽 635m。清江出峡谷后为较开阔的阶地区，发育有较完整的 I、II、III 级阶地。

(2) 地质构造。隔河岩水利枢纽是岩溶化程度很高、地质条件比较复杂的石灰岩坝址。坝区位于长阳复式背斜南翼的次级褶皱津洋口向斜的南翼中, 岩层走向 NE70°, 倾向 SE, 倾角 25°~30°。坝区基本构造格架是燕山运动早期的产物, 嗣后燕山晚期与喜山运动对坝区地层的构造形迹有加强的作用。由于坝区最发育的北北西向扭裂断层作用, 岩层产状与区域主应力方向有一个偏角。坝址出露的地层, 主要为中、下寒武系的浅海相碳酸盐岩石与碎屑岩, 地层总厚 1700m。坝址断裂构造比较发育, 并有多条剪切带, 两岸发育有岩溶通道系统, 对坝基岩体、洞室和边坡的稳定以及帷幕工程都有重要影响或起控制作用。

3 工程规模及效益

隔河岩水利枢纽控制流域面积 14430km², 多年平均流量 403m³/s, 平均年径流量 127 亿 m³。水库正常蓄水位 200m, 总库容 31.2 亿 m³, 其中兴利库容 19.2 亿 m³。水库具有年调节性能, 水量利用程度为 92.3%。

枢纽的主要任务是发电。电站装机 4 台, 总装机容量 1200MW, 年发电量 30.4 亿 kW·h, 保证出力 187MW。隔河岩水电站建成后, 不仅增加了华中电网电量, 而且可以有效发挥补偿调节作用, 承担电网中调峰、调频, 改善供电质量的作用。

枢纽的第二个任务是防洪。清江流域地处长江中游暴雨中心, 历史上洪水灾害频繁, 又恰好在长江的荆江河段上游约 20km 处, 加之清江洪水常与长江洪水遭遇, 更加重了荆江河段的洪水威胁。据历史记载, 清江洪水与长江洪水遭遇有 8 次之多, 清江洪峰流量最大可达长江的 15%。因此隔河岩水库建成后, 预留 5 亿 m³ 的防洪库容, 可以削减清江下游洪峰, 也可错开与长江洪峰的遭遇, 减少荆江分洪区的使用机会和推迟分洪时间。在 1998 年抗洪过程中, 清江隔河岩水库合理运用, 成功地实现了与长江的错峰, 为避免荆江分洪起到了决定性的作用。

枢纽的第三个任务是航运。清江是鄂西土家族自治州山区的最大河流, 是山区货物吞吐的水运通道。但清江滩多流急, 陡涨陡落, 航运十分困难。隔河岩建成前主要依靠公路, 连接长江港口与鄂西腹地, 交通运输条件差、费率高, 制约了鄂西地区的经济发展。隔河岩枢纽及其下流的反调节枢纽——高坝洲, 可形成长达 150km 的深水航道, 300t 级船舶可从长江直达库区。坝上通航设施的通过能力为 340 万 t。

综上所述, 隔河岩水利枢纽在发电、防洪、年航运等方面, 均有很大的效益。作为开发清江、繁荣鄂西的起步工程, 也是有重要意义的。

4 枢纽布置及建筑物设计

隔河岩水利枢纽主要建筑物由大坝、电站厂房、垂直升船机及泄洪消能工等组成, 详

见图 2。

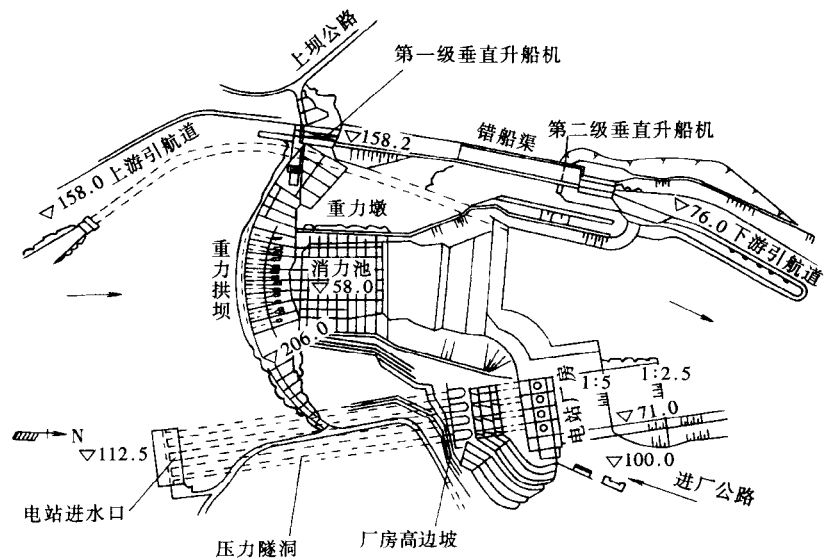


图 2 隔河岩水利枢纽布置图

大坝基础主要为寒武系的百龙洞组灰岩，两岸坝肩上部为平善坝组灰岩页岩互层，坝基岩石较新鲜完整。坝区地壳稳定，经国家地震局鉴定，该区的地震基本烈度为Ⅵ度。

根据坝区的地形、地质及水文地质条件，采用了重力拱坝，灌浆防渗帷幕穿过石灰岩地层直达不透水的厚层页岩。泄洪建筑物布置在河床，隧洞引水式电站位于右岸，两级垂直升船机和施工导流隧洞布置在左岸。

大坝坝顶全长 653.5m，坝顶高程 206m，最大坝高 151m。结合地形、地质特点，两岸布置为重力坝，河床为三圆心变截面重力拱坝，外圆弧半径 312m，最小坝坡 1:0.5，其拱顶高程在河床中部为 180m，向两岸逐渐降低至 150m，拱顶以上的坝体不做接缝灌浆，仍呈重力坝的工作状态。这种上重下拱的特殊坝型，既适应了地形、地质条件，也兼顾了坝体应力和坝体稳定等方面的要求。

隔河岩大坝泄洪消能的特点是水头高、流量大（100 年一遇洪水时，下泄流量为 13000m³/s，落差 109.7m；1000 年一遇洪水时，下泄流量为 21900m³/s，落差 104m），且因拱坝形状而使水流向心集中，增加了消能的难度。设计的溢流前缘长 188m，共设 7 个表孔、4 个深孔和两个放空兼导流的底孔。表孔尺寸为 12m×18.2m，堰顶高程 181.8m；深孔尺寸 4.5m×6.5m，孔底高程 134m；底孔尺寸 4.5m×6.5m，孔底高程 95m。各孔口均用弧形闸门控制操作，并在其上游设检修平板闸门。孔口体型设计中在国内首次采用不对称宽尾墩，使水流纵向和横向尽量分散，消能效果好，不但解决了水流向心集中问题，而且使消力池长度大幅度缩短。在此基础上，进一步采用适应地形条件的不对称消力池，节省了工程量。

防渗帷幕线路长达 1.5km，总钻孔进尺超过 20 万 m。两岸远河地段岩体透水性小，

岩溶不太发育，设 1 排灌浆孔；两岸近河地段，顺河断层较多且溶蚀较严重，岩体透水性也较强，设 2 排灌浆孔；河床地段岩溶发育较弱，但裂隙发育，透水性强，也设 2 排灌浆孔。除左岸的帷幕边线置于远河地段的相对不透水岩层中外，其余各段均深入到可靠的隔水层石碑组页岩中。灌浆孔距为 2m，排距 1.2~1.5m 设计的防渗标准，下部透水率 $q < 1\text{Lu}$ ，上部为透水率 $q < 3\text{Lu}$ ，帷幕下游侧设一排排水孔。为方便施工和保证钻灌质量，两岸各设 4 层灌浆平洞，层间钻灌深度为 40~60m。施工采用高效的小口径钻孔（孔径 56mm），自上而下分段循环灌浆，最大灌浆压力为 5MPa。每排孔分 3 序施工，逐步加密。

电站厂房位于右岸山体下游坡脚的河滩阶地上，采用隧洞引水。进水口设在大坝上游右岸山体边坡上，底部高程 142.5m。4 条直径 9.5m 的隧洞接直径 8m 的压力钢管，单机单洞，分别接至 4 台单机容量 300MW 的水轮发电机组，引水道总长 $4 \times 599\text{m}$ 。电站主厂房全长 142m，宽 38.6m。

厂房内设有 2 台 250t 桥式吊车。水轮机为混流式，额定水头 103m，额定转速 136.4r/min，单机最大引用流量 $328\text{m}^3/\text{s}$ 。发电机立轴三相同步半伞式，额定容量 340MV·A，额定功率因数 0.9，额定电压 18kV。副厂房紧靠主厂房上游侧，4 台主变压器布置在厂房上游侧 100m 高程的平台上。出线按 220kV 二回、500kV 二回考虑，高压侧均采用六氟化硫全封闭组合电器（GIS）。主厂房下游的尾水渠通向下游河道。

引水隧洞全长 $4 \times 444\text{m}$ ，依次穿过红溪灰岩，平善坝灰岩、页岩互层和石龙洞灰岩。隧洞前段位于大坝防渗帷幕上游，采用普通钢筋混凝土衬砌；隧洞后段位于防渗帷幕下游，采用环形后张预应力钢筋混凝土衬砌，以控制衬砌混凝土的裂缝开展。压力钢管按明管设计，置于混凝土连续支座上，基础为石碑组页岩。钢管上段标质为国产 16Mn 钢，下段为巴西产 SM58Q 钢。钢管单节长 2.2~2.5m，运至现场组装，所有焊缝采用爆炸消应法消除焊接残余应力。

隔河岩水电站厂房开挖边坡高达 200 余米，上部为坚硬的灰岩，岸坡裂隙发育，下部为软弱的页岩，灰岩和页岩的接触带为厚达数米的剪切破碎带，且有 4 条隧洞从边坡中部穿出，地质条件和结构布置均较复杂。设计的边坡形状在平面上呈弧形，全为逆向坡，灰岩呈台阶状开挖，页岩为较缓的斜坡，灰岩和页岩的转折处设较宽的平台。

隔河岩升船机是我国第一座高升程 300t 级船舶过坝垂直升船机，年通过能力为 340 万 t。总升程 122m，分为两级。第一级与左岸重力坝相交叉，成为大坝挡水前缘的一部分，该级升程 40m，可适应水库水位涨落 40m 幅度时船舶过坝的要求。第二级位于左岸下游河滩，升程 82m，衔接中间错船渠和下游河道。中间错船渠位于两级升船机之间，长 400m，宽 30m，过往船只可双向同时运行。错船渠紧靠第二级垂直升船机的一段是钢筋混凝土渡槽，采用“π”形连续厢型刚架，长 200m，为三向预应力结构。升船机采用全平衡钢丝绳卷扬系统，承船厢有效水域尺寸为 $42\text{m} \times 10.2\text{m} \times 1.7\text{m}$ ，带水总重量 1400t。

在坝址东南 9.5km 的关家冲垭口有一座副坝，为土石坝，坝顶长 50m、高 17m。

5 工程主要施工方案

5.1 导流工程

坝址处在洪水陡涨陡落、两岸地貌不对称的高山峡谷，采用枯水期隧洞导流、汛期围堰过水的导流方式。设计导流流量 $3000\text{m}^3/\text{s}$ ，可保证枯水期连续 6 个月的基坑施工期。导流工程包括左岸导流隧洞、上游土石围堰、上游碾压混凝土围堰、下游土石围堰及电站厂房土石围堰等。导流隧洞长 695m，断面尺寸 $13\text{m} \times 16\text{m}$ ，实际施工期为 11 个月。碾压混凝土围堰高 40m，体积近 13 万 m^3 ，实际施工期为 59d。

5.2 土石方施工

隔河岩水利枢纽三大主体建筑物工程的土石方开挖总量为 598 万 m^3 ，其中洞挖 40 万 m^3 。在本工程中土石方的施工特点是边坡工程多，而且高度大（大坝和厂房的高边坡均达 200m 左右）；山坡陡峭、工作面狭窄，各工种、工序干扰大，布置较困难。汛期围堰过水，基坑淹没，受洪水影响部位多。

开挖工程的施工方法，一般均采用自上而下、逐层下降的开挖程序，采用三向或两侧预裂后，进行梯段爆破。施工道路进入掌子面，用推土机集渣， 4m^3 电铲或 $3.0 \sim 6.9\text{m}^3$ 装载机配置 20t 自卸汽车出渣。对预裂孔一般采用 YQ-100 型钻机；对梯段爆破孔采用 YQ-150 型钻机。预裂孔深度根据开挖轮廓线或建基面高程确定。爆破施工中，邻近预裂缝部位预留 2~3 排孔进行缓冲爆破。梯段高度一般控制 8~10m，对地形陡峭狭窄的部位，降至 4~5m。弃渣按规划运至上、下游弃渣场或回填永久场地、临时施工场地等。

大坝和厂房基坑的开挖，采用 YQ-150mm 型潜孔钻机钻孔。距建基面预留 2~3m 保护层，按规范要求进行钻爆开挖，爆破和出渣等与上述相同。

对于厂房高边坡等部位，在每一个梯段下降后，要求及时锚喷支护，特别是厂房高边坡 128m 高程平台以下，要求更严格，岩石为石牌页岩，易风化松动、塌落，要求开挖后 7~15d 内必须及时锚喷保护。

引水隧洞的开挖，采用 3 臂凿岩台车钻孔、全断面掘进，中心掏槽，周边线光面爆破，底部垫渣作为出渣道路，对地质不良地段，采用上下断面法或小导洞逐步扩挖法施工。对枢纽其他部位的夹层、断层的置换洞、阻滑键、传力柱和灌浆平洞、排水平洞等基本采用全断面掘进。

5.3 混凝土施工

主体建筑物的混凝土总工程量为 328.26 万 m^3 ，其中大坝 265.84 万 m^3 ，电站厂房 46.97 万 m^3 ，通航建筑物 15.45 万 m^3 。

5.3.1 大坝工程

大坝轴长线 653.45m，分成 30 个坝段施工。11~18 号坝段为河床溢流坝段，坝高

151m, 底宽 75.5m, 坝段宽度 24m, 设一条纵缝, 分缝在顺水流向长度为 35 ~ 40m 处。坝体混凝土总量 212 万 m^3 , 另外消力池、下游护岸、拱座地下基础深层处理等项的混凝土工程量为 54 万 m^3 。

大坝的施工, 一方面考虑汛期围堰过水、淹没基坑的方式; 另一方面又由于两岸山体有适合布置幅射式缆机的条件。因此, 依据工期和浇筑强度的要求, 布置了高、低缆机各两台, 用于浇筑大坝混凝土。缆机的固定端设在右岸, 移动端在左岸。低缆机跨度 670m, 主塔间距 4m, 起重量 20t, 月设计生产能力每台 2.5 万 m^3 , 主、副塔建基面高程均为 210m, 可浇筑高程 160 ~ 165m 以下的混凝土。高缆跨度 892m, 主塔间距 4m, 起重量也是 20t, 主塔建基面高程 275m, 副塔建基面高程 252m, 月设计生产能力每台 3.5 万 m^3 , 可浇筑高程 206m 以下混凝土。高程 206m 以上建筑物混凝土的浇筑, 采用在坝顶上增设的起重量 10t、臂长 40m 的塔机或起重量 10t、臂长 37m 的门机等施工机械进行。由于缆机为幅射式布置, 又受左岸地形条件限制和右岸至塔间距影响, 右岸 1 号 ~ 3 号坝段和左岸 24 号 ~ 27 号坝段的尾仓等, 均超出缆机控制范围以外, 则另增设丰满门机和电吊等浇筑混凝土。

根据浇筑进度安排, 大坝月高峰浇筑强度为 9 万 ~ 10 万 m^3 , 因此, 保证 4 台缆机正常运行, 是满足混凝土浇筑强度基本要求。按设计的施工进度, 要求 2 台低缆应于 1988 年 10 月投产, 高混凝土砂石系统和 2 台高缆应于 1989 年 10 月投产。但实际投产时间大幅度推迟了, 2 台低缆到 1990 年 3 月、4 月才投产, 高砂石混凝土系统到 1990 年 11 月才投产, 2 台高缆到 1991 年 12 月才投产, 分别与计划要求推迟 1.5 ~ 2 年, 这对大坝混凝土的浇筑强度、施工进度和工程工期都产生了一定的影响。在缆机推迟使用的时期内, 不得不在大坝浇筑块上轮换部位拆、装 2 ~ 3 台门机来浇筑混凝土, 使月浇筑强度达到 2 万 ~ 5 万 m^3 左右。

大坝下游消力池, 宽 114m, 最大池长 138.4m, 池底高程 58m, 底板厚度 3 ~ 5m, 分块尺寸一般为 15.5m $\times$ 14m, 混凝土工程量 13.9 万 m^3 , 池两侧设导墙, 墙迎水面边坡为 1:0.35。

5.3.2 电站建筑物

(1) 进水塔。进水塔顶部高程 206m, 底板高程 142.5m, 基础开挖高程 138.5m, 底板顺水流方向宽 27.05m, 垂直水流方向宽 96m, 整个结构用永久缝分为 4 块, 每块长 24m, 4 个进水口与隧洞对应布置。为了安装进水闸金属结构, 在塔体右侧布置安装平台, 长 25.9m, 宽 24m, 建基面高程 160 ~ 170m, 平台顶高程 206m, 通过交通桥与坝上游公路连接。进水塔 (含引水渠和公路桥) 混凝土 9.4 万 m^3 , 底板混凝土 (含引水渠) 用电吊于 1991 年 3 月浇筑完成。塔体和安装平台混凝土, 原拟用布置在其下游侧高程 180m 平台上的高架门机浇筑, 施工中因缺高架门机设备, 改为在高程 170m 平台安装 1 台起重量 10t 的塔机浇筑。

(2) 引水隧洞。引水隧洞为单机单洞布置, 4 条引水隧洞中心间距 24m, 每条洞长 444m, 隧洞断面直径 9.5m, 预应力钢筋混凝土衬砌厚度一般 0.9m, 普通钢筋混凝土衬砌厚度, 根据岩层完整性为 0.9 ~ 1.5m, 衬砌分段长度为 12m 和 10m, 隧洞进口底高程