

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.013

冲击式水轮机斗叶根部型线优化设计*

符杰 宋文武 王辉艳

(西华大学能源与环境学院, 成都 610039)

【摘要】 应用UG软件完成转轮斗叶模型建立,采用CFD技术对多喷嘴冲击式水轮机内部流动进行数值模拟,并结合ANSYS软件对斗叶应力的分析结果,完成转轮斗叶及根部型线的优化,成功地解决了喷嘴数增加后,射流之间、转轮内部流动之间的流动干涉问题,保证了冲击式水轮机转轮的强度和水力性能,使设计的机组运行更加稳定,效率提高。

关键词: 冲击式水轮机 三维建模 斗叶 数值模拟 应力计算

中图分类号: TK735 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)09-0062-04

Optimization Design of Bucket Roots Type Line for Pelton Turbines

Fu Jie Song Wenwu Wang Huiyan

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

Abstract

With multiple nozzles and high head Pelton turbines, the increasing of nozzles will lead to mutual interference of flows in the runner, which reduces the efficiency of Pelton turbine. The working pressure at the root of bucket will increase obviously, and the safety factor of the hydropower station will be reduced. UG software was used to establish the model of runner bucket. By using CFD technique, the internal flow of a Pelton turbine with six nozzles was numerically simulated. ANSYS software was used to analyze the stress on the bucket. The runner bucket and profile line at the root were optimized. The problem of mutual interference among jets and internal flows was solved after the increasing of nozzles. The intensity and hydraulic performance of Pelton turbines were guaranteed. The designed unit has the characteristics of stable operation and high efficiency.

Key words Pelton turbine, 3-D model, Bucket, Numerical simulation, Stress calculation

引言

冲击式水轮机具有结构简单、适用水头高、安装高程不受空蚀条件限制、对流量变化不敏感等优点,在河川上游、山区等水头高、流量小的水力资源开发中得到了广泛应用。近几年,新冲击式水轮机的效率和出力不断提高,应用的水头也大大增加,水斗根部的工作应力明显增加,使其安全系数降低。与反击式水轮机转轮相比,冲击式水轮机的水斗是在变负荷下工作的,水斗每受到一次射流的冲击都相当

于经受了一次应力循环,其水斗根部在各工况运转时受到一种非对称的交变脉动应力作用。另外水斗根部形状复杂、空间狭小,厚度变化大,容易产生应力集中和材料缺陷,且缺陷不易彻底清除,使得冲击式水轮机的疲劳破坏主要发生在转轮水斗的根部,并迅速向内部扩展,造成重大破坏事故。近年来已有学者进行了冲击式水轮机转轮整体锻造后数控加工,保证水斗的型线和尺寸公差及其水力性能,防止断斗现象,延长转轮的使用寿命^[1],采用CFD法对多喷嘴冲击式水轮机转轮进行流场分析和射流干涉

收稿日期:2012-03-04 修回日期:2012-04-12

* 流体及动力机械省部共建教育部重点实验室资助项目(SBZDPY-11-4、SBZDPY-11-8)和四川省教育厅重点资助项目(11ZA279)

作者简介:符杰,讲师,主要从事流体机械流动理论及新产品开发研究,E-mail: f909xh@163.com

通讯作者:宋文武,教授,主要从事流体机械流动理论及新产品开发研究,E-mail: wenwus@163.com

研究^[2-6],采用 Ansys 软件对水斗应力和振型研究,获得了水斗的应力分布以及最高应力点在刃口处的结论^[7]。

对冲击式水轮机而言,转轮的主要破坏是由空蚀和疲劳裂纹引起的。空蚀引起振动和噪声,迫使机组频繁大修,大大降低了转轮的效率和出力;疲劳裂纹往往出现在转轮斗叶根部,为弥补斗叶根部强度不足,新的设计技术、材料和工艺不断应用于冲击式转轮的设计和制造^[8-11],但冲击式转轮的空蚀破坏和疲劳断裂事故仍不断发生。因此,如何在保障转轮性能指标的前提下,结合转轮斗叶根部的强度要求,在设计阶段准确地预测转轮应力分布,并根据预测结果有针对性地优化转轮斗叶根部型线和结构,完成转轮三维模型的建立,使水斗完全达到数控加工的目的,已经成为当前冲击式水轮机转轮的设计、制造急需解决的问题。

本文正是基于这种目的,采用 CFD 技术进行转轮性能预测和转轮斗叶强度分析,并结合强度分析结果,进一步优化转轮斗叶根部型线,改善部分射流到斗叶根部的流态,解决喷嘴数增加后射流之间、转轮内部流动之间的流动干涉问题,完成转轮斗叶型线的优化设计。

1 水斗及转轮的三维造型

首先,利用二维设计软件(AutoCAD)对冲击式水轮机转轮木模图的横、纵截面线进行处理;再导入三维设计软件(UG)中,并通过变换命令(平移、旋转等)将横、纵截面线进行基准定位,对转轮木模图的横、纵截面线进行位置还原,其结果如图1所示。将工作面、背面分别分成4个区域(工作面:水斗缺口区域I,水斗中部区域II,水斗根部应力缺口区域III,水斗根部区域IV。背面:水斗缺口区域V,水斗中部区域VI,水斗根部区域VII,水斗根部与转轮轮盘连接区域VIII。),在保持曲面曲率一致性的前提下,对每个区域内采用网格曲线命令构建区域面,由于

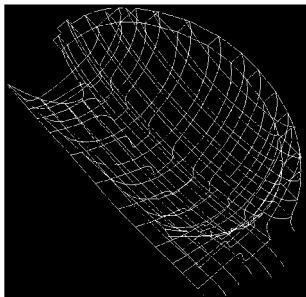


图1 横、纵截面线的定位图

Fig.1 Positioning map of horizontal and longitudinal section lines

水斗根部附近控制线少,工厂在实际生产中往往靠经验打磨,在进行三维建模时需要添加辅助截面,并在曲面曲率一致性的目标下进行反复修改,最终获得根部形状,其区域划分和构面结果如图2所示。最后采用一定的缝合公差(不大于0.001 mm),将工作面、背面及连接面缝合成水斗实体。缝合时若不能在公差内缝合,应采用桥接曲面命令生成中间小面,然后再缝合成实体,其三维实体如图3所示。

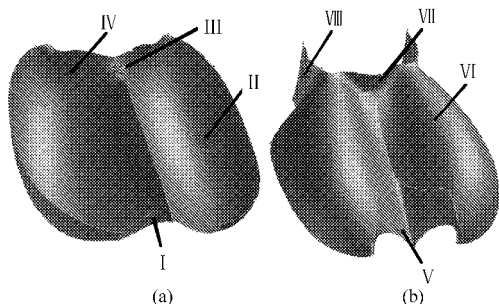


图2 斗叶面模型建立及区域划分

Fig.2 Establishment of bucket leaf model and zoning
(a) 工作面 (b) 背面

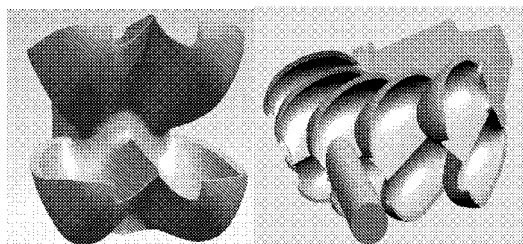


图3 斗叶及转轮三维实体模型

Fig.3 3-D entity model of bucket and runner

2 数值模拟

2.1 边界条件设置

对三维造型软件UG中构建的单个斗叶进行处理,完成水斗流体计算模型的建立,通过其输出模块转换为*.x_t文件,并导入Gambit软件中,采用四面体网格对其进行网格划分、初始边界条件设置和网格文件输出,最后将网格文件导入Fluent软件中,在完成进出口边界条件及非定场计算条件的设置后完成流动分析计算^[4-6]。

2.2 优化计算及结果分析

在同一水头下,结合转轮运行要求和制造材料要求,完成3种(斗叶根部在满足强度条件下优化加厚,标记为转轮1;斗叶根部常规加厚,标记为转轮2;斗叶根部深度增大,标记为转轮3)斗叶根部设计,并对3种不同的斗叶根部型线分别进行几何模型的建立、网格划分和边界条件设置,完成冲击式水轮机转轮斗叶的数值模拟,其部分计算结果如图4~6所示。

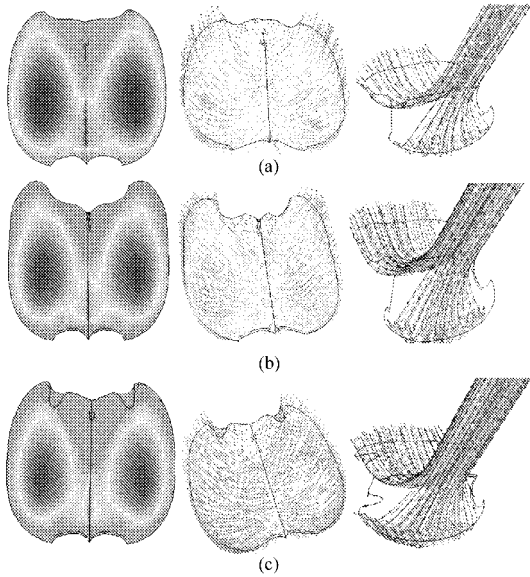


图4 100%射流时水斗内部压力、速度及射流迹线分布

Fig.4 Pressure, velocity and path line distribution in bucket at 100% jet

(a) 转轮1 (b) 转轮2 (c) 转轮3

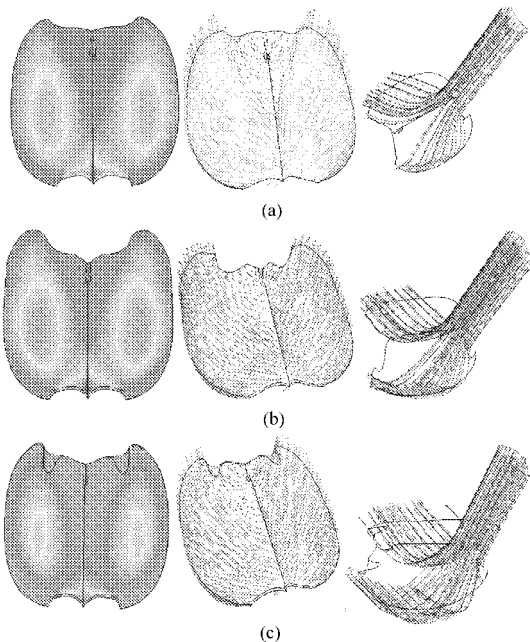


图5 50%射流时水斗内部压力、速度及射流迹线分布

Fig.5 Pressure, velocity and path line distribution in bucket at 50% jet

(a) 转轮1 (b) 转轮2 (c) 转轮3

从流动计算结果可以看出,在斗叶接受全射流(即100%射流)时,3个转轮斗叶工作面的压力梯度变化均匀,速度分布合理,斗叶接受射流迹线分布均匀,不存在脱流和旋涡。但在转轮2和3的斗叶接受部分射流时,斗叶根部结构对流体出流影响较大,当斗叶根部厚度增大、深度增大后背面结构嵌入

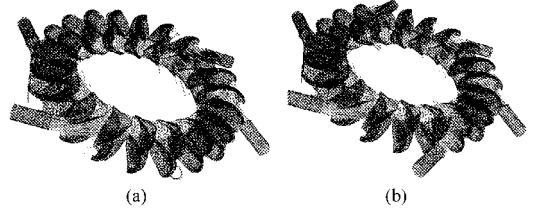


图6 多喷嘴同时作用在转轮上的流动情况

Fig.6 Flow situation of runner with six nozzles

acting at the same time

(a) 4喷嘴射流情况 (b) 6喷嘴射流情况

工作面越多,斗叶根部流动越差,在斗叶根部区域存在回流,并且随着斗叶接受射流的减小而逐步增大,甚至在上一个斗叶快要完全脱离射流的瞬时,斗叶工作面的流体对下一个接受射流的斗叶背面存在撞击,其撞击力的方向与转轮旋转方向相反,从而影响到机组的出力大小。通过对CFD计算的数据提取后分析,得出转轮1的水力效率比转轮2和3的水力效率高0.86%和1.15%。

3 应力计算

3.1 应力计算模型处理

在进行斗叶应力计算时,结合转轮斗叶数,对轮毂圆柱体进行切分,为了在斗叶工作面上施加面载荷,同时作出射流水体的模型,其计算模型如图7所示。

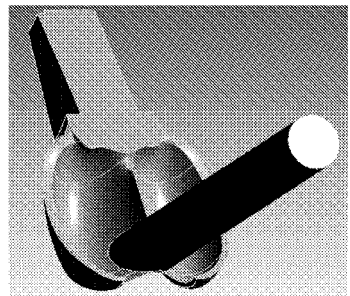


图7 水斗应力计算模型图

Fig.7 Model diagram for stress calculation of bucket

3.2 应力计算结果分析

在ANSYS软件中,对轮毂圆柱面施加Cylindrical Support约束,固定水斗的径向、周向及轴向的移动自由度和转动自由度,施加相同的载荷,选用稀疏矩阵法进行同一水头下3种不同根部斗叶应力的计算,其部分计算结果如图8、9所示。从应力计算结果可以看出,在斗叶接受全射流(即施加100%载荷)时,转轮1的总变形量和等效应力在3种根部设计中最小,其变形量为 5.0459×10^{-5} m,等效应力为33.262 MPa。

4 结论

(1)采用CFD技术进行转轮性能预测和转轮斗

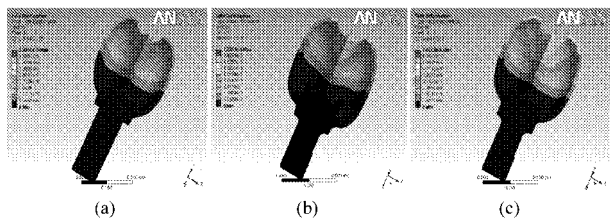


图8 水斗总的变形图

Fig. 8 General deformation diagram of bucket

(a) 转轮1 (b) 转轮2 (c) 转轮3

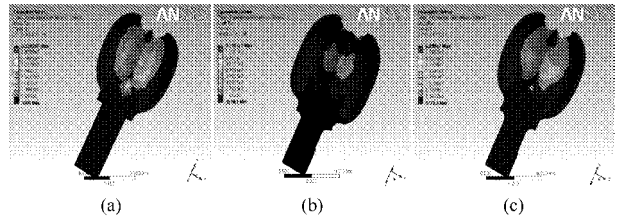


图9 水斗等效应力图

Fig. 9 Equivalent stress diagram of bucket

(a) 转轮1 (b) 转轮2 (c) 转轮3

叶强度分析,并结合强度分析结果,优化转轮斗叶根部型线,改善了部分射流射到斗叶根部的流态,完成转轮斗叶(根部)型线的优化设计,从而保证冲击式水轮机转轮的强度和水利性能。

(2)提出了斗叶分区域三维建模的方法,为冲击式水轮机转轮采用整体锻造的现代制造技术进行水斗数控加工提供了三维几何模型,有助于提高转轮制造精度和机组效率。

参 考 文 献

- 1 王波,刘献礼,杜金成,等. 冲击式水轮机转轮水斗整体数控加工工艺及编程技术的研究[J]. 大电机技术,2010(3): 40~44.
Wang Bo, Liu Xianli, Du Jincheng, et al. Research on integral CNC machining process and programming technology for runner of Pelton turbine [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2010(3): 40~44. (in Chinese)
- 2 Alexandre Perrig. 冲击式水轮机水斗中流动的数值分析[J]. 尹继红,译. 国外大电机,2005(1):55~59,65.
- 3 Agarwal A K. 采用数值模拟方法的水斗式水轮机转轮用户定制设计[J]. 程志慧,译. 国外大电机,2006(4):59~64.
- 4 肖业祥,郑爱玲,韩凤琴,等. CFD法研究多喷嘴冲击式水轮机的射流干涉[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2007,35(3):66~70.
Xiao Yexiang, Zheng Ailing, Han Fengqin, et al. CFD-based investigation into jet interference in multi-nozzle Pelton turbines [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2007,35(3):66~70. (in Chinese)
- 5 符杰,宋文武,周敏,等. 多喷嘴冲击式水轮机内部流动分析研究[J]. 农业机械学报,2008,39(10):71~75.
Fu Jie, Song Wenwu, Zhou Min, et al. Research on internal flow of multi-nozzle Pelton turbines [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10):71~75. (in Chinese)
- 6 韩凤琴,肖业祥,久保田乔. 水斗非定常自由水膜流三维贴体数值模拟[J]. 工程热物理学报,2006,27(4):601~603.
Han Fengqin, Xiao Yexiang, Kubota Takashi. Numerical simulation free water sheet flow on Pelton bucket using 3-D body-fitted coordinate system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(4):601~603. (in Chinese)
- 7 李庆刚,宋文武,符杰,等. 水斗式水轮机喷嘴及水斗应力和振形研究[J]. 农业机械学报,2008,39(9):52~55,59.
Li Qinggang, Song Wenwu, Fu Jie, et al. Research on the stress and oscillation of Pelton turbine's nozzle and bucket [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9):52~55, 59. (in Chinese)
- 8 田正忠,赵俊行. CJA475-170冲击式转轮裂纹原因分析[J]. 大电机技术,2001(7):31~37.
Tian Zhengzhong, Zhao Junhang. The analysis of crack reason on CJA475-170 Pelton runner bucket [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2001(7): 31~37. (in Chinese)
- 9 魏斯 T. 冲击式转轮的现代制造技术[J]. 马元珽,译. 水利水电快报,2010,31(4):27~28,41.
- 10 韦塞利 J. 冲击式水轮机转轮的现代制造技术[J]. 马元珽,译. 水利水电快报,2006,27(22):13~15,19.
- 11 帕金森 E. 冲击式转轮的现代设计技术[J]. 范春生,译. 水利水电快报,2008,29(3):28~30.