

# 三峡工程建设的主要科技难题

王家柱

(中国长江三峡工程开发总公司, 湖北宜昌 443002)

**[摘要]** 三峡工程是世界最大的多目标开发的综合利用工程。工程规模巨大, 技术复杂, 具有防洪、发电、航运等巨大的综合效益。文章论述了工程建设过程中已经和将要解决的一大批重大科学技术难题, 并指出其将对水利水电科学技术的发展起到重要的促进作用。

**[关键词]** 三峡工程; 科技; 难题

**[中图分类号]** TV6; T-19 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)08-0016-07

长江三峡水利枢纽工程规模巨大, 技术复杂, 工程建设过程中已经和将要解决的一大批重大科学技术难题, 将对水利水电科学技术的发展起到重要的促进作用。三峡工程建设中需要研究和解决的重大科技难题较多, 以下仅列举与工程建设直接有关的几个主要问题。

## 1. 泥沙问题研究<sup>[1]</sup>

水库泥沙问题是世界性的水库建设难题。三峡水库年平均入库泥沙量达  $5.3 \times 10^8$  t, 如泥沙问题处理不好, 不仅会影响水库正常效益的发挥, 缩短水库使用寿命, 而且可能影响长江黄金水道的通畅。

三峡水库的泥沙问题研究, 始于20世纪60年代。30多年来, 研究工作一直持续不断, 吸取了新中国建立以来国内大坝建设处理泥沙问题的经验和教训, 特别是黄河三门峡水库的惨痛教训。三峡工程的泥沙研究, 采用原型观测、数学模型计算、物理模型试验、与已建实际工程类比分析的综合方法。根据三峡水库的地形、地貌特征, 采用“蓄清排浑”的水库调度方式, 可以保证水库的长期有效运用; 工程建筑物布置上采取的一系列排沙、防淤工程措施, 配合恰当的调度和辅助清淤, 可以确保

航道畅通和水电站正常运行。

### 1.1 “蓄清排浑”的运用方式

三峡水库入库水量巨大, 大坝设有23个低高程(90 m)、大尺寸(7 m×9 m)的泄洪底孔, 同时汛期水库水位维持在较低高程(145 m)。这些条件使三峡水库调度可按“蓄清排浑”方式运用。在多水多沙的汛期6月~9月(来水量占全年61%, 输沙量占全年84%), 水库水位维持低水位145 m(防洪限制水位), 大量泥沙可通过深孔泄洪排出库外, 实现“排浑”; 汛末10月, 来水中含沙量降低, 水库蓄水至175 m(正常蓄水位), 实现“蓄清”。采用这一水库调度运用方式, 入库来水中的绝大部分泥沙可排出库外。

三峡水库长度600余 km, 平均宽度仅1.1 km, 水库形状似条带, 是河道型而不是湖泊型的水库。整个水库宽度相当均一, 绝大部分库段宽度小于1 km, 仅1/7的库段宽度为1~1.7 km, 故水库的边界地貌也是有利于冲沙排沙的。根据水库边界条件进行的水力学计算成果, 三峡水库冲淤平衡后的宽度约为1.3 km, 大于水库实际的平均宽度。因而, 三峡水库主体部分将不会形成大的淤积边滩, 绝大部分的水库有效库容将得以长期保留。根据水库泥沙淤积数学模型长系列计算成果, 三峡

水库运行 80~100 年左右，水库将达到冲淤平衡状态，届时，水库有效库容仍可保持 86%~92%。

上述结论的可靠性在于：采用的数学模型是在国内外大量研究和实际观测资料验证的基础上开发的，国内外著名泥沙专家多次审议均予以较高评价；同时，“蓄清排浑”的运用方式，国内已有闹得海、三门峡（改建后）等一批成功工程实践的例证。

### 1.2 物理泥沙模型实验研究

坝区和变动回水区泥沙问题，主要研究解决库尾（主要是重庆市区）和近坝区泥沙淤积对航运和水电站运行的影响。鉴于问题的复杂性，难于用数学模型计算来解决，故采用了物理泥沙模型实验的方法，共建有 14 座三峡工程泥沙物理模型（坝区 5 座，变动回水区 9 座），模型比尺为 1/100~1/300。

中国的泥沙物理模型实验技术在葛洲坝工程建设期间取得了长足的进展，达到了世界领先水平，现葛洲坝工程已正常运行 18 年。由于葛洲坝水库库容仅  $16.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，水库早已达到冲淤平衡状态。通过对葛洲坝水库实际淤积情况的观测，并与模型实验复演成果验证分析，两者十分吻合，但模型成果略偏安全。三峡工程的来水和来沙条件与葛洲坝工程基本一致，泥沙模型实验采用相同的实验方法，并有多个模型实验成果相互比较验证，其成果是可信的。

根据多个泥沙物理模型多年反复实验的成果表明，三峡工程建成后的 30 年内，不论是坝区或变动回水区，泥沙淤积均不会对航运和发电造成大的不良影响。水库运行数十年后，在特殊干枯的水文年份、当水库水位降至最低水位时，累积性的泥沙淤积可能对航运或发电造成一些不利的影 响。研究成果还表明，对变动回水区航道和港口作业的不利影响，可通过优化水库调度、航道整治和港口改造等措施加以解决；根据模型实验研究成果，针对对坝区航运和发电的不利影响，采取优化建筑物布置和设置防淤、排沙、冲沙等工程措施予以解决。

值得指出的是，三峡工程泥沙问题研究，是按现状，即较为不利的前提条件下进行的。一些有利因素，如长江上游干支流建坝的拦沙和调洪作用，以及正在实施的长江中上游水土保持工程和长江防护林工程的减沙作用，均未加以考虑，可认为试验研究成果是偏于安全的。实际上，根据国务院批准

的长江流域综合利用规划，在今后数十年内，上游干支流必将建成一大批大型和巨型水库。例如，金沙江上的溪落渡和向家坝，支流岷江上的紫平铺和瀑布沟，支流嘉陵江上的亭子口和合川，支流乌江上的构皮滩和彭水等。这些水库的建成，以及正在加紧实施的长江上中游水土保持工程和长江防护林带建设，都将对减少三峡水库的入库泥沙量起到显著的削减作用，有利并将简化三峡水库泥沙淤积问题的处理。

## 2 大江截流和二期深水围堰<sup>[2]</sup>

### 2.1 大江截流

三峡工程大江截流设计流量  $19\,400 \text{ m}^3/\text{s}$ ，龙口最大水深达 60 m，是目前世界上大江大河截流史上规模最大、难度极高的截流工程。经过长期的设计、科研工作，最后选用预平抛垫底的单戗立堵方案。经过精心的施工组织，大江截流已于 1997 年 11 月 8 日胜利合拢。主要技术指标列入表 1。

### 2.2 二期深水围堰

二期上下游横向围堰是三峡工程二期施工的屏障。上游围堰设计洪水标准为百年一遇（洪峰流量  $83\,700 \text{ m}^3/\text{s}$ ），并按 200 年一遇洪水  $88\,400 \text{ m}^3/\text{s}$  不漫顶作校核。下游围堰设计洪水标准为 50 年一遇（洪峰流量  $79\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ）。大江上游围堰最大高度约为 80 m，上下游围堰土石方总填筑量为  $1\,032 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。二期围堰工程量特大，施工期仅约半年，工期紧迫，施工强度特高，且约 80% 的堰体填筑量需采用水下抛投施工，无法采取机械碾压。经比较，二期围堰型式采用砂石堰壳、混凝土防渗墙心墙上接土工膜防渗的方案。考虑到上游围堰河深槽部位防渗墙最大深度达 74 m，该部位采用双排墙以策安全。

二期围堰防渗墙总面积为  $92\,200 \text{ m}^2$ ，其中混凝土防渗墙面积为  $83\,450 \text{ m}^2$ 。围堰防渗墙工程量大，工期紧，加以基础条件复杂，混凝土防渗墙施工成为二期围堰施工的主要难点。

大江截流合拢后，配备了 250 余台 20~77 t 的自卸汽车和 130 余台开挖、碾压设备进行高强度的填筑施工，迅速形成了防渗墙施工平台。1997 年 12 月中旬，防渗墙施工全面开展。高峰施工期，有 110 余台冲击及冲击反循环钻机、7 台抓斗、一台双轮铣进行防渗墙施工。为了防止在水下抛投的松散的风化砂中造孔坍塌，采取了振冲加密的工

艺, 振冲最大深度为 30 m。设计要求防渗墙嵌入基岩 0.5 m, 造孔需穿过平抛垫底层、淤沙层以及花岗岩块球体等复杂地层, 由于上游防渗墙基岩高差近 30 m、基岩面呈 70~80°陡坡, 使防渗墙的施工异常困难。实际施工中, 采用“两钻一抓”为主的造孔工艺, 配以一系列特殊的工艺措施, 如灌浆堵漏、小药量爆破、重锤劈打、埋管灌浆等。至 1998 年 6 月中旬, 上下游围堰第一道防渗墙封闭,

基坑开始限制性抽水。9 月 12 日, 大江基坑基本抽干。1998 年末至 1999 年 3 月, 二期基坑内的大坝、电厂基础开挖陆续完成并相继开始混凝土浇筑。已有的监测结果表明, 围堰堰体及基础渗水量甚微, 约 1 000 m<sup>3</sup>/h, 远低于设计预计值, 其他渗压、沉降、防渗墙应力、应变等观测指标均在设计预期范围内, 表明围堰运行是正常的。

表 1 三峡工程大江截流主要技术指标

Table 1 Main technical quotas for the river closure of TGP

项目	主要技术指标		备注
	设计	实施	
截流龙口合拢时间	1997 年 11 月上旬	10 月 26~27 日, 11 月 8 日	10 月 23 日龙口形成, 考虑通航要求, 11 月 8 日最终合拢
截流合拢方式	平抛垫底, 单戗双向立堵	平抛垫底, 单戗双向立堵	下游戗堤(不承担落差)及围堰堰体尾随进占
截流龙口宽度 /m	130.0	130.0 (40.0*)	* 为 11 月 8 日最终合拢小龙口宽度
截流合拢流量 /m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	14 000~19 400	8 480~11 600*	* 龙口合拢实测流量
截流施工最大水深 /m	60.0	60.0	
截流合拢最大落差 /m	0.8~1.24	0.66*	* 10 月 26 日晚 8 时实测
截流合拢最大流速 /m·s <sup>-1</sup>	3.29~4.23	4.22*	* 10 月 26 日晚 8 时实测
截流戗堤总抛填量 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	126	126	
截流龙口总抛填量 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	20.8	20.8	
上堰平抛垫底总量 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	74		
平抛垫底高程 /m	40.0	40.0~45.0	
日抛填最高强度 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	7.0~8.0	19.4*	* 含下游戗堤及堰体抛填
小时抛填最高强度 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>		1.71*	* 含下游戗堤及堰体抛填

### 3 永久船闸高陡边坡的稳定和变形

三峡工程永久船闸布置在大坝左侧的山体内。船闸线路总长 6 442 m, 其中上游引航道长 2 113 m, 宽 180 m (口门宽 220 m); 船闸主体段长 1 607 m; 下游引航道长 2 722 m, 宽 128~180 m (口门宽 200 m)。因船闸上下游最大水头为 113 m, 故设 5 级闸室分担水头。双线船闸主体段闸室全部位于新鲜基岩内, 其两侧高陡边坡最大开挖深度达 170 m; 两线闸室间保留宽 60 m 的岩石中隔墩, 闸室底部为高约 60 余 m 的直立墙。永久船闸闸室采用薄混凝土衬砌结构, 需依靠岩体自身维持结构稳定, 深挖高陡岩石边坡的稳定和变形量 (特别是开挖完成后的残余变形量), 是工程设计和施工中需要特别重视的问题。根据多年研究的成果,

采用岩体排水、控制爆破、喷锚及预应力锚索加固等一系列措施, 以确保工程安全。

永久船闸闸室部位两侧山体内, 各布置有 7 层贯通全长的排水洞, 各层排水洞间, 设有排水孔帷幕。排水洞及排水帷幕施工完毕后经监测表明, 排水效果良好, 外侧地下水位已有明显降低, 外水压力低于设计值。

永久船闸闸室主体部分开挖总量近 4 000 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 其中大部分为需进行爆破的坚硬岩石。施工中, 对开挖爆破震动影响给予了特别的重视。在实地爆破试验的基础上, 对爆破程序、爆破参数做了严格的控制, 规定采用预留保护层和预裂爆破、光面爆破等防震工艺, 并严格控制梯段爆破的单段起爆药量。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

一般在 2.40 m 以下。

永久船闸部位岩石强度高、整体性好，主要地质构造面与船闸轴线的交角均大于 45 度。但由于船闸的结构要求，开挖形成了较多的不稳定楔形块体。为了保证高陡边坡的稳定和限制其变形，除施工期及时进行锚杆和喷混凝土支护外，船闸边坡设有约 4 000 束 300~500 t 级的预应力锚索和约 10 万根高强系统结构锚杆。

永久船闸设置有广泛的安全监测系统，包括地面变形精密三角测量系统、地下水观测系统、岩体深部变形观测仪埋设系统、锚杆锚索应力应变观测系统、爆破震动影响和岩体松弛监测等。截至 1999 年 5 月底，各部位表层变形累计最大值如表 2。地下水观测结果表明，船闸两侧山体地下水得到了有效的控制，低于设计预期值。边坡及中隔墩深层岩体埋设仪表（钻孔倾斜仪、多点位移计等）的观测结果表明，深部岩体变形量不大，且沿深度连续性良好。对已有安全监测结果的分析表明，变形量等观测值均在设计预期范围内，船闸高陡边坡稳定状况良好。

#### 4 大坝电站高强度混凝土浇筑<sup>[3]</sup>

三峡大坝为混凝土重力坝，但其主体部分泄洪坝段和电站坝段结构仍比较复杂，特别是泄洪坝段

设有导流底孔、泄洪深孔、溢流表孔等三层孔口。水电站厂房主要由钢筋混凝土薄壁结构组成，结构更为复杂。考虑到三峡工程的特殊重要性，对三峡工程混凝土的耐久性问题给予了特别的重视，对混凝土的主要设计指标、原材料和混凝土配合比，包括混凝土的碱骨料活性反应问题，都进行过长期反复的比较和试验研究。三峡大坝混凝土将严格控制水灰比和单位用水量，使用中低发热量、低含碱量的大坝水泥，掺加 I 级粉煤灰和高效减水剂、加气剂，以提高混凝土的耐久性。三峡大坝混凝土采用 90 天龄期强度设计，其主要指标列如表 3。

表 2 永久船闸不同部位累计最大变形  
(截至 1999 年 5 月底)

Table 2 Cumulative maximum deformation at different positions of the permanent shiplock

部位	累计最大变形值 /mm		备注	
	水平变形	垂直位移		
南坡	坡顶	+55.90	+4.32, -13.80	水平变形向中心轴线方向为正,背向轴线方向为负。
	直立墙	+33.76	+6.10, -8.02	
北坡	坡顶	+36.33	+5.75, -2.53	垂直位移沉降为正,回弹为负。
	直立墙	+24.09	+6.91, -3.35	
中隔墩	南侧	+17.18~-27.92	+9.59, -24.20	
	北侧	+32.30~-14.52	+2.35, -14.07	

表 3 三峡工程大坝混凝土设计主要指标

Table 3 Main quotas for the concrete design of the TGP dam

使用部位	设计标号	限制水灰胶比	最大骨料/mm	抗冻性	抗渗性	极限拉伸值 / $10^{-4}$	粉煤灰最大掺量/%	总碱含量控制 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
大坝内部	R <sub>90</sub> 150 <sup>#</sup>	0.60	150	D <sub>100</sub>	S <sub>8</sub>	0.70~0.75	40~45	2.5
大坝基础	R <sub>90</sub> 200 <sup>#</sup>	0.55	150	D <sub>150</sub>	S <sub>10</sub>	0.80~0.85	35	2.5
大坝外部	R <sub>90</sub> 200 <sup>#</sup>	0.50	150	D <sub>250</sub>	S <sub>10</sub>	0.80~0.85	30	2.5

三峡工程第二期施工阶段，共需浇筑混凝土 1 846×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>，其中河床大坝、左岸电站厂房混凝土浇筑 1 210×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>，是三峡工程最为艰巨和复杂的施工任务。二期工程施工期虽有 6 年，但第一年主要用于修造围堰和基础开挖，最后两年金属结构和机电安装任务很重。1999—2001 年，是三峡工程混凝土施工的高峰年，年浇筑强度均在 400×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 以上，其中 2000 年创造了浇筑强度约为 548×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 的世纪纪录，最大月高峰浇筑强度达 55.35×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>，远远超出国内外已建工程的最高水平。为了保证三峡大坝的高强度施工，多年来，

对各种可能的施工方案和主要施工机械进行了长期的比较和研究。最后选用的是塔带机与高架门机、缆机相结合的综合施工方案。塔带机是一种新型的混凝土浇筑机械，可实施从拌合楼至浇筑仓面的工厂化——连续式混凝土生产、运输、提升，直至入仓浇筑。这一方案具备高强度浇筑混凝土的显著优点，但要求运行和管理水平高，需严格控制每一个工艺环节，加强全过程的设备运行操作和维修管理，才能确保整个系统的连续、高效、安全运行。

三峡工程二期基坑内，布置有一批大型高效的混凝土浇筑设备。其中包括：6 台回转半径 100 m

的塔带机, 4台胎带机, 8台臂长71 m的20 t门塔机, 两台跨度1 416 m、起重量25 t的缆索起重机, 两台300 t履带吊, 以及小时总生产量2 400 m<sup>3</sup>、制冷总容量约8×10<sup>4</sup> kW·h的9座混凝土拌合楼。1999年7月, 混凝土月浇筑强度已达41.8×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。

三峡大坝设两条后期灌浆的纵缝, 浇筑块体仍很大, 一般浇筑块体尺寸都在500~1 000 m<sup>3</sup>。三峡坝区夏季气温炎热, 日平均气温可达40℃以上, 加以气温骤降频繁, 大体积混凝土温控防裂任务十分艰巨。为了确保三峡大坝混凝土质量, 根据葛洲坝工程和三峡一期工程的实践经验, 各混凝土拌合楼均配备了大容量的制冷设施, 采用二次风冷骨料和加片冰的工艺措施, 使能在夏季生产7℃的低温混凝土。同时, 采取严密工艺措施, 加快混凝土入仓速度, 仓面喷雾, 表面覆盖防止阳光辐射等, 以降低混凝土入仓和浇筑温度。混凝土浇筑块体内, 埋设冷却水管, 实施通水冷却, 以限制混凝土最高温升。为抵御寒潮冲击和防止产生表面裂缝, 加强了混凝土养护和表面保温。

表4 主要闸门、启闭机技术特征

Table 4 Technical characters of chief sluice gates and on-off machines

项目	大坝		电站进口		永久船闸	
	深孔工作门	表孔工作门	导流底孔工作门	快速工作门	闸首工作门	输水廊道工作门
孔口尺寸 /m×m	7×9	8×17	6×8.5	9.2×13.24	34.0×39.5	4.2×4.5
门型	弧形门	平板定轮门	弧形门	平板定轮门	人字门	反弧门
操作条件	动水起闭	动水起闭	动水起闭	动闭静启	静水起闭	动水起闭
设计水头 /m	85.0	17.0	80/85	67.0	37.75	45.2
总水压力 /kN	63 000	13 000	48 680	75 650		
孔口数量	23	22	22	26	两线五级	
闸门数量	23	22	22	26	24	
启闭机型式	液压式	坝顶门机	液压式	液压式	液压式	液压式
启闭机容量 /kN	4 500/500	4 500	3 500/500	4 000/8 000	2 700/2 100	1 500

三峡工程135台套启闭机中, 114台为大容量液压启闭机, 设计、制造和安装的难度很大。例如: 电站进口快速工作闸门液压启闭机, 启门力达5 000 kN, 持住力8 000 kN, 活塞杆行程16 000 mm。永久船闸人字门, 运行时最大淹没水深达36.0 m, 液压启闭机油缸内径580 mm, 活塞杆最大推力2 700 kN (非工作状态时最大推力5 400 kN), 工作行程7 276 mm, 且必须确保左右启闭机同步。

## 5 特大型金属结构

三峡工程的闸门、启闭机, 升船机和压力钢管等金属结构门类品种甚多, 规模十分巨大, 全部金属结构总质量达26.45×10<sup>4</sup> t。

### 5.1 闸门和启闭机

三峡工程各类闸门、启闭机品种类型多、数量大。整个工程共有各类闸门282扇, 启闭机135台套。

多数闸门结构尺寸大, 受力条件复杂, 技术要求高。例如, 大坝泄洪深孔弧形工作门, 孔口尺寸7 m×9 m, 设计水头85 m, 校核水头90.4 m, 设计总水压力63 000 kN, 其尺寸和总水压力均居世界前列。电站进水口快速工作门, 孔口尺寸9.2 m×13.2 m, 设计水头67.0 m, 为动水快速关闭的平板门, 关门时间3.5 min。永久船闸首级人字门, 设计水头37.75 m, 单扇门尺寸20.2 m×39.5 m, 重约900 t, 是国内外罕见的巨型闸门。表4列出了若干重要闸门、启闭机的技术特征。

### 5.2 压力引水钢管

三峡水电站采用单管引水, 压力引水钢管共26条, 每条钢管全长122.2 m, 内径12.4 m。压力管道承受的最大静水头为113 m, HD值达1 730 m<sup>2</sup>, 为世界水电站压力管道工程之最。

压力管道位于坝面的背管部分, 采用钢衬钢筋混凝土联合受力的结构型式。其设计原则为: 允许外包钢筋混凝土开裂, 由内水压力引起的管道环向应力全部由钢衬和钢筋共同承担, 安全系数>2.2;

钢衬和钢筋混凝土单独承担内水压力时，各自的安全系数均 $>1.0$ 。外包钢筋混凝土厚度为2 m，设有三层钢筋。钢衬材质选用16 Mn钢板，钢板厚度为30~36 mm。压力管道下水平段为明钢管，材质采用600 MPa强度级的钢板，板厚为60 mm。

### 5.3 升船机

三峡工程升船机是用于客轮快速过坝的重要通

航建筑物，一次可以通过一条3 000 t级的客货轮。升船机为单线一级垂直提升式。三峡升船机与世界上几个大型升船机主要技术指标对照如表5。由表列数据可知，不论是过船吨位、提升总质量、提升高度，三峡升船机均远远超过了世界上已建和在建的大型升船机。因此，三峡升船机的设计、制造、安装的难度均很大，目前仍在继续比较研究。

表5 国内外大型升船机主要技术指标比较

Table 5 Comparison of main technical quotas for large ship elevators at home and abroad

名称	国别	型式	过船吨位 /t	承船厢尺寸 (长×宽×水深)/m×m×m	提升总质量 /t	提升 高度/m	驱动功率 /kW
尼德诺芬	德国	平衡重垂直提升式	1 000	85.5×12.5×2.5	4 300	36.0	4×55
隆库尔	比利时	平衡重斜面提升式	1 350	91.0×12.0×(3.0~3.7)	4 500~5 200	67.5	12×125
克拉斯诺雅尔斯克	俄罗斯	自行式斜面提升式	1 500	90×18.0×2.2.5	8 200	101.0	12×800
吕内堡	德国	平衡重垂直提升式	1 350	100×12.0×3.5	5 700	38.0	4×160
斯特勒比	比利时	平衡重垂直提升式	1 350	112.0×12.0×(3.5~4.3)	7 500~8 800	73.0	4×500
水口	中国	平衡重垂直提升式	2 500	114.0×12.0×2.5	5 500	59.0	4×160
三峡	中国	平衡重垂直提升式	3 000	120.0×18.0×3.5	11 800	113.0	8×160

## 6 特大容量水轮发电机组

三峡水电站将安装26台单机容量700 MW的水轮发电机组，电站总装机容量18 200 MW，年平均发电量 $847 \times 10^8$  kW·h。三峡水电站供电范围覆盖华中、华东和西南三大电网，远景还将与华北、华南联网，在电力系统中具有十分重要的地位。三峡水电站装机容量巨大，既能提供巨额廉价的清洁能源，又能承担电网调峰运行，将促进长江经济带华东、华中、西南统一电网的形成，并成为电网的骨干电站。因此，确保机组的稳定、安全运行，是对三峡水电站水轮发电机组最主要的要求。

单机容量700 MW的三峡水电站水轮发电机组，属于世界最大的水电机组。不仅单机容量特大，因防洪和排沙的需要，在汛期需降低水位运行，其运行水头变幅达52 m，最大水头(113 m)与最小水头(71~61 m)的比值达1.59~1.85。在此巨大水位变幅的条件下，既要确保机组运行的稳定性，又要具有较优的效率和气蚀特性，使机组设计、制造和安装难度特大，超过世界上已有的任何大型机组。三峡水电站机组与国外特大容量机组主要特性指标对照如表6。

由于国内尚无制造单机容量700 MW水轮发电机组的实践经验，在长期的科学、设计研究选定机组基本参数的基础上，三峡工程水轮发电机组采购采用了国际公开招标。招标标书中对机组的效率、气蚀特性，特别是机组运行稳定性，都提出了严格的要求。1997年9月，正式签订了左岸14台水轮发电机组的采购合同，总金额为7.4亿美元，由世界著名制造厂商组成的两家跨国集团联合体，分别承担机组制造任务。其中，法国ALSTOM和瑞士ABB公司联合制造供应8台套机组，加拿大GE、德国VOITH、SIMENSE组成的VGS集团将供货6台套机组。14台水轮发电机组将在8个国家的17家制造厂加工制造。我国国内水轮发电机组制造厂商，将通过分包承担约30%的制造任务，并将通过外商的技术转让，掌握三峡机组的制造技术，为今后承担三峡工程右岸电站12台机组的制造任务打下基础。

三峡工程水轮发电机组设计、制造任务艰巨。为了确保制造质量，三峡总公司通过招标，与法国技术监督局和法国电力公司组成的联合体(BV/EDF)签订了合同，授权负责机组的监造任务。

表6 三峡机组与国外类似机组主要参数对照

Table 6 Contrast of major parameters between TGP generating sets and foreign similar generating sets

参数	三峡	大古力 (美国)	伊太普 (巴西、巴拉圭)	古里 (委内瑞拉)	克拉斯诺雅尔斯克 (俄罗斯)
最大水头/m	113.0	108.2	125.9	146	100.5
额定水头/m	80.6	86.9	112.9	130	93
水 最小水头/m	71.0 (61.0)	67.0	90.0	110	76
轮 额定出力/MW	770	713	715	610	508
机 最大出力/MW	852	827	722/808	730	508
额定转速/ $r \cdot \min^{-1}$	75	85.7	90.9/92.3	112.5	93.8
转轮直径/m		9.223	8.450 6	7.163	7.5
额定出力/MW	700	700	700	630	500
最大出力/MW	756	805	728	725	
水 频率/Hz	50	60	50 (60)	60	50
轮 冷却方式	定子水冷	定子水冷	定子水冷	风冷	定子水冷
发 额定电压/kV	20	15	18	18	15.75
电 绝缘等级	F	B	F	B	
机 推力负荷/t		4 700	4 056	2 667	
定子内径/m		18.79	16	13.65	16.10

## 参考文献

- [1] 长江水利委员会. 长江三峡工程技术丛书. 三峡工程泥沙研究[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,1997
- [2] 中国长江三峡开发总公司. 三峡工程二期围堰理论与实践[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,2000
- [3] 陆佑楣. 三峡大坝混凝土施工[M]. 北京:中国电力出版社,2003

## Major Difficult Problems in the Construction of the Three Gorges Project

Wang Jiazhu

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

[Abstract] As the largest in the world by far, the Three Gorges Project (TGP) is a multipurpose development and comprehensive utilization project that can bring a huge benefit by combining flood control, electric power generation and shipping. It is of large scale and technically complex. This paper expounds a large number of major technical problems that has been, and will be, solved in the construction of the project, and points out that the solution of these problems will be an important urge to the development of both water conservancy and hydraulic power generation science and technology.

[Key words] TGP; science and technology; difficult problems