

# 轮毂形状对诱导轮性能的影响

宋沛原, 李家文, 唐 飞

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

**摘 要:** 在离心泵前加置诱导轮是保证离心泵获取优越汽蚀性能的关键途径。针对某型号液体火箭发动机诱导轮, 采用 CFD 技术研究了轮毂型线形状对诱导轮汽蚀性能和扬程的影响。结果表明, 在具有相同入口流动状态条件下, 改变诱导轮轮毂型线形状可使诱导轮产生不同扬程。

**关键词:** 液体火箭发动机; 诱导轮; 轮毂; 扬程

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2012) 02-0038-06

## Effect of hub shape on performance of inducer

SONG Pei-yuan, LI Jia-wen, TANG Fei

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The inducer mounted in front of the centrifugal pump is a key way to ensure the centrifugal pump to achieve the excellent cavitation performance. In allusion to the inducer of a certain liquid rocket engine, CFD technique was adopted for researching the influence of hub shape on the cavitation performance and pumping head of inducer. The results show that, under the condition of the same inlet flow, changing the inducer-hub shape can make the inducer to generate the different pumping head.

**Keywords:** liquid rocket engine; inducer; hub; head of delivery

## 0 引言

为提高航天运输系统的有效载荷, 要求推进剂供应系统能够工作在尽可能低的入口压力条件下。由于诱导轮具有小载荷、高稠度、小冲角等特点, 使液体绕流叶片型面时压降较小, 因此诱导轮能在低入口压力、局部出现汽蚀的条件下工作。

为了进一步提高诱导轮的性能, 国内外研究者对诱导轮形状展开了广泛而深入的研究。日本东北大学流体科学研究所、航空宇宙技术研究所角田宇宙推进技术研究中心和大阪大学在研究 H-II 火箭的 LE-7 诱导轮时发现, 改变诱导轮前方进料管的几何尺寸, 就可以改善诱导轮的汽蚀性能, 并抑制了泵轴的振动<sup>[1-2]</sup>。Bakir 应用商用 CFD 软件 CFX, 基于 N-S 方程和零方程湍流模

收稿日期: 2011-10-24; 修回日期: 2011-12-29

基金项目: 国家高技术项目(2009AA705405)

作者简介: 宋沛原 (1986—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机离心泵



1.2 网格生成

为了减少计算量，根据周期性边界条件选取 1/3 流道划分结构网格，对于叶片吸力面前缘、轮缘间隙以及轮毂处等需要关注的局部加密处理。计算网格数约为 35 万。

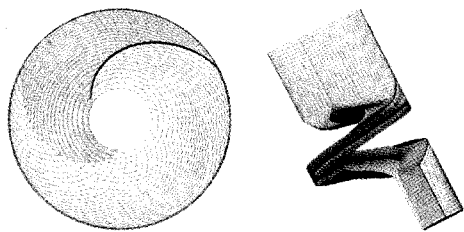


图 3 计算网格  
Fig. 3 Calculation grid

1.3 汽蚀模型

Singhal 等人给出的完全汽蚀模型考虑了汽蚀流动中的相变、空泡动力学、湍流压力脉动和流体内含有的非凝结性气体的影响。

在该模型中，假设了初始流场中含有不可冷凝小气核，这些小气核在液体中处于溶解或混合状态。在来流中给定了不可冷凝气体的质量分数，所以整个流动的不可冷凝气体的含量都是常数，但其密度随着当地压强的变化而变化。这样，就引入了混合密度函数  $\rho$ ，它和蒸汽质量分数  $f_v$  的关系如下：

$$\frac{1}{\rho} = \frac{f_v}{\rho_v} + \frac{f_g}{\rho_g} + \frac{1-f_v-f_g}{\rho_l}$$

式中：下标 v、g 和 l 分别代表蒸汽、气体和液体状态；蒸汽质量分数  $f_v$ ，由蒸汽输运方程、质量守恒方程和动量守恒方程联合求解。蒸汽输运方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t} = (\rho f_v) + \nabla (\rho f_v V) = R_e - R_c$$

式中： $V$  是速度矢量； $R_e$  代表空泡的产生和膨胀的相变率； $R_c$  代表空泡的压缩和破裂的相变率。 $R_e$  和  $R_c$  从描述空泡在液体中运动特性的 Rayleigh-Plesset 方程推导得出：

当  $p_{sat} > p$  时，

$$R_e = C_e \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(p_{sat} - p)}{3\rho_l}}$$

当  $p_{sat} < p$  时，

$$R_c = C_c \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(P_{sat} - P)}{3\rho_l}} f_v$$

式中： $C_e$ 、 $C_c$  为相变率系数， $C_e=0.02$ ， $C_c=0.01$ ； $V_{ch}$  为当地特征速度（约等于当地的湍流强度）； $\sigma$  为饱和液体的表面张力系数； $p_{sat}$  为液体饱和蒸汽压， $p$  为当地操作压强。

1.4 计算方法及边界条件

采用旋转坐标系，进口条件为压力进口，出口条件为质量流量出口，固壁面采用无滑移边界条件，工质选用液态水（300 K）。

2 计算结果与分析

2.1 性能分析

表 2 是各方案诱导轮性能比较。

表 2 各方案诱导轮性能比较

Tab. 2 Performances of inducers designed with various schemes

	扬程/MPa	效率/%
方案 1	1.600	71.2
方案 2	1.650	70.7
方案 3	1.786	70.0
方案 4	1.840	69.2
方案 5	1.839	69.2

从表 2 可以看出，与方案 1 直锥轮毂诱导轮相比，方案 2，3，4，5 诱导轮在保证效率没有明显下降的基础上能提高扬程，其中方案 4 和方案 5 可以提高 15%。

2.2 汽蚀性能分析

图 4 是各方案诱导轮的汽蚀性能曲线。

从图 4 可以看出，各方案中当  $NPSH=16$  m 时，诱导轮扬程开始下降。当  $NPSH=14$  m 时，扬程下降幅度超过 3%。方案 2，3，4，5 诱导轮在提高扬程的同时，还能保持与方案 1 大致相同



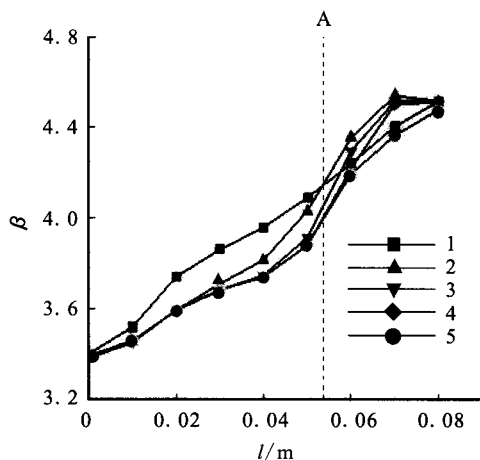


图 8 各方案诱导轮液流角曲线

Fig. 8 Curves for flow angles of various inducers

图 7 可以分成三个部分来分析, 第一部分 A~B; 第二部分 B~C; 第三部分 C~D。

第一部分是诱导轮入口段, 即是诱导轮叶片刚开始接触流体的区域, 此时诱导轮叶片还未对流体做功, 所以扬程没有增加。

流体流通到第二部分时, 叶片对流体做功, 流体的压能逐渐增大; 从图中可以看出方案 2, 3, 4, 5 诱导轮此时产生的扬程已明显高于方案 1 直锥轮毂诱导轮, 而且由于受到诱导轮轮毂型线的影响, 方案 2, 3, 4, 5 诱导轮具有不同的扬程。

第三部分为诱导轮出口阶段, 由于受到出口安放角流动损失的影响, 扬程保持不变。

从图 8 可以看出在诱导轮入口段各方案诱导轮液流角很小, 随着流体向后流动, 液流角逐渐增大, 但受轮毂型线的影响, 方案 2, 3, 4, 5 液流角增长趋势小于方案 1; 至诱导轮出口阶段, 由于各方案诱导轮轮毂型线不同, 所以液流角也不尽相同。

图 9 为各方案诱导轮流体轴向速度随轴向位置变化的曲线。

从图 9 可以看出, 大约在轴向位置 0.053 m 之前, 方案 2, 3, 4, 5 诱导轮流体的轴向速度小于方案 1; 在轴向位置 0.053 m 之后, 方案 2, 3, 4 诱导轮流道面积减小, 所以方案 2, 3, 4 诱导轮流体通过轴向截面的轴向速度大

于方案 1; 方案 5 诱导轮轮毂型线逐渐接近于方案 1, 所以方案 5 诱导轮流体轴向速度逐渐与方案 1 相同。

图 10 是各方案诱导轮叶尖绝对速度切向分量随轴向位置变化的曲线。

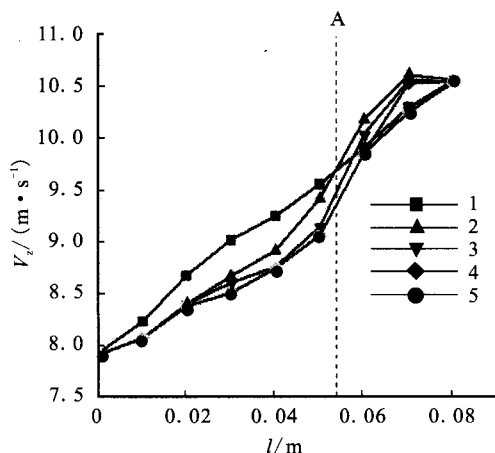


图 9 各方案诱导轮流体轴向速度

Fig. 9 Fluid axial velocity of various inducers

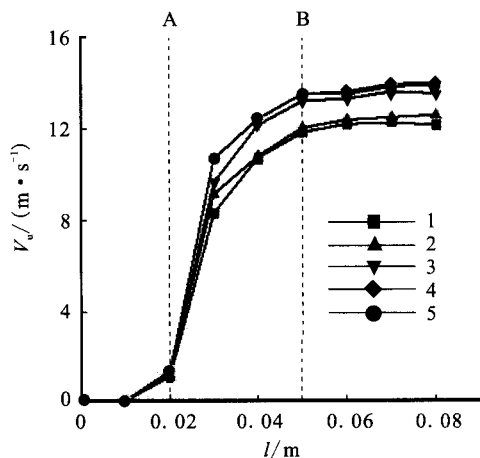


图 10 叶尖绝对速度的切向分量

Fig. 10 Tangential components of blade tip absolute velocity

从图 10 可以看出, 在 0.02 m 之前, 各方案诱导轮叶尖绝对速度的切向分量变化不大, 大约在 0.02 m 之后由于受轮毂型线形状的影响, 各方案诱导轮叶尖绝对速度切向分量随轴向位置依次增大, 至诱导轮出口阶段, 各方案诱导轮叶尖绝对速度切向分量增长趋势减缓。

从图 7、图 8、图 9 和图 10 可看出: 方案 1 到方案 4 诱导轮产生的扬程逐次增大, 流体通过各个轴向截面的轴向速度依次减小, 叶尖绝对速度的切向分量依次增大; 方案 4 和方案 5 诱导轮轮毂型线只在出口阶段不同, 但产生的扬程、轴向速度与叶尖绝对速度切向分量差异很小, 说明诱导轮出口阶段对诱导轮性能影响不大。

### 3 结论

初步探索了轮毂形状对诱导轮内部流场流动特性的影响, 获得如下结论:

- 1) 在具有相同入口流动状态条件下, 不同轮毂形状的诱导轮具有大致相同的汽蚀性能;
- 2) 轮毂型线对诱导轮扬程有显著影响, 因此, 在诱导轮设计过程中, 必须考虑轮毂形状的影响;
- 3) 诱导轮出口阶段对扬程增加没有显著作用, 因此在保证诱导轮效率的前提下, 可以选择方案 5 来代替直锥轮毂诱导轮。

#### 参考文献:

- [1] HASHIMOTO T, YOSHIDA M W. Experimental study on rotating cavitation of rocket propellant pump inducers[J]. Journal of Propulsion and Power 1997, 13 (4): 488-494.
- [2] HASHIMOTO T, YAMADA H, FUNATSU S. Rotating cavitation in three and four-bladed inducers [C]// Proceedings of 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Seattle, WA: AIAA, 1997: 111-119.
- [3] BAKIR F, KOUIDRI S, NOUGUERA R. Experimental analysis of an axial inducer influence of the shape of the blade leading edge on the performance in cavitating regime[J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125: 293-301.
- [4] SEMENOV Y, FUJII A, TSUJIMOTO Y. Rotating choke in cavitating turbopump inducer transations of the ASME[J]. Journal of Fluids Engineering, 2004, 126: 87-93.
- [5] 黄建德, 谷传纲. 诱导轮形状对汽蚀特性的影响[J]. 航空动力学报, 2000, 15(2): 31-35.
- [6] J K 杰科布森. 液体火箭发动机涡轮泵诱导轮[M]. 傅轶青, 陈炳贵, 译. 北京: 国防工业出版社, 1976.
- [7] 李向阳, 王晓峰. 液氧/煤油发动机煤油预压涡轮泵技术[J]. 火箭推进, 2009, 35(1): 21-24.
- [8] WATANABE Satoshi, KIM Jun-Ho. Numerical/experimental investigations on inlet back flow in a helical inducer in partial flow conditions [C]// Proceedings of ASME/JSME Fluids Engineering Conference. San Diego, California, USA: ASME, 2007: 893-898.
- [9] 唐飞, 李家文, 陈晖, 等. 采用环形入口壳体的诱导轮汽蚀性能研究[J]. 机械工程学报, 2011 (4): 171-176.
- [10] 李斌, 栾希亭, 张小平. 载人登月主动力--大推力液氧煤油发动机研究[J]. 载人航天, 2011 (1): 28-33.
- [11] 张民庆, 张蒙正, 毛根旺. 某型液体火箭发动机燃烧不稳定性鉴定实验研究[J]. 航空工程进展, 2011 (2): 226-230.
- [12] 窦唯. 液体火箭发动机用过滤器流阻特性及试验[J]. 导弹与航天运载技术, 2011 (1): 10-13.

(编辑: 王建喜)