

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.016

带分流叶片混流式水泵非定常流动特性研究

张旭¹ 王鹏飞² 阮晓东¹

(1. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027;

2. 浙江大学自贡创新中心, 自贡 643000)

摘要: 为研究在流固耦合作用下分流叶片对混流式水泵的性能影响,以某型号的大流量混流式水泵作为研究对象,采用双向流固耦合方法和动网格变形技术对有/无分流叶片混流泵进行流场和结构场计算。对比分析了有/无分流叶片对混流泵非定常流动特性和动力学特性的影响。研究发现,分流叶片的添加使得动静干涉产生的压力脉动幅值的最大值大幅降低,但减小了脉动衰减的速度。有/无分流叶片对轴向力平均值影响不大,但考虑流固耦合效应时轴向力有所减小并有波动产生。分流叶片的添加可以降低应力以及形变的波动幅值。叶片最大应力区主要集中于靠近叶轮轮毂及轮缘处,分流叶片的添加使得叶片最大应力减小,且改善了应力变化梯度,使得应力分布更加均匀。分流叶片的添加也使得叶片形变在圆周方向更加均匀,改善了形变分布的偏心问题。研究结果可以为混流泵叶片的优化设计提供相应参考。

关键词: 混流式水泵; 分流叶片; 流固耦合; 压力脉动; 非定常流动

中图分类号: TH313

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)11-0153-08

OSID:



Unsteady Flow Characteristics of Mixed-flow Pumps with Splitter Blades

ZHANG Xu¹ WANG Pengfei² RUAN Xiaodong¹

(1. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. Zigong Innovation Center of Zhejiang University, Zigong 643000, China)

Abstract: In order to study the influence of splitter blades on the performance of mixed-flow pumps with the effects of fluid-solid interaction, a certain type of mixed-flow pump with large flow was used as the research object, and the two-way fluid-solid interaction coupling method with dynamic mesh deformation was used. The influence of the presence of splitter blades on the unsteady pressure fluctuations and the resulting structural dynamic characteristics of the mixed-flow pump were studied. It was found that the presence of splitter blades greatly reduced the maximum value of pressure fluctuation amplitude which was induced by rotor stator interaction. However, the presence of splitter blades had an effect of reducing the rate of fluctuation dissipation. The splitter blades had little influence on the average value of the axial force. When the effects of fluid-solid interaction were considered, the average value of axial force was reduced and there were fluctuations. Besides, the presence of splitter blades had an effect of reducing the fluctuation amplitude of total stress and deformation. The maximum stress area occurred in the intersection of the blade and the hub/shroud. The maximum stress of the blade was reduced by the presence of splitter blades, and the stress gradient was reduced, resulting a more uniform stress distribution. The blade deformation was more uniform in the circumferential direction due to the presence of splitter blades, and the eccentricity of the deformation distribution was reduced. The research results could provide some references for the optimal design of the mixed-flow pump.

Key words: mixed-flow pump; splitter blades; fluid-solid interaction; pressure pulsation; unsteady flow

收稿日期: 2020-12-02 修回日期: 2021-01-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB057301)、国家自然科学基金创新研究群体项目(51821093)、四川省应用基础研究计划项目(2019YJ0681)和自贡市重点科技计划项目(2017JZ20)

作者简介: 张旭(1993—),男,博士生,主要从事湍流理论分析与流体机械优化设计研究,E-mail: zhangxuzju@zju.edu.cn

通信作者: 王鹏飞(1985—),男,副教授,主要从事流体机械内流理论及设计研究,E-mail: wangpf@zucc.edu.cn

0 引言

混流式水泵广泛应用于多种领域^[1-4]。混流式水泵高速旋转的叶轮与静止的导叶之间的动静干涉相互作用、压水室壁面压力波动反射作用以及正常运行过程中主泵内部复杂的三维非定常流动等,都会引起泵内的压力波动^[5-7],强烈的压力脉动不仅会对泵的流量、扬程和效率等外特性产生影响,而且会引起泵叶片载荷波动^[8],进一步引发机组设备的振动和噪声^[9-10],对泵的安全平稳运行产生不利影响。因此很有必要对混流泵内流场的压力脉动特性及其叶片载荷特性进行深入研究。

随着计算机技术的突飞猛进,计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)和流固耦合(Fluid solid interaction, FSI)已经成为流体机械的内部流动研究及关键部件应力应变分析的有效技术手段之一^[11-14]。文献[15]采用大涡模拟方法对高比转数混流泵内三维非定常湍流场进行了数值模拟,发现压力脉动幅值从轮毂到轮缘均逐渐增大,叶轮进口压力脉动无明显规律性,但出口存在明显的周期性。文献[16]研究了混流泵内以叶片压力脉动为声源诱发的噪声,研究发现混流泵叶轮和蜗壳之间的动静干涉作用是引发流动诱导噪声的主要原因;流动诱导噪声的主频是由压力脉动主频以及泵体结构的固有频率综合决定的。泵内非定常流动会对泵叶片产生交变载荷,泵关键部件的应力与流固耦合分析对其安全运行至关重要。文献[17]采用单向流固耦合对离心泵叶轮进行结构分析,研究发现在各工况下叶轮应力分布不均且存在局部应力集中;叶轮变形的总位移随半径的增大不断变大,并在叶轮边缘达到最大。文献[18]对比分析了顺序耦合和双向耦合发现叶轮上的等效应力分布基本一致。文献[19]利用 CFD 和有限元分析软件对单叶片离心泵采用单向和双向流固耦合计算,分析了转子振动位移和所受的水力激励,并与试验测量的水力激励位移对比。但上述研究对象多为离心泵,对混流泵的流固耦合研究还需深入。

分流叶片采用了长短叶片间隔布置,可以有效地改善叶轮内部流场分布,可以综合提高泵的整体性能,国内外学者对带分流叶片的离心泵进行了大量的数值模拟和试验测试^[20-23],但应用在混流泵上还鲜有报道。本文基于计算流体力学软件 Fluent 16.0 和 ANSYS Workbench 16.0 平台对混流泵的内部流动及流固耦合特性进行计算,主要研究叶轮流道内有/无分流叶片对混流泵性能的影响。

1 研究方法

1.1 计算模型与网格划分

某型号混流式水泵的设计参数为:流量 $Q = 1\ 386\ \text{m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 16\ \text{m}$,转速 $n = 1\ 500\ \text{r}/\text{min}$,比转数为 392.5。泵的结构是长轴悬臂式安装结构。设计了两个叶轮方案,其中方案 1 为 6 叶片原始混流泵叶轮结构,方案 2 是在方案 1 的基础上进行优化,在流道中加入了分流叶片,分流叶片通过截短主叶片生成。分流叶片长度为主叶片长度的 1/2。导叶选 11 片。混流泵的全三维结构如图 1 所示。输送的介质为常温清水,密度 $1\ \text{g}/\text{cm}^3$,粘度 $1\ \text{Pa}\cdot\text{s}$,模型泵叶轮和轴的材料为结构钢,密度 $7\ 850\ \text{kg}/\text{m}^3$,弹性模量 210 GPa,泊松比 0.3。

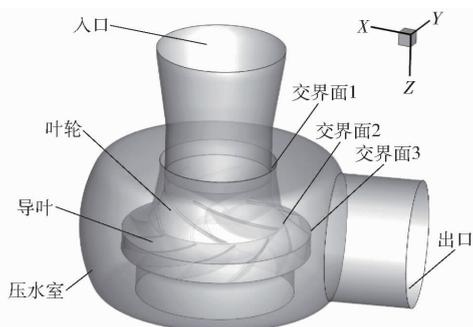


图1 混流泵总体结构(叶轮为方案1结构)

Fig. 1 Overall view of mixed-flow pump

采用 ICEM - CFD 软件对模型进行网格划分,选择网格类型为非结构化四面体网格。为保证网格质量和计算精度,对几何模型曲率较大处进行了局部网格加密。在验证了网格无关性要求后,流体域选择的总网格数为 430 万。各个部件的网格划分如图 2 所示。固体区域的有限元网格在 Transient Structure 中生成,网格单元数为 341 577。

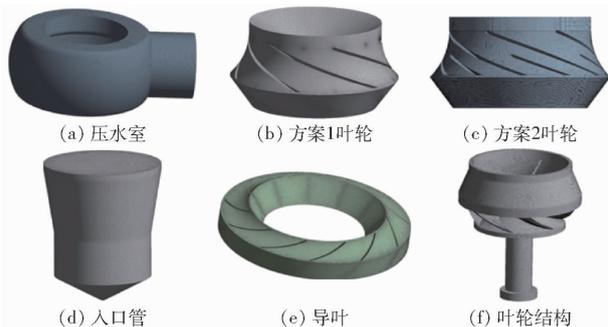


图2 各水力部件网格划分

Fig. 2 Computational meshes of each component

1.2 数值计算方法

采用 ANSYS Fluent 软件对流场进行数值计算,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行求解。采用基于隐式耦合求解的 SIMPLE 算法求解时均 $N-S$ (Navier-Stokes) 方程。旋转叶轮和静止导叶之间的耦合采

用滑移网格模型,采用 Frame motion 和 Mesh motion 处理旋转叶轮网格的稳态计算和瞬态计算过程。进口边界采用质量流量入口,出口边界条件采用压力出口。壁面设置为无滑移固定壁面,壁面区采用壁面函数法处理。在导叶流道内沿着流道设置 3 个压力脉动监测点。监测的位置如图 3 所示。计算时首先对整个泵进行稳态数值计算,并将收敛的稳态结果作为初始值进行瞬态数值计算。在作瞬态数值计算时,设置时间步长为 $2.22 \times 10^{-4} \text{ s}^{[24]}$ 。每个时间步长叶轮旋转 2° ,旋转一周需要 180 个时间步长。收敛残差为 10^{-5} 。

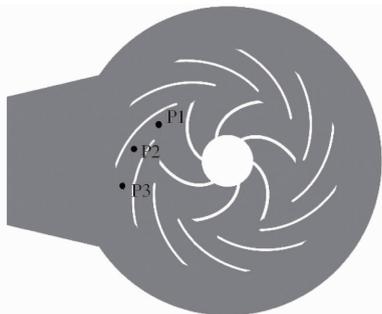


图 3 压力脉动监测点位置(叶轮结构为方案 1)

Fig. 3 Monitor points setting (blade structure case 1)

由于本文需要考虑叶片变形与流场作用的双向流固耦合效应,所以在作流场瞬态计算时,采用动网格技术来处理流固耦合面的网格变形,本文采用光顺模型和网格重构方法来进行动网格的变形。在固体求解域中将叶轮叶片选为流固交界面。采用 ANSYS Workbench 平台提供的 system coupling 模块进行数据交换。流场的输出参数为力载荷,输入参数为网格变形量,结构场的输出参数为网格变形量,输入参数为力载荷。每一步都进行数据交换,耦合收敛残差设为 0.01。

1.3 外特性验证

为了验证当前数值计算的准确性,在闭环试验台中进行了原始模型泵的外特性试验。当采用 CFD 计算泵的效率时,忽略了其机械损失和容积损失,因此在换算成实际效率时需要加上一个损失系数。根据泵设计手册^[25],机械损失和容积损失定义为 0.96 和 0.96,图 4 中 H_b 表示设计扬程, Q_b 表示设计流量, η 表示效率。图 4 显示了试验与经过修正的数值计算结果的 $H-Q$ 以及 $\eta-Q$ 的外特性曲线比较。可以看到,CFD 计算结果与试验结果吻合较好,CFD 计算可以较为精确地预测曲线的趋势,CFD 计算的扬程和效率与试验之间的相对误差小于 5%,CFD 计算结果与试验结果的差异可能是由网格分辨率不足引起的,要准确捕捉叶片表面周围的湍流边界层需要更为复杂的网格模型和计算方

法,本文的重点并不是湍流精确计算方法,当前采用的数值计算方法可以满足研究需求。同时对比方案 1 和方案 2 的外特性曲线可以发现,两种设计方案的模拟扬程都能满足设计要求。在设计点附近,方案 2 的扬程和效率与方案 1 相近并稍微有所提高,在小流量工况下,方案 2 的扬程和效率明显高于方案 1,这主要是因为在小流量工况下分流叶片的添加使得叶轮流速分布更加均匀,控制了内部流动分离,流道内回流引发的流动损失减小。在大流量工况下,方案 2 的扬程和效率明显低于方案 1,这主要是因为在大流量工况下分流叶片的添加带来了排挤阻塞作用。另外从效率曲线上可以看出,在设计点左侧,方案 2 的效率下降速度比方案 1 慢,方案 2 的高效区更宽,说明分流叶片的添加有利于泵的多工况尤其是小工况运行。表 1 给出了各过流部件在设计工况下的总压(压力水头)损失占扬程的百分比。从表中可以看出,泵内主要水力损失发生在叶轮和压水室中,方案 2 中分流叶片的添加虽然使得叶轮的水力损失增加,但其使得其他过流部件内的水力损失减小,综合来看,在最佳效率点方案 2 中总的水力损失更小,效率更高。

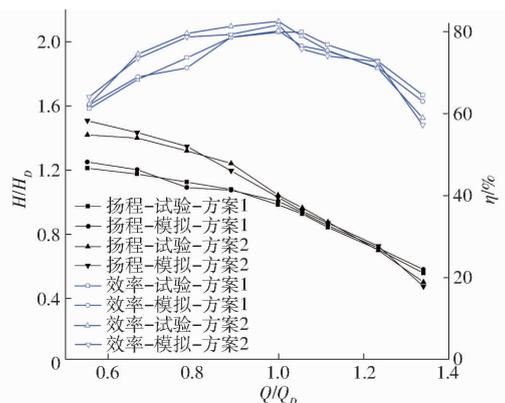


图 4 外特性曲线对比

Fig. 4 Comparison of performance curves

表 1 设计工况下各过流部件总压损失占扬程百分比

Tab. 1 Total pressure loss of each component under design condition %

类别	过流部件			
	入口管	叶轮	导叶	压水室
方案 1	0.16	7.40	4.50	15.30
方案 2	0.14	10.27	4.13	8.80

2 计算结果与讨论

2.1 压力脉动对比分析

为了探究分流叶片的添加及流固耦合效应对混流泵内压力脉动的影响,图 5~8 对比分析了导叶流道内点 P1~P3 的压力脉动的时域和频域。可以发

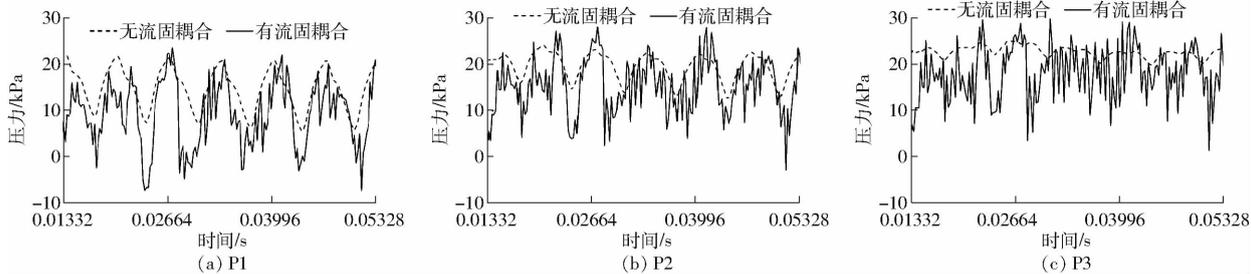


图5 方案1混流泵导叶流道内压力脉动时域对比

Fig. 5 Pressure pulsation contrast in time domain with case 1

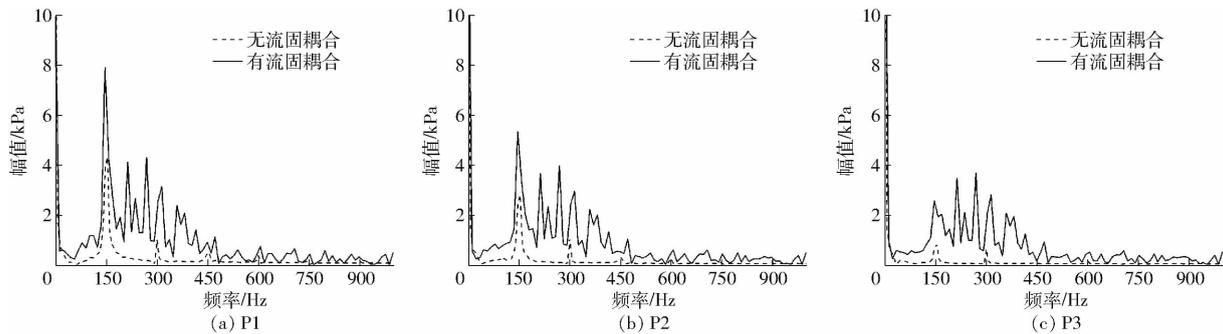


图6 方案1混流泵导叶流道内压力脉动频域对比

Fig. 6 Pressure pulsation contrast in frequency domain with case 1

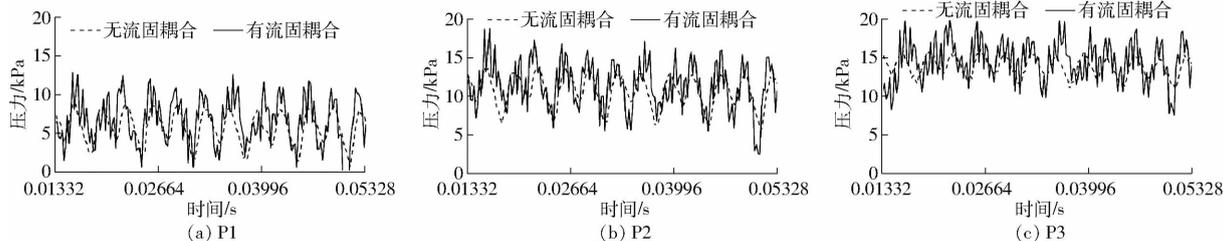


图7 方案2混流泵导叶流道内压力脉动时域对比

Fig. 7 Pressure pulsation contrast in time domain with case 2

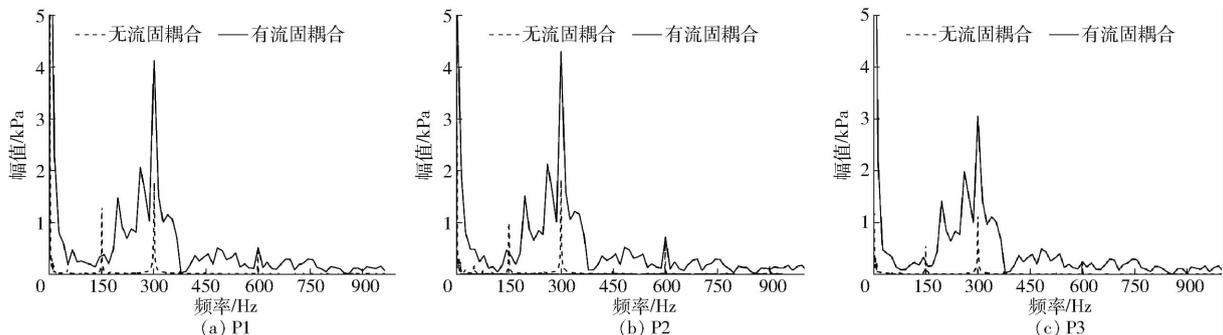


图8 方案2混流泵导叶流道内压力脉动频域对比

Fig. 8 Pressure pulsation contrast in frequency domain with case 2

现,在考虑了流固耦合效应后,混流泵内压力脉动幅值都有较为明显的提高,具体来看,方案1中原始叶轮结构混流泵内压力脉动的主频为叶频150 Hz,考虑流固耦合效应后基频及其倍频幅值都有较大幅度提高,方案2中带分流叶片混流泵内压力脉动的主频为全叶频300 Hz,但由于分流叶片长度只有正常叶片1/2,所产生的压力脉动叠加于原始脉动分量上,削弱了原始叶轮脉动强度,由于分流叶片长度与正常叶片不同,其引发的压力脉动频率分量也存在

半叶频150 Hz,但幅值明显低于主频300 Hz。考虑流固耦合效应后,压力脉动的主频300 Hz处的脉动幅值大为提高,但其半叶频150 Hz处的脉动幅值大为减小。这说明流固耦合效应削弱了分流叶片长度的影响,使得分流叶片产生的尾迹与正常长度叶片的尾迹更为接近。对比两种方案的压力脉动数据可以发现,分流叶片的存在,有效地削减了动静叶干涉产生的压力脉动幅值。点P1处的压力脉动主频幅值从7 908 Pa/4 335 Pa(考虑流固耦合/无流固耦

合)下降到 4 304 Pa/1 829 Pa, 降幅达到 45.6%/57.8%, 但沿着流道方向其脉动削减程度逐渐下降。出口处方案 2 的脉动水平相比方案 1 还有所上升, 这说明分流叶片的添加会使得导叶内脉动耗散衰减的速度变慢。但从疲劳 S-N(应力-寿命)曲线来说, 低幅值脉动增加不会影响叶片寿命, 高幅值脉动的削减使得叶片所承受的高周应力大幅降低, 可以有效提高叶片寿命。所以分流叶片的设计削减了压力脉动最大幅值, 有利于叶片的安全承载。

2.2 叶轮径向力轴向力分析

图 9 展示了分流叶片的添加及流固耦合效应对混流泵径向力的影响, 从图 9 中可以看出, 在不考虑流固耦合效应时, 分流叶片的添加使得径向力的平均水平从 100 N 提高到 140 N, 径向力的脉动幅值从 76 N 增大到 125 N, 但径向力脉动的主频并未发生改变。考虑流固耦合效应时方案 1 原始叶轮的径向力变化较大, 说明分流叶片的添加削弱了流固耦合作用对径向力的影响。图 10 展示了分流叶片及流固耦合效应对混流泵轴向力的影响, 可以发现, 在不考虑流固耦合作用时, 方案 1 和方案 2 的轴向力基本保持不变, 随时间波动幅度很小。且两种方案的轴向力比较接近, 都在 9 500 N 附近。这说明添加长度为主叶片 1/2 长度的分流叶片对轴向力影响很小, 基本不改变叶轮的轴向力。对比两种方案的流固耦合效应可以发现, 考虑流固耦合效应时轴向力的平均水平都比不考虑流固耦合效应时低, 脉动水平比不考虑流固耦合效应时有所提高, 同样可以发现分流叶片的添加削弱了流固耦合作用对轴向力平均水平的影响。

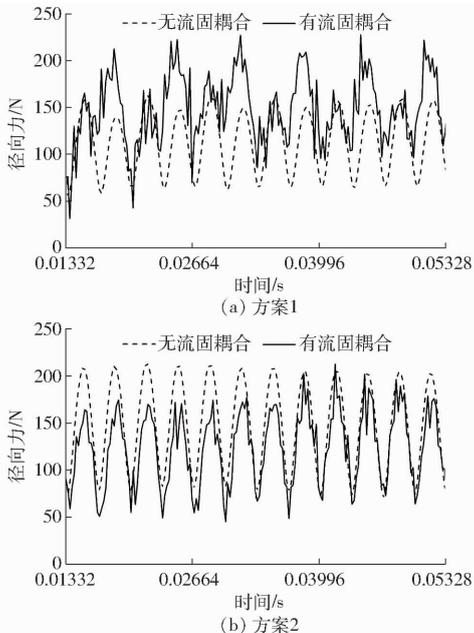


图 9 有/无流固耦合效应时径向力对比
Fig. 9 Radial force contrast with/without FSI

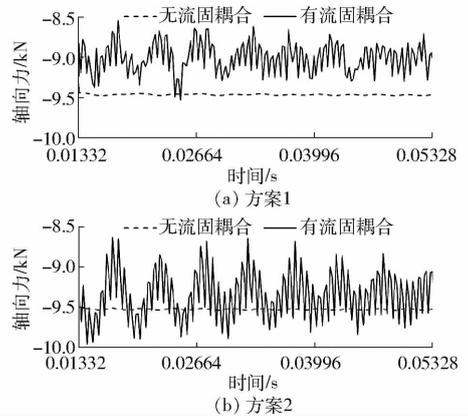


图 10 有/无流固耦合效应时轴向力对比
Fig. 10 Axial force contrast with/without FSI

2.3 转子应力及形变分析

在叶轮叶片固体结构上布置了 6 个测点, 测点 1 位于叶轮出口靠近上盖板处, 测点 2 位于叶轮出口中间, 测点 3 位于叶轮出口靠近下盖板处, 测点 4 位于叶轮进口靠近上盖板处, 测点 5 位于叶轮进口中间, 测点 6 位于叶轮进口靠近下盖板处。图 11、12 为 6 个测点在一个周期内的等效应力变化曲线。可以发现, 有无分流叶片对叶轮出口上盖板处的应力影响不大, 两者基本重合。在叶轮出口中间和靠近下盖板处, 分流叶片的存在使得其应力平均水平和应力变化幅值均下降。在叶轮进口靠近上盖板处, 分流叶片的存在使得应力平均水平提高较多, 而在叶轮进口中间和靠近下盖板处, 分流叶片的存在使得应力平均水平下降。总体看来, 分流叶片的添加可以降低应力变化幅值, 在低应力测点, 分流叶片的存在可能使得其应力水平上升, 但在高应力测点处, 分流叶片的存在使得其应力水平下降, 这有利于混流泵的长期安全承载。图 13、14 是 6 个监测点在一个周期内的变形量曲线。可以看出, 由于分流叶片的存在, 叶片形变出现了一些相位差, 分流叶片使得形变出现滞后。随时间变形量变化趋势基本一致, 形变平均水平基本保持不变, 但在某些位置分流叶片的添加使得变形量变化幅值明显降低。可以看出变形量级基本在 0.1 mm 左右, 但由于水的可压缩性较小, 所以如此小量级的形变引起压力脉动幅值如图 6、8 中所示成倍增加。

2.4 转子瞬态应力及形变分布

图 15 是方案 1 原始叶轮结构在一个周期内不同时刻的应力分布云图, 图 16 是方案 2 带分流叶片叶轮结构在一个周期内不同时刻的应力分布云图。可以看出, 原始叶轮叶片的应力沿着半径交替出现高应力区和低应力区。高应力区出现在叶片靠近轮毂处、叶轮中间和叶轮轮缘处; 低应力区主要分布在轴心处。应力区域在叶片上呈长条结构。各时刻转

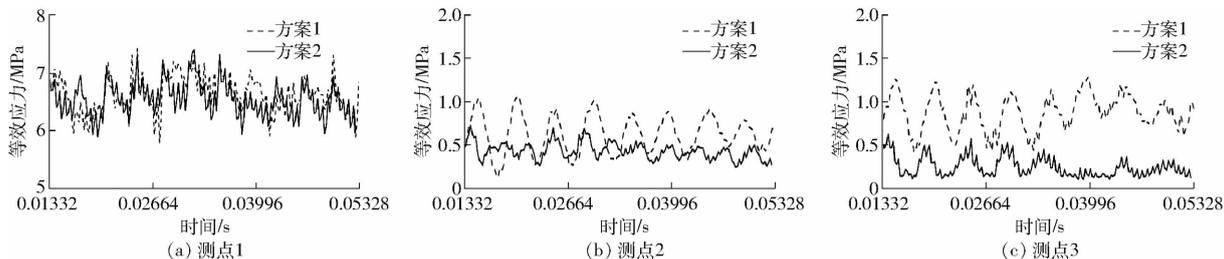


图 11 叶轮出口边测点应力随时间变化曲线对比

Fig. 11 Comparison of equivalent stress in time domain at outlet of impeller

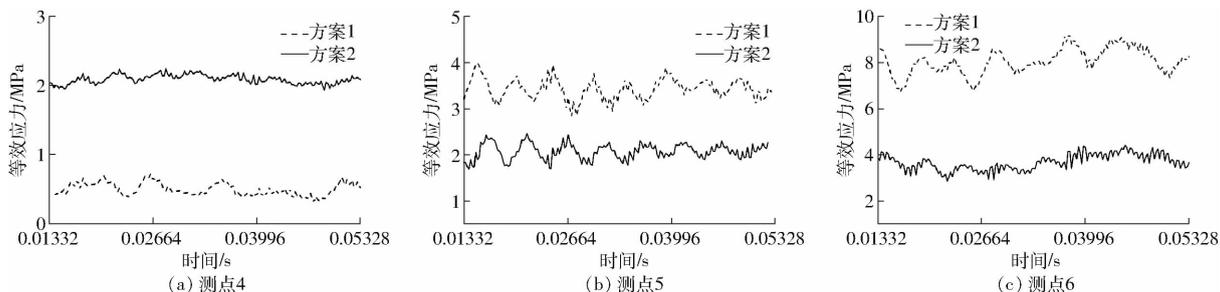


图 12 叶轮进口边测点应力随时间变化曲线对比

Fig. 12 Comparison of equivalent stress in time domain at inlet of impeller

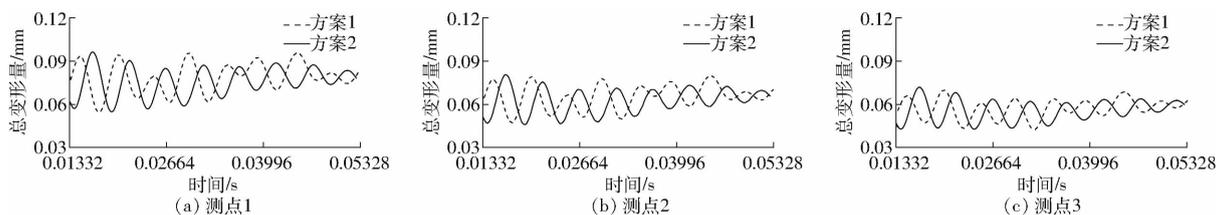


图 13 叶轮出口边测点变形量随时间变化曲线对比

Fig. 13 Comparison of total deformation in time domain at outlet of impeller

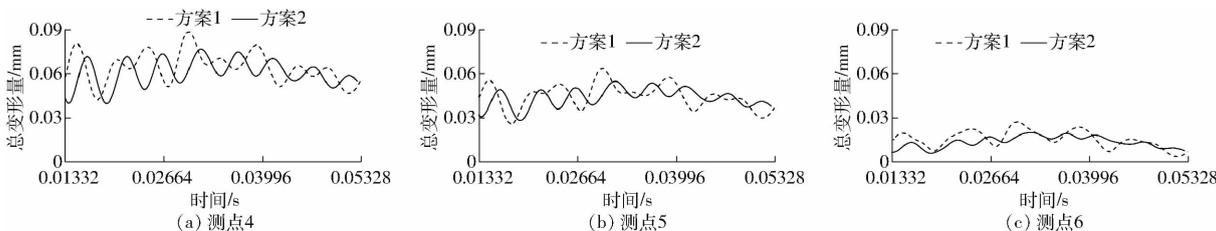


图 14 叶轮进口边测点变形量随时间变化曲线对比

Fig. 14 Comparison of total deformation in time domain at inlet of impeller

子的应力分布图基本一致,均呈中心对称分布。带分流叶片叶轮的应力分布与原始叶轮应力分布有较大差别,其高应力区扩大,低应力区缩小,应力变化梯度减小,应力分布由长条结构变为渐缩的纺锤结构,整个叶片应力分布更加均匀。带分流叶片叶轮整体最大应力相比于原始叶片由 25 MPa 左右下降到 17 MPa 左右。这说明分流叶片不仅有利于提高转子叶轮的承载能力,而且有利于提高转子的抗疲劳特性。图 17 是方案 1 原始叶轮结构在一个周期内不同时刻的变形量分布云图,图 18 是方案 2 带分流叶片叶轮结构在一个周期内不同时刻的变形量分布云图。可以看出,变形量随着半径的增大而增大,但变形量在圆周方向并不是均匀分布的,最小形变

的中心位于一个变化的偏心位置,偏心的产生与压水室的非均匀流动有关。最大形变位于叶轮出口靠近上盖板处。带分流叶片叶轮的变形量明显小于原始叶轮叶片变形量,这主要是由于分流叶片的添加使得压力脉动水平降低,从而使得作用在叶片上产生的应力水平降低,所导致的形变减小。另外可以观察到带分流叶片叶轮的形变在圆周方向分布的均匀性更好,最小形变中心的偏心距离明显减小。这主要是由于分流叶片的添加使得叶轮流道内的流动更加均匀,改善了形变在圆周方向的均匀性。

3 结论

(1) 在设计点处保持扬程基本不变的情况下,

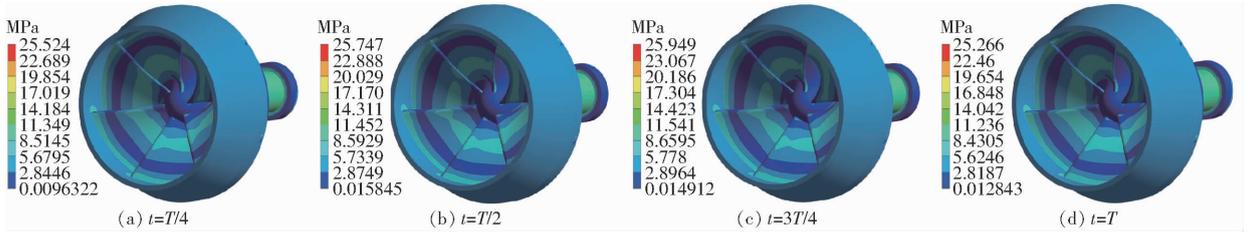


图 15 方案 1 不同时刻的应力分布云图

Fig. 15 Contour of stress with different time for case 1

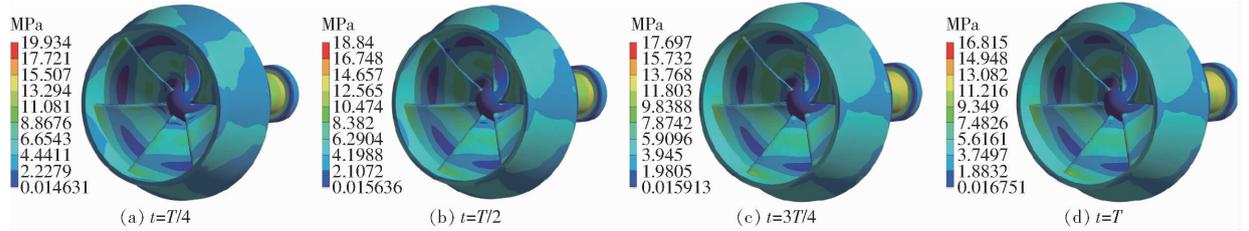


图 16 方案 2 不同时刻的应力分布云图

Fig. 16 Contours of stress with different times for case 2

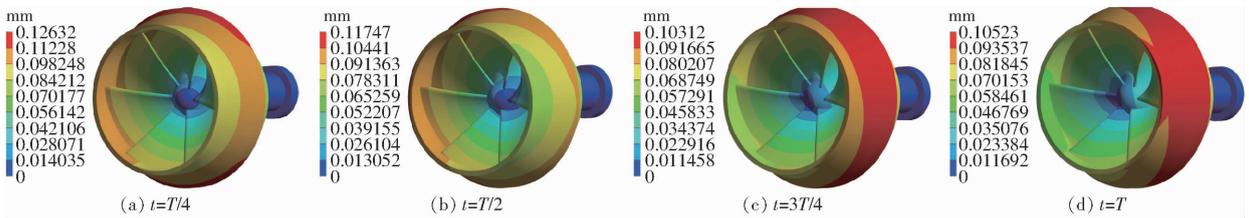


图 17 方案 1 不同时刻的变形量分布云图

Fig. 17 Contours of deformation with different times for case 1

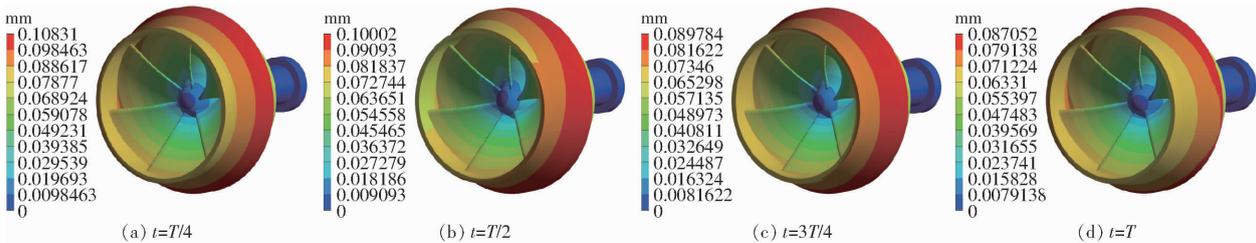


图 18 方案 2 不同时刻的变形量分布云图

Fig. 18 Contours of deformation with different times for case 2

分流叶片的添加减小了小流量工况的流动损失,提高了泵的效率。

(2) 分流叶片的添加使得动静干涉产生的压力脉动幅值的最大值大幅降低,但减小了压力脉动衰减的速度。

(3) 分流叶片的添加可以降低应力以及形变的波动幅值,高应力区主要集中于靠近叶轮轮毂及轮毂处,分流叶片的添加使得叶片最大应力减小,且改

善了应力变化梯度,使得应力分布更加均匀,有利于混流泵叶片的安全承载。分流叶片的添加也使得叶片形变在圆周方向更加均匀,改善了形变分布的偏心问题。

(4) 分流叶片的添加基本不影响混流泵的轴向力平均值,两种方案下的轴向力的脉动水平都比较低。分流叶片的添加使得混流泵径向力平均水平和脉动幅值有所升高,但并未改变径向力脉动主频。

参 考 文 献

[1] 崔宝玲, 方晨, 葛明亚. 低比转数离心泵内部流动特性和外特性试验[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(5):375-380. CUI Baoling, FANG Chen, GE Mingya. Internal flow characteristics and performance test of low specific-speed centrifugal pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(5):375-380. (in Chinese)

[2] 史佩琦, 崔宝玲, 陈洁达, 等. 低比转速离心泵内部流场数值模拟[J]. 浙江理工大学学报, 2012, 29(4):575-579. SHI Peiqi, CUI Baoling, CHEN Jieda, et al. The simulation of internal flow field in low-specific-speed centrifugal pump[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2012, 29(4):575-579. (in Chinese)

- [3] LI Yaojun, WANG Fujun. Numerical investigation of performance of an axial-flow pump with inducer [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 19(6):705 – 711.
- [4] XU Han, JIN Donghai, SUN Dakun, et al. Effect of rotor-stator axial spacing on the pressure-rise performance and flow field in an axial pump [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2019, 233(6):727 – 737.
- [5] LI Deyou, WANG Hongjie, WEI Xianzhu, et al. Analysis of rotor-stator interaction in turbine mode of a pump-turbine model [J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2016, 9(5):2559 – 2568.
- [6] ZHANG Wenwu, CHEN Zhenmu, ZHU Baoshan, et al. Pressure fluctuation and flow instability in S-shaped region of a reversible pump-turbine [J]. *Renewable Energy*, 2020, 154:826 – 840.
- [7] POSA A, LIPPOLIS A, BALARAS E. Large-eddy simulation of a mixed-flow pump at off-design conditions [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2015, 137(10):1 – 10.
- [8] 彭小娜, 朱相源, 李国君, 等. 导叶时序位置对离心泵叶片载荷影响的数值模拟 [J]. *排灌机械工程学报*, 2019, 37(3):192 – 198.
PENG Xiaona, ZHU Xiangyuan, LI Guojun, et al. Numerical prediction of clock effect of diffuser in volute on blade loading in centrifugal pump [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2019, 37(3):192 – 198. (in Chinese)
- [9] YANG Ailing, LANG Dapeng, LI Guoping, et al. Numerical research about influence of blade outlet angle on flow-induced noise and vibration for centrifugal pump [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 2014:583482.
- [10] 董亮, 代翠, 孔繁余, 等. 离心泵作透平流体诱发内场噪声特性及贡献分析 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52(18):184 – 192.
DONG Liang, DAI Cui, KONG Fanyu, et al. Flow-induced noise characteristic and contribution to interior noise for centrifugal pump as turbine [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(18):184 – 192. (in Chinese)
- [11] WU Dazhuan, YAN Peng, CHEN Xin, et al. Effect of trailing-edge modification of a mixed-flow pump [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2015, 137(10):101205.
- [12] WANG Kai, LIU Houlin, ZHOU Xiaohua, et al. Experimental research on pressure fluctuation and vibration in a mixed flow pump [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(1):179 – 184.
- [13] 黎义斌, 胡鹏林, 李仁年, 等. 不同叶顶间隙对斜流泵性能影响的数值分析 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(23):86 – 93.
LI Yibin, HU Penglin, LI Rennian, et al. Numerical analysis for effects of different blade tip clearance on performance in mixed-flow pump [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(23):86 – 93. (in Chinese)
- [14] ZHANG Xu, WANG Pengfei, RUAN Xiaodong, et al. Analysis of pressure pulsation induced by rotor-stator interaction in nuclear reactor coolant pump [J]. *Shock and Vibration*, 2017(1):1 – 18.
- [15] 王春林, 贾飞, 吴志旺, 等. 高比转数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. (in Chinese)
- [16] 郑源, 陈宇杰, 毛秀丽, 等. 混流泵压力脉动特性及其对流动诱导噪声的影响 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(23):67 – 73.
ZHENG Yuan, CHEN Yujie, MAO Xiuli, et al. Pressure pulsation characteristics and its impact on flow-induced noise in mixed-flow pump [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(23):67 – 73. (in Chinese)
- [17] 郑军, 杨昌明, 朱利, 等. 离心泵叶轮流固耦合分析 [J]. *流体机械*, 2013, 41(2):25 – 29.
ZHENG Jun, YANG Changming, ZHU Li, et al. Fluid-structure coupling analysis of centrifugal impeller [J]. *Fluid Machinery*, 2013, 41(2):25 – 29. (in Chinese)
- [18] 刘厚林, 徐欢, 吴贤芳, 等. 基于流固耦合的导叶式离心泵强度分析 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(12):27 – 30.
LIU Houlin, XU Huan, WU Xianfang, et al. Strength analysis of a diffuser pump based on fluid-structure interaction [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(12):27 – 30. (in Chinese)
- [19] BENRA F K, DOHMEN H J. Comparison of pump impeller orbit curves obtained by measurement and FSI simulation [C] // *ASME Pressure Vessels & Piping Conference*, 2007.
- [20] 张金凤, 王文杰, 方玉建, 等. 分流叶片离心泵非定常流动及动力学特性分析 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(23):37 – 41.
ZHANG Jinfeng, WANG Wenjie, FANG Yujian, et al. Influence of splitter blades on unsteady flow and structural dynamic characteristics of a molten salt centrifugal pump [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(23):37 – 41. (in Chinese)
- [21] 何有世, 袁寿其, 郭晓梅, 等. 偏置分流叶片离心泵叶轮内部流动数值模拟 [J]. *农业机械学报*, 2006, 37(2):33 – 36.
HE Youshi, YUAN Shouqi, GUO Xiaomei, et al. Numerical simulation for 3-D incompressible turbulent flow in impeller with splitting vanes of centrifugal pump [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(2):33 – 36. (in Chinese)
- [22] 谢蓉, 海洋, 王晓放. 分流叶片周向位置设计及其对离心叶轮内部流动的影响 [J]. *燃气轮机技术*, 2009(2):40 – 44.
XIE Rong, HAI Yang, WANG Xiaofang. Design of the splitter blade circumferential position and its effect on the internal flow of centrifugal impeller [J]. *Gas Turbine Technology*, 2009(2):40 – 44. (in Chinese)
- [23] XU C, AMANO R S. Centrifugal compressor performance improvements through impeller splitter location [J]. *ASME Journal of Energy Resources Technology*, 2018, 140(5):051201.
- [24] 王福军, 张玲, 黎耀军, 等. 轴流式水泵非定常湍流数值模拟的若干关键问题 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44(8):73 – 77.
WANG Fujun, ZHANG Ling, LI Yaojun, et al. Some key issues of unsteady turbulent numerical simulation in axial-flow pump [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(8):73 – 77. (in Chinese)
- [25] 关醒凡. 现代泵技术手册 [M]. 北京: 宇航出版社, 1995.