

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司
中国水利水电建设工程咨询西北咨询有限公司

CHOUSHUI XUNENG DIANZHAN
SHIGONG JISHU

抽水蓄能电站 施工技术

吕永航 方志勇◎编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

CHOUSHUI XUNENG DIANZHAN
SHIGONG JISHU

抽水蓄能电站 施工技术

吕永航 方志勇◎编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

抽水蓄能电站水工建筑物结构、施工技术与常规水电站有很多相同之处，也有其自身特点。本书从抽水蓄能电站工程布置特点出发，引用了类似工程施工经验，较全面地介绍了抽水蓄能电站工程施工技术，全书共分10章，以已建、在建抽水蓄能电站及相关常规水电站工程施工经验和典型工程案例为主，并简要的叙述了相关设计概念、现行规范要求。书中以江苏溧阳抽水蓄能电站为背景，较详细地介绍了复杂水文地质、地形条件下，大跨度富水地区Ⅳ、Ⅴ围岩地下工程施工新技术的综合运用，上下水库库盆、面板堆石坝布置、开挖填筑工程施工技术与环境保护的良好协调，内容丰富，同时又突出重点。

本书具有一定的知识性、专业性、实践性，可供从事抽水蓄能电站及类似工程建设的施工、监理、设计人员及在校大中专学生参考。

图书在版编目（C I P）数据

抽水蓄能电站施工技术 / 吕永航, 方志勇编著. --
北京 : 中国水利水电出版社, 2014.6
ISBN 978-7-5170-2154-4

I. ①抽… II. ①吕… ②方… III. ①抽水蓄能水电站—工程技术 IV. ①TV743

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第121539号

书 名	抽水蓄能电站施工技术
作 者	吕永航 方志勇 编著
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
刷 印	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 40.5印张 965千字 3插页
版 次	2014年6月第1版 2014年6月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	195.00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



深蓄总布置平面图



深蓄下水库



漂蓄2#尾水洞顶拱开挖支护



漂蓄2#引水上平段



漂蓄2#引水竖井正井开挖



漂蓄4#尾水岔管



漂蓄地下厂房



漂蓄1#竖井式进出水口下弯段



漂蓄上水库库盆施工过程面貌



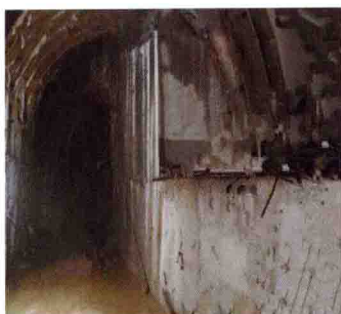
漂蓄主变洞顶拱层开挖



漂蓄主厂房顶拱层开挖



漂蓄尾水洞岩脉段开挖支护、顶拱衬砌混凝土、底拱开挖支护



漂蓄1#施工支洞塌方半洞换填混凝土



2#引水竖井塌方方段小导管支护效果



漂蓄尾水洞 F136、137 断层影响区域小导管



6# 施工支洞不良地质段台阶法开挖支护施工



漂蓄尾水调压井穹顶预应力锚杆安装



下水库库岸边坡双聚能预裂爆破开挖效果



漂蓄上水库西南库岸顺层边坡分层开挖



锦屏一级地下厂房



锦屏一级尾调室上游三岔口开挖情况



锦屏尾调室分层栈桥平台



呼蓄电站上水库冬季全貌



呼蓄库底沥青混凝土摊铺厚度检测



呼蓄库底沥青混凝土摊铺、碾压



呼蓄沥青混凝土条带缝开放端预处理



呼蓄沥青混凝土斜坡摊铺施工



呼蓄扰水破冰实施后效果



序


目前国际上很多发展中国家都在建设抽水蓄能电站，为快速增长的电力系统提供调峰、调频和承担事故备用的作用，而发达国家的抽水蓄能电站在电力系统中已占有相当的比重。我国大力发展这类电站，虽然起步相对较晚，但起点却很高，随着抽水蓄能机组的国产化，发展速度、技术水平和建设规模已逐步进入国际先进行列。自进入 21 世纪以来，我国在开发清洁能源，发展风电、光伏电的同时，在电力系统中需要有更多的抽水蓄能电站协同运行，以有效的利用这些新能源。抽水蓄能电站要求靠近新能源进行选点，往往是随遇而安、难以精选，电站建设就可能要面对各种复杂的工程地质条件。

《抽水蓄能电站施工技术》一书以江苏溧阳抽水蓄能电站为依托，针对该电站特有的地质和建设环境，对各项施工技术进行了系统的介绍，虽然遇到很大困难，但起到了抛砖引玉的作用，参与编写的是咨询西北公司承担该电站施工监理的人员，主编是长期从事水利水电建设监理和施工、设计工作者，至今仍是建设监理一线人员。他们结合多年的实践经验，适时编成这本书，真是件大好事，实为难得！我在阅读初稿并与编者交谈后，欣然应允为本书作序，推荐给读者。

《抽水蓄能电站施工技术》一书对抽水蓄能电站的特点和施工技术作了全面介绍，又结合近 20 年来咨询西北公司所承担的近百项水利水电工程和抽水蓄能电站监理、咨询服务的经验，重点突出、图文并茂，可读性、资料性较强。引用的工程案例以溧阳电站为主，同时也吸纳承担过监理的国内工程相关经验，如跨度、高度很大的金沙江向家坝右岸地下电站；地应力较高的锦屏一级地下电站洞室群；呼和浩特抽水蓄能电站寒冷地区沥青混凝土防渗面板；西龙池、黑麋峰蓄能电站等深长直井、斜井施工技术等等。

地下工程建设中经常遇到地下水的问题，但如溧阳电站那样在地下水位很高的Ⅳ、Ⅴ类围岩中，边开挖、边涌水、边塌方，致使地下工程难以进展的情况实不多见！溧阳电站的建设者们深入研究地下水的规律，探索抽排、控制地下水的措施，实施“超前勘探、超前排水、超前支护”技术，采用了国内新技术、新工艺、新材料等综合工艺，在断层带、强蚀变岩脉段的大型洞室的施工中取得了成功经验。书中有了精炼的叙述，值得借鉴。

《抽水蓄能电站施工技术》在工程规划选点、工程建设部署和建筑材料选用等方面，要求将生态环境保护列为首位，溧阳电站很好的做到了！溧阳电站选点在我国江南旅游胜地天目山景区，电站的上、下水库已与紧邻的天目湖融为一体、和谐相处、环境优美、倍添景色。令人难以置信的是，在这里曾经有过大型地下工程的开挖，在这里曾经是建设大型电站的战场。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '石瑞' (Shi Rui), written in a cursive style.

2014年6月
溧阳

前 言

抽水蓄能电站的发展至今已有 100 多年的历史，20 世纪上半叶抽水蓄能电站发展缓慢，到 1950 年，全世界建成抽水蓄能电站 28 座，投产容量约 2000MW。20 世纪 60 年代后，抽水蓄能电站开始快速发展，60 年代增加容量 13942MW，70 年代增加容量 40159MW，80 年代增加容量 34855MW，90 年代增加容量 27090MW。到 2010 年，全世界共有 40 多个国家和地区已建、在建设抽水蓄能电站，其中投入运行的超过 350 座，总装机容量 160000MW。目前很多发达国家抽水蓄能电站的装机容量已占电力总装机容量相当的比例，例如：奥地利 16%、日本 13%、瑞士 12%、意大利 11%、法国 4.2%、美国 2.4%。

我国在 20 世纪 60 年代后期开始研发抽水蓄能电站，与欧美、日本等发达国家和地区相比，我国抽水蓄能电站的建设起步较晚。1968 年和 1973 年先后建成岗南和密云两座小型混合式抽水蓄能电站，装机容量分别为 11MW 和 22MW。20 世纪 80 年代中后期，抽水蓄能电站的建设步伐加快。1991 年，装机容量 270MW 的潘家口混合式抽水蓄能电站首先投入运行，从而迎来了抽水蓄能电站建设的第一次高潮。20 世纪 90 年代，随着改革开放的深入，国民经济快速发展，抽水蓄能电站建设也进入了快速发展期。先后兴建了广蓄一期、北京十三陵、浙江天荒坪等几座大型抽水蓄能电站。“十五”规划以来，又相继开工了张河湾、西龙池、白莲河、天荒坪、泰安、桐柏、琅琊山、惠州、宝泉、蒲石河、黑麋峰、响水涧、呼和浩特、仙游、敦化、深圳、溧阳、清远、文登等一批大型抽水蓄能电站。

我国抽水蓄能电站建设虽然起步比较晚，但起点较高，近年建设的几座大型抽水蓄能电站技术已处于世界先进水平。例如：广州一、二期抽水蓄能电站总装机容量 2400MW，为世界上最大的抽水蓄能电站；天荒坪与广州抽水蓄能电站机组单机容量 300MW，额定转速 500r/min，额定水头分别为 526m 和 500m，已达到单级可逆式水泵水轮机世界先进水平；西龙池抽水蓄能电站单级可逆式水泵水轮机组最大扬程 704m，仅次于日本葛野川和神流川抽水蓄能电站机组。十三陵抽水蓄能电站上水库成功采用了全库钢筋混凝土

防渗衬砌，渗漏量很小，也处于世界领先水平。天荒坪、张河湾和西龙池抽水蓄能电站采用现代沥青混凝土面板技术全库盆防渗，处于世界先进水平。

抽水蓄能电站的运行具有几大特性：它既是发电厂，又是用户，它的填谷作用是其他任何类型发电厂所没有的；它启动迅速，运行灵活、可靠，除调峰填谷外，还适合承担调频、调相、事故备用等任务。目前，中国已建的抽水蓄能电站在各自的电网中都发挥了重要作用，使电网总体能耗得以节省，降低了电网运行成本，提高了电网的可靠性。抽水蓄能电站在系统中的作用主要有：一是解决电力系统日益突出的调峰问题；二是发挥调压调相作用，保证电网电压稳定；三是发挥事故备用作用，保障电力系统安全稳定运行；此外，抽水蓄能电站还具有黑启动、系统特殊负荷等功能。

《抽水蓄能电站施工技术》一书，以国内公认的水文地质、地形条件最复杂的江苏溧阳抽水蓄能电站工程为依托，对我国近30年来，尤其是20世纪90年代以来，抽水蓄能电站建设的经验进行总结与回顾。旨在从监理、施工技术管控角度，通过对抽蓄电站施工技术实践的总结和对设计的理解，系统地总结抽水蓄能电站建设的设计理念、思路、方案和施工技术工艺等进行总结。

全书共分10章，第1章介绍抽水蓄能电站概况与发展、工程选址与总体规划布置、水工建筑物设计、施工组织设计、施工总进度控制和溧阳抽水蓄能电站上水库主坝、上下水库库盆、输水系统与地下厂房、砂石加工及混凝土生产系统、施工交通及水处理系统等布置及结构设计。第2章介绍混凝土面板堆石坝的结构特点、土石坝填筑、面板堆石坝的质量风险及防范重点，并以溧阳上水库主坝（混凝土面板堆石坝）为例，重点介绍了坝基开挖与处理、坝体填筑、土石方平衡、数字大坝应用、面板堆石坝的设计与优化、混凝土面板堆石坝近30年发展经验和超高坝主要技术研究、呼和浩特抽水蓄能电站沥青混凝土面板施工技术等内容。第3章介绍明挖爆破施工技术，边坡稳定分析和边坡治理。以溧阳上、下水库边坡施工为例，重点介绍了上（下）水库的开挖与支护、库底与副坝的填筑、上水库库底防渗体系等内容。第4章重点探讨了地下工程施工支洞布置、通风与排烟、地下厂房系统防渗与排水布置、地下厂房分层与主变室开挖关系、地下厂房高边墙及相邻洞室间关联关系、提升系统设计及其关联关系等内容。第5章介绍锚喷支护设计与施工技术，地下工程新奥法和新意法施工及溧阳电站尾水支管施工支洞新意法施工案例。第6章介绍围岩分类与稳定性分析、常见的不良地质条件及应对措施，溧阳地下工程不良地质段平洞、竖井、岔管等施工典型案例。第7章介绍平洞、竖井/斜井开挖与支护施工技术，溧阳地下工程尾水主洞、尾水调压井施

工方案，以及类似工程实践，如：西龙池和黑麋峰长斜井开挖支护设计与施工、张河湾 386m 深竖井开挖施工、甘肃白龙江喜儿沟调压井砂卵石地层大直径超深沉井施工等典型案例。第 8 章介绍地下厂房系统大型洞室施工特点、施工技术和主要施工方法、工艺，以及复杂水文地质条件下的溧阳电站地下厂房、跨高最大的向家坝地下电站、高地应力条件下的锦屏电站地下厂房施工典型案例。第 9 章介绍水利水电地下工程主要监测项目、监测仪器与工作原理、监测仪器埋设和溧阳工程施工期监测成果及初步分析。第 10 章介绍混凝土基本原材料特性及试验方法、混凝土配合比设计与温度控制，以及抽水蓄能电站主要混凝土结构的施工技术，如：地下厂房系统混凝土施工、隧洞混凝土衬砌与钢管衬砌、水工隧洞堵头混凝土施工、斜井/竖井混凝土施工和冬季（低温季节）施工，和溧阳上水库进出水口整流锥混凝土施工和尾水主洞挂顶混凝土施工典型案例。

本书编写过程中，参考了国内已有的类似工程施工技术总结材料、专著、论文等和马洪琪院士、曹克明设计大师、石瑞芳设计大师组成的溧阳抽水蓄能电站工程特别咨询团的相关咨询意见，以及现行有效的相关勘察、设计、施工规程、规范等。对这些参考书和文献的作者，在此表示衷心的感谢。江苏国信溧阳抽水蓄能发电有限公司陈宁、陈洪来，中国电建集团胡育林、宁永升、练新军、杨贵仲、肖康、丛振民等专家对本书编写提出了宝贵意见，石瑞芳设计大师对本书进行了审核，提出了指导和宝贵的修改意见并做序。中国水利水电建设工程咨询西北公司高级咨询罗长利、邵岗总经理、宋天峰副总经理给予了大力支持和指导，咨询西北公司赵义鹏、纪维成、兰肃、刘娟、师存禄、杨晓良、孙保成、方伟、陈子辉、尹翔文、李晓、南雅、张润涛、张连修、张援征、刘伟等参与了部分章节编写工作，卢力、姚翔、马莺莺等对全书进行了校核并绘制其中图表，在此深表感谢。

本书涉及专业面广，旨在实现施工技术与设计理念的结合，但由于本书编写人员均为从事水利水电工程建设监理多年、仍在一线工作的同志，时间紧而水平有限，书中难免有不妥之处，敬请专家和读者不吝指教。

作 者

2014 年 1 月 6 日
于江苏溧阳

目 录

序

前言

第 1 章 抽水蓄能电站水工建筑物布置及结构设计	1
1.1 抽水蓄能电站简介.....	1
1.2 工程选址与总布置.....	11
1.3 水工建筑物设计.....	16
1.4 施工组织设计.....	38
1.5 施工总进度控制.....	48
1.6 溧阳抽水蓄能电站简介.....	50
1.7 溧阳施工交通、排水和水处理.....	68
第 2 章 上水库主坝（面板堆石坝）施工	70
2.1 混凝土面板堆石坝结构特点.....	70
2.2 岩土概论与土石坝填筑.....	70
2.3 面板堆石坝的质量风险及防范重点.....	82
2.4 溧阳电站主坝坝基开挖.....	91
2.5 溧阳电站主坝坝基处理.....	91
2.6 溧阳主坝坝体填筑原材料及施工质量控制要求.....	92
2.7 溧阳电站主坝分期填筑规划.....	97
2.8 溧阳电站主坝坝体填筑施工程序.....	98
2.9 溧阳电站主坝分区填筑碾压施工工艺和方法.....	99
2.10 数字大坝技术应用.....	114
2.11 溧阳主坝土石方平衡.....	118
2.12 近年发展经验和超高坝主要技术研究.....	123
2.13 冬季填筑施工.....	130
2.14 面板坝案例.....	131
2.15 混凝土面板坝止水结构.....	133
2.16 呼和浩特抽水蓄能电站上水库沥青混凝土面板施工技术.....	136
第 3 章 上、下水库库盆施工与边坡治理	155
3.1 明挖爆破.....	155
3.2 边坡治理.....	175

3.3	溧阳上、下库开挖与支护	208
3.4	溧阳上水库库底及副坝填筑	236
3.5	上水库库底防渗土工膜施工工艺	237
3.6	溧阳电站下水库边坡开挖双聚能预裂爆破应用	241
第4章	地下洞室群施工关联关系	244
4.1	施工支洞布置	244
4.2	通风、排烟	247
4.3	地下厂房系统防渗、排水布置	250
4.4	地下厂房分层及与主变室开挖关系	252
4.5	地下厂房高边墙及相邻洞室间关联关系	253
4.6	提升系统设计及其关联关系	255
第5章	锚喷支护及新奥法、新意法施工	261
5.1	锚喷支护设计	261
5.2	锚喷支护施工技术	263
5.3	超前小导管与管棚施工	271
5.4	喷混凝土施工	272
5.5	新奥法施工	276
5.6	新意法 (ADECO-RS) 施工	283
5.7	地下工程固结灌浆	289
5.8	溧阳工程 9 [#] 施工支洞新意法施工案例	293
第6章	不良地质段施工	295
6.1	溧阳工程地质特征	295
6.2	主要工程地质问题	304
6.3	施工阶段的地质工作	307
6.4	围岩分类及稳定性分析	307
6.5	常见的不良地质条件及应对措施	315
6.6	溧阳工程不良地质段施工经验	323
6.7	溧阳不良地质段平洞施工 (8 [#] 施工支洞开挖支护)	336
6.8	溧阳工程不良地质段竖井施工	339
6.9	不良地质段支岔管施工 (3 号岩脉分布影响区尾水支、岔洞开挖方案)	345
6.10	1 [#] 施工支洞 44 号岩脉段塌方治理——案例 1	350
6.11	溧阳工程复杂地质条件下施工支洞动态设计与调整——案例 2	353
第7章	输水系统开挖与支护	356
7.1	平洞开挖与支护	356
7.2	竖井/斜井开挖与支护	366
7.3	溧阳尾水主洞开挖与支护	381

7.4	溧阳尾水调压井开挖与支护	387
7.5	深长竖井、斜井施工	391
第8章	地下厂房系统开挖与支护	419
8.1	地下厂房系统大型洞室施工概述	419
8.2	主要施工方法工艺	423
8.3	主厂房开挖	424
8.4	大型地下厂房稳定分析与设计	429
8.5	溧阳地下厂房开挖与支护施工	456
8.6	溧阳地下厂房洞室群枢纽布置与设计	478
8.7	典型案例：金沙江向家坝地下电站施工	490
8.8	典型案例：锦屏一级高地应力条件下地下工程施工技术	509
第9章	施工监测	522
9.1	概述	522
9.2	溧阳工程主要监测类型	523
9.3	监测仪器与工作原理	526
9.4	内观变形监测	527
9.5	应力应变监测	534
9.6	渗流监测	536
9.7	安全监测仪器埋设	537
9.8	施工监测实施	539
9.9	监测结果的处理及反馈	545
9.10	溧阳工程监测成果及分析	549
9.11	现行监测规范规定的比较及主厂房变形稳定分析	554
第10章	混凝土工程	557
10.1	混凝土基本原材料特性及试验方法	557
10.2	混凝土配合比设计与温度控制	584
10.3	溧阳上水库进出水口整流锥混凝土施工方案	588
10.4	溧阳工程尾水主洞挂顶混凝土施工	591
10.5	地下厂房系统混凝土施工	595
10.6	隧洞混凝土衬砌施工	603
10.7	隧洞钢管衬砌施工	611
10.8	水工隧洞堵头施工	620
10.9	竖井、斜井混凝土施工	625
10.10	溧阳上水库库岸无砂混凝土施工	628
10.11	极端低温环境施工	631
	参考文献	635