

三峡工程永久船闸关键技术

樊启祥

(中国长江三峡工程开发总公司, 湖北宜昌 443002)

[摘要] 三峡工程双线五级船闸通航建筑物的总体布置, 涉及泥沙淤积碍航、船闸输水系统水力学、高陡边坡处理、主要金属结构及机电设备制造和技术等方面问题都有特殊要求, 必须通过充分的科学试验、论证和工程实践, 逐步予以解决。

[关键词] 通航建筑物; 输水系统; 高陡边坡; 水力学

[中图分类号] U641 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)01-0048-05

1 通航建筑物总体布置的重大技术问题

三峡工程通航建筑物总体布置的特点是坝区河段流量大、水流含沙量高、坝区地形复杂, 既要解决好坝区泥沙淤积和通航水流条件问题, 又要处理好通航建筑物与发电、防洪的关系。

1.1 三峡水利枢纽坝址选择和枢纽坝轴线布置

三峡水利枢纽通航建筑物总体布置的基本要求是使过坝船队(船)在最高和最低的通航水位和流量条件下安全通过坝。通航建筑物引航道的平面布置是根据船闸(或升船机)的级别、线数、设计船型船队、通过能力等, 结合地形、地质、水流、泥沙及上、下游航道与连接段等条件研究确定, 以满足过坝船队(船)的通航水流条件(指通过水流的流速流态要求)。

三峡工程发电与通航在枢纽坝轴线布置方面吸取了葛洲坝工程的经验, 根据三斗坪坝址地形左凸右凹, 右岸岸坡较陡, 左岸岸坡较缓的地形特点, 宜于布置多级船闸的有利条件, 将通航建筑物布置在坝轴线左侧, 远离电站和泄水建筑物, 确定了三斗坪坝址。这样, 确保了在三峡工程各设计阶段,

通航部分与其他部分在布置方面不发生矛盾^[1]。

1.2 泥沙淤积碍航问题

在多沙河流的河段上兴建通航枢纽时, 泥沙淤积和通航水流条件是不可分的, 解决泥沙淤积碍航问题是通航建筑物总体布置的重要课题。长江三峡—葛洲坝枢纽河段为多沙河段, 年均输沙量达 5.3×10^8 t, 多沙年如1954年输沙量达 7×10^8 t, 并集中于汛期。通过大量泥沙模型试验和方案优化工作, 三峡工程吸取了葛洲坝工程的经验, 采取排、防、导、冲、清5种手段, 较好地解决泥沙淤积碍航问题:

1) 排沙。排沙的手段是确定正确的河势。长江上游每年随江水下泄 5×10^8 t 泥沙, 绝大部分通过泄水建筑物排往坝下游。三峡工程河势规划, 通过泥沙模型试验, 按照有利于排沙的要求, 确定了泄水建筑物在坝轴线上的位置。

2) 防淤。需在通航建筑物上、下游引航道靠江一侧建人工防淤隔流堤, 消除坝前主流左右侧大范围回流, 防止泥沙进入上、下游引航道。三峡工程在升船机上、下游引航道右侧均修筑了防淤隔流堤。

3) 导流导沙。将通航建筑物上、下游防淤隔

流堤两侧均设计成流线型，当冲沙系统冲沙时起主导导沙和束水攻沙作用。

4) 冲沙。上、下游引航道虽然修筑了防淤隔流堤，但在上、下游引航道口门附近及其连接段仍存在回流和缓流区，产生回流和缓流泥沙淤积；引航道内的异重流、往复波流和船闸充泄水在上、下游引航道内带进泥沙产生淤积。模型试验证明，三峡工程在坝区泥沙淤积接近冲淤平衡时，上、下游引航道及其连接段年淤积数量约为 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 或更多。这些淤积若采用挖泥船清淤将会与过坝船队(船)发生干扰，应采用动水冲沙的措施。葛洲坝工程实践证明，全断面冲沙流速为 $3.0 \sim 3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ，在 $6 \sim 8 \text{ h}$ 内，可以基本冲走主要泥沙淤积，超过 $6 \sim 8 \text{ h}$ ，冲沙效果就不显著了。对此，三峡工程可以参考并通过模型试验确定。现建成的临时船闸将在三期改建成冲沙闸。根据模型试验成果，三峡工程上航道口门碍航淤积将在水库运行后 40 年左右形成，下航道口门淤积在 1998 年临时船闸投入使用时就出现。冲沙系统的布置及冲沙流量的选择要考虑三峡航道口门区淤积的具体特点。

5) 清淤。通过冲沙，不可能将引航道的边边角角和口门上、下游部位的边滩泥沙淤积冲净，每年留有 $30 \times 10^4 \sim 50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 碍航泥沙，需由挖泥船清理。下游引航道 1998 年投入使用，口门区采取分槽错开清淤、提前清淤等措施，保证了汛期临时船闸的顺利通行，为三峡水库蓄水后上、下航道口门区碍航泥沙清淤积累了经验。

三峡工程解决泥沙淤积碍航问题的技术难度和复杂性超过葛洲坝工程，相关的工程措施难度也高。如连续五级船闸闸室内泥沙淤积问题，坝下河床下切影响下游引航道枯水期航深问题，如何选择各部位清淤工程量、清淤方式、清淤机具等，攻克这些技术难题将促进坝区泥沙碍航清淤技术进一步提高。

1.3 通航建筑物上、下游引航道往复波流引起的通航水流条件问题

引起三峡工程通航建筑物上游引航道往复波流的因素主要有两个：一是当三峡水库运行大约 40 年左右，坝前泥沙淤积形成边滩，在大坝和电站泄洪时，由河势和扩散水流挤压口门区非恒定回流形成引航道内的往复流；二是船闸充水时，在上游引航道内引起的非恒定流往复波流，将在有限长的引航道内呈周期性的往复波动。两者所产生的往复波

流迭加时波峰更高波谷更深，因而波降、流速以及系泊在引航道内船舶的动水压力也相应更大。

为解决三峡通航建筑物上游引航道内各部位往复波流影响的通航水流条件问题，通过对各种布置方案，包括防淤隔流堤的布置和引航道内各部位水深要求等进行了长期的科研试验，对工程措施进行优化，最后选择全包隔流堤方案，结合合理调度两线船闸输水方式，以期达到往复波流的波高尽可能减小的目的。

2 船闸输水系统水力学问题

三峡工程永久船闸总水头 113.0 m ，单级最大工作水头达 45.2 m ，一次充(泄)水体积最大达 $23.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，一次充(泄)水时间要求 $\leq 12 \text{ min}$ ，是当今世界上水头最高、规模最大、运行工况复杂、技术难度大的船闸^[2]。

2.1 永久船闸输水系统

永久船闸输水系统闸室内采用等惯性长廊道 4 区段 8 支廊道分散顶部出水加消能盖板型式。葛洲坝水利枢纽 1[#] 船闸运行实践证明，这种船闸输水系统存在的主要问题有：超灌超泄严重超标，在闸室出水的 4 区段中间和两端形成 5 个泥沙淤积区，输水过程中可能影响闸室内船舶的安全。解决连续船闸输水系统超灌超泄问题要考虑正常输水及补水运行的重要性、安全性和复杂性。解决的办法是提前关闭充水阀门以控制闸室水位的最大惯性超高(超降)值，满足以上要求主要依靠船闸自动化控制^[3]。

2.2 船闸输水系统泄水方案

为保证下游引航道内通航水流条件达到要求，船闸泄水不能直接排入下游引航道，而是通过设置于引航道下面的泄水箱涵，跨过下游隔流堤，排入长江。泄水箱涵长约 1500 m ，须考虑正常工况与紧急工况下泄水主廊道动水关门产生的水击压力及反弧门后的水流状况。

考虑泄水箱涵出口与下游引航道的水头差，以及由大坝泄洪、电站日调节等在下游引航道内引起的非恒定往复波流对第 6 闸首人字工作门的影响，在末级闸室内设置了两个辅助泄水短廊道及阀门，在主廊道泄水后期，开启辅助泄水阀门泄水入下游引航道。

2.3 输水阀门水力学、门型和阀门段廊道体型

输水阀门的主廊道区段阀门使用频繁，工况复

杂,是输水系统和整个船闸运行的要害部位。经过长期大量的科学试验,尤其是1:10大比尺模型试验和技术攻关,采取以下综合技术措施:阀门反向弧型门,阀门采用刚度和质量大的横梁全包式;动水关门,快速开门。受启闭机械性能限制,开门时间确定为2 min,结合三峡工程具体条件,初始淹没水深确定为26 m;阀门后廊道设顶扩,阀门后廊道设底扩,门楣通气等。

3 船闸高陡边坡处理

由于通航布置方面的要求,三峡工程双线连续五级船闸所处部位地形较高,船闸闸室底板建基面需挖至121.50~50.00 m高程,两侧形成人工岩质高边坡,边坡高度一般为50~120 m,第三闸室坛子岭附近,边坡最高达170 m。为了充分利用坝址区花岗岩岩体结构强度高的特点,闸室边墙在微风化及新鲜岩体部分开挖成直立坡,采用钢筋混凝土薄衬砌式结构,以节约工程量和投资。根据科研成果,船闸闸室人工岩质高边坡的坡比为:新鲜和微风化岩体在闸室侧墙部位开挖成直立坡,闸室侧墙以上为1:0.3;弱风化带岩体为1:0.5;强风化带岩体为1:1,全风化岩体为1:1~1:1.5。除边坡上部的风化岩体外,微新花岗岩体完整,强度高,无大规模的断层,主要断裂结构面与边坡走向成30°以上交角,结构面性状好,已测到的地应力方向一般与边坡夹角较小,从总体看对边坡稳定是有利的。岩体结构面与边坡或裂隙组成的定位楔形块体、半定位楔形块体及随机块体的局部边坡稳定性大部分也较好,只有局部地段和部位在有地下水作用或爆破荷载作用下稳定性较差,需及时采取加固支护措施。

边坡加固采取的重要措施是边坡排水(包括地表坡面水的拦截及导排、边坡岩体中地下水的疏干)和边坡岩体的锚固支护(包括边坡系统锚杆,不稳定块体加固支护锚杆和锚索)。山体排水洞和排水幕的形成是边坡稳定的重要保证。布置在永久船闸南北山体内部的7层山体排水洞实施早于地面开挖工程,起到了疏干边坡地下水,提供地质预报和提供对穿锚索施工作业面的作用。

3.1 永久船闸高边坡开挖

永久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)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,不仅必须保证整体和局部稳定,而且必须严格控制边坡的流变,以满足船闸人字门的正常运行要求。

3)永久船闸闸首及闸室边墙均为衬砌式结构,由高强锚杆连接在岩体上,边坡岩体段下直接影响着闸首支持体及闸室混凝土衬砌墙的稳定与变形。

4)施工难度大、干扰多、工期紧。船闸工程不仅地面施工强度高,工作面窄,深且陡的闸室直立边墙开挖尤其困难,与地下隧洞及竖井开挖同步进行,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处理的难题。

为解决永久船闸高边坡开挖爆破施工技术难题,满足闸室开挖及边坡稳定要求,施工单位进行了历时近一年的现场爆破试验,提出了适合永久船闸槽挖爆破的施工程序、各种不同爆破方式(槽挖深孔梯段微差爆破、侧向保护层爆破、基岩底部保护层爆破等)的爆破参数。开挖程序是先进行中间先锋槽开挖,后进行侧向保护层开挖。先锋槽采用液压钻进行梯段爆破和施工预裂;侧向保护层采用手风钻光爆开挖。

通过爆破试验,并在施工中补充完善开挖爆破措施。确定爆破单响药量为100 kg,质点振动速度为15 cm/s,后期调整为70 kg(一般情况采用1孔1段爆破,控制在为50 kg以内)。爆破单孔痕率,节理裂隙间距大于2.0 m的不发育岩体为90.72%,节理裂隙间距为2.0~0.5 m的较发育岩体为67.78%,节理裂隙间距为0.5 m以下的极发育岩体为31.33%(设计要求的单孔痕率应分别大于80%,50%~80%,10%~50%);船闸槽挖爆破岩石质点振动速度控制在15 cm/s以内(超过50%的控制10 cm/s以内),船闸槽挖爆破质量控制满足设计要求。

3.2 永久船闸锚固工程

由于深槽高边坡的特殊性,规定了上一梯段边坡支护(含衬砌墙结构锚杆与边坡锚索施工)未完成不得进行下一梯段的槽挖施工,边坡支护须符合爆破震动影响要求。在同一开挖层上,锚索造孔、高强锚杆造孔、随机锚杆施工随开挖跟进,开挖工作面与支护工作面相距30 m以上,开挖工作面每天推进10 m,待第二梯段开挖后,在距工作面30 m处进行上一层的锚索、高强锚杆安装验收,形

成一个多层次、多工序的立体交叉作业。

实际开挖过程中，首先要有利于槽口直立墙边坡岩体的稳定，对直立墙第一梯段进行锁口锚杆等系统加固。锁口锚杆安全监测资料表明，锁口锚杆对槽口直立坡的稳定具有非常重要的锚固作用，承受了反复爆破和边坡卸荷变形产生的张拉荷载。

为减少地表水对直立墙岩体的侵蚀破坏，对裸露的岩体平台进行封闭混凝土保护。为保护槽口处直立墙岩体，有利于施工期安全，对电缆槽部位边坡进行了喷护。

在各级槽挖过程中，通过联合地质工作组工作，对出现不稳定的块体进行了锚杆、7 000 kN 系统端头和对穿锚索的随机支护处理。这些措施的及时实施，有效地控制并保障了工程的施工安全。随着槽挖加深，直立墙上的系统锚索与系统高强锚杆支护工作采取高排架施工方案，总体上控制了高边坡与中隔墩的变形，提供了浇筑混凝土转换条件。其中，高强结构锚杆的作用一是施工期用于加固直立墙岩体、保证施工期安全；二是在运行期将衬砌混凝土锚固于岩壁上。经过高强结构锚杆现场生产性试验，优化了施工工艺，验证了设计参数。

3.3 高边坡安全监测

在永久船闸部位埋设了 1 500 余台监测仪器，监测项目包括变形监测、渗流监测、应力应变监测、爆破振动监测、地应力监测、水力学监测、锚索（杆）应力监测、岩体松弛范围监测和岩体声发射监测等。由埋设的监测仪器观测资料表明，边坡向闸室中心线最大水平位移为 61.56 mm，直立墙顶的最大水平位移为 40.15 mm，这些数值与设计专题报告中的计算值 16~48 mm 基本一致。上述成果表明：只要严格控制爆破对岩体的损伤，对边坡和局部不稳定岩体适时进行喷锚加固，切实做好系统排水，加强边坡安全监测和反馈分析，不断调整优化爆破参数和支护设计，永久船闸边坡稳定和变形完全能够满足运行安全的要求。

4 主要金属结构及机电设备技术要求

三峡工程永久船闸金属结构及机电设备设计有两线，每线船闸的金属结构及其启闭机械和电气设备的型式和数量相同，经方案论证，第 1 至第 6 闸首工作门全部采用人字工作门，输水阀门全部采用反向弧门。除船闸第一级按分期蓄水的通航水位变化布置外，其余四级均按等水位差布置。人字闸门

最大门高 38.5 m，启闭机最大推力荷载正常工况 2 700 kN，非常工况 4 500 kN，输水廊道反弧门最大工作水头 45.2 m，启闭机最大启闭力 1 500 kN。与国内外已建大型船闸工程技术规模对比分析，三峡永久船闸人字门及其启闭机、输水阀门的工作水头和综合指标都是世界最大的。因此，永久船闸人字门及其液压启闭机的设计、制造与安装，80 m 深的竖井下布置的输水系统反弧门与其液压启闭机及吊杆系统的设计、制造、安装技术等金结液压设备中，关键部件及关键工艺都具有极大的挑战性。

通过有关设计单位、科研单位、国内制造厂家、安装单位、监理单位和项目业主几十年来的工作，这些问题得到了解决，已安装就位的大型金属结构及其启闭机械经过单闸首设备联动调试与无水系统联合调试，各项指标满足设计与质量要求。

考虑三峡工程分期蓄水水位要求，五级连续船闸可按三级、四级、五级 3 种方式运行，相应的存在不同运行工况，如：不补水运行与补水运行；双侧阀门输水与单侧阀门输水运行；等惯性长廊道四区段八分支输水系统的超灌超泄问题的动水关阀控制技术；五级连续船闸保证安全通行的相邻闸首间人字门与反弧门的过闸工艺与闭锁保护；正常情况下一线船闸上行一线船闸下行；有一线船闸出事故另一线船闸单线运行时的换向过闸问题；船闸运行安全中的紧急工况、保护工况、特殊工况的控制技术。这些都是永久船闸电气控制系统的关键技术。船闸电气控制系统中设置了现地操作，集中控制系统手动操作，集中控制系统逐级过闸操作，集中控制系统同步过闸操作等方式，以确保五级船闸安全、顺畅、经济运用。

针对电气控制系统上述关键技术，吸取葛洲坝船闸与三峡临时船闸运行经验，在三峡五级连续船闸过闸工艺、补水控制、动水关阀控制、集中控制系统与现地控制系统间的通讯、接口、分工与协调方面做了大量的工作，并经过了出厂试验、对接试验。通过无水系统与有水系统联合调试，已验证了这些设备与程序在设计、制造、安装与调试过程的质量满足设计要求，保证了船闸投入永久运用的可靠性。

5 结语

永久船闸监测资料综合分析表明：船闸高边坡与中隔墩岩体整体是稳定的，且随着永久船闸工程

开挖工作的结束，高边坡与中隔墩的变形已逐步趋于稳定。永久船闸的金属结构及机电设备已安装完毕，通过了单闸首设备联动调试及船闸控制系统无水调试和有水调试。各项测试结果表明：船闸金属结构、机电设备、控制系统及水力学均满足设计与运行工艺要求。2003年6月1日三峡水库开始蓄水，6月10日水位达到135m，永久船闸开始初始通航水位下的补充试验，6月13日开始进行实船过闸试验，各项成果满足要求，6月16日正式投入试通航。三峡永久船闸还要适应三峡水库蓄水过程及永久运用的进一步检验。相信建立在充分的科

学试验、科学论证及已建工程实践检验基础上的三峡工程永久船闸将使长江黄金水道的明天会更好。

参考文献

[1] 梁应辰. 三峡工程通航建筑物[A]. 中国科学技术前沿[M]. 上海: 上海教育出版社, 1997. 527~568
 [2] 水利部长江水利委员会. 长江三峡水利枢纽单项工程技术设计报告 第三册[M]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 1994
 [3] 水利部长江水利委员会. 三峡工程永久通航建筑物研究[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997

Key Technical Issues of TGP Permanent Shiplock

Fan Qixiang

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

[Abstract] To solve the high-dam navigation issue of the world class Three Gorges Project (TGP) is one of the key technical issues of the TGP. Special requirements exist in the TGP double-lane five-step shiplock in terms of general layout of navigation structures, sedimentation hindering to navigation, hydraulics of the water-conveyance system, high and steep slope treatment, manufacture and technology of main metal structures and mechanical and electric equipment, which have been resolved step by step by scientific tests, verification and engineering practice.

[Key words] navigation structures; water-conveyance system; high and steep slope; hydraulics

《中国工程科学》2004年第6卷第2期要目预告

极地系统科学考察

- 大科学系统工程管理探索 陈立奇
- 中国载人航天“飞船起步”的战略思考 赵少奎
- 最尖锐的矛盾与最优越的机遇
- 中国建筑发展寄语 吴良镛
- 中国石油勘探战略东移与大庆油田的发现 赵文津
- 三峡工程水电站压力管道和蜗壳技术
- 结构型式的选择及论证 戴会超等
- 非线性系统的高增益滑模输出跟踪 王新华等
- 统计不相关最佳鉴别矢量集的本质研究 吴小俊等
- 广义不确定性系统理论(GUST)的基本构思 王清印等
- 三维柱型地形上单浮体的辐射和散射问题
- 同轴但半径大于或等于半径圆柱体

- 障碍物条件 吴必军等
- 基于径向基函数神经网络的滚动轴承
- 故障模式的识别 陆爽等
- GaAlAs/GaAs 平面波导串联矩形谐振腔
- 滤波器的研究 蔡纯等
- 隧道火灾烟气发展的模拟计算研究 李元洲等
- 高耗能企业系统化节能模型控制研究 张少军等
- 微观结点数目对显微偏析数值模拟的影响 刘永刚等
- 大型工程的战略管理 汪应洛等
- 中国公司治理的路径依赖——理论与实证分析 邴红艳
- 开展工程伦理学研究 增强工程师责任意识 李世新