

文章编号:0559-9342(2008)03-0059-03

基于 CFD 的混流式水轮机转轮 增容防蚀改造

曾永忠,刘小兵,王辉艳

(西华大学能源与环境学院,四川 成都 610039)

关键词: 流体机械;增容防蚀;数值模拟;混流式水轮机

摘要: 因选型不当及下游修建电站的影响,周岗水电站的水轮机长期偏离最优工况区运行,不仅运行效率低,而且转轮空蚀破坏严重,导致机组稳定性差、出力严重不足。为了节省电站改造成本,在不改动水轮机其他通流部件的条件下,通过只更换转轮的技术手段来达到水轮机增容防蚀的目的。为此,新转轮的设计借助先进的数值模拟软件来评价其性能优劣,缩短了转轮的设计周期,降低了新转轮的生产成本,有效提高了水轮机的效率和出力,取得了显著的经济效益。

Renovation in the Output Increasing and Cavitation Prevention of Francis Turbine Runner Based on CFD

Zeng Yongzhong, Liu Xiaobing, Wang Huiyan

(School of Energy and Environment, Xihua University, Sichuan Chengdu 610039)

Key Words: fluid machinery; output increasing and cavitation prevention; numerical simulation; francis turbine

Abstract: Due to the influences of improper model choosing and the construction of downstream power station, the turbine of Zhougang Power Station has not been operating under the optimal working condition for a long time. Its operating efficiency is low and its runner is seriously damaged by cavitation. Both of them cause the worse stability of the unit and the serious inefficiency of output. To save the renovation cost and without changing other passage parts of the turbine, the purposes of increasing the output and cavitation prevention should be achieved by only changing the runner. Therefore, a new type of runner is designed by using advanced numerical simulation software to evaluate its performance, which has shortened the design period of the runner, lowered the production cost of the new runner, effectively improved the efficiency and output of the runner and achieved distinct economic benefit.

中图分类号:TV734.1

文献标识码:A

0 引 言

随着计算机技术的飞速发展,数值模拟技术被广泛应用于流体机械领域。目前,在水轮机研究领域,数值模拟试验台逐渐取代了真实的试验,这不仅可以节约大量试验经费、降低新水轮机的设计成本,而且可以大大缩短水轮机的生产周期。这种新的技术对旧水电站的增容防蚀改造尤其有现实意义。它意味着技术人员可以在水电站不停机的情况下,通过数值模拟找到旧水轮机问题的所在,从而有针对性地设计出新的转轮。实践证明,数值模拟方法用于旧水电站的改造可靠、方便和省钱^[1]。

周岗水电站位于雅安周公河流域,共装机1台,总装机容量1360 kW,水轮发电机组由重庆水轮机厂制造,型号为HL260-LJ-126;最大水头为 $H_{\max}=21.6$ m;平均水头为 $H_{CP}=20.8$ m;平均流量为 $Q_{CP}=35$ m³/s;额定出力 $N_r=1360$ kW;额

定转速 $n=300$ r/min;发电机型号为TS252/30-20;额定功率 $N_r=1360$ kW;额定转速 $n=300$ r/min。

该水电站于1959年投产以来已服役48年,机组设备陈旧,特别是水轮机转轮部分损坏十分严重。检修时发现存在以下问题:①转轮叶片空蚀严重,14个叶片中有7个叶片严重空蚀穿孔。②水轮机实际运行工况已经偏移最优工况区。近年来,由于下游兴建电站,周公河水电站的尾水位抬高了约2 m,因此电站平均水头已不是原来设计的20.8 m,其经常运行实际工作水头 $H=18.8$ m。③水轮机出力严重

收稿日期:2008-01-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50179021);西华大学重点实验室和重点学科建设基金项目(BZD0704)

作者简介:曾永忠(1969—),男,四川峨眉人,讲师,从事教学与科研工作。

不足。

综上所述,周公河水电站的水轮机由于当初选型不当和下游修建水电站等的影响,而使水轮机长期在偏离最优工况区运行,致使水轮机转轮遭到严重的空蚀损坏,水力效率低、出力不足,严重影响到电站的安全经济运行,必须尽早进行技术改造^[2]。

1 旧转轮内部三维紊流场的数值模拟和分析

1.1 计算模型

水轮机的实体模型和原型是由重庆水轮机厂提供的型号为 HL260 的转轮木模图并通过 3D 建模软件 GAMBIT 绘制,整个计算区划分为固定导叶区,活动导叶区和转轮区。转轮叶片和活动导叶以及固定导叶一起联合计算。图 1 给出了该水轮机转轮的单流道计算区域的三维图,与水轮机实际模型相比,计算中对流道做了以下简化处理:①计算中没有考虑转轮下环和上冠处的间隙,也就是没有把容积损失计算进去;②没有考虑转轮的金属材质的粗糙度对转轮水力性能的影响。

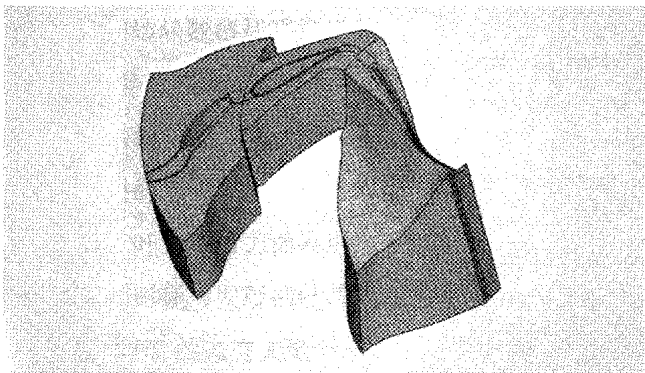


图 1 单流道计算区域

1.2 计算网格

计算区域的网格是应用可视化 ICG/AUTOGRD 网格生成软件生成的。计算区域借用 NUMECA 软件中专门针对叶轮的网格生成模块 AutoGrid5 整体划分网格,网格总数为 60 多万个。在生成网格过程中,壁面附近(近似于边界层内)网格的尺寸最小为 0.01mm×0.01 mm,网格尺寸沿壁面法向方向按几何级数的规律加密,网格数约为该方向网格总数的 1/4,边界层外的网格均匀分布。这样可以帮助设计人员比较清晰地了解叶片边壁上的水流流动情况,提高数值模拟的精度。

1.3 数值计算方法

数值计算采用了 NUMECA 公司适于叶轮机内部复杂流动求解的有效数值模拟工具—NUMECA FINE/Turbo7.4 软件包。该软件包应用 Jameson 的有限体积差分格式并结合 Baldwin-Lomax 湍流模型对相对坐标系下的三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程进行求解,采用显式四阶 Runge-Kutta 法时间推进以获得定常解。该软件为提高计算效率,应用了多重网格法和残差光顺等加速收敛措施,转轮与导叶的动静干涉采用混合平面法进行数据传递^[3-4]。

计算边界条件的给定如下:给定转轮进口设计水头和入

流角,给定转轮出口处的平均静压。壁面采用了绝热无滑移边界条件,与转轮叶片连接的上冠、下环以及整个叶片壁面定义为转动,而活动导叶和固定导叶及其附属的部分则定义为静止。活动导叶的开度旋转到设计工况的位置。本次计算只计算了在实际工作水头 $H=18.8$ m 下转轮内部的流动场情况。

2 旧转轮数值计算结果分析

2.1 叶片的静压力分布

从图 2a、图 3a 可以看出,工作面和吸力面负荷分布不均匀。工作面的下环附近有明显的高压圈,压力等值线从进口边到出水边沿流动分布得不均匀;叶片的吸力面靠近出水边附近,有明显的低压圈存在,这个位置正是在电站检修时发现的叶片空蚀发生部位。

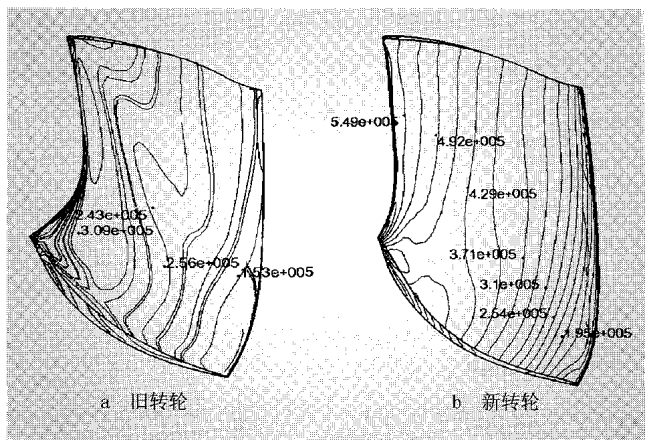


图 2 转轮叶片工作面静压力等势线

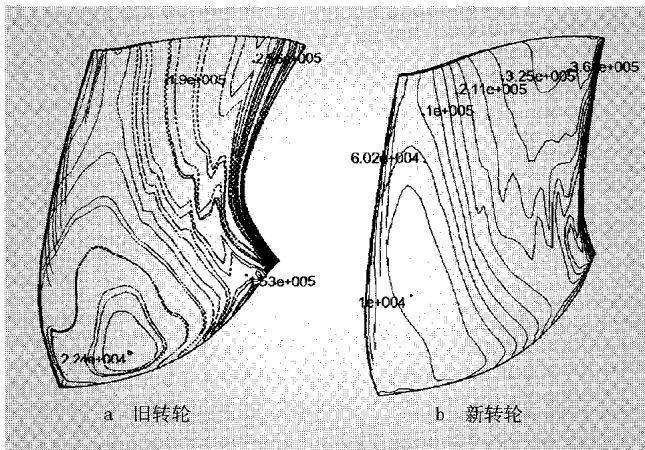


图 3 转轮叶片背面静压力等势线

2.2 叶片的速度矢量分布

从图 4a、图 5a 可以清楚看见,水流在流入转轮的时候在上冠和下环叶片头部的工作面附近有明显的旋涡流发生。由于下游电站的兴建,把电站的尾水位抬高约 2 m,因此电站平均水头已不足 20.8 m,其经常运行实际水头 $H=18.8$ m,使水轮机的实际运行工况偏离了最优工况区,导致叶片进口边的位置和叶片的头部形状和目前的水力条件不适合,导致水流旋涡的发生,必然引起过机流量的减少,这也是水轮机出力不足的原因之一。

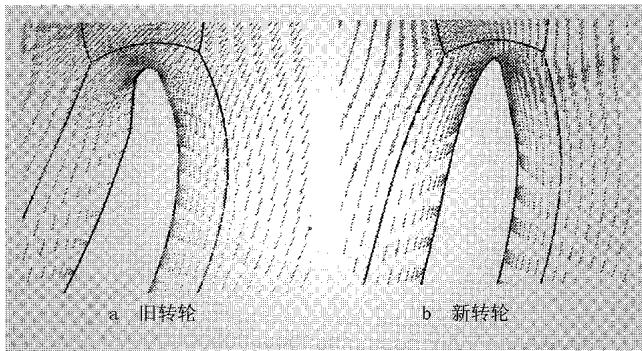


图 4 转轮下环附近速度矢量

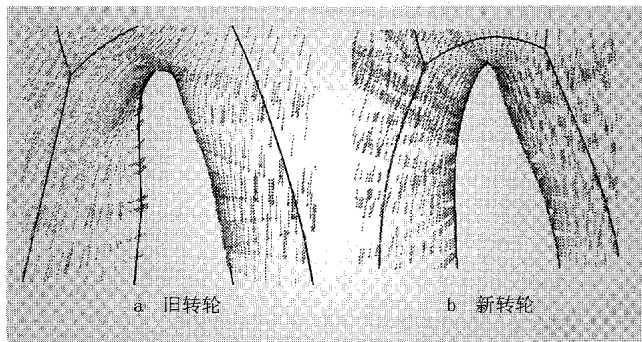


图 5 转轮上冠附近速度矢量

3 新转轮的设计和性能预测

3.1 技术改造原则

一般来说,水轮机性能优劣,主要取决于转轮。因此,转轮改造是电站技改增容防蚀是否成功的关键,对新转轮的要求通常是出力大、效率高、耐磨蚀。经过与电站方多次探讨和技术经济比较,我们决定该电站的技术改造遵循以下原则:

(1)只更换转轮,保持水轮机其他通流部件不改变,以最经济手段提高水轮机的效率和出力,并改善其空蚀性能。

(2)为降低电站的改造成本,新设计的转轮不上试验台试验。根据电站目前的具体水力参数,应用现代计算机的数值模拟技术来评价新转轮设计方案的优劣,这样既缩短了电站改造周期,又降低了新转轮的生产成本。

(3)不更换发电机。发电机的额定转速保持不变,经校核,发电机额定出力满足水轮机增容的要求。

3.2 新转轮设计工况点的选择

目前电站的设计净水头为 $H=18.8$ m, 其相应的单位转速为 $n_{11}=87.18$ r/min, 比 HL260 转轮的最优单位转速 $n_{10}=72$ r/min 高 15.18 r/min。为了在高单位转速下获得较高的效率,我们选定 $n_{11}=88$ r/min 为设计单位转速,也是新转轮的最优单位转速。选定设计单位流量 $Q_{11}=1.28$ m³/s, 比 HL260 转轮的最优单位流量多 0.18 m³/s。设计工况点选择的目的是把水轮机实际工况运行点由低效率区调整到高效率区。

3.3 水轮机新转轮水力设计

新转轮水力设计思路为:

(1)抬高转轮上冠,以提高转轮过流能力。

(2)减小叶片进水边上冠处的直径及转轮进水边平均直径,以提高转轮单位转速。

(3)适当减小叶片的进口安放角,消除进口边水流旋涡的发生。

(4)修改叶片头部的形状。减小叶片进、出水边在下环附近的弯曲程度,以改善叶片部分下环流态,避免叶片头部旋涡的发生。

(5)减少转轮叶片数,提高转轮过流能力,以利于增大水轮机出力。HL260 转轮最大使用水头 33 m,而周公河电站最大水头不超过 20 m,考虑一定的裕量,为减小叶片对水流的排挤,叶片数将由 $z=14$ 片减小到 $z=13$ 片。

3.4 新转轮数值计算结果及分析

把重新设计的转轮通过三维建模软件生成三维模型,在 NUMECA FINE 软件中替换原来的旧转轮,保持原来的固定导叶和活动导叶不变。在相同边界条件下的计算结果如下:

(1)叶片的静压力分布。从图 2b,图 3b 可以看出,新转轮工作面和吸力面负荷分布比较均匀。旧转轮工作面的下环附近存在的高压圈已经在新转轮中得到改善,压力等值线从进口边到出水边沿流动分布得比较均匀,静压力的分布得到了改善。叶片的背面静压力的分布也比旧转轮均匀,低压区的位置已经改变。

(2)叶片的速度矢量分布。从图 4b,图 5b 可看出,通过修改叶片头部形状,上冠、下环附近的叶片头部附近已不再有旋涡发生了。改型后转轮的速度矢量大小、方向分布更为理想,进、出口角安放合理,水流对进口保持无撞击,在下环附近无论是进口还是出口速度均匀;水流流向、速度大小较理想。比较新旧转轮在设计工况点的 CFD 数值计算结果可以看出:真机在设计工况点附近运行时,上冠、下环附近的叶片不会出现旋涡现象,空化性能较旧转轮将会有所改善。新转轮的水力性能将会大幅提高,空化及运行稳定性亦有较大改善⁹。

4 结论

综上所述,应用数值模拟软件 NUMECA FINE/Turbo7.4 可以有效地提高水轮机转轮改型设计的水平,降低电站改造成本,缩短新转轮的设计周期,使转轮叶片的改型工作有详尽而可靠的流场分析结果作基础。因此,在我国目前大量的水电站改造工作中,积极推广基于 CFD 的水轮机增容防蚀改造,具有深远的意义⁹。

参考文献:

- [1] 吴钢,权先璋,等. 九子溪电站水轮机增容改造[J]. 水电能源科学,2000,(4):37-39.
- [2] 程良骏主编. 水轮机[M]. 北京:机械工业出版社,1981.
- [3] E.Gode,R.Cuenod,Numerical flow simulations in Francis turbines [J]. water power& dam construction,1989.
- [4] Jacques McNzbb,Andre Coutu,D.Gradam Holmes.The Effects of Blade Lean on Hydraulic and Mechanical Characteristics of Francis Runers[C]. IAHR symposium in Montreal, 1986.
- [5] 王国海. 水轮机增容改造与新技术的应用 [J]. 大电机技术, 2001,(7):20-23.
- [6] 刘小兵. 固液两相流动及在涡轮机械中的数值模拟 [M]. 北京:中国水利水电出版社,1996.