

三峡水利枢纽二期工程科技和管理创新

戴会超, 曹广晶

(中国长江三峡工程开发总公司, 湖北宜昌 443002)

[摘要] 三峡工程规模巨大、技术复杂, 针对重大技术难题, 汇集全国科技精华, 充分发挥专家的作用, 展开科技攻关, 并借鉴国外先进经验, 科学决策。2003年6月1日水库开始蓄水, 6月10日水位到达135 m高程, 6月16日双线五级船闸试通航成功, 左岸电站首批水轮发电机组从7月份开始投产, 到2003年底已有6台机组正式并网发电。三峡工程已经顺利地实现了蓄水、通航、发电的二期工程建设目标。在枢纽总布置及大坝工程、水电站工程、双线连续五级船闸、特大型水轮发电机组、导截流及围堰工程和特大型工程管理技术研究及实践方面, 取得了一系列重大突破。

[关键词] 三峡水利枢纽; 大坝; 水电站; 船闸; 截流; 工程管理

[中图分类号] TV61 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)01-0050-10

1 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、通航等巨大综合效益, 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。新中国成立后, 在毛泽东、邓小平、江泽民三代领导集体的直接关怀下, 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、设计和研究工作。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全国性协作研究。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150 m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、国务院决定组织重新论证, “以求更加细致、精确和稳妥”。经过近3年的深入研究论证, 经论证领导小组审议, 通过了14个专题论证报告。长江水利委员会(长江委)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进行了大量科学研究工作, 解决了一系列重大技术难题, 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。

[收稿日期] 2004-05-21

[作者简介] 戴会超(1965-), 男, 河北保定市人, 博士, 中国长江三峡工程开发总公司教授级高级工程师, 河海大学特聘教授从事水利水电技术管理工作

2 枢纽总体布置及大坝工程^[1~3]

2.1 按坝址河段特点合理布置枢纽主要建筑物

三峡工程最大泄流量 124 300 m³/s, 电站装机 26 台、总容量 1 820 × 10⁴ kW。坝址河段河床开阔, 河道原有中堡岛。为布置泄洪、发电、通航等枢纽建筑物, 将中堡岛全部挖除, 大坝布置成直线, 泄洪设施布置于河床中部, 泄洪前缘长 483 m; 26 台大容量机组布置于左右两侧, 采用坝后式电站厂房; 利用有利的河道地形条件, 船闸和升船机均布置于左岸, 并在右岸预留 6 台机组地下电站 (土建工程于 2004 年开始施工); 对三大建筑物进行合理布置, 解决了河床宽度不足的难题。

2.2 大坝泄洪设施及消能防冲布置研究

枢纽设计洪水流量 98 800 m³/s, 校核洪水流量 124 300 m³/s。根据三峡水库防洪调度规划, 要求枢纽在防洪限制水位 145 m 时具有下泄洪水流量为 57 600 m³/s 的能力; 在百年一遇洪水时, 具有下泄洪水流量 70 000 m³/s 的能力; 遇设计洪水和校核洪水时, 要求枢纽下泄 100 000 m³/s 以上的泄流能力。汛期泄洪除机组过流外, 泄流量的 3/4 需要从泄水建筑物通过。按照泄洪建筑物 483 m 布置长度, 一般无法满足泄量要求。为此, 结合施工要求, 泄水建筑物采取了三层孔口布置的方式。大坝永久泄洪设施需布置深孔以满足低水位时的泄洪要求, 并设表孔满足设计洪水和校核洪水泄洪要求。从水库排沙考虑, 要求深孔进口高程低于电站进水口高程。综合分析防洪、排沙、工程防护、厂前排漂等因素, 尽量缩短泄洪前缘长度, 减少两岸厂房及坝段的开挖工程量, 大坝泄洪设施采用深孔和表孔相间布置方案。位于河床中部的泄洪坝段长 483 m。泄洪坝段布置 23 个深孔和 22 个表孔。深孔设在坝段中部, 孔口尺寸 7 m × 9 m, 设计水头 85 m; 表孔在两个坝段之间跨缝布置, 净宽 8 m, 堰顶高程 158 m。为进行三期施工导流及截流, 在表孔正下方跨缝布置 22 个导流底孔, 孔口尺寸 6 m × 8.5 m。导流底孔在后期以回填混凝土封堵。

针对大坝水头高、泄洪量大、排沙量多及三层泄洪孔运行条件复杂等特点, 研究了三层泄洪孔口不同运行条件下的体型选择和高速水流下抗空化及防泥沙磨蚀问题, 以及深孔与表孔联合泄洪和深孔与底孔联合泄流时, 下游水力衔接及消能防冲等问

题; 下游水位较深, 选用挑流消能型式, 消能效果较好; 比较了导流底孔有压短管和有压长管方案, 综合考虑结构安全、方便施工、抗磨和水力学条件等因素, 选用有压长管。深孔出口反弧段流速 35 ~ 40 m/s, 采取跌坎掺气防止空化。坝下消能区两侧设左右导墙, 以减小泄洪对电站运行和对下游航道口门的不利影响。

2.3 采取多种综合措施, 确保岸坡厂房坝段地基深层抗滑稳定

三峡工程大坝基础总体上为坚硬完整的花岗岩, 其中左岸厂房 1[#] ~ 5[#] 坝段、右厂房 24[#] ~ 26[#] 坝段坝基存在相对较发育的、倾向下游的缓倾角裂隙, 尤以 3[#] 厂房坝段更为发育, 裂缝结构面连通率达 83 %。坝趾后即为高陡开挖边坡, 形成施工临时坡高达 70 m, 地形、地质条件对左岸厂房 1[#] ~ 5[#] 坝段的地基稳定极为不利, 是三峡大坝工程的重大技术问题之一。

为查明左岸厂房 1[#] ~ 5[#] 坝段的地质条件, 尤其是缓倾角结构面的分布情况, 进行了三次特殊勘探。基本查明了缓倾角结构面展布、性状及连通率。

长江委针对左岸厂房 1[#] ~ 5[#] 坝段的抗滑稳定问题, 进行了大量的研究和分析, 国内有多家科研院校和设计单位参加复核计算与研究。在采取综合工程处理措施后, 坝体深层抗滑稳定安全系数均满足 $K' > 3.0$ 的要求

2.4 大坝大孔口应力与配筋优化

大坝大孔口主要有以下 3 类: a. 泄洪深孔, 孔口尺寸为 7 m × 9 m, 设计水头 85 m。b. 电站引水压力管道进水口, 孔口尺寸为 10 m × 12 m, 设计水头 67 m。技术设计研究成果表明, 这两类孔口均存在孔口拉应力大, 配筋量大, 钢筋布置排数多的特点。c. 采用在孔口段附近将横缝止水局部后移方案, 配筋一般可控制在 2 ~ 3 排, 局部为 3 ~ 4 排。

2.5 大坝混凝土快速施工技术^[4]

三峡工程混凝土总量达 2 800 × 10⁴ m³, 质量要求高, 施工难度大。因此必须采用成套先进的混凝土快速施工新技术, 才能保证工程的质量和工期。三峡大坝二期混凝土浇筑从 1998 年开始, 1999 年到 2001 年连续 3 年特高强度混凝土施工, 年浇筑量均在 400 × 10⁴ m³ 以上, 三年共浇筑混凝土 1409 × 10⁴ m³, 其中 2000 年创造了混凝土浇筑

强度年 $548 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、月 $55.35 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、日 $2.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的世界纪录。为保证三峡大坝的高强度高质量施工,对施工方案和主要施工设备进行了反复的科学论证,选定了以塔带机为主,辅以高架门、塔机和缆机的综合施工方案。从传统常规的吊罐浇筑升华为混凝土一条龙连续生产工艺。该系统由各混凝土拌和楼通过皮带机将混凝土输送到塔带机直接进入仓浇筑,集水平和垂直运输为一身,具有连续浇筑、生产率高、可实现混凝土浇筑工厂化生产的特点。结合三峡工程的实践,建立了一整套保证质量的混凝土快速施工工艺和现代化施工管理体系,全面推行仓面工艺设计,制定了一整套严密的施工工艺。为满足三峡混凝土耐久性的特殊要求,经大量试验选用非碱活性花岗岩人工骨料,并严格限制水泥熟料中碱含量小于 0.5%,要求混凝土中总碱量 $\leq 2.5 \text{ kg/m}^3$;在混凝土中掺用 I 级粉煤灰。由于 I 级粉煤灰微珠含量高,可作为一种功能材料,大大改善混凝土的和易性,减少用水量,并可抑制碱活性反应,节省水泥用量,减少混凝土温度裂缝和干缩;选用品质优良的高效减水剂,通过与 I 级粉煤灰联合掺用,使花岗岩人工骨料配制的四级配混凝土用水量由 110 kg/m^3 减少为 85 kg/m^3 左右;采用缩小水胶比增加粉煤灰掺量的技术路线,从而更有效地提高了混凝土的耐久性;采用有补偿收缩性能的 525# 中热大坝水泥,以减少混凝土收缩变形,减少混凝土产生裂缝的风险。三峡工程低温混凝土生产系统是世界上已建及在建工程中规模最大、温控要求最严的混凝土生产系统。要求夏季生产出机口温度为 7°C 的低温混凝土,设计生产能力为 $1720 \text{ m}^3/\text{h}$,设计夏季高峰月混凝土浇筑强度为 $44 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。针对三峡工程的特殊性,及混凝土预冷工艺的要求,经反复试验研究,首次将二次风冷骨料技术应用于三峡工程。三峡工程大坝柱状块尺寸大,基础温差标准高,加上坝区气温骤降频繁,混凝土表面防裂难度大,温控措施要求严格。为此,三峡工程在广泛分析国内外工程已采取单项或多项温控措施现状的基础上,首次实施全过程、全方位、高标准、大容量的综合温控技术。

3 水电站厂房工程^[5,6]

3.1 电站进水口型式研究

三峡电站水轮发电机组采用单机单管引水,压力钢管直径 12.4 m,设计流量 $1020 \text{ m}^3/\text{s}$,运用

水位变幅达 45 m,进水口尺寸大、水头高。

研究了单孔进水口和双孔进水口两种型式。按常规的大喇叭口体型设计单孔进水口,喇叭口面积为引水管道面积的 3.5 倍以上,闸门尺寸和启闭机容量较大,金属结构工程量多,且制造安装难度大。针对三峡电站进水口的特点,借鉴国外大型水电站进水口设计和实践经验,采用单孔小喇叭进口体型。两种进水口方案大比尺 (1:30) 水工模型对比试验的成果表明,两方案的水力特性基本相当,单孔方案稍优,总水头损失小 10 cm,单孔进水口的孔口应力较小。双孔将增加钢筋用量,进水口的门体、门槽和启闭机数量比单孔进水口增加一倍,维修工作量相应增多,要求工作闸门同步操作,运用要求严格,事故概率比单孔方案大。

3.2 大型钢衬钢筋混凝土压力管道和伸缩节研究

三峡电站压力管道具有条数多 (26 条)、直径大 (内径 12.4 m)、HD 值高 (1730 m^2) 等特点。在“七五”国家重点科技攻关项目的初步设计中选定了在下游坝面浅预留槽的背管型式。

关于结构型式,在技术设计阶段初期选定钢衬钢筋混凝土管道方案。

在技术设计过程中,除长江委进行大量设计和研究工作外,根据需要,三峡总公司技委会组织了若干单位进行了 7 项科学研究和试验,其中包括:结构仿真计算;坝内埋管段结构分析与大比尺仿真材料结构模型试验;大比尺平面结构模型试验研究;上弯段大比尺结构模型试验;下弯段大比尺结构模型试验;预应力钢筋混凝土管道结构设计研究;下平段施工措施研究等,取得了丰硕的成果,使我国在这方面的科研水平上了一个台阶,为三峡工程压力管道技术设计质量的提高创造了条件。

为了解我国采用钢衬钢筋混凝土压力背管的实际情况,技委会组织了专家组有关专家会同长江委设计人员,对东江、五强溪水电站引水压力管道进行了调查。三峡总公司还邀请了 3 位俄罗斯专家对钢衬钢筋混凝土联合受力管道的设计和施工进行了咨询,组团到俄罗斯考察了钢衬钢筋混凝土压力管道的设计和施工技术。

根据以上研究与考察结果,长江委对钢衬钢筋混凝土压力管道的设计做了优化,总的安全系数由 2.2 降为 2.0;提高钢衬和钢筋强度级别;钢筋的布置不宜多于三排等。

由于压力管道直径特大,采用常规伸缩节难以

满足要求。经计算分析,左岸厂房1#~6#坝段厂坝间的相对位移和转角较小,钢管的应力在允许应力范围内,确定采用垫层管取代伸缩节方案。7#~14#河床坝段的相对位移稍大,钢管应力绝大部分在允许应力范围内,仅局部超过允许应力,若合理选择合拢时间,也可以取消伸缩节;考虑到安全因素,最后7#~14#坝段管道厂坝连接段选用带波纹管止水的伸缩节,该结构型式新,是国内外尺寸最大的伸缩节。

3.3 蜗壳外围混凝土结构型式及施工工艺研究

三峡水电站具有单机容量大、台数多、总装机容量大的特点,在电网中是举足轻重的巨型电源。鉴于该电站的重要性,为保证机组运行稳定,蜗壳混凝土结构型式的合理选择是重要因素之一。电站机组的蜗壳尺寸大,HD值高,水头变幅大,蜗壳外围二期混凝土相对较薄,合理选择蜗壳混凝土结构型式,增强蜗壳结构的刚度,有利于提高机组运行稳定性。针对上述问题开展了大量的设计和试验研究工作。

1) 采用大比尺物理仿真模型,研究结构的受力特性、超载能力和破坏形态。武汉大学水利电力学院和长江水利科学院分别进行了模型试验,两者的试验成果相近,可信度高。

2) 大量的三维有限元计算,成果包括:充水保压方案优于垫层蜗壳方案;对保压水头进行了优选;在确定保压水头70 m以后,研究提出了保压保温控制标准和措施。

3) 可考虑温度、徐变、自重、水压等荷载和缝面接触问题,同时又可模拟结构、材料参数和边界条件随混凝土龄期和施工过程变化的三维有限元仿真计算。

采用数值分析、结构模型试验和原型观测分析相结合的技术路线进行综合研究,研究成果已应用于三峡左岸电站厂房工程。

4 双线连续五级船闸工程^[7~9]

4.1 船闸总体设计

双线连续五级船闸是工程蓄水后解决船舶过坝的关键设施。三峡工程能否解决高坝通航问题,直接关系到长江黄金水道航运的发展和沿江地区经济的发展。根据坝址的地形地质特点和河道复杂的水沙条件,首先对与船闸技术可行性、先进性和运行可靠性有关的带有全局性的总体技术进行了研究。

船闸设计总水头113 m,远大于目前世界上已建船闸的最大总水头72.8 m,坝址河道地形和水沙条件复杂。经研究,提出了采用双线连续五级船闸(见封面),并对船闸主体建筑物基本结构型式做出了决策,解决了三峡水利枢纽高坝通航的问题。

4.2 高水头大型船闸输水技术

高水头船闸的输水技术水平直接影响船闸的运行安全和船舶过坝的效率,是目前世界上大型高水头船闸必须解决的一个技术难题。船闸输水系统必须满足三个重要指标,即输水时间要满足通过能力的要求,控制在12~13 min;廊道系统的水流条件必须防止对廊道和阀门造成气蚀和声振;闸室的水面升降平稳,上下游引水和泄水满足船舶通航水流条件的要求。三峡船闸级与级之间的最大输水水头45.2 m,远大于目前世界上已建船闸的最大输水水头36.4 m。经研究,采用先进的船闸输水综合技术,解决了船闸闸室快速、安全、平稳输水的难题,保证了在船闸充泄水过程中,上下游引航道通航的水流条件。

4.3 深切高陡边坡的稳定、变形控制与大型衬砌结构研究

船闸高边坡集高、陡、长于一体,不仅规模大、形态复杂,岩石开挖后,岩体存在深切开挖卸荷变形的问题,船舶过闸对边坡稳定的要求高,如此复杂的船闸高边坡问题,在国内外尚无先例。不仅要保持高边坡岩体在施工期和运行期的稳定,要求岩体作为船闸结构的一个组成部分与衬砌结构协同工作,还要考虑边坡岩体变形对船闸设备正常运行,特别是对人字闸门正常运行的影响。通过应用大量高新技术进行地质勘测和多种现场科研试验,用不同模型进行计算分析,采用开挖、加固、防渗、排水等综合技术,可靠地解决了高边坡的稳定与变形问题。在此基础上,通过合理采用岩槽的开挖形式(保留两线船闸间岩体隔墩)和船闸的结构型式,大量节省了工程量和投资,保证了船闸的建设工期。

4.4 高大人字门结构和启闭机可靠性研究

船闸人字门的规模和淹没水深均超过当前世界最高水平。通过引入新的设计概念,采用新方案、新材料、新工艺和新设备,解决了高大人字门结构受力、运行的可靠性及其特大启门力等技术难题。

4.5 复杂工况下船闸运行监控技术

三峡五级船闸设备多,首先船闸需根据上下游

不同的水位组合,分别采用不同的级数运行,在同一级船闸中根据上下游来船的不同,时有1~3个闸室同时在过船运行,一个闸室的两侧阀门通常为双边同步运行,有时只一边运行,在某些水位情况下参与运行的第二级闸室需要补水等等,运行工况远较一般船闸复杂。为保证船闸运行的可靠性和效率,经研究,船闸按照集中和分散两套控制方式进行设备配置,并自主开发了多种对船闸进行监控的专用软件,保证了在复杂工况下,安全、可靠、灵活地对船闸进行监控,并为船闸集中自动监控技术的推广应用奠定了基础。

4.6 高难度的船闸施工技术

三峡船闸施工工程量大、工期紧、技术难度高。170 m深切岩坡开挖,其下部直立开挖部分需作为船闸结构的组成部分,要求保持岩坡的强度和完整性,高薄衬砌墙混凝土浇筑、高大闸阀门设备的安装等施工难度均非一般船闸施工可比。针对复杂地质条件下高达68.5 m直立岩坡的开挖、300 t级长达60 m的水平锚索施工,对施工工序、直立坡成型、爆破控制,锚固的设备和器材,提出了成套工艺和技术要求,并分别提出了多种控制岩体质量的新技术和水平锚固工程的高精度施工工艺及技术标准。混凝土浇筑首创采用了已获国家专利的先进立模施工新技术。针对金属结构和设备安装提出了大型人字门、阀门、设备安装的专用标准和安装工艺等,保证了船闸施工的质量和工期。

5 特大型水轮发电机组^[1,3]

水轮发电机组是发挥三峡工程发电效益的关键设备,它在电力系统中承担基荷、调峰、调频及进相运行等重大作用。设有26台特大型水轮发电机组的三峡电厂是当今世界上最大的水电站。它在实现“西电东送”和全国电力联网的战略,实现我国能源结构的优化配置方面,具有极其重要的地位。

由于三峡工程防洪和排沙的需要,三峡水轮机的运行水头变幅甚大,达40 m。又由于确保运行可靠、安全、稳定的原则,必须摆在首位考虑,使得机组的设计、制造、安装都具有很大的难度,并超过了世界上已有的大型水轮发电机组。

1) 单机容量 70×10^4 kW的三峡电站水轮发电机组是世界上单机出力最大的混流式水电之一。其主要技术参数代表了当今世界的先进水平,亦反映了水轮机的最新发展趋势。其中,水轮机真机效率

达到96%,发电机效率达到98.77%。

2) 三峡机组尺寸巨大,水轮机转轮直径达10 m,发电机定子机座外径达21.4 m,定子铁芯内径达18.8 m,铁芯高度达3.73 m,均为世界之最,其单台机组质量约6 600 t,是目前世界上最大的水轮发电机组。

3) 三峡发电机的推力负荷达5 500 t,亦为当今世界之最,伊泰普发电机的推力负荷为4 700 t。

4) 针对三峡电站的特点,在水轮机和发电机的设计制造过程中采用了目前世界上成熟的新技术、新结构和新材料。如CFD技术,X叶片,通流部件普遍采用不锈钢材料等。

5) 三峡电站左岸14台机组采取公开招标、议标决策的方式,责任方为国外制造厂商,国内工厂参与,并与国外厂商联合设计,合作生产,加速和极大提高了我国巨型水轮机的研究、设计、制造能力和应用水平,极大地促进了我国巨型水电机组国产化的进程。

6) 三峡左岸电站机组安装创造了一年内(2003年)连续安装、投运6台 70×10^4 kW机组,总容量达 420×10^4 kW的世界最高记录。

6 三峡工程导截流及围堰工程

6.1 施工导流及施工期通航研究^[10]

长江为航运黄金水道,施工期的航运畅通非常重要。三峡工程施工导流方式及施工通航方案与工程枢纽总体布置、施工导流、施工布置和总进度密切相关,为一庞大复杂的系统工程。必须运用系统工程的思路论证决策施工导流方案;不同的导流方式产生不同的通航效果。通过多年的方案比较研究,确立了“三期导流、明渠通航、围堰挡水发电”的施工方案。施工期通航问题的关键时期为主河道截流期至库水位蓄至135 m永久通航建筑物启用前期间。按初步设计,施工通航有三条通道(导流明渠兼作通航、临时船闸和一线垂直升船机)。后升船机缓建,如何改善明渠和临时船闸的通航条件,确保施工期长江航运基本畅通,以及如何挖掘明渠通航潜力,缓解临时船闸过船压力,提高明渠、临时船闸的综合通过能力等方面的研究就更为重要。

该项目研究影响因素诸多,技术难度高,意义重大,为了更好地完成并实施该项目,开展了全方位的、全国性的联合技术攻关。既有大量的物理模

型及原型试验研究,又有数学模型计算分析;既有原型资料的分析研究,又预测了未来施工期通航能力及影响;既有工程施工影响的跟踪模型试验及原型运行观测,又建立了工程运行安全的信息反馈保障系统。主要科学技术内容和创新成果如下:

施工导流方案比较研究:三斗坪坝址河床宽阔,坝址处有中堡岛,形成了良好的分期导流条件。施工期通航问题至关重要,分期导流的具体方案设计,必须结合施工期通航方案一并研究。为此,研究比较了右岸导流明渠施工期不通航和通航两种类型的多种方案。

明渠通航与明渠不通航方案比较研究:由于施工导流方式及施工通航方案,特别是明渠是否兼作通航航道,还直接影响工程的施工总进度及施工期通航问题。经多年研究,明渠通航和不通航方案具有不同的特点。三峡工程施工期采用导流明渠结合临时船闸和升航机通航,既有利于提高施工期通航保证率、增加通航可靠性,又有利于减少初期工程规模、缩短工期、提前发电。

导流明渠体型、布置及临时船闸通航技术研究:针对三峡坝址复杂的弯道水流现象,对明渠的布置、规模、体型等进行了系列试验研究。最后选定的导流明渠体型及布置,成功地解决了复杂弯道水流条件下明渠“导流”和“通航”设计流量相差较大(近4倍)等矛盾。明渠导流经受了1998年特大洪水的考验,并成功地保障了6年施工期的安全通航。

临时船闸通航技术研究内容主要包括:临时船闸引航道的清淤减淤措施;研究改善临时船闸引航道口门区通航水流条件的措施。

提高明渠汛期通航能力研究:当长江为中、小流量时,船队多由明渠通行,入汛后,明渠水陡流急,船队无法通行,须改由临时船闸通过,但临时船闸规模较小,引航道泥沙淤积,清淤与通航相互干扰,上下锚地相距较远,品字形超宽船队解编,以及较难预测的临时船闸运行故障导致的停闸检修,将出现长江断航,因此研究明渠汛期通航及提高通航能力的措施显得非常必要。为此,在满足设计通航流量的条件下,通过提高明渠汛期通航能力研究(减驳减载、施绞换推等工程措施的采用),使施工期通航流量由设计的 $20\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 提高到 $40\,000\text{ m}^3/\text{s}$ (上水) $\sim 45\,000\text{ m}^3/\text{s}$ (下水),成功地实现了施工期长江航运的畅通。

基于以上成果,鉴定委员会认为,在特大型综合水利枢纽工程建设中,在巨大导流流量($79\,000\text{ m}^3/\text{s}$)和极高通航水流条件下,满足了客货量的通过能力($1\,500\times 10^4\text{ t/a}$),成功地在弯道上解决了明渠导流及施工通航的关键技术问题,成果总体上达到国际领先水平。

6.2 长江两次截流及深水高土石围堰关键技术^[11,12]

6.2.1 大流量深水河道截流技术 三峡工程截流包括大江截流和导流明渠提前截流,截流成功后都面临在一个枯水期快速修建深水高土石围堰。三峡工程大江截流和明渠提前截流的难度,与世界上单项水力学指标最高的一些截流工程比较,都是较高的,其综合困难程度乃世界截流史所罕见。1997年11月8日大江截流和2002年11月6日导流明渠提前截流成功,标志我国河道截流技术已跻身世界领先地位。

三峡工程大江截流是修建二期上下游土石围堰关键性的第一道工序,其目的是截断长江主河道,迫使长江水流改道从导流明渠渲泄。截流最大水深达60 m,居世界截流工程之冠。大江截流施工与航运关系密切,截流过程必须兼顾通航。截流河床地形地质条件复杂,深槽新淤砂及其左侧陡峭岩壁,对截流戗堤稳定极为不利。针对大江截流水深,戗堤侵占出现堤头坍塌的难题,探讨了深水截流堤头坍塌的机理,提出并采用了深水平抛垫底措施,有效防止了堤头坍塌事故的发生,1997年11月8日,龙口顺利合拢。实测截流流量 $11\,600\sim 8\,480\text{ m}^3/\text{s}$,落差0.66 m,最大流速4.22 m/s,截流最高日抛投强度 $12.09\times 10^4\text{ m}^3$ 。

明渠截流初步设计为12月上旬,截流流量为 $9\,010\text{ m}^3/\text{s}$,鉴于后续工程施工工期紧,施工压力大,极大地制约着工程的施工进度,明渠截流宜尽量提前,而明渠提前截流又涉及诸多复杂因素,不但导流建筑物应具备提前投入运行的条件,而且提前截流本身在截流难度方面将产生实质性变化。明渠提前截流具有截流流量大(设计流量 $Q=12\,200\sim 10\,300\text{ m}^3/\text{s}$)、截流水深(20~25 m)、落差大(相应设计流量落差5.77~4.11 m)、龙口流速大(最大垂线平均流速7.47~6.68 m/s,最大点流速达8.47 m/s)、截流总功率大,达 $69.0\times 10^4\sim 41.5\times 10^4\text{ kW}$,截流难度极大。同时,明渠属人工河道,基面平整光滑,对抛投料稳定不利;

截流进占时,必须以右岸端进为主,单堤头抛投强度极高;同时也要兼顾通航;再加上明渠截流水深大而水面坡降极小等。制约因素复杂、施工强度高,存在许多关键技术及难题,是当今世界上截流综合难度最大的截流工程。为此进行了多年的一系列关键技术攻关研究。不论是截流工程关键技术研究,还是高质量截流的信息跟踪,以及动态决策保障系统研究等方面,均取得了创新成果。

6.2.2 深水土石围堰关键技术 二期上下游土石围堰最大高度 82.5 m,堰体施工最大水深 60 m,为深水土石围堰。围堰基础地形地质条件复杂,上部为淤砂层,下部为砂卵石及残积块球体夹砂层,基岩面起伏差较大,且表层岩体为较强透水带,河床深槽左侧为高差 30 m、坡角近 80°的陡岩。围堰型式为两侧石渣及块石体、中间风化砂及砂砾石堰体,塑性混凝土防渗墙上接土工合成材料防渗心墙。在河床深槽部位堰体中间设两排防渗墙,两墙中心距 6 m,墙厚 1 m,墙底嵌入花岗岩弱风化岩石 1 m,其下接帷幕灌浆。围堰填筑量达 $1\ 032 \times 10^4 \text{ m}^3$,且 80% 堰体为水下抛填,防渗墙面积达 $8.4 \times 10^4 \text{ m}^2$,需在 1998 年汛前建成度汛,工期紧、强度高、施工难度大,为国内外已建水利水电工程罕见,是三峡工程建设中的重大技术难题之一。围堰于 1998 年 6 月抢至度汛高程,先后经受长江 8 次洪峰考验,在洪水流量 $61\ 000 \text{ m}^3/\text{s}$,最高水位 77.8 m 时,围堰运行正常。

围堰设计的实质问题是如何在深水抛填的散粒料中和复杂地质条件下,快速建成一座具有可靠防渗体系的满足安全运用要求的大型土石坝。其技术难题主要有:断面的结构和防渗型式的选择;60 m 水深下抛填风化砂密度的确定;深槽、陡坡、硬岩防渗墙的施工技术;新型柔性墙体材料研制及其质量控制方法;新淤砂的动力稳定性及其处理。为此,国家“七五”、“八五”科技攻关以及三峡工程技术设计和施工阶段科研等项目中安排了一系列研究课题。围堰从设计、研究、实施、运行到拆除研究的全过程,实质上是完整的原型土石坝工程试验过程,2003 年 5 月顺利完成了使命,并安全拆除。

6.3 三期碾压混凝土围堰

三期碾压混凝土围堰的修建为双线五级船闸通航和左岸电站发电及为右岸大坝及厂房创造干地施工创造了条件。堰体为重力式,堰顶高程 140 m,

顶宽 8 m,最大堰高 121 m,最大底宽 92 m,上游面高程 70 m 以下坡比 1:0.3;以上为垂直坡;下游面高程 130 m 以上为垂直坡,130 m 至 50 (58) m 高程为 1:0.75 的边坡,其下为平台。

三期碾压混凝土围堰,迎水侧 4 m 厚防渗层采用二级配碾压混凝土, $R_{90}200^\#$ 、 S_8 ;其余为三级配碾压混凝土, $R_{90}150^\#$ 、 S_4 。沿围堰轴线 40~42 m 设 1 条结构横缝,相邻结构横缝中间设诱导缝,不设纵缝。堰体设置两层廊道,第一层为基础灌浆排水廊道,其底板最低高程 40 m;第二层为堰体排水观测廊道,其底板高程 90 m,堰体排水孔距 3 m。三期碾压混凝土围堰主要工程量:基础开挖 $65.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,混凝土量 $167.36 \times 10^4 \text{ m}^3$,固结灌浆 6 650 m,帷幕灌浆 6 510 m,基础排水孔 2 950 m。围堰分二个阶段施工:基坑积水抽干后进行第二阶段施工,浇筑明渠段碾压混凝土 $110.66 \times 10^4 \text{ m}^3$,明渠段沿围堰轴线长 380 m,堰体高度 90 m。要在 2003 年 5 月底,即不到 5 个月的时间内完成。为攻克这一技术难题,开展科技攻关,全面优化和采用新工序,使碾压混凝土浇筑提前于 2002 年 12 月 16 日开始,于 2003 年 4 月 16 日全部浇筑至实际高程 140 m,避开了高温季节浇筑碾压混凝土的难题,提前完成了任务:最大仓面面积达到 $19\ 012 \text{ m}^2$;最大月浇筑强度达 $47.6 \times 10^4 \text{ m}^3$;最大日浇筑强度达 $21\ 066 \text{ m}^3$;最大班率达到 $7\ 250 \text{ m}^3$;最大小时浇筑达到 1278 m^3 ;以及日上升 1.2 m。

7 特大型工程管理创新

7.1 三峡工程建设管理体制

党中央、国务院高度重视三峡工程建设,形成了特大型工程的科学决策体系。为了确保工程建设的顺利进行,国务院决定成立国务院三峡工程建设委员会(三建委),是三峡工程的高层次决策机构,由国务院总理任主任,国务院有关部委及重庆市、湖北省政府主要负责人为委员。三建委下设办公室,负责三建委的日常工作,制定三峡工程移民安置的方针政策,审批移民安置规划和实施计划,并对移民搬迁的具体实施进行监督。经国务院批准成立的中国长江三峡工程开发总公司,是一个独立核算、自主经营、自负盈亏、具有法人地位的经济实体,是三峡工程建设项目法人,全面负责三峡工程的建设 and 建成后的运行管理,负责三峡工程建设

资金(含水库淹没处理与移民安置费用)的筹措和偿还,成立技术委员会主要对三峡工程重大技术问题进行审查咨询。工程设计由长江水利委员会总成。经招投标选择施工承包商和监理单位。除直接参加三峡工程建设单位外,还有国内有关科研院所和高等院校数千名科技工作者参加了三峡工程建设的科研攻关工作。

7.2 投资管理模式

首创“静态控制、动态管理”的投资管理模式,工程投资得到有效控制;建立和完善了以概算控制和合同价管理为基础的、具有双重约束机制的投资控制体系;编制了业主总执行概算、分阶段执行概算和合同项目实施控制价作为工程建设过程中投资控制的依据;加强了设计、招标、合同管理全过程的投资控制;成功地探索了一套建设项目价差管理办法,对因价格波动影响导致的工程投资变化进行科学管理;建立了投资跟踪预测和风险分析制度,推行全面预算管理,严格控制费用。这些措施的建立和完善,使工程投资得到了有效控制。至2003年底,三峡工程累计完成固定资产投资1005亿元,其中枢纽工程静态投资完成363亿元,占工程概算(静态)的73%;水库移民静态投资完成304亿元,占移民概算(静态)的76%;价差预备费192亿元,利息135亿元,库区移民包干外投资11亿元。与1994年投资测算方案相比,总投资减少64亿元,静态投资因移民投资列报提前增加89亿元,价差和利息分别减少130亿元和34亿元。从完成的枢纽工程量和列报投资匹配情况看,与概算比较,绝大部分项目的工程量完成比例高于投资完成比例,说明枢纽工程投资列报规范,控制情况较好。

7.3 多元化融资

形成了多元化的融资格局,保障了工程建设的顺利进行。适应三峡工程不同阶段的特点,制定了分阶段的筹资方案。在一期建设阶段,以国家注入的资本金和政策性银行贷款作为主要的资金来源。在二期建设阶段,逐步加大了市场融资份额,从1997年开始进入国内债券市场发行企业债券,成功发行6期共190亿元企业债券,并使用了国外出口信贷及国际、国内商业银行贷款。在开始转入三期工程建设阶段时,长江电力于2003年11月18日成功上市,募集资金100.018亿元。总公司在资本市场上开辟了“三峡债券”和“长江电力”两个

具有品牌形象的债券和股票融资窗口。截止2003年底,三峡工程累计到位资金1165.7亿元,其中作为国家资本金注入的三峡基金和葛洲坝电厂发电收益456.9亿元,占到位资金的39.2%;债务融资合计521.9亿元,占到位资金的44.8%;向长江电力出售机组获得现金187亿元。资金运作良好,及时足额到位,保障了工程建设和移民资金拨付的需要。

7.4 工程质量保证体系

为保证三峡特大型工程的质量,三峡工程制定了一套完整的质量标准,建立健全了工程质量保证体系,质量管理水平不断提高。总公司认真贯彻落实党中央、国务院领导关于三峡工程质量的一系列重要指示和国务院三峡工程建设委员会质量检查专家组意见,牢固树立质量第一的思想,提出了“零质量事故”管理目标;建立和健全了三峡工程质量保证体系,颁布实施了符合三峡工程特点并高于国内行业标准的质量标准体系,加强了混凝土原材料、生产、浇筑、养护和金结机电设备制造、安装、调试全过程的质量控制,采取了一系列管理和技术创新措施,如推行了单元工程工艺设计、设立了质量特别奖、聘请了国内外专业质量总监等。经过10年建设,2003年双线五级船闸、左岸大坝、茅坪溪防护土石坝、左岸电站厂房、三期碾压混凝土围堰等主要建筑通过国家阶段验收,蓄水后(水位135m~139m)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,工程是安全可靠的。在三期工程施工中,全面总结和吸取了二期工程的经验教训,继续实行和完善专业质量总监职能,全面修订和落实三峡工程质量标准,进一步规范三期工程施工技术要求,切实加强温控措施,建立质量检查与处理的快速反应机制和坚持工艺设计制度,坚持职工培训,树立精品意识,有效地保证了混凝土的施工质量和水轮发电机组的安装质量。

7.5 工程进度管理

制定科学的进度计划,阶段性控制目标均按期或提前实现。为适应三峡工程规模大、项目多的特点,逐步建立和完善了以项目管理为基础、以信息化为辅助手段的进度控制体系;根据设计批准的控制性总进度编制了实施进度总计划,并在此基础上进一步细化、分解,编制了分项目的年度、季度、月度计划和保证计划按期实现的施工组织设计;同

时引入了先进的管理理念和现代化的管理工具,提升了进度控制水平;应用P3软件制定最佳的项目目标实施计划;在实施过程中,重点加强对节点工期目标的控制,对于偏离或滞后于计划的项目,及时进行动态调整,优化技术方案,加大资源配置,采取有效的激励措施,确保所有项目按计划实施。

7.6 安全生产管理

坚持以人为本,安全生产管理逐步走向制度化、标准化和规范化;认真贯彻落实《安全生产法》,坚持“安全第一、预防为主”的方针,提出了“零安全事故”管理目标,并聘请了日本的安全总监,引进了国外先进的管理理念和措施,不断完善三峡工程安全生产管理体系,落实安全生产责任制,强化各项管理措施;颁布实施了《三峡工程安全生产十项硬性规定》,严格执行了“周联合检查制度”、“干部对口班组培训管理制度”、“班组六项工作循环制度”等规定;对民工实行了“四统一”管理,即统一用工、统一食宿、统一劳保、统一培训,改善了民工的生产和生活条件;在全工地广泛开展了创建文明施工区活动,进一步促进了安全生产管理工作;死亡、重伤事故得到有效遏制,事故频率大大下降,是三峡工程开工以来事故起数、死亡与重伤人数最低的年份;高度重视电力安全生产,特别是对新投产机组采取了一系列技术和管理措施,保证了机组的安全运行。

7.7 工程信息化管理

在1995年三峡工程开工初期,总公司就开始与加拿大合作建设三峡工程管理信息系统(TGPMIS),这也是中国水电工程界首次引进管理信息系统(MIS)。通过消化吸收和二次开发,实现了三峡工程全过程、全方位信息控制与管理目标,促进了工程建设的科学管理,并在国内数个大中型建设项目中推广应用。运用计算机控制技术,初步实现了三峡-葛洲坝梯级枢纽运行调度管理自动化,建成了三峡-葛洲坝水库水情自动测报分析系统、梯级枢纽优化调度和发电调度系统、三峡泄洪设施、左岸电站、双线五级船闸现地自动监视和集中监控系统,上述系统于2003年陆续投运。2003年又成功开发了电力生产管理信息系统(EPMS),这个系统是三峡电厂生产管理的信息平台,可定量监控生产成本和优化企业资源配置,它的建成为三峡电厂促进电力生产科学管理,创国际一流电厂奠定了基础。

7.8 坝区管理与环境保护

实行“业主为主,地方配合”坝区封闭式的管理,为工程建设创造了良好的环境;总公司和地方政府加强合作,企地共建,以服务三峡工程建设为目标,以业主为主导,地方政府积极配合和参与管理,确保了三峡坝区及其周边地区的政治稳定和社会安定,保障了工程建设的顺利进行;树立全面、协调、可持续发展的观点,高度重视生态环境的保护,将环境保护和工程建设进行同步规划、同步实施,加强了坝区绿化,水土保持,防治水环境保护和大气保护等工作,改善了坝区自然环境。

7 结论

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,汇集全国科技精华,充分发挥专家的作用,展开科技攻关,并借鉴国外先进经验,科学决策,取得了一系列技术上的重大突破,实现了质量、进度和投资的有效控制,保证了二期工程蓄水、通航、发电建设目标的实现。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。该项目研究成果已在工程建设中得到了全面应用,主要研究结论如下:

1) 研究比选确定坝址、枢纽总体布置和工程总规模;大坝采取深孔、表孔、导流底孔三层孔口相间布置缩短了泄洪前沿,解决了枢纽大泄流能力的世界级难题;采取多种综合工程措施,解决了坝基局部高连通率结构面稳定的难题;解决了大型钢衬钢筋混凝土压力管道设计方法;大坝混凝土年浇筑强度居世界第一。

2) 研究采用适合坝址河道地形和水沙条件特点的双线连续五级船闸和先进施工技术,解决了总设计水头远大于世界已建船闸的高坝通航难题。

3) 水轮发电机组最大容量、尺寸、推力负荷、效率均居世界领先水平,解决了低水头可多发电,高水头可稳定发电的难题,满足电网对机组的要求,创年安装投产6台机组的世界最高水平。

4) 导流方案确保了施工期复杂流量条件航运畅通,解决了深水、大流量、厚覆盖层河床大江截流及综合难度世界第一的明渠截流难题;快速建成80 m深水高土石围堰和90 m碾压混凝土围堰。

5) 形成了一整套特大型水电工程建设管理模式,建管无缝交接,实现了长江流域梯级滚动开发。

参考文献

- [1] 王家柱. 三峡工程建设的主要科技难题 [J]. 中国工程科学, 2003, 5 (8): 16~22
- [2] 陆佑楣. 在实践中认识三峡工程. 中国三峡建设 [J], 2003, (1): 4~6
- [3] 张超然, 戴会超. 三峡工程建设中若干重大技术问题的突破 [J]. 中国工程科学, 2003, 5 (2): 20~25
- [4] 戴会超, 张超然. 三峡工程大坝混凝土快速施工新技术 [J]. 水利学报, 2002, (10): 104~108
- [5] 张超然, 戴会超. 三峡工程重大技术问题的研究 [J]. 水利水电技术, 1998, (1): 6~11
- [6] 张超然, 戴会超. 三峡水利枢纽工程建设概况和若干关键技术问题 [J]. 水力发电, 1998, (1): 16~19
- [7] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院等. 三峡船闸关键技术 [R]. 湖北宜昌, 2004
- [8] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院等. 三峡船闸高边坡工程关键技术 [R]. 湖北宜昌, 2004
- [9] 张超然, 戴会超. 三峡工程建设中的几个岩土力学问题 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 23, (10): 1591~1598
- [10] 杨文俊, 周良景, 朱光淬. 三峡工程明渠导流及其通航研究与运行效果 [J]. 长江科学院报, 2002, (6): 3~5
- [11] 郑守仁. 三峡工程大江截流及二期围堰设计主要技术问题论述 [J]. 人民长江, 1997, (4): 1~4
- [12] 王家柱. 三峡工程大江截流若干重大问题的研究和决策 [J]. 中国三峡建设, 1996, (12): 1~4

Innovation of Management and Science and Technology in Phase II Construction of TGP

Dai Huichao, Cao Guangjing

(China Yangtze Three Gorges Project Corporation, Yichang, Hubei 443002, China)

[Abstract] The Three Gorges Project (TGP) has the characteristic of engineering largeness and technology complexity. The Three Gorges Reservoir started storing water on June 1, 2003, and water level reached 135 m on June 10. The double-way consecutive five-step ship locks succeeded trial navigation on June 16, 2003. The first hydro turbine generator units were put into operation on left bank in July, there were 6 sets hydro turbine generator in operation at the end of 2003. The Phase II construction of TGP, in terms of storing water, navigation and power generation, has been finished. Breakthroughs have been made in a number of key technology problems, such as the TGP general layout and dam engineering, power station, the double-way consecutive five-step ship locks, super-hydro generator set, river diversion, river closure and cofferdam, research and practice of giant project's management, etc.

[Key words] Three Gorges; dam, hydropower station; ship lock; generating set; river closure; management