

文章编号:1000-8055(2012)02-0419-06

加力燃油泵压出室非设计工况 内流特征数值模拟

薛梅新, 吴 迪, 朴 英

(清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘 要: 针对某型航空发动机加力燃油泵隔舌空蚀破坏, 采用滑移网格技术模拟泵内非定常流场, 揭示了压出室在典型非设计工况下的内流特征, 研究了隔舌处的空化机理. 计算结果表明: 大流量工况, 扩散管锥形段存在大小两个分离涡, 而环形腔室隔舌段燃油以相切方式流经隔舌壁面, 无明显流动分离, 不会发生空化; 而小流量工况, 扩散管锥形段内两分离涡扩展到大部分区域, 右半侧部分阻滞燃油在反向流向涡作用下, 绕流隔舌上部, 在隔舌下游形成了明显分离涡, 导致隔舌壁面静压急剧降低, 进而引发空化, 产生空蚀破坏.

关 键 词: 加力燃油泵; 切线泵; 压出室; 空化; 分离

中图分类号: V233. 2

文献标志码: A

Numerical simulation on internal flow characteristics in the discharge chamber of an afterburning fuel pump under off-design conditions

XUE Mei-xin, WU Di, PIAO Ying

(School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The unsteady flow in an afterburning oil pump on a certain type of aero-engine was simulated for the uncommon cavitation damage problem near its casing tongue, with arbitrary sliding mesh technology. The discharge chamber internal flow characteristics at off-design conditions were investigated to find out possible conditions causing the casing tongue cavitation. The results showed that: under large flow-rate condition, there are two separated vortices of different sizes located in the cone-shaped tube passage, while the fuel flowed past the casing wall without obvious separation in the annular chamber, which hardly trigger cavitation; under small flow-rate condition, the two separated vortices extend to take up most part of the cone-shaped passage, incoming flow of the diffuser is choke up with a part of the fuel blocked at right side flowing back to the annular chamber around the tongue. As a result, serious flow separation is raised with a high pressure decrease, which is expected to generate cavitation and following damage on the casing tongue.

Key words: afterburning fuel pump; tangent pump; discharge chamber; cavitation; separation

收稿日期: 2011-03-17; **修订日期:** 2011-09-01

基金项目: 中国博士后科学基金(20100480259)

作者简介: 薛梅新(1985—), 男, 湖北公安人, 博士生, 主要从事流体机械内流及空化方面研究.

某型航空发动机的加力燃油泵采用环形压出室和开式径向直叶轮的高速离心泵(又称切线泵或部分流泵),该泵工作转速高、流量大、扬程高、结构简单、质量轻,符合高性能高推比发动机的要求.在服役过程中,该泵压出室隔舌壁面出现了严重的空蚀破坏,部分区域甚至发生了穿透(如图 1 所示),威胁到发动机的安全运行.

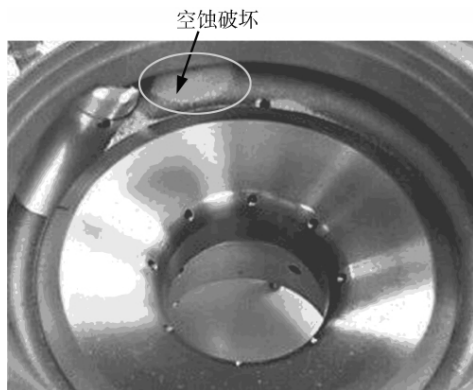


图 1 加力燃油泵壳体壁面空蚀破坏

Fig. 1 Cavitation damage on afterburning pump casing

对于普通离心泵,空蚀多发生在叶片吸力面前缘、叶轮与泵壳间隙等流速和压力发生剧烈变化的部位^[1],隔舌壁面处产生空蚀破坏则较为罕见.最近 Bachert 等^[2]发现某离心泵过载时扩散管隔舌下游产生流动分离引发了空化现象.由于航空发动机特殊性,加力燃油泵即使在全加力时,燃油流量仅为设计流量的 50%.在远离设计点的低负荷工况下运行时,加力燃油泵压出室隔舌处可能产生的流动分离会引发空化^[3-5],产生空蚀破坏.因此,深入研究非设计工况下压出室内流动特征,对探索隔舌空化机理及减免隔舌壁面空蚀破坏具有重要意义.

关于高速离心泵或切线泵的研究主要集中于性能试验及设计改进^[6-8],对内流特征缺乏深入认识.近年来,国内学者利用数值模拟方法对该类泵内流特征与性能优化进行了有益的探索^[9-10],然而研究多限于设计工况,并未涉及非设计工况下压出室内流动规律.陈党民等^[10]发现由于叶轮与蜗壳动静相互作用非常强烈,切线泵内流具有显著非定常特性,应采用非定常计算方法进行求解.因而,本文对加力燃油泵内流场进行非定常数值模拟,通过对比流量扬程数据验证方法的有效性,进而研究了压出室在大流量和小流量两种典型工况下的内流特征,探索隔舌空化发生工况,文中流动图画均为泵瞬时扬程达到峰值时刻.

1 物理模型和数值方法

加力燃油泵主要由进口活门、转轴、叶轮、环形蜗壳、锥形扩散管等部件组成.求解区域取燃油泵进口活门到扩散管出口的燃油流道,包括盘盖侧间隙,其中对进口及泵腔内转轴表面进行了适当简化,计算域及网格模型如图 2 所示.计算网格采用分块结构化六面体网格,分为吸入段(S1)和压出段(S2)静止区域,叶轮段旋转区域.由于开式叶轮结构特殊,叶轮段网格沿叶片轮毂面分为前后两部分(R1,R2).为了准确求解湍流边界层,近壁网格进行了法向加密.计算流道总计 110 万个网格单元,其中 S1 单元数约 14 万, S2 单元数约 42 万, R1 单元数约 37 万, R2 单元数约 17 万.

航空煤油为多组分混合物,本文计算取特征密度 ρ 为 780 kg/m^3 ,黏性系数 μ 为 $0.0024 \text{ Pa} \cdot \text{s}$.进口边界面(inlet)采用压力进口条件,给定进口总压,出口边界面(outlet)采用质量流量出口条件.所有动静固壁面采用速度无滑移条件,近壁区采用壁面函数法处理,叶轮动壁面设置转速条件.

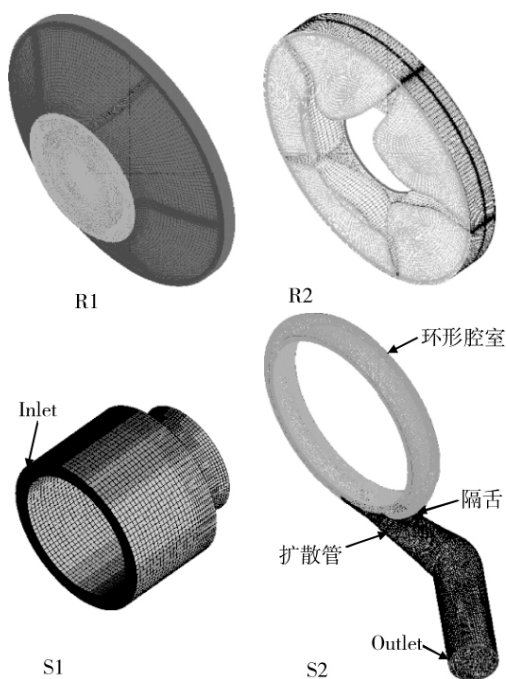


图 2 燃油泵计算域及网格

Fig. 2 Calculation domain and grid of the pump

计算采用商业软件 ANSYS CFX 12.1 求解器,泵内湍流流动采用剪切应力输运(SST) $k-\omega$ 湍流模型求解旋转坐标系下不可压雷诺平均方程.动静区域交界面参数传递采用瞬态转静子模型, R1 和 R2 交界面采用通用连接(general connec-

tion). 动量及湍流输运方程对流项离散采用二阶精度高分辨率格式^[11], 瞬态项离散采用二阶后向欧拉格式, 其他项采用中心差分格式. 非定常流场计算的物理时间步长取 $\delta t = T/360$, 其中 T 为叶轮转动周期.

2 计算结果与分析

2.1 瞬时及有效扬程预测

图3所示是在设计工况下, 叶轮旋转 360° , 泵出口处总压 p_{out} 瞬时变化曲线. 该曲线具有明显的脉动特征, 波动频率与叶片通过频率一致, 波动幅值可达 0.5 MPa , 约为扬程的 7% . 由于瞬时扬程随叶轮转动呈周期性脉动, 故对其进行时间平均来预测泵的有效扬程.

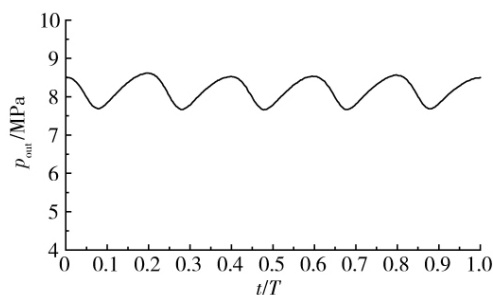


图3 设计工况下出口瞬时压力脉动

Fig. 3 Fluctuation of p_{out} under the design condition

图4是数值预测的有效扬程与试验数据的对比, 现有试验数据为不同转速 ($n/n_d = 0.44, 0.48, 0.52, 0.56, 0.59$) 下等效率工况点的流量扬程, 图中数据进行了无量纲化处理, 其中下标 d 表示设计工况参数值. 总体上看, 计算扬程高于试验扬程, 误差主要源自计算模型的简化、旋转效应以及试验测量等方面, 模型简化主要包括忽略了工艺孔、环形腔室处理壁面的粗糙度等, 这样会降低流

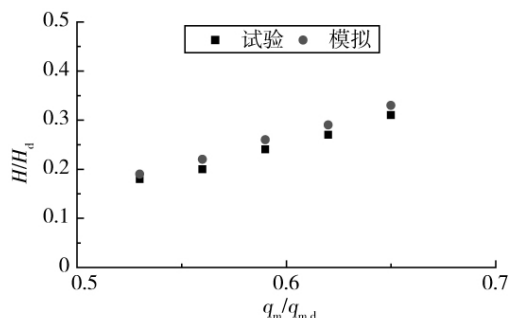


图4 不同转速下试验与计算流量扬程对比

Fig. 4 Comparison of experimental and numerical flow capacity-head at different rotation speeds

动损失、提高出口扬程, 使得计算扬程均高于试验扬程, 而随叶轮转速增加, 旋转效应也会对流场产生不同影响. 整体计算相对误差均在 5% 以内, 表明本文加力燃油泵非定常流场的模拟结果是可靠的.

2.2 大流量工况压出室流动分析

大流量工况对应于发动机全加力状态. 计算设置进口总压 $p_{in} = 0.8 \text{ MPa}$, 出口质量流量 $q_m = 50\% q_{m,d}$, 转速 n_d . 加力泵压出室由环形腔室和锥形扩散管共同组成, 如图2所示. 两者相交处为隔舌, 燃油在隔舌处分为两股进入扩散管与环形腔室.

2.2.1 扩散管流动分析

图5为大流量工况下加力燃油泵锥形扩散管内三维流线分布, 其中曲面 $S_{l,1}$ 和 $S_{l,2}$ 为速度梯度张量第二不变量 Q_c ^[12] 的等值面, 表示涡核大小及形状. 平面 I, II, III, IV 为垂直于扩散管中心线的流向截面, 截面上速度矢量 v 可表示为 $v = v_n + v_t$, v_n 为截面法向分量, v_t 为截面切向分量. 各截面分布如图6所示, 其中细实线为二维流线, 颜色越深, 该处流速越小.

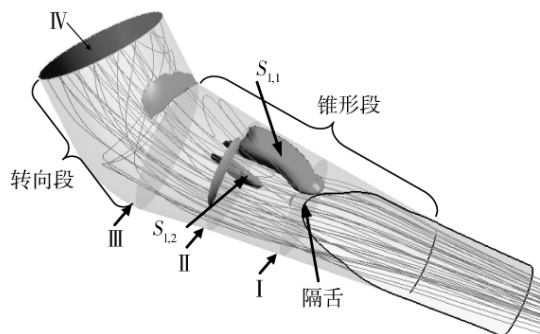


图5 大流量工况扩散管内三维流线分布

Fig. 5 Streamlines in the diffuser at large flow-rate

由图5可知, 扩散管锥形段存在明显分离涡核 $S_{l,1}$ 和 $S_{l,2}$, $S_{l,1}$ 对应的分离涡 $E_{l,1}$ 起始于隔舌左上角, 如图6(a), 而终止于锥形段尾部右上角, 如图6(c), 占据了较大区域; 而 $S_{l,2}$ 对应的分离涡 $E_{l,2}$ 位于锥形段中部靠近壁面处, 如图6(b), 其涡旋轴线与流向存在较大夹角, 且体积较小. 图6(a)~6(c)中分离涡对应区域, 流速 v 均较小, 而主流区域流速 v 较大, 受分离涡影响, 向左下方扩张, 经过转向段后, 分离涡消失, 燃油流速分布恢复均匀, 并形成明显二次流向涡, 如图6(d).

总体上看, 大流量工况, 燃油流量小于设计流量, 燃油在扩散管锥形段顶部和中部右侧出现了不同程度的分离, 主流向左下方偏移.

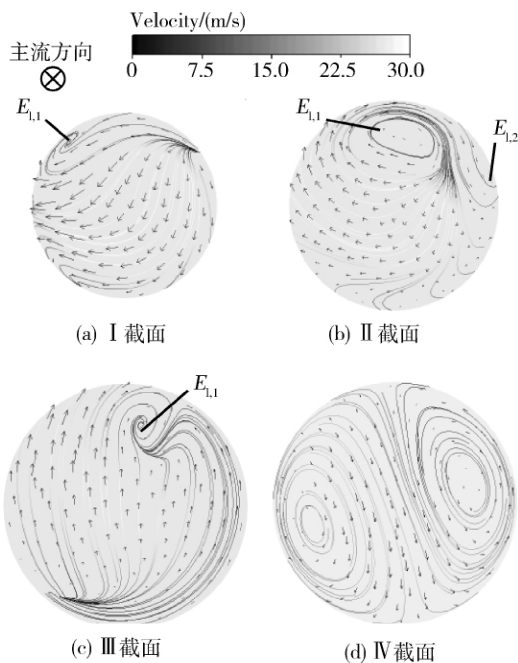


图 6 大流量工况扩散管流向截面 v_t 分布
Fig. 6 v_t on the different streamwise sections in diffuser at large flow-rate

2.2.2 环形腔室隔舌段流动分析

大流量工况下环形腔室隔舌段的三维流线分布如图 7 所示,燃油绕泵轴线作圆周运动,其最外侧贴附于环形壁面,仅在隔舌上部下游存在极小范围流动分离,该分离点靠近扩散管分离涡 $E_{l,1}$ 的起始点,选取该处轴向截面,处于截面上的速度矢量分量 v_t 分布如图 8 所示,其中虚线框为环形腔室与扩散管的相切段. 环形腔室进口来流在隔舌处分为两股,流入环形腔室的燃油不经过相切段,在锥形段外直接以近乎相切的方式流经隔舌壁面,在隔舌下游产生流向分离涡,但分离区并不明显.

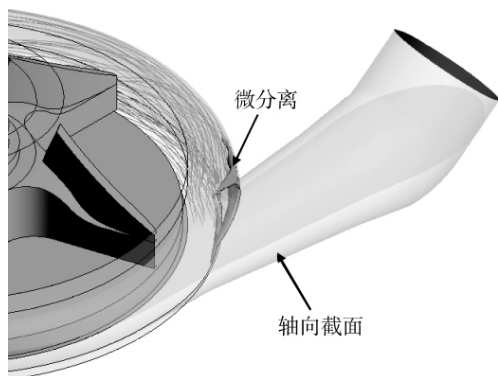


图 7 大流量工况环形腔室隔舌段三维流线分布
Fig. 7 Streamlines in the annular chamber close to the tongue at large flow-rate

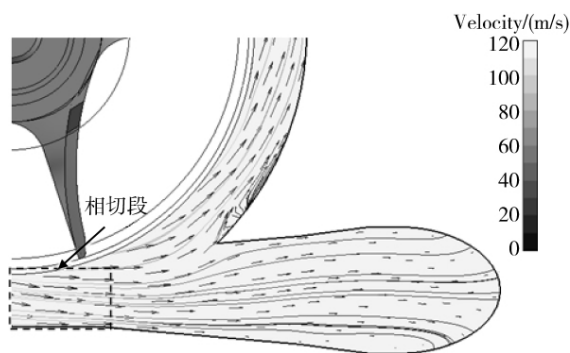


图 8 大流量工况压出室轴向截面 v_t 分布
Fig. 8 v_t on the axial section of the discharge chamber at large flow-rate

图 9 为该轴向截面的静压分布,在环形腔室与锥形段连接的喉部区域,燃油迅速减速增压,静压等值线与锥形段中心线基本垂直,且燃油在隔舌处滞止分离使得隔舌两侧壁面静压分别达到局部最大值和最小值,环形腔室侧低压区约 4.0 MPa. 大流量工况下,隔舌环形腔室侧未发生明显分离,燃油静压高于饱和蒸汽压力,不可能发生空化. 由该泵改制的地面油源泵,长期工作在类似工况却并未发现空蚀破坏,也在一定程度上验证了该结论.

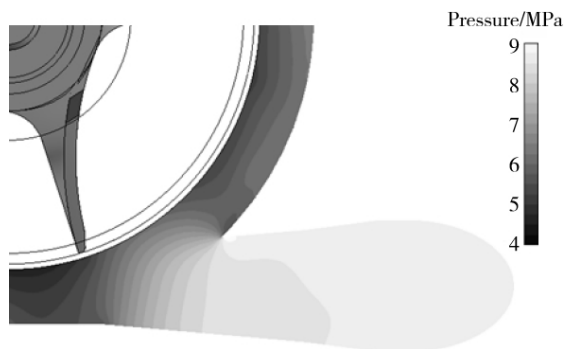


图 9 大流量工况压出室轴向截面静压分布
Fig. 9 Static pressure contour on the axial section of the discharge chamber at large flow-rate

2.3 小流量工况压出室流动分析

小流量工况对应于发动机小加力状态或阀门关闭的冷却待启动状态. 计算设置进口总压 $p_{in} = 0.8 \text{ MPa}$, 出口质量流量 $q = 10\% q_d$, 转速为 n_d .

2.3.1 扩散管流动分析

图 10 为小流量工况下加力泵锥形扩散管内三维流线分布,其中曲面 $S_{l,1}$ 和 $S_{l,2}$ 为速度梯度张量第 2 不变量 Q_c 的等值面,图 10(a)、图 10(b)是从两个不同视角观察内流特征及涡结构. 图中截

面 I, II, III, IV 位置与图 5 一致,截面上速度矢量分量 v_t 的分布如图 11 所示。由图 10 可知,扩散管锥形段内两个分离涡核 $S_{s,1}$ 和 $S_{s,2}$ 发生明显变化。 $S_{s,1}$ 对应的分离涡 $E_{s,1}$ 仍然起始于锥形段顶部,但在截面 I 附近开始由顶部流向涡向右侧反向流向涡过渡,如图 11(a);在锥形段中部右下侧发展为反向流向涡,如图 11(b);在锥形段尾部反向流向涡已占据右侧大半部,如图 11(c)。 $S_{s,2}$ 对应的分离涡 $E_{s,2}$ 伴随 $E_{s,1}$ 的变化则位于锥形段顶部,先起始于截面 I 右上角,而后发展到尾部截面 III 的左上侧,如图 10(a)。与大流量相比,分离涡 $E_{s,1}$ 和 $E_{s,2}$ 占据区域明显变大,高速主流被挤压至锥形段左下侧,经转向段后,分离涡消失,燃油在截面 IV 均匀分布,并形成中心二次涡,如图 11(d)。锥形段右半侧燃油流动受阻,在反向流向涡作用下,沿图 10(b) 黑色箭头所示路线,绕流隔舌上部,返回到环形腔室。

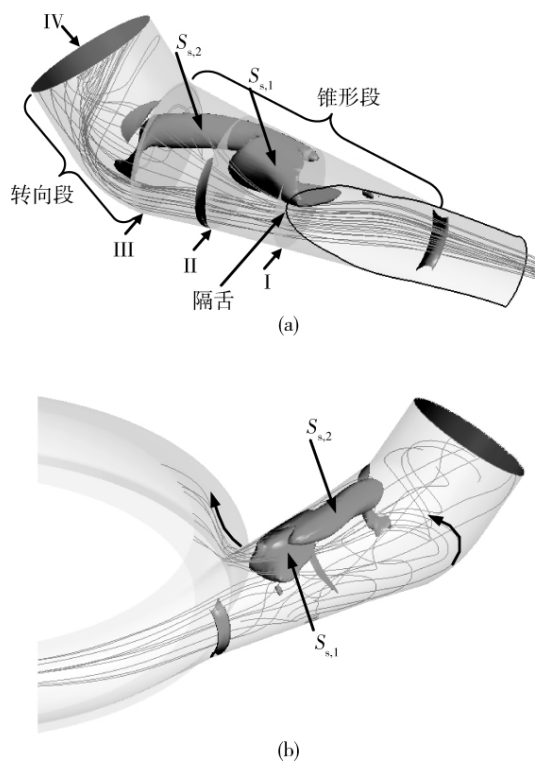


图 10 小流量工况扩散管内三维流线分布

Fig. 10 Streamlines in the diffuser at small flow-rate

总体上看,小流量工况燃油流量远低于设计流量,锥形段内形成了两大分离涡,扩散管流动严重堵塞,高速主流局限于锥形段左下部,而反向流向涡将锥形段右半部阻滞燃油经隔舌上部输运回环形腔室。

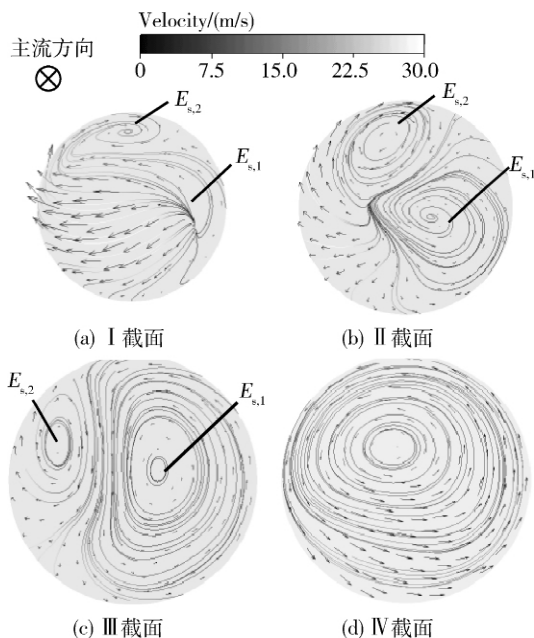


图 11 小流量工况扩散管流向截面 v_t 分布

Fig. 11 v_t on the different streamwise sections in diffuser at small flow-rate

2.3.2 环形腔室隔舌段流动分析

小流量工况下环形腔室隔舌段的三维流线分布如图 12 所示,受扩散管返流影响,隔舌上部下游形成明显分离涡,该处轴向截面的速度矢量 v_t 分布如图 13 所示。流入环形腔室的燃油经由相切段进入扩散管锥形段后,偏向隔舌,然后折返环形腔室,与钝体绕流类似,隔舌绕流在下游形成了明显分离区。小流量工况下,扩散管内流动分离已发展到环形腔室隔舌段,使得该处流动更为复杂。

图 14 为该轴向截面的静压分布,受分离影响,喉部区域压力等值线发生扭曲,不再与锥形段中心线垂直。隔舌环形腔室侧低压区明显扩大,其

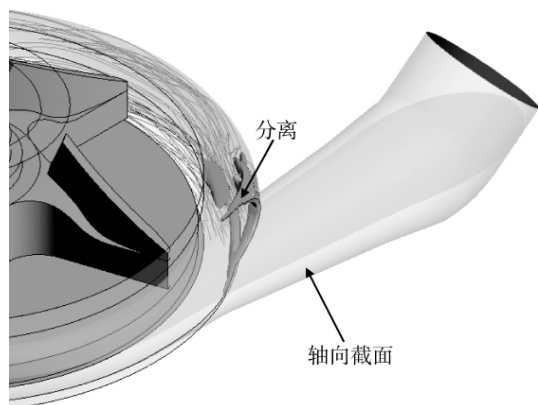


图 12 小流量工况环形腔室隔舌段三维流线分布

Fig. 12 Streamline distribution in the annular chamber close to the tongue at small flow-rate

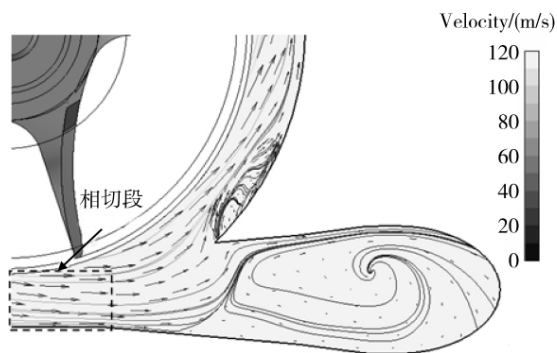


图 13 小流量工况压出室轴向截面 v_i 分布

Fig. 13 Velocity vectors v_i on the axial section of the discharge chamber at small flow-rate

压力值至少降低约 10 个大气压,该局部低压区与图 1 所示隔舌空蚀破坏位置相符,且空化一般发生在分离处,因而小流量工况扩散管堵塞在隔舌腔室侧形成的湍流分离可能是导致隔舌空化的原因.飞行状态下,加力燃油泵 90% 的工作时间都处于小流量工况,长时间的空泡初生与溃灭最终会导致隔舌区域的空蚀破坏.

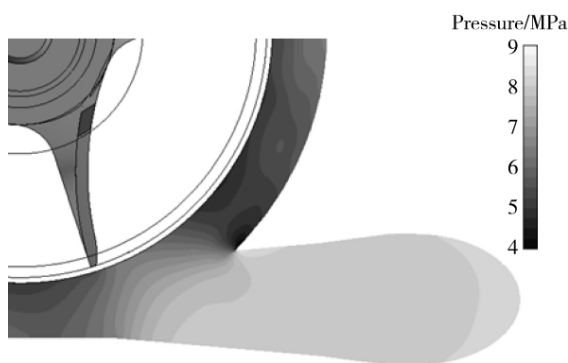


图 14 小流量工况压出室轴向截面静压分布

Fig. 14 Static pressure contour on the axial section of the discharge chamber at small flow-rate

3 结 论

本文对某加力燃油泵内非定常流动进行了数值模拟,计算预测的有效扬程与试验数据吻合良好.为了探索加力泵隔舌空蚀破坏可能发生工况,对两个典型非设计工况下压出室内流特征进行了详细分析,可以得出以下结论:

1) 大流量工况,扩散管锥形段内流动发生分离,而环形腔室隔舌段流动仍贴附于隔舌壁面,无明显分离区,不会发生空化.

2) 小流量工况,扩散管锥形段内流动堵塞,锥形段内阻滞燃油在反向流向涡作用下,绕流隔舌返回环形腔室,在隔舌下游形成了明显分离涡,进而导致分离区静压急剧降低.

3) 隔舌环形腔室侧因扩散管流动堵塞形成的分离低压区易引发空化,对小流量类似工况应进行更深入的研究,并耦合空化模型,揭示泵内空泡两相流发展规律,进而开展隔舌结构优化设计,寻求有效防止隔舌空化空蚀现象发生的途径.

参考文献:

- [1] 陈乃祥,吴玉林.离心泵[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [2] Bachert R, Stoffel B, Dular M. Unsteady cavitation at the tongue of the volute of a centrifugal pump[J]. Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(6): 061301(6 pages).
- [3] Washio S, Fujiyoshi S, Takahashi S. Observation of cavitation inception in separating water flows through constricted channels[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223(9): 2071-2080.
- [4] Washio S, Takahashi S, Uemura K, et al. Singular properties of flow separation as a real cause of cavitation inception[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2008, 222(4): 667-678.
- [5] O'Hern T J. An experimental investigation of turbulent shear flow cavitation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1990, 215: 365-391.
- [6] 范宗霖,王革田.切线泵的试验研究[J].水泵技术, 2002, (1): 3-8.
- [7] 吴玉珍.部分流式切线泵在高效率条件下扬程系数的确定[J].化工设备与管道, 2000, 37(3): 37-39.
WU Yuzhen. Determination of head coefficient for part flow tangent pumps with high efficiency[J]. Process Equipment & Piping, 2000, 37(3): 37-39. (in Chinese)
- [8] Barske U M. Development of some unconventional centrifugal pumps[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1960, 174(1): 437-461.
- [9] 张剑慈,崔宝玲,李映,等.低比转速开式叶轮高速离心泵的优化设计系统[J].机械工程学报, 2006, 42(7): 19-23.
ZHANG Jianci, CUI Baoling, LI Yi, et al. Optimum design system of low-specific open-impeller high-speed centrifugal pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(7): 19-23. (in Chinese)
- [10] 陈党民,李新宏,黄淑娟.部分流泵整机非定常流动数值模拟[J].工程热物理学报, 2005, 26(增刊): 89-92.
CHEN Dangmin, LI Xinhong, HUANG Shujuan. Numerical analysis of the unsteady flow field for a partial emission pump[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26 (Supplement): 89-92. (in Chinese)
- [11] Barth T J, Jespersen D C. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes[R]. AIAA-1989-366, 1989.
- [12] Hunt J C R, Wray A A, Moin P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows[R]. CTR-S88, 1988.