



电力科技专著出版资金资助项目

Research on Prototype Hydro-Turbine Operation

原型水轮机 运行研究

黄源芳 刘光宁 樊世英 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn





原型水轮机运行研究

黄源芳 刘光宁 樊世英 编著

电力科技专著出版资金资助项目



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

原型水轮机研究是水轮机研究的三大方法之一,现代水轮机理论分析和模型试验这两种研究方法还不足以准确预测或由模型推断原型的各种运行表象。原型水轮机运行条件真实,水的各种特性包括水中泥沙特性,不同运行工况的各种异常现象如空化、磨损,以及电网对水电机组的运行要求等,与电力生产关系更加密切,原型水轮机运行研究十分必要,研究成果可直接应用于生产实践。

本书内容分为三篇。第一篇为原型水轮机专题分析研究,专题论述了原型水轮机的研究方法,水轮机运行稳定性,水轮机泥沙磨损对策,水轮机振动、裂纹成因和防护措施等。第二篇为原型水轮机运行调查研究,是作者在国内外水电站原型水轮机运行状况调查中获取的真实资料,从中可了解不同水电站水轮机的运行状况,也可了解同一水电站不同水轮机的运行状况,为采用不同方法研究水轮机提供了真实、可靠的依据。第三篇为三峡水电站原型水轮机研究综述,这是迄今研究原型水轮机规模最大、同比研究最深入、跟踪研究时间最长,也是备受行业关注、对行业影响最大的原型水轮机运行研究。

本书可供从事水轮机研究、试验和设计,水电站水力机械设计,水电厂水轮机运行、维护,电网运行调度的工程师,以及高等院校叶轮机械专业的师生使用。本书论述的主要是混流式水轮机,亦可供其他型式水轮机原型研究参考,对从事水轮机材料包括涂层材料研究也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

原型水轮机运行研究/黄源芳,刘光宁,樊世英编著. —北京:中国电力出版社,2010.4

ISBN 978-7-5123-0004-0

I. ①原… II. ①黄… ②刘… ③樊… III. ①水轮机运行—研究 IV. ①TK730.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 007747 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>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 4 月第一版 2010 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 28 印张 666 千字 6 彩页

印数 0001—3000 册 定价 98.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



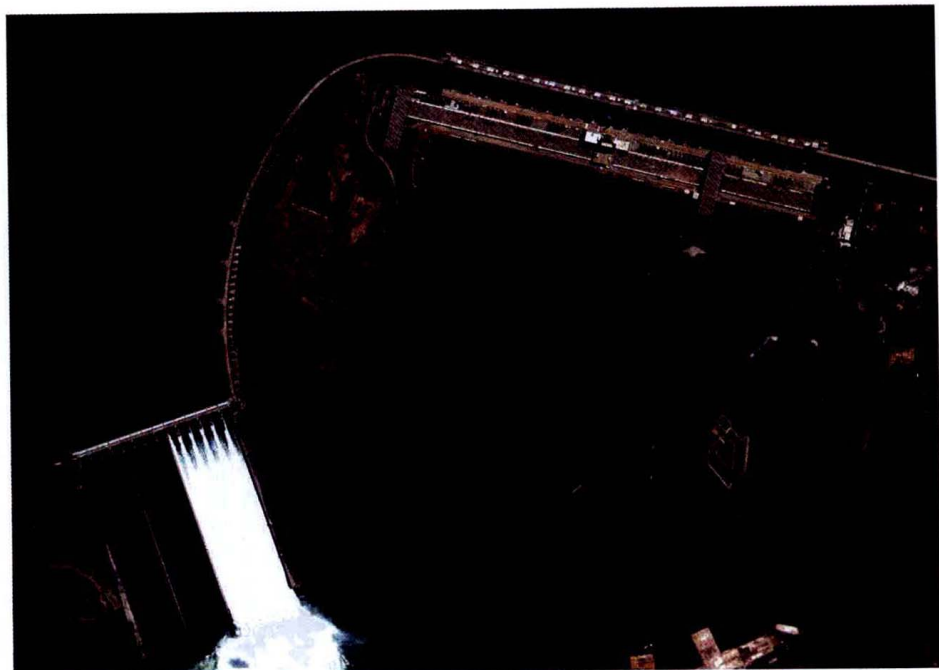
■ 三峡水利枢纽工程

总装机容量22 500MW，世界最大水电站。左岸电厂装有14台700MW机组，右岸电厂装有12台700MW机组，26台机组于2008年10月已全部投入运行。右岸地下电厂装有6台700MW机组，防汛保安自备电厂装有2台50MW机组。严格按设定的运行区域分区运行，自投产以来运行稳定。



■ 巴西/巴拉圭伊泰普水电站

总装机容量14 000MW，世界第二大水电站。20台700MW机组布置在一座电站厂房内，最后2台700MW机组分别于2006年和2007年投入运行。设计多年平均发电量750亿kWh，实际最高发电量达934亿kWh(18台机组，2000年)，由于巴拉那河流量稳定，机组在高水位最佳运行条件下运行，20台机组的年发电量可望超过950亿kWh，是世界上发电量最大的水电站。



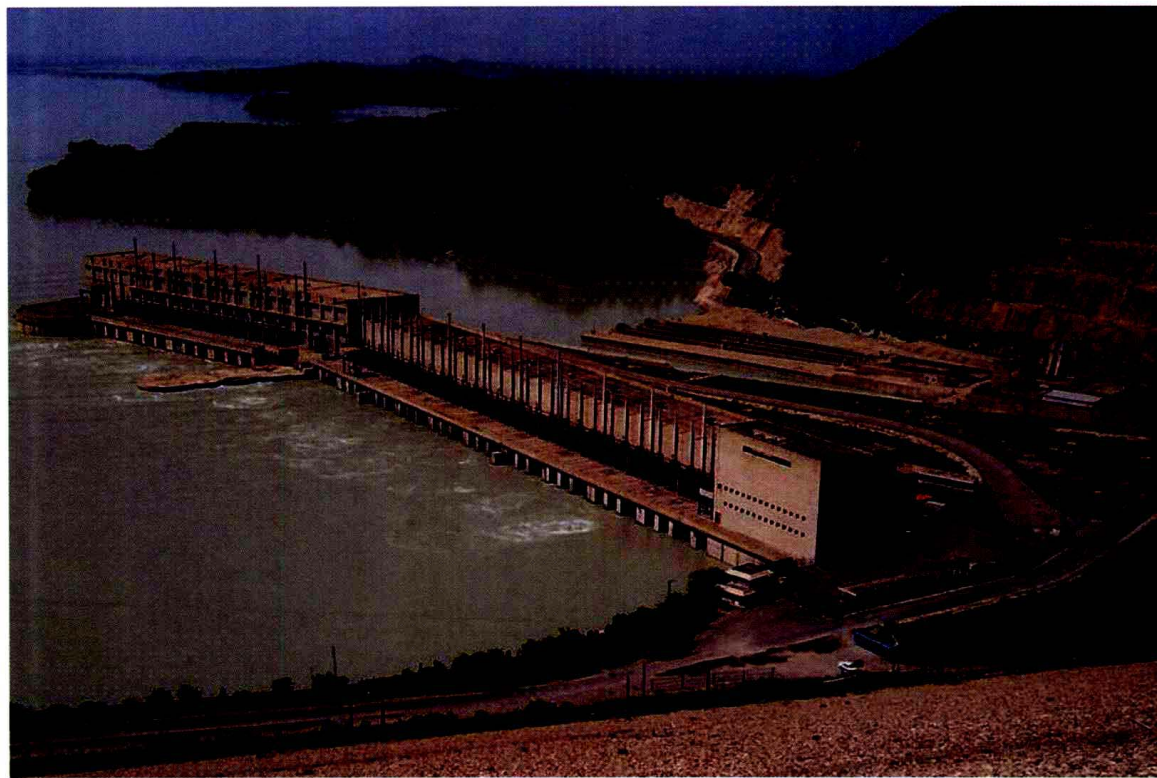
■ 美国大古力三座发电厂房

总装机容量6809MW，美国最大水电站。左岸厂房装有9台125MW机组，右岸厂房装有9台125MW机组，第三厂房装有3台600MW机组和3台700MW机组，另有6台提水水泵机组。3台700MW水轮机叶片为碳钢，振动、裂纹、空蚀严重，发电机曾发生定、转子碰撞事故，3台700MW发电机定子已经修复改造。几乎在满负荷和最佳运行区运行。



■ 委内瑞拉古里水电站

总装机容量10 300MW，分两期建成。第一期工程安装10台机组，单机容量266MW。第二期工程大坝加高52m，又安装10台机组，单机容量600MW。水头146m时最大出力730MW。该电站1986年建成，发电量占委内瑞拉电力供应的82%。相应于每年减少2000万吨二氧化碳进入大气层。水轮机振动、空蚀严重，10台新设计转轮更换旧转轮正在实施中，是世界上更换转轮水轮机中容量最大的水轮机。



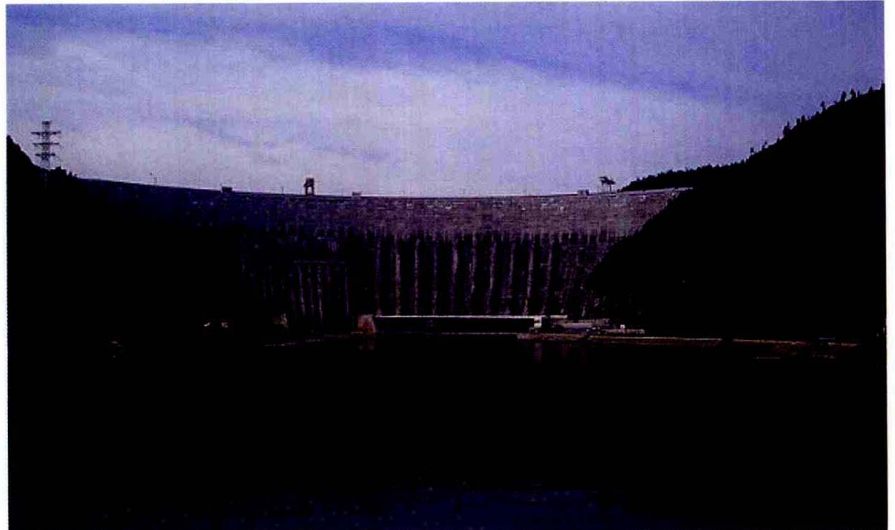
■ 巴基斯坦塔贝拉水电站

总装机容量3510MW，巴基斯坦最大水电站。第一电厂装有10台175MW机组，第二电厂装有4台440MW机组。第二电厂440MW水轮机运行水头变化幅度，是大型混流式水轮机之最。头两台机组投产不到半年，因水轮机运行中发生共振损坏，实施32项修复、加固项目，停机一年才重新投入运行。为保证机组安全运行，在厂房内装设压缩空气补气系统。



■ 俄罗斯萨彦—舒申斯克水电站

总装机容量6400MW，年发电量235亿kWh，俄罗斯最大水电站。10台640MW机组布置在一座弧形厂房内，首台机组利用低位进水口于1978年发电。最后一台机组于1985年投入运行，10台机组于2000年正式投入永久运行。2009年8月17日发生重大事故。



■ 湖南江垭水利枢纽

总装机容量300MW，装有3台100MW机组。水轮机运行水头范围为62.1~109.5m，额定水头为80m，酷似三峡。由加拿大GE公司负责水力设计/模型试验，采用“X”型叶片，由东方电机股份有限公司制造。可视三峡水轮机的中间试验电站，由加拿大公司在现场进行过原型水轮机稳定性能试验。佐证了三峡水轮机在高水头运行时的稳定性能。



■ 湖南五强溪水电站

总装机容量1200MW，装有5台240MW机组。水轮机转轮直径为8.3m，由哈尔滨电机厂有限责任公司和德国福伊特公司联合设计、制造。首台机组于1994年12月投入运行，末台机组于1996年12月发电。叶片出现裂纹，修复补焊后仍存在。70~120MW负荷范围被定为禁止运行区。



■ 云南大朝山水电站

总装机容量1350MW，装有6台225MW机组。由加拿大GE公司负责水力设计/模型试验，东方电机股份有限公司制造，转轮对称分瓣制造。首台机组于2001年12月投入运行，末台机组于2003年12月发电。首台机组试运行，卡门涡产生蜂鸣声，叶片出现裂纹，叶片修型、裂纹补焊后，裂纹不再出现。



■ 贵州天生桥一级水电站

总装机容量1200MW，装有4台300MW机组。供货合同由哈尔滨电机厂有限责任公司签订，由法国阿尔斯通公司负责水力设计并提供4台转轮。首台机组于1998年12月投入运行，末台机组于2000年12月发电。水库水位升高至正常蓄水位780m后，机组振动区向大负荷区转移，电站负荷限制在250MW以上运行。



■ 广西岩滩水电站

总装机容量1200MW，装有4台300MW机组，广西电网主力调峰电厂。转轮直径为8.0m，由哈尔滨电机厂有限责任公司制造，分瓣转轮。首台机组于1992年9月投入运行，末台机组于1995年6月发电。在2002年10座电站水轮机调研中，该水电站年运行小时数、年发电量和裂纹总长度均为最大。



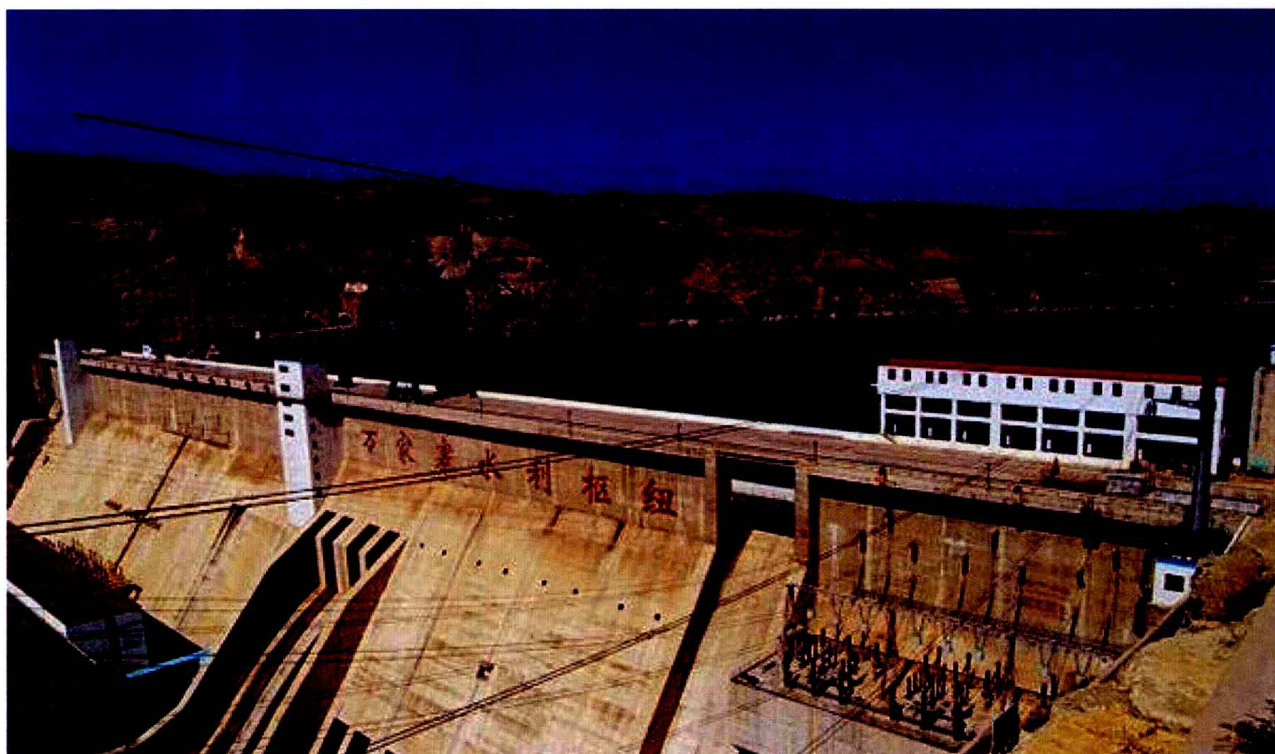
■ 青海李家峡水电站

总装机容量2000MW，装设5台400MW机组，已装4台。机组前后双排布置，其中一台发电机采用蒸发冷却。加拿大GE公司负责水力设计，东方电机股份有限公司制造。首台机组于1997年2月投入运行，末台机组于1999年1月发电。电站开机台数及机组负荷由电网直接调度，难以避开振动区运行。转轮密封环损坏，叶片多处裂纹。



■ 四川二滩水电站

总装机容量3300MW，装有6台550MW机组，由加拿大GE公司设计并制造2台，哈尔滨电机厂有限责任公司和东方电机股份有限公司分包制造。转轮对称分瓣制造，比速系数 $K=2325$ 。首台机组于1998年8月投入运行，末台机组于1999年12月发电。较长时间低负荷运行，叶片多处出现裂纹。



■ 山西万家寨水利枢纽

总装机容量1080MW，装有6台180MW机组。水头变幅大，水中含有泥沙，较低参数设计。首台机组于1998年11月投入运行，末台机组于2000年发电。水轮机由天津阿尔斯通公司和上海福伊特水电公司供货。两种水力设计/模型试验和结构设计，是方便对比研究同一电站不同水力和结构设计、不同抗磨涂层效果的电站。

■ 河南小浪底水利枢纽

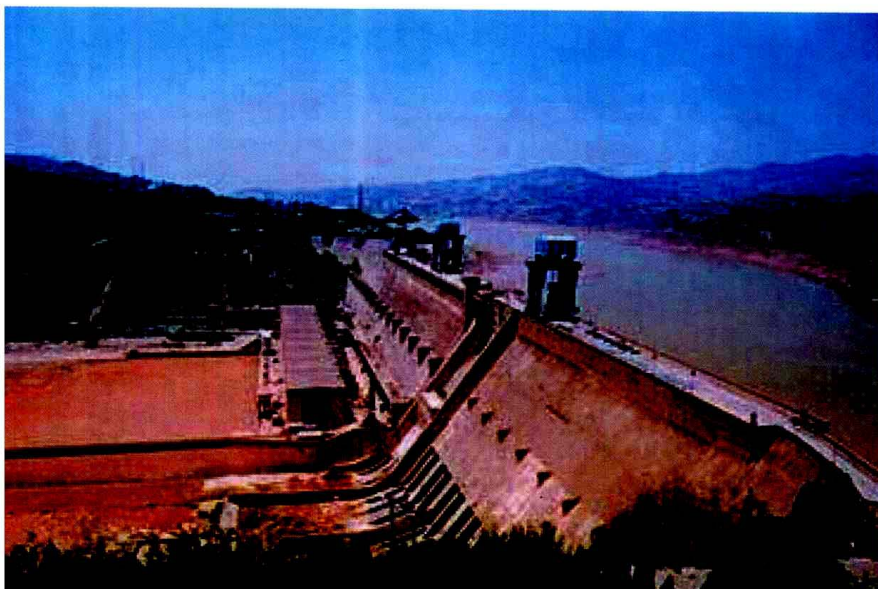
总装机容量1800MW，装有6台300MW机组，是我国中原地区最大的水电站。水头变幅大，水中含有泥沙，较低参数设计。水轮机由美国福伊特公司设计制造。转轮在现场组焊加工，叶片模压成型。首台机组于2001年12月投入运行，末台机组于2003年12月发电。首台机组试运行，发生异常噪声，大轴抖动，叶片裂纹，经叶片修型、补气，优化开机规律后运行正常。





■ 湖北隔河岩水电站

总装机容量1212MW，装有4台300MW机组和2台厂用电机组。首台机组于1993年6月投入运行，末台机组于1994年发电。年发电量30.4亿kWh，为华中电网主要调峰电站之一。由加拿大GE公司负责水轮机水力设计/模型试验和结构设计，2台由加拿大GE公司供货，2台由哈尔滨电机厂有限责任公司供货。4台转轮由加拿大GE公司制造。较高参数设计，比速系数 $K=2349.9$ 。在2002年10座电站水轮机调研中，叶片出现裂纹最少。



■ 河南三门峡水利枢纽

原设计总装机容量1200MW，装设8台150MW的混流式机组。后因泥沙淤积，水库不能蓄水至设计水位。工程改造后，装设5台50MW的转桨式机组，后增设2台75MW混流式机组。泥沙磨损严重，汛期不能运行。经升级改造后，磨损减慢，效率提高，修复量减小，可全年发电。



■ 甘肃刘家峡水电站

设计总装机容量1200MW，装有4台225MW、1台300MW机组。首台机组于1969年3月投入运行，末台机组于1974年发电，制造缺陷较多，泥沙磨损严重，机组出力不足。1986年开始修复改造，2002年现代化改造完成，电站最大出力达到1350MW。

■ 浙江新安江水电站

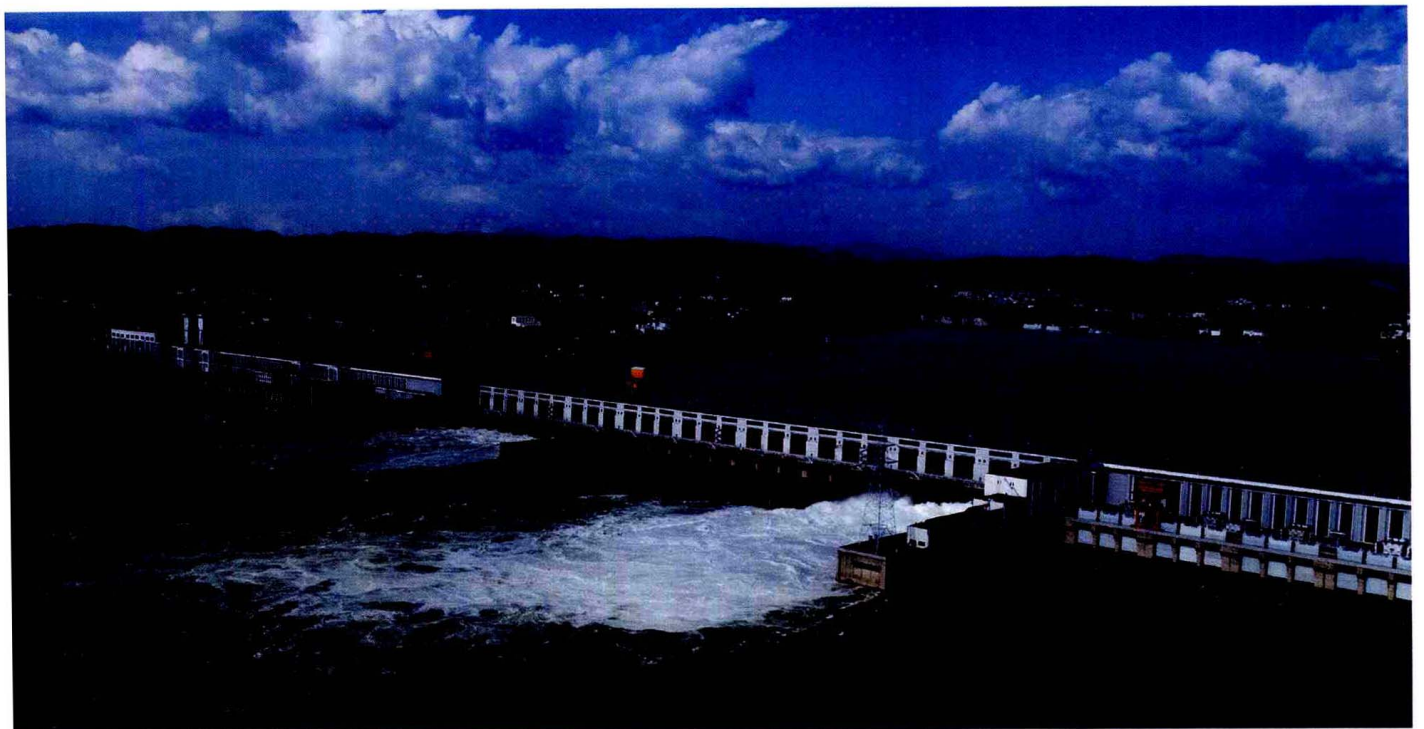
总装机容量662.5MW，装有9台72.5MW机组，中国自主设计制造。首台机组于1960年4月投入运行，末台机组于1977年10日发电。水库水质好，初期空蚀严重。1986年开始改造，至2009年11月，经改造后，厂区焕然一新，电厂机电设备可靠性、安全性好，成为华东地区可靠的调峰电站。





■ 吉林白山水电站

总装机容量1500MW，装有5台300MW级机组，是我国东北地区最大的水电站，分两期建设。首台机组于1983年12月投入运行，末台机组于1994年发电，是东北电网中担任调峰、调频和事故备用的主力电厂。



■ 湖北葛洲坝水利枢纽

总装机容量2725MW，两座厂房内装有21台机组。首台机组于1981年投入运行，末台机组于1988年发电。运行正常，可超出力运行。初期推力轴承“烧瓦”，有空蚀破坏和泥沙磨损现象。其中2台转轮直径11.3m，是世界上尺寸最大的水轮机，4叶片，额定出力170MW。由于上游三峡电站蓄水发电，运行条件改变，正在实施现代化改造中。

序 言 1

水能资源是可再生能源，是技术上最成熟、经济上最合理的清洁能源，也是我国能源结构中重要的组成部分。截至 2008 年底，我国水电装机容量达到 1.715 亿 kW，是全国电力总装机容量的 21.6%。2008 年我国水力发电量为 6533 亿 kWh，是全国各种能源总发电量的 16.4%。2008 年底，我国水电在建规模为 7000 万 kW，这是一个前所未有的发展速度。

无论是开发建设新的水电站，还是对已有水电站进行修复、改造，水力发电都离不开水轮发电机组。以建坝技术来看，黄河三门峡大坝的质量很好，但由于泥沙的原因，机组发电能力大打折扣。所以，发展水电，一方面要研究建坝技术，强调与生态环境的协调；另一方面要研究水轮发电机组，使有限的水能更有效地转化为电能。

我国第一座水电站是云南石龙坝水电站，发电用的水轮机和发电机都是德国制造的。20 世纪 50 年代初期，我国主要学习前苏联的技术，1955 年制造了北京官厅水电站 1 万 kW 的水轮发电机组。1959 发电的新安江水电站，装备了 7.25 万 kW 的水轮发电机组，周恩来总理亲笔题词：“为我国第一座自行设计和自制设备的大型水力发电站的胜利建设而欢呼！”1987 年，黄河龙羊峡水电站发电，装备有单机容量 32 万 kW 的机组，这是当时由我国设计、制造的最大容量的水轮发电机组。2005 年 7 月，由外国公司设计、国内工厂制造的三峡左岸电站 70 万 kW 机组投产发电。2007 年 7 月，由国内工厂独立设计、制造的三峡右岸电站 70 万 kW 机组投入运行。

三峡水轮发电机组，无论是当初的研究、设计、决策，还是 26 台机组投产后的检验、评估、结论，都离不开“原型水轮机的研究”。想当初，为了弄清 70 万 kW 水轮机的运行状况，我们的工程师遍访了世界上装有 50 万 kW 以上机组的水力发电站；为了给三峡左岸机组投产前准备预案，我们的工程师在大江南北调查了与三峡机组相似的 49 台水轮发电机组；为了对投入运行的 26 台 70 万 kW 水轮机的运行状况，给国家和社会一个交代，我们邀请有资质的试验单位，对 5 种不同设计的水轮机全面进行了现场试验。对原型水轮机进行调查分析研究，对原型水轮机进行现场试验分析，这都是原型水轮机的研究方法。

水轮机模型研究可以在实验室内进行。水轮机原型研究，无论是现场调查研究，还是现场试验研究，都要在现场进行，都会对电厂的电力生产和运行调度带来某种“不便”。正是由于这个原因，原型水轮机运行研究比之模型水轮机的试验研究，难度更大、费用更高，加上试验方法的局限性，使得原型水轮机运行研究难以得到更广泛认同和支持。也正因为如此，我在这里，代表作者，对书中涉及到的国内、外许多水电厂，表示敬意和感谢，并希望在原型水轮机的运行研究方面，继续获得你们的支持。

黄源芳、刘光宁、樊世英三位同志，是我国水电设备的技术专家，他们参与了国内许多重大水电机组的咨询、研究、设计和运行调查，尤其为三峡水轮发电机组成功投入运行作出了贡献。他们合著的《原型水轮机运行研究》一书，正是他们多年来工作经验的总结和亲身体会，我很荣幸能与他们分享他们的研究成果，也希望他们的成果能得到更广泛传播。

原型水轮机的运行研究和模型水轮机的试验研究，是水轮机技术研究方法中相互补充、不可替代的基本研究方法，在我国水电事业快速发展的今天，必将为更加有效地将水能转化为电能作出更大贡献。

中国工程院院士 

2009年12月18日