

文章编号: 1006-4710(2015)01-0007-06

# 大广坝水电站水轮机提效增容改造研究

王钊宁<sup>1</sup>, 罗兴铸<sup>1</sup>, 郭鹏程<sup>1</sup>, 程宦<sup>2</sup>, 王亚林<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

2. 东方电气集团 东方电机有限公司, 四川 德阳 618000)

**摘要:** 基于海南大广坝水电站水轮机改造项目, 通过分析电站运行中存在的水力不稳定现象和水轮机效率水平偏低的原因, 提出了水轮机的改造方案和目标; 讨论了水力参数和设计理念; 介绍了改造前后转轮流道的本质差异。通过全流道数值仿真计算, 定性评估了改造后水轮机的稳定性, 定量标定了水轮机的效率水平, 预期了模型水轮机的综合特性曲线。结论认为, 改造后模型水轮机最优效率大于 93.8%, 额定效率 91%, 加权平均效率 89.3%; 原型水轮机最优效率 95.1%, 额定效率 92.4%, 加权平均效率 90.8%; 与改造前相比, 加权平均效率增幅可达 2.0%。

**关键词:** 大广坝水电站; 混流式水轮机; 改造; 水力设计; 效率; 稳定性

**中图分类号:** TP311.11      **文献标志码:** A

## Improving efficiency and increasing capacity of the hydraulic turbine in Daguangba Hydropower Plant

WANG Zhaoning<sup>1</sup>, LUO Xingqi<sup>1</sup>, GUO Pengcheng<sup>1</sup>, CHENG Huan<sup>2</sup>, WANG Yalin<sup>2</sup>

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, China)

**Abstract:** A new retrofitting method and target are presented by means of analyzing the phenomenon of hydraulic instability and the reason of relatively low turbine efficiency based on the transformation project referring to Daguangba Hydropower station in Hainan, meanwhile, hydraulic parameters selection and design conception are discussed in details. Also, this paper introduces the essential difference of runner channel between pre-and-post retrofit. According to the full passage numerical simulation computation, the hydraulic stability of retrofitted Francis runner is qualitatively evaluated and the efficiency level is quantitatively indicated. Finally, the paper has predicted the comprehensive feature curves of the model water-turbine. The conclusions indicate that the model turbine optimum efficiency exceeds 93.8%, the rated efficiency and weighted average efficiency are respectively 91% and 89.3% compared with 95.1% optimum efficiency, 92.4% rated efficiency, and 90.8% weighted average efficiency originating from the prototype turbine; the weighted average efficiency of the model turbine significantly increases 2.0% by contrast with the one of the prototype turbine.

**Key words:** Daguangba Hydropower Plant; francis turbine; retrofitting; hydraulic design; efficiency; stability

收稿日期: 2014-06-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479166); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20126118130002); 陕西省自然科学基金基础研究计划基金资助项目(2012JM7005)。

作者简介: 王钊宁, 男, 博士生, 研究方向为水力机械技术。E-mail: wzn8223087@163.com。

通讯作者: 罗兴铸, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为流体机械流动理论与优化设计、流体机械振动与稳定性、水力机组状态监测与故障诊断。E-mail: luoxq@xaut.edu.cn。

大广坝水电站位于海南省东方市昌化江上,装有4台单机容量为60 MW的混流式水轮发电机组,机组额定转速  $n_r=214.3$  r/min,额定水头  $H_r=73$  m,最高水头  $H_{max}=87.4$  m,额定流量  $Q_r=92.9$  m<sup>3</sup>/s,水轮机转轮型号为D85。电站建于上世纪90年代,第一台机组发电至今已近20年。水轮机经过20年的运行,过流部件已经到了加速破坏期,目前维修量明显加大,检修期显著加长,尤其是转轮,随着维修及磨损的增加,水轮机的效率及稳定性显著降低,电站的经济效益逐年下降。

目前,我国已建成的中小型水电站中有相当部分是上世纪90年代前建成的,这些机组受研制水平限制,虽然当时先进,但经过多年运行,也出现了一些问题。加之随着机组服役年限增加,以及电网对水电机组承担调峰的要求加大,都需进行技术改造<sup>[1]</sup>。

近年来CFD技术、刚强度计算技术及模型测试技术等的发展也为电站的增容改造提供了新的设计依据。王国海等<sup>[1]</sup>分析了水轮机改造中的原因和一些关键技术,并展示了CFD等新技术在三峡水轮机开发中提升机组综合性能所发挥的重要作用。柯剑等<sup>[2]</sup>对龚嘴水电站2#水轮机的设计思路、结构改进、参数优化等多方面进行了阐述,优化后的转轮运行状况良好,达到了改造的预期目的。

## 1 大广坝水电站机组存在的问题

### 1.1 大广坝水电站运行现状

电站近五年运行的平均数据(即每台机组每月最大权重的出力情况)和2008年的数据(见图1)基本相同。

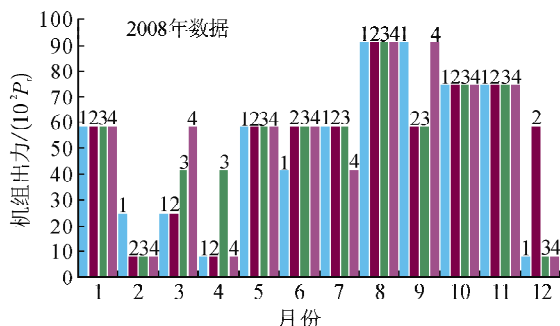


图1 2008年月最大权重机组出力  
Fig. 1 Monthly maximum weight unit capacity in 2008

从图1可以看出,一年之中,只有汛期8月份4台机组和9月份部分机组大部分时间满负荷运行,丰水季节10月份和11月份4台机大部分时间也只是带80%额定出力  $P_r$ ,一年中大部分时间大多机组

发  $P_r$  的60%,其余时间运行在  $P_r$  的50%以下,甚至只有  $P_r$  的10%。因此,大广坝水电站水轮机运行条件不是很理想。

### 1.2 水轮机效率水平偏低

D85转轮是东方电机厂上世纪80年代末基于二维积分理论,采用手工绘图方法研发的产品,当时有一定先进性,但和现代水轮机相比,各项水力参数水平有明显差距。

限于当时的设计理念和开发手段,D85转轮具有那个年代水轮机的显著特点。一是模型水轮机最优效率偏低,仅有92.23%,且效率圈降落梯度较大,高效运行区范围很小,水轮机加权平均效率偏低。根据电站出力加权因子(见表1)计算,D85模型水轮机和电站原型水轮机加权平均效率分别为87.1%和88.6%;二是95%出力限制线非常靠近最优区,严重制约了原型水轮机运行范围的选择。

表1 电站出力加权因子  
Tab. 1 Weighted factors of output

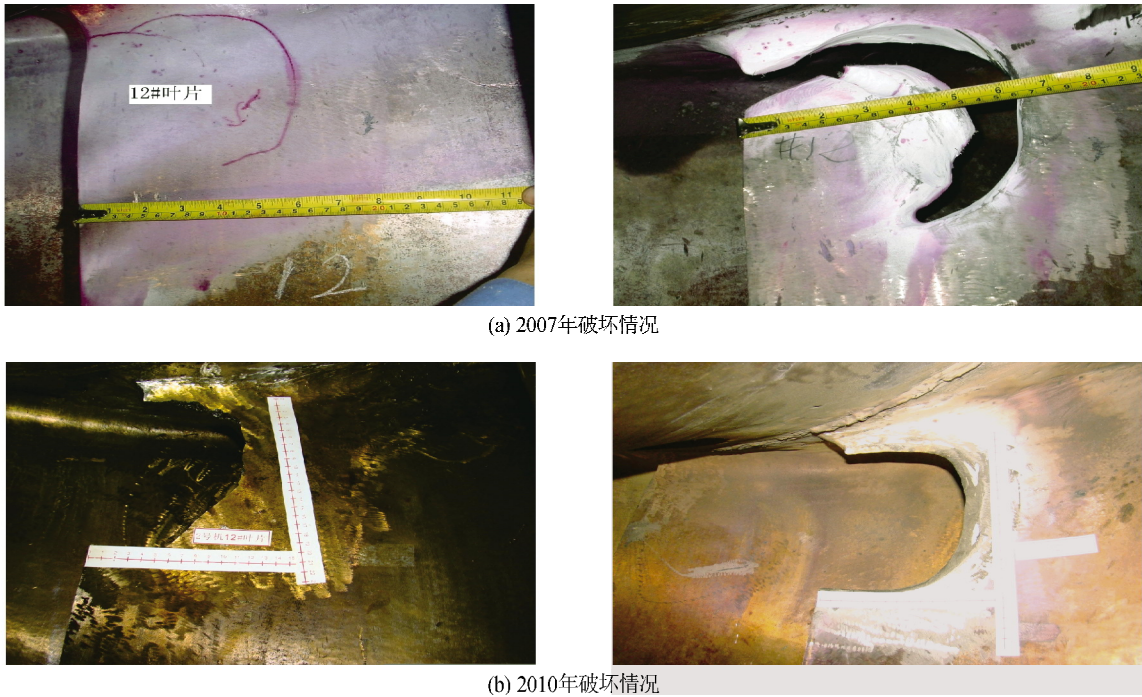
水头 $H/m$	不同出力下的运行概率				
	$P$	$0.90P$	$0.75P$	$0.60P$	$0.40P$
87.4	0.41	1.24	5.40	2.49	0.83
82.0	8.85	13.00	20.88	10.37	3.32
78.0	0.14	10.93	8.44	5.95	0.41
73.0	0.00	1.11	0.56	0.14	0.00
68.0	0.00	1.52	1.38	0.56	0.14
62.9	0.00	0.00	0.41	0.69	0.83

说明:表中  $P$  的单位为 MW。

### 1.3 水轮机存在不稳定现象

虽然大广坝水电站多年来运行状态良好,但是和现代水轮机相比,稳定性还是有一定差距。一是传统叶片负荷分布不均匀,压力突变导致空蚀现象比较严重,而且多年的空化空蚀修补,累积面积较大,主要集中在上冠两叶道间和泄水锥周边;二是传统叶片转轮在部分负荷时压力脉动现象比较突出,尤其是尾水管混频低频压力脉动和分频高频压力脉动,导致多个叶片出现裂纹;三是与现代金属材料 and 加工技术相比,原来转轮的材料性能和加工精度存在明显不足。

总之,受客观条件和主观因素制约,大广坝转轮体已到了加速破坏期,特别是转轮叶片出现裂纹(主要集中在叶片出水边靠近上冠区域)的累积总片数和长度都在逐年增加,其中大部分是穿透性裂缝。致使转轮修复量和维修任务明显增加,检修工期加长,运行安全风险增加。图2(a)和(b)是2#机组转轮12#叶片同一位置分别在2007年和2010年检修时的破坏情况。



(a) 2007年破坏情况

(b) 2010年破坏情况

图 2 2007 年和 2010 年 2# 机组转轮 12# 叶片破坏情况

Fig. 2 Failure of 12# blade of 2# runner in 2007 and 2010

## 2 大广坝水电站改造分析研究

### 2.1 水轮机改造方案分析

图 1 说明大广坝水电站大多时间运行在部分负荷,很少有弃水和超出力要求。

统计数据表明,该电站一年有 8 个月时间运行水头都在 75 m 以上;据 2009 年全年运行水头统计计算,其加权平均水头  $H_a$  约为 77.9 m;另外,据电站最新运行统计资料(见图 3),2007 年 7 月到 2012 年 6 月共 60 个月的月平均运行水头数学平均为 77.3 m。因此,提高额定水头  $H_r$ ,有限增加机组出力是可行的改造方案。

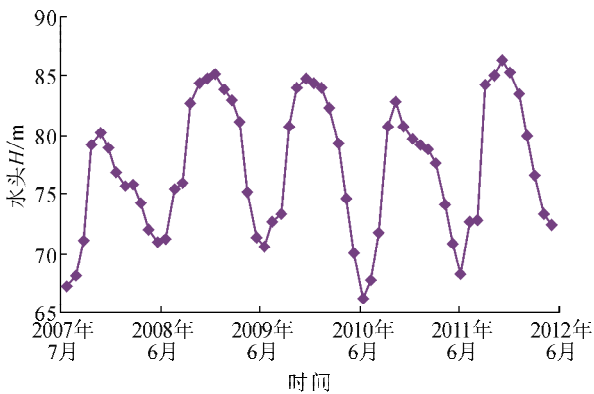


图 3 月平均运行水头

Fig. 3 The average monthly operating head

现代水轮机设计理念和设计水平已经达到了一个全新的高度,借助三维几何设计软件和 CFD 分析工具,可以大幅提高水轮机水力性能。大广坝电站通过对活动导叶和转轮整体优化设计,水轮机效率将会显著提高,稳定性将会大幅改善机组。

因此,大广坝水电站水轮机改造定性为提高额定水头条件下的提效增容改造,改造范围为活动导叶和转轮。

### 2.2 单位目标流量

大广坝水电站水轮机比转速  $n_s = 248.5 \text{ m} \cdot \text{kW}$ ,比速系数  $K = 2123$ ,机组选型参数水平偏低。同步转速选择偏低,几何上导致了导叶高度偏低,同步转速  $n$  和导叶高度  $B_0$  的不足,严重影响水力参数和几何参数多方面的合理搭配,很大程度上制约了水轮机改造的效果<sup>[3-4]</sup>。

导叶相对高度  $B_0/D_{th}$  是在电站建设初期反复论证选择的,和比转速一样,具有一定的时代意义。电站最大水头  $H_{max}$  越低,导叶相对高度  $B_0/D_{th}$  越高; $B_0/D_{th}$  越低,水轮机强度越高,更适应较高设计水头。随着科技的进步,材料性能的提升,现代水轮机导叶相对高度相应也有所提高,尤其是高比转速水轮机。大广坝电站最大水头不超过 90 m,导叶相对高度  $B_0/D_{th} = 0.25$ ,明显偏低,目前这个水头段的  $B_0/D_{th}$  一般取值  $0.3 \sim 0.35$ 。导叶高度不足,也是本次改造工作的最大先天障碍。

电站统计资料表明,机组的负荷大多集中在 20~50 MW 之间,占到 65%左右;50~60 MW 的出力占 10%左右;10~20 MW 的出力占 13%左右;1~10 MW 的出力占 12%左右;根据机组的负荷分配和目前水力设计理念,大广坝电站在现有导叶高度条件下,水轮机的最优单位流量  $Q_{10}$  应该减小到  $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$  左右(D85 最优单位流量  $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ),才有利于提高水轮机最优效率和加权平均效率。

### 2.3 设计水头与额定水头选择

设计水头  $H_d$  的高低决定着水轮机的运行区域以及水轮机的参数优化, $H_d$  取值合理,水轮机将具有良好的参数匹配和运行范围,运行更加稳定合理<sup>[5-6]</sup>。仅水力参数搭配的合理性考虑,水轮机的最优水头和最优流量成反比匹配关系,最优流量越大,最优水头越低,反之则越高。大广坝水电站导叶高度偏低,较高的  $H_d$  容易达到,而较低的最优水头不易实现。图 4 显示,电站水轮机最优水头落在 82 m 左右最为理想,在现有导叶高度条件和单位流量下,既要实现 82 m 最优设计水头,又要使水轮机高效稳定,实践上存在很多问题。转轮改造必须充分考虑设计的困难,在改善小流量水轮机性能的同时,尽可能地保持水轮机的设计水头  $H_d$  不增加或略有降低。

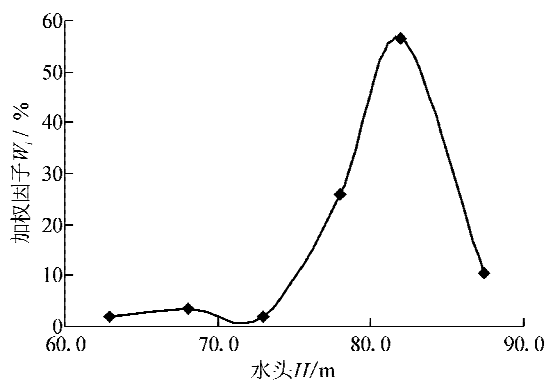


图 4 水头与加权因子关系

Fig. 4 Relationship between water head and weighted factor

额定水头  $H_r$  的高低决定着水轮机的能量特性以及运行区域的合理性,在转轮直径的变化不会太大的情况下, $H_r$  选取就显得尤为重要<sup>[7-8]</sup>。改造机组受导叶高度的限制,水轮机单位流量的增加很有限,伴随着流量的增大,水轮机将会有下列主要性能恶化现象:①空化性能变差,磨蚀增加;②小负荷区水轮机的叶道涡严重,流态变差,引起压力脉动幅值升高,稳定性变差;③水轮机的效率降低。

电站额定水头  $H_r$  提高到 77 m 为宜,原因有三:①有利于限制水轮机引用单位流量,在保证水轮机额定出力不变或略有增加的情况下,明显改善以

上各方面水力性能;②增加低水头水轮机的出力余度,提高低水头水轮机效率,提升电站汛期经济效益;③电站多年的运行统计资料表明,适当提高额定水头有利于提升水能利用率,有利于水轮机在长期稳定运行区工作。

### 2.4 水轮机水力改造目标

大广坝机组投运时间将近 20 年,已到了加速老化阶段,改造的重点是提高机组效率,拓宽稳定运行范围,满足电站调频、调峰的需要。基于电站条件和目前技术,提出以下水力改造目标。

#### 1) 提高水轮机效率

模型水轮机最优效率大于 93.5%,力争达到 94.0%;尽可能保持原有水轮机的额定效率水平;基于电站加权因子和基础转轮水平,改造水轮机的加权平均效率至少提高 1.7%。

#### 2) 增强水轮机稳定性

水轮机稳定性指标有尾水管涡带、叶道涡、叶片头部脱流空化、压力脉动和高部分负荷压力脉动等等<sup>[4-6]</sup>。本文主要从以下几方面增强了水轮机稳定性:①消除高部分负荷压力脉动;②尽可能把叶道涡初生线和发展线向小流量方向推移;③通过调整叶片进口冲角,把进口脱流空化排除在运行水头以外;④叶片出水边修形,防止发生破坏性卡门涡;⑤合理分布叶片出水边环量,降低尾水管压力脉动;⑥通过叶片压力负荷优化,改善水轮机空化性能。

### 2.5 转轮流道改造前后外形对比

图 5 是转轮流道改造前后外形对比图。改造转轮主要做了以下几方面改进:①上冠形线下压;②下环形线改为圆弧、椭圆和直线三段连接;③叶片进水边采用负倾角空间形式并修型;④出水边加长,并修改下环锥角。

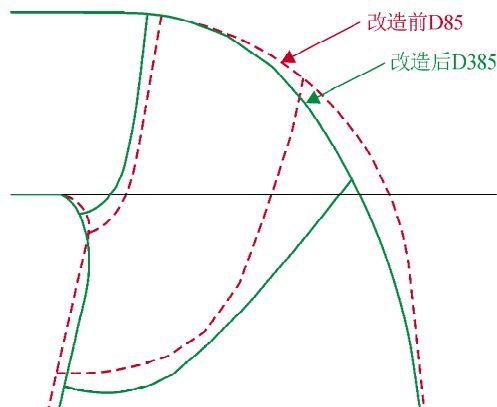


图 5 改造前后转轮流道外形对比

Fig. 5 Comparison of runner meridional contour before and after retrofitting

### 3 CFD 数值分析

#### 3.1 数值模型

CFD 数值仿真技术是现代水轮机水力开发的主要工具之一,其数值结果是水力工程师评判水轮机性能的主要依据<sup>[9]</sup>。大广坝水电站水轮机改造工作是在模型转轮 D385 和模型试验的基础上进行的,不仅做了叶片和导叶修行设计,而且严格依据大广坝水电站流道,对改造前后模型水轮机做了全流道数值仿真分析,为水轮机效率修正提供了严格的数值依据。

图 6 是模型水轮机改造数值模型,所有数值结果均基于模型水轮机研究讨论。数值计算采用商业 CFD 软件 CFX 进行,湍流模型选用 SST  $k-\omega$  模型,具体网格划分方法和数值求解过程可参考文献<sup>[10]</sup>、<sup>[11]</sup>。

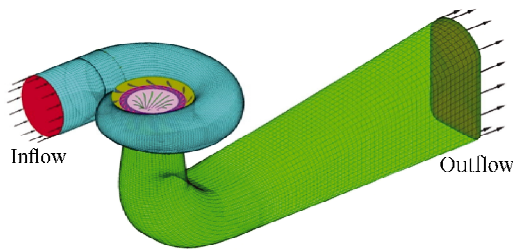


图 6 模型水轮机数值模型  
Fig. 6 Model turbine geometry

#### 3.2 导叶相对位置优化

导叶设计完成后,通常需要在周向方向上寻找最优匹配位置。在导叶一个相邻周期内,相对位置每变化  $2^\circ$  做一次最优工况数值计算,通过计算结果随相对位置的变化曲线即可标定出最佳相对位置。图 7 说明导叶从正 X 方向顺时针旋转  $4^\circ$  达到最优匹配位置。

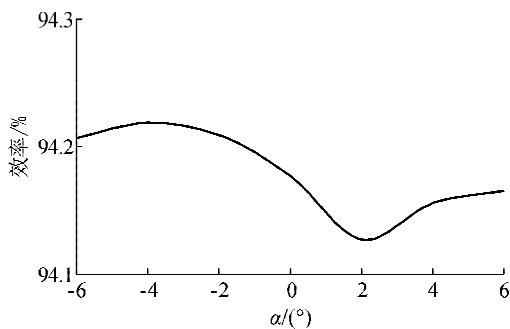


图 7 相对位置优化  
Fig. 7 The relative position optimization

图 8 是导叶周向布置位置优化前后,水轮机在最优单位转速时随导叶开度变化的效率曲线。结果

表明,优化后水轮机效率在最优水头区域有  $0.1\%$  的增幅。另外,固定导叶和活动导叶搭配越合理,水流运动就会更稳定,压力脉动更小。

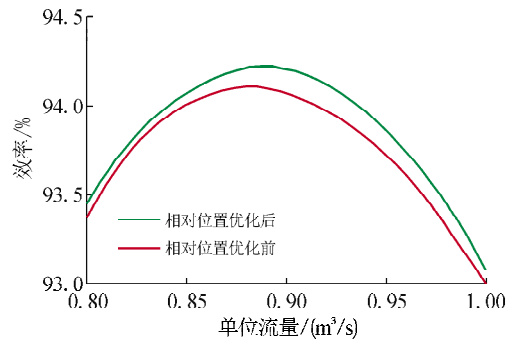


图 8 相对位置优化前后对比  
Fig. 8 Comparison of relative position before and after optimization

#### 3.3 优化前后最优单位转速下效率曲线对比

本文分别对大广坝改造前的水轮机 D85、基础水轮机 D385 和优化后的模型水轮机做了数值分析。图 9 是三种方案在最优单位转速下随导叶开度变化的数值效率曲线,可以看出:①三组曲线在额定单位流量附近效率相当,且 D85 转轮峰值效率靠近额定流量,最优工况基本和试验曲线重合,较真实反映出原水轮机的水力特性;②改造前的基础模型水轮机峰值效率达到  $93.5\%$ ,最优单位流量也在  $0.94 \text{ m}^3/\text{s}$  附近;③改造后,水轮机最优工况向小单位流量移动,约在  $0.94 \text{ m}^3/\text{s}$  附近,模型最优效率达到  $94.0\%$ ,水轮机不但基本保持了原来水轮机额定效率水平,而且实现了小单位流量工况下效率的大幅度跃升。

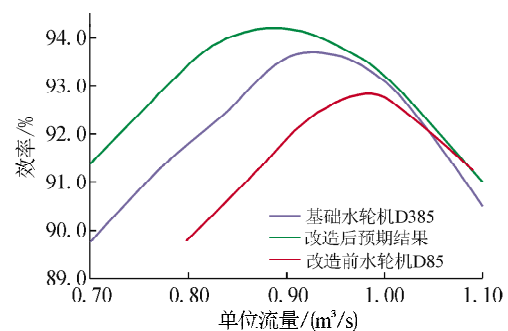


图 9 三种方案数值计算比较  
Fig. 9 Comparison of three schemes numerical results

数值结果表明,改造后水轮机最优效率达到  $94.0\%$ ,额定效率大于  $91.0\%$ ,多个小流量工况效率增幅可达  $2.0\%$ ,可以保证水轮机的加权平均效率至少提高  $1.7\%$  的目标。

#### 3.4 额定工况校核计算

额定水头一般较最优水头偏小,有必要对额定单位转速工况进行校核计算。图 10 是最优单位转



速 78 r/min 和额定单位转速 75 r/min 下变导叶开度的水轮机效率对比曲线,可以看出,随着单位转速的升高,高效区向大单位流量偏移,说明水轮机在额定工况至少可以保证最优水头下额定单位流量工况点的水轮机效率水平,额定工况水轮机的目标效率预期完全可以保证。

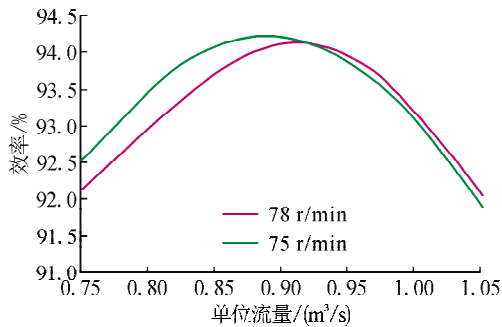


图 10 额定工况效率校核计算

Fig. 10 Efficiency checking calculation result at rated condition

#### 4 结 论

在 D385 模型水轮机试验结果的基础上,大广坝水电站改造水轮机性能优良,达到目标。

1) 通过采用转轮流道上冠形线下压、下环形线修型、叶片进水边采用负倾角空间、出水边加长等几何措施,改善了水轮机的空化性能和尾水管压力脉动特性。

2) 通过提高额定水头,拓宽水轮机运行范围,减小最优单位流量,提高水轮机加权平均效率,采用“X”叶片,改善水轮机空化性能,实现了水力参数和几何参数的合理搭配。

3) 原型水轮机最优效率 95.1%, 额定效率 92.4%, 加权平均效率 90.8%。与改造前相比,加权平均效率增幅可达 2.0%。

#### 参考文献:

[1] 王国海,陶星明. 水轮机增容改造与新技术的应用[J]. 大电机技术,2001,(7):1-7.  
Wang Guohai, Tao Xingming. The uprating of hydraulic turbine and application of advanced technology [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2001, (7):1-7.

[2] 柯剑,向虹光,程远照. 龚嘴水电站 2# 水轮机增容改造综述[J]. 四川水力发电,2008,27(4):112-114.  
Ke Jian, Xiang Hongguang, Cheng Yuanzhao. Refurbishment of No. 2 turbine unit for installed capacity increase at Gongzui Hydropower Station[J]. Sichuan Water Power, 2008, 27(4):112-114.

[3] 徐洪泉,王万鹏,李铁友. 论水轮机比转速选择和水电

站稳定性的关系[J]. 水力发电学报,2011,30(5):220-223.

Xu Hongquan, Wang Wanpeng, Li Tiejou. Relationship of turbine specific speed choice and power station stability [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(5):220-223.

[4] 王钊宁,郭鹏程,罗兴铸,等. 溪洛渡水电站巨型混流式水轮机水力开发研究[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(8):681-687.

Wang Zhaoning, Guo Pengcheng, Luo Xingqi, et al. Hydraulic design of giant-scale francis turbine in Xiluodu Hydropower Plant[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(8):681-687.

[5] 黄源芳,刘光宁,樊世英. 原型水轮机运行研究[M]. 北京:中国电力出版社,2010.

[6] 李启章. 大型水轮发电机组的振动稳定性问题[J]. 湖北电力,2001,25(4):20-23.

Li Qizhang. The problem of stability for the vibration on large hydro-turbine set[J]. Hubei Electric Power, 2001, 25(4):20-23.

[7] Liu Shuhong, Li Shengcai, Wu Yulin. Pressure fluctuation prediction of a model kaplan turbine by unsteady turbulent flow simulation[J]. Journal of Fluids Engineering, 2009, 131(10):101102.

[8] Romeo Susan-Resiga, Sebastian Muntean, Vlad Hasmatuchi, et al. Analysis and prevention of vortex breakdown in the simplified discharge cone of a francis turbine[J]. Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(5):051102.

[9] Guo Pengcheng, Luo Xingqi, Zheng Xiaobo, et al. CFD-based match design and improving performance for francis turbine components: proceedings of 2008 ASME fluids engineering conference, August 10-14, 2008[C]. Jacksonville, Florida, USA, 2008.

[10] 郭鹏程,罗兴铸,覃延春. 基于计算流体动力学的混流式水轮机性能预估[J]. 中国电机工程学报,2006,26(17):132-137.

Guo Pengcheng, Luo Xingqi, Qin Yanchun. Numerical performance prediction for a francis turbine based on computational fluid dynamics stage simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17):132-137.

[11] 郭鹏程,罗兴铸,刘胜柱. 离心泵内叶轮与蜗壳间耦合流动的三维紊流数值模拟[J]. 农业工程学报,2005,21(8):1-5.

Guo Pengcheng, Luo Xingqi, Liu Shengzhu. Numerical simulation of 3D turbulent flow fields through a centrifugal pump including impeller and volute casing [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8):1-5.

(责任编辑 王卫勋)