

高速平板诱导轮的结构设计与分析

陈 晖¹, 张恩昭¹, 谭永华², 李 斌¹

(1 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100; 2 航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100)

摘 要: 诱导轮是液体火箭发动机 (LPRE) 中重要的组成部分, 它能有效地提高主泵的抽吸性能。首先介绍了 LPRE 诱导轮的几种典型结构型式, 然后阐述了 LPRE 诱导轮的基本概念和设计原理, 进一步推荐和分析了高速平板诱导轮几个重要结构参数的设计准则, 最后按照设计方法设计了用于某液体火箭发动机的一台高速诱导轮, CFD 计算表明它具有较好的扬程性能和抗汽蚀特性。

关键词: 液体火箭发动机; 诱导轮; 结构设计

中图分类号: V434.21

文献标识码: A

文章编号: (2009) 03-0001-05

Geometry design and analysis of the high-speed rotational plate inducer

Chen Hui¹, Zhang Enzhao¹, Tan Yonghua², Li Bin¹

(1 Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2 Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: The inducer is a key component of the liquid propellant rocket engine (LPRE), which can effectively raise the suction performance of the main pump. The basic types of LPRE inducer were introduced. The basic concept and design theory were then presented. Furthermore, the design criteria of some important geometry parameters of the high-speed rotational plate inducer were recommended and analyzed. Finally, a high-speed rotational inducer for a LPRE was designed by this method. The CFD results indicated it had a good head performance and cavitation characteristic.

Key words: liquid propellant rocket engine; inducer; geometry design

收稿日期: 2009-03-23; 修回日期: 2009-05-10。

作者简介: 陈晖 (1970—), 男, 博士, 研究领域为流体机械。

0 引言

诱导轮以其高叶栅稠度和小冲角等特点,使得液体工质绕流叶片型面时压降不大,所以诱导轮的临界净正抽吸压头较小;同时它是一种轴流式叶轮,流通面积大,即使在局部空化条件下也能正常的工作而不易堵塞,因此诱导轮具有较高的抗汽蚀性能。平板诱导轮具有加工简单、空间紧凑的优点,与主泵叶轮串联使用,可以有效提高泵进口前的压力,从而避免或减轻后级叶轮流道中发生汽蚀破坏。

目前,在液体火箭发动机涡轮泵中广泛采用由诱导轮和离心轮组合的泵机组,使得涡轮泵转速可以大幅度提高,这不仅减小了涡轮泵的尺寸、重量及性能,而且由于抗空化能力的显著提高,使主泵可以在较低的进口压力下稳定可靠地工作,因此可以使推进剂贮箱中的增压压力降低,从而减小推进剂贮箱的结构重量和给贮箱增压的气体量。

从稳态流动的角度出发,阐述了液体火箭发动机中诱导轮的基本型式和诱导轮的传统设计理

论,并归纳和探讨了高速平板诱导轮几个主要参数的选择依据,同时通过设计实例进行了进一步分析。

1 诱导轮的基本型式

在传统的液体火箭发动机中,由于扬程能力不高,诱导轮通常与主叶轮串连使用。诱导轮可以按扬程(压头)高低进行分类,也可以按轴面流道的形状分类。按扬程分类时,可分为低扬程诱导轮($\psi \leq 0.15$)和高扬程诱导轮($\psi > 0.15$)两类。这两类诱导轮的叶片一般都是平板型、等螺距型及变螺距型。高扬程诱导轮常常由诱导轮本体以及具有静止的导向叶片所组成。

按轴面流道形状不同常可以分为四种基本型式^[1]:

- (1) 圆柱形的叶尖和轮毂;
- (2) 圆柱形的叶尖和圆锥形的轮毂;
- (3) 圆锥形的叶尖和轮毂;
- (4) 带围环的,有轮毂或无轮毂。

表 1 列出了一些典型诱导轮的主要性能和结构参数^[2]。

表 1 几种基本型式诱导轮的结构和性能参数

Tab.1 Geometry and performance parameters of basic type inducers

发动机型号	泵代号	工质	流量系数 φ_i	扬程系数 ψ_i	前缘叶片角 β_i	汽蚀比转数 C_i	进口轮毂比 \bar{d}_i	前缘掠形
雷神	Mark3	液氧	0.116	0.075	14.15°	3095	0.31	径向
J-2	Mark15	液氧	0.109	0.11	9.75°	3724	0.20	后掠
X-8	Mark19	液氧	0.106	0.10	9.8°	3388	0.23	后掠
X-8	Mark19	液氧	0.05	0.063	5.0°	6298	0.19	前掠
J-2	Mark15	液氢	0.0942	0.21	7.9°	6298	0.42	后掠
J-2	Mark15	液氢	0.0735	0.20	7.35°	4799	0.38	后掠

随着各种技术的发展,当今诱导轮的设计变得更加复杂,出现了许多衍生的新结构型式。其中由于扬程系数得到较大提高(单列叶片达到 0.25,双列叶片有时能超过 0.5),使得诱导轮有

可能被单独作为增压泵来使用^[3](例如,航天飞机主发动机 SSME 上的低压氧化剂涡轮泵和低压燃料涡轮泵,以及 PD-120 发动机的氧化剂预压涡轮泵和燃料预压涡轮泵)。

2 诱导轮的设计原理

2.1 诱导轮的几何参数

诱导轮展开的平面叶栅及其进出口速度三角形示意图见图 1。

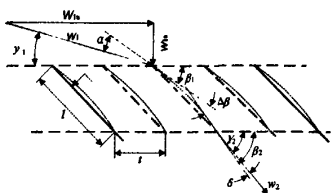


图 1 诱导轮叶栅的几何参数

Fig.1 Geometry parameters of the inducer cascade

图 1 表示了进出口叶片角 β_1 和 β_2 、叶片曲率角 $\Delta\beta$ 、弦长 l 、栅距 t 、进出口相对速度与叶栅叶片角的夹角 γ_1 和 γ_2 以及冲角 α 等几个重要几何参数。

2.2 Brumfield 准则

假设诱导轮进口液流为均匀、无旋的稳定流动, 根据图 1 的叶栅速度三角形整理得到诱导轮的汽蚀余量^[4]可以表示为:

$$NPSH_i = \frac{1}{2g} \left(\frac{n}{30} \right)^{4/3} \pi^{2/3} Q^{2/3} \left(1 - \bar{d}_i^2 \right)^{-2/3} \left[(1 + \lambda) \varphi_i^{4/3} + \lambda \varphi_i^{-2/3} \right] \quad (1)$$

式中, \bar{d}_i 为诱导轮进口轮毂比; φ_i 为进口流量系数; λ 为诱导轮叶片进口前缘汽蚀系数。

在最佳流动状态的流量系数 φ_i 下使 $NPSH_i$ 最小, 这样就得到了所谓的 Brumfield 准则, 它实质上是诱导轮进口几何参数和流动状态的理论最优配合:

$$\lambda = \frac{2\varphi_{iopt}^2}{1 - 2\varphi_{iopt}} \quad (2)$$

将叶栅速度三角形代入 Brumfield 准则得到对应于 φ_{iopt} 的叶片进口外缘直径:

$$D_{iopt} = 2.89715 \left[\frac{Q}{(1 - \bar{d}_i^2) n \varphi_{iopt}} \right]^{1/3} \quad (3)$$

2.3 扬程和流量

按照传统设计思想, 如果所设计的泵的装置汽蚀余量 $NPSH_d$ 小于泵的必需汽蚀余量 $NPSH_r$, 泵就会产生空化。为了使泵不发生汽蚀, 其所差的部分应当用诱导轮产生的扬程来补偿, 故诱导轮的设计扬程为:

$$H_i \geq NPSH_r - NPSH_d \quad (4)$$

式中, $NPSH_r$ 为泵的必需汽蚀余量; $NPSH_d$ 为泵的装置汽蚀余量。

为了不在诱导轮流道内发生汽蚀, 诱导轮本身的汽蚀余量 $NPSH_i$ 应小于或等于泵的装置汽蚀余量 $NPSH_d$ 。考虑到诱导轮本身的抗汽蚀特性, 允许在一定程度的空化状态下工作, 可按 $NPSH_i = NPSH_d$ 进行计算, 于是式 (4) 变为:

$$H_i \geq NPSH_r - NPSH_i \quad (5)$$

式中, $NPSH_i$ 为诱导轮的汽蚀余量, 按下式计算:

$$NPSH_i = \left(\frac{5.62n\sqrt{Q}}{C_i} \right)^{4/3} \quad (6)$$

式中, C_i 为诱导轮的汽蚀比转数。 C_i 的取值范围一般是 1500~5000。

通过诱导轮的流量 Q 由下式确定:

$$Q = Q_{imp} + q_1 + q_2 \quad (7)$$

式中, Q_{imp} 为主泵叶轮的流量; q_1 为通过诱导轮叶顶间隙回流的流量; q_2 为主泵轮的泄漏流量, 如叶肩密封和轴向力平衡装置的泄漏流量。

3 诱导轮主要参数的确定

3.1 叶片数

为了减小对进口流场的影响, 诱导轮的叶片不宜过多, 当今液体火箭发动机中的诱导轮叶片数常采用 2~4 个。研究发现, 偶数叶片和奇数叶片的诱导轮在一些工况下都会诱发出不同的空化振动现象, 如偶数叶片的诱导轮常会出现交替空化的现象, 而 3 叶片的诱导轮则易发生旋转空化的现象^[5], 所以叶片数应根据具体情况与其他结构参数优化选取。诱导轮叶片数和后级主叶轮叶片数互成倍数, 可以增加流动的对称性。

3.2 叶栅稠度

叶栅稠度 l/t 影响叶片的负荷和流动的偏离,因而也影响到泵轮的抗汽蚀性能。如果叶片的长度不够,空化区就不会在诱导轮流道内消失,而要扩展到后级主叶轮入口。所以较大的叶栅稠度能够提高抗汽蚀性能,并能减轻空化诱发的一些振动;但是叶栅稠度过大,会增加水力损失,也不利于加工,而且对于改善抗汽蚀性能的效果甚微。从试验可知,当 l/t 超过一定值后,叶片进口前缘汽蚀系数 λ 下降很小。

3.3 叶片型面

常将诱导轮的叶片设计成平板型或弯板型,其平面叶栅型面的进口与出口段均为楔型。经验证明,将叶片进口削尖对改善抗汽蚀性能有着重要影响,削尖的相对长度 $l_i/D=0.3\sim0.5$ 为最优范围,当 $l_i/D>0.5$ 时对提高抗汽蚀性能已无明显影响。为了减轻流动尾迹和阻力,叶片后缘常打磨成流线型,这样可以提高诱导轮的扬程和效率。同时为了提高抗汽蚀性能,叶片表面的光洁度应达到 $<10\mu\text{m}$ 。

3.4 叶片厚度

从减小通流阻塞程度的角度出发,叶片的厚度越小越好。但考虑到强度因素,叶片必须能够承受离心力和压力等的共同作用,因此叶片根部的厚度应比周边的厚一些。一般,叶片根部厚度的选取范围为 $\delta_{\text{根}}=(0.015\sim0.02)l_{\text{根}}$; 周边厚度为 $\delta=(0.015\sim0.01)l_{\text{根}}$, 其中 $l_{\text{根}}$ 为叶片根部的长度,或叶片端面形成 $2^\circ\sim3^\circ$ 的斜度。为了减小应力集中,叶片与轮毂连接处应采用较大的圆角,也可以做成双圆弧过渡。

3.5 叶片进口边形状

经验证明诱导轮叶片进口边的形状对抗汽蚀性能、流动状态以及强度都会有较大影响。一般采取进口边后掠修圆的办法,即进口边的半径沿旋转反方向逐渐增加,到转过一定的后掠角 $\Delta\varphi$,其半径才等于外缘半径(图2)。因为这样做使液流在到达叶尖前以获得能量和预旋,从而改善了叶片进口外缘的压力场分布,抑制了空化区的扩展,研究发现进口边后掠修圆能提高抗汽蚀性能10%~25%。

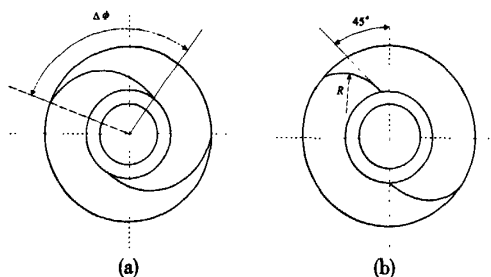


图2 诱导轮叶片进口边

Fig.2 Shape of blade inlet-edge

图2(a)是前苏联杜莫夫推荐的型式,曾广泛用于工程中,较大的后掠角有利于提高诱导轮的抗汽蚀化性能,但会因此造成轴向长度较长,通常取 $\Delta\varphi=90^\circ\sim150^\circ$; 图2(b)是经过大量试验认为抗汽蚀性能和过流能力较好的一种型式,其中 $R=0.35(D-d)^{0.6}$ 。

3.6 进口叶片角和冲角

诱导轮的抗汽蚀性能随进口叶片角 β_1 而变化,要得到小的汽蚀系数,必须减小叶片角。经验表明 β_1 和冲角 α 的关系为:对薄叶片 $\alpha/\beta_1=0.35$, 厚叶片 $\alpha/\beta_1=0.5$ 。

为改善流动,叶片进口楔角 α_w 按下式计算:

$$\alpha_w = \beta_1 - \beta_w, \quad \beta_w = \arctg(1.1\varphi_i)$$

式中, φ_i 为诱导轮设计流量系数。1.1 φ_i 表示取设计流量的110%。

4 设计实例与分析

图3是根据以上建立的设计思想,为某新型液体火箭发动机涡轮泵设计的一台高速诱导轮,其主要几何参数见表2。

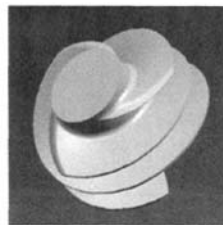


图3 诱导轮的几何模型

Fig.3 Geometry model of the studied inducer

表 2 诱导轮几何参数

Tab.2 Geometry parameters of the studied inducer

参数名称	数 值
叶片数	3
轮毂比	0.477
叶尖叶片角/ $^{\circ}$	10
叶根叶片角/ $^{\circ}$	20
导 程/m	0.0945
叶尖稠度	2.65

为了使研究具有一般性, 将各性能参数进行无量纲化处理, 得到三个重要无量纲数: 流量系数 Φ ; 扬程系数 ψ ; 空化数 σ 。

通过 CFD 计算, 得到诱导轮扬程系数与流量系数的关系特性 (图 4): 在进口压力不变的前提下, 随流量的增加, 扬程以近似线性的关系单调减小。

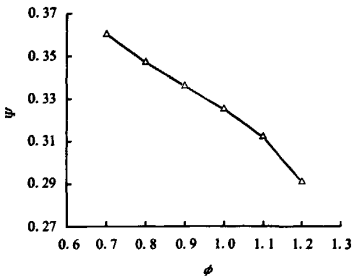


图 4 诱导轮的扬程性能

Fig.4 Head performance of the inducer

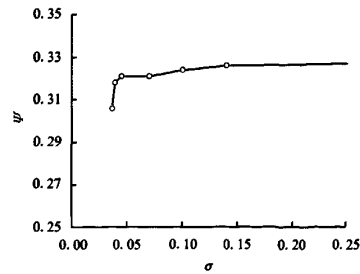


图 5 诱导轮的汽蚀特性

Fig.5 Cavitation characteristic of the inducer

将空化数不断减小, 诱导轮扬程系数没有明显变化, 但是当空化数达到某个值时, 诱导轮开始出现了所谓的断裂现象, 扬程系数迅速下降

(图 5), 这是由于此时空化区造成叶轮通道中流动的严重堵塞, 致使叶片压力面压头提升能力突然下降。

从以上计算结果可以看到, 新设计的诱导轮具有较好的扬程性能和抗汽蚀性能, 目前该诱导轮已经成功用于我国新型液体火箭发动机上, 能够满足系统要求。

5 结束语

诱导轮是提高液体火箭发动机涡轮泵抽吸性能的重要部件。随着技术的发展, 各国研发了多种结构型式的诱导轮。Brumfield 准则是诱导轮设计的理论基础, 它反映了进口几何参数和流动状态的最佳匹配, 而扬程和流量要求则是诱导轮设计中的重要依据。在结构设计中, 应根据扬程性能和抗汽蚀性能的具体要求来确定叶片数、叶栅稠度、叶片的型面、厚度、进口形状、叶片角及冲角等诱导轮的主要参数。用该方法设计的诱导轮具有较好的扬程性能和抗汽蚀性能。

参考文献:

[1] Jackson J K. Liquid Pocket Engine Turbopump Inducers [R]. NASA SP-8052, 1971.

[2] Brennen C E. Hydrodynamics of Pumps[M]. Concepts ETI, Inc. and Oxford University Press, 1994.

[3] 休泽尔. 液体火箭发动机现代工程设计[M]. 朱宁昌 等译. 北京: 中国宇航出版社, 2004.

[4] Wang Leqin, Zhu Zuchao, Xie Ping. Design Theory and Engineering Implementation on Variable-Pitch Inducer of High-Speed Centrifugal Pump [C]. Proceedings of the Third International Conference on Pumps and Fans, 1998.

[5] 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): 1-5.

[6] Petrov V. Cavitation Characteristics of High-Rotational Centrifugal Pumps with Inducers[R]. Mashinostroyeniye, 1973.

[7] 白东安. 涡轮泵超低工况性能研究[M]. 火箭推进, 2008, 34(3): 13-16.

(编辑: 马 杰)