

Engineering Achievements

三峡工程

钮新强

Changjiang Institute of Survey, Planning, Design, and Research (CISPDR) Co., Ltd., Wuhan 430010, China

1. 工程简介

三峡工程是治理和开发长江的关键性骨干工程，其坝址位于长江干流西陵峡中段，地处湖北省宜昌市三斗坪镇，控制流域面积约 $1 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，多年平均流量为 $14\,300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，多年平均年径流量为 $4.51 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，水库正常蓄水位为 175 m ，相应库容为 $3.93 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。三峡工程由枢纽工程、输变电工程和移民工程组成，其中，枢纽工程包括拦河大坝、坝后式电站、地下电站、船闸、垂直升船机和茅坪溪防护坝等。枢纽工程全景如图1所示。



图1. 三峡枢纽工程全景。

三峡工程于1994年12月14日正式开工，1997年11月8日实现大江截流，2003年6月开始发挥发电、航运效益，2010年10月首次成功蓄水至 175 m 水位，2020年11月完成整体竣工验收，至2021年已连续12年顺利实现 175 m 蓄水目标。

三峡工程规模和综合效益巨大，工程技术复杂，其特点和设计难点主要有[1]：

(1) 泄洪流量巨大，最大洪水设计标准为万年一遇

加大10%，洪峰流量为 $124\,300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，下泄流量为 $102\,500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，并且要兼顾排漂、排沙和施工导流、截流要求；

(2) 电站规模巨大，总装机容量为 $22\,500 \text{ MW}$ ，安装32台单机容量为 700 MW 水轮发电机组，运用水位变幅达 40 m ；

(3) 通航规模大、要求高，船闸规划年单向货运量达 $5.0 \times 10^7 \text{ t}$ ，通过万吨级船队，且需适应坝址复杂的水、沙和河道地形条件，以及枢纽分期运行要求。

围绕上述技术难题，三峡工程在设计研究、施工和运行过程中提出并运用了新的理论和方法，取得了一系列重大技术成就。

2. 工程技术成就

2.1. 枢纽总布置

三峡工程在进行枢纽布置时，由于泄洪规模巨大，按常规泄洪孔口布置需较大的泄水前缘宽度，但因电站装机容量大，机组台数多，泄洪坝段的长度在满足消能防冲要求的前提下应尽可能短[2]，还需考虑施工导流和通航问题。

通过多种不同枢纽布置方案和建筑物型式的研究，最终在主河槽布置深孔结合表孔的泄洪坝段，充分利用河床两岸滩地布置坝后式厂房，从上下游引航道进出口通航水

流条件和泥沙淤积碍航考虑将通航建筑物布置在左岸，采用分期导流方式满足施工期通航要求，利用坝址河床中的中堡岛布置纵向围堰，并在其右侧天然汉河布置导流明渠，如图2所示，成功解决了枢纽泄流量大、电站装机台数多且容量大、通航建筑物通过能力要求高等一系列技术难题。

2.2. 高重力坝泄洪消能与抗滑稳定

2.2.1. 高水头超大流量泄洪孔口立体交错布置

三峡大坝泄洪建筑物创新采用三层大孔口的立体交错布置方案[3]，如图3所示，满足了超大泄洪流量及施工期导流要求，并提出深孔采用有压短管、跌坎掺气的型式，导流底孔采用有压长管、跨缝、设控制闸门的布置方案，成功解决了水头高、水位变幅大、复杂运行条件下泄洪孔口的空化空蚀、泥沙磨损和消能防冲技术难题。

三层泄洪孔立体交错布置方案在同一坝段布置表孔、深孔和导流底孔，坝体开孔率高（平面33%，立面32%，体积31%），孔口尺寸大、作用水头高（深孔设计水头为85 m）、运用频繁、运用水位变化大、结构型式复杂，导致孔口结构应力大、配筋多、施工困难等问题极为突出。在深入分析多层大孔口结构特性的基础上，在国内率先开展了钢筋混凝土非线性有限元裂缝分析和非线性配筋设计方法研究，摸清了孔口配筋与孔周裂缝发展的规律。依据孔口拉应力的形成机制，采取了“上游横缝止水后移、横缝灌浆”等综合措施，利用缝间外水压力平衡孔口内水压

力及增强大坝侧向刚度，使泄洪孔口应力和变形指标均在设计控制范围内，从而有效减少孔口钢筋数量，降低了施工难度，节省工程投资。

三峡大坝泄洪设施自2003年投入运用，至今已运行十多年，其中经受了2012年最大入库洪峰流量 $71\,200\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ （约相当于20年一遇洪水）的考验，泄洪建筑物运行调度正常。

2.2.2. 左岸1~5号厂房坝段深层抗滑稳定技术

三峡大坝左岸1~5号厂房坝段下游布置坝后式厂房，致使大坝基岩下游面临空，形成坡度约 54° 、临时坡高67.8 m、永久坡高39 m的高陡边坡（图4），近百米高的重力坝坐落在坡顶；而坝基内有多条倾向下游的长大缓倾角裂隙，其中3号坝段坝基潜在滑移面连通率高达82.9%，且抗剪强度低，对坝基深层抗滑稳定十分不利，重力坝深层抗滑稳定是三峡工程的重大技术问题之一。

通过系统、精细的地质勘探，查明了坝基长大缓倾角结构面的确切位置、产状、性状、展布范围与组合关系。研究提出了重力坝坝基深层抗滑稳定综合分析理论，即以沿经勘探查明的长大缓倾角结构面滑动为基本滑移模式，另外考虑两种极端滑移模式，综合采用刚体极限平衡等安全系数法、线性和非线性有限元分析及地质力学模型试验开展系统论证，以及确定性基本滑移模式抗滑稳定安全系数大于3.0、极端滑移模式抗滑稳定安全系数大于2.3~2.5的稳定控制标准。基于分析结果，采取了“坝踵设齿槽、

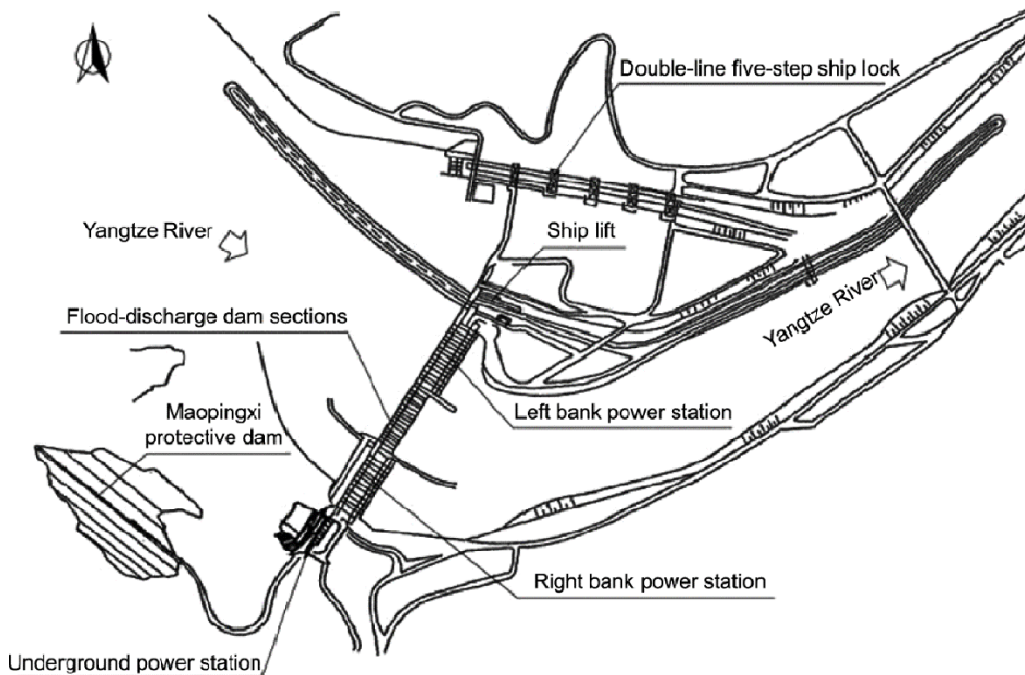


图2. 三峡工程枢纽布置。

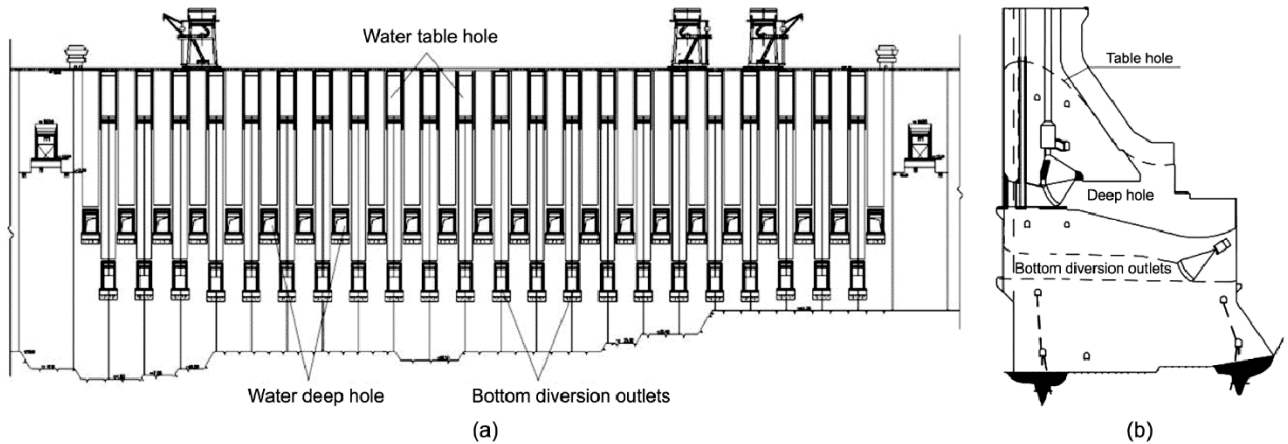


图3. 三峡大坝泄洪坝段三层孔口布置示意图。

帷幕前移、深层排水洞和厂坝联合作用、预应力锚索”等综合加固措施。

根据运行期监测成果，两种确定性基本滑移模式滑移面上实测扬压力仅为设计值的40%~56%，其深层抗滑稳定安全系数分别为3.37和4.20，均满足设计控制标准，表明采用的综合技术措施有效，大坝运行安全可靠。

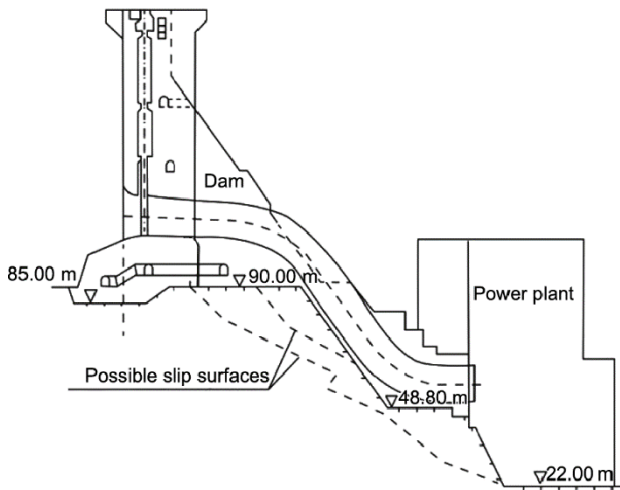


图4. 左岸1~5号厂房坝段深层抗滑稳定典型滑移面示意图。

2.3. 单薄山体浅埋大型地下电站

2.3.1. 大型地下电站主洞室“单洞型”布置技术

受枢纽布置和地形地质条件的限制，三峡工程地下电站布置于右岸白岩尖山体中。其单机最大引用流量为 $991.8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，额定水头为85 m，输水系统水流惯性时间较长， T_w 值为4.7~5.4 s，按照传统设计方法，需要设置大规模的下调压室（单室稳定面积约 1200 m^2 ）。白岩尖山体单薄、块体发育，高挖空率导致洞室群围岩稳定问题非常突出。为此，采用理论分析、数值仿真和模型试验等手段，对水轮机安装高程、尾水有压段长度及下游水位三者之间的关系进行深入研究，突破电站尾水洞传统的有压洞或无压洞设计理论，提出一种明满流混合交替的新型尾水洞——变顶高尾水洞，建立了相应设计理论和设计方法。如图5所示，采用变顶高尾水洞，取消了尾水调压室，简化了地下洞室群布置[4]。

同时，采用超长超高电流离相封闭母线新技术，实现主变压器向地面的转移，取消了主变洞。将大型地下电站主洞室布置由传统的“三洞型”（即主厂房、主变洞、尾水调压室）变为“单洞型”（仅主厂房），减少了洞室群

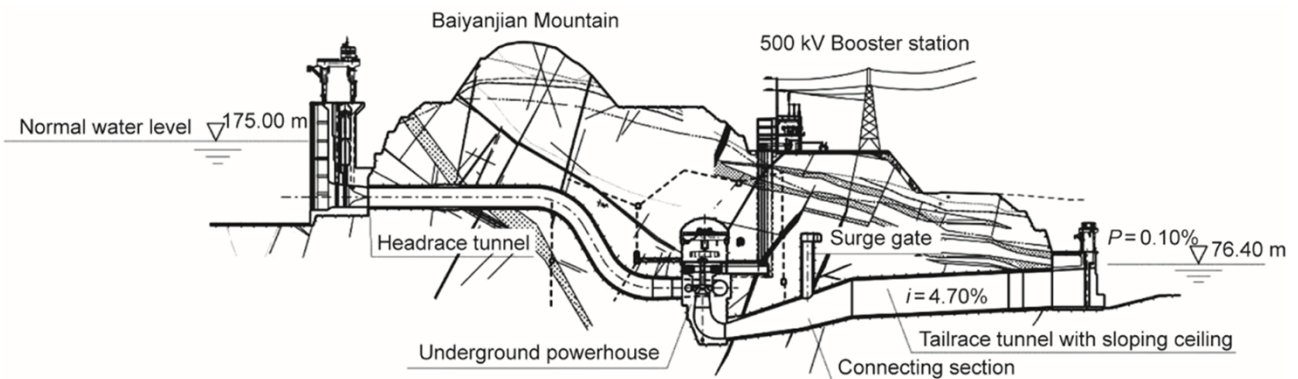


图5. 三峡地下厂房沿输水系统纵剖面图。

规模,降低了山体挖空率及对岩体的扰动,降低了工程技术风险,并节约了工程投资,解决了单薄山体大型地下电站洞室群整体稳定难题。

2.3.2. 浅埋大型地下厂房“稳定拱”设计理论

三峡地下电站主厂房洞身跨度为31 m,吊车梁以上跨度为32.6 m,厂房最大高度约87.3 m,洞室上覆岩体最薄处仅一倍厂房跨度,远小于规范规定应大于两倍的设计要求。对于浅埋大跨度高边墙地下洞室,围岩顶拱设计尚无成熟的理论和方法可循。在传统拱理论的基础上,对浅埋地下洞室岩体的拱效应及稳定性进行深入研究,揭示了地下洞室围岩顶拱承载的力学机制。研究表明,浅埋地下洞室的顶拱稳定,取决于顶拱岩体内能否形成稳定的拱形承载区,将其定义为“围岩稳定拱”。通过研究不同埋深对洞室围岩稳定拱的影响规律,根据洞室顶拱围岩中能否形成稳定的主压应力拱圈,建立了洞室顶拱最小上覆岩体厚度的判别准则。在此基础上,提出了根据“岩体稳定拱”来确定大型地下洞室最小埋置深度的设计方法[5]。

应用稳定拱理论和精细控制爆破施工实践,三峡右岸地下厂房围岩形成稳定拱的最小埋深约为2/3倍洞跨,顶拱围岩具备形成稳定拱的埋深条件和地应力等条件,突破了规范“主洞室上覆岩体厚度不宜小于两倍洞宽”的限制,建成了国内外同期开挖断面尺寸最大且埋深仅一倍跨度的大型浅埋式地下厂房。

2.4. 高水头大型双线五级船闸

三峡船闸主体建筑长1.6 km,布置在通过直立开挖岩

体和锚杆加固形成的双线岩槽中,边坡最大坡高170 m,坡底部直立闸槽深度达70 m;船闸总水头为113 m,级间水头为45.2 m。是目前世界上规模最大、总水头最高、连续级数最多、技术条件最复杂的内河船闸[6]。

基于三峡船闸地质条件,研究提出了“全衬砌船闸”新形式,将闸首、闸室墙及输水主廊道全部采用钢筋混凝土薄衬砌结构,如图6所示,通过拉剪型高强锚杆将衬砌体与岩体形成联合受力体,共同承受人字门、水压力和船舶等荷载,相对于传统的重力式结构,减少岩石开挖 $8.4 \times 10^6 \text{ m}^3$,节省混凝土 $6.0 \times 10^6 \text{ m}^3$,缩短工期9个月。

三峡船闸设计输水时间为12 min,一次输水水体达237 000 m^3 ,其综合水力指标居世界最高水平。如何在满足输水时间要求的前提下保障闸室停泊条件和输水廊道及阀门设备运行安全,是水力设计需要解决的关键技术问题。采用在闸室两侧对称布置输水主廊道,闸室底部采用4区段8分支廊道等惯性分散出水加盖板消能的型式,其优良的动力平衡特性保证了闸室输水的快速、平稳。为了防止阀门段廊道和阀门发生空蚀和声振,提出了“高空化数输水廊道+阀门快速开启+底扩廊道体型+门楣自然通气”的防空化综合技术[7-8]。

对各项监测资料进行分析表明,船闸边坡变形是稳定的,边坡地下水及墙背渗压、闸首及闸室墙变形、高强结构锚杆应力等均在设计允许范围内,输水系统总体性能较优。

2.5. 高水头大型垂直升船机

三峡升船机过船规模3000 t级,提升总重量为15 500 t,提升高度为113 m,是国内首座全平衡齿轮齿条爬升式垂

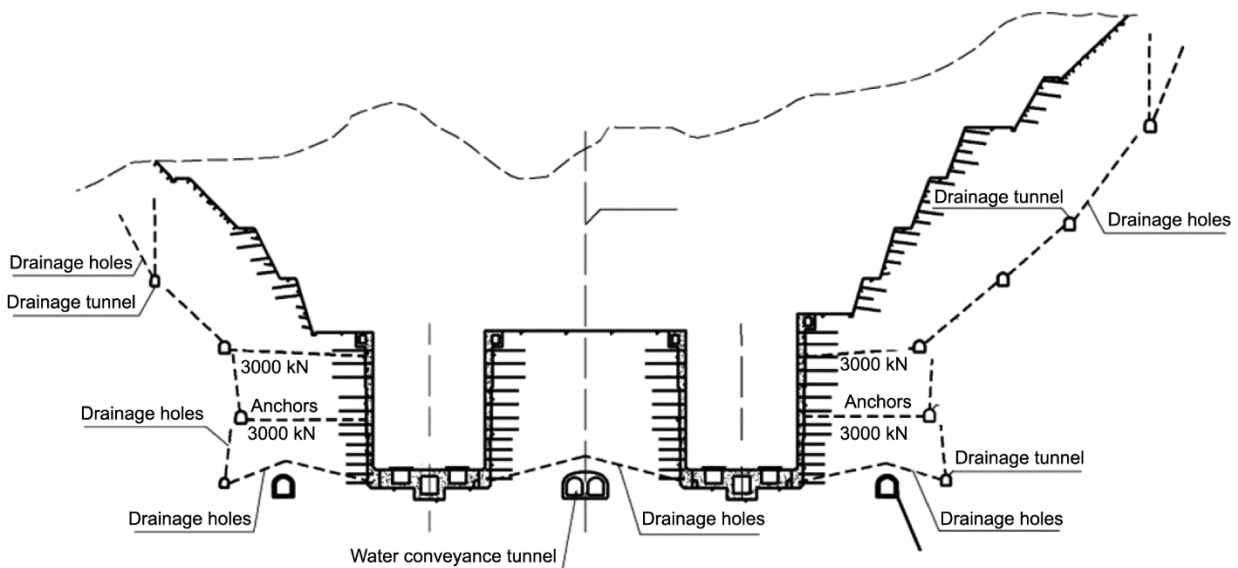


图6. 三峡全衬砌船闸闸室典型剖面。

直升船机。与国内外垂直升船机相比，三峡升船机不仅过船规模大，提升高度高，而且还具有上下游水位变幅大及下游水位变化速度快、需进行高烈度地震设防以及因服务客船安全标准高等特点，是全世界规模和技术难度最大的升船机。

为了适应复杂不利的自然条件，克服由重载、高扬程和极限工况等不利条件所产生的设计困难，满足高标准安全通航需求，三峡升船机设计采用了一系列的新技术：在承船厢室段，在保留全平衡齿轮齿条爬升式升船机基本构型特征的基础上，采用了集升降驱动、对接锁定和船厢失衡事故保护等功能的承船厢竖直支承系统；齿轮托架机构能适应塔柱承重结构与承船厢多自由度相对变位，保持驱动机构开式齿轮与齿条高精度啮合；驱动机构电气传动控制系统可精确保证承船厢升降运行过程水平状态，且具有电气同步功能；承船厢水平支承及导向系统可最大限度降低承船厢结构及设备水平地震载荷，且具有弹性缓冲和阻尼吸震功能。

在上下游引航道段及闸首段，针对三峡枢纽大流量泄洪、大负荷调峰、大水位变幅运行条件，提出了“汛期隔流，枯期漫顶”的上游新型隔流堤，适应上游大水位变幅的“卧倒门过船，平板门对接，叠梁门调位”的特大新型组合门，以及适应下游快水位变率的“带压调位，充气止水，分级锁定”的特大新型双扉平板门，为船舶安全进出升船机提供了安全保证[9]。

截至2021年年底，三峡升船机已连续稳定运行6年，通过各类船舶超过1.8万余艘，载运旅客49万人次，过机货运量760万余吨，为提升三峡水利枢纽通航质量发挥了积极作用。

2.6. 大流量、高落差、深水截流

三峡工程大江截流的最大水深达60 m，截流设计流量为 $14\ 000\sim 19\ 400\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，截流综合难度为世界之最[10]。针对大江截流施工中超高水深、大流量截流、堤头容易坍塌等技术难题，综合分析施工过程中深水抛投稳定、航运和施工强度等问题，通过模型试验及多种方案研究，创新采用深水平抛垫底、单戗堤立堵截流新技术，创造了昼夜连续填筑 $194\ 000\ \text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 的截流施工世界纪录，并确保了截流施工期间长江航运安全畅通[11]。三峡工程大江截流情景如图7所示。

三峡工程明渠截流，实际截流流量为 $12\ 200\sim 8600\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，截流设计总落差为5.57 m，在国内首次成功地实施了双戗配合立堵截流技术。



图7. 三峡工程大江截流照片。

2.7. 高坝大体积混凝土高强度施工及温控

三峡大坝孔洞多、结构复杂，坝块尺寸大，混凝土温度控制要求严，温控防裂难度大。大坝混凝土体积达 $1.6\times 10^7\ \text{m}^3$ ，工程量大，工期紧，施工强度高，高峰期持续时间长，传统方案难以满足施工强度要求。通过采用以塔带机连续浇筑为主，门塔机、缆索起重机浇筑为辅，仓面“五小机”（平仓机、振捣机、高压水冲毛机、仓面吊及喷雾机）配套作业，计算机全过程监控的混凝土施工新技术，创造了年浇筑混凝土 $5.48\times 10^6\ \text{m}^3$ 的世界纪录，实现了混凝土大坝安全、优质、高效施工。

同时，自主研发并系统创新整套大体积混凝土温控防裂技术，首创二次风冷骨料生产 $7\ ^\circ\text{C}$ 预冷混凝土，采用个性化通水冷却、新型保温材料等温控防裂技术，温控防裂效果显著，使我国水工混凝土温控防裂技术处于世界领先水平[12]。

2.8. 水库综合利用调度

2.8.1. 多区域协同防洪调度

三峡工程初步设计中，为防御上游大洪水，研究确定了对荆江河段的防洪补偿调度方式。为提高三峡水库的防洪效益、减少中下游城陵矶河段的超额洪量、减轻遭遇中小洪水时的防汛压力，创新提出了以单一水库对多防洪对象的耦合调度、中小洪水减压调度为代表的多区域协同防洪调度技术，能够在保证枢纽大坝安全和不降低荆江防洪标准的前提下，兼顾对城陵矶防洪补偿调度的水位按158.00 m控制，减轻中游防汛压力的运行控制水位按150.00 m控制。采用多区域协同技术进行防洪调度不仅减少了中下游河段的超额洪量，还可减少防汛巡堤次数，充分发挥了三峡水库的防洪效益[13]。

随着长江上游水库逐步投运，研究提出了具有“时空-量-序-效”多维度属性的以三峡为核心的长江上游水库群多区域协同防洪调度模型，优化了长江上游水库群防洪库容动用时机、次序、大小，有效应对了2020年长江流

域大洪水，拦蓄洪水 $2.54 \times 10^7 \text{ m}^3$ ，避免了荆江河段、城陵矶附近、湖口附近蓄滞洪区的运用，发挥了巨大的防洪减灾效益。

2.8.2. 促进四大家鱼繁殖的生态调度

考虑四大家鱼繁殖的水文、水温和水力条件，辨识四大家鱼自然繁殖的生态调度需求，提取了持续涨水时间、初始水位、水位日上涨率等影响鱼类自然繁殖的关键要素，提出了满足长江中游四大家鱼自然繁殖的调度指标和“人造洪峰”的蓄泄调度方式，支撑了生态调度试验的开展。

根据沙市断面的监测数据分析，10多年来，四大家鱼鱼卵年径流量呈现波动上升，其中，2019年达到6.68亿粒，2020年达到20.22亿粒，生态调度的涨水过程对促进四大家鱼繁殖具有明显效果。

3. 结论与展望

(1) 三峡工程蓄水运用以来，枢纽工程各建筑物运行正常，各部位金属结构设备运行情况良好。电站机组及机电设备运行正常，电站多次实现22 500 MW满负荷连续发电。双线五级船闸、升船机持续保持安全、高效、稳定运行。

(2) 三峡工程在设计和建设中面向工程建设重大问题，始终走科技创新之路，坚持原始创新与协同创新，取得了世界领先的科技创新成果。三峡工程的成功实践，极大地提高了我国水利水电建设的整体技术水平，在三峡工程中研发的大量创新技术，已在世界上后续水利水电项目中广泛推广应用。

(3) 我国水资源利用和经济社会发展对三峡工程运行管理提出了新的更高要求，需加强以三峡水库为骨干的长江控制性水库群联合调度研究，深度融合现代信息技术，构建以三峡为核心的水库群综合调度决策支持系统，进一步提高对洪水的调控能力，保障流域防洪安全；坚持生态优先，优化长江经济带能源结构，实现绿色循环低碳发展；加强水资源优化配置，高效利用水资源，保障供水安全。

References

- [1] Zheng S, Niu X. The research and practice of key technological issues in structure design of Three Gorges Project. Eng Sci 2011;13(7):20-7. Chinese.
- [2] Niu X, Wang X, Chen H. Design on the general layout of Three Gorges Project. J Hydroelectr Eng 2009;28(6):13-8. Chinese.
- [3] Niu X. Technology practice summary of the Three Gorges High Gravity Dam. Adv Water Sci 2013;24(3):442-8. Chinese.
- [4] Xie H, Zhou S, Hu J. Design and research on some technological issues for structures of TGP hydropower station. Yangtze River 2010;41(4):81-3. Chinese.
- [5] Niu X, Ding X. Bearing mechanism of top arch and stable arch design method for surrounding rock of underground caverns. Chin J Rock Mech Eng 2013; 32(4): 775-86. Chinese.
- [6] Zheng S, Niu X, Song W, Tong D. Impacts of the Three George's Project ship lock on the innovation and development of the water science in the world. China Water Resour 2004;22:25-7. Chinese.
- [7] Proceedings of Three Gorges Project design. Beijing: China Waterpower Press; 2003. Chinese.
- [8] Niu X. Key technologies of the hydraulic structures of the Three Gorges Project. Eng Sci 2016;2(3):340-9. Chinese.
- [9] Niu X, Qin L, Yu Q. The design of gear-rack climbing type ship-lift of Three Gorges Project. Eng Sci 2011;7:96-103. Chinese.
- [10] Weng Y, Xie X, Fan W. The construction design and practice of Three Gorges Project. Eng Sci 2011;13(7):6. Chinese.
- [11] Zheng S. Key technical issues in Stage III cofferdam and river closure design of TGP. Yangtze River 2002;33(1):4. Chinese.
- [12] Zheng S. Progress in key technologies of dam design and construction of Three Gorges Project (II). Miner Explor 2004;7(2):22-6. Chinese.
- [13] Zhang S, Zhou M. Operation and regulation of Three Gorges Reservoir. Eng Sci 2011;7:61-5. Chinese.