

带引射器的多级导流叶轮航空燃油 离心泵数值模拟

李 嘉, 李华聪, 符江锋, 韩小宝

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 以带引射器的多级导流叶轮航空燃油离心泵为研究对象,开展了该型离心泵性能数值模拟研究.通过数值模拟结果与试验数据的对比,验证了基于Pumplinx下该型离心泵性能仿真的正确性;通过分析离心泵轴向与径向中间截面的压力分布研究内流场特性,并在该泵最差气蚀工况下的分析了气蚀特性,给出完全气蚀状态下的气液两相分布以及预测了离心泵的 $\Delta h-H$ 特性曲线.研究表明:带引射器的多级导流叶轮航空燃油离心泵数值模拟的扬程效率以及气蚀特性曲线与试验数据吻合.在小流量工作范围内内流场压力分布均匀稳定,增压效果明显;当进口压力为0.018 MPa时产生完全气蚀状态,小于技术要求最小进口压力0.027 MPa,因此该泵的工作要求范围内不会产生气蚀现象.

关 键 词: 航空燃油离心泵; 引射器; 多级导流叶轮; 气蚀特性; 数值模拟

中图分类号: V228.1

文献标志码: A

Numerical simulation of multi-diversion aero fuel centrifugal pump with ejector

LI Jia, LI Hua-cong, FU Jiang-feng, HAN Xiao-bao

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Targeting the multi-diversion aero fuel centrifugal pumps with ejector, the numerical simulation of the centrifugal pump was performed. By comparing the simulation data with test data, the simulation's accuracy was identified by Pumplinx. The inner flow characteristics of the model were calculated by analyzing the pressure of middle axial and middle radial areas. Then cavitation characteristic was simulated in the worst operating conditions; and the gas-liquid two-phase distribution of the pump's full cavitation state was given at its Δh values and $\Delta h-H$ curve was acquired. Studies have shown that this centrifugal pump's head, efficiency and cavitation characteristic curve of numerical simulation meet the test data. Pressure of inner flow is steady, and could make high pressure at high efficiency under small flow states; meanwhile, it could not produce cavitation within its operating range at the input pressure of 0.018 MPa, less than the input pressure of 0.027 MPa for technical requirements at its full cavitation state.

Key words: aero oil centrifugal pump; ejector; multi-diversion impeller; cavitation characteristic; numerical simulation

燃油泵是航空发动机的重要附件.对高性能燃油离心泵进行性能分析,以满足航空发动机进

一步发展的要求,是一项重要的研究课题^[1-2].离心泵具有体积小、质量轻、抗污染能力强、工作可

靠性高等优点. 发动机起动时, 发动机转速低, 导致传统离心泵出口压力小, 容易产生气蚀现象, 难以满足燃油系统对喷油压力的要求^[3]. 而航空涡轴发动机采用的离心泵出口流量较小, 且要求在小流量工况下能够提供一定的增压能力. 因此需要研究一种增压能力强且具有高抗气蚀特性的发动机前级增压泵.

离心泵的设计和使用过程中, 扬程、效率及气蚀特性是必须考虑的因素之一^[4]. 近年来, 国内外许多学者对离心泵的性能进行了大量研究并取得了一定的成果. Kurokawa 等研究了离心泵叶轮出口的流动特点^[5], Hwayang-dong 等针对离心泵的抗气蚀性能进行了参数优化研究^[6], Marx 等针对前置诱导轮的离心泵进行了非定常数值研究^[7], 程效锐等通过 CFD 技术研究了螺旋离心泵瞬态特性, 给出了其轴向力与径向力的分布^[8], 张永学等通过二元理论对高效率离心泵进行了设计研究并通过 BVF 进行了效率预测^[9], 吴大转等通过数值模拟对多级离心泵开式叶轮参数进行了优化研究^[10]. 由此可见, 近年来许多学者从不同角度对离心泵的性能特性进行了研究分析, 并取得了一定的结论. 与传统航空燃油离心泵相比, 带引射器的多级导流叶轮航空燃油离心泵几何结构非常复杂, 其叶轮型线扭曲度大, 设计难度大, 未见有相关文献论述. 本文采用了诱导轮与叶轮一体化设计的多级导流结构. 叶轮分为正反两侧叶片; 轮缘直径比传统组装结构的离心泵更小; 采用引射器连接了蜗壳进口与泵进口. 通过对叶轮、蜗壳

以及引射器的一体化合理匹配设计, 可有效改善泵的效率、增压能力以及抗气蚀特性.

为此, 本文对带引射器的多级导流叶轮航空燃油离心泵的性能特性进行了数值模拟, 完成了其一体化匹配设计, 并分析了叶轮、蜗壳以及引射器内部流动特性与气液两相分布状态. 首先将数值模拟结果与试验数据进行了对比, 验证使用的数值方法可行性并分析了所预测的各个性能. 其次, 数值模拟仿真了离心泵气蚀特性, 分别研究了最差气蚀工况和不同气蚀状态下的气蚀特性.

1 研究模型

根据航空发动机对主燃油前级增压泵的新要求, 该型带引射器的多级导流组合叶轮航空燃油离心泵的技术指标如下: 进口压力 p_1 为 0.027~0.12 MPa(绝对); 出口压力 p_2 为 0.097~0.28 MPa(绝对); 额定转速 n 为 10 678 r/min; 最大流量 Q 为 1 500 L/h. 性能参数如下: 扬程 H 为 23.07 m, 比转速 n_s 为 75.6.

该型离心泵的叶轮为多级导流组合叶轮结构, 诱导轮与叶轮组合为一体式结构, 诱导轮共有 4 个叶片, 主叶片有 2 片, 辅助叶片有 2 片. 由于叶片的高度和厚度以及叶片间距都是变化的, 因而诱导轮属于非规则诱导轮. 离心叶轮为半开式, 共有 6 个后弯式叶片沿圆周均布, 从进口到出口, 叶片宽度相等. 离心泵的蜗壳为带锥形扩散管的螺旋形形状, 其断面形状为圆形断面, 效率较高^[11]. 图 1 给出了叶轮与蜗壳的设计原理图.

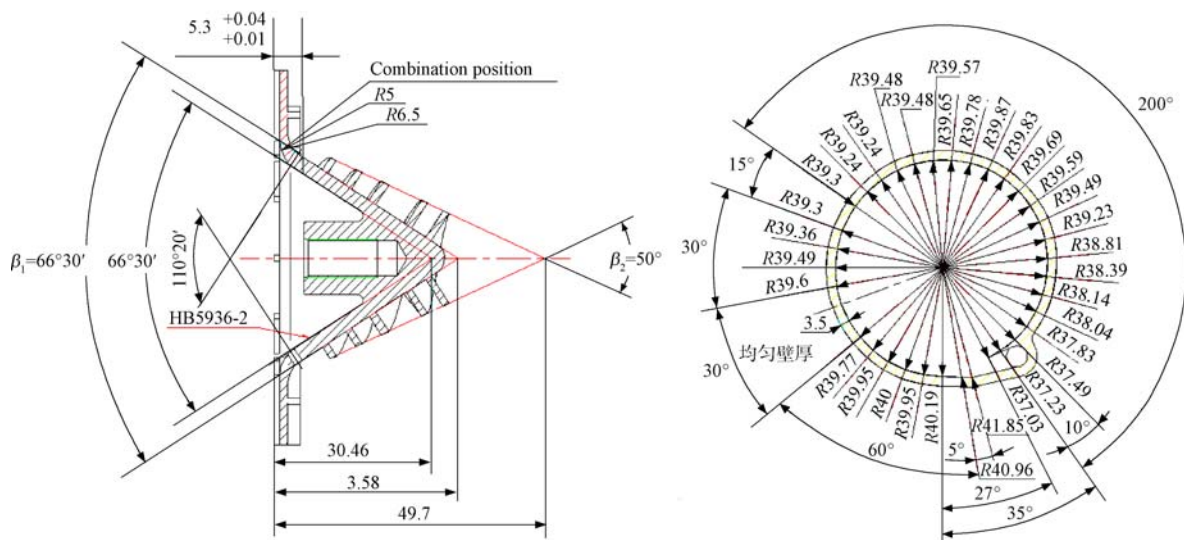


图 1 叶轮与蜗壳设计原理图(单位:mm)

Fig. 1 Radial profile of impeller and volute (unit:mm)

图 1 中给出了叶轮与蜗壳的设计原理和具体结构参数. 如图所示多级导流组合叶轮采用诱导轮与叶轮一体设计, 结合点处的连接过渡角度平稳; 蜗壳选取了 36 个断面, 减小了断面的面积比, 提高了设计精度.

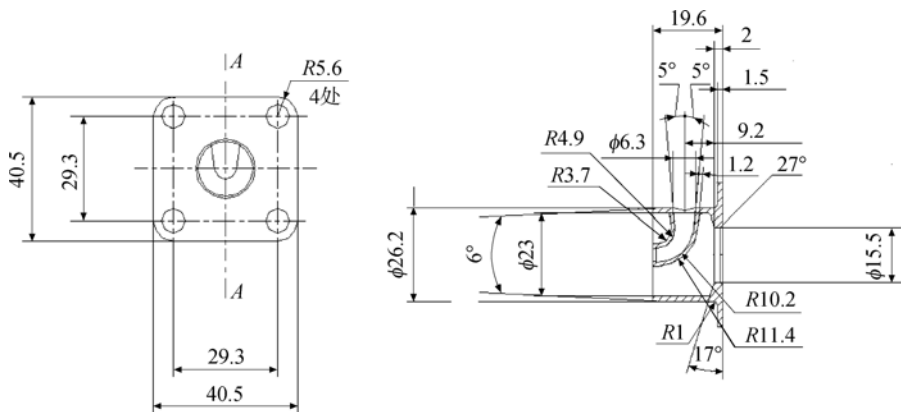


图 2 引射器设计原理图(单位:mm)

Fig. 2 Radial profile of the ejector (unit:mm)

根据设计原理与具体的结构参数, 对离心泵进行三维建模. 叶轮、蜗壳三维模型如图 3 和图 4 所示, 图 5 给出了离心泵整体三维模型.

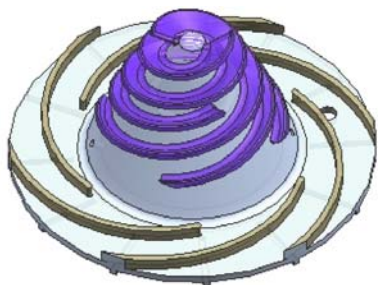


图 3 离心泵叶轮三维模型图

Fig. 3 Impeller model of centrifugal pump

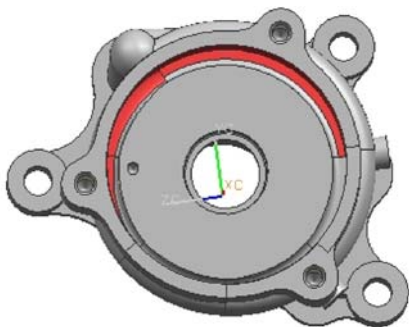


图 4 离心泵蜗壳三维模型图

Fig. 4 Volute model of centrifugal pump

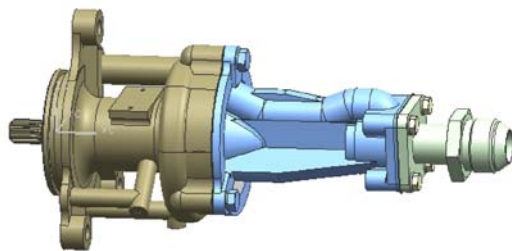


图 5 离心泵整泵三维模型图

Fig. 5 Three-dimensional model of centrifugal pump

2 计算工况和边界条件设置

选取设计转速为 10 678 r/min 的不同流量状态开展离心泵数值模拟, 并将计算结果与试验数据相对比, 以验证计算方法的适用性.

Pumplinx 是美国 Simerics 公司专门为各类泵的水力学模拟计算开发的 CFD(计算流体动力学)软件, 能够求解可压缩、不可压缩流体流动、传热、传质、湍流、空化等物理现象^[13]. 本文中借助 Pumplinx 软件, 采用压力基隐式差分方法, 2 阶迎风差分格式及 COUPLED 方法求解三维定常雷诺平均 Navier-Stokes 方程. 选取 $k-\epsilon$ 模型和 Rayleigh-Plesset 方程的 volume of fluid(VOF)模型进行内流场计算和气蚀两相计算^[14-16]. 计算工质为航空煤油. 计算中, 为提高计算效率, 采用了多重网格法、局部时间步长和残差光滑等加速收敛措施.

将离心泵内部流动视为不可压缩流动,采用动静参考系解决旋转叶轮与静止泵体的耦合问题,叶轮设置为运动参考系,泵壳和其他流动域设置为静参考系.进口边界采用压力进口边界,给定来流总温总压;出口边界为体积流量出口边界;壁面边界,采用绝热无滑移条件.

3 试验验证

图6为加工完成后的叶轮、蜗壳以及引射器的样机组合示意图.图7给出了离心泵的整体试验方案.

按照图7所示的试验方案对离心泵样件进行了试验,得到离心泵在不同流量条件下泵的进出口压力,基于该数据预测了泵的扬程、效率以及必需气蚀余量.并将试验数据与数值模拟结果进行对比,验证性能.表1给出了该型离心泵在1500 L/h流量下数值模拟和试验数据.

在不同流量工况下预测了性能参数,将预测结果与试验结果进行对比,给出流量-扬程、流量-效率、流量-必需气蚀余量的曲线,如图8、图9、



图6 离心泵样机示意图

Fig. 6 Centrifugal pump's model machine

图10所示.

根据表1、图8~图10可以看出,本文使用的基于Pumplinx下的数值模拟能够准确地模拟离心泵性能,预测的扬程、效率以及必需气蚀余量与试验数据基本一致.随着流量的增加,该泵的扬程值越来越小,效率至设计流量时最大然后稍有降低, Δh_r 值越来越大,均符合离心泵一般规律.在不同流量工况下,该型离心泵均能满足航空涡轴发动机对离心泵性能特性的需求.

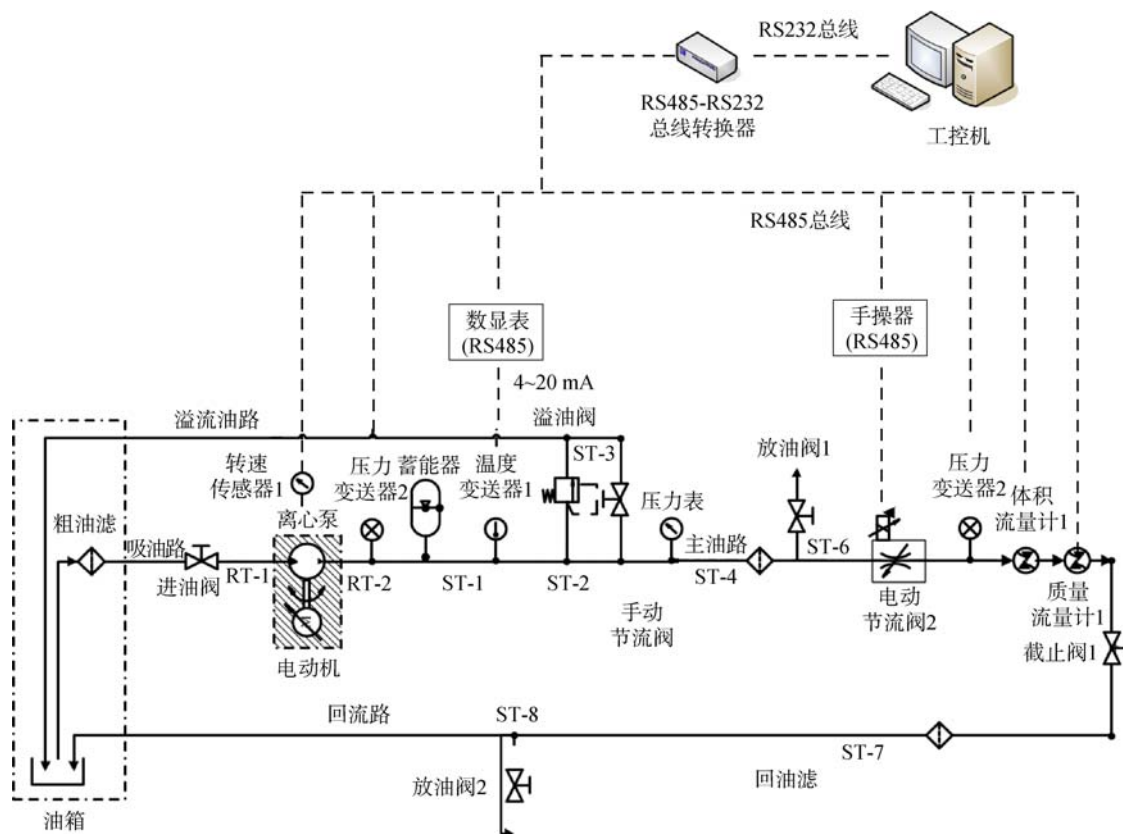


图7 离心泵试验方案

Fig. 7 Test program of centrifugal pump

表 1 离心泵扬程、效率以及必需气蚀余量数值模拟及试验预测结果
(流量为 1500 L/h)

Table 1 Comparison with simulation and test
(Volume flow of 1500 L/h)

参数	试验	数值模拟	偏差/%
H/m	22.5	22.9	1.7
效率	0.65	0.69	5
$\Delta h_r/\text{m}$	1.84	1.89	2.6

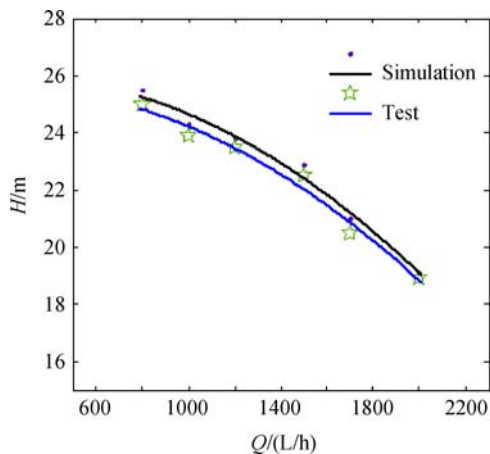


图 8 离心泵 $Q-H$ 曲线数值模拟与试验对比
Fig. 8 Centrifugal pump's $Q-H$ curve of simulation and test

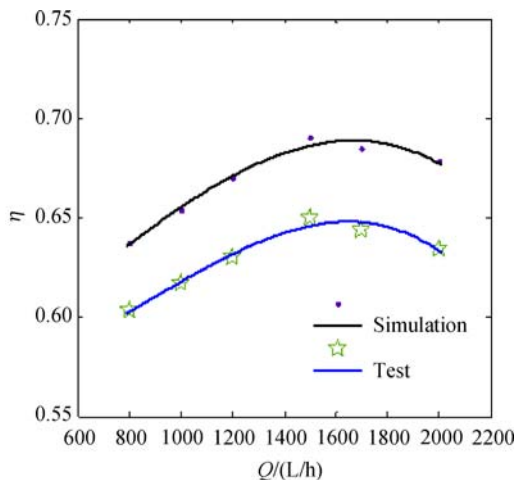


图 9 离心泵 $Q-\eta$ 曲线数值模拟与试验对比
Fig. 9 Centrifugal pump's $Q-\eta$ curve of simulation and test

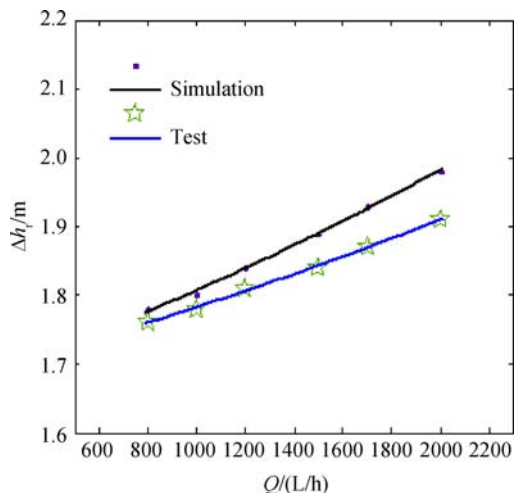


图 10 离心泵 $Q-\Delta H_r$ 曲线数值模拟与试验对比
Fig. 10 Centrifugal pump's $Q-\Delta H_r$ curve of simulation and test

4 数值计算

4.1 计算网格

带引射器多级导流叶轮结构的航空燃油离心泵由于几何结构非常复杂,其叶轮型线扭曲度大,引射器与泵入口接口处及蜗壳隔舌角处的网格过渡处理复杂.为此叶轮采用多块拓扑结构的方式分别划分正反两侧叶轮流道网格;引射器与蜗壳流道采用八叉树的方式划分非结构网格,最终生成离心泵混合网格.

叶轮结构化网格划分时,采用多块拓扑结构的方式,将叶轮上下叶片的计算域模型分为关于原点对称的周期模型,这样便使得复杂模型相对简单,更好地完成高质量结构网格.单个模型进行网格划分时,将单独的计算域建立多区域划分即形成多块拓扑结构.图 11 所示为上下叶轮单独计算域划分的多块拓扑关系.

引射器与蜗壳本身结构相对简单,适合非结构网格的计算迭代方式,非结构网格采用四面体网格 (Tetra),迭代格式采用八叉树即 Robust (Octree) 计算方法.最终离心泵混合网格划分模型如图 12 所示,其中叶轮的网格数为 1232 357,蜗壳的网格数为 585 922,引射器的网格数为 116 358,整个计算区域的网格数为 1934 637.

进行数值计算时,将本文使用的混合网格模型与全流道非结构网格进行了对比,叶轮的结构网格与非结构网格如图 13 所示.混合网格划分方式更能适应引射器多级导流叶轮结构.

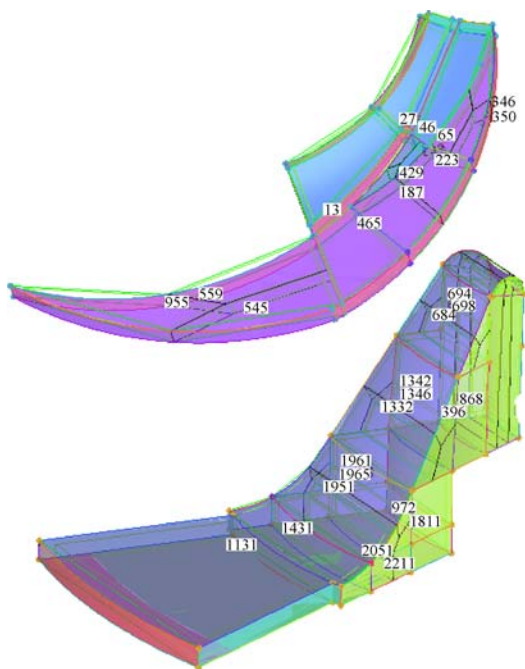


图 11 叶轮单流道多块拓扑结构

Fig. 11 Multi-block structures of the impeller

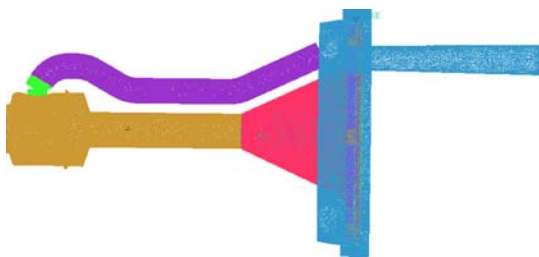


图 12 离心泵混合网格模型

Fig. 12 Hybrid grid model of centrifugal pump

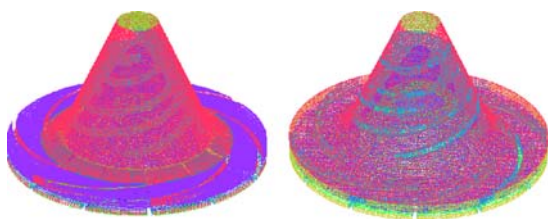


图 13 叶轮结构网格与非结构网格对比

Fig. 13 Comparison with structure grid and unstructured grid

4.2 内流场数值模拟

为了对该泵性能有全面的研究,选取了转速为 10678 r/min,流量为 1000, 1500, 2000 L/h 三个流量点进行分析。

图 14~图 16 给出了离心泵 3 个流量点在径向中间截面下的压力分布云图。

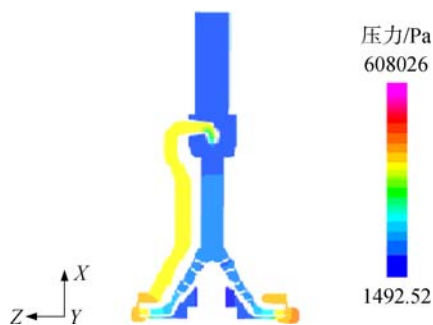


图 14 1000 L/h 离心泵径向中间截面压力云图

Fig. 14 Pressure nephogram of pump in 1000 L/h of middleradial area

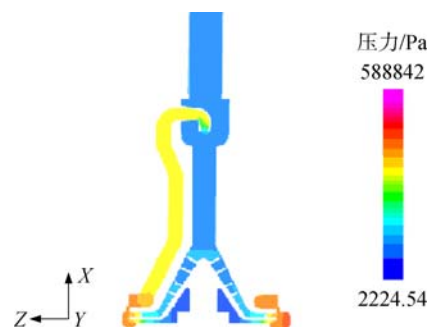


图 15 1500 L/h 离心泵径向中间截面压力云图

Fig. 15 Pressure nephogram of pump in 1500 L/h of middleradial area

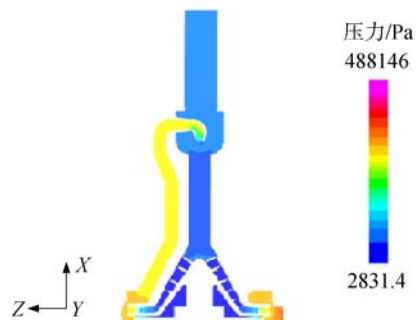


图 16 2000 L/h 离心泵径向中间截面压力云图

Fig. 16 Pressure nephogram of pump in 2000 L/h of middleradial area

图 14~图 16 可以看出,从叶轮进口至离心泵出口压力越来越大,且变化趋势非常均匀,没有范围大的低压区或者突变的高压区。1000 L/h(小流量工况)离心泵增压能力较其他两个流量状态下要强,随着流量增压而降低,且 1500 L/h(设计流量)下,出口压力符合要求。引射器将燃油从叶轮出口引至导流管入口的过程中,燃油压力在引射器中越来越小,但是到导流管入口处,仍能提供一定的燃油压力,用来提供离心泵入口压力,从而

改善离心泵的气蚀特性. 在不同流量下, 引射器与泵入口接口处形成了一定范围的低压团, 且大流量较小流量范围小.

图 17~图 19 给出了离心泵轴面中间截面压力分布云图.



图 17 1000 L/h 离心泵轴向中间截面压力云图
Fig. 17 Pressure nephogram of pump in 1000 L/h of middle axial area

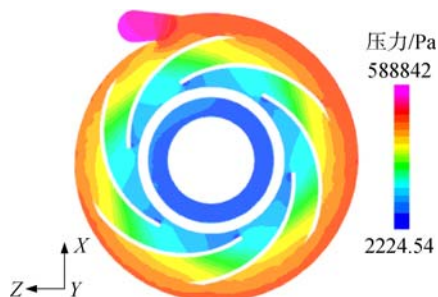


图 18 1500 L/h 离心泵轴向中间截面压力云图
Fig. 18 Pressure nephogram of pump in 1500 L/h of middle axial area

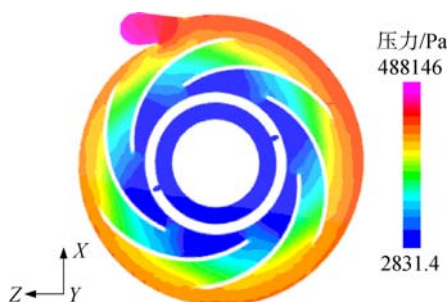


图 19 2000 L/h 离心泵轴向中间截面压力云图
Fig. 19 Pressure nephogram of pump in 2000 L/h of middle axial area

图 17~图 19 可以看出, 离心泵小流量工况下, 叶轮内压力整体分布均匀, 没有较大的压力梯度; 各个流道内压力分布规律基本一致, 叶轮通道内, 相同半径处叶片压力侧的压力高于吸力侧的压力. 叶轮入口至出口, 压力均匀增大; 流体在蜗

壳内流动比较平稳, 伴随着叶轮的旋转运动, 流体在蜗壳中沿着出流方向, 压力越来越高直到蜗壳出口处达到最大. 由于蜗壳的影响, 叶轮整体的压力分布呈明显的非对称性, 其中大流量工况下叶轮内压力的非轴对称性强于小流量工况.

整体来说, 带引射器的多级导流叶轮离心泵能够很稳定的将蜗壳入口处的部分压力顺利地引入离心泵入口处, 且叶轮、蜗壳以及引射器整体的压力分布均匀, 均没有大范围漩涡流等不利流动.

4.3 气蚀特性数值模拟

离心泵在高转速、大流量的工况下, 泵的进口条件最为恶劣, 即为泵的最差气蚀状态. 针对该型一体式航空燃油离心泵最大工作状态: 转速为 10678 r/min, 流量为 2000 L/h, 进行气蚀性能数值模拟研究.

按 GJB 6242-87 的要求, 气液比 $V/L=0.45$ 时, 来计算航空燃油泵的气蚀特性, 相当于进口绝对压力为 0.045 MPa. 进行气蚀数值模拟时, 通过改变进口压力, 来实现气液比的改变. 对转速为 10678 r/min, 流量为 2000 L/h 工况下, 进口压力分别为 0.1, 0.07, 0.045 MPa 各个条件进行仿真研究. 内流场压力分布与气蚀性能仿真结果如图 20~图 22 所示.

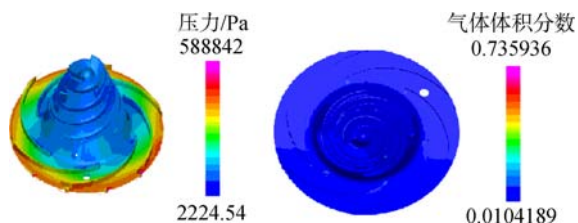


图 20 离心泵进口压力为 0.1 MPa 时压力分布云图与蒸气分布图

Fig. 20 Pressure nephogram and cavitation nephogram of pump in at 0.1 MPa of inlet pressure

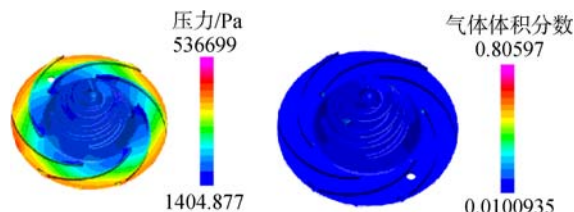


图 21 离心泵进口压力为 0.07 MPa 时压力分布云图与蒸气分布图

Fig. 21 Pressure nephogram and cavitation nephogram of pump in at 0.07 MPa of inlet pressure

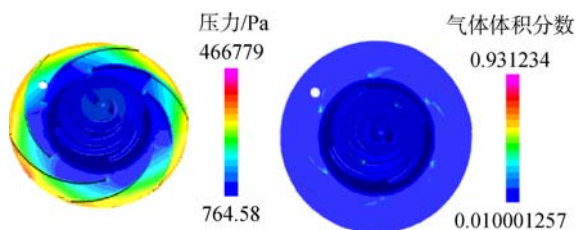


图 22 离心泵进口压力为 0.045 MPa 时压力分布云图与蒸气分布图

Fig. 22 Pressure nephogram and cavitation nephogram of pump inlet at 0.045 MPa of inlet pressure

图 20~图 22 可以看出,该型号离心泵在最差工况下进行气蚀性能仿真,结果表明,该工况下未发生气蚀现象,泵在入口压力降低后,增压能力没有产生较大变化,均能提供正常的增压值,说明离心泵入口处没有气泡堵塞,仍能正常工作,满足性能需求.且随着入口压力的降低,蒸气体积分数越来越大,蒸气主要出现在叶片进口处,且由此向四周发散,叶轮从进口方向看为逆时针旋转,故可见叶片的吸力面的蒸气体积分数比例要比背力面高很多.高于进口压力 0.045 MPa 以上,即 GJB6242-87 要求的工作范围内,带引射器的多级导流叶轮航空燃油离心泵蒸气含量均不是很大,增压能力均能达到其扬程要求.表明该型航空燃油离心泵在工作范围内有很强的抗气蚀特性.

通过不同工况下离心泵气蚀性能的数值模拟,来进行该型离心泵的气蚀特性预测.式(1)和式(2)可以预测出离心泵的扬程 H 与气蚀余量 Δh .

$$H = \frac{p_{\text{out}} - p_{\text{in}}}{\rho g} + \Delta H \quad (1)$$

$$\Delta h = \frac{p_{\text{in}} - p_v}{\rho g} \quad (2)$$

式中 p_{in} 为泵进口处的总压力(Pa); p_{out} 为泵出口处的总压力(Pa); ΔH 为泵进出口的高度差(m); p_v 为局部温度下的气化压力(Pa).

不同流量工况下,通过改变入口的总压,按式(1)和式(2)计算得到各个流量下的 NPSH 值.改变 NPSH 后给出 1500 L/h 工况下完全气蚀状态仿真结果,如图 23 所示.

从图 23 中可以看出,在 $\Delta h=1.75$ m 时,即进口压力 $p_{\text{in}}=0.018$ MPa,叶片上蒸气体积最大,为该泵完全气蚀状态.离心泵发生气蚀状态后,会随着进口压力降低即 Δh 值降低而使得气体体积分数增加,使泵的气蚀破坏越来越明显.该流量工况

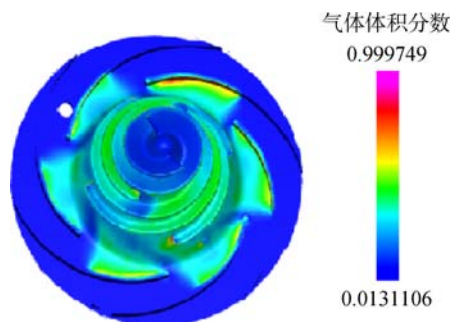


图 23 $\Delta h=1.75$ m 时,离心泵完全气蚀状态

Fig. 23 Full cavitation state at Δh is 1.75 m

下,进口压力处于 0.018 MPa 以下,发生完全气蚀状态,小于要求的最小进口压力 0.027 MPa,且满足航空标准要求的离心泵工作最小压力 0.045 MPa,表明带引射器的多级导流叶轮航空燃油离心泵能够满足航空涡轴发动机对于气蚀特性的要求.

通过大量数值仿真数据得出各个流量工况下 Δh - H 值,拟合出不同流量工况下的 Δh - H 曲线,如图 24 所示.

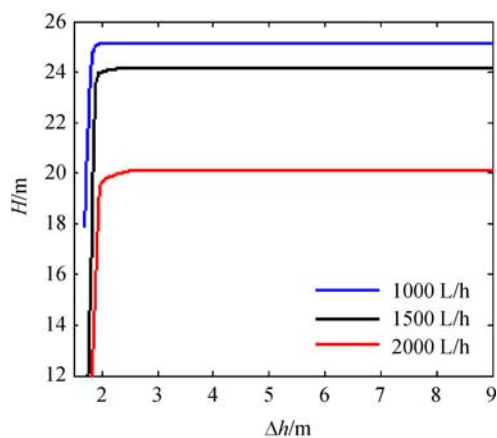


图 24 离心泵数值模拟预测 Δh - H 曲线

Fig. 24 Centrifugal pump's Δh - H curve of simulation

图 24 中当 Δh 值接近 2 时,扬程 H 出现明显下降的趋势,说明此时离心泵叶轮内开始有气泡产生,当 Δh 继续变小时,扬程曲线变成陡降的形状,按工程上规定,取扬程陡降 3% 的点为必需气蚀余量 Δh_r . 图 24 中可以看出,各个工作流量下的 Δh_r 值均小于 2,且流量越大,该 Δh_r 值越大,符合离心泵的 Δh - H 变化规律.该型泵的临界气蚀状态均发生在较低的进口压力下,能够在较大的工作压力范围下提供很高的抗气蚀能力,满足航空涡轴发动机对于气蚀特性的要求.

5 结 论

本文对带引射器的多级导流叶轮航空燃油离心泵开展了气蚀特性研究工作. 主要结论如下:

1) 基于 Pumplinx 下的数值模拟, 能够准确地研究该型离心泵的内流场性能和气蚀特性. 各个流量工况下内流场压力分布均匀, 效率高. 且针对航空涡轴发动机的工作特性即小流量状态下, 能够高效的供给足够的压力.

2) 该泵在航空涡轴发动机要求的工作范围内不会产生气蚀现象, 且产生完全气蚀现象的最小进口压力 0.018 MPa 小于技术要求的最小进口压力 0.027 MPa, 表明该型离心泵的正常业务范围满足国军标要求及工作需求, 具有更高的抗气蚀性能.

以上结论表明: 本文所研究的带引射器的多级导流叶轮航空燃油离心泵无论是增压、工作效率、抗气蚀能力上均具有独特优势. 文中的相关结论已用于该型产品的设计生产, 并对该型产品的性能改型设计及新型研制有一定的指导意义.

参考文献:

- [1] 刘尚勤. 离心泵用作航空发动机主燃油泵研究[J]. 航空发动机, 2006, 32(2): 43-45.
LIU Shangqin. Investigation of centrifugal pump used as a eroengine main fuel pump[J]. Aeroengine, 2006, 32(2): 43-45. (in Chinese)
- [2] 樊思齐. 航空发动机控制[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- [3] 刘尚勤, 王磊. 航空发动机的一种新型主燃油泵设计[J]. 航空发动机, 2003, 29(2): 5-7.
LIU Shangqin, WANG Lei. Design of a new main fuel pump for Aeroengine[J]. Aeroengine, 2003; 29(2): 5-7. (in Chinese)
- [4] 牟介刚. 离心泵现代设计方法研究和工程实现[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005.
- [5] Kurokawa J, Hode S. Prediction of outlet flow characteristics of centrifugal impeller[J]. Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineerings, 2011, 28(241): 254-258.
- [6] Thai Q, Lee C. The cavitation behavior with short length blades in centrifugal pump[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(10): 2007-2016.
- [7] Marx Y P. Unsteady simulations of impeller diffuser interactions centrifugal pump[J]. EPFL Supercomputing Review, 1997, 11(9): 185-194.
- [8] 程效锐, 李仁年, 黎义, 等. 螺旋离心泵瞬态特性的数值分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(8): 186-192.
CHENG Xiaorui, LI Rennian, LI Yi, et al. Numerical analysis on transient regime of screw-type centrifugal pump [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(8): 186-192. (in Chinese)
- [9] 张永学, 陈龙, 周鑫, 等. 高效率离心泵水力设计及 BVF 诊断[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(6): 479-483.
ZHANG Yongxue, CHEN Long, ZHOU Xin, et al. Hydraulic design and BVF diagnosis of high efficiency centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(6): 479-483. (in Chinese)
- [10] 吴大转, 孙幼波, 陈涛, 等. 多级离心泵半开式叶轮参数优化的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(1): 75-78.
WU Dazhuan, SUN Youbo, CHEN Tao, et al. Numerical study on key parameters optimization of semi-unshrouded impeller[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(1): 75-78. (in Chinese)
- [11] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
- [12] 蒲志理. 航空油泵设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [13] 任璇, 姜华川, 王飞, 等. 基于 Pumplinx 的离心泵优化设计研究[R]. 贵阳: 第 15 届中国科协年会: 航空发动机设计、制造与应用技术研讨会, 2013.
- [14] Huang D G, Zhuang Y Q, Cai R Z. A computational method for caviational flows based on energy conservation[J]. Journal of Mechanical Engineer in Science, 2007, 221(11): 1333-1338.
- [15] Singhal A K, Athaval M M, Li H. Mathematical basis and validation of the full caviation model[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 617-624.
- [16] Cheah K W, Lee T S, Winoto S H. Numerical flow simulation in a centrifugal pump at design and off-design conditions[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2007, 115(10): 342-350.

(编辑: 秦理曼)