

中国水力发电工程学会水力机械专业委员会  
中国电机工程学会水电设备专业委员会 编  
中国动力工程学会水轮机专业委员会

# 水电设备的研究与实践

—— 第十七次中国水电设备  
学术讨论会论文集

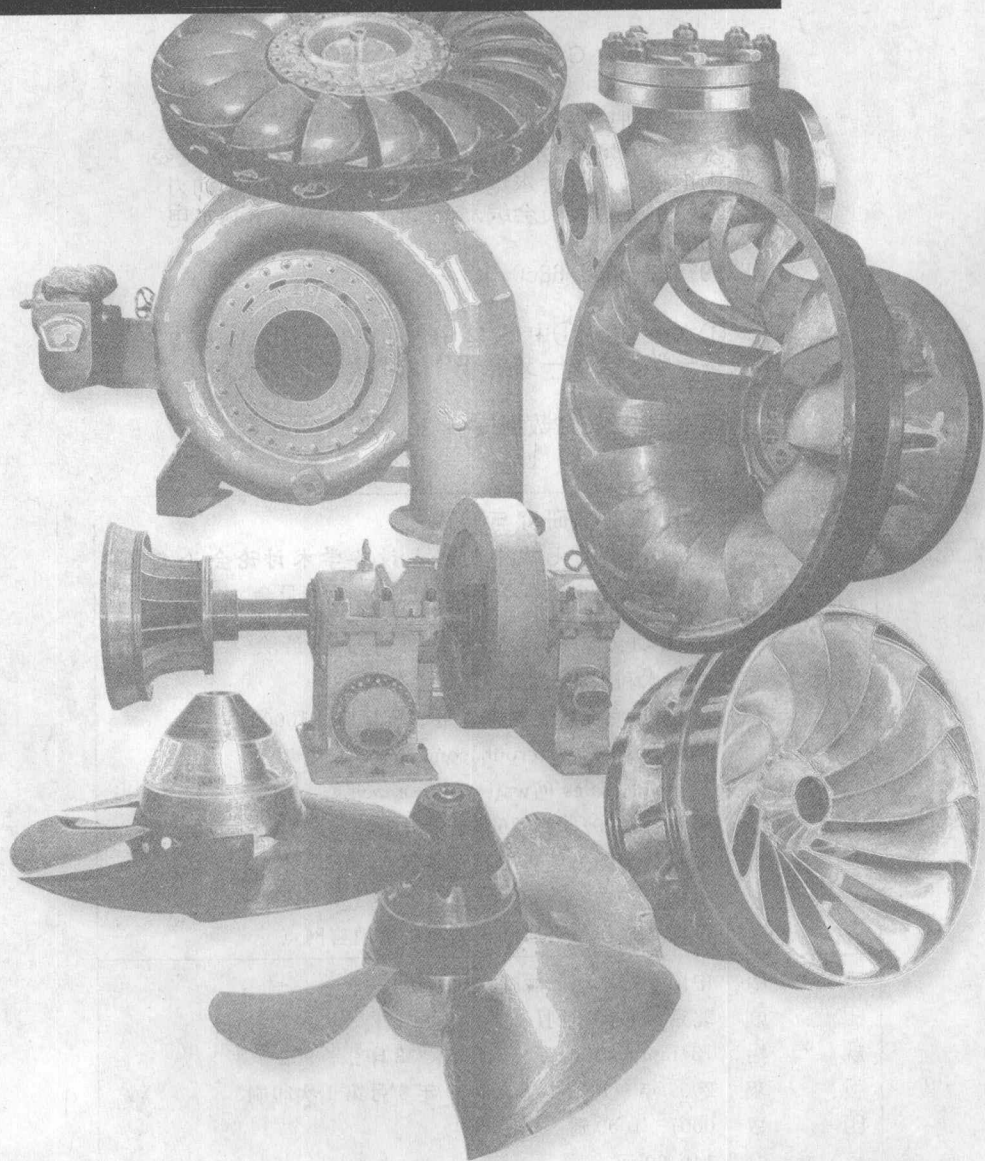


中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

中国水力发电工程学会水力机械专业委员会  
中国电机工程学会水电设备专业委员会 编  
中国动力工程学会水轮机专业委员会

# 水电设备的研究与实践

—— 第十七次中国水电设备  
学术讨论会论文集



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

### 图书在版编目 (C I P) 数据

水电设备的研究与实践 : 第十七次中国水电设备学术讨论会论文集 / 中国水力发电工程学会水力机械专业委员会, 中国电机工程学会水电设备专业委员会, 中国动力工程学会水轮机专业委员会编. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2009. 9

ISBN 978-7-5084-6860-0

I. ①水… II. ①中… ②中… ③中… III. ①水力发电站—设备—学术会议—文集 IV. ①TV73-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第174300号

|      |                                                                                                                                                                                                                    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 水电设备的研究与实践<br>——第十七次中国水电设备学术讨论会论文集                                                                                                                                                                                 |
| 作 者  | 中国水力发电工程学会水力机械专业委员会<br>中国电机工程学会水电设备专业委员会 编<br>中国动力工程学会水轮机专业委员会                                                                                                                                                     |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010) 68367658 (营销中心) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心 (零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643<br>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  | 北京市兴怀印刷厂                                                                                                                                                                                                           |
| 规 格  | 184mm×260mm 16开本 38印张 901千字                                                                                                                                                                                        |
| 版 次  | 2009年9月第1版 2009年9月第1次印刷                                                                                                                                                                                            |
| 印 数  | 0001—1000册                                                                                                                                                                                                         |
| 定 价  | 140.00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

## 本书编写机构组织委员会

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 主 任 | 赵 琨 |     |     |     |     |
| 副主任 | 唐 澍 | 吴伟章 | 陶星明 | 贺建华 | 黄 凌 |
|     | 胡伟明 | 石清华 | 张 强 | 孙 毅 |     |
| 委 员 | 孙殿湖 | 付元初 | 游 超 | 孔昭年 | 游赞培 |
|     | 曾镇铃 | 蒋登云 | 陈顺义 | 刘景旺 |     |

## 学 术 委 员 会

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 主 任 | 杨建东 |     |     |     |     |
| 副主任 | 曹树良 | 陆 力 | 罗兴铎 | 郑 源 | 戴 江 |
|     | 王泉龙 | 尹国军 | 付国锋 | 苑连军 |     |
| 委 员 | 吴新润 | 刘光宁 | 王正伟 | 马振岳 | 孙建平 |
|     | 陶喜群 | 何国任 | 李定中 | 江泽沐 | 徐正镐 |
|     | 田树棠 | 王希成 | 苟东明 | 李月彬 | 李胜兵 |
|     | 王建华 | 陈 东 |     |     |     |

## 编 辑 委 员 会

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 主 任 | 戴康俊 |     |     |     |     |
| 副主任 | 徐洪泉 | 覃大清 |     |     |     |
| 委 员 | 涂东花 | 潘罗平 | 刘诗琪 | 李修树 | 张海平 |

能源，特别是清洁的可再生能源是当今国际社会的一个热门话题，各国政府正在努力扩大可再生能源的发展和利用，以减少对化石能源的依赖，减少碳排放。水电作为清洁的可再生能源，与其他清洁能源相比，具有投资少、电能质量稳定和具备快速反应能力等优点。我国水能资源理论蕴藏量居世界第一，水力发电约占我国总发电量的 1/4。如何合理利用水能资源，提高水能资源利用效率，改善水力发电设备性能，是我国政府部门、水电工程设计企业、水电科研单位、水电设备制造行业共同关注的重要问题。

新中国成立以来，尤其是改革开放以后，我国的水电事业日新月异，取得了举世瞩目的伟大成绩。随着我国一大批大型、特大型水电工程的建设并竣工，我国水电总装机容量已位居世界第一。与此同时，我国水电设备技术依托国家重大工程项目，以强大的市场需求吸引国际一流制造商，在采购先进设备的同时，引进关键技术加以消化、吸收和再创新，使我国水电设备的设计、制造、安装和运行水平有了明显进步，实现了较大的飞跃。我国企业先后成功制造了一大批单机容量 30 万 kW、40 万 kW、55 万 kW 和 70 万 kW 的水电机组并顺利投入运行。今后一段时期内，为满足我国水电工程建设需要，国内企业制造的水电机组单机容量正向着 80 万 kW 甚至有可能是 100 万 kW 等级进军。我国水电设备制造技术日臻完善，形成了有国际竞争力的水电设备制造能力，水电工程的规划、设计、施工、运行管理也已形成了完整的体系。

我国水能资源十分丰富，但与发达国家相比，目前开发程度还比较低，开发利用潜力很大。随着我国经济持续快速发展，能源需求必将不断增长，继续大力发展水电是满足我国能源需求的重要措施。中国水电事业的飞速发展，给我们带来了许多新的机遇，同时也面临着许多挑战，需要我们不断地

去探索、创新、总结和交流。中国水力发电工程学会水力机械专业委员会、中国电机工程学会水电设备专业委员会和中国动力工程学会水轮机专业委员会联合举办每两年一次的中国水电设备学术讨论会，给广大科研设计人员和工程技术人员提供一个跨学会、跨行业、跨部门的全国性学术交流平台，广泛探讨和交流我国水电设备科研、设计、制造、安装和运行管理的新技术、新经验和新成果，并将其汇编成册，与广大水电设备工作者共享，以利于促进我国水电设备技术水平进一步提高。

水电是清洁的可再生能源，水电开发前景光明，任重道远，我们要以科学发展观为指导，把握好发展机遇，开拓进取，为促进水电建设的可持续发展作出积极的贡献。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王觉' (Wang Jue), written in a cursive style.

2009年9月

## 前 言

---

第十七届中国水电设备学术讨论会将于2009年10月在浙江省淳安县千岛湖召开。会议由中国水力发电工程学会水力机械专业委员会、中国电机工程学会水电设备专业委员会、中国动力工程学会水轮机专业委员会联合主办,浙江富春江水电设备股份有限公司协办。为了及时了解和掌握水电设备技术发展的现状,总结和借鉴水电机组科研、设计、制造、安装、运行和管理的经验,主办单位汇编出版本文集以搭建一个学术交流平台。

会议征文共收到稿件100余篇,经专家审核本文集共收录93篇论文,汇聚了广大设计人员和工程技术人员的研究和实践成果,根据内容分为9部分:设计选型、流动分析、稳定运行、结构设计、空蚀与磨蚀、试验研究、电气及调速器、安装与运行、其他。我们希望本文集能够给水电设备工作者提供有益的帮助和借鉴,以促进我国水电设备技术水平进一步提高。

经过3个专委会以及水力机械专业委员会信息网的通力合作,在论文作者和审稿专家的积极支持以及会议协办单位的鼎力相助下,本文集得以顺利出版。在此,我们谨向为本文集的出版提供过指导、支持和帮助的单位、专家以及各位作者表示深深的谢意,同时感谢出版社编审人员的辛勤劳动。

由于编写时间仓促,水平和经验有限,错误和不当之处,敬请各位读者批评指正!

编 者

2009年9月

# 目 录

## 序 前 言

### 一、设 计 选 型

|                                                                                        |                     |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----|
| 水轮机的特征水头问题·····                                                                        | 刘光宁                 | 3   |
| 银盘水电站大型轴流机组·····                                                                       | 季定泉 孟利平 杨小松         | 8   |
| 大型潮汐电站设计综述·····                                                                        | 张延锋 段宏江 高 敏         | 13  |
| 梨园水电站水轮机参数选择·····                                                                      | 杨加明 朱惠君 曾镇铃         | 22  |
| 运用知识经济观念指导水机设计优化·····                                                                  | 田树棠 段宏江 刘国峰         | 34  |
| 大型抽水蓄能水电站“四机两变一洞式”地下厂房机电设备<br>布置研究与应用·····                                             | 万凤霞 苟东明 蒋一峰 张玉鑫 王 瑶 | 40  |
| 董箐水电站高尾水变幅水轮机选型设计·····                                                                 | 赵明琴 李月彬             | 44  |
| 水轮发电机通风系统的网络计算·····                                                                    | 王 铭                 | 50  |
| 潘口水电站水轮发电机设计·····                                                                      | 刘元涛 黄剑奎 刘 玲         | 57  |
| 可调可逆式水泵水轮机组设计及抽水蓄能水电站新近成果<br>····· Jean - Bernard HOUDEL INE Daniel ROULET Thomas KUNZ | 刘 杰                 | 66  |
| ALSTOM 筒阀技术<br>····· 杨伟华 Jacques BREMOND Gerard VUILLEROD                              | 苗 凯                 | 76  |
| 小型水电站推广高性能水轮机转轮的探讨·····                                                                | 乌晓明                 | 82  |
| 清水塘水电站灯泡贯流式水轮机设计特点·····                                                                | 陈美娟 陈梁年             | 88  |
| 江坪河水电站水轮机参数选择·····                                                                     | 喻 忻 刘 旗             | 96  |
| 乡城水电站技术供水方式的选择·····                                                                    | 张 鹏                 | 106 |
| 舟坝水电站模型水轮机尾水管压力脉动试验研究·····                                                             | 刘光宁 覃大清 魏显柱         | 111 |

### 二、流 动 分 析

|                                                     |                 |     |
|-----------------------------------------------------|-----------------|-----|
| 水轮机内部流动数值模拟新进展·····                                 | 桂中华 潘罗平 张 浩     | 121 |
| 水轮机流道近壁层观察和试验研究·····                                | 姚启鹏             | 126 |
| 混流式水泵水轮机驼峰区数值模拟及分析<br>····· 王焕茂 吴 钢 吴伟章 魏显著 陈元林 黎 辉 |                 | 132 |
| 基于木模图的混流式转轮叶片三维建模·····                              | 邓 杰 陈 锐         | 141 |
| 基于并行遗传算法求解可逆式转轮双向流场·····                            | 李凤超 樊红刚 陈乃祥     | 149 |
| 水轮机叶片背面脱流 CFD 分析 ·····                              | 王洪杰 魏显著 张 勇 卢德平 | 155 |

|                        |                     |     |
|------------------------|---------------------|-----|
| 高落差 5 叶片贯流式水轮机内部流动数值解析 | 赵志强 章焕能 韩凤琴 久保田 乔   | 162 |
| 混流式水轮机甩负荷暂态过程的三维数值计算   | 李金伟 于纪幸 吴玉林 任绍成 姜明利 | 170 |
| 离心泵叶轮设计与流动分析           | 曹树良 谭 磊 桂绍波         | 175 |

### 三、稳 定 运 行

|                                    |             |     |
|------------------------------------|-------------|-----|
| 拉西瓦水电站巨型水轮发电机组低水头提前发电关键技术研究 and 实践 | 苑连军 刘慧凤     | 185 |
| 拉西瓦水电站低水头提前发电技术研究                  | 杨新光 田树棠 刘慧凤 | 191 |
| 利用动平衡试验解决龙滩水电站 2 号机组振动摆度偏大的问题      | 黄素满 曾艳梅     | 202 |
| Rudbar 水电站水力过渡过程分析研究               | 曾艳梅 黄素满 喻 忻 | 209 |
| 考虑不平衡电磁拉力的偏心转子非线性振动分析              | 马震岳 宋志强     | 216 |

### 四、结 构 设 计

|                                               |                 |     |
|-----------------------------------------------|-----------------|-----|
| 水轮机桨叶的电—机操作机构                                 |                 |     |
| ..... 周泰经 吴应文 饶培棠 徐良汉 吕 平 王福海 杨翠花 周汉城 魏守平 熊伍华 |                 | 227 |
| 大型水轮发电机推力轴承设计                                 | 武中德 张 宏         | 230 |
| 弹性金属塑料瓦的更新换代与应用                               | 桂世华             | 236 |
| 清水塘水电站发电机结构设计                                 | 董彩新 吴金水         | 241 |
| 低转速大容量灯泡贯流式水轮发电机电磁设计                          | 吴金水 李 娜         | 247 |
| 大型锻焊厚壁轴研制成功——水电大型轴锻件走出瓶颈                      | 王 鉴             | 251 |
| 弹性油箱刚强度有限元分析                                  | 陈志祥 严锦丽         | 255 |
| 固定导叶流固耦合模态分析                                  | 严锦丽 邵 明         | 260 |
| 考虑轴承刚度的导轴承载荷分配                                | 黄亿良 陈志祥         | 265 |
| 立式水轮发电机导轴承设计                                  | 方静辉             | 268 |
| 无损检测技术在水轮机转轮制造中的重要性                           | 李海玲 于纪幸 任绍成 姜明利 | 271 |
| 尾水管扩散段长度及出口宽度对其回能系数的影响                        |                 |     |
| ..... 陈 柳 于纪幸 姜明利 任绍成                         |                 | 275 |
| 1000MW 水轮发电机电磁设计探讨                            | 陈锡芳             | 281 |
| 灯泡贯流机组转子支架优化设计研究                              | 罗永要 王正伟         | 290 |
| 全贯流式水轮机的设计                                    | 汤毅强 汤华诺         | 295 |
| 国产化高压电机单只 VPI 定子线棒绝缘系统开发与研究                   |                 |     |
| ..... 毛继业 远 藤 安 弘 李建英 张 桦                     |                 | 299 |

### 五、空 蚀 与 磨 损

|                  |              |     |
|------------------|--------------|-----|
| 吐木秀克水电站水轮机泥沙磨损研究 | 上官永红 杨子刚 陈立春 | 315 |
|------------------|--------------|-----|

|                                 |                 |     |
|---------------------------------|-----------------|-----|
| 溪洛渡水电站水轮机导叶区流动分析及泥沙磨损预估·····    | 高忠信 唐 澍         | 320 |
| 混流式水轮机导水机构的磨损特点与抗磨防护·····       | 余江成             | 328 |
| 多泥沙水电站水轮机主轴密封·····              | 周庆大             | 337 |
| 基于固液两相流数值模拟的混流式水轮机磨损预估<br>····· | 彭光杰 李明安 孔德铭 王正伟 | 341 |
| 水泵水轮机空蚀磨损调查·····                | 陈顺义 刘诗琪         | 348 |

## 六、试 验 研 究

|                                      |                         |     |
|--------------------------------------|-------------------------|-----|
| 黑麋峰水电站水泵水轮机模型验收试验及主要性能分析<br>·····    | 郑建兴 张俊芝 曾再祥 曾维才 黄金树     | 355 |
| 水轮机模型试验技术的进展·····                    | 赵 越 赵英男 赵景芬             | 362 |
| 阿海水电站水轮机模型验收试验·····                  | 曾镇铃                     | 369 |
| 基于 LabVIEW 的水力机械模型性能测试系统<br>·····    | 孟晓超 张建光 张海平 徐国珍 陈 莹 马兵全 | 374 |
| 模型水轮机力矩测量系统的测试研究<br>·····            | 张建光 孟晓超 张海平 徐国珍 马兵全 陈 莹 | 379 |
| 混流式水轮机空化监测研究·····                    | 孙建平                     | 383 |
| 新疆下坂地水电站水轮机模型开发研究·····               | 陈 锐 彭忠年 田姪娟 薛 鹏         | 388 |
| 幅相影响系数法在旋转机械动平衡中的应用·····             | 唐拥军 潘罗平 李立罡             | 393 |
| 流速仪法在伊朗莫拉萨得拉水电站机组绝对效率测量中的应用<br>····· | 唐拥军 潘罗平 张 飞             | 399 |
| 抽水蓄能水电站机组压水供气系统研究试验·····             | 王小军 方 杰 孙洁民             | 405 |
| 洪江水电站灯泡贯流式水轮机模型试验·····               | 黄金树                     | 411 |
| 亭子口水电站水轮机模型验收试验分析·····               | 田子勤                     | 416 |
| 清水塘水电站水轮机过渡过程试验研究·····               | 阎宗国 彭光杰 王正伟             | 422 |

## 七、电 气 及 调 速 器

|                                                         |                  |     |
|---------------------------------------------------------|------------------|-----|
| 非线性转子—轴承系统动力学的研究现状与展望·····                              | 马震岳 张雷克          | 429 |
| 浅析 EXC9000 型励磁调节器在白山水电站中的应用 ·····                       | 王则英 喻 忻          | 436 |
| 灯泡贯流机组机械液压超速保护技术特点·····                                 | 白素杰 陈燕新          | 441 |
| 龙滩水电站计算机监控系统现地控制单元 LCU 功能实现<br>·····                    | 李镇江 赵英宏 吴丹丹      | 447 |
| 基于虚拟仪器的水力机械数据采集系统的开发与实现·····                            | 何志锋 彭伊丽 孙建平      | 454 |
| 500kV 气体绝缘金属封闭输电线路 (GIL) 技术研究及其在张河湾抽水蓄能水电站的应用<br>·····  | 刘长武 万凤霞 苟东明 欧阳明鉴 | 459 |
| 拉西瓦水电站 800kV 气体绝缘金属封闭输电线路 (GIL) 在高垂直竖井内起吊及安装方法<br>····· | 杨新光 刘慧凤 张东胜      | 464 |

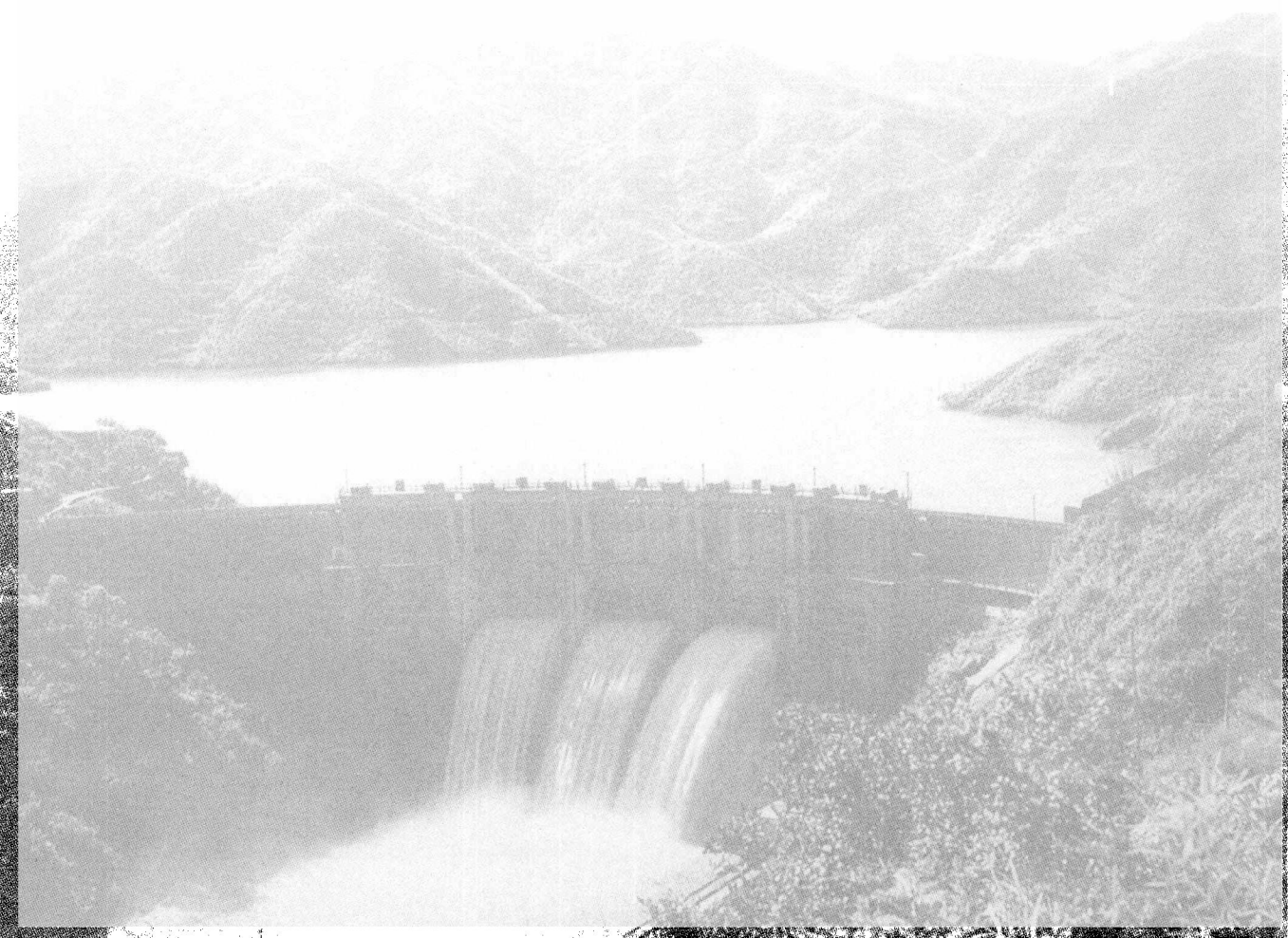
## 八、安 装 与 运 行

|                                      |     |     |     |     |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| 拉西瓦水电站水轮机转轮现场制造及质量控制·····            | 张东胜 | 宿国祯 | 宿亮登 | 473 |
| 大峡水电站技术供水系统改造·····                   | 陶建民 | 刘周歧 |     | 484 |
| 双线圈双稳态控制阀在龙滩电厂中的应用及改造·····           | 刘 健 | 黄 懿 |     | 491 |
| 水电机组故障诊断技术的发展现状与展望<br>·····          | 潘罗平 | 周 叶 | 唐 澍 | 496 |
| 红山嘴三级水电站枯水期运行问题的解决方案<br>·····        | 彭忠年 | 陈 锐 | 田娅娟 | 507 |
| 三峡水利工程左岸电厂辅机管道安装支架系统简介·····          | 朱旭东 |     |     | 511 |
| 水电机组故障智能诊断研究综述·····                  | 葛新峰 | 徐广文 | 周 叶 | 519 |
| 王甫洲水电站拦污栅断裂分析与处理·····                | 郑玉民 | 钟 山 | 周海波 | 525 |
| 大型减压调流阀在伊朗 Taleghan 水利枢纽工程中的应用 ····· | 马国强 |     |     | 531 |
| 高水头、大容量灯泡式水轮机运行存在问题及对策·····          | 刘洪成 |     |     | 536 |
| 黄河班多水电站事故油泵替代事故压力油罐浅析·····           | 张军智 | 张 振 |     | 540 |

## 九、其 他

|                                       |     |     |     |     |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| 气垫式调压室供气供水设备选择原则·····                 | 蒋登云 | 郭筱蓉 | 刘 丁 | 545 |
| 三峡升船机运动仿真与可视化模拟·····                  | 邓 杰 | 唐 澍 |     | 551 |
| 东方电机水力开发技术的进步·····                    | 石清华 |     |     | 557 |
| 反击式水轮机空蚀评定国家标准的修订·····                | 陶喜群 |     |     | 562 |
| 基于 MATLAB 的水轮机选型设计·····               | 刘生国 |     |     | 568 |
| 越南宣光水电站机电设备编码准则·····                  | 张军智 | 刘健伟 |     | 572 |
| 浅谈越南 SONLA 水电站机电设备成套投标及合同执行·····      | 张 雷 |     |     | 578 |
| 市政供水系统中负压消除罐的作用及分析·····               | 刘 旗 | 王则英 | 杨 辉 | 581 |
| 浅析水电站建筑节能及合理划分空调分区对系统运行能耗的影响<br>····· | 李 杰 | 刘句良 | 杨兴华 | 584 |
| 紫坪铺水电站机组自流减压技术供水系统减压阀的改造<br>·····     | 李兴全 | 虎 勇 |     | 589 |

# 一、设计选型





# 水轮机的特征水头问题

刘光宁

(哈尔滨大电机研究所 黑龙江 哈尔滨 150040)

**【摘 要】** 水轮机选型时,要考虑几个特征水头的问题,它们是:水头变幅  $(H_{\max} - H_{\min}) / H_0$ 、最大水头与最小水头的比值  $H_{\max} / H_{\min}$ 、最大水头与设计水头的比值  $H_{\max} / H_0$ 、最小水头与设计水头的比值  $H_{\min} / H_0$ 、最大水头与额定水头的比值  $H_{\max} / H_r$ 。对这些特征水头处置不当,往往会造成机组不能安全稳定运行。

**【关键词】** 水轮机;特征水头;稳定运行

## 1 水轮机特征水头

### 1.1 水头变幅 $(H_{\max} - H_{\min}) / H_0$

水轮机运行的水头变幅由水利工程综合利用的要求确定。通常,由于防洪排沙的需要,汛期必须降低水库水位运行的水电站,其水头变幅都较大。水头变幅用  $(H_{\max} - H_{\min}) / H_0$  表示,一般工程设计要求混流式水轮机的水头变幅不超过 30%~40%。国内外一些电站水轮机的水头变幅排序情况见表 1。

表 1 水头变幅  $(H_{\max} - H_{\min}) / H_0$

| 序号 | 水电站名称     | 最大水头<br>$H_{\max}$<br>(m) | 设计水头<br>$H_0$<br>(m) | 额定水头<br>$H_r$<br>(m) | 最小水头<br>$H_{\min}$<br>(m) | 水头变幅<br>$(H_{\max} - H_{\min}) / H_0$<br>(%) |
|----|-----------|---------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------------------------|
| 1  | 潘家口常规机组   | 85                        | 61.735               | 63.5                 | 36                        | 79.37                                        |
| 2  | 小浪底       | 141                       | 110                  | 112                  | 68                        | 66.4                                         |
| 3  | 岩滩        | 68.5                      | 59.75                | 59.4                 | 37                        | 52.7                                         |
| 4  | 三峡(围堰发电期) | 113                       | 108.4                | 80.6                 | 56                        | 52.6                                         |
| 5  | 天生桥 I 级   | 143                       | 119.9                | 111                  | 83                        | 50.0                                         |
| 6  | 五强溪       | 60.1                      | 49.5                 | 44.5                 | 36.2                      | 48.3                                         |
| 7  | 三峡(后期)    | 113                       | 108.4                | 80.6                 | 71                        | 38.7                                         |
| 8  | 江垭        | 109.5                     | 101.15               | 80                   | 62.1                      | 46.9                                         |
| 9  | 柘林        | 43.9                      | 38.64                | 35.5                 | 26.4                      | 45.3                                         |

续表

| 序号 | 水电站名称        | 最大水头<br>$H_{\max}$<br>(m) | 设计水头<br>$H_0$<br>(m) | 额定水头<br>$H_r$<br>(m) | 最小水头<br>$H_{\min}$<br>(m) | 水头变幅<br>$(H_{\max} - H_{\min}) / H_0$<br>(%) |
|----|--------------|---------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------------------------|
| 10 | 大朝山          | 85.63                     | 80                   | 72.5                 | 53.02                     | 40.8                                         |
| 11 | 大古力第Ⅲ级       | 108.2                     | 93                   | 86.9                 | 67                        | 44.3                                         |
| 12 | 万家寨 (ALSTOM) | 80                        | 67.77                | 68                   | 50                        | 44.3                                         |
| 13 | 刘家峡          | 114                       | 102.2                | 100                  | 70                        | 43.1                                         |
| 14 | 隔河岩          | 121.5                     | 106.74               | 103                  | 80.7                      | 38.2                                         |
| 15 | 依泰普          | 126.7                     | 118.4                | 112.9                | 82.9                      | 37                                           |
| 16 | 万家寨 (VOITH)  | 80                        | 81.19                | 68                   | 50                        | 37                                           |
| 17 | 漫湾           | 100                       | 86.3                 | 89                   | 69.3                      | 35.6                                         |
| 18 | 李家峡          | 135.6                     | 130.5                | 122                  | 90                        | 35                                           |
| 19 | 二滩           | 189.2                     | 164.63               | 165                  | 135                       | 32.9                                         |
| 20 | 龚嘴           | 55.3                      | 48.2                 | 48                   | 39.7                      | 32.4                                         |
| 21 | 龙羊峡          | 148.5                     | 118.15               | 122                  | 110.5                     | 32.2                                         |
| 22 | 萨彦舒申斯克       | 220                       | 212                  | 194                  | 175                       | 21.23                                        |

1.2 最大水头与最小水头的比值  $H_{\max} / H_{\min}$

水电站前期设计阶段,设计部门往往用最大水头与最小水头的比值  $H_{\max} / H_{\min}$  来衡量水轮机水头变化的大小。 $H_{\max} / H_{\min}$  大于 1.6 的水电站可视为水头变化偏大。国内外一些水电站的  $H_{\max} / H_{\min}$  值见表 2。

表 2 最大水头与最小水头的比值  $H_{\max} / H_{\min}$

| 水电站名称      | $H_{\max} / H_{\min}$ | 水电站名称  | $H_{\max} / H_{\min}$ | 水电站名称 | $H_{\max} / H_{\min}$ |
|------------|-----------------------|--------|-----------------------|-------|-----------------------|
| 潘家口常规机组    | 2.36                  | 大朝山    | 1.62                  | 李家峡   | 1.51                  |
| 小浪底        | 2.07                  | 柘林     | 1.66                  | 隔河岩   | 1.51                  |
| 三峡 (围堰发电期) | 2.018                 | 五强溪    | 1.66                  | 漫湾    | 1.44                  |
| 岩滩         | 1.85                  | 刘家峡    | 1.63                  | 二滩    | 1.40                  |
| 江垭         | 1.76                  | 大古力第Ⅲ级 | 1.62                  | 龚嘴    | 1.39                  |
| 天生桥Ⅰ级      | 1.72                  | 万家寨    | 1.60                  | 龙羊峡   | 1.34                  |

1.3 最大水头、最小水头与设计水头的比值

按一般概念,水轮机的设计水头  $H_0$  (通过特性曲线最高效率点的水头) 应等于或接近水电站的加权平均水头  $H_w$ , 以获得最大的发电效益。

表 1 中的某些水电站水轮机最大水头、最小水头与设计水头的比值排序见表 3。

在实际工程项目中,水头变幅大的电站有过 3 种选择设计水头  $H_0$  的实例:

(1) 偏低选取,如巴基斯坦的塔贝拉水电站 11<sup>#</sup>~14<sup>#</sup> 水轮机和国内的潘家口水电站常规水轮机组。

表 3

最大水头、最小水头与设计水头的比值

| 水电站名称        | $H_{\max}/H_0$ | $H_{\min}/H_0$ | 水电站名称       | $H_{\max}/H_0$ | $H_{\min}/H_0$ |
|--------------|----------------|----------------|-------------|----------------|----------------|
| 潘家口常规机组      | 1.38           | 0.58           | 岩滩          | 1.15           | 0.62           |
| 小浪底          | 1.28           | 0.62           | 隔河岩         | 1.14           | 0.76           |
| 龙羊峡          | 1.26           | 0.94           | 柘林          | 1.14           | 0.68           |
| 五强溪          | 1.21           | 0.73           | 江垭          | 1.08           | 0.61           |
| 天生桥Ⅰ级        | 1.19           | 0.69           | 依泰普         | 1.07           | 0.70           |
| 万家寨 (ALSTOM) | 1.18           | 0.74           | 三峡 (后期)     | 1.04           | 0.66           |
| 大古力Ⅲ级        | 1.16           | 0.72           | 李家峡         | 1.04           | 0.69           |
| 漫湾           | 1.16           | 0.80           | 萨彦舒申斯克      | 1.04           | 0.83           |
| 二滩           | 1.15           | 0.82           | 万家寨 (VOITH) | 0.99           | 0.62           |
| 刘家峡          | 1.11           | 0.69           |             |                |                |

(2) 折中选取, 如小浪底水电站的水轮机。

(3) 偏高选取, 如依泰普和三峡两水电站的 700MW 水轮机。

水头变幅大的混流式水轮机, 为保证高水头区的稳定运行, 一般都偏高选择  $H_0$ 。推荐最大水头与设计水头的比值在 1.07~1.11 之间, 同时兼顾最小水头与设计水头的比值大于或等于 0.65, 见《水力发电厂机电设计规范》(DLT 5186—2004)。

#### 1.4 最大水头与额定水头的比值 $H_{\max}/H_r$

为保证高水头工况的水力稳定性, 额定水头  $H_r$  (发额定出力的最小水头) 可按  $H_{\max}/H_r \leq 1.15$  选择。

防洪为主的水电工程额定水头往往偏低, 有些水电站  $H_{\max}/H_r \geq 1.35 \sim 1.4$ , 致使高水头工况的导叶开度偏小、水力稳定性能差、负荷调节范围较小。有的水电站在高水头、大负荷工况下甚至不能运行。

某些电站水轮机最大水头与额定水头  $H_r$  的比值排序情况见表 4。

表 4

最大水头与额定水头的比值  $H_{\max}/H_r$ 

| 水电站名称   | $H_{\max}/H_r$ | 水电站名称 | $H_{\max}/H_r$ | 水电站名称 | $H_{\max}/H_r$ |
|---------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|
| 三峡      | 1.4            | 龚嘴    | 1.15~1.26      | 岩滩    | 1.15           |
| 江垭      | 1.37           | 柘林    | 1.24           | 二滩    | 1.15           |
| 五强溪     | 1.35           | 龙羊峡   | 1.22           | 刘家峡   | 1.14           |
| 潘家口常规机组 | 1.34           | 大朝山   | 1.18           | 漫湾    | 1.12           |
| 天生桥Ⅰ级   | 1.29           | 隔河岩   | 1.18           | 李家峡   | 1.11           |
| 小浪底     | 1.26           | 万家寨   | 1.18           |       |                |

## 2 讨论

水头变幅  $[(H_{\max} - H_{\min})/H_0]$  或最大水头与最小水头的比值  $H_{\max}/H_{\min}$  大的水轮机,

要慎重考虑特征水头的问题。例如最大水头与设计水头的比值  $H_{\max}/H_0$  应不大于 1.11, 否则叶片进水边头部背面容易出现脱流空化; 最小水头与设计水头的比值  $H_{\min}/H_0$  应大于或等于 0.6, 否则叶片进水边头部正面容易出现脱流空化; 最大水头与额定水头的比值  $H_{\max}/H_r$  应不大于 1.2, 否则容易使高水头工况遭遇叶道涡、尾水管低频压力脉动和叶片进水边头部背面脱流空化。

(1) 1990 年, 瑞士苏尔寿公司设计、加拿大 DBS 公司制造的巴基斯坦塔贝拉电站 11<sup>#</sup>~14<sup>#</sup> 水轮机, 水头变幅  $[(H_{\max}-H_{\min})/H_0=88.87\%]$  和最大水头与最小水头的比值 ( $H_{\max}/H_{\min}=2.745$ ) 较大, 最大水头与设计水头的比值 ( $H_{\max}/H_0=1.398$ ) 也偏大。由于设计水头偏低, 在高水头部分负荷工况下, 叶片头部背面脱流空化严重, 且在高水头部分负荷的叶道涡诱发了振动, 使转轮叶片出现裂纹, 尾水管锥管也开裂。

(2) 小浪底水电站的水头变幅  $[(H_{\max}-H_{\min})/H_0=66.4\%]$  和最大水头与最小水头的比值 ( $H_{\max}/H_{\min}=2.07$ ) 较大, 最大水头与设计水头的比值 ( $H_{\max}/H_0=1.282$ ) 和最大水头与额定水头的比值 ( $H_{\max}/H_r=1.259$ ) 偏大。由于设计水头偏低, 且选型和翼型设计存在问题, 致使水轮机在低水头启停机工况下遭遇水力弹性脉动与轴系发生扭转共振, 导致转轮叶片在 72h 试运行中开裂。高水头工况又可能产生叶片头部背面脱流空化, 诱发振动。

(3) 岩滩水电站的水头变幅  $[(H_{\max}-H_{\min})/H_0=52.7\%]$  和最大水头与最小水头的比值 ( $H_{\max}/H_{\min}=1.85$ ) 较大, 但最大水头与设计水头的比值 ( $H_{\max}/H_0=1.146$ ) 和最大水头与额定水头的比值 ( $H_{\max}/H_r=1.153$ ) 都正常。机组自 1992 年投运以来, 在 50m 水头以上某一运行工况下, 发电机层楼板有一个强振区。强振区的负荷范围在 20MW 左右, 且随水头的升高向大负荷方向移动。

哈尔滨电机厂在岩滩转轮改造中采取了以下措施:

1) 增加转轮的叶片数。叶片从原来的 13 片增至 15 片, 使二阶叶片通过频率从 32.5Hz 提高至 37.5Hz, 以错开强振时导叶后、转轮前出现的压力脉动频率的响应范围, 同时也可错开楼板的二阶固有频率。

2) 降低转轮的最优单位转速。转速从原 A296 转轮的  $n_{110}=78\text{r/min}$  降至 A773 转轮的  $n_{110}=72.4\text{r/min}$ , 将高水头区转轮叶片进口背面脱流空化区排除在运行范围之外, 以降低由此引起的叶片通过频率的激振能量。

岩滩水电站的 3<sup>#</sup> 水轮机于 2003 年 5 月 25 日更换新转轮。在各种水头下, 消除了厂房楼板的强振现象。岩滩水电站转轮出现裂纹的主要原因是负荷调节范围过大。

(4) 五强溪水电站的水头变幅  $[(H_{\max}-H_{\min})/H_0=48.3\%]$  和最大水头与最小水头的比值 ( $H_{\max}/H_{\min}=1.66$ ) 较大, 最大水头、最小水头与设计水头的比值分别为 1.214 和 0.73, 最大水头与额定水头的比值 ( $H_{\max}/H_r=1.35$ ) 偏大。

龙羊峡水电站的水头变幅  $[(H_{\max}-H_{\min})/H_0=32.2\%]$  和最大水头与最小水头的比值 ( $H_{\max}/H_{\min}=1.344$ ) 都不大, 最大水头、最小水头与设计水头的比值分别为 1.257 和 0.935, 最大水头与额定水头的比值  $H_{\max}/H_r$  为 1.2。

这两个水电站在低水头下运行没有问题, 但在水库超蓄时出现的高水头工况下, 运行不稳定。