

三峡工程推动我国水电设备制造的技术进步

梁维燕

(哈尔滨动力设备股份有限公司, 哈尔滨 150040)

[摘要] 三峡工程安装26台700 MW水电机组,是世界最大的水电站,左岸14台机组利用出口信贷国际招标采购,招标文件要求外商和中国有资格的制造厂商联合设计,合作制造,并向中国制造厂商转让技术,中国制造厂商分交份额的比例不低于总价的25%,后2台机组以中国制造厂商为主。Alstom中标8台与哈尔滨电机厂合作,VGS中标6台与东方电机厂合作,合同执行顺利。哈尔滨电机厂与东方电机厂在近20年针对三峡等大型水电机组开展科技攻关的基础上,消化吸收引进技术,效果良好,进行相应技术改造,自主开发设计制造大型水电机组。三峡工程右岸12台机组立足于国内制造,为我国大型水电站建设提供优质、先进、可靠的机组奠定了基础。

[关键词] 三峡工程;水电机组;自主开发;技术进步

[中图分类号] TK730.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)12-0001-05

1 三峡工程及其水电机组概况

中国长江全长6300 km,多年平均入海水量 $9760 \times 10^8 \text{ m}^3$,仅次于亚马逊河及尼罗河,居世界第三位。水力资源蕴藏量200 GW,约占全国的1/3。长江三峡由瞿塘峡、巫峡和西陵峡组成,历史上长江洪水流出峡谷后多次泛滥成灾,危害甚大。近80年来,设想、勘测、规划了多次,又经过反复论证,1992年4月全国人大通过了《关于兴建三峡工程的决议》,同年7月,中国政府批准长江三峡水利枢纽初步设计,坝址位于西陵峡中段较为开阔的湖北省宜昌市三斗坪镇。

三峡枢纽工程主要由拦河大坝及泄洪建筑物、水电站厂房、通航建筑物等组成。拦河大坝为混凝土重力坝,坝顶高程185 m,坝轴线全长2309.5 m,泄洪坝段居中,正常蓄水位175 m,总库容 $393 \times 10^8 \text{ m}^3$,水电站厂房分置泄洪坝段两侧坝后,左岸厂房安装14台机组,右岸厂房安装12台机组,共装26台700 MW水电机组,总装机18200

MW,年发电 $847 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,为世界最大水电站;通航建筑物设在左岸,有双线5级船闸及单线一级垂直升船机,提升3000 t级船舶(总提升11800 t,为世界第一)。2003年首批机组发电,2009年建成。三峡枢纽工程布置如图1。

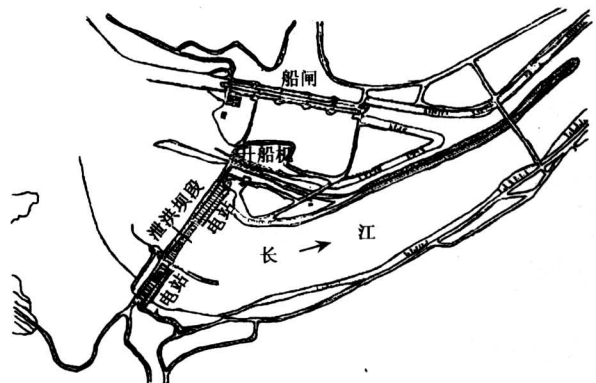


图1 三峡工程枢纽布置图

Fig.1 Layout of the Three Gorges project pivot

[收稿日期] 2002-08-07; **[修回日期]** 2002-08-20

[作者简介] 梁维燕(1929-),男,山西襄陵县人,中国工程院院士,哈尔滨动力设备股份有限公司教授级高级工程师

由于自然条件和以防洪为主要的需要,三峡水电站初期水头为61~94 m,后期水头为71~113 m,每年汛前水库水位降到145 m高程,防洪库容为 $221.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因水头变幅很大,额定水头80.6 m,给水轮机设计增加了难度。单台机组出力700 MW,75 r/min,水轮机转轮名义直径9.709/10.427 m(VGS/Alstom),是当今世界最大的混流式水轮机转轮。机组采用3个导轴承的半伞式结构,推力轴承负荷5 050/5 500 t,亦为当今世界之最。发电机额定出力778 MVA,功率因数0.9,

为提高在高水头下水轮机运行的稳定性,发电机设计最大出力840 MVA,可连续运行。发电机额定电压20 kV,采用定子绕组水冷、转子空冷的冷却方式。发电机定子机座外径21.42/20.9 m,定子铁心内径18.5/18.8 m,铁心高度3.13/2.95 m,都是世界最大的。采用机组大部件的强度与刚度适应热变形的结构都是保证机组稳定运行的重要因素,单台机组约重6 600 t,也是目前世界上最大的水电机组。对比国际上大型水电站和机组制造厂家,如表1。

表1 三峡水电站和机组与国际大型水电站和机组的主要技术参数

Table 1 Key technical parameters of three gorges hydropower station and international large-size hydropower stations and units

	美国 大古力	巴西 依泰普	委内瑞拉 古里	俄罗斯 萨扬舒申斯克	中国 葛洲坝	三峡	
水头/m($h_{\max}/h_r/h_{\min}$)	108.2/86.9/67	126.7/112.9/82.9	146/130/110	220/194/178	27/18.6/8.3	113/80.6/71	
台×MW	3×700	3×600	18×700	10×610	2×170/19×125	26×700	
转轮名义直径 D_1 /m	F9.223	F9 296 TH	F8.45	F7.3	F6.77	K11.3/10.2	F9.709/10.427
转轮质量 /t	408	460	295	155	256		410/450
发电机最大出力 /MVA	825	615	824	805	711		840
推力轴承负荷/t	4 700	4 100	4 056	2 667	3 250	3 800/3 300	5 050/5 500
定子冷却方式	水冷	空冷	水冷	空冷	水冷	空冷	水冷
铁心内径×长度 /m	18.79×2.13	18.3×3.48	16×3.5	13.65×3.8	11.85×2.75	16.99×2.0/ 15.0×1.59	18.5/18.8× 3.13/2.95
转速 /r·min ⁻¹	85.7	72	90.9/92.3	112.5	142.8	54.6/62.5	75
首台机组发电时间	1978	1976	1984	1984	1979	1981	计划 2003
日本日立				7T			
日本东芝				3T3G			
日本三菱				1G			
俄罗斯列宁格勒金属工厂					10T		
俄罗斯电力工厂					10G		
德国 伏依特	3T(美)		12T				左岸 6T/2
德国 西门子			9G	1G			左岸 6G/2
加拿大 GE 加拿大	3G	3T		5G			左岸 6TG/2
		美西屋 3G					
瑞士 ABB			9G				左岸 8G
法国 阿尔斯通			6T				左岸 8T
中国 哈尔滨电机厂						13TG	左岸 8TGC
中国东方电机厂						2TG/6TG	左岸 6TGC

注:F—混流式;K—转桨式;TH—喉径;T—水轮机;G—发电机;C—合作生产

2 左岸 14 台机组的招标和引进技术

自 1993 年起,我国有关单位先后邀请表 1 中有制造大型水电机组经验的厂家来华进行技术交流,中方也派出各种代表团到国外考察。世界最大的三峡水电机组,吸引着国内外有制造大型水电机组能力的厂家,并提出了自己的技术方案,表现独特的优势,力争在竞争中获胜。

三峡工程左岸厂房 14 台 700 MW 水电机组为国际招标,并规定:投标者对提供设备的技术与经济负全部责任,要求与中国有资格的制造企业联合设计、合作制造,并向中国制造企业转让技术,中国制造企业分交份额的比例不低于总价的 25%,后 2 台机组以中国制造企业为主。国外大型水电设备制造厂商组成 5 个联合体投标,形成竞争局面。1997 年议标选定 Alstom 与 ABB 中标 8 台,与挪威 Kvaerner 和哈尔滨电机厂(哈电)合作;GE Canada 和德国 Voith Siemens (VGS) 中标 6 台,与东方电机厂(东电)合作,两厂分包份额约为总价的 30%,两厂分别与外商签订技术转让协议和分包合同。1997 年 9 月中国长江三峡工程开发总公司(三峡总公司)与外商分别签订了合同,技术转让协议和分包合同相继生效,至今合同执行比较顺利。与机组配套的控制设备同样通过国际招标,2000 年 5 月签订合同,14 台励磁系统设备由 Siemens 中标,与东电合作;14 台调速系统设备由 Alstom 中标,与哈电合作,同时向两厂转让技术并分包制造,达到较好效果。

在项目实施中,哈电、东电派人参加试验,联合设计和技术转让培训,技术转让做到在中方计算机上安装转让软件达到国外相同计算结果并顺利使用一年后验收;技术转让深度做到转让外商自己开发的软件和执行软件的源程序。

哈电、东电已有几十年设计制造大型水电机组的经验,近 20 年在国家支持下,在开展三峡机组科技攻关的基础上,较好地消化吸收引进技术,已经掌握水轮机水力设计与模型试验、发电机电磁设计、大部件强度刚度计算、推力轴承计算与试验、轴系稳定性计算、发电机通风冷却计算、专项关键工艺等技术,可以自主开发设计制造大型水电机组。

3 三峡机组的关键技术

1) 水轮机水力设计和模型转轮研究是决定水

轮机性能的关键,应以保证机组运行稳定性和可靠性为前提。国际电工委员会 IEC 规定在符合要求的水轮机试验台进行模型转轮验收试验做为验收水轮机性能是否满足合同条款的依据。最终选定的 VGS (GE Canada) 和 Alstom (挪威 Kvaerner) 两个模型转轮的能量和空化性能完全达到了合同的要求,模型最高效率达 95.26%/94.54%,在运行范围内无气蚀,代表当今国际上水轮机性能的较好水平。由于竞争激烈,国内外水轮机制造厂家一直致力于在水力试验台上进行能量、空化和稳定性能的研究。仅 3 年时间,中水头混流式水轮机的效率提高了 1~1.5 个百分点,是很大的进步。在模型验收试验中压力脉动最大值达 8%~9%,超过合同保证值 2~4 个百分点,经过改进再次试验,仍未达到要求,说明真机在一定水头一定负荷下会产生较大水力振动,要求在电力调度中,严格控制单机负荷在合同规定的正常运行范围内运行,以满足机组稳定性的要求。

近 30 年来,国内外的水电机组向大容量发展,部件尺寸的加大造成结构刚度减弱,振动问题普遍存在,都避开振动区运行,三峡机组容量和部件尺寸都是世界最大的;更应引起高度的重视。同一模型转轮应用于中小型水轮机没有产生明显的振动,说明大部件的刚度问题是形成大型水轮机振动的重要因素,应采取增加大部件刚度的措施。

国内外大型混流式水轮机转轮叶片出水边产生裂纹是影响水电机组运行可靠性的较普遍现象。叶片裂纹性质属疲劳断裂,是由作用于叶片的交变动应力过大而造成的,属水力与结构设计的原因,而叶片材质、焊接、热处理工艺、运行工况等多种因素的全过程的研究是必要的。

哈电和东电运用引进技术的水力设计,在符合国际标准的水力试验台上对三峡水轮机模型转轮进行复试,并自选参数进行了几个转轮的计算与试验。结果表明已达到了引进技术的同等水平,正在为云南小湾、广西龙滩等 700 MW 级水电机组进行研究开发,效果是良好的。

2) 推力轴承是水电机组安全运行的关键。三峡推力轴承负荷是世界最大的,各制造企业都有自己的传统结构与运行经验,VGS (GE Canada) 采用小螺旋弹簧簇支撑的巴氏合金瓦面材料浸油外循环结构,镜板直径 5.4 m,Alstom (ABB) 采用不同直径圆柱销支撑双层瓦的巴氏合金瓦面材料浸油

外循环结构,镜板直径 5.2 m,推力轴承各项参数都在常规范围以内。ABB 与哈尔滨大电机研究所合作,在 3 000 t 推力轴承试验台上用半数真机推力瓦完成全负荷试验,测定各项真机运行数据,保证机组可靠运行。在与国外技术交流中,进一步了解到俄罗斯电力工厂采用弹性金属塑料瓦面材料已有近 30 年的运行经验,国内许多水电站已经采用,用户普遍欢迎。国内制造厂新设计的水电机组都采用弹性金属塑料瓦面材料,提高比压,减小镜板直径,降低损耗,可以取消高压油顶起系统,更适用于三峡机组年起停 500 次的运行条件。在国内有多年设计、制造、运行的经验和三峡机组的引进技术,国内制造企业已经掌握大型推力轴承的设计制造技术,充分发挥我国推力轴承试验的有利条件,继续开展推力轴承支撑结构和弹性金属塑料瓦的试验研究工作,能够用于三峡右岸机组。

3) 发电机定子线棒绝缘是保证机组可靠运行和决定发电机寿命的关键部件。发电机定子线棒绝缘耐热等级提高到 B 级、F 级以来,世界上同时存在两大技术流派:一是以西屋公司为代表的(包括 ABB, Siemens 公司等)制造企业,采用少胶带 VPI 工艺,即以少胶云母带包扎后,在罐中抽真空加压浸渍树脂,少胶云母带储存期较长,一批线棒入罐浸渍树脂加温加压使绝缘固化,生产效率较高;另一是以 GE 公司为代表的(包括俄罗斯电力工厂、法国 Alstom 公司等)制造企业,采用多胶带液压工艺,即以含有固化剂的多胶云母带包扎后,一批线棒入罐实施液压工艺,以沥青为介质加温加压使绝缘固化。国内传统原是多胶带液压工艺,20 世纪 70 年代以来,为改进线棒三维形状,采用多胶带模压工艺,并将半导体防晕层一次模压完成,虽然应用压模较多,生产效率较低,但线棒形状是最好的。近 20 多年来用多胶带模压定子线棒在制造、下线、安装、运行中无一绝缘击穿故障。不同的工艺制造出的定子线棒绝缘性能是同等的,绝缘厚度是相同的,哈电、东电制造的定子线棒质量是稳定的。

由 VGS 和 Alstom 提供的三峡发电机都是采用定子绕组水冷、转子空冷的冷却方式,额定电压 20 kV, Siemens 和 ABB 提供定子线棒主绝缘都是以少胶带 VPI 工艺制造的,单侧绝缘厚度都是 4.5 mm。如果哈电、东电引进技术,就要增加新设备,绝缘材料都要进口,掌握少胶带 VPI 技术达

到质量稳定还要有一个过程,而且外商只限于应用到三峡机组。经过协商,外商同意哈电、东电按多胶带模压工艺制造真机线棒送到外商检验测试,满足外商技术要求经三峡总公司认可,分包合同中各 2 台定子线棒由国内提供,现已试验完成。国内制造线棒用于外商技术负责的发电机中的确是一项很大的进步,并为今后技术发展奠定了基础。

4 为自主开发大型水电机组奠定基础

三峡工程水电机组的单机容量(最大出力 840 MVA)和部件结构尺寸都是世界最大的,引进了世界著名制造厂家的先进技术,培养了一批年轻的技术骨干,形成了一支老中青结合的技术队伍,具备了自主开发设计制造大型水电机组的能力。按照国际先进技术标准和材料标准进行设计制造与采购,制造企业进行相应的技术改造,建立了质量保证体系和科学管理制度,使我国水电机组制造水平和能力具有国际竞争力。

1) 大型水电机组立足国内自主开发设计制造,不要重复全面引进国外技术。通过三峡工程建设,全面引进了国外大型水电机组的先进技术,并已了解国外主要制造厂家的技术特点。在此基础上应积极消化吸收所引进的技术,博采众长,继续开展科研工作,有所创新,形成具有自主知识产权的系列技术。新建大型水电站应与国内制造厂家密切合作,从初可研阶段就提出机组选型的方案,开展科研工作,必要时,再考虑与国外厂家合作或引进单项技术,真正实现自主设计制造。三峡工程水电机组采用国际招标,设计、制造、试验和国内分包合同要求符合有关国际技术标准。国内技术标准陆续与国际接轨。实践说明,国内是可以满足国际技术标准要求的。

2) 大型水电机组材料与配套件的采购立足于国内,促进我国工业发展。三峡水电机组是国际招标,选用材料与配套件除润滑油采用国际外,全按国际技术标准采购。三峡左岸水电机组国内分包中有些关键材料与配套件是进口的,在国内技术标准逐步与国际接轨条件下,为了推动在国内采购,原国家机械工业局,原国家冶金工业局和中国机械工业联合会,先后组织国内有关专家对钢材、铸锻件、标准紧固件、有色金属材料和绝缘材料进行国内外技术标准对照和优选国内供货厂家,推荐给机组总供货外商和三峡总公司审定、批准国内分包商

采购。结果，一部分由国内材料制造厂家按国际技术标准制造供应，一部分按国内标准制造供货。转轮铸件国内已经按国外铸件实际性能试制成功，并经国家鉴定，大型铸锻件已可由国内供应。我国加入 WTO 后，国内机组制造厂家具备在国内外择优比价采购材料与配套件条件，更有利于保证机组质量。

3) 充分发挥哈电和东电等制造厂家技术改造形成的生产能力。十几年来，国家支持大力发展水电，提高水电设备制造能力，特别是满足三峡工程水机组的需要，哈电、东电利用银行贷款进行技术改造，增加高水头水力试验台等科研手段，添置大型五轴数控龙门铣床加工转轮叶片型线和焊接坡口，添置大型数控立车、大型数控卧车、先进焊接设备等，能够焊接加工大型部件，装备条件已优于国外同行业水平，可充分满足大型水电发展的需

要。三峡工程左岸 14 台机组的中标外商是国际一流的，但实际制造供货分散在 17 个国家 100 多个工厂，有经验的老制造工厂只生产一些关键部件，如 Siemens 公司把关键的定子线棒交给巴西工厂制造。责任在总供货外商，产品质量有待实践检验。

4) 国内水电机组制造厂家要认真学习国外经验，吸收引进技术，切实加强管理。国外制造厂家各有一套完整详细的指导性技术文件，外商派来的任一位驻工地代表可以在这套文件查阅出指导工地安装操作的技术规范、工艺规程、记录表格等，是传递技术经验的“天书”。在制造厂内严格要求生产工人按设计、工艺、标准生产操作，养成良好习惯，精益求精，一丝不苟，严格检验与记录，使质量保证体系有效地运行，保证质量和按合同交货，做好售后服务，使用户满意。

Three Gorges Project Advancing Technology for Hydropower Equipment Manufacturing in China

Liang Weiyan,

(Harbin Power Equipment Company Limited, Harbin 150040, China)

[Abstract] The Three Gorges Project is the largest hydropower station in the world with 26 sets of 700MW hydropower units. International tendering with export credit was adopted for the fourteen units on the left bank. It was requested in the tendering documents that foreign companies should jointly design and jointly manufacture the equipment with qualified Chinese manufacturers and foreign companies should transfer their technology to Chinese manufacturers. The participation percentage of Chinese manufacturers should not be lower than 25% of the total contract value. And the last two units will be mainly supplied by Chinese manufacturers. Alstom won eight units co-operating with Harbin Electrical Machinery Company Limited while VGS won six units working with Dongfang Electrical Machinery Company. The contracts are proceeding smoothly. Harbin and Dongfang digested assimilated the transferred technology based on their technology tackling activities carried out in the passed two decades for large hydropower units. They conducted certain technology innovations and tried to be self-reliant on developing, designing and manufacturing large hydropower units. The 12 units on the right bank will mainly be manufactured by Chinese manufacturers, which laid a foundation for supplying good quality, advanced and reliable units for large hydropower stations in China.

[Key words] Three Gorges Project; hydropower units; self-reliant development; technology advancement