

三叶片两级诱导轮的气蚀性能研究

李欣¹, 肖立明¹, 刘畅¹, 胡声超¹, 李家文², 王珏³

(1. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 2. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;
3. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 为了研究三叶片两级诱导轮的气蚀性能, 通过试验获取了诱导轮的水力性能和气蚀性能曲线, 观察了两级诱导轮的气蚀发展变化情况, 分析了其内部的压力脉动现象, 并与单级诱导轮进行了对比。结果表明: 两级诱导轮能减小初生气蚀数, 降低同步旋转气蚀的强度, 但在 $1.1 Q_d$ 和设计流量 Q_d 工况下, 两级诱导轮发生了频率为 21 Hz 的径向不稳定现象。

关键词: 两级诱导轮; 气蚀性能; 回流; 同步旋转气蚀

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2018)06-0086-05

Study on cavitation performance of a two-stage inducer with three-blades

LI Xin¹, XIAO Liming¹, LIU Chang¹, HU Shengchao¹, LI Jiawen², WANG Jue³

(1. Beijing Astronautical Systems Engineering Institute, Beijing 100076, China;
2. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China;
3. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to study the cavitation performance of a two-stage inducer with three-blades, the hydraulic and cavitation performance in two-stage inducer were obtained through experiments. In addition, the cavitation development was observed with visualization tests, and the pressure fluctuation inside the inducer passage was investigated by Fast Fourier Transformation and compared with single-stage inducer. The results show that the two-stage inducer can improve the cavitation performance by reducing the incipient cavitation number and decreasing the intensity of synchronous rotating cavitation. However, under the conditions of design flow Q_d and $1.1 Q_d$, a radial instability with a frequency of 21 Hz occurred in the two-stage inducer.

Keywords: two-stage inducer; cavitation performance; backflow; synchronous rotating cavitation

0 引言

涡轮泵是液体火箭发动机的关键组件之一, 它由涡轮和泵两部分组成, 其中泵的作用是对推进剂

进行增压。泵通常包括诱导轮和离心轮, 其中诱导轮的作用是为离心轮进行增压, 防止离心轮发生气蚀。气蚀会造成泵的性能迅速下降, 从而影响整个火箭发动机的正常工作。在实际应用中, 为了减轻

贮箱重量,诱导轮入口的压力通常不能设置太高,受工况变化或其他干扰因素的影响,可能会产生严重的气蚀。因此如何提高诱导轮的气蚀性能成为各国学者研究的重点。

当诱导轮发生气蚀时,在某些工况下,还可能产生气蚀不稳定现象,如旋转气蚀^[1-3]、气蚀喘振^[4]等,使得诱导轮承受脉动压力,引起轴振动等,从而影响泵的正常工作的。为了提高诱导轮的气蚀性能,抑制气蚀不稳定现象的发生,国内外学者进行了大量研究。1993年,日本学者 Tsujimoto^[5-6]创造性地提出了第一个较为完整的旋转气蚀理论计算模型,研究了旋转气蚀的影响因素。2006年, Ugajin 等^[7]采用 DES (Detached Eddy Simulation) 方法对诱导轮内的气蚀流动进行了非定常数值计算,通过计算分析发现:当气穴延伸或接近于叶片流道的喉部时,气穴体积的脉动幅值将会增加。2007年, Tomaru 等^[8]在诱导轮入口壳体处开回流限制槽 (Backflow Restriction Step) 成功抑制了气蚀喘振。2009年, Watanabe 等^[9]研究了热力学效应对诱导轮叶尖泄漏涡气蚀的影响,同时针对一个两叶片诱导轮,研究了其小流量下的回流结构^[10]。2012年,韩国的 Lee 等^[11]研究了一个两叶片诱导轮的气蚀性能,观察到了非对称气蚀和气蚀喘振,通过分析他们发现气穴附近的局部流动对非对称气蚀的发生有重要影响,而非对称气蚀会对诱导轮的扬程产生影响。他们还研究了一个两叶片两级式诱导轮的气蚀性能,发现两级式诱导轮与传统的单级式诱导轮相比对气蚀喘振和非对称气蚀等气蚀不稳定现象有较好的抑制作用^[12]。2015年, Campos-Amezcuca 等^[13]采用数值仿真方法研究了诱导轮的非稳态气蚀流,结果显示气穴最初出现在叶片前缘,其变化主要受流量和吸力面压力的影响,他们指出旋转气蚀的产生主要是因为片状气蚀与下一级叶片前缘的相互作用。

国内北京航空航天大学^[14-16]、西安航天动力研究所^[17]等单位针对诱导轮的气蚀性能也开展了大量研究。笔者曾研究了变螺距诱导轮的气蚀性能^[18],本文主要以之前的诱导轮为基础,在前面设计了一级短叶片诱导轮,使原来的诱导轮变成两级诱导轮。通过试验,研究了该两级诱导轮的扬程特性与气蚀性能,并且与原诱导轮进行了比较。

1 研究对象

原诱导轮的参数见文献[18],将原诱导轮作为第二级诱导轮,第一级诱导轮设计为短叶片等螺距诱导轮,主要参数见表1,具体设计方法见参考文献[12]中的设计方法。两级诱导轮实物如图1所示。

表1 第一级诱导轮参数

Tab. 1 Main parameters of the first-stage inducer

外径/mm	叶片数	叶片角/(°)	轮毂直径/mm
70	3	9	36



图1 两级诱导轮

Fig. 1 Two-stage inducer

2 试验方法

诱导轮试验装置和试验方法同文献[18]。试验时采用水作为试验工质,试验转速为4 000 rpm。试验采用两个溅射薄膜压力传感器(型号:CYB-20S;量程:-0.1~0.7 MPa,精度:0.5%),分别用来测量诱导轮入口压力和压升,另有两个同类型的压力传感器(型号:CYB-20S;量程:-0.1~1.0 MPa,精度:0.5%)间隔90°安装在透明壳体上用来测量压力脉动。试验数据采集频率设为1 600 Hz,并且持续4秒。

3 试验结果与分析

诱导轮的流量、入口压力和扬程分别用无量纲数流量系数、气蚀数和扬程系数表示。

$$\Phi = \frac{Q}{\pi \Omega r_T^3}$$

$$\sigma = \frac{p_1 - p_v}{0.5 \rho \Omega^2 r_T^2}$$

$$\Psi = \frac{p_2 - p_1}{\rho \Omega^2 r_T^2}$$

式中: Φ 为流量系数; σ 为气蚀数; Ψ 为扬程系数; Ω 为转速,rad/s; r_T 为诱导轮叶尖直径,m; Q 为体积流量, m^3/s ; p_v 为介质的饱和蒸汽压,Pa; p_1 为诱导轮入口静压,Pa; ρ 为介质密度, kg/m^3 ; p_2 为诱导轮出口静压,Pa。

3.1 水力性能试验结果

两级诱导轮的水力性能试验结果见图 2,图中红色曲线表示原诱导轮单独试验获得的结果,绿色曲线表示两级诱导轮的试验结果。可以看出,两级诱导轮的扬程要整体低于原诱导轮,在设计流量 Q_d 下,两级诱导轮的扬程比原诱导轮低 15.3%,但随着流量增大,扬程差逐渐减小,在流量系数 $\Phi = 0.074\ 5$ 时,两级诱导轮的扬程比原诱导轮低 8.1%。两级诱导轮中,第一级诱导轮的作用是为了改善第二级诱导轮的入口条件,为避免第一级诱导轮发生气蚀,采用了 5 mm 的大叶尖间隙。受第一级诱导轮影响,介质在第二级诱导轮入口存在预旋,于是第二级诱导轮对介质做功减少,导致诱导轮扬程比原诱导轮低。

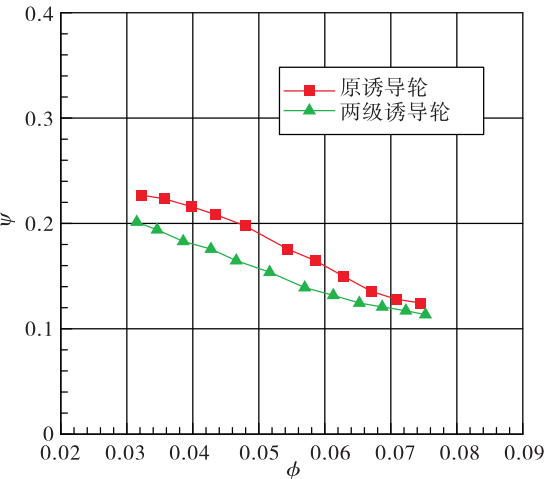


图 2 诱导轮的水力性能
Fig. 2 Hydraulic performance of the inducer

3.2 气蚀性能试验结果

图 3 是两级诱导轮的气蚀性能曲线,图中实线表示两级诱导轮试验结果,虚线表示原诱导轮单独试验获得的结果。对比图 3 中实线和虚线,发现两级诱导轮在设计流量 Q_d 和 $1.1\ Q_d$ 工况下试验曲线存在阶梯点,但是阶梯点下降的扬程比原诱导轮少,具体见表 2;而在 $0.8\ Q_d$ 工况下,两级诱导

轮在气蚀严重时,扬程下降缓慢,并且不存在阶梯点。

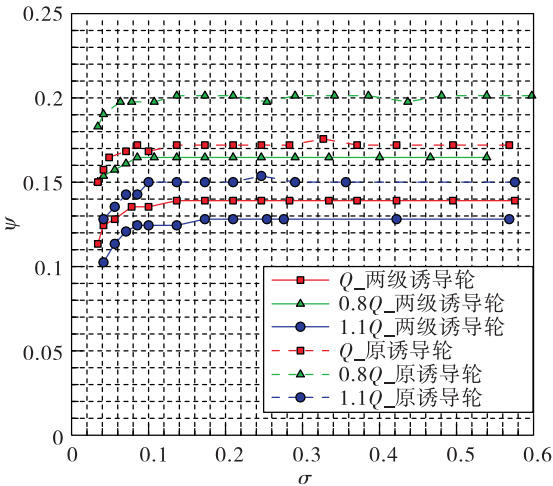
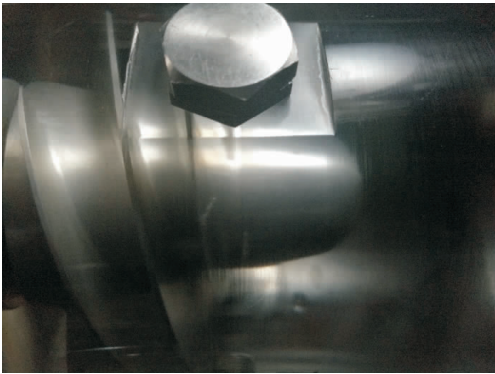


图 3 诱导轮气蚀性能
Fig. 3 Cavitation performance of the inducer

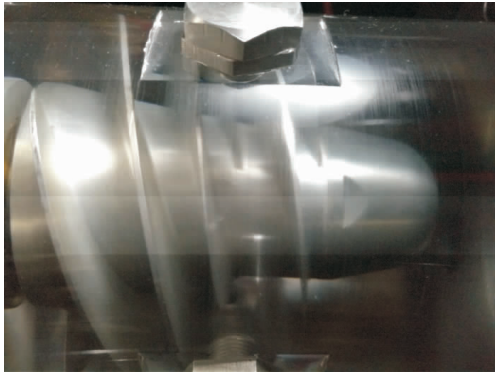
表 2 气蚀性能曲线阶梯点扬程下降百分比
Tab.2 Head drop percentage of the step point in cavitation performance curve

	%		
	$0.8Q_d$	Q_d	$1.1Q_d$
原诱导轮	1.8	2.3	4.9
两级诱导轮	0	2.3	2.9

通过可视化试验,观察了原诱导轮和两级诱导轮的初生气蚀,见图 4。不同流量下诱导轮的初生气蚀数见表 3。从表中可以明显看出,三种流量下,两级诱导轮的初生气蚀数均比原诱导轮小,即两级诱导轮对气蚀产生有一定的抑制作用。



(a) 原诱导轮设计流量下的初生气蚀 $\sigma=0.422\ 1$



(b) 两级诱导轮设计流量下的初生气蚀 $\sigma=0.334\ 3$

图 4 原诱导轮与两级诱导轮的初生气蚀
Fig. 4 Inception cavitation of original inducer and two-stage inducer

表 3 两级诱导轮的初生气蚀数与原诱导轮对比
Tab.3 Comparison of inception cavitation number between original inducer and two-stage inducer

流量	$0.8Q_d$	Q_d	$1.1Q_d$
原诱导轮 $\sigma_{初}$	0.597 8	0.422 1	0.290 3
两级诱导轮 $\sigma_{初}$	0.539 2	0.334 3	0.253 7

两级诱导轮在不同流量下入口压力的瀑布图见图 5 ~ 图 7。从图中看出,两级诱导轮内部发生了同步旋转气蚀现象。并且在设计流量 Q_d 和 $1.1\ Q_d$ 流量下,当 $\sigma=0.034\ 1$ 时,频率 $f=43\ \text{Hz}$ 处也出现了压力峰值,经过分析,该频率为两个旋转单元体频率的叠加,单个旋转单元体的频率为 $21\ \text{Hz}$,方向为径向。

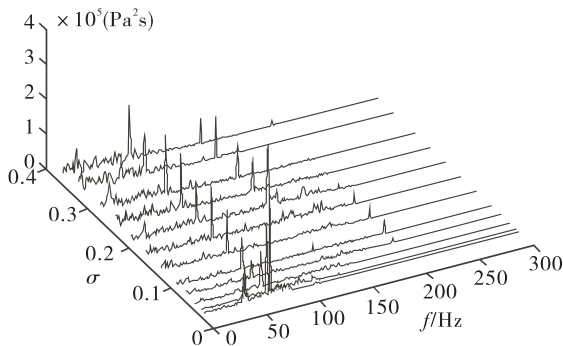


图 5 设计流量 Q_d 下两级诱导轮入口压力的瀑布图
Fig. 5 Waterfall plot of inlet static pressure fluctuation of two-stage inducer under design flow Q_d

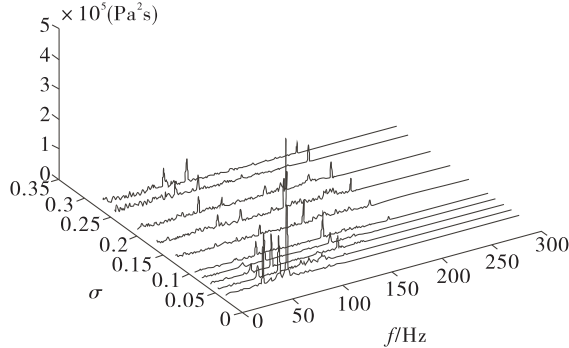


图 6 $1.1Q_d$ 下两级诱导轮入口压力的瀑布图
Fig. 6 Waterfall plot of inlet static pressure fluctuation of two-stage inducer under $1.1Q_d$

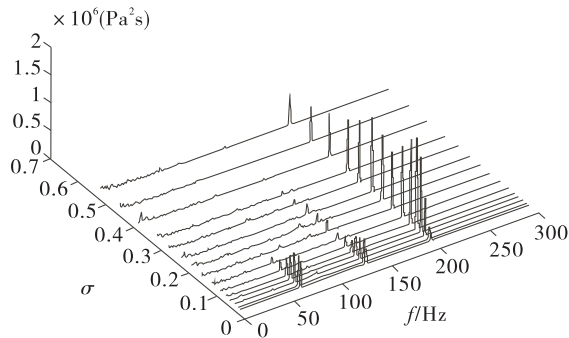


图 7 $0.8Q_d$ 下两级诱导轮入口压力的瀑布图
Fig. 7 Waterfall plot of inlet static pressure fluctuation of two-stage inducer under $0.8Q_d$

不同流量下,两级诱导轮与原诱导轮同步旋转气蚀引起的压力脉动的幅值对比见表 4。从表中可以看出,在 $0.8\ Q_d$ 、设计流量 Q_d 和 $1.1\ Q_d$ 工况下,同步旋转气蚀的最大脉动幅值分别降低了 21.8% 、 40.1% 和 45.8% ,说明两级诱导轮对同步旋转气蚀具有抑制作用,这是因为一级诱导轮改变了二级诱导轮内的气穴形状^[12],但在设计流量 Q_d 和 $1.1\ Q_d$ 工况下也引起了新的 $21\ \text{Hz}$ 的径向不稳定现象。

表 4 不同流量下同步旋转气蚀引起的最大压力脉动幅值对比
Tab.4 Amplitude comparison of maximum pressure fluctuation caused by synchronous rotating cavitation under different flow rates

流量	$0.8Q_d$	Q_d	$1.1Q_d$
原诱导轮最大脉动幅值/kPa	3.07	3.84	4.98
两级诱导轮最大脉动幅值/kPa	2.4	2.3	2.7

4 结 论

本文通过试验研究了两级诱导轮的气蚀性能,并与原诱导轮进行了对比研究,得到以下结论:

1) 两级诱导轮的一级诱导轮采用大叶尖间隙,增强了回流,改善了二级诱导轮的气蚀性能,使同流量下初生气蚀数比原诱导轮减小,但因为第一级诱导轮在第二级诱导轮入口产生了预旋,导致第二级诱导轮做功减小,诱导轮扬程比原诱导轮低。

2) 两级诱导轮能有效减小同步旋转气蚀的强度,但在 $1.1Q_d$ 和设计流量 Q_d 工况下,两级诱导轮发生了频率为 21 Hz 的径向不稳定现象。

参考文献:

- [1] TSUJIMOTO Y, KAMIJO K, BRENNEN C E. Unified treatment of flow instabilities of turbomachines[J]. Journal of propulsion and power, 2001, 17(3): 636 – 643.
- [2] TSUJIMOTO Y, YOSHIDA Y, MAEKAWA Y, et al. Observations of oscillating cavitation of an inducer[J]. Journal of fluid engineering, 1997, 119(4): 775 – 781.
- [3] HASHIMOTO T, YAMADA H, FUNATSU S, et al. Rotating cavitation in three and four-bladed inducers: AIAA – 1997 – 3026[R]. Reston: AIAA, 1997.
- [4] FURUKAWA A, ISHIZAKA K, WATANABE S. Flow measurement in helical inducer and estimate of fluctuating blade force in cavitation surge phenomena[J]. JSME international journal, 2002, 45(3): 672 – 677.
- [5] TSUJIMOTO Y, KAMIJO K, YOSHIDA Y. A theoretical analysis of rotating cavitation in inducers[J]. Journal of fluids engineering, 1993, 115(1): 135 – 141.
- [6] TSUJIMOTO Y, WATANABE S, KAMIJO K, et al. A non-linear calculation of rotating cavitation in inducers[J]. Journal of fluids engineering, 1996, 118(3): 589 – 594.
- [7] UGAJIN H, KAWAI M, OKITA K, et al. Numerical simulation of unsteady cavitating flow in a turbopump inducer: AIAA 2006 – 5068[R]. Reston: AIAA, 2006.
- [8] TOMARU H, UGAJIN H, KAWAACKI S, et al. Suppression of cavitation surge in a turbopump inducer by the backflow restriction step[C]//43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Cincinnati: AIAA, 2007.
- [9] WATANABE S, FURUKAWA A, YOSHIDA Y, et al. Analytical investigations of thermodynamic effect on cavitation characteristics of sheet and tip leakage vortex cavitation [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation. Ann Arbor: [s. n.], 2009.
- [10] WATANABE S, INOUE N, ISHIZAKA K, et al. A study on back flow structure in a 2-bladed helical inducer at a partial flow rate[C]//Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting. Colorado: ASME, 2009.
- [11] LEE K, CHOI J, KANG S. Cavitation performance and instability of a two-bladed inducer[J]. Journal of propulsion and power. 2012. 28(6): 1168 – 1175.
- [12] LEE K, CHOI J, KANG S. Study on the suppression of cavitation instability in a two-stage inducer[J]. Journal of propulsion and power. 2012. 28(5): 946 – 954.
- [13] CAMPOS-AMEZCUA R, BAKIR F, CAMPOS-AMEZCUA A, et al. Numerical analysis of unsteady cavitating flow in an axial inducer[J]. Applied thermal engineering, 2015, 75(2): 1302 – 1310.
- [14] 唐飞, 李家文, 李永鹏, 等. 提高液体火箭发动机诱导轮汽蚀性能的研究[J]. 火箭推进, 2013, 39(3): 44 – 49, 57.
- TANG F, LI J W, LI Y P, et al. Study on improving cavitation performance of inducer for liquid rocket engine[J]. Journal of rocket propulsion, 2013, 39(3): 44 – 49, 57.
- [15] 叶汉玉, 李家文, 李欣. 诱导轮旋转汽蚀数值模拟[J]. 火箭推进, 2014, 40(4): 43 – 49.
- YE H Y, LI J W, LI X. Numerical simulations of rotating cavitation in inducer[J]. Journal of rocket propulsion, 2014, 40(4): 43 – 49.
- [16] LI X, LI J, WANG J, et al. Study on cavitation instabilities in a three-bladed inducer[J]. Journal of propulsion and power. 2015. 31(4): 1051 – 1056.
- [17] 陈晖, 李斌, 张恩昭, 等. 液体火箭发动机高转速诱导轮旋转气蚀[J]. 推进技术, 2009, 30(4): 390 – 395.
- [18] 李欣, 肖立明, 刘畅, 等. 变螺距诱导轮的气蚀性能研究[J]. 火箭推进, 2017, 43(2): 1 – 8, 17.
- LI X, XIAO L M, LIU C, et al. Study on cavitation performance of variable-pitch inducer[J]. Journal of rocket propulsion, 2017, 43(2): 1 – 8, 17.

(编辑: 陈红霞)