

核主泵内部流动干涉的瞬态效应研究

黎义斌, 李仁年, 王秀勇, 毕祯, 胡鹏林, 程效锐

(兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃省 兰州市 730050)

Transient Effects for Flow Interaction in the Flow Field of Nuclear Main Pump

LI Yibin, LI Rennian, WANG Xiuyong, BI Zhen, HU Penglin, CHENG Xiaorui

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu Province, China)

ABSTRACT: In order to reveal flow interference effects of impeller and guide vane of a nuclear main pump, adopting similar conversion algorithm and multiple parameters matching method, based on RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and block structured grids, unsteady numerical simulation was carried on the model pump whose shrinkage coefficient is 0.5. The results show that the pulsation amplitude of the head is related to operating conditions, the minimal value is on the rated condition, and it will gradually increase when the working condition deviate from the optimal point. The unstable flow pulsation effect appears in the inner flow passage of the guide vane, the transient effect of the flow pulsation of the inside guide vane is not obvious when the working condition is above $0.8Q_d$; the flow pulsation within the guide vane tends to be unstable when the working condition is under $0.8Q_d$. Considering the hydraulic stability of the unit, working condition should be above $0.8 Q_d$. Rotor-stator interaction induces periodic pulsation of the guide vane static pressure distribution, the average pulsation amplitude on the pressure side is maximum, and the suction side is minimum. The pressure pulsation period is related to the impeller blade number. The guide vane static pressure distribution is related to the relative position of the impeller trailing edge and the guide vane leading edge; the impeller trailing edge caused the blockage effect on the guide vane inlet flow, and it's the main reason causes the guide vane static pressure pulsation.

KEY WORDS: nuclear main pump; guide vane; rotor-stator interference; pulsation; numerical simulation

摘要: 为了揭示核主泵叶轮和导叶的流动干涉效应,采用相似换算法和多参数匹配法,基于 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型与块结构

化网格,对缩比系数为 0.5 的模型泵进行非定常数值模拟。结果表明:扬程脉动幅值与运行工况有关,额定工况时扬程脉动的幅值最小,偏离最优工况时,扬程脉动幅值逐渐增大。导叶内部流道产生不稳定的流量脉动效应,大于 $0.8Q_d$ 工况时,导叶内流量脉动瞬态效应不明显;小于 $0.8Q_d$ 工况时,导叶内流量脉动趋于不稳定。考虑到机组的水力稳定性,运行工况应大于 $0.8Q_d$ 。动静干涉使导叶内静压分布呈现周期性脉动,导叶压力面平均脉动幅值最大,吸力面平均脉动幅值最小,压力脉动的周期与叶轮叶片数有关;导叶内静压分布与叶轮尾缘和导叶前缘相对位置有关,叶轮尾缘对导叶入口流动的阻塞效应,是诱发导叶内静压脉动的主要原因。

关键词: 核主泵; 导叶; 动静干涉; 脉动; 数值模拟

0 引言

核电站反应堆冷却剂泵(又称核主泵、一回路泵)是最关键的核级泵,也是核岛内唯一的高速旋转机械^[1]。近年来,核电以安全、高效、节能、环保等优势越来越受到各个国家的青睐。2006 年 3 月 22 日,国务院通过了《中国核电中长期发展规划(2005—2020 年)》,预计到 2020 年,我国核电装机总量将从目前的 870 万千瓦提高到 4000 万千瓦,占全国总装机容量的比重从现在的 1.4% 上升到 4% 以上^[2]。目前,国际上第三代核主泵及系统设计与制造关键技术基本成熟。

核主泵主要应用于核反应堆冷却剂循环系统。20 世纪 90 年代,Westinghouse 公司研制了世界上首台第三代核主泵 APR1000 反应堆冷却剂泵 RCPs^[3](reactor coolant pumps, RCPs),该泵采用高惯量飞轮大功率屏蔽电机泵,理论上可实现 50 年寿命期免维修。21 世纪初期,在借鉴 APR1000 结构型式和设计参数的基础上,采用了基于数值模拟和试验研究的离散式设计方法,Westinghouse 公司与 KSB 公司联合研制了 APR1400 反应堆冷却剂循

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAF01B02); 国家自然科学基金项目(51369015)。

National Science and Technology Support Program (2013BAF01B02); National Natural Science Funds of China (51369015).

环泵。对比 APR 1000 的额定参数, APR1400 核主泵的扬程提高了 7%, 流量提高了 40%, 轴功率提高了 1.4 倍。通过 1:2 缩比模型样机和试验验证, 其冷态试验(25)效率为 83%, 热态工况时额定效率超过 85%^[3]。

国内学者^[4-13]应用 CFD 数值解析方法, 研究了核主泵过流部件的结构型式对水力性能的影响, 在此基础上表征了核主泵不同过流部件的内部流动特征及其相互作用机理。在失水事故工况下, 获得了不同工况下气相体积分数的变化规律^[14]。在停机过渡过程^[15]和变流量过渡过程^[16]等瞬变条件下, 研究了核主泵非定常压力脉动特性, 涡量变化规律和径向力分布规律。

本文基于 APR1400 核主泵水力模型进行改型设计, 通过理论分析和 CFD 数值方法预测了该泵的水力性能, 在此基础上阐明了核主泵内部流动干涉的瞬态效应。

1 模型泵相似换算与水力设计

1.1 模型换算法

核主泵过流部件由吸入段、叶轮、径向导叶、环形压水室、排出段组成, 立式结构布置; 驱动电机采用高性能屏蔽式电机, 工作状态下核主泵产生的轴向力通过屏蔽电机上端部的推力轴承承受。由于原型泵尺寸较大, 采用原型泵进行试验测试研制成本高、周期长, 国内外普遍采用原型泵的缩比模型进行试验, 核主泵的缩比系数为

$$\lambda = \frac{D_{2M}}{D_2} \quad (1)$$

式中: λ 表示核主泵的缩比系数, 本文取值为 0.5; D_{2M} 与 D_2 分别为模型泵和原型泵叶轮的出口平均直径。假设模型泵和原型泵满足几何相似和动力相似, 即比转速和水力效率均相近, 可近似认为满足相似换算准则, 表 1 为模型泵的额定参数。

考虑到叶片排挤系数和尺度效应对核主泵水力性能的影响, 基于叶片排挤系数不变性假设, 模型泵的叶轮叶片数 5 枚, 导叶叶片数 12 枚。

表 1 额定参数

Tab. 1 Rated parameters

参数	值
流量/(m ³ ·h ⁻¹)	2624
扬程/m	27.4
转速/(r·min ⁻¹)	1480
效率/%	83

1.2 过流部件理论分析

为了使核主泵水力性能达到设计要求, 同时为核主泵缩比模型的试验研究提供必要的理论依据, 采用混流式叶轮结构、径向导叶和环形压水室的水力匹配方案, 基于多参数匹配对核主泵叶轮、导叶和压水室进行了多重方案水力优化设计, 其中叶轮和导叶水力设计采用包角变换法^[17-20]。

采用 Proe5.0 软件对核主泵全流道进行三维造型, 为了保证核主泵入口流动分布均匀, 减少边界条件的设置对流场造成的影响, 适当延长了吸入端和排出端长度, 图 1 为核主泵动静干涉的三维模型, 其中图 1(a)和图 1(b)分别为轮缘侧和轮毂侧叶轮和导叶位置关系。



图 1 核主泵三维模型

Fig. 1 Nuclear main pump 3-D model

2 数值计算方法

2.1 湍流模型

采用固定于旋转叶轮上的相对参考系, 叶轮转速设置为 1 480 r/min, 核主泵内部流场为三维不可压非稳态黏性湍流流场。在此基础上, 建立相对坐标系下时均连续方程和动量方程。为了精确模拟核主泵内部流动, 湍流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。流场求解中, 压力与速度耦合采用 SIMPLEC 算法, 采用二阶迎风格式离散 N-S 方程。代数方程迭代计算采取亚松弛, 设定收敛精度为 10^{-4} 。计算收敛精度和结果的准确性受边界条件选取的影响较大, 所以设置叶轮进口为质量入流条件, 进口参考压力设置为 17.6 MPa; 出口设置为自由出流。固壁面设为无滑移壁面, 即壁面上各速度分量均为零, 近壁面的湍流流动按标准壁面函数处理。

核主泵内不可压缩流体的三维非定常湍流控制方程采用雷诺平均动量方程为:

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho F_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i}) \delta_{ij} \quad (3)$$

式中： ρ 表示流体密度； $-\overline{\rho u'_i u'_j}$ 表示平均雷诺应力。 μ_t 是湍流黏性系数，为湍动能 k 和湍流耗散率系数 ε 的函数； δ_{ij} 为克罗内克尔数。

采用 RNG $k-\varepsilon$ 双方程模型使雷诺平均方程封闭，其形式为：

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + 2 \mu_t \bar{S}_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + 2 C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \bar{S}_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - R - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中： μ_t 为湍流黏性系数，为湍动能 k 和湍流耗散率系数 ε 的函数； δ_{ij} 为克罗内克尔数； \bar{S}_{ij} 为应变率张量：

$$\begin{cases} \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \\ \mu_{eff} = \mu_t + \mu \end{cases} \quad (6)$$

式中 R 为 ε 方程中的附加源项，代表平均应变率对 ε 的影响：

$$\begin{cases} R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(\frac{1-\eta}{\eta_0} \right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{K} \\ \eta = Sk / \varepsilon \end{cases} \quad (7)$$

式中： $C_\mu=0.0845$ ； $C_{1\varepsilon}=0.42$ ； $C_{2\varepsilon}=1.68$ ； $\alpha_k=1.0$ ； $\alpha_\varepsilon=0.769$ ； $\beta=0.012$ ； $\eta_0=4.38$ 。

2.2 边界条件及网格处理

计算域由吸入端、叶轮、径向导叶、环形压水室、排出端组成。依据核主泵水力模型，在 Pro/E 5.0 软件完成全流道三维建模。网格划分采用 ICEM CFD 14.5 软件，在计算域内采用高质量的块结构化六面体网格布局。通过网格无关性和时间步长独立性验证，获得最经济的网格数，其中 0.5 模型泵网格总数为 1205.7 万。如图 2、3 所示。

首先验证核主泵网格无关性和时间步长无关性，得到了最经济的网格数和计算步长，时间步长为转轮旋转周期的 1/120，即每个时间步长内叶轮旋转 3° ，实际时间步长 $\Delta t = 3.4483 \times 10^{-4}$ s。计算中，先进行三维定常湍流数值计算，并将得到的定常流场结果作为非定常数值计算的初始流场。

为了阐明核主泵叶轮与导叶位置对内部瞬态

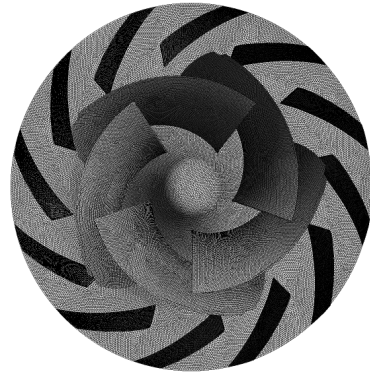


图2 叶轮与导叶网格

Fig. 2 Grid of impeller and guide vane

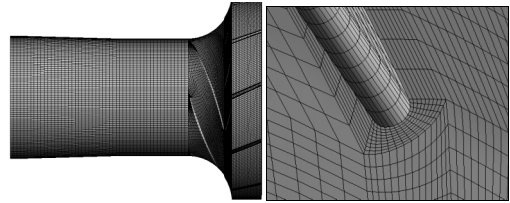


图3 网格及其拓扑关系

Fig. 3 Grid model and topological relationship

流场和外特性的影响，首先定义核主泵叶轮、导叶和环形压水室三者的空间位置关系，同时将导叶流道定义为 12 个子流道，各子流道之间夹角为 30° ，如图 4 所示。如图 5 所示时刻定义为 T_0 时刻。叶轮相对于导叶位置的角度变化周期为 72° ，即任意某一叶轮叶片旋转 72° 后，叶轮和导叶的位置关系保持初始位置关系。基于此，在一个周期内取 T_0 、

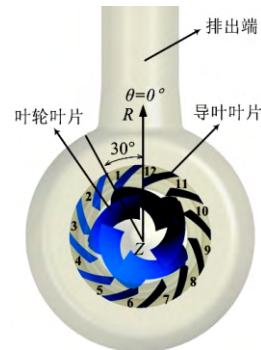


图4 叶轮与导叶位置关系

Fig. 4 Position relationship of impeller and guide vane

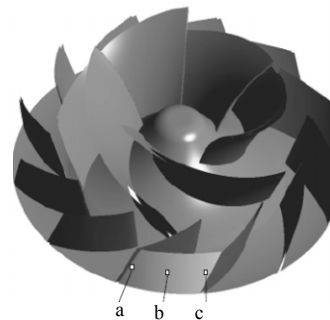


图5 导叶出口 1 监测点

Fig. 5 Monitoring point of guide vane outlet 1

$T_0+0.25T$ 、 $T_0+0.5T$ 、 $T_0+0.75T$ 共 4 个时刻，研究叶轮和导叶动静干涉流场的瞬态效应。为了分析导叶出口面静压的瞬态效应，选取导叶流道 1 出口面 3 个监测点，如图 5 所示。

3 结果与分析

3.1 外特性试验与性能预测

采用 Fluent 14.5 软件对模型泵内部流动进行了数值模拟，在 $0.4Q_d$ 、 $0.6Q_d$ 、 $0.8Q_d$ 、 Q_d 、 $1.2Q_d$ 共 5 种工况条件下，对模型泵外特性进行非定常性能预测。为了定量评价模型泵性能预估值和试验值的差异，将缩比系数 $\lambda=0.5$ 的模型泵扬程预估结果与 Claus Knierim^[3]得到的缩比系数 $\lambda=0.5$ 的核主泵扬程-流量试验曲线进行对比分析(额定工况下，模型泵扬程值和 Claus Knierim 得到的模型泵扬程值均为 27.4m，对比模型泵扬程预测值和 Claus Knierim 得到的模型泵扬程试验值，具有参考价值)。结果表明，在 $0.76Q_d\sim 1.22Q_d$ 工况范围内，CFD 计算值与试验值的误差趋于增大。小流量工况时，扬程计算值和试验值吻合较好；大流量工况时，扬程计算值和试验值误差较大。在全流量工况，CFD 性能预测值均高于试验值，额定工况下扬程计算值和试验值误差在 4%以内。如图 6^[3]所示。

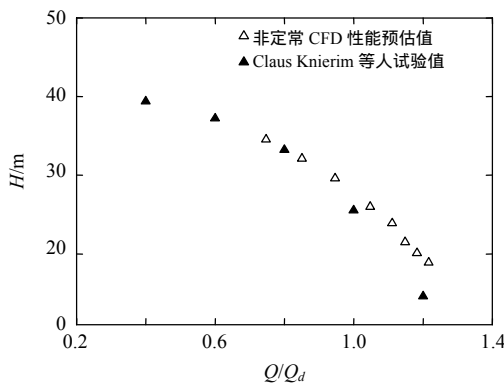


图 6 非定常预测值与 Claus Knierim 试验结果对比
Fig. 6 Head comparison between unsteady numerical predictions and Claus Knierim's experiment results

为了对比不同工况下核主泵瞬时扬程的脉动规律，对模型泵进行非定常数值模拟和性能预估，如图 7 所示，在 $0.4Q_d\sim 1.2Q_d$ 共 5 种工况下，任意某一旋转周期内瞬时扬程呈周期性波动规律，额定工况时瞬时扬程脉动幅值最小，小流量工况时瞬时扬程脉动幅值逐渐增大，但瞬时扬程脉动频率不变。考虑到瞬态条件下核主泵机组的抗震性指标要求，核主泵瞬时扬程的脉动幅值越小越好，因此稳定运行工况应在 $0.8Q_d\sim 1.2Q_d$ 之间。

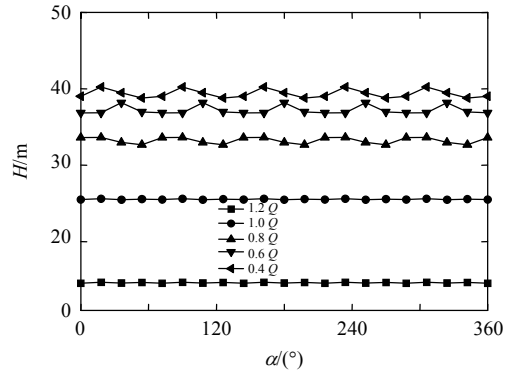


图 7 瞬时扬程的脉动效应

Fig. 7 Pulsation effects of transient head

3.2 动静干涉对导叶流量脉动效应

核主泵采用了高温条件下受力较为均匀的环形压水室，理论分析认为，环形压水室结构会迫使导叶流道内部压力场和速度场重新分布，从而破坏了导叶内部参数周向分布规律。为了验证理论分析，在叶轮某一旋转周期的 T_0 时刻，对比分析 $0.4Q_d\sim 1.2Q_d$ 共计 5 种工况条件下导叶内部流量分布的瞬态特性，如图 8—11。

研究表明， $0.4Q_d$ 工况下，导叶流道内部周向流量分布呈不均匀规律，且在某一周期的 T_0 、 $(T_0+0.25T)$ 、 $(T_0+0.5T)$ 、 $(T_0+0.75T)$ 时刻点，导叶流道的流量分布规律随时间呈现周期性变化规律。同

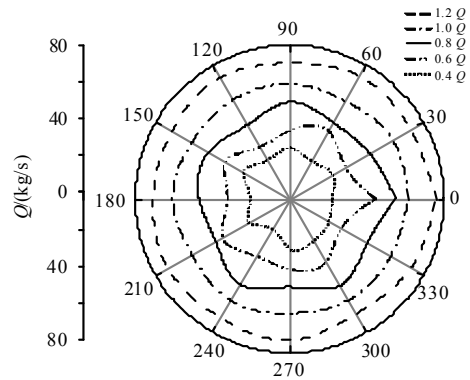


图 8 T_0 时刻导叶内流量脉动

Fig. 8 Flow pulsation of guide vane at T_0 moment

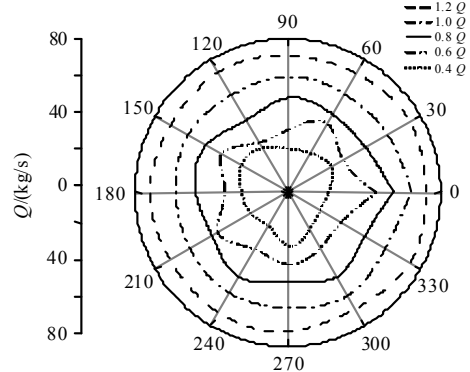


图 9 $(T_0+0.25T)$ 时刻导叶内流量脉动

Fig. 9 Flow pulsation of guide vane at $(T_0+0.25T)$ moment

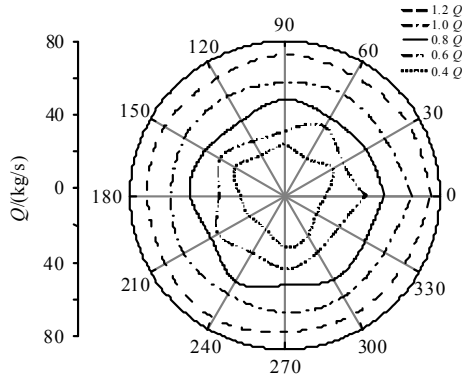


图 10 $(T_0+0.5T)$ 时刻导叶内流量脉动

Fig. 10 Flow pulsation of guide vane at $(T_0+0.5T)$ moment

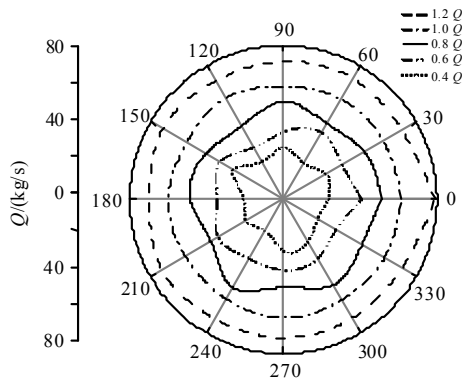


图 11 $(T_0+0.75T)$ 时刻导叶内流量脉动

Fig. 11 Flow pulsation of guide vane at $(T_0+0.75T)$ moment

样,在 $0.6Q_d$ 工况下,导叶流道周向流量分布呈不均匀规律,但在某一周期 T_0 、 $(T_0+0.25T)$ 、 $(T_0+0.5T)$ 、 $(T_0+0.75T)$ 时刻点,导叶流道的流量分布规律基本保持不变。在 $0.8Q_d$ 工况下,导叶各流道内部周向流量分布的不均匀性逐渐削弱,在任意周期 T_0 、 $(T_0+0.25T)$ 、 $(T_0+0.5T)$ 、 $(T_0+0.75T)$ 时刻点,导叶流道的流量分布规律保持不变。在额定工况和 $1.2Q_d$ 工况下,导叶流道的周向流量呈均匀分布规律,在某一周期 T_0 、 $(T_0+0.25T)$ 、 $(T_0+0.5T)$ 、 $(T_0+0.75T)$ 时刻点,导叶内部流道流量分布规律保持不变。

$0.4Q_d \sim 0.8Q_d$ 下,导叶内瞬态流量存在脉动效

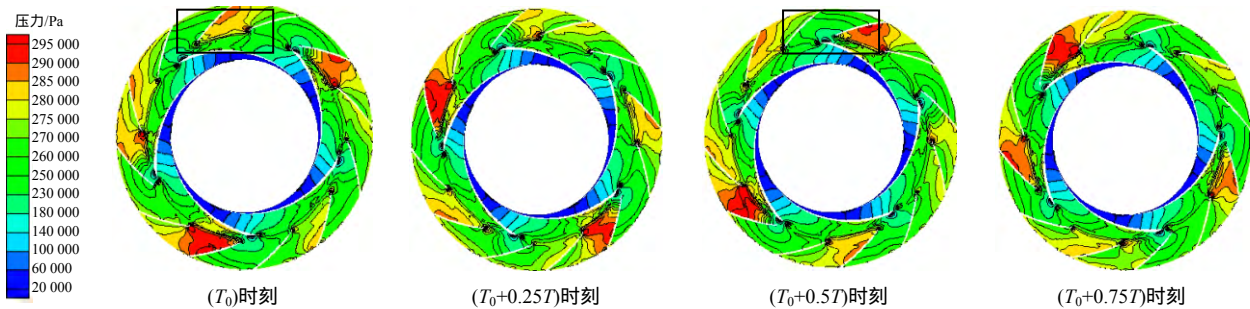


图 13 额定工况下动静干涉叶轮侧静压分布

Fig. 13 Static pressure distribution on rotor-stator interfere close to rim under the rated condition

应,且流量脉动规律与时间无关。考虑到核主泵与屏蔽电机水力稳定性要求,核主泵稳定运行工况应介于 $0.8Q_d \sim 1.2Q_d$ 之间。

3.3 动静干涉界面的静压效应

如图 12,监测点 a、b、c 分别位于导叶出口工作面、中间位置和背面。通过对比某一周期内 T_0 、 $(T_0+0.25T)$ 、 $(T_0+0.5T)$ 、 $(T_0+0.75T)$ 时刻点导叶出口面监测点压力脉动特性,3 个监测点压力脉动均呈周期性脉动规律,其中监测点 a 的压力脉动和监测点 b、c 的压力脉动相位相差 12° 。当监测点 a 处压力脉动幅值处于最小值时,监测点 b 和 c 处压力脉动幅值处于最大值。导叶工作面的压力脉动幅值最大,导叶背面的压力脉动幅值最小,且导叶压力脉动周期与叶轮叶片数有关。

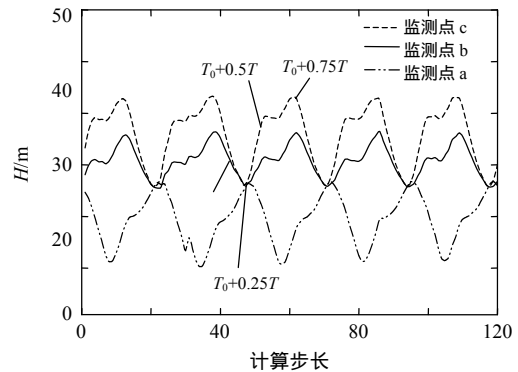


图 12 额定工况下导叶出口断面压力脉动

Fig. 12 Pressure pulsation of guide vane outlet surface under the rated condition

为了研究叶轮和导叶动静干涉对核主泵内部流动的瞬态效应,对模型泵进行非定常数值模拟。图 13、14 为某一周期内 T_0 、 $(T_0+0.25T)$ 、 $(T_0+0.5T)$ 、 $(T_0+0.75T)$ 时刻点核主泵内部流场静压分布规律。

核主泵叶轮与导叶之间的动静干涉会诱发周期性的瞬态效应,当旋转叶片尾缘逐渐靠近并掠过下游导叶叶片前缘区域时,叶片尾缘和导叶前缘之间形成封闭的楔形区域,如图 13 和图 14 T_0 时刻。根据叶片出口速度三角形和叶片出口流道内液流

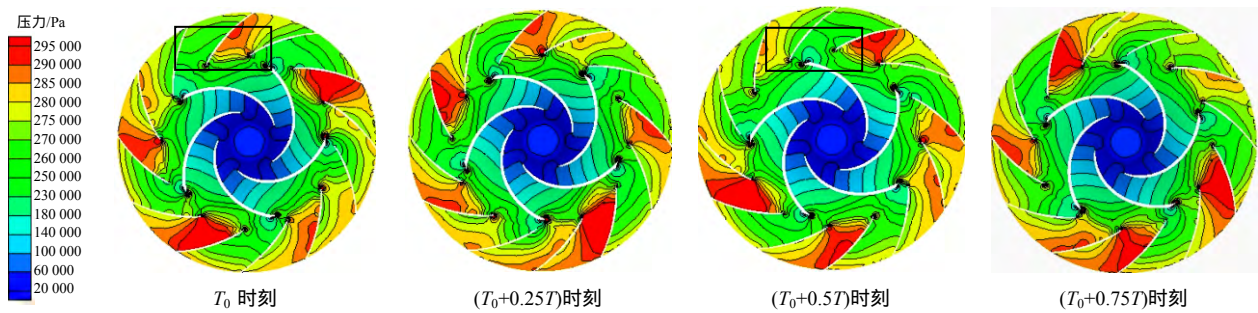


图 14 额定工况下动静干涉轮毂侧静压分布

Fig. 14 Static pressure distribution on rotor-stator interfere close to hub under the rated condition

绝对速度，叶片尾缘和导叶前缘形成的楔形区域，堵塞了叶轮出口的部分流道，使楔形区域内部产生局部的静压升现象。同时，在导叶相邻流道的内部区域，叶片尾缘对导叶流道的动静干涉效应较弱，叶片尾缘对导叶流道的堵塞效应不明显。所以导叶流道内部产生局部静压降，如图 13、14 的 $(T_0+0.5T)$ 时刻所示。随着叶轮尾缘和导叶前缘的周期性动静干涉效应，导叶内静压分布存在周期性的不稳定的瞬态效应。导叶内静压分布规律与叶轮尾缘和导叶前缘的相对位置有关，叶轮尾缘对导叶入口流动的阻塞效应，是诱发导叶内静压产生不稳定脉动的主要原因。

4 结论

对核主泵内部动静干涉流动效应进行非定常数值模拟和评价。主要结论如下：

1) 核主泵瞬态扬程的脉动幅值与运行工况有关，脉动频率与运行工况无关。额定工况下，扬程脉动幅值最小；偏离最优工况时，其脉动幅值逐渐增大。

2) 环形压水室与核主泵动静干涉的共同作用下，导叶内诱发不稳定的流量脉动效应。 $0.8Q_d \sim 1.2Q_d$ 工况时，导叶内流量脉动瞬态效应不明显； $0.4Q_d \sim 0.8Q_d$ 工况时，导叶内流量脉动趋于不稳定。考虑到机组的水力稳定性，核主泵稳定运行工况应在 $0.8Q_d \sim 1.2Q_d$ 之间。

3) 叶轮和导叶之间的动静干涉诱发导叶流道内部的压力脉动效应，导叶内部静压产生周期性波动，且导叶压力面平均脉动幅值最大，吸力面平均脉动幅值最小，且压力脉动周期与叶轮叶片数有关。叶片尾缘和导叶前缘之间形成封闭的楔形区域，堵塞了叶片出口部分流道，使楔形区域内部产生局部静压升。导叶流道内部静压分布规律与叶轮尾缘和导叶前缘相对位置有关，叶轮尾缘对导叶入口流动的阻塞效应，是诱发导叶内静压脉动的主要

原因。

参考文献

- [1] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 宇航出版社, 2010: 729-735.
Guan Xingfan. The theory and design of modern pump [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010: 729-735(in Chinese).
- [2] 秦武, 李志鹏, 沈宗沼, 等. 核反应堆冷却剂循环泵的现状与发展[J]. 水泵技术, 2007(3): 1-6.
Qin Wu, Li Zhipeng, Shen Zongzhao, et al. Actuality and development of the nuclear reactor coolant pump[J]. Pump Technology, 2007(3): 1-6(in Chinese).
- [3] Knierim C, Baumgarten S, Fritz J, et al. Design process for an advanced reactor coolant pump for a 1400 MW nuclear power plant[C]//Proceeding of FEDSM2005: 2005ASME Fluids Engineering Divisions Summer Meeting and Exhibition, Houston, TX, USA, 2005.
- [4] 朱荣生, 郑宝义, 李小龙, 等. 1000 MW 级核主泵内部非定常流动特性[J]. 热能动力工程, 2012, 27(3): 377-382.
Zhu Rongsheng, Zheng Baoyi, Li Xiaolong, et al. Study on unsteady flow characteristics of 1000 MW nuclear reactor coolant pump[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2012, 27(3): 377-382(in Chinese).
- [5] 王春林, 易同祥, 吴志旺, 等. 混流式核主泵非定常流场的压力脉动特性分析[J]. 动力工程, 2009, 30(11): 1036-1040.
Wang Chunlin, Yi Tongxiang, Wu Zhiwang, et al. Analysis on pressure fluctuations of unsteady flow field in mixed-flow main coolant pump[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 30(11): 1036-1040(in Chinese).
- [6] 朱荣生, 李小龙, 袁寿其, 等. 反应堆主泵压水室出口收缩角对水力性能的影响[J]. 核动力工程, 2011, 33(2): 97-102.
Zhu Rongsheng, Li Xiaolong, Yuan Shouqi, et al. Effect of pumping chamber outlet contraction angle on hydraulic performance of main nuclear reactor pump[J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 33(2): 97-102(in Chinese).

- [7] 朱荣生, 习毅, 袁寿其, 等. 气液两相流条件下核主泵导叶出口边安放位置[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(6): 484-489.
Zhu Rongsheng, Xi Yi, Yuan Shouqi, et al. Position of guide vane trailing edge of nuclear reactor coolant pump under gas-liquid two phase condition[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(6): 484-489(in Chinese).
- [8] 张栋俊, 徐士鸣. 球形压水室扩散管位置对核主泵性能的影响[J]. 流体机械, 2010, 38(5): 13-17.
Zhang Dongjun, Xu Shiming. Influence of orbicular pumping chamber diffusion tube position on nuclear first-loop coolant pump performance[J]. Fluid Machinery, 2010, 38(5): 13-17(in Chinese).
- [9] 张野, 王晓放, 介红恩. 压水堆冷却剂中硼酸浓度对核主泵性能影响研究[J]. 核动力工程, 2011, 32(4): 95-98.
Zhang Ye, Wang Xiaofang, Jie Hongen. Effect of boric acid concentration on reactor coolant pump performance in PWRs[J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(4): 95-98(in Chinese).
- [10] 王春林, 彭娜, 赵佰通, 等. 核主泵模型泵导叶进口边相对位置对泵性能的影响[J]. 排灌机械, 2008, 26(5): 38-41.
Wang Chunlin, Peng Na, Zhao Baitong, et al. Influence of relative position of difuser inlet edge on performance of nuclear model pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008, 26(5): 38-41(in Chinese).
- [11] 秦杰, 徐士鸣. 导叶结构对核主泵性能的影响[J]. 发电设备, 2010, 24(5): 315-318.
Qin Jie, Xu Shiming. Influence of guide vane structure on performance of reactor coolant pumps[J]. Power Equipment, 2010, 24(5): 315-318(in Chinese).
- [12] 朱荣生, 郑宝义, 王秀礼, 等. 1000MWe 核反应堆冷却剂泵多场耦合特性分析[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(5): 784-788.
Zhu Rongsheng, Zheng Baoyi, Wang Xiuli, et al. Multiple field coupling analysis of performance in coolant pump of 1000 MWe reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(5): 784-788(in Chinese).
- [13] 李颖, 周文霞, 张继革, 等. 核反应堆冷却剂循环泵全流道三维数值模拟及性能预估[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(10): 898-902.
Li Ying, Zhou Wenxia, Zhang Jige, et al. Numerical simulation of three-dimensional flow through fluu passage and performance prediction of nuclear reactor coolant pump[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(10): 898-902(in Chinese).
- [14] 付强, 袁寿其, 朱荣生, 等. 失水事故工况下核主泵气液两相瞬态流动特性[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(9): 112-116.
Fu Qiang, Yuan Shouqi, Zhu Rongsheng, et al. Transient gas-liquid two-phase flow characteristics of nuclear main pump under loss of coolant accident[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(9): 112-116(in Chinese).
- [15] 王秀礼, 袁寿其, 朱荣生, 等. 核主泵停机过渡过程瞬态水动力特性研究[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(3): 364-370.
Wang Xiuli, Yuan Shouqi, Zhu Rongsheng, et al. Transient hydraulic characteristic study on nuclear reactor coolant pump during stoping period[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(3): 364-370(in Chinese).
- [16] 王秀礼, 袁寿其, 朱荣生, 等. 核主泵变流量过渡过程瞬态水动力特性研究[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(7): 1169-1174.
Wang Xiuli, Yuan Shouqi, Zhu Rongsheng, et al. Transient hydraulic characteristic study on nuclear reactor coolant pump during stoping period[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(7): 1169-1174(in Chinese).
- [17] 魏清顺, 刘在伦. 导流器叶片进口安放角对潜水泵性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(14): 109-115.
Wei Qingshun, Liu Zailun. Effects of inlet setting angles of space guide vanes on submersible pump performances[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(14): 109-115(in Chinese).
- [18] Gaetani P, Persico G, Mora A, et al. Impeller-vaned diffuser interaction in a centrifugal compressor at off design conditons[J]. Journal of Turbomachinery, 2010, 134(061034): 1-9.
- [19] 魏清顺, 刘在伦. 基于 CFD 的离心泵浮动叶轮平衡腔压力数值分析与验证[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(14): 103-108.
Wei Qingshun, Liu Zailun. Numerical analysis and validation of floating impeller balance chamber pressure in centrifugal pump based on CFD[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(14): 103-108(in Chinese).
- [20] 高闯, 谷传纲, 王彤, 等. 叶轮和扩压器几何参数对离心压缩机末级性能和失速的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(32): 83-86.
Gao Chuang, Gu Chuangang, Wang Tong, et al. Effects of impellers and diffusers' geometries on performance and rotating[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(32): 83-86(in Chinese).



黎义斌

收稿日期: 2014-08-25。

作者简介:

黎义斌(1977), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事核主泵现代设计方法与流动特性研究, liyibin58@163.com;

李仁年(1963), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械多相流及风力发电技术, 本文通信作者, lirn@lut.cn。

(责任编辑 车德竞)