

DOI:10.7652/xjtuxb201411009

喷水推进泵压力脉动特性数值计算及分析

张明宇, 王永生, 靳栓宝, 魏应三, 付建

(海军工程大学动力工程学院, 430033, 武汉)

摘要: 针对喷水推进器装船后不均匀来流对压力脉动特性的影响,以某巡逻艇喷水推进混流泵为研究对象,基于RANS方程和SST湍流模型,通过流体动力学软件CFX稳态计算,进行了巡逻艇航速数值预报,所得计算值与试航值误差为1.8%,从而验证了计算流体动力数值计算的可信性。采用分离涡模拟方法,对敞水泵和装船泵进行了三维非定常数值模拟,计算分析了叶轮进出口、叶轮内部、导叶内部及喷口5个截面和叶轮叶顶间隙处的压力脉动,并对不均匀来流带来的差别进行了研究。结果表明:在敞水泵和船后泵的叶轮出口、导叶内部,水流距叶轮越远,压力脉动影响越小,压力脉动频率取决于叶轮转动频率,压力脉动幅值沿轮毂到轮缘逐渐增大,船后泵压力脉动幅值整体高于敞水泵;对于均匀来流,敞水泵旋转域叶轮室的压力脉动频率主要受导叶的影响,船后泵则受轴频的影响,二者压力脉动幅值在叶顶间隙处均从叶顶沿导边到随边逐渐增大;对于敞水泵,流道出口压力脉动频率主要受叶频控制,对于船后泵,压力脉动频率为轴频。

关键词: 喷水推进泵;计算流体动力学;压力脉动;分离涡模拟

中图分类号: TH313 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)11-0051-07

Numerical Analysis for Pressure Fluctuation of Waterjet Pump

ZHANG Mingyu, WANG Yongsheng, JIN Shuanbao, WEI Yingsan, FU Jian

(College of Marine Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: For ununiform inflow to impeller due to hull and duct, the dynamic characteristics of waterjet pump (mixed-flow pump) in patrol craft are numerically analyzed. The steady flow is simulated by SST turbulence model based on RANS and the calculated speed of ship from CFD exceeds the trial voyage by 1.8%. The unsteady flow of bare pump and the same pump fixed on craft is simulated by CFD method for DES turbulence. The pressure fluctuation of impeller inlet, impeller blade channels, impeller outlet, guide vane channels, nozzle and tip of impeller is supervised and discussed, and the difference caused by the ununiformity is also analyzed. The results show that on the impeller outlet, guide vane channels and the nozzle of both bare pump and fixed pump, the farther the flow to the impeller the weaker the pressure pulsation effects. The pressure fluctuation frequency is mainly dominated by the impeller rotation frequency, and the pressure fluctuation amplitude gradually increases from hub to tip, however, the corresponding amplitude is lager in pump fixed on craft. In the revolver impeller, the pressure fluctuation frequency is mainly dominated by the guide vanes reaction in bare pump while by shaft frequency in pump fixed on craft. The pressure fluctuation amplitude in the tip gradually increases along the axis from the leading edge to the trailing edge. In the duct outlet, the

收稿日期: 2014-02-18。 作者简介: 张明宇(1989—),男,硕士生;王永生(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51309229)。

网络出版时间: 2014-09-01

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140901.1009.007.html>

pressure fluctuation frequency is mainly dominated by the impeller rotation frequency in bare pump while by shaft frequency in pump fixed on craft.

Keywords: waterjet pump; computational fluid dynamics; pressure fluctuation; detached-eddy simulation

随着舰船综合性能的提高,喷水推进在高性能舰船、快艇上的应用越来越广泛。作为喷水推进器核心部件的喷水推进泵(简称喷泵)的设计便显得尤为重要,压力脉动特性研究可在保证喷泵水力效率的情况下有效缩减过激的泵体振动及其引起的局部空化,更是降噪研究的基础和前提。出于舰船的隐身性,研究喷泵内部非定常流场压力脉动特性具有重要的意义。

转动叶轮和静止导叶之间的相对运动、叶片导边的水流冲击、叶片随边的脱流、局部空化等都会引起喷泵出现压力脉动^[1]。本文的研究对象喷泵为混流泵,以往泵内压力脉动的研究通常是试验研究,其周期长、成本高,对于所发现的非定常特性缺乏量化指标。随着计算流体力学(CFD)的逐步完善,国内外学者通过数值模拟的方法对泵内三维非定常流场进行了探索。Solis 等通过改变叶轮形状和径向尺寸、采用 SST 湍流模型探索了减小压力脉动对离心泵的影响^[2]。Cheah 等采用 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型对蜗壳内的脉动特性进行了模拟^[3]。Zobeiri 等对泵内转子-定子的动静干涉进行了数值模拟和分析^[4]。Furukawa 等基于叶表面奇点法对离心叶轮进行了无黏流场分析^[5]。王春林等用大涡模拟研究了高比转数混流泵非定常流场的压力脉动特性^[6]。施卫东等采用 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型研究了采样频率和时间对轴流泵压力脉动特性的影响^[7]。常书平基于 RANS 方程和 SST 湍流模型对喷水推进器内非定常流场进行了数值模拟^[8]。靳栓宝对比分析了时间步长取叶轮旋转 3° 、 2° 、 1° 所需时间对监测点压力的影响^[9]。

本文对某喷泵在敞水、船后两种情况下进行了脉动特性分析,探索了船后不均匀来流对脉动的影响。本文设置了 6 组监测点,其中在叶轮叶顶间隙内设置了 4 个监测点,以分析叶顶间隙处压力脉动特征,而在叶轮中间径向设置了 6 个监测点,旨在为喷泵的噪声控制提供有价值的参考。

1 计算模型和监控点分布

研究对象为比转数等于 445 的混流泵,叶轮叶片数为 4,导叶数为 7,泵直径为 265 mm,叶顶间隙为 0.3 mm。为方便分析,将流道出口(泵进口)从

轮缘到轮毂的监测点依次命名为 $D_1, D_2, \dots, D_6$, 同理叶轮监测点依次为 $R_1, R_2, \dots, R_6$, 叶轮出口监测点依次为 $R_{S1}, R_{S2}, \dots, R_{S6}$, 导叶体监测点依次为 $S_1, S_2, \dots, S_6$, 喷口监测点依次为 $N_1, N_2, \dots, N_6$, 叶顶间隙从叶轮进口到出口依次为 $J_{X1}, J_{X2}, \dots, J_{X4}$, 如图 1 所示。

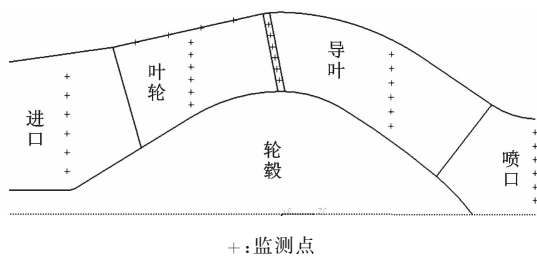


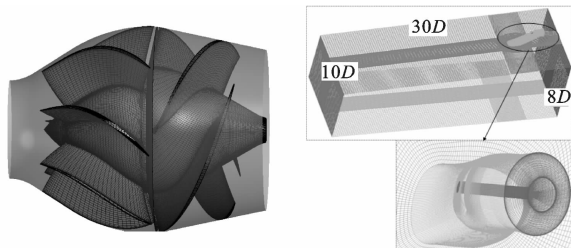
图 1 压力监测点布置

2 数值模拟

本文采用工程上应用广泛的雷诺时均法进行 CFD 计算。首先选取 SST 湍流模型来封闭控制方程,对装船泵内部流场进行稳态数值模拟。SST 模型在近壁面区域调用 $k-\epsilon$ 模型模拟,收敛性好,而在湍流充分发展区域调用 $k-\omega$ 模型模拟,计算效率高^[10]。在验证数值计算的可信性之后,采用分离涡(DES)法^[11]对敞水泵和船后泵进行三维非定常计算,求解其压力脉动特性。

2.1 网格情况

采用结构化网格进行网格划分:中叶轮网格数为 106 万,导叶体网格数为 102 万,由 turbogrid 划分;喷口网格数为 24 万,流道和计算域网格数为 286 万,由 ICEM 中划分;计算域的长、宽、高分别为泵直径的 30、10、8 倍,网格总数为 518 万。网格划分情况如图 2 所示。



(a) 泵和喷口

(b) 流道和计算域

图 2 泵、喷口、流道和计算域网格划分

网格边界层均为 0.1 mm,后处理 Y^+ 最大值为 92,满足计算要求。

2.2 域的设置和边界条件

计算域包括喷口、导叶、叶轮和流道,其中仅有叶轮为旋转域。设进口为速度进口,开口为压力开口,相对静压值为 0,出口为压力出口,相对压力值为 0。除了 3 个交界面以外,其余部分均设置为壁面,叶轮叶片与轮毂为相对静止壁面,其他为绝对静止壁面。边界条件如图 3 所示。

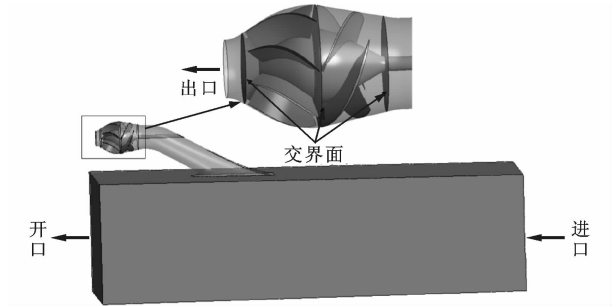


图 3 边界条件示意图

2.3 初始条件及时间步长

泵的设计工况为 2 400 r/min,稳态步长为 $30/(n\pi) = 0.004\text{ s}$, n 为转速。瞬态计算以稳态结果为初始值。采样频率越高,所得数据的时间分辨率越高,采样频率过低,脉动幅值可能被低估^[7]。结合以上情况,本文时间步长为每旋转 1° 所需的时间,为 $1/(6n) = 69.4\text{ }\mu\text{s}$,共用时 0.15 s。

3 装船泵稳态验证

根据厂方提供船体阻力曲线,对不同转速下的喷水推进器提供的净推力进行了计算,并将净推力曲线与船体阻力曲线叠加后通过两曲线的交点来预报航速,结果如表 1 和图 4 所示。

表 1 2 400 r/min 下喷水推进器净推力

航速/ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	74	76	78	79
净推力/kN	15.9	15.6	15.2	15.0

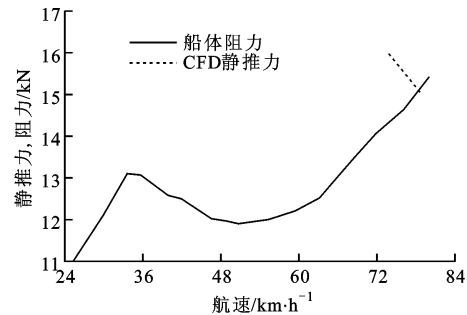


图 4 航速的数值模拟结果

由图 4 可知,在交点处净推力与船体阻力相等,此时泵工况为 2 400 r/min,来流速度为 78 km/h,泵功率为 247.3 kW。由于厂商船体试航值为 76.6 km/h,所以模拟误差为 1.8%,说明本研究所用数学模型和计算方法基本可信。

4 敞水泵与船后泵流道出口不均匀度

流道出口不均匀度是导致敞水泵和船后泵压力脉动的主要原因。进水流道出口速度不均匀度^[12]

$$\xi = \frac{1}{Q} \int_{dA} ((u - \bar{U})^2)^{1/2} dA$$

式中: Q 为出口截面的体积流量; u 为出口截面各单元上的局部速度; $\bar{U}$ 为截面平均速度; A 为进水流道出口截面面积。出口截面的速度分布越均匀, ξ 就越小,反之就越大。计算结果显示,敞水泵流道出口不均匀度为 0.09,船后泵为 0.21,流道出口不均匀性如图 5 所示。

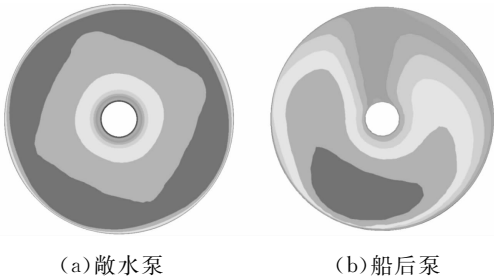


图 5 流道出口不均匀性示意图

5 敞水泵压力脉动特性计算与分析

暂不考虑装船泵进水流道压力脉动的影响,对敞水泵各截面进行了压力脉动特性分析。对敞水泵进行三维非定常模拟时,以直管取代装船流道,直管同样采用结构化网格进行离散,进口处设置为流量进口,该流量值从船后泵在 2 400 r/min、78 km/h 工况中的流道出口提取,为 634.9 kg/s。其他设置及监测点与船后泵完全相同,同样是先计算稳态,再以稳态为初始条件计算瞬态。敞水泵模型及边界设置如图 6 所示。

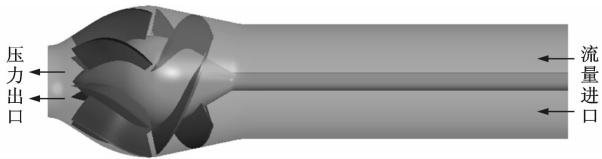


图 6 敞水泵模型及边界设置

5.1 敞水泵压力脉动幅值分析

各截面监测点压力脉动幅值如图 7 所示。在敞

水泵中来流均匀,叶轮内部、叶轮出口、导叶内部以叶轮叶片扰动为主,从轮缘到轮毂压力脉动幅值逐渐减弱,压力幅值从大到小依次为叶轮出口、流道出口、叶轮中、导叶内部、喷口。喷口处水流经导叶整流后距叶轮最远,其受叶轮影响较小;叶顶间隙的4个监测点从叶顶沿导边到随边的压力幅值受叶片影响逐渐变大。

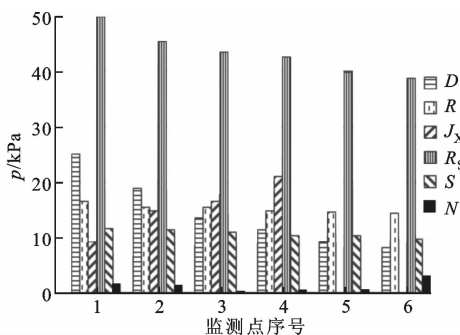


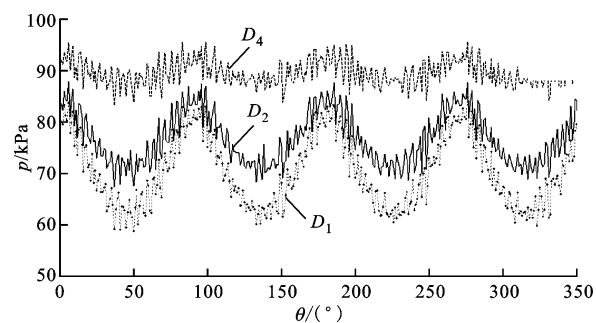
图7 敞水泵监测点压力脉动幅值直方图

5.2 敞水泵监测点时域图分析

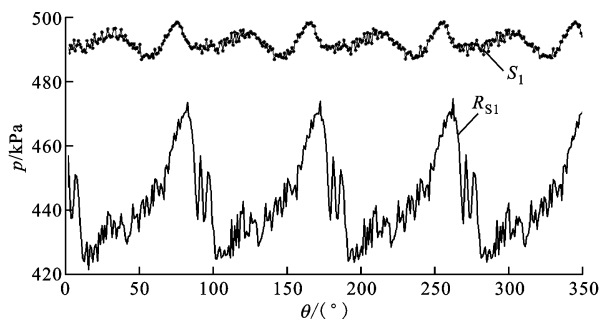
为方便显示,本文间隔性地选取一些点进行分析。如图8a,由流道出口监测点1、2、4显示,流道出口处监测一圈出现了4个明显的小周期。这是由于来流均匀、脉动与叶频相符、周期性受叶片影响所致。脉动幅值由轮缘到轮毂逐渐减小,说明靠近轮缘处受叶片影响较大。如图8b,由于叶轮最外缘受叶片影响最大,所以通过对叶轮出口与导叶内部最外缘监测点进行分析发现,在一个周期内两者也均有4个明显的小周期,其幅值显示,叶片旋转频率对压力脉动的影响在导叶区不如叶轮区^[6]。本文研究表明,在叶轮叶顶间隙处,从泵进口沿轴向,水流受叶轮影响逐渐增强,因此选择 J_{x4} 和叶轮最外缘监测点 R_1 来显示叶轮区域脉动情况。如图8c,监测一圈在叶轮区域有7个明显的小周期,与导叶数相同。这是因为叶轮为旋转域,水流与导叶冲击的反作用形成了叶轮域压力脉动的时域特性,与物理现象相符。如图8d,在喷口处,除监测点6例外,脉动压力值从轮缘到轮毂呈下降趋势,这是喷口中心的旋涡引起的,虽然距离叶轮较远,但整体波峰差值偏小,也有明显的4个周期。

5.3 敞水泵压力脉动频域分析

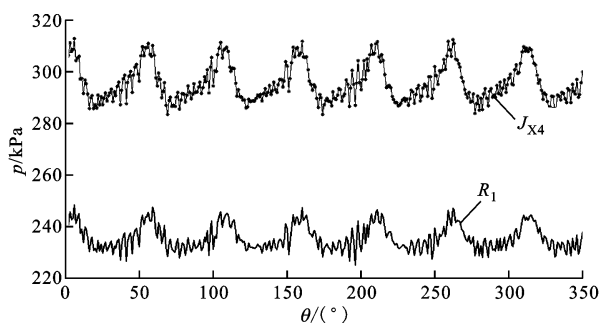
根据三维瞬态输出结果,采用傅里叶变换(FFT)对各监测点进行脉动频谱分析^[13]。各组监测点的压力脉动频域图如图9所示。为方便显示,取各组监测点1、2、4、6, F_n 为轴频的倍数。叶轮叶片数为4,叶轮对水流的影响频率及其谐波为轴频的4倍



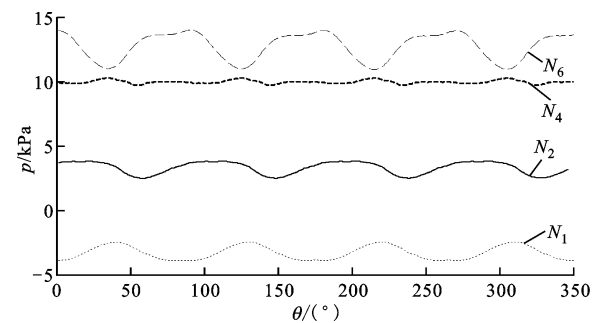
(a)流道出口处监测点1、2、4



(b)导叶内部和叶轮出口最外缘处监测点



(c)叶顶间隙和叶轮内部监测点



(d)喷口处监测点

图8 监测点处压力脉动时域特性

(叶频);导叶叶片数为7,导叶对水流的影响频率及其谐波为轴频的7倍。由图9可知,在流道出口、叶轮出口、导叶内部,压力脉动主频率均为叶轮叶片频率,即轴频的4倍,且压力脉动幅值从轮缘到轮毂依次减小,而在导叶中各监测点压力脉动幅值波动范

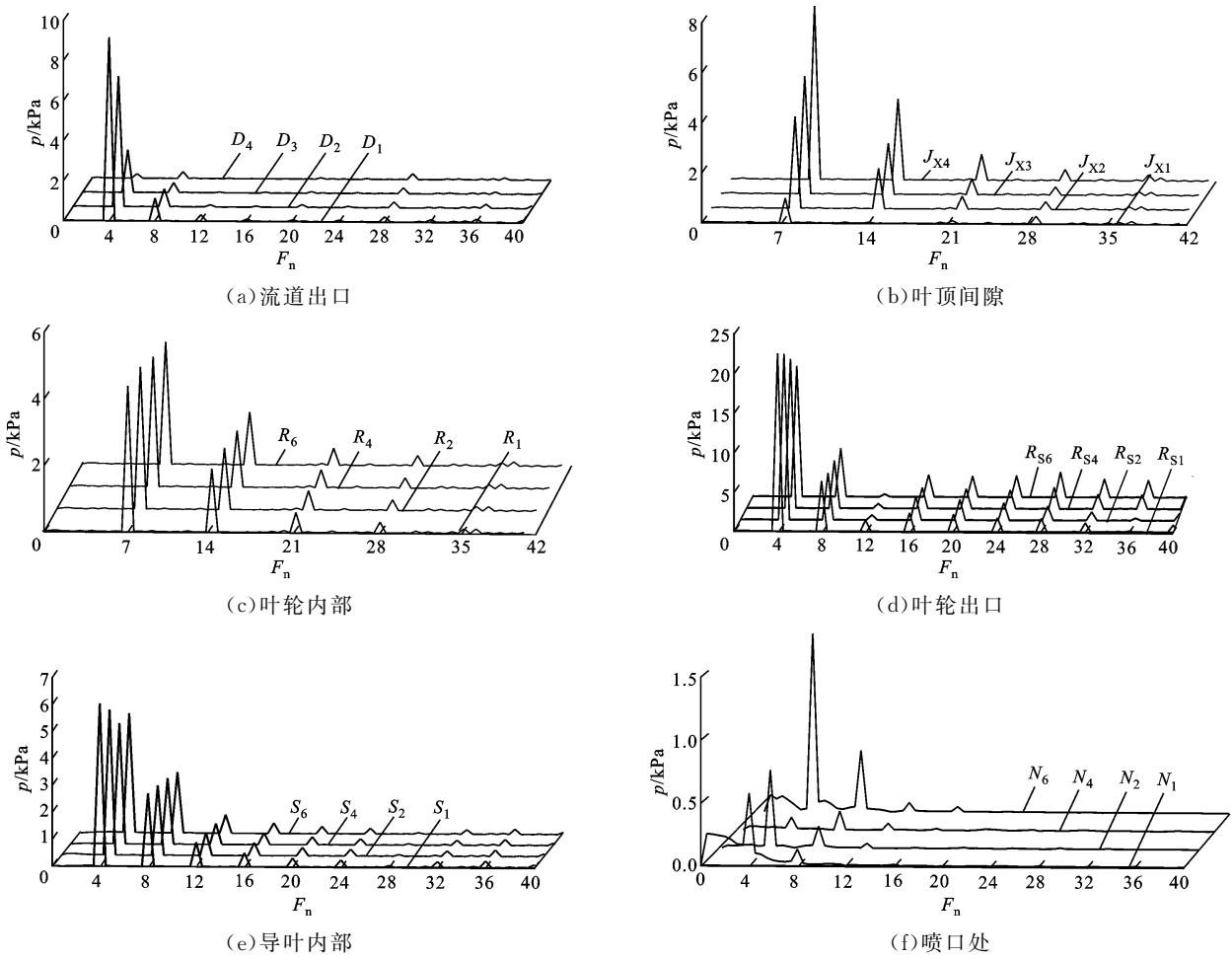


图9 敞水泵压力脉动频域特性

围较小,下降趋势减缓,这是导叶整流的结果。在叶轮旋转域的叶顶间隙和叶轮中,每个旋转周期内 7 片导叶对水流的反作用被切割成 7 份,压力脉动主频率为轴频的 7 倍。叶顶间隙处从叶轮进口到出口沿轴向压力脉动幅值增加,这是受叶片影响累积的结果,叶轮中沿径向从轮缘到轮毂压力脉动幅值逐渐减小。在喷口处最大压力脉动频域在 1.4 kPa 以下,由于导叶的消失、锥形轮毂引起的扰流等原因,所以规律性不明显。

6 船后泵压力脉动特性计算与分析

斜底船船后泵计算模型与边界条件见图 3。以 2 400 r/min、78 km/h 工况进行瞬态计算,待稳定后,取最后 3 圈输出结果平均值来分析脉动幅值走向,对各截面时域特性、频域特性进行直观展示,探究其规律及物理意义。

6.1 船后泵压力脉动幅值分析

各监测点压力脉动幅值如图 10 所示,其中叶顶间隙只有 4 个监测点。

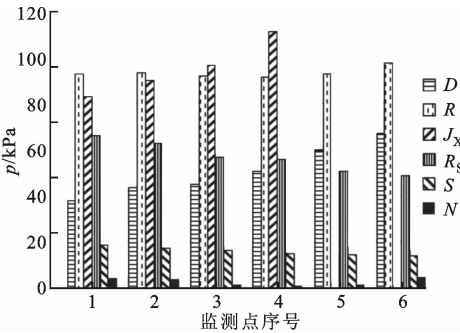


图10 船后泵监测点脉动压力幅值直方图

由图 10 可知,流道出口处因距离叶片导边尚有一段距离,水流经过了流道弯管和轴之后发生紊乱,但依然呈现规律性,即在流道出口处,从轮缘到轮毂压力脉动幅值逐渐增大,与敞水泵的情况相反。叶轮内部、叶轮出口、导叶内部以叶轮叶片扰动为主,从轮缘到轮毂脉动压力幅值逐渐减小。整体幅值从大到小依次为叶轮出口、叶轮、导叶内部。喷口处距叶轮最远,受叶轮影响较小,水流经导叶整流后的压力幅值仅有微弱变化;叶顶间隙的 4 个监测点,从叶顶

沿导边到随边的累积压力脉动幅值受叶片影响逐渐增大;船后泵整体压力脉动幅值走向与敞水泵一致。

6.2 监测点压力脉动时域特性分析

由于流道出口距离叶片导边尚有一段距离,受叶轮影响微弱,流道弯管和轴引起的扰流掩盖了叶轮对来流的反作用,所以在监测一圈后各监测点压力脉动变化没有规律性可寻,这与敞水泵均匀来流下呈现4个小周期存在明显差异,且在同一监测点船后泵压力脉动幅值明显大于敞水泵。该结果同样表现在旋转域的叶轮中,由于叶轮设置为旋转域,叶轮中和叶顶间隙处监测一圈为一个周期,一圈内流道和轴引起的扰流掩盖了叶轮的影响,所以一圈监测点压力脉动变化没有规律性。叶轮出口和导叶内部最外缘监测点压力脉动时域图如图11所示。

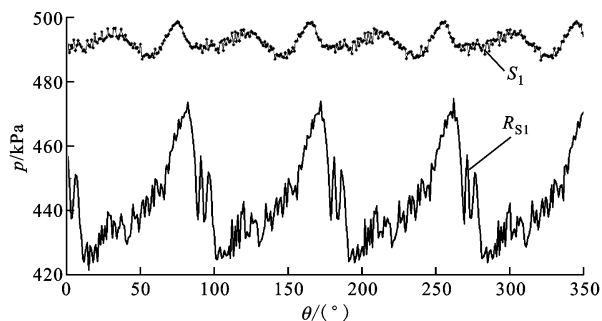


图11 叶轮出口和导叶内部最外缘监测点压力脉动时域图

由图11可见,在叶轮出口与导叶中,叶轮引起的扰流起主导作用,监测一圈出现了4个明显的小周期,与叶频相符,相比叶轮出口处监测点 R_{S1} ,导叶中4个小周期的波峰相差较小,说明叶片旋转频率对压力脉动的影响在导叶区不如叶轮区,该结果与敞水泵一致。喷口监测点压力脉动时域图如图12所示。

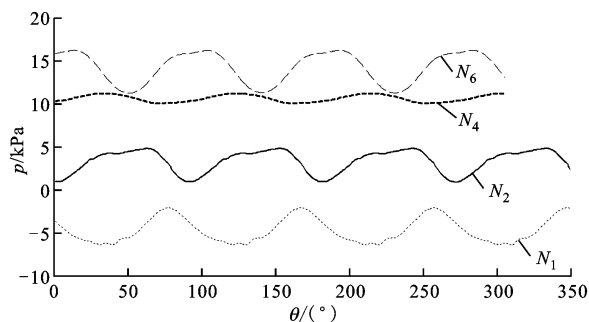
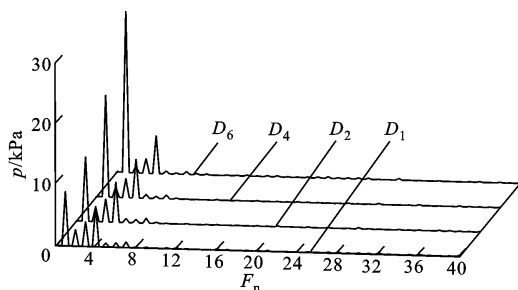


图12 喷口监测点压力脉动时域图

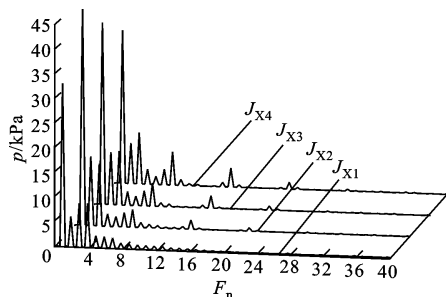
由图12可见,喷口监测点压力脉动呈现出4个小周期,但此时受叶片的影响很小,波峰差值很小,且压力峰值从轮缘到轮毂依次递减。结合以上叶轮出口和导叶分析可知,距叶轮越远,受叶轮影响越小。

6.3 监测点压力脉动频域特性分析

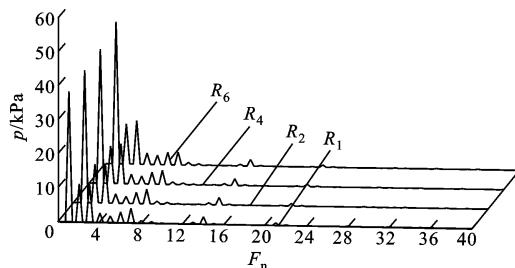
为方便与敞水泵对比,仍取各组监测点1、2、4、6进行分析。各组监测点压力脉动频域特性如图13所示。由图13可见,与裸泵相比,监测一圈内,流道出口以流道弯管和轴引起的扰流为主,流道和轴对水流的影响频率为轴频,而敞水泵则因为来流均匀,脉动频率主要为叶频。由图13b、13c可见,叶轮旋转域频率及其谐波为轴频,这是不均匀来流掩盖了导叶对水流反作用的结果,与敞水泵有明显的不同。在叶轮出口、导叶内部和喷口,水流脉动主要受叶轮的影响,叶轮对水流的影响频率及其谐波为叶频,与



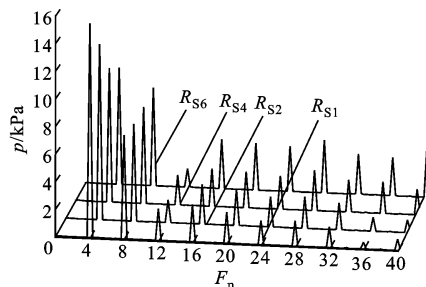
(a) 流道出口



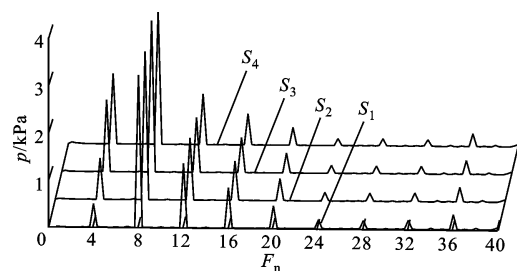
(b) 叶顶间隙



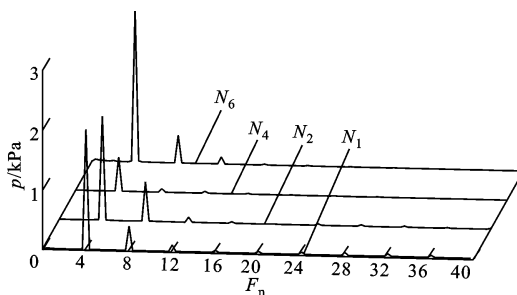
(c) 叶轮内部



(d) 叶轮出口



(e) 导叶内部



(f) 喷口

图 13 各监测点压力脉动频域特性

敞水泵相似,只是因为受到不均匀来流影响。船后泵的压力脉动幅值上大于敞水泵。

7 结 论

采用分离涡方法对喷泵在敞水和船后的内部压力脉动进行了数值计算和对比,得出以下结论。

(1) 流道出口距离叶片导边尚有一段距离,船后泵中水流经过流道弯管和轴之后产生紊乱,但依然具有规律性,即在流道出口,从轮缘到轮毂的压力脉动幅值逐渐增大,该结果与敞水泵相反。

(2) 叶轮出口和导叶内部的压力脉动主频以叶频为主,压力脉动幅值从轮缘到轮毂逐渐减小。

(3) 旋转域叶轮在均匀来流的敞水泵中的压力脉动频率以导叶对水流反作用频率为主,即为 7 倍轴频。压力脉动幅值从轮缘到轮毂逐渐减小,减小幅度减缓;船后泵中,来流紊乱,压力脉动频率为轴频。叶顶间隙,从叶顶沿导边至随边累积压力脉动幅值受叶片影响逐渐增大。

(4) 喷口处,敞水泵和船后泵的压力脉动幅值都很微弱,从壳体到轴心呈下降趋势,监测点 6 突然增大,这是轮毂消失引起的旋涡所致。喷口处压力脉动频率均为叶频。

(5) 对比分析显示,压力脉动主要受叶轮的影响,从叶轮出口到喷口各监测点的压力脉动幅值逐渐减小,说明随着流体远离叶轮,叶轮对压力脉动的影响逐渐减小。

(6) 相同的监测位置,船后泵脉动压力幅值总体比敞水泵大。

参考文献:

- [1] 施卫东, 邹萍萍, 张德胜, 等. 高比转速斜流泵内部非定常压力脉动特性 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 147-152.
SHI Weidong, ZOU Pingping, ZHANG Desheng, et al. Unsteady flow pressure fluctuation of high-specific-speed mixed-flow pump [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 147-152.
- [2] MOISES S, BAKIR S, KHELLADI F, et al. Pressure fluctuations reduction in centrifugal pumps: Influence of impeller geometry and radial gap [J/CD]. ISRN Mechanical Engineering, 2011: ID 479594.
- [3] CHEAH K W, LEE T S, WINOTO S H. Unsteady fluid flow study in a centrifugal pump by CFD method [C]//4th International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Mechanics. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2009: 66-71.
- [4] ZOBEIRI A, KUENY J L, FARHAT M, et al. Pump-turbine rotor-stator in generating mode pressure fluctuation in distributor channel [C]//The 23th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Yokohama, Japan: IAHR, 2006: 17-21.
- [5] FURUKAWA A, TAKAHARA H. Pressure fluctuation in a vaned diffuser downstream from a centrifugal pump impeller [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2003, 9(4): 285-292.
- [6] 王春林, 贾飞, 吴志旺, 等. 高比转速混流泵非定常流场压力脉动特性 [J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(2): 103-108.
WANG Chunlin, JIA Fei, WU Zhiwang, et al. Pressure fluctuation of unsteady flow in high Specific speed mixed-flow pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(2): 103-108.
- [7] 施卫东, 姚捷, 张德胜, 等. 采样频率和时间对轴流泵压力脉动特性的影响 [J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(3): 190-195.
SHI Weidong, YAO Jie, ZHANG Desheng, et al. Influence of sampling frequency and time on pressure fluctuation characteristics of axial-flow pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(3): 190-195.
- [8] 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.

(下转第 102 页)