

200m 级高碾压混凝土坝全面智能温控关键技术研究及应用

完成单位：华能澜沧江水电股份有限公司
中国水利水电科学研究院
中国电建集团昆明勘测设计研究院
中国水利水电第四工程局有限公司
有限公司

主要完成人：郑爱武 张国新 周华 张磊 肖海斌 刘毅 向弘 陈江
龚永生 王红军 郭建文 朱振决 李仕奇 庞博慧 辛建达

高碾压混凝土坝的防裂是一项重要且更为艰巨的任务。项目针对 200m 级高碾压混凝土坝全过程智能温控的关键技术难题，在大体积混凝土智能化温控理论方法、分析模型、硬件设备、软件系统等方面开展全面研究，形成了完整的大体积混凝土防裂智能温控关键技术和成套系统，本项目使得智能温控理论方法和技术在黄登工程中得到全面成功应用，取得的科技创新成果如下：

1. 提出了高碾压混凝土坝施工防裂全过程智能温控方法和模型

建立了全坝全过程智能温控要素的采集方法和评价预警模型，首次实现了碾压混凝土坝全坝温控要素的自动化采集、管理、分析、评价和预警预报。首次提出并建立了混凝土温升、温降等多阶段智能通水冷却方案预测模型（包含流量、水温、通水方向），实现全坝全过程温控施工智能化通水冷却控制。



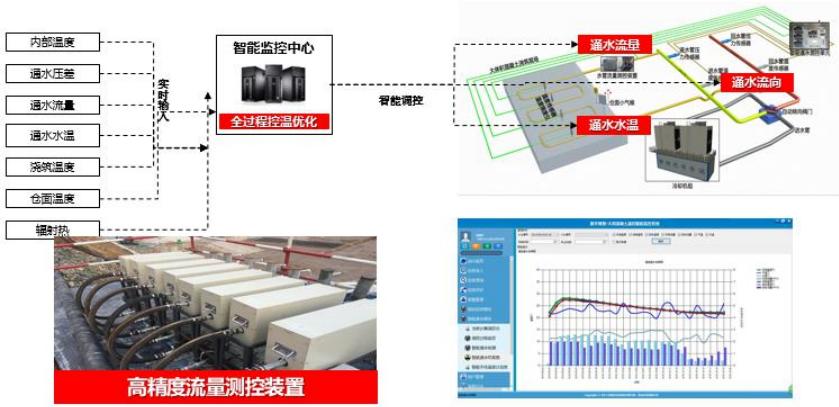
2. 研发并全面应用了智能化采集和调控设备

基于高精度的红外和接触式数字测温技术，首次研发并应用了采用 APP 移动应用和无线传输技术的手持式混凝土温度实时采集设备，实现混凝土出机口温度、入仓温度、浇筑温度等温控要素的半自动化采集。首次研发并应用了带智能逼近程序的测控单元，实现全坝海量通水要素（水温、水压、流量、阀门开度）的实时、准确、全面的采集以及快速、

精确调控。

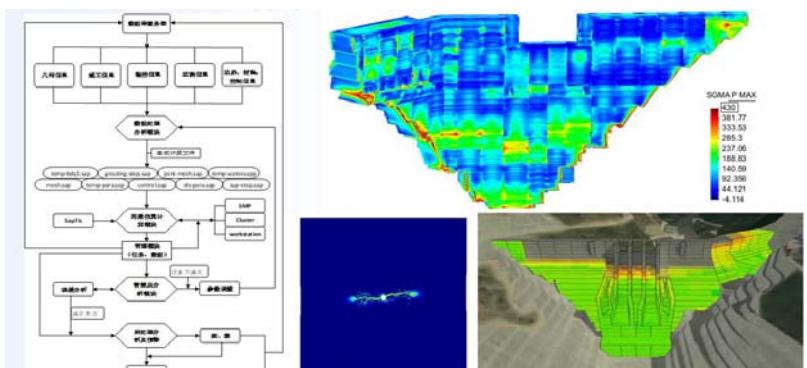
3. 研发集成并全面应用了全坝全过程智能温控系统

首次研发并集成了一整套拥有自主知识产权的全坝全过程混凝土温控智能监控软硬件系统：包含信息自动采集、实时传输、实时评价、温控方案仿真反馈预测、智能通水控制、温控信息实时预警、信息智能发布与干预等模块。实现了混凝土拌制入仓、仓面环境控制、通水冷却、表面保护全过程智能监控，全面提升了黄登和大华桥工程的温控施工质量和管理水平。



4. 提出了温控跟踪反演仿真分析新方法

开发了一套温控跟踪反演仿真分析新方法及相应的软件接口，实现实时跟踪反馈仿真分析。通过监测资料的反馈研究，掌握了高碾压混凝土重力坝的温度场、应力场的分布规律，揭示了200m级高碾压混凝土重力坝施工期真实工作性态。



本项目研究成果已成功应用于黄登、大华桥等大型水利水电工程，获发明专利4项实用新型专利5项及4项软件著作权，在理论和方法上具有创新性，在关键技术上有重大突破，经济和社会效益显著，具有广阔的应用前景。

大型压力钢管自动化生产及洞内机械化组焊安装技术

完成单位： 中国水利水电第七工程局有限公司 四川川安国购机器人科技有限公司

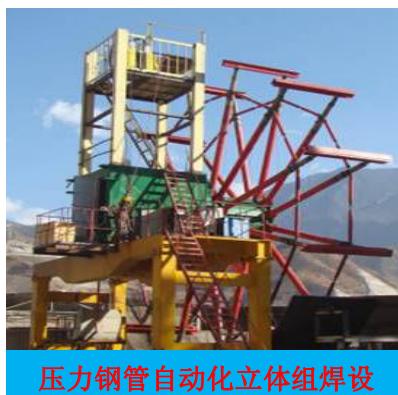
主要完成人： 张桥 曾洪富 刘建军 粟皓维 肖丹亚 李建兵 龙绍飞

谢守斌 李传法 曹锋 等

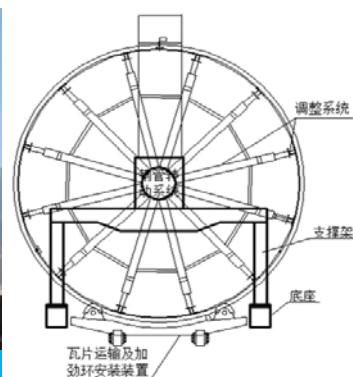
压力钢管传统制作工艺为平放地面立式人工组焊，其制作方式一般分为洞外、洞内两种，受制作场地、运输道路、施工支洞开挖尺寸等因素的限制，传统制造工艺不能顺利实施，针对上述情况，依托梨园、黄金坪水电站压力钢管制作与安装工程，通过研究压力钢管机械化组焊机及相应的配套设施，将传统的平放地面立式人工组焊工艺转变为卧式立体机械化制作及安装工艺，实现了压力钢管制作及安装全流程的机械化及自动化操作，解决了上述工程实际难题，主要进展如下：

1. 研发了一种大型压力钢管自动化立体组焊设备

研发了一种集瓦片组圆、数控调圆、纵缝焊接、加劲环对装及焊接五项工艺操作为一体的大型压力钢管自动化立体组焊设备，将传统的压力钢管管节平面立式组焊工艺更改为立体卧式组焊工艺，并完成了压力钢管管节立体组装的全部生产过程，使钢管的制作周期、资源投入和场地占用大幅减少。

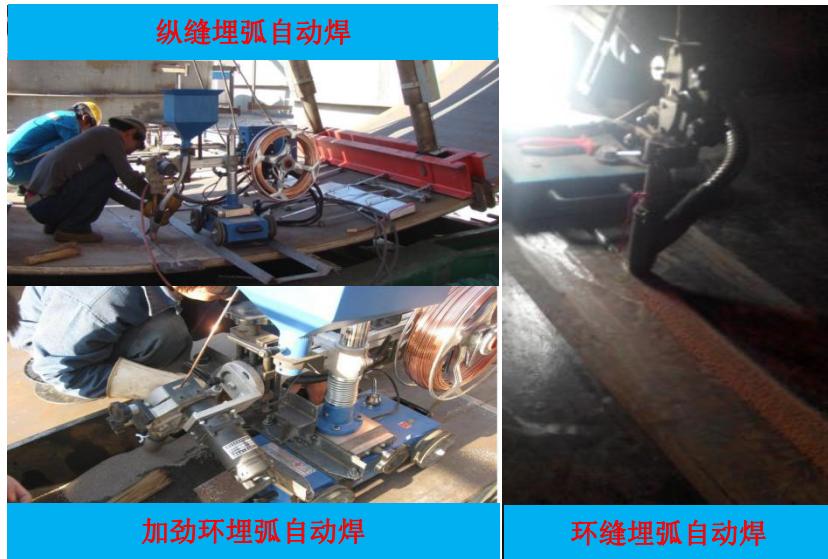


压力钢管自动化立体组焊设



2. 开辟了大型压力钢管洞内组装焊接方式的新途径

应用自动化组焊设备配合研发的加劲环焊缝纠偏装置，实现压力钢管拼、安装过程中的各类焊缝的埋弧自动焊焊接，保证了焊接质量，提高了生产效率，改善了施工环境。成果在黄金坪电站首次应用。

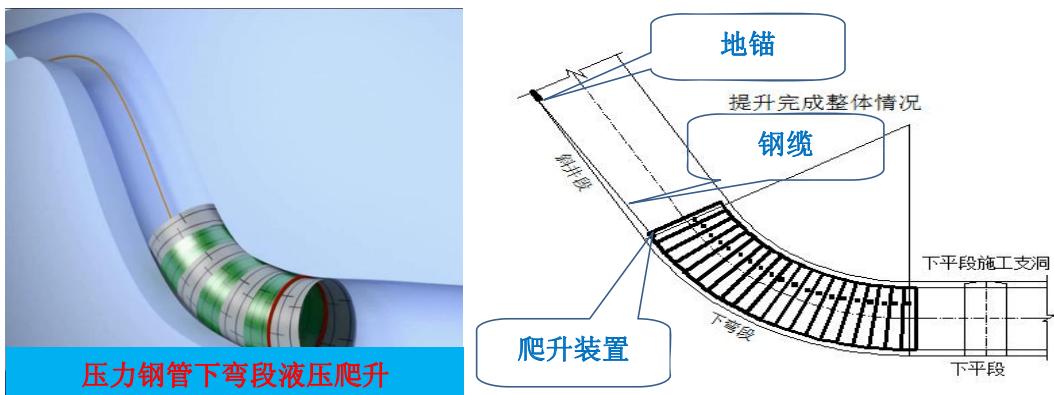


3. 提出了压力钢管洞内无绳运输新工艺

应用自动化组焊设备，并研制了具有分离、自举功能的纵向运输台车和具有分离功能的横向运输台车，实施了压力钢管在洞内组焊、运输、安装全过程机械化施工工艺，创新了压力钢管制作安装技术，尤其适用于受场地、起重运输条件限制的压力钢管洞内制作安装。

4. 创造了压力钢管下弯段安装新技术

基于预应力锚索张拉原理，研发了自锁式液压爬升装置，创造了大型压力钢管下弯段管节在下平段逐节组焊、整体爬升安装施工新技术。



项目成果在梨园、黄金坪水电工程压力钢管制作及安装施工中成功应用，取得了巨大的社会、经济效益，在国内外水电工程建设中有广阔的应用前景。

复杂地形多种料源高面板堆石坝变形控制筑坝技术

完成单位: 中国水利水电第十二工程局有限公司、江苏国信溧阳抽水蓄能发电有限公司

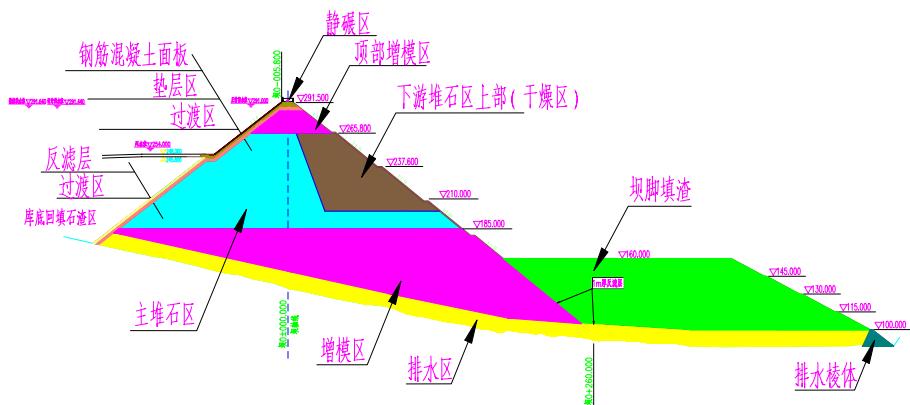
中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司

主要完成人: 沈益源 沈仲涛 劳俭翁 龚家明 赵仲舒 石含鑫 练新军 王志伟 吴书艳 严大顺
方浩 项建明 占懿 倭收 姜国平

抽水蓄能电站由于其良好的调峰填谷的发电作用以及占地范围较少、开发周期短的特点,在当今时代方兴未艾,在复杂地形条件下,用多样性料源填筑高面板堆石坝,如何控制坝体的不均匀沉降是工程成败的关键,因此,对此方面的施工技术的研究和成熟会进一步加大施工期、运行期安全保障,为抽水电站的开发提供更好的条件。在中国电力建设集团有限公司科研项目支持下,研究提出了在复杂地形条件下,用复杂地形多种料源高面板堆石坝变形控制筑坝技术,解决了坝体不均匀沉降控制、料源紧张和大坝填筑质量等难题,主要进展如下:

1. 提出了修整坝轴线 W 地形、软岩堆石料筑坝方法

上水库主
坝坝基为两沟
一山脊“W”地
形,且沟和山
脊均约 17° 倾
向下游,对坝
的稳定和坝体
不均匀变形很
不利。对坝基
地形进行改造
的措施包括:

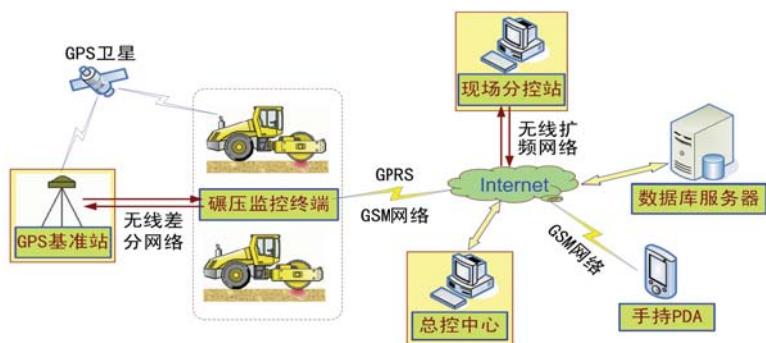


- ①对中部山梁凸起部位进行削坡开挖,形成高程 185m 平台,减少坝体在平行坝轴线方向的不均匀沉降。
- ②结合坝基开挖,对中部山梁陡峻基岩坡面进行台阶开挖,在高程 170m 形成宽 10m 平台,减少堆石体沿基岩面的下滑力。

大坝填筑料全部利用工程建筑自身开挖料,主要采用下水库开挖料、上水库开挖料和输水发电系统的洞挖料。既有下水库软化系数大于 0.64 的下水库弱风化晶屑凝灰岩、安山斑岩及花岗斑岩等中硬岩,以及软化系数较低的强风化晶屑凝灰岩、安山斑岩、花岗斑岩等软岩,又有上水库强风化的岩屑石英砂岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩。坝区填筑料源复杂,合理利用开挖弃渣特别是软岩弃渣筑坝,提高经济效益的同时,取得环保效益。

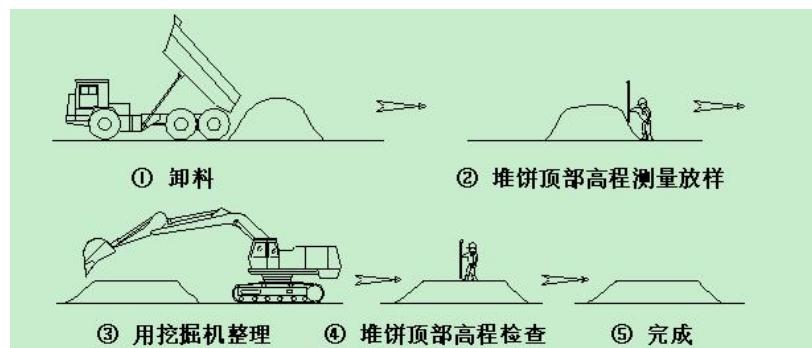
2. 提出了数字化施工技术在面板堆石坝填筑应用方法

数字技术利用GPS全球定位技术、无线数据通讯技术、计算机技术、数据处理与分析技术等数字技术开发的堆石坝施工数字化管理系统应用于大坝施工信息PDA实时采集与调度、坝料上坝运输过程实时监控、大坝填筑碾压质量实时监控，并集成了大坝综合信息管理，对不同料源准确地运送到不同的填筑区，将填筑质量的事后控制转变为事前控制，满足了高强度填筑条件下的填筑质量要求，改变了堆石坝施工以人工管理的传统模式，极大地提高了施工管理效率。



3. 提出了“堆饼”控制堆石料层厚方法

为精确控制大坝填筑层厚，采用“堆饼”工法进行堆石料层厚控制。“堆饼”是采用堆石料在坝面按照 $20 \times 20\text{m}$ 网格布置，按堆石体填筑的松铺层厚制作成“饼状”，作为推土机驾驶员摊铺堆石料的参照物，起到控制大坝填筑层厚的目的。



4. 提出了坝后坡设置混凝土框格梁生态护坡方法

为解决大坝下游面干（浆）砌石大块石料紧张的问题，满足工程环保及景观的要求，提高下游护坡附近堆石区的填筑质量，坝后坡采用C20预制混凝土网格梁护坡，梁内表土回填厚度30cm，覆土表面直接撒播草籽，并种植小叶女贞。

5. 提出了施工废水处理“零排放”方法

通过施工废水處理及再循环利用系统和地表水与施工废水的有效分离、生活污水雨污分离与污水处理后回用等措施，达到了施工废水“零排放”，实现了废（污）水资源利用效益最大化。

高海拔寒冷地区果多水电站碾压混凝土施工质量控制关键技术

完成单位：中国水利水电第七工程局有限公司 华能果多水电有限公司

河海大学

西京学院

主要完成人：唐杰伟 刘英 郑祥 刘昕鑫 汪明 欧和平 曹永芳

西藏属于高寒高海拔地区，昼夜温差大、湿度、风速变化快，施工中人机降效严重，施工投入高，施工进度无法达到预期要求，对藏区水电工程的开发带来了极大的挑战。为有效解决上述碾压混凝土筑坝关键工艺难题，寻求创新施工技术突破，通过一系列的混凝土施工质量控制技术研究，有效解决了高寒高海拔地区碾压混凝土温控防裂难题。

1. 提出了高海拔寒冷碾压混凝土高掺石粉、低掺粉煤灰复掺工艺

我国碾压混凝土普遍采用低水泥用量高粉煤灰掺量的配合比设计思路。由于西藏地区特殊地理环境和经济条件制约，各种资源匮乏，缺少筑坝材料特性、优化配合比以及施工工艺等先期成功经验和技术，高

序号	工程或费用名称	单 位	不掺石粉			掺石粉		
			数量	单价 (元)	合计 (万元)	数量	单价 (元)	合计 (万元)
	大坝混凝土工程				13438.60			12362.38
1	C15 三级配碾压混凝土	m ³	205858	592.41	12195.29	205858	543.78	11194.16
2	C15 三级配变态混凝土	m ³	17693	702.71	1243.31	17693	660.28	1168.23
	投资差额				1076.22			

掺石粉（30%）+（30%）复掺工艺，满足了混凝土，设计性能要求，大幅降低了施工成本。

表 1 碾压混凝土配合比调整投资对比表

2. 研发了拌合物工作性含湿率测试仪

自主研发了拌合物工作性含湿率测试仪，建立了现场 Vc 值与含湿率指标对应关系模型，提出了碾压层施工质量快速量化可检控方法，创建了高、精、快现场检测技术，解决了现场拌合物工作性和碾压结合层面效果评价与控制难题。

图 2 碾压混凝土含湿率测试仪测试过程图



3. 研发了一种仓面便携式智能加浆设备与工艺

自主研发了一种仓面便携式智能加浆设备与工艺，解决了传统变态混凝土人工作业施工的随意性较大、加浆量和加浆范围不可控等问题，显著提升了变态混凝土施工质量、效率和工艺水平。

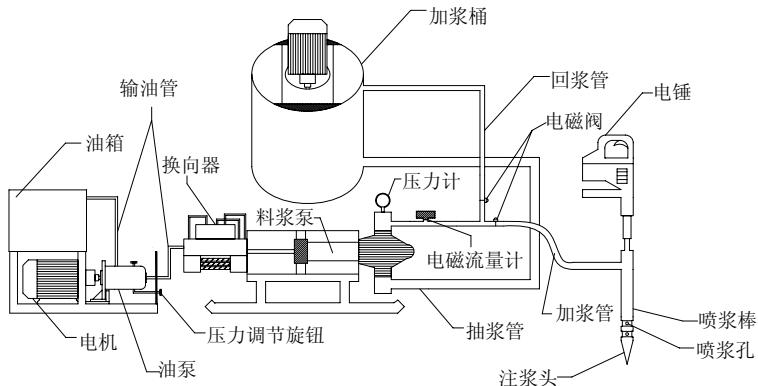


图3 便携式变态混凝土高加浆系统构成示意图

4. 提出了一套完整的温控技术措施和防裂方法

针对高海拔寒冷特点，采取仿真动态施工和全程温控措施，提出了完整温控技术措施和防裂方法，采用天然低温河水冷却大坝温控方案，取得显著温控防裂效果。



本课题两项专利技术，即便携式变态混凝土自动高压注浆工艺及设备与含湿率快速准确测试碾压混凝土工作性成果具有突出创新、实用功能，已形成了新产品设备与工法标准，未来完全可以实现行业技术服务产业化的可能。课题成果技术方法在工程实践中得到应用证明，完全符合推广新技术应用范畴。其中，含湿率碾压混凝土施工检控方法优势显著，可继续在更多工程中应用总结，完善参数模型和推广，形成成熟检测应用新技术。

拱坝坝肩稳定计算程序

推荐单位：中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

项目完成人：蔡云鹏 李梦 白兴平 柏俊磊

拱坝坝肩稳定直接关系到水电工程能否正常运行，是拱坝工程安全评价极其重要的部分。传统的坝肩稳定计算采用人工表格计算方法，计算过程繁琐、效率低、低级差错概率大，此外，常规二维计算无法做到荷载求解精准，在荷载计算原则方面无法全面考虑，多为近似计算，误差大。本次拱坝坝肩稳定计算程序基于三维可视化技术，以现行拱坝设计规范为依托，针对坝肩稳定计算的全过程，应用多种创新方法，实现了过程所见即所得，改进了传统手段在计算过程中的近似计算，能够快速准确地计算坝肩稳定安全系数，提高计算效率，减少计算差错，对坝肩边坡稳定性提出可靠的分析评价，实现拱坝及计算块体三维模型可视化、计算程序化、分析一体化。本项技术申报 6 项发明专利技术，截止目前，已获得 3 项发明专利，主要发明内容如下：

1. 提出了确定拱坝坝肩边坡滑动块体不同地质界面及计算参数的新方法

建立拱坝、地形体的三维模型，同时导入平切图，程序自动生成地层面并拟合生成结构面，利用底滑面、侧滑面、上游拉开面分割得到滑动块体后，根据各滑动面上各岩性分布区域的面积，采用加权平均的方法求得实际的滑动面力学参数。地质分界面的拟合过程采用了最小二乘法，最大限度的减少了由于地质分界面高低起伏造成的拟合误差。

2. 提出了确定拱坝坝肩边坡滑动块体底滑面渗水压力的新方法

综合考虑底滑面水压力的实际分布，并通过荷载体量化更准确地计算底滑面水压力。按照 1m 步长垂直于上游拉开面与底滑面的交线来剖分底滑面，确定各单元渗径实际长度，计算各单元中间位置处的渗压曲线，对于底滑面上沿没有直接与上游拉开面相交的部分，这里采用补齐计算，然后减掉补齐部分的渗水压力曲线的做法，将各单元渗压曲线连接成体，体积即为底滑面渗水压力。

3. 提出了确定拱坝坝肩滑动块体侧滑面的新方法

确定侧滑面的方法有三种，前两种为常规做法，利用空间中的三个点确定侧滑面或利用剪出口点外加侧滑面倾向倾角结合确定侧滑面，第三种为创新做法，首先建立地形面、底滑面所在平面以及上游拉开面，并用各层平切图中结构面剖线拟合结构面，利用地形面、底滑面所在平面以及上游拉开面，切割侧滑面，得到有效侧滑面，利用最小二乘法将侧滑面拟合成平面，得到块体侧滑面。

4. 提出了确定拱坝坝肩滑动块体侧滑面渗水压力的新方法

综合考虑侧滑面水压力的实际分布，通过荷载体量化更准确地计算侧滑面水压力；按照1m步长沿水平向来剖分侧滑面，求得每两层中间位置处的侧面渗水压力曲线；根据侧滑面的走向倾角，利用系统自求得的计算结果曲线垂直于侧滑面施加到侧滑面上，将计算结果曲线连接成体，体积即为侧滑面渗压。

5. 提出了确定拱坝坝肩滑动块体上游拉开面水推力的新方法

改变传统的以求出上游拉开面型心位置确定水头进行静水压力计算确定上游拉开面水压力的做法。按照1m步长平行于上游拉开面与底滑面的交线来剖分上游拉开面，每两层中间会形成一个小面，求得每层小面上的上游水压力，得到一个法向矢量方向，将每个P分解到x、y、z向，每个方向上的力分别直接叠加，上游拉开面推力直接可以根据分力进行叠加运算。

6. 提出了一种基于三维可视化技术的拱坝坝肩边坡稳定计算的新方法

拱坝坝肩稳定计算过程要素实现了三维模型建立、矢量计算、上游拉开面水压力、侧滑面渗压、底滑面渗压、块体自重、坝体自重、滑面面积等的程序计算，并具备安全系数计算以及滑面倾角、滑面参数等数据的敏感性分析计算功能，实现可视化、模板化、自动化，计算分析一体化。

成果良好应用于拉西瓦水电站蓄水安全鉴定工作中，快速准确地计算坝肩稳定安全系数，对边坡稳定性提出可靠的分析评价，提高计算效率，缩短安全鉴定工作时间，使拉西瓦水电站抬高水位发电时间提前约1个月，产生发电效益约500万元。

拉西瓦水电站开展蓄水以及竣工安全鉴定等工作，均需要对坝肩边坡开展全面的稳定计算，采用西北院自主研发的拱坝坝肩稳定计算程序，能够基于创新方法提出更准确可靠的坝肩稳定性评价结论，相比同行业同档次计算分析，节省委托费用约200万元。

构皮滩水电站垂直升船机特高塔体施工关键技术

完成单位： 中国水利水电第八工程局有限公司

主要完成人： 周政国 黄益彬 吴三线 刘宏 田福文 徐国强 叶东生 何井斌

田忠庆 汤福勇 林文棋 刘军辉 沈广余 罗峰 王守良

构皮滩升船机是国内外首座采用三级升船机方案的通航建筑物，也是目前水头最高、水位变幅最大的通航建筑物，其中第二级升船机船厢室塔柱高度为 152.5m，建筑总高度为 176.5m，两项参数指标均居世界第一，且多项技术参数超过国内外已建升船机技术指标。本项目针对构皮滩水电站垂直升船机特高塔体结构复杂、施工工序多，工期紧、施工强度高，底板大体积混凝土温控要求严，升船机薄壁塔体防裂难度高等重难点问题，通过大型塔机群+全面定点分料系统吊运混凝土、全悬臂及半悬臂大型模板安装、装配式梁板结构施工、“3 小+12 大”垂直升船机高精度体型控制技术及 4D 模拟监控技术、RJ-103 远程监控和 RJ-101 塔吊防撞技术等，总结形成成套施工技术，实现了安全、优质、高效施工。主要进展如下：

1. 总结形成了垂直升船机特高塔体快速施工技术

①运用全悬臂和半悬臂

模板结合施工，减少每个仓面三分之一的拉模筋工程量；

②升船机每隔 12m 楼层梁板由现浇改为预制装配式吊装施工，保证了梁板混凝土预制施工与升船机筒体同步上升；

③采用大型塔机+定点分料系统相结合的施工模式，创造单月上升 12m（四层）、季度上升 33m、半年上升 60m 的垂直升船机国内施工记录。



图一： 大型仓面分料系统

2. 研究形成了高精度超高垂直升船机型控制技术

采用“3小+12大”【解释：“3小”指筒体上升3m在筒体外侧四个角点位和筒体内侧预制梁轴线上对其体型小测一次，“12大”指筒体上升12m在筒体外侧四个角点位和筒体内侧预制梁轴线上对其体型大测一次】体型控制模式对超高垂直升船机进行实时跟踪测量，筒体最终结果显示为整体偏差为16mm，达到了国内外超高垂直升船机型控制的领先水平；

混凝土浇筑形体观测记录表						
工程部位	x	y	$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta h(\text{mm})$	备注/检测时间
1	1084.885	1.994	-0.5	+0	+0	2015.5.15
2	1110.748	1.993	0.5	+0	+0	
3	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
4	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
5	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
6	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
7	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
8	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
9	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
10	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
11	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
12	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
13	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
14	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
15	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
16	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
17	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
18	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
19	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
20	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
21	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
22	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
23	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
24	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
25	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
26	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
27	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
28	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
29	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
30	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
31	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
32	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
33	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
34	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
35	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
36	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
37	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
38	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
39	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
40	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
41	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
42	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
43	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
44	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
45	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
46	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
47	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
48	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
49	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
50	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
51	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
52	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
53	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
54	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
55	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
56	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
57	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
58	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
59	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
60	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
61	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
62	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
63	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
64	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
65	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
66	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
67	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
68	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
69	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
70	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
71	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
72	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
73	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
74	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
75	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
76	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
77	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
78	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
79	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
80	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
81	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
82	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
83	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
84	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
85	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
86	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
87	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
88	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
89	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
90	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
91	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
92	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
93	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
94	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
95	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
96	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
97	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
98	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
99	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
100	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
101	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
102	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
103	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
104	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
105	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
106	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
107	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
108	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
109	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
110	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
111	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
112	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
113	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
114	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
115	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
116	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
117	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
118	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
119	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
120	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
121	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
122	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
123	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
124	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
125	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
126	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
127	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
128	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
129	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
130	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
131	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
132	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
133	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
134	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
135	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
136	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
137	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
138	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
139	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
140	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
141	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
142	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
143	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
144	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
145	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
146	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
147	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
148	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
149	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
150	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
151	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
152	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
153	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
154	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
155	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
156	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
157	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
158	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
159	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
160	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
161	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
162	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
163	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
164	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
165	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
166	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
167	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
168	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
169	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
170	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
171	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
172	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
173	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
174	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
175	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
176	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
177	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
178	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
179	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
180	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
181	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
182	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
183	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
184	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
185	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
186	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
187	1094.250	1.5.728	0.5	+0	+0	
188	1094.250	1.5.728	0.5	+0</td		

水电水利工程 BIM 与三维 GIS 集成应用研究

完成单位：中国电建集团昆明勘测设计研究院 四川视慧智图空间信息技术有限公司
有限公司
西南交通大学

主要完成人：闻平 王冲 张叶廷 桂林 吴小东 吴弦骏 王媛 丁雨淋
谢潇 杨林波 杨文 陈昌黎 肖胜昌 文道平 谢飞

地理信息系统作为具有较强应用意义的空间信息管理科学，逐渐在工程项目中得到了广泛应用，另一方面，建筑信息模型（BIM）在勘测设计行业得到了越来越广泛的应用，各领域间的协同合作已成为发展趋势，而协同的核心是数据的共享。本项目针对水电水利工程特点，建立了一套基础地理信息数据快速获取、处理、传输体系并形成了一系列水电水利工程 BIM 设计成果与三维 GIS 无缝融合关键技术，在此基础上开发构建了插件式三维 GIS 框架，为工程项目的勘察设计、施工建设、运维管理等全生命周期提供了集成应用管理系统及三维可视化应用软件平台。

项目先后牵头组织 1 项行业标准、3 项企业标准的编制，申请国家专利 5 项（授权 1 项），发表核心期刊 14 篇（EI 1 篇），申请转件著作权 8 项（授权 8 项），获得省级创新工作室 1 个，出席会议特邀报告 4 次，正在牵头编制专著 3 部。主要成果如下：

1. 高原山区无人机正射影像快速获取及处理技术

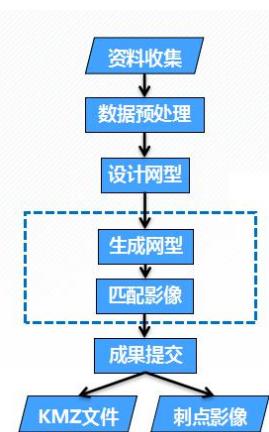
针对高原山区无人机正射影像采集过程中，传统方式影像采集重叠度过高、冗余数据严重、航摄影像质量差等问题，从相控点自动构网、自动匹配及刺点照片自动生成等技术入手进行研究，形成了海拔起伏较大测区无人机影像重叠度过高处理方法（专利）及其相关软件、一种无人机影像相控分布构网与航片可选



像控点自动布设



影像冗余剔除

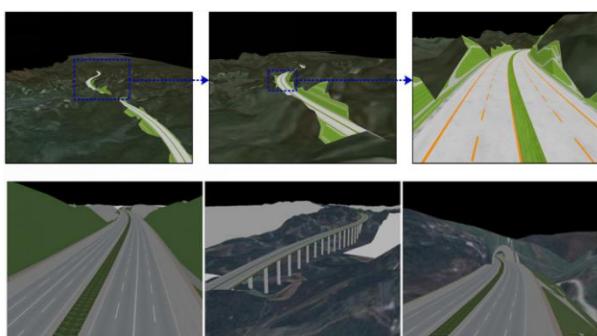


自动布设流程

范围匹配方法（专利）及其相关软件，极大的提高了生产效率，节省了成本。通过参数化正射影像匀光匀色技术可生产高质量拼接影像。

2. BIM 与三维 GIS 融合关键技术

为实现 BIM 模型到三维 GIS 平台的数据融合、数据管理、数据可视化及高精度空间分析的目标，以 BIM 及三维 GIS 平台的技术特性为中心，深入研究的 BIM 模型格式转换技术，解析并对各类 BIM 模型进行重构，实现将各类 BIM 无损转换至三维 GIS 平台中。

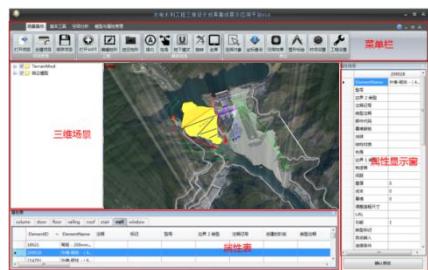


在实现模型自动放置的基础上，研究解决了 BIM 模型与地形接触部分地形自动开挖、自动补充技术，实现了 BIM 模型与地形的无缝融合。以 BIM 及三维 GIS 数据为基础，针对水电水利工程业务需求，开发了桥梁、道路、隧道等设施的参数化建模功能，在各类地理设施中心线、点位等数据的基础

上，可根据参数设置，自动生成模型，实现各类工程的概念设计，工程量自动计算。技术成果成功应用于滇中引水工程三维场景制作、糯扎渡电厂水库综合管理系统开发、糯扎渡电厂环境量监测系统开发、黄登水电站勘察设计工作、杨房沟水电站勘察设计、卡拉水电站勘察设计、观音岩水电站运维管理三维系统开发中。

3. 插件式三维 GIS 平台研发

面向 BIM 项目全生命周期系统，采用插件式构架，研发了 BIM 三维设计成果集成管理与可视化展示平台，结合三维、3S、互联网、BIM、全景 360 等技术，实现了三维 GIS 地理场景数据组织、网络发布，解决了海量基础地理信息数据的组织管理、地形与影像数据的三维渲染、网络传输与三维浏览、安全保密等技术难点，达到了三维 GIS 宏观应用的广度和 BIM 精细应用的深度相结合的目的，最终实现从各专业分散的信息传递到多专业协同的信息共享服务。以平台构架为基础，根据具体项目业务需求，先后构建了 8 项具体行业应用综合管理分析系统，包括：高原山区引调水工程智能选线平台、高海拔山区风电场智能选址平台、滇中引水昆明段综合管理平台、水电水利工程应急指挥平台、砚山县农村土地经营权确权颁证系统、糯扎渡电厂水库综合管理系统、糯扎渡电厂环境量管理系统、中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司云 GIS 服务平台等。



水电站扩建工程百米级深水无导轨水上下闸封堵技术

完成单位： 中国水利水电第七工程局有限公司
武汉大学

主要完成人： 伍夕国 杨合谊 张光辉 任伟勤 拓瑜 徐红刚 贺昌海 刘全

巴基斯坦塔贝拉水电站为巴基斯坦最大水电站，塔贝拉四期扩建项目需要在水下安装泄洪洞闸门，把原泄洪洞变为水电站四期的引水洞。工程施工面临技术难题可以总结为“难吊运”、“难探测”、“难测控”、“难校正”，分别详述如下。

1、难吊运。引水洞的封堵闸槽位于库湾中，离最近的岸边距离是 200m，陆基起吊设备无法完成吊运；原封堵闸门自重 108 吨，水面无导轨整体吊装入位困难。

2、难探测。塔贝拉水库已经运行近 40 年，深水库底的淤积情况不明，封堵闸槽及其底部结构情况探测困难，需清淤和深入探测是否存在异物阻碍下闸。

3、难测控。封堵闸槽在水下 80m 水深下，闸槽的位置、闸门的定位、闸门的吊装过程、下闸后的封堵等操作的观测困难。库区水面风浪大、无下闸槽辅助结构，闸门下闸过程中的水面运输、平台稳定性、水下精准入槽等环节控制困难。

4、难校正。闸门入槽后，闸门在闸槽内处于自由状态。可能向上游侧倾斜，止水缝较大，封堵困难，必须对闸门的状态进行校正。

针对以上技术难点进行了研究创新。

1. 研制了运吊装一体化平台

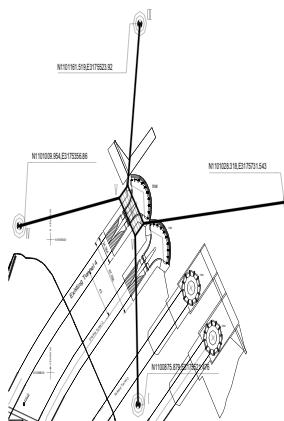
主要功能包含：运输、起吊、定位、潜水、起吊状态控制、技术供应等。最大吊深：120m 设计载重：210t。解决了叠梁门在库区运输、起吊和安装等一系列关键技术问题。



2. 采用海军锚锚泊系统和吊装反馈监控系统，解决了平台稳定性和下闸过程可控性问题。

针对吊装中的平台稳定性问题，计算分析了平台受力条件；经研究和方案比选，最终采用基于海军锚的精准锚泊定位系统。在浪高 $<0.5\text{m}$ ，风力 <3 级条件下，能保证较高的下闸质量。

针对水下吊装状态控制难的问题，设计安装了叠梁门吊重、吊深反馈监控系统。



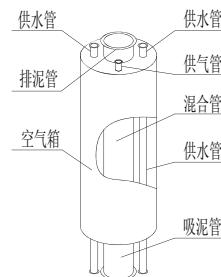
3. 采用了叠梁门吊装快速精确测量定位方法

采用观测量转移原理和 RTK+全站仪联合测量的方法，实现了水上测量水下定位和测量目标的动态快速定位，精度达到厘米级。

4. 槽内闸门调控方法

设计了 100 米级水深水下叠梁门顶推方案，发明了水下顶推器和顶推稳定器，保证封堵抽排流量低于 $390\text{m}^3/\text{h}$ ，实现了引水洞低流量封堵成功。

5. 研制了空气动力清淤器进行库底清淤



该设备成功清除了库底多年淤积淤泥，清淤效率达到 $523\text{m}^3/\text{h}$ 。

成果已成功应用于塔贝拉 3 号洞和 4 号洞的深水下闸作业，取得了无辅助吊装高成功率和一次性封堵成功的成果。在保证施工质量和施工进度的同时，降低了施工成本，取得了良好的技术经济效益。本课题为深水无导轨闸门吊装施工创立了典型，可为水库库底及水下建筑物探测、清理等工程借鉴，丰富了我国和世界水电工程改扩建技术库。随着国内外水电工程改扩建市场的增长，深水无导轨闸门安装技术具有广阔的应用前景。

特高拱坝安全在线监控技术研究

完成单位：国家能源局大坝安全监察中心 1

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司 2

雅砻江流域水电开发有限公司 3

主要完成人：张秀丽 沈海尧 傅春江 王玉洁 孙辅庭 冯永祥 崔何亮 黎中原

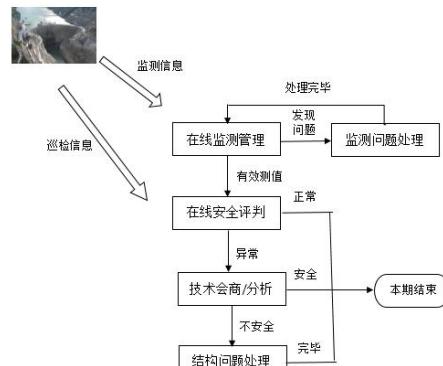
随着小湾、锦屏一级、溪洛渡等水电站的投运和白鹤滩、乌东德等水电站的开建，我国特高拱坝数量和最大坝高均居世界之首，特高拱坝的运行安全已引起政府监管部门的高度重视。本项目依托锦屏一级拱坝，深入分析并吸取国内外大坝安全监控或相近领域的经验教训，围绕在线监控系统应达到的“评判精准、反馈快速、运行稳健”等关键问题，充分利用现代坝工技术和信息技术的最新成果，研究并开发了特高拱坝安全在线监控云平台，实现了特高拱坝安全状况的快速动态评判和即时反馈。主要创新性成果如下：

1. 构建了特高拱坝安全在线监控新体系

摒弃通过一个软件解决复杂大坝各类安全问题的传统做法，认为大坝安全在线监控系统仅仅是一个平台和工具，技术手段和管理手段有机结合是做好大坝安全在线监控的保证。基于上述新理念构建的特高拱坝安全在线监控新体系以“法制、技术、管理”为特征，是建立在法制（23号令）基础上，由在线监控技术平台和一系列管理措施组成的有机整体。在线监控平台包括各有侧重又相互协同的“在线监测管理、在线快速结构分析、在线结构安全评判”三大功能。

2. 提出了基于智能移动客户端的巡视检查新技术和大批量、多类型监测仪器测值自动快速采集、报送、处理新技术

提出了基于 NFC（近距离无线通讯技术）的大坝巡视检查新技术，实现了采用智能移动客户端进行现场巡检的路径引导、图像采集、情况记录、状态评判和信息上传，显著提高了巡视检查工作的规范性、准确性和效率。提出了基于云端服务的大批量、多类型监测



仪器数据自动快速采集、报送、处理新技术，实现了海量多类型安全监测数据的统一报送和快速处理。将奇异谱和局部邻近度等方法用于监测信息有效性检验，提出了基于监测信息系列特征的有效性检验自动匹配技术，准确高效地保证了监测信息的可靠性和有效性。

3. 提出基于智能反演、实时监测和运行现状的特高拱坝在线快速结构分析新技术。

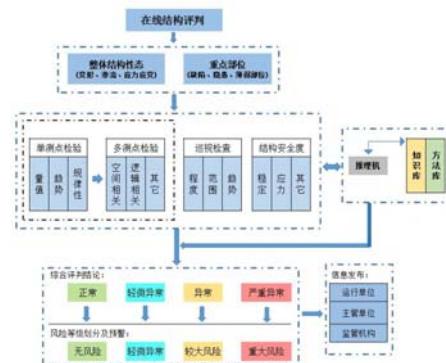
植入幂函数缩放函数有效提高了遗传算法搜索的效率和精度；基于改进遗传算法和有限元计算，依托云平台提出基于实际坝基处理、混凝土温控、接缝灌浆等施工和实时结构状况、荷载条件及监测信息的快速有限元正反分析技术，实现了精确反映特高拱坝实际坝体、坝基结构特点及真实运行性态的在线快速结构分析，能够开展常规工况的诊断以及不常用工况的预测，为及时开展技术会商提供辅助决策依据。

4. 提出了基于多源信息融合的在线结构安全综合评判新方法

充分吸取国外拱坝失事教训、借鉴业界大坝安全评判方法、总结大坝安全定期检查经验，创新性提出基于多源信息融合的在线结构安全综合评判新方法并有效实施。新方法体现了国家能源局颁发的《水电站大坝运行安全评价导则》(DL/T 5313-2014)有关大坝安全评判的原则，结合特高拱坝结构本质特征和运行性态，采用基于产生式规则的“多信息、多指标、多层次”融合诊断技术，实现了大坝结构安全评判由单一监测信息向安全监测、巡视检查、结构计算等多源信息融合的重要转变。

5. 研发了集在线监测管理、在线快速结构分析和在线安全综合评判功能于一体的特高拱坝安全在线监控云平台。

开创性地研发了集“在线监测管理、在线快速结构分析、在线安全综合评判”功能于一体的特高拱坝安全在线监控云平台，实现了从安全监测、巡视检查、快速结构分析诊断、快速结构安全综合评判到拱坝安全状况即时移动反馈的全流程大坝安全在线智慧监控，显著提高了应对大坝安全突发事件的预测预警、技术会商、日常管理和应急处理能力。项目成果已成功用于锦屏一级拱坝在线监控，部分功能已推广用于在国家能源局大坝安全监察中心注册的500多座大坝的日常在线监控，总体效果良好。



龙开口水电站工程重大地质缺陷处理关键技术

完成单位：中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司
中国水利水电科学研究院

主要完成人：叶建群、李德玉、熊立刚、涂祝明、吕国轩、赵士正、郑再新、魏尚朝、郑鹏翔、欧阳金惠

龙开口水电站位于云南省大理州鹤庆县境内的金沙江中游河段，总装机容量 1800MW，是国家西部大开发的重点项目之一。工程枢纽区地形地质条件复杂，大坝抗震设防烈度为 9 度。其中大坝右岸变形体规模巨大，其稳定性直接威胁枢纽建筑物的安全。主河床大规模复杂深槽顺河向斜穿整个坝基，为国内外水电工程罕见。厂房尾水渠粉质粘土边坡稳定性极差。经深入研究与创新应用工作，技术成果达到国际领先水平，经济效益显著。

1. 创新性采用桩板墙接头新技术并以“治坡先治水”设计理念加强地表及地下排水系统设计

大坝与岸坡的桩板墙接头处理方案避免了坝肩深切开挖削弱变形体坡脚，极大减少边坡支护工程量提高了安全可靠性，解决了变形体边坡稳定安全度低以及处理措施施工难度大、工期长、投资大的难题。

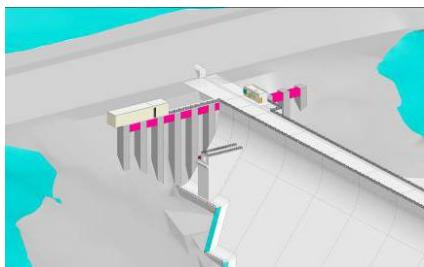


图 1 桩板墙接头方式

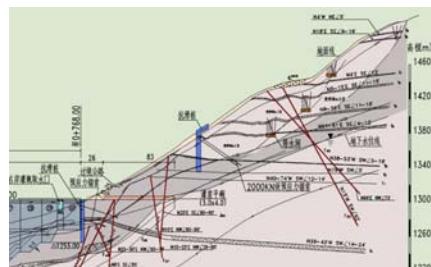


图 2 右岸变形体处理

2. 针对坝基巨型深槽，提出了钢筋混凝土承载板洞挖全置换创新性处理方案

深槽处理与坝体混凝土同步施工，攻克了坝基深槽严重影响工程安全和工程进度的技术难题，深槽上游防渗与支撑结构设计和施工难度国内罕见，具有独创性。处理方案极大减少了工程施工期安全风险，经济效益显著。

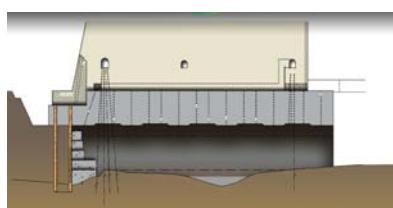


图 4 深槽处理

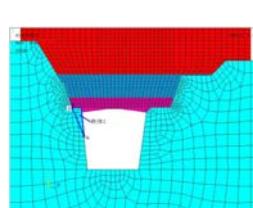


图 4 承载板及防渗支撑结构计算

3. 国内首次研究提出浅埋式抗滑桩工作机理和设计方法,解决了厂房尾水渠粉质粘土高边坡的处理问题

通过对龙开口水电站厂房尾水渠粉质粘土高边坡的加固处理研究，针对西部工程特殊的深厚覆盖层粉质粘土边坡，结合土工试验和离心模型试验成果，对常规抗滑桩设计方法进行改进，首次提出一种浅埋式钢筋混凝土抗滑桩结构型式与施工方法。

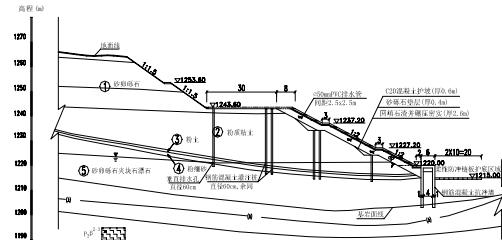


图 5 浅埋式抗滑桩

在我国西部水电和海外水电工程建设中，地质条件越来越复杂，复杂地质缺陷处理技术构思新颖，技术难度大，创新点多，达到国际领先水平，为今后水电工程地质缺陷处理提供了新经验。

500m 级深竖井大直径反井钻一次成井施工关键技术

完成单位：中国水利水电第八工程局有限公司

主要完成人：彭运河 刘豫 李重用 李勇恩 才俭峰
王飞跃 黄仕保 彭光友 黄明强 罗俭

美纳斯竖井深度达 500m，采用大直径反井钻机全断面一次成井施工技术，安全、高效、环保地完成了 500m 级深竖井施工，创建了大直径长竖井反井钻全断面施工工法。

1. 首次在水电工程领域使用 **500m 级大直径 ($\Phi 5.5m/\Phi 6.0m$) 深竖井反井钻机全断面一次成型开挖施工技术**；同时在施工过程中采用定向钻机及稳定钻杆，配合高精度定向仪进行钻孔精度控制，钻孔精度达万分之一(**0.01%**)，有效解决了深竖井钻机钻孔偏差控制难的问题。

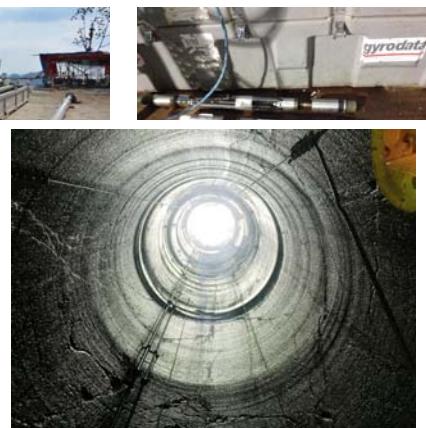
采用定向钻机从竖井顶部向竖井底部钻进先导孔，然后更换反井钻机从下向上一次将竖井扩挖至设计断面尺寸；通过在施工过程中采用定向钻机及稳定钻杆，配合高精度定向仪对先导孔钻孔精度进行了有效控制，钻孔精度达万分之一(0.01%)，从而有效解决了深竖井钻机钻孔偏差控制难的问题。

先导孔施工完成后，将先导孔钻机更换全断面反井钻机，在竖井底部安装设计直径 $\Phi 5.5m$ （通风电缆竖井为 $\Phi 6.0m$ ）的反扩刀盘，从下向上一次将竖井扩挖至设计直径。

全断面开挖完成的竖井井壁完整、光滑，最大程度上减小了对井壁围岩的扰动和破坏，保证了井壁围岩的整体稳定，大大提高了支护以及后续施工过程中人员和设备的安全性，同时避免传统的导井法（人工爆破扩挖溜渣）施工工艺存在的安全风险高、进度慢、人工劳动强度大、职业健康危害性高、井内环境条件不良等问题。



定向钻杆



竖井扩挖完成



71RM 先导孔钻机



RD5-550 全断面反井钻机

2. 研制了一种双绳系同步卷扬系统及一种竖井井口模块化封口装置，改进了竖井内部吊盘自动水平调节系统，保证深竖井施工安全。

深竖井施工使用的卷扬机由于下降深度大，绕绳长且冗余度大，任何细微偏差，都会造成卷扬机不同步，项目通过研制了一种双绳系同步卷扬系统有效解决了这个问题；针对竖井施工安全问题突出的特点，对竖井封口盘模块化设计以及竖井内部吊盘水平调节系统进行研究，研制出一套适合竖井施工的封口盘装置及竖井内部吊盘自动水平调节装置，制定了一套深井施工的安全技术措施和相应的安全规章制度，保障了竖井的安全施工。



压力竖井提升系统



模块化封口装置



吊盘调平系统

3. 创新建立了《大直径长竖井反井钻全断面施工工法》，形成了大直径深竖井全断面开挖施工体系

根据对使用大直径深竖井反井钻机全断面一次成型开挖、支护施工技术，如开挖过程中进行地质预判、不良地质段灌浆、回填及支护处理、渗水处理、钻孔精度质量控制及施工安全等进行研究，创新建立了《大直径长竖井反井钻全断面施工工法》，形成了一套大直径深竖井全断面开挖施工体系，有利于竖井反井钻机全断面开挖方法的应用与推广，实现竖井反井钻机全断面开挖的标准化和规范化。

百米级特大整流锥式竖井进出水塔关键施工技术

完成单位： 中国水利水电第五工程局有限公司 江苏国信溧阳抽水蓄能发电有限公司

主要完成人： 刘聪 韩敬泽 刘新星 杨贵仲 段炜 吴高见 苟三江 管建龙

进出水口作为抽水蓄能电站的咽喉，其重要性不言而喻。但截至目前，抽水蓄能电站上水库进出水口型式多采用侧式，竖井式进出水口应用较少，应用百米级竖井式进出水口的抽水蓄能电站更是屈指可数。本项目依托江苏溧阳抽水蓄能电站上水库展开研究，研究提出了一套系统、完整的百米级特大整流锥式竖井进出水塔施工方法。主要内容如下：

1. 悬空整流锥混凝土浇筑用“斜拉型钢桁架支承平台+承插式盘扣架”支模体系

上水库进出水口的整流锥重约 5705t，悬空高度 100m。针对其大跨、重载、复杂悬吊等特点，研发了“预应力锚索斜拉型钢桁架支撑平台+分阶段张拉施加预应力”施工技术。根据整流锥分层浇筑的体量，浇筑前提前张拉钢绞线对钢桁架平台施加预应力，达到控制平台变形的目的。另外，在钢桁架平台中心设置“钢柱体（内注混凝土）+钢环结构”的整流锥端部巨型固定装置，确保了整流锥浇筑过程中的姿态稳定。所采用斜拉钢桁架支承平台为国内水电工程中首创。



2. 47m 高底座段椭圆曲线过流面组合模板体系

进出水口底座段过流面垂直高度 47m，纵剖面呈椭圆曲线结构，横剖面为半径不断变化的圆形，过流面最大直径 23.4m，下部渐变至直径 9.2m。针对过流面特点，设计发明了一种适用于椭圆变化曲线过流面混凝土浇筑的梯形可调节组合钢模板，底座段最上部 5m 段因曲线变化过大，采用木模进行现场组拼成曲面定型模板。“梯形可调节组合钢模板+木模定型曲面模板”的组合模板体系成功解决了 47m 高底座



段内部椭圆曲线过流面的混凝土浇筑难题。底座段椭圆曲线过流面自行设计的梯形可调节组合模板为国内首创。

3. 底座倒坡混凝土浇筑的承插式盘扣架支模体系



底座段上部 10m 高的倒坡斜锥体混凝土引入了国际上最为先进的支撑架体系—承插式盘扣架，并设计了一套施工速度快、抗倾覆能力强、稳定性高的大型宽幅闭环式模板支撑体系，解决了倒坡混凝土浇筑过程中水平推力下的架体变形难题，为国内水电工程中首创。

4. 挑空 42m 的 1.5m 厚顶板混凝土浇筑用承插式盘扣架高支模支撑体系

针对进出水塔 1.5m 厚顶板挑空 42m 且一次性浇筑成型的特点，创新性设计了高支模承插型盘扣式满堂支撑体系，该体系由两种规格的盘扣架组合搭设，并通过在中间稳定支架（翅膀）的方法提高整架稳定性，为国内水电工程首次大规模使用。



5. 设计了竖塔 6 道 1m 厚联系板混凝土浇筑用的配模优化方案

竖塔在 EL215.5000~EL287.500 范围内有 6 道 1m 厚钢筋混凝土联系板，间距为 5m，结合 1m 厚联系板在混凝土不同龄期的承载力，对混凝土浇筑用的配模方案进行了优化设计，提出了采用 2 层承插式盘扣架的架体周转使用方案，大大提高了 1m 厚联系板施工速度。

6. 建立了重难点工程的施工过程监控系统

本项目实施过程中的多个技术难题均属于国内外首例，通过建立重难点工程的施工过程监控系统，一方面对整个施工过程的结构状态进行了把控，另一方面校核了设计方案的准确性，为后续类似工程的建设提供了理论支撑。

成果应用于溧阳抽水蓄能电站上水库 1#、2#进出水口工程，取得了很好的效果，创造直接经济效益 547 万元，上水库蓄水阶段安全鉴定验收时，专家组给出了“这不是一座水工建筑物，而是一件工艺品”的好评。

极端条件下混凝土坝体防灾减灾及安全评价

完成单位: 大连理工大学 1

红河州水利水电工程地质勘察咨询
规划研究院 3
淮阴工学院 5

昆明理工大学 2

红河州水利水电勘察设计研究院 4

主要完成人: 陈健云 王铭明 徐强 李静 陆路 范书立 杨菊 夏权斌 吴建明 白杨清

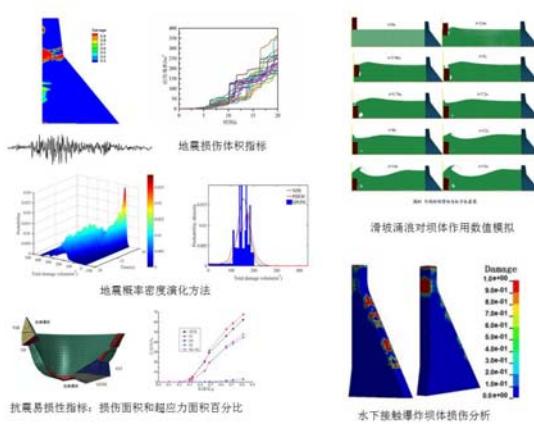
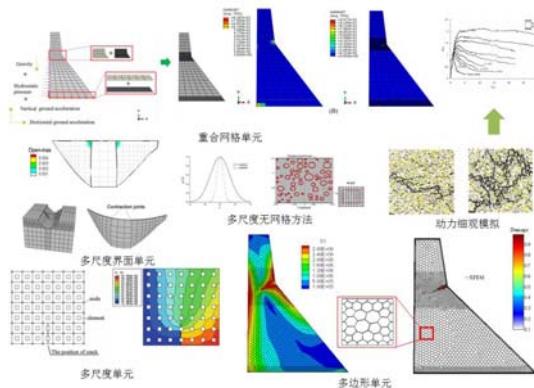
该项目针对极端条件下混凝土坝动力响应机制, 基于全生命周期性能演化的混凝土坝设计方法, 建立贯穿于水利水电工程设计、施工和运行全过程的混凝土坝安全控制理论, 针对混凝土坝在全生命周期中可能受到的地震、涌浪、爆炸冲击极端荷载下的非线性动力反应、损伤机理、破坏模式、加固措施及安全评价开展研究, 为我国大型水利水电工程的设计、施工与运行提供理论与技术支撑。创新性成果如下:

1. 构建了混凝土坝的多/跨尺度动力非线性数值计算方法

针对极端条件下混凝土坝的强非线性破坏规律分析, 提出了混凝土坝筑坝材料和场地岩体的多尺度动力本构模型以及混凝土坝-场地动力相互作用的高效、高精度多/跨尺度动力非线性数值计算方法。系统开展了筑坝材料和场地岩体的多尺度破坏特征及失效模式的研究。

2. 分析了强震、滑坡涌浪及水下爆炸等极端荷载作用下混凝土坝的损伤特征和破坏机理

研究了强震、滑坡涌浪及水下爆炸等极端荷载作用下混凝土坝的损伤特征和破坏机理, 得到了强震、爆炸及滑坡涌浪等极端荷载对作用下混凝土坝的强度失效及整体失稳破坏模式, 给出了水下及空气中接触爆炸对坝体动态响应及破坏特征的影响规律。

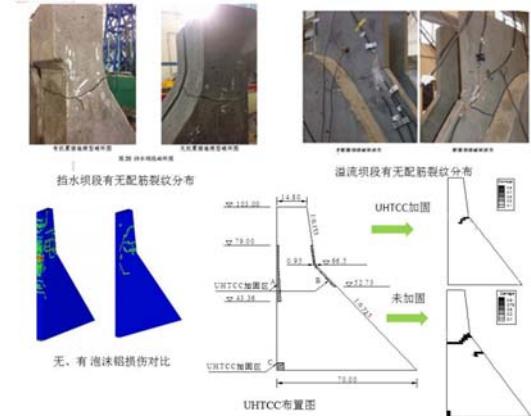
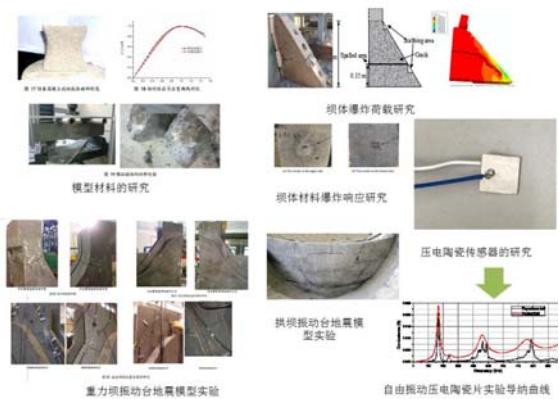


3. 发展了混凝土坝破坏的试验技术 和测试技术

发展了地震、爆炸等极端荷载下混凝土坝破坏的试验技术和测试技术。发展了混凝土坝振动台模型弱面效应的仿真混凝土材料，研究该仿真材料动力作用下的损伤特性、机理及形态，进行了非完全相似条件的理论推导，提出了通过断裂特性相似以解决坝体模型材料应变比尺不等于1时相似要求的模型动力实验的设计方法，发展相应的传感设备提升数据采集能力。提出了模拟水下爆炸作用的试验方法，开展了爆炸实验研究，得到了混凝土坝在水下冲击波作用下的动力损伤特征及响应分布规律。

4. 提出了强震、爆炸等极端荷载作用 下大坝防护的工程措施

开展了强震、爆炸等极端荷载作用下的工程措施研究。基于混凝土坝在地震、爆炸等荷载作用下的动态响应特性和破坏机理，提出了坝体表面采用超高韧性水泥基复合材料、泡沫铝以及坝体顶部采用泡沫混凝土、轻骨料混凝土等提高坝体抗震、抗爆能力措施；提出了大体积混凝土结构配筋的模拟方法和相似技术，通过振动台模型试验验证了混凝土坝通过配筋提高抗震能力的效果。



经验模态分析法在抽水蓄能机组甩负荷试验的应用与研究

完成单位：中国电建集团中南勘测设计研究院 武汉大学
有限公司
湖南黑麋峰抽水蓄能有限公司

主要完成人：郑建兴 杨建东 曾艳梅 杨桀彬 向明 伍志军 何银芝 付国锋
张强 刘平 杨晖 莫湘磊 吴滨 黄梅 李立

在水利水电工程领域将经验模态分析应用于抽水蓄能机组甩负荷试验研究，尚属首次。通过对经验模态分析法的理论基础、原理和处理方法进行深入研究，并将抽水蓄能机组甩负荷试验数据的特性进行了对比分析，创造出了一种独特的适用于抽水蓄能电站机组甩负荷试验反演分析及预测计算的方法。同时，还将经验模态分析法与置信度法进行了有机的结合，为干扰信号的处理和分析提供了有益的补充和帮助。通过该方法的成功应用，在抽水蓄能电站机组甩负荷试验信号分析、数据处理、数理统计以及特性分析和研究等方面取得了丰富的研究成果，并成功应用于黑麋峰抽水蓄能电站机组甩负荷试验中。

1. 首次在水电行业内将经验模态分析法成功应用于抽水蓄能机组甩负荷试验中，提出了一套完整的、适用于抽水蓄能机组调试试验的反演分析及预测计算方法。

抽水蓄能电站机组甩负荷试验具有压力波动过程复杂、存在非线性非平稳压力脉动信号等主要特点，现有的一维过渡过程计算分析程序难以准确计算和预测压力脉动引起的非线性非平稳信号，经验模态分析法(Empirical Mode Decomposition, EMD)正好解决了这一技术难题。利用该方法进行反演分析和预测计算的主要内容包括：1) 实测数据的经验模态分析，针对历次甩负荷试验的压力信号进行频谱分析和逐级分解；2) 精细化的反演计算与分析，获取历次甩负荷试验的均值压力计算误差和压力脉动幅值；3) 试验工况及运行控制工况的准确预测，根据获取的均值压力计算误差和压力脉动幅值，在待预测工况水力过渡过程复核计算基础上进行误差修正和瞬时压力脉动叠加。

经过对黑麋峰抽水蓄能电站全厂4台机组累计42次甩负荷试验的实际检验，历次试验预测压力极值与实测压力极值吻合性较好，找出了机组甩负荷试验计算压力极值与实测压力极值差异中包含计算误差和压力脉动的成份，为机组历次甩负荷试验提供了可靠的技术保障，规避了试验存在的技术风险，圆满完成了同一流道双机同时甩100%负荷试验，各主要部位实测压力极值和控制工况预测压力极值等均能满足调节保证控制值的要求，机组

及输水系统具备了全水头段满负荷运行的条件。该方法的成功应用，为类似抽水蓄能机组甩负荷试验反演及预测分析提供了借鉴和参考。

以②水力单元双机同时甩 75%负荷为例，实测压力波动见图 1-1，经 EMD 分解后的均值压力和脉动压力见图 1-2。

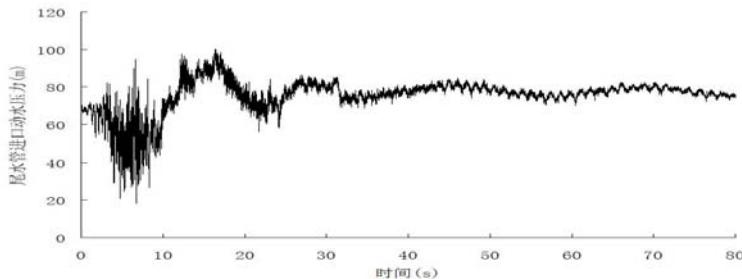


图 1-1 ③机尾水管测点实测压力波动图

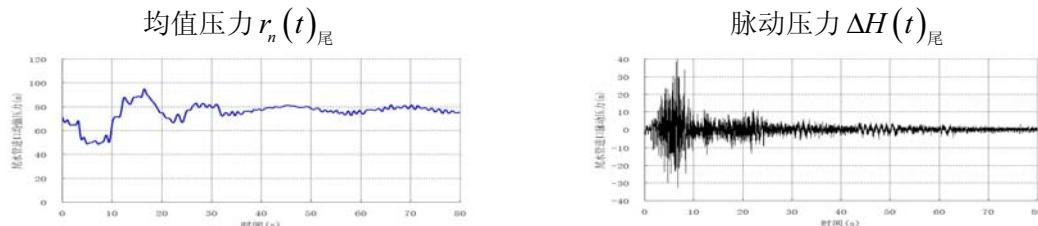


图 1-2 ③机尾水管测点 EMD 分解的均值压力和脉动压力图

2. 首次在水电行业内将经验模态分析法与置信度法联合应用于抽水蓄能机组甩负荷试验中，通过 97%（或 95%）置信度法对实测数据进行干扰信号预处理与分析，剔除干扰信号后，再次对压力波动值进行 EMD 分解得到均值压力与脉动压力，进一步研究其压力极值特性，进而判断机组的安全稳定性能。

3. 通过对研究课题工程应用实例机组甩负荷试验总结分析，针对水轮机制动工况存在明显的“S”形区域特性、导叶延时关闭规律的电站，首次在水电行业内研究出了机组甩负荷时单位流量和单位转速在四象限曲线的运行轨迹特性，以及各主要部位发生的压力极值特性。研究成果对改善抽水蓄能机组“S”形区域特性问题、优化导叶关闭规律、改善机组甩负荷时主要部位极值和压力脉动特性提供了实际经验，具有较高的借鉴意义和参考价值。

4. 首次在水电行业内系统全面的对抽水蓄能机组甩负荷试验实测数据与计算数据进行了统计与对比分析，主要包括球阀、蜗壳及尾水管进口各部位的压力极值、计算误差、压力脉动的频率和幅值特性等，对于行业内针对调节保证设计、机组甩负荷试验相关规程规范的制修订起到了借鉴作用。

糯扎渡特高心墙堆石坝安全监测关键技术研究

完成单位： 长江空间信息技术工程有限公司（武汉）

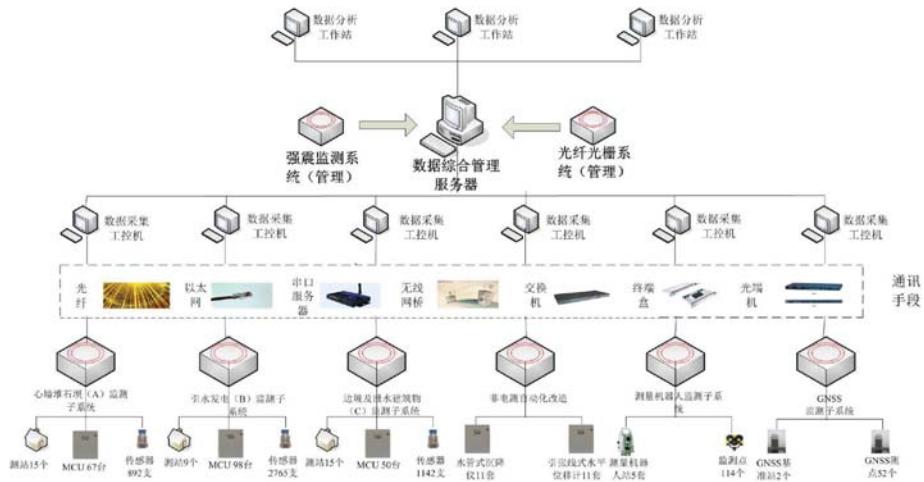
主要完成人： 杨爱明 裴灼炎 马能武 李双平 刘德军 冯小磊 叶芳毅
沈智娟 冉林 李家仁 郑敏 宋燕敏 吴瑕 李名哲

糯扎渡水电站心墙堆石坝是目前亚洲已建的最高掺砾粘土心墙堆石坝，最大坝高261.5m，安全监测规模大、仪器超规范、超量程，自动化子系统多、系统复杂，工程的设计与施工均无相关经验参照，在大坝安全监测及其自动化系统施工过程中需要解决诸多技术难题。本项目融合了测绘技术、安全监测技术、光电技术、自动控制技术、软件工程、数据库技术、通讯技术等多技术研究出多个技术成果，成功解决了超高心墙堆石坝安全监测仪器设备安装埋设保护技术难题，解决了范围广、测点种类多数量多、子系统多的自动化系统组网技术难题，分析研究了粘土心墙内部渗透压力影响机理，推动了心墙堆石坝安全监测技术的进步和自动化技术的发展。主要进展如下：

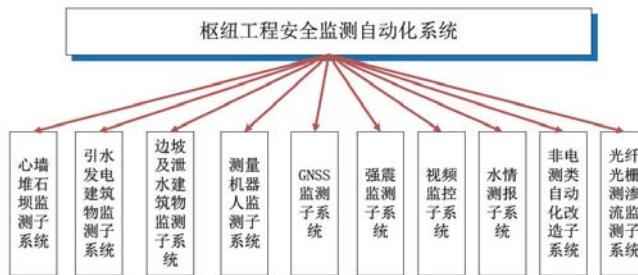
1. 研究发明了电缆阻渗环、填筑土体测斜管安装保护装置、360°棱镜与GNSS接收天线安装归心盘，实现了特高心墙堆石坝安全监测工程优质、高效施工。



2. 采用基于TCP/IP协议组网技术，解决了糯扎渡自动化大范围、多测点、多系统等复杂情况下的快速通讯及数据传输问题，提高了系统的可靠性。



3. 实现了安全监测自动化多源异构系统的集成和预警及应急预案自动触发，提高了系统的智能水平。



4. 通过对心墙堆石坝渗透压力的监测研究，揭示了心墙堆石坝心墙填筑施工孔压变化规律，为类似工程的安全评价提供依据。



该项目在特高心墙堆石坝安全监测方面具备技术的完备性、可行性，所开发研制的专项监测设备和监测技术具备技术前瞻性。项目关键技术已应用于三峡、南水北调、苗尾、向家坝、丹江口、白鹤滩、溪洛渡、黄登等水利水电工程，为工程的施工、运行安全监控提供了可靠、及时、稳定、连续的监测数据，也为工程高效管理提供了技术支持。新的监测技术减少了人力投入，提高了隐患排查率，降低了工程失事风险，具有较大的社会效益和经济效益，对推动监测技术的进步具有重要意义。

直立陡峭地形超薄双曲高拱坝建造关键技术

完成单位：中国水利水电第十二工程局有限公司

主要完成人：王锦江 徐志强 李保华 马岿平 杨为民 孙莉 葛国平 叶建洪 刘清忠 王磊

近 50 多年来，中国修建了许多拱坝。在拱坝设计理论、计算方法、结构型式、泄洪消能、施工导流、地基处理及枢纽布置等方面都有很大进展，积累了丰富的经验。四川省二滩抛物线双曲拱坝，高 240m，标志着中国在高拱坝的勘测、设计、施工和科研方面已达到一个新的水平。随着我国经济突飞猛进的发展，拱坝建设将会越来越多，应用范围将更加广阔，拱坝必定有更为广阔的应用空间。

重庆云阳盖下坝混凝土双曲拱坝工程的成功建成，给今后在直立陡峭峡谷地区的拱肩槽开挖、施工布置、双曲拱坝的型体控制及温控工艺积累薄拱坝的施工工艺、施工方法和施工管理控制等，积累了宝贵的经验。推广应用前景很好。主要进展如下：

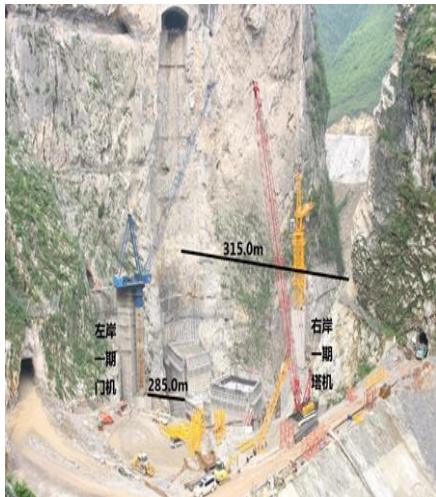
1. 提出了直立陡峭地形拱肩槽垂直开挖关键技术

研究利用左坝肩上坝公路交通洞内向下部开挖，采用倒悬开敞式爆破开挖方式，综合采用差异台阶式、三边一次成型光面控制等精准爆破技术，有效控制了爆破影响，保证了爆破精度；利用倒悬拱顶布置移动起吊设备，灵活吊运出渣设备及施工材料，有效地解决了陡峭狭窄空间爆破与出渣等施工难题。



2. 优化了直立陡峭地形超薄双曲高拱坝混凝土浇筑系统优化布置

研究采用了翻升式门、塔机混凝土垂直运输方案，成功解决了缆机难以布置的难题，有效缩短了工期（整个工程工期缩短了7个月），节约了约1220万元投资。



一期垂直运输布置图



二期垂直运输布置图

3. 研发了双曲超薄高拱坝形体控制技术

采用了计算、编程、放样和校模一体化测控技术，实现了精准快捷测量放样，单次最少节约0.3h/次。同时采用曲率可调悬臂模板，保证了双曲拱坝形体质量。

4. 优化了双曲超薄高拱坝温控防裂技术

通过优化混凝土配合比，减少水泥用量，采用预冷混凝土、移动式冷却机组随坝体浇筑分层布置等综合温控措施，保证了超薄拱坝温控效果，有效控制了混凝土裂缝。

成果应用于顺溪水电站工程，为顺溪水电站的成功建设做出了重要贡献。

南水北调中线工程若干关键施工技术研究与应用

完成单位：中国水利水电第七工程局有限公司

主要完成人：向建、王吉成、李发孝、姜暑芳、翟俊勇、王先平、王荣华、倪坤林、郭瑞、殷本林、彭锋、蒋爱民、邓鹏、文小林、刘英等

项目研究成果属于水利工程科学技术领域。本课题依托南水北调中线工程中五个标段。其中穿黄隧洞战线长、尺寸大，采用双层复合式环锚预应力混凝土衬砌结构具有“内水内排、外水外排”、内外衬独立受力；穿黄隧洞其深埋于黄河河床以下约50m，洞径7m，内衬混凝土厚度仅45cm，有粘结环向锚索间距45cm，具有大埋深、长距离、大曲率、施工强度高、工艺复杂、精度要求高、渗漏量小、洞内不具备地面运输条件等特点。其次，工程区地质条件复杂，存在非均质液化地基、淤泥质土地基等不良地质基础，地基承载力差，采用传统的桩加固技术处理上述不良地质地基难以保证加固质量，并且影响施工进度。再者，高含水膨胀土地区建渠难、加固难，破碎效率低下、换填施工工序复杂；同时，高填方渠段渠坡长、工程量大、衬砌面板薄壁无筋，采用传统的施工方法和混凝土材料进行渠道衬砌面板浇筑施工进度慢、效率低。最后，倒虹吸工程的地下水位高，地下水丰富，开挖深度深，降水难度大，承受着松散层孔隙潜水、孔隙裂隙潜水和孔隙裂隙承压水对基坑土体破坏的危险。针对各工程段存在的各种问题及难题开展课题研究，主要包括以下五个子课题。

1 穿黄隧洞预应力环锚衬砌混凝土施工关键技术

针对中线穿黄隧洞物料运输困难、施工强度高、施工组织难度大；超薄内衬混凝土施工质量控制难；小曲率半径、大吨位环锚预应力张拉施工质量控制要求高等难题，展开了混凝土高质运输研究、超薄内衬混凝土施工与质量控制研究和小曲率半径预应力环锚施工关键技术的研究。研制了混凝土垂直运输波纹弹性缓冲管和集物料运输、混凝土泵送于一体的无枕轨道穿越运输设备，保证了混凝土的运输质量，解决了高落差狭窄空间长距离混凝土运输难题；研制密窗式专用台车、铜止水固定装置，保证了大配筋率密集埋件的薄壁预应力混凝土浇筑质量和结构要求；研制了双层复合式衬砌新型结构形式，采用U型管径向限位卡和预埋导轨，固定了薄层衬砌环锚波纹管，实现了预应力环锚快速、安全、优质施工；研制了一种洞室顶拱混凝土回填装置，操作简单，施工周期短，

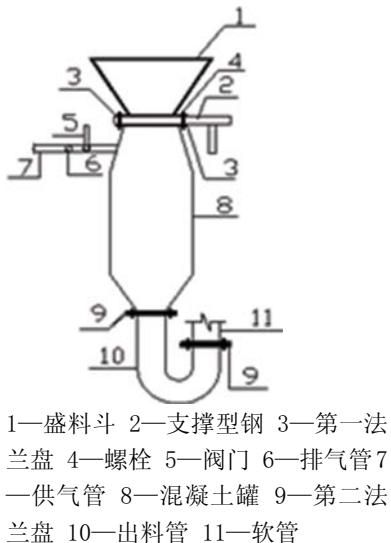


图 1 顶拱混凝土回填装置示意图

适应性强，达到了快速、密实的要求。

2 不良地质段基础加固处理施工关键技术

针对潮河段和引江济汉渠道段含有硬化夹层的非均质液化地基和淤泥质土基础施工处理困难难题，研究了非均质液化地基挤密砂石桩施工关键技术和淤泥质土地基粉喷桩加固施工关键技术，解决了坚硬夹层夹碎石桩钻孔难题，研发了新型膜袋挤密碎石桩，解决了细颗粒地层易堵塞碎石桩排水通道难题，实现了非均质液化地基的有效加固处理，制定了相应的粉喷桩施工质量控制和检验标准，提高了地基承载力、减少了不均匀沉降。

3 高含水膨胀土地基改性换填处理施工关键技术

针对鲁山南1段工程的膨胀土料粘粒含量大、含水率高，破碎效率低下、质量控制等难题开展关键技术研究，研究采用了井点降水与旋耕犁、耙松土翻晒结合的快速调降膨胀土含水率的施工技术；研制了膨胀土与掺合料双轴混合搅拌专用机械，解决了高含水膨胀土施工难题。

4 薄壁纤维混凝土机械化衬砌施工技术

针对焦作1段工程中薄壁素混凝土衬砌面板拉裂的难题，展开了纤维混凝土的性能研究和衬砌机设备适应性及机械一体化施工研究，获得了薄壁混凝土衬砌的配合比参数，改善了抗裂性和防渗性，保证了机械化施工高效、高质完成，总结了“十度”控制标准，使渠道衬砌施工质量得到保证。

5 复杂地质条件下深基坑控制性降排水施工技术

针对李河和翁涧河倒虹吸工程中深基坑地下承压水位较高，基坑承压破坏较严重等问题，研究了深基坑优控降排水施工技术，以“系统降水井+随机降水井+基础反滤垫层”预防了裂隙承压顶托破坏，采用地下连续墙技术控制深基坑优控降水，有效防止降水对基坑周边临近建筑物的沉降破坏。

课题研究形成了各项关键施工技术，获得发明专利2项，实用新型专利9项，获得省部级工法3项，出版专著1本，发表论文22篇。研究成果具有明显的理论创新、工艺突破和显著的经济社会效益。课题研究成果解决了相关工程难题，该关键技术鉴定为国际领先水平。课题的研究成果应用于工程施工全过程，保证了南水北调中线工程按期、优质、安全投入运行，实现了社会、经济和生态环境的协调、可持续发展。研究成果通过培训、指导或者技术转让为今后的水利工程大型隧洞预应力内衬施工提供参考，应用前景广阔。



图2 衬砌机械化施工

技术发明奖一等奖项目：

水泥灌浆智能控制系统关键技术及成套设备

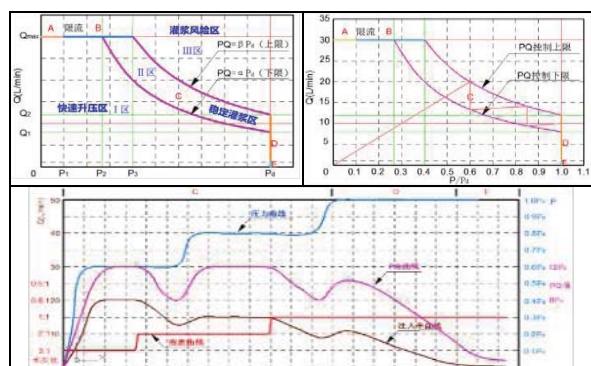
推荐单位：中国长江三峡集团有限公司

项目完成人：樊启祥 张超然 黄灿新 蒋小春 杨宗立 周绍武

基岩水泥灌浆质量关系到水电工程全生命期安全运行。即使在采用“记录仪和数字灌浆”后，灌浆过程仍然由人工操作，工艺控制还存在一些关键技术亟待解决，主要包括：配浆变浆精度低响应慢；压力流量控制响应慢易超压；升压、变浆等过程缺少时程控制；灌浆数据传输及灌浆成果易受干扰；灌浆特殊情况判定和处理依赖个人经验；灌浆数据的全面性不足；灌浆设备及管线布置凌乱。项目围绕灌浆工艺智能控制关键技术持续深入研究八年，研发了集灌浆工艺智能控制、灌浆装备轻量集成、灌浆成果在线分析为一体的水泥灌浆智能控制系统和成套装备。主要技术发明如下：

1. 发明了水泥灌浆三区五阶段智能控制模型和 P-Q-C-t 联动实时控制方法，发明了水泥灌浆六种特殊情况判断标准和实时处理策略，发明了集正常灌浆和特殊情况处理于一体的智能控制方法，满足水泥灌浆四工序、六过程、五类地层的智能控制要求

创建了水泥灌浆三区五阶段智能控制模型（iGCM），建立了压力、流量、密度时程控制关系，为水泥灌浆智能控制奠定理论基础；制定了六种灌浆特殊情况判断标准和实时处理策略，发明了灌浆工艺状态自动切换方法，基于压力 P-流量 Q-密度 C-抬动 T-温度 T-时间 t 六参数联动实现灌浆特殊情况智能识别和实时控制；发明了集常规灌浆和灌浆



特殊情况处理于一体的智能控制方法，研发了常规灌浆和特殊情况处理智能识别和控制系统，满足水泥灌浆四工序、六过程、五类地层的智能控制要求。

2. 发明了水泥灌浆智能控制数据感知传输、无级配浆变浆、压力控制等成套专利，

研发了集成式智能灌浆系统成套设备 iGC

发明了“集成式智能灌浆系统”专利，将灌浆参数感知传输系统、配浆变浆系统、压力控制系统与智能灌浆工艺控制系统集成，研制了智能灌浆单元机 iGC；发明了“灌浆记录仪传感器信号数字化传输方法及装置”等专利，研发了以五参数记录仪为核心的灌浆数据处理中心，研发了密度、流量、压力和抬动测量新方法和新设备；发明了无级配浆实现方法和小体积动态配浆方法，研发了自动配浆系统，实现精准自动配浆和无级变浆；发明了“灌浆压力波动程控方法”，建立了灌浆压力与阀门开度的数学模型，研发了压力自动控制系统，达到灌浆压力精准控制。



3. 发明了“灌浆现场过程监控方法及系统”专利，创建了复杂环境下集端网云于一体的水泥灌浆智能管理云平台（iGM）

发明了“灌浆现场过程监控方法及系统”专利，创建了复杂环境下集端网云于一体的水泥灌浆智能管理云平台（iGM）；开发了应用于移动端的智能水泥灌浆 APP，具备灌浆数据实时监控、灌浆设备调拨维护在线记录、灌浆成果防伪查询等功能，满足复杂环境下灌浆的便捷化、移动化管理；iGM 可以与工程管理信息系统和智能大坝建造系统实现数据交互和协同工作。



项目推动水泥灌浆达到智能控制水平，实现常规灌浆四工序、六过程和灌浆特殊情况智能识别和实时控制。成果在乌东德、白鹤滩工程基础加固和防渗工程中全面应用，累计完成灌浆 11 万米 ($P_{max} 6.0 \text{ MPa}$)，质量合格率 100%，是国家高质量发展规划在水泥灌浆的体现，直接经济效益 2108 万元。成果获知识产权 12 项，发明专利 5 项、实用新型 5 项，外观 1 项，软件著作权 1 项；已进入实质审查专利 24 项，发明专利 10 项、实用新型 11 项，外观设计 3 项。经鉴定研究成果整体上达到国际领先水平，经济、社会和环境效益显著，推广应用价值巨大。