



SHUILI FADIAN JISHU GUOJIHUIYI LUNWENJI

第一届

水力发电技术国际会议

(第二卷)

论文集

本书编委会 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

第一届

水力发电技术国际会议

论文集

(第二卷)

本书编委会 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

第一届水力发电技术国际会议论文集. 第2卷/《第一届水力发电技术国际会议论文集》编委会编. —北京: 中国电力出版社, 2006

ISBN 7-5083-4874-5

I. 第... II. 第... III. 水力发电-国际学术会议-文集 IV. TM612-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 123376 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京盛通彩色印刷有限公司印刷

*

2006 年 10 月第一版 2006 年 10 月北京第一次印刷

880 毫米 × 1230 毫米 16 开本 66.75 印张 2093 千字

印数 001—800 册 定价 400.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

第一届水力发电技术国际会议论文集

编 委 会

主 任： 毕亚雄

副 主 任： 秦中一 李菊根 贾金生 陈洪斌 刘建明 李 东
毛亚杰 刘广峰 李定中 周尚洁 李 新

常务副主任： 邴凤山

论文集出版： 中国电力出版社

主 编： 文伯瑜 白立江

副 主 编： 赵 伟 傅 伟 杨伟国

审 稿 专 家： 文伯瑜 李定中 赵 琨 朱耀泉 王德宽 唐 澍
刘利人 秦锡翔 饶道群 程永权

责 任 编 辑：

英 文 版： 潘宏娟 曹 荣 潘 琳 刁晶华 谭学奇 张 敏
梁 卉 王卫华 韩世韬

中 文 版： 李慧芳 郭丽然 穆智勇 王冬虎 潘 琳 曹 荣
马 琳 李文娟 梁 卉 王卫华 刁晶华 杨 易

论 文 编 辑： 赵媛媛 王 玉 舒波平 金玉琪 古 巍 刘惠荣
王幼春 胡丹蓉 冯密峡 王连富

翻 译： 国电信息中心北京中电求真科技发展有限公司

监 制： 国电信息中心北京中电求真科技发展有限公司

前 言

以全新技术装备起来的人类，已跨入了 21 世纪。中国电力工业已步入大电站、大机组、高电压、大电网、自动化和信息化的时代。自 20 世纪下半叶，中国的水电建设掀起了新的高潮，一大批世界顶级的工程、一大批世界顶尖的技术在中国兴起。世界水电在中国，中国水电冠全球。据不完全统计，中国已投产的大中型各类水力发电机组：混流型机组 301 台，轴流机组 55 台，抽水蓄能机组 25 台，贯流机组 83 台。

在建和拟建的众多巨型电站和单机容量在 70 万~80 万 kW 的特大机组共计 120 台。国家有关规划数字显示，在 2020 年前中国将投产的单机容量 70 万~80 万 kW 的混流机组约 150 台，单机容量 30 万~40 万 kW 的抽水蓄能机组约 150 台；单机容量 3 万~6 万 kW 的大型贯流机组约 150 台。由此可见，中国水电建设和发展已进入“黄金时代”。不久的将来，中国水电装机容量就会突破 2 亿 kW，还有 3 亿 kW 的水电装机容量将纳入国家的规划、设计和建设项目中。广阔的中国水电装备市场，众多特大机组的设计、制造和生产运行技术，需要借鉴国际先进技术和先进经验，需要国际同行的合作，携手发展中国的水电装备制造业和创新电站经济运行新理论和新模式，以最大限度地发挥水电可再生、清洁、灵活的绿色环保的本土化能源的作用，为保护全球人类绿色家园作贡献。

在国际间的技术合作上，三峡工程有成功的经验。充分发挥国家重大工程对技术创新的带动作用，走出了一条引进技术，联合开发，合作制造，独立自主再创新的成功路子。众所周知，三峡水轮发电机组因国际招标成为世界水电装备技术最高水平的展示和较量，被誉为“全球水电奥运”，达到了世界最先进技术和装备比选的目的。通过三峡右岸电站 12 台机组的合作，哈尔滨电机厂有限责任公司，东方电机股份有限公司凭借自主创新形成的核心竞争力，通过 7 年的时间，使中国大型水电机组在水电大装备的设计、制造、安装水平等方面，实现了 30 年的大跨越。

发展水电和确保大机组的安全稳定运行不仅是电站的经济效益所在，更是电网安全、经济运行的重要保证，也是中国能源结构优化和能源安全的期盼。20 世纪七八十年代末，美国的大古力Ⅲ水电站、巴西的伊泰普水电站建成投产，积累了丰富的制造和生产运行经验。交流特大型水电站、特大型水电机组的设计、制造和生产技术经验，促进全球水电装备制造业的发展和创新，成为我们举办“第一届水力发电技术国际会议”的主旨。水电站建设、水电装备技术的创新、水电站群的优化运行，是人们开发水能资源的基本要求。

水电站群梯级水库调度自动化、网络化、信息化，控制设备的智能化，机组运行状态远程诊断技术的实现，也是会议的主要内容之一。据统计，采用状态诊断技术可减少故障停机时间 75%，每年可减少维修费用 25%~50%。如果电站运行系统中的状态监测与故障诊断的获利与投资比达 36:1，如果系统中是以可靠性分析技术为基础、以状态监测诊断系统技术为工具，可使发电系统日常维护工作量减少 40%~70%。在电站状态维修系统中，专家知识的集成、监测系统的集成、软硬件的功能集成是核心技术，又是状态检修决策和维护管理的基础。这也是本次会议议题之一。本届会议的主要交流内容涵盖以下七个方面：

1. 大型水轮机设计、制造和运行关键技术；
2. 大型水轮发电机及高压设备技术；
3. 大型水电站设备保护和控制技术；
4. 大型水电站在线监测及故障诊断技术；
5. 大型水电站群梯级调度及水情测报技术；

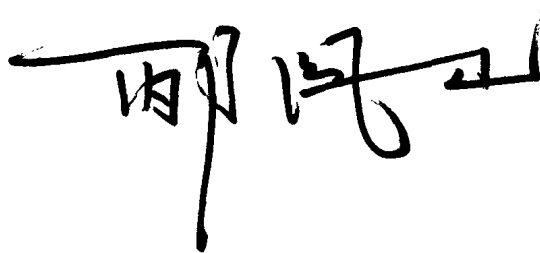
- 6. 大型水电站机电设备安装及运行管理技术；
- 7. 大型水电站的金属结构、船闸设计和机电安装技术。

本论文集共收录论文 409 篇，其中国外论文 36 篇。共计 500 余万字，分别用中文和英文出版。论文编审工作是在秦中一、毕亚雄、邴凤山等主持下进行的。参加论文审稿的专家有文伯瑜、李定中、赵琨、朱耀泉、王德宽、唐澍、刘利人、秦锡翔、饶道群、程永权、杨伟国等人。

会议组委会委托中国电力出版社正式出版发行，以飨读者。

鸣谢！

中国水力发电工程学会秘书长
第一届水力发电技术国际会议执行副主席（常务）

A large, stylized handwritten signature in black ink, which appears to read '邴凤山' (Bing Fengshan).

2006 年 10 月

目 录

前言

利用 HVOF 对水轮机过流部件进行表面强化处理	艾友忠 卢进玉 涂阳文 (1)
洪江水电厂贯流式机组金属结构问题探讨	梁湘津 (5)
清江流域梯级水电站调度自动化的实现背景及其意义	谭少华 熊华康 (11)
清江与三峡梯级水电站联合调度的补偿效益分析	熊华康 (15)
抽水蓄能机组参数选择及需要注意的问题	陈顺义 王小军 赵 政 (21)
抽水蓄能电站计算机监控系统及控制技术	傅新芬 吴 毅 (28)
抽水蓄能电站自动控制和继电保护设计有关问题的讨论和建议	周才全 王胜军 (34)
大型水电站综合通信网络技术设计和应用	徐 涵 (38)
接力式液压启闭机	金晓华 汪云祥 (43)
水口水电站 2×500t 级垂直升船机	汪云祥 扈晓雯 (48)
水轮机压力脉动分析	黄万全 (57)
冲沙底孔钢衬 NM360 耐磨钢板装焊技术研究	万天明 赵显忠 (60)
三峡左岸二期工程压力钢管制作安装施工技术	彭 波 (73)
清江升船机安装调试技术	曹 毅 李 波 (78)
三峡永久船闸金属结构和机电设备系统联合调试	王家强 (85)
三峡左岸电站 VGS 机组盘车暨总装工艺改进	张燕滨 邓常义 (93)
三峡电站 VGS 机组轴承试运行出现的问题原因分析及处理	邓常义 (97)
三峡左岸电站 1~6 号机压力钢管合拢缝焊接工艺研究	肖可畏 黄 伟 (100)
洪江水力发电厂 1 号水轮机桨叶接力器联接螺栓断裂原因分析	谭丕成 (109)
水电站洞内大型钢管技术研究	彭智祥 杨 瑾 (112)
发电机推力轴承用、渗油原因及处理方法	肖 明 张宏杰 刘定友 王全洲 于维峰 刘宇明 赵志民 (116)
混流式水轮机变工况点数值研究	逯 鹏 郭鹏程 彭文季 罗兴铸 (119)
灯泡贯流式机组运行稳定性浅析	刘 强 (125)
二滩水电站调速器的交叉冗余双微机调节器	张富强 胡乙进 谭中美 (129)
对水电厂设备检修管理的探索和思考	李平诗 余维坤 (135)
基于移动 Agent 的水电站分布式故障诊断专家系统	赵振龙 李书明 陈 军 (140)
水轮发电机组故障诊断系统结构及软件实现方法	李书明 赵振龙 陈 军 (146)
大峡水电站 3 号机组励磁参数实测及 PSS 试验	刘建国 (152)
小峡水电站厂用电高压回路开关设备选型分析	刘丽军 马景浩 张致鹏 (162)
水轮发电机定子线棒绝缘击穿原因分析及处理	张致鹏 马景浩 刘丽军 李景亮 (167)
浅谈微机保护装置的现场检验和改进完善	陈光进 (171)
含沙水中水轮机水力优化设计研究	吴 彬 梁 柱 刘小兵 (175)
抽水蓄能电站变频启动装置 (SFC) 启动时应关注的问题	何幼军 (180)
关于大朝山水电站水轮发电机组稳定性运行的分析	杨 波 (183)
二滩电站发电机组轴承漏油治理历程	徐文峰 (190)
水电行业的计算机监控系统	李连华 (195)

进相运行机组失磁保护分析	李文友	何能全	(207)
三峡电站厂内起重设备选型设计及关键技术	熊腾晖	周云章	(210)
基于多种通信方式的大型水情自动测报系统的实现	姚 峰 梅祥岸 刘 瑜	熊光亚	(215)
静止变频器在广州蓄能水电厂的应用		郭小涛	(219)
联合开发 联合调试 三峡电站监控系统投运新模式		谢秋华	(224)
巨型水内冷发电机绝缘测试技术	谢 俊 郭 岩	陈国庆	(229)
大型发电机局部放电监测及电晕处理		余维坤	(234)
葛洲坝水轮发电机组改造增容	艾友忠	卢进玉	(240)
抽水蓄能机组启动方式的低频特性分析及保护的频率自适应	张侃君 任 岩	尹项根	(244)
基于水电设备状态监测集成化远程诊断系统的研究	刘晓亭 冯辅周	刘 昱	(249)
S7-PLC 控制调相压水系统并与治理甩负荷抬机合成为一个神经元		朱文杰	(255)
清江对荆江的防洪作用分析		熊华康	(263)
我国水电机组的技术改造与创新		端润生	(267)
柘林水电厂 5 号机组稳定性试验分析	徐擎天 罗跃林	吴道平	(273)
固定导叶卡门涡与叶道涡	李启章	李志民	(277)
溧阳抽水蓄能电站单机容量与机组台数选择	郑建兴	伍志军	(285)
GZ-II 电站推力轴承烧瓦事故的分析及处理	何少润	陈志凌	(290)
关于水力发电机组状态检修的一些建议		李海红	(298)
机组转速升高率的公式推导及适用条件	蒋 琪 杨建东	詹佳佳	(301)
水电站不锈钢复合钢板焊接及耐腐蚀技术研究	万天明	赵显忠	(308)
水力发电企业状态检修探索		黄国祯	(313)
甘肃小峡水电站黑启动研究及现场试验		吉振伟	(318)
三峡电站 11~14 号机组定子磁化试验总结		郑少平	(322)
现代电机保护控制节能装置现状及发展趋势		李国岭	(329)
励磁过电压及保护措施的应用		金根明	(333)
漫湾发电厂计算机监控系统运行情况简介		马云华	(337)
失磁保护及失步保护整定计算中 x_{st} 参数的计算分析	赵 斌 姚晴林 郭宝甫	唐云龙	(343)
自适应相间电抗继电器	王善祥 仇正强 王 苏	朱声石	(348)
大型水轮发电机电气试验研究及相关规程讨论	范于军	莫文华	(351)
大型高精度复合钢板椭圆护角冷加工技术研究	梅 骏	王守运	(357)
高水头超大型偏心铰弧形闸门制造技术	刘灿学 邓大宏 梅 骏 闫玉梅	张美姣	(361)
渐变管制作技术	邓大宏 廖绪锋 邱凌霞	李 壮	(367)
水布垭放空洞超大型偏心铰弧形闸门及启闭机安装		曹 毅	(372)
水轮发电机启动调试试运行主要问题研究	莫文华	范于军	(380)
大峡水电站励磁系统的改造		赵新虎	(385)
GIS 高压开关局部放电声信号测试与特征提取研究	陈心欣 张 伟	洪玉萍	(388)
低水头电站流量在线监测新技术	刘秀良 徐春荣	刘永前	(392)
三峡左岸电站 VGS 水轮机基础环/座环现场加工	肖 汉 徐大桥	何念民	(397)
三峡左岸电站 VGS 机组导叶端面间隙调整		徐大桥	(405)
三峡 VGS 发电机组转子支架焊接施工控制	翦文斌	周思国	(408)
含沙水流运行条件下混流式水轮机的水力设计		端润生	(415)
三峡 VGS 发电机定子铁芯叠装技术		王启茂	(424)
三峡左岸电站 VGS 机组发电机定子下线		徐宗林	(430)

东风水电站期货电量优化研究初探	张湘君	周 琼	(445)
三峡左岸电站首批机组启动试运行	廖 立		(450)
ADB610D 钢的焊接性研究	肖可畏	黄 伟	(454)
一种用于抽水蓄能机组的调速器	刘昌玉	顾宏进	周志军
小浪底电厂应用自动选择机组同期模式			刘远进 (461)
的问题分析	张宏杰	张建生	石月春
陈栓领	李宪栋	贾春雷	(466)
浅谈小浪底水电厂压油装置的优化	张宏杰	刘定友	刘学歌
蔡 路			(469)
水力发电厂竞价上网发电报价决策支持系统的研究与实施	申晓留	周长玉	易 俗
魏 瞰			(471)
水轮发电机组恒前池水位控制系统的研究	余向阳	南海鹏	吴罗长
(476)			
集成智能功率柜的励磁系统研制与现场试验	王 伟	石 磊	马 齐
朱晓东			(484)
水轮发电机起励仿真研究	陈贤明	王 伟	吕宏水
刘国华	王 彤		(491)
天生桥一级水电站主要机械设备问题治理	李 璞		(498)
低比速转轮轴向水推力研究	戴勇峰	张克危	郑莉媛
(503)			
三峡左岸电站 ALSTOM 机组转子组装关键控制措施	牟官华		司永刚
(510)			
大型筒体的制作工艺及质量控制	楼飞民		(516)
黄河小浪底郑州集中控制系统的实现	杨叶平	袁 宏	董泽亮
(520)			
大型水轮机顶盖积水及排水状态监测与诊断分析	陈焱涛		李朝晖
(525)			
CMMS 框架下的水电厂最优维护信息系统	李朝晖	艾友忠	王 宏
毕亚雄			(531)
现代大型水电厂管理探索	黄国祯		(541)
差流动态追忆法的研究	毛乃虎	康 丰	唐治国
张澄宇			(546)
软件通信服务器及其在金银台水电站中的应用	陈 军	李书明	邓素碧
(550)			
水轮发电机定子安装运行的几个问题	雷江远		李建卫
(555)			
混合式水轮机主轴工作密封的研究与应用	王 雷		毛志浩
(559)			
水电工程项目合同管理系统的设计与实现	曲俊华		王 勇
(563)			
发电机空气间隙对横差电流的影响	叶 灵		(569)
大型抽水蓄能机组定子绝缘问题处理	李 宽		(574)
大型抽水蓄能机组对断路器失灵保护的要求	陈 莉		(578)
三峡梯级调度 AGC 的功能设计与实现	张新军	刘绍新	王桂平
张玉平			(582)
水轮发电机组低水头下振动分析	万 庆		张金星
(586)			
三峡梯级优化调度 DSS 研究及应用	李 晖	何 莉	张滔滔
唐绪峰			(590)
三峡电厂励磁软件结构框图及其特色分析	陈小明	胡先洪	章 俊
(596)			
马其顿科佳水电站的远程控制和调节	段振国	迪 曼	李建辉
张 捷	马 林		(606)
多进程技术在 H9000 V3.0 现地程序中的应用	张 捷		杨春霞
(612)			
马其顿科佳水电站计算机监控系统	段振国	李建辉	张 捷
迪 曼	马 林		(615)
刚果共和国英布鲁水电枢纽计算机监控系统	姚维达		(619)
水电厂实施状态监测的关键技术	郑松远		(623)
东风水电厂自动发电控制功能与实现	张玉平		杨叶平
(629)			
三峡梯级调度计算机监控系统综述	毛 江		张启明
(633)			
三峡工程泄洪闸门计算机监控系统	张润时		薛福文
(638)			
万安水电厂 3 号机组振动分析	徐擎天	陈垣熙	孙建平
吴道平			(644)
高压电力设备综合诊断管理系统研究	徐 澄		(648)
法国、挪威水电梯调管理经验借鉴	童 强	马月姣	鲁 铭
(652)			
三峡枢纽电力通信监控及综合网管系统的建设设想	谢定刚		(659)

三峡梯级调度自动化系统网络安全防护策略的实施与应用	张新军	周保红	(663)
三峡永久通信系统介绍		王华斌	(667)
三峡梯级水利枢纽围堰运行期发电决策支持	黄春雷	王玉华 陈忠贤	李厚俊 (671)
三峡—葛洲坝梯级水库运行调度		李学贵	(676)
关于变压器电压调整方式选择的探讨		黄 政	(681)
水电厂梯级调度中心 AGC 策略研究及实现	俞鸿飞	周桦旻 高伟波 黄 俊	吴夏军 (684)
水调自动化系统在乌江流域梯级联合优化调度中的应用		杜泽新	(689)
桐柏抽水蓄能电站 SFC 启动机组的自动控制	杨文道	郑 重	(693)
乌江流域梯级库群联合调度管理模式的探索		王安东	(698)
乌江流域水情自动测报系统通信方式优化研究		杜泽新	(702)
桐柏抽水蓄能电站机组控制单元介绍		郑 重	杨文道 (707)
GIS 操作产生的过电压对三峡左岸电站主变压器的影响		陈 辉	(711)
三峡左岸电站围堰发电期机组相对效率试验成果分析		叶青平	(715)
弹性金属塑料轴瓦在大型水轮发电机组上运行可靠性分析		王建忠	(720)
现代大型水电机组自动灭磁技术的创新发展	艾友忠	邵显钧	黄大可 (724)
导叶不同步装置和单元式继电器在抽水蓄能电站的应用		何少润	(733)
抽水蓄能机组总装、轴线调整、摆度标准确定及摆度定义研究		许义群	(739)
抽水蓄能电站的静止变频启动装置		杨仕莲	(746)
广州抽水蓄能电站进水球阀的安装与检修		吴邦庆	吴瑞清 (751)
一起典型的变压器铁芯故障		武发全	(755)
发电企业参与电力市场竞争的环境创立和竞争策略		刘 春	(758)
水电站引水压力钢管灌浆孔熔焊封堵焊裂纹的预防和处理	万天明	赵显忠	(764)
小峡水电站技术供水的特点	党存和	梁志旺	(767)
大峡水电站机组顶盖排水控制系统改造	关小刚	张东成	(771)
齿盘—残压双回路测频装置在乌江增容调速器上的运用		叶长红	(773)
乌江渡发电厂 3×210MW 机组推力外循环冷却系统改造		陈仕虎	(775)
乌江渡发电厂“黑启动”试验探讨	梁 卫	傅宝亮	刘帮鼎 (778)
乌江渡发电厂增容改造工程水轮发电机组尾水管改造	陈仕虎	申明光	(782)
乌江渡发电厂扩建、增容改造机组运行检修及技改经验		梁 卫	(786)
乌江渡发电厂增容改造水轮机运行工况初探	肖小川	陈仕虎	王安东 (790)
混流式水轮机振动分析与优化运行		冯顺田	(794)
三峡塔带机 PLC 故障诊断系统		洪 诚	(799)
THYRIPOL 励磁装置在水口电厂的应用		葛耿民	(804)
我国抽水蓄能电站建设及机组国产化进程		端润生	(809)
东风水电站险情预测及应急处理预案	王俊莉	高 英	(814)
凤滩扩机工程发电机—变压器组保护的设计	李 力	刘立红 袁志鹏	谢卓建 (818)
大型水轮发电机主保护定量化设计过程的合理简化	桂 林	王维俭 孙宇光	王祥珩 (826)
构皮滩 30t 缆索起重机的副车设计		陈 坚	(831)
一次主变压器重瓦斯保护动作的分析与处理		罗青海	(834)
线路短路冲击引起发电机励磁调节方式切换的故障分析	刘万平	郭爱军	(838)
从万安水电厂设备检修实践经验谈设备状态检修的可行性	陈垣熙	洪琚水	(842)
对一起发电机低频过励磁事故的分析	郭爱军	刘万平	洪琚水 (846)
水轮发电机组下导摆度超标原因分析及处理	邱茂生	陈垣熙	(849)

三峡水轮机高水头运行水力稳定性研究	朱耀泉 (854)
乌江流域梯级水电站水库联合优化调度探讨	郑惠清 高 英 (858)
乌江渡发电厂扩建、增容机组出现的问题及处理情况	梁 卫 (861)
大朝山水电站主变压器高压套管在线监测装置应用	候 华 周润良 (864)
弧门开度检测装置改造	文德合 (869)
我国水轮机几个问题的探讨	朱文杰 (872)
水轮机固定导叶和活动导叶后的卡门涡旋频率研究	高忠信 唐 澍 梁贺志 (875)
浅谈大坝应急预案应考虑的几个问题	赵 峰 (881)
近尾洲水电厂计算机监控装置的开发及改造	何亚文 郭 毅 (885)
三峡船闸自动化运行控制技术	段 波 朱海清 吴 斌 (890)
筒阀在小浪底电厂的应用情况分析	刘定友 肖 明 马新红 (895)
IEC995 规定的效率换算法及其在三峡水轮机上的应用	端润生 (901)
基于回路热管散热器的大功率整流装置研究	王 波 张 敬 周 宇 顾宏进 (907)
发电机注入式定子单相接地保护的研究	任 岩 张侃君 尹项根 (914)
长江三峡水利枢纽机电工程设计的技术进步	袁达夫 邵健雄 刘景旺 (920)
大型发电机组灭磁装置能容量的选择和仿真计算	黄冬华 王 川 (928)
东风水库汛限水位动态控制分析	王俊莉 高 英 (935)
天生桥一级电站水轮机转轮裂纹处理	李 璞 (940)
大型水轮发电机组励磁系统设计的新理念	李基成 (946)
三峡励磁系统交直流灭磁原理分析	陈小明 胡先洪 (959)
具有广域适应性的新型电力工程测试分析仪器研究	申 明 胡嘉纯 (964)
乐滩水电站船闸设计	麦建清 (968)
岩滩水电站扩建工程水轮机主要参数选择	聂启蓉 (975)
桥巩机组的选择及其制造难度分析	郑 彪 (979)
百色水电站水轮机主要参数与结构特点	徐秉均 (985)
乐滩水电站工程金属结构布置设计	宾仕勋 (988)
CAN 总线在励磁系统应用中抗干扰分析	张兴旺 程传玲 黄赋光 (994)
UNITROL 5000 励磁系统的实践与思考	熊 巍 许敬涛 郭子锐 (999)
励磁调节器的可靠性分配与设计	陈彦颖 许敬涛 (1008)
电力系统稳定器 PSS2A 模型研究	许敬涛 秦汉军 李孔潮 张兴旺 吴国兵 曹成军 (1013)
水电站计算机监控系统冗余配置结构探讨	陆劲松 夏建华 (1021)
电缆过热在线监测及预警系统在电厂的应用	魏德荣 秦一涛 张 弘 (1025)
HB-24 型六氟化硫断路器和 BA-24 型金属封闭 开关设备在水电站厂用电系统中的应用	虞宇飞 周丽臻 (1029)
高性能、高可靠的新型智能化万能式断路器	胡廷东 戴水东 方 祥 (1033)
基于改进 PSO 算法的三峡梯级优化调度	朱承军 周建中 杨俊杰 (1039)
抽水蓄能机组背靠背启动研究	吕宏水 冯 勇 朱晓东 曾继伦 邵宜祥 (1043)
抽水蓄能电站控制及自动化设备的特点及新技术的采用	崔继纯 陈 英 (1051)

利用 HVOF 对水轮机过流部件进行表面强化处理

艾友忠^{1,2} 卢进玉² 涂阳文²

(1 华中科技大学, 湖北武汉 430074; 2 中国长江电力股份有限公司, 湖北宜昌 443002)

【摘 要】我国是水轮机泥沙磨损最为突出和最为严重的国家, 尤其是黄河干流和长江上游干流水电站更为突出。多年来, 为了探索泥沙对水轮机的破坏规律, 研究如何减缓含沙水流对水轮机过流部件表面的破坏速度, 各种新技术、新材料、新工艺等得到了实验室和现场的验证。实践表明: 利用高速火焰喷涂技术对水轮机过流部件进行表面强化处理, 能将水轮发电机组的使用寿命有效地延长。

【关键词】水轮机 磨蚀 高速火焰喷涂 表面强化

1 引言

我国是水轮机泥沙磨损最为突出和最为严重的国家, 尤其是黄河干流和长江上游干流水电站更为突出。水轮机过流部件表面遭受磨蚀破坏后, 导致机组运行效率降低、年发电量减少、检修间隙缩短和检修费用增加。甚至还会造成机组等效强迫停运率增大, 降低机组的等效可用系数和运行调度灵活性。这些问题已成为当前水电生产中亟待解决的问题。由于不同流域的泥沙含量、粒径级配、沙粒形状、硬度和过机流速不同, 导致不同电站水轮机过流部件的破坏程度也不尽相同。多年来, 在探索水轮机过流部件表面的磨蚀机理和防护方式上作了很大的努力, 也获得了许多有价值的经验。在其他国家和地区也作了许多研究。比如瑞士 Sulzer Escher Wyss 应用一种等离子喷涂 SXH48 陶瓷层和高速火焰喷涂技术, 形成一些碳质金属层, 都获得很好的成功, 也有使用 PU755 和 PU741 聚氨脂强化表面护层获得成功的。

所以, 通过过流表面强化处理技术形成抗磨蚀涂层进行防护很有必要。由于涂层材料的不同以及形成涂层的手段不同, 效果也有很大的差异。目前, 利用火焰喷涂技术对水轮机过流部件进行表面强化处理的应用越来越受到国内外水轮机行业的欢迎, 应用于设计阶段和老水电机组改造中。

2 水轮机磨蚀机理分析

水轮机过流部件遭受磨蚀破坏机理主要是泥沙冲蚀磨损和空蚀破坏以及它们之间的联合作用。根据 L.Finnie 的微切削理论, 水轮机过流表面泥沙对金属材料的冲蚀量可由下式表示

$$V_d \approx \frac{cM^2}{p} f(\alpha) v^n \quad (1)$$

式中 V_d ——冲蚀量, kg/mm^2 ;
 M ——流动沙粒质量, kg ;
 α ——冲蚀角;
 v ——沙粒速度, m/s ;
 p ——金属材料的屈服应力。

上式表明, 水轮机过流表面材料所受到的冲蚀量与沙粒质量的平方以及与沙粒速度的 n 次方成正比, 并且还和沙粒相对金属表面的冲蚀角有关, 金属材料在低冲蚀角的冲蚀率达到峰值, 随冲蚀角的增大, 冲蚀率会逐渐下降。材料的耐冲蚀性能取决于材料的屈服应力, 因而可以推论材料的弹性模量越高, 材料的抗冲蚀性能越好^[2]。另外水轮机在运行中还经常发生空化现象, 导致水轮机过流部件的空蚀破坏。实验表明, 水柱冲击过流部件表面时, 接触冲击力由下式计算

$$T = \sqrt{\rho E E_1 / (E + E_1)} v \quad (2)$$

式中 T ——接触冲击力, N;

E_1 ——水流弹性模量;

ρ ——流体密度, kg/m^3 。

上式说明接触冲击力 T 与冲击速度 v 和过流部件材料有关。材料的抗空蚀性能与材料硬度成正比。

含沙水流中运转的水轮机一般情况下是在空蚀与泥沙磨损联合作用的破坏下, 二者相互促进加速了水轮机的破坏程度。当含沙水流通过水轮机时, 具有一定动能的沙粒若与水轮机表面发生碰撞就有可能产生磨损, 但并不是说含沙水流通过水轮机就一定产生磨损。由上述公式可知, 磨损的产生与沙粒的自身特性和水流的挟沙状况以及材料特性都有紧密的联系。只有满足了磨损的条件, 即对某种材料而言, 沙粒不但要具有一定的动能, 而且还要具有一定的冲角, 使沙粒的压入压强大于材料的弹性极限时才能发生。而某种因素的改变都将影响磨损的生成。如虽然水流的流速较大, 沙粒的动能较大, 但若沙粒的冲角很小, 压入压强小于材料的弹性极限, 就不会产生磨损。但若沙粒呈尖角形, 当尖角与材料接触时, 在同样的动能条件下, 压入能量都集中在尖角上, 使压入压强增高, 从而使磨损发生。对某种材料而言, 当沙粒粒径、冲角一定时, 存在一临界流速, 当水流速度大于该临界流速时发生磨损, 小于该临界流速时, 虽然沙粒不产生切削磨损, 但长时间作用会导致材料的疲劳破坏, 同样材料会发生磨损现象。由于目前我国水轮机大都在含沙流域运行, 而大量的磨损现象发生说明自然界水力环境的恶劣, 因此, 必须通过改善材料表面特性以达到抵抗泥沙磨损的破坏作用。这就要求在材料方面既要有很高的硬度抵抗泥沙磨损, 同时材料还要具备一定的韧性来达到抗空蚀的功效。

3 高速火焰与其他喷涂技术的特点比较

3.1 高速火焰 (HVOF) 喷涂技术

高速火焰喷涂 (HVOF) 是 20 世纪 80 年代出现的一种高能喷涂方法。它是以氧及某种燃气作热源, 通过高强度的燃烧使气体快速膨胀, 形成高压, 把喷涂材料以粉末状态注入高速喷射燃烧的火焰中, 燃烧产物在高压驱动下形成高速气流, 以两倍马赫以上的高速通过枪管冲击枪外。高速燃气一方面使粉末材料的颗粒达到半熔化状态, 另一方面又使粉末材料的颗粒加速运动, 将熔化后的粉末材料紧密均匀地附着在被喷涂物体的表面上, 与基材物理结合在一起。换一句话说, 就是利用高速火焰喷涂技术将专用的金属粉末沉积在水轮机过流部件表面上。而基材温度低于 150°C , 使基材不发生任何变形。HVOF 火焰温度适中, 通常在 3000°C 左右, 喷枪喷射火焰速度大于 2000m/s , 喷涂的粉末飞行速度可达 $300 \sim 600\text{m/s}$, 涂层致密, 孔隙率低 (气孔率可低于 1%), 喷涂温度低, 残余应力低, 涂层硬度高, Co-WC 涂层硬度 HV 可达 1300。涂层与基体的结合强度高, 对 Co 基合金粉末涂层来说, 可达到 70MPa 以上。涂层特性主要由粉末特性体现, 如抗磨、抗腐蚀等。

3.2 喷焊技术

喷焊技术的工艺与焊接工艺及效果相当, 它一般采用高放热材料 (含 Ni)。目前最常用的是 Ni-Cr-B-Si 粉末或在该材料中再加入 WC、 Cr_3C_2 等硬质材料组或粉末, 具体工艺是, 预热工件至 400°C 左右, 首先用喷枪将粉末喷在工件表面, 然后用乙炔火焰加热涂层至 1100°C 左右, 使涂层重熔, 与基材产生化学反应 (焊接) 溶解在一起, 形成新的涂层。

该技术的特点是: ①冶金结合强度高, 一般均高达 150MPa 以上; ②工件受热较大, 温度高达 1000°C 以上, 变形较大, 且很难控制。

3.3 等离子喷涂技术

在利用等离子工艺对水轮机进行喷涂方面, 目前也有一些应用。等离子喷涂是将金属粉末通过等离子焰流中心加热到熔化或半熔化状态, 随着焰流高速喷射并沉积到经预处理的工件表面上, 从而形成一种具有特殊性能的涂层。等离子喷涂陶瓷材料优点突出。

3.4 电弧喷涂技术

另一种水电站应用的喷涂方法是电弧喷涂, 电弧喷涂的最大特点是热效率高、生产效率高、操作简

单，生产成本低。与 HVOF 和等离子喷涂相比，存在涂层与基体结合强度低、可喷涂的抗磨蚀丝材有限、涂层孔隙率高的缺点。所以电弧喷涂仅适用于部件表面缺陷的修复，而不适合用于抗磨蚀破坏的表面防护。

高速火焰喷涂（HVOF）与等离子喷涂（APS）、喷焊（FS）和刷涂（BS）等工艺性能的差异见表 1。

表 1 不同喷涂工艺性能的差异

喷涂工艺	硬度 (HV)	结合强度 (MPa)	喷涂材料
HVOF	1000 ~ 1200	> 70	Cr - Ni 基合金粉末
HVOF	1100 ~ 1300	> 70	Co 基合金粉末
APS	900 ~ 1100	30 ~ 40	金属铬粉末
FS	600 ~ 700	> 100	自溶性 Cr - Ni 基粉末
BS	600 ~ 700	> 100	Co 基自溶性金属粉末

由以上所述不同喷涂技术的特点可见，由于水轮机抗磨蚀既要防止变形又不能承受高温，所以仅有高速火焰喷涂（HVOF）和喷焊技术可应用于水轮机磨蚀破坏领域。20 世纪 90 年代后期，开始使用喷焊技术对水轮机过流表面进行喷涂，但由于水轮机过流表面曲线的复杂性以及水轮机磨蚀破坏因素的多元性，给强化水轮机过流表面技术带来许多难题。虽取得了一定的效果，但由于水轮机叶型的复杂性以及工件厚大等特点，给叶片加热工艺带来很多困难，而且由于叶片应力分布情况很复杂，使得水轮机在经历了温度升降后叶片会发生变形。因此利用喷焊技术对水轮机（特别是大中型水轮机）进行喷涂还存在着许多无法克服的工艺困难。高速火焰喷涂（HVOF）技术的特点对于抵抗水轮机磨蚀破坏来说更为有利。其特长的是喷涂金属陶瓷粉，因其较高的喷射速度以及较低的火焰温度保证了粉末在喷涂中更少的氧化和失炭，从而使涂层有更高的硬度和更好的耐磨损性。因此，选用 HVOF 更适合对水轮机进行抗磨蚀处理。在具体喷涂过程中，针对不同型号、不同流域、不同工况的水轮机，要进行分析 and 喷涂试验对比，通过采用不同的喷涂材料和不同的喷涂工艺对过流表面进行保护，从而可达既节省开支又满足预期的保护效果。利用高速火焰喷涂（HVOF）技术以及专用的适合于水轮机抗磨蚀的粉末材料制作的抗磨蚀涂层近几年已在葛洲坝、青铜峡、刘家峡、三门峡等多家水电厂进行了应用，并取得了显著的效果。

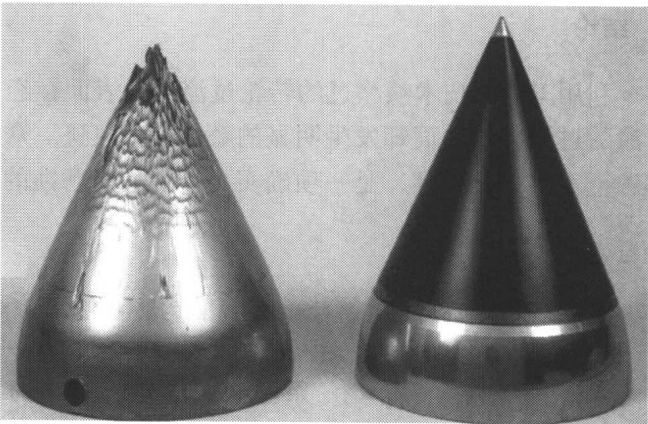


图 1 水轮机喷针修复前后情况



图 2 黄河上某低水头电站水轮机转轮室中环表面试喷情况

4 应用情况分析

图 1 中左图，是某高水头电站水轮机喷针的磨蚀情况；图一中右图，是对其进行修复后，采用 HVOF 技术进行了表面强化保护，使用寿命比以前有较大的延长。

图 2 是黄河上某低水头电站水轮机的转轮室中环，由于磨蚀较为严重，电站采用其他的防护措施后，效果不明显，而采用 HVOF 试验后的情况，防护效果较为有效，机组运行 3 年后，已涂

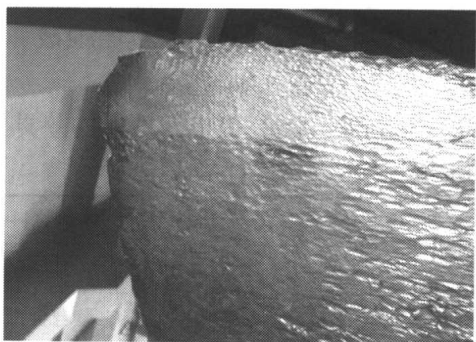


图3 黄河上某转桨式水轮机叶片的磨蚀情况

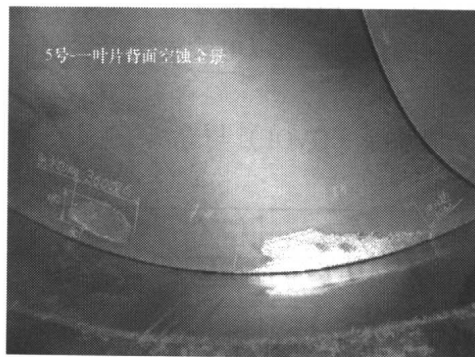


图4 利用 HVOF 修复处理，运行 15600h 后的情况

部位、比未涂部位高出 2mm 左右。

图3是黄河上某转桨式水轮机叶片的磨蚀情况。长期以来，新转轮投运以后，每年必须进行一次堆焊修复处理，运行3年后（约12000h），必须将转轮吊出进行机组扩大性检修。此时，由于转轮室和叶片外缘的磨蚀，使得机组的容积损失增大，效率下降15%以上。

图4是该电站利用HVOF技术对叶片进行喷涂保护和修复后，该叶片运行3年（约15600h）以后，仅仅只有局部出现了涂层的失效，保护效果显著。

5 结论

利用HVOF技术喷涂过的转轮过流部件表面在经过近两万多小时的运行后未发生任何损坏，而未经过喷涂的过流部件表面却发生明显的磨蚀破坏痕迹。众多的试验和实践都证明，利用HVOF对水轮机过流部件进行表面强化处理，是一项确实可行的预防磨蚀的高效技术措施。

参考文献

- [1] 卢进玉，符建平．水轮机过流部件表面的磨蚀保护．材料保护，1999（10B）
- [2] 张 菁，揭晓华．高速火焰喷涂技术及其应用．国外金属热处理，1998（2）
- [3] 庞佑霞，郭源君，刘厚才．水轮机过流部件磨蚀机理的研究．润滑与密封，2001（4）
- [4] L.Finnie, Some reflections on the past and future of erosion, Wear, 1995, 186~187: 1~10
- [5] K.K Sinha et al., Tool Alloy Steels, 1990, 24（2）: 443
- [6] 薛伟，陈昭运．耐泥沙磨蚀涂层研究．机械工程材料 第25卷（6）

作者简介



艾友忠，男，1959年生，华中科技大学水电工程与数字化学院，博士，教授级高工，一直从事水电站设备检修及技术管理工作。

洪江水电厂贯流式机组金属结构问题探讨

梁湘津

(湖南五凌公司洪江水力发电厂,长沙 410004)

【摘 要】水电机组的稳定运行是电网系统安全的保证。随着贯流式水轮发电机组设备健康状况越来越受到重视,该类型水力发电厂重要金属结构部件的缺陷处理工作要求也越来越高。本文总结了洪江水电厂在运行的三年多时间内针对几个重大金属结构问题的处理方案,希望能够给水电同行提供一定借鉴。

【关键词】贯流式 机组 金属结构问题 洪江水电厂 技术监督

1 前言

众所周知,贯流式水轮机具有单位过流量大、转速高、水轮机效率高的特点,其空化性能和运行稳定性也优于一般轴流式水轮机。贯流式水轮机是开发低水头水能资源的一种最经济、适宜的水轮机形式,具有资源利用充分、投资节省等的优势。

目前,我国对于大型贯流式水轮机技术研究相对比较滞后。虽然在机组水力设计上已不存在问题,但对于机组结构设计、制造与安装等方面的关键技术仍然有较大提升空间。特别是在贯流式机组的发电机、水轮机等部件金属结构支撑结构强度校核,机组运行后刚度及振动特性的评估、优化等方面,都缺乏专门的跟踪数据和研究论文。

2 洪江水电厂简介

洪江水电厂位于洪江区上游 4.5km 处,是沅水干流开发规划的重要梯级工程。洪江水电厂主体工程 1998 年 3 月 3 日开工,当年实现截流,2002 年 8 月开始机电设备安装,2003 年 2 月 20 日首台机并网发电,当年实现 5 台机组全部投产,创造了年投产同类机组数量的全国记录。

洪江水电厂以发电为主,兼有航运、灌溉等综合效益。坝址以上流域面积 35500km²,多年平均流量 705m³/s,水库正常蓄水位 190.00m,相应库容 1.95 亿 m³。电厂现装有 6 台 4.5 万 kW 灯泡式贯流式机组,机组设计水头 20.50m,是目前我国单机容量最大、水头最高的灯泡贯流式水轮发电机组。设计多年平均发电量 9.7 亿 kWh,年利用小时 4311h。水电机组按照国标招标制采购,主要由日本 HITACHI 公司、法国 ALSTOM 公司及中国哈尔滨电机有限责任公司等厂家提供。

3 金属结构检查

洪江水电厂领导和技术人员对于机组金属结构状况十分重视,对重要设备和关键部件定期进行检查和维护。在五强电力工程公司和湖南省电力试验研究所的大力配合下,洪江水电厂技术人员通过运用无损检测技术,力图及时准确地发现和预测机组金结缺陷,减少安全隐患。具体检测方法和内容见表 1。

洪江水电厂机组经过三年多的运行,各个金属结构部件的安全问题开始显现。电厂技术人员发现的金属结构缺陷主要有:发电机转子支臂裂纹、机

表 1 洪江水电厂金结检查项目

序号	部件名称	检测方法和内容
1	发电机部分	发电机主轴超声波探伤
		发电机轮臂磁粉探伤
		发电机电磁极配重块宏观检查
2	螺栓件	转轮联轴螺栓超声波探伤
3	水轮机	导叶宏观检查和着色探伤
		管型座支撑焊缝宏观检查和着色探伤
		排水环焊缝宏观检查和着色探伤
		水轮机叶片宏观检查和着色探伤
		配水环焊缝宏观检查
		导叶操作机构宏观检查和着色探伤
		轮叶操作机构宏观检查和着色探伤
		尾水道焊缝宏观检查和着色探伤

组桨叶和轮毂空蚀、桨叶操作连接螺栓断裂和转轮室筋板裂纹等。洪江水电厂技术人员针对这四个比较重大的金属结构问题开展攻关，顺利地解决了面临的难题，最大程度上缓和了金属结构部件缺陷的扩展。

4 转子支臂裂纹处理

2005 年 3 月份，由湖南电力试验研究院对洪江水电厂 4 号机组转子支臂进行探伤检查。专业人员作好现场保护工作并清理油漆，从焊缝表面看焊缝表面质量良好，按有关要求打磨焊缝作到表面光滑过渡。接下来，技术人员对支架斜筋与轮毂之间的 K 形坡口、补强角焊缝进行 MT 探伤，发现多处裂纹。为确认结果，技术人员又进行 UT、MT 探伤，复查全部大小斜筋与中心体间的焊缝。

MT 探伤检查结果显示：转子支臂上、下游两侧裂纹总数为 154 处，合计长度为 14.6m。其中上游侧筋板发现裂纹共 56 处，有 5 处整条焊缝存在裂纹，裂纹总长度为 9.86m，一块筋板上裂纹最多达 12 条，最大深度达 18mm。下游侧筋板发现裂纹共 97 处，全部为断续裂纹，裂纹总长度为 4.685m，裂纹几乎都发生在中心体熔合线处。MT 探伤检查标准符合 JB4730。

洪江水电厂技术人员针对该现象迅速作出反映，对 1~6 号发电机转子支臂进行抽查，探伤结果显示支臂焊接熔合面存在多处咬边现象，2~5 号机组转子支臂筋板均有大量表层裂纹，裂纹呈断续状分布。与以前洪江水电厂机组转子支臂裂纹检查结果相比，这次裂纹有了新的发展，44 块大小斜筋板与中心体间焊缝裂纹都有本质上的延伸，如主筋板的大小斜加强筋板以及磁轭中心体间焊缝裂纹都有扩展的迹象。

电厂专业人员对转子支臂裂纹处理已经有一套成熟的技术方案，对表面裂纹超标的筋板按照挖补、清根、焊接和检验的顺序进行处理，在此重点介绍裂纹补焊工艺。

焊接前清理裂纹处表面，去除所有对焊接质量有影响的油、水、锈等有害杂质。先定点测量并记录转子支架磁极与定子间的气隙值，并确定其起始磁极的编号、同时做出标记。开焊前，在转子支架磁极上下表面各对称安装 4 块百分表，在转子支架磁极外表面径向上下端各安装 4 块百分表，在集电环径向和制动环端面各安装 2 块百分表，监测焊接过程中和焊接后支架变形趋势及相对的变形量，并做记录。焊接过程中根据变形情况调整补焊顺序。

焊接方法：对原始焊缝咬边、裂纹缺陷部位采用熔化极气体保护焊、钨极氩弧焊和手工电弧焊进行补焊，焊接有关工艺参数见表 2。

表 2
 焊接工艺参数

工艺参数 \ 焊接方法	熔化极气体保护焊	手工电弧焊	钨极氩弧焊
保护气体	78% Ar + 22% CO ₂	无	100% Ar
预热温度（℃）	100 ~ 120	100 ~ 120	100 ~ 120
层间温度（℃）	250 以下	250 以下	
电源极性	直流反接	直流反接	直流正接
焊接电流（A）	90 ~ 280	80 ~ 150	90 ~ 130
焊接电压（V）	22 ~ 32	22 ~ 28	18 ~ 22
焊接速度（mm/min）	150 ~ 450	60 ~ 200	
焊接位置	1G \ 2G \ 3G \ 1F \ 2F	1G \ 2G \ 3G \ 1F \ 2F	1F \ 2F

焊接前，焊条应按焊条说明书要求的加热温度和时间进行烘干。烘干后的焊条存放在 110~120℃的保温箱中存放，焊接时，使用焊条保温筒领取焊条，随用随取。对 3 层以上完成的修补焊缝，除打底层外，包括表层焊道在内均进行锤击，锤击后的表面质量以焊缝表面产生明显的屈服为合格。焊接时层与层之间的焊接接头部位应错开。接头处在进行下一段焊接前，采用砂轮机进行打磨，同时清除焊缝附近的焊接飞溅物。对较大的缺陷，应对称交替焊接。焊后 24h 对修补区域进行 UT/MT 探伤检查。

洪江水电厂机组在转子支臂裂纹处理以后运行正常。电厂技术人员密切关注裂纹的发展，定期对转子