

中国水力发电工程学会水工
及水电站建筑物技术丛书

中国水电地下工程建设 与关键技术

党林才 侯 靖 吴世勇 等 著

ZHONGGUO SHUIDI
DIXIAGONGCHENG
YU GUANJIAN JIS



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国水力发电工程学会
及水电站建筑物技术丛书

中国水电地下工程建设 与关键技术

党林才 侯 靖 吴世勇 等 著

内 容 提 要

本书为《中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物技术丛书》之一,共编录论文55篇,主要介绍我国近年来水电地下工程的建设实践及其关键技术。内容包括综合论述、工程勘察、工程设计、工程施工、工程监测、理论研究、新技术与新材料等七个部分。本书既反映了近年来我国水电工作者在地下工程岩石力学基本理论、工程勘测设计方法、施工技术与管理、安全监测等方面取得的宝贵经验与重要成果,又吸纳了一批大型的、工程地质条件复杂的水电地下工程实例,内容丰富、涵盖面广、实用性强,对今后地下工程建设具有较强的参考价值和借鉴意义。

本书可供水利、水电、地质、岩土、建筑工程、建设管理、安全监测等有关部门的勘测、设计、施工、科研、管理人员阅读,也可供相关专业的高校师生及科研单位的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国水电地下工程建设与关键技术 / 党林才等著

— 北京:中国水利水电出版社,2012.10

(中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物技术丛书)

ISBN 978-7-5170-0252-9

I. ①中… II. ①党… III. ①水力发电工程—地下工程—文集 IV. ①TV7-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第238964号

书 名	中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物技术丛书 中国水电地下工程建设与关键技术
作 者	党林才 侯靖 吴世勇 等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 26.75印张 634千字
版 次	2012年10月第1版 2012年10月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	86.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物专业委员会

第六届委员会

主任委员：王柏乐

副主任委员：（按姓氏笔画排序）

王 琪	王义锋	任青文	张书军
李文谱	李正平	宗敦峰	林 鹏
范 灵	党林才	贾金生	

秘 书 长：党林才

副 秘 书 长：鲁一晖 陈观福

委 员：（按姓氏笔画排序）

马吉明	毛文然	王仁坤	王治明	韦晓明
叶发明	孙 役	任旭华	任继礼	朱俊高
吕明治	陈 进	严旭东	严 军	严优丽
何世海	吴 波	吴树延	吴梦喜	李光鹏
李守义	迟世春	肖贡元	肖恩尚	陆采荣
张秀崧	张社荣	张 林	周启明	黄建添
黄志斌	黄 辉	解 伟	董汉生	籍 东

秘 书：刘荣丽

本书编审委员会

主 编：党林才 侯 靖 吴世勇

委 员：（按姓氏笔画排序）

王玉洁 刘 宁 李 军 吴旭敏

何世海 宋媛媛 陈建林 陈祥荣

周才全 周垂一 郑全春 郑晓红

单治钢 俞 辉 徐建强 彭六平

序

在广大水电建设工作者的共同努力下，以中国水电地下工程建设与关键技术为主题的论文集随着水电工程大型地下洞室关键技术研讨会的召开同步出版了。论文集征文通知发出后，投稿者十分踊跃，鉴于篇幅所限，经过专家评审，筛选出具有代表性的论文 55 篇汇编出版。论文集所收集的论文基本反映了我国水电工程大型地下洞室建设的最新进展情况和相关勘察、设计、施工、科研等方面的技术水平。具有学术水平高、结合工程实践紧密，涉及技术领域广、内容丰富等特点。

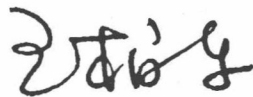
改革开放以来，特别是近十多年来，我国水利水电建设事业蓬勃发展，建成和正在建设一大批高坝大库和大型水电站，为满足国民经济和社会发展需要发挥了重要作用。由于我国超过 70% 的水力资源都集中在西部高山峡谷地区，地下空间的利用既有利于解决枢纽布置问题，又可以回避复杂高边坡带来的边坡稳定性问题，由此相应带动了水电工程大型地下洞室群勘察、设计、科研、施工、监测等技术的快速发展。尽管我们有些数值分析软件以及部分施工设备仍需要从国外引进，但综合评价我国水电工程大型地下洞室建设水平，可以说已经步入世界先进水平的前列。

水利水电工程中主要的地下水工建筑物有地下厂房、输水隧洞、调压室、泄洪洞、导流洞、交通洞等，他们在技术上既有共性的问题，也有各自的特点。论文集介绍了大跨度地下厂房、深埋长引水隧洞、大型洞室群、导流洞改建为竖井泄洪洞等各具特色的工程实例；论文集也分别对地下工程勘察设计技术、掘进支护技术、原型监测及动态反馈分析技术以及涨壳式中空预应力锚杆、中空注浆锚杆、TBM 应用、让压锚杆（索）等专项技术进行了论述和分析。论文集还收集了介绍地下工程建设相关技术的一些文章，如地下排

水设计、化学灌浆技术、滑模混凝土施工技术等。因此，论文集内容十分丰富，涉及面十分广泛。

论文集的出版揭示了水工及水电站建筑物专业委员会主办的本届学术会议的一个明显特点是，学术会议的参加者和论文集的投稿者不但来自于传统的设计、科研单位，还有大量施工单位和建设单位的水利水电工作者也纷纷踊跃参会和投稿；同时一大批青年水利水电工作者在工程建设中脱颖而出，认真总结工程经验，积极投稿，水工及水电站建筑物专业委员会已名副其实地成为广大水利水电工作者的民间群众性学术团体，本次会议也成为广大水工专业人员的一次盛会。

随着水利水电工程项目逐步向自然条件恶劣的西部和江河上游段转移，大型地下洞室建设的难度也将相应加大，建设中还将遇到新的关键技术点，还需要我们继续推进新技术、新工艺的发展。水工及水电站建筑物专业委员会的工作不能涵盖水工专业的全部内容，让我们在中国水力发电工程学会的领导和指导下，同有关专业委员会紧密协作，为水电工程大型地下洞室建设技术和水工及水电站建筑物专委会的工作迈上新台阶而共同奋斗！



2012年8月27日

前 言

自 20 世纪 80 年代开始,按照现代技术设计和施工的鲁布革、二滩水电站地下厂房成功建设以来,我国水电工程的大型地下洞室建设取得了骄人的成绩,先后建设了龙滩、小湾、拉西瓦、瀑布沟等多个大型地下厂房。在建的金沙江溪洛渡水电站左、右岸地下厂房是目前世界上规模最大的在建地下厂房;2012 年年底即将投产发电的锦屏二级水电站,4 条引水隧洞单洞长约 16.7km,开挖直径为 12.4~14.6m,最大埋深约 2525m,是目前世界上规模最大、综合技术难度最高的水工隧洞群。这些世界级难度工程的成功建设,极大地推动了我国地下工程技术的发展,标志着我国地下工程技术已处于世界先进水平。同时,也为我国大型地下工程建设,从勘测设计、快速安全施工、围岩变形监测与反馈分析以及解决关键技术问题等方面积累了丰富的值得总结和交流的经验。

为了宣传我国大型地下工程的建设成就,总结大型地下工程建设经验,进一步提高建设水平,为建设各方提供经验交流、技术切磋和学术探讨的平台,中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物专业委员会(以下简称水工专委会)主办了本次以大型地下工程技术研讨为主题的学术交流活动。

水工专委会专业面覆盖广,有着较多的值得交流的选题空间,前两次分别以“利用覆盖层建坝的实践与发展”、“高拱坝建设中的重大技术问题研究”为主题组织了技术研讨会,并以专著形式正式出版了论文集;论文集为专业技术人员提供了该领域最新发展水平和大量相关工程实例资料,便于查阅和参考,起到了案头参考书的作用;水工专委会以后还可从泄洪与消能防冲建筑物、重点坝型和重要水工建筑物关键技术与安全等方面继续进行深入研讨交流。受此启发,拟从本次研讨会文集开始,以“中国水力发电工程学会水工

及水电站建筑物技术丛书”为系列丛书名，将每次技术与学术交流文集正式出版，以期使系列文集真正起到使用手册和工具书的作用，同时也促进研讨会选题和文集质量的不断提高。

各设计、施工、建设管理单位和科研院校的工程技术人员、专家学者、专委会委员对本次技术与学术交流活动给予了热情关注，作者投稿踊跃，共收到稿件 80 余篇，经过编审委员会认真审稿，本期共收录了具有较高学术与交流价值且未曾公开发表过的论文 55 篇，形成本书。

受水工专委会委托，本次技术研讨会由中国水电顾问集团华东勘测设计研究院、二滩水电开发有限责任公司承办，杭州图强工程材料有限公司、浙江中科依泰斯卡岩石工程研发有限公司协办。他们在本次技术研讨会的筹办和组织、丛书出版过程中付出了辛勤劳动，给予了大力支持。在此，对会议的承办、协办单位表示衷心地感谢！也对积极参与、热情支持本次技术交流活动的论文作者表示衷心的感谢！希望各位委员、各位同仁、各位读者继续关注和支持水工专委会工作，并对我们的工作提出意见和建议。

编著者

2012 年 9 月

目 录

序

前言

综 合 论 述

中国水电大型地下工程建设实践与关键技术·····	党林才	侯 靖	3
西部地下工程关键问题与工作方法之一：地应力的作用与判断方法			
····· 朱焕春 褚卫江 朱永生 吴家耀 孟国涛 张春生 侯 靖 陈祥荣 江亚丽			20
西部地下工程关键问题与工作方法之二：岩体特性与工程设计			
····· 朱焕春 褚卫江 朱永生 吴家耀 孟国涛 张春生 侯 靖 陈祥荣 江亚丽			31

工 程 勘 察

锦屏二级水电站引水隧洞区岩溶水文地质条件·····	单治钢	周春宏	45
锦屏二级水电站辅助洞超埋深水压致裂法			
地应力测试应用研究·····	赵国平 陈文华 卢 泳 马 鹏	周春宏	53

工 程 设 计

论深埋长隧洞 TBM 掘进岩爆风险预评估方法·····	侯 靖	吴旭敏	63
特大型尾水调压室围岩稳定性分析			
及关键岩石力学问题探讨·····	倪绍虎 吕 慷	孟江波	71
巨型调压室洞室群开挖动态反馈分析与支护设计·····	陈 涛	吴旭敏 陈晓江	80
锦屏二级水电站深埋大直径软岩引水隧洞工程问题及处理对策·····	张 洋	张 伟	89
锦屏二级水电站引水隧洞支护设计			
与实践·····	潘益斌 吴旭敏 何 江 房敦敏	刘 宁	96
两河口水电站竖井旋流泄洪洞竖井掺气设施试验研究·····	张仁东	吕海艳	102
洪家渡水电站特大型溢洪道岩溶处理·····	岳 龙		108
思林水电站地下厂房岩溶系统处理综述·····	张维佳	周维林	117
思林水电站 2 [#] 尾水洞塌方处理·····	孙华刚	张凤强	126
20 世纪亚洲最大的地下厂房——二滩水电站地下厂房·····	吴世勇	王锋辉	131
大型地下厂房洞室群围岩变形破坏特征			
与稳定控制措施·····	周 钟 廖成刚	侯东奇	141
复杂大型地下洞室群快速动态反馈分析与优化设计方法·····	陈建林		154

系统预应力锚索安全合理锁定吨位研究·····	应和平	陈建林	万祥兵	161
水平薄层灰岩中地下厂房顶拱支护设计·····	张捷	周长兴	赵朝霞	164
复杂水文地质条件下的地下厂房防渗排水设计·····	冯梅	廖成刚	邢万波	169
地下洞室围岩定位块体快速生成及稳定分析·····	石广斌	万宗礼	石根华	177
锦屏二级水电站尾部厂区枢纽布置·····	陈建林	万祥兵	应和平	183
拉西瓦水电站厂区大型地下洞室设计与施工主要问题 及其解决方案·····	姚栓喜	王冬条	马长虹	190
功果桥水电站地下厂房变形机理分析 与工程治理·····	何敏	王明疆	郝军刚	196
丰宁抽水蓄能电站地下厂房洞室布置及支护设计·····	李刚	王阳雪	许文龙	202
安宁水电站地下厂房洞室群防渗、排水设计研究·····	阎培林	王志国		208
西龙池地下厂房洞室群排水系统设计·····		赵朝霞		213

工 程 施 工

高山峡谷地区复杂施工布置枢纽规划	李 军	王瑞贵	221			
浅谈大直径 TBM 进度计划及影响因素分析	夏泽勇	周垂一	李 军	226		
硬岩掘进机 (TBM) 在深埋长隧洞中						
半断面掘进试验研究	来记桃	曾雄辉	张 鹏	231		
大断面、多格室深井滑模混凝土施工技术研究	李 峰	宋义鹏		237		
大型调压室螺旋形立体开挖支护施工新技术	段汝健	董学元		242		
涨壳式预应力中空锚杆在 TBM 法施工中的施工工艺研究	周 彪	梁巧艳		249		
已建地下发电厂厂房爆破扩建工程的安全监控	张翔宇	罗 勇		253		
锦屏深埋长隧洞施工关键技术	周建平	余 奎	李太成	常作维	杜效鹤	264
锦屏一级水电站地下厂房开挖支护施工关键技术问题	段汝健	郭盛勇	王永德		273	
锦屏一级水电站特高拱坝左岸抗力体灌浆加固处理		蒋学林			279	
锦屏二级水电站引水隧洞绿泥石片岩洞段坍塌变形分析						
及安全掘进施工方法实践		杨 洋			288	
锦屏二级水电站进水口事故闸门室岩锚梁基础开挖爆破试验	周 俊	郭伟民			295	
锦屏二级水电站引水隧洞工程施工运输	刘伯全	李 军	夏泽勇		300	
锦屏二级引水隧洞深埋段施工方案		周垂一			304	
锦屏二级水电站引水隧洞施工期岩爆控制措施						
及其工程实践	李 军	吴旭敏	周春宏		309	
苗尾水电站 2# 导流隧洞出口洞段						
开挖变形处理	王凤军	陈永红	任金明	钟伟斌	315	
索风营水电站大型地下洞室施工创新回顾	吴成滨	唐 英			321	

工 程 监 测

高应力区岩墙变形监测优化布置探讨·····	付建军	赵海斌	331
-----------------------	-----	-----	-----

基于现场监控量测法的三峡地下厂房围岩

变形特性分析.....	黄 祥	李 军	耿 峻	336
思林水电站地下厂房的监测与动态反馈分析.....	龚朝蜀	廖基远		342
锦屏地下厂房洞室群施工期围岩稳定整体分析	李君军	郑晓红	王玉洁	353
地下工程监测异常数据解释.....	王玉洁	郑晓红		358

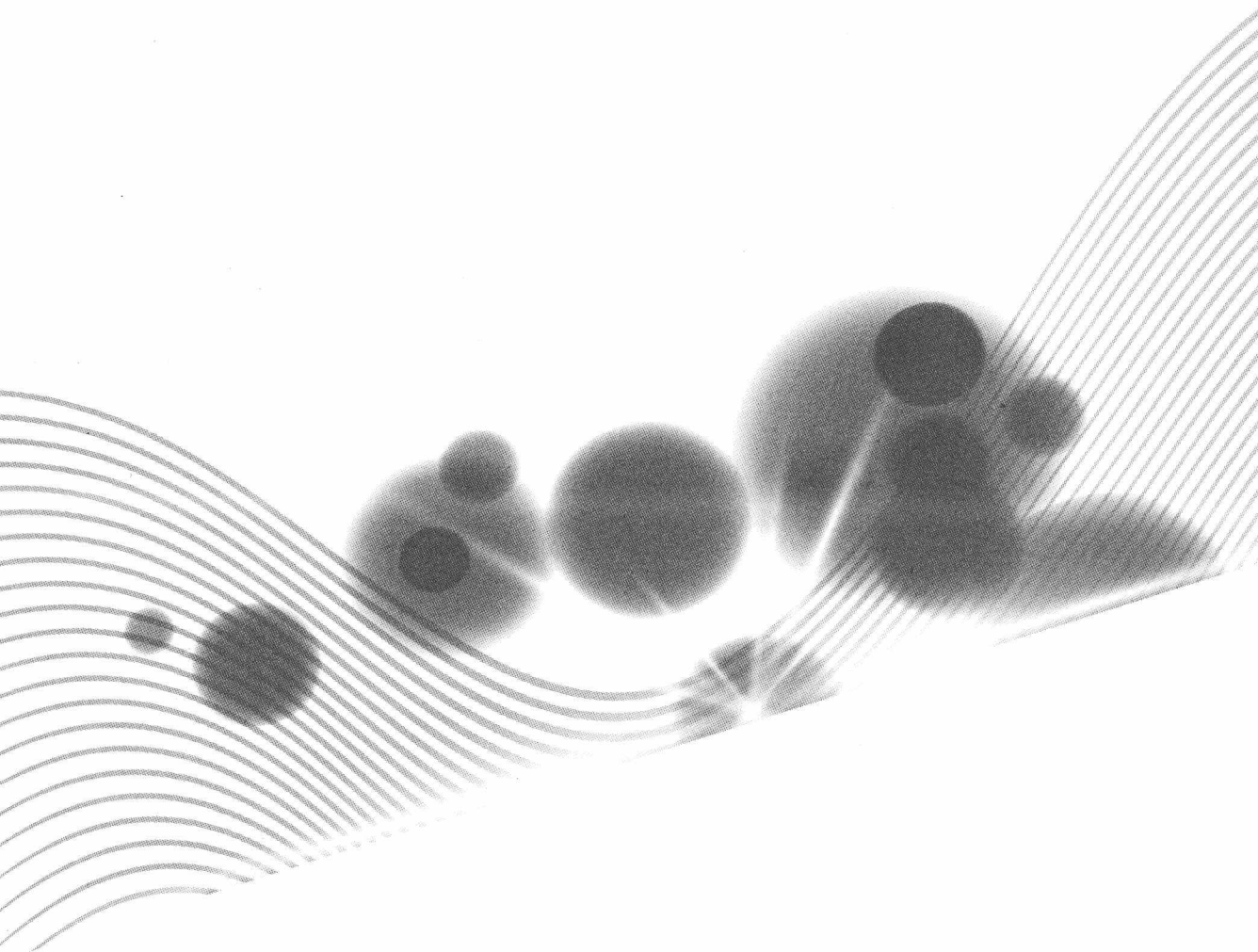
理 论 研 究

基于细观损伤方法的地下洞室开挖卸荷松弛研究.....	任青文	陈郡鹏	杜小凯	369
地下洞室开挖与支护分析理论和计算方法.....	肖 明	陈俊涛		377
锦屏二级深埋隧洞围岩损伤特征分析				
与深度预测.....	朱焕春	刘 宁	褚卫江	392

新技术与新材料

新型让压锚杆(索)在水电工程中的应用研究前景.....	王 勇	项小珍	沈立恭	401
水利水电工程中中空注浆锚杆注浆及水灰比的研究.....	王 勇	项小珍		406
涨壳式中空预应力锚杆在锦屏二级水电站引水洞				
高岩爆区的应用.....	王 勇	梁巧艳		411

综 合 论 述



中国水电大型地下工程建设 实践与关键技术

党林才¹ 侯靖²

(1 水电水利规划设计总院 北京 100120; 2 中国水电顾问
集团华东勘测设计研究院 浙江杭州 310014)

【摘 要】 近年来中国的水电大型地下工程建设越来越多,地下厂房洞室群正朝着单机大容量、洞室大跨度与高边墙、洞室开挖大规模的大型化方向发展,水工隧洞则向大埋深、超长距离、大断面的方向发展,遇到的技术问题越来越复杂,在工程设计与建设过程中,积累了许多宝贵的经验。本文主要论述水电大型地下工程设计过程中主要的一些经验认识,包括洞室布置方式、洞室群间距、防渗排水系统设计、断面型式选择、深埋长大水工隧洞建设技术、地下工程监测与数值计算技术、动态设计等,并提出了地下工程建设面临的关键技术问题以及发展方向,供参考讨论。

【关键词】 地下工程 洞群间距 防渗排水系统 断面型式 数值计算 监测技术 深埋长大水工隧洞 动态设计

1 概述

自改革开放以来,随着西部大开发战略的实施,我国水利水电建设事业蓬勃发展,修建了一大批高坝大库、长距离输水隧洞和大型地下电站,为满足国民经济和社会发展需要发挥了重要作用。由于我国超过70%的水电资源都集中在水能富集的西部高山峡谷地区,这些地区江河纵横,山高坡陡,河谷狭窄,流量又大,地面空间非常有限,地下空间的利用既可以解决枢纽布置的空间问题,又可以充分利用水头提高水能利用效率,因此往往采用地下厂房方案,由此带动了水电工程大型地下洞室群勘察、设计、科研、监测、施工等技术的快速发展。其中20世纪末建成投产的当时我国最大水电站——二滩水电站,其大跨度、高边墙、小净距的地下厂房洞室群的成功建设,标志着我国水电地下洞室的勘察、设计、科研、施工技术水平进入了一个新的时期。

近年来随着一大批水电站地下厂房的建设,如已建的二滩、小浪底、三峡右岸、大朝山、小湾、拉西瓦、龙滩、瀑布沟、官地等,在建的溪洛渡、锦屏一级、锦屏二级、向家坝、长河坝、糯扎渡、双江口、大岗山等,拟建的白鹤滩、乌东德、两河口等,水电工程地下厂房规模正朝着单机大容量、厂房洞室大跨度与高边墙、洞室开挖大规模的大型化方向发展。据统计,我国已建和在建的地下水电站约120座,水工隧洞累计长约1100km。正在金沙江上建设的溪洛渡水电站,左、右岸地下厂房开挖尺寸为443.34m×31.9m×

77.6m (长×宽×高), 各装 9 台 770MW 水轮发电机组, 装机容量达 13860MW, 是目前世界上规模最大的在建地下厂房。2012 年年底即将投产发电的锦屏二级水电站, 装机容量 4800MW, 4 条引水隧洞单线长度约 16.7km, 开挖直径为 12.4~14.6m, 最大埋深约 2525m, 具有埋深大、洞线长、洞径大的特点, 高地应力作用非常强烈, 地下水十分丰富, 是目前世界上规模最大、综合技术难度最大的水工隧洞群。这些世界级难度工程的成功建设, 极大地推动了地下工程技术的发展, 标志着我国地下工程技术已处于世界先进水平。

随着水电工程地下洞室建设规模越来越大、地质条件越来越复杂, 在勘测设计与施工建设过程中需解决的主要技术问题有:

- (1) 大型地下洞室群工程地质和水文地质特性研究。
- (2) 大型地下洞室群合理布置。
- (3) 大型地下洞室群围岩稳定分析与评判标准研究。
- (4) 大型地下洞室群支护设计与动态调整。
- (5) 大型地下洞室群施工期快速监测与反馈分析。
- (6) 高地应力地下洞室群岩爆机理研究、预报与预防措施研究。
- (7) 大型地下洞室群防渗排水。
- (8) 大型地下洞室开挖程序、进度与系统仿真研究。

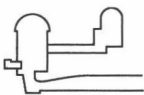
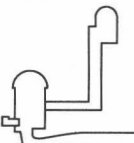
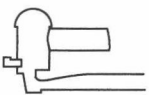
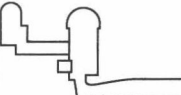
2 水电站地下厂房洞室布置及主要问题

水电站地下厂房洞室群一般由主副厂房洞、主变洞、尾闸洞 (根据需要设计)、调压室、母线洞、出线洞、进厂交通洞、通风兼安全洞、排水洞等洞室组成。地下厂房洞室群布置的主要内容是确定主洞室 (主副厂房洞、主变洞) 的布置方式、主洞室之间的距离及防渗排水系统的布置。

2.1 主洞室布置方式

根据主副厂房洞、主变洞两大洞室布置的相对位置关系, 地下厂房洞室群的布置可分为二洞式、一洞式两种布置方式。二洞式布置方式主副厂房洞、主变洞分别采用两个独立洞室, 通常情况下, 大型地下水电站推荐采用二洞式布置。一洞式布置方式主变压器布置在主副厂房洞内, 一般用于机组台数少的电站。主洞室布置格局方案特性见表 1。

表 1 主洞室布置格局方案特性表

方案 项目	二洞式布置				一洞式布置
	方式一	方式二	方式三	方式四	
布置简图					
围岩稳定	围岩稳定情况较好	围岩稳定情况好	围岩稳定情况好	围岩稳定情况较好	围岩稳定情况好

续表

方案 项目	二洞式布置				一洞式布置
	方式一	方式二	方式三	方式四	
电能损耗	电能损耗中等	电能损耗较大	电能损耗较少	电能损耗中等	电能损耗少
设计经验	富有工程经验	少	较少	少	少
高压钢管 工程量	较少	较少	较少	较多	较少
事故危害	小	小	小	小	大
运行维护	方便	不便	方便	方便	较复杂
工程布置	地下洞室群简洁明了	附属洞室布置复杂	地下洞室群较简洁，机电设备布置较复杂	防水、排水布置复杂，高压管道布置不顺畅	机电设备布置复杂
实际运用	多	少	较少	少	少

2.1.1 二洞式布置方式

二洞式布置方式的主副厂房洞、主变洞采用两个独立洞室，根据主副厂房洞与主变洞之间的相互位置关系，又可分为如下 4 种布置方式。

(1) 方式一：主变洞布置在主副厂房洞下游侧，与主副厂房洞平行的单独洞室内，主变层一般与发电机层同高。该布置方式在水电工程中运用最多，如二滩、小湾、溪洛渡、锦屏一级、锦屏二级等水电站以及十三陵、广蓄、天荒坪、泰安、宜兴、宝泉等抽水蓄能电站，工程设计经验丰富，而且两大洞室布置紧凑，每台机组的低压母线均较短，电能损失小，出线方便，运行维护方便；同时，由于厂房和主变分开布置，如发生事故，可减轻其危害程度。

(2) 方式二：主变洞布置在主副厂房洞下游侧，与主副厂房洞平行的单独洞室内，但是为改善洞群间围岩稳定，主变洞高于主副厂房洞布置，如鲁布革水电站和白山抽水蓄能电站。这种布置方式可改善洞群围岩稳定，并可减轻事故危害程度，但存在母线较长而增加投资，电能损耗大，通风散热问题复杂，起吊运输设备以及运输通道增加，运行维护不便，附属洞室布置复杂等缺点。

(3) 方式三：主变洞布置在主副厂房洞下游侧，与主副厂房洞纵轴垂直或斜交的单独洞室内。这种布置方式一般适用于机组台数不多，主副厂房洞与主变洞长度不长，并且主变洞跨度不大，也没有特别不利的地质构造及节理。主变洞的位置既要尽可能布置在较好的岩层内，又要使高、低压母线的长度尽量短一些，同时要尽量靠近进厂交通洞。如此布置有利于洞室群的围岩稳定，若中控室布置于主副厂房洞和主变洞纵轴线相交处，运行管理方便。瑞典的哈尔斯普兰格梯（Harspranget）电站和我国的小江、回龙山、镜泊湖等电站的地下厂房洞群采用这种布置方式。

(4) 方式四：主变洞布置在主副厂房洞上游侧，与主副厂房洞平行的单独洞室内，如加拿大的丘吉尔瀑布（Churchill Falls）电站。两大洞室布置紧凑，运行维护方便；同时，