

文章编号: 1000-7709(2019)03-0136-04

# 螺旋混流式喷水推进泵压力脉动的数值研究

韩 伟<sup>1,2</sup>, 韩 阳<sup>1</sup>, 龚鹏飞<sup>3</sup>, 王 洁<sup>1</sup>, 胥丹丹<sup>1</sup>

(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; 3. 上海电气凯士比核电泵阀有限公司, 上海 201308)

摘要: 为研究螺旋混流式喷水推进泵动静干涉的压力脉动特性, 运用 ANSYS Fluent 软件基于 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型, 采用 SIMPLEC 算法进行变流量工况下非定常数值模拟, 分析变流量工况下泵内各监测点的时域和频域特性。结果表明, 螺旋混流式喷水推进泵内压力脉动的振源主要位于叶轮与导叶交界处, 压力系数的幅值最大, 且压力脉动自交界面处分别向上、下游传播并逐渐减弱。在叶轮旋转区域, 压力系数的幅值受径向位置的影响较强, 在导叶静止区域, 压力系数的幅值受径向位置的影响较弱。各监测点压力脉动的主频不受流量变化的影响, 均为叶片通过频率。在叶轮进出口, 压力系数受流量变化影响最为明显; 叶轮出口处的压力脉动频谱较宽。在远离叶轮旋转区域, 压力系数受流量变化的影响较小, 监测点的主频集中在叶频处, 压力脉动幅值较小, 无高频脉动出现。研究成果可为喷水推进泵的噪声及振动控制提供参考。

关键词: 螺旋混流式喷水推进泵; 压力脉动; 变流量工况; 数值模拟

中图分类号: TH311

文献标志码: A

## 1 引言

随着我国对海洋权益的日益重视, 对综合舰艇的性能要求也越来越高。喷水推进作为一种新型推进方式, 也越来越多地应用于高性能舰船。与传统的螺旋桨推进相比, 喷水推进主要依靠推进泵进出口水流的动量差产生推力, 具有效率高、噪音小、变工况能力强、抗空化性能好等诸多优点<sup>[1,2]</sup>。喷水推进泵在运行时, 由于高速旋转的叶轮与静止导叶之间的相对运动、叶片进口的水流冲击、局部的空化等均会引起推进泵内出现压力脉动<sup>[3]</sup>。研究喷水推进泵内流场的压力脉动对于降低压力脉动引起的喷水推进器泵体的振动, 提高泵运行的稳定性有重要意义。目前关于喷水推进泵压力脉动研究主要集中于轴流泵和混流泵, 而对螺旋混流式喷水推进泵的研究较少。螺旋混流式喷水推进泵在结构上有机融合了螺旋泵及混流泵的特点, 具有良好的吸入性、抗空化性、较宽的高效区。本文运用 ANSYS Fluent 软件对螺旋混流式喷水推进泵不同工况下的内部流场进行非定常计算, 得到不同工况下各监测点的压力

脉动特性, 旨在为喷水推进泵的噪声及振动控制提供参考。

## 2 几何模型及监测点设置

某螺旋混流式喷水推进泵的主要参数为: 流量  $Q=13.8 \text{ m}^3/\text{h}$ , 扬程  $H=1.3 \text{ m}$ , 喷速比  $K=2.33$ , 比转速  $n_s=277.9$ , 叶片数  $Z=2$  个, 导叶叶片数  $Z_d=5$  个。运用 SolidWorks 软件分别对螺旋混流式喷水推进泵的进口段、叶轮、空间导叶、喷管进行水体三维建模, 见图 1。

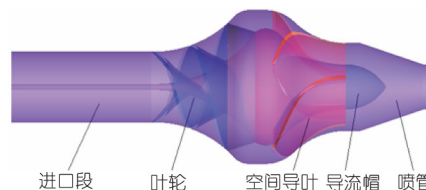


图 1 螺旋混流式喷水推进泵水体三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of water-jet screw mixed-flow pump

在叶轮进口边、叶轮出口、过渡区域、导叶进口及导叶出口 5 个截面上各选取 3 个监测点, 各监测点均匀布置, 见图 2。

收稿日期: 2018-06-02, 修回日期: 2018-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51669012, 51209113)

作者简介: 韩伟(1977-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为流体机械两相流理论, E-mail: hanwei@lut.cn

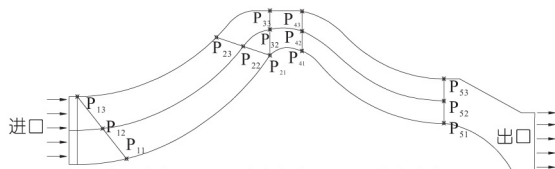


图 2 压力脉动监测点布置

Fig.2 Pressure fluctuation measuring points distribution

### 3 数值模拟

#### 3.1 控制方程及湍流模型

采用雷诺时均动量方程描述喷水推进泵内不可压缩流体的三维非定常流动,控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (1)$$

式中,  $t$  为时间;  $\rho$  为液体密度;  $u_i, u_j, u_k$  分别为流体不同方向上的速度分量;  $x_i, x_j, x_k$  分别为流体不同方向上的空间坐标;  $p$  为压力;  $\mu$  为流体动力粘度;  $\delta_{ij}$  为“Kronecker delta”符号;  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  为雷诺应力。

引入 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型和连续性方程使动量方程封闭。RNG  $k-\epsilon$  湍流模型考虑了高应变率和流线较大弯曲的情况<sup>[4]</sup>,与其他湍流模型相比,该模型可通过频谱分析的方法消除其中的小尺度涡,将小尺度涡的影响并入到涡粘性中,对处理旋转机械流动有较好的适用性<sup>[5]</sup>。

#### 3.2 计算域网格划分

采用 ICFM CFD 软件对计算域进行网格划分,由于叶轮内部及空间导叶结构复杂,对叶轮及空间导叶部分采用非结构体网格进行划分,并对流动剧烈变化的区域进行局部加密,以满足壁面函数的要求。对计算域的网格进行无关性检验,最终确定网格数为  $1.962 \times 10^6$  个,见图 3。

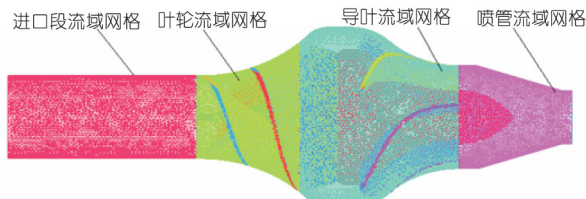


图 3 流场计算域网格

Fig.3 Flow field calculation mesh

通过数值模拟得到螺旋混流式喷水推进泵的外特性曲线,见图 4。由图 4 可知,在设计工况下泵的效率最高,约为 82.5%,扬程为 1.303 m;在小流量工况下,具有较宽的高效区,数值模拟的结

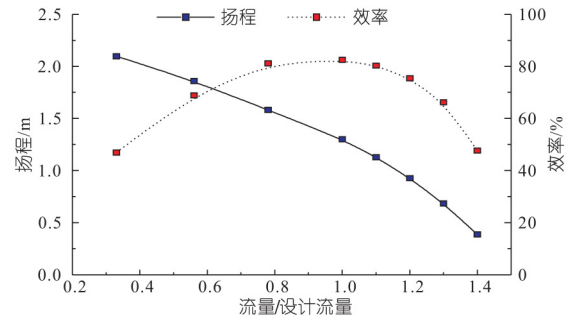


图 4 螺旋混流式喷水推进泵外特性曲线

Fig.4 Performance curves of water-jet screw mixed-flow pump

果与泵的主要设计参数基本一致,表明该数值模拟方法可用于预测该泵的水力特性。

#### 3.3 数值求解

在 Fluent 15.0 中采用有限体积法对控制方程在空间上进行离散,对时间项采用二阶全隐式格式,运用 SIMPLEC 算法求解不可压缩时均 N-S 方程。将定常的计算结果作为非定常计算的初始值以提高收敛速度,计算收敛精度设置为  $10^{-5}$ 。

考虑到计算效率,将时间步长选取为叶轮旋转  $3^\circ$  所需的时间,每计算一次最多迭代 20 次,计算总时间选取为叶轮旋转周期  $T$  的 9 倍。为保证计算精度,提取叶轮旋转最后一圈的数据进行压力脉动分析。

## 4 结果分析

#### 4.1 设计工况压力脉动时域与频域分析

为消除静压的影响,更好地表述喷水推进泵内各监测点的压力脉动值,采用量纲为 1 的压力系数  $C_p$  来描述压力脉动幅值:

$$C_p = (p - \bar{p}) / (0.5 \rho u^2) \quad (2)$$

式中,  $p$  为监测点瞬时静压;  $\bar{p}$  为静压平均值;  $u$  为叶轮出口圆周速度。

##### 4.1.1 设计工况压力脉动时域分析

图 5 为设计工况下喷水推进泵内不同监测点的时域分布图,横坐标代表一个旋转周期。由图 5 可知,不同监测点压力系数均具有明显周期性,在叶轮一个旋转周期内,存在两个波形,与叶轮的叶片数保持一致,这主要是因为螺旋叶轮的两枚叶片周期性的掠过流体引起流体质点的压力波动。叶轮进口边沿径向位置的三个点,从轮毂到轮缘,压力脉动的波形基本一致,但压力脉动的峰值依次增大。在靠近轮毂位置,螺旋叶片对流体作用较弱,流体质点的圆周速度较小,流体质点的惯性也相对较小,因此其压力波动较小;随着径向

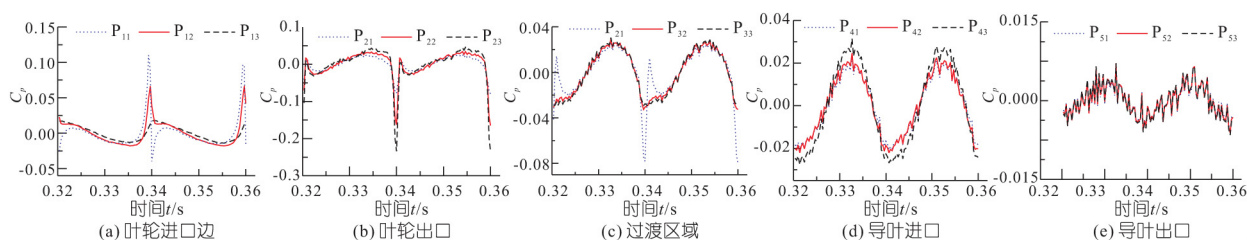


图 5 设计工况下喷水推进泵内压力脉动时域图

Fig.5 The pressure fluctuation time-domain diagram in the water-jet pump under design flow rate condition

位置从轮毂向轮缘移动,流体质点的圆周速度增大,惯性也随之增大,流体对螺旋叶片进口边的冲击作用增强,加剧了流体质点运动的不稳定性,引起较大的压力脉动。这说明在叶轮进口边沿径向增大方向,流体流动紊乱程度越来越大。在叶轮出口处,流体沿径向方向的压力脉动与叶轮进口边规律相似,但与叶轮进口相比,各监测点压力系数的峰值有所增大,监测点  $P_{23}$  的压力系数峰值为点  $P_{13}$  的 2.126 倍。同时,叶轮出口处压力系数波动明显,这主要是因为流体经旋转的叶轮做功后,流体质点的动能增大,在叶轮出口处发生脱流,同时旋转叶轮与静止导叶的动静干涉效应也加剧了流动的不稳定性。由此说明,在叶轮出口附近区域,流体的流动更为紊乱也更加复杂。在过渡流道内,各监测点压力系数的峰值有所减小,监测点  $P_{32}$  与  $P_{33}$  的压力系数波形图几乎重合。分析导叶进口的时域图,不难看出监测点的波形图具有较好的一致性,各监测点压力系数的幅值受位置的影响不太明显,与过渡区域表现出来的现象相同,这说明远离旋转区域流体的压力系数受径向位置影响较弱。在导叶出口,各监测点的波形重合,波形不再受径向位置的影响,监测点的压力系数进一步降低,流体的流动较均匀。

通过分析可知,螺旋混流式喷水推进泵内的压力系数幅值最大的监测点在叶轮与导叶交界处,在叶轮进出口附近,各监测点压力系数受径向位置影响较大,压力系数的幅值基本均沿着轮毂向轮缘逐渐增大,随着监测点与叶轮轴向距离增大,其压力系数的幅值受径向位置的影响降低。在导叶进口处,各监测点压力系数的幅值减小,沿

径向布置的监测点波形几乎重合。在导叶出口压力系数幅值的大小几乎为零,流动趋于稳定,导叶的整流、稳流作用进一步显现出来。

#### 4.1.2 设计工况压力脉动频域分析

为更详细地分析压力脉动中各频率成分大小,同时确定振源位置,将各监测点的数据通过快速傅里叶变换(FFT),得到设计工况下不同监测点的频域图,见图 6。由推进泵转速计算得到叶片通过频率  $f_0 = 25 \times 2 = 50$  Hz。对比分析螺旋混流式喷水推进泵内不同位置的频域图可知,各监测点压力脉动的主频均为叶片通过频率。在叶轮旋转区域,受径向位置的影响,从轮毂到轮缘各监测点压力脉动的频谱范围变宽,分频成分增多,衰减较慢。在过渡区域,各监测点压力脉动的主频幅值降低,分频成分减少。在导叶进口及出口,压力脉动的波形一致,主频幅值近乎相等,无高频脉动。

#### 4.2 变流量工况压力脉动时域与频域分析

##### 4.2.1 变流量工况压力脉动时域分析

为分析螺旋混流式喷水推进泵在偏离设计工况下流道内的压力脉动情况,分别对比  $0.7Q$ 、 $Q$ 、 $1.2Q$  三种工况下泵内监测点  $P_{12} \sim P_{52}$  的时域图,见图 7。由图 7(a)可知,在偏离设计工况时,压力系数的波形图也表现出明显的周期性,但波形不再具有相似性,其压力系数的峰值也呈增大趋势。在小流量工况下,波峰值与波谷值出现了明显突变,流动紊乱。这是因为小流量工况时,流体轴面速度减小,冲角增大,流体在叶片背面的流动分离发展明显。随着流量的增加,这一现象得到了明显改善。在大流量工况下,其压力系数的波形呈

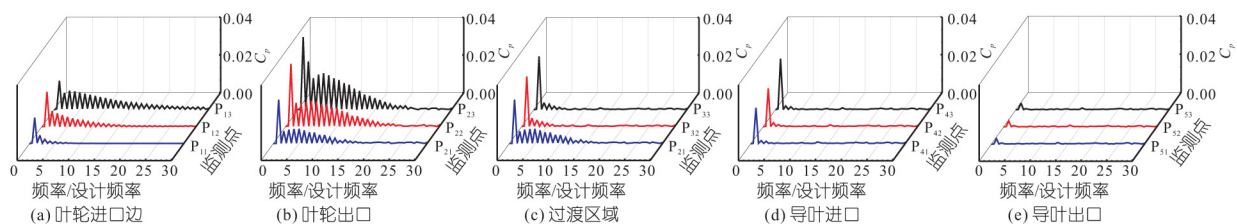


图 6 设计工况下喷水推进泵内压力脉动频域图

Fig.6 The pressure fluctuation frequency-domain diagram in the water-jet pump under design flow rate condition

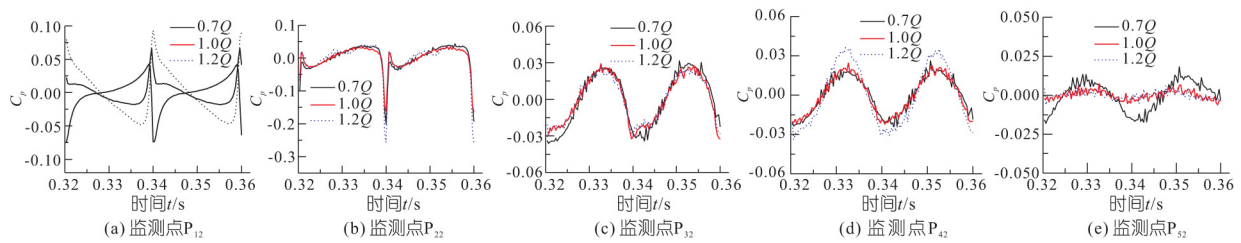


图 7 不同工况下喷水推进泵内压力脉动时域图

Fig.7 The pressure fluctuation time-domain diagram in the water-jet pump under different flow rate condition

W 型,在一个周期内出现了三个峰值,峰值的大小为设计工况下的 1.39 倍,这主要是因为在大流量工况下,流体轴面速度增大,冲角减小,流体在叶片工作面出现流动分离,流动表现出明显的不稳定。由图 7(b)~(f)可知,不同工况下各点的波形图具有明显的相似性,压力系数的波形及峰值受流量变化的影响较小,不同工况下各监测点压力系数的峰值在 P<sub>22</sub> 点处达到最大,与压力脉动

的振源位于叶轮与导叶交界处具有一致性。

#### 4.2.2 变流量工况压力脉动频域分析

将不同工况各监测点的压力系数通过快速傅里叶变换,得到不同监测点的频域图,见图 8。由图 8 可知,不同工况下监测点的主频均在一倍叶频处,这说明螺旋混流式喷水推进泵的主频不受流量变化影响。在叶轮进口边,监测点的压力系数幅值随流量增大而增大,在小流量工况下压力

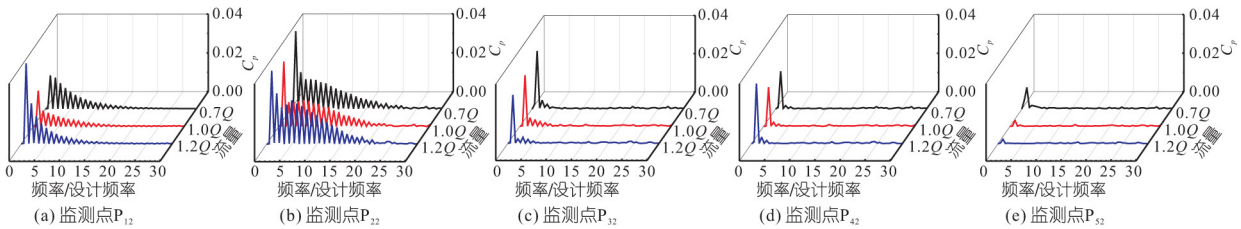


图 8 不同工况下推进泵内压力脉动频域图

Fig.8 The pressure fluctuation frequency-domain diagram in the water-jet pump under different flow rate condition

脉动频谱较宽,流动较紊乱。

在叶轮出口,压力系数的幅值受流量变化的影响较小,但在偏流量工况下,均出现了高频脉动。在过渡区域及导叶进口,幅值的大小几乎不受流量变化的影响,也无高频脉动出现,这主要受导叶整流作用的影响。在导叶出口,幅值在小流量工况明显增大,这是因为流量减小时,喷管内的流动波动程度较大,对上游流动产生一定的反作用,导致导叶出口处压力脉动较大。

## 5 结论

a. 螺旋混流式喷水推进泵内压力脉动的振源主要位于叶轮与导叶交界处。径向位置对压力系数的影响主要集中在叶轮旋转区域。

b. 各监测点压力脉动的主频不受流量变化影响,均为叶片通过频率。

c. 在叶轮进出口,压力系数受流量变化影响最为明显;在远离叶轮旋转区域,压力系数受流量变化影响较小。

#### 参考文献:

- [1] 王立祥.喷水推进及喷水推进泵[J].通用机械,2007(10):12-15.
- [2] Cao L L, Che B X, Hu L J, et al. Design Method of Water Jet Pump Towards High Cavitation Performances[C]//IOP Conference Series:Materials Science and Engineering, 2016.
- [3] 常书平,王永生,魏应三,等.喷水推进器内非定常压力脉动特性[J].江苏大学学报:自然科学版,2012,33(5):522-527.
- [4] Liu Z, Chen Y, Wu Y, et al. Simulation of Exchange Flow Between Open Water and Floating Vegetation Using a Modified RNG  $\kappa-\epsilon$ , Turbulence Model[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2017, 17(2):355-372.
- [5] Yang G. RNG  $\kappa-\epsilon$  Pump Turbine Working Condition of Numerical Simulation and Optimization of the Model[C]// International Conference on Intelligent Computing. Springer International Publishing, 2016:684-693.

(下转第 149 页)

由分析可知,解析模型中变量选择如下:①可疑故障元件。 $B_2、B_4、T_3、L_2、L_3$ ;②相关保护。 $B_{2m}、B_{4m}、T_{3m}、T_{3p}、T_{3s}、QF_{4f}、QF_{8f}、QF_{10f}、QF_{12f}、QF_{14f}、QF_{19f}、L_{2Sm}、L_{2Rm}、L_{2Sp}、L_{2Rp}、L_{2Ss}、L_{2Rs}、L_{3Sm}、L_{3Rm}、L_{3Sp}、L_{3Rp}、L_{3Ss}、L_{3Rs}$ ;③相关断路器。 $QF_{16}、QF_{14}、QF_{12}、QF_{13}、QF_{19}、QF_4、QF_6、QF_8、QF_{10}、QF_{27}$ 。

诊断结果用元件序列表示为 00110,即变压器  $T_3$  和母线  $B_2$  同时发生故障。根据诊断结果并结合收到的警报分析可得  $QF_{10f}、QF_{10}、QF_{14}$  发生了拒动,母线保护  $B_{2m}$  漏报,变压器后备保护  $T_{3p}$  误报,其余为正确动作。诊断结果与假设的故障场景一致,表明本文所用模型诊断结果合理。

### 5 结论

- a. 本文充分考虑了保护和断路器拒动、误动和告警信息误报、漏报等不确定性因素。对保护规则、动作状态和告警信息三者之间的关系进行解析,实现了实际动作状态和告警信息关系的解耦。
- b. 利用电气量新判据,对常规解析模型增加约束,实现故障诊断信息的冗余,有效地降低了误诊的可能性。

### 参考文献:

[1] Cardoso G, Rolim J G, Zurn H H. Identifying the Primary Fault Section After Contingencies in Bulk Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(3):1 335-1 342.

[2] Meng K, Dong Z Y, Wang D H, et al. A Self-Adaptive RBF Neural Network Classifier for Transformer Fault Analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3):1 350-1 360.

[3] 郭文鑫,文福拴,廖志伟,等.计及保护和断路器误动与拒动的电力系统故障诊断解析模型[J].电力系统自动化,2009,33(24):6-10.

[4] Guo W, Wen F, Ledwich G, et al. An Analytic Model for Fault Diagnosis in Power Systems Considering Malfunctions of Protective Relays and Circuit Breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3):1 393-1 401.

[5] 刘道兵,顾雪平,李海鹏.电网故障诊断的一种完全解析模型[J].中国电机工程学报,2011,31(34):85-92.

[6] 董晓阳,谢红涛,孙明蔚.计及时序信息检查的分层模糊 Petri 网电网故障诊断模型[J].电力系统自动化,2013,37(6):63-68.

[7] 董明,韦刘红,文福拴,等.电力系统故障诊断的机会约束规划模型与方法[J].电力系统自动化,2011,35(20):47-52.

[8] 董明,张勇,张岩,等.含电气量信息的电力系统故障诊断解析模型[J].电力系统自动化,2013,37(6):55-62.

## Fault Diagnosis of Transmission Network Based on Electrical Criterion

LI Chun-hui,GAO Liang,ZHANG Jun-feng,QU Zi-cheng,KANG Bao-lin

(Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** Taking complex power network fault diagnosis as the target, this paper analyzed the process of fault diagnosis in the case of multiple faults and accompanied by uncertain factors, considering the protection and circuit breaker failure, the possibility of misoperation and false alarm information in the process of uploading the false alarm information. The relationship among protection rule, action state and alarm information was analyzed to realize decoupling between actual action state and alarm information. And a new criterion of electric variable was put forward using PMU electrical state information. The constraint was added to the conventional analytical model, and the redundancy of fault diagnosis information was realized, which greatly reduced the possibility of false diagnosis.

**Key words:** transmission network; fault diagnosis; analytical model; electrical criterion

\*\*\*\*\*  
(上接第 139 页)

## Numerical Study of Pressure Fluctuation in Water-jet Propulsion Mixed-flow Pump

HAN Wei<sup>1,2</sup>, HAN Yang<sup>1</sup>,GONG Peng-fei<sup>3</sup>,WANG Jie<sup>1</sup>,XU Dan-dan<sup>1</sup>

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

2. Key Laboratory of Fluid Machinery and System, Gansu Province, Lanzhou 730050, China;

3. Shanghai Electric -KSB Nuclear Power Pumps & Valves Company, Shanghai 201308, China)

**Abstract:** In order to study the pressure fluctuation induced by the dynamic and static interference of the water-jet propulsion mixed-flow pump, the software ANSYS Fluent, the RNG turbulent  $k-\epsilon$  model and SIMPLEC algorithm were applied to simulate the unsteady flow in variable-flow conditions. The time domain and frequency domain characteristics of the pump at different monitor positions under various flow rate conditions were analyzed. The results show that the vibration source of pressure fluctuation in the water-jet propulsion mixed-flow pump was mainly located at the interface of impeller and guide vane where the amplitude value of pressure coefficient reaches the maximum, the pressure fluctuation propagates the upstream and downstream from the interface position and it gradually attenuates. In the rotation zone of the impeller, the amplitude value of pressure coefficient is strongly affected by the radial position. In the static zone of the guide vane, the amplitude value of pressure coefficient is weakly affected by the radial position. The dominant frequency is not changed under different flow rate conditions and is approximate to the blade passing frequency. In the zone of the impeller inlet, the pressure fluctuation is influenced obviously by different flow rate conditions. The frequency spectrum of the pressure fluctuation in the impeller outlet is wider. In the zone away from the impeller rotation, the pressure fluctuation is influenced poorly by different flow rate conditions and the dominant frequency is approximate to the blade passing frequency. The amplitude value of pressure coefficient is smaller and the high frequency pressure fluctuation is not appeared. The study results can provide reference for the noise and vibration control of the water-jet propulsion pump.

**Key words:** water-jet propulsion mixed-flow pump; pressure fluctuation; various flow rate conditions; numerical calculation