

# 三峡工程建设中若干重大技术问题的突破

张超然, 戴会超

(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。文章介绍了三峡工程建设在大江截流和混凝土防渗墙施工技术、大坝混凝土快速施工新技术、船闸高边坡施工技术、电站大型钢衬钢筋混凝土压力管道和蜗壳保温保压技术、沥青混凝土心墙、船闸金属结构、水轮发电机组等重大技术问题上的突破。

**[关键词]** 三峡工程; 重大技术; 突破

**[中图分类号]** TV5, TV6 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)02-0020-06

## 1 引言<sup>[1]</sup>

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、航运等巨大综合效益, 建成后将对我国社会经济发展产生巨大的影响。枢纽正常蓄水位 175 m, 总库容  $393 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。枢纽主要由大坝、水电站厂房、通航建筑物三大部分组成。大坝为混凝土重力坝, 大坝轴线全长 2 309.5 m, 最大坝高 181 m。泄洪坝段居河床中部, 两侧为厂房坝段和非溢流坝段。电站为坝后式厂房, 左、右岸厂房分别安装 14 台和 12 台单机容量为 700 MW 的水轮发电机组, 总装机容量 18 200 MW, 右岸预留后期扩机的 6 台机组。通航建筑物位于左岸, 永久通航建筑物为双线五级船闸及单线一级垂直升船机。施工期另设单线一级临时船闸, 配合导流明渠满足施工期通航要求。

工程建设采用“一级开发, 一次建成, 分期蓄水, 连续移民”的建设方案, 总工期为 17 年, 分三个阶段进行。第一阶段 1993 年至 1997 年, 以实现大江截流为标志; 第二阶段 1998 年至 2003 年, 以实现水库初期蓄水、首批机组发电、船闸通航为标志; 第三阶段 2004 年至 2009 年, 实现全部机组发电、工程竣工。

三峡工程自 1993 年开工至今, 工程进展顺利, 进度符合总进度计划要求, 质量满足设计要求, 投

资控制在概算范围之内, 技术上取得一系列重大突破, 创造了水电建设史上一批新的世界记录。

## 2 大江截流和混凝土防渗墙施工技术<sup>[2,3]</sup>

二期围堰施工, 是影响三峡工程施工成败的关键性项目之一。大江截流和混凝土防渗墙施工是二期围堰的两个关键技术问题。

### 2.1 大江截流

三峡大江截流具有截流水深和流量大、截流施工强度高和工期紧、截流进程中有通航要求、以及戗堤基础覆盖层深厚的难点。

三峡坝址位于葛洲坝枢纽水库回水区, 截流时河床最大水深约 60 m, 居世界首位。如何防止戗堤进占时堤头坍塌和保证堤头稳定, 成为截流的关键。为此, 开展了大量水力学模型试验、数值计算和机理分析研究。试验和分析表明, 当水深减少到 20 m 左右时, 可以有效防止堤头坍塌, 保证堤头的安全稳定。最终确定采用预平抛垫底、上游单戗立堵, 双向进占, 下游尾随进占的方案。

三峡大江截流设计流量  $14\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ , 为了做到万无一失, 按截流流量  $19\,400 \text{ m}^3/\text{s}$  进行备料及截流准备。同时采用高科技手段, 为合理安排截流施工进度、选择截流时机、截流过程中戗堤口门的水文要素, 以及导流明渠冲淤变化等情况提供技术

支持；成功开发了无人立尺观测技术，解决了龙口水位观测的难题；采用无人测船技术，配置新型的“哨兵型”声学多普勒流速剖面仪和微机测流系统，成功地实现连续搜索监测口门区的流速变化和水舌位置；实施水情动态跟踪滚动预报。此外在大江截流整体水工模型上开展跟踪预报试验，模拟动态变化的边界条件，跟踪现场施工，预报并分析截流过程中可能产生的影响；同时采用大江截流三维计算机仿真模型，演示截流进展动态，供现场总指挥部决策。

1996年汛后，截流戗堤开始预进占，至1997年汛前，形成上游460 m宽的口门，下游口门宽480 m，并安全度汛。1997年9月中，随着长江流量的递减，截流戗堤继续预进占，至10月27日龙口束窄至40 m。11月8日9时，开始龙口合龙，15时30分，大江截流合龙胜利完成，创造了截流流量8 480~11 600 m<sup>3</sup>/s，截流水深60 m，上下游戗堤进占24 h抛投强度 $19.4 \times 10^4$  m<sup>3</sup>的世界记录。

## 2.2 混凝土防渗墙施工技术

二期围堰的技术难点是：最大堰高82.5 m，土石方总填筑量 $1 220 \times 10^4$  m<sup>3</sup>，防渗体总面积 $20 \times 10^4$  m<sup>2</sup>，其中混凝土防渗墙近 $10 \times 10^4$  m<sup>2</sup>，围堰规模名列世界前茅；堰址水深达60 m，约2/3的堰高在水下施工，难度很大；堰址地质情况复杂，覆盖层中有块球状孤石，表面有粉细沙层，地形起伏大，有深槽和陡坡，不利于防渗墙的施工；根据现场条件，采用风化砂作主要填料，水下抛填时结构松散，难以密实，物理力学指标差，围堰变形大；必须在一个枯水期内完成，施工强度高，月填筑强度超过 $300 \times 10^4$  m<sup>3</sup>，月成墙强度达 $1.3 \times 10^4$  m<sup>2</sup>。

二期围堰的最大难点是混凝土防渗墙施工。为此，针对不同地层特征，研究采用了不同的成槽机具和方法，主要的方法有：

铣削成槽法。采用液压双轮铣槽机，对堰体、覆盖层和全强风化层铣削成槽，速度快、效率高。

铣、砸、爆结合成槽法。在铣削成槽中，遇大块石、块球体和硬岩时，即用全液压钻孔内爆破或辅以槽内紧密聚能爆破，对块球体密集带则经钻孔预爆后再以重锤冲砸，击碎后再用液压铣清孔，有效地解决大块石问题。

两钻一抓（铣）成槽法。先用冲击反循环钻机钻主孔，终孔后用抓斗成副孔（或用液压铣副孔），

该法造孔精度高、效果好。遇块球体和硬岩时，仍用冲击钻砸碎成槽。

施工中还遇到许多难题，如平抛垫底层、一期围堰坡脚及预进占裹头段石渣架空，危及槽孔及施工设备安全。为此，采用投入堵漏料后用钻头冲击实，分层施工完成，并用优质膨润土泥浆固壁，防止坍塌，或根据先导孔资料，掌握严重架空部位，采用布设灌浆孔自下而上分段预灌浓浆处理。

成槽施工中，在槽内掉入钻具或其他铁件难以避免，以往的处理法很复杂、低效，为此研究了深水电磁铁打捞技术。

上述各种成槽技术的应用，使成槽速度成倍提高，如下游防渗墙的成墙速度达到6 600 m<sup>2</sup>/月，保证了二期围堰近 $10 \times 10^4$  m<sup>2</sup>的防渗体得以按期高质量地完成。

以往混凝土防渗墙多采用硬性混凝土，其适应变形的能力差，容易引起过高应力而折断。二期围堰堰高变形量大，经研究试验，采用塑性混凝土做墙体材料，其技术参数为：抗压强度不低于5 MPa，抗折强度不低于1.5 MPa，初始切线模量700~1 000 MPa，渗透系数不大于 $10^{-7}$  cm/s，破坏渗透比降不小于80。运行表明塑性混凝土材料防渗墙具有很强的适应变形能力，为确保防渗墙的安全运行提供了重要的技术保障。

1998年6月22日，二期围堰达临时度汛高程，防渗墙单墙封闭，6月25日基坑开始限制性抽水。8月6日上游围堰第二道防渗墙完工，9月12日基坑按计划抽干。7月初至9月初，长江连续出现了8次洪峰，围堰运行正常。原型观测资料表明，防渗墙最大压应力2.73 MPa，最大拉应力0.045 MPa，均在墙体材料允许范围内。最大渗水量约90 L/s，远低于设计预测值600 L/s。上游围堰第一道防渗墙最大变位达591.40 mm，防渗墙虽位移较大，墙体变形仍是平滑曲线，无明显错位，达到了一流质量。2002年5月1日和7月1日上、下游围堰先后破堰进水，胜利地完成了其历史使命。

## 3 大坝混凝土快速施工新技术<sup>[4]</sup>

三峡工程混凝土总量高达 $2 800 \times 10^4$  m<sup>3</sup>，质量要求高，施工难度大，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。

大坝施工难点：泄洪坝段设有溢流表孔、深孔

和导流底孔三层孔口；厂房坝段布置有电站进水口和排砂孔口，有内径为 12.4 m 的钢衬钢管混凝土压力管道，结构复杂；坝区气候骤降频繁，夏季高温持续时间长，对混凝土温控有特殊要求；混凝土浇筑与金属结构和机组埋件安装，以及与固结灌浆、帷幕灌浆、接缝灌浆并行作业的相互干扰。

### 3.1 塔带机连续浇筑混凝土为主的综合施工技术

为保证三峡大坝的高强度施工，多年来，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。配置五大混凝土拌和系统，设计拌和能力为  $2\,520\text{ m}^3/\text{h}$ 。为实现砂石料的优质特高强度生产和供应，采用了先进的成套生产加工设备，充分利用基坑开挖料等有效措施，采用冲击式破碎制砂机、拌磨机、筛分车间筛分及回收石粉联合制砂新工艺。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，1999—2001 年混凝土浇筑量高达  $1\,409 \times 10^4\text{ m}^3$ 。

塔带机具有连续浇筑、生产率高、可实现混凝土浇筑工厂化生产的特点。三峡厂坝部位布置 6 台塔带机，单台平均生产率为  $100\text{ m}^3/\text{h}$  左右，高峰可达  $200\text{ m}^3/\text{h}$ ，单台平均浇筑月强度可达  $5 \times 10^4\text{ m}^3$ ，并创造了塔带机浇筑 4 级配和一个仓号多品种混凝土的先例。

### 3.2 建立一整套快速施工工艺和管理体系

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。开发研制了混凝土生产运送浇筑计算机综合监控系统，实现了混凝土施工全过程的实时监控、动态调整和优化调度。针对混凝土浇筑的复杂状况，对施工方案和施工计划进行科学的选择和安排，突破了传统的经验判断模式，成功地开发了混凝土浇筑施工计算机模拟系统，提高了混凝土施工效率。

### 3.3 混凝土原材料及配合比优化

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  $< 0.5\%$ ，要求混凝土中总碱量  $\leq 2.5\text{ kg}/\text{m}^3$ ；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 4 级配混凝土用水量由  $110\text{ kg}/\text{m}^3$  减少到  $85\text{ kg}/\text{m}^3$  左右；采用缩小水胶比增加粉煤灰掺量的技术路线，从而更有效提高混凝土的耐久性；采用有补偿收缩性能的 525<sup>#</sup> 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。

### 3.4 二次风冷技术

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  $7\text{ }^\circ\text{C}$  的低温混凝土，设计生产能力为  $1\,770\text{ m}^3/\text{h}$ ，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 & 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。 $7\text{ }^\circ\text{C}$  低温混凝土生产线的工艺流程为：利用地面骨料调节仓作冷却仓，进行第一次风冷粗骨料；利用拌和楼料仓进行第二次风冷粗骨料；加片冰或低温水拌和混凝土。

二次风冷骨料技术创新点是地面骨料风冷替代常规水冷骨料工艺，与高效冷风机及相应的送配风装置组成冷风闭式循环系统用以连续冷却骨料。

经过 1999—2001 年三个夏季高温的运行，实测混凝土出机口温度为  $1.6 \sim 12\text{ }^\circ\text{C}$ ，平均温度为  $6.8\text{ }^\circ\text{C}$ ， $< 7\text{ }^\circ\text{C}$  合格率在  $85\%$  左右。

### 3.5 混凝土综合温控技术

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；采用了从选择优质原材料、优化混凝土配合比、控制混凝土出机口和浇筑温度、通水冷却、表面保温和流水养护等一整套温控措施。由于塔带机混凝土运输过程中温度回升率缺乏与之对应的参照资料，必须寻求理论计算等方法，为此，建立新的计算模型，解决了混凝土温度回升计算的难题。高温季节塔带机快速高强度浇筑坝体约束区混凝土，在国内外为首次，没有可借鉴的施工经验及有关计算分析方法，经研究和论证确定采用综合温控防裂措施。

在深化对温控的分析中，专门开发了“大坝温控仿真反馈分析系统”，提出一整套先进的计算方

法，为三峡体型各异的63个坝段、200个坝块、上万个浇筑仓位在施工期与运行期的温度场与徐变应力场的仿真、预报与反馈分析提供了手段。

通过实施全过程综合温控措施，大大减少了坝体混凝土裂缝的产生。统计到2002年11月止，三峡工程共浇筑混凝土近 $2\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，平均每 $10^4 \text{ m}^3$ 混凝土出现裂缝仅0.16条，低于目前国内外一般为1条的标准；同时还没有发现基础约束区贯穿性裂缝；对已出现的裂缝都进行了可靠处理，不会给工程留下隐患。

#### 4 船闸高边坡施工技术<sup>[2,3]</sup>

双线五级船闸横贯枢纽左岸山体，上下游设引航道与长江主河道相连，全长6 442 m，其中主体建筑物段长1 621 m，是高边坡最集中的区域，最大边坡高度达170 m，土石方明挖 $3\,715 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，洞挖 $98 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

两线船闸中间留有54~57 m的岩石中间隔墩。因此，在主体建筑物段形成双陡槽式双侧边坡。为充分利用岩石的高强度和节省工程造价，在陡槽部位开挖成直立边坡，闸室的边墙为锚固在直立边坡上的混凝土薄衬砌，边坡的岩体亦构成船闸结构的一部分。与一般高边坡相比，船闸高边坡具有以下特点：

1) 它是在山体中深切出来的陡高边坡，高度大、形态复杂、范围广、应力释放充分，呈现出明显的卸荷和非均质特征。

2) 对边坡稳定，尤其是变形特性有严格要求。长江是我国的黄金水道，作为永久船闸的边坡，不仅要确保边坡整体和局部稳定，而且对边坡的流变必须严格控制，以满足船闸人字门正常运行要求。

3) 施工难度大、干扰多、工期紧。船闸工程不仅地面施工强度高，窄、深且陡的闸室直立边墙开挖困难，而且与大量地下隧洞与竖井开挖同步进行，如何解决开挖爆破的相互影响，最大限度地减少岩体损伤和确保施工安全都是需要处理的难题。

针对船闸高边坡的特殊性和重要性，采取了山体排水、堵、截、排地表水和预应力锚索、高强锚杆、喷混凝土支护，施工中严格控制施工程序和整套控制爆破措施，以及加强原型监测和反馈分析，实行动态设计的综合治理措施。

明挖至闸墙顶以下深槽开挖时预留侧向保护层，先进行闸槽中部先锋槽梯段控制开挖，然后再

进行侧向预留保护层和直立墙小梯段光面爆破成型开挖，严格控制单位耗药量和单响药量，尽量减少爆破对岩体的损伤。根据爆破震动观测和岩体钻孔声波测试结果，保留岩体表层松弛范围为0.4~3.8 m，一般在2.4 m以下。

确定地下输水隧洞和竖井开挖超前闸槽开挖施工顺序，有利于闸槽直立墙边坡稳定。锁口支护、随机支护及边坡锚喷与开挖同梯段实施，随开挖及时跟进，且满足爆破振动影响要求。高强锚杆、锚索随开挖适时跟进。在实际施工中，由于种种原因高强锚杆和锚索均迟后支护，因而使一些本来可以稳定的楔形体受到较大扰动和损伤，甚至发生局部失稳现象，根据动态设计原则均作了加固处理。双线五级船闸共施加1 000~3 000 kN预应力锚索4 000多根，高强锚杆约10万根。船闸岩石开挖于1999年4月基本完成，开始进入混凝土施工，计划2003年6月通航。

通过对原型监测资料的综合分析，截至2002年10月，测得南北坡岩体向闸室中心线方向的最大位移分别为61.61 mm和49.54 mm；南北坡直立墙最大位移分别为41.12 mm和33.08 mm；中隔墩南、北侧最大位移分别为21.53 mm和29.85 mm，其中开挖完成后，后期流变（蠕变形）量占总变形很小，一般在10%以下。控制在设计预测范围之内，边坡变形已趋于稳定。

#### 5 电站大型钢衬钢筋混凝土压力管道和蜗壳外围保温保压混凝土浇筑技术<sup>[2,3]</sup>

##### 5.1 钢衬钢筋混凝土压力管道及垫层管

三峡电站引水管道内径为12.4 m，具有压力管道直径大、HD值高等特点，经综合比选，选用钢衬钢筋混凝土联合受力结构。我国对该型式压力管道设计和施工已有几个实例，可是HD都没有三峡大。三峡压力管道在设计内水压力下，外包混凝土按限裂设计，内水压力由钢衬、钢筋共同承担，总的安全系数大于2.2。钢衬钢筋各自单独承担全部内水压力时，要求安全系数均大于1.0。该方案外包混凝土选用Ⅱ级钢筋，需布设4~5层环筋，施工难度大，不利于保证混凝土浇筑质量。经设计优化，总的安全系数调整为2.0；钢衬、钢筋各自单独承担全部内水压力时安全系数分别为1.2和0.8，选用Ⅲ级钢筋调整为3层环筋，可节约钢材



10%左右,又有利于施工。

由于压力管道直径特大,采用常规伸缩节难以满足安全要求。研究采用垫层管取代伸缩节的方案,经计算分析,左岸厂房1#~6#机组段厂坝间的相对位移和转角较小,在任何季节合拢钢管的应力在允许应力范围内,确定用垫层管取代伸缩节。为确保垫层管的安全,加厚垫层管四周垫层厚度,由3 cm增加到5 cm;垫层管底部设置排水,并埋设监测仪器;垫层管外包钢筋混凝土,钢筋混凝土按全水头设计;垫层管轴向长度12 m不设加筋环,其两端钢管设置止推环。7#~14#河床坝段的相对位移也在允许范围之内,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#机组厂坝连接段选用带波纹管和外套常规伸缩节的联合方案,该结构型式新型,是国内外尺寸最大的波纹管伸缩节。目前1#~10#钢衬钢筋混凝土管道已施工完成。

### 5.2 蜗壳外围保温保压混凝土浇筑技术

三峡水轮机蜗壳与外围混凝土结构型式,先后研究了充水加压、半包(上部铺设垫层)和全包(全部铺设垫层)3个方案。经综合分析,为更有利于水轮发电机组稳定运行和结构安全,确定采用打压方案。长江水利委员会设计院对三峡厂房总体设计是按设置垫层方案考虑,厂房尺寸十分紧凑,加上三峡蜗壳打压水头高,钢管及蜗壳尺寸大,闷头很难在厂内布置。鉴于对蜗壳焊缝质量检查已有可靠手段,为简化闷头结构和便于闷头布置,同时又能保证蜗壳与外围混凝土紧密结合,有利于抗振和保证机组安全运行,取消1.5倍最高运行水头的打压试验工序,仅采用保压浇蜗壳外围混凝土方案,闷头布置在厂房内紧靠上游边墙。

针对三峡水轮发电机组运行水头变幅大,初期水库处于低水头运行,后期又长时间处于防洪限制水位运行的特点,为保证在运行期间蜗壳与外围混凝土贴紧,联成整体,保压水头为 $70 \pm 2$  m,水温控制在 $16 \sim 22$  °C。由于保压水头接近水轮发电机组的最小水头,当在高水头运行时蜗壳外围混凝土拉应力值将明显增大。因蜗壳本身系按承受高水头设计,外包混凝土按限裂设计,其混凝土抗裂安全系数允许在1.0左右,布设4层钢筋。截至2002年10月,左厂1#—10#机组已顺利完成了蜗壳保温保压混凝土浇筑,目前已进入机电安装高峰。

## 6 沥青混凝土心墙施工技术<sup>[2,3]</sup>

碾压式沥青混凝土防渗技术应用大型水工建筑物,在国际上是近30年来发展起来的新技术。三峡茅坪土石坝最大坝高104 m,坝顶长1 840 m,采用碾压式沥青混凝土心墙防渗,心墙厚0.5~1.2 m,下部设置3 m厚的扩大段,心墙顶轴线长880 m,墙体最大高度94 m,沥青混凝土工程量约 $5.0 \times 10^4$  m<sup>3</sup>。

国内缺乏碾压式沥青混凝土心墙高土石坝的设计和施工经验。针对其工程特点,在沥青和集料的选择,尤其是矿粉含量和级配的要求;沥青混凝土配合比试验;沥青混凝土孔隙率、渗透系数、容重和模量数等设计参数的合理选择和试验方法;沥青混凝土心墙和坝壳料之间的过渡料的特性,以及对心墙应力应变的影响等技术问题都进行系统深入试验研究。

在现场摊铺和生产性摊铺试验的基础上进行沥青混凝土的施工。心墙采用专用摊铺机水平分层铺筑,1.5 t振动碾碾压密实,铺筑过程中进行温度、厚度、宽度碾压及外观检查。碾压温度控制在 $140 \sim 160$  °C,不得低于 $130$  °C,不宜高于 $170$  °C。施工中经反复检测分析沥青混合料的厚度,压实系数为 $0.85 \sim 0.91$ 之间。据此,确定每层摊铺厚度控制在 $23 \pm 2$  cm,压实厚度为 $20 \pm 2$  cm。为能达到最大压实容重,便于混合料内部气泡排除,混合料在入仓后需静置约30 min,再进行碾压。采用不同的碾压机具碾压,经钻取芯样和性能试验,对沥青混凝土容重、孔隙率、渗透系数的影响并不明显,从施工角度考虑,用1.5 t振动碾压的最佳遍数为静1+动8+静2。碾压时行走速度为 $20 \sim 25$  m/min,行走过程中不得突然刹车,或横跨心墙碾压。横向接缝处要重叠碾压 $30 \sim 50$  cm。经现场无损检测和取芯样检测,其施工质量保证项目的指标容重 $> 2.4$  g/cm<sup>3</sup>,孔隙率 $< 3\%$ ,渗透系数 $< 1 \times 10^{-7}$  cm/s,均满足设计的要求。目前坝体已填筑至173 m高程。

## 7 船闸金属结构

三峡双线五级船闸,总落差113 m。单级闸室有效尺寸为 $280 \text{ m} \times 34 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ (长×宽×坎上最小水深)。船闸人字门最大门高38.5 m,宽20.2 m,单扇门重达800多吨,最大工作水头36.75 m。

主要研究闸门的抗扭刚度及增大抗扭刚度的措施，顶枢底枢结构形式与受力状态，支枕垫的安全传力等问题。门侧两端布置连续支枕垫块传递水压力，并兼作止水。顶枢采用楔形块调整方案。底枢采用固定式，与连续的刚性支枕垫相配用。第1闸室人字门高37.5 m，最大淹没水深达35 m，为目前世界上淹没水深最大的船闸人字门。

研究了闸门在启闭过程中动水阻力矩的变化规律和门体所受动态水力特性等问题。对启闭机型式比较了四连杆式启闭机和液压直推式启闭机。根据20世纪90年代国内外液压技术的迅速发展和国外的一些大中型船闸的成功运行经验，设计选用液压直推式启闭机，启闭力2700 kN，开门时间3 min。目前24扇人字门和液压启闭已安装完毕。

船闸第2至第4闸室充泄水阀门尺寸为4.2 m×4.5 m，工作水头45.2 m，为目前世界上已建船闸最大的阀门。采用横梁全包式的反向弧形阀门，以保证门体在动水启闭和承受高水作用的刚度和强度。阀门启闭机选用竖缸液压启闭机，启闭力1500 kN。

目前24扇防反向弧门和48扇事故检修门均已安装完毕。船闸运行采用计算机集控调度的方式，已于2002年7月进行无水调试，10月开始有水调试，以确保2003年6月正式投入运行。

## 8 水轮发电机组<sup>[2,3]</sup>

三峡700 MW混流式水轮发电机组，运行水头初期61~94 m，后期为71~113 m。系世界上最大的水轮发电机组。针对三峡电站机组具有单机容量大，工作水头变幅大，过机水流含有泥沙等特点，重点研究水轮发电机组稳定性能和改善运行稳

定性的措施；水轮发电机组主要数优选及结构方案；调速器及油压装置选型等问题。鉴于三峡电站机组台数多、容量大，在电力系统中的地位极其重要，必须从机组选型、设计、制造上采取措施，确保机组运行稳定可靠。按后期运行条件拟定水轮机最优工况水头，以确保水轮机在高水头运行工况的稳定性和效率，同时兼顾低水头运行性能。

水轮发电机组主要参数经过反复比较拟定为：水轮额定转速75 r/min，额定水头80.6 m，额定出力710 MW，最大出力852 MW；发电机最大容量840 MVA，功率因素0.9。机组冷却采用定子水冷、转子空冷方式。机组的推力负荷达5500 t左右，为世界之最，推力轴承的布置研究了水轮机顶盖和下机架两种方式，选用了承重下机架的方案。调速器采用数字式微机调速器。机组油压装置为分离结构。目前已进入机组安装高峰，分别由加拿大GE公司及法国ALSTON公司生产的2#和5#机转轮和发电机定子已成功吊入机坑，重1700多t的发电机转子已于2002年11月7日吊入机坑。计划2002年年底要完成两台发电机组的安装，以满足2003年首批4台机组并网发电。

### 参考文献

- [1] 陆佑楣. 三峡工程建设项目管理的实践[J]. 中国三峡建设, 2002, (1): 4~6
- [2] 张超然, 戴会超. 三峡水利枢纽建设概况和若干关键技术问题[J]. 水力发电, 1998, (1): 16~19
- [3] 张超然, 戴会超. 三峡工程重大科学技术问题的研究[J]. 水利水电技术, 1998(1): 10~15
- [4] 戴会超. 三峡大坝混凝土快速施工方案及工艺研究[J]. 中国三峡建设, 2002(7): 10~12

## Technical Breakthroughs in the Construction of TGP

Zhang Chaoran, Dai Huichao

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

**[Abstract]** The huge Three Gorges Project is technically complex. Quite a lot of technical breakthroughs have been made on the issues such as river closure of the Grand Channel and concrete construction of the cutoff wall, prompt concrete construction of dam, high slope construction of permanent shiplock, large-scale steel-lined reinforced concrete penstocks of power station and temperature and pressure maintaining of the spiral case, asphalt concrete core wall, metal works of the shiplock, turbine generating units, and so on.

**[Key words]** Three Gorges Project; key technique; breakthroughs