我国水利水电地下工程施工技术的回顾与展望

马洪琪

（云南华能澜沧江水电有限公司，云南 昆明 650011）

摘　要：系统地总结了我国近 20 年来地下工程施工技术所取得的主要成就，简要阐明了大型地下引水发电系统快速施工技术、大断面长隧洞快速施工技术、无钢衬高压钢筋混凝土岔管施工技术、高压长斜井快速施工技术、地下工程混凝土模板施工技术等 5 方面的技术创新要点，并对今后 10 个方面的集成创新方向进行了展望。

关键词：技术创新；地下工程；水电建设

作者简介：马洪琪(1942－　)，上海人，中国工程院院士。

0 引　　言

21 世纪以来，随着社会生产力的发展和科学技术的进步，以科学发展观为指导，面对资源短缺、环境恶化和土地衰退，有识之士提出“Think Deep”的号召，把地下空间当成新型的国土资源加以开发利用。经济发展和社会进步对可再生能源需求的增长，极大地促进了水利水电工程建设的发展。南水北调工程的穿越黄河地下输入隧洞、一大批巨型电站的地下引水发电系统，其地下工程规模之大，施工难度之高，将进一步推动我国地下工程施工技术的发展。

20 世纪 60 年代以前，我国地下工程施工以手风钻钻孔爆破开挖、人工出渣为主，围岩稳定性维护以架立支撑防止塌方的被动支护为主，施工速度慢，效率低，安全问题突出。1963 年陆浑水库增建泄洪洞，开始研究光面爆破技术，采用喷锚支护设计，取得成效。随着新奥法概念的引进，我国水电建设者展开了喷锚支护推广性研究。自 1970 年~1985 年，渔子溪一级电站、白山电站、西洱河梯级电站等建设，均采用光面爆破和喷锚支护技术，推动了我国地下工程开挖与支护技术的进步。1985 年以后，伴随着改革开放，鲁布革电站率先使用世界银行贷款，引进国外的先进技术、先进设备和管理经验，使我国地下工程施工技术产生了质的飞跃。鲁布革电站大跨度、高边墙地下厂房，采用喷锚支护作为永久支护，并首次采用挪威的岩壁吊车梁技术。使用先进的开挖、支护设备，创造了鲁布革电站长引水隧洞全断面开挖、支护月进尺 373.5 m 的世界纪录。引水隧洞全断面针梁钢模混凝土衬砌技术的应用极大地开拓了中国工程师的视野。从此以后，我国的工程技术人员在引进、消化、吸收基础上的再创新，拥有了一批有自己特色的地下工程新技术。

1　地下工程施工技术的主要成就

总结近 20 年来我国地下工程施工技术取得的主要成就，概括起来有以下 5 个方面。

1.1　大型地下引水发电系统快速施工技术

我国的地下厂房，无论规模多大，地质条件多复杂，基本采用喷锚支护为永久支护和岩壁吊车梁技术，这是实现地下厂房洞室群快速施工的前提。如大朝山电站地下厂房顶拱有一段长约 45 m 的凝灰岩夹层，原设计在该地段采用钢筋混凝土衬砌，后改为钢拱肋、系统锚杆和钢纤维喷混凝土支护获得成功，简化了施工程序，加快了进度。跨度为 30.7 m 的龙滩地下厂房，在顶拱Ⅴ类围岩段，采用预应力锚杆和喷钢纤维混凝土进行永久支护，也获得成功。山西西龙池、江苏宜兴抽水蓄能电站地下厂房，处于薄层灰岩和Ⅲ、Ⅳ类花岗岩地段，围岩强度低，支护型式采用在厂房顶拱上方增设若干锚固洞，从洞内打辐射状预应力锚索，对顶拱作预加固，在开挖厂房时喷锚支护紧跟，也取得了较好的效果。

岩壁吊车梁的工作原理是充分利用围岩的承载能力承担吊车荷载，用一定深度的注浆锚杆把钢筋混凝土梁锚固在岩石上，梁上荷载通过锚杆及梁与岩石面上的磨擦力传到岩体深部（见图 1）。许多工程实践都证明岩壁吊车梁这种新型结构施工方便，安全可靠，适应性强，即便象安徽琅琊山抽水蓄能电站其灰岩的抗压强度较低，也成功地采用了岩壁吊车梁。我国岩壁吊车梁技术在设计和施工方面都有新的创新。如岩台开挖技术（见图 2），锚杆在松驰圈不受力，向深部传力的设计概念等。

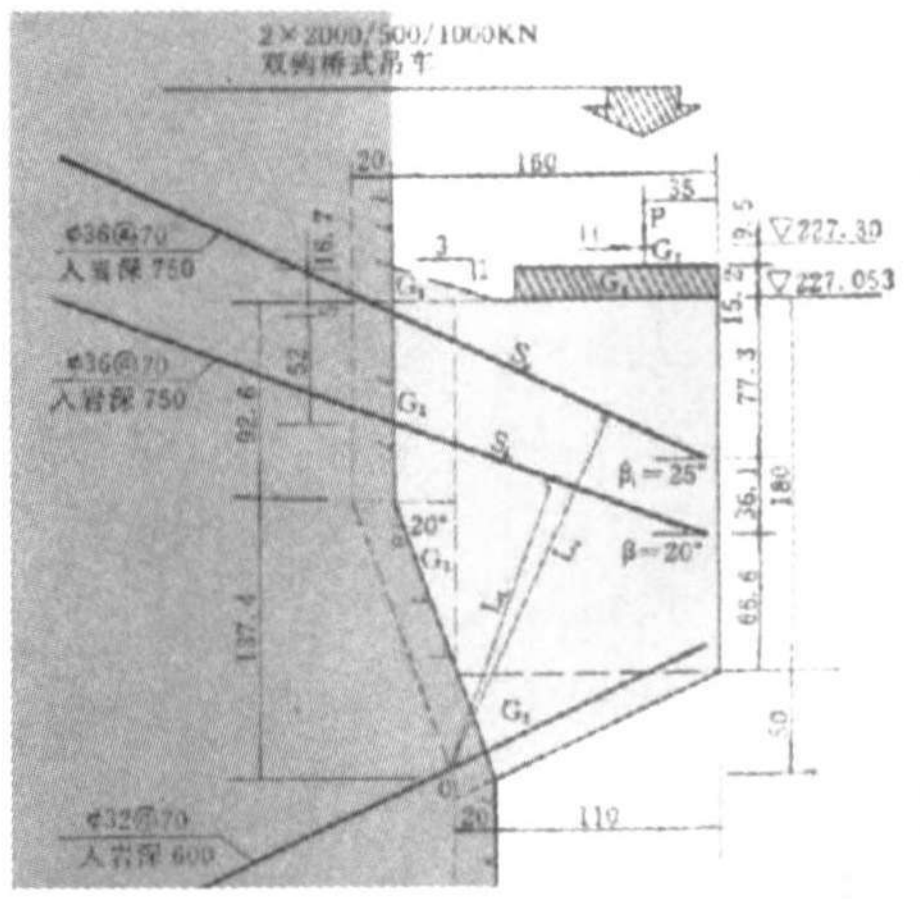


图 1　岩锚吊车梁图

地下引水发电系统快速施工技术的主要经验有 5 条：①规划和优化总体施工方案，认真布置施工支洞，使引水系统、3 大洞室和尾水系统形成既互不干扰又有机联系的整体，实现多工作面连续施工（见图 3）；②充分利用关键线路上地下厂房尺寸大、工序多的特点，规划合理的分层分块，采用“平面多工序、立体多层次”的施工方法，

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

实现快速施工；③抓住地下厂房施工的5大难点，即顶拱的开挖、支护，岩壁吊车梁施工，厂房高边墙稳定，母线洞安全开挖技术，大挖空率的尾水管与厂房高边墙交叉口稳定技术；④广泛采用新工艺、新技术、新设备，尤其是高效的成龙配套的施工设备，如电脑台车、锚杆三联机、钢纤维喷混凝土机械手、反井钻机等应用，可大大提高施工效率；⑤利用现代信息化技术，将三维有限元分析、施工期地质评价及监测成果反馈分析，动态调整喷锚支护设计参数。

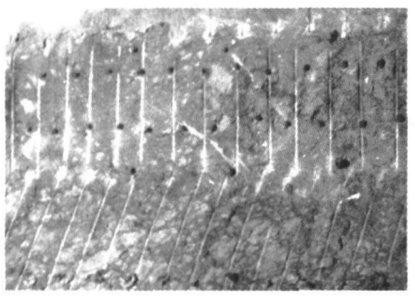


图2 岩台开挖成型后部

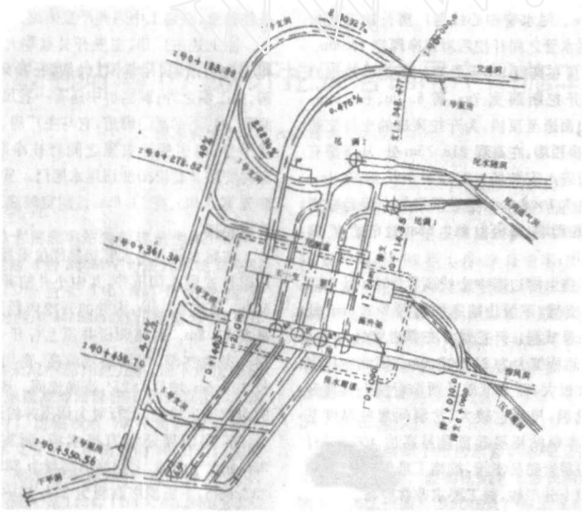
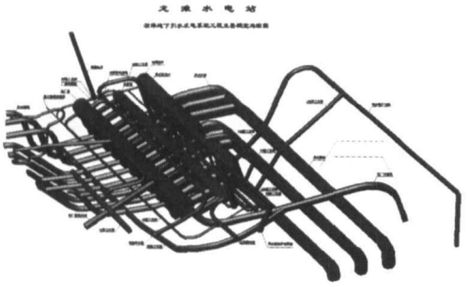
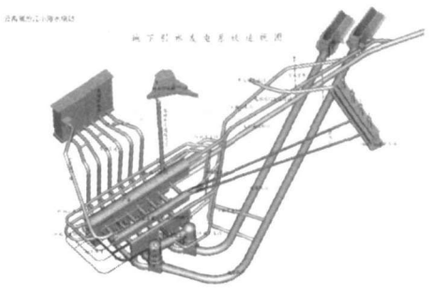


图3 广蓄电站引水发电系统施工支洞布置图

上述新技术的综合运用，使我国地下厂房的施工记录不断刷新，如由119条洞室组成的龙滩水电站地下引水发电系统开挖总量达309万 m^3，主厂房尺寸为388.5 m×30.3 m×75.4 m（长×宽×高），共安装9台单机容量为700 MW的机组，创造了年最高石方洞挖127万 m^3，月平均洞挖12万 m^3 的新纪录，地下厂房仅用32个月就完成开挖与支护（见图4）。



（a）龙滩水电站



（b）小湾水电站

图4 龙滩、小湾水电站引水发电系统透视图

1.2 大断面长隧洞快速施工技术

我国大型水电站的水工隧洞尺寸都很大，如溪洛渡电站和糯扎渡电站的导流洞长度为1.2～1.5 km，方圆型衬砌断面为16 m×21 m（宽×高），开挖断面为17.2 m×22.2 m～19.6 m×24.6 m，进口渐变段的最大开挖断面更达27.0 m×26.0 m，施工速度要求很快，从导流工程开工到大江截流一般为二年左右。组织大断面长隧洞快速施工，是工程技术人员要认真研究的课题。

长度1.0 km左右的导流洞，一般均在上下游合适的位置各布置一条施工支洞，分别进入导流洞的上层和下层，实现多工作面的快速施工。对于Ⅰ、Ⅱ类围岩，导流洞一般分3层开挖。上层开挖的高度约8.0 m，采用中导洞开挖超前，周边光面爆破跟进，喷锚支护紧跟的施工程序。一般采用三臂液压台车造孔，装载机配自卸车出碴，锚杆台车造孔并安装锚杆，机械手喷射混凝土。下层开挖时先对直边墙实施预裂，中间拉槽采用液压潜孔钻打垂直孔，底板预留两米左右的保护层采用水平光面爆破施工。大断面隧洞开挖的难点是通过断层破碎带的Ⅳ、Ⅴ类围岩及隧洞进出口段的特殊部位。其主要施工原则有3条：①以“锚喷支护为核心”，最大限度地控制围岩变形，采取“超前勘探、预锚固或预灌浆、控制爆破、短进尺、早封闭、强支护、勤量测”的施工方法，确保成洞围岩的稳定。如采用管棚双浆液预加固、中空自进式注浆锚杆预加固或超前固结灌浆，格构拱架或钢支撑与锚杆联合受力，喷钢纤维混凝土覆盖等综合支护措施，以保证施工安全和成洞质量；②对于自稳时间极短的洞段，则应采用分层、分区开挖、支护的施工方法，顶拱层一般分四区开挖，按“先边后中、先软后硬”的开挖支护程序进行施工（见图5）；③加强安全监测及反馈分析，调整支护参数。对进、出口渐变段的洞口开挖，因跨度大，埋深浅，断面体型不利，又受到卸荷裂隙和地质构造的切割，除采用上述施工方法外，还应在进、出口明挖的最低一级马道上向顶拱打垂直锚筋桩，对顶拱起预锚和悬吊作用，再在洞脸周边打预应力锚杆或锚索，提高围岩的自稳能力。

隧洞的混凝土衬砌，一般采用先底板、后边顶的施工程序。在已浇筑的底板混凝土上架设重型钢轨，安装电动驱动、液压控制的钢模台车、钢筋台车和灌浆台车，实施钢筋绑扎、边顶拱混凝土浇筑和灌浆的平行交叉作业（见图6、7）。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

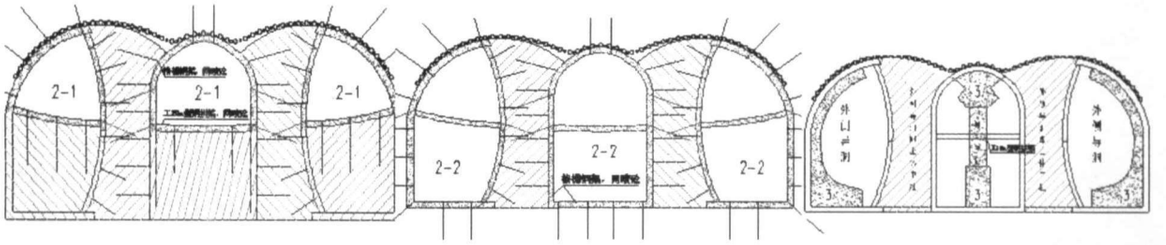


图 5 广州地铁车站分块施工方法



图 6 小湾导流洞施工中的钢模台车

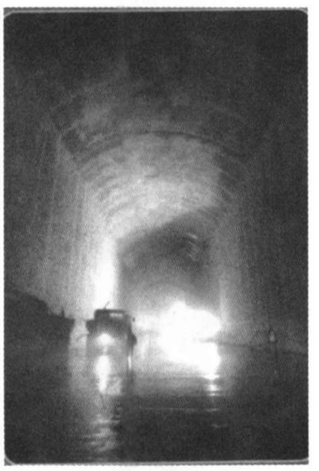


图 7 衬砌后的小湾导流洞

在小浪底水利枢纽工程还成功地在两条排沙洞实施了我国首例双圈无粘结环锚预应力混凝土衬砌新技术（见图 8）。

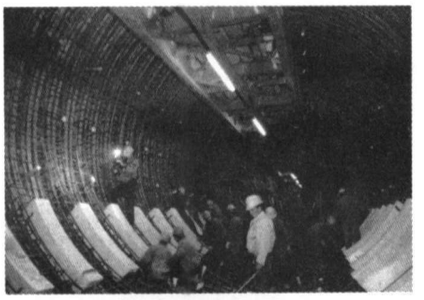


图 8 小浪底排沙洞施工

1.3 无钢衬高压钢筋混凝土岔管施工技术

随着抽水蓄能电站在我国兴建，大直径高压岔管的结构型式是摆在工程师面前的一道难题。如广州抽水蓄能电站采用一洞四机的布置型式，主、支管分岔处内径由 8.0 m 变至 3.5 m，主管是大圆锥体，分岔支管是小圆锥体，大小圆锥体相贯，体型结构复杂。岔管承受最大静水头 610 m，最大动水头 725 m，PD 值达 58000 kN·m（见图 9）。如采用常规的钢岔管，需采用厚度 60 mm 左右的高强钢板，如在洞外加工，则运输洞尺寸大，费用高，如轧制成瓦片在洞内拼装焊接，则施工条件差，质量难以保证。广蓄电站引进了美国哈扎公司设计的无钢衬高压钢筋混凝土岔管新技术，混凝土衬砌厚度仅 60 cm，28 d 抗压强度为 30 MPa，单层钢筋布置。

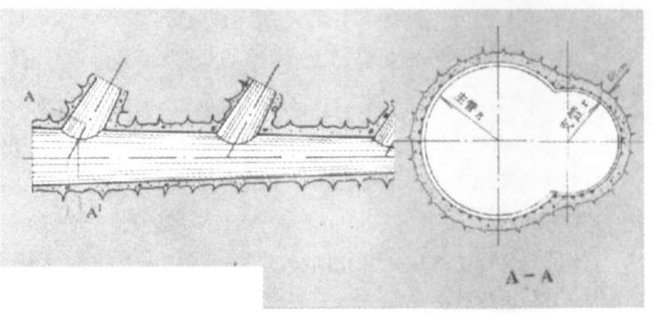


图 9 广蓄电站高压钢筋混凝土岔管

无钢衬高压钢筋混凝土岔管的设计原则是：内水压力由混凝土传递到围岩的应力应小于该处地应力场的最小主应力，围岩承受绝大部份内水压力。钢筋混凝土衬砌主要起保护围岩、降低糙率和便于高压灌浆作业。通过高压固结灌浆，加固了围岩，提高围岩特别是构造带的抗渗性及整体性，并对混凝土岔管施加一定的预压应力。水道放空时，外水压力由混凝土衬砌及一倍厚的围岩联合承担。岔管顶部一定高程设排水洞和排水孔，以释放内水外渗的水压力。无钢衬高压钢筋混凝土岔管施工技术要点有 4 条：①严格的光面爆破技术和预应力锚杆紧跟，以控制开挖体型、抑制围岩变形；②环向钢筋的加工与绑扎，由于是一个大圆锥与 4 个小圆锥相贯，每根环向钢筋均不相同，与椭圆方程参数近似，加工后必须用专用模具调整到位，做到曲线圆顺，表面平整；③开发透水排气的模板，解决混凝土泌水、排气的通畅，养护水又能湿润混凝土；④6.5 MPa 的高压固结灌浆技术，既要固结混凝土衬砌周边围岩的松驰圈，又要加固一倍洞径的围岩，确保衬砌与围岩联合受力，既要使混凝土衬砌有一定的预压应力，又不致使混凝土劈裂。广蓄电站高压钢筋混凝土岔管设计、施工与原型观测的成功实践，为水头更高、一洞六机布置天荒坪抽水蓄能电站采用此结构型式提供了有益的经验（见图 10、11）。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

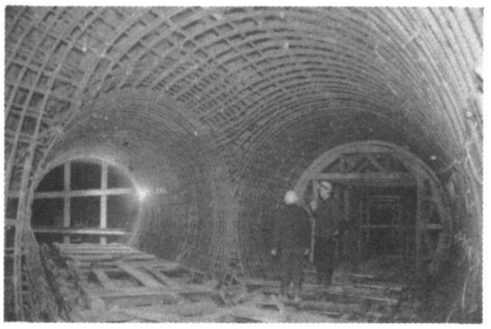


图10 广蓄岔管钢筋绑扎

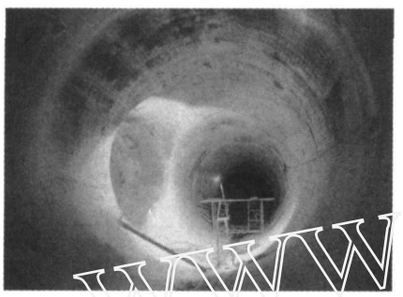


图11 广蓄混凝土岔管成型图

1.4 高压长斜(竖)井快速施工技术

引水式电站或抽水蓄能电站的水头很高，高压水道采用斜井布置方式显然比竖井更经济，但斜井的施工方法，尤其是混凝土衬砌模板技术是施工的难点。广蓄电站高压水道采用二级斜井布置，其中上斜井长406.22 m，下斜井长347.5 m，倾角50°，开挖直径9.7 m，衬砌直径8.5 m，用长度为90.4 m的中平洞连接上、下斜井。天荒坪抽水蓄能电站则采用700多米长的一级斜井布置，只是在开挖阶段在中部布置一条施工支洞，并在斜井中间留一个岩塞，将斜井开挖分为两段。

斜井的导井开挖一般采用正、反井同时掘进，上口用下山法，手风钻开挖，人工装碴，卷杨机牵引斗车出碴，工人劳动强度大，作业面排水困难，进度慢；下口用阿力马克爬罐打反导井，自重溜碴。阿力马克爬罐在鲁布革工程首次采用，导井开挖速度快，月进尺可达80 m。但通风散烟困难，掌子面作业环境差，安全问题突出。

90年代中期，煤炭系统研制了矿井反井钻机，由于其安全、快捷的优点，在水电系统中开始应用。用反井钻机开挖斜井、竖井的导井，是斜（竖）井开挖的一次革命。但限于钻机性能，用国产钻机施工斜井导井，开凿长度未能突破200 m。2005年水电十四局从芬兰购进了一台HINO400H型反井钻机，在广东惠州抽水蓄能电站斜井施工中创造了新的纪录。该斜井倾角50度，全长301 m，直径为240 mm的先导孔贯通不到一个月，直径为1400 mm的扩孔仅1.5个月，标志着我国长斜井反井钻机施工技术的重大突破。

斜井的扩大开挖与喷锚支护，在由卷扬机牵引的扩挖平台车上进行，作业台车共设4层，高达10 m，可实现掌子面垂直于洞轴线开挖，使钻手容易打周边孔和径向锚杆孔，日平均扩挖与支护1.6 m。

斜井混凝土施工的难点是模板技术，常规的立模浇筑方法进度缓慢。为此，广蓄电站从英国CSM公司引进了间歇式的斜井滑模设备，其主要结构由中梁、上下锁定架、模板系统、工作平台及爬升悬吊系统组成。中梁由液压爬爪沿4条悬吊高强钢缆爬升，钢缆上端固定于井口平台。中梁定位后，模板由液压千斤顶带动沿中梁轨道滑升（见图12）。这是我国第一例斜井混凝土滑模施工技术，创造了月平均滑升102 m，最高滑升149 m的纪录。广蓄斜井施工综合成洞率为每天1.0 m。如此大直径、陡倾角长斜井施工速度，在国际上都是一流的。

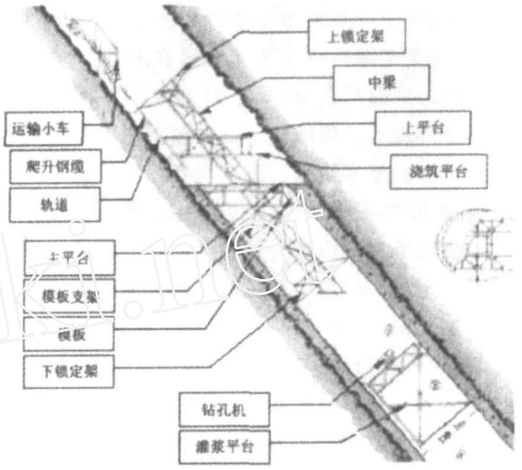


图12 广蓄斜井滑模结构

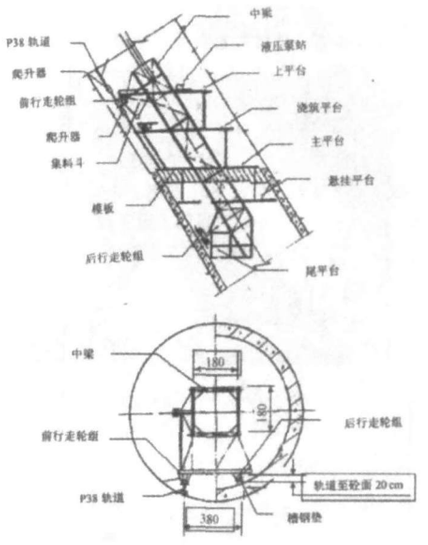


图13 天荒坪斜井XHM-7滑模结构

有了广蓄的实践经验，水电十四局自行研究制了XHM-7型连续式斜井滑模，其核心技术是滑模的驱动设备，即依附在P38钢轨侧壁的液压爬升器，在前行走轮前后各布置一对爬升器，在液压系统控制下，前后爬升器同时工作带动模板滑升，而且爬升器有自锁功能，安全可靠（见图13）。这套滑模设备在长度为700 m、倾角58°的天荒坪抽水蓄能电站中应用，创造了月滑升230.3 m的新纪录，超过了广蓄斜井滑模滑升速度，其重量仅为CSM公司滑模的1/2。从此，我国拥有了自主知识产权和核心技术的的斜井滑模设备。水电一局在桐柏抽水蓄能电站研制的LSD斜井滑模，则是由两台连续拉伸式液压

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

千斤顶沿固定于斜井中心线的钢绞线上爬升，克服了模体偏心受力的缺陷，受力更合理，效率更高（见图14）。直径为10 m的龙滩电站斜井，是迄今为止采用滑模施工技术的最大斜井。进而在三峡永久船闸方圆型断面的斜井混凝土施工中，又研制成功斜井全断面变径滑模新技术。反井钻机的应用和滑模技术的进步，使长斜井、深竖井快速施工技术日臻完善（见图15）。



图13 天荒坪斜井施工

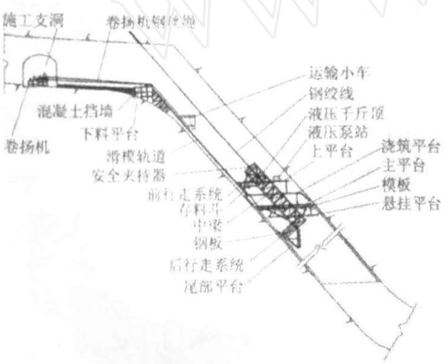


图14 LSD斜井滑模系统

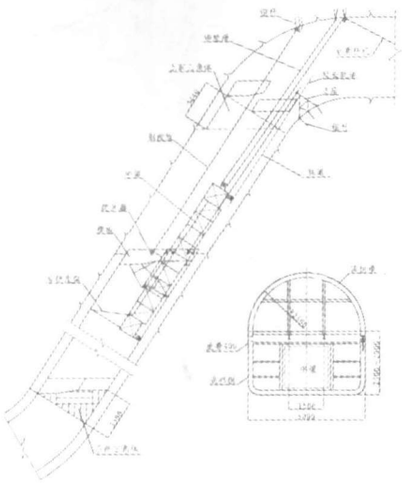


图15 三峡变断面斜井滑模结构

1.5 地下工程混凝土模板施工技术

经过20多年的不断创新，我国地下工程各类洞、井的混凝土模板施工技术已经实现了根本性变革。目前，方圆型断面均采用先底板、后边顶拱一次成型钢模台车，最大衬砌断面达16×21 m，重量约300 t。圆形断面采用针梁模板全断面混凝土浇筑的直径已达9.0 m。对直径更大的隧洞，一般用钢模台车先浇筑底拱100°混凝土，再浇筑边顶拱。如小浪底导流洞直径为14.5 m，龙滩电站尾水洞直径为21 m，均采用此施工方法（见图16）。

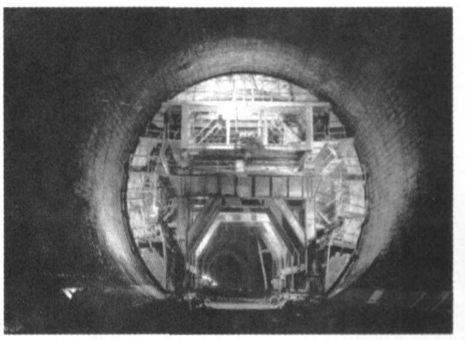


图16 龙滩尾水洞施工

集地下工程模板技术之大成者，当数长江三峡工程永久船闸地下输水系统。它由四条输水廊道和36条竖井组成，廊道总长约5500 m，其中包括16条变断面斜井和72个渐变段；竖井总高度为2578 m。地下输水系统结构复杂，洞洞交叉，洞井相贯，洞中套洞，井内有井（见图17）。平洞标准衬砌断面有11种，并且以1∶7～1∶8坡比变坡，起、降坡处均为圆弧过渡，进出口均设弯段，方圆形断面直墙与底板均采用圆弧连接。72个渐变段共有19种不同断面型式，斜井倾角约57度，直线段为上大下小的渐变断面。由于体形变化复杂，对不同部位，按竖井、斜井和平洞对模板进行分类，竖井模板分别选用了自升式爬模、滑框翻模、滑模、悬臂模和筒子模5种类型；斜井模板选用底拱滑模、边顶滑模、弯道模、全断面变径滑模4种类型；平洞模板选用边顶钢模台车、底拱翻模台车、底拱小翻模、升坎段翻模，共投入了13个种类的专用模板，模板总数达80多台套。永久船闸地下输水系统模板类型之多，数量之大，在国内外水电工程地下洞室混凝土施工中尚无先例。从技术性能看，竖井模板中滑框翻模及自升式爬模月浇筑高度为20～25 m，斜井的几种滑模平均每天滑升4.0 m，平洞钢模台车平均每5 d浇筑一块。先进的混凝土模板施工技术，不仅保证了洞井混凝土施工的高速度，而且保证了混凝土成型的高质量。永久船闸地下输水系统混凝土衬砌设计糙率为$n=0.015$，实测糙率小于设计值，提高了水道的输水能力，经济效益显著。

2 开展集成创新，进一步提高地下工程施工技术水平

近20年来我国水利水电工程的快速发展，极大地提高了我国地下工程的施工技术水平。现在已经从引进、消化、吸收再创新向集成创新转变。诸如：高性能的爆破器材研制和起爆网络设计，将使爆破效率更高并实现更严格的控制爆破要求；测量技术的发展、钻孔精度和轮廓爆破技术的提高，使开挖质量近乎完美，如三峡工程地下厂房32 m跨度的顶拱开挖，残留半孔不仅互相平行，而且每茬炮孔几乎在同一直线上，最大超挖仅7.5 cm（见图18）；钢纤维和聚丙稀微纤维喷混凝土的应用，替代了传统的挂钢筋网喷混凝土；岩土锚固技术的发展及各种新型锚杆的研发，结合分层分块的优选及预加固技

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

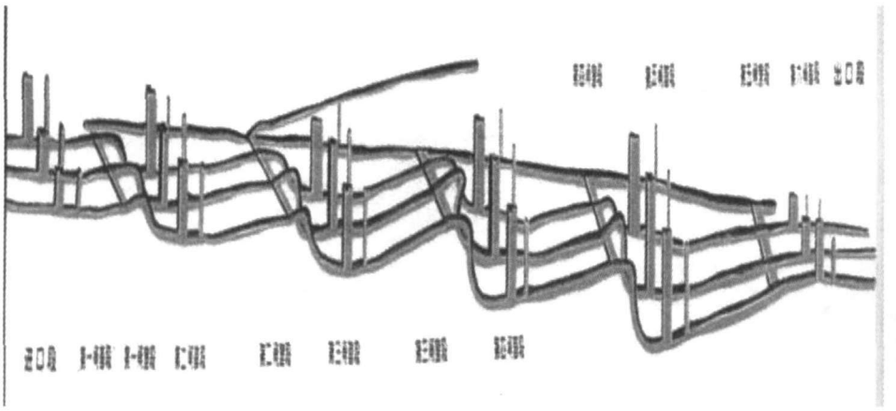


图 17 三峡地下输水系统透视图



图 18 三峡地下厂房施工

术，使不良地质条件下的大洞室开挖稳定成为可能；反井钻机的出现及滑模技术的完善，实现了长斜井和深竖井快速施工；高效通风机的研制，配合反井钻机打通风井使长隧道的通风散烟难题得以解决；“平面多工序、立体多层次”工法的广泛推广，极大地提高了地下厂房的施工速度；各种先进的模板技术组合，可适应不同类型断面形式的洞井混凝土快速施工；岩壁吊车梁、无钢衬高压钢筋混凝土岔管、双圈无粘结环锚预应力混凝土衬砌等新型结构的推广应用，促进了地下工程结构的变革；在工程安全监测和支护设计方面，以“锚喷支护”为核心，计算机仿真技术为载体的信息合成技术，施工实时监测反馈分析技术，地下工程数码摄像监测系统的研究等，为支护设计优化和工程运行安全提供技术保障。将上述新技术、新材料、新工艺、新设备进行集成创新，运用现代管理科学实现精细化管理，我们有理由相信，我国的地下工程施工技术将位居世界前列。

参考文献：

[1] 王裕湘. 鲁布革水电站地下厂房岩壁吊车梁设计[J]. 水力发电,1988(12).

[2] 马洪琪. 广蓄电站地下厂房开挖及岩锚吊车梁施工[J]. 水利水电施工,1993(4).

[3] 关 雷. 松雨.广蓄电站斜井混凝土衬砌滑模施工[J]. 术,水力发电, 1993(7).

[4] 熊训邦,等.XHM-7 型斜井滑模系统的研制与应用[J]. 水力发电, 1998(8).

[5] 钱兴喜.永久船闸地下输水系统模板工程简介[J]. 云南水电, 2002(4).

[6] 马洪琪. 地下工程新技术的实践[J]. 中国工程科学,2002(11).

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net