

提高液体火箭发动机诱导轮汽蚀性能的研究

唐 飞¹, 李家文², 李 永¹, 周 成¹

(1. 北京控制工程研究所, 北京 100190; 2. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 诱导轮叶型的设计应尽可能减少静压降, 并保证叶片的负荷分布均匀, 减轻叶片的汽蚀破坏。利用 CFD 技术分析了阶梯壳体和叶片打孔对诱导轮叶片负荷的影响, 计算结果表明这些措施都可以降低叶片前缘的负荷。相比较于叶片打孔, 阶梯壳体更加有助于降低叶片前缘的负荷, 在一定程度上提高诱导轮汽蚀性能。最后, 通过基于混合模型的汽蚀计算验证了上述结论的正确性。

关键词: 诱导轮; 叶片负荷; 壳体开槽; 叶片打孔; 汽蚀性能

中图分类号: V434+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 03-0044-06

Study on improving cavitation performance of inducer for liquid rocket engine

TANG Fei¹, LI Jia-wen², LI Yong¹, ZHOU Cheng¹

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190;

2. School of Astronautics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The blade shape design of inducer should depress the drop of static pressure, ensure the load uniformity on the blade and alleviate destroy of cavitation. The effects of case with steps and punching at blades on inducer blade load are analyzed by using CFD technology. The results show that the measures can decrease the load of blade leading edge. Compared with punching on the blades, it is more easy for the case with steps to reduce the load of blade leading edge and improve the cavitation performance of inducer. The cavitation calculation based on the mixture model was performed, and the above conclusion was confirmed.

Keywords: inducer; blade load; case grooving; punching at blade; cavitation performance

0 引言

高速诱导轮是现代液体火箭发动机中提高涡轮泵性能的关键部件, 它的基本设计任务是保证

抽吸性能, 以避免主泵叶轮发生汽蚀。但是, 诱导轮内部常常会出现各种汽蚀现象, 导致压力和流量急剧下降, 影响发动机的正常工作。同时, 由汽蚀所诱发的流场脉动和转子振动会严重影响液体火箭发动机的性能、稳定性和寿命。

收稿日期: 2012-09-18; 修回日期: 2012-12-12

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2007JY02)

作者简介: 唐飞 (1982—), 男, 博士, 研究领域为航天器推进技术

美国 P&W 公司为 NASA 研发航天飞机主发动机 (SSME) 的改进型高压液氧涡轮泵, 在研制初期的涡轮泵组合件热试过程中, 遇到了较严重的超同步振动, 不仅磨损了诱导轮叶片和密封装置, 而且导致试验件提前关机。故障诊断表明, 汽蚀是激发超同步响应的主要因素^[1]。

1999 年日本 H-II 火箭第八次发射失败, 通过飞行数据与计算结果对比、发动机残骸微观分析和地面试验等研究认为: LE-7 发动机液氧涡轮泵诱导轮出现汽蚀, 其诱发的脉动与泵前的导流叶片固有频率发生共振使得叶片出现断裂, 并使发动机停机最终导致发射失败^[2]。

欧洲阿里安 V 的火神发动机液氢涡轮泵诱导轮中也发生了汽蚀, 使转子承受较大的不平衡径向载荷, 导致轴承磨损过大。在欧洲空间局的支持下, 法国、意大利和德国等合作围绕旋转汽蚀引起的转子动力学问题开展了大量实验和 CFD 研究, 并将其作为新一代上面级 Vinci 发动机涡轮泵的重要考核指标^[3]。

诱导轮应用广泛、设计方法比较成熟, 但针对其汽蚀研究则相对较少。由于所有诱导轮的设计思路基本上是使诱导轮进口几何条件满足流动条件, 即 Brumfield 准则为指导。所以, 关于提高火箭发动机汽蚀性能的方法归纳起来大体分为三类: 提高进口压力, 改进进口或叶尖间隙流场, 控制叶片载荷^[4]。研究表明, 诱导轮采用阶梯壳体和叶片打孔等方法可以改变进口及叶尖间隙流场, 提高诱导轮的汽蚀性能。但是, 对于这两种结构参数改变对诱导轮汽蚀性能影响, 目前还没有较为系统的研究。

1 数值计算

1.1 研究对象

本文所研究的诱导轮的主要参数为转速 $n=18\ 000\ \text{rpm}$, 叶片数 $Z=3$ 。由于氧泵诱导轮通常是用水而不是用液氧作试验, 为了与实验结果进行对比, 计算中工质采用液态水。为准确反映诱导轮内部流动的真实情况, 本文所建立的几何模型与真实结构尽量保持一致, 如进口边修圆打磨、前缘与尾缘小圆倒角、叶片剖面形状和叶根倒角等。具体的结构图和网格图如下所示:

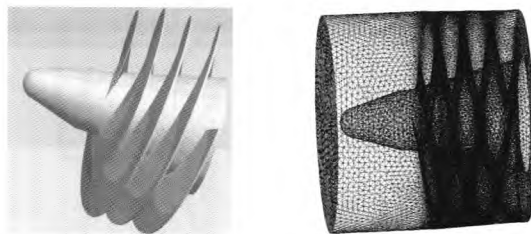


图 1 诱导轮模型及流道网格图

Fig. 1 Model and corresponding grids of inducer

1.2 求解模型及计算方法

本文对计算域采用了四面体非结构网格, 与结构网格相比, 更适用于几何形状复杂流道的网格划分, 并具有良好的自适应性。对于叶片吸力面前缘、叶顶间隙等需要关注的局部作为一个单独的模块, 用尺寸函数进行网格加密处理。流场的计算单元约为 75 万, 计算节点约为 20 万个。

数值计算采用有限体积法进行离散, 动量项等采用二项迎风格式。计算中采用旋转坐标系, 进口条件为速度进口, 速度分布均匀, 出口条件为压力出口, 固壁面采用无滑移边界条件。针对本文的三维粘性流动, 计算中对湍流核心区域的流动采用 RNG $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型, 在临近固壁的区域采用标准壁面函数公式将区域内的物理量与湍流核心区的求解变量关联。所有控制方程计算采用了基于 SIMPLE 的标准压力修正算法。计算中先不考虑汽蚀的影响。

1.3 计算结果及叶片受力分析

1.3.1 计算结果

通过数值计算得到的诱导轮吸力面静压分布图如图 2 所示。

从图 2 可见, 诱导轮进口压力低, 出口压力高, 这与诱导轮提高泵抗汽蚀性能的作用相符合。当诱导轮置于叶轮前面增加了叶轮进口处流体的压力, 避免了汽蚀的发生。值得注意的是, 最小压力出现在诱导轮吸力面的进口附近的外缘, 显然, 这是最容易发生汽蚀的地方, 这一点与理论分析结果相吻合。

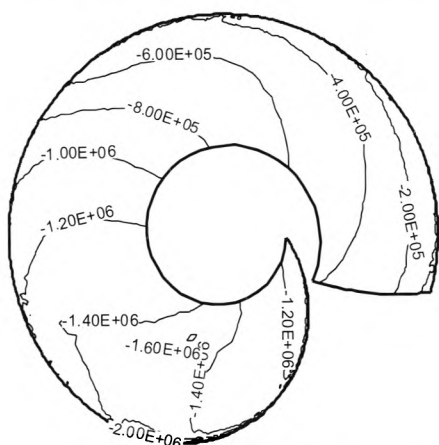


图 2 诱导轮吸力面静压分布图 (Pa)

Fig. 2 Static pressure distribution on suction surface of inducer

1.3.2 诱导轮叶片的受力分析

高性能诱导轮的一个重要特征是在保证做功能力条件下自身具有良好的进口性能, 即较小的必需汽蚀余量。因此, 叶型的设计应尽可能减少静压力降并保证叶片的负荷分布均匀, 减少汽泡的产生, 减轻叶片的汽蚀破坏。

由于做功, 使诱导轮叶片内出现局部的低静压区。而叶片做功主要体现在叶片压力面与吸力面的压差, 表现为叶片所承受的轴向负载。如果负载越大, 则说明压差越大, 吸力面的静压就越小, 汽蚀区域也会越大, 反之亦然。所以, 可以通过分析诱导轮叶片表面所承受的载荷, 来分析叶片表面静压的大致分布。为了便于比较分析, 将诱导轮叶片前缘分成 5 个区域。

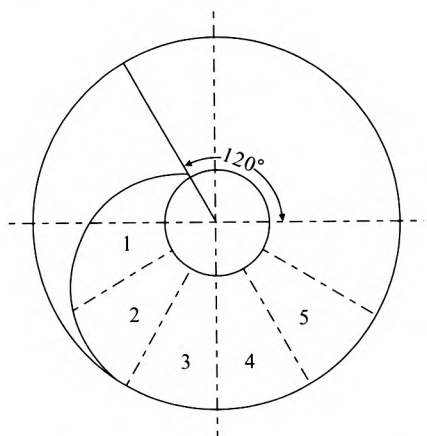


图 3 诱导轮叶片前缘分区示意图

Fig. 3 Sketch of subarea at blade leading edge

5 个区域是根据诱导轮前缘包角来划分的, 1 区域的包角变化范围为 $0\sim 90^\circ$, 2 区域的包角变化范围为 $90\sim 120^\circ$, 3 区域的包角变化范围为 $120\sim 150^\circ$, 4 区域的包角变化范围为 $150\sim 180^\circ$, 5 区域的包角变化范围为 $180\sim 210^\circ$ 。分别计算出 5 个区域所承受的轴向负荷如表 1 所示。

表 1 诱导轮前缘区域叶片受力情况

Tab. 1 Stress on blade leading edge

	1 区	2 区	3 区	4 区	5 区
F/N	100	780	950	880	740

从表 1 可以发现, 从区域 2 开始之后, 叶片所承受的负载比较大, 其中在区域 3 达到最大值。说明在区域 2 和 3 的静压值相对比较低, 汽蚀容易发生在该区域。而区域 4 和 5 虽然所承受的负载也比较大, 但由于受到了叶片的做功, 使静压得到较大的升高, 所以在这两个区域并不会发生汽蚀。

2 诱导轮阶梯壳体的研究

诱导轮进口处的几何尺寸的改变能使诱导轮进口处的流动发生很大的变化, 对诱导轮的汽蚀性能产生影响^[5]。通过在诱导轮采用阶梯壳体的方法来增加叶尖处的回流, 提高汽蚀区域的压力。阶梯壳体示意图如图 4 所示。

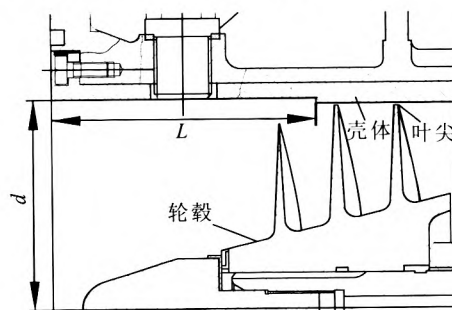


图 4 阶梯壳体平面示意图

Fig. 4 Plane sketch of case with steps

其中的 L 为阶梯壳体轴向长度 (以叶片轴向起始位置为基准), d 为阶梯壳体高度。诱导轮轮毂半径为 71 mm, 叶尖与壳体之间的间隙为

0.75 mm。为了分析阶梯壳体深度以及高度对整个诱导轮汽蚀性能的影响, 本文在原方案的基础上, 选取了 8 组阶梯壳体方案, 各方案的参数如表 2 所示。

表 2 各阶梯壳体方案参数比较

Tab. 2 Comparison of parameters for cases with steps								
方案	A	B	C	D	E	F	G	H
d/mm	72.75	73.75	74.75	74.75	74.75	72.75	74.75	73.75
L/mm	94	94	94	89	99	99	101	89

由于阶梯壳体部分的流动是本文比较关心的部位, 而此处的流动比较复杂, 所以需要对该部分网格进行局部加密处理。通过 Gambit 中的尺寸函数来进行叶尖处和阶梯壳体处的网格局部加密。通过计算得到各方案的扬程和效率如表 3 所示。

表 3 阶梯壳体的计算结果比较

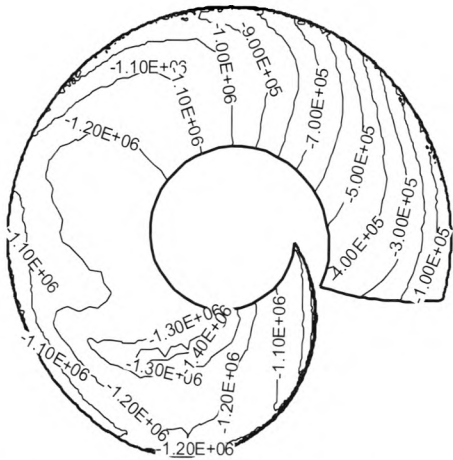
Tab. 3 Calculated results of case with steps								
方案	A	B	C	D	E	F	G	H
扬程/ m	197.6	193.7	195.6	199.8	193.4	191.7	188.54	196.7
效率/ %	72.3	71.2	71.5	72.4	71.4	70.8	69.7	72.2

各方案叶片所承受的轴向负载如表 4 所示。

表 4 阶梯壳体各方案叶片受力比较

Tab. 4 Stress of blade for each scheme of case with steps								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1 区	40	80	90	35	140	75	130	30
2 区	570	350	290	560	170	340	150	570
3 区	700	570	520	910	220	500	200	900
4 区	860	830	825	880	380	580	300	890
5 区	840	800	860	810	720	770	520	790

由于诱导轮可以牺牲一定的扬程和效率来提高其汽蚀性能, 所以综合效率、扬程和诱导轮叶片所承受的载荷来看, 方案 E 为所计算的方案中的最优方案。方案 E 的阶梯壳体深度为 3 mm, 阶梯壳体轴向位置为 99 mm。分析表 4, 发现阶梯壳体深度和轴向长度越大, 越能降低叶片所承受的轴向负载, 降低压力面与吸力面的压差, 改善诱导轮的汽蚀性能。



3 诱导轮叶片打孔的研究

根据试验研究表明,叶片上打孔可以提高诱导轮吸力面的静压分布,减小局部最小静压分布的区域面积,降低叶片所承受的载荷。为此,本文对诱导轮叶片打孔进行分析研究。由于汽蚀主要发生在修圆末端,所以将打孔的位置选定在叶片包角 120° 附近,打孔为 $3 \times \Phi 3$, 孔的排列方式分布为径向排列,如图 6 所示。

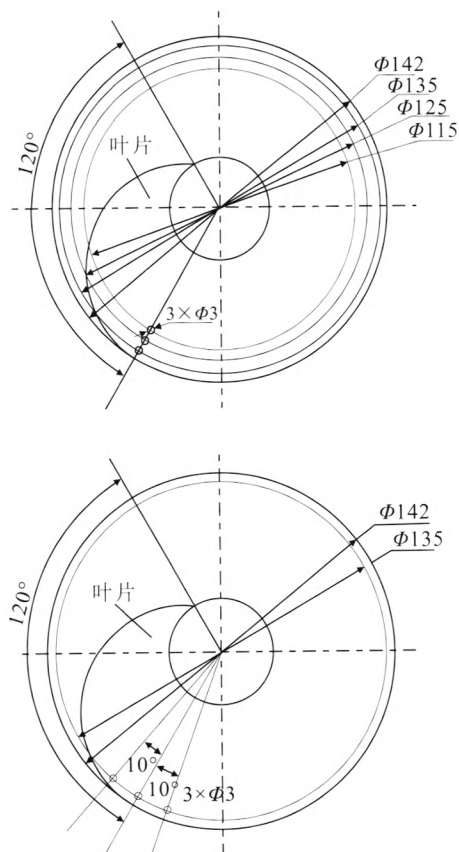


图 6 径向打孔和周向打孔示意图

Fig. 6 Sketch of radial and circumference punching

通过数值计算得到两方案叶片受力、扬程以及效率如表 6 所示。

图 7 为周向打孔方案叶片吸力面的静压分布图。

分析表 6 和图 7, 打孔都可以降低诱导轮前缘叶片所承受的轴向负载, 但是效果又不及方案 E。分析原因, 可能是由于孔的面积相对于槽的

面积比较小, 对局部的压力分布有一定的影响, 但是对整个叶片进口段的压力分布要比开槽的影响小很多。所以, 由于回流的区域比较大, 开槽方案的效果要好于打孔方案。

表 6 打孔方案计算结果比较

Tab. 6 Calculated results of punching schemes

	1 区 /N	2 区 /N	3 区 /N	4 区 /N	5 区 /N	扬程 /m	效率 /%
径向 打孔	20	530	720	610	590	192.1	72.3
周向 打孔	40	650	840	750	700	190.2	72.1

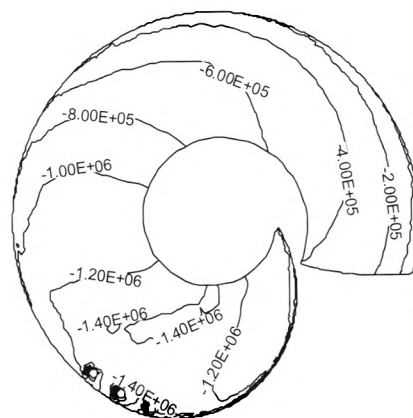


图 7 周向打孔方案叶片吸力面的静压分布图 (Pa)

Fig. 7 Contours of static pressure on suction surface of blade with circumference punching

4 汽蚀比较计算

4.1 数值计算模型

诱导轮汽蚀流场计算选用混合模型。混合模型是一种简化的多相流模型, 它用于模拟各相有不同速度的多相流, 假定了多相流在短空间尺度上局部的平衡。混合模型可以在某些情况下很好地替代欧拉模型。

4.1.1 基本控制方程

1) 连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = \dot{m} \quad (1)$$

式中: \vec{v}_m 为质量平均速度, $\vec{v}_m = \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k \right) / \rho_m$;

ρ_m 为混合密度, $\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$; α_k 为第 k 相的体积分数; ρ_k 为第 k 相的密度; \dot{m} 为汽蚀所产生的质量传递。

2) 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{v}_m) + \nabla (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \quad (2)$$

式中: \vec{F} 为体积力; μ_m 为混合粘性系数, $\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$; $\vec{v}_{dr,k}$ 为第二相 k 的漂移速度, $\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m$ 。

3) 能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \sum_{k=1}^n [\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)] = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (3)$$

式中: k_{eff} 为有效热传导率, 右边的第一项代表了由于传导造成的能量传递; S_E 包含了所有的体积热源, 而 E_k 为

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (4)$$

上式是针对可压缩相而言。对不可压缩相有 $E_k = h_k$, 这里 h_k 是第 k 相的显焓。

4.1.2 汽蚀动力学方程

单个气泡体积关于空间和时间的变化由下式给出:

$$\Phi(r, t) = \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (5)$$

式中: R 为气泡的半径。

蒸发的体积分数定义为

$$\alpha_v = \frac{\Phi \eta}{1 + \Phi \eta} \quad (6)$$

式中: η 为单位流体容积内的气泡数量。

汽蚀体积分数方程是从混合连续方程中获得的。经过处理后, 假定为不可压缩的液体, 可以获得下面的表达式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v) + \nabla (\alpha_v \vec{v}_m) = \frac{\rho_l \eta}{\rho_m (1 + \eta \Phi)^2} \frac{d\Phi}{dt} + \frac{\alpha_v \rho_v}{\rho_m} \frac{d\rho_v}{dt} \quad (7)$$

由于气泡在低温下形成液体, 等温模拟气穴流动, 忽略了蒸发潜热。汽蚀动力学方程采用 Rayleigh-Plesset 方程, 它与压力和气泡体积 Φ 相关:

$$\frac{p_B - p}{\rho_l} = R \frac{d^2 R}{dt^2} + 1.5 \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_l R} + 4 \frac{\mu_l}{\rho_l R} \frac{dR}{dt} \quad (8)$$

式中: p_B 为气泡内的压力, 由蒸汽的部分压力 p_v 和非凝结气体的部分压力 p_g 之和来表示; σ 为表面张力系数。

为了简化计算, 假设气泡产生及消失的过程由下式描述:

$$\begin{aligned} p_v < p \text{ 时, } \frac{dR}{dt} &= \left(\frac{2(p_B - p)}{3\rho_l} \right)^{1/2} \\ p_v > p \text{ 时, } \frac{dR}{dt} &= - \left(\frac{2(p_B - p)}{3\rho_l} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (9)$$

4.2 数值计算结果

采用混合模型, 将各方案进行汽蚀计算。根据实验条件, 工质的温度为 30 °C。计算得到的汽蚀曲线图如图 8 所示, 图中 A 表示原方案, B 表示 120° 周向打孔方案, C 表示方案 E。

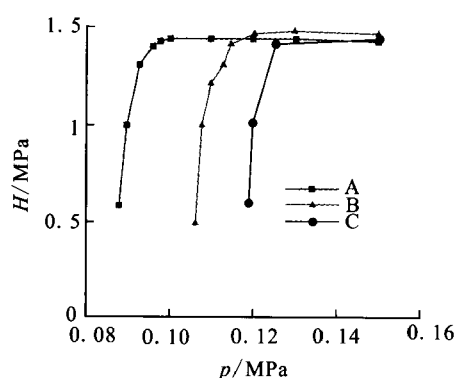


图 8 汽蚀计算结果

Fig. 8 Result of cavitation calculation

从图 8 可知, 阶梯壳体和叶片打孔都能提高诱导轮的汽蚀性能。阶梯壳体改善的汽蚀性能要优于叶片打孔, 这与上面所分析的结论一致。

(下转第 57 页)

间。从 $\delta p_e/\delta p_i$ 和 $(m+1)$ 的变化趋势可以看出, 泵动增益随入口压力增大而减小。 $\delta p_e/\delta p_i$ 与 $(m+1)$ 差别很大, 由此可见仅用 $\delta p_e/\delta p_i$ 值来表示泵动态增益并不准确, 而动增益更能准确地描述泵的流体动力学传递关系。

6 结论

通过对某型发动机氧泵的 POGO 动态水试, 获取了泵关键动特性参数及参数的规律特性。泵入口压力 p_i 在 0.2~0.55 MPa 范围, 无量纲 C_b 的大小在 1.2~6.5 之间, 且随 p_i 的增高而减小。 M_b 随压力的变化不明显, 但随频率的增高迅速减小。 $(m+1)$ 变化的总体趋势为随 p_i 的增高而减小; 当 p_i 为 0.245 MPa 时, $(m+1)$ 随频率的增高而增大; 当 p_i 为 0.55 MPa 时, $(m+1)$ 随频率的增高基本保持不变。

参考文献:

- [1] OTSUKA S, TSUJIMOTO Y, KAMIJO K, et al. Frequency dependence of mass flow gain factor and cavitation compliance of cavitating inducers [J]. Journal of Fluids Engineering, 1996 (6): 400-408.
- [2] DOTSON K W, RUBIN S, SAKO B H. Effects of unsteady pump cavitation on propulsion-structure interaction (POGO) in liquid rockets, AIAA2004-2027 [R]. USA: AIAA, 2004.
- [3] RUBIN Sheldon. An interpretation of transfer function data for a cavitating pump, AIAA2004-4025 [R]. USA: AIAA, 2004.
- [4] SHIMURA Takashi. Geometry effects in the dynamic response of cavitating LE-7 liquid oxygen pump [J]. Journal of Propulsion and Power, 1995 (2): 330-336.
- [5] IACOPOZZI M, LIGNAROLO V, PREVEL D. POGO characterization of ARIANE V turbopump LOX pump with hot water, AIAA 93-2124[R]. USA: AIAA, 1993.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 49 页)

5 结论

根据本文所进行的研究工作, 可以认为:

1) 根据所选取阶梯壳体方案的计算结果分析来看, 阶梯壳体的深度和轴向长度越大, 能够提高诱导轮吸力面局部低压区的静压值, 能够改善诱导轮的汽蚀性能, 并降低叶片所承受的载荷。

2) 径向打孔和周向打孔, 由于孔的面积相对于阶梯壳体的面积比较小, 对局部的压力分布有一定的影响, 但是对整个叶片进口段的压力分布要比阶梯壳体的影响小很多。

3) 由于回流的区域比较大, 阶梯壳体方案的效果要好于打孔方案。

4) 本文所作的数值计算还需要通过试验进

行验证。

参考文献:

- [1] ROBERT S R, LOREN A G. The space shuttle main engine liquid oxygen pump high-synchronous vibration issue, the problem, the resolution approach, the solution, AIAA94-3153 [R]. USA: AIAA, 1994.
- [2] ONO A, WARASHIUA S, TOMARU H. development of cryogenic turbopumps for the LE-7A Engine [J]. IHI Engineering Review, 2004, 37(1): 50-56.
- [3] GOIRAND B, MERTZ A, COUSSELLIN F, et al. Experimental investigations of radial loads induced by partial cavitation with liquid hydrogen inducer [J]. Journal of Fluids engineering, 1992, 114(3), 411-420.
- [4] 陈晖, 张恩昭, 李斌. 诱导轮旋转空化-诱发不稳定现象的研究与进展[J]. 水泵技术, 2006 (2): 1-6.
- [5] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.

(编辑: 张永秀)