

大渡河流域梯级电站群智慧调控关键技术研究及实施

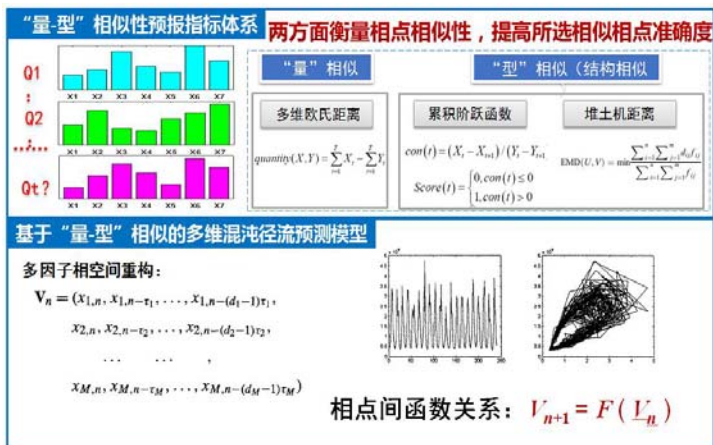
完成单位：国电大渡河流域水电开发有限公司 河海大学

主要完成人：周业荣、李攀光、梁忠民、贺玉彬、罗 玮、王 军、王甫志、胡义明、李彬权、陈 媛、邹祖建、钟青祥、顾发英、朱艳军、王 璞

流域水库群调度存在降雨径流时空关系复杂、防洪兴利矛盾突出及多目标协同难度大等世界性难题。对此，历经 6 年的研发，大渡河实现了流域气象、水情、市场、设备等信息的量化感知、汇聚传输和互联互通，建成了首个流域级的云计算与大数据中心，构建了首套流域智能调控平台，研发了流域梯级电站群智慧调控成套技术并成功应用，促进现代信息技术和传统优化调度技术深度融合，保障了大渡河流域梯级电站群安全高效运行。核心创新如下：

1. 发明了多因子“量-型”混沌相似的中长期水文预报方法

针对我国中长期水文预报不确定性大、预报精度不高的难题，在相似性理论的框架内，采用物理归因分析与数据挖掘相结合的方法，构建了基于降雨、径流、大气环流指数时空场的多因子集；创建了基于多维欧氏距离、累积阶跃函数和堆土机距离算法相耦合的“量-型”相似性指标体系；



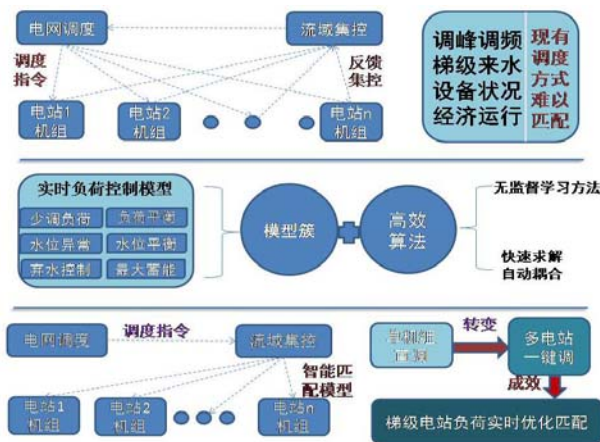
通过混沌相空间重构及多因子非线性函数关系的量化，建立了多因子“量-型”相似的多维混沌径流预测模型，丰富和发展了中长期水文预报理论。

2. 创建大数据驱动的高精度水情气象耦合概率预报技术

实时动态获取美国国家环境预报中心（NCEP）、欧洲中期天气预报中心（ECMWF）和本地数据，融合四维变分、集合卡尔曼滤波的流域多源数据混合同化技术；建立多时空尺度流域产汇流耦合预报模型，预报水平分辨率由 3km 提高为 1.5km；采用大数据分析技术研发预报误差概率分布智能估计算法，创建基于多层次-误差分布的实时洪水概率

预报模型，提高了实时洪水预报精度，提供丰富的预报不确定性信息。

3. 研发了适应电网高强度调峰调频需求的梯级水电站群负荷实时智能调控方法

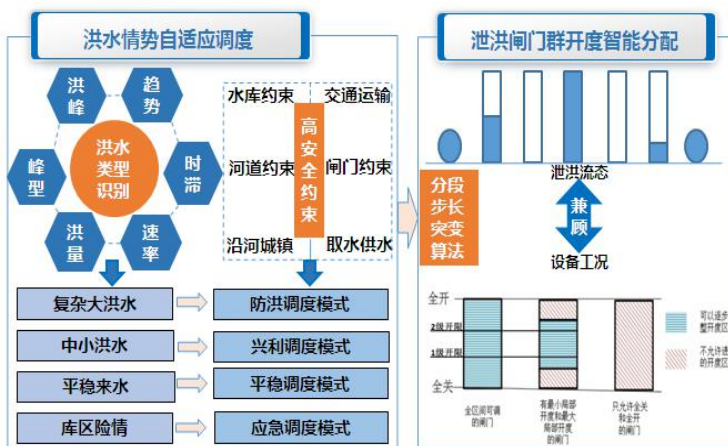


针对传统梯级水电站群优化调度技术难以适应电网调峰调频负荷频繁变化需求的难题，发明了一种厂网协调模式下的梯级智能分配技术，建立了梯级站间负荷实时智能分配控制模型簇，解决了电网负荷实时平衡与流域梯级水电站安全、经济耦合运行的建模难题。首次引入无监督学习方法对水电站群负荷历史分配场

景进行深度学习，自动选取最优负荷分配模型。大渡河成为国内第一家实现多电站“一键调”的大型流域。

4. 创建了自适应复杂洪水情势的流域泄洪闸门智能调控技术

通过流域洪水演变特性分析，定量揭示了大渡河流域洪水遭遇规律。依托实时感知、精准预测分析技术，自动识别预测洪水类型，自动耦合不同来水和流域多重防洪需求。建立多要素安全约束，研发了不同场景调洪目标模型簇，具备复杂大洪水、平稳来水、中小洪水及水库异常等多场景自适应能力。调度响应能力由小时级提升为分钟级。



该成套技术在大渡河流域大型梯级水电站群首次全面应用，推动了大型流域智慧调控理论发展和技术进步，取得了显著的经济、社会、环境效益。获国家专利授权 10 项（其中发明专利 4 项），软件著作权 12 项，出版专著 2 部，纳入行业标准 2 项，获省部级科技奖励一等奖 5 项，具有广阔的推广应用前景。

复杂环境高坝大功率泄洪新型消能技术研究与应用

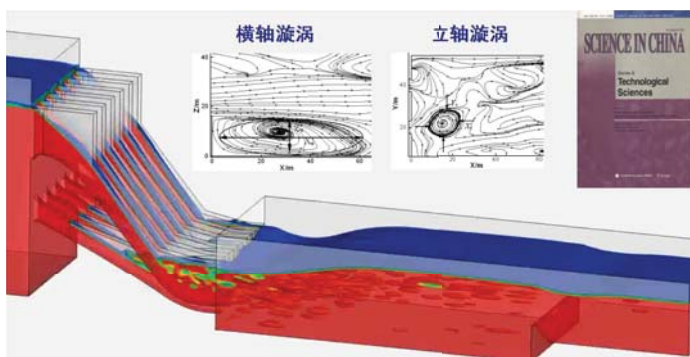
完成单位：中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司
中国三峡建设管理有限公司
四川大学

主要完成人：冯树荣、张超然、许唯临、樊启祥、潘江洋、张金婉、张建民、张永涛
戴晓兵、王毅、高鹏、陈伟、张苾萃、曾雄辉、苗宝广

高坝泄洪消能是水电水利工程的关键技术，问题多发，影响工程运行安全，泄洪雾化对环境存在不利影响。已建工程出现的问题中，泄洪消能占比最高，主要表现为消能工或流道冲损、岸坡垮塌、雾化危害等。本课题依托向家坝工程泄洪消能方案设计，研究新型减免雾化、降低建筑物边壁水力指标、提高安全性的高效消能技术。提出了高低跌坎出流的多层多股水平淹没射流新型底流消能技术，包括消力池漩涡流场理论和整套水力与结构设计方法，在高坝大功率泄洪消能提高运行安全性和环境保护等方面取得丰富成果。主要创新点如下：

1. 揭示了多层多股水平淹没射流的水力特性和消能机理

针对多层多股水平淹没射流新型消能型式，提出了消力池漩涡流场理论和整套水力设计方法，揭示了多层多股淹没射流的水力特性和消能机理，为新型跌坎底流消能型式的研发与设计提供了理论基础和应用技术，发展了高坝泄洪消能设计理论和方法。



2. 首次在坝高 150m 级、单宽流量 230m³/s 级的消能建筑物中成功实践高低跌坎底流消能

首次采用高低跌坎式消力池(坝高 150m 级、池内单宽流量 230m³/s 级), 利用高低坎消力池双层、多孔口三元淹没射流消刹下泄高速水流的巨大能量, 大幅降低消力池临底流速和底板脉动压强, 消能率高, 流态稳定, 出流平顺, 提高泄洪消能建筑物安全度, 利于下游航运和江岸安全。成功解决了总泄洪功率居世界同类工程之首、消力池单宽泄洪功率国内最高, 且紧邻城市和大型化工企业的向家坝水电站泄洪消能问题。



3. 创新泄洪消能建筑物整体浇筑技术和低热水泥温控防裂技术

首次采用流道底板和隔墙与大坝一次成型整体浇筑技术, 提高结构整体性, 保证高速水流作用下的结构安全; 首次在泄洪消能建筑物高强度混凝土中使用低热水泥, 降低混凝土最高温度 6℃~8℃, 有效防止混凝土裂缝。



4. 研发了混凝土磨蚀监测系统

首次采用磨蚀计, 监测高水头、高含沙水流泄洪消能建筑物运行磨蚀、空蚀情况。

水利水电工程劣质生境生态修复关键技术

完成单位：长江水利委员会长江科学院
武汉长江科创科技发展有限公司
重庆新开源农业开发有限公司
长江勘测规划设计研究有限责任公司
四川华电杂谷脑水电开发有限责任公司

主要完成人：汪在芹 高强 李珍 孙海龙 张平仓 廖灵敏 张乾柱 黄金权
任立 谢波 赵鑫钰 喻志强 任斐鹏 甘国权 卢阳

水利水电工程建设过程中产生的高陡边坡、大型弃渣场、消落带等劣质生境，土壤环境恶劣、植物生长困难、水肥调节能力差，影响生态环境与工程安全。生态文明建设已上升为国家战略，本项目紧密围绕国家大中型水利水电工程及生态文明建设需求，依托水利部国际科技交流与开发、国家自然科学基金及科技部农业科技成果转化资金等项目，研发了水利水电工程劣质生境生态修复与监测成套技术，主要成果如下：

1. 提出了高陡边坡生态修复新方法

针对水利水电工程高陡边坡存在的客土稳定性差、边坡保水能力不足、水土流失严重等难题，优化设计了“种子带—网—纤维素”生态护坡结构、土壤水分生态有效性和土壤抗侵蚀性调控方法等新技术，有效防止基质层表面径流，提高水分入渗，保障坡面结构稳定，实现植物种子合理播种密度及播种深度，突破了高陡边坡劣质生境难以修复的技术瓶颈，修复坡度达 60° ，使土壤侵蚀模数控制在 $500 \text{ t/km}^2\cdot\text{a}$ 以下，比同类技术成本降低 25%。

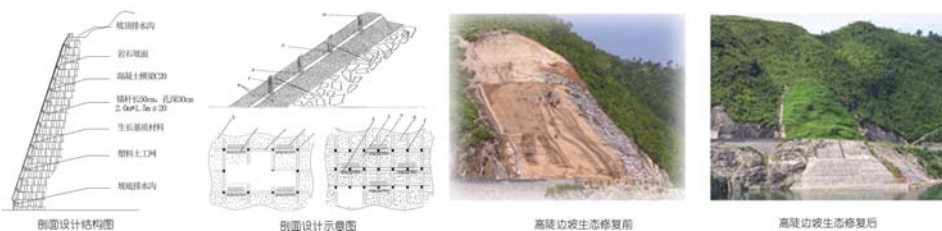


图 1 高陡边坡生态修复案例

2. 构建了大型渣场生态修复新技术

研发了由掺拌覆土、截水防渗和边坡保土拦护等构成的大型弃渣场生态修复技术，有效避免坡面和弃渣场表面的松散覆土受水力侵蚀和风力侵蚀的剥离，减少覆土陷落到坡面大块度弃渣场缝隙中，控制了弃渣场水土保持覆土和取土规模，解决了大型弃渣场水肥条件差、水土流失风险大的技术难题。



图 2 大型渣场生态修复案例

3. 选育了适合消落带生态修复的植物新品种

针对消落带复杂生境，选育了适合库区消落带植被恢复的“两栖”乔木水桦和草本假俭草“涵宇一号”，研发了成套繁殖、栽培及管护技术体系，实现了消落带坡面稳定、养分拦截、水质净化和生态修复，使得坡面及消落带水土保持功能显著增强，林草植被恢复率达到 85%以上，土壤侵蚀模数控制在 200t/km²·a 以下。

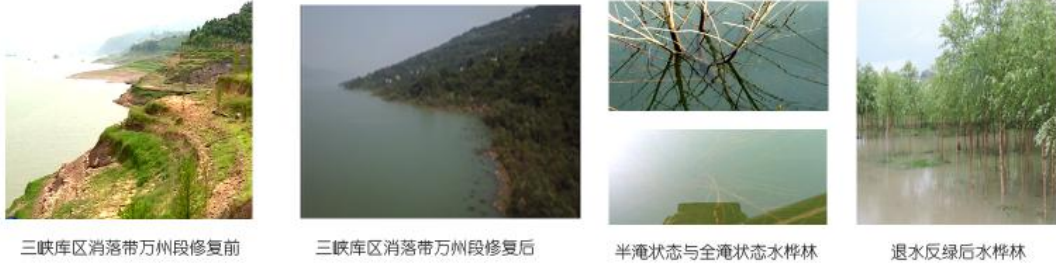


图 3 库区消落带生态修复案例

4. 建立了劣质生境生态修复动态监测新体系

针对传统土壤侵蚀和水土流失监测手段存在的获取数据周期长、数据精度不高、人力物力投入高等问题，研发了国内首座移动式水土流失实验室、坡面土壤侵蚀快速测定系统、降雨侵蚀过程测定仪器，实现了坡面降雨和土壤侵蚀过程的高精度、实时、动态监测，解决了坡面水土流失难以原位跟踪监测的难题。



图 4 生态修复动态监测系统

本项目成果获国家专利 31 项，其中发明专利 12 项，编写行业标准 2 部，地方标准 1 部，出版专著 3 部，发表论文 50 余篇（SCI、EI 10 余篇），获水利先进实用技术推广证书 2 项，促进了行业科技进步。已在三峡工程、岷江上游多个水电站等工程中得到成功应用，产生了显著的社会、经济和生态效益，具有广阔的应用前景。

项目联系人：李 珍 13886026425 QQ 420101869
高 强 13971181992 QQ 925039491

强震区深厚覆盖层特高土石坝建设关键技术与工程应用

完成单位： 中国大唐集团有限公司 四川大唐国际甘孜水电开发有限公司
 中国电建集团成都勘测设计研究院 中国水利水电第五工程局有限公司
 有限公司
 天津大学 四川二滩国际工程咨询有限责任公司

主要完成人： 余挺 熊雄 吴高见 姜长飞 张小春 何顺宾 张丹 吴斌平

高山峡谷地区河流普遍存在深厚覆盖层，但国内外尚无在深厚覆盖层上修建 200 米以上高土石坝设计和建设经验，众多复杂难题亟待解决。

本项目重点依托大渡河长坝水电站大坝开展研究工作。该砾石土心墙堆石坝坝高 240 米，建于 70 米深的河床覆盖层上，为深厚覆盖层世界第一高坝，工程规模超现行规范，无现成经验可借鉴，设计和施工难度大。项目针对深覆盖层特高土石坝的防渗、变形控制需要，提出了主、副两道防渗墙合理分担高水头的坝基防渗新技术，开发了坝基廊道与岸坡半固端连接的新型结构型式，创新了心墙砾石土料勘察、制备方法，研制、研发了一系列特高土石坝高效建设的新设备和新技术，解决了深厚覆盖层特高土石坝防渗设计、高强度施工和质量管控等一系列难题。

1. 提出了深厚覆盖层特高土石坝防渗新技术及新结构

通过研究首次揭示了主、副防渗墙按比例分担水头的主要规律，提出了主、副两道防渗墙合理分担高水头的坝基防渗新技术，成功解决了 212m 超高水头下深厚覆盖层防渗技术难题。

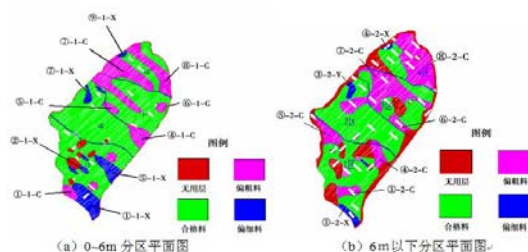
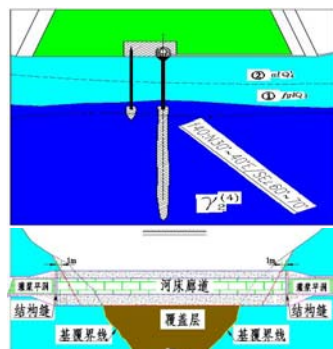
开发了坝基廊道与岸坡半固端连接的新型结构型式，创新性地提出了廊道插入岸坡一定深度形成半固端、固端设置弹性垫层、廊道与混凝土板相贯线布置 SR 柔性止水、廊道混凝土内掺入纤维素纤维、廊道外喷涂 4mm 聚脲层的综合防护措施，首次实现了防渗墙顶廊道的防渗结构成功应用于 200m 以上的高土石坝。

2. 创新了心墙砾石土料勘察、制备方法

在传统料场勘察方法基础上，针对长河坝水电站汤坝砾石土料场空间分布极度不均匀的问题，提出了基于 P5 含量等值线的料场勘察方法，将料场中同一地质成因的土料在空间上进行 P5 含量分区分级，查明了偏粗料（65%>P5 含量>50%）、合格料（50%>P5 含量>30%）、偏细料（P5 含量<30%）分布特征及其分区储量，为料场合理开采利用提供了充分的依据，取得了良好的效果。

建设了 5 套土料超径筛分系统，采用棒条式振动给料机作为超径（>150mm）剔除设备，单台产能可达 670t/h。

研究应用稳定土搅拌系统作为土料掺混的机械制备系统，调整搅拌叶片间距、配料仓壁坡度和附着式振捣位置，通过定量给料、计量输送和强制搅拌掺混，实现掺配土料的自



动配料、均匀掺混的生产工艺，实际产能可达 700t/h。

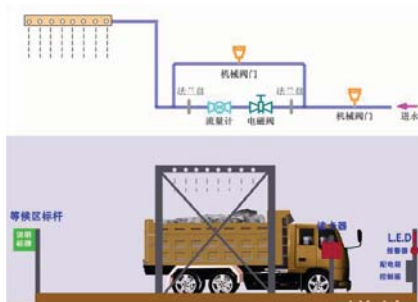
通过跟踪检测与计算，研发了均匀布坑、回畦灌水、渗透扩散、计时闷存的砾石土料含水量调整方法，保证了大坝心墙土料最优含水率要求。研制了移动式自动加水装置，可实现土料连续定量均匀加水。

3. 研制了无人驾驶振动碾等一系列新设备

研究开发了振动碾机身电气及液压控制系统、集成应用卫星导航定位、状态监测与反馈控制、超声波环境感知等技术，首次实现了振动碾的无人驾驶作业，可避免漏压、欠压，提高了碾压质量和施工效率。

针对土石坝填筑料运输车加水自动化、精细化难控制问题，首次提出了通过集成无线射频技术、自动控制技术和无线数传等技术，建设一套土石坝填筑料运输车辆加水量全天候、远程、自动监控系统，以实现按车按量精细监控，确保加水量满足设定的标准要求。

另结合工程实际研制了边坡混凝土浇筑反轨液压爬模、高塑性粘土机械化喷涂专用设备、双料摊铺器等，大大提高了施工效率和质量。



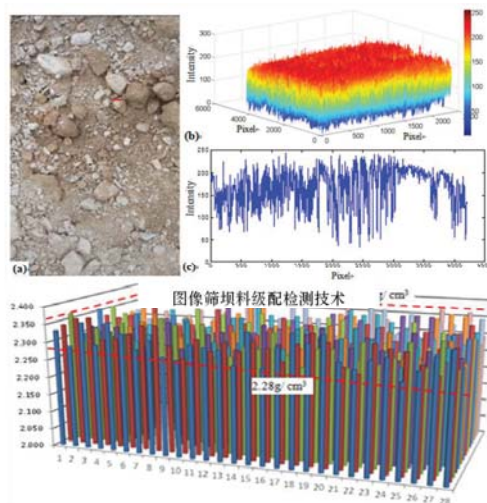
4. 研发了智能化施工监控新系统与工程质量测控新方法

通过集成应用高精度卫星定位、数据库、网络通讯、计算机图形学等技术，创新性的建立了长河坝心墙堆石坝工程机载碾压轨迹可视化实时监控系统，实现了长河坝心墙堆石坝填筑全过程同步智能化监控，确保碾压参数满足设定的标准要求。

将数字图像处理技术引入到坝料颗粒级配检验中，结合人工智能和大数据等手段，研发了图像筛坝料级配检测技术。通过颗粒尺寸分布数学模型描述坝料的级配分布特征，利用模型中的特征参数来反映坝料级配特征，实现了坝料级配的多维描述。

采用体积压缩率作为检测指标，采用碾压区域的栅格化检测技术，研发了基于三维扫描的堆石坝填筑压实度检测技术，实现了对填筑面任意区域的质量检测，并且标记不合格区域并反馈给监测中心，用于指导及时的补充碾压。

首创了基于地基反力测试的车载压实质量检测方法。从地基反力测试的原理和机制出发，结合信号分析处理方法确定实时检测指标，通过系列现场试验，验证了用峰值因素 CF 值来表征堆石坝粗料料常规压实检测参数（干密度、相对密度、孔隙率等）的适用性，建立了 CF 在粗料料上与碾压参数的多元回归模型，结合 CF 指标的控制标准，可以确定为达到压实标准所需耗能最小的最优碾压参数，为优化大坝填筑碾压方案提供参考。



反滤料三维扫描各局部碾压压实质量检测结果

本项目成果直接应用于长河坝工程，为工程建设和安全运行提供了有力保障，取得了 36.4 亿元的经济效益，实现了深厚覆盖层上高土石坝建设的新跨越，在世界坝工史上具有重要里程碑意义，极大地推动了世界水电建设行业技术进步。成果已在两河口电站和双江口电站应用，具有广阔的推广应用前景。

层状结构岩质边坡倾倒变形机理研究及工程应用

完成单位 华能澜沧江水电股份有限公司
成都理工大学

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司
江南水利水电工程技术公司

主要完成人: 吴关叶 郑爱武 黄润秋 黄泰仁 郑全春 郑惠峰 巨能攀 叶永年
任成功 谷涛 吕敬清 曹学兴 赵建军 鄢镜 胡永福

倾倒变形是深切河谷地区普遍的斜坡变形破坏现象,在我国黄河、雅砻江、澜沧江、金沙江、大渡河等流域多个水电工程,都存在大规模的岸坡岩体倾倒。倾倒变形边坡的评价与治理技术成为制约工程建设的关键问题。针对我国西部高山峡谷地区层状结构岩质边坡倾倒变形问题,建设、设计、施工、高校等单位联合攻关,开展了系统研究和工程实践。在倾倒变形岩体调查和精细描述指标构建、分级体系与分类标准、综合参数取值、破坏过程与变形机理、稳定性评价方法与变形控制标准、以及治理支护体系构建等方面取得了系统的创新性成果,并成功应用于工程实践。为治理层状结构岩质边坡倾倒变形问题提供了成套解决方案。主要进展如下:

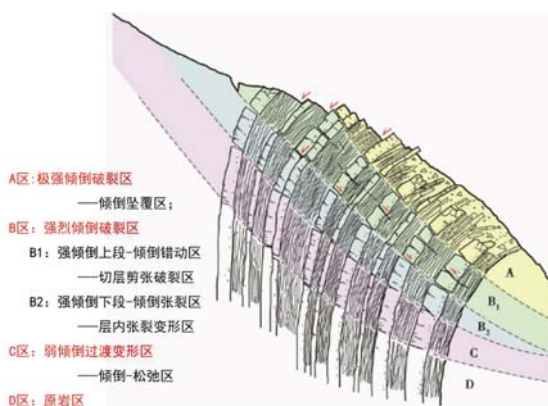
1. 构建了倾倒变形岩体结构特征指标体系,建立了倾倒变形岩体分类体系及倾倒变形程度分级标准,提出了层状结构岩质边坡倾倒变形岩体参数综合取值方法

通过定性与定量相结合,构建了倾倒岩体精细描述指标体系。由卸荷变形特征;风化程度;岩层倾角;层内最大拉张量;层内单位拉张量;纵波波速;结构电阻比7个指标构成。

首次从倾倒变形破坏的地质过程和变形稳定性分析的基本理念出发,建立了描述倾倒边坡不同变形程度的工程地质模型,提出了4个具有地质-力学含义的区域:A类极强倾倒破裂区、B类强倾倒破裂区、

C类弱倾倒过渡变形区,其中B类强倾倒破裂区进一步划分为B1类强倾倒上段和B2类强倾倒下段。结合具体地质条件和工程效应,以及一定的可靠度综合分析,提出了倾倒变形岩体力学参数综合取值方法,以及不同倾倒变形程度岩体的物理力学参数建议值。

2. 揭示了层状结构岩质边坡倾倒变形机理及过程,揭示了坡面形态对倾倒折断面性态和深度影响的基本规律,提出了反倾层状岩体倾倒折断面多级折断面深度的计算方法



倾倒变形是岩体的结构性变形，而非岩体材料自身的变形，是岩体结构中拉裂面、折断面的组合变形，同时具有沿重力方向的剪切滑移和坡外方向的转动，从而形成倾倒边坡“小扰大动”的链式放大效应：即边坡下部的小扰动，引起边坡中上部的大变形。

大型离心机试验和数值分析表明：层状结构倾倒变形边坡主要经历 4 个阶段，初期卸荷回弹-倾倒变形发展（层内剪切）阶段；倾倒-层内拉张发展阶段；倾倒-弯曲；折断变形破裂发展阶段；底部滑移-后缘深部折断面贯通破坏阶段。层状结构岩质边坡变形特征为：下部挤出+中部膨胀+顶部下座。



3. 揭示了层状结构岩质边坡倾倒变形岩体边坡开挖和蓄水的变形时空响应规律，建立了倾倒变形边坡变形控制标准

综合地质调查、模型试验和数值模拟等多种手段，揭示了倾倒岩体工程边坡开挖和蓄水条件下的相应规律。

从变形控制理论出发，根据倾倒变形“底部小扰动，顶部大变形”的链式效应，提出了层状结构岩质边坡倾倒变形控制标准。

倾倒变形边坡变形控制指标

项目	边坡安全控制合位移标准(mm/M)	边坡预警值(mm/d)
坡脚	3~5	4~6
中部	6~8	8~10
坡顶	8~10	10~15

4. 提出了层状结构岩质边坡倾倒变形稳定性预测评价方法，构建了层状结构岩质倾倒变形边坡的“下部压坡镇脚、上部锁头、中上部系统框架锚固”治理支护体系

基于变形特征的分区评价、变形稳定性数值分析、以及传统的极限平衡稳定性评价方法，将倾倒变形的地质现象、定量描述与变形稳定性相结合，提出了层状结构倾倒变形边坡稳定性分析评价方法体系。提出了“下部压坡镇脚、上部锁头、中上部系统框架锚固”的层状结构倾倒变形边坡系统支护体系。

成果成功应用于苗尾水电站工程，确保了倾倒变形边坡稳定与工程安全，取得直接经济效益约 2 亿元。并已推广应用于黄登、大华桥、古水、如美、杨房沟、卡拉等水电站工程。