



首页 >> 专题报道 >> 2012学术年会 >> 特邀报告

曹应超：黄河小浪底工程关键技术研究与实践

发布时间：2012-11-06



水利部小浪底水利枢纽管理中心

小浪底工程是国家“八五”重点建设项目，是黄河治理开发的关键控制性工程，其开发任务“以防洪（包括防凌）、减淤为主，兼顾供水、灌溉、发电，蓄清排浑，除害兴利，综合利用”。

工程位于三门峡水利枢纽下游130km、河南省洛阳市以北40km的黄河干流上，下距郑州花园口128km，距入海口近900km。控制黄河流域面积69.4万km²，占流域面积的92.3%，控制黄河径流量的91.2%、输沙量的100%，是黄河干流三门峡水利枢纽以下唯一能够取得较大库容的控制性工程，既可较好地控制黄河洪水，又可利用其淤沙库容拦截泥沙，实施调水调沙运用，减缓下游河床的淤积抬高，对黄河治理以及促进黄河下游两岸经济社会可持续发展具有不可替代的战略意义。

小浪底工程主要由主坝、泄洪排沙系统、引水发电系统组成。主坝为壤土斜心墙堆石坝，采用了以垂直防渗为主、水平防渗为辅的防渗体系，最大坝高160m，坝顶长1667m，坝体方量5185万m³，水库正常高水位EL. 275m，库容126.5亿m³，其中淤沙库容75.5亿m³，可拦沙约102亿t，长期有效库容51亿m³，设计多年平均年径流量277.2亿m³，设计多年平均输沙量12.75亿t。泄洪排沙系统由9条泄洪洞、1条溢洪道、10座进水塔、3个消力塘组成；引水发电系统安装有6台30万kW水轮发电机组，总装机容量180万kW，设计多年平均发电量51亿kW·h。

1991年4月七届全国人大四次会议批准小浪底工程在“八五”期间动工兴建，1999年10月25日下闸蓄水，2009年4月通过国家发展改革委、水利部共同主持的竣工验收。工程概算总投资352.34亿元人民币，其中内资260.07亿元人民币，外资11.09亿美元。小浪底工程是我国第一个建设管理模式全方位与国际接轨的大型水利工程，工程建设全面实行项目法人责任制、招标投标制、建设监理制和合同管理制，主体土建工程实行国际招标，来自全世界51个国家和地区的上万名建设者参加了工程建

图片集锦



>> 更多图片

历届回顾

- 中国水利学会2011年学术年会
- 中国水利学会2010年学术年会
- 中国水利学会2008年学术年会
- 中国水利学会2007年学术年会
- 中国水利学会2006年学术年会
- 中国水利学会2005年学术年会
- 中国水利学会2003年学术年会
- 中国水利学会2002年学术年会

设。工程移民搬迁安置涉及河南、山西两省8县（市）33个乡镇20多万人，实行大农业安置为主的方式，实现了移民搬得出、稳得住、能致富的目标，被世界银行誉为与发展中国家合作的典范。

小浪底工程投运以来，始终秉承民生工程理念，积极践行可持续发展治水思路，坚持水资源统一调度、公益性效益优先、电调服从水调的原则，不断加强工程运行管理，发挥了巨大的社会效益、生态效益和经济效益。

防洪作用突出。从先秦时期到民国年间的2540年中，黄河共决溢1590次，改道26次，平均三年两决口，百年一改道。小浪底工程投入运行以来，将确保防汛安全、充分发挥枢纽防洪效益作为首要工作目标。每年提供约90亿 m^3 的防洪库容，通过采取蓄洪、削峰和错峰等运用，有效缓解了黄河下游洪水威胁，将黄河下游防洪标准从不足60年一遇提高到1000年一遇，即遇1000年一遇洪水，可使花园口洪峰流量降为22600 m^3/s ，保证了黄河下游连续13年安全度过伏汛期。

黄河凌汛灾害是黄河下游严重的自然灾害之一，历史上曾以频繁决口、难以防治而著名，自古就有“凌汛决口，河官无罪”的说法。由于黄河下游河道上宽下窄，弯曲连绵，容易形成冰塞、冰坝，在小浪底工程投入运行前，每年国家要采用飞机、大炮、炸药等措施炸毁冰坝，防止黄河堤决口。小浪底工程投入运行后，小浪底水库可提供20亿 m^3 的防凌库容，通过精确调控下游河道流量，保证了在凌汛期黄河下游平稳封、开河，数千年宣称不治的黄河下游凌汛威胁基本解除，同时也为黄河下游滩地近190万群众和340万亩耕地提供了有效的防洪保障。

减淤效果明显。黄河年平均输沙量16亿t，约1/4淤积在下游河床，致使河床平均每年抬升约10cm。河床升而大堤长，形成了罕见的地上悬河。目前，河床滩面一般高出地面3m—5m，比新乡市地面高出20m，比开封市地面高出13m。

小浪底水库从1999年下闸蓄水以来，一直采用“拦粗排细、调水调沙”的运用方式，从2002年至今共进行14次调水调沙运用，水库排出淤积泥沙约4.94亿t，冲刷下游河道泥沙约3.9亿t，共约8.23亿t泥沙冲入大海，入海口平均每年造地2万多亩，下游河道由建库前的淤积抬高转变为冲刷下切，主河槽平均下降2.03m左右，有效减缓了下游河道淤积，二级悬河形势得到缓解，黄河下游主河槽最大过洪能力从不足1800 m^3/s 增大到4100 m^3/s 。

供水保障有力。小浪底水利枢纽投运以来，共下泄水量2708亿 m^3 ，通过水库调节补水859亿 m^3 ，平均每年增加调节供水量66亿 m^3 ，已先后为6次引黄济津、10次引黄济青、4次引黄济淀提供了稳定水源。通过小浪底水库的调节补水，实现了黄河的跨流域调水，不仅提高了下游约5400万亩引黄灌区的灌溉保证率，缓解了下游沿黄地区生产和生活用水紧张局面，而且提高了北京、天津等大中型城市和河北等区域的用水保障率。

2000年至2002年，小浪底电站连续3年将小浪底水库降低到最低发电水位以下，阶段性停止发电，实施供水，保证了下游用水需求和生态流量。2008年10月至2009年2月，黄河中下游地区发生特大干旱，先后13次调整小浪底水库下泄流量，共下泄水量31.63亿 m^3 ，补水9.87亿 m^3 ，有效缓解了河南、山东两省沿黄地区的旱情，有力支援了抗旱保丰收工作。2011年春季，黄河流域部分区域接连提升干旱预警，小浪底水库连续3次加大下泄流量，由300 m^3/s 加大到900 m^3/s ，下泄水量13.64亿 m^3 ，补水4.38亿 m^3 ，有力支援了下游抗旱工作。2012年1月至3月，黄河中下游累计降水量较近5年平均量偏少50%，旱情严重，小浪底水库加大下泄流量，河南、山东两省引黄水量由前期不足150 m^3/s 增加至800 m^3/s 左右，保证了下游春灌需求。

生态效益突出。据统计，1980—1990年黄河累计断流191d。进入90年代，由于黄河连续的枯水年，断流现象愈演愈烈。1997年最为严重，黄河下游断流26次，累计226d，断流河段长达702km。小浪底工程投运以来，实现了黄河连续12年不断流，并在黄河中下游形成了大片湿地，改善了小浪底库区和下游地区的生态环境。

水电优势显著。小浪底电站实行“电调服从水调”的原则，在河南省电网中承担着重要的调峰调频功能，截至目前累计发电617亿 $kW \cdot h$ ，相应节约标准煤2263万t、减少碳排放量7351万t，发挥了清洁能源、可再生能源的优势，同时有效提高了电网的安全性能和供电质量，缓解了河南电网供电紧张局面，促进了地方经济发展。

小浪底工程建设规模宏大，地质条件复杂，水沙条件特殊，移民任务繁重，运用要求严格，被中外水利专家称为世界上最具挑战性的水利工程之一。黄河水少沙多，水沙关系不协调，导致小浪底工程泥沙条件十分独特和复杂；厚达70余米的河床深厚覆盖层、单薄的左岸山体和顺水流向发育的断裂构造、软弱泥化夹层等工程地质条件十分复杂；水库多目标开发任务、进水口防泥沙淤堵和保持长期有效库容等要求，使得水库调度运用十分严格。

小浪底工程建设者围绕工程规划、设计和施工等关键技术难题，进行了400多项科学试验研究，在综合利用水利工程泥沙设计理论、多泥沙河流水工建筑物布置和设计、高土石坝设计和施工技术、高速含沙水流消能和抗磨蚀技术、高含沙条件下电站汛期发电技术、复杂地质条件下密集洞室群设计和施工技术等均取得了创新和突破。通过多年运行实践，小浪底工程针对复杂的多泥沙河流建设高坝大库所提出的规划和枢纽布置新理念，以及采用的多项新技术，经历了持续高水位运行的考验，各项运行指标全部达到初步设计要求，水库泥沙淤积、发电量等指标优于初步设计。重大技术创新主要有：

一、创新性地提出了“合理拦排、综合兴利”的规划理念

在总结三门峡水库工程规划、建筑物布置、以及运行经验教训的基础上，按照小浪底工程开发目标的要求，研究提出了“合理拦排，综合兴利”的规划理念：提出了具有小浪底工程特点（正常死水位EL. 230m/非常死水位EL. 220m）的水库特征水位指标；对126.5亿m³的总库容进行了科学的规划，其中75.5亿m³为拦沙库容，40.5亿m³为防洪库容，另有10.5亿m³的调水调沙库容，防洪和调水调沙库容为长期有效库容；研究建立了水库水沙调控指标体系，优化了可最大限度发挥水库减淤效益并长期保持有效库容的水库调度方法，形成了一套适应高含沙水流、且可较为精确描述水沙运动规律的计算公式，提出了水电站过机泥沙与组成的计算方法和防沙措施等。各项成果不仅为水库建设与运行奠定了坚实的基础，而且大幅度提升了基础研究水平，促进了行业科技进步。

二、科学性地采用隧洞泄洪为主、进水口集中布置的枢纽布置方案

小浪底工程在独特的水文泥沙条件和复杂的工程地质条件下，枢纽建筑物的选型和总体布置，不仅要满足非常死水位EL. 220m宣泄7000m³/s、总泄流能力不低于17000m³/s的泄洪排沙运用要求，还必须解决进水口防泥沙淤堵、排漂、高速含沙水流对水工流道的磨蚀、水轮机的抗磨和汛期发电、大坝防渗、左岸单薄山体自身稳定及规模宏大的洞室群稳定等一系列的技术难题，满足枢纽工程能灵活调控水沙的运用要求，全面实现工程开发目标。在大量科学试验的配合下，前后研究比较了近20个布置方案，形成了极具黄河多泥沙特点的“隧洞泄洪为主、进口集中布置”的枢纽建筑物布置方案，成为在多泥沙河流上建造高坝大库的典型工程案例。该方案融汇了众多的技术创新：

1. 世界坝工史上最密集的洞室，在约1km²的左岸山体内密集布置了108个洞室。
2. 世界坝工史上最大最复杂的进水塔群，9条泄洪洞、6条发电洞和1条灌溉洞的进水口集中布置在一字排开的10座进水塔内。
3. 世界最大、最集中消力塘。9条泄洪洞和1条正常溢洪道集中在3个水垫塘内消能。
4. 国内首次在高水头、大直径有压隧洞中采用双圈缠绕无黏结后张预应力混凝土衬砌技术，成功解决了高压水外渗影响左岸单薄山体稳定的技术难题。
5. 成功建造了国内缓倾角砂页岩不良地质条件下最大的地下厂房。

隧洞泄洪为主、进水口集中分层布置的枢纽布置方案既充分适应了复杂的地形地质条件，又成功解决了进水口防泥沙淤堵、发电引水口门前清以及防洪、水沙调控等异常复杂的运行要求。工程运行方便灵活，大大节省了投资。

三、合理性地采用天然淤积铺盖作为大坝辅助防渗体系

小浪底工程大坝坐落在70余米深厚覆盖层上，坝前最终淤积高程将达254m。经多方案比较后，采用带内铺盖的斜心墙堆石坝，内铺盖和拦洪主围堰的粘土防渗斜墙相连，形成辅助防渗系统。初期运用以垂直防渗为主，后期随着水库淤积的发展，坝基的渗透稳定性增加，渗漏量随之减少，从而在大坝防渗措施上进行了简化，采取一道混凝土防渗墙和基岩单排灌浆幕，深覆盖层下157m的主河床不设帷幕灌浆。实际运行情况表明，目前坝前淤积高程基本维持在180m左右，防渗墙上游侧的水头削减了40多米，坝基和右岸渗漏量逐渐减少。采用以垂直防渗为主、内铺盖和天然淤积铺盖防渗为辅的大坝渗控体系，不仅提高了大坝防渗安全性，而且促进了多沙河流坝基防渗技术的发展。

四、经济性地采用多级孔板消能技术成功改建泄洪洞

为了解决左岸山体有限的空间和深埋洞群布置之间的矛盾，3条直径14.5m的导流洞能否重复利用成为枢纽建筑物总布置要解决的核心难题。在大量科学试验研究的基础上，首次在世界坝工史上采用多级孔板洞内消能技术，将3条直径为14.5m的导流洞改建为总泄流能力达4825m³/s的为永久泄洪洞，从而使枢纽建筑物总布置走出了困境，不仅解决了枢纽总布置难题，节约投资3.8亿元，而且为大型导流洞重复利用提供了一条崭新的技术思路和案例。

五、针对性地解决了汛期发电问题

为确保小浪底工程汛期能正常发电，发挥最大的综合效益，首先在发电引水口下15m~20m布设排沙洞以减少过机沙量，提出了新型抗磨水轮机设计制造方案，采用107.1r/m低比转速（比建在清水河上的同样设计参数的水轮机转数低两个级别），加大了导叶分布圆直径和高度，适当降低了机组安装高程，降低导叶和水轮机的相对流速，提高抗空蚀能力；转轮、上下抗磨板、导叶等均使用抗空蚀性能良好的不锈钢锻造，转轮叶片采用钢板模压成型、数控机床加工、工地组装整件出厂的制造工艺，大大提高了转轮叶片与模型的相似性，在安装中采用座环现场加工工艺，设置了筒形阀以避免缝隙射流产生的磨蚀；在叶片上采用高压速氧喷涂碳化钨（钴）和在导叶表面涂聚胺酯抗磨材料；设计建造了地下水技术供水系统和方便检修的环形检修廊道。以上综合措施成功解决了电站汛期发电问题。小浪底工程水轮机10多年运行表明，抗磨措施十分有效，机组运行状况良好。

六、突破性地解决了金属结构技术难题

小浪底工程金属结构集中布置在进水塔群、孔板洞中闸室、排沙洞出口闸室、溢洪道、地下厂房尾水闸室和电站尾水出口等部位。有各种闸门62扇，卷扬启闭机20台，液压启闭机27套（45台油缸），拦污栅25扇，清污机4台，门机2台，台车式启闭机1台，总重量32000t。其中，运用水头140m的1号孔板洞偏心铰深孔弧形工作门，总水压力75700kN的1号明流洞泄洪弧门，可局部开启运用的设计水头122m的排沙洞偏心铰弧门，突破4000kN轮压的定轮闸门，提升力5000kN、提升高度90m的固定卷扬启闭机，1号孔板洞出口浮箱式检修门，闸门集中监控系统等，以及多泥沙河流闸门埋件的抗磨蚀技术等均属国内规模最大、同类产品技术领先水平。

七、创造性地采用了多项国际领先的施工技术

小浪底工程建设过程中，加强科技攻关、重视科学试验、推进科技创新，成功地解决了工程建设中一系列高难度技术课题，多项技术创新达到国际、国内领先水平，主要有：采用机械化联合流水作业建造了国内第一高壤土斜心墙堆石坝，采用横向接头孔填充塑性混凝土保护下的平板接头形式、建造了国内当时最深、强度最高的混凝土防渗墙，在国内首次采用双圈缠绕后张无粘结预应力混凝土隧洞衬砌技术，在砂页岩地层中设计建造了国内最大的地下厂房，建造了世界坝工史上绝无仅有的进水塔群和大型综合消能水垫塘，首次在国内大规模地采用了双层保护预应力锚索和钢纤维喷混凝土技术、成功地处理了地质条件极为复杂的进出口高边坡岩石开挖，70MPa高强硅粉混凝土等新材料的研究及应用，首次在国内成功地采用了GIN帷幕灌浆技术等。

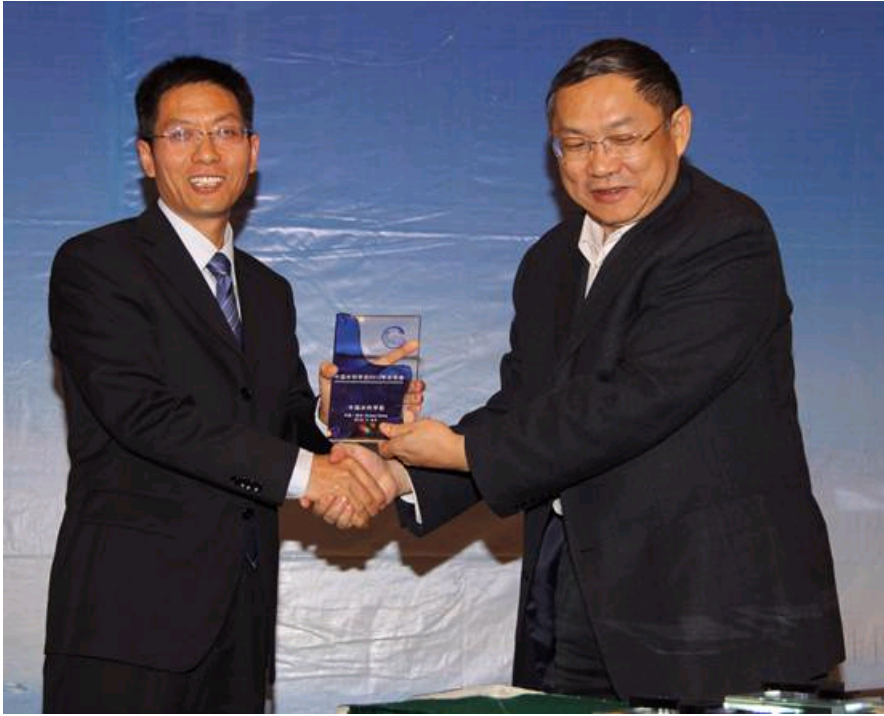
八、系统性地创新了工程建设管理模式

引进先进技术和方式与小浪底工程建设实际相结合，创造了与国际接轨并具有中国特色的建设管理模式，形成了完善、高效、权威的工程建设技术保障体系。圆满完成近20万移民搬迁安置任务，成为我国大型水利水电工程集中高强度移民安置工作的典范。创造性的提出了水利水电工程施工期环境监理的理论、方法、管理模式和运作机制，有效地控制了工程投资，较概算节余38亿元，取得了质量优良、工期提前、投资节约的巨大成绩。

小浪底工程建设推动了我国水利水电工程技术的发展和进步，诸多创新成果为小浪底工程的成功建设和安全运用提供了技术支撑，具有广泛的推广应有前景，部分纳入碾压土石坝设计规范、边坡设计规范、泥沙设计手册等行业技术标准，并广泛应用于之后的水利水电工程建设与管理，为高心墙堆石坝设计和建设提供了技术参考。

小浪底工程的成功建设，开创了世界多泥沙河流上建设高坝大库的成功先例，创造了与国际接轨并具有中国特色的建设管理模式，树立了大型水利水电工程集中高强度移民安置工作的典型，工程建设水平步入了世界先进行列，为我国大型水利水电工程积累了现代建设管理与国际合作经验，成为世界了解中国水利水电建设与发展的重要窗口。先后荣获国际堆石坝里程碑工程奖、新中国成立60周年“百项经典暨精品工程”称号、中国土木工程詹天佑奖、中国水利工程优质（大禹）奖、中国建设工程鲁班奖（国家优质工程）、“百年百项杰出土木工程”等奖项，并获得多项勘察、设计及工程运行等奖励。

黄河小浪底工程关键技术研究与实践荣获2012年度大禹水利科学技术特等奖，这是对小浪底工程科技创新成果和广大科技人员工作成绩的肯定。借此机会，向各位领导和专家一直以来的关心和厚爱表示衷心的感谢。我们将以此为契机，紧密结合当前水利事业改革发展实际，加强大型水利枢纽现代化管理，加快小浪底工程关键技术推广应用和科技创新，为水利事业跨越式发展作出新的贡献。



颁发特邀报告纪念牌