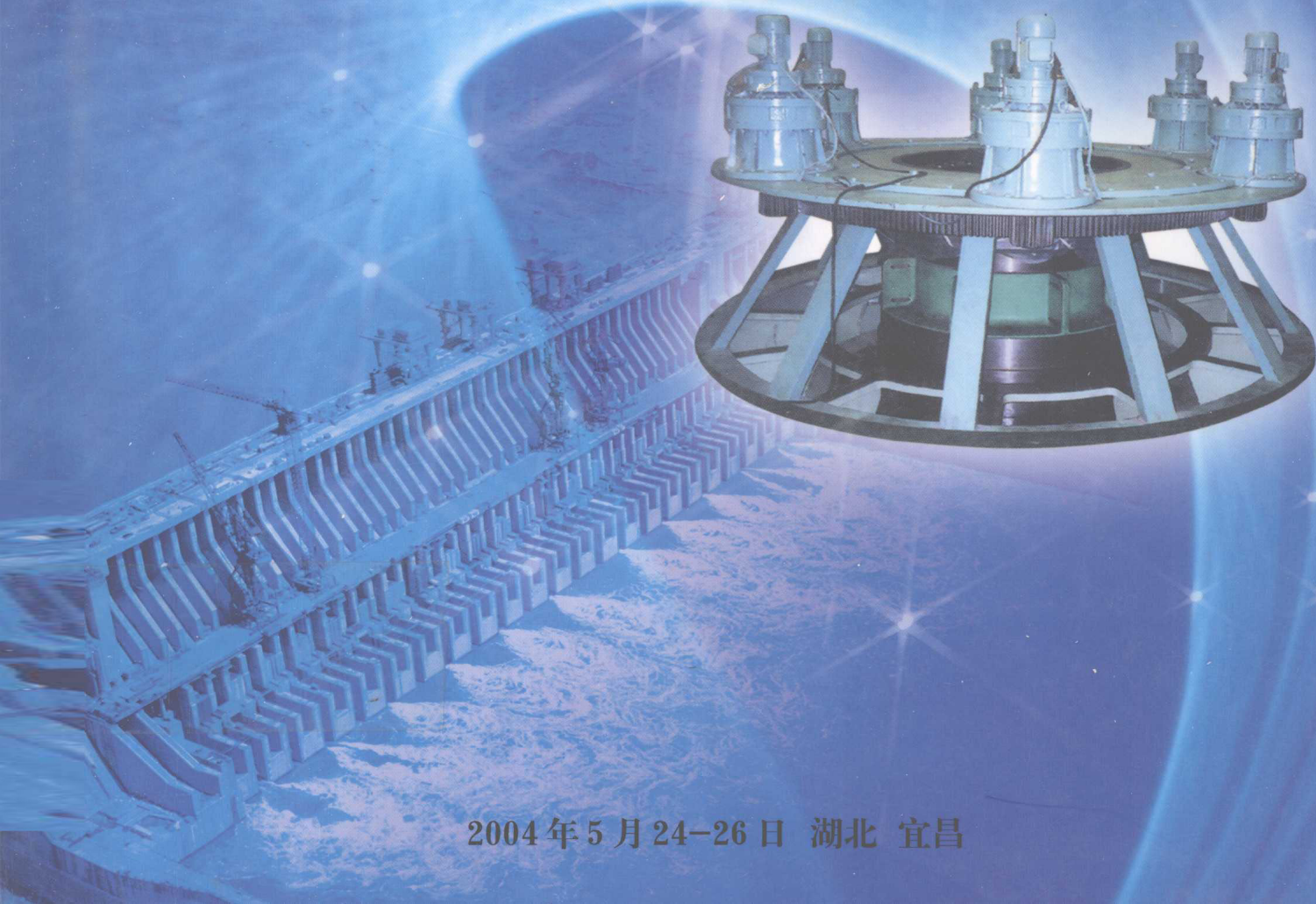


# 2004 水力发电国际研讨会 论文集

(下 册)

主办单位：中国长江三峡工程开发总公司  
湖北清江水电开发有限责任公司  
中国水力发电工程学会  
中国水利学会



2004年5月24-26日 湖北 宜昌

## 2004 水力发电国际研讨会组织机构

### 组织委员会

组织委员会主席： 陆佑楣 中国大坝委员会主席

#### 组织委员会副主席：

朱尔明 中国水利学会理事长、中国大坝委员会副主席  
周大兵 中国水力发电工程学会理事长、中国大坝委员会副主席  
陈方枢 中国安能建设总公司总经理  
林初学 中国长江三峡工程开发总公司副总经理  
郭建堂 中国水利水电建设集团公司总经理  
李菊根 中国水电工程顾问集团公司总经理  
汪金元 湖北清江水电开发有限责任公司副总经理

#### 组织委员会委员（以姓氏笔划为序）：

于文星 中国长江三峡工程开发总公司办公室主任、中国大坝委员会副秘书长  
王 宁 中国华电集团公司工程建设部副主任  
尹 炼 中国南方电网有限公司国际合作部主任  
左 强 国家自然科学基金委员会水利学科项目主任  
许可达 三峡建设委员会装备司司长、中国大坝委员会副秘书长  
齐志坚 国家电网公司国际合作部主任  
曲 波 中国大唐集团公司工程管理部主任  
刘金焕 国电大渡河流域水电开发有限公司总经理  
吴世勇 二滩水电开发有限责任公司总经理助理、规划发展部主任  
李赞堂 中国水利学会秘书长  
邴凤山 中国水力发电工程学会秘书长、中国大坝委员会副秘书长  
陈东平 中国华能集团公司水电开发部经理  
钮新强 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院院长  
高 波 水利部国际合作与科技司司长  
贾金生 中国水利水电科学研究院副院长、国际大坝委员会副主席  
贾彦兵 中国国电集团公司工程建设部副主任  
袁 德 中国电力投资集团公司安全生产部经理  
谭少华 湖北清江水电开发有限责任公司副总经理  
潘罗生 龙滩水电开发公司总工程师

#### 组织委员会秘书长：

陈洪斌 中国长江三峡工程开发总公司国际合作部副主任  
陈润发 湖北清江水电开发有限责任公司科技办主任  
王连祥 中国水利水电科学研究院教授级高工

技术委员会：

技术委员会主席：

潘家铮 中国工程院、中国科学院院士、中国大坝委员会名誉主席

C. B. Viotti (巴西) 国际大坝委员会主席

技术委员会副主席：

张津生 中国大坝委员会副主席

曹广晶 中国长江三峡工程开发总公司副总经理

高季章 中国水利水电科学研究院院长、中国大坝委员会秘书长

L. Berga 西班牙大坝委员会主席

技术委员会委员 (以姓氏笔划为序)：

付元初 中国水利水电建设集团公司副总经理

申茂夏 中国水利水电第七工程局副局长

汪小刚 中国水利水电科学研究院岩土所所长

周建平 中国水电工程顾问集团公司总工程师

张 诚 中国长江电力股份有限公司三峡电厂厂长

吴晓铭 国电大渡河流域水电开发公司总工程师

杨建明 湖北清江水电开发有限责任公司副总工程师

林绍忠 长江科学院总工程师

周厚贵 中国葛洲坝集团公司总工程师

陈厚群 中国水利水电科学研究院教高、中国工程院院士

高凤龙 中国水利水电科学研究院国科处副处长

梅锦煜 中国安能建设总公司总工程师

曹征齐 中国大坝委员会副秘书长

鲁一晖 中国水利水电科学研究院结构所所长

蒋国澄 中国水利水电科学研究院教授级高工

Andre Bergeret (法国) 国际大坝委员会秘书长

Charlwood (美国) 国际大坝委员会混凝土专业委员会主席

K. BABA (日本) 国际大坝委员会副主席

Seok-Ku Ko 韩国大坝委员会主席

技术委员会秘书长：

唐 澍 中国水利水电科学研究院机电所所长

张国新 中国水利水电科学研究院结构材料所所长

沈紫坪 《水电站机电技术》编辑部主任

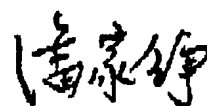
## 前 言

水力发电是一种可再生的清洁能源，在人类社会与经济发展中起到了不可替代的作用。但是，由于各种原因近 20 多年来水电发展在世界范围内呈减缓趋势。尽管如此在许多发展中国家包括中国，水电水利事业的取得了蓬勃的发展，技术发展硕果累累。为了促进中国水电行业同各国同行的交流，中国长江三峡工程开发总公司、湖北清江水电开发有限责任公司、中国水力发电工程学会和中国水利学会联合举办了“2004 年水力发电国际研讨会”。会议于 2004 年 5 月 24 日—26 日在中国宜昌三峡工程现场召开，参会代表近 300 人，来自 20 多个国家和地区。会议收到论文 133 篇，会议文集用中、英文印，分为上、中、下三册，论文涉及以下几个主要方面：

- 高面板坝设计、施工及监测
- 混凝土大坝的设计、施工及运行管理
- 大体积混凝土配合比优化设计与外加剂的管理使用
- 水电站大型水轮机组的稳定性与运行经验
- 水电站的增容与改造。

我相信文集反映了近年来水电枢纽和大型水轮机技术方面的丰富成果。衷心地希望这本文集将为水电水利行业的决策者、投资者、研究人员和工程师提供有价值的参考。

潘家铮



2004 水力发电国际研讨会 技术委员会主席

2004 年 5 月 20 日 于北京

## 目 录 (下册)

三峡工程: 左岸电站水轮机 .....	1
<i>Jacques Brémond, Gérard Vuillerod</i>	
尼那灯泡贯流式水轮机选型与结构设计 .....	8
<i>王君利, 玛·弗朗索瓦</i>	
三峡水轮机转轮固液两相三维紊流计算及磨损预估 .....	14
<i>高忠信, 张世雄, 陆力</i>	
水头变幅大的混流式水轮机 CFD 分析与优化 .....	23
<i>刘胜柱, 罗兴铸, 郭鹏程, 梁武科</i>	
苏只水电站尾水管的 CFD 分析与优化设计 .....	28
<i>郭鹏程, 罗兴铸, 郑小波, 梁武科</i>	
混凝土蜗壳内部的三维流动分析 .....	33
<i>郑小波, 罗兴铸, 郭鹏程</i>	
应用空间导叶的混流式水轮机三维湍流计算和试验分析 .....	39
<i>张 梁, 吴玉林, 杨建明</i>	
三峡左岸电站 3 号机起动试运行水压脉动与机组振动测试 .....	47
<i>唐 澍, 符建平, 薛付文, 熊 浩, 潘罗平</i>	
三峡左岸电站水轮发电机组水力稳定性分析与现场试验 .....	51
<i>田子勤, 邵建雄, 刘景旺, 郑莉媛</i>	
混流式模型水轮机整体三维粘性流动计算 .....	56
<i>肖惠民, 杨建东, 张梁</i>	
探讨提高水轮机稳定性的对策 .....	61
<i>孙鸿秉, 初曰亭</i>	
二滩水电站大型水轮机组的稳定性探讨 .....	66
<i>陈飞翔, 田开华</i>	
三峡水轮机的三维非定常湍流计算和压力脉动分析 .....	71
<i>邵奇, 刘树红, 戴江</i>	
三峡电站水轮发电机组的振动对厂房结构的影响研究 .....	77
<i>欧阳金惠, 陈厚群, 李德玉</i>	
水布垭水电站设置最大出力的概要与分析 .....	84
<i>杨建明</i>	
抽水蓄能电站侧式进/出水口水力特性研究 .....	90
<i>张兰丁</i>	
运用 RBF 对空隙进行在线监测和故障诊断以及 对大型水轮发电机定子杆的振动分析 .....	98
<i>Jiang Jin, Liu Guanglin, Chen Qiquan, Tang Shaohua, Tao Zhijian</i>	
防泥沙腐蚀的涂层研究进展 .....	106
<i>Hans Aunemo, Alain Demers, Olav Rommetveit, Bernard Jacquet, Dennis Gray</i>	
运用先进场测量方法进行可探测水力发电状态检查 .....	114
<i>Halvard Bjørndal</i>	
从环保型水轮机及其操作机构发展过程中得到的经验 .....	123
<i>K.V. Pekler, Y.V. Sapronenko, A.A.Chernigovsky, LMZ, St. Petersburg,</i>	

天荒坪抽水蓄能电站水泵水轮机调试中的问题 .....	127
<i>何永泉, 张启平, 王炎</i>	
葛洲坝机组的现场试验与状态检修 .....	134
<i>艾友忠, 卢进玉, 吴炜</i>	
飞来峡水电站发电机的运行故障分析 .....	141
<i>邓东, 孙玉田, 李金香</i>	
混合专家系统在水轮机组状态监测与故障诊断中的应用 .....	145
<i>刘光临, 蒋 劲, 符向前</i>	
基于 SIMSEN 软件的水轮发电机瞬态运行方式的仿真研究 .....	150
<i>李桂芬, 孙玉田, 董旭松</i>	
古力电站二号机组的改进 .....	158
<i>Hans Aunemo, Carlos Azuaje, Geir Gulbrandsen, Pedro Zambrano</i>	
俄国水轮机设备整修中的问题和趋势 .....	165
<i>V.A.Demianov, A.A.Sotnikov, A.K.Malyshv LMZ,</i>	
龚嘴水电站水轮发电机组改造增容 .....	170
<i>任开福</i>	
吉林省湾湾川水力发电厂机组增容改造 .....	175
<i>邹玉涛</i>	
古田溪水力发电厂匹配性整体改造研究 .....	182
<i>徐世元, 郑志泰</i>	
对日本多用途大坝新运行方法的建议 .....	189
<i>Mizuho Imamura, Toru Hino, Yasuyuki Houchi</i>	
浅析三峡水库的发电能力——从气候变异与人类活动的影响来看 .....	196
<i>刘 攀, 郭生练, 熊立华, 王才君</i>	
清江隔河岩水电厂十年运行分析评价 .....	202
<i>夏维进, 刘祥红, 凌世河, 张文选, 刘朝晖</i>	
抽水蓄能电厂在寡头垄断市场的购电优化策略 .....	209
<i>齐志刚, 王金文, 张勇传</i>	
浅论环境影响评价在水利水电工程建设中的作用——以张峰水库工程为例 .....	215
<i>李振海, 赵蓉, 陈凯麒</i>	
南水北调中线工程北京段主要环境影响问题及缓解措施研究 .....	222
<i>赵蓉, 李振海, 祝秋梅</i>	
土工合成材料在佛子岭抽水蓄能电站下库过水堆石坝中的应用 .....	229
<i>陈景富, 王力理</i>	
浆砌石双曲拱坝施工技术及质量控制研究 .....	232
<i>崔 雷, 徐中秋, 王国强, 王国欣</i>	
天生桥一级水电站放空洞高压弧门设计与运行 .....	237
<i>汪志龙</i>	
抽水蓄能电站地下厂房智能优化识别研究 .....	242
<i>马震岳, 孙万泉, 严旭东, 齐俊修, 杜晓京</i>	
小湾拱坝 700m 高边坡的加固 .....	249
<i>邹丽春, 汤献良, 许晖</i>	

## 三峡工程：左岸电站水轮机

Jacques Brémond, Gérard Vuillerod  
ALSTOM Power Hydro

**摘要：**Alstom 公司负责三峡左岸水电站的 8 套水轮机和发电机的设计，制造，安装和调试，并且提供左岸全部 14 台机组的控制系统。本文介绍了由 Alstom 提供的水轮机设计方案，阐述了组织这种世界性产品制造和安装如此大机组的挑战性。整个工程的不同阶段培训了大批中国公司的技术人员。2003 年 10 月，通过对三台机组四个月的成功试运行证明：Alstom 为此项目提供的工程和操控方面的性能都是有效的。

**关键词：**Francis 水轮机，三峡，设计，制造，安装

ALSTOM 为左岸发电站提供了 8 套水轮机和发电机以及全部 14 台机组的控制系统。本文着重介绍水轮机方面。

### 1 机组描述

#### 1.1 常规数据

主要水力特性如下：

额定净水头：	80.6 m
最大净水头：	113 m
额定功率：	710 MW
最大功率：	852 MW
运行最大流量：	>1000 m <sup>3</sup> /s
转速：	75 rpm

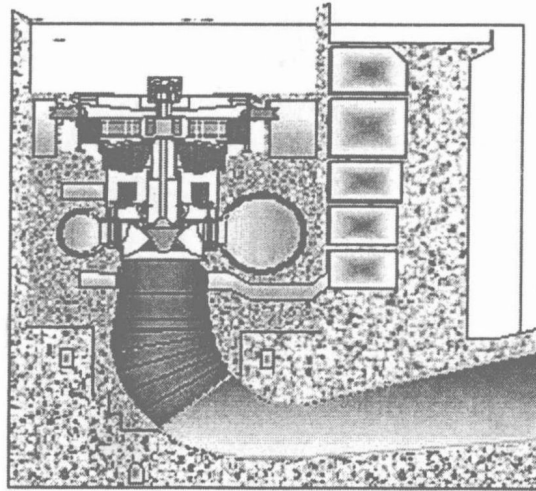


图 1 电站剖面图

由于水库蓄水需要一个过程，因此第一台机组必须在低于最小毛水头 61 mWC 的工况下运行，这突破了常规设计的制约。通常机组水头变化范围非常大，毛水头大约在 70 到 113 m 之间。

三峡机组采用传统方法设计的 Francis 水轮机，由客户指定。然而这些水轮机机械显著的特性在于它们超出常规的尺寸，转轮出口直径达到 9 800 mm (Itaipu 的 1.21 倍)，这意味着在优化选型，材料花费，密封焊接，制造过程，运送和操作方面新的挑战。

其它主要尺寸如下：

蜗壳进口上游水阀门直径：	12 400 mm
导水机构镗孔直径：	11 600 mm
导水机构高度：	2 990 mm
蜗壳进口中心线与机组中心之间的距离：	12 500 mm
导水机构中心线和顺这些水轮尾水管最低点的距离：	30 000 mm

现在我们来回机的不同部件，依据惯例我们将按照水流方向依次介绍。

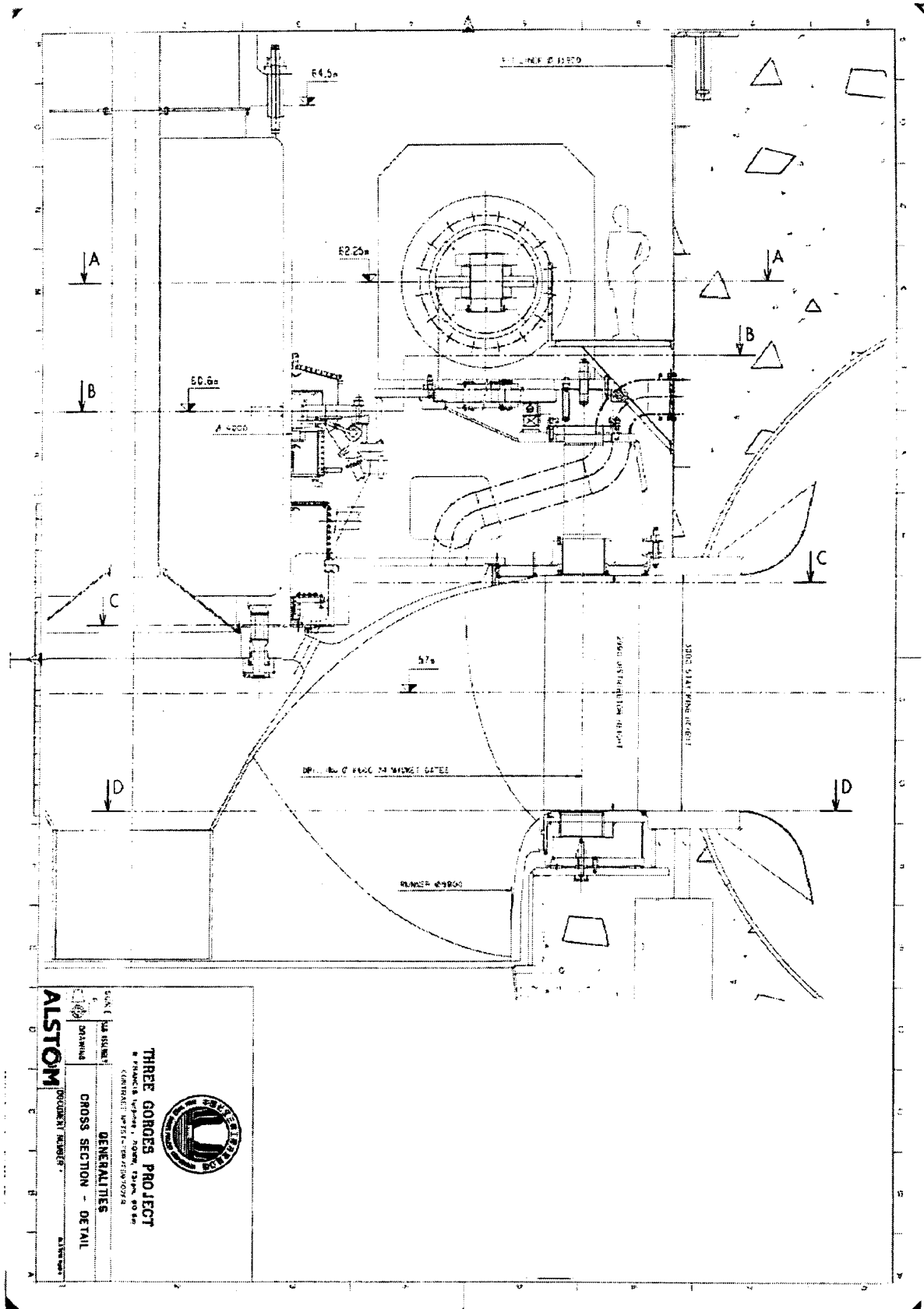


图 2 机组剖面图



## 1.2 蜗壳

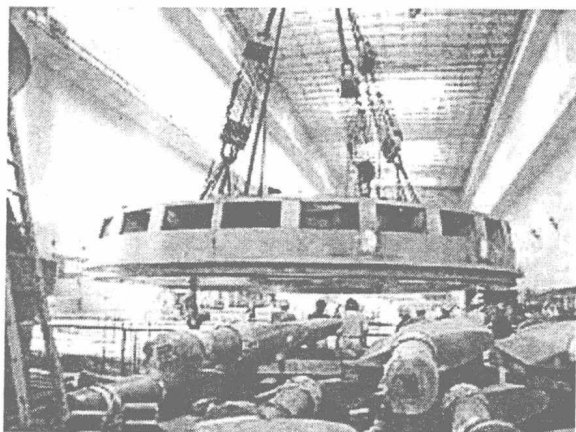
蜗壳壁板选择高强度碳钢(500 MPa),在厂房制造并现场焊接。此设计能够经受超过 134 mWC 的压力。装配和混凝土浇铸过程中,蜗壳将被支撑在 15 个混凝土支墩上。

混凝土浇铸过程中,蜗壳内壁压力始终控制在运行压力的最小值之下,以便确保运行期间它们能够紧贴混凝土支墩,从而防止机组震动。

## 1.3 座环

座环由两个厚板制成的环和 24 片固定导叶组成,形状随蜗壳从进口到出口的外部轮廓变化,共有四种类型的固定导叶。在厂房里将蜗壳连接板焊接到座环上。

## 1.4 导水机构



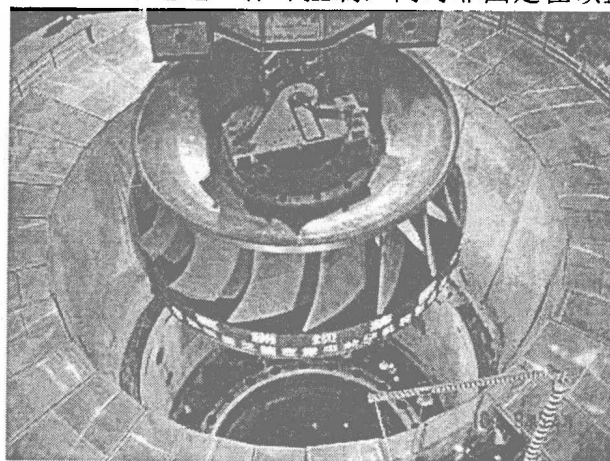
底环(114 吨)和顶盖(304 吨—如图 3),由四个部分焊接在一起,支撑 24 片不锈钢制成的导叶,等级为 Cr13-Ni4,用三个自润滑材料制成的轴承支撑,其中两个在顶盖上,一个在底环上。

每片导叶重 9.5 吨,对应水力总剖面的部分是焊接在耳轴上的中空板状结构。

底环固定在转轮室上,顶盖焊接于座环的上环。一张不锈钢耐磨板固定在顶盖和底环上,在靠近导叶水平位置上

图 3 水电站顶盖安装现场  
容纳一个铜制密封装置,用来减少停机时导叶和顶盖座环之间的泄漏。而且,通过在靠近冲程末端的操作机构上安装预压扭矩装置,可以限制导叶之间的泄漏。

导叶被两个油压伺服发电机(压力 6.3 MPa)通过工作环控制,同时靠固定在顶盖上的自润滑材料制成的部分和一组臂杆引导。两个相邻导叶之间的控制杆上安装了牵引装置,用来防止额外压力传送到蜗壳上。



## 1.5 转轮

转轮有 15 个叶片,采用 Cr13-Ni4 型马氏不锈钢铸件。考虑到它的尺寸(直径 10 600 mm,高 5 080 mm,重 425 吨),转轮的制造,加工和运输需要特殊的工具(如图 4 所示)

图 4 转轮安放现场

## 1.6 尾水管锥管和尾水管肘管里衬

锥体用 25mm 金属板做里衬,转轮出口 1500mm 外延部分由不锈钢制成,其余是碳钢。设计有两个通道方便安装转轮检查平台。

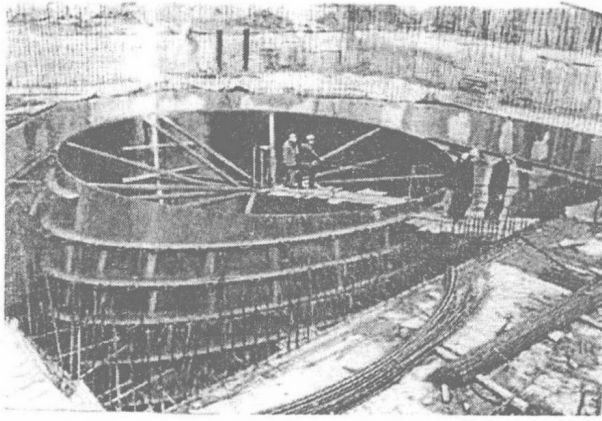


图 5 浇筑混凝土前的尾水管

肘管里衬中间位置在水速达到 6 m/s 之前是连续的。尾水管里衬总重 260 吨。尾水管出口向机械中心下游延伸 50mm。

两个支墩将尾水管分为三个通道，每个支墩出口宽 9000mm，高 12400mm。人孔门放在中间通道的顶端。尾水管出口两边安装两个由直径 800mm 水力控制阀控制的泄水管。

### 1.7 主轴

中空结构的主轴直径 4000mm，重 109 吨，没有轴承支撑环。较低部分通过预压调节螺栓连接到转轮上。上部通过预压杆和中空销连接发电机主轴。

沿着主轴装有 3 个轴承和一个推力轴承。水轮机导轴承装有 12 个倾斜垫。润滑油通过外部泵输送并通过外部热交换器冷却。

### 1.8 主轴密封

主轴密封采用水力轴向式。两个聚乙烯高分子材料制成的环装在不锈钢旋转耐磨盘上，通过水封和弹簧片产生作用。

## 2 技术转让

技术转让包括在规范里面。超过 40 个来自哈尔滨电机厂的技术人员跟随整个工程的每一步接受培训。包括如下领域：水力和机械设计，制造，质量担保和工程管理，装配以及试运行。

## 3 制造

### 3.1 机构

依据尺寸，不同部分的重量，和指定的进度表，零件在全世界好几个工厂进行加工制造如下表所示。如此复杂的工业设计体系必需建立强大的工程管理机构。

表 1 制造车间

组成部分	制造地
尾水管，蜗壳， 转轮室，机坑里衬	Baju, 中国, 现场车间 (全部 8 台机组)
座环	Alstom, Brasil (4) - HEC, China (4)
导水机构	Alstom, Brasil (2) - HEC, China (3) - Tianjin Alstom H., China (3)
水轮机主轴	Doosan, Korea (6) - HEC, China (2)
转轮	Alstom, France (2) - HEC, China (2 + 3 with GE, Norway + 1 with Alstom, France)
水轮机导轴承，轴封	Alstom, France (5) - HEC, China (2)

### 3.2 蜗壳

蜗壳壳板在现场附近的厂房制造。

### 3.3 座环

座环 6 个部分都要经过应力消除和热处理。座环在预装车间安装后再运送（如图 6 所示）

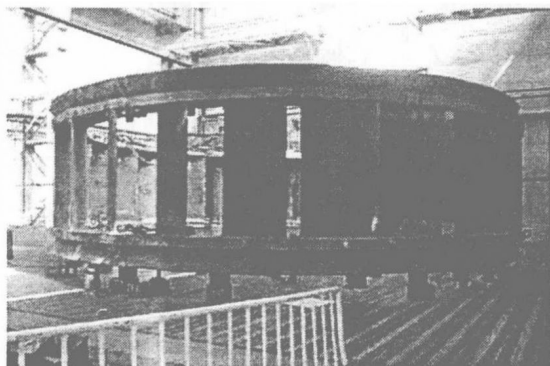


图 6 在中国 HEC 厂进行的座环预装

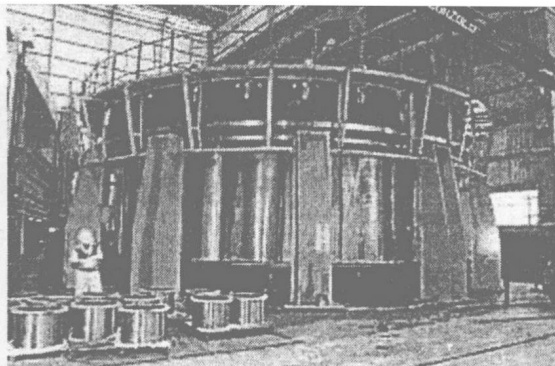


图 7 在巴西阿尔斯通厂预装的导水机构

### 3.4 导水机构

每个供应商提供的导水机构的预装都在工厂完成，便于检查现场安装时的可靠性和导叶在所有指定冲程下运行时的性能（如图 7 所示）。

### 3.5 转轮

15 个叶片全部采用数控 5 轴研磨机械进行加工。这种方法可以确保转轮和缩减尺寸模型测试之间的几何形状的良好匹配。

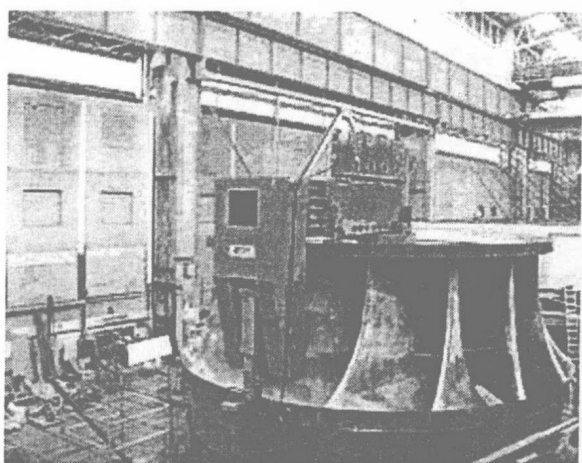


图 8 转轮在法国 La Ciotat 进行加工

转轮在 La Ciotat（法国）采用稍微不同的方法制造。与转轮上冠和下环相连的叶片局部穿透转轮下环较厚区域，通过重新焊接完成。这种处理方法除了减少焊接工作量之外，还可以很好的防止焊接过程中的变形。通过一系列样本测试可以对密封圈几何形状进行有效优化。

这项已经被阿尔斯通水电厂应用于好几个转轮的制造。

最后加工前已经加装了耐磨环（如图 8 所示），连接部分采用模板加工。转轮制造完成后进行了静平衡验证。

### 3.6 尾水管里衬

尾水管里衬也在现场附近的 Bajou 厂加工。锥体分为四部分，尾水管肘管分为 6 部分，并且都在车间进行预装。

### 3.7 主轴

主轴由碳钢锻造加工而成，并且进行了限制不平衡的完全加工。与转轮相连的较低部分采用模板加工。

## 4 装配

下面的篇幅主要介绍与水轮机装配有关的一些重要问题。其特征决定了必需进行现场加工来确保精度，并且要为埋入部分浇筑混凝土以及热膨胀时引起的变形留出一定的余量。

此外，由于每一部件的尺寸都超出常规，因此装配不同部分时需要大量的工具。

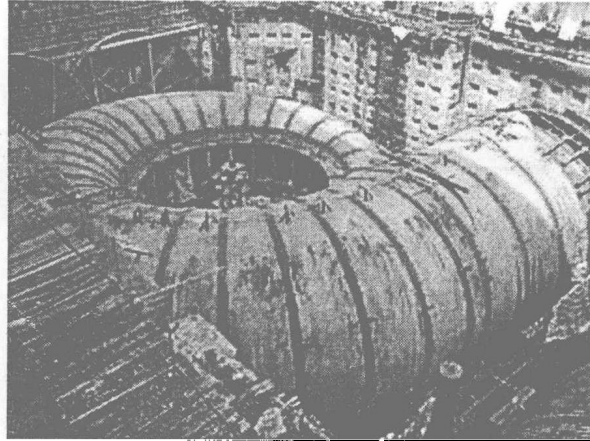


图 9

### 4.1 埋入部分

座环分为六个部分，每部分重达 65 吨，因此需要将它们局部贯穿焊接在一起。

焊接后的蜗壳用连接板定点安装在座环上。虽然没有进行装配压力蜗壳装配现场

测试，但蜗壳的所有焊接都受 UT 和 RT 控制。装配和浇铸过程中，蜗壳靠 15 个混凝土支墩支撑。

混凝土浇铸的整个过程中，蜗壳压力面置于 0.7MPa 的压力之下，低于最小运行压力，确保运行过程中，蜗壳能够紧贴混凝土支墩，从而防止机组震动。

为了测试混凝土浇铸过程中，蜗壳受压情况，在蜗壳上游套筒上焊接一个测量装置，并且将一个虚拟导水机构固定在座环内侧，这些工具可以在多台机组重复使用。

混凝土浇铸完以后，必须进行座环和转轮室的尺寸校合。并对座环和导水机构之间的密封面进行火焰切割和充实处理，确保设计精度。

### 4.2 非埋入部分

现场没有好的调节装置，导水机构的密封装置的加工精度很难保证。考虑到车间和现场不同的空间位置，用楔子调整顶盖和底环的位置。

在座环和转轮室上都钻了固定螺纹孔和装配孔（如图 10 所示）。水轮机主轴和较低的发电机主轴的连接体采用特殊的钻孔机和镗削机进行现场加工。

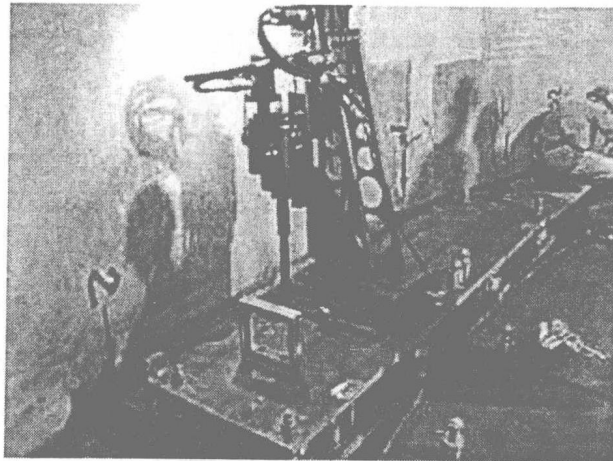


图 10 采用钻孔机和镗削机在座环上加工抽头孔

## 5 试运行

### 5.1 试运行进度表

第一台 ALSTOM 机组（5 号）在 2003 年 7 月 7 号组装完成，并在 7 月 13 号完成了试运行，比计划时间提前了将近 4 个月。第二台机组（6 号）在 8 月 23 号组装完成，紧接着第三台（4 号）在 10 月 22 号组装完成，比第一台仅仅晚了三个半月。

这三台机组每台都有 600MW 的出力，这样在试运行的毛水头工况下，机组最大出力比合同规定值超出 20 到 30MW。

## 5.2 机组运行调查

ALSTOM 水电设备公司在 IPT(巴西)和 TGHP 的协助下,于 2003 年 9、10 月份,对 6 号机组进行了更广泛的运行测试。测试目标为验证水轮机在不同的额定运行条件下以及过渡过程中的水力性能。这种方法便于 TGHP 制定更合适的运行计划,以确保设备长期运行过程中的性能。

四个座环和三个转轮叶片都装有传感器,用于记录应变,加速度和压力。从旋转传感器上传送的 75 个信号和从固定传感器上传送的 32 个信号一起进行同时同步记录。从旋转部分发出的信号通过主轴上的通风管传送到转子顶端。

应力测量为不同运行条件下水轮机的座环和转轮提供了有效信息。应用动态应力可以保证转轮和座环持续稳定的运行。机组处于最大额定流量下,没有发现固定导叶的明显振动。

根据 ALSTOM 的经验,在高水头工况下这种性能也将保持。

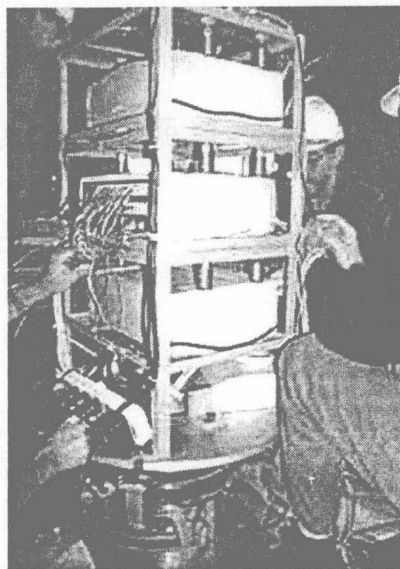


图 11 机组旋转信号处理

## 6 结论

这项特殊的工程从 1997 年签订合同起,到 2003 年完成第一台机组的试运行,经历了各个不同的阶段。ALSTOM 公司在证实和共享技术、经验方面保持了充分的真实性和有效性,不仅在掌握大型机组的设计和技术参数方面,而且在组织一个世界性制造业的复杂管理和指导多个承包商进行的现场施工方面都卓有成效。

## 鸣谢

感谢所有为这项具有首创性和挑战性的大工程的成功实现提供帮助的人们,以及 ALSTOM 公司在全世界具有奉献精神的团队和为整个三峡工程提供支持的承包商和客户。

## 参考文献

- [1] J.C. Diana. Three Gorges Project Mechanical and Technical Description of the turbines, IAHR congress, Singapore, 1998.

## 尼那灯泡贯流式水轮机选型与结构设计

王君利<sup>1</sup>, 玛·弗朗索瓦<sup>2</sup>

1, 天津阿尔斯通水电设备有限公司;

2, 国阿尔斯通水机技术中心

3,

摘要: 尼那水电站位于中国青海省黄河干流上, 装有 4 台 40MW 灯泡贯流式水轮发电机组, 转速 107.1rpm, 其水轮机转轮直径达 6m, 为目前中国境内运行的大型灯泡贯流机组之一。也是阿尔斯通公司近代的代表性产品。该机组是天津阿尔斯通公司设计制造的。本文介绍了阿尔斯通公司在贯流水轮机方面的先进技术, 并介绍了针对该电站特点, 进行水轮机选型, 转轮开发及模型试验的过程; 同时介绍了水轮机结构设计特点, 如转轮采用缸动式结构、叶片密封形式、导水机构安全保护措施、主轴密封设计、组合轴承设计等。最后, 机组实际运行证明, 该产品的设计制造是成功的。

关键词: 尼那 贯流式 选型 设计

### 1 前言

尼那水电站位于中国青海省贵德县黄河干流上。坝高 48.7m, 坝长 603m。水库正常蓄水位 2235.5m, 为日调节水库, 河床式电站。地面厂房内装有 4 台灯泡贯流式水轮发电机组, 单机容量 40MW。电站的主要参数: 最大水头 18.1m; 额定水头 14.0m; 最小水头 12.1m; 加权平均水头 14.6m。正常尾水位(相应流量  $Q=666.0\text{m}^3/\text{s}$ ) 2219.35m; 最低尾水位(相应流量  $Q=123\text{m}^3/\text{s}$ ) 2217.90m。泥沙特性, 从  $0.08\text{kg}/\text{m}^3$  (多年平均含沙量) 到  $117\text{kg}/\text{m}^3$  (汛期) 变化。

该电站在贯流产品中, 其显著特点是:

- 水头较高;
- 变幅较小;
- 出力较大;
- 汛期水流的泥沙含量较大。

该电站的建成将是黄河上第一座装备大型灯泡贯流式水轮发电机组的电站。因此合理的水轮机参数和结构设计, 是保证机组长期稳定安全运行的关键, 同时也可为黄河上游其它待建的灯泡贯流式电站提供借鉴。

### 2 水轮机选型和水力优化设计

阿尔斯通公司早在 1950 年就开始研究开发大出力灯泡贯流式机组, 至今在技术方面积累了丰富的经验, 其产品遍布世界各地。如:

- 世界上首座潮汐电站---法国朗斯电站, 装有 24 台出力 10 MW 灯泡贯流式机组;
- 美国石岛电站, 装有 8 台出力 54 MW 灯泡贯流式机组, 其水轮机转轮直径达 7.4 m; 至今这些代表性产品仍在安全运行。

近年来，随着市场需求的增加（尤其是中国市场），阿尔斯通公司在贯流式水轮机性能方面又取得长足进展，这首先要感谢它在科研方面的长期不懈的努力和试验设备上的巨大投资（见图1）。

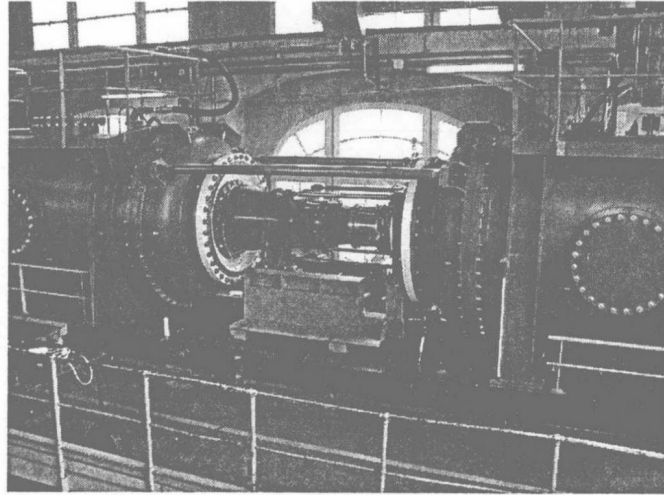


图1 尼那模型机和试验台

针对尼那项目，自1995年，阿尔斯通公司就着手研制开发4叶片、轮毂比为0.38的模型转轮，应用现代的CFD工具（水力的 and 机械的）对尼那项目的转轮和流道进行两个方面的优化（见图2和3）。

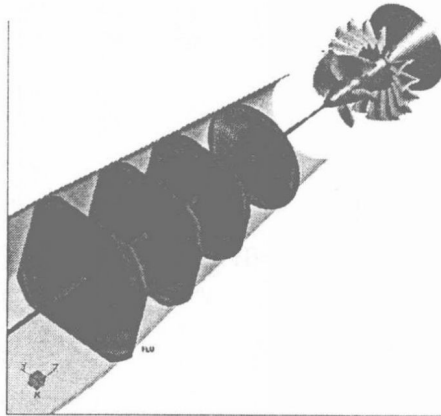


图2 尼那项目的水力设计

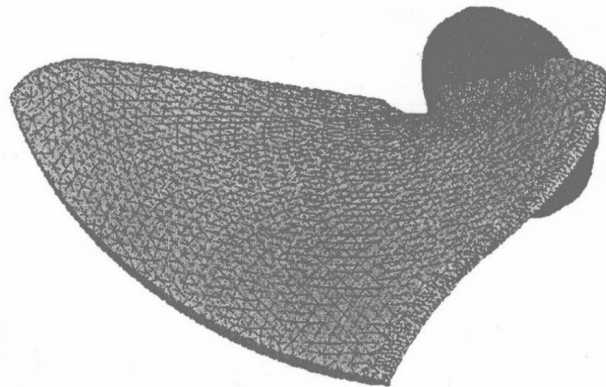


图3 尼那转轮的强度计算

该模型转轮初步试验就获得了很高的能量指标，最优单位转速和最优单位流量符合尼那项目要求，并与 CFD 计算结果一致。1998 年尼那项目进行了招标。在投标阶段阿尔斯通公司推荐了两个方案，并对两个方案进行了分析比较，见表 1。主要不同是转轮直径：6.0m 作为方案 I，5.85m 为方案 II。

表 1 水轮机选型方案比较

	主方案	备选方案
最大水头 $H_{max}$ (m)	18.1	18.1
加权平均水头 $H_{av}$ (m)	14.6	14.6
额定水头 $H_r$ (m)	14.0	14.0
最小水头 $H_{min}$ (m)	12.1	12.1
额定出力 $N_r$ (MW)	41.0	41.0
额定转速 $n$ (rpm)	107.1	107.1
转轮直径 $D_1$ (m)	6.0	5.85
额定流量 $Q_r$ (m <sup>3</sup> /s)	316.7	317
额定点效率 $\eta_r$ (%)	$\eta_r+0.07$	$\eta_r$
最高效率 $\eta_{max}$ (%)	$\eta_{max}+0.02$	$\eta_{max}$
加权平均效率 $\eta_{av}$ (%)	$\eta_{av}-0.05$	$\eta_{av}$
理论允许吸出高度 (m)	-12.0	-14.1
叶片相对流速 (m/s)	36.1	35.6
机组安装高程 (m)	2204.8	2204.0

经过评标，阿尔斯通公司凭借优秀的技术参数及其在灯泡贯流式机组多年的制造业绩，最终赢得了该项目。考虑到方案 I 和方案 II 的效率指标相当，方案 I 的空蚀性能更好，因此将转轮直径 6.0m 方案作为最终的设计方案。

### 3 水轮机模型试验及验收

阿尔斯通公司在 1995 年开发的模型基础上，结合真机情况，重新对进口流道进行了优化，包括座环进入筒型线和增加辅助支墩。2001 年中期阿尔斯通公司完成了初步模型试验，并于 2001 年 10 月通过了业主模型验收试验。合同试验包括：能量试验，空蚀试验，飞逸试验，尾水管压力脉动试验，差压法测流试验等。最终试验结果完全达到了合同保证值。见表 2。

表 2: 水轮机效率对比

	合同保证值	模型试验结果
模型最高效率	$\eta_{max}$	$\eta_{max}+0.1\%$
真机最高效率	$\eta_{max}$	$\eta_{max}-0.02\%$
额定点模型效率	$\eta_r$	$\eta_r+0.1\%$
额定点真机效率	$\eta_r$	$\eta_r+0.03\%$
模型加权平均效率	$\eta_{av}$	$\eta_{av}+0.084\%$
真机加权平均效率	$\eta_{av}$	$\eta_{av}+0.01\%$

### 4 结构设计特点

水轮机剖面图见图 4，机组采用两支点双悬臂结构，水轮机转轮和电机转子共用一根轴。整个机组主支撑为管形座，灯泡体前端设有两个辅助支撑以加强机组刚度。机组主要由管形座、导水机构、转轮室、尾水管、转轮、主轴、受油器、主轴密封、水导轴承、组合轴承、流道盖板和接力器等构成。



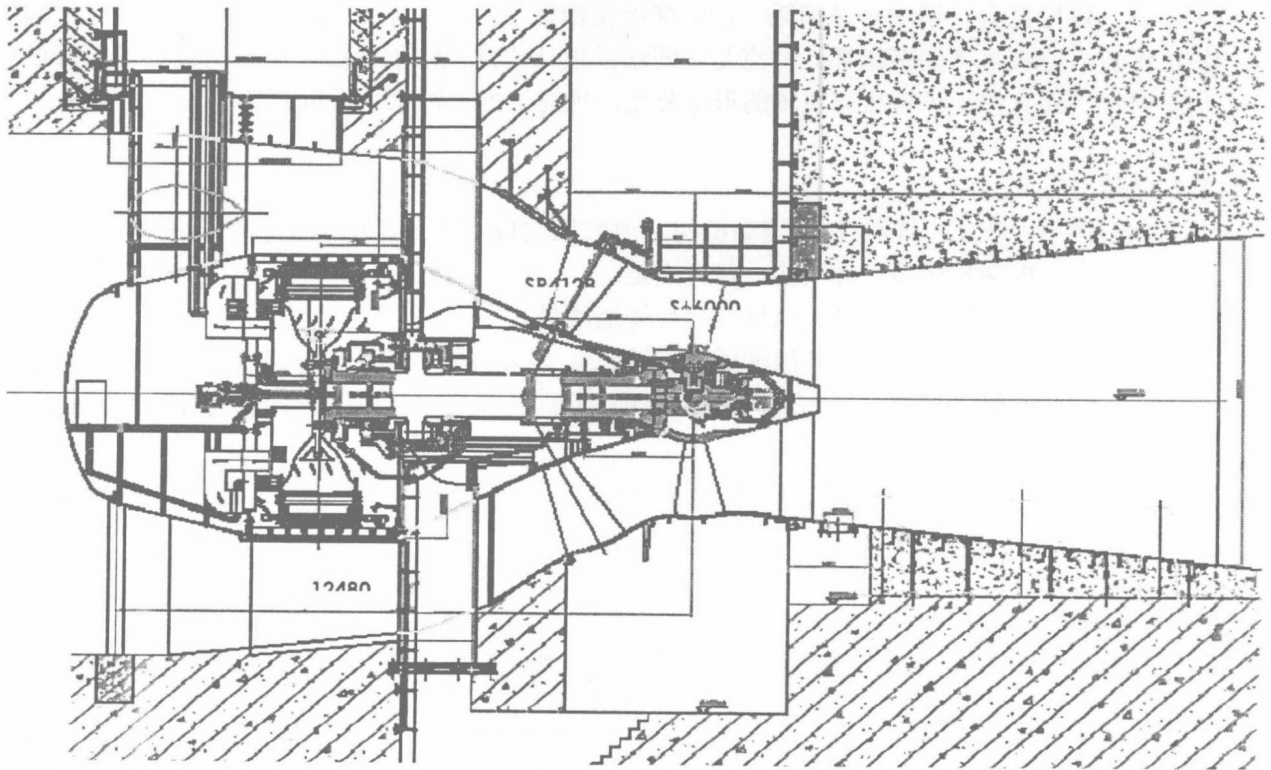


图4 机组剖面图

#### 4.1 管形座

管形座由内锥和外锥构成，其上游与电机定子把合，下游与导水机构把合，其上下进入筒埋入混凝土中，形成机组主支撑，抵抗机组翻转力矩，扭转力矩。尼那机组管形座采用钢板焊接结构，考虑运输原因，内锥分两瓣，外锥分四瓣，其特点是：

- 依据有限元计算结果，对内锥支撑筋板合理布置，提高了管形座刚度，降低轴向变形，提高机组运行稳定性。
- 内外锥通过特殊定位工装进行现场组装，然后浇筑混凝土，这样不但保证了内外锥准确定位，更主要的是减少了座环的机加工工时。

#### 4.2 导水机构

导水机构是机组产生环量、调节流量的部件。主要由内外导水环、导叶、控制环及传动系统构成。内外导水环采用钢板焊接结构，内导水环为整体结构，外导水环分为两半；导叶轴套采用自润滑钢背轴瓦；转臂与控制环的连接采用球铰轴承；导叶采用碳钢整铸结构，轴颈及导叶搭接面堆焊不锈钢。控制环采用滚珠摩擦，降低了转动摩擦力。其操作机构特点是：

- 为保证机组安全运行，采用重锤独立关机操作方式，即接力器为单作用结构，仅起打开导叶作用。在任何运行工况，包括最大水头，调速系统油压消失等，完全靠重锤的重力将机组关闭，确保机组安全关机，提高操作的安全性和可靠性。
- 增加导叶摩擦装置，当安全装置破断后，由于摩擦力作用，使导叶处于受控状态，阻止导叶在水力作用下自由摆动，避免破坏相邻导叶引起的连锁反应而造成机组飞逸。

#### 4.3 主轴