排灌机械工程学报 2010年11月 Nov. 2010 第28卷 第6期 Vol. 28 No. 6
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering

大功率高压离心泵的优化设计

王乐勤，平仕良，吴大转
（浙江大学 化工机械研究所，浙江 杭州 310027）

摘　要：针对大功率高压离心泵高扬程、大流量、高转速以及高运行可靠性的要求，从水力模型设计、转子动力学设计、高压承压元件安全设计3个方面对大功率高压离心泵进行研究. 在水力设计上，应用CFD技术对泵的过流部件进行优化并考虑泵内间隙流动对整个转子系统的动力学影响，完成泵的水力模型设计；在转子动力学设计上，通过对机组轴系扭振特性和临界转速分析并考虑泵的实际工况引入“湿”临界转速以保证转子的刚性化设计和机组的运行可靠性；在高压壳体设计中，引入压力容器的设计理论，采用基于应力分类的大型高压离心泵承压件的优化设计并进行三维数值模拟完成高压壳体的安全设计. 在3 800 kW高压泵上运用以上技术，结果表明，所设计的泵符合要求，该技术对国内研发大功率高压泵具有参考意义.

关键词：高压离心泵；大功率；水力模型；转子动力学；高压承压元件
中图分类号：S277.9；TK730.2　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1674-8530(2010)06-0470-04

Optimal design of centrifugal pump with large power and high pressure

Wang Leqin, *Ping Shiliang*, *Wu Dazhuan*
(Institute of Chemical Machinery Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: Aimed at the requirements of centrifugal pumps with large power and high pressure, such as high head, large flow, high rotation speed, high operation reliability, and so on, some key technologies were studied through hydraulic model design, rotor dynamics design and safety design of high pressure devices. The hydraulic model of pumps was designed by applying CFD technology to optimize flow parts, meanwhile the influence of the tip clearance flow on the dynamics of the rotor systems was considered. In the design of rotor dynamics, the twist vibration characteristics of units shafting and critical speed were analyzed in order to ensure rotor rigidity design and unit operation reliability, especially, the “wet” critical speed analysis was introduced when pump practical operation conditions were considered. In the optimization design of high-pressure shell based on stress classification, the theory of pressure vessel design was introduced and 3D numerical simulation was carried out. These key technologies have been successfully applied in high-pressure pump with 3 800 kW power, which provides a reference for development of centrifugal pump with large power and high pressure in domestic.

Key words: high pressure centrifugal pump; large power; hydraulic model; rotor dynamics; high pressure devices

收稿日期：2009-11-24
基金项目：浙江省重大科技项目(2008C11056,2008C13046)
作者简介：王乐勤(1945—)，男，浙江湖州人，教授，博士生导师(hj_wlq2@zju.edu.cn)，主要从事流体机械设计和控制研究.
平仕良(1982—)，男，河北石家庄人，博士研究生(pingshidong@zju.edu.cn)，主要从事流体机械设计研究.

万方数据

生产装置的大型化在石油化工、电力和钢铁等领域中成为一种趋势，大功率高压离心泵在这些大型生产装置中作为输送流体的关键动力设备除了需要越来越高的普通水力性能指标外，还要求具备高效率、高可靠性和高自动化等特点，要求采用高速、多级叶轮结构并配置安全监控系统，相应地需要增加齿轮箱增速装置，同时配置润滑、在线监控等辅助系统，并且对于高速旋转的长轴转子的动力学问题、高压密封问题等需采取特别的措施. 因此，整个大功率高压离心泵机组的成套化设计是一个复杂的系统工程，涉及了化工、力学、机械以及控制等多个学科的交叉，所涉及的关键技术包括结构设计、水力学分析与设计、承压部件静力学分析与设计、转子动力学分析、监控系统设计、润滑与密封设计、整体可靠性分析等. 正是由于整个大功率高压离心泵机组的复杂性，造成了过去我国大型超高压离心泵机组基本上依赖于国外进口产品局面.

文中针对一台用于 1.6×10^6 t/a 延迟焦化装置的 3 800 kW 大功率高压切焦泵，转速 4 000 r/min，流量 280 m^3/h，扬程 3 060 m，从水力设计、转子动力学设计和承压部件结构设计 3 个方面研究大功率高压泵研发过程中的关键问题和相关技术.

1 泵水力模型分析与优化

目前基于相似换算法和速度系数法的一元设计方法已经相对成熟，并且已经积累了大量比较优秀的水力模型[1]. 但是，超高压离心泵的水力模型由于受超高压、大功率因素的影响，使得轴的直径大小以及叶轮结构等区别于普通离心泵，并考虑间隙流动对泵转子动力学的影响，其水力设计不能完全参照普通离心泵的设计方法，也不能完全根据现有模型进行相似换算. 因此，必须在借鉴现有经验基础上建立超高压离心泵水力设计方法，使用计算流体动力学技术进行泵的全流场三维数值模拟[2-3]，基于流场模拟预测性能，改进不利于性能提高的流动结构，以实现大功率高压泵的优化设计. 图 1 为计算区域网格划分.

鉴于大功率高压离心泵的级数较多，实际进行水力模型计算时，计算机性能存在一定的瓶颈，所以仅对首次级叶轮（包括导叶）的串联流场进行水力性能数值计算. 虽然没有对整个离心泵进行水力计算，但由于次级叶轮与其后各级叶轮水力模型相同，首级叶轮又比较典型，因此，对首级和次级叶轮的计算能检验模型的正确性，而对首级和次级叶轮的流场计算又能推测出整个离心泵的水力性能. 图 2 为间隙流动计算结果.



图 1 计算区域网格划分

Fig. 1 Mesh of calculation domain

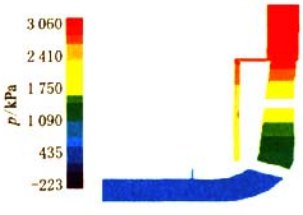


图 2 间隙流动计算结果

Fig. 2 Computational results of clearance flow

2 机组轴系转子动力学分析

大功率高压多级离心泵级数多、转轴长、转速高，结构较为复杂，并且随着使用要求的提高，大功率高压离心泵朝着大型化、高速化和机电一体化的方向发展，对运行的安全性和可靠性要求更高. 其中，除水力学性能、结构和电气控制等方面需要满足高要求外，复杂旋转轴系的振动及稳定性也是需要重点关注的问题.

目前国内泵生产行业，尤其大功率高压泵机组生产企业都不具备对高压泵机组进行转子动力学分析的技术和能力，特别是在机组轴系扭转振动和“湿”临界转速方面. 这成为制约企业扩大生产的关键技术问题.

2.1 湿临界转速分析

与一般转子系统不同，大功率高压离心泵转子系统在进行转子动力学分析时除了要考虑泵轴以及轴承的动特性外，还要考虑叶轮处的密封间隙力. 由于转子一般是卧式的，而诸密封环位于两个径向轴承之间，因此对整个转子的振动影响很大. 就动特性而言，密封环的作用与滑动轴承类似，但作用机理不

万方数据

同."湿"状态下临界转速计算模型如图3所示.

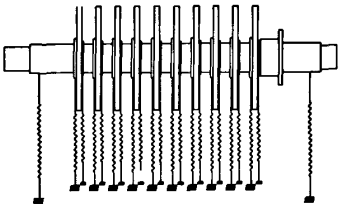


图3 "湿"状态下临界转速计算模型

Fig. 3 Calculation model of critical speed in "wet" state

密封间隙力的产生主要靠密封间隙两端很高的压差所产生的轴向流动而不是动压效应[4-8].密封间隙的动力特性对高压泵的动力学特性有重要的影响,因此分析计算密封间隙的动力特性系数成为计算分析高压泵"湿"临界转速的关键,图4为间隙密封的动力学分析模型.

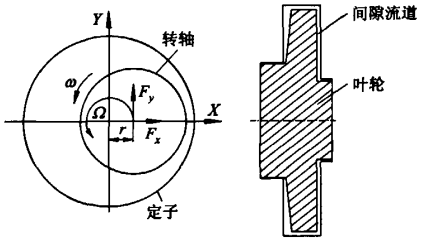


图4 间隙密封转子动力学模型

Fig. 4 Dynamic model of rotor with clearance seal

以一台用于 1.6×10^6 t/a 延迟焦化装置的3 800 kW超高压切焦泵为例,对密封间隙 δ 与临界转速 ω 的关系进行分析,分析结果如图5所示.可以看出泵的一阶"湿"临界转速明显高于一阶"干"临界转速,接近一阶"干"临界转速的2倍.说明环形密封的动力特性对泵转子动力学特性的影响是显著的.

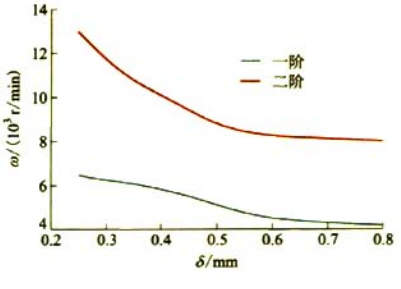


图5 密封间隙与临界转速的关系

Fig. 5 Relationship between seal clearance and critical speed

环形密封的动力特性系数与密封的结构参数有很大的关系,因此需要考虑不同密封环间隙下其动力特性的变化及其对转子系统动力特性的影响,以保证转子运转的安全.

2.2 机组轴系扭转振动特性

大功率高压离心泵机组由电机、变速装置、多级离心泵组成,其整个轴系结构较为复杂,因此轴系的扭转振动特性分析及优化对机组的安全设计具有重要的作用.

在国内泵行业,大部分企业并不具备大型机组的轴系扭转振动特性分析的技术和能力,而大型泵机组的国际标准对其机组轴系扭转振动特性有具体标准要求.这就造成了国内泵生产的技术瓶颈,研制新型大功率机组必须解决该技术难题.图6为轴系扭转振动分析模型.



图6 轴系模型

Fig. 6 Shafts model

在保证泵机组轴系扭转特性分析正确的前提下,适当地简化机组轴系的模型,最终在泵机组轴系扭振特性的设计中,要求低速轴和高速轴的各阶固有频率比在1倍和2倍工作转速下的对应频率小10%以上或大10%以上.

3 承压元件设计和分析

3.1 高压壳体设计

大功率高压泵允许最大工作压力普遍在30 MPa以上,部分产品的允许最大工作压力更高.因此,高压泵壳体的安全性和可靠性显得极其重要.本研究在泵壳体设计中引入压力容器的设计和分析理念,采用基于应力分类的大型高压离心泵关键承压件的优化设计,以确保承压壳体设计的安全性和可靠性[9-10].

根据钢制压力容器分析设计标准对各类应力强度的安全判据,通过有限元分析可以看出接管锥体与筒体连接的连接处、盖板与筒体接触处、远离接管的筒体内壁及筒体内壁靠近接管的部分应力较大.

万方数据

根据结果对壳体设计进行优化. 如图 7 所示.

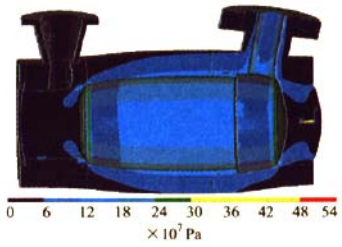


图 7　壳体强度分析
Fig. 7　Strength analysis of shell

3.2　主螺栓强度分析

高压泵壳体高压端使用高强度螺栓预紧密封，螺栓承受巨大拉应力，螺栓螺纹的安全关系整个机体的安全. 因此螺纹设计要求保证其在极限工况下不会发生失效. 采用接触强度分析方法对螺纹进行强度分析，结果如图 8 所示.

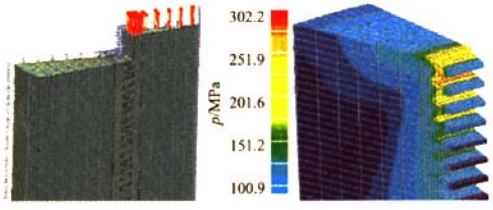


图 8　螺纹强度分析
Fig. 8　Strength analysis of screw thread

4　结　论

大功率高压泵机组的研发是一个复杂的系统工作，其中涉及了化工、力学、机械以及控制等多个学科的交叉. 文中通过水力模型建立、机组振动性能分析、高压承压元件安全设计 3 个方面对大功率高压泵机组研制过程中的关键技术进行了介绍，其中作为机组可靠性重要保证的轴系转子动力学分析设计尤为重要.

参考文献(References)

[1] 查　森. 叶片泵原理及水力设计[M]. 北京：机械工业出版社，1988.

[2] 潘中永，谢　蓉，曹英杰，等. 叶片安放角变化规律对离心泵性能影响分析[J]. 排灌机械，2009，27(5)：319－322.
Pan Zhongyong, Xie Rong, Cao Yingjie, et al. Analysis effects of blade angle on centrifugal pump performance [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2009, 27(5): 319－322. (in Chinese)

[3] 张元兴，楚武利. 用 CFD 研究离心压缩机叶顶间隙对内部流场的影响[J]. 风机技术，2007(2)：11－13，33.
Zhang Yuanxing, Chu Wuli. Application of CFD researching on the influence of top blade clearance on inner flow field of centrifugal compressor[J]. *Compressor Blower Fan Technology*, 2007(2): 11－13, 33. (in Chinese)

[4] 孙启国，姜培林，虞　烈. 大间隙环流壁面摩擦及偏心转子静特性研究[J]. 摩擦学学报，1999，19(3)，261－265.
Sun Qiguo, Jiang Peilin, Yu Lie. Study on wall friction and static characteristics of eccentric rotor in large gap annular flow[J]. *Tribology*, 1999, 19(3), 261－265. (in Chinese)

[5] Antunes J, Axisa F, Granenwald T. Dynamics of rotors immersed in eccentric annular flow—Part Ⅰ: Theory [J]. *Journal of Fluid and Structures*, 1996, 10(8): 893－918.

[6] Childs D W. Fluid-structure interaction forces at pump impeller-shroud surfaces for axial vibration analysis[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1991, 113(1): 108－115.

[7] Hsu Y, Brennen C E. Fluid flow equations for rotor dynamic flows in seals and leakage paths[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2002, 124(1): 176－181.

[8] Black H F. Effects of hydraulic forces in annular pressure seals on the vibrations of centrifugal pump rotors [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1969, 11(2): 206－213.

[9] 陆明万，寿比南. 新一代的压力容器分析设计规范—ASME Ⅷ－2 2007 简介[J]. 压力容器，2007，24(9)：42－47，61.
Lu Mingwan, Shou Binan. A new generation code for design by analysis of pressure vessels—introduction of ASME Ⅷ－2 2007 edition[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2007, 24(9): 42－47, 61. (in Chinese)

[10] 陈勇军，郑津洋，邓贵德，等. 单层厚壁圆筒弹性动应力的简化计算方法[J]. 工程力学，2006，23(11)：45－51.
Chen Yongjun, Zhen Jingyang, Deng Guide, et al. A simplified method for calculating elastodynamic stresses of monobloc thick-walled cylinder[J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(11): 45－51. (in Chinese)

(责任编辑　陈建华)

万方数据