

非均匀入流对 CAP1400 核主泵内流 及性能的影响研究

张恒¹, 刘雷^{1,2}, 刘立军¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 沈阳鼓风机集团股份有限公司, 110869, 沈阳)

摘要: 针对 CAP1400 反应堆冷却剂系统中, 由于蒸发器下腔室和核主泵直接相连导致核主泵入口产生非均匀入流, 从而影响核主泵内部流场的问题, 通过基于剪切应力运输模型的全三维 CFD 模拟方法, 对蒸发器下腔室和核主泵联合模型进行数值模拟, 分析了蒸发器下腔室致非均匀流动的形成机理, 研究了非均匀入流对核主泵内部流动和水力性能的影响。结果表明: 下腔室非对称结构和突缩截面的流动分离是非均匀流动的主要成因。在额定工况下, 非均匀入流导致左侧和右侧核主泵扬程分别下降 6.0%、5.1%, 效率分别下降 7.2%、6.6%; 在 0.5~1.2 倍额定流量工况范围内, 性能下降幅度与流量呈正相关。非均匀入流呈现轴向速度分布不均匀并伴随二次流动的稳定结构, 并且左右两侧叶轮内非均匀入流的旋流畸变特性和轴向速度分布不同。叶轮入口旋流畸变引起入口冲角发生变化, 与均匀入流相比, 左右两侧叶轮叶高中部的冲角变化相反, 而叶顶部分冲角均增加、叶根部分冲角均减小; 叶轮入口轴向速度不均匀引起左右两侧叶轮各流道的流量波动分别增大 3 倍和 2 倍, 降低了核主泵的运行稳定性。

关键词: CAP1400; 核主泵; 非均匀入流; 水力性能; 旋流畸变

中图分类号: TL353 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202302005 **文章编号:** 0253-987X(2023)02-0039-10

Effect of Non-Uniform Inflow on the Internal Flow and Performance of the Reactor Coolant Pump in CAP1400 System

ZHANG Heng¹, LIU Lei^{1,2}, LIU Lijun¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shenyang Blower Group Co., Ltd., Shenyang 110869, China)

Abstract: In CAP1400 reactor coolant system, because the lower header of steam generator and the reactor coolant pump are directly connected, non-uniform inflow is generated at the pump inlet and impacts the internal flow of the pump. By full-scale three-dimensional CFD simulation based on shear stress transport model, numerical calculation of the lower header-pump combined model is conducted to analyze the formation mechanism of non-uniform inflow in the lower header of steam generator and investigate the effect of non-uniform inflow on the internal flow and hydraulic performance of the pump. The results show that non-uniform inflow is mainly caused by the asymmetric structure of the lower header and the flow separation at suddenly reduced section.

收稿日期: 2022-05-05。 作者简介: 张恒(1997—), 男, 硕士生; 刘立军(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0606104)。

网络出版时间: 2022-07-01 网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220630.1657.002.html>

Under the design flow rate conditions, the non-uniform inflow leads to a 6.0% and 5.1% decrease in head and a 7.2% and 6.6% decrease in efficiency for the left and right pumps, respectively. Under the condition of 0.5 to 1.2 times design flow rate, the performance decrease is positively correlated with flow rate. In addition, non-uniform inflow presents a stable structure with uneven axial velocity distribution and secondary flow, and the inflows of the left and right impellers have different swirl distortion characteristics and axial velocity distribution. The swirl distortion at the impeller inlet causes changes in the inlet impulse angle. Compared with uniform inflow, the impulse angle in the middle of the blade of the left and right impellers changes in the opposite direction, while the impulse angle at the blade top increases and the angle at the blade root decreases. The flow fluctuations in the flow channels of the left and right impellers increase by three times and twice respectively due to the uneven axial velocity at the impeller inlet, leading to degraded operational stability of the reactor coolant pump.

Keywords: CAP1400; reactor coolant pump; non-uniform inflow; hydraulic performance; swirl distortion

核反应堆冷却剂主循环泵(核主泵)作为核电站一回路中主要承压边界和唯一的高速旋转设备,被誉为堆芯中高温高压强放射性介质环境的“心脏”,因此核主泵的安全使役对堆芯安全性有着至关重要的作用。核主泵在反应堆冷却剂回路中位于蒸汽发生器和反应堆之间,主要为冷却剂循环流动提供动力^[1]。相比第二代核电系统,第三代核电技术采用“非能动”设计理念,通过简单、空间紧凑且方便维修的设备设计,使得整个系统达到减少维护的目的^[2]。第三代 CAP1400 核反应堆冷却剂系统如图 1 所示^[3]。第三代系统将蒸汽发生器与核主泵之间的连接管路进行了简化,取消了 U 型过渡管道,使得高温高压的冷却剂从蒸汽发生器下腔室流出后,未经整流而直接灌入左、右两侧并联的核主泵中,因此核主泵入口不再满足均匀入流条件的假设,叶轮入口和内部的流动状态发生改变,影响核主泵的运行可靠性和安全性^[4]。因此,实际工程中核主泵上游下腔室产生的非均匀入流不可忽视。

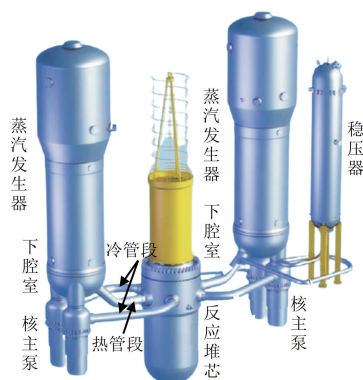


图 1 CAP1400 核反应堆冷却剂系统^[3]

Fig. 1 CAP1400 reactor coolant system

针对流体机械的非均匀入流研究主要以叶轮入口前的弯管流道、非对称抽气以及进口导叶等结构产生的非均匀入流为主^[5-6],研究发现弯管等入口结构产生的非均匀入流导致水泵的扬程和效率下降,轴向力和径向力发生变化,从而导致叶片上出现不稳定载荷,增加了振动和汽蚀的风险^[7-12]。对于有严格运行要求的核主泵非均匀入流研究较少,陶文铨团队^[13]利用实验的方法首次对 AP600 蒸发器下腔室流出的流动状态进行研究,表明核主泵入口产生轴向回流。侯向陶等^[14]、Wang 等^[15-16]发现了 AP1000 蒸发器下腔室产生的入流畸变破坏了流场的对称性,导致叶轮内的流场更加复杂,降低了核主泵的扬程和效率,并加剧了径向和轴向载荷的波动,增加了叶轮疲劳失效的风险。Xu 等^[17]、Long 等^[18-19]认为非均匀入流加剧了核主泵内的压力脉动,直接影响了核主泵的稳定安全运行。Li 等^[20]研究了入口 U 型管道引起的非均匀入流,利用 CFD 对比不同入流条件对核主泵性能的影响,并从涡流演化的角度发现了叶轮通道的不均匀性。杨国英等^[21]针对 CAP1400 系统中双扭管的流动稳定性和均匀性开展了数值模拟研究,发现双扭管内的速度均匀性较差。上述非均匀入流领域的相关研究中,研究对象仅仅局限于单独管道或者两台并联泵中的其中一台,并且主要针对第二代及第三代 AP1000 系统^[22],对于我国自主研发的第三代 CAP1400 核电系统中蒸发器下腔室引起的非均匀入流形成机理及非均匀入流条件下核主泵的响应机理研究很少。

本文运用 ANSYS CFX 软件,建立 CAP1400 蒸发器下腔室与核主泵联合模型,以直管道均匀入

流作为对比,分析蒸发器下腔室非均匀流动形成机理,研究叶轮入口轴向速度分布和二次流畸变特性,建立非均匀入流和核主泵叶轮内流之间的映射关系,并对比非均匀入流条件下左、右两台核主泵的差异,为核主泵适应非均匀入流的优化设计以及实现安全、稳定运行的目标提供参考依据。

1 物理模型

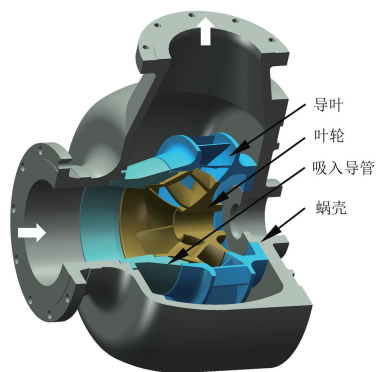
本文研究对象为 CAP1400 反应堆冷却剂系统中蒸发器下腔室和核主泵真机缩小 1/2.3 的缩尺模型,其中核主泵水力模型按照公开参数自主开发,表 1 为 CAP1400 核主泵水力模型主要参数。

表 1 CAP1400 核主泵水力模型主要参数

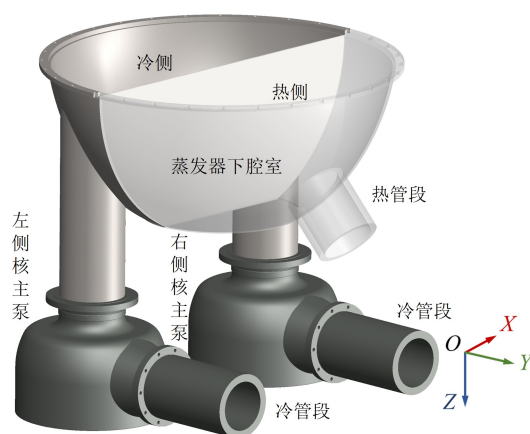
Table 1 Parameters of the CAP1400 RCP model pump

参数	数值
额定流量 $Q_d / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	1 779
额定扬程 H_d / m	21
额定转速 $n_s / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 485
比转速	388
叶轮叶片数	5
导叶叶片数	18
叶轮出口直径 D_2 / mm	380
蜗壳基圆直径 D_3 / mm	804

图 2(a)为核主泵 4 个主要水力部件,包括吸入导管、叶轮、导叶、蜗壳。图 2(b)为蒸发器下腔室和核主泵三维装配图。可以看出,虽然下腔室冷侧对称连接两台相同的核主泵,但是需要考虑下腔室产生的非均匀入流对两台核主泵影响可能不相同,所以需要对比下腔室冷侧 1/2 模型和左、右两侧核主泵分别进行联合计算。另外,为了对比分析,建立入口为直管道的均匀入流计算模型。



(a)核主泵结构



(b)蒸发器下腔室和核主泵连接示意

图 2 CAP1400 核主泵与蒸发器下腔室结构

Fig. 2 Structural diagram of the reactor coolant pump and lower header of steam generator in CAP1400 system

2 数值方法

本文采用 ANSYS CFX 软件对计算模型进行数值求解,该求解器基于有限体积法求解时均化三维 Navier-Stokes 方程,湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型,该模型对泵内逆压梯度流动(如分离流)预测效果较为准确^[23]。叶轮、蜗壳等流道内壁均采用无滑移边界条件,近壁区采用壁面函数法处理。稳态计算中采取冻结转子模型交界面从而实现叶轮和定子之间的耦合,瞬态计算采用瞬态转静子模型。

由于 CAP1400 蒸发器中均匀密集布置了 12 606 根 U 型传热管,相关研究发现各传热管的流量分配较均匀,流体沿着轴向流动^[24],因此可以将下腔室冷侧入口视为轴向均匀流动,流动状态设定为总压 0.2 MPa、温度 293 K。出口给定质量流量,分别计算 $0.5Q_d \sim 1.2Q_d$ 范围内 8 个流量工况。瞬态计算时间步长设置为 $336.7 \mu\text{s}$,即对应叶轮旋转 3° ,一共计算 20 个周期,选取各监测点计算数据呈现明显的周期性变化时的数据进行瞬态分析,工作介质为常温常压水。

叶轮和导叶流体域采用 NUMECA 软件整体生成分块的结构化网格,叶片周围与前后缘则采用 O 型网格提高叶片壁面附近网格质量,并将壁面第一层网格高度设定为 0.01 mm,以保证壁面 Y^+ 小于 1。其他流体域采用 ICEM 网格生成工具进行网格划分,其中,下腔室作为研究重点部位划分为结构化六面体网格,蜗壳流域采用适应性更强的非结构混合四面体网格。对下腔室和核主泵各部件网格进行质量检查,均满足求解器的计算要求,各部件网格和整体网格如图 3 所示。

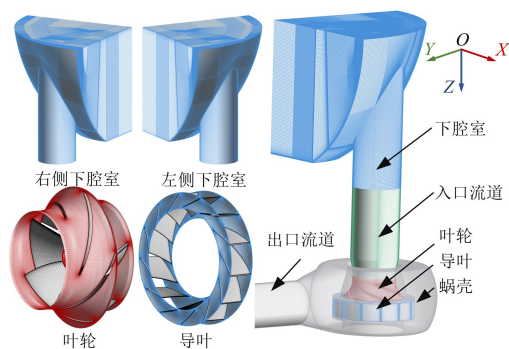
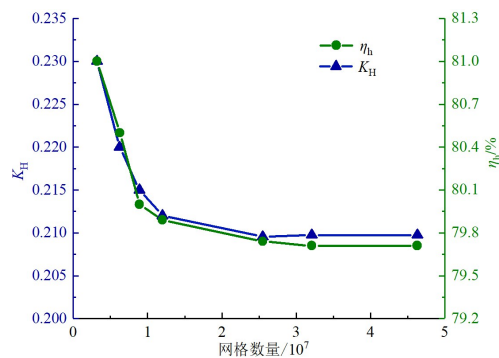


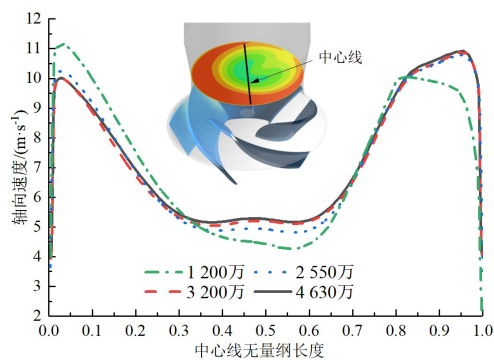
图3 核主泵和下腔室联合模型网格划分

Fig. 3 Grids diagram of the joint model of the reactor coolant pump and lower header of steam generator

本文以左侧下腔室与核主泵联合模型为例进行网格无关性检查,通过外特性和核主泵入口流场信息验证网格数量的独立性。外特性随网格数量的变化如图4(a)所示。图中: η_h 为水力效率; K_H 为无量纲化扬程系数。可以看出,当网格总数超过3 210万时,核主泵扬程和效率基本保持不变。选取叶轮入口截面中心线,比较不同网格数量时中心线上轴向速度分布,结果如图4(b)所示。可以看出,当网格数量为3 210万和4 630万时,轴向速度分布几乎一致。因此,综合考虑数值模拟的精度和时间,最终确定3 210万网格作为计算网格数量。



(a) 外特性随网格数量的变化



(b) 叶轮入口中心线轴向速度随网格数量的变化

图4 网格无关性验证

Fig. 4 Verification of grid independence

核主泵的水力效率 η_h 与无量纲化扬程系数 K_H 分别表示为

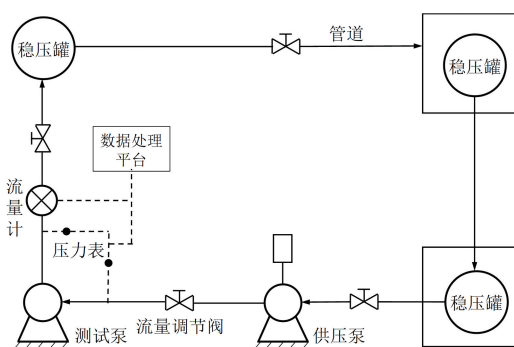
$$\eta_h = \rho g Q H / M \omega \quad (1)$$

$$K_H = g H / u_2^2 \quad (2)$$

$$H = z_2 - z_1 + (p_2 - p_1) / \rho g + (v_2^2 - v_1^2) / 2g \quad (3)$$

式中: z 为高度; p 为静压; v 为流速; ρ 为介质密度; g 为重力加速度; Q 为流量; u_2 为叶轮出口处圆周速度; M 为扭矩; ω 为叶轮转动角速度;下标1、2分别表示核主泵入口和出口。

为了验证数值模拟的准确性,将均匀入流条件下核主泵的外特性实验结果和数值计算值进行对比。实验在中国沈阳国家工业泵质量监督检验中心的闭式水泵实验台进行,如图5所示。实验平台包括供压泵、流量调节阀、空化抑制罐、稳压罐和测量仪器等部件。在实验过程中,严格遵守国家标准《GB/T 3216—2016 回转动力泵水力性能验收试验1级、2级和3级》的要求,在核主泵的入口和出口安装压力变送器测量扬程,测量不确定度小于 $\pm 0.2\%$,出口使用电磁流量计测量流量,测量不确定度小于 $\pm 0.5\%$ 。



(a) 实验回路示意



(b) 实验台现场

图5 核主泵水力性能测试实验台

Fig. 5 Hydraulic test bench for reactor coolant pump

均匀入流条件下外特性的数值计算结果和实验

如图6所示。可以发现,二者有很好的一致性。在额定工况点,数值计算和实验结果之间扬程和效率的相对误差分别小于0.8%、0.4%,在计算流量工况范围内,效率和扬程相对误差均小于4.0%,都在合理范围之内。因此,本文建立的数值模型可以较为准确地预测核主泵的水力性能,具有较好的可靠性。

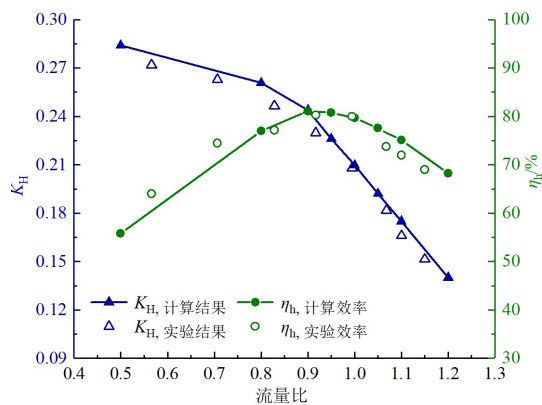


图6 外特性数值计算结果与实验结果的对比

Fig. 6 Hydraulic performance comparison between the experimental and numerical results

3 结果分析

3.1 蒸发器下腔室致非均匀流动形成机理

左侧和右侧下腔室与核主泵入口流道内的轴向速度(V_z)和流线分布如图7所示,分别进行 $X=0$ 和 $Y=0$ 两个切面内的流动分析。可以看出,由于下腔室和核主泵入口管道两者流道中心线不重合,流体进入下腔室后形成主流区域和偏流区域,其中主流区域位于核主泵入口流道上方,其他区域为偏流区域。偏流区域内流体受到下腔室弧形壁面的引导,在下腔室底部发生转向与主流汇合流进入入口流道中。

此外,在下腔室和核主泵入口管道相贯处突缩截面形成了分离流动,影响面积沿流动方向逐渐扩大。随着流动发展,由于分离流动的影响,在核主泵入口流道中心线偏流区域一侧的流速骤降,流道内产生较大的速度梯度,导致主流被压缩至流道中心线的另一侧。当流动发展到叶轮入口时,速度依然呈现非对称分布,截面内形成较大的速度梯度。

最后,由于下腔室几何结构完全对称,因此左侧和右侧下腔室与核主泵入口流道内流动结构对称,即非均匀流动形成机理相同。

综上所述,核主泵入口连接蒸发器下腔室时,由于下腔室相对核主泵入口的非对称结构以及下腔室与入口管道相贯处突缩截面产生流动分离,导致核

主泵入口流道中出现非均匀流动,进而对核主泵叶轮入口和内部流态产生影响。

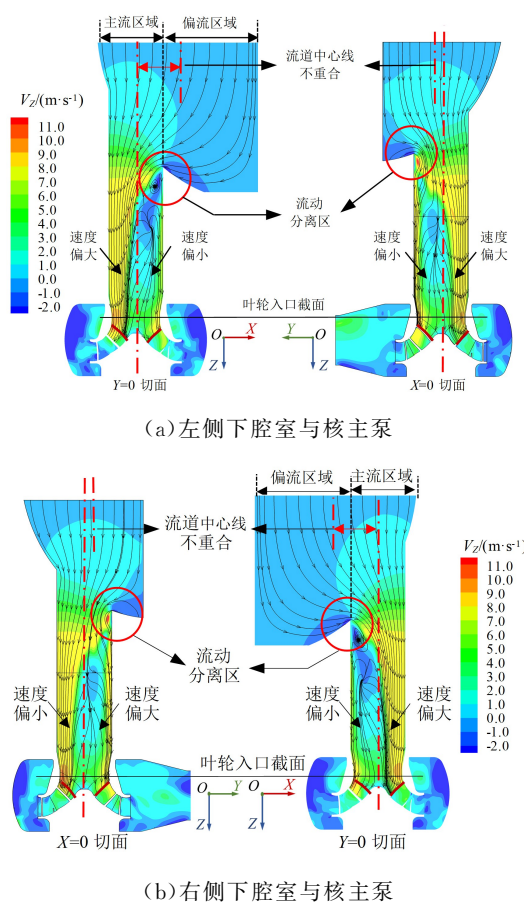


图7 下腔室与核主泵入口流道内的速度和流线分布

Fig. 7 Velocity and streamline distribution in lower header and inlet of reactor coolant pump

3.2 非均匀入流对核主泵性能影响

图8为不同入流条件下的核主泵性能曲线。可以看出,非均匀入流导致核主泵的扬程和效率显著降低。在额定工况下,左侧核主泵的扬程下降6.0%、效率下降7.2%,右侧核主泵的扬程下降5.1%、效率下降6.6%,超过了工程应用中允许5%的性能波动值。因此,蒸发器下腔室产生非均匀入流对核主泵造成了不可忽略的性能下降。

另外,随着流量逐渐增大,扬程和效率的下降幅度增加。这说明流量越大,非均匀入流对核主泵内部流场的影响越大。

最后,对比左、右两台核主泵的性能曲线可以得到,完全对称的下腔室结构产生的非均匀入流对左侧和右侧泵产生的影响并不相同,左侧泵性能下降明显大于右侧泵。这说明相同的下腔室结构在左、右两侧泵入口产生不相同的非均匀入流结构,对核主泵的内流场和水力性能产生不同程度的影响。

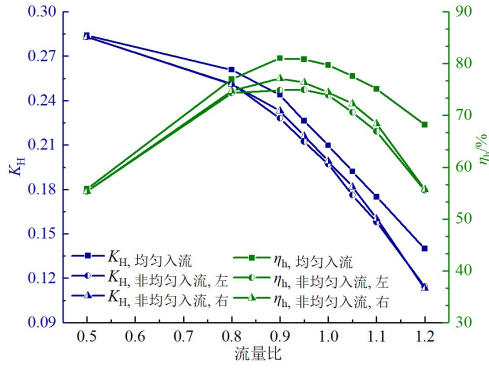


图 8 不同入流条件下的核主泵性能曲线

Fig. 8 Performance curves of reactor coolant pump under different inflow conditions

3.3 非均匀入流对叶轮入口流态影响

3.3.1 叶轮入口轴向速度分布

非均匀入流条件下叶轮旋转一个周期内 3 个时刻叶轮入口轴向速度瞬态分布云图如图 9 所示。

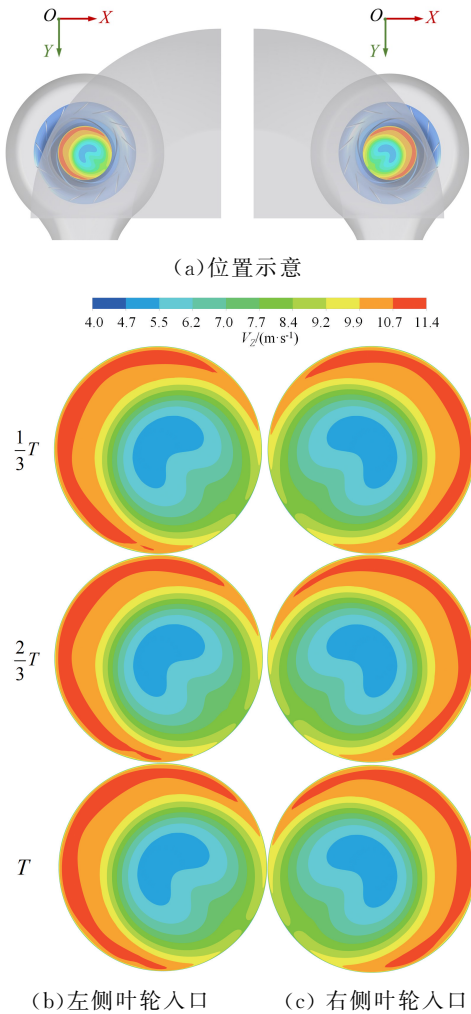


图 9 非均匀入流时叶轮入口处的轴向速度瞬态分布

Fig. 9 Transient distribution of axial velocity at impeller inlet under non-uniform inflow

图中,叶轮入口流动分析截面距离叶片前缘中间叶高 125 mm。可以看出,左、右两侧叶轮入口的轴向速度对称分布,均存在非常明显的轴向速度偏心畸变区。管道中心处轴向速度最小,沿着径向轴向速度增大,沿周向速度分布不均匀,主流区内轴向速度最大相差接近 7.4 m/s。管道内理论平均流速仅为 8.1 m/s,显著偏离了原始设计的叶轮入口均匀流动状态。

另外,对比每个时刻的轴向速度分布可以发现,在叶轮旋转一个周期内,每个时刻均呈现了相同的轴向速度分布结构,高速和低速区域均持续稳定存在,速度畸变大小和位置不随时间变化。这说明核主泵入口流道中产生比较稳定的非均匀流动结构,并且叶轮旋转对入口轴向速度的非均匀流动结构影响非常小。

3.3.2 叶轮入口旋流畸变特性

参考航空发动机中定量衡量进气畸变严重程度的旋流畸变指数:旋流强度 I 、旋流方向 D 和旋流对数 P ,详细描述非均匀入流在叶轮入口处的旋流畸变特征。其中: I 为测环上旋流角的绝对平均值,代表旋流畸变的强度; D 为测环上不同旋流叠加后的旋转方向; P 为测环上不同旋流叠加后所等价的涡对个数。在计算这些指数之前需要求解旋流角 α 、旋流周向范围 θ 和区域旋流角 S ,计算式^[25]为

$$\alpha = \arctan(V_\theta/V_z) \quad (4)$$

$$S_i^+ = \frac{1}{\theta_i^+} \int_{\theta_i^+} \alpha_i(\theta) d\theta \quad (5)$$

$$S_i^- = \frac{1}{\theta_i^-} \int_{\theta_i^-} \alpha_i(\theta) d\theta \quad (6)$$

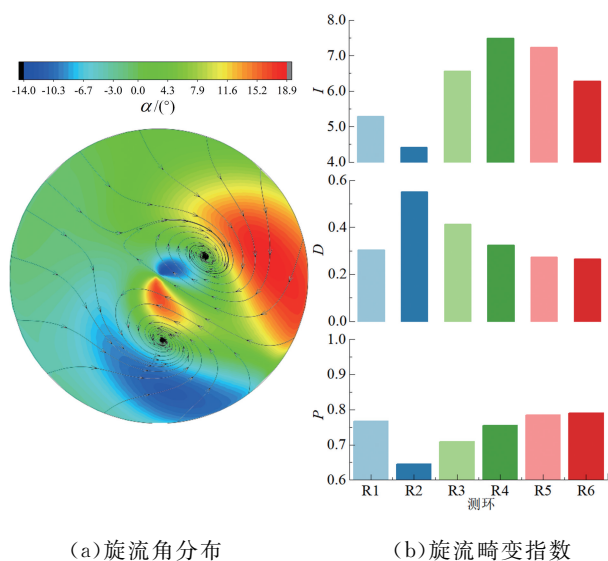
式中: V_θ 为周向速度; α 方向与叶轮转动方向一致;下标 i 为不同半径测环; θ 为旋流角对应的周向角度; θ^+ 、 θ^- 分别为正、负旋流角的周向角度范围; $\alpha_i(\theta)$ 为不同测环上指定周向角度范围内的旋流角分布函数。 I_i 、 D_i 、 P_i 的计算式为

$$I_i = \frac{S_i^+ \theta_i^+ + |S_i^-| \theta_i^-}{360} \quad (7)$$

$$D_i = \frac{S_i^+ \theta_i^+ + S_i^- \theta_i^-}{S_i^+ \theta_i^+ + |S_i^-| \theta_i^-} \quad (8)$$

$$P_i = \frac{S_i^+ \theta_i^+ + |S_i^-| \theta_i^-}{2 \max(|S_i^+ \theta_i^+|, |S_i^- \theta_i^-|)} \quad (9)$$

在叶轮入口处分别选取 20%、35%、50%、65%、80%、95% 管道半径的 6 个测环,命名为 R1~R6。基于旋流畸变评价指数,绘制非均匀入流条件下左侧和右侧叶轮入口处的旋流畸变图谱,如图 10 和图 11 所示。

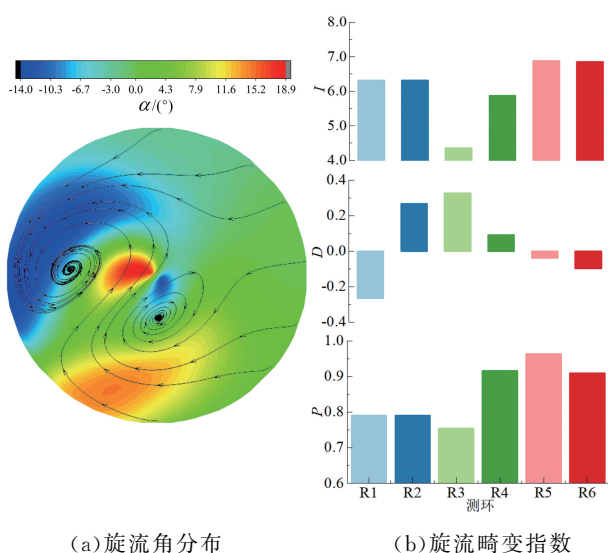


(a) 旋流角分布

(b) 旋流畸变指数

图 10 左侧叶轮入口旋流畸变图谱

Fig. 10 Description of the left impeller inlet swirl distortion



(a) 旋流角分布

(b) 旋流畸变指数

图 11 右侧叶轮入口旋流畸变图谱

Fig. 11 Description of the right impeller inlet swirl distortion

从图 10(a) 的旋流角分布可以发现,非均匀入流在左侧叶轮入口形成与主流叠加复杂的螺旋流动,形成两对旋向相反的圆环状二次流动,涡核卷吸主流导致叶轮入口旋流角发生急剧变化,导致涡核两侧出现正负旋流角交替区域,旋流角的范围为 $-14.5^{\circ} \sim 19.1^{\circ}$,相比于理论设计的轴向流动产生较大变化。从图 10(b) 可以看出,涡核中心所在测环 R2 处 I 最小,测环 R4 处的 I 最大。各测环处 D 均为正值,并且 P 均在 $0.5 \sim 1.0$ 之间,表明叶轮入口截面内旋流整体呈现同向偏置旋涡流,并不是完全对称的标准对涡旋流。

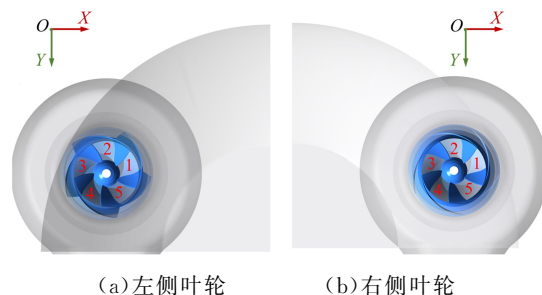
图 11(a) 为右侧叶轮入口的旋流角分布。可以看出,左、右两侧叶轮入口存在结构相似但是旋向相反的旋流角分布。从图 11(b) 可以看出,涡核中心所在测环 R3 处的 I 最小,涡核位置相对左侧叶轮入口发生变化。测环 R1、R5 和 R6 处的 D 均为负值,表明旋流与叶轮旋转方向相反,对比左侧叶轮的 D 分布,右侧叶轮入口的 D 呈现正负交错分布,旋流流动更加复杂,对叶轮入口冲角的影响程度产生差异。测环 R4、R5 和 R6 处的 P 接近为 1,表明 65% 半径以上区域内存在接近标准的对涡旋流,其他区域旋流整体呈现与左侧叶轮大致相同的同向偏置旋涡流。

对比发现,非均匀入流条件下左、右两侧叶轮入口均产生较为明显的二次流动现象,但是旋流特性不同,左侧叶轮入口整体旋流强度更大,旋流方向呈现同向偏置旋涡流,而右侧叶轮入口旋流方向呈现同向和负向偏置旋涡流交错分布,更偏向于对涡旋流。

3.4 非均匀入流对叶轮内部流态影响

3.4.1 叶轮流道流量分布

结合 3.3.1 小节分析可知,下腔室入流结构导致叶轮入口产生轴向速度不均匀的非均匀流动,从而对叶轮各流道流量分配产生影响。非均匀入流条件下,叶轮旋转一个周期的初始时刻左、右两侧核主泵叶轮流道编号示意如图 12 所示。不同入流条件下,叶轮旋转一个周期时叶轮各流道质量流量随时间的变化如图 13 所示。



(a) 左侧叶轮

(b) 右侧叶轮

图 12 叶轮流道编号示意

Fig. 12 Numbering of impeller channel

从图 13 可以看出,在初始时刻,左侧叶轮流道 3 和 4、右侧叶轮流道 1 和 2 处的流量明显高于平均值,分别对应叶轮入口轴向速度较大的区域。

随着叶轮旋转,每个流道流量呈现周期性变化,这是由于每个流道旋转经过轴向速度较大的区域时流道流量增大,经过轴向速度较小的区域时流道流量减小。相比均匀入流,在叶轮旋转一个周期内非均匀入流导致各流道流量随时间波动明显增大,左侧和右侧叶轮内流道波动值分别为 15.4 kg/s 和

9.7 kg/s, 增大约 3 倍和 2 倍。因此, 非均匀入流导致叶轮各流道内的流量分配明显不均匀, 使叶轮受

交变应力, 极易引起叶轮轴向力和径向力产生变化, 产生振动或者疲劳断裂等问题。

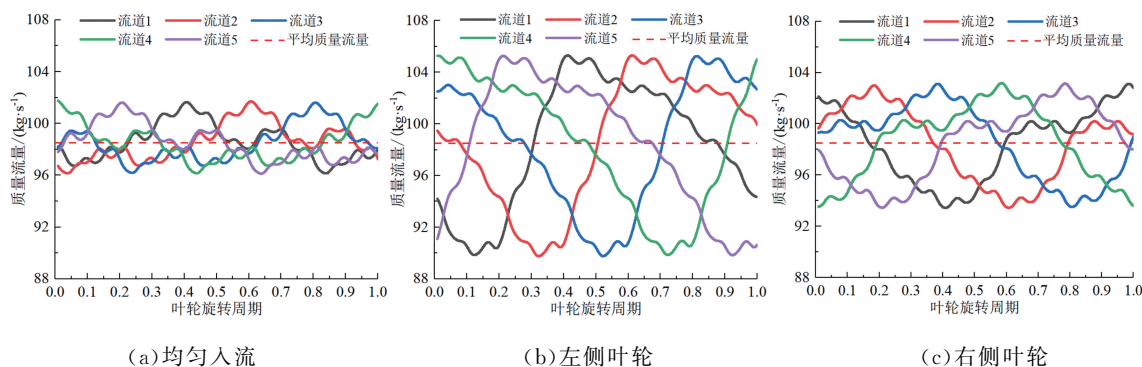


图 13 不同入流条件下叶轮各流道流量随时间变化

Fig. 13 Transient flow rate of each channel of impeller under different inflow conditions

3.4.2 叶片入口冲角分布

叶片入口冲角定义为

$$i = \beta_{A1} - \beta_1 \quad (10)$$

$$\beta_1 = \arctan(v_{m1}/u_1 - v_{u1}) \quad (11)$$

式中: β_A 为叶片安放角; β 为流动角; v_m 为绝对速度的轴面分速度; u 为圆周速度; v_u 为绝对速度的圆周分速度; 下标 1 表示在叶片入口处。

3.3.2 小节分析表明了左、右两侧叶轮入口存在特性不同的旋流畸变, 从而对叶片入口的流动产生不同程度的影响。额定流量工况下, 不同入流条件下叶片入口 10%、50% 和 90% 叶高处的冲角沿周向分布如图 14 所示, 可以看出。

(1) 均匀入流时, 各叶高处入口冲角从叶片吸力面至压力面, 冲角先增大后减小, 在叶片前缘达到最

大, 并沿周向分布呈现周期性变化, 频率与叶片数完全相同, 表明各流道内的流动大致相同。

(2) 非均匀入流时, 冲角沿周向分布整体上也呈现周期性变化, 但是每个周期的波峰和波谷值存在差异。在 10% 叶高处, 左、右两侧叶片的冲角较均匀入流更接近 0° , 而在 90% 叶高处两侧叶片的冲角均大于均匀入流时的, 意味着非均匀入流导致叶顶部分流动损失增大, 叶根部分流动损失减小。这是由于叶轮入口中心处旋流强度较小、边缘处较大。

(3) 在 50% 叶高处, 与均匀入流相比, 左、右两侧叶片冲角变化相反。这是因为左、右叶轮入口处旋流方向所相反, 这也是导致左侧和右侧核主泵性能产生差异的原因之一。

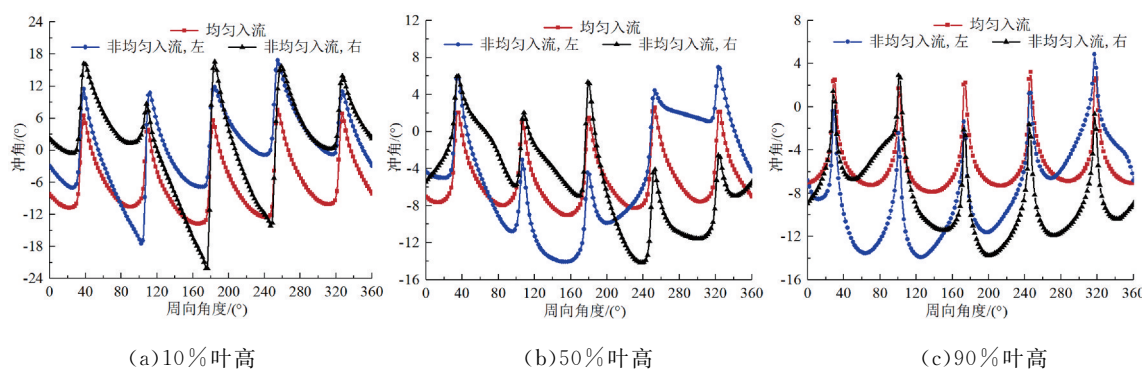


图 14 不同入流条件下叶片入口冲角沿周向分布

Fig. 14 Impulse angle of blade inlet distributed along the circumference under different inflow conditions

4 结 论

本文对 CAP1400 反应堆冷却剂系统中蒸发器

下腔室引起的非均匀入流对核主泵内部流动和性能的影响进行数值模拟分析, 揭示了非均匀流动的形成机理, 获得了非均匀入流条件下左侧和右侧叶轮

入口轴向速度瞬态分布规律以及旋流畸变特性,以及非均匀入流对两侧叶轮内部流动状态的影响规律。本文结论如下。

(1)产生非均匀入流的两个主要原因,一是下腔室相对核主泵入口的非对称结构;二是下腔室与入口管道相贯处突缩截面产生流动分离。

(2)非均匀入流条件下,核主泵的扬程和效率比均匀入流显著降低,额定工况时左侧和右侧核主泵的扬程分别下降了6.0%和5.1%,效率分别下降了7.2%和6.6%,并且外特性下降幅度与流量呈正相关。

(3)非均匀入流条件下,左侧和右侧叶轮入口轴向速度均呈现非常明显的速度畸变区域,从而引起叶轮内各流道流量分配明显不均,左侧和右侧叶轮内流道波动值分别增大了约3倍和2倍,降低了叶轮的运行稳定性。

(4)非均匀入流条件下,左侧和右侧叶轮入口旋流畸变特性不同,旋流方向产生较大差异,导致两侧叶片叶高中部处冲角相对于均匀入流变化相反,流动损失不同,并且两侧叶片在叶顶处流动损失均增大,叶根处流动损失均减小。

参考文献:

- [1] 雷明凯,陈语曦,朱宝,等.核主泵压力脉动及其诱导振动研究进展[J].中国核电,2019,12(3):275-279.
LEI Mingkai, CHEN Yuxi, ZHU Bao, et al. Pressure pulsation and its induced vibration of main coolant pumps in nuclear power plant [J]. China Nuclear Power, 2019, 12(3): 275-279.
- [2] ZHENG Mingguang, YAN Jinquan, JUN Shentu, et al. The general design and technology innovations of CAP1400 [J]. Engineering, 2016, 2(1): 97-102.
- [3] NIU Tingting, LIU Chunli, XIA Shuan. Analysis of CAP1400 reactor coolant hot leg flow field [C]//2017 25th International Conference on Nuclear Engineering. New York, NY, USA: ASME, 2017: V008T09A035.
- [4] 王悦荟,刘聪,王鹏飞,等.蒸汽发生器致畸变入流对核主泵流动性能的影响[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(11):2076-2084.
WANG Yuehui, LIU Cong, WANG Pengfei, et al. Influence of distorted inflow caused by steam generator on flow properties of reactor coolant pump [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(11): 2076-2084.
- [5] VAGNOLI S, VERSTRAETE T. URANS analysis of the effect of realistic inlet distortions on the stall inception of a centrifugal compressor [J]. Computers & Fluids, 2015, 116: 192-204.
- [6] CAO Puyu, WANG Yang, KANG Can, et al. Investigation of the role of non-uniform suction flow in the performance of water-jet pump [J]. Ocean Engineering, 2017, 140: 258-269.
- [7] VAN ESCH B P M. Performance and radial loading of a mixed-flow pump under non-uniform suction flow [J]. Journal of Fluids Engineering, 2009, 131(5): 051101.
- [8] MITTAG S, GABI M. Experimental and numerical investigation of centrifugal pumps with asymmetric inflow conditions [J]. Journal of Thermal Science, 2015, 24(6): 516-525.
- [9] 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]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8): 73-77.
- [10] 颜禹,陆晓峰,朱晓磊.进口弯管及前置扰流子对离心泵性能影响[J].农业工程学报,2013,29(20):74-81.
YAN Yu, LU Xiaofeng, ZHU Xiaolei. Effect of import bend and forward turbolator on performance of centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(20): 74-81.
- [11] 施卫东,张光建,张德胜,等.入口非均匀流对轴流泵性能和压力脉动的影响[J].排灌机械工程学报,2014,32(4):277-282.
SHI Weidong, ZHANG Guangjian, ZHANG Desheng, et al. Effects of non-uniform suction flow on performance and pressure fluctuation in axial-flow pumps [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(4): 277-282.
- [12] 冯建军,杨红红,王晨,等.进口非均匀来流对离心泵失速特性的影响[J].水动力学研究与进展: A 辑,2019,34(5):551-558.
FENG Jianjun, YANG Honghong, WANG Chen, et al. Effect of non-uniform inflow on stall characteristics in centrifugal pumps [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics: A, 2019, 34(5): 551-558.
- [13] 黄伟,张文其,陶文铨,等.蒸汽发生器下封头/主泵连接处流动特性试验研究[J].核动力工程,2002,23(S1):38-42.
HUANG Wei, ZHANG Wenqi, TAO Wenquan, et al. Flow characteristics experimental study within con-

- nection between steam generator channel head and pump suction [J]. Nuclear Power Engineering, 2002, 23(S1): 38-42.
- [14] 侯向陶, 王鹏飞, 许忠斌, 等. 蒸汽发生器下封头对核主泵入口流场影响 [J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(4): 277-282.
- HOU Xiangtao, WANG Pengfei, XU Zhongbin, et al. Influence of steam generator channel head on reactor coolant pump inflow field [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(4): 277-282.
- [15] WANG Yuehui, WANG Pengfei, TAN Xiaohong, et al. Research on the non-uniform inflow characteristics of the canned nuclear coolant pump [J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, 115: 423-429.
- [16] WANG Yuehui, XU Zhongbin, WANG Pengfei, et al. Numerical and experimental analysis on the non-uniform inflow characteristics of a reactor coolant pump with a steam generator channel head [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2020, 14(1): 477-490.
- [17] XU Rui, LONG Yun, WANG Dezhong. Effects of rotating speed on the unsteady pressure pulsation of reactor coolant pumps with steam-generator simulator [J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, 333: 25-44.
- [18] LONG Yun, WANG Dezhong, YIN Junlian, et al. Experimental investigation on the unsteady pressure pulsation of reactor coolant pumps with non-uniform inflow [J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, 110: 501-510.
- [19] LONG Yun, WANG Dezhong, YIN Junlian, et al. Numerical investigation on the unsteady characteristics of reactor coolant pumps with non-uniform inflow [J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 320: 65-76.
- [20] LI Yibin, FAN Zhaojing, GUO Dongsheng, et al. Dynamic flow behavior and performance of a reactor coolant pump with distorted inflow [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2020, 14(1): 683-699.
- [21] 杨国英, 邓清华, 何伟, 等. 圆形截面双扭管内流动稳定性和均匀性评估 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(6): 102-112.
- YANG Guoying, DENG Qinghua, HE Wei, et al. Evaluation of flow stability and uniformity in double elbow pipe with circular cross section [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(6): 102-112.
- [22] 夏栓, 冯斌, 张海军. AP1000 核岛主泵流场数值模拟 [J]. 核技术, 2013, 36(4): 101-107.
- XIA Shuan, FENG Bin, ZHANG Haijun. Simulation of AP1000 reactor coolant pump flow field CFD [J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(4): 101-107.
- [23] 任芸, 吴登昊, 牟介刚, 等. 考虑旋转和曲率的湍流模型修正及应用 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(9): 25-30.
- REN Yun, WU Denghao, MU Jiegang, et al. Modification for turbulence model considering rotation and curvature with applications [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(9): 25-30.
- [24] 马松洋, 李明芮, 陈文振, 等. 进出口阻力对倒 U 型管束内倒流特性的影响分析 [J]. 核动力工程, 2022, 43(2): 53-58.
- MA Songyang, LI Mingrui, CHEN Wenzhen, et al. Influence of inlet and outlet resistance on the characteristics of backflow in inverted U-tube bundle [J]. Nuclear Power Engineering, 2022, 43(2): 53-58.
- [25] 胡伟波, 程邦勤, 陈志敏, 等. 整体涡旋流畸变对压气机性能影响的研究 [J]. 推进技术, 2015, 36(9): 1324-1330.
- HU Weibo, CHENG Bangqin, CHEN Zhimin, et al. Investigation on effects of bulk swirl distortion on compressor performance [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(9): 1324-1330.

(编辑 陶晴 杜秀杰)