

变螺距诱导轮的气蚀性能研究

李欣¹, 肖立明¹, 刘畅¹, 东华鹏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: 为了研究变螺距诱导轮的气蚀性能, 通过试验观察了变螺距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。结果表明: 诱导轮内的气穴随着入口压力降低, 会呈现不同的气穴形态; 气穴发展受流量影响, 流量越大, 气穴发展速度越快; 诱导轮内发生了同步旋转气蚀, 同步旋转气蚀也受流量影响, 流量越大, 同步旋转气蚀越强。

关键词: 变螺距诱导轮; 气蚀性能; 同步旋转气蚀; 可视化

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2017) 02-0001-08

Study on cavitation performance of variable-pitch inducer

LI Xin¹, XIAO Liming¹, LIU Chang¹, DONG Huapeng¹, LI Jiawen², WANG Jue³

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

Abstract: In order to study cavitation performance of the variable-pitch inducer, the cavitation development and variation of the variable-pitch inducer were observed, and the pressure pulsation phenomenon in the inducer was investigated. The results show that the different cavitation shapes appear in cavitation in the inducer with inlet pressure decreasing, flow rate has an effect on cavitation development, which means that the cavitation develops faster at higher flow rate, synchronous rotating cavitation appears in the inducer, and the higher the flow rate is, the more serious the synchronous rotating cavitation becomes.

Keywords: variable-pitch inducer; cavitation performance; synchronous rotating cavitation; visualization

0 引言

诱导轮是安装在离心泵前的轴流泵, 它的作用是为离心泵增压, 避免离心泵发生气蚀。在火

箭动力系统中, 为了减轻贮箱重量, 诱导轮入口压力通常较低, 受工况变化以及一些干扰因素的影响, 可能会产生严重的气蚀, 导致诱导轮流道被堵塞, 从而使泵的扬程迅速下降。在某些工况

收稿日期: 2016-12-16; 修回日期: 2017-02-09

作者简介: 李欣 (1987—), 男, 博士, 工程师, 研究领域为空间运输系统, 火箭发动机

下,还会发生气蚀不稳定现象,如旋转气蚀^[1-3]、气蚀喘振等^[4],引起轴振动,进而对轴承和密封等零部件的可靠性造成威胁,影响泵的重复使用。

国外通过试验和数值仿真对气蚀不稳定现象开展了大量研究。2005 年, Fuji 等通过试验发现,在诱导轮入口增加喷射流,当喷射流量为总流量的 10%,并且射流方向与旋转方向一致时能够有效抑制气蚀不稳定现象^[5]。2006 年, Hosangadi 等使用 CHUNCH 软件比较了诱导轮在液氢和水中的性能,发现热力学效应的存在能够改善诱导轮的气蚀性能^[6]。2008 年, Kim 等研究了在诱导轮上游安装环形挡板对气蚀喘振的影响,发现其对气蚀喘振有很好的抑制作用,但是对诱导轮的抽吸性能和压升影响不大,特别是在低流量下^[7]。2011 年, Iga 等采用二维平面叶栅模型对三叶片诱导轮气蚀喘振现象进行了数值模拟分析,根据流场及喘振的特点,他们将气蚀喘振分为三类:第一类喘振由小的旋涡气蚀和大尺度的脉动组成,第二类喘振由具有射流结构的层状气蚀组成,第三类喘振由伴随有脉动特性的次同步旋转气蚀组成^[8]。2012 年,韩国的 Lee 等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不对称气蚀等气蚀不稳定现象有较好的抑制作用^[9]。通过数值模拟和实验研究相结合的方法,发现两级式诱导轮能抑制气蚀不稳定的原因是第一级诱导轮的存在使得第二级诱导轮叶片前缘的气穴形状发生了改变。2014 年, Pace 等针对在 CPRTF 做过试验的三叶片诱导轮,研究了几何条件对气蚀流动不稳定的影响^[10]。根据上面的研究可以发现,国外主要研究气蚀不稳定现象的产生机理及抑制方法,但是并没有形成统一的设计准则。

近几年,国内围绕气蚀不稳定现象也开展了一些研究。2009 年,陈晖等通过数值模拟诱导轮二维叶栅中的非定常流动,研究了旋转气蚀,并对其机理进行了分析^[11]。2013 年,唐飞等利用 CFD 方法分析了阶梯壳体和叶片打孔对诱导轮气蚀性能的影响^[12]。2014 年,叶汉玉等通过数值模拟捕捉到了旋转气蚀现象,发现气穴尺寸变化与攻角存在一定的关系^[13]。2015 年, Li 等搭建了诱

导轮气蚀性能试验台,研究了叶尖间隙对诱导轮气蚀性能的影响。通过增大叶尖间隙,有效抑制了同步旋转气蚀^[14]。

本文以一个变螺距诱导轮为研究对象,通过可视化试验研究了气穴在不同流量下的发展变化规律,同时采用 FFT (Fast Fourier Transformation) 方法对诱导轮的脉动压力进行了分析。

1 研究对象

本文研究的变螺距诱导轮为三叶片诱导轮,见图 1,诱导轮叶尖间隙为 0.5 mm,转速为 4 000 rpm,设计流量 $Q=4.6$ L/s,其主要几何参数见表 1。



图 1 变螺距诱导轮

Fig. 1 Picture of variable-pitch inducer

表 1 诱导轮参数

Tab. 1 Main parameters of the inducer

外径/ mm	叶片数	入口角/ (°)	出口角/ (°)	入口轮毂 直径/mm	出口轮毂 直径/mm
79	3	8	15	36	50

2 试验方法

诱导轮试验装置布局如图 2。整个试验台为闭式试验系统,采用水作为试验工质。试验时,采用真空泵和压气机来调节诱导轮入口压力。试验诱导轮由变频电机驱动,最大转速可达 6 000 rpm。诱导轮流量通过电动调节阀进行控制。在诱导轮和调节阀之间装有辅助泵,当流量不足时,通过辅助泵来克服管路流阻损失,提高系统流量。

诱导轮试验段和压力测量位置见图 3 和图 4。

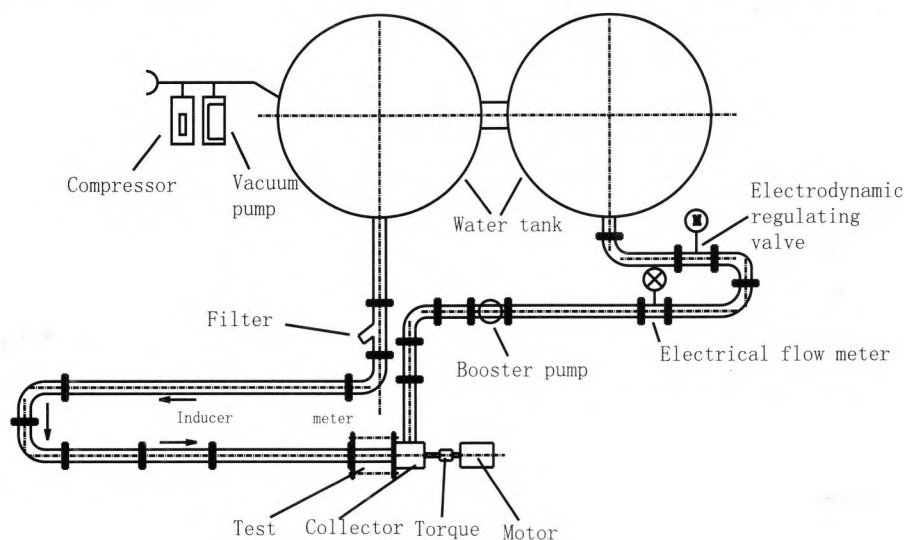


图 2 诱导轮试验装置布局图

Fig. 2 Test facility for cavitation performance of inducer

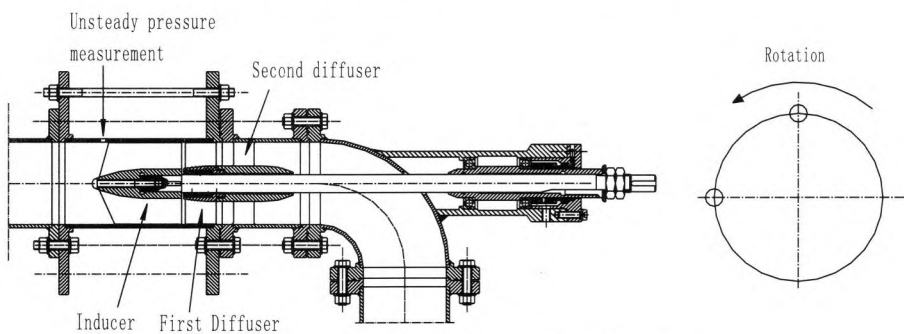


图 3 诱导轮试验和非稳态压力测量位置

Fig. 3 Inducer test and unsteady pressure measuring location

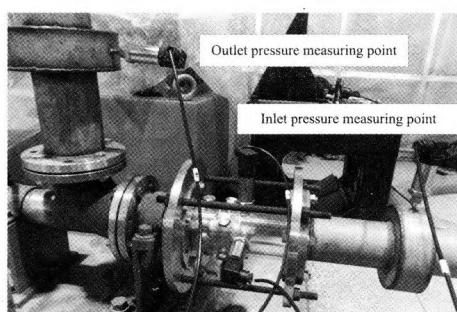


图 4 诱导轮压力测量位置

Fig. 4 Pressure measuring position of inducer

为了观察诱导轮内部流动状态, 采用有机玻璃加工诱导轮透明壳体。两个溅射薄膜压力传感器 (型号: CYB-20S; 量程: $-0.1 \sim 0.7$ MPa, 精度: 0.5%) 分别安装在诱导轮入口和出口, 用来测量诱导轮入口压力和出口压力。另有两个

同类型的压力传感器 (型号: CYB-20S; 量程: $-0.1 \sim 1$ MPa, 精度: 0.5%) 安装在透明壳体上用来测量压力脉动。为了不影响流场, 传感器的头部与壳体齐平安装。两个传感器沿旋转方向间隔 90° , 轴向位置在诱导轮叶片前缘附近, 因为由气蚀不稳定引起的压力脉动在叶片前缘附近最明显。试验数据采集频率设为 $1\,600$ Hz, 并且持续 4 s。试验时流量通过电磁流量计测量。

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。

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

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

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

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

诱导轮的水力性能试验结果见图 5, 图中横坐标为流量系数 Φ , 纵坐标为扬程系数 Ψ 。可以看出, 随着流量增加, 诱导轮扬程逐渐降低, 并且扬程随流量基本呈线性变化。由于在整条曲线上不存在斜率是正值的流量区域, 故诱导轮不会发生旋转失速, 同时可以认为该诱导轮在试验的流量区域能够稳定工作^[15]。

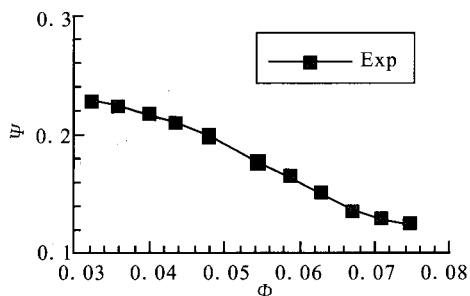


图 5 诱导轮的水力性能

Fig. 5 Hydraulic performance of the inducer

3.2 气蚀性能试验结果

图 6 是两级诱导轮的气蚀性能曲线。从图中可以明显看出, 在诱导轮扬程发生 10% 陡降前, 诱导轮扬程成阶梯下降, 且不同工况下其扬程下降量不同。在设计流量 Q_d 下, 阶梯处扬程下降量为 2.3%, $0.8Q_d$ 和 $1.1Q_d$ 流量工况下扬程下降量分别为 1.8% 和 4.9%。在国外文献中也出现过这种阶梯式下降的气蚀性能曲线, 在台阶处都发生了气蚀不稳定现象^[16-17]。

随着流量减小, 诱导轮的扬程逐渐升高, 气蚀性能也存在差异。把诱导轮扬程发生 10% 陡降

时的气蚀数定义为临界气蚀数, 在不同的流量下, 诱导轮的临界气蚀数 $\sigma_{10\%}$ 不相等。在设计流量 Q_d 和 $1.1Q_d$ 工况下临界气蚀数 $\sigma_{10\%}$ 分别为 0.038 9 和 0.055 4, 而 $0.8Q_d$ 工况下, 当气蚀数降低到试验的最小值 0.034 1 时, 扬程下降了 9.1%, 未达到临界状态, 即随着流量增大, 诱导轮的气蚀性能逐渐变差。因为小流量下, 诱导轮回流更强, 改变了诱导轮入口的流动情况, 从而改善了诱导轮的气蚀性能, 但是回流增强也会增大流动损失, 导致诱导轮的效率下降。

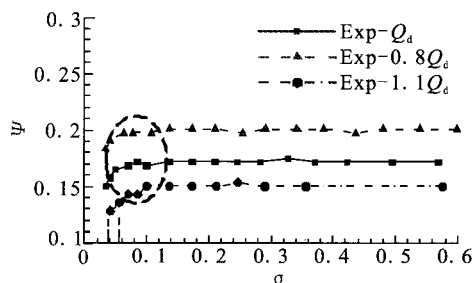


图 6 诱导轮气蚀性能曲线

Fig. 6 Cavitation performance of the inducer

3.2.1 诱导轮气蚀流动可视化结果分析

通过可视化试验, 观察了诱导轮内部的气蚀流动发展变化情况。设计流量 Q_d 下气蚀流动随气蚀数变化情况见图 7。当气蚀数 $\sigma=0.422$ 1 时, 诱导轮开始产生气穴。气穴首先出现在诱导轮叶片吸力面前缘与轮缘交界处, 此处圆周速度最大, 静压最低, 同时由于压力面和吸力面存在压差, 在叶尖间隙处会产生轮缘漩涡, 导致该处最容易产生气穴。此时的气穴呈细长的漩涡状, 称作轮缘漩涡气穴^[15], 见图 7 (a)。随着气蚀数减小, 即入口压力的降低, 气穴区域逐渐增大。在气蚀数从 0.422 1 减小到 0.136 6 的过程中, 轮缘漩涡气穴逐渐变粗变长, 见图 7 (b) 至图 7 (d)。由于叶尖间隙处存在回流, 故气穴在回流作用下, 与叶片始终保持一定的角度。当气蚀数降低到 0.085 4 时, 轮缘漩涡气穴继续增大, 并且开始附着在叶片上, 此时的气穴称为叶面气穴, 如图 7 (e)。由于气穴区域受离心力的影响, 主要集中在叶片吸力面轮缘附近, 并没有对主流造成影

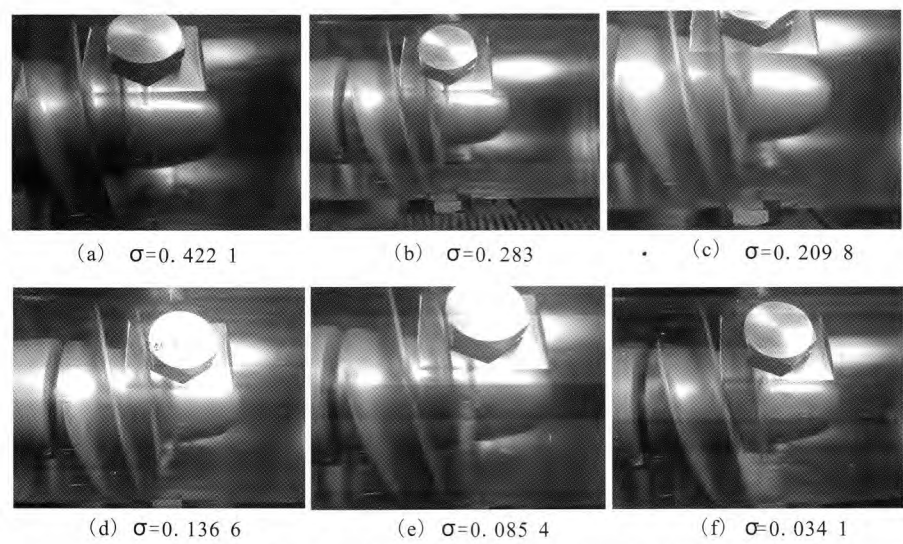


图 7 设计流量 Q_d 气蚀流动随气蚀数发展变化情况

Fig. 7 Variation of cavitation flow in inducer with different cavitation numbers at design flow Q_d

响, 故诱导轮的扬程并没有降低。当气蚀数继续减小到 0.034 1 时, 此时的气穴已经发展成为片状的叶面气穴, 并且开始堵塞流道喉部, 见图 8 (f), 于是导致诱导轮扬程下降。

同一气蚀数下, 气穴区域是不稳定的, 气穴形状时刻在发生变化, 见图 8。此时气穴虽然没有导致扬程降低, 但是因为气穴形态的变化, 也会引起振动等不稳定现象。

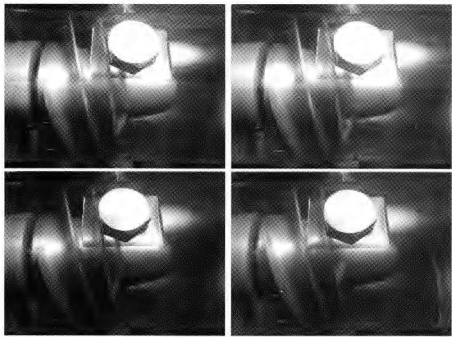


图 8 设计流量 Q_d 下 $\sigma=0.136 6$ 时不同时刻气穴形态

Fig. 8 Cavitation shapes at different moment and at design flow Q_d , as $\sigma=0.136 6$

$1.1Q_d$ 和 $0.8Q_d$ 工况下气蚀流动随气蚀数变化情况与设计流量 Q_d 下类似, 气穴在不同流量的发展过程大致如下: 首先在诱导轮吸力面前缘和轮缘交界处出现轮缘漩涡气穴, 随着气蚀数减小,

气穴发展为叶面气穴, 并且在主流和回流交界处生成回流涡气穴, 随后内部多种气穴共同发展, 最终叶面气穴堵塞流道喉部, 导致扬程下降。

诱导轮的流量会对气蚀流动的发展产生影响, 不同流量下诱导轮的初生气蚀数见表 2。可见, 随着流量增大, 初生气蚀数逐渐减小, 但是从图 6 看出, 临界气蚀数却随着流量增大而增大。由此可知, 不同流量下, 气穴的成长速度不一样。在大流量工况下, 气蚀从初生到堵塞流道的气蚀数变化范围比小流量工况小, 即大流量工况下, 气穴成长的速度较快。

表 2 不同流量下的初生气蚀数

Tab. 2 Inception cavitation number of inducer at different flow

流量	$0.8Q_d$	Q_d	$1.1Q_d$
初生气蚀数 $\sigma_{初}$	0.597 8	0.422 1	0.290 3

试验中还观察到, 在气蚀数降低到临界气蚀数之前, 诱导轮压力面也出现了气蚀, 见图 9。这是因为诱导轮是变轮毂诱导轮, 从入口到出口, 轮毂直径逐渐增大, 使得流道面积逐渐减小。当诱导轮在 $1.1Q_d$ 工况下工作时, 攻角比设计流量 Q_d 下小, 又因为回流和轮毂形状的共同作用, 故在诱导轮入口局部区域出现负攻角, 导

致压力面发生气蚀。



图 9 诱导轮压力面气蚀($Q=1.1Q_d$, $\sigma=0.1366$)

Fig. 9 Cavitation at pressure side of inducer blade as $Q=1.1 Q_d$ and $\sigma=0.1366$

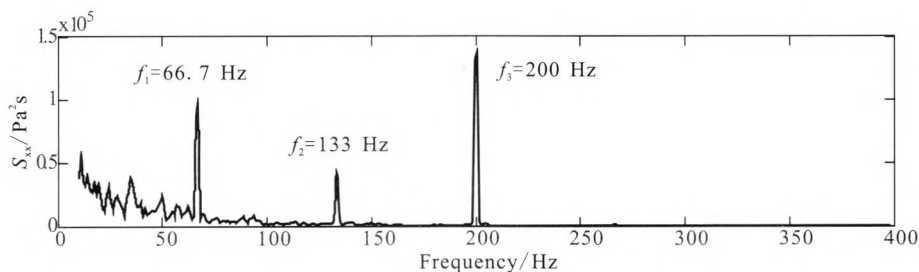
3.2.2 诱导轮气蚀不稳定现象研究

设计流量 Q_d 下, 气蚀数 $\sigma=0.4221$ 时诱导轮

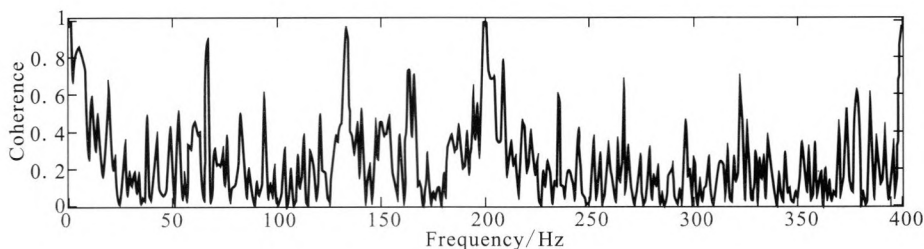
前缘压力脉动见图 10, 存在频率 $f_1=66.7$ Hz, $f_2=133$ Hz 和 $f_3=200$ Hz 的压力脉动。因为诱导轮刚开始气蚀, 故此时的压力脉动并不是因为气蚀引起的。对信号进行自相关性分析和相位角分析, 结果见图 10 (b) 和 10 (c), 三个峰值的压力脉动的相关性都大于 0.9, f_1 和 f_2 的相位角差均为 0° , f_3 的相位角差为 90° , 而诱导轮的转频 $f_N=66.7$ Hz, 由此可知, f_1 为轴转动引起的压力脉动, f_3 为叶片转动引起的压力脉动。而频率 $f_2=f_3-f_1$, 满足后面的关系式^[17], 可知为轴转动与叶片转动的耦合作用引起的。

$$\varphi(f)=a\varphi(f_3)-b\varphi(f_1)$$

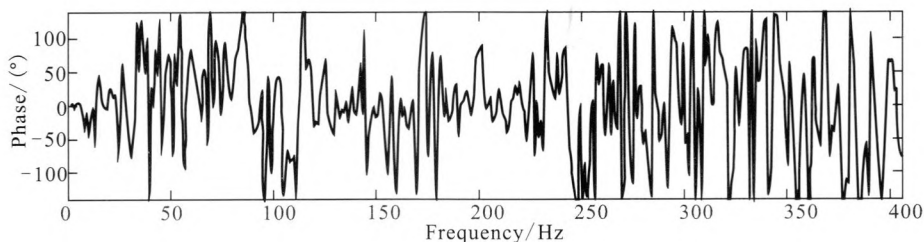
式中 a 和 b 为整数。



(a) 频谱图



(b) 自相关性分析



(c) 相位角分析

图 10 设计流量 Q_d 下 $\sigma=0.4221$ 时诱导轮前缘压力脉动

Fig. 10 Coherence and cross-spectrum phase on leading edge of inducer at design flow Q_d as $\sigma=0.4221$

图 11 是设计流量 Q_d 下诱导轮前缘压力脉动的瀑布图。图中坐标分别是压力的功率谱密度、气蚀数和频率。在试验中主要存在三种压力脉动, 其频率分别为 f_N , $2f_N$ 和 $3f_N$ 。从图中看出, 当气蚀数 $\sigma=0.1$ 时, 叶频引起的压力脉动开始增大, 这是因为压力测点附近开始发生气蚀, 导致压力脉动增强, 随着气蚀数减小, 气蚀范围增大, 脉动幅值也不断增大, 当增大到最大值时, 由于压力测点附近全部气蚀, 此时测点周围的压力都是饱和蒸汽压, 导致该压力脉动迅速减小。轴频引起的压力脉动 f_N 随着气蚀数减小也在增大。当 $\sigma=0.034\ 1$ 时, 压力脉动达到最大值。该工况下诱导轮前缘的压力脉动见图 12。此时频率等于转频 f_N 的幅值的功率谱密度增大了一个数量

级, 相位角差约为 -90° , 可知旋转单元体数目为 1, 脉动沿径向传播, 因此该峰值是由于诱导轮内部发生同步旋转气蚀现象引起的。

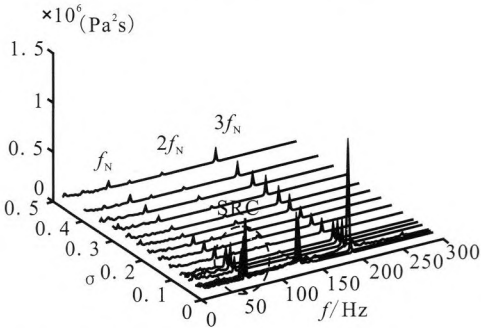


图 11 设计流量 Q_d 下诱导轮入口压力的瀑布图

Fig. 11 Waterfall plot of power spectrum of inducer inlet pressure at design flow Q_d

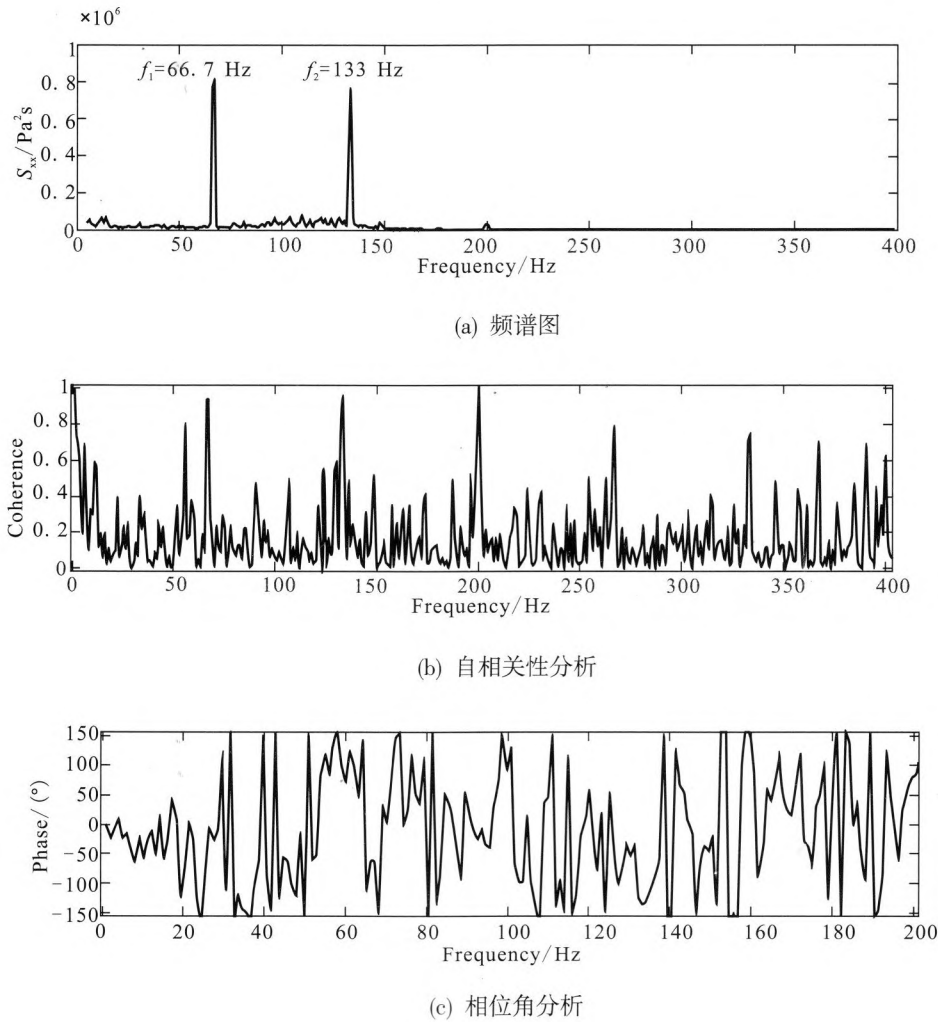


图 12 设计流量 Q_d 下 $\sigma=0.034\ 1$ 时诱导轮前缘压力脉动

Fig. 12 Pressure pulsation on leading edge of inducer at design flow Q_d , as $\sigma=0.034\ 1$

图 13 和图 14 是 $1.1Q_d$ 和 $0.8Q_d$ 工况下诱导轮前缘压力脉动的瀑布图。从图中可以看出,这两种流量下诱导轮也发生了同步旋转气蚀。

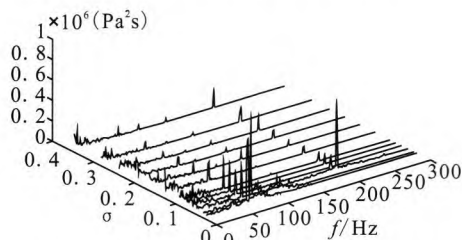


图 13 $1.1Q_d$ 下原诱导轮入口压力的瀑布图

Fig. 13 Waterfall plot of inlet static pressure of original inducer at $1.1Q_d$

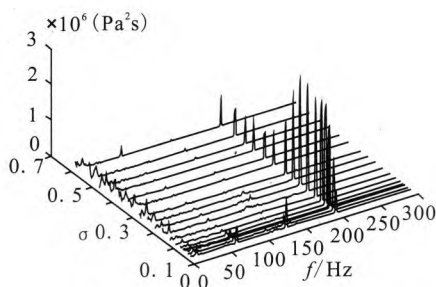


图 14 $0.8Q_d$ 下原诱导轮入口压力的瀑布图

Fig. 14 Waterfall plot of inlet static pressure of original inducer at $0.8Q_d$

不同流量下,同步旋转气蚀引起的压力脉动的最大幅值见表 3。从表中可以看出,随着流量增大,同步旋转气蚀引起压力脉动的最大幅值也显著增大, $1.1Q_d$ 工况下的最大幅值是 $0.8Q_d$ 工况下的 1.62 倍,说明大流量下的同步旋转气蚀更应该引起重视。

表 3 不同流量下同步旋转气蚀引起的最大压力脉动幅值

Tab. 3 Maximum pressure pulsation amplitude of SRC at different flow rates

流量	$0.8Q_d$	Q_d	$1.1Q_d$
最大脉动幅值/kPa	3.07	3.84	4.98

4 结论

通过试验研究了变螺距诱导轮的气蚀性能,

包括气蚀发展变化规律和气蚀不稳定现象,得到以下结论:

1) 随着气蚀数降低,诱导轮内的气蚀流动在发展过程中会出现不同的形态,包括轮缘漩涡气穴、叶面气穴和回流涡气穴等,其中叶面气穴是造成诱导轮流道喉部堵塞的主要原因。

2) 流量会对诱导轮气蚀流动产生影响,流量越大,初生气蚀数越小,但是气穴发展更快,临界气蚀数比小流量下大。

3) 同步旋转气蚀受流量影响,流量越大,同步旋转气蚀越强, $1.1Q_d$ 工况下同步旋转气蚀引起的压力脉动幅值为 $0.8Q_d$ 工况下的 1.62 倍。

参考文献:

- [1] TSUJIMOTO Y, KAMIJO K, YOSHIDA Y. A theoretical analysis of rotating cavitation in inducers[J]. Journal of fluids engineering, 1993, 115: 135-141.
- [2] TSUJIMOTO Y, YOSHIDA Y, MAEKAWA Y, et al. Observations of oscillating cavitation of an inducer [J]. Journal of fluid engineering, 1997, 119: 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] FUJI A, MIZUNO S, HORIGUCHI H, et al. Suppression of cavitation instabilities by jet injection at inducer inlet [C]//2005 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition. Houston, TX, USA: ASME, 2005.
- [6] HOSANGADI A, AHUJA V, UNGEWITTER R J, et al. Numerical study of a flat plate inducer comparison of performance in liquid hydrogen and water [C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Sacramento, California: [s.n.], 2006: 111-118.
- [7] KIM J, ISHIZAKA K, ISHIZAKI M, et al. Suppression effect of upstream installed ring-shaped obstacle plate on cavitation surge in pump inducers[J]. Journal of fluid science and technology, 2008, 3(1): 1-10.

(下转第 17 页)

- rical study of spacecraft contamination and interactions by ion-thruster effluents [J]. Journal of spacecraft and rockets, 1996, 33(4): 535-542.
- [9] 马伟, 宣益民, 韩玉阁, 等. 长寿命卫星热控涂层性能退化及其对卫星热特征的影响[J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 568-572.
- [10] 张天平, 陈继巍, 李小平, 等. 地面寿命试验中离子推力器表面的溅射沉积量计算 [J]. 航天器环境工程, 2011, 28(5): 436-439.
- [11] 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术 - 原理及其应用 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007(1): 368-370.
- [12] KEMP R F, LUEDKE E E, HALL D F, et al. Effects of electrostatic rocket material deposited on solar cells [C] //Proceedings of the 9th NASA Electric Propulsion Conference. Washington D C: NASA, 1972: 1-10.
- [13] 范平, 邵建达, 易葵, 等. 纳米 Mo 膜的光学特性及最小连续膜厚研究[J]. 中国激光, 2005, 32(7): 977-981.
- [14] 孙安邦, 毛根旺, 陈茂林, 等. 离子推力器羽流特性的粒子模拟[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(2): 401-405.
- [15] 李娟, 楚豫川, 曹勇. 离子推力器羽流场模拟以及 Mo~+CEX 沉积分析[J]. 推进技术, 2012, 33(1): 131-137.
- [16] 任军学, 顾左, 郭宁, 等. 离子发动机羽流特性的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2013, 28(6): 1372-1379.
- [17] 张尊, 汤海滨. 氙气离子推力器束流等离子体特征参数的 Langmuir 单探针诊断[J]. 高电压技术, 2013, 39(7): 1602-1608.

(编辑: 王建喜)

(上接第 8 页)

- [8] IGA Y, Hashizume K, YOSHIDA Y. Numerical Analysis of Three Types of Cavitation Surge in Cascade[J]. Journal of fluids engineering. 2011. 133: 071102-1-071102-13
- [9] 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.
- [10] PACE G, VALENTINI D, PASINI A, et al. Geometry effects on flow instabilities of different three-bladed inducers[J]. Journal of fluids engineering, 2015, 137: 041304-1-041304-12.
- [11] 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.
- [12] 唐飞, 李家文, 李永, 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 Fei, LI Jiawen, LI Yong, et al. Study on improving cavitation performance of inducer for liquid rocket engine[J]. Journal of rocket propulsion, 2013, 39(3): 44-49, 57.
- [13] 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 Hanyu, LI Jiawen, LI Xin. Numerical simulations of rotating cavitation in inducer[J]. Journal of rocket propulsion, 2014, 40(4): 43-49.
- [14] 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.
- [15] BRENNEN C E. Hydrodynamic of pumps [M]. England: Cambridge University Press, 1994.
- [16] LEE K, YOO J, KANG S. Experiments on cavitation instability of a two-bladed turbopump inducer[J]. Journal of mechanical science and technology, 2009(23): 2350-2356.
- [17] TORRE L, PASINI A, CERVONE A, et al. Effect of tip clearance on the performance of a three-bladed axial inducer[J]. Journal of propulsion and power, 2011, 27(4): 890-898.

(编辑: 陈红霞)