

air leakage [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University 2009.

(陈滨 编辑)

文章编号: 1001-2060(2016)06-0092-06

# 混流式核主泵中压力脉动特性分析

李景悦 赖喜德 张翔 罗丽

(西华大学能源与动力工程学院, 四川 成都 610039)

**摘要:** 核主泵是反应堆冷却剂系统的主要设备和压力边界的设备之一,对安全性要求极高。由于核主泵叶轮与导叶的动静干涉作用,以及运行过程中偏离设计工况时,其流道内流体会产生非常复杂的压力脉动,并会对核主泵水力单元零部件产生复杂的附加动态应力而导致疲劳破坏。为提高核主泵的安全性,采用对混流式核主泵进行全流道非定常数值模拟途径来探究核主泵水力单元在不同运行工况下的瞬态流场,通过研究叶轮、导叶流道压力的时域变化规律,并利用快速傅里叶变化的频域分析方法对压力脉动特性进行特点分析。结果表明:在设计工况下压力脉动幅值最小,若运行工况的流量远远低于设计工况,流道内的压力脉动幅值将大幅度上升,压力脉动最为剧烈点位于叶轮出口。流量的减小对叶轮出口流动影响较小,但对叶轮进口影响较大。压力脉动的频率与叶轮叶片数和导水机构的导叶数有关,叶轮与导水机构的压力脉动主要发生在主频及谐波位置,且为低频压力脉动。

**关键词:** 核主泵; 压力脉动; 叶轮; 导叶; 瞬态流场

中图分类号: TH313 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.06.015

## 引言

核反应堆冷却剂主循环泵(以下简称:核主泵)是核电站一回路系统内唯一高速旋转的机械。由于运行环境的特殊性,其长期性、安全性和可靠性要求较高。核主泵在启动、停机以及事故发生时会偏离设计工况,其流道内流体会产生非常复杂的压力脉动现象,并会对核主泵水力单元零部件产生复杂的附加动态应力而导致疲劳破坏,另外一方面若其脉动频率与泵的固有频率接近或相等,则极易引起结

构共振,发生重大核事故。因此,核主泵水力单元的压力脉动特性一直是国内外专家、学者高度重视的课题<sup>[1-2]</sup>。

目前,美国 EMD、法国热蒙 AREVA、奥地利 ANDRITZ 等公司都拥有各自相对成熟的核主泵技术<sup>[3-5]</sup>。我国虽然至今尚未掌握核主泵关键部件的核心技术,但在叶片泵压力脉动方面已有一定的研究。袁寿其等对不同叶片数下管道泵的振动特性进行探究,通过优化叶片数的方法改善了泵内部的不稳定流动<sup>[6]</sup>;张玉良等通过非定常数值模拟分析离心泵停机过程的流动特性,得到总压的变化特性<sup>[7]</sup>;姚志峰采用试验研究方法,分析了双吸泵的压力脉动特性,提出长短叶片的使用可改善压力脉动<sup>[8]</sup>。然而,国内学者大多是对离心泵、轴流泵的分析<sup>[9-10]</sup>,而对于混流式核主泵,由于缺少模型,且无法自主设计,因此相关研究甚少。本文则以某厂生产的混流式核主泵为模型泵,通过三维非定常数值模拟,探究其水力单元的压力脉动。这对在建、拟建核电站的安全可靠运行具有一定的理论参考价值。

## 1 核主泵水力单元的几何建模

本文采用某厂生产的混流式核主泵为研究对象。该模型泵的设计参数为:流量  $Q = 23\ 790\ \text{m}^3/\text{h}$ ,扬程  $H = 98\ \text{m}$ ,转速  $n = 1\ 485\ \text{r}/\text{min}$ ,叶轮叶片数  $Z = 7$ ,导叶叶片数  $Z_d = 12$ ,转频  $f = 24.75\ \text{Hz}$ ,叶频

收稿日期: 2015-07-17; 修订日期: 2015-08-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379179); 西华大学研究生创新基金资助项目(yejj2015047); 受到“流体及动力机械教育部重点实验室”资助

作者简介: 李景悦(1991-),女,江苏丹阳人,西华大学硕士研究生。

通讯作者: 赖喜德(1962-),男,四川三台县人,西华大学教授。

为  $f_n = 173.25$  Hz; 其水力单元包括: 进口流道、叶轮、导叶、球壳, 如图 1 所示。

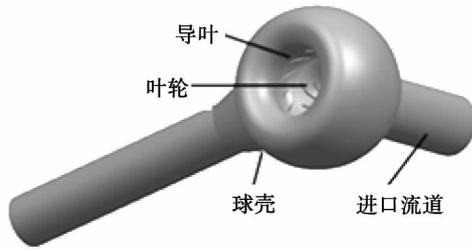


图 1 模型泵水力单元

Fig. 1 Hydraulic unit of model pump

1	62 189	1 034 561	658 221
2	63 114	1 224 561	801 231
3	65 794	1 366 788	887 348
4	78 911	1 678 231	1 017 893

### 2.2 边界条件与计算动力学模型

采用 CFD(计算流体动力学) 软件对核主泵水力单元进行全流道数值模拟。进口边界条件设定为质量流量, 出口给定压力, 选用无滑移壁面。在满足雷诺时均  $N-S$  方程与连续方程的前提下, 使用 SST(剪切压力传输) 湍流模型封闭方程组。

雷诺时均  $N-S$  方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \rho F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (1)$$

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

湍流模型方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \mu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \mu \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4)$$

式中:  $\rho$ —流体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t$ —时间,  $\text{s}$ ;  $\mathbf{u}$ —速度矢量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $u_i$ 、 $u_j$ —时均速度的分量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $F_i$ —体积力,  $\text{N}$ ;  $P$ —压力,  $\text{Pa}$ ;  $\Gamma_k$ 、 $\Gamma_\omega$ —湍流脉动值引入

## 2 流场数值计算方法

### 2.1 网格化分

对整个计算区域进行非结构化网格划分, 对于流动复杂区域进行网格加密处理。由于网格数对结果影响较大, 因此, 需要进行网格无关性验证。

对比表 1 中 4 种方案, 发现网格总数在 280 万之后, 网格数的增加对水力效率的影响较小。结合计算条件考虑, 选择方案 3 进行数值仿真。

表 1 网格无关性验证

Tab. 1 Grid independence test

方案	进口流道网格	叶轮网格	导叶网格
1	401 231	1 886 202	
2	485 113	2 574 019	
3	489 164	2 809 094	
4	589 019	3 364 054	

的相应扩散系数;  $\mu$ —动力粘度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $k$ —湍动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $\omega$ —比耗散率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $G_k$ —因层流速度梯度造成的湍动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $G_\omega$ — $\omega$  方程导致的,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $Y_k$ 、 $Y_\omega$ —扩散引起的湍流,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ 。

首先对模型泵水力单元进行定常计算, 再以定常计算结果作为非定常计算的初始条件。通过有限体积法对瞬时控制方程进行空间上的离散。以叶轮旋转  $3^\circ$  作为时间步长, 以叶轮旋转 5 周所用时间作为总时长, 取最后一周的计算结果用以分析, 并使用 FFT(快速傅里叶) 变换方法, 对结果进行处理, 用以揭示各监测点的压力脉动特性。

### 2.3 监测点的设置

为了探究核主泵水力单元关键部件的压力脉动特性, 对叶轮进口至导叶出口的压力脉动进行监测。由于叶轮与导叶流道具有对称性, 因此选择一个流道在其叶轮进口、叶轮中间流道和叶轮出口分别设置绝对静止监控点  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ ; 在导叶进口、导叶中间流道和导叶出口分别设置绝对静止监控点  $P_4$ 、 $P_5$ 、 $P_6$ , 其在轴面投影图的分布如图 2 所示。

## 3 核主泵水力单元的外特性瞬态计算分析

不同时刻, 核主泵内流体的流动状态不同, 叶轮

对流体做功也并不完全一致,其表现出的外特性也不完全一样,图3与图4给出了不同流量下,模型泵的瞬态效应变换特点。

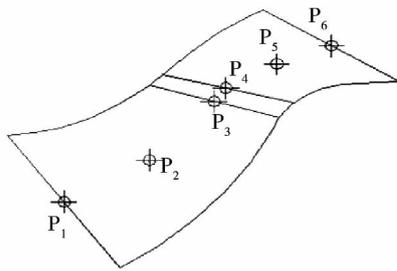


图2 监测点的设置

Fig. 2 Arrangement of monitoring points

图3中扬程为液体由泵进口到出口获取的能量。由图3中可以看到,流量愈小,泵的扬程愈高,扬程波动越大。在设计工况下,泵的瞬时扬程几乎相同,趋于一条直线。随着流量的减少,扬程脉动幅值逐渐增大。在0.2Q和0.5Q,扬程脉动已比较明显。值得注意的是,在小流量工况下,扬程以近似正弦的规律变化,且波峰与波谷各出现了7次,恰巧与叶轮叶片数相等。而对于效率曲线,由图4可以发现,在设计工况附近泵的效率趋于稳定。偏离设计工况越远,效率越低。在0.2Q与0.5Q时,泵的效率一直处于下降阶段,并且可以清晰看到,在一个旋转周期内T,每经过1/7T,效率曲线的斜率明显增强,其变化方式在一定程度上具有一定的周期性。由此可见,该模型泵叶轮叶片数关系着模型泵外特性的波动。

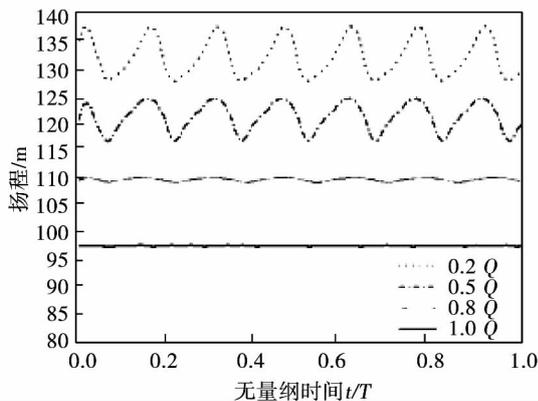


图3 扬程曲线图

Fig. 3 Headgraph

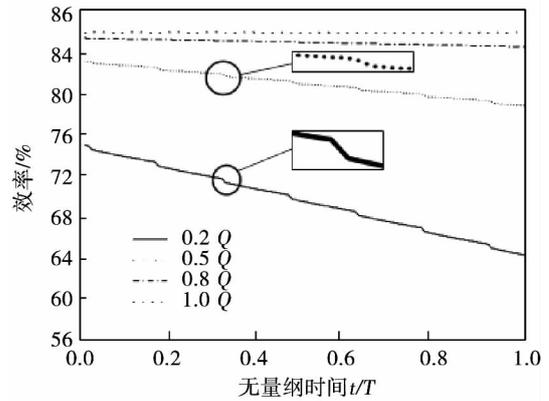


图4 效率曲线图

Fig. 4 Efficiencygraph

### 4 叶轮和导水机构压力脉动特性分析

叶轮、导叶作为核主泵水力单元的关键部件对流场的瞬态效应有重要影响,而流道内高低压的交替变换是流场瞬时特性的表现。为进一步探究叶轮、导叶内的瞬时流态,现对叶轮进口至导叶出口各监测点的压力脉动予以分析。

无量纲压力系数  $C_p$  :

$$C_p = \frac{P - \bar{P}}{0.5\rho u_2^2} \tag{5}$$

式中: P—监测点的瞬时静压,Pa;  $\bar{P}$ —一个旋转周期内监测点的平均静压值,Pa;  $u_2$ —叶轮出口的圆周速度,m/s。

#### 4.1 叶轮压力脉动特性分析

##### 4.1.1 叶轮叶片进口压力脉动

图5为叶轮进口监测点P<sub>1</sub>的压力脉动时域图。可以看到,叶轮进口压力以近似正弦的形式波动,呈明显的周期性变化。在一个叶轮旋转周期内,压力脉动的波峰与波谷各出现7次,与叶轮叶片数相等。出现该现象与小流量工况点叶轮进口出现回流,部分已进入叶轮的水流返回上游,形成一低压的漩涡区,即所谓部分负荷效应有关。在设计工况,叶轮压力脉动较小,说明在该工况下流体流动较平稳。随着流量的减少,压力脉动加剧,在0.2Q工况下,压力系数已接近0.2,约为设计工况的2.5倍。这是由于,当泵的运行工况远远偏离设计工况时,流道内流体流动状态不稳定,湍动能增加,泵的水力振动加

剧, 叶轮与导叶的动静干涉作用亦更明显。

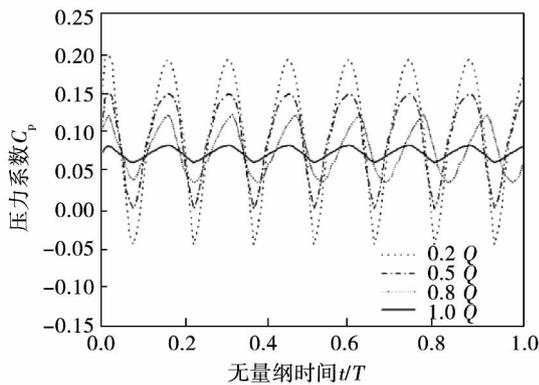


图 5 叶轮进口压力脉动时域图 ( $P_1$ )  
 Fig. 5 Pressure pulsation of impeller at inlet in time domain ( $P_1$ )

图 6 为监测点  $P_1$  压力脉动频域图。可以发现, 当频率为 173.25 Hz 时叶轮进口振幅最大, 该频率与叶频一致, 为叶轮进口压力脉动主频。并且在各工况下, 频率为 346.5、519.75 和 693 Hz 时, 监测点  $P_1$  压力脉动幅值都有明显增大, 值得注意的是, 这些频率分别为主频的 2、3、4 倍。而在 0.5Q 工况, 频率为 866.25、1 212.75 Hz 时, 压力脉动幅值也较大, 大于附近频率所在的相应幅值。在 0.2Q 工况, 更多的频率点 1 039.5、1 386 Hz 处都出现了压力脉动增大现象。不难发现, 这些频率都为叶频的整数倍。由此可见, 叶轮进口压力脉动主要以主频及谐波诱发的振动为主。

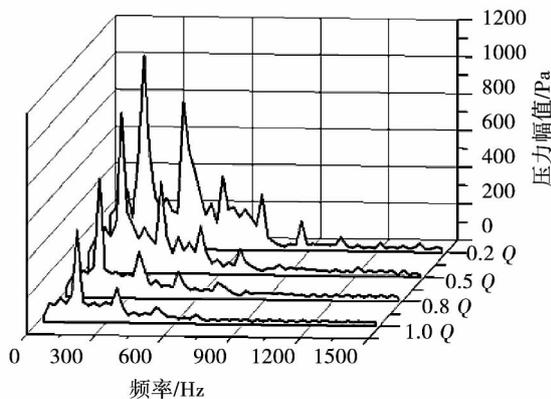


图 6 叶轮进口压力脉动频域图 ( $P_1$ )  
 Fig. 6 Pressure pulsation of impeller at inlet in frequency domain ( $P_1$ )

#### 4.1.2 叶轮叶片出口压力脉动

理论上, 叶轮出口与导叶相连接, 其受到动静干涉作用的影响应当更为严重。因此, 叶轮出口的压力脉动理应受到重视。为探究叶轮出口压力的变化规律, 图 7 与图 8 分别给出了不同流量下压力随时间和频率的变化情况。

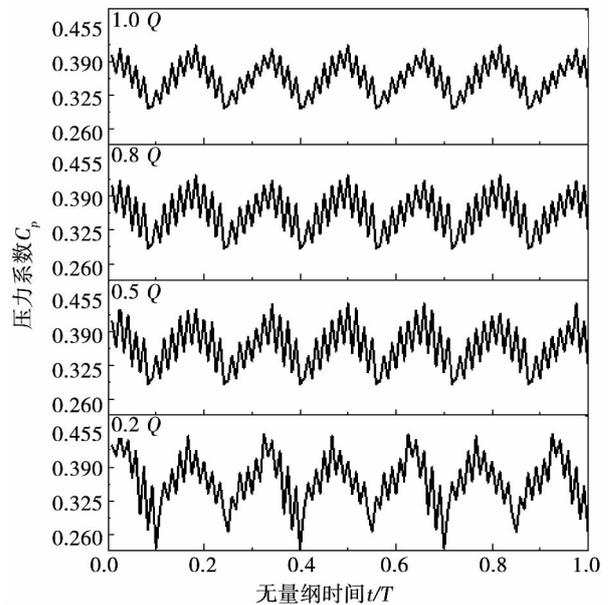


图 7 叶轮出口压力脉动时域图 ( $P_3$ )  
 Fig. 7 Pressure pulsation of impeller at outlet in time domain ( $P_3$ )

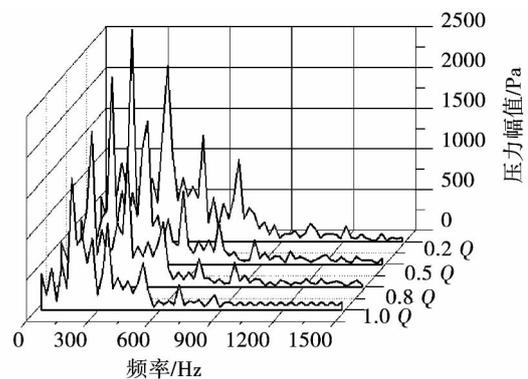


图 8 叶轮出口压力脉动频域图 ( $P_3$ )  
 Fig. 8 Pressure pulsation of impeller at outlet in frequency domain ( $P_3$ )

由图 7 可以看到, 叶轮出口压力波动比较明显, 各工况下监测点  $P_3$  的压力脉动呈周期性变化。在同一周期内, 压力脉动的波峰与波谷各出现 7 次。

并且, 叶轮出口高低压力交替现象明显, 波动剧烈程度大于叶轮进口。出现该现象是由于水流流出叶轮时会在叶片端面形成一低压的卡门涡街, 当高压区与低压区依次经过静止的监测点时这点的压力自然出现周期波动。不难发现, 在  $1.0Q$ 、 $0.8Q$ 、 $0.5Q$  工况下, 压力系数  $C_p$  随无量纲时间  $t/T$  的变化特点相似。而在  $0.2Q$  工况下, 叶轮出口波动增大, 但依然呈规律性脉动。由此可见, 流量的减小对叶轮出口压力脉动影响不大。

图 8 为叶轮出口监测点  $P_3$  的压力脉动频域图。结合图 6 对比, 叶轮出口振动明显比进口剧烈, 其设计工况点最大振幅为进口的 3.23 倍。随着流量的减少, 叶轮压力脉动剧烈程度呈上升趋势。叶轮出口以中低频压力振动为主, 主频依然为叶频, 谐波振动随流量的减少而增加。可以看到, 在  $0.2Q$  工况下, 主频的各阶倍频都有高幅值出现, 该现象与偏离设计工况过远有关。

#### 4.2 导叶压力脉动特性分析

图 9 给出了导叶进出口压力脉动时域图。导叶压力在一定范围内波动, 其脉动周期性依然与叶轮叶片数有关。偏离设计工况越远, 其脉动情况越复杂, 但由于导叶的整流作用, 其压力脉动较叶轮出口有明显的改善。在小流量工况, 特别是  $0.5Q$  与  $0.2Q$  工况下, 可以明显看出, 导叶出口压力脉动比进口大。出现这种现象一方面是导叶内流动受到叶轮出口压力脉动的影响, 另一方面由于导叶出口受到球壳形泵壳结构的干扰, 并且, 在小流量工况下, 流体流动偏离设计工况, 流道内流态不理想, 其压力脉动情况较设计工况显得更为明显。

为了解沿导叶流道液压的变化规律, 图 10 给出了设计工况下导叶流道监控点  $P_4 \sim P_6$  的压力频域变化特性图。

可以看到, 叶频依然为导叶内压力脉动的主频, 次频位于 2 阶主频处, 并且在 3、4、5 阶主频位置, 都存在较强的压力脉动。在主频及谐波位置, 监测点  $P_6$  的压力脉动幅值明显强于  $P_4$ 、 $P_5$ , 再次证明由于球壳的干扰导叶出口位置压力脉动较为强烈。若固有频率与叶频及谐波相近或相同, 则极易发生共振现象, 严重时极可能出现严重核事故。

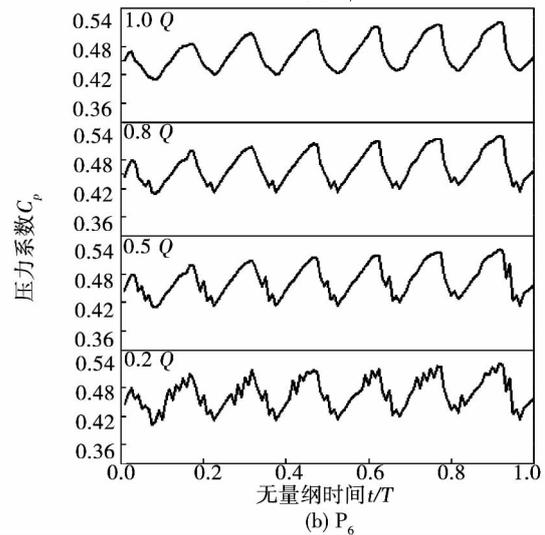
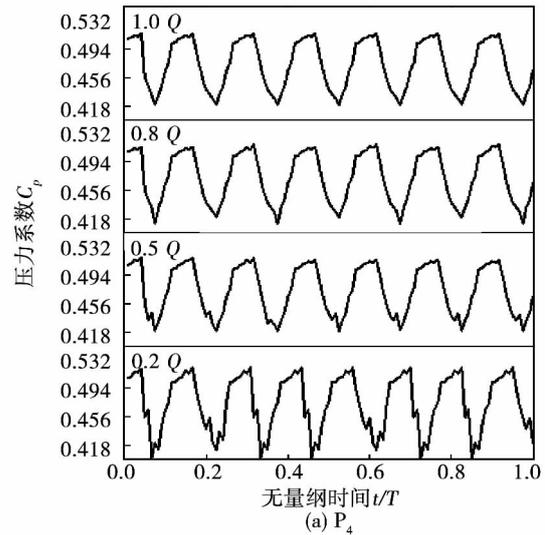


图 9 导叶压力脉动时域图  
Fig. 9 Pressure pulsation of diffuser in time domain

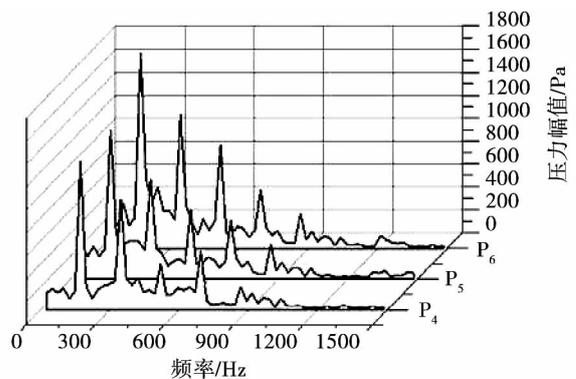


图 10 导叶压力脉动频域图  
Fig. 10 Pressure pulsation of diffuser in frequency domain

## 5 结 论

通过对混流式核主泵水力单元的数值模拟,对叶轮与导叶的压力脉动特性进行分析,可以得到:

(1) 核主泵的瞬时流动特性具有一定的周期性,其变化规律与泵的叶片数有关。一个叶轮旋转周期内,模型泵的外特性周期性波动次数与叶轮叶片数相等;

(2) 叶轮与导叶流道的压力脉动以中低频为主,主频与叶频相等。在主频及谐波处易发生能量较大的波动;

(3) 设计工况下压力脉动最小。而流量的减小对叶轮出口影响较小,但对叶轮进口影响较大。若运行工况远远偏离设计工况,流道内的压力脉动将大幅度上升;

(4) 导叶内的压力脉动维持在一定范围内,导叶进口压力脉动较叶轮出口有明显改善,但导叶出口压力脉动会因球壳影响而增强。

感谢: 本研究在“流体及动力机械教育部重点实验室”资助下完成,特此感谢!

### 参考文献:

- [1] 唐 辉. 世界核电设备与结构将长期面临的一个问题—微动损伤[J]. 核动力工程, 2000, 21(3): 221-231.  
TANG Hui. Fretting damage, one of world-wide difficulties in the field of nuclear power equipment and Structures for a Long-term [J]. Nuclear Power Engineering, 2000, 21(3): 221-231.
- [2] 郝 光. 核电设备质量见证点跟踪管理方法[J]. 中国核电, 2012(01): 50-57.  
HAO Guang. The method innovation in nuclear equipment quality witness tracing and management [J]. China Nuclear Power, 2012, 01: 50-57.
- [3] 刘 松. 核泵主轴机械-热耦合疲劳问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.  
LIU Song. Research on mechanical-thermal fatigue of the shaft in a reactor coolant pump [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

- [4] BRUNETIÈRE N, TOURNERIE B, FRÈNE J. TEHD lubrication of mechanical face seals in permanent regime. Part 1: Numerical model and experiments [J]. Journal of Tribology, 2003, 125: 608-616.
- [5] GALENNE E, PIERRE-DANOS I. Thermo-elasto-hydro-dynamic modeling of hydrostatic seals in reactor coolant pumps [J]. Tribology Transactions, 2007, 50: 466-476.
- [6] 袁寿其, 吴登昊, 任 芸, 等. 不同叶片数下管道泵内部流动及振动特性的数值与试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 115-122.  
YUAN Shou-qi, WU Deng-hao, REN Yun, et al. Numerical and experimental study on flow and vibration characteristics of in-line circulator pumps with different blades numbers [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 115-122.
- [7] 张玉良, 朱祖超, 崔宝玲, 等. 离心泵停机过程非定常流动的数值模拟[J]. 工程热物理, 2012, 33(12): 2096-2099.  
ZHANG Yu-liang, ZHU Zu-chao, CUI Bao-ling, et al. Numerical simulation of unsteady flow in centrifugal pump during stopping period [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(12): 2096-2099.
- [8] 姚志峰, 王福军, 杨 敏, 等. 叶轮形式对双吸离心泵压力脉动特性影响试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 133-143.  
YAO Zhi-feng, WANG Fu-jun, YANG Min, et al. Effects of impeller type on pressure fluctuations in double-suction centrifugal pump [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 133-143.
- [9] 张玉新, 王秀叶, 丁 鹏, 等. 潜水轴流泵内部流场压力脉动的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(4): 302-307.  
ZHANG Yu-xin, WANG Xiu-ye, Ding Peng, et al. Numerical analysis of pressure fluctuation of internal flow in submersible axial-flow pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(4): 302-307.
- [10] 戴菡葳, 刘厚林, 丁 剑, 等. 离心泵叶轮出口宽度对泵腔内压力脉动分布的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(1): 20-25.  
DAI Han-wei, LIU Hou-lin, DING Jian, et al. Effects of impeller outlet width on pressure pulsation in two side chambers of centrifugal pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(1): 20-25.

(姜雪梅 编辑)

capability and optimization efficiency compared to particle swarm optimization and genetic algorithms ,and can improve the dynamic performance of main stream pressure control system. **Key words:** boiler ,main stream pressure , seeker optimization algorithm ( SOA) ,PID parameter optimization

转速对三分仓回转式空气预热器热力性能的影响 = **Influence of Rotational Speed on Thermal Performance of Tri-sector Rotary Air Preheaters Based on Finite Difference Method** [刊 ,汉] CHEN Xun ,DUAN Xue-nong ,YANG Yi ,WANG Dun-dun ( State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute ,Changsha ,Hunan China ,Post Code: 410007) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 ,31( 6) . - 85 ~91

Based on finite difference method ,the tri-sector rotary regenerative air-preheater was spread along the rotor's circular side and mesh between the matrix elements and the fluids was generated. Then the matrix and fluid temperature fields were obtained according to the energy balance equation and using an improved Gauss-Sidel arithmetic. For a 600MW unit tri-sector rotary regenerative air-preheater ,a detailed analysis was carried out for the temperature field distributions of the fluid and metal and ammonium bisulfate ( ABS) deposition area with different the rotational speeds. The results showed that ,1) The nonlinear characteristics of matrix temperature distribution along with the rotation angle increases while the rotational speed decreases ,which can be described by the unsteady heat transfer correction factor  $\Pi$  ,and for each sector the value of factor  $\Pi$  is different. 2) There exist relatively stable balance positions during both heating and cooling periods ,which are the intersection points of matrix temperature profile curves with different rotational speeds. 3) The effect on average outlet temperatures of primary and secondary air channels from rotor rotational speed depends on the rotor rotation direction and the sector angle division. **Key words:** tri-sector rotary air preheater ,rotational speed ,thermal performance ,finite difference method ,ammonium bisulfate ,unsteady heat transfer

混流式核主泵中压力脉动特性分析 = **The Pressure Pulsation of Mixed-flow Reactor Coolant Pump** [刊 ,汉] LI Jing-yue ,LAI Xi-de ,ZHANG Xiang ,LUO Li ( School of Energy and Power Engineering ,Xihua University ,Chengdu ,Sichuan ,China ,Post Code: 610039) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 ,31( 6) . - 92 ~97

The reactor coolant pump is one of the main equipments and pressure boundaries of the reactor coolant system ,and the requirements of safety and reliability are extremely high. And the complex pressure pulsation can lead to fatigue damage of flow channel. In order to improve the safety and reliability of reactor coolant pump ,the CFD method was employed to simulate numerically the transient flow field. The impeller and diffuser were taken into account ,and the characteristics of pressure pulsation in time were analyzed. The frequency domain characteristics of pressure fluctuation were obtained by using the method of FFT. The results show that pressure fluctuation at the design working

condition is most stable ,but it is most intense at the outlet of impeller. The cyclical fluctuation in transient performance is equal to the number of impeller blades in a rotation period. The pressure fluctuation occurs mainly at the main frequency and its harmonics ,and with low and intermediate frequencies. **Key words:** reactor coolant pump , pressure pulsation ,impeller ,diffuser ,transient flow field

**新型屋顶式太阳能烟囱通风性能数值模拟研究 = Numerical Investigation on Ventilation Performance of a New Roof Solar Chimney** [刊 ,汉] GU Yuan ,LEI Yong-gang ,WANG Fei ( School of Environment Science and Engineering ,Taiyuan University of Technology ,Taiyuan ,Shanxi ,China ,Post Code: 030024) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 31( 6) . -98 ~104

A new roof solar chimney based on the coupling action of wind pressure and thermal pressure was introduced. The effects of the ratio of the shutters installation height to the solar chimney height ( $h_4/h_1$ ) ,the ratio of the windshield height to the shutters height ( $h_2/h_3$ ) ,the ratio of the channel II width to the channel I width ( $w_2/w_1$ ) ,outdoor wind speed ( $v$ ) and solar radiation intensity ( $I$ ) on the ventilation performance of the new structure were studied by three-dimensional computational fluid dynamics method. The results show that the mass flow rate of the new roof solar chimney firstly increases ,and then decreases with the increase of the ratio ( $h_4/h_1$ ) . There is an optimum ratio ( $h_4/h_1$ ) at around 0.15 for the maximum of mass flow rate ,but the velocity across the chimney outlet decrease with the increase of the ratio ( $h_4/h_1$ ) . With the increase of the ratio ( $w_2/w_1$ ) ,the mass flow rates of the solar chimney under different outdoor wind speeds have different variation trends. **Key words:** roof solar chimney ,wind pressure , thermal pressure ,ventilation performance

**回热汽轮机用于再热机组的理论研究 = Theoretical Research on the Thermo-economics of Regenerative Turbine for the Reheat Unit** [刊 ,汉] GUO Jun ( Northwest Electric Power Design Institute ,Xi' an ,Shaanxi ,China ,Post Code: 710075) ,Han Xiao-qu ,MU Qi-wei ,Liu Ji-ping ( State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering ,Xi' an Jiaotong University ,Xi' an ,China ,Post Code: 710049) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 31( 6) . -105 ~113

Reheating and regenerating technologies are widely used in modern thermal power units with large capacity and high steam parameters. However ,with the increasing reheat steam temperature ,the superheat degree of the steam extracted after the reheater increases ,so that the irreversible loss inside the corresponding regenerators becomes larger and the regenerative effectiveness is weakened. Therefore ,the retrofitting scheme by installing a regenerative back pressure turbine has been proposed in order to improve the system thermo-economics. In this paper ,on a 1 000 MW ul-