排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2018 年 6 月 June 2018 | 第 36 卷 第 6 期 Vol. 36 No. 6

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.17.0048

基于双向流固耦合的核主泵叶轮力学特性

钟伟源*，朱荣生，王秀礼，卢永刚，刘永，康俊鋆
（江苏大学国家水泵及系统工程研究中心，江苏 镇江 212013）


钟伟源

摘要：基于双向流固耦合方法对核主泵内流场和结构场进行联合求解，研究流固耦合作用下核主泵叶轮的力学特性，分析经流固耦合作用后叶轮总体、叶片进出口边及叶根在各流量下的应力及变形分布. 研究结果表明流固耦合作用对核主泵外特性有一定影响且耦合后结果更接近试验值；随着流量的增加，叶轮前盖板处应力分布均匀性有所降低，而叶轮的最大等效应力均发生在叶轮叶片出口边与叶轮前盖板交界处，在交变载荷的作用下容易产生疲劳破坏. 叶轮的最大的变形发生在叶轮叶片出水边的中部，叶轮的最大变形量随着流量的增加而增大. 叶根的进出口边处易出现应力集中现象，说明叶片进出口边对液流的压力载荷及动静干涉作用极为敏感，在叶轮水力及结构设计时应予以足够重视. 研究结果为核主泵以后的性能分析、叶轮的结构设计、维护和检修提供了有益参考.

关键词：核主泵；双向流固耦合；动应力；变形；数值模拟
中图分类号：TH313　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2018)06-0479-09

钟伟源，朱荣生，王秀礼，等. 基于双向流固耦合的核主泵叶轮力学特性[J]. 排灌机械工程学报，2018，36(6)：479-487.

ZHONG Weiyuan，ZHU Rongsheng，WANG Xiuli，et al. Mechanical properties of nuclear reactor coolant pump impeller based on bidirectional fluid structure interaction[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2018，36(6)：479-487.(in Chinese)

Mechanical properties of nuclear reactor coolant pump impeller based on bidirectional fluid structure interaction

ZHONG Weiyuan，*ZHU Rongsheng*，*WANG Xiuli*，*LU Yonggang*，*LIU Yong*，*KANG Junjun*
(National Research Center of Pumps，Jiangsu University，Zhenjiang，Jiangsu 212013，China)

Abstract：Based on the bidirectional fluid structure interaction method，the flow field and the structural response of the impeller were solved. The mechanical properties of the impeller of the nuclear reactor coolant pump were studied. The stress and deformation distributions of the impeller，the leading and trailing of the blade，and the root of the blade under different flows were analyzed. The results show that the fluid structure interaction effect has some influence on the characteristics of the nuclear reactor coolant pump and the result is closer to the test value after coupling. With the increase of flow rate，the stress distribution uniformity of the front shroud decreases，and the maximum equivalent stress occurs at the trailing edge of impeller blade and the frond shroud at the junction，where the fatigue load is liable to occur under the alternating load. The maximum deformation of the impeller occurs at the middle of the exit edge of the blade，which increases with flow rate. The stress concentration phenome-

收稿日期：2017-03-09；**修回日期**：2017-06-25；**网络出版时间**：2018-03-20
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180320.1438.004.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51379091，51509112)；江苏省重点研发计划项目(BE2016160)；江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2016072-02)；江苏省自然科学基金项目(BK20130516)；江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX16_0894)
第一作者简介：钟伟源(1992—)，男，广东茂名人，硕士研究生(通信作者，1491506818@qq.com)，主要从事流体机械流固热耦合研究.
第二作者简介：朱荣生(1964—)，男，湖南永州人，研究员(gqzrs@sina.com)，主要从事核电站主冷却剂循环泵内气液两相瞬态流动与气蚀性能研究.

non appears easily at the leading and trailing of the blade root, which shows that the inlet and outlet of the blade are very sensitive to the pressure, load, static and dynamic interference of the fluid flow. Therefore, enough attention should be paid to these areas in impeller's hydraulic and structural design. The results provide a useful reference for the performance analysis of the nuclear reactor coolant pump as well as the structural design, maintenance and overhaul of the impeller.

Key words: nuclear reactor coolant pump; bidirectional fluid structure interaction; dynamic stress; deformation; numerical simulation

核反应堆冷却剂主循环泵(简称核主泵)是核电站一回路系统中确保核电站安全和可靠运行的核心动力设备,常被喻为核电站的心脏,核主泵长期稳定安全运行对冷却堆芯、防止堆芯融化等核电站事故的发生尤为重要[1-2]. 当发生失水事故或其他压力边界变化时,会诱发核主泵流体与结构间的耦合振动,对叶轮等关键过流部件产生损伤或疲劳破坏,严重时甚至会导致一回路系统的损坏,对核电站可靠性产生隐患[3-4].

针对旋转机械关键部件的应力与流固耦合分析,国内外学者做了大量研究. BENRA 等[5]采用单、双向流固耦合方法对单叶片泵进行了计算并对比了2种方法与试验结果的偏差. KATO 等[6]提出了1种单向流固耦合方法并运用于多级离心泵中,试验结果证明了该方法对噪声预测的可行性. 施卫东等[7]、孔繁余等[8]采用单向流固耦合技术对离心泵叶轮、泵体等关键过流部件的结构强度进行了分析与校核. 裴吉等[9]采用双向流固耦合技术对离心泵内流场进行了预测,并分析了耦合作用对离心泵叶轮内流场的影响. 黄浩钦等[10]分析了不同瞬态相位下单双向耦合方式对船用离心泵叶轮应力应变的影响及转子模态特性. 李伟等[11]、陈向阳等[12]运用 ANSYS 软件对混流泵和轴流式核主泵叶轮进行了耦合计算,分析了流固耦合作用下叶片的应力和变形等特性. 但上述流固耦合研究大多集中在流固耦合作用对离心泵或混流泵的外特性、噪声、内流场影响等,对叶轮的结构分析也多是总体应力或变形的分布情况,而对叶轮的进出口边、叶片根部等易出现裂纹和应力集中的敏感部位缺少进一步深入研究.

文中基于双向流固耦合方法,对 AP1000 核主泵叶轮内部流场和叶轮结构场进行计算求解,揭示核主泵在不同流量工况下叶轮总体、叶片根部和叶片进出口边的应力与变形情况,文中的研究结果为核主泵模型优化设计、设备的检修及稳定运行提供参考.

1 计算模型与相关设置

1.1 计算模型

计算模型为 AP1000 核反应堆冷却剂泵,其主要性能参数为流量 $Q=17\ 886\ m^3/h$,扬程 $H=111.3\ m$,转速 $n=1\ 480\ r/min$,比转数 $n_s=351$,设计压力为 17.1 MPa[13]. 核主泵主要过流部件结构装配关系如图1所示,采用混流式叶轮及扭曲空间导叶,导叶叶片数为11,考虑到核主泵安全性能的严格要求,将泵体设计成类球形泵体,以更好地平衡核主泵在各工况下的径向力[14-15]. 叶轮结构中,进口直径 $D_1=600\ mm$,出口平均直径 $D_2=736\ mm$,叶片数 $z=5$,出口宽度 $b_2=220\ mm$,出口边倾角 $\theta=23°$,叶片平均厚度 $\delta=13\ mm$,前盖板平均厚度 $\delta_1=26\ mm$. 材料选用铁素体-奥氏体双相不锈钢,材料密度 $7\ 930\ kg/m^3$,弹性模量 210 GPa,泊松比 0.27,屈服强度 σ_s 为 550 MPa.

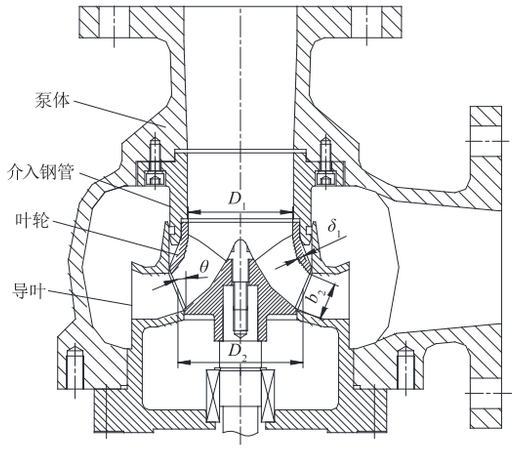


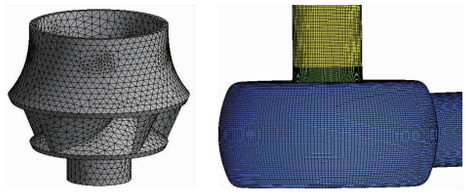
图1 核主泵过流部件结构装配图

Fig. 1 Structural assembly drawing of flow passage of nuclear reactor coolant pump

1.2 网格划分

对于固体域,运用 ANSYS Workbench 中的 Mesh 模块对叶轮结构部分进行四面体网格划分,如图2a所示. 网格节点总数约为11.6万,网格单元总数约

为 7.8 万. 对于流体域，利用 ICEM 网格划分软件对水体进行网格划分，如图 2b 所示，兼顾计算资源且为了保证计算模型更好的收敛性，流体域水体均采用六面体网格，并对叶片表面边界层和交界面区域进行局部加密处理. 经网格无关性检查后发现，当模型的网格数高于 300 万时，扬程变化小于 1%. 综合考虑计算资源与计算精确度，最终选取流体域网格划分单元总数约为 320.0 万，其中进水段、叶轮水体、导叶水体、泵体水体网格单元数分别为 13.5 万，65.0 万，42.5 万，199.0 万.



(a) 固体域网格　　(b) 流体域网格

图 2　流体域与固体域网格模型

Fig. 2　Mesh model of fluid and solid domains

1.3　计算方法和边界条件

采用双向流固耦合方法对核主泵内流场和叶轮结构场进行迭代求解. 流场计算采用雷诺时均 N－S 方程和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型，结构响应采用弹性体结构动力学方程，运用任意拉格朗日法跟踪固体边界和流体边界的运动状况，实现核主泵以顺序相互迭代的方式对双向流固耦合进行求解. 对于双向流固耦合方法已有很多文献做过介绍[16－17]，文中不再详细阐述.

双向流固耦合计算涉及流体域的非定常计算和固体域的瞬态动力学分析，其中流场非定常计算在 CFX 中进行，结构场的瞬态动力学分析在 ANSYS Workbench 中的 Transient structure 模块进行. 为保证流固耦合计算的顺利进行，在流固耦合求解之前，对流场和结构响应分别求解，发现流场和结构场均能较好收敛，边界条件合理.

在流场计算时，空间和时间分别采用二阶迎风格式和二阶欧拉后差格式，计算域结合核主泵一回路系统的运行条件，设置进口为全压进口，出口为给定的质量流量，参考压力为 101.325 kPa，壁面粗糙度设为 10 μm，近壁面处选用标准壁面函数，壁面边界条件设为绝热无滑移壁面，对于耦合过程中叶轮流体域网格变形，设置动网格处理，流场中每个计算时间点的残差收敛目标为 10^{-4}.

固体域计算中，材料参数设为双相不锈钢，瞬态分析的阻尼模型采用比例阻尼，叶轮叶片与前后盖板内侧设置为流固耦合面，加载重力加速度和由叶轮转动产生的向心加速度，在轮毂圆环下底面设置固定约束，设置圆环侧面为圆柱面约束，径向和轴向固定，切向自由，如图 3 所示.

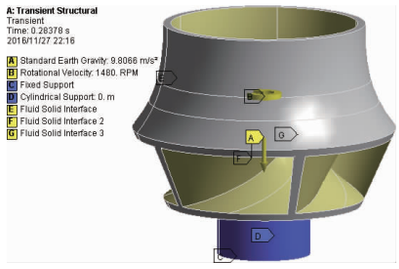


图 3　叶轮约束及载荷

Fig. 3　Impeller constraint and load

综合考虑计算精度和计算量，兼顾叶轮流体域与固体域网格数的差异，取时间步长为 0.000 675 7 s（即叶轮旋转 6°），总时间 0.243 24 s，即旋转 6 个周期，并且流体非定常计算与固体瞬态动力学分析中的时间步长和总时间保持一致.

2　计算结果分析

2.1　试验结果对比

因核主泵实型泵体积大，实现起来较为困难，因此利用相似换算缩小后的核主泵样机在开式试验台上进行试验测试，试验样机尺寸系数 $\lambda = 1/2.71$，流量 $Q_M = 900\ m^3/h$，扬程 $H_M = 15.17\ m$，转速 $n_M = 1\ 480\ r/min$，比转数 $n_{sM} = 351$.

分别对 $0.6Q \sim 1.4Q$ 中 5 个流量工况点双向流固耦合、流体域非定常模拟数据最后一圈的计算扬程进行时均化处理，并与试验结果对比，如图 4 所示. 由图可知，数值模拟的扬程与试验结果存在一定偏差，但总体趋势基本一致，并且耦合后扬程均有所降低，降低的幅度为 1 m 左右. 除 $1.4Q$ 流量点外，其余各流量点耦合后的扬程与试验偏差均有所减小，表明双向流固耦合后的结果更接近试验值. 在设计流量工况点与试验的偏差值为 1.74%，验证了耦合结果的可靠性. 由于耦合计算过程同时考虑了流体域与固体域的相互影响，流体的压力载荷作用致使叶轮结构发生变形扭曲，而叶轮结构场的变化又反过来影响泵内部流场的分布，耦合后更接近核主泵内部真实的流动情况，导致了耦合前后计算结果的差异性，说明文中流场计算模型能够较准确地预测其性能，即流场计算可准确地得到叶轮表面的压力载荷，为叶轮的结构场分析提供了保证.

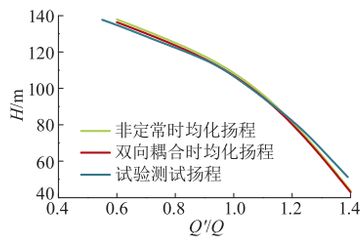


图4 试验与数值模拟扬程
Fig. 4 Heads of experiment and simulation



图5 样机试验管路
Fig. 5 Prototype test line

2.2 双向耦合作用下叶轮应力变形分析

2.2.1 叶轮应力总体分布

图6为0.8Q,1.0Q和1.2Q工况下,在t=0.243 24 s时刻,双向流固耦合作用下叶轮正面与背面的等效应力(Von Mises Stress)分布,鉴于文章篇幅与核主泵的实际运行范围为0.9Q~1.1Q,为使研究结果具有更高的可辨性和可信度,故对核主泵实型泵计算模型在0.8Q,1.0Q和1.2Q这3个流量工况点进行重点分析.

由图6可以看出,3个流量工况下叶轮的等效应力分布规律相似,均呈中心对称分布;对于叶轮前盖板和叶片,总体上等效应力由进口到出口逐渐增大,并且随着流量的增加,叶轮前盖板处应力分布均匀性有所减弱,后盖板及轮毂处因结构厚度较大等效应力较小,变化趋势不明显. 叶轮的最大等效应力均发生在叶片出口边与前盖板交界处,这使得叶片与前盖板交界处强度降低,在交变载荷的作用下容易产生疲劳破坏,而最小等效应力分布在叶轮轮毂处. 另外,叶片进口边在非设计工况下由于冲击较大易出现局部应力集中及应力分布不均的现象. 随着流量的降低,叶轮最大和最小等效应力逐渐增大,原因是随着流量的减小,叶轮流体域静压逐渐增加,在0.8Q下的最大等效应力为183 MPa,叶轮转子材料为铁素体-奥氏体双相不锈钢,材料屈服强度σ_s为550 MPa,按第4强度理论计算可知叶轮转子在3个工况点下的强度均符合要求.

以上结果表明,核主泵叶轮在0.8Q,1.0Q和1.2Q工况下的应力集中主要发生在前盖板与叶片出口交界处,主要由于该区域结构的不连续性及其尖锐的结构特征导致的,且该处由于相交关系约束大,无法通过弹性变形释放应力,从而容易导致叶片近支点部位形成应力集中. 因此,在进行叶轮结构优化设计时,要充分考虑流体与固体相互耦合的作用,可通过圆弧过渡、对叶片进行加厚等方式优化叶片应力分布.

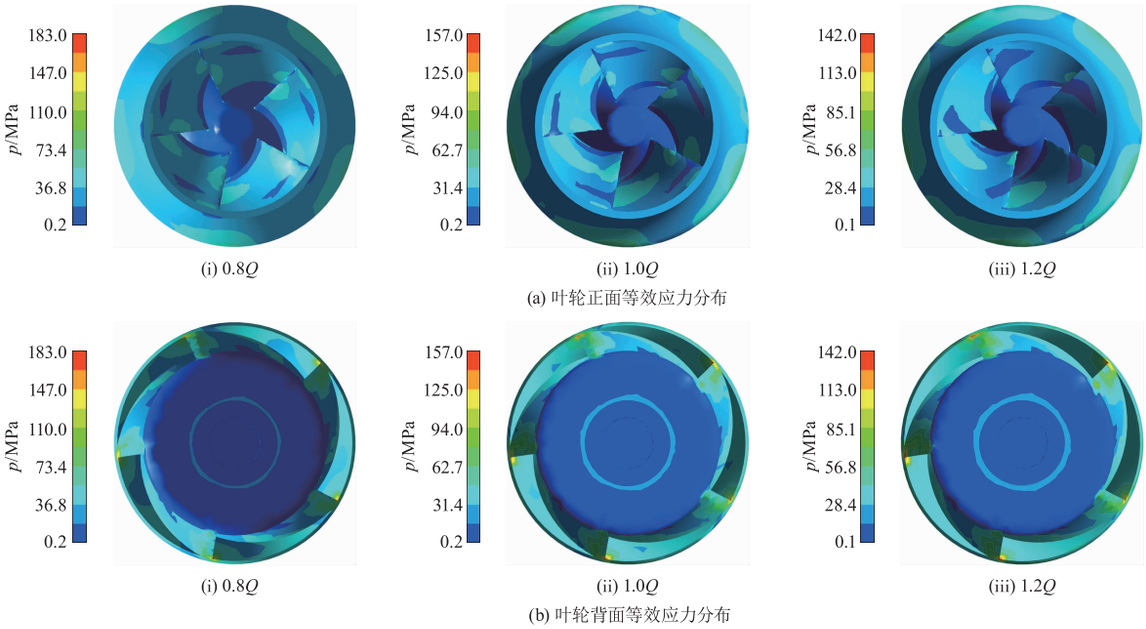
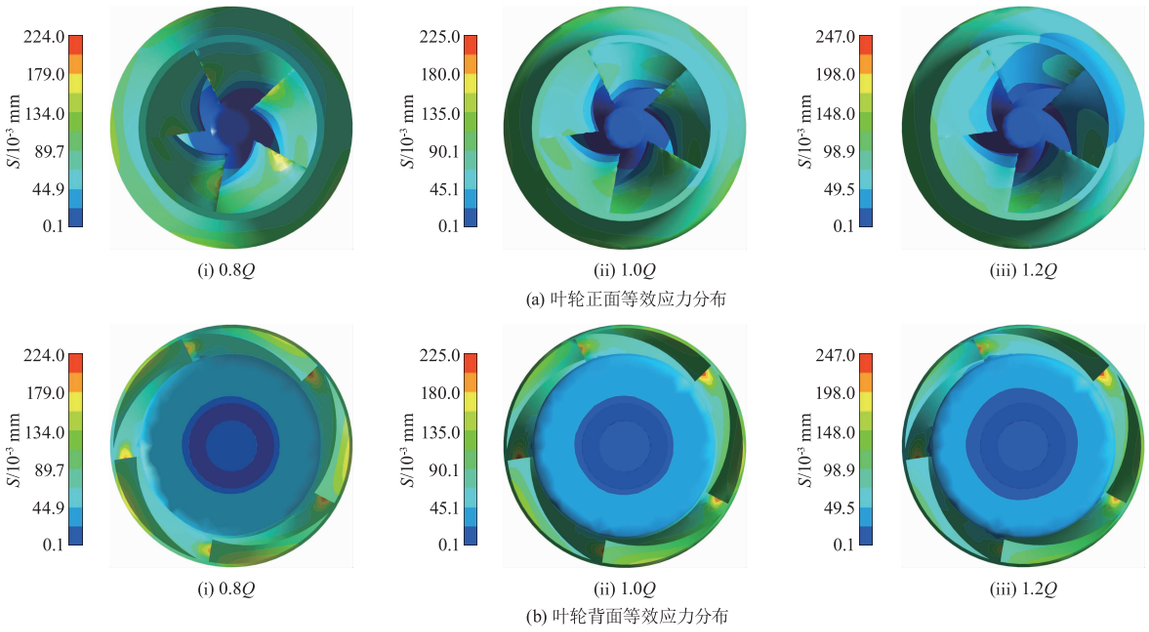


图6 叶轮等效应力分布
Fig. 6 Equivalent stress distribution of impeller

2.2.2　双向耦合作用下叶轮变形总体分布

图 7 为 0.8Q，1.0Q 和 1.2Q 工况下，在 t = 0.243 24 s 时刻，双向流固耦合作用下叶轮正面与背面的位移变形 S 分布. 由图可看出，3 个流量工况下叶轮的变形分布有较大差异，从小流量到大流量变形分布的均匀性依次减弱，在 1.2Q 工况下非均匀性最为强烈，叶轮右上角部分呈现了较大面积的低变形区域，这种现象与叶片内压力的分布有关. 叶轮前盖板与叶片的变形要远大于后盖板和叶轮轮毂区域，可以看出，叶轮的最大变形量随着流量的增加而逐渐增大. 在 0.8Q，1.0Q 和 1.2Q 这 3 个工况下，双向流固耦合叶轮最大变形量分别为 0.224，0.225 和 0.247 mm，叶轮的最大变形发生在叶轮叶片出水边的中部，轮毂处变形最小，由于叶轮出口处压力载荷最大，加上离心力的作用，叶轮外圈会出现较大变形，而叶片中间位置缺少结构约束导致该处出现最大变形；同时，在偏小流量和设计流量工况下，叶片进口边中部也出现了局部较大的变形量，这是由于在水力设计时为了避免叶轮气蚀，对叶片进水边减薄处理而导致进水边对水压变化较为敏感的结果.



(i) 0.8Q　(ii) 1.0Q　(iii) 1.2Q

(a) 叶轮正面等效应力分布

(i) 0.8Q　(ii) 1.0Q　(iii) 1.2Q

(b) 叶轮背面等效应力分布

图 7　叶轮变形位移分布

Fig. 7　Impeller deformation displacement distribution

2.3　叶片进出口边及根部应力变形分析

2.3.1　叶根交线及监测点设置

从以上叶轮应力和变形的总体分布分析发现，叶轮的进出口边及叶片根部易出现较大的应力集中和大变形情况，可能会对叶轮转子的安全性造成威胁. 下面对这些典型位置进行进一步的深入分析，对叶片与叶轮前后盖板的 4 条交线和叶片进出口边进行数据监测和提取. 如图 8 所示，定义前盖板与叶片压力面的交线为 Sp，与叶片吸力面的交线为 Ss；后盖板与叶片压力面的交线为 Hp，与吸力面交线为 Hs；定义 α 为叶片进出口边上从前盖板到后盖板的相对位置，前盖板上取 α = 0，后盖板上取 α = 1；定义 β 为在叶根上沿着流线方向从叶片进口到出口的相对位置，叶片进口取 β = 0，叶片出口取 β = 1；叶片进口边设置 A，$A2$，$A4$ 监测点，叶片出口边设置监测点 G，$G2$，$G4$，在 Sp 上设置了 A – F 共 6 个监测点.

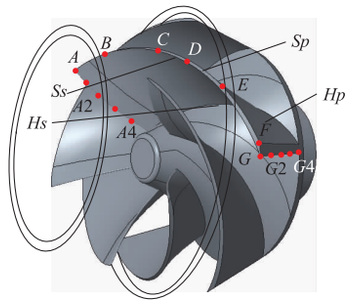


图 8　叶根交线和监测点位置

Fig. 8　Definition of intersection lines and monitoring points of blade root

2.3.2　叶片进出口边动应力

图 9 为 1.0Q 工况下叶片进出口边 6 个监测点最后 1 圈的动应力变化与各监测点时均化动应力 δ_d

分布. 由图可知,总体上出口边的动应力要大于进口边,这是由于出口压力大所致,且在出口边上应力从前盖板向后盖板呈递减趋势. 图9a中 t 为叶轮转1圈所用时间,受叶轮与导叶的动静干涉影响,进出口边上6个监测点动应力的时域特性为波浪形周期性变化,呈现出11个小周期,进口边上点 A 和 $A2$ 动应力波动平稳均匀;而在出口边上的各监测点(G,$G2$,$G4$)的每个小周期内还出现了明显的大波峰夹小波峰现象,具体表现为22个波峰和22个波谷,是导叶数的2倍,并且3点中点 $G2$ 表现最为强烈,小波峰几乎趋近大波峰,原因可能是由于叶轮出口边靠近导叶叶片前缘,叶轮尾部会产生射流尾迹,其在叶轮上脱落、进入导叶被剪切、演化和发展均会导致压力震荡和动静干涉作用[18],从而对叶轮出口边的动应力时域特征产生影响,说明动静干涉作用及流体压力的震荡对动应力的影响明显. 而动应力的最大峰峰值点出现在叶片进口边与后盖板的交界处($A4$),此处动应力时均幅值虽不是最大,但峰峰值为其余各点的2~5倍,叶片的高振幅动应力点是引起裂纹并导致结构疲劳破坏的主要原因之一,在结构设计中此处应重点留意.

其余流量工况下叶片进出口边监测点的动应力和动态变形与1.0Q工况点规律相似,限于篇幅,在此不作详细分析.

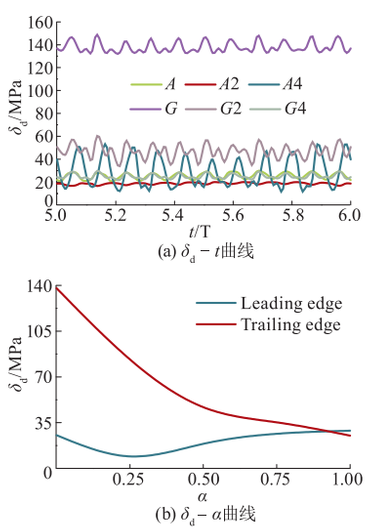


图9 叶片进出口边各监测点动应力与时均化应力分布

Fig. 9 Dynamic stress and time-averaged stress distribution of monitoring points at inlet and outlet of blade

2.3.3 叶片根部应力与变形分布

叶轮叶片所受应力主要包括旋转时由离心作用产生的拉应力、转子偏心作用或内部流场压力载荷产生的弯曲应力以及液流压力载荷分布不均而产生的扭应力等. 图10为 t=0.243 24 s时,额定流量下某叶片各叶根交线的应力与变形规律. 由图可知,对于应力分布,叶片与前盖板交线(Sp,Ss)的应力总体上要大于叶片与后盖板交线(Hp,Hs)应力值,Ss 与 Sp 应力水平虽总体上最高,但二者相差无几,最小应力水平出现在 Hs 线上;其中,叶根进出口边上出现明显的大应力,是其他位置上的2~3倍,因此叶片的进出口边极易发生强度破坏或疲劳断裂,无论是设计或是运行检修时都应作为重点考察对象. 在 β=0.1 交线前段,最大应力出现在 Sp 线上,对于 β=0.1~1.0 交线段,最大应力值在前盖板与吸力面的 Ss 线上. 对于叶片的变形,如图10b所示,叶根的变形量沿着流线的方向,从叶片的进口到出口呈先增后减的变化趋势,拐点出现在靠近叶片出口边的 β=0.8 处,原因推测是叶根出口处靠近导叶进口,流体在此处的压力载荷受动静干涉作用强烈,易出现压力波动,故靠近叶片出口处的叶片变形易受影响.

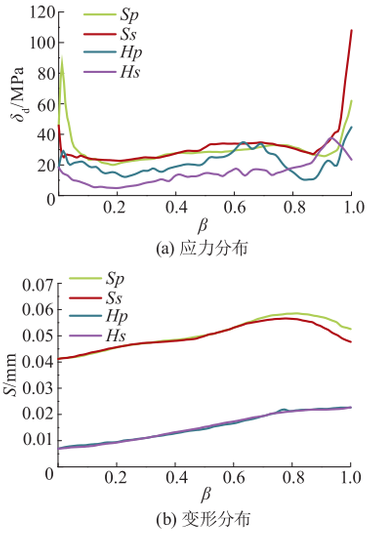


图10 1.0Q 叶根各交线应力与变形(t=0.243 24 s)

Fig. 10 Deformation and stress of each intersection of blade root at 1.0Q

图11为核主泵叶轮某一叶片上各叶根交线上的等效应力随流量及叶根位置的变化规律. 由图可知,随着流量的增加,各叶根交线的应力逐渐减小,说明流体的压力载荷在对叶根的应力影响中占主导作用. 对于交线 Sp 和 Ss,两者应力趋势具有一定的相似性,在叶根中部区域应力对流量的变化不明显,而在 β=0.2 与 β=0.8 附近各有1个拐点,在 β=0~0.2 与 β=0.6~1.0,随着流量的减小,叶根等效应力逐渐增加,说明叶片进口和出口边附近应

力对液流流量的变化极为敏感，推测这与叶片进出口附近液体的流动状态有关，当液体流入叶轮流道和流出叶轮时，液体流动方向发生改变，此时易形成旋涡及流动不稳定；对于交线 *Hs*，除靠近叶片进口边和出口边处出现突变大应力外，其等效应力总体上随液流方向呈逐渐上升趋势，而 *Hp* 线等效应力从叶片进口到叶片出口波动幅度较大，无明显的规律性.

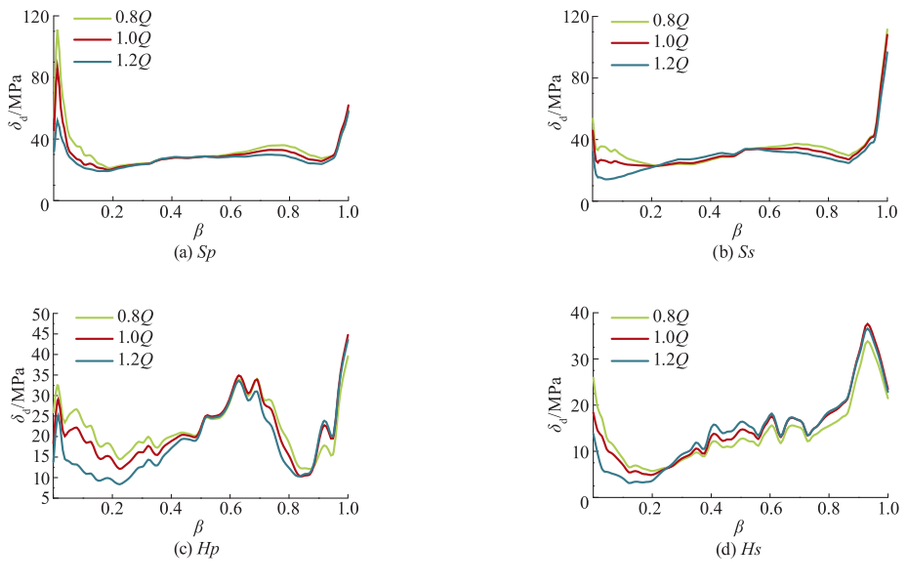


图 11　各流量下叶根交线的应力分布

Fig. 11　Stress distribution at intersection of blade roots at each flow rates

对交线 *Sp* 上 *A* – *F* 这 6 个监测点动应力的时域图进行快速傅里叶变换（FFT），得到各点的频域图，如图 12 所示.

由图 12 可以发现，各点主频主要为 271 Hz，其值刚好是叶轮转频的 11 倍，并且与导叶的叶片数相等，这说明叶根交线上各点受叶轮与导叶的动静干涉效应比较明显，而点 *A* 和点 *F* 除了频率 271 Hz 外，还出现较高的 24 Hz 及 542 Hz 这 2 个频率，分别对 *A* – *F* 各点这 3 个主频进行提取，得到了 *Sp* 交线上从叶片进口到叶片出口的各主频的分布，如图 13 所示. 由图可知，除点 *A* 外，从叶片进口到出口，导叶叶频（271 Hz）及 2 倍导叶叶频（542 Hz）振幅逐渐增大，说明从叶片进口到出口节点动应力受叶轮与导叶的动静干涉越来越严重.

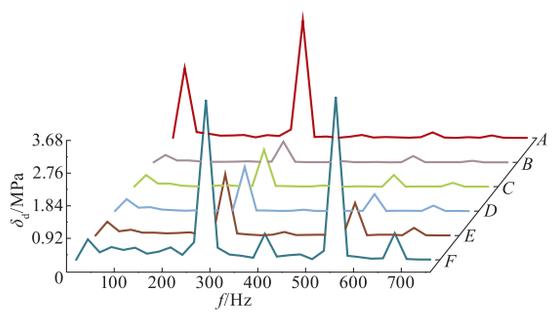


图 12　*Sp* 交线上各点频域图

Fig. 12　Frequency map of each point on *Sp* intersection line

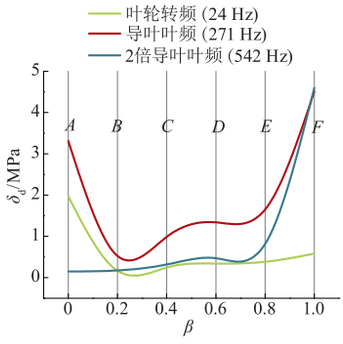


图 13　*Sp* 交线上频率成分分布

Fig. 13　Frequency distribution on *Sp* intersection line

3　结　论

基于双向流固耦合方法对 AP1000 核主泵内部流场和叶轮结构场进行求解计算，分析了不同流量工况下核主泵叶轮总体应力变形情况和叶片进出口边及根部的动应力特性，得到以下结论：

1）相对于纯液相非定常模拟，双向流固耦合后 5 个流量工况点的扬程均值都有所减小，除 1.4*Q* 流量点外，其余各流量点耦合后的扬程与试验偏差均有所减小，表明双向流固耦合后的结果更接近试验值，验证了耦合结果的可靠性.

2）不同流量工况下叶轮等效应力分布规律具有一定相似性，随着流量的增加，叶轮前盖板处应力分布均匀性有所减弱，叶轮的最大等效应力均发生在叶片出口边与前盖板交界处，这使得叶片与前盖板交界处强度降低，在交变载荷的作用下容易产生疲劳破坏；叶轮的最大的变形发生在叶片出口中部附近，轮毂处变形最小，叶轮的最大变形量随着流量的增加而逐渐增大.

3）对于叶片进出口边，动应力的最大峰峰值点出现在叶片进口边与后盖板的交界处（*A*4），峰峰值为其余各点的2～5倍，叶片的高振幅动应力点是引起裂纹导致结构破坏的主要原因之一，在结构设计中此处应重点留意.

4）流体的压力载荷在对叶根的应力影响中占主导作用，随着流量的增加，各叶根交线的应力逐渐减小，对于叶片后盖板与压力面或吸力面的交线，等效应力从叶片进口到叶片出口波动较大，无明显的规律性，说明靠近后盖板的应力受流体的影响更为复杂.

5）叶根交线 *Sp* 与 *Ss* 应力分布大小相当，而叶根的进出口边处易出现应力剧增现象，并且叶片进口到出口节点动应力受叶轮与导叶的动静干涉越来越严重，说明叶片进出口边对液流的压力载荷及动静干涉作用极为敏感，在叶轮结构设计时应予以足够重视.

通过对混流式核主泵叶轮模型的双向流固耦合数值模拟，揭示了叶轮总体及叶片进出口边和叶根部位的应力变形分布规律，为反应堆主冷却剂循环泵以后的性能分析、叶轮的结构设计、维护和检修提供了有益的参考.

参考文献(References)

[1] 蔡龙，张丽平. 浅谈压水堆核电站主泵[J]. 水泵技术，2007(4)：1－9.
CAI Long，ZHANG Liping. Discusion on main pump of pressurized water reactor nuclear power station[J]. Pump technology，2007(4)：1－9.(in Chinese)

[2] 王勤湖，李社坤，卢文跃，等. 压水堆核电站一回路工况变化对主泵主要机械性能的影响[J]. 核动力工程，2005，26(6)：103－108.
WANG Qinhu，LI Shekun，LU Wenyue，et al. The influence with the change of the main mechanical properties of the main pump on primary circuit of pressurized water reactor nuclear power station[J]. Nuclear power engineering，2005，26(6)：103－108.(in Chinese)

[3] JOSE G，CARLOS S. Unsteady flow structure and global variables in a centrifugal pump[J]. Journal of fluids engineering，2006，128(9)：937－946.

[4] 王秀礼，卢永刚，袁寿其，等. 基于流固耦合的核主泵汽蚀动力特性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报，2015，36(2)：213－217.
WANG Xiuli，LU Yonggang，YUAN Shouqi，et al. Dynamic characteristics analysis of the reactor coolant pump variation based on fluid－structure coupling[J]. Journal of Harbin Engineering University，2015，36(2)：213－217.(in Chinese)

[5] BENRA F K，DOHMEN H J. Comparison of pump impeller orbit curves obtained by measurement and FSI simulation[C]//Proceedings of ASME 2007 Pressure Vessels and Piping Conference，2007：41－48.

[6] KATO C，YAMADE Y，WANG Hong，et al. Prediction of the noise from a multi-stage centrifugal pump[C]// Proceedings of ASME 2005 Fluids Engineering Division Summer Meeting，2005：1273－1280.

[7] 施卫东，徐燕，张启华，等. 基于流固耦合的多级潜水泵叶轮结构强度分析[J]. 农业机械学报，2013，44(5)：70－73.
SHI Weidong，XU Yan，ZHANG Qihua，et al. Structural strength analysis of multistage submersible pump impeller based on fluid－structure interaction[J]. Transactions of the CSAM，2013，44(5)：70－73.(in Chinese)

[8] 孔繁余，陈浩，王婷，等. 基于流固耦合的减压塔底泵泵体强度分析[J]. 机械工程学报，2013，49(2)：159－164.
KONG Fanyu，CHEN Hao，WANG Ting，et al. Strength analysis of decompression tower bottom pump′s pump casing based on fluid－solid coupling[J]. Journal of mechanical engineering，2013，49(2)：159－164.(in Chinese)

[9] 裴吉，袁寿其，袁建平. 流固耦合作用对离心泵内部流场影响的数值计算[J]. 农业机械学报，2009，40(12)：108－112.
PEI Ji，YUAN Shouqi，YUAN Jianping. Numerical calculation for effect of fluid－structure interaction on flow field in centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAM，2009，40(12)：108－112.(in Chinese)

[10] 黄浩钦，刘厚林，王勇，等. 基于流固耦合的船用离心泵转子应力应变及模态研究[J]. 农业工程学报，2014，30(15)：98－105.
HUANG Haoqin，LIU Houlin，WANG Yong，et al. Stress－strain and modal analysis on rotor of marine centrifugal pump based on fluid－structure interaction[J].

Transactions of the CSAE, 2014, 30(15): 98 – 105. (in Chinese)

[11] 李伟, 杨勇飞, 施卫东,等. 基于双向流固耦合的混流泵叶轮力学特性研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12):82 – 88.
LI Wei, YANG Yongfei, SHI Weidong, et al. Mechanical properties of mixed-flow pump impeller based on bi-directional fluid – structure interaction[J]. Transactions of the CSAM, 2015,46(12):82 – 88. (in Chinese)

[12] 陈向阳,袁丹青,杨敏官,等. 基于流固耦合方法的300MWe 级反应堆主泵叶片应力分析[J]. 机械工程学报,2010,46(4):111 – 115.
CHEN Xiangyang, YUAN Danqing, YANG Minguan, et al. Blade stress of the reactor coolant pump of 300 MWe nuclear power plant in China based on fluid – solid coupling method[J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(4): 111 – 115. (in Chinese)

[13] 付强, 邢树兵, 朱荣生,等. 核主泵叶轮叶片进口边位置对气液两相流动特性的影响[J]. 核动力工程, 2016,37(3):87 – 93.
FU Qiang, XING Shubing, ZHU Rongsheng, et al. Effect of blade inlet position on flow characteristics of nuclear reactor coolant pump under gas – liquid two-phase condition[J]. Nuclear power engineering, 2016, 37(3):87 – 93. (in Chinese)

[14] 张栋俊,徐士鸣. 类球形压水室出流管形状对核主泵性能的影响[J]. 水泵技术,2010(1):21 – 25.
ZHANG Dongjun, XU Shiming. Effect of the shape of a flow tube on the performance of a nuclear main pump [J]. Pump technology,2010(1):21 – 25. (in Chinese)

[15] 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,2012,33(2):97 – 102.
ZHU Rongsheng, LI Xiaolong, YUAN Shouqi, et al. Influence of outlet contraction angle on hydraulic performance of main pump chamber[J]. Nuclear power engineering,2012,33(2):97 – 102. (in Chinese)

[16] 肖若富, 朱文若, 杨魏,等. 基于双向流固耦合水轮机转轮应力特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(10):862 – 866.
XIAO Ruofu, ZHU Wenruo, YANG Wei, et al. Stress analysis of Francis hydraulic turbine runner based on FSI [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2013,31(10):862 – 866. (in Chinese)

[17] 施卫东, 王国涛, 张德胜,等. 基于流固耦合的轴流泵叶片应力特性[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(9):737 – 740.
SHI Weidong, WANG Guotao, ZHANG Desheng, et al. Stress characteristics in blades of axial-flow pump based on fluid – structure interaction[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2013, 31(9):737 – 740. (in Chinese)

[18] 朱跃, 张继革, 尹俊连,等. 屏蔽式核主泵动静转子间的压力脉动特性[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(9):1576 – 1582.
ZHU Yue, ZHANG Jige, YIN Junlian, et al. Characteristics of pressure fluctuation between rotor and stator of canned nuclear coolant pump[J]. Atomic energy science and technology, 2014, 48(9):1576 – 1582. (in Chinese)

(责任编辑　盛杰)