

三峡工程双线五级船闸设计

钮新强, 童迪, 宋维邦

(长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 武汉 430010)

[摘要] 简要介绍了三峡双线五级船闸的总体设计及总体布置, 高水头船闸的输水技术, 全衬砌船闸结构的关键技术问题, 大型人字门及启闭设备和复杂运行条件下的监控技术。船闸自 2003 年投入运行, 运行实践证明, 设计采用的技术先进、合理、可靠。三峡船闸的设计建设, 发展了船闸工程的设计理论和实践, 使世界船闸工程技术达到了新水平。

[关键词] 三峡工程; 双线五级; 船闸设计

[中图分类号] TV61 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)07-0085-06

1 前言

长江是我国第一大河。按照规划, 长江为 I 级航道, 常年通航, 年运量约占全国内河总运量的 80%。在三峡工程修建以前, 上游从宜昌至重庆长约 660 km 河道, 滩险众多, 水流条件复杂, 最大只能通航由 800 t 至 1 000 t 驳船组成的 3 000 t 级船队, 航道年单向通过能力仅约 1 000 万 t。三峡工程建成后, 上游库区航道, 通航条件得到根本改善, 万吨级船队每年约有一半时间, 可以从下游直达重庆九龙坡港; 大坝下游航道, 通过枢纽流量调节, 枯水期航道的通航条件, 得到了显著改善, 长江中、上游航道的通过能力, 年单向可提高到 5 000 万 t。

三峡船闸主要建筑物的等级为 I 级, 设计总水头 113 m, 最大通航流量 56 700 m³/s, 设计水平年 2030 年的规划通过坝址的货运量, 年单向达到 5 000 万 t。船闸采用双线五级连续布置, 闸室输水的最大工作水头 45.2 m, 闸室有效尺寸按照通过万吨级船队设计, 为 280 m × 34 m × 5 m (长 × 宽 × 槛上最小水深)。船闸在坝址左岸深切开挖的岩槽中修建, 开挖边坡的最大高度达 170 m, 闸首和闸室全部采用衬砌式结构。三双线五级船闸是目前世界上

在满足船闸上、下游通航条件、解决闸室快速安全输水和解决船闸结构技术方面难度特大的大型船闸。

2 船闸总体设计

三峡船闸总体设计, 主要针对影响三峡水利枢纽和船闸的整体效益、船闸技术的可行性和先进性, 以及工程量造价等, 带全局性的重大技术问题进行研究和决策。针对枢纽坝址复杂的水流、泥沙条件、船闸 113 m 的总设计水头和主体结构在深挖岩槽中修建的特点, 在船闸设计的总体上进行设计研究, 解决以下主要问题。

2.1 多沙河流上船闸的工程布置

三峡枢纽的坝址, 处于接近直角的急弯河段, 船闸线路在上、下游与长江主流之间, 大角度相交, 在引航道口门区形成大于通航标准的横向流速, 不能满足船舶安全进出引航道口门的要求; 在汛期, 长江水流中大量含沙, 工程运行一定年限后, 泥沙淤积将改变航道的通航尺度和水流条件, 导致引航道口门区要求的通航水流条件不能得到保证。

船闸线路的位置, 通过大范围、多方案比较研究, 确定采用位于坝址左岸制高点坛子岭左侧的线路。通过在上、下游引航道右侧, 修建隔流堤, 优选

[收稿日期] 2011-05-10

[作者简介] 钮新强(1962—), 男, 浙江湖州市人, 教授级高级工程师, 全国工程设计大师, 长期从事大型水利水电工程设计与研究工作;
E-mail: niuxin角度@cjwsjy.com.cn

引航道口门的位置,调整引航道口门轴线与主河道水流之间夹角,使引航道口门区的水流条件能长期满足通航要求。

对泥沙淤积碍航问题,在汛期利用溢流坝泄洪,以大流量排沙,减少引航道泥沙淤积。在不考虑枢纽上游建坝的条件下,大量模型试验表明,船闸引航道在工程运行几十、乃至上百年后,泥沙淤积才有可能碍航,泥沙淤积的部位主要在引航道口门以外,在三峡工程下游的葛洲坝枢纽船闸引航道上,已被成功运用的“动水冲沙”措施,在三峡船闸上,不可能取得显著效果;对三峡工程至远期才有可能发生的泥沙淤积碍航问题,经过了研究分析,确定采用以机械清淤为主和将临时船闸改建为冲沙闸,在汛末降低下游水位,进行小流量冲沙为辅,并在三峡船闸的右侧,预留了在需要时可以加建冲沙隧洞,以增加冲沙流量的条件可能性,保证了三峡船闸直至水库泥沙淤积平衡以后,船闸引航道仍能保持通航尺度的要求。

2.2 超高水头船闸的输水方式

三峡船闸 113 m 总设计水头的输水方式,关系到船闸在枢纽中的布置,解决船闸水力学问题的难度和运行管理的条件、通过能力、工程量和造价,以及船闸工程的可行性和技术的先进性。首先考虑的问题是必须对船闸的总设计水头进行合理分级,三峡船闸先后研究了三级船闸分开布置、四级和五级船闸连续布置,以及连续布置的三级省水船闸等多种方案。对船闸总水头的分级主要考虑了坝址的地形、地质条件和船闸上、下游水位组合等,并考虑了当前船闸输水技术的水平,按分级水头明显高于已建的世界高水头船闸。但通过努力,在技术上确有一定把握的原则,采用将总设计水头等分为五级,两线船闸并列连续五级布置,在中间级的最大工作水头 45.2 m 时,船闸最大一次充、泄水水体为 23.7万 m^3 ,充、泄水时间控制在 12 min 以内的分级方式。通过自主创新,将输水系统与闸墙结构分开布置,采用以增加阀门顶部淹没水深为基本的技术措施,结合引用其他高水头船闸先进的输水技术,解决了三峡船闸超高水头的输水问题。

2.3 岩石地基上船闸的结构形式

按照选定的船闸线路,闸槽需在山体深切开挖形成,船闸结构采用不同的形式,对工程造价有显著的影响。船闸结构按常规采用分离重力式或整体式,在技术上相对比较简单,也有丰富的经验,但岩

石开挖和混凝土浇筑的工程量大、造价高。三峡船闸基岩为闪云斜长花岗岩,比较完整,湿抗压强度高,具备承受荷载的能力,但必须保证岩体与闸墙间能联合受力和控制岩坡变形,需要解决的技术难度大。经研究,通过对岩体采用加固支护、边坡表面封闭、地下水疏排和开挖爆破控制等综合技术以及研究衬砌闸墙与岩体联合受力的机理,采取保证闸墙与墙后岩体可靠联合工作和控制变形的工程技术措施,三峡船闸决定将闸首和闸室墙全部采用衬砌式结构,形成了新颖的“全衬砌式船闸”。通过两线船闸采用全衬砌式结构并列连续五级布置,船闸的线路与枢纽其他工程和施工总布置的矛盾较小,船闸运行管理集中、方便,为工程明显地节省了工程量和投资,提升了船闸结构的技术水平,并为在河道上游基岩坝址修建船闸工程中采用全衬砌式结构提供了技术经验。

3 船闸总体布置

3.1 线路选择及其布置

三峡船闸先后在左岸研究了 I 至 IV 线 4 条线路,4 条线路的主体结构,均位于山体深切开挖的岩槽中。经比较,最后选用的 IV 线,引航道口门轴线与主河道水流之间的夹角较小,线路更平顺,比其他线路,能更好地适应水库淤积平衡后口门区的水流条件。

选定线路主体结构直线段长度 1 621 m,船闸线路总长 6 442 m。上游引航道中心线由一闸首上游面往上为 930 m 直线段,接半径为 1 000 m,圆心角 42° 的弯段,再接 450 m 长的直线段,至上游隔流堤头,引航道全长 2 113 m,正常段底宽 180 m,航道底高程 130 m。上游引航道口门以上,为 530 m 长的口门区,口门底宽 220 m,往上游再接半径为 1 200 m,圆心角为 28° 的弯段后,用切线与库区航线相接。上游引航道右侧,布置有长 2 680 m 的隔流堤。

下游引航道中心线从六闸首下游面往下为 930 m 的直线段,接半径为 1 000 m,圆心角 54° 的弯段,再接 850 m 的直线段,至下游隔流堤头,引航道全长 2 708 m,正常段底宽 180 m,航道底高程 56.50 m。下游引航道口门以下,为 530 m 长的口门区,口门宽度 200 m,往上游再接半径 1 000 m、圆心角为 10° 的弯段后与主河道连接。下游引航道右侧,布置有长 3 550 m 的隔流堤。三峡船闸总体布

置图见图 1。

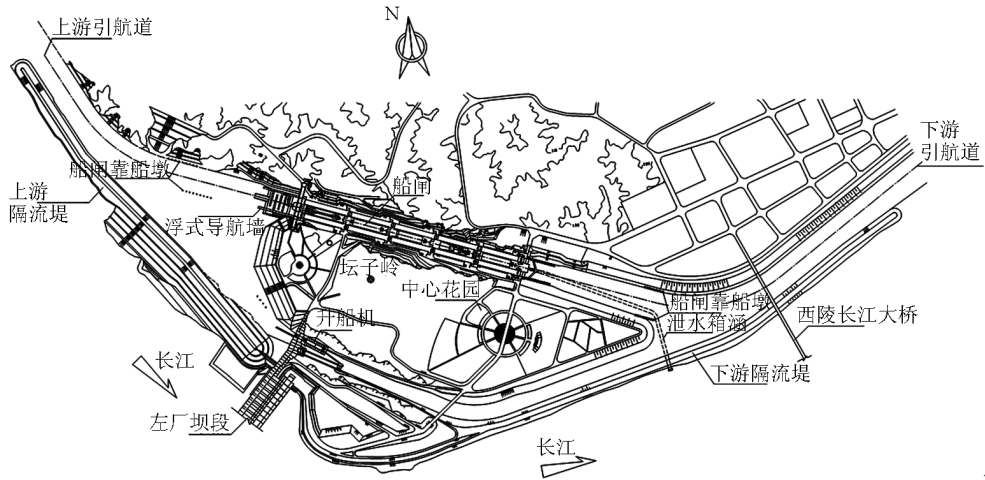


图 1 三峡船闸总体布置图

Fig. 1 General layout of Three Gorges ship-lock

3.2 建筑物及设备布置

三峡两线船闸每线船闸由上下游引航道及其导航、靠船建筑物及主体结构段的 6 个闸首, 5 个闸室组成。

3.2.1 主要建筑物布置

三峡两线船闸的主体建筑物, 深切挖的闸槽中布置, 均为分离衬砌式结构。在两线船闸之间, 保留有底宽为 57 m 的岩体隔墩。一闸首闸顶高程 185.00 m, 二、三、四闸首闸顶高程分别为 179.00、160.00、139.00 m, 五闸首闸顶高程为 116.67 m。

一至五闸室结构段长分别为 265、263.5、265.5、265.5、254.2 m。墙顶高程分别为 179.00、160.00、139.00、116.67、96.62 m。

分别在南北边坡及中隔墩岩体内, 布置输水主廊道。上游正向进水箱涵对称船闸中心线布置在引航道底部, 输水系统的泄水, 为两条横穿隔流堤的泄水箱涵, 将闸室水体直接泄入长江, 并在六闸首闸墙内布置辅助泄水廊道。每条输水主廊道设有 6 组阀门井, 门井均在岩体内开挖, 钢筋混凝土衬砌形成。

3.2.2 金属结构及启闭设备

三峡船闸自上游至下游依次布置一闸首事故检修门及其桥式启闭机, 一至六闸首人字门及其液压启闭机, 六闸首下游浮式检修门; 人字门高度 37.5~38.5 m, 单扇闸门的宽度 20.2 m, 一闸首人字门的最大淹没水深 35 m。输水系统依次布置有进水

口拦污栅、各级输水反弧门及液压启闭机、输水反弧门的上下游检修闸门、六闸首辅助泄水廊道工作阀门及启闭机和上游检修闸门; 输水反弧门孔口尺寸, 一、六闸首为 4.5 m × 5.5 m (宽 × 高), 二至五闸首为 4.2 m × 4.5 m (宽 × 高)。人字门采用卧缸液压启闭机启闭, 输水反弧门采用竖缸液压启闭机启闭, 两套设备共用一套液压系统。

3.2.3 电气设备

每线船闸各设置 1 套监控系统, 监控系统由现地控制层和集中监控层组成。集中监控层由集中控制装置、通航指挥信号装置、工业电视及监视设备、广播及通信设备组成, 完成单线连续过船作业的集中自动控制和监视指挥。现地控制层由分布在 6 个闸首的 12 个启闭机房内的现地控制站(子站)和水位检测、人字门、输水反弧门开度检测等设备组成。

现地控制站采用冗余的控制结构, 以可编程序控制器(PLC)作为主控制装置, 2 台 PLC 分别配置在同一闸首的两个子站中, 互为热备工作。子站与子站之间的相互联系除采用 PLC 网络通讯外, 还采用电缆进行 I/O 点之间的低级硬连接。现地控制站的作用是接受和执行集控指令控制现地设备可靠运行, 同时在集控设备或集控网络发生故障, 使集中控制不能正常工作时, 能各自独立地进行有闭锁保护的现地单机操作。

三峡船闸主体结构布置图见图 2。

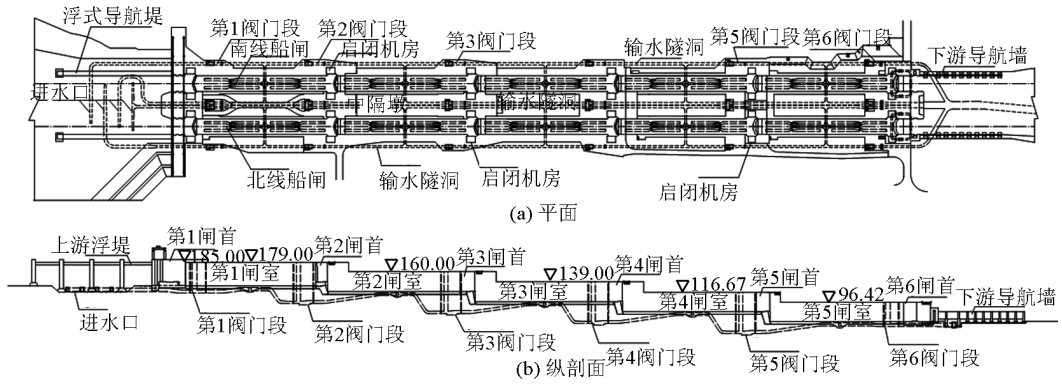


图2 三峡船闸主体结构布置图

Fig. 2 Layout of major structures of Three Gorges ship-lock

4 船闸结构设计

4.1 结构布置

三峡船闸底板与两侧闸墙间设有一道纵缝。闸墙为全衬砌式或混合式。

闸首顺流向分为门龕段和人字门支持体段。人字门支持体大部分采用重力衬砌式,部分采用下部为重力衬砌式,上部为重力式的混合式。支持体背

面及下游与岩体接触面上,布置结构锚杆。

大部分闸室墙为钢筋混凝土衬砌式,通过结构锚杆与墙后岩体联合受力,部分闸室墙为上部重力式,下部衬砌式的混合式。闸室墙厚度主要取决于设备布置、结构锚杆锚头的尺寸及受力要求。衬砌闸室墙厚采用1.5 m,纵向每12 m设一道结构缝。

闸室典型设计断面图见图3。

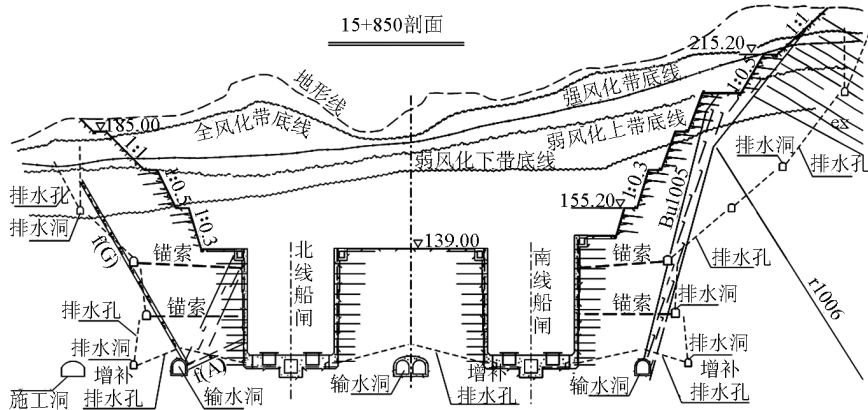


图3 闸室典型设计断面图

Fig. 3 Typical section of lock chamber

4.2 结构分析

4.2.1 衬砌结构技术特点

三峡船闸采用衬砌闸墙与岩体联合受力的分离式结构,衬砌墙的高度为48~68.5 m,在国内外尚无专门的规程、规范或设计标准可循。结构设计需研究解决以下技术问题:

1) 支撑人字门支持体的岩体能提供足够的抗力,支持体的稳定和建基面的应力满足要求;荷载引起的变形满足人字门及边墙顶部机械设备正常运行

的要求;

2) 锚杆是受力体系联合工作的关键,受力条件复杂,不仅承受轴力,还承受由闸墙自重、水荷载及温度变形产生的弯、剪应力。

3) 受力体系为混凝土、锚杆、岩体三者共同工作,要求受力体在各种工况下,能够充分发挥各自的材料特性,保证工程安全可靠。

4) 研究高可靠度的墙后排水系统,使墙后渗水有效地控制在设计允许的范围以内。

4.2.2 整体稳定分析

1) 闸室。衬砌闸室墙自身不能满足整体稳定要求,在闸室高水位时,依靠岩体对闸室墙的支撑作用,承担内水荷载,闸室墙不存在稳定问题。在低水位运行或检修时,作用在闸室墙上的外水压力,通过锚杆传递至岩体,依靠结构锚杆与岩体联合受力维持稳定,闸室墙的整体稳定计算,可转化为对结构锚杆的设计。

2) 闸首。对于门龕段为薄衬砌式,支持体为重力衬砌式的闸首,在两者之间设置结构缝,以简化门龕段的受力条件。门龕段受力条件与闸室墙相同。三峡船闸人字门支持体,在上游高水位运行工况下,由于墙背和下游面有足够的完整岩体与其联合受力,满足整体稳定要求。在检修工况下,考虑渗压力作用,在不计入锚杆的情况下,满足抗滑稳定要求。抗倾稳定则需考虑结构锚杆的作用,与岩体联合受力。锚杆反力采用有限元方法计算,按受力最大的锚杆拉力达到其设计强度布置结构锚杆。通常锚杆受力多呈上大、下小的倒三角形分布,在锚杆过缝处设置自由段,使锚杆受力更加均匀。

4.2.3 有限元分析

三峡船闸衬砌式闸墙结构,均通过结构锚杆与岩体连成整体,形成闸墙—结构锚杆—岩体联合受力体系,在各种工况下,能够充分发挥各自的材料特性,保证工程安全可靠。闸首支持体和闸室墙有限元分析的方法、主要的技术问题基本相同。由于混凝土与岩体之间存在着接触面,混凝土与岩体为非线性材料,正确模拟衬砌结构与岩体联合受力的机理,保证两者间协调工作。

经研究,在接触边界上引入接触面单元,在物理方程中,考虑了由于变温和其他方面的原因引起的初始间隙,以及岩体表面不平整对接触面剪切应力的影响^[1]。

接触面单元的物理方程,较真实反映了衬砌结构—结构锚杆—岩体三者之间的联合受力状态,按上述结构布置,对闸首支持体、闸室墙联合受力体进行有限元分析,锚杆用梁单元模拟,在施工期,模拟混凝土的浇筑过程,考虑温度作用与混凝土的徐变;在检修期,考虑墙后渗透压力与温度变化的共同作用,可得到不同条件下的结构应力、变形及锚杆内力。

4.3 结构锚杆设计

有限元分析表明,结构在温度荷载作用下,锚杆

承担了较大的剪力。为此,在混凝土与岩基接触面处,在锚杆上包裹了弹性材料,形成能让锚杆进行弯曲变形的“自由段”,以减小锚杆对墙体切向变形的约束,能够基本消除锚杆的剪力,充分发挥锚杆抗拉强度大、抗剪强度低的特点,并使锚杆受力分布均匀。在锚杆自由段的表面,采用喷锌加防腐涂料封闭,并外套弹性材料的联合防腐方式进行处理。

4.4 排水系统设计

降低衬砌结构墙后的渗透水压力,是保证墙体与岩体间联合受力的主要因素。三峡船闸底板下部沿两侧纵缝设置了纵向基础排水廊道。在闸墙与基岩接触面上,设置了较新颖的“井”式排水方案,能高效地排除墙后渗水,降低墙后水压力。由竖向排水管和横向排水管组成“井”式排水系统,可将水导向相邻的竖向排水管进入基础排水廊道后,自流至下游集水井,由水泵抽排至下游引航道。

5 高水头船闸输水系统设计

三峡船闸最大的输水水头 45.2 m,远超过目前世界上已建大型船闸的最高水头,且充、泄水体大,要求的输水时间短、闸室水面上升速度快,导致解决闸室输水问题的难度大。为解决闸室快速充、泄水的问题,采取了以下技术措施。

5.1 以增加阀门段廊道阀门淹没水深为主,辅以其他较先进的技术措施

1) 三峡船闸输水系统主廊道与船闸的主体结构分开,在两侧山体中布置隧洞,方便地降低阀门段廊道高程,提高廊道输水的空化数。

2) 在阀门后,廊道采用顶部逐渐扩大,与底部突然扩大相结合的体型进一步提高水流的空化数。

3) 采用快速开启阀门,并采取在阀门的门楣和在阀门后底槛上进行通气,以及采用全包式阀门和不锈钢阀门面板等有效防止在廊道阀门发生气蚀的技术措施。

5.2 在闸室底板布置等惯性进、出水系统和采用有地降低超灌超泄的技术措施

1) 船闸输水系统在闸室内布置与闸室水体中心对称轴对称的 4 区段 8 条分支廊道等惯性分散出水孔,并在出水孔上设消能盖板^[2]。

2) 采用提前关闭输水阀门措施,控制了闸室的超灌、超泄,并在六闸首设置短廊道泄水,保证五闸室泄水后,水位能与下游引航道的水位齐平。

6 船闸金结机电设计

6.1 大型人字门及启闭设备

三峡船闸人字门的最大高度 38.5 m,最大单扇门重 850 t,最大淹没水深 36 m,最大启闭力 2 700 kN,人字门设计需考虑防撞荷载、岩体后期变形、闸门受水压力作用引起的变形和门格内淤沙荷载等因素。闸门既要求有足够的刚度,又要求能适应闸首的变形;巨大的门体自重,加大了人字门底枢润滑的难度;人字门启闭机由于扇形大齿轮节圆直径和模数超过了世界规模,无法采用已往常用的轮盘式启闭机,合理解决闸门的启闭设备,是保证船闸正常运行的重要条件。

1)大型人字门设计时,在主横梁中间截面、端部及边柱设计中采用了充分利用材料强度,降低应力幅值,提高结构抗疲劳能力的设计技术,并在设计中引进了低周高应力疲劳的概念。对支、枕垫块的接触形式,由过去通常采用的同弧半径或平面的面接触,改成大曲率半径对小曲率半径的线接触形式。底枢设计以自润滑材料代替被动润滑系统,提高了人字门的工作性能和运行的安全可靠。

2)采用大行程卧缸直连式无级变速液压启闭机。人字门采用无级变速运行方式,以降低动水阻力矩的峰值,使启闭机启门力得到充分利用。在液压油缸尾部,设置了弹性支承轮,以减小细长油缸的挠度。在设计中采用了大型卧式细长油缸变截面动态稳定性计算方法,保证了启闭机运行的安全、可靠^[3]。

6.2 电气设备设计

三峡船闸具有双向运行、换向运行、变级数运行、补水/不补水运行、控制闸室灌、泄水的超灌、超泄等多种运行工况,以及事故工况和突发意外事件应急处理等多种控制要求。为保证船闸设备的正常运行,对船闸的监控设备,要求具有高度的准确性和可靠性。

1)每线船闸设有集中和现地两套控制系统,由

计算机监控系统、通航信号及广播指挥系统、工业电视监控系统等组成。控制系统严格按照过闸工艺过程和全线闸、阀门间的闭锁保护条件,对现地控制站发布控制命令,完成船闸的运行过程。系统还能实时采集各现地控制站设备运行工况,做出相应处理,根据通航调度系统的需求,将各子站设备信息和船闸运行工况、故障检修和操作等信息报告给通航调度系统并相互进行信息交换。

2)在每个闸首两侧的现地控制站内,各设有 2 台互为备用的可编程控制器,控制装置具有保护上、下级闸、阀门相互闭锁的功能。现地站可实现对单侧的闸、阀门进行单控,也可接受集控命令参与连续的流程控制和向集控主机传送闸、阀门运行状态的信息。

7 结语

三峡双线五级船闸是世界上设计水头最高,船闸规模巨大、技术复杂。在船闸设计过程中,通过自主创新 and 借鉴国内外工程经验、采用先进技术,成功地解决了遇到的各种技术难题。三峡船闸的设计和建成,在促进长江航运高速发展的同时,在河道地形和水、沙条件复杂,设计水头较高和基础较好的岩石基础上船闸技术的许多方面取得了突破和创新,促进了船闸工程技术的发展。船闸自建成投入运行 9 年来,建筑物和设备工作正常,运行实践证明,船闸设计采用的技术先进、合理、可靠。

参考文献

- [1] 钮新强. 全衬砌船闸设计[M]. 武汉:长江出版社,2011.
- [2] 钮新强,宋维邦. 船闸与升船机设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [3] 宋维邦,钮新强,董士镛,等. 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.

(下转 122 页)