

第十八次

中国水电设备学术讨论会论文集

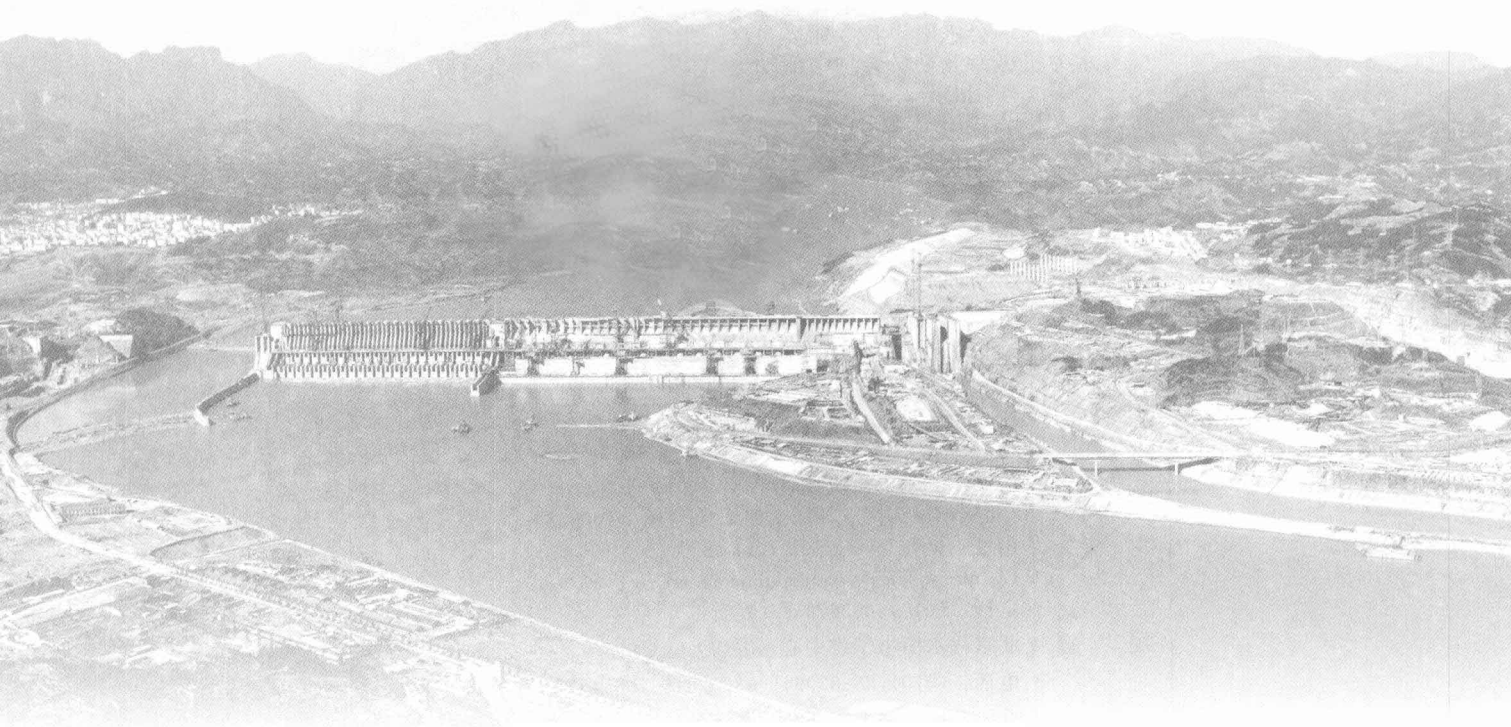
中国电机工程学会水电设备专业委员会
中国水力发电工程学会水力机械专业委员会 编
中国动力工程学会水轮机专业委员会



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

第十八次 中国水电设备学术讨论会论文集

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



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共收录 105 篇论文,分为 10 部分:水力设计及选型、稳定运行、结构设计及制造、空蚀与磨损、试验研究、安装与运行、状态检修、水电站改造、电气及辅机、其他。本书汇集了近几年来广大水电工程技术人员的研究和实践成果,内容涵盖水力发电、水力机械技术发展的新思想、新理论、新观点和先进技术,设计、制造、运行和管理中存在的技术问题,水电站事故教训的总结分析,新建或改造电站、泵站的选型设计以及水电事业的发展战略等。

本书可供大专院校、科研设计、制造、安装、运行及管理等部门学者、专家和工程技术人员阅读。

图书在版编目 (C I P) 数据

第十八次中国水电设备学术讨论会论文集 / 中国电机工程学会水电设备专业委员会, 中国水力发电工程学会水力机械专业委员会, 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, 2011. 10
ISBN 978-7-5084-9088-5

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第212161号

书 名	第十八次中国水电设备学术讨论会论文集
作 者	中国电机工程学会水电设备专业委员会 中国水力发电工程学会水力机械专业委员会 编 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 (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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	210mm×297mm 16 开本 34.75 印张 1077 千字 8 插页
版 次	2011 年 10 月第 1 版 2011 年 10 月第 1 次印刷
印 数	001—900 册
定 价	120.00 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

第十八次中国水电设备学术讨论会组织机构

组 织 委 员 会

主 任：陆 力

副 主 任：赵 琨 邱希亮 刘仲民 胡伟明 石清华

李 正 卜漱和 张 强 许超群

委 员：唐 澍 游赞培 付元初 沈紫萍 陈顺义

韩大伟 李定中 彭忠年 李胜兵 刘景旺

孟晓超 徐尚智

学 术 委 员 会

主 任：曹树良

副 主 任：杨建东 王正伟 戴 江 罗兴琦 郑 源

孙殿湖 魏显著 游 超 许子清

委 员：吴培豪 江泽沐 刘光宁 李启章 温国珍

樊世英 何国任 田树棠 曾镇铃 蒋登云

伍建辉 郑 彪 马震岳 苑连军 王建华

陈 东 李月彬 潘罗平 尹国军 卜良峰

秘 书 处

秘 书 长：徐洪泉

副秘书长：覃大清 戴康俊

秘 书：马素萍 涂东花 刘诗琦 张海平 安 庆

刘 娟 廖翠林

前 言

由中国电机工程学会水电设备专业委员会、中国水力发电工程学会水力机械专业委员会和中国动力工程学会水轮机专业委员会联合主办的中国水电设备学术讨论会是一个跨学会、跨行业、跨部门且能充分体现我国水电设备行业最高水平的权威性学术会议，每两年召开一次。

第十八次中国水电设备学术讨论会将于 2011 年 11 月在福建省武夷山市召开，由三个专委会和水力机械专业委员会水力机械信息网、全国水利水电技术信息网联合主办，福建南电股份有限公司协办。本次会议的举办，将为大专院校、科研设计、制造、安装、运行及管理等部门学者、专家和工程技术人员提供一个交流平台，就水力发电、水力机械技术发展的新思想、新理论、新观点和先进技术进行交流，对设计、制造、运行和管理中存在的技术问题开展研讨，对水电站事故教训进行总结分析，对新建或改造电站、泵站的选型设计及水电事业的发展战略提出建议，推动水电事业的科学发展。

会议征文共收到论文 130 余篇，由于篇幅所限，本书共收录 105 篇论文。根据稿件内容，共分为 10 部分：水力设计及选型、稳定运行、结构设计及制造、空蚀与磨损、试验研究、安装与运行、状态检修、水电站改造、电气及辅机、其他。本书汇集了近年来广大水电工程技术人员的研究和实践成果，希望能对广大水电设备工作者提供借鉴和帮助，也期望能产生共鸣或争鸣，促进我国水电设备技术水平的提高，推动水电行业的科技进步。

经过三个专委会和两个信息网的合作与努力，特别是论文作者、审稿专家的支持与帮助，在各协作单位的鼎力协助下，《第十八次中国水电设备学术讨论会论文集》顺利出版。在此，我们谨向为本论文集的出版提供过指导、支持和帮助的单位、专家及各位论文作者表示深深的谢意，并感谢中国水利水电出版社编审人员的辛勤工作和努力。

由于时间仓促，受编者水平和经验所限，错误和不当之处难免，敬请各位读者批评指正！

编者

2011 年 10 月

目 录

前言

从国际水电发展形势看我国水电百年发展	贾金生 徐 耀	(1)
--------------------------	---------	-----

水 力 设 计 及 选 型

基于正反问题迭代方法的离心泵叶轮设计及流场模拟	谭 磊 曹树良 邴 浩等	(7)
高扬程大型离心泵磨损预估数值研究	高忠信 邓 杰 游 超等	(12)
波波娜水电站水轮机内部流动分析与结构设计	上官永红 刘会平	(19)
江苏宜兴抽水蓄能电站甩负荷试验水力过渡过程计算与实测对比	向 红 余雪松 李成军等	(23)
大型贯流机组设计及运行问题浅析	段宏江	(29)
流固耦合技术在水轮机蝶阀活门动态特性分析中的应用	张恩佳 周佳亮	(35)
中低比速大型离心泵研发的探讨	邓 杰 高忠信	(39)
不同过渡圆角对转轮应力及频率影响的研究	潘月辉	(46)
新疆伊犁库什塔依水电站水轮机的机型选择	汤永明	(50)
45m 水头段模型水轮机技术研发	陈 锐 田姪娟 薛 鹏等	(53)

稳 定 运 行

大型混流式水轮发电机组的运行稳定性	樊世英	(63)
水泵水轮机稳定性预判和对策	陈顺义 李成军 周 杰等	(74)
江苏宜兴抽水蓄能电站水泵水轮机导水机构的自激振动	李启章 于纪幸 任绍成等	(83)
水轮机顶盖垂直振动过大的危害与处理	田树棠 刘国峰	(88)
董管电站机组异常噪音测试分析及水轮机减振措施	贾瑞旗 刘安国 刘 杰	(93)
枫树坝水电站转轮裂纹原因及预防措施	徐广文 张海丽	(100)
抽水蓄能机组水泵起动过程的压力脉动分析	赵英男 郭全宝 赵 越	(103)
二滩电站降低水库死水位水轮机低水头运行可行性分析	董宏成 蒋登云	(106)
龙江水电站机组振动等问题的探讨	赵新朝 郭建平 方 源	(112)
洪江水电厂灯泡贯流式机组转子支臂裂纹原因分析与处理	曾维才	(116)
大型灯泡贯流式机组 AGC 运行稳定性研究	肖启志 谭丕成 李汉臻	(121)
大型灯泡贯流式水轮发电机组负荷波动故障的分析及处理	肖启志 李建勇 邓 亚	(124)
水轮发电机组的自激振动与弓状回转	刘春林 常洪军 徐珍懋	(127)
水轮发电机组补气综述	李金伟 于纪幸 李启章等	(136)
混流式水轮机叶片裂纹防止对策	李 华 手塚光太郎	(140)
MGV 在解决低比转速水泵水轮机空载稳定性中的应用	谢宝星 杨官霞 赵毅锋等	(145)
三峡电厂右岸 21 号机组运行稳定性分析	叶青平 张良颖 刘连伟等	(151)

混流式水轮机尾水管压力脉动特性分析	茅媛婷 郑 源 周大庆等	(159)
小电网下复杂水机电系统中调速器参数对小波动调节品质的影响研究	肖玉平 郑 源 翟小娟等	(163)
南水北调中线泵站输水系统水力过渡过程分析研究	戚兰英 樊红刚 石维新	(167)
瑞丽江一级水电站 2 号水轮机自然补气系统的改进	赵 越 陈碧辉 郭全宝等	(176)
水轮机转轮叶片裂纹产生的基本原因及实例	陈 柳 李启章 于纪幸	(181)

结构设计及制造

阿海水电站水轮机及圆筒阀主要技术特点	曾镇铃	(187)
滚动推力轴承在水轮发电机中的设计应用	刘为民 宋子明	(191)
中型灯泡贯导水机构工厂预装工艺与试验技术研究	杨国斌 唐习斌 魏世文	(199)
相似理论在卧式导轴承模型试验中的应用	方静辉 陈志祥 朱何会	(205)
四川九龙江江边水电站水轮机主要参数及结构特点	方晓红	(211)
深溪沟水电站大型轴流式水轮机的设计	张续钟	(215)
卧式双喷培尔顿水轮发电机组轴承特性分析	黄 清 齐玉凤 杨红波等	(220)
水电设备焊接标准及质量控制研究	王万鹏 廖翠林 陆 力等	(225)
太平江水轮机转轮的制造	陶喜群 赵慧滨	(231)
浅谈灯泡贯流式水轮机结构设计特点及运行中解决问题的对策	王春雷 王 鉴	(234)
导叶摩擦保护装置的应用分析	陈立春	(238)

空蚀与磨损

关于水轮机磨损标准制定及相关问题的讨论	余江成 陆 力 马素萍	(245)
刘家峡水电厂水轮机导水机构部件磨蚀情况及修复措施	高云涛 张建伟 苟小军	(249)
ZZ550 水轮机空蚀问题探讨	乌晓明	(253)
水轮机空化相似性研究	徐洪泉 唐泉涌 王万鹏等	(259)
控制空化是水轮机磨蚀防护的关键	余江成	(265)
水轮机常用不锈钢材料及 HVAF 涂层磨蚀性能的试验研究	刘 娟 余江成 潘罗平	(269)
UHMW-PE 在轴流式水轮机转轮室防护中的应用	张 旭 姚启鹏 赵学平	(274)
浑水条件下运行的水轮机流道和局部结构	姚启鹏	(278)
多泥沙条件下高水头水轮机的选型研究	罗 洪 郭建伟 王泉龙	(282)

试 验 研 究

三峡电站原型水轮机性能试验	符建平 郑莉媛 潘罗平等	(289)
大中型水轮发电机动平衡指标和动平衡试验	张智彬 何成连	(298)
水轮机模型效率试验误差分析方法探讨	徐洪泉 张海平 张建光等	(302)
叶片圆盘泵性能预测与试验验证	周昌静 陈国明 尹树孟	(308)
石虎塘三叶片、四叶片贯流式水轮机选型设计和模型试验	杜荣幸 德宫健男 川尻秀之	(312)
牛栏江-滇池补水工程水泵模型验收试验及性能分析	刘登峰 黎 辉	(316)
基于高精度测温电桥的热力学效率试验装置研发	唐拥军 潘罗平	(323)

安 装 与 运 行

通过萨扬-舒申斯克水电站事故原因分析看机电设备安全运行问题	贾金生 徐洪泉 李铁友等	(329)
水电站制动器故障现场处理和改造探索	杨 英	(337)
灯泡贯流式水轮机运行中的几个问题	贾瑞旗 何成连	(343)
水发电机组设备缺陷问题及分析	彭天波	(347)
大型抽水蓄能电站首机首次启动试验方式选择研究 (一) ——两种启动试验方式的特征水力参数和经济性评估方法	张玉良 潘秀云	(352)
大型抽水蓄能电站首机首次启动试验方式选择研究 (二) ——首机首次水泵工况启动试验方式关注的主要技术问题	张玉良 潘秀云	(358)
洪江水电厂大型灯泡贯流式机组运行问题及研究	吕吉平	(363)
一例立式水轮发电机主轴折弯的现场矫正处理	徐 伟 杜 江 曾 嵘	(367)
新疆吉林台一级水电站 4 号机组推力轴承超温的原因分析及处理	陈红波	(370)

状 态 检 修

水电站检修维护管理现状及趋势	卢进玉 马 龙 肖艳凤	(375)
水电站主设备状态集中监测与诊断系统的研发及应用	潘罗平 周 叶 安学利	(380)
三门峡水电厂状态检修的探索和实践	付海婴 付芳芳 孙海龙	(386)
声学测量在水电机组故障诊断中的应用	何志锋 孙建平	(390)
流域电厂检修新模式探讨	王 竞	(394)
水轮机空化在线监测研究及应用新进展	桂中华 潘罗平 孟晓超等	(397)
水发电机组变压器油中气体在线监测技术分析与研究	周 叶 潘罗平 夏 伟	(402)
水轮发电机组检修的三维仿真系统研究	李效旭 郑 源 潘 虹	(406)
水发电机组轴心轨迹滤波提纯分析研究	葛新峰 储冬冬	(410)
基于虚拟仪器的水轮发电机组三维全息谱分析	张 飞 潘罗平 高忠信	(414)

水 电 站 改 造

葛洲坝电站 3 号机组增容改造稳定性分析	卢进玉 马 龙 周 伍等	(421)
山美水电站 3 号机组水轮机技术改造	陈绍钢	(427)
马颈坳水电站 6 号水轮机的增容改造	张屹峰 徐洪泉 王万鹏	(432)
洪江贯流式水轮机桨叶铜套更换项目探讨	梁湘津	(436)
新疆金沟河二级站水轮机主轴密封的改造	刘会平	(440)

电 气 及 辅 机

基于 CATIA 的越南定平电站进水蝶阀三维模型装配设计	王 旭 潘 峤 王洪涛	(445)
抽水蓄能机组原动机及调速系统参数实测、建模与仿真	彭天波 杨洪涛	(450)
电力系统稳定分析用水轮机调节系统模型研究	徐广文 张海丽	(458)
关于逻辑插装式调速器压力冲击问题的探讨	刘同安 刘德发 马洪亮等	(462)
大通径水轮机调压阀的应用研究	张中亚 陈 艳 张 辉	(466)

新型组合式事故配压阀及分段关闭阀的开发与应用	刘同安 张建明 张治宇等	(470)
高水头混流式水轮机进水球阀设计	吴亚军 桑岛健	(475)
天荒坪电站磁极线圈开匝移位原因分析及其改造	曾 辉 朱兴兵 胡云梅	(479)
天荒坪抽水蓄能电站调速器控制系统升级改造	赵毅锋 游光华 孔令华等	(483)
双牌水电站 2 号机水轮机调速器的改造	刘庚生	(487)
基于 VB 和 Fortran 的抽水蓄能电站调节品质仿真研究	翟晓娟 郑 源 肖玉平等	(492)
丰满发电厂 6 号机组蝶阀动水关闭试验研究	张恩博 常洪军	(498)
抽水蓄能电站 SFC 系统研制及应用	闫 伟 石祥建 龚翔峰等	(503)
定子铁芯固有振动特性有限元解析研究	黄道锦 汪小芳	(507)
黄塘甲电站灯泡贯流式水轮发电机设计	黄惠广	(512)
天荒坪电站发电电动机机械制动器改造	曾 辉 张书友	(516)

其 他

实行全面预算管理 提高机电设备安装管理水平	张爱武	(523)
我国水电设备的国际市场机遇、挑战及应对措施	廖翠林 陆 力 徐洪泉等	(528)
抽水蓄能电站机电设备选型及安装调试管理要点	曾再祥	(532)
土耳其 Osmancik 和 Kale 水电站水轮发电机组的技术特点	汤毅强	(537)
蒙古国 OT 供水泵站复杂供水管道水锤计算及防护	郑莉玲 朱兴旺	(541)

从国际水电发展形势看我国水电百年发展

贾金生^{1,2,3} 徐 耀^{1,2,3}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 中国大坝协会, 北京 100038)

【摘 要】 我国水电经过 100 年的发展取得了巨大的成就, 总装机容量突破 2 亿 kW, 已雄居世界第一。本文从当前国际水电的发展形势出发, 分析了水电是回报率最高的能源以及储水设施建设的重要性, 并在回顾我国水电百年发展的各个阶段的基础上, 提出了新形势下水电未来发展需要的新理念。

【关键词】 水电; 能源回报率; 储水设施; 人类发展指数

1 当前国际水电的发展形势

为应对经济危机, 尤其是全球气候变化, 各国进一步加大了对水电的投入力度。目前世界上有 165 个国家和地区已明确将继续发展水电, 其中 110 个国家和地区规划建设规模达 3.38 亿 kW。发达国家多因已基本完成水电开发的任务, 重点投入到对已建水电站的更新改造、增加水库的泄洪设施提高防洪能力、调整电站运行调度目标实施生态保护和修复等, 如北美、欧洲等不少国家; 发展中国家多数制定了规划, 约在 2025 年左右基本完成水电开发任务, 如亚洲、南美地区的发展中国家等; 欠发达国家和地区, 虽然多数有丰富的水电资源, 也一直致力于发展水电, 但限于资金、技术等条件, 大力开发水电仍然有很多困难, 如非洲的不少国家等; 还有一些政局不稳的国家, 虽然急需发展水电, 但限于国力等条件, 推进非常缓慢。2008 年世界上在建大坝有 1200 多座, 其中 60m 以上大坝有 370 余座, 主要分布在亚洲、南美等 55 个国家。

2 水电是回报率最高的能源

我国当前当处于水电建设持续高速发展之时。为清楚审视各种能源开发方式的效益和优劣, 需要引用西方发达国家 20 世纪 70 年代就开始运用的一个概念——能源回报率。如以一个火力发电站为例, 能源回报率是指一个火力发电站在运行期内发出的电力与它在建设期、运行期为维持其建设和运行所消耗的所有电力的比值。建设期、运行期所消耗的所有电力既包括直接能源消耗, 如机械设备运行、照明耗能等, 也包括建筑材料、煤炭等制造、运输等过程的耗能。按照这一定义可估算出各种能源开发方式的能源回报率: 水电在 170 以上, 远高于风电的 18~34, 核电的 14~16, 生物能的 3~5, 太阳能的 3~6, 传统火力发电的 2.5~5.1, 应用碳回收技术火力发电的 1.6~3.3 (图 1)。仅此而言, 优先发展水电较之发展其他能源对积极应对气候变化、建设资源节约型、环境友好型社会具有无可比拟的优势。发达国家凭借资金、技术和市场机制等方面的优势, 比发展中国家早 30 多年优先完成了水电的开发任务, 也从侧面说明了发展水电的战略重要性。

3 积极开发水电, 加快储水设施建设

发展水电离不开修建水库大坝。开发水电所形成的水库多数具有防洪、抗旱、供水等综合效益。要充分利用流域的雨洪资源, 变水害为水利, 依靠良好的、足够的储水设施是唯一可靠的手段, 对发达国家如此, 对多数发展中国家更是如此。联合国定义了一个人类发展指数 (HDI) 以综合反映各国人均的 GDP、寿命和教育水平。人类发展指数为一介于 0~1 之间的数, 数值越接近于 1 表示人类发

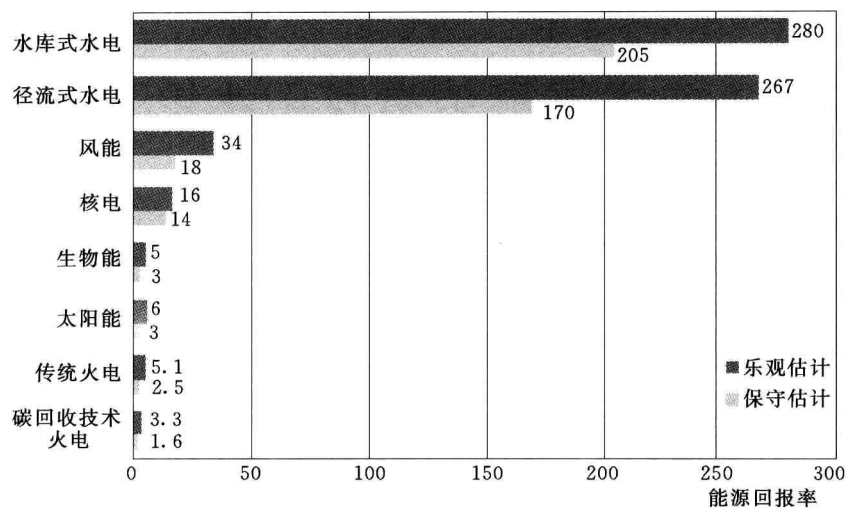


图1 各种能源开发方式的回报率

展水平越高。把各国人类发展指数与人均水库库容进行比较可以发现，对绝大多数国家而言，一个国家或地区水库大坝发展水平与国家人类发展水平呈较强的正相关。综合全球 50 余个国家 2007 年的人类发展与水库大坝发展数据计算结果见图 2。从图 2 中可以看出，人类发展指数大于 0.9 的国家，人均库容拥有量平均为 3184m³；人类发展指数介于 0.7~0.8 的国家，人均库容拥有量平均为 541m³，如中国 2007 年人类发展指数为 0.772，在 182 个国家中列第 92 位，人均库容 528m³（图 3）；人类发展指数介于 0.5~0.6 的国家，人均库容拥有量仅为 125m³。这与联合国《人类发展报告》中所指出的“全球水基础设施的分布与全球水风险的分布呈反比关系”是一致的。因此储水设施建设通常既是推动发展的关键因素，同时也是经济社会发展的自然结果。随着人口的增加和城市化的进一步发展，全球每年预计需要增加 640 亿 m³ 的水量。要实现水安全的目标，必须提高用水效率和增加雨洪利用，必须修建足够的储水设施。因此，加快水资源与水电资源的开发利用，必会被更多的国家所重视以解决日益严峻的水安全问题。

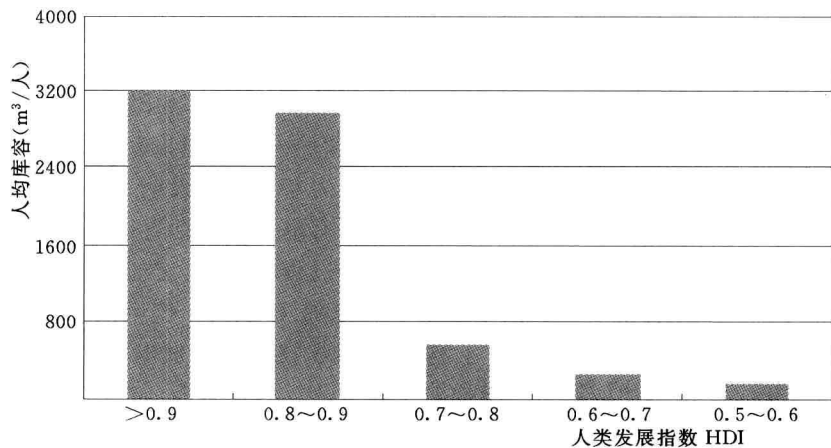


图2 人均库容与人类发展指数关系

4 我国水电的百年发展

我国水电百年发展大体可分为四个阶段。即艰难创业的第一阶段，从第一座水电站建设至新中国成立，特征是国力衰微，事事艰辛，在建设的量和质方面都处于起步阶段。1949 年以前，我国高于 15m 以上的水库大坝只有 22 座，洪灾、旱灾是心腹大患，虽然有大力发展水电的需要，但极难推进。

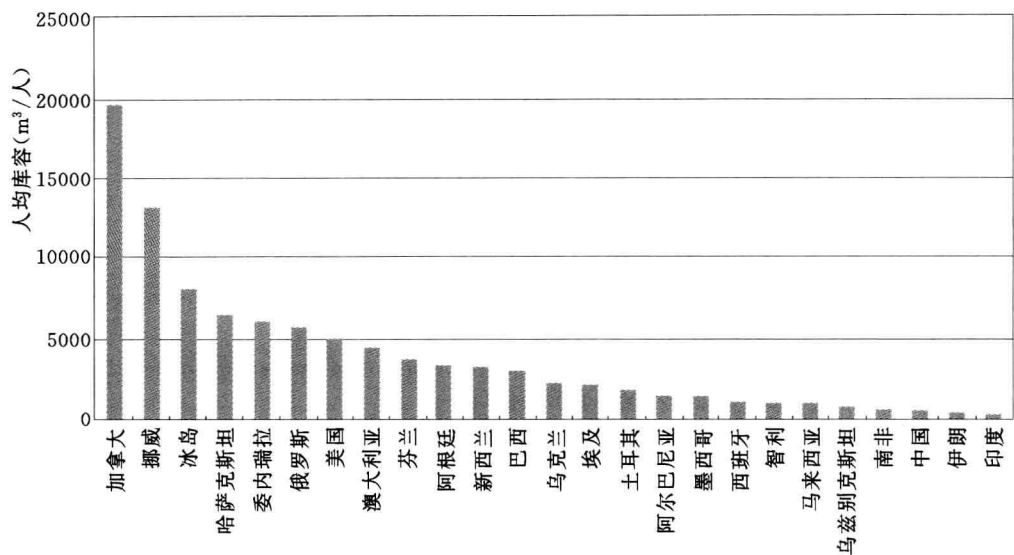


图3 典型国家人均库容（2007）

第二阶段可从新中国成立算至改革开放开始。我国在这一阶段修建了大量的水库大坝，是国际上修建水库大坝最活跃的国家，但是修建水库大坝的主要目的是防洪、灌溉等。相比之下，由于水电与火电相比，建设周期长、投资大、技术难、见效慢等原因，水电建设虽然以自力更生为主取得了很大的成就，但总体上发展缓慢、技术落后。第三阶段可从改革开放算至三峡、小浪底、二滩等特大型水库大坝建成，我国水电发展在这一阶段实现了质的突破，由追赶世界水平到很多方面居于国际先进和领先，不少水库大坝经过了1998年大洪水、2008年汶川地震等的严峻考验。这一阶段水电站为世界所称道的突出特点是设计质量高、施工速度快、质量好、普遍实现了预期效益。以锦屏一级等300m级高坝为代表的水电站建设标志着我国进入了自主创新、引领未来的第四发展阶段。这一阶段需要充分利用后发优势，通过技术创新、建立环境友好的技术体系、促进区域发展和社会和谐等，走出具有中国特色的新路。

5 我国水电又好又快的发展需要新的理念

在谋求可持续发展与应对气候变化的国际背景下，全球的水电发展迎来了前所未有的良好发展机遇，水电建设将掀开新的一页，迎来新的春天。但是现在建设一座大坝和水电站已经不仅仅是一件单纯的技术和学术问题，其活动的全过程变得更加公开和透明。中国及世界其他国家的成功及成熟的经验表明，水与水能以其可靠、廉价、经济可行、社会和谐与环境友好的方式开发是可行的，为此必须以可持续方式加速储水设施建设，尽可能将各种因开发所造成的不利影响降到最低，在实践中，需要我国的水电建设者们实现以下转变。

- （1）认识上需要从强调改造、利用自然转变到既强调改造、利用自然，又强调保护和适应自然。不仅需要对国内外经验进行认真的反思和总结，更需要立足于创新，以适应当前及今后一个时期发展的要求。
- （2）决策上需要从重视技术上可行、经济上合理转变到既重视技术上可行、经济上合理，又重视社会可接受、环境友好的发展要求。通过发展规划的制定和目标调整，真正谋求科学决策和科学发展。
- （3）运行管理上需要从重视工程安全、实现传统功能转变到既重视工程安全、传统功能实现，又重视生态调度、生态安全和生态补偿。
- （4）效益共享上需要从重视国家利益、集体利益转变到既重视国家利益、集体利益，又重视受影响人利益和生态补偿的发展要求，真正做到统筹兼顾，实现社会和谐和可持续发展。



【致谢】

本研究受中央水资源费项目《国际水资源用水效率演变及对我国的启示》以及中国水利水电科学研究院优秀青年科技人员科学研究专项《中国水电开发效益评估方法研究》资助。

参考文献

- [1] Berga, L. Dams for Sustainable Development [C] . Proceedings of the High Level International Forum on Water Resources and Hydropower, Beijing, China, 2008.
- [2] Gargaon L, Belanger C, Uchiyama Y. Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001 [J] . Energy Policy, 2002, 30: 1267 - 1278.
- [3] Gargaon L. Civilisation and energy payback [J] . Energy Policy, 2008, 36: 3317 - 3322.
- [4] Gagnon L. Energy payback trends: A guide for future development [C] . Proceedings of Hydro 2009, Lyon, France, 2009.
- [5] Gagnon, L. Energy Payback Ratio [R] . Hydro-Québec, Montreal, 2005.
- [6] 联合国开发计划署. 人类发展报告 2007/2008 [M] . 联合国开发计划署, 2008.
- [7] Word atlas & industry guide 2008, 2009 [J] . The International Journal on Hydropower and Dams. London, UK, 2008, 2009.
- [8] 贾金生, 马静. 保障足够的储水设施以应对气候变化 [J] . 中国水利, 2010 (2): 14 - 17.
- [9] 沈崇刚, 郑连第. 中国大坝建设历史——中国大坝 50 年 [M] . 北京: 中国水利水电出版社, 2000.



水力设计及选型

基于正反问题迭代方法的离心泵 叶轮设计及流场模拟

谭 磊¹ 曹树良² 邴 浩² 刘 毅² 祝宝山²

(1. 清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084;
2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

【摘 要】 采用正反问题迭代设计方法完成了离心泵叶轮设计, 正反问题迭代设计方法基于流体的连续方程和运动方程求解轴面速度, 计算得到的轴面速度分布规律能较好地吻合叶轮内部真实流动。在其他参数相同的情况下, 分析了叶轮包角对离心泵性能的影响。采用 SIMPLEC 算法, 对设计得到的离心泵全流道进行了数值模拟, 预估了离心泵水力性能, 分析了离心泵内部压力分布等流动细节。
【关键词】 离心泵; 叶轮; 设计; 流场模拟

1 引言

泵作为一种通用机械, 广泛应用于工农业生产及日常生活中, 消耗着大量的能源, 深入研究离心泵叶轮水力设计方法以提高机组性能, 对节能降耗具有重大的意义。叶轮的水力设计对离心泵的水力性能至关重要, 工程实际中, 广泛应用传统的一元理论设计方法进行叶轮设计, 该方法假定叶轮叶片由厚度无限薄的无穷多叶片组成, 轴面速度沿过水断面均匀分布, 仅满足流体的连续方程。为弥补传统方法的不足, 叶轮设计需获取更为真实的内部流场, 吴仲华提出了基于两类相对流面的叶轮机械三元流动普遍理论, 该方法同时满足流体的连续方程和运动方程, 采用两类相对流面 S_1 流面和 S_2 流面相互迭代计算, 为叶轮机械内部流动计算奠定了基础。真实三元流动的理论设计方法在理论上最严格, 设计的叶片能更好地适应叶轮内部真实的三维流动, 有利于提高叶轮水力性能, 适用于各种比转速离心泵的水力设计。

本文采用基于三元流动理论的正反问题迭代设计方法完成了离心泵叶轮设计, 分析了叶轮包角对离心泵性能的影响。采用 SIMPLEC 算法, 对设计得到的离心泵全流道进行了数值模拟, 预估了离心泵水力性能, 分析了离心泵内部压力分布等流动细节。

2 离心泵叶轮设计

2.1 离心泵叶轮正反问题迭代设计方法

为弥补离心泵叶轮传统一元理论设计方法的不足, 本文采用正反问题迭代设计方法设计离心泵叶轮, 离心泵叶轮正反问题迭代设计方法见图 1, 具体过程参见文献 [2]。

2.2 设计参数及结果

离心泵主要设计参数如下: 流量 $Q=200\text{m}^3/\text{h}$,

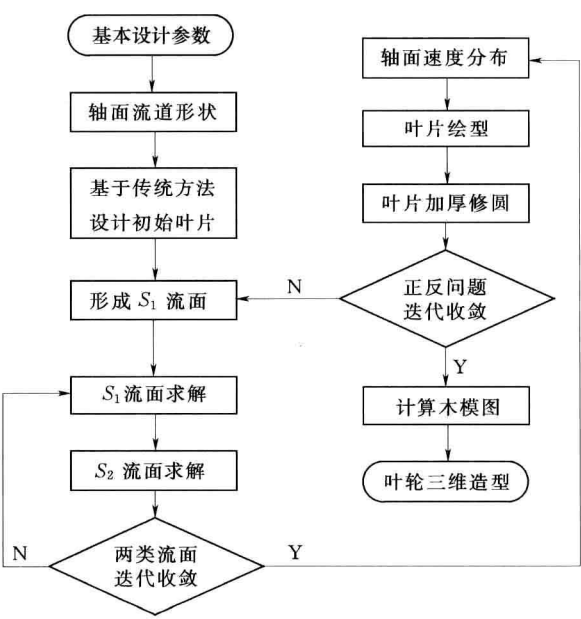


图 1 离心泵叶轮正反问题迭代设计方法图



扬程 $H=32\text{m}$, 转速 $n=1480\text{r/min}$, 叶轮进口直径 $D_1=148\text{mm}$, 叶轮出口直径 $D_2=322\text{mm}$, 叶轮出口宽度 $b_2=22\text{mm}$ 。

为分析叶轮包角对离心泵性能的影响, 本文设计了两个不同包角的叶轮, 其中叶轮 A 包角为 100° 、叶轮 B 包角为 120° , 两个叶轮三维造型见图 2。

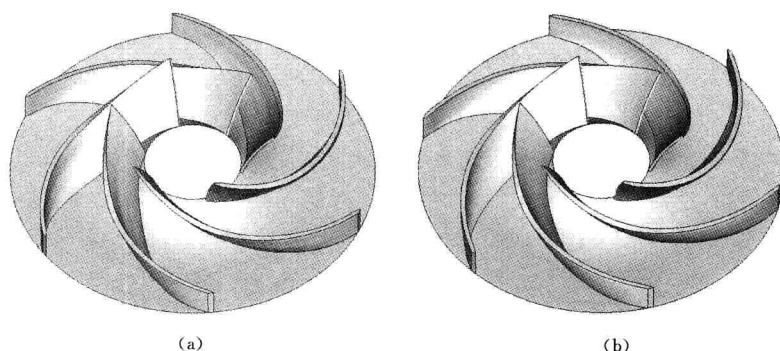


图 2 叶轮三维造型图
(a) 叶轮 A; (b) 叶轮 B

3 离心泵全流道数值模拟

3.1 网格划分

离心泵全流道计算域采用非结构化四面体网格, 见图 3, 为了提高模拟精度, 对叶片表面和压水室隔舌进行了局部加密, 整个计算区域的网格数为 135 万。

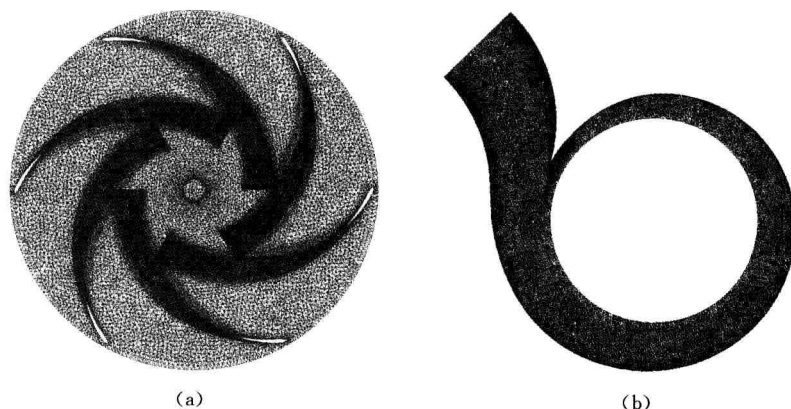


图 3 离心泵的网格划分
(a) 叶轮; (b) 压水室

3.2 基本方程

离心泵内部三维湍流流动的基本方程为流体的连续方程和运动方程, 具体形式如下:

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial (-\rho \overline{u_i' u_j'})}{\partial x_j} + S_i \quad (2)$$

式中: f_i 为体积力; μ 为分子动力黏性系数; S_i 为控制方程源项。

采用水力机械中应用较广的 RNG $k-\epsilon$ 模型封闭基本方程, 湍动能 k 和湍流耗散率 ϵ 方程如下: