

龙滩

LONGTAN
JIDIAN JI
JINSHU JIEGOU SHEJI YU YANJIU

机电及金属结构设计与研究

徐立佳 付国锋 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

龙滩

LONGTAN

JIDIAN JI

JINSHU JIEGOU SHEJI YU YANJIU

机电及金属结构设计与研究

徐立佳 付国锋 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司组织编制的“龙滩水电站”系列著作之一,共6章,包括:绪论,水轮机,电气,控制保护,高水头底孔弧形工作闸门和通风空调。主要介绍了龙滩水电站水轮机及其辅助设备、电气主接线及主要电气设备、控制保护、底孔弧形工作闸门和通风空调的设计及相关关键技术研究成果,是作者对龙滩水电站工程机电与金属结构设计及其关键技术问题研究的一个总结。

本书可供从事水电工程机电与金属结构研究、设计和施工的相关技术人员借鉴,也可供高等院校水利、土木工程类相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

龙滩机电及金属结构设计与研究 / 徐立佳, 付国锋
主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2016. 8
ISBN 978-7-5170-4677-6

I. ①龙… II. ①徐… ②付… III. ①水力发电站—
机电设备—研究②水力发电站—金属结构—研究 IV.
①TV734

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第211391号

书 名	龙滩机电及金属结构设计与研究 LONGTAN JIDIAN JI JINSHU JIEGOU SHEJI YU YANJIU
作 者	徐立佳 付国锋 主编
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 (营销中心)
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	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.5印张 368千字
版 次	2016年8月第1版 2016年8月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	70.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《龙滩机电及金属结构设计与研究》

编 审 人 员 名 单

主 编 徐立佳 付国锋

序号	名 称	撰写人	校稿人	统稿人
第 1 章	绪论	徐立佳	付国锋	付国锋
第 2 章	水轮机			
2.1	水轮机稳定性研究	张俊芝	何银芝	何银芝
2.2	水轮机模型及验收试验	伍志军	何银芝	
2.3	水轮机转轮制造方式	张雷	何银芝	
2.4	水力-机械过渡过程	曾艳梅	何银芝	
第 3 章	电气			
3.1	电气主接线研究	刘昆林	王小兵	王小兵
3.2	700MW 全空冷水轮发电机	张培裘 周大方 邓双学 刘昆林	王小兵 孙成章	
3.3	500kV 三相组合变压器	刘昆林	王小兵	
3.4	500kV XLPE 绝缘电缆	唐波 刘昆林	王小兵	
3.5	大入地电流高土壤电阻率接地技术研究	胡凯 刘昆林	王小兵	
第 4 章	控制保护			
4.1	水电站监控系统	李力	袁志鹏 刘立红	李力
4.2	700MW 水轮发电机继电保护系统	李正茂	刘立红	
4.3	智能门禁系统	彭云辉	刘立红	
4.4	泄洪告警及指令广播通信系统	彭云辉	刘立红	
第 5 章	高水头底孔弧形工作闸门	蒋立新	陈辉春	袁长生
第 6 章	通风空调	贺婷婷	李伟	付国锋

序

在布依族文化中，红水河是一条流淌着太阳“鲜血”的河流，珠江源石碑文上的《珠江源记》这样记载：“红水千嶂，夹岸崇深，飞泻黔浔，直下西江”，恢弘气势，可见一斑。红水河是珠江水系西江上游的一段干流，从上游南盘江的天生桥至下游黔江的大藤峡，全长 1050km，年平均水量 1300 亿 m^3 ，落差 760m，水力资源十分丰富。广西境内红水河干流，可供开发的水力资源达 1100 万 kW，被誉为广西能源资源的“富矿”。

龙滩水电站位于红水河上游，是红水河梯级开发的龙头和骨干工程，不仅本身装机容量大，而且水库调节性能好，发电、防洪、航运、水产养殖和水资源优化配置作用等综合利用效益显著。电站分两期开发，初期正常蓄水位 375.00m 时，安装 7 台机组，总装机容量 490 万 kW，多年平均年发电量 156.7 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ；远景正常蓄水位 400.00m 时，再增加 2 台机组，总装机容量达到 630 万 kW，多年平均年发电量 187.1 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。龙滩水库连同天生桥水库可对全流域梯级进行补偿，使红水河干流及其下游水力资源得以充分利用。

龙滩水电站是一座特大型工程，建设条件复杂，技术难度极高，前期论证工作历时半个世纪。红水河规划始于 20 世纪 50 年代中期，自 70 年代末开始，中南勘测设计研究院（以下简称“中南院”）就全面主持龙滩水电站设计研究工作。经过长期艰苦的规划设计和广泛深入的研究论证，直到 1992 年才确定坝址、坝型和枢纽布置方案。龙滩碾压混凝土重力坝的规模和坝高超过 20 世纪末国际上已建或设计中的任何一座同类型大坝；全部 9 台机组地下厂房引水发电系统的规模和布置集中度也超过当时国际最高水平；左岸坝肩及进水口蠕变岩体边坡地质条件极其复杂、前所未见，治理难度大。中南院对此所进行的勘察试验、计算分析、设计研究工作量之浩瀚、成果之丰富也是世所罕见，可以与任何特大型工程媲美。不仅有国内许多一流机构、专家参与其中贡献才智，而且还有发达国家的咨询公司和著名专家学者提供咨询，龙滩水电站设计创新性地解决了一系列工程关键技术难题，并通过国家有关部门的严格审批和获得国内外专家的充分肯定。

进入 21 世纪,龙滩水电站工程即开始施工筹建和准备工作;2001 年 7 月 1 日,主体工程开工;2003 年 11 月 6 日,工程截流;2006 年 9 月 30 日,下闸蓄水;2007 年 7 月 1 日,第一台机组发电;2008 年 12 月,一期工程 7 台机组全部投产。龙滩工程建设克服了高温多雨复杂环境条件,采用现代装备技术和建设管理模式,实现了均衡高强度连续快速施工,一期工程提前一年完工,工程质量优良。

目前远景 400.00m 方案已列入建设计划,正在开展前期论证工作。龙滩水电站 400.00m 方案,水库调节库容达 205 亿 m^3 ,比 375.00m 方案增加调节库容 93.8 亿 m^3 ,增加防洪库容 20 亿 m^3 。经龙滩水库调节,可使下游珠江三角洲地区的防洪标准达到 100 年一遇;思贤滘水文站最小旬平均流量从 $1220\text{m}^3/\text{s}$ 增加到 $2420\text{m}^3/\text{s}$,十分有利于红水河中下游和珠江三角洲地区的防洪、航运、供水和水环境等水资源的综合利用,更好地满足当前及未来经济发展的需求。

历时 40 余载,中南院三代工程技术人员坚持不懈、攻坚克难,终于战胜险山恶水,绘就宏伟规划,筑高坝大库,成就梯级开发。借助改革开放东风,中南院在引进先进技术,消化吸收再创新的基础上,进一步发展了碾压混凝土高坝快速筑坝技术、大型地下洞室群设计施工技术、复杂地质条件高边坡稳定治理技术、高参数大型发电机组集成设计及稳定运行控制技术,龙滩水电站关键技术和工程实践的一系列创新成果,为国内外大型水电工程建设树立了新的标杆,成为引领世界水电技术发展的典范。依托龙滩水电站工程建设所开展的“200m 级高碾压混凝土重力坝关键技术”获国家科学技术进步二等奖,龙滩大坝工程被国际大坝委员会(ICOLD)评价为“碾压混凝土筑坝里程碑工程”,龙滩水电站工程获得国际咨询工程师联合会(FIDIC)“百年重大土木工程项目优秀奖”。龙滩水电站自首台机组发电至 2016 年 6 月,建筑物和机电设备运行情况良好,累计发电 1100 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,水库发挥年调节性能,为下游梯级电站增加发电量 200 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,为 2008 年年初抗冰救灾和珠江三角洲地区枯季调水补淡压咸发挥了重要作用,经济、社会和环境效益十分显著。

为总结龙滩水电站建设技术创新和相关研究成果,丰富水电工程建设知识宝库,中南院组织项目负责人、专业负责人及技术骨干近百人编写了龙滩水电站系列著作,分别为《龙滩碾压混凝土重力坝关键技术》《龙滩进水口高边坡治理关键技术》《龙滩地下洞室群设计施工关键技术》《龙滩机电及金属结构设计与研究》和《龙滩施工组织设计及其研究》5 本。龙滩水电站系列著

作既包含现代水电工程设计的基础理论和方案比较论证的内容，又具有科学发展历史条件下，工程设计应有的新思路、新方法和新技术。系列著作各册自成体系，结构合理，层次清晰，资料数据翔实，内容丰富，充分体现了龙滩工程建设中的重要研究成果和工程实践效果，具有重要的参考借鉴价值和珍贵的史料收藏价值。

龙滩工程的成功建设饱含着中南院三代龙滩建设者的聪明智慧和辛勤汗水，也凝聚了那些真诚提供帮助的国内外咨询机构和专家、学者的才智和心血。我深信，中南院龙滩建设者精心编纂出版龙滩水电站系列著作，既是对为龙滩工程设计建设默默奉献、尽心竭力的领导、专家和工程技术人员表达致敬，也是为进一步创新设计理念和方法、促进我国水电建设事业可持续发展的年轻一代工程师提供滋养，谨此奉献给他们。

是为序。

中国工程院院士：



2016年6月22日

前 言

机电与金属结构设计是水电站设计的重要组成部分。本书主要介绍了龙滩水电站水轮机及其辅助设备、电气主接线及主要电气设备、控制保护、底孔弧形工作闸门和通风空调的设计及相关关键技术的研究成果。

龙滩水电站位于广西壮族自治区天峨县城上游 15km 处，前期工程装机 7 台，单机额定容量 700MW，在电力系统中发挥着调峰、调频和事故备用等作用，具有发电、防洪、航运等综合利用效益，是国家实施“西部大开发”和“西电东送”的标志性工程之一。在机电与金属结构设计过程中，设计者们以工程经济性和确保运行安全可靠为目标，开展关键技术研究，主要解决了下列问题：

(1) 现场制作 700MW 混流式水轮机转轮，将上冠、下环、叶片散件运至工地，在工地制造车间进行组焊、热处理、精加工、静平衡试验等，提升了转轮现场制作的水平。700MW 水轮发电机采用全空冷冷却方式，投运时系国内外单机额定容量最大的全空冷水轮发电机，为巨型水轮发电机冷却方式的选择积累了经验。

(2) 电气主接线采用发电机变压器单元接线、设置发电机出口断路器、500kV 侧完全 4/3 断路器接线方案，为国内外水电站首次应用。

(3) 国产化 500kV XLPE 绝缘电缆、计算机监控系统和水轮发电机组继电保护系统在超大型水电站首次成功应用，对打破国外企业的垄断、加速国产化进程意义重大。

(4) 500kV、780MVA 主变压器首次采用了三相组合变压器，解决了重大件运输问题。

(5) 在国内外超大型水电站中对 700MW 水轮发电机主保护配置首次进行定量化设计，最大范围地实现了发电机定子绕组内部故障的有效保护。

(6) 通过大入地电流高土壤电阻率接地技术的研究，提出了大型水电站接地网电位升高的允许值，提出了综合技术经济指标最优的接地处理方案，并通过了实践检验，保证了电站人身与设备安全。

(7) 在挡水水头 110.00m、操作水头 90.00m 的底孔弧门中应用了预压止水结构,突破了现有预压止水结构型式,成功解决了高水头弧门止水的问题。

(8) 通过对巨型地下水电站洞室群整体多工况热态通风模拟试验和计算机模拟分析,成功解决了地下水电站通风空调系统设计的难题,减少了通风空调系统的投资,降低了运行能耗。

本书对龙滩水电站机电与金属结构设计研究成果进行了总结,在编写过程中得到了中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司领导和相关人员的大力支持,本成果也凝聚了全院几代设计人员的心血与智慧。希望本书能为从事水电站机电与金属结构专业的人员提供有益借鉴。

本书在编写出版过程中,引用了大量机电与金属结构设计研究相关成果和文献资料,也得到了河海大学工程管理研究所的大力相助。在此,向各位专家、学者们表示衷心的感谢。

由于设计研究周期长,资料庞杂,并限于作者水平,书中难免有不妥之处,敬请同行专家和读者批评指正。

编者

2016 年 6 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 工程总体布置	1
1.2 机电与金属结构设计解决的关键技术问题	4
第 2 章 水轮机	6
2.1 水轮机稳定性研究	6
2.2 水轮机模型及验收试验	23
2.3 水轮机转轮制造方式	33
2.4 水力-机械过渡过程	42
第 3 章 电气	55
3.1 电气主接线研究	55
3.2 700MW 全空冷水轮发电机	76
3.3 500kV 三相组合变压器	90
3.4 500kV XLPE 绝缘电缆	96
3.5 大入地电流高土壤电阻率接地技术研究	102
第 4 章 控制保护	112
4.1 水电站监控系统	112
4.2 700MW 水轮发电机继电保护系统	139
4.3 智能门禁系统	154
4.4 泄洪告警及指令广播通信系统	162
第 5 章 高水头底孔弧形工作闸门	168
5.1 底孔弧形工作闸门及其研究内容	168
5.2 底孔弧门结构设计	169
5.3 底孔弧门有限元静动力分析	174
5.4 底孔弧门流激振动模型试验	186
5.5 底孔弧门止水装置	190

第 6 章 通风空调..... 197

6.1 基本参数分析 197

6.2 通风空调系统方案..... 204

6.3 CFD 数值模拟 212

6.4 模型试验 215

参考文献..... 233

绪 论

龙滩水电站工程分两期建设,前期工程按正常蓄水位 375.00m 建设,装机 7 台,单机额定容量 700MW,年平均发电量 156.7 亿 kW·h,年利用小时数 3740h,水库总库容 162.1 亿 m³,具有年调节能力;后期工程按正常蓄水位 400.00m 设计,增加 2 台机组。目前,工程总装机容量 6300MW,年平均发电量 187.1 亿 kW·h,年利用小时数 3470h,总库容 272.7 亿 m³,具有多年调节水库。龙滩水电站以 500kV 一级电压接入电力系统,前期出线 4 回,其中河池 1 回、柳州 2 回、平果 1 回;后期出线 5 回,并预留 1 回备用出线间隔,第 5 回出线方向将根据电网发展再研究确定。龙滩水电站在系统中担任调峰、调频和事故备用,具有发电、防洪、航运等综合利用效益,按“无人值班”(少人值守)原则设计。龙滩水电站工程于 2007 年 5 月第 1 台机组发电,至 2008 年 12 月底前期 7 台机组全部投产发电,自投产以来,运行安全稳定,取得了巨大的经济效益和社会效益。

1.1 工程总体布置

1.1.1 枢纽布置

龙滩水电站枢纽由挡水建筑物、泄水建筑物、引水系统、发电系统及通航建筑物组成。挡水建筑物为碾压混凝土重力坝。泄水建筑物布置在河床坝段,由 7 个表孔和 2 个底孔组成;表孔溢洪道承担全部泄洪任务,2 个底孔对称布置于表孔溢洪道两侧,用于水库放空和后期导流。引水发电系统位于河床左岸,引水系统由 9 个进水口和 9 条引水隧洞组成;尾水系统由 9 条尾水支洞、3 个调压井、3 条尾水隧洞及尾水出口等建筑物组成。发电系统包括左岸地下主厂房、母线廊道、主变洞、地面 GIS 开关站和出线平台以及中控楼等。通航建筑物位于河床右岸,按Ⅳ级航道设计,采用二级垂直提升式升船机。

水轮发电机组全部布置在左岸地下厂房洞室内,前期装机 7 台,8 号、9 号机组机坑浇至锥管层并在后期安装。主变洞位于主厂房洞下游,与主厂房洞平行,两洞室之间距离 43.00m,主变洞与主厂房洞之间每台机组通过母线廊道连接。500kV GIS 开关站和出线平台以及中控楼布置在左岸下游地面。主变洞右端通过主变进风兼主变运输洞与进厂交通洞相连,主变洞左端通过联系洞与主厂房副安装场相连;500kV 高压电缆分为 3 组经过 3 个电缆竖井上升至高程 340.00m 后经电缆平洞至 500kV GIS 开关站的电缆层。中控楼与地下主厂房洞、主变洞之间由设于 1 号高压电缆竖井中的 1 座楼梯和 2 台电梯作为联系通道。

1.1.2 主要机电设备布置

1.1.2.1 主厂房布置

主厂房布置于左岸地下，9 台机组一列式布置，机组间距 32.50m；主、副安装场布置在厂房两端，主安装场位于主厂房右端，长 60.00m，副安装场长 36.00m，位于主厂房左端；主厂房总长度 388.50m；主厂房净宽 28.50m，安装场与主机间同宽。厂房总高度为 74.60m。在主厂房内高程 246.72m 处安装两台 500t+500t 双小车桥式起重机。主厂房由上往下布置依次为：发电机层、母线层、水轮机层、蜗壳层、锥管层及尾水管操作廊道层。

(1) 发电机层布置。发电机层高程为 233.70m。上游侧为通风夹层；下游侧布置励磁系统和机组控制保护共 38 面盘柜。主安装场考虑放置 1 台机组的发电机转子、下机架、水轮机转轮、顶盖及发电机定子现场叠片的要求，长 60.00m；副安装场考虑转子、转轮及顶盖的装配及放置零星小部件，长 36.00m。

(2) 母线层布置。母线层高程为 227.70m，主要布置发电机主引出线、发电机中性点设备、机组自用变压器及开关柜和二次屏柜。发电机主引出线位于下游侧，B 相中心线与“—Y”轴重合，发电机中性点引出线位于第二象限。

(3) 水轮机层布置。水轮机层高程为 221.70m，第二象限布置调速器、油压装置及控制柜；第三象限主要布置油、气、水管路；第四象限为水轮机机坑进入廊道，下游侧布置全厂技术供水设备。在该层主安装场下的副厂房地面高程为 219.70m，布置空压机室和深井泵房，副安装场下的副厂房地面高程为 220.20m，布置透平油库和透平油处理室。

(4) 蜗壳层、锥管层及尾水管操作廊道层布置。蜗壳层、锥管层主要布置蜗壳取水自流减压供水设备，尾水管操作廊道层主要布置机组技术供水备用水泵及相应设备。

1.1.2.2 主变洞布置

主变洞分两层布置，上层高程为 245.70m，主要布置与主变 500kV 套管连接的 500kV GIS 管线及 500kV 电缆。下层高程为 233.70m，与发电机层同高程，以方便主变的运输，该层布置主变压器、变压器冷却器、雨淋阀、高压厂用变压器等设备。为了减少离相封闭母线的长度，主变布置在靠母线廊道一侧，主变运输道布置在下游侧。主变室下面上游侧布置 3.7m 宽的电缆道，贯穿整个主变洞。主变洞右端布置绝缘油库和绝缘油处理室。

主变从主厂房主安装场经主变进风洞运至主变洞。主厂房内每台机组的离相封闭母线经母线廊道与主变洞内对应的三相组合变压器连接。主变洞总长 406.75m，宽度为 19.50m。

1.1.2.3 母线廊道布置

母线廊道共 9 条，每条母线廊道内主要布置离相封闭母线和发电机电压配电装置，分两层布置，高程 227.70m 层主要布置离相封闭母线和发电机断路器；高程 221.70m 层主要布置机端电压互感器柜、电压互感器避雷器柜、高压开关柜、动力盘、照明配电室等。母线洞长 43.00m，宽 9.00m。

1.1.2.4 开关站和出线平台布置

500kV GIS 开关站和出线平台集中布置在距左岸坝下游约 500.00m 的山坡上，为减

少边坡高度和开挖量,开关站与出线平台采用框架结构。开关站和出线平台有左岸上坝公路与之相通,并与中控楼相邻,运行、维护、管理和设备运输均较方便。

500kV GIS 开关站分 3 层布置,高程 340.00m 层为 500kV 电缆层,主要布置 500kV 电缆及动力和控制电缆;高程 346.00m 层为 500kV GIS 层,主要布置 500kV GIS 设备、20t 桥机及现地控制柜,宽 18.10m,长 220.00m;高程 365.00m 层为 500kV 户外出线平台层,主要布置 500kV 出线并联电抗器、避雷器、电容式电压互感器、阻波器和出线门架,宽 50.60m,长 220.00m。

1.1.2.5 中控楼布置

中控楼布置在开关站出线平台附近,分 4 层布置,地面首层高程 365.60m,主要布置中控室、继电保护室、计算机室、蓄电池室;地下层高程 360.80m,主要布置电缆桥架及动力和控制电缆;地面第二层高程 370.70m,主要布置通信电源室、通信机房、资料室、办公室;地面第三层高程 376.70m,主要布置 2 台电梯机房。中控室布置计算机监控系统控制台、模拟屏、大屏幕电视墙、计算机条形桌,继电保护室内共布置 120 面盘柜,计算机室配置 8 个计算机工作台,通信机房共布置 42 面盘柜。

中控楼与地下厂房、主变洞之间设 2 台电梯和 1 座楼梯作为联系通道。中控楼长 48.00m,宽 33.00m。

1.1.2.6 电缆竖井及电缆平洞布置

主变洞高压电缆层与 500kV GIS 开关站之间高差约 100.00m,设 3 个高压电缆竖井与 3 个高压电缆平洞连通主变洞与开关站,3 个电缆竖井从右至左依次为 1~3 号电缆竖井。

1 号电缆电梯竖井位于主变洞右端部,竖井内布置 3 回高压电缆、2 台电梯、1 座楼梯及 1 个通风井,通过高程 340.00m 的电缆平洞将 3 回高压电缆引出与地面 500kV GIS 开关站相连,并兼有连通中控楼与主变洞、地下厂房的交通之功能。

2 号、3 号电缆电梯竖井位于主变洞下游侧,竖井内均各布置 3 回高压电缆、1 台电梯、1 座楼梯及 1 个通风井,通过电缆竖井顶部高程 340.00m 的电缆平洞将高压电缆引出与地面 500kV GIS 开关站相连。

1.1.3 主要金属结构设备布置

龙滩水电站金属结构设备分布在大坝泄洪建筑物、引水发电建筑物、升船机上闸首和施工导流建筑物中。共有各种闸门(拦污栅)98 扇,各类门槽(栅槽)112 套,门库 12 套,各种型式启闭机 27 台(套)。金属结构总重量 23428.951t,其中闸门及埋件重量 18952.351t,启闭机重量 4476.600t。

泄洪建筑物由 7 个溢洪道表孔和两个底孔组成。其中,溢洪道表孔设 1 扇事故检修闸门和 7 扇弧形工作闸门,底孔设 1 扇检修闸门、两扇事故闸门和两扇弧形工作闸门。溢流坝段弧形闸门由液压启闭机启闭。在弧形工作闸门上游设置事故检修闸门,7 孔事故检修门槽共用 1 扇事故检修闸门,事故检修闸门由溢流坝段坝顶门机操作。在底孔上游进水口设置检修闸门,在底孔上游距进口 8.00m 设置事故闸门,底孔检修闸门和底孔事故闸门由溢流坝段坝顶门机操作,在底孔下游出口处设置弧形工作闸门,每扇门由 1 台液压启闭机操作。

每台机组进水口前布置6扇拦污栅,由进水口清污门机启闭。在拦污栅栅槽前设置抓斗导槽,由进水口清污门机连接抓斗沿导槽进行清污。在拦污栅后设置检修闸门,9台机组共用两扇检修闸门,由进水口坝顶门机小车通过自动抓梁启闭。每台机组设置1扇事故闸门,由进水口液压启闭机操作。

尾水建筑物金属结构主要包括尾水管金属结构和尾水洞出口金属结构。在每台机组尾水管出口布置检修门槽,9孔检修门槽共设9扇门叶,由调压井廊道内的3台尾水管台车操作。9条尾水管经调压井后合3为1,形成3条尾水洞,在出口处通过隔墩将每条尾水洞分成两个孔口,共有6个尾水出口检修门槽,每个尾水出口检修门槽设置1扇检修闸门,由尾水洞出口门机操作。

1.2 机电与金属结构设计解决的关键技术问题

机电与金属结构设计是龙滩水电站设计的重要组成部分,主要包括:水轮发电机组及水力机械辅助设备、电气主接线及主要电气设备、控制保护、金属结构和通风空调系统的设计。其中,广泛采用了新技术、新设备、新工艺、新材料和国产化设备,自动化程度达到世界先进水平。龙滩水电站设计过程中,就机电与金属结构关键技术开展了专题研究,并将研究成果成功应用于工程,取得了显著成效。机电与金属结构设计主要解决的关键技术问题如下所示。

(1) 700MW混流式水轮机转轮制造方式选择问题。转轮是水轮机的核心部件,其性能直接影响机组运行的安全性和经济性。若运输条件允许,国内外大型混流式水轮机转轮均采用工厂整体转轮、整体运输;当运输条件受到限制时,则采用分瓣运输工地进行合缝组焊或采用散件运往工地进行组装、焊接。转轮尺寸巨大,位于深山峡谷地区的龙滩水电站交通运输条件受到限制,转轮既要满足运输条件要求,又要确保良好的制造质量,确保原型转轮与模型转轮相似,满足机组安全稳定运行要求。因此,转轮的制造方式选择是大型水轮机转轮制造的关键技术之一。

(2) 700MW水轮发电机冷却方式选择问题。随着单机容量的增大,发电机额定电流增大,发电机各部件的尺寸加大,各部分的损耗、发热量随之增加,发电机通风冷却的难度相应增大。冷却方式关系到水轮发电机参数的选择、结构设计、重量和造价。大型水轮发电机冷却方式主要有全空冷、半水冷和蒸发冷却,全空冷水轮发电机具有结构简单、安装及运行维护方便、运行可靠性高的特点。单机容量大、定子铁芯长的龙滩水电站发电机能否采用全空冷方式是有待研究的课题。

(3) 电气主接线型式优化问题。电气主接线是水电站电气设计的主体和依据,与电网特性、电站接入系统方式、电站规模、水能参数、电站运行方式、枢纽条件等密切相关,大型水电站电气主接线是电力系统的重要组成部分,对电力系统的安全稳定运行起着重要作用。通过定量计算与分析,选择技术经济指标最优的电气主接线型式是电气设计的关键技术之一。

(4) 超高压电力变压器型式设计问题。随着水电站单机容量的增大以及交通运输条件和地下厂房布置的限制,主变压器型式不仅要考虑生产厂家的技术水平,还要考虑变压器

的运输方式、运输重量、运输尺寸和地下厂房的布置情况。因此，超高压电力变压器的型式设计是设备选择的关键技术之一。

(5) 700MW 水轮发电机主保护配置优化问题。大型发电机结构复杂、定子绕组并联分支数多、保护要求高，而现行的水轮发电机保护规程适应的机组单机容量尚未达到 700MW 或以上的容量等级，以往国内外水电站中发电机保护配置主要凭经验和传统习惯进行定性设计。因此根据 700MW 水轮发电机内部结构和电气参数、发电机中性点接地方式等特点，对发电机主保护配置进行量化设计，优化发电机中性点引出方式和主保护配置并应用于工程实际，对保证发电设备和电网的安全稳定运行意义重大。

(6) 大入地电流高土壤电阻率接地问题。接地技术对电力系统的安全运行有着重要的影响，直接关系到人身和设备的安全。随着电力系统规模的扩大，入地短路电流大幅升高，且水电站大多位于电阻率高的山区，对大入地电流高土壤电阻率接地技术提出了新的课题。

(7) 高水头弧门止水问题。高水头弧门主要有预压式止水、偏心铰压紧式止水和充压伸缩式止水三种型式。预压式止水型式的闸门结构简单、造价低廉，在各种水位条件下水流平顺、适应性强。但以往工程预压止水型式弧门主要用于中低水头，龙滩水电站弧门挡水水头 110.00m、操作水头 90.00m，通过对龙滩水电站高水头弧门预压式止水研究，对后续高水头电站底孔弧门的设计具有极高的参考价值。

(8) 地下厂房通风问题。地下厂房通风空调系统的设计直接关系到运行维护人员及设备运行的环境是否舒适安全。龙滩水电站地下厂房洞室群多，内部空间大小不一，系统多，气流组织困难，实际运行各支路系统阻力难以平衡，通风空调效果难以保证。因此，在进行厂房气流组织计算的同时通过模型试验验证设计的合理性和可靠性，并根据模型试验结果优化系统设计，可为后续大型地下电站通风空调系统设计提供可借鉴的经验。

(9) 大型水电站设备国产化问题。国外计算机监控系统研制起步较早，制造工艺水平较高，占据着一定优势。过去国内水电工程中的 500kV XLPE 绝缘电缆主要由欧洲和日本厂家供货，如何打破国外厂商在国内大型水电站设备供应的垄断地位，加速我国机电设备的国产化进程，是水电行业面临的重要课题。

水 轮 机

2.1 水轮机稳定性研究

2.1.1 研究背景

水轮机运行稳定性指水轮机在各运行工况下,水轮机过流部件的压力脉动和由压力脉动引起的振动及振动区域的大小程度,以及由电磁和机械的原因引起的振动程度、功率摆动的程度、水轮机的噪声等。水轮机的稳定性关系到机组及水电站能否正常运行。

龙滩水电站工程分两期建设,前期水头 H 变化范围为 97.00~154.00m,后期水头 H 变化范围为 107.00~179.00m。其中,前期最大水头 $H_{\max} = 1.232H_r$,后期 $H_{\max} = 1.432H_r$, H_r 为设计水头;前期 $H_{\max} = 1.588H_{\min}$,后期 $H_{\max} = 1.673H_{\min}$ 。国内外转轮直径 5.00m 以上的混流式水轮机的运行数据表明,在比速系数 K 大于 1900~2000 的大机组中,当 $H_{\max}/H_{\min}$ 的值大于 1.4~1.5、 $H_{\max}/H_r$ 的值大于 1.4 以上时,稳定性不良或裂纹的机组数大大增加;而小于上述比值的机组,发生稳定性问题或裂纹的机组数较少,即,稳定性较差与发生裂纹的机组大多集中在 $H_{\max}/H_{\min}$ 值与 $H_{\max}/H_r$ 值较大的工程。

龙滩水电站不论是 $H_{\max}/H_{\min}$ 值或 $H_{\max}/H_r$ 值,均高于其他大多数水电站。在比速系数 K 大于 2100 以上的大机组中,龙滩水电站水轮机的 $H_{\max}/H_{\min}$ 值位居前列,就 $H_{\max}/H_r$ 值而言,超过了目前所有水电站。因此,龙滩水电站水轮机是否会像其他水头变幅大的水轮机一样发生不稳定和裂纹,是令人担忧的。

虽然导致机组产生不稳定和裂纹的原因很多,除运行条件外,还涉及水轮机的设计、加工制造和安装等一系列因素,但有这么多的发生不稳定和裂纹的机组集中在 $H_{\max}/H_{\min}$ 值与 $H_{\max}/H_r$ 值较大的区域内,说明 $H_{\max}/H_{\min}$ 值与 $H_{\max}/H_r$ 值较大即使不是引发不稳定和裂纹主要的原因,至少也是重要的因素之一。这是由于混流式水轮机的叶片不能调节,水头变幅大再加上 $H_{\max}/H_r$ 值较大,则水轮机的运行工况或水流条件变差,从而促进水轮机流道中产生各种撞击、脱流、漩涡、空化等水力不稳定现象与动应力,促使水压脉动和水力不稳定现象产生。

龙滩水电站机组在系统中担任调频、调峰及事故备用等作用,负荷变化剧烈,同时,其下游水位洪枯两季变化达 40.00m,部分负荷运行时向水轮机补气困难。鉴于这些制约,龙滩水电站水轮发电机组运行工况和条件比常规水轮机更恶劣,稳定性问题也显得尤为突出。