

引用格式:Min Zheng, Cheng Xiaoxiong, Wang Yu. Hydraulic Design and Numerical Simulation of a Special Runner for the Propeller Turbine[J]. Journal of Gansu Sciences, 2021, 33(5): 78-82. [敏政, 成泉雄, 王昱. 轴流定桨式水轮机特型转轮水力设计及数值模拟[J]. 甘肃科学学报, 2021, 33(5): 78-82.]
doi:10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2021.05.013.

轴流定桨式水轮机特型转轮水力设计及数值模拟

敏政^{1,2}, 成泉雄¹, 王昱^{1,2}

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050;
2. 甘肃省流体机械及系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要 某水电站由于原始设计中的选型错误, 导致电站水力参数与水轮机参数不相符, 两台机组多年来无法正常高效运行, 现有水力模型中无法找到可兼容的合适转轮。为此, 研究采用传统水力设计方法设计了一个与该型水轮机流道尺寸相匹配且与电站水力参数相吻合的特型转轮, 并运用CFD技术进行了水轮机全流道模拟分析。模拟结果表明, 设计的转轮效率可达81%, 最大出力可达170 kW, 满足预期要求, 为增容改造方案的可行性提供了依据。据此结果制造的水轮机在电站投运后达到了160 kW的预期目标。

关键词 轴流定桨式水轮机; 转轮; 增容改造; 水力设计; 数值模拟

中图分类号: TK733 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0366(2021)05-0078-05

轴流定桨式水轮机是广泛应用的机型之一, 在水轮机行业占比甚大。由于其容量较小, 与之相关的水电站设计部门资质相对较低, 导致水轮机选型设计不合理或不完善的现象屡见不鲜。最常见的情况是转轮型号与电站水力参数不适应, 造成不能充分或高效利用水能, 部分小型电站甚至因此而不能正常发电^[1], 如甘肃省武威市西营河水管处三级电站六台水轮发电机组就属于这种情况。

近年来水力发电技术进展迅猛, 继三峡电站之后我国水轮机设计及制造水平已跃居世界先进行列, 涌现了大量优秀的水力模型, 在满足新建电站技术要求的同时, 也为老旧电站水轮机的更新换代和增容增效改造提供了很大的便利^[2]。大量新型高效转轮模型的存在, 使得老旧水轮机组的改造在不更换导水机构、转轮室、蜗壳、底环及尾水管等大型埋入部件的前提下, 仅需更换一个新型转轮即可达成, 这是最理想的增容改造途径, 而且从目前的实践活动来看常常都能获得成功^[3-5], 对于大型水电站而言, 如果没有与其流道兼容的现有转轮水力模型供

其选用, 可以委托具有国际先进水平的东方电机厂、哈尔滨电机厂为其“量身定做”。

然而, 对于中小型水电站而言, 委托东电、哈电开发一个新型转轮的巨大成本只能使其望而却步。中小型水电站增容改造中, 需要“量体裁衣”式的开发转轮时, 无需向东电、哈电的优秀水力模型看齐, 不必对转轮的效率及抗空化能力提出过高要求, 也不必通过试验获取模型综合特性曲线, 只要能够针对特定机组达到预期的增容改造目的即可。另一方面, 东电、哈电的叶片几何形状设计软件显然是不可能随意获取的核心技术。因此, 为中小型水电站“量体裁衣”式的转轮开发技术路线如图1所示。

研究以甘肃省武威市西营河水管处电站为例, 对其水轮机组进行了增容改造实践, 取得了良好的改造效果。

1 问题分析及方案设计

1.1 西营河水管处电站存在的问题

西营河水管处电站额定水头 $H_r = 6$ m, 机组额

收稿日期: 2020-01-20; 修回日期: 2020-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51669011)

作者简介: 敏政(1965-), 男, 青海同仁人, 副研究员, 研究方向为水力发电工程。E-mail: 13993162205@qq.com

通信作者: 成泉雄, E-mail: r179426249@163.com

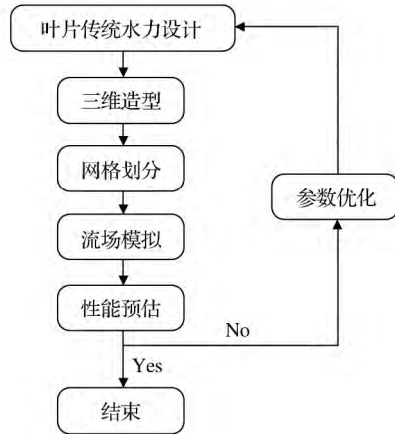


图 1 转轮开发技术路线

Fig.1 Technical route for runner development

定转速 $n_r = 428.6 \text{ r/min}$, 发电机额定功率 $N_r = 160 \text{ kW}$, 水轮机型号为 ZD560-LM-100 ($\varphi = 0^\circ$)。该机型在电站水力条件下, 夏季丰水期机组最大功率只有 105 kW , 同时存在大量弃水, 发电机容量和水能得不到充分利用; 到了冬季流量较小时, 机组甚至不能发电, 只能停机弃水^[6]。

根据上述电站参数可以求出, 水电站应该选用最优单位转速 $n_{110} = 175 \text{ r/min}$, 最优单位流量 $q_{v,110} = 1.43 \text{ m}^3/\text{s}$ 的转轮。实际使用的 ZD560-LM-100 ($\varphi = 0^\circ$) 转轮, 其最优单位转速 $n_{110} = 140 \text{ r/min}$, 最优单位流量 $q_{v,110} = 1.08 \text{ m}^3/\text{s}$, 远小于电站需求值, 造成机组运行效率过低和过流能力偏小, 这就是机组最大出力只能达到 105 kW 的原因; 轴流定桨式水轮机模型综合特性曲线本就陡窄, 水轮机效率对流量的变化非常敏感, 再加上单位转速远离 ZD560 的最优值, 这就使得水电站冬季流量偏小时, 运行工况点落到了模型综合特性曲线的有效范围之外, 流量过低加之效率极低, 使得水轮机的实际功率基本上只能维持机组空载运行而不能输出电能。

筛选现有的轴流式水轮机水力模型, 找到最接近电站实际参数的转轮是 ZD760-100 ($\varphi = 5^\circ$), 其最优单位转速 $n_{110} = 165 \text{ r/min}$, 最优单位流量 $q_{v,110} = 1.67 \text{ m}^3/\text{s}$, 导叶相对高度 $\bar{b}_0 = 0.45$, 而电站现有 ZD560-LM-100 ($\varphi = 0^\circ$) 的导叶相对高度 $b_0 = 0.4$, 可见, 选用 ZD760-LM-100 ($\varphi = 5^\circ$), 单位转速依然偏低而单位流量却过分偏大, 现有导叶高度低于 ZD760-LM-100 ($\varphi = 5^\circ$) 所必需的高度要求, 电站实际运行工况点 ($n_{110}, q_{v,110}$) 落在了模型综合特性曲线的有效运行区域之外。因此, 找一个更合适转轮取而代之的目的无法达到。为了解决问题, 只能在保持现有 ZD560-LM-100 ($\varphi = 0^\circ$) 水轮机其他所有

部件不变的情况下, “量体裁衣”式的研制一个特型转轮。这个特型转轮的参数应该如下: 转轮直径 $D_1 = 1 \text{ m}$, 轮毂直径 $d_B = 0.35 \text{ m}$, 匹配导叶高度 $b_0 = 0.4 \text{ m}$, 最优单位转速 $n_{110} = 175 \text{ r/min}$, 最优单位流量 $q_{v,110} = 1.43 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

1.2 设计方法

轴流式转轮叶片叶栅绕流计算方法主要有 3 种: 升力法、保角变换法和奇点分布法。升力法是一种以实验为基础的半经验半理论的设计方法, 可直接选取优秀的空气或水动力翼型。保角变换法的关键是通过变换函数建立物理平面和辅助平面上对应的流动关系, 其优点是可以得到准确的解析解, 但对于复杂边界条件确定这种变换函数是很困难的, 目前很少采用这种方法。奇点分布法是势流叠加法的具体应用, 用集中或连续分布的涡、源、汇等奇点代替翼型, 这些奇点所产生的诱导流场与无穷远来流流场叠加后形成的复合流场应满足给定的边界条件, 此法可解任意翼型剖面的叶栅绕流问题。研究采用无限薄翼型奇点分布法设计新转轮。

通过无限薄翼型奇点分布法计算出 5 个断面翼型骨线后, 选用性能优良的 RAF-6 空气动力学翼型进行叶片加厚^[7]。图 2 为某一断面翼型图。

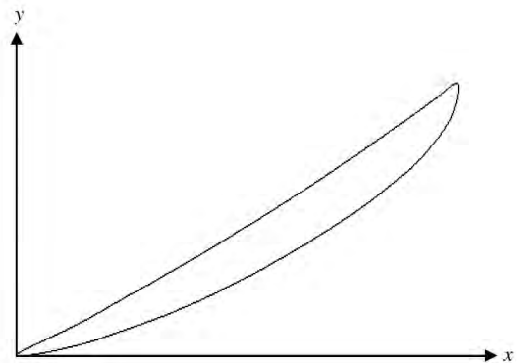


图 2 断面翼型图

Fig.2 Airfoil section

2 数值预测方法

2.1 几何模型的建立及网格划分

利用了 Pro/E 三维建模软件及 ANSYS-ICEM 网格划分软件对水轮机全流道的数值模拟进行了前处理^[8]。水轮机内部流动复杂, 其流动是不可压缩的粘性紊流, 为使水轮机数值模拟结果值得信赖, 准确建模至关重要。利用前述方法设计出的转轮叶片 5 个断面翼型图在 Pro/E 中进行三维建模, 得到转轮几何模型, 同时根据电站所用的 ZD560-LM-100

($\varphi=0^\circ$)明槽轴流式水轮机的其余过流部件绘制出导水机构及尾水管几何模型。转轮三维模型和水轮机全流道三维模型如图3所示。

正确绘制几何模型后需对其流场进行网格划分。采用 ANSYS-ICEM 划分网格,网格类型为非结构化网格,网格总数为 3.49×10^6 ,为满足近壁面网格的计算要求,对导叶和转轮叶片的近壁面处进行加密,网格质量很好,均在 0.2 以上,具体网格如图4所示。

3 数值计算及结果分析

3.1 数值计算

ZD560-LM-100($\varphi=0^\circ$)水轮机改造设计的主要参数如下:设计水头为6 m,设计流量为 $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$,

转轮直径为 1 m,设计转速为 428.6 r/min,活动导叶数为 12 片,无固定导叶,尾水管为高度 3 m 的直锥管。

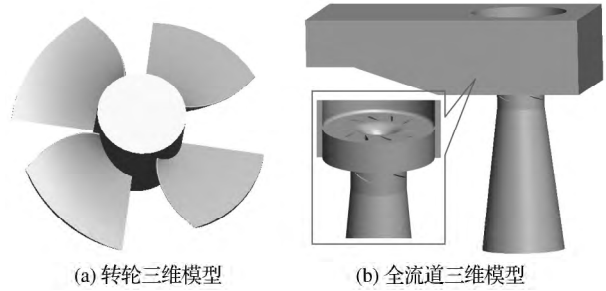


图3 转轮三维模型和水轮机全流道三维模型
Fig.3 Three-dimensional model of runner and full channel of the turbine

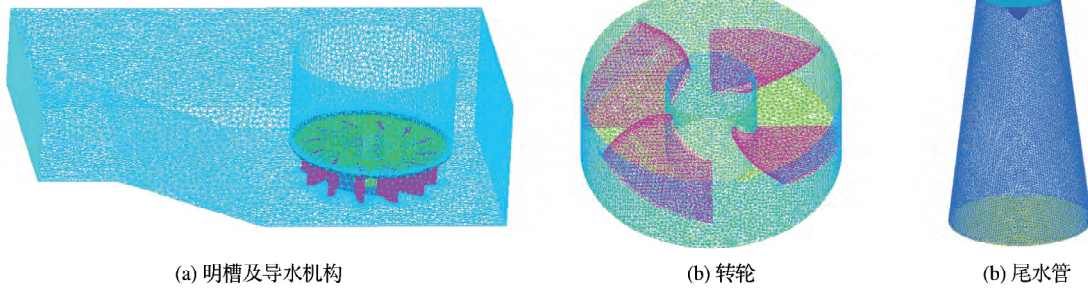


图4 各部件计算域网格
Fig.4 Calculation domain grid of each component

水轮机流量调节方程式^[9]为

$$q_v = \frac{(r_2^2 \omega + \frac{\eta H g}{\omega})}{(\frac{\cot a_0}{2\pi b_0} + \frac{r_2}{F_2} \cot \beta_2)}, \quad (1)$$

其中: q_v 为流量; ω 为旋转角速度; r_2 为叶片出水边半径; η 为水轮机效率; F_2 为转轮出口过水断面面积; H 为水头; g 为重力加速度; a_0 为导叶开度; b_0 为导叶高度; β_2 为叶片出口边安放角。

水轮机的水力效率计算公式为

$$\eta_h = \frac{M\omega}{q_v \rho g H}, \quad (2)$$

其中: q_v 是转轮进口流量; M 是转轮绕旋转轴的合力矩; ω 是转轮旋转的角速度。

式(1)反映出流量与叶片几何参数与导水机构的关系。针对特定的导水机构, b_0 已知,对于设计好的转轮,其 r_2 、 F_2 、 β_2 及 ω 已经确定。式(1)反映了在确定的水头和转速下,机组过流能力与导叶开口角之间的关系。据此,可根据式(1)反算出活动导叶在最优工况下的开口角,并在其左右另外选择 3 个导叶开口角,利用 ANSYS-Fluent 对这 4 个工况

进行流场模拟计算,得到模拟计算结果,并利用式(2)来计算水轮机效率。

3.2 流态分析

设计工况下转轮叶片表面流线分布如图5所示,转轮叶片表面沿圆周方向流线分布均匀,从轮毂到轮缘流速逐渐增大,流线光滑,无旋涡和二次流,流态稳定,能量转化率较高。

叶片表面压力分布如图6所示,压力面和吸力面的压力均是从进水端向出水端逐渐减小。压力面出水边有极少量负压区,基本不可能遭受汽蚀破坏。而吸力面存在很大面积的负压范围,可能会发生汽蚀破坏,但吸力面的负压值较低,产生的汽蚀破坏也较轻,因此可通过工艺处理使其不能满足汽蚀发生条件。

尾水管内部流速变化规律如图7所示,整个尾水管区域内没有出现明显的回流、横流、旋涡等现象,流线顺畅,扭曲程度较小,稳定性高,不会产生较高的压力脉动。

3.3 性能分析

改造前后水轮机的性能参数对比如表1所列。改造后的水轮机在最优工况时,效率达到 80% 以

上,比改造之前提升了 15%,随着导叶开度越来越大,出力逐渐增大,但效率逐渐降低。改造后的转轮

效率虽然比不上型谱产品,但出力完全满足预期要求 160 kW,可以达到增容的目的。

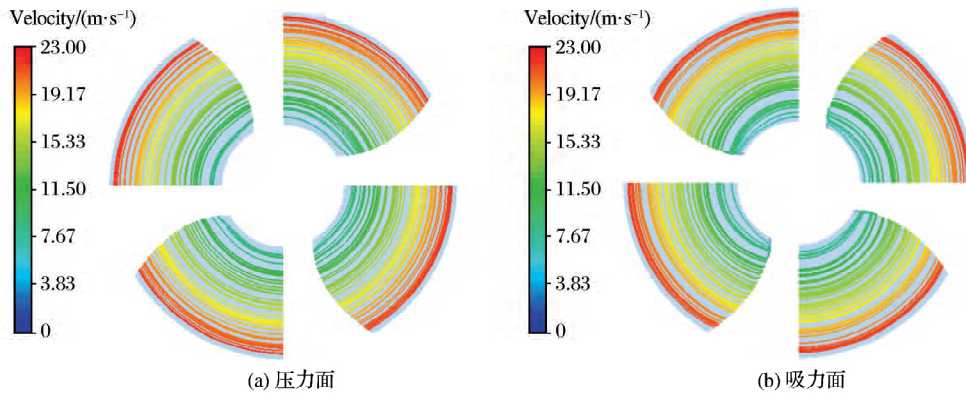


图 5 转轮叶片表面流线分布
Fig.5 Streamline distribution on runner blade surface

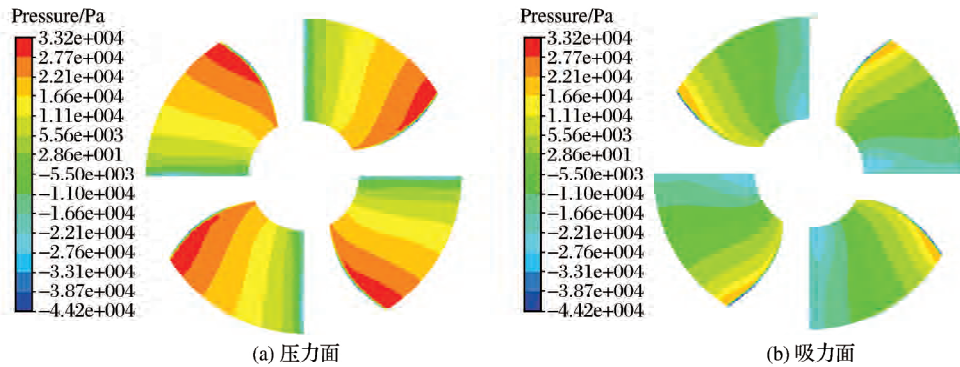


图 6 转轮叶片表面压力分布
Fig.6 Pressure distribution on runner blade surface

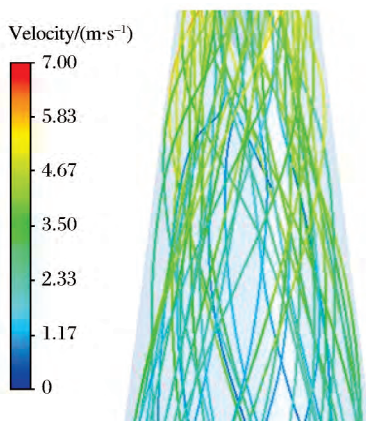


图 7 尾水管内部流线分布
Fig.7 Streamline distribution inside draft tube

根据表 1 中的性能参数,绘出改造后水轮机的性能曲线,如图 8 所示。

因为水轮机的实际运行情况与软件模拟的水轮机流场情况不可能完全一致,所以数值模拟结果与实际结果相比只是接近却不可能相等,但应用于指导增容改造工作,是可以满足工程要求的。制造的

转轮在电站的运行实践表明,机组最大出力达到了 160 kW,冬季枯水期也能达到 60 kW 的出力,改造取得了预期的效果。

表 1 改造前后参数对比

Table 1 Parameter comparison before and after transformation

运行工况	流量 /($m^3 \cdot s^{-1}$)	功率 /kW	效率 /%
改造前 最优工况	3.22	105.00	65.63
改造后 较小流量工况	3.25	148.84	79.06
改造后 最优工况	3.49	163.26	80.76
改造后 较大流量工况	3.70	172.29	80.39
改造后 大流量工况	4.01	179.65	77.34

4 结论

(1) 中小型水电站的增容改造中,若无合适的替代转轮,可采用传统的水力计算方法重新设计一个适合已有固定流道尺寸并能满足出力要求的转轮,再通过流场模拟对其性能进行预估,即可制造一个新转轮来达到增容改造目的。

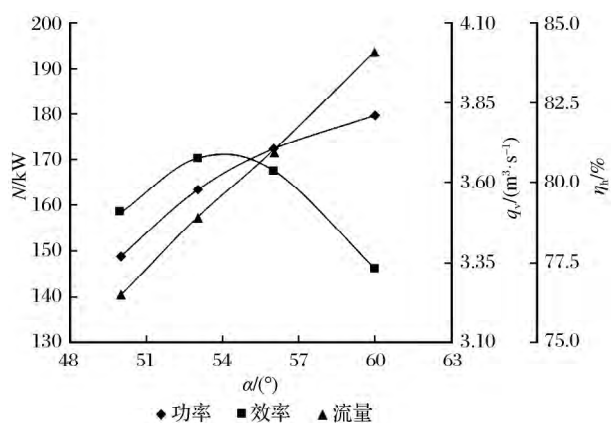


图8 改造后不同导叶开口角下的功率、效率和流量

Fig.8 Power, efficiency and flow in different guide vane opening angles after transformation

(2) 利用 CFD 技术对水轮机全流道进行数值模拟计算,可以得到比较准确的水轮机外特性预测结果,并为增容改造方案的可行性提供依据。

(3) 针对特定情况开发的特型转轮,由于没有

完整的模型综合特性曲线,仅适用于特定电站。此法具有极强的针对性,可为老机组的改造工作提供良好的借鉴和思路。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部.小型水电站技术改造规范:GB/T 50700-2011[S].北京:中国计划出版社,2011.
- [2] 敏政,岳巧萍,田亚平,等.HL638-WJ-84型水轮机增容改造及数值预测[J].兰州理工大学学报,2018,44(2):65-69.
- [3] 孔虎泰.东武仕水电站增效扩容改造转轮选型 CFD 计算分析[J].小水电,2019,(4):5-7.
- [4] 卿彪,杨军,唐军,等.基于 CFD 的映秀湾电站过流部件的分析[J].中国农村水利水电,2018,(1):174-177,183.
- [5] 敏政,田亚平,朱月龙,等.基于转轮换型的水轮机增容改造及数值模拟[J].人民长江,2017,48(16):78-82.
- [6] 曹鵬.水轮机原理及水力设计[M].北京:清华大学出版社,1991.
- [7] 高建铭.水轮机设计原理[M].北京:水利水电出版社,1982.
- [8] 胡坤,李振北.ANSYS ICEM CFD 工程实例详解[M].北京:人民邮电出版社,2014.
- [9] 郑源,鞠小明.水轮机[M].北京:中国水利水电出版社,2007.

Hydraulic Design and Numerical Simulation of a Special Runner for the Propeller Turbine

Min Zheng^{1,2}, Cheng Xiaoxiong¹, Wang Yu^{1,2}

(1.College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2.Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Gansu Province, Lanzhou 730050, China)

Abstract A turbine has failed to perform effectively for many years, due to the consistency between the hydraulic parameter of the power station and that of the turbine caused by the mistaken choice in the initial design of that power station, and a suitable compatible runner cannot be found in existing hydraulic models. To solve this problem, a special runner that matches both the flow channel in size and the power station hydraulic parameters has been designed using conventional method in this paper, and has gone through the whole flow channel simulation using CFD technique. The result of that simulation showed that the efficiency of this newly designed runner can reach up to 81%, and the maximum output can reach 170 kW, which meet the expected requirements, and thus providing a solid foundation for a feasible capacity-increasing transformation. The constructed turbine based on this result has been put to use and has met the expected output goal of 160 kW.

Key words Propeller turbine; Runner; Capacity-increasing transformation; Hydraulic design; Numerical simulation

(本文责编:毛鸿艳)