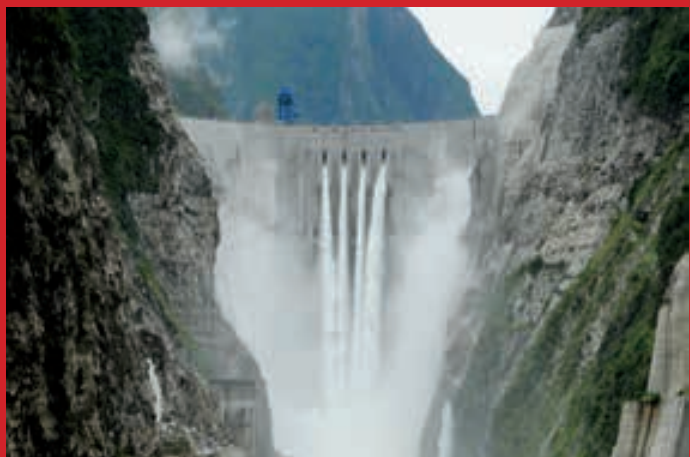




水利水电工程是我国重要的基础设施，是大型土木工程。新中国成立以来，我国建设的大量水利水电工程在抵御洪旱灾害、优化水资源配置、改善水生态环境、促进流域区域协调发展等方面发挥了重要作用。我国已成为水库大坝数量世界最多、水电装机容量世界最大、坝工领域科技创新最多的国家，尤其是近年来建成的一批世界级规模和综合难度的水利水电工程，成为我国引领国际水利水电发展的重要标志，并有力促进了我国水电技术走向世界，形成了强大的国际竞争力。

黄河小浪底水利枢纽是黄河治理开发的关键性控制工程，是世界最复杂、最具挑战性的水利工程之一。工程在基础深混凝土防渗墙施工、高含沙水流进水口防淤堵、大规模洞室群进出口高边坡加固技术等方面取得了众多技术创新。工程投运使黄河下游防洪标准由60年一遇提高到千年一遇，黄河下游河道20年不淤高，生态环境显著改善。获2009年国际里程碑工程奖，得到国际广泛认可。

云南澜沧江小湾水电站大坝在建时为世界最高拱坝，是

世界上承受水荷载最大的双曲拱坝，在特高拱坝结构和抗震安全设计、700m级特高边坡及坝基开挖卸荷松弛处理等方面取得重大技术突破，形成了300m级特高混凝土拱坝设计理论和筑坝关键技术体系。获2016年国际里程碑工程奖，得到国际广泛认可。

雅砻江锦屏一级水电站工程拱坝最大坝高305m，为世界已建最高坝。在建设过程中成功解决了高陡边坡、高地应力、高水头、深部卸荷裂隙等世界级技术难题，取得了众多技术创新和突破，获2015年世界工程组织联合会杰出工程建设奖，得到国际广泛认可。

湖北清江水布垭水电站大坝是世界已建最高的面板堆石坝，研发应用了现代最先进的混凝土面板堆石坝技术，代表了该坝型建设的最高水平。在大坝变形控制、渗流控制、施工与质量控制以及安全监测与反馈分析等方面取得重大技术进步，形成了200m级高面板坝设计理论和筑坝技术体系。获2009年国际里程碑工程奖，得到国际广泛认可。

黄河小浪底水利枢纽

开工时间	1991年9月1日
竣工验收	2009年4月
总装机容量	1800MW
电压等级	220kV

一、工程概况

小浪底工程位于河南省洛阳以北40km黄河干流上，坝址上游距三门峡水利枢纽130km，下距黄河花园口128km，控制流域面积69.4万km²，是国家“八五”重点建设项目，“以防洪、防凌、减淤为主，兼顾供水、灌溉和发电，蓄清排浑，除害兴利，综合利用”为开发目标的一等工程。

小浪底工程主要由大坝、泄洪排沙系统和引水发电系统组成。主坝为壤土斜心墙堆石坝，最大坝高160m，坝顶长1667m，坝下混凝土防渗墙21093m²，最大造孔深度81.9m，墙厚1.2m。坝体总填筑量5073万m³，水库壅高水头140m，总库容126.5亿m³。泄洪排沙系统包括进水塔群，由导流洞改建的3条直径为14.5m的孔板消能泄洪洞，3条断面尺寸为（10.0~10.5m）×（11.5~13.0m）的明流泄洪洞，3条直径为6.5m的排沙洞，一条正常溢洪道

和一条非常溢洪道，一座两级消能的消力塘。引水发电系统包括6条直径为7.8m的引水发电洞，一座长251.5m、跨度26.2m、最大开挖高度61.4m的地下厂房，一座主变室，一座尾水闸门室和三条断面为12.0m×19.0m的尾水洞，一座6孔防淤闸，一座228.5m×153.0m的220kV地面式开关站。

电站安装6×300MW混流式水轮发电机组，总装机容量1800MW。电站主接线采用双母线双分段带旁路接线方式，电压等级为220kV，出线6回，是河南电网重要的调频、调峰和事故备用电站。

金属结构设备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。共有124个孔口，各种闸门72扇，拦污栅26扇，启闭机74台套。

小浪底前期准备工程1991年9月1日开工，1994年4月21日通过水利部主持的前期准备工程验收。主体工程1994年9月12日开工，1997年10月28日截流，1999年10月25日下闸蓄水，2001年12月31日主体工程完工，2009年4月通过了国家发展改革委和水利部共同主持的竣工验收。



主坝



黄河小浪底水利枢纽鸟瞰图

二、科技创新与新技术应用

- 1 深厚覆盖层混凝土防渗墙施工技术。采用厚1.2m的混凝土防渗墙，其最大造孔深度81.9m，是我国同地质条件下最深的防渗墙；在国内外首次采用“横向槽孔填充塑性混凝土保护下的平板式接头”新工艺。
- 2 多级孔板洞消能防冲技术。首次在世界上采用多级孔板消能技术，将3条直径14.5m的导流洞改建为永久的泄洪洞，不仅解决了枢纽泄洪排沙建筑物总布置的困难，还节约投资3.8亿元。经专家鉴定该技术达到国际领先水平。
- 3 地下洞室群进出口高边坡处理技术。对进水塔后、出口消力塘上游坡开挖形成的岩石高边坡，分别采用了系统喷锚、预应力锚索、混凝土面板、排水降压、去头减载、混凝土抗滑桩、混凝土支墩等综合处理措施。
- 4 复杂地质条件下洞室群施工处理技术。导流洞改建为多级孔板消能泄洪洞；排沙洞施工中采用了无粘结预应力混凝土衬砌技术；发电洞压力钢管和衬砌混凝土之间接触灌浆采用了FUKO灌浆新技术，可以进行多次灌浆，确保灌浆质量。
- 5 水轮机综合抗磨技术。采用了低参数抗磨水轮机、设置筒形阀、喷涂抗磨材料等新技术、新工艺、新材料，减轻了设备的磨损，成功解决了黄河汛期发电问题。

小浪底工程自1999年10月投入初期运用，至2008年底，已连续9年安全度汛，有效缓解了下游洪水威胁，基本解除了下游凌汛威胁；水库泥沙总淤积量约24.11亿 m^3 ，水库拦沙和调水调沙使下游河道由建库前的淤积抬高转变为冲刷下切，主河槽最小过流能力由1800 m^3/s 提高到约3810 m^3/s ；增强了水资源调控能力，提高了下游引黄灌区的灌溉保证率，缓解了下游生产和生活用水紧张局面，为实现黄河下游不断流发挥了重要作用；累计发电370亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，提高了电网的安全性和供电质量，有效缓解了河南电网供电紧张局面；大片湿地的形成，为各种水生生物提供了良好的栖息地，改善了小浪底库区和下游河口地区的生态环境。



调水调沙



进水塔



大坝填筑



大河截流

云南澜沧江小湾水电站

开 工 时 间 2002年1月
竣 工 时 间 2015年12月
总 装 机 4200MW
总 投 资 370.83亿元

一、工程概况

该工程是“国家重点工程”、“国家西部大开发战略标志性工程”，位于云南省凤庆县与南涧县交界的澜沧江中游河段，系澜沧江中下游河段规划八个梯级中的第二级，是澜沧江中下游河段的控制性水库电站。由华能澜沧江水电股份有限公司投资建设，工程以发电为主，兼有防洪、灌溉、拦沙及航运等综合利用效益。

工程枢纽由混凝土双曲拱坝、左岸泄洪洞、地下厂房和右岸引水发电系统等组成。大坝坝高294.5m，坝顶弧长892.786m，坝身布置5个表孔、6个中孔和2个放空底孔，工程建设时是世界最高拱坝，也是世界上承受水荷载最大的拱坝，在设计和建设中解决了多项世界级技术难题。水库总库容150亿m³，是澜沧江中下游河段的龙头水库，具有多年调节性能。工程边坡高达700m，大坝坝顶高程1245m，水库正常蓄水位1240m，死水位1166m，汛期限制水位1236m。电站安装6台单机700MW世界上水头最大、转速最高的混流式机组，总装机4200MW，多年平均发电量190亿kW·h，保证出力1778MW，为一等大(I)型工程。工程建成以来，历经多次正常蓄水位考验，运行状况良好。大坝最大渗流量仅2.78 L/s，为世界同类工程最优。

工程于2002年1月开工建设，2015年12月竣工，总投资370.83亿元。



小湾特高拱坝



引水发电系统进水口



小湾边坡开挖工艺被谭靖夷院士称为“艺术品”



雄伟的小湾特高拱坝庐山真面目



小湾特高拱坝泄洪全貌

二、科技创新与新技术应用

1 创立了特高拱坝结构设计新理论，确定了合理体型，优化了大坝混凝土配合比，发明了可预防高压水劈裂的柔性防渗体系等措施，解决了特高拱坝结构安全问题，成功实现了世界特高拱坝由坝高272m到294.5m跨越。

2 针对地震加速度 $0.313g$ 的抗震安全难题，提出了新的特高拱坝抗震安全设计方法和拱坝体系整体失效的定量准则，提出了跨横缝抗震钢筋及坝顶安装减震装置等措施。成果纳入了国家标准并广泛应用于之后的众多工程。

3 针对700m级特高边坡及坝基开挖卸荷松弛处理难题，研制出了新型锚固钻机及荷载分散型锚索施工技术，建立了三维边坡稳定下限分析方法，形成了特高边坡及坝基处理成套技术。

4 针对大体积混凝土防裂施工和安全监控难题，提出增加中期冷却并实现了小温差、早冷却、慢冷却的施工技术，建立了特高拱坝温控标准。建立了具有预测、预警和结果三维可视等新的功能的特高拱坝安全监测实时分析系统，实现了大坝工作性态全过程实时安全监控。

5 工程重视节能、节地、节水、节材和环境保护。通过优化开关站布置和骨料运输及加工系统，在节能的同时，节约土地1000余亩；充分利用开挖料，节约石料400万 m^3 ；施工用水循环利用，减少用水280万 m^3 。工程共节约投资2.8亿元。建立了珍稀动、植物保护区和自然保护区，取得了良好的成效。

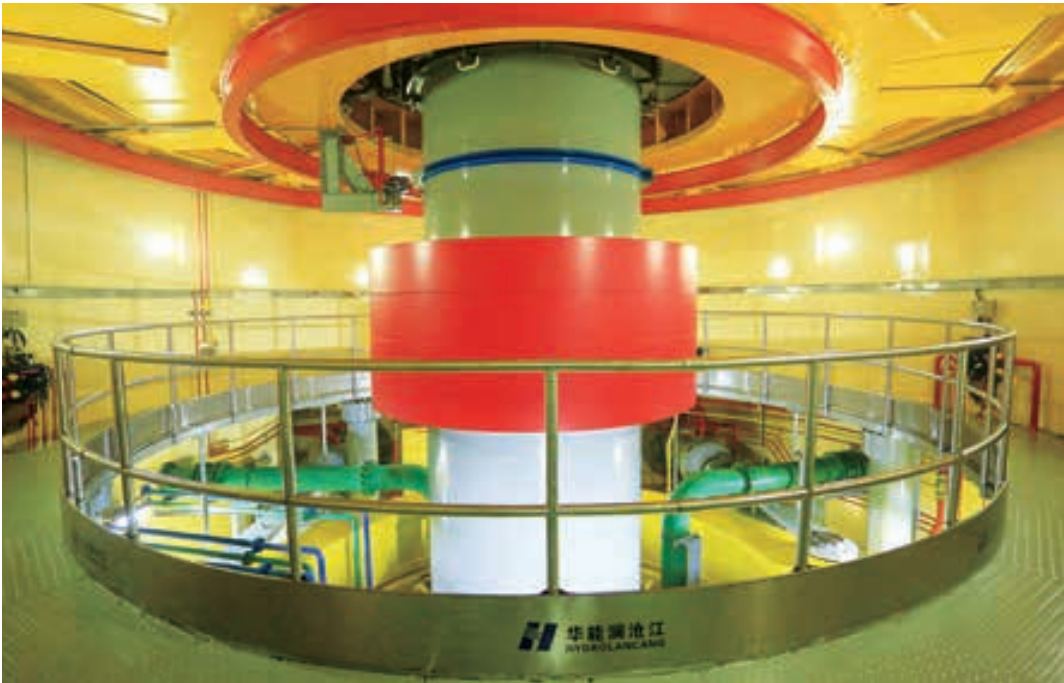
6 工程建成以来累计发电1415亿 $kW \cdot h$ ，贡献税收90亿元，龙头水库的调节性能使下游电站每年增加电量62亿 $kW \cdot h$ 。工程经济和社会效益巨大。



高坝大库



安装有6台单机700MW混流式机组的地下厂房



当今世界单机容量700MW级水头（87m）
最大、转速（ $n_r=150r/min$ ）最高的水轮机



璀璨灯光下的小湾水电站夜景

雅砻江锦屏一级水电站工程

开 工 时 间	2005年9月
竣 工 验 收	2016年4月
装 机	3600MW
库 容	77.6亿m³
总 投 资	401.7亿元

一、工程概况

雅砻江锦屏一级水电站工程，坝高305m，是目前世界所有坝型中的第一高坝。该工程装机3600MW，库容77.6亿m³，是一等大（1）型工程，大坝为混凝土双曲拱坝。工程以发电为主，兼有防洪任务。工程于2014年8月蓄水至正常水位以来已经过多次洪水考验，大坝、地基、高边坡的变形、应力、渗流、渗压等各项指标均满足设计要求，运行工况良好。工程于2013年8月投产发电至2017年5月底，已累计发电580亿kW·h，累计交税43.22亿元，工程效益显著。该工程具有高拱坝、高陡边坡、高地应力、高水头泄洪消能、深部卸荷裂隙等特征。

工程于2005年9月开工建设，2016年4月通过竣工验收，总投资401.7亿元。



锦屏一级水电站大坝全景



锦屏一级水电站枢纽工程全景图

二、科技创新与新技术应用

- 1 针对305m特高拱坝复杂地基变形控制等难题，创建了拱坝与地基协同分析一体化设计和安全评价理论，实现了拱坝从200m级到世界最高坝的跨越。
- 2 针对倾倒变形、断层交汇、深部裂隙发育复杂地质条件，以及高陡边坡稳定难题，提出了“抗剪洞、大吨位长锚索结合锚喷支护、立体排水”的综合技术措施，实现了高达530m高陡边坡的稳定安全。
- 3 针对高地应力、构造发育的地下厂房洞室群围岩稳定难题，首次提出了“浅表固壁—变形协调—整体承载”的大变形控制技术，保障了地下厂房洞室群的安全。
- 4 针对高水头、超高流速、大泄量及泄洪雾化难题，首创坝身水流空中无碰撞泄洪消能与减雾、泄洪洞高效减蚀和燕尾坎挑流消能防冲等技术，安全监控表明，消能、防蚀、减雾效果良好。



锦屏一级水电站大坝仰视图



锦屏一级水电站大坝



锦屏一级水电站大坝泄洪

5 针对特高拱坝混凝土防裂等难题，提出混凝土骨料碱性控制、智能温控、4.5m升层、实时监控等成套高效施工技术，节约工期5个月，大坝工程质量优良。

6 工程建设注重节能、节地、节水、节材和环境保护。采用薄拱坝设计、废水处理回用、分层取水等技术，43.7%的场地进行了多次利用；混凝土配合比优化节约水泥10.23万t；建立了大规模的鱼类增殖放流站，已投放鱼苗610万尾。

湖北清江水布垭水电站

截 流	2002年10月
投 入 运 行	2008年8月
最 大 坝 高	233m
最 大 泄 量	18320m³/s
泄 洪 功 率	31000MW

一、工程概况

清江水布垭水电站位于湖北省巴东县境内，是清江流域梯级开发的龙头电站，是一座具有多年调节性能的水库，是以发电、防洪为主，兼顾其他的一等大型水电水利工程，是国家"十五"重点建设项目和“九五”科技攻关依托工程。主要建筑物由河床混凝土面板堆石坝、左岸河岸式溢洪道、右岸地下式电站厂房和放空洞等组成。工程于2002年10月截流，2006年10月通过蓄水验收，2007

年7月首台机组发电，2008年8月，所有机组投入运行。

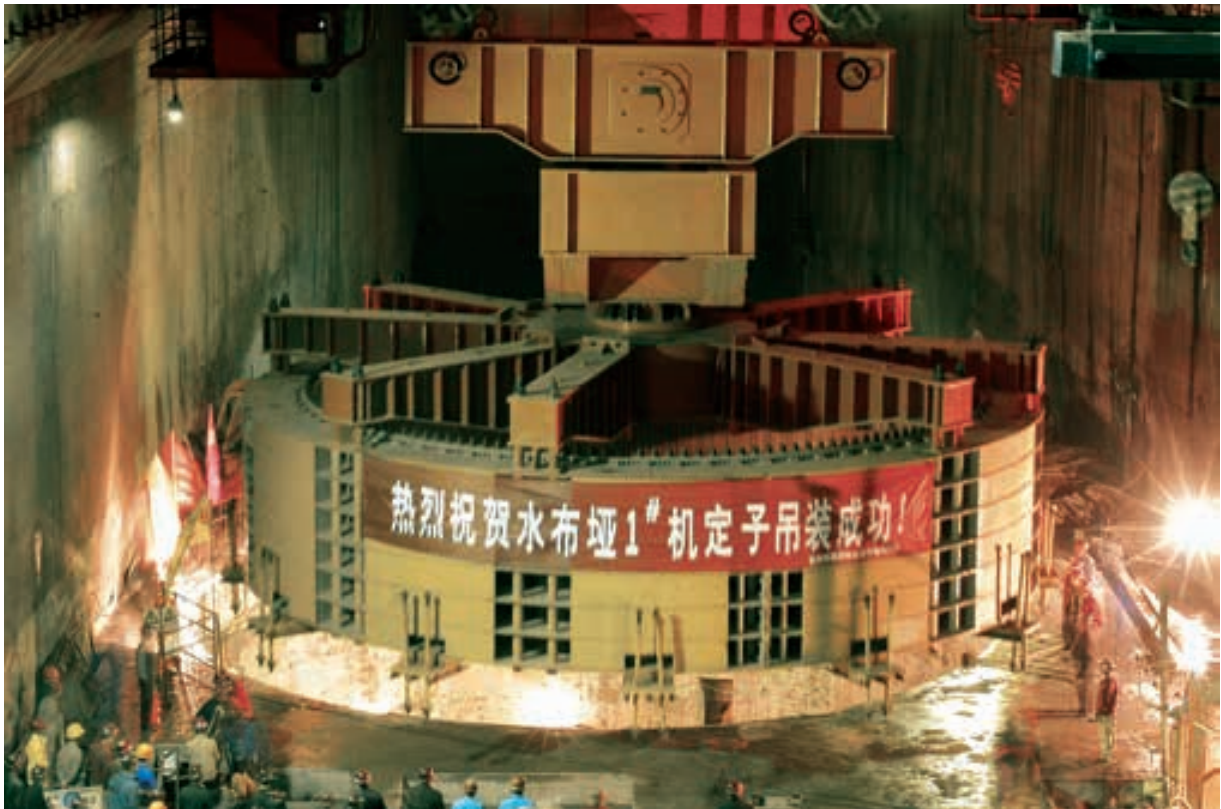
水布垭大坝最大坝高233m，是当时国内外已建和在建最高的面板坝；溢洪道泄洪水头落差171m，最大泄量18320m³/s，泄洪功率31000MW，消能区防淘墙面积2.8万m²，最大墙深40m；放空洞设计最大挡水水头152.2m，最大操作水头110m，平面定轮事故检修闸门滚轮轮压值为5400kN；地下电站尺寸168.5m×23m×65.47m，洞室群围岩上硬下软，软岩比例大；大电流全连式离相封闭母线垂直高差达118m；防渗帷幕灌浆接触段最大压力达到了1.5MPa；以上各项指标在当时均居国内外同类工程之首或前列。



溢洪道泄洪



地下厂房施工



首机定子吊装



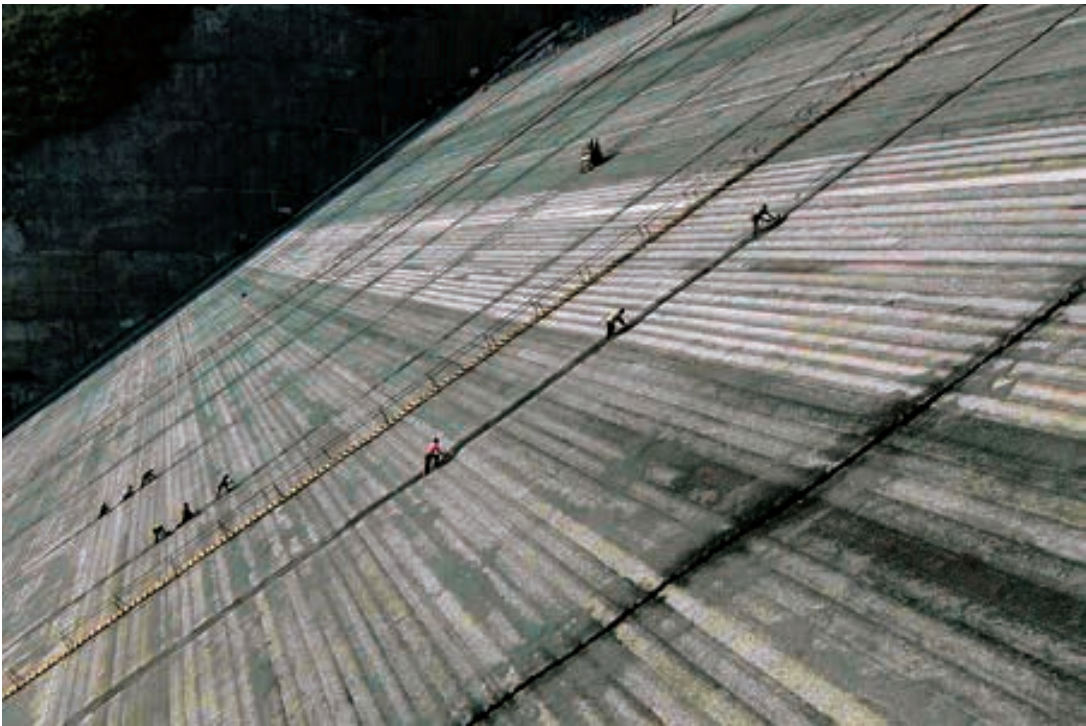
溢洪道开挖与浇筑

二、科技创新与新技术应用

- 1 本工程采用面板坝，避免了黏土心墙坝比较坝型所需大量黏土料对良田和植被的破坏，同时将面板坝的高度从世界纪录190m提高到230m，形成了一整套超高面板坝设计理论体系和筑坝关键技术，为扩展面板坝这一施工简易、经济安全和新坝型的应用范围，作出重要贡献。
- 2 采用了“标准板和防渗板”结合的新型趾板结构形式，采用挤压边墙凿断，首次在面板上设置永久水平缝、聚丙烯腈纤维用于面板混凝土，对面板坝常规的周边缝和垂直缝止水结构和止水材料进行了系统改进，研制了适应大变形的中部止水和表面自愈型止水结构，形成了一整套安全有效的超高面板坝防渗设计技术。

3 首次在大泄洪功率、消能区为复杂软岩环境的水电站泄洪消能设计中采用岸边溢洪道挑流消能和护岸不护底的防淘墙防冲方案。与常规混凝土水垫塘方案相比，避免了施工度汛风险，缩短了直线工期，节省了投资。

4 水布垭电站的兴建，能有效拦截上游洪水，对长江防洪起到巨大作用；电站总装机1840MW，年发电量39.84亿kW·h，有效减少了火力发电所造成的环境污染问题。



挤压边墙切槽技术



315开关站



水电站上游全景



水电站鸟瞰图