

厄瓜多尔 CCS 水电站的设计关键技术综述

谢遵党, 杨顺群

(黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 厄瓜多尔 CCS 水电站是该国最大的水电站, 位于热带雨林地区, 受火山地震影响较大。针对泥沙多、地震烈度高、覆盖层深、输水距离长、水头高等复杂自然条件, 通过开拓性的设计研究, 成功解决了修建特大规模沉砂池、超深覆盖层上的大型建筑物、火山灰中的大洞室、24.8 km 长深埋隧洞、618 m 水头的压力管道、大跨度地下厂房洞室群、高水头大容量冲击式水轮机组等遇到的关键技术问题。创新的设计为工程顺利施工创造了条件, 保障了工程安全可靠运行, 也为水利水电工程建设开辟了新路径。

关键词: 沉砂池; 长隧洞; 超深覆盖层高压竖井; 高水头水电站; 厄瓜多尔科卡科多辛克雷水电站(CCS)

中图分类号: TV731.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)01-0137-06

Summary of key technologies in design of Ecuador Coca Codo Sinclair Hydropower Station

XIE Zundang, YANG Shunqun

(Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The Coca Codo Sinclair Hydropower Station in Ecuador, located in the tropical rain forest area, adjacent to an active volcano, is the largest hydropower station in the country. Considering the complex natural conditions such as heavy sediment load, high seismic intensity, deep overburden, and long water transfer distance and high water head, key technical problems were successfully solved through pioneering design and research, such as: the construction of large-scale sedimentation basin, large structures on ultra-deep overburden, large caverns in volcanic ash, 24.8 km long deep-buried tunnel, penstocks with 618 m water head, large-span underground powerhouse caverns, high-head large-capacity impulse turbines. The innovative design created good conditions for the smooth construction of the project, guaranteed a safe and reliable operation of the project, and opened up new paths for the construction of water conservancy and hydropower projects.

Key words: desilting basin; long tunnel; ultra-deep overburden high pressure shaft; high-head hydropower station; Ecuador Coca Codo Sinclair Hydropower Station;

1 研究背景

厄瓜多尔科卡科多辛克雷(Coca Codo Sinclair, 简称 CCS)水电站位于亚马逊河二级支流科卡河上, 为径流引水式, 装有 8 台冲击式水轮机组, 总装机容量 1 500 MW, 总投资约 23×10^8 美元, 是该国最大的水电站。CCS 水电站设计年均发电量约 87×10^8 kWh, 满足了全国三分之一人口的电力需求, 结束了该国进口电力的历史^[1-2]。

科卡河流域地形以山地为主, 分布着众多火山, 工程区附近有雷文塔多(Reventador)活火山, 火山口距科卡河约 7 km。流域内分布有高山气候、热带草原气候及热带雨林气候带, 年均降雨量由上游地区 1 331 mm 向下游逐渐递增到 6 270 mm。1923 - 2007 年 6 级以上的大地震共发生了 9 次。科卡河两岸和古河道沉积了较厚的松散火山沉积物, 在强降雨作用下易受侵蚀, 河流输沙量很大。科卡河水量丰沛, 工程区河道总体坡降较陡, 从首部枢纽到厂

收稿日期: 2018-09-19; 修回日期: 2018-11-13

作者简介: 谢遵党(1968-), 男, 河南长垣人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事水利水电工程设计研究工作。

通讯作者: 杨顺群(1969-), 男, 河南漯河人, 本科, 教授级高级工程师, 主要从事水利水电工程设计研究工作。

房直线距离不到 30 km,落差达 650 m,水能资源丰富,开发价值很高。

图 1 是 CCS 水电站工程布置示意图。为开发科卡河水能资源,修建 CCS 电站必须克服复杂自然条件的制约,建设特大规模沉砂池、超深覆盖层上的大型混凝土建筑物、火山灰中的大洞室、24.8 km 长

的深埋隧洞、设计最大静水头 618 m 的压力管道、纵横交错的大跨度地下厂房洞室群、高水头大容量冲击式水轮机组,设计中遇到的诸多问题都没有成熟的理论和经验可以被直接采用,需要通过开拓性的设计研究解决。

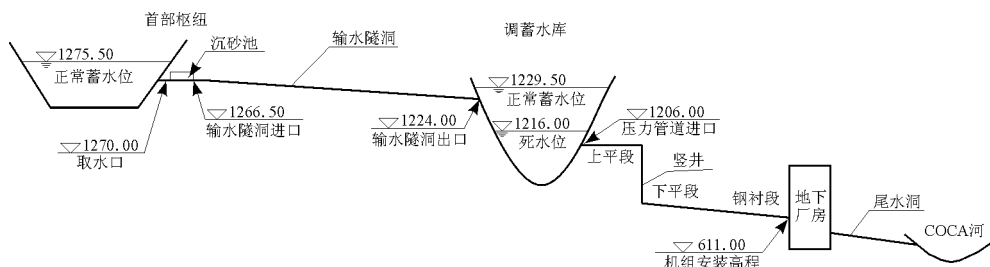


图 1 CCS 水电站工程布置示意图

现行的规范标准要求重力坝、溢洪道等混凝土建筑物基础要设在质量较好的基岩上。特殊的地质地形条件决定近 40 m 高、泄流能力高达 15 000 m^3/s 的 CCS 水电站泄洪和冲沙混凝土坝、大型沉砂池必须建在最深超过 200 m 的覆盖层上。综合采用混凝土灌注桩、振冲碎石桩、截渗墙等措施,成功解决了地震液化、基础沉降和渗漏等问题,开辟了混凝土坝地基处理新途径。

南美洲水电站泥沙对水轮机磨损的问题比较突出^[3]。CCS 水电站在首部枢纽设沉砂池并利用调蓄水库进一步沉沙,引水流量达 222 m^3/s 。这样规模的沉沙工程国内外均没有成熟的经验可以借鉴。通过物理模型和数值模型的反复试验研究分析,最终达到了沉沙率高、冲沙耗水量小、运行经济可靠的设计目标^[4-7]。

随着常规钻爆开挖技术的发展和隧洞掘进机设备的日益成熟,长距离、大埋深隧洞在交通、水利等行业的应用越来越普遍。大埋深长隧洞经常遇到高地应力、岩爆、高外水、突涌水、突泥和涌砂、高地温、围岩大变形等极为复杂的工程地质问题,需要针对每个工程的实际情况研究分析才能做出合理的设计^[8-10]。CCS 水电站输水隧洞长 24.8 km,开挖洞径 9.11 m,最大埋深超过 800 m,其规模在世界上名列前茅^[11]。限于地形条件,施工通道要在火山沉积物中穿过,使设计更为困难。设计中采用先进的理念,通过优化布置、采用通用薄管片等措施,全洞包括施工支洞没有任何二次衬砌,在保证工程安全的前提下简化了施工,提高了掘进速度。

超过 500 m 水头的水电站压力管道的工程实践

较少,在抽水蓄能电站采用较多,其设计理论和设计方法尚处于研究发展阶段^[12-14]。CCS 水电站引水发电系统压力管道要承受最大 618 m 的静水头,同时存在外水压力大、地应力偏低等地质问题,设计中综合采用钢筋混凝土衬砌、钢板衬砌和围岩灌浆处理等手段,成功解决了工程安全和防渗漏问题。

水电站大型地下厂房洞室群围岩稳定和变形问题非常突出,一般需要结合工程具体地质条件专门研究,采用钢筋混凝土衬砌、挂网喷混凝土和预应力锚索等综合措施处理^[15-17]。CCS 水电站是世界上规模最大的冲击式机组水电站,其地下厂房要容纳 8 台冲击式机组、24 台变压器及其附属设备,需要解决洞室多、洞室群纵横交错布置、主洞室跨度大、洞室间岩壁薄等引起的问题。经分析论证,大洞室主要采用锚杆挂网喷混凝土柔性支护,避免了大范围预应力锚索影响施工工期的问题。

2 工程设计关键技术问题处理

首部枢纽坝址控制流域面积约 3 600 km^2 ,多年平均降雨量 3 600 mm,多年平均径流量 $91.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。受强降雨和火山活动影响,坝址处泥沙量较大,水库多年平均输沙量 $1211.6 \times 10^4 \text{ t}$,多年平均悬移质含沙量为 1.01 kg/m^3 。

根据地震危险性分析,工程区最大可信地震为 6.9 级,最大可信地震峰值加速度 0.4 g。按照国际抗震标准,重要建筑物设计地震加速度为 0.3 g,一般建筑物采用 0.15 g。

2.1 首部枢纽特大沉砂池设计与深覆盖层处理

首部枢纽水库总库容 $2 818 \times 10^4 \text{ m}^3$,无调节库

容,主要建筑物有溢流坝、冲沙闸、引水闸、沉沙池、混凝土面板堆石坝等^[18]。首部枢纽布置如图2。溢流坝布置在左侧垭口处,坝顶长度271.75 m,最大坝高39 m,设8孔20 m宽开敞式溢洪道,最大泄量15 000 m³/s。3孔冲沙闸位于溢流坝右侧,总冲沙流量977 m³/s。引水闸与溢流坝轴线成70°交

角,16孔闸门对应下游8条沉砂池道。沉沙工作段长度150 m,单条沉沙池过流量27.8 m³/s,总设计流量222 m³/s。混凝土面板堆石坝布置于右岸河床,坝顶长度156 m,最大坝高32 m。面板堆石坝及泄洪排沙坝均采用深30 m厚0.8 m悬挂式塑性混凝土截渗墙防渗。

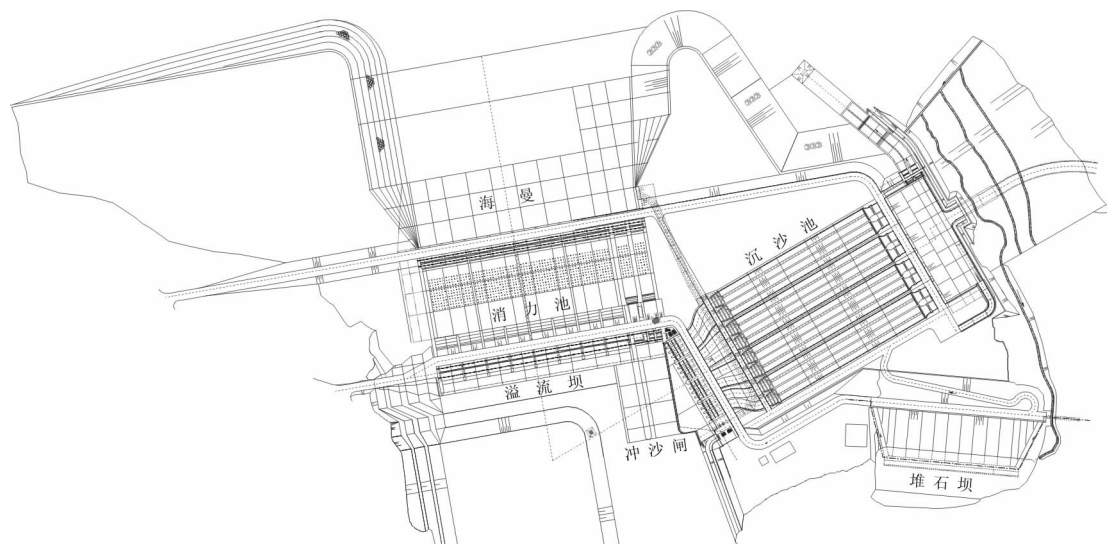


图2 首部枢纽总布置图

溢流坝和排沙闸建基于古河床砂卵砾石和砂层上,下伏最深超过200 m的火山灰沉积层。为解决抗滑稳定和基础承载力问题,放缓了上游坝坡至3:2。左岸挡水坝段下局部可液化砂层采用振冲碎石桩处理。冲沙闸坝段处于由岩石向覆盖层过渡段,为防止过量不均匀沉降,采用素混凝土灌注桩形成复合地基,调整基础变形性能。为保护下游粉细沙质河道,溢流坝下游设长度64.4 m、深度4~6 m的消力池。消力池下游为总长120 m钢筋混凝土和抛石海漫,末端接深7.8 m、底宽6 m、顶宽30 m的抛石防冲槽。

沉沙池需要将粒径大于0.25 mm的泥沙去除,每年沉沙约 700×10^4 t。沉沙池工作段断面上部为13 m宽、8.63 m深的矩形。为使泥沙向底部滑动,下部为深3.32 m、侧坡为1:1.5的等腰梯形,底部矩形槽中铺设排沙管。排沙管采用挪威专利 SED-CON 排沙系统,其核心部件是底部开串槽的圆管,利用在沙水交界面槽口内外水压差形成较高流速水流排沙。每池设5根独立的30 m长的排沙管顺次布置,分别引到排水廊道,出口均设有阀门,可根据泥沙积聚情况控制分段排沙,最大排沙需水量小于总流量的6%。

沉沙池基础两端位于花岗岩石基岩上,中部是

最深80 m的冲洪积层。为减少不均匀沉降,避免砂层液化对结构的影响,布置了间距7.5 m、直径1.5 m和1.8 m的混凝土灌注桩,桩体嵌入花岗岩层1.5~1.8 m。为避免桩体沙层液化时承受过大水平地震力,桩顶和沉沙池结构之间设置0.5 m厚的砂卵石隔离层柔性连接,桩顶桩径分别扩为3.5和3.8 m以分散隔离层荷载。

2.2 深埋长输水隧洞与火山灰中施工支洞设计

输水隧洞布置于科卡河右岸高山中,总长度24.8 km,为底坡0.173%的明流洞,设计输水流量222 m³/s,成洞直径8.20 m。

隧洞主要由两台双护盾掘进机开挖。图3是输水隧洞平面布置图。1号掘进机从中部设置的2A施工支洞向上游掘进9 588 m至进口下游的1号施工支洞出洞;2号掘进机从出口向上游掘进13 772 m至2B施工支洞,在洞中拆机;其余洞段钻爆开挖。2A施工支洞距进口约11 km,长度为1 645 m。2B施工支洞进口位于2A施工支洞下游,长度为1 370 m,改建为永久通风和检修通道。1号、2号掘进机分别遇断层破碎带和强地下水,各停机处理一次。处理方案均为从已完成管片衬砌处开挖旁洞到工作面前,为掘进机开辟通道,处理时间分别花费了约6个月^[19-20]。

掘进机开挖段采用预制钢筋混凝土管片衬砌,全长没有设二次衬砌或其它加固措施。管片为6+1通用型薄、长管片,厚度为0.3 m,长度1.8 m^[21]。根据承受的荷载不同,设计了A、B、C、D共4种管片。施工中为简化操作,实际只采用了两种。在I、II、III类围岩地段用B型管片,当围岩为IV、V类时,采用D型重型管片衬砌。隧洞平均埋深在400 m,最大埋深800 m,地下水位较高。管片设计只考虑了3倍洞径的外水压力,在出现地下水的地段,设排水孔消减地下水压力。合理的设计为快速施工提供了基础,掘进机最高月进尺1 080 m,扣除大断层处理和大量涌水停机的影响,平均月进尺达800 m。

2A支洞断面尺寸为6.89 m×10.36 m,进洞410 m段位于火山灰地层,采用钻爆施工,采用密植钢拱架加挂网喷混凝土支护。钢拱架为20号槽钢,间距40 cm。钢筋网为双层,喷混凝土厚度40 cm。投入运用多年监测数据无异常。

2.3 调蓄水库布置

为减小输水隧洞规模、方便机组运行,在格兰那迪亚斯河峡谷距地下厂房约1 km处设调蓄水库。该河流域面积约10.3 km²,多年平均流量1.41 m³/s。调蓄水库正常蓄水位1 229.5 m,死水位1 216 m,调蓄库容88×10⁴ m³,满足每天4 h,1 500 MW峰荷、15 h,1 125 MW腰荷和5 h,937.5 MW基荷发电的调节需要。

如图4所示,调蓄水库库尾建有混凝土拦沙坝。主河道上建有面板堆石坝,坝顶长度141 m,最大坝高70 m,上游坝坡1:1.4,下游坝坡1:1.8。溢洪道用于机组紧急甩负荷时输水隧洞关闸前持续20 min来水222 m³/s、同时遭遇河流两年一遇洪水流量24 m³/s时泄洪,最大泄量246.00 m³/s。堆石坝上游

右岸设有放空洞。调蓄水库每年有19×10⁴ m³泥沙沉积,采用挖泥船清淤,保持调节库容。

2.4 高水头压力管道设计

两条压力管道进口位于调蓄水库右岸,进口底板高程1 204.50 m,设有拦污栅、检修门和事故门。压力管道单洞设计流量139.2 m³/s,设计最大静水压力、水击压力分别为6.18、6.83 MPa。洞轴线总长度为1 783 m,其中,上平洞长707 m,竖井高539 m,下平洞长538 m(含压力钢管长度为360 m)^[22-23]。

混凝土衬砌内径5.8 m,厚度为0.6 m。上平段水头较低,采用限裂设计;竖井及下平段承受水头较高,采用透水衬砌。混凝土衬砌设计可承受与最大内水静压力相等的外水压力。上平段固结灌浆压力0.3~0.5 MPa,竖井及下平段为2.5~7.0 MPa。

每条压力管道钢衬由主管、三级非对称的卜形内加强月牙肋形岔管、4条支管等组成,钢板衬砌段主管内径5.2 m,岔管内径3.2 m,支管段内径2.6 m。钢材为日本产SUMITEN610Z,屈服极限 $Re \geq 470$ MPa。钢管独立承担内、外水压力。主支管外设有间距750~1 400 mm的加劲环^[24]。

2.5 大跨度地下厂房复杂洞室群设计

如图5所示,地下厂房洞室群包括主厂房、母线洞、主变洞、排水洞、尾水洞、进场交通洞、电缆洞等。

水轮机为立轴6喷嘴水斗式水轮机,与发电机轴直接相连,由稳水栅、尾水井、配水环管、机壳、喷管总成(含喷嘴口环、喷嘴、喷管、喷针、偏流器、喷针接力器及偏流器接力器等)、转轮、主轴、导轴承、补气装置等组成。水轮机额定水头604.1 m,额定流量34.7 m³/s,额定效率91.89%,额定转速300 r/min,水斗数目22个,水斗节圆直径3 349 mm,射流直径260 mm,额定出力188.266 MW,最大出力192.85 MW。

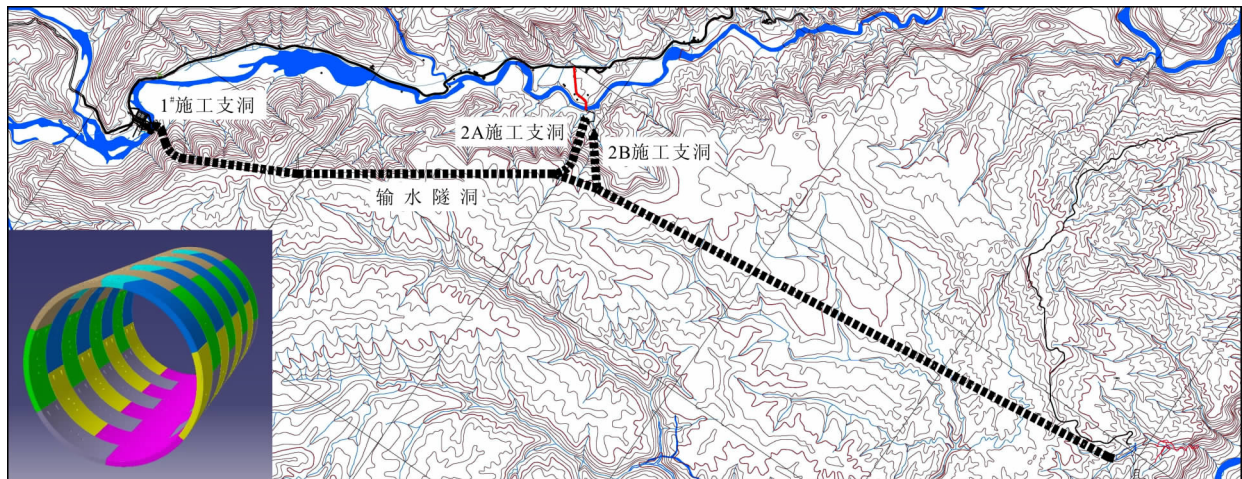


图3 输水隧洞平面布置及管片拼装

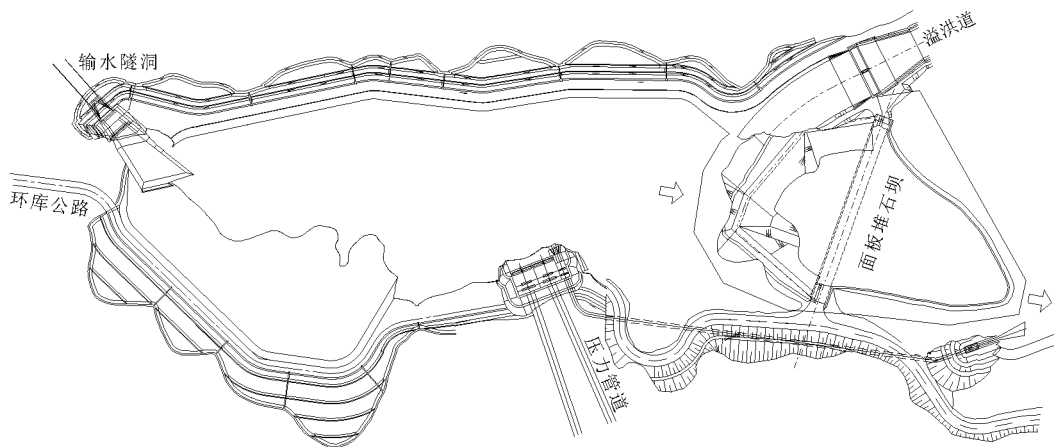


图 4 调蓄水库布置图

主厂房开挖尺寸为 212.0 m×26.0 m×46.8 m (长×宽×高),安装 8 台单机容量为 187.5 MW 的冲击式水轮发电机组及其附属设备,机组安装高程 611.10 m,机组间距 18.5 m,机组段总长度为 192 m。安装间长度 30 m,布置在厂房中间位置。图 6 是主厂房和主变洞剖面图。

发电机-变压器组接线采用单元接线。发电机出口离相封闭母线励磁变压器后至发电机断路器之间配置专用的电制动开关设备。共设置 24 台 500 kV 单相主变压器和 1 台备用主变压器,变压器采用单相双卷无励磁调压升压变压器。主变压器正上方

布置有 500 kV SF6 全封闭 GIS 设备。

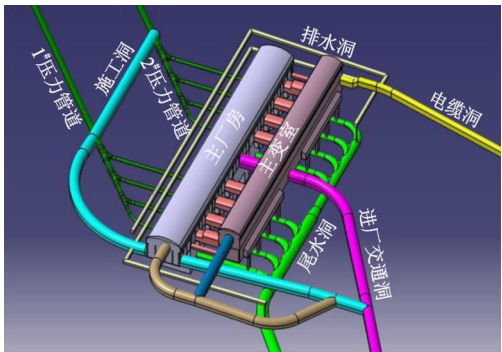


图 5 地下厂房洞室布置图

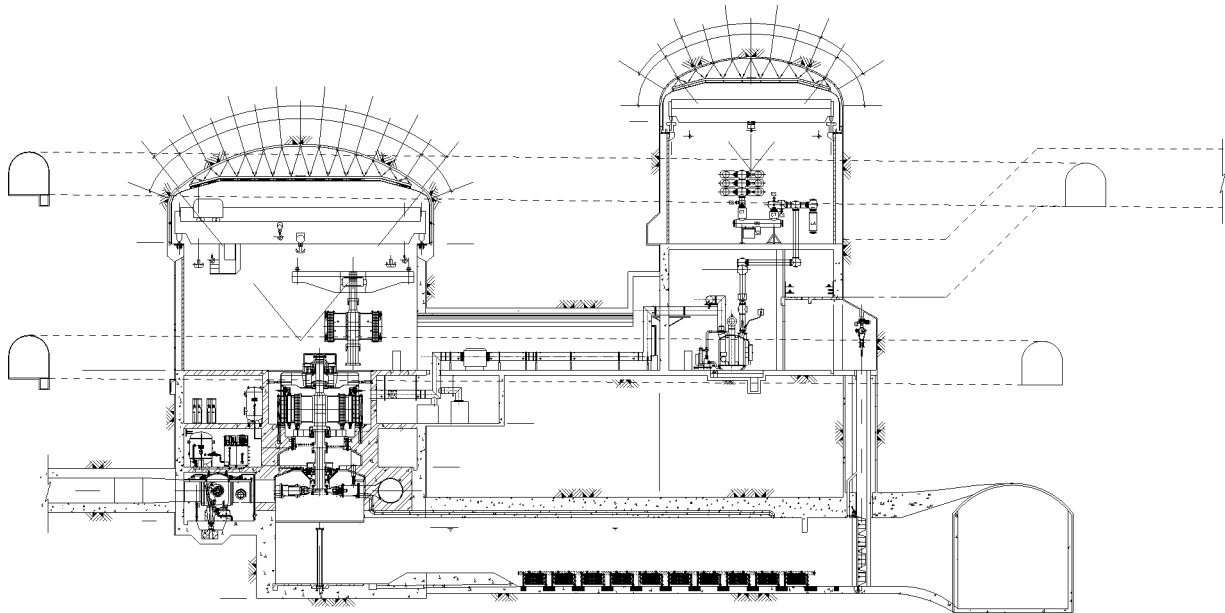


图 6 主厂房及主变洞剖面图

进场交通洞采用城门洞型,典型断面开挖尺寸为 7.7 m×7.5 m(宽×高),洞长 487.9 m。8 条母线洞位于厂房与主变洞之间,洞长 24.0 m。除了机压母线,母线洞还布置有断路器、励磁变压器、电制

动短路开关柜等设备。

主变洞位于主厂房下游侧,与厂房平行布置,开挖尺寸为 192.0 m×19.0 m×33.8 m(长×宽×高),底层装有由 25 台单相变压器,其中一台备用。

500 kV GIS 设备布置在主变室上层。电站采用 500 kV 一级电压接入电力系统, 2 回 500kV 出线从 GIS 室经电缆洞连到地面出线场, 接至圣拉菲 500 kV 变电站。

水轮机下泄水流经 8 条尾水支洞汇入 1 条尾水主洞, 经尾水渠排入下游河道。尾水支洞断面型式采用矩形, 宽、高均为 5.7 m, 长约 62 m。尾水主洞采用马蹄形断面, 断面尺寸 11.4 m × 12.7 m (宽 × 高), 长约 493 m, 纵坡 $i = 0.0014$, 腰线采用钢筋混凝土衬砌, 顶拱采用喷锚支护。

地下厂房洞室跨度大、距离近、纵横交错, 洞室开挖空间干扰大, 因而应力、应变规律复杂, 围岩稳定问题突出。采用了整体挂网喷混凝土加锚杆支护、局部型钢喷混凝土加锚杆支护的支护方案。另外, 针对地下厂房洞室的不稳定块体, 专门进行了支护处理^[25]。

水轮机配水环管最大静水头 620.75 m, 最大水击压力为 750 m 水头。配水环管与外围混凝土间留有间隙, 接触前配水环管先行承担 0.85 倍最大净水头, 剩余水头由配水环管和外围混凝土联合承担。

尾水渠边坡高度超过 50 m, 处于碎石土、砂卵石地层, 地下水位高, 地震荷载大, 而且受重要道路约束不能放缓坡度, 采用了 500 kN、1 000 kN 预应力锚索结合坡面挂网喷混凝土支护, 局部设置了截面 2.2 m × 3 m、间距 6 m、长度 $L = 14.5 \sim 22$ m 不等的抗滑桩, 并在桩上增设 1 000 kN 锚索形成桩锚结构, 增加稳定性。

3 结 论

(1) 上部矩形断面过流、下部梯形断面储沙、底部分段铺设 SEDCON 排沙系统的沉沙池, 可以适应大流量、高含沙量引水的沉沙要求。根据泥沙积聚情况分时分段控制排沙, 运用灵活可靠, 耗水量小。

(2) 泄洪排沙坝、沉沙池等较高大混凝土建筑物, 采用合理的设计, 修建在深覆盖层上是安全可行的。针对性采用截渗墙、振冲碎石桩、素混凝土桩、钢筋混凝土桩等处理措施, 渗漏、沉降、地震液化等可以达到控制标准要求。

(3) 通用型薄管片用于 TBM 掘进施工, 管片类型少, 操作简便, 简化了施工, 提高了掘进速度。采用高标号混凝土, 并运用透水衬砌排泄外压的设计理念, 管片衬砌能够适应不良的地质条件, 避免采用现浇混凝土二次衬砌等加固措施。

(4) 透水衬砌的设计理念用于 600 m 水头级的

高压管道, 辅以合理范围的钢板衬砌和围岩灌浆措施, 能够在低地应力、高外水压力等不利条件下达到防渗、工程安全等各项目的标。

(5) 大跨度复杂地下厂房洞室群, 采用先进手段进行分析设计, 科学安排施工顺序, 可以主要通过锚杆挂网喷混凝土柔性支护保证围岩稳定和控制变形, 避免大范围使用预应力锚索影响工期。

参考文献:

- [1] 字继权. 厄瓜多尔科卡科多辛克雷水电站 EPC 项目综述[J]. 云南水力发电, 2014, 30(5): 1-2+10.
- [2] 杨元红. 厄瓜多尔 CCS 水电站 EPC+C 项目技术管理[J]. 云南水力发电, 2014, 30(5): 23-26.
- [3] 野崎次男, 诸一骅. 考虑水轮机磨损决定沉砂池容量和断面[J]. 河海大学科技情报, 1990, 10(3): 119-124.
- [4] 李志乾, 耿波, 台航迪. CCS 水电站大型沉砂池设计[J]. 珠江水运, 2014(22): 60-61.
- [5] 王陆, 刘增强, 王小平. 水电站大型沉砂池 BIM 技术应用[J]. 土木建筑工程信息技术, 2017, 9(2): 78-83.
- [6] 李顺涛, 耿波, 向媛, 等. 沉沙池冲沙过程 CFD 模拟分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(11): 104-108.
- [7] 王明明. 厄瓜多尔 CCS 水电站沉砂池过渡引渠结构有限元分析[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018.
- [8] 陈晓东, 陈居乾. 引大入秦工程长大隧洞及大型跨河建筑物设计与技术创新[J]. 甘肃水利水电技术, 2018, 54(10): 3-54.
- [9] 赵健飞, 郭钰欣, 周夏腾. 复杂地质条件下隧洞开挖遇到的问题及解决方法[J]. 水利水电施工, 2018(2): 57-60.
- [10] 杜雷功. 长大深埋水工隧洞设计关键技术研究与实践[J]. 水利水电技术, 2017, 48(10): 1-9.
- [11] 谢遵党, REDDISH D J. 世界深埋长隧洞建设中的问题及应对措施[J]. 人民黄河, 2004, 26(10): 37-39.
- [12] 马军峰, 许远志, 昌国锴. 抽水蓄能电站超高水头输水隧洞渗水处理施工技术[J]. 水利水电施工, 2017(2): 42-46.
- [13] 余磊, 王玉杰, 曹瑞琅, 等. 高压水工隧洞钢筋混凝土衬砌裂缝开度计算方法评析[J]. 水利水电技术, 2018, 49(8): 142-149.
- [14] 伍鹤皋, 尚斌, 苏凯. 高压隧洞透水衬砌结构研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(3): 321-325.
- [15] 陆健健, 方丹, 李良权. 白鹤滩水电站左岸地下厂房支护优化设计[J]. 水利水电技术, 2018, 49(8): 128-135.
- [16] 王仁坤, 邢万波, 杨云浩. 水电站地下厂房超大洞室群建设技术综述[J]. 水力发电学报, 2016, 35(8): 1-11.
- [17] 张恩宝, 樊熠玮, 赵晓峰. 溪洛渡水电站地下厂房洞室群施工期围岩稳定性分析[J]. 水电站设计, 2016, 32(4): 1-7.

(下转第 149 页)

- 黄河,2012,34(10):108-109+113.
- [4] 司春棣.引水工程安全保障体系研究[D].天津:天津大学,2007.
- [5] DONG Longjun, HU Datao, BAI Yunfei, et al. Unascertained average grade model for surrounding rock classification on hydraulic tunnels[C] // The 2008 International Symposium on Safety Science and Technology, China Occupational Safety and Health Association, Beijing:2008.
- [6] 王桂平,朱苦竹.基于模糊神经网络的水工隧洞病害诊断研究[J].地下空间与工程学报,2009,5(1):201-206.
- [7] JIA Xiaoyun, LIN Baolong. Numerical analysis of lining temperature field of hydraulic tunnel under the highway[J]. Advanced Materials Research, 2011, 163-167:1505-1515.
- [8] 王梦雅,夏富洲.基于可拓理论的渡槽结构老化评价[J].武汉大学学报,2014,47(2):211-216+254.
- [9] 潘洪科,李业学,王爱勤.渡槽工程的病害分析与防治研究[J].河南大学学报,2015,45(4):493-498.
- [10] SWANNELL N, PALMER M, BARLA G, et al. Geotechnical risk management approach for TBM tunnelling in squeezing ground conditions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 57(3):201-210.
- [11] 王莲芬.网络分析法(ANP)的理论与算法[J].系统工程理论与实践,2001(3):44-50.
- [12] VINODH S, GAUTHAM S G, ANESH RAMIYA R, et al. Application of fuzzy analytic network process for agile concept selection in a manufacturing organisation[J]. International Journal of Production Research, 2010, 48(24):7243-7264.
- [13] 陈宇寒,张宏.基于 PSO 和扩展 TOPSIS 方法的 COA 优选方法[J].系统工程理论与实践,2015,35(8):2144-2151.
- [14] 柴乃杰,鲍学英,张天奇,等. TOPSIS-熵权决策法在绿色施工节水措施综合效益评价中的应用[J].水资源与水工程学报,2017,28(5):156-161.
- [15] DENG Hepu, YEH C H, WILLIS R J. Inter-company comparison using modified TOPSIS with objective weights[J]. Computers & Operations Research, 2000, 27(10):963-973.
- [16] 王锦辉,费良军,谢芳,等.灰色关联理论-TOPSIS 法的大型灌区运行状况综合评价[J].排灌机械工程学报,2015,33(11):985-990.
- [17] LIU P, WANG T. Research on risk evaluation in supply chain based on grey relational method[J]. Journal of computers, 2008, 3(10):28-35.
- [18] 田民,刘思峰,卜志坤.灰色关联度算法模型的研究综述[J].理论新探,2008(1):24-27.
- [19] 尹庭杰,梁庆国,赵佃锦.引大入秦工程盘道岭隧洞病害原因浅析[J].兰州交通大学学报,2014,33(4):82-88.

(上接第 142 页)

- [18] 王廷益.厄瓜多尔科卡科多辛克雷水电站首部枢纽工程[J].云南水力发电,2014,30(5):3-7.
- [19] 杨继华,杨风威,姚阳,等. CCS 水电站引水隧洞 TBM 断层带卡机脱困技术[J].水利水电科技进展,2017,37(5):89-94.
- [20] 张国.厄瓜多尔 CCS 项目双护盾 TBM 通过断层破碎带施工技术研究与实施[J].水利建设与管理,2018,38(6):1-6.
- [21] 王美斋,肖豫,陈晓年,等.厄瓜多尔 CCS 水电站 TBM 引水隧洞左右通用型管片的设计与实践[J].资源环境与工程,2017,31(5):606-609.
- [22] 刘大贵,杨春雷.厄瓜多尔科卡科多辛克雷水电站引水发电系统工程[J].云南水力发电,2014,30(5):11-13+22.
- [23] 谢遵党.厄瓜多尔辛克雷水电站压力管道充水试验[J].云南水力发电,2018,34(2):31-36.
- [24] 陈丽晔,王春,姚宏超. CCS 水电站隧洞钢衬美国标准与中国标准对比[J].人民黄河,2014,36(12):94-96.
- [25] 娄国川,齐三红,杨风威,等.厄瓜多尔 CCS 水电站地下厂房稳定分析[J].黄河水利职业技术学院学报,2014,26(1):1-4.