

技术发明奖三等奖项目 1:

变态混凝土自动注浆振捣台车研制与应用

完成单位: 中国水利水电第七工程局有限公司

主要完成人: 吴旭、彭卫平、颜曦、郑平、徐绍波、欧阳新群、郑鹏鹏、蔡天福、刘照、张宏武、杨愚、肖志怀、江绍春、刘翔、王婷

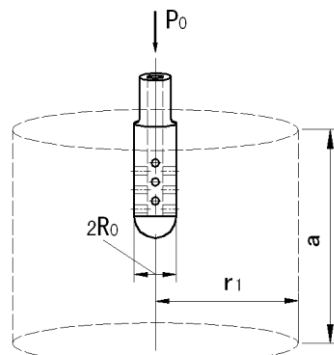
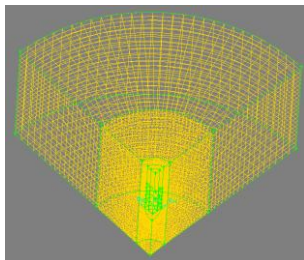
变态混凝土施工质量关系到大坝防渗及大坝安全。目前变态混凝土采用人工作业,难以保证施工工艺的标准化和施工质量的均质性,是碾压混凝土大坝的一大短板。根据变态混凝土的施工特点,研制了变态混凝土自行式注浆振捣台车,该设备集自动均匀注浆与液压高频振捣功能于一体,通过触摸屏人机界面(HMI),可实现注浆装置自动定位、注浆过程可视监控、注浆量精确控制、输浆管路有效清洗和注浆振捣工作模式自动切换,并具有作业数据统计查询和操作人员权限管理等功能。研究成果有效提高了变态混凝土的施工质量,填补了国内外变态混凝土注浆振捣机械化施工的空白。

项目获得发明专利 4 项,实用新型专利 7 项;主编了《变态混凝土施工规范》;获得国家级工法 1 项;发表 EI 收录论文 2 篇。通过中国水电专家委员会鉴定,课题研究成果达到国际领先水平。

本项目属科学技术领域中的土木工程机械与设备-钢筋混凝土机械。

1. 提出了一种变态混凝土施工中浆液扩散半径计算方法

基于计算流体动力学、数值仿真技术、正交试验设计原理和统计学回归分析方法等先进的理论和方法,提出了一种变态混凝土施工中浆液扩散半径计算方法,通过物理实验进行了验证,首次解决了变态混凝土施工中浆液扩散半径计算的问题,为注浆工作装置及系统设计提供了理论依据。

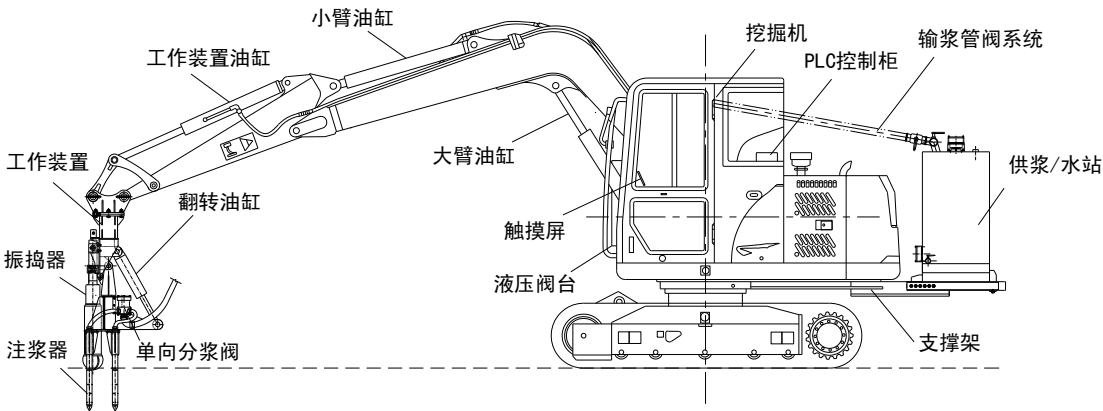


$$\text{浆液扩散半径: } r_1 = 39.2911 \cdot \Delta p^{0.185} \cdot t^{0.494} \cdot e^{0.226} \cdot D_p^{0.272} \cdot R_0^{0.903} \cdot \rho^{-0.554} \mu_g^{-0.016}$$

2. 研制了变态混凝土自行式注浆振捣台车

变态混凝土施工目前仍处于人工作业状态，不能有效保证变态混凝土施工质量。为了更好地发挥变态混凝土的优越性，保证施工质量，研制了贮浆、输浆、注浆/清洗装置和插入式液压机械振捣装置，采用自动化控制系统控制注浆/振捣；开发了人机交互操控设备，实时显示、自动对位，具有切换灵活、操作简便、界面友好等特点。保证了在制浆、储存、输浆过程中保持灰浆的稳定性，控制了注浆范围、注浆量，实现了定量均匀注浆，系统可自动记录施工过程，强化了质量管理。

变态混凝土快速施工自动注浆振捣台车由主机、电源系统、注浆/清洗系统、振捣系统、PLC 控制系统、液压系统和支架等组成。上述子系统和装置均安装在挖掘机平台上，包括工作装置与挖掘机铲斗四杆机构摇臂铰接、供浆/水站支撑在挖掘机尾部、PLC 和液压装置位于挖掘机的回转工作台上、触摸屏和控制箱安装在挖掘机驾驶室内等。这不仅简化了设备的开发过程，而且使设备具有良好的机动性和可靠性。



机械作业代替人工作业，保证了浆液的稳定性和变态混凝土均匀注入及渗透的均匀性，有效避免了变态混凝土施工质量离散性大的缺陷。有效解决了现场人工注浆、振捣时作业人员与设备交叉施工的局面，保证了施工的安全性，控制了施工风险，降低了施工安全隐患控制成本。

研究成果实现了与碾压混凝土其他工序机械化施工的协调性，提高了施工效率，保证了施工质量，降低了施工成本。通过在亭子口水利枢纽、立洲水电站、果多水电站、丰满水电站等工程的成功应用，经济和社会效益显著，具有良好的推广应用前景。

技术发明奖三等奖项目 2:

大粒径心墙砾石土填筑质量检测设备及快速测定技术

推荐单位: 中国水利水电第五工程局有限公司

项目完成人: 吴高见 江万红 杨建平 张永春 谭小军 胡宗容

随着我国高土石坝技术的发展,砾石土心墙料被广泛使用。由于砾石土材料的特殊性,其含水率及 P5 含量检测耗时较长,不能满足当前高坝大方量填筑施工强度的要求。目前宽级配砾石土料最大粒径已经达到 150mm 以上,根据径径比不小于 5 的原则,要对全料进行击实,击实筒直径应大于 750mm,国内目前水电项目中尚未有击实筒直径达到此要求。针对以上超大粒径砾石土料的击实试验及含水率快速检测问题,依托长河坝(砾石土心墙堆石坝)水电工程,开展相关技术研究。

1. 气动式全自动超大型击实仪的研制及应用

国内目前对由于击实仪的限制,对砾石土的击实最大只能满足 60mm 粒径,在对传统击实仪进行优化改造,研制出击实筒直径达 800mm 的超大型击实仪,满足最大粒径已经达到 150mm 以上宽级配砾石土料击实试验的要求。



图 1 超大型击实仪击锤气动提升和击实筒气动旋转装置



图 2 超大型击实仪控制系统界面

超大型击实仪的研制采用了以下关键技术:(1)大型击实仪击锤提升及落距控制技术;

(2)锤落点均匀分布技术;(3)大型击实仪电气自动化控制技术。

全自动击实仪和用于全自动气动击实仪的电气控制系统获得 2 项国家发明专利,击实仪锁定、锤击、气动、转动装置等获得 6 项实用新型专利。

利用研制成功的 800mm 超大直径击实仪和常规大型击实进行对比击实试验,表明 P5 含量与最大干密度成线性关系,相关性较好,P5 含量与最优含水率成反线性关系,超大型击实仪试验结果具有很好的可靠性,在长河坝水电站大坝工程中,将 800mm 击实仪应用到现场砾石防渗土料碾压压实质量控制标准的确定和复核中。。

2. 大型红外微波烘干设备的研制及应用

(1) 大型微波干燥机的研制

为解决土料含水率快速、精确测定的问题，研制了适用于砾石土加热干燥的大型微波干燥机，同时解决了高温状态下的土料和砾石会对微波机箱体造成破坏的问题，研究获得了适宜的砾石土承箱材料和容积。

(2) 微波干燥机的率定从以下两个方面进行

1) 微波干燥机烘烤时间：确定微波干燥机对砾石土烘烤时间在 20 分钟。

2) 加热的土料破坏影响性分析：通过试验分析，确定采用微波干燥机对土料进行含水率试验时对土料无破坏影响。

3.移动试验室的研发和应用

研发了可进行土料含水率快速检测的移动试验室，可在20min内检测出土料含水率，在30min内出具含水率试验报告，缩短了检测时间近7h，加快了现场施工进度。

(1) 移动试验室的设计和研发：移动试验室计算得出试验数据后，可以快速出具试验报告，极大的提高了试验检测的效率，能快速进行下一层的填筑。

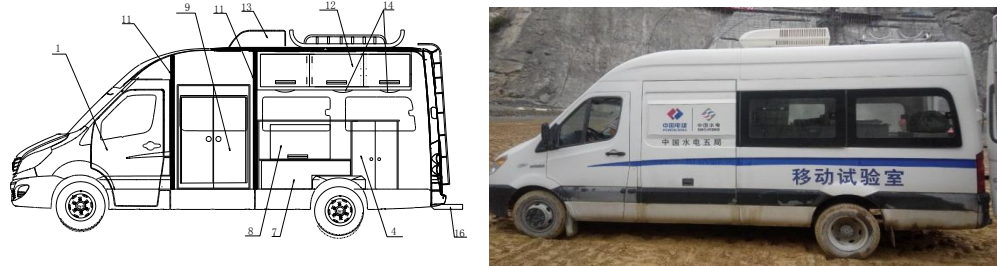


图 4 移动试验室设计和实物图

(2) 试坑用水高精度流量计量方法和装置：移动试验室在工作室内左右部各配置了一个水箱，在工作室内放置一套可移动式的高精度流量计，对试坑用水采用流量计进行快速、精确计量，极大的提高工作效率。

4.砾石土含水率快速测定技术

(1) 全料含水率快速检测方法

根据土料含水率定义推导出砾石土全料含水率计算理论公式：

$$\omega = (1 - p_5)\omega_1 + \omega_2 p_5$$
 式中： ω 为砾石土全料计算含水率； p_5 为大于5mm砾石含量； ω_1 为小于5mm细料含水率； ω_2 为大于5mm砾石吸着含水率。

小于5mm细料含水率可通过酒精燃烧法快速检测。对大于5mm砾石经比较分析可取系列试验的砾石饱和面干吸水率平均值代替，对全料含水率计算结果影响较小。

通过研究分析，在实际检测过程中可以将砾石吸水率取一个固定值，只需测定小于5mm土的含水率（采移动实验室中的微波干燥机烘烤得到），可大大缩短含水率检测时间。

(2) 土样含水率快速检测方法和设备

研究采用土壤水分快速测定仪进行土样含水率测定，当仪器测定的数值与土的真实含水率不相符时，调整档位使仪器读数与土样的真实含水率相同（滤定仪器）。该方法与酒精燃烧法相比较，时间大致相同。

技术发明奖三等奖项目 3:

一种用于高陡边坡混凝土浇筑的反轨液压爬模

推荐单位: 中国水利水电第五工程局有限公司

项目完成人: 李法海 陈曦 樊鹏 韩兴 袁幸朝 梁涛

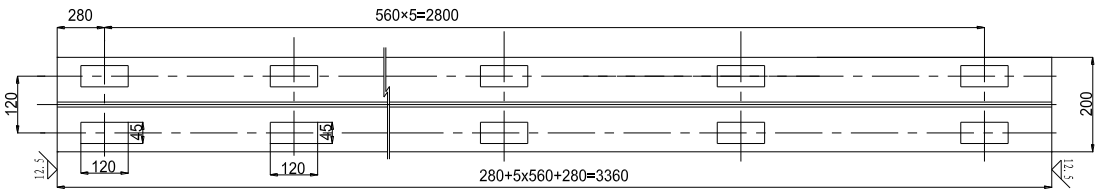
我国目前在水电站陡边坡混凝土的浇筑施工中，采用常规滑模施工，首先卷扬机安装困难，其次浮托力不易控制。采用常规模板进行施工，模板安装拆除工作量大，人员劳动强度大，投入大量人力物力，但施工必须向机械化与自动化相结合的方面发展，提高自动化程度。

本课题主要研究高陡边坡混凝土浇筑有轨液压爬模研发与施工技术，伴随课题研究，自主研发的“一种高陡边坡混凝土浇筑反轨液压爬模系统”获评国家发明专利，专利授权号：ZL.201410756761.X。研究成果形成标准的施工工法，工法获评 2015 年度中国电建集团公司工法（编号：ZGDJGF021-2015）。本课题主要技术发明点如下：

- 1. 成功解决了水利工程高陡边坡混凝土浇筑过程中模板工程量大，常规无轨滑模牵引动力安设困难等问题。

用坝顶将跨河缆索将上部的轨道运至仓面附近后，与下部的轨道支撑用螺栓连接固定。通仓固定完后将滑模吊至相应位置后，再将滑模体吊运至仓面下部，人工采用导链安装就位。

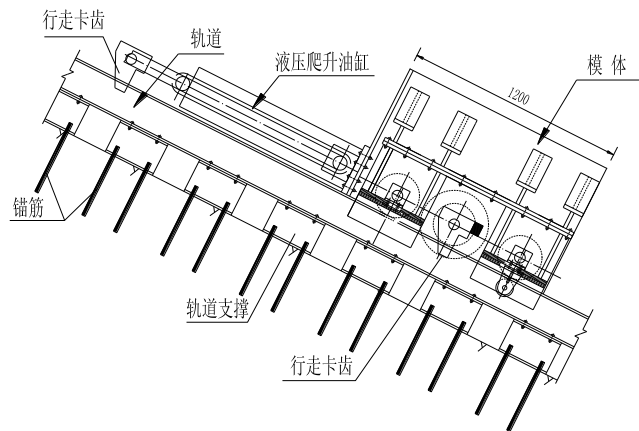
滑模轨道采用 H 型钢，结构如下：规格为 200mm×200 mm×8 mm×12 mm，轨道下部为轨道支撑，采用和轨道同型号的 H 型钢，每隔 50cm 布置一个，单个尺寸沿轨道方向长 30cm。轨道设置在混凝土分缝以外 10cm 处，在滑模安装前通仓安装完毕，坡度与压板表面坡比一致，单根轨道支撑每隔 50cm 采用 2Φ25 锚杆固定在基岩面上，锚杆长 3m，入岩 1.5m；锚入基岩 1.5m，两根锚杆垂直轨道方向间距 10cm。



- 2.研发了液压爬模有自动控制系统，自动控制系统的联动系统能同步升降，并通过单独控制实现左右油缸单独升降

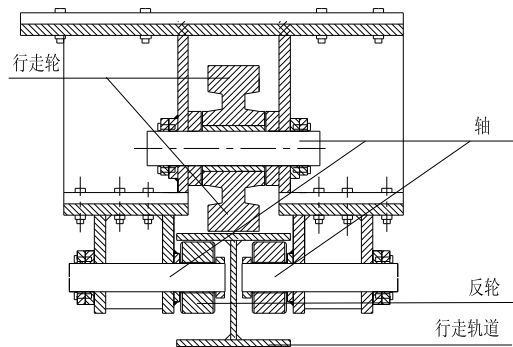
液压爬模通过液压油缸连接爬钩装置和液压爬模主体行走车架，通过控制液压油缸的同

步伸出来推动爬钩装置向上爬升，爬钩装置锁定后再通过液压油缸的缩回带动爬模主体向上爬行；相反，整体向下缓慢移动，实现自动上下爬行浇筑功能。当一个爬行过程行走完毕后通过液压油缸再次推进爬钩装置，直至其锁定轨道，在通过液压油缸的回缩或下伸，进行下一段的爬升，直至完成整个爬升过程。有轨液压爬模结构如图所示。



3.自制了轨道及反向托轮控制并用，克服了混凝土浮托力并实现液压爬模的着力与支撑，使模体爬升过程精确定位

有轨液压爬模结构共分为两部分，分别为模体、行走装置及轨道。行走装置包括行走轮（反轨结构）和爬升液压油缸，轨道与行走装置重约 7.5t（其中行走装置 2.2t）。



高陡边坡混凝土浇筑有轨液压爬模研发与施工课题研究成果在长河坝水电站大坝工程的运用过程中，浇筑过程未出现异常情况、爬模提升稳定，实际爬模提升速度可达 80cm/h，浇筑混凝土表面平整。施工全过程处于安全、稳定、快速、优质的可控状态，能够很好的解决高陡边坡混凝土浇筑过程的模板工作量大等问题，提高了自动化水平，降低劳动强度，得到了各方的好评。在总结完善后，有轨液压爬模能够提高施工效率，加快施工进度，减少人力物力投入，提升施工质量。工法的投入使用使得边坡混凝土浇筑更加自动化、机械化。

技术发明奖三等奖项目 4:

松软地层防参加固控制灌浆技术

推荐单位: 五凌电力有限公司

项目完成人: 杨松林 张贵金 钟平 陈安重 彭春雷 胡大可

松软地层防渗灌浆, 普遍存在: 单耗大、易塌孔埋钻、灌浆不起压、灌浆效果差等突出问题, 依托湖南托口水电站河湾地块防渗工程, 在国家电力投资集团(原中国电力投资集团)立项重大科技项目, 并在国家自然科学基金项目资助下, 发明一种“自下而上、浆体封闭、高压脉动灌浆”全新工艺, 系统研究获得了可控性灌浆材料、封孔止浆技术、控制灌浆工艺等重大技术突破。成果成功应用于托口水电站河湾地块防渗帷幕灌浆工程, 南水北调中线一期工程鹤壁三标砂卵石基础处理生态防渗工程以及向家坝水电站泄水坝段基础破碎带防渗工程, 累计节约成本约 2.3 亿元。项目开展以来先后发表高水平论文 14 篇, 培养博士生 1 名, 硕士生 12 名, 获得专利 8 项和工法 2 个。新工艺及相关成套技术对堤防防渗、病险库坝治理、矿山、公路、城市地铁等复杂地质条件下的工程建设、水土流失综合治理等有普遍指导意义和推广应用价值。形成的主要技术发明及相关理论如下:

1. 发明了松软地层控制灌浆工艺

创造性提出“自下而上、浆体封闭、高压脉动灌浆”新工艺, 流程为: 孔内自上而下分大段(可约 30 米一段), 段内自下而上分小段连续提升灌注。主要工法流程: 钻灌准备→下套管安装灌浆器→灌浆段洗孔→灌浆段灌入封闭浆体→封闭浆体待凝→选择浆液灌浆→自下而上小间隔提升→本灌浆段结束→进行下一段灌浆→全孔灌浆结束封孔。

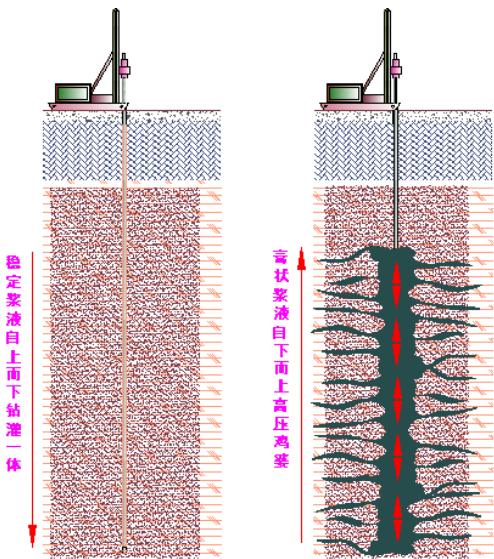


图 1 高压脉动灌浆示意图

通过原型试验、室内物理模拟、生产试验以及结构性状研究得出在松软地层采用“自下而上、浆体封闭、高压脉动灌浆”新工艺可达到 5Lu 的防渗标准, 为以后类似工程设计孔排距、灌浆参数提供有力依据。

2. 研发了松软地层可控性灌浆材料

工程常用的水泥浆材存在不稳定、耐久性差、抗震性弱，成本高，粘土类浆材强度偏低。对此研发了松软地层可控性灌浆材料——粘土水泥膏浆，通过室内 2000 余组大样本长周期试验，对粘土水泥系列浆材的析

水率、流变性、可灌性、抗冲能力、凝结时间、抗渗性能、强度特性、耐久性进行了全面系统研究。各项指标均显著优于松软地层防渗要求。



图 2 粘土水泥膏浆图

3. 创新提出松软地层灌浆止浆起压控制技术

①以浆止浆封孔技术。研发一种软固体封孔止浆材料，在灌浆管和钻孔壁之间注入封闭材料，在灌浆过程中起到消能阻浆的作用，为实现自下而上提升灌注，使全孔段均匀受灌创造条件。②新型孔口封闭器。发明了一种压滤式孔口封闭器，使得灌浆材料在孔口段局部产生压滤效应，孔口段压力梯度急剧下降，极大地减弱了浅层或局部弱面发生低压重复劈裂和地面冒浆、抬动等现象的发生，可保证灌浆起压，获得更好的灌浆效果。

4. 研制改进了成套控制灌浆设备

①研制了高性能粘土制浆机、膏浆泵、藕节式水压栓塞、高压脉动灌浆泵。
②改进了系列配套灌浆机具。包括：膏浆制浆机、70t 大吨位拔管机、适用于粘土水泥浆材的灌浆记录仪。



图 3 成套控制灌浆设备

5. 发展了控制灌浆理论

针对松软地层控制灌浆关键技术，研究了控制灌浆理论：①脉动灌浆机理：首次提出脉动灌浆方法，基于弹塑性理论研究了松软地层可使用更高的灌浆压力从而获得更好的灌浆效果的力学机理。②止浆机理：创造性提出采用柔性软固体材料，通过“以浆止浆”实现封孔止浆，基于力学平衡原理揭示了封孔浆体的工作机制。完善和发展了控制灌浆理论。

技术发明奖三等奖项目 5:

水电站超大型斜拉门式启闭机关键技术

推荐单位: 黄河勘测规划设计有限公司

项目完成人: 张金良 唐松智 杨 光 杨 立 王 春 王国栋

水电站常规门机仅为垂直启闭闸门, 不允许斜拉起吊。随着我国水电工程的蓬勃发展、坝型和闸门布置的多样性, 要求门机具备垂直和斜拉启闭功能的呼声越来越高。三峡水利枢纽经过改造, 导流底孔泄洪洞建成永久底孔泄洪洞, 闸门启闭方向与铅锤方向夹角为 8.53° , 容量 4500kN 门机在斜拉启闭时需承受 668kN 的水平力。小湾水电站为双曲拱坝结构, 泄洪中孔、放空底孔事故检修闸门启闭方向与铅锤方向夹角为 9.462° , 水平力达 1085kN, 且门机沿弧形轨道运行。因斜拉门机需要承受很大的水平力作用, 必将对门机各机构的布置形式、结构受力和整机稳定产生非常大的影响。针对水电站超大容量斜拉门机亟待解决的难题, 课题组进行了深入的研究, 在关键技术问题上取得了突破和创新, 获 4 项发明专利, 3 项实用新型专利。发明专利主要内容如下:

1、用于坝体闸门的斜拉双向门式启闭机

启闭闸门的斜拉双向门机总体布置, 包括单、双吊点起升机构结构均可满足斜拉和垂直起吊两种工况; 可实现多种速度、保持小车自锁与稳定的小车驱动机构; 满足垂直和斜拉工况的门架结构; 在弧形轨道运行并适应垂直和斜拉的门机大车运行机构等技术创新。独特的拉杆穿轴装置, 解决了人工穿脱销劳动强度大、不能满足工程防洪防汛时间的难题, 同时保障了操作人员的安全。首创的直拉/斜拉试验装置, 成功地完成了门机垂直负荷和斜拉负荷的动、静载试验。该试验装置结构简单, 对坝面结构和受力要求较低, 特别是斜拉试验简单易行便于控制, 满足了工程需要, 填补了国内空白。



2、斜拉门式启闭机小车驱动机构的布置方法

双向斜拉门机的小车受力复杂，既要驱动小车行走，又要在斜拉工况时承受水平荷载并保持小车的稳定，小车运行速度应与起升机构钢丝绳收放速度匹配，才能保证钢丝绳在卷筒、滑轮上不松弛，保证门机和闸门运行安全。斜拉门机的小车驱动型式可采取钢丝绳卷扬机构、小车行走轮装设锁定机构和液压油缸等三种驱动方式，而液压驱动用于超大型斜拉门机的小车运行最为安全便捷。



3、用于驱动斜拉门机或斜拉台车式启闭机小车的液压缸

采用具有自锁功能的液压缸作为斜拉门机小车驱动机构，既满足了在各种工况下小车的移动和定位要求，又可平衡斜拉工况的水平力，保证了斜拉时小车的稳定，同时液压油缸可适应不同工况下主梁的变形。

4、斜拉门式启闭机小车驱动机构的液压系统

创造性的将双联叶片泵、差动回路、旁路纠偏回路等运用于液压系统中，满足了主起升斜拉空钩对位、起吊时小车运行速度与起升机构钢丝绳收放速度匹配、保证钢丝绳不脱离绳槽的要求。



成果应用于三门峡水利枢纽、云南小湾水电站、四川大岗山水电站和云南石门坎水电站等工程。国家质量监督检验检疫总局对上述工程门机分别进行了直/斜拉工况静载和动载型式试验，试验中各项检测数据符合规范要求。在黄河汛前调水调沙中，三门峡门机操作迅速准确，为三门峡水利枢纽工程“接力”调水、人工塑造异重流、输沙入海、减轻下游河道淤积、实现维持黄河健康生命的目标中发挥了重要的作用。小湾水电站、大岗山水电站坝顶斜拉门机投入运行以来，在保证工程发电、灌溉、供水等方面发挥了重要作用，社会和经济效益显著。

技术发明奖三等奖项目 6:

高地应力窄河谷反拱水垫塘及设计方法

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：白俊光 姚栓喜 谢小平 杨存龙 王亚娥 侯延华

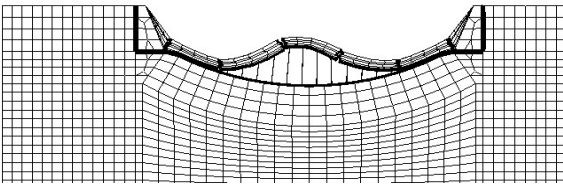
水垫塘是高坝泄水建筑物主要消能建筑物。目前已建的二滩、小湾、溪洛渡、构皮滩、锦屏一级、拉西瓦等均采用坝后水垫塘集中消能。但大多水垫塘工程结构基本都采用了传统的平底梯形结构。反拱水垫塘较好的适应高山峡谷高地应力区自然地形，提高了水垫塘的稳定安全度，减少边坡开挖，边坡的安全性大大提高为加大坝身泄量，将单位水体消能率提高到 26.0 kW/m^3 ，减少岸边洞泄，作到“泄得下、兜得住”的泄洪消能思路的实现提供了研究与巨型工程应用实例，研究主要成果如下：

1. 明确了反拱水垫塘的工作机理和稳定机理

工作机理为在拱座稳定的前提下，拱圈底板从空载自由状态过度到上举力作用下，底板块径向位移增大至锁定高度，拱圈底板块成拱（瞬时或长期成拱）状态。稳定机理表现为利用混凝土材料的抗压性能将拱圈径向荷载变为拱圈轴向压力（拱端推力），并传递给拱座，通过拱座将大部分荷载传给岩体，拱圈依靠拱座和岩体保持稳定。拱结构把单底板块的抗浮稳定变成了拱圈与拱座组成的拱结构的整体稳定。

2. 提出了反拱水垫塘的破坏机理，揭示了拱圈底板块局部破坏和拱圈整体破坏的过程

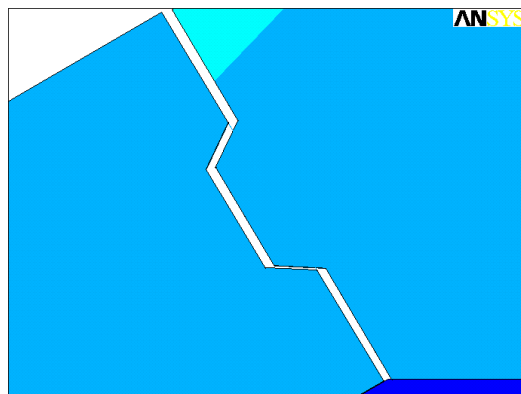
对于单底板块，底板块之间缝宽为 200mm 时，底板块飞出座穴，拱圈失稳；对于整个拱圈，当底板块间缝宽为 150mm 时，底板块已经飞出座穴，拱圈就已失稳。拱圈多底板块振动时，拱圈底板块失稳是底板缝隙的“累加”所产生的效应。“累加”表示，五个底板块的缝隙集中在某个底板块上。



中心板块失稳形态

3. 首次研究了反拱水垫塘板块间缝隙大小对拱结构稳定的影响

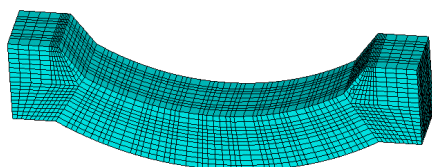
板块间缝隙大小是影响拱结构形成的主要因素，有条件时应尽可能加大单块板的拱向长度。试验表明，只要保持拱座稳定，无论止水部分破坏还是全部破坏，板块间是否设插筋，缝隙小于 50mm 时，拱圈底板块振动位移很小。拱圈维持正常运行的最小缝宽为 150mm。



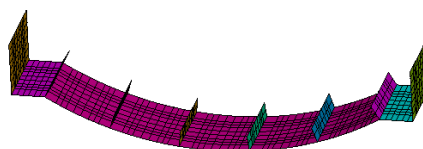
缝隙宽度和错位

4. 提出了反拱水垫塘受力状态和稳定分析的途径、方法、计算模型、计算手段

反拱水垫塘稳定分析可采用三维有限元计算进行静力分析、水动力学模型试验与有限元结合的动力分析以及传统的结构力学方法简化的三铰拱偏保守分析。在拱座稳定分析中，作用在其背面和底部的渗透压力是影响其结构稳定的主要荷载。



三维有限元模型



接触单元

5. 提出了反拱水垫塘的适用条件

反拱水垫塘更适用于“河谷狭窄、岸坡陡峻、坡脚地应力较高”的地形地质条件、“长度短、宽度窄、深度浅”的水垫塘布置条件及“单位水体消能率高、冲击动水压力大、入塘水舌难以形成淹没水跃”的水力条件。

首次将反拱水垫塘成功应用到我国巨型工程中，并经受了近 5 个月的连续泄水初期运行考验。反拱水垫塘稳定及结构设计研究为我国乃至世界 250m 量级高拱坝第一次采用真正意义上的圆弧形反拱水垫塘提供了有力的技术支持，为高拱坝类似拉西瓦工程的水垫塘设计和运行提供了安全保证，也为类似工程的水垫塘设计开辟了另一种选择形式，是我国的坝后水垫塘更加安全化、多样化。

技术发明奖三等奖项目 7:

高拱坝闸墩 U 型预应力锚索施工技术研究及应用

推荐单位: 中国水利水电第八工程局有限公司

项目完成人: 姜命强 贺毅 于永军 文海家 蒋和平

在预应力闸墩的锚固形式中,传统的结构形式一般为直线形对穿锚索,但因其削弱坝体结构、使坝体内应力复杂化,施工时极易发生贯穿性裂缝;在结构布置上与流道、闸门槽等结构布置容易互相冲突。近年来,国内高拱坝结构中开始采用 U 型预应力锚索,其基本不削弱坝体结构,锚固区域应力分布趋于均匀,对改善闸墩应力有很大的优势。然而,由于 U 型预应力锚索的特殊结构形式及应用于高拱坝闸墩的施工特点,如施工环境存在施工场地狭窄、施工干扰大、高临空面作业等诸多不利因素,锚索结构存在安装吨位大、索体长、孔道倾角大、曲率半径小、整体张拉各钢绞线表现受力不均等特点,其在预埋定位管的制作和安装、锚索或钢绞线的运输、穿索、张拉等方面,都存在其特有的施工特点和难点,该项目研究主要关键技术成果如下:

1. 锚索预埋定位管及附属装置的制作及安装技术方法

该技术发明通过采用先进的焊接技术和精确的空间测量定位技术,并在混凝土结构中预埋支撑架,对大半径 U 型段及高度超过 20m 的钢套管进行制作和安装,保证了定位钢套管及其附属结构的定位准确,确保了定位误差在 $\pm 10\text{mm}$ 以内,安装质量可靠。



2. 提出了 U 型锚索受力不均匀情况下的控制量化指标

针对整体式 U 型锚索中 U 型段各钢绞线的张拉时受力不均衡的性状，提出了 U 型锚索受力不均匀情况下的控制量化指标。通过现场测试和理论研究的方法定量地分析了高拱坝闸墩 U 性锚索受力不均匀性的分布特点，并针对不同部位钢绞线的预紧拉力，提出了量化控制指标；通过受力不均匀系数来定量地描述了各钢绞线受力的不均匀性；利用预应力损失公式结合经典摩擦理论，得到了单根钢绞线受力的解析解，提出了钢绞线的抗拉强度建议设计取值范围。

3. 整体穿索、整体张拉式 U 型锚索制作及安装技术

通过在锚索孔道口搭设专用施工平台，设计了一种占地面积小的固定式分格绞盘卷装钢绞线，利用卷筒、卷扬机、设计专用的球形整体穿索连接器等将编索、穿索过程结合进行，利用锁扣装置对下索的速度进行控制，解决了高空、狭窄场地长索体、大吨位、小曲率半径 U 型锚索的编索、穿索安装等施工难题，并采用开发了整体穿索、整体张拉施工工艺及期成套施工技术。



4. 分束管穿索、整体张拉式 U 型锚索施工技术

闸墩预应力锚索吨位大、分束管多、排列规则，需要更加精准的焊接制作及定位安装技术。该技术主要特点在于 U 型分束管由于孔道直径小，钢绞线与牵引钢丝绳之间的牵引连接器需要精密设计及加工制作。本技术发明通过研制专用穿索连接器和接头挤压装置，首次将分束管技术成功应用于大坝 U 型预应力锚索。

主要关键技术成果和创新点主要包括：单根钢绞线分别进行牵引穿过分束管，牵引力量小，也便于在高悬空、狭窄的场地内的施工布置，但孔道小，采用了更可靠且更简单的穿索连接器和更可靠的连接方式；锚索进行整体张拉，由于 U 型段采用了分束管技术，张拉时各钢绞线之间不相互挤压，受力较均匀。

5. 同步张拉技术

成功研究并采用了“主次同步、对称张拉、分序分级”的 U 型预应力锚索整体张拉技术，有效地改善了张拉过程中闸墩受力状况，为确保工程提前发电赢得了宝贵的时间。

技术发明奖三等奖项目 8:

多瓣式超大型主纵梁潜孔弧门技术

推荐单位: 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司

项目完成人: 王兴恩 杨清华 徐祎 谭守林 李超洋 雷小平

弧门是水电工程潜孔工作闸门中较常采用的门型之一,其结构主要有主横梁和主纵梁两种型式。基于运输方便考虑,目前我国已建工程中大尺寸超大型潜孔弧门多采用孔口宽高比较大的主横梁结构,该种闸门结构型式会增加泄水坝段宽度,且制造、运输及安装单元较多,建设周期较长,对于多孔口工程,增加投资较多;而现有采用的左右分两瓣的主纵梁潜孔弧门技术,基于运输尺寸及重量限制,闸门孔口尺寸受限较多,对于泄洪规模较大的工程,会增加闸孔数量,经济性也较差。本项目基于现有主纵梁潜孔弧门技术的基础上,针对现有技术存在的不足依托枕头坝一级水电工程泄洪闸超大型潜孔弧门开展技术研发,研发了一种多瓣式(门叶纵向分瓣数 ≥ 3)超大型主纵梁潜孔弧门技术,解决了传统高窄大孔口超大型潜孔弧门采用双主纵梁左右对称分两瓣技术造成门叶外形尺寸大、重量过重,制造、运输及安装难度大,大尺寸支铰铸造报废率高、高窄大孔口潜孔弧门采用摇摆式液压机行程大、制造困难、外露部分多、工程美观性差等技术难题,主要进展如下:

1. 主纵梁潜孔弧门门叶结构纵向多分瓣(≥ 3)的制造、运输,在工地通过螺栓及焊接组合拼装成整体技术

主纵梁潜孔弧门的门叶结构由一瓣及以上的中门叶和对称设置的两瓣边门叶并合拼装而成,中门叶和边门叶的并合处均设有连接板,连接板上设有操作孔,操作孔边缘设有对称的焊接坡口,连接板经螺栓与边门叶一侧的连接板连接,操作孔的焊接坡口在螺栓连接后焊接并磨平。主纵梁潜孔弧门采用双缸悬挂式液压机操作,闸门吊耳设置在边门叶主纵梁靠闸墩侧上下支臂之间。



该技术解决了传统双瓣主纵梁潜孔弧门的门叶超宽超重不能运输问题,可根据水工泄洪要求和启闭机技术水平设置较大规模的主纵梁潜孔弧门,减少了多孔口泄洪闸门设置的数量及闸墩混凝土的浇筑量,从而节省金属结构及土建投资。此外,主纵梁潜孔弧门采用

双缸悬挂式液压机操作，较传统采用摇摆式液压机，减少液压机行程，降低液压机制造难度，且无需在闸门上部设置启闭机操作平台，直接将液压油缸上挂点支铰座埋设于闸墩两侧的二期混凝土中，油缸整体均位于坝顶以下，液压机无外露部分，坝面布置整洁美观。

该技术已在大渡河枕头坝一级水电工程中应用成功，解决制约工程建设的金属结构大件运输技术难题，技术经济性较好，尤其对于川滇藏等偏远地区的水电工程其运输的技术经济性更加明显，故该技术应用前景广泛。

2. 减轻弧门铰链重量和提高铸造质量技术

弧门支铰的铰链连接孔板顶部设置成厚度远小于连接孔板的放射状肋板，放射状肋板的厚度为连接孔板下部厚度的 $1/5 \sim 1/3$ ，放射状肋板与顶板发散连接。放射状肋板与顶板之间形成三角孔；三角孔内设有一组横肋。横肋和现有的加强肋上均设有导流孔，横肋空隙处的顶板上设有减重孔。该技术减小了弧门支铰整体外形尺寸及重量，并提高支铰铸造质量。



该技术已在大渡河枕头坝一级、北盘江光照、董箐及马马崖一级等多个水电工程中应用共计节省成本 400 多万元，具有较好的经济效益；弧门支铰在铸造过程中，铸液流动性好，无裂纹、冷隔和缩孔的产生，无质量缺陷，支铰铸造质量良好。

3. 液压油缸支铰座固定及二期混凝土浇筑技术

闸墩侧向预留的安装孔上方设置浇筑孔，安装孔为圆孔或多边形孔；闸墩包括边墩和中墩，边墩上的安装孔为盲孔，盲孔的孔底设有一组圆环布置的轴向插筋，中墩上的安装孔为通孔；边墩的安装孔中设有一个油缸支铰座，中墩的安装孔两端设有一对对称设置的油缸支铰座；安装孔内壁四周设有放射向插筋，放射向插筋与油缸支铰座四周的放射向连接筋经矩形板焊接；油缸支铰座插入安装孔的一端焊接有轴向连接筋，盲孔中的轴向连接筋经矩形板与盲孔底部的轴向插筋焊接；通孔中的轴向连接筋直接与另一个油缸支铰座底端焊接；浇筑孔为矩形孔，矩形孔开口尺寸大于油缸支铰座外形尺寸且一直延伸至闸墩顶部的检修平台；当油缸支铰座固定好后，从顶部检修平台进行二期混凝土浇筑。此外，对于油缸支铰座中心高程与坝顶平台高程相差较大，从顶部浇筑孔浇筑二期混凝土，落差很大，精度不易控制的高闸坝工程，可根据油缸支铰座中心高程及埋设要求确定液压泵房平台高程，采用闸顶平台与液压泵房平台不同的台阶式闸墩结构。



该技术可提高液压油缸支铰座安装精度与二期混凝土的浇筑效率及质量，对于液压油缸支铰座中心高程与坝顶平台高程相差较大的工程，采用闸顶平台与液压泵房平台不同的台阶式闸墩结构，可减少闸墩混凝土的浇筑量从而节省投资。

该技术可提高液压油缸支铰座安装精度与二期混凝土的浇筑效率及质量，对于液压油缸支铰座中心高程与坝顶平台高程相差较大的工程，采用闸顶平台与液压泵房平台不同的台阶式闸墩结构，可减少闸墩混凝土的浇筑量从而节省投资。