

超高堆石坝枢纽工程 施工导截流关键技术研究及应用

张宗亮 李仕奇 刘兴国 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

超高堆石坝枢纽工程 施工导截流关键技术研究及应用

张宗亮 李仕奇 刘兴国 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

本书编委会

主 编： 张宗亮

副 主 编： 李仕奇 刘兴国 刘兴宁 唐先奇 和孙文

参编人员： 张社荣 徐卫亚 周宜红 陈贵斌 张廉荣
曹军义 梁礼绘 李光华 刘琼芳 张万全
王 强 李晓燕 岑黛蓉

参加研究单位和人员

中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院：

张宗亮 李仕奇 刘兴宁 陈贵斌 李光华 曹军义 梁礼绘
刘琼芳 张万全 王 强 李晓燕 岑黛蓉 杨宏斌 李 敏

云南华能澜沧江水电有限公司：

刘兴国 吴 敏 沈嗣员 谷 涛

中国人民武装警察部队水电一总队：

唐先奇 吴桂耀 黄宗营 张礼宁 贺博文

中国水利水电第十四工程局有限公司：

和孙文 张廉荣 凌征华 李 飞 张春洪 杨保才 徐 萍

天津大学：张社荣 顾 岩 祝 青 彭敏瑞 黄 虎

河海大学：徐卫亚 褚卫江 周家文

三峡大学：周宜红 童富果

获悉《超高堆石坝枢纽工程施工导截流关键技术研究及应用》一书即将付梓，欣然为之作序。

众所周知，堆石坝由于其具有对地质条件适应性强、能就地取材、建筑物开挖料利用充分、工程经济效益好等优点，随着施工技术和施工重型机械的发展，堆石坝在水电开发过程中得到了广泛应用和快速发展。尤其是在西南高山峡谷地区，由于其交通及地形地质等条件的制约，堆石坝的优势更为明显。20世纪90年代至21世纪初，小浪底（坝高160m）、天生桥一级（坝高178m）、洪家渡（坝高179.5m）、水布垭（坝高233m）等200m级超高堆石坝工程的成功建设和运行，标志着我国高堆石坝设计、施工技术已步入世界先进行列。21世纪以来，糯扎渡（坝高261.5m）、古水（坝高310m）、如美（坝高315m）、两河口（坝高295m）、双江口（坝高314m）等300m级超高堆石坝工程的建设或启动，也必将进一步推动我国和世界高堆石坝技术的发展。

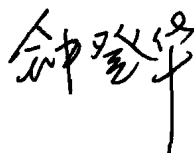
施工导截流是采用工程措施，利用导流建筑物，控制河道水流下泄，由围堰或大坝挡水，使天然径流全部或部分改道，形成对枢纽工程的施工围护，保证施工在干场地内正常进行。施工导截流直接影响到堆石坝枢纽工程建设进度，对工程防洪度汛和安全施工以及向下游供水等方面起到极其重要的作用，是工程建设顺利实施的关键。近年来随着水电工程建设速度的加快以及施工质量要求的提高，施工导截流技术的研究就显得尤为重要。

中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院（以下简称昆明院）自20世纪90年代起就依托天生桥一级面板堆石坝工程对施工导截流技术进行了系统的研究，创新和实践了诸如大断面导流洞一次支护和薄壁混凝土衬砌、过水围堰及堆石坝过流保护、“瓶塞式”导流洞新型堵头等一批关键技术，并先后被国内其他高堆石坝工程借鉴和应用，使昆明院的施工导截流技术处于国内领先水平。近些年昆明院又依托糯扎渡心墙堆石坝工程，在之前成果的基础上又创新出大跨度、不良地质条件下隧洞开挖程序、一次支护和薄壁衬砌设计、大跨度浅埋深隧洞洞口平顶开挖设计施工技术、80m级高复合土工膜斜墙围

堰设计及快速施工技术等关键技术，并已成功在糯扎渡工程中实践。随着糯扎渡导截流建筑物的顺利建设和成功实现大江提前截流，进一步巩固了昆明院在施工导截流技术研究方面的国内领先地位，使我国和世界导截流技术登上一个新的台阶。

本书依托天生桥一级、糯扎渡两座高堆石坝工程，理论联系实际，从施工导截流设计、科研、试验、施工等方面开展了深入的研究和探讨，系统阐述了昆明院近二十年超高堆石坝导截流设计理论及其工程应用。我相信，本书的出版对于推动我国水利水电高堆石坝工程施工导截流技术的发展具有重要理论意义和实践价值；同时，也将会给广大高堆石坝工程施工导截流设计、施工和管理人员提供有益的借鉴和参考。

中国工程院院士



2011年6月16日

序二

堆石坝是最古老的一种坝型，然而在我国，高堆石坝的设计、建设和堆石坝现代筑坝技术的启蒙却是新中国成立之后的事。随着我国水电建设事业的迅猛发展，一批高堆石坝和超高堆石坝工程竣工运行，我国超高堆石坝筑坝技术取得跨越式的发展——设计理论方法日臻完善，施工机械设备配套齐全，建设管理水平不断提高，网络信息技术广泛应用，工程安全质量更加可靠。目前，我国现代堆石坝筑坝技术已经达到国际先进水平，有些方面甚至处于国际领先水平，引领世界筑坝技术的发展方向。成绩实属不易，这其中凝聚着诸多工程技术人员和专家学者的辛勤劳动和不懈坚持。

中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院（以下简称昆明院）在堆石坝筑坝技术创新上的贡献尤为突出。不同历史时期，一批又一批承前启后、专心致力于堆石坝技术发展创新的精英团队为筑坝技术的创新付出了艰辛的努力。早在20世纪70年代，昆明院就已承担并完成了高度82.5m、被誉为“亚洲第一土坝”的毛家村水库黏土心墙堆石坝的勘察设计任务；80年代，完成了高度103.8m的鲁布革水电站心墙堆石坝工程，这也是国内第一个采用世界银行贷款和实行业主负责制、招标承包制、建设监理制的水电工程；90年代，完成了天生桥一级水电站混凝土面板堆石坝的设计，最大坝高178m，该大坝建成时，其坝高为同类坝型的亚洲第一，世界第二。21世纪初，糯扎渡水电站开工建设，糯扎渡心墙堆石坝最大坝高261.5m，为中国第一高堆石坝，同类坝型中世界第三，并即将蓄水投运，它将我国已建在建心墙堆石坝高度在小浪底水利枢纽大坝高度上一次性提升了100m。以上四项工程均是我国堆石坝筑坝技术发展史上具有划时代意义的典型工程，是我国堆石坝勘察设计、科学研究、工程建设、运行管理等技术发展与创新应用的标志，充分体现了昆明院人“十年磨一剑”的开拓创新精神和无私奉献精神。

《超高堆石坝枢纽工程施工导截流关键技术研究及应用》是昆明院联合高等院校、科研院所和施工单位，依托天生桥一级、糯扎渡两座高堆石坝工程建设，以设计技术创新为主体，针对导截流关键技术开展攻关工作的产学研用创新成果和工程实践。本著述归纳总结了高堆石坝枢纽工程的导截流设计、施工技术

和建设管理的成功经验；探索建立了超高堆石坝施工导截流工程设计理论、方法和施工技术。实践证明，这套理论方法能够显著提升设计效率和施工技术水平。特别是在以下几个方面，具有鲜明的特点和创新性。

(1) 大型地下洞室开挖支护程序和薄壁衬砌结构设计理论。糯扎渡水电站导流隧洞，开挖断面尺寸达 $19.4\text{m} \times 24.2\text{m}$ (宽 $\times$ 高)，合理的开挖支护程序使巨型导流隧洞成功穿越由破碎岩、高岭土充填的宽达 40m 的 F_3 断层。在导流隧洞结构设计中，依靠围岩自稳能力和围岩一次支护加固作用原理，采用复合薄壁衬砌结构，仅用 22 个月就完成了长达 2200m 的巨型导流隧洞，实现了工程提前 1 年截流。

(2) 在不断总结实践经验的基础上，创新性提出了“悬吊、预锚、超前固和支撑”的大跨度浅埋深隧洞洞口平顶开挖设计与施工技术。糯扎渡水电站 2 号导流洞进口渐变段开挖断面尺寸 $27.6\text{m} \times 26.3\text{m}$ ，采用平顶一次开挖成型，既保证了洞口的施工安全质量，又加快了施工进度，节省了工程投资，其设计和施工技术达到世界先进水平。

(3) 糯扎渡水电站上游围堰高 82m ，科学合理的断面设计、材料分区及土工膜防渗技术的应用，成功解决了高土石围堰沉降变形对岸坡和基础防渗体的适应性。围堰施工中，73 天完成围堰填筑总量 135万 m^3 ，日平均填筑强度 1.33万 m^3 ，日平均填筑上升速度 1.16m ，刷新了狭窄河谷、复杂工序条件下围堰施工强度的新纪录。

(4) 天生桥一级水电站导流隧洞封堵设计中，最早提出在导流隧洞堵头段扩挖，并按“瓶塞式”原理进行封堵体体型设计。封堵体最大挡水 165m ，堵头长度仅为 21m ，既大幅缩短了封堵体长度，又可简化施工工序。同时采用低热膨胀性水泥材料、混凝土风砂枪冲毛技术、新型止浆材料等多种新材料、新工艺，有力推动了水工隧洞封堵体设计和施工技术的发展。这些技术在后来的数十座水电站导流隧洞封堵体设计中得到借鉴和应用。

(5) 在天生桥一级水电站上下游过水围堰和堆石坝体过流保护设计中，采用混凝土面板、堆石体内水平锚筋和钢筋网保护技术，结构新颖，有效解决了高速水流冲刷、回流淘刷、渗透变形等技术难题。这一技术在我国堆石坝工程采用枯期导流方式和过水保护设计方面，勇开先河，敢为人先，后在国内已建成的多座面板堆石坝工程中推广应用。

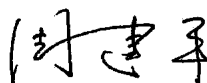
21 世纪以来，按照贯彻落实科学发展观，实行国民经济社会协调、可持续、全面发展的要求，必须在做好生态保护和移民安置工作的基础上积极发展水电。到 2020 年，实现非化石能源消费占一次能源消费的比重达到 15% 的目标，水电的比例要占其中的 52% 以上，水电在能源消费中的比例要达到 8%，相应的常

规水电规模 3.5 亿 kW。因此必须重点推进西部地区大型水电站建设，开发国家级大型水电能源基地，进一步扩大西电东送规模，促进国家能源结构优化调整。毫无疑问，这必将给水电工程技术的进一步发展带来新的契机。

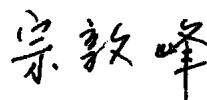
西部水电工程建设条件复杂，任务艰巨，必须要继续探索和创新，不断克服新的困难和解决新的难题。施工导流作为一门相对独立的专业，它贯穿工程建设的全过程，融合了水力学、工程结构、施工方法、施工进度和工程管理等学科。导截流方案设计的科学合理，直接表现于其安全性、经济性和可实施性。本著述全面介绍了堆石坝枢纽工程施工导截流关键技术的设计研究成果；阐述了如何在工程建设中将理论研究和工程实践实行无缝衔接；提出了导截流风险决策、导流建筑物消能防冲等研究课题和大型水库控制蓄水、分层供水等环保理念，不愧是高堆石坝设计建设方面难得的具有重要参考价值的著作。

本书由昆明院牵头，参与工程建设的其他有关各方，包括联合攻关的高等院校、科研院所共同著述，编著者都是始终直接参与现场一线设计建设和科学研究的主要技术人员，他们将亲身经历的工程实践和科学研究的成果，毫无保留地无私地奉献给广大读者，必将进一步提升我国高堆石坝施工导截流设计建设的水平，激励和启发水电工程建设者不断探索创新和技术进步，攀登新的高峰，故乐之为序。

中国水电工程顾问集团公司总工程师



中国水利水电建设集团公司总工程师



2011 年 6 月 16 日

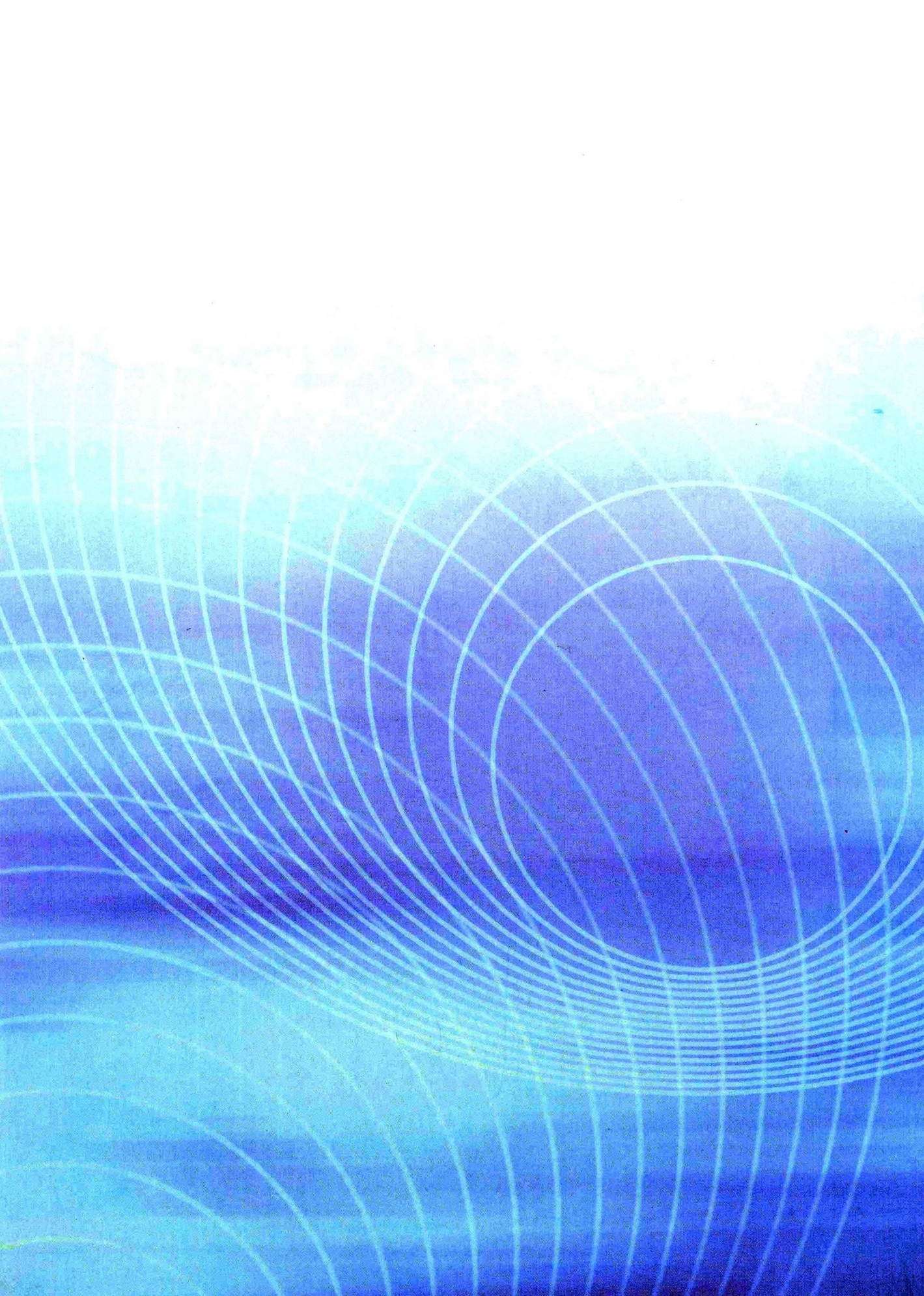
河道水流控制技术
是水电工程建设的关键

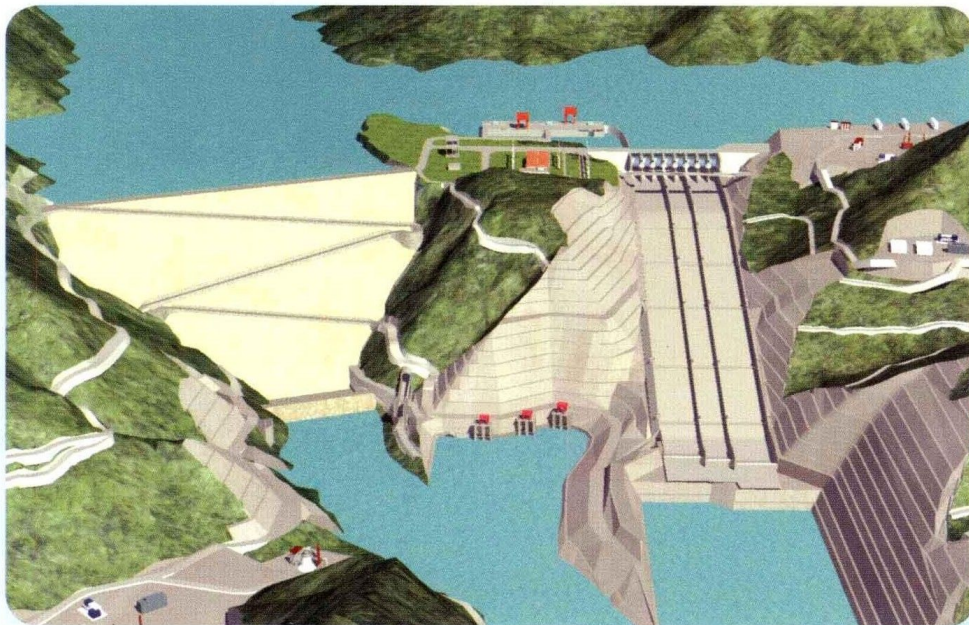
中国工程院院士

马洪琪

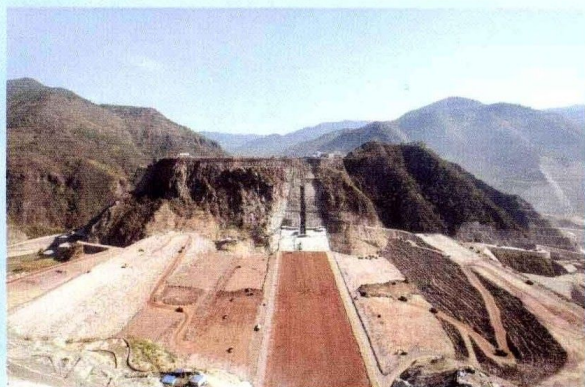
2011年6月

马洪琪院士题词

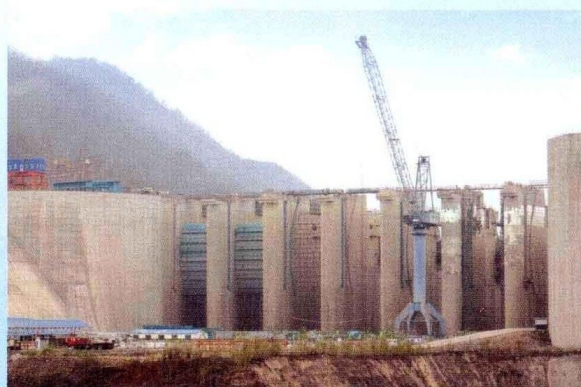




糯扎渡水电站装机容量5850MW，水库总库容为 $237.03 \times 10^8 \text{m}^3$ ，心墙堆石坝高261.5m，为同类坝型世界第三、中国第一。工程于2007年11月大江截流，计划于2011年11月下闸蓄水，2012年7月首台机组发电



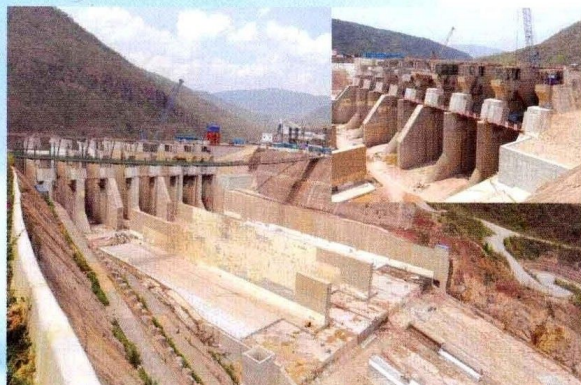
糯扎渡水电站大坝填筑施工



糯扎渡水电站溢洪道闸室施工



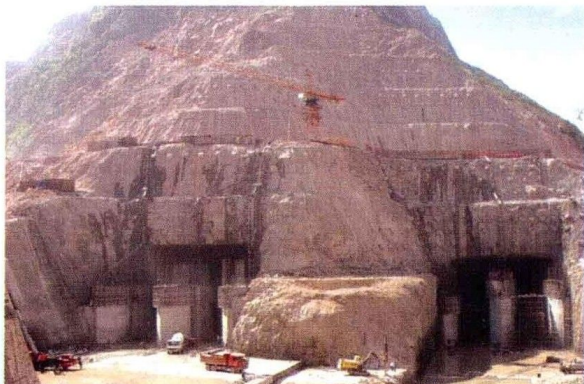
糯扎渡水电站岸塔式电站进口宽225m、高87m，分上下层，共18个 $7\text{m} \times 12\text{m}$ （宽 $\times$ 高）孔口，运行期将实现分层取水



糯扎渡水电站开敞式溢洪道最大设计泄量为 $31318 \text{m}^3/\text{s}$ ，泄洪落差182m，泄槽最大流速 52m/s ，泄洪功率55860MW，泄洪功率居世界第一



超高堆石坝枢纽工程 施工导截流关键技术研究及应用



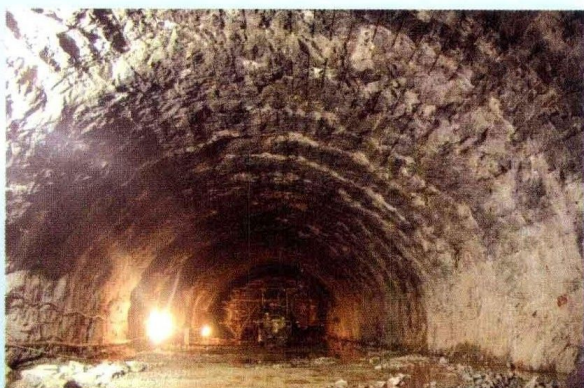
糯扎渡水电站1号导流洞渐变段，采用起微拱的开挖施工方法



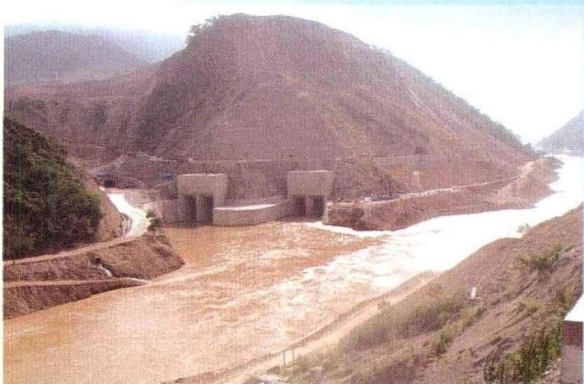
糯扎渡水电站2号导流洞渐变段，最大断面尺寸 $27.6\text{m} \times 26.3\text{m}$ ，采用平顶一次开挖成型



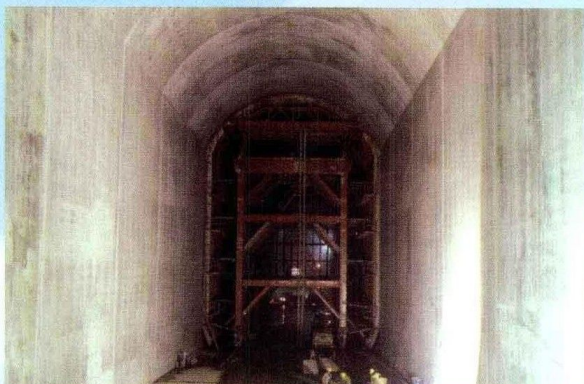
糯扎渡水电站3号导流洞进口渐变段采用“中隔墩法”分幅开挖



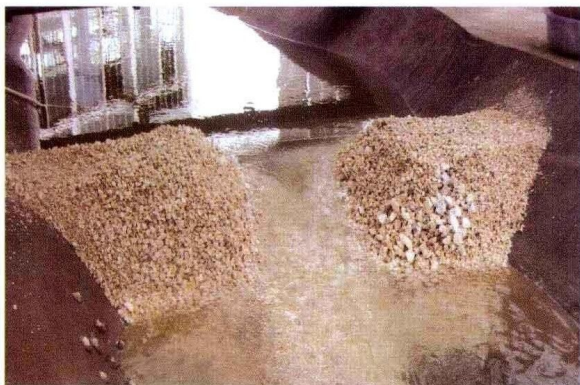
糯扎渡水电站1号导流洞上层开挖施工，开挖跨度达 19.6m



糯扎渡水电站1号、2号导流洞过流，单洞最大设计流量 $6934\text{m}^3/\text{s}$



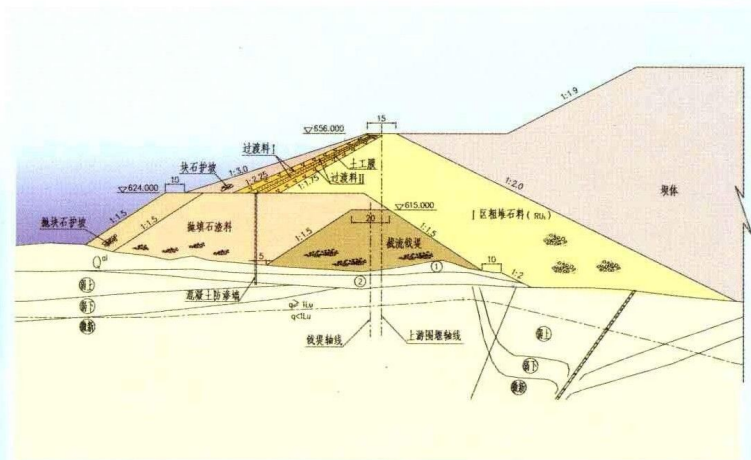
糯扎渡水电站1号导流洞混凝土衬砌，内空尺寸 $16\text{m} \times 21\text{m}$



糯扎渡水电站工程截流模型试验



糯扎渡水电站于2007年11月实现大江截流



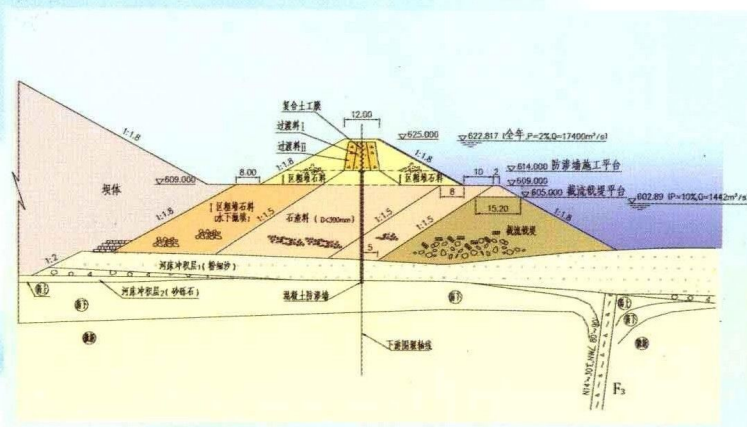
糯扎渡水电站上游围堰结构图



糯扎渡水电站上游围堰基础混凝土防渗墙快速施工



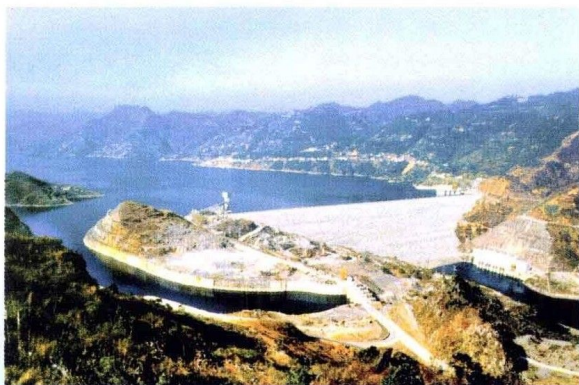
糯扎渡水电站上游土工膜斜墙围堰，填筑总量 $135 \times 10^4 \text{m}^3$ ，填筑时间73天，日平均填筑强度 $1.33 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ，日平均填筑上升速度 $1.16\text{m}/\text{d}$



糯扎渡水电站下游围堰结构图



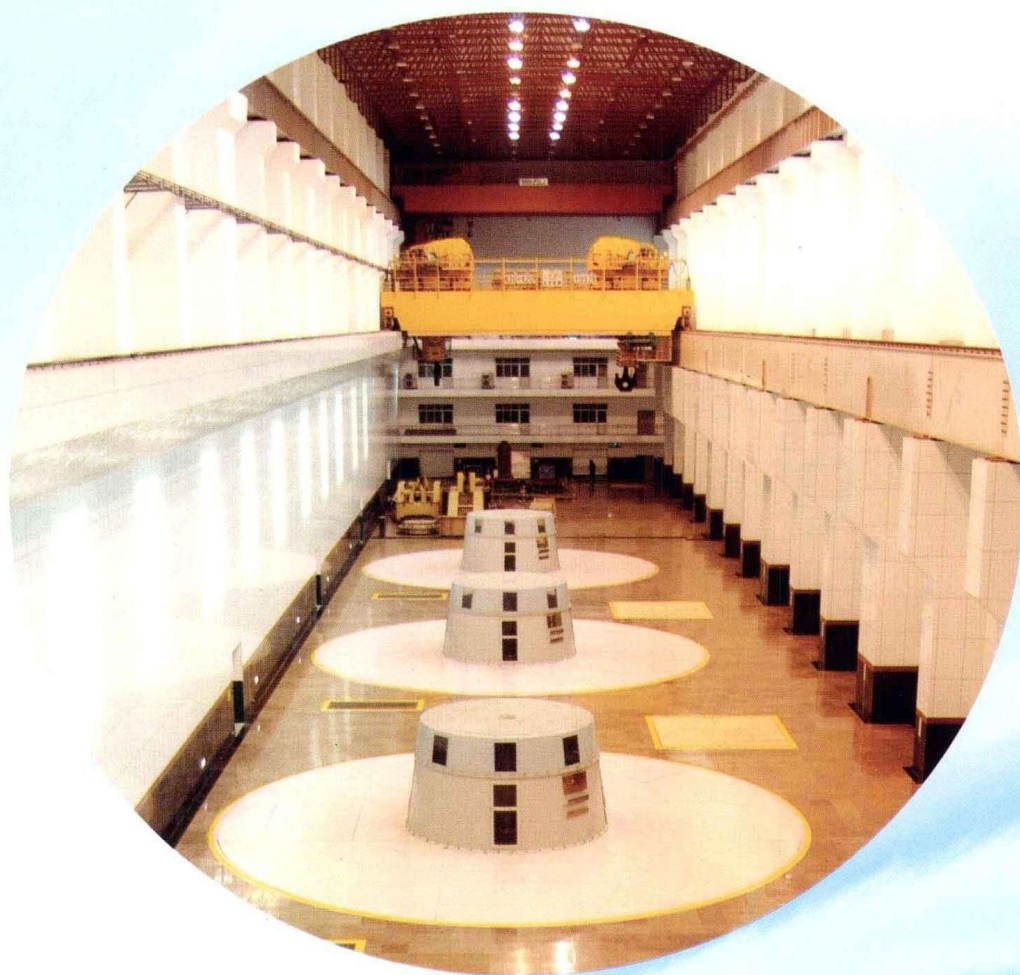
超高堆石坝枢纽工程 施工导截流关键技术研究及应用



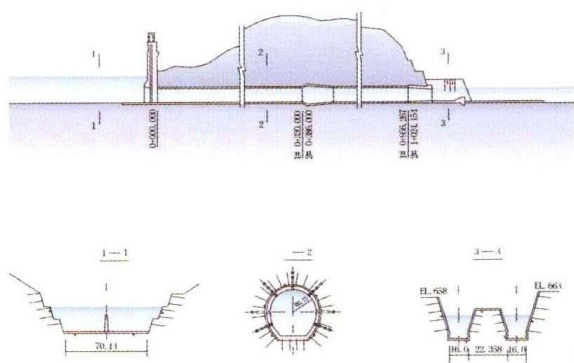
天生桥一级水电站装机容量1200MW，水库总库容 $102.6 \times 10^8 \text{m}^3$ ，混凝土面板堆石坝高178m。电站于1998年12月首台机组发电，2000年竣工，建成时坝高为同类坝型世界第二、亚洲第一



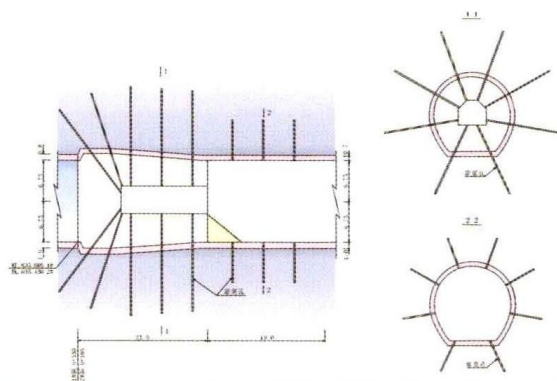
天生桥一级水电站于1994年12月实现大江截流



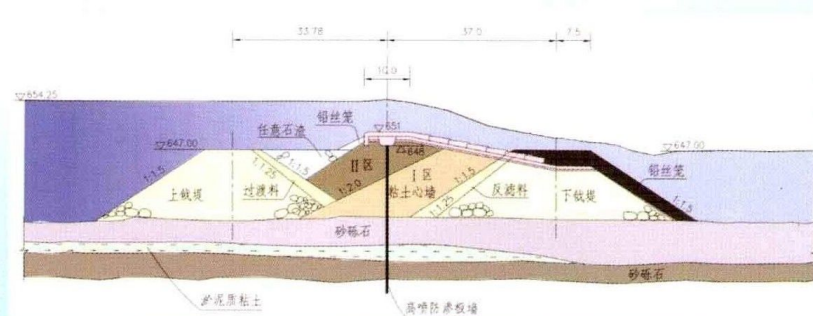
天生桥一级水电站主厂房内安装四台300MW水轮发电机组



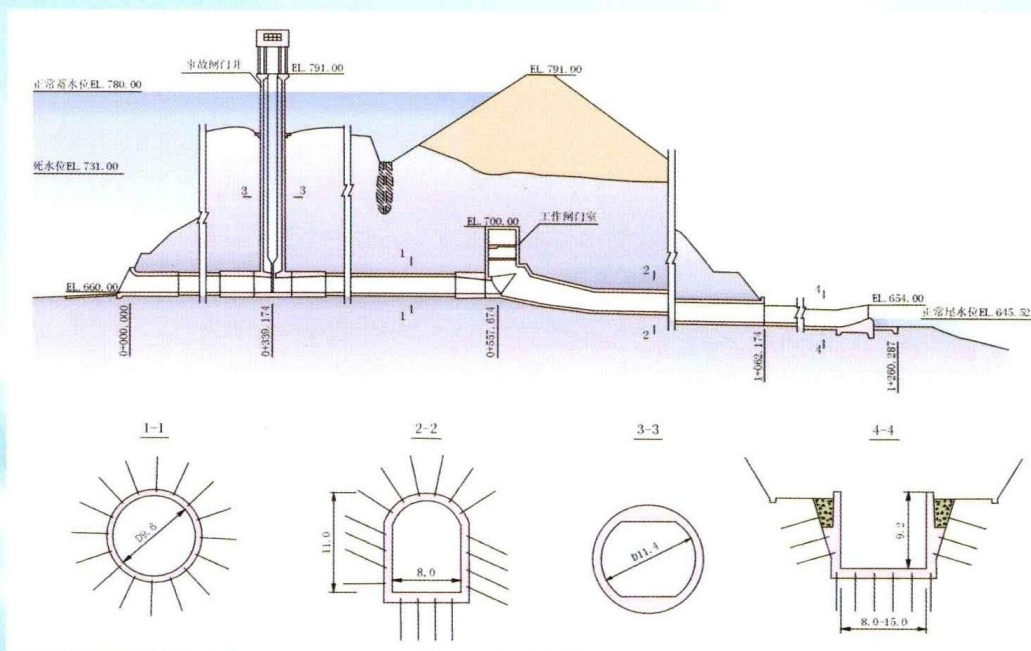
天生桥一级水电站设置两条导流洞，为修正马蹄型，内空尺寸为13.5m × 13.5m



天生桥一级水电站“瓶塞式”导流洞堵头，堵头长度为21m



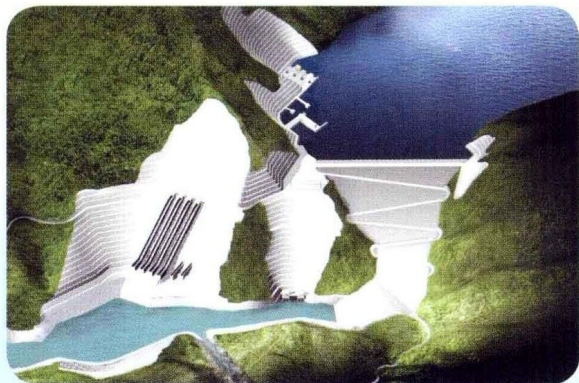
天生桥一级水电站上游过水土石围堰结构图



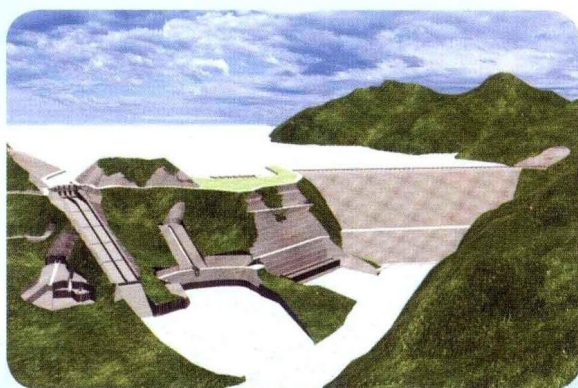
天生桥一级水电站放空隧洞圆形有压段直径为9.6m，闸后无压段尺寸为8m × 11m，采用浅覆盖大断面弧形控制闸门室



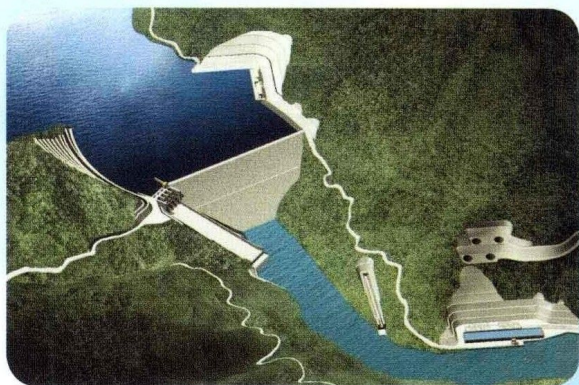
超高堆石坝枢纽工程 施工导截流关键技术研究及应用



古水水电站拟建心墙堆石坝，最大坝高305m，装机容量2600MW，水库总库容 $39.12 \times 10^8 \text{m}^3$



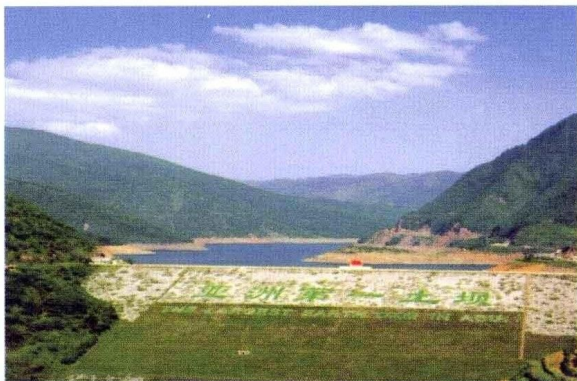
其宗水电站拟建心墙堆石坝，最大坝高310m，装机容量3660MW，水库总库容 $100.09 \times 10^8 \text{m}^3$



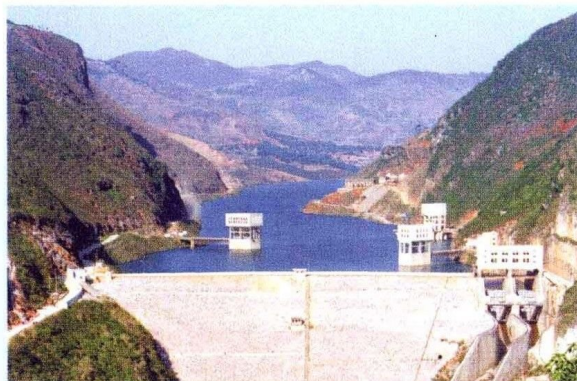
梨园水电站拟建面板堆石坝高155m，电站装机容量2400MW，水库总库容为 $7.27 \times 10^8 \text{m}^3$



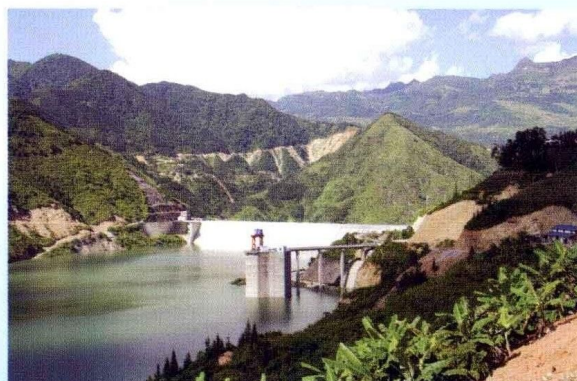
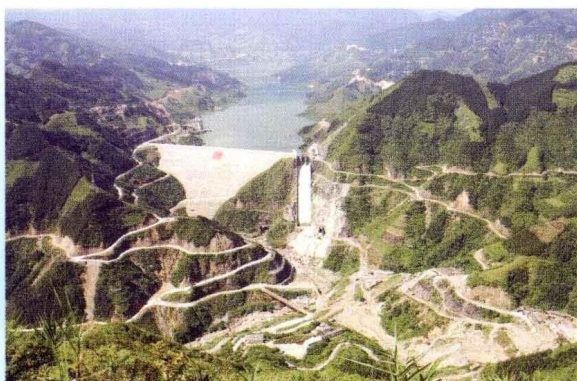
戛洒江一级水电站拟建混凝土面板堆石坝高176m，电站装机容量270MW，水库总库容 $14.91 \times 10^8 \text{m}^3$



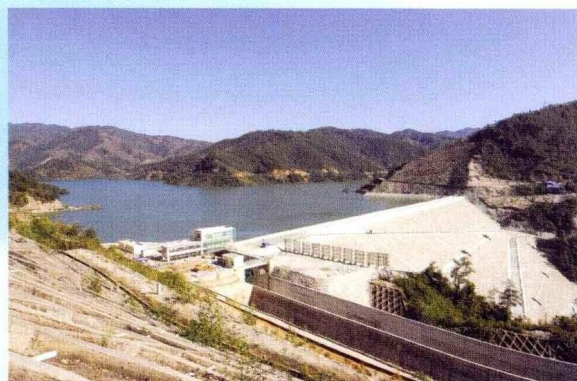
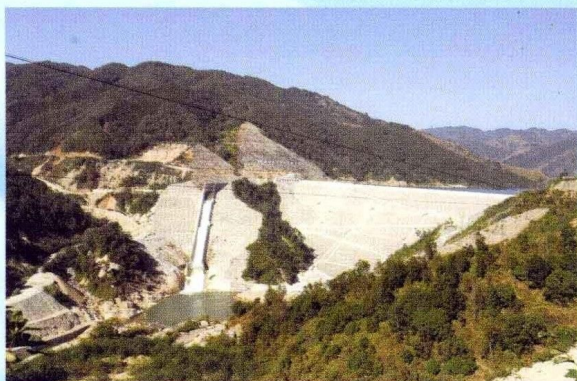
毛家村水库总库容 $5.53 \times 10^8 \text{m}^3$ ，黏土心墙坝高82.5m，大坝于1967年建成，誉为“亚洲第一土坝”



鲁布革水电站装机容量600MW，水库总库容 $1.11 \times 10^8 \text{m}^3$ ，心墙堆石坝高103.8m，工程于1988年竣工。为国内第一个采用世界银行贷款和实行业主负责制、招标承包制、建设监理制的水电工程



马鹿塘二期水电站装机容量240MW，水库总库容 $5.36 \times 10^8 \text{m}^3$ ，混凝土面板堆石坝高154m。工程由中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院实行工程总承包，于2009年竣工投产



苏家河口水电站装机容量315MW，总库容 $2.25 \times 10^8 \text{m}^3$ ，混凝土面板堆石坝高131.5m，工程于2010年竣工