

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.13.1060



高速离心泵诱导轮与离心轮的匹配

王文廷, 陈晖, 李永鹏, 杜玉洁

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)



王文廷

摘要: 某型号液体火箭发动机推进剂泵压力脉动量级较大,诱导轮与离心轮匹配性不好,是导致泵内压力脉动较大,泵性能降低的重要原因.为了研究诱导轮与离心轮的匹配关系对泵性能及泵内压力脉动特性的影响,通过数值仿真计算方法,从诱导轮与离心轮的匹配性出发,分析了不同诱导轮方案,以及诱导轮与离心轮相对位置变化对泵内流场特性及性能的影响.结果表明:对于大流量高速离心泵,诱导轮出口保持一定长度的等螺距段,有利于改善离心轮入口流动情况,提高泵的性能;诱导轮叶片转折角过大,会导致离心轮进口回流,降低泵的性能;与诱导轮结构方案相比,诱导轮与离心轮的相对位置对泵性能的影响较小;诱导轮与离心轮轴向距离过小会造成离心轮内流动不均匀,泵性能下降;综合考虑汽蚀性能、压力脉动水平和效率,泵方案设计选用进口变螺距、出口等螺距的诱导轮方案.

关键词: 液体火箭发动机;高速离心泵;诱导轮;离心轮

中图分类号: S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2015)04-0301-05

王文廷, 陈晖, 李永鹏, 等. 高速离心泵诱导轮与离心轮的匹配[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(4): 301-305.

Wang Wenting, Chen Hui, Li Yongpeng, et al. Matching research of inducer and impeller of high-speed centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME), 2015, 33(4): 301-305. (in Chinese)

Matching research of inducer and impeller of high-speed centrifugal pump

Wang Wenting, Chen Hui, Li Yongpeng, Du Yujie

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an, Shaanxi 710100, China)

Abstract: The propellant pump of specific liquid propellant rocket engine suffers from serious pressure fluctuation, the poor matching of the inducer and impeller is an important cause of larger pressure fluctuation and lower performance of the pump. In order to study the effect of matching of the inducer and impeller on pump hydraulic performance and pressure fluctuation, the numerical simulation by using commercial CFD code was carried out to analyze the effects of various inducer configurations on pump flow field and performance. The results show that for the high-speed centrifugal pump with a large flow rate, the inducer with constant pitch outlet is conducive to improving the flow of the impeller inlet and increasing performance. The larger turning angle of inducer blade can result in the reflux in impeller inlet and lower performance of the pump. Compared to the inducer scheme, the relative position between the inducer and impeller has smaller effects on pump performance. The short axial distance between the inducer and impeller results in the inhomogeneity of the flow in the impeller, and the lower performance of the pump. Considering cavitation performance, pressure fluctuation levels and efficiency of the pump, the final scheme of the pump chooses an inducer with variable-pitch inlet and constant pitch outlet.

收稿日期: 2013-11-05; 网络出版时间: 2015-04-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20150422.1028.010.html>

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2011TY09)

作者简介: 王文廷(1985—),男,甘肃武威人,工程师(wenting_1120@163.com),主要从事流体机械设计优化研究.

陈晖(1970—),男,浙江宁波人,研究员(chen_51@hotmail.com),主要从事流体机械及空化理论研究.

Key words: liquid propellant rocket engine; high-speed centrifugal pump; inducer; centrifugal impeller

随着大推力液体火箭发动机的研制,以及发动机性能提升的需求,推进剂泵的性能和稳定性受到了越来越多的重视.诱导轮与离心轮匹配不好,是引起泵内压力脉动较大、泵性能较低的原因之一^[1-3].俄罗斯研制的大推力液氧煤油发动机 RD-170 涡轮泵最初工作过程中压力脉动量级较大,在后续改进型号 RD-171 的研制中采取了相应的措施,其中一项便是诱导轮与离心轮的匹配优化设计.

目前相关研究主要集中在几个方面:诱导轮、离心轮单个过流部件优化设计,以提高泵组的水力性能^[4-6];研究特殊的诱导轮入口结构形式,提高诱导轮汽蚀性能^[7-8];诱导轮与离心轮能量匹配研究,以改善泵机组的汽蚀性能^[9-10].文中通过数值仿真分析,研究不同诱导轮、离心轮方案的匹配性及其相对位置对泵内流动分布及泵水力性能的影响.

1 研究对象及计算方法

研究对象为某型发动机氧泵,特点是流量大、转速高,泵入口流速约 17 m/s,离心轮进出口直径比达到 0.77,图 1 为流道模型示意图.为了准确反映流动的真实情况,计算模型与真实结构尽量一致,如考虑了诱导轮进口修圆打磨、叶片进出口倒角等特征.计算采用四面体非结构网格,对叶片进口边、叶顶间隙等部位进行了网格加密处理,网格单元数约为 300 万.

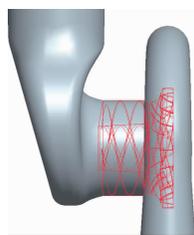


图 1 计算模型
Fig. 1 Computational model

通过研究非定常计算模拟泵转动的动态过程,掌握泵内各区域压力脉动特性.计算工况推进剂泵转频为 $F_n = 266.7$ Hz,采样频率为 18 667 Hz,约 $70 F_n$.计算时在诱导轮入口前、离心轮与扩压器之间、扩压器出口附近以及蜗壳扩散管内布置了压力脉动测点.文中离心轮与扩压器之间压力脉动数据为圆周均布 7 个监测点的平均值.

2 诱导轮方案对比分析

设计最初为等螺距诱导轮,诱导轮叶片入口攻角较大,诱导轮进口回流影响了低压壳体中的流动,增加了低压壳体的流动损失,影响泵机组的汽蚀性能;后为了提升汽蚀性能,设计了变螺距诱导轮方案,通过计算发现变螺距诱导轮方案的泵性能较差;最终设计了变螺距+等螺距的方案.

设计了等螺距、变螺距及变螺距+等螺距 3 种结构形式,共 5 个方案的诱导轮.各方案诱导轮除入口攻角与出口角有变化,其他结构参数都相同,具体见表 1,表中 i_1 为入口攻角(叶尖), β_{21} 为出口角(叶尖),诱导轮结构及螺距变化示意图见图 2,图中 L 为诱导轮相对轴向长度; S 为诱导轮叶片螺距.

表 1 不同方案的诱导轮结构参数
Tab. 1 Configuration parameters of different schemes of inducer (°)

方案	i_1	β_{21}
等螺距 D	4.1	10.0
变螺距 B1	1.8	11.0
B2	2.8	11.0
变螺距+等螺距 BD1	2.0	11.2
BD2	3.1	11.2

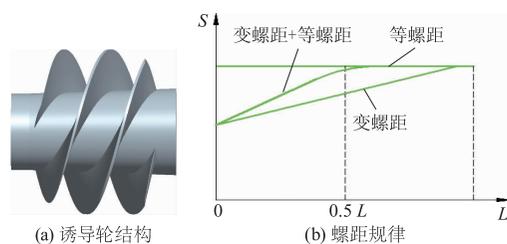


图 2 诱导轮结构及螺距规律
Fig. 2 Inducer structure and pitch curve

将 5 种方案诱导轮与相同的离心轮(此离心轮为方案 1)匹配进行非定常流场计算,计算时不改变各方案诱导轮与离心轮的相对位置(轴向距离和周向角度).表 2 为不同匹配方案的计算结果,其中 η_h 为水力效率, \bar{H} 为计算扬程/额定扬程.

表 2 不同匹配方案的计算结果
Tab. 2 Numerical results at different matching schemes

方案	$\eta_h/\%$	\bar{H}
等螺距 D	86.4	1.08
变螺距 B1	79.3	0.97
B2	81.1	0.99
变螺距+等螺距 BD1	83.5	1.02
BD2	86.3	1.07

从表2可以看出,相比等螺距诱导轮,变螺距诱导轮方案泵水力效率和扬程都较低;变螺距+等螺距方案BD2与等螺距方案相当.从不同诱导轮方案泵内部流动情况对比可以看出,变螺距诱导轮方案,随着诱导轮叶片角的增加,诱导轮叶片出口处液流出现了“扩张”的趋势,引起离心轮进口处回流、叶片出口背面流动分离,这是造成泵性能降低的原因(方案B1与B2流动情况相似);而等螺距方案D诱导轮出口没有出现这种情况,如图3所示.

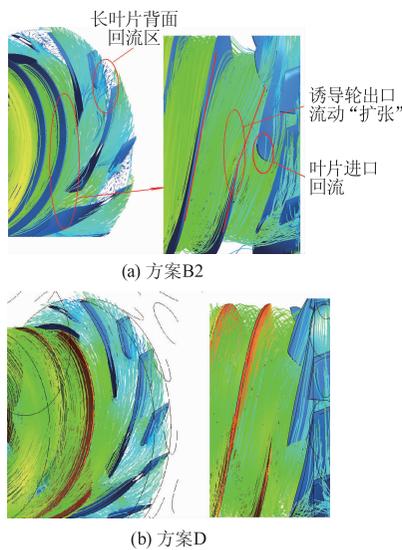


图3 不同诱导轮方案内部流线对比
Fig.3 Comparison of streamlines between different inducer schemes

变螺距+等螺距方案BD1与方案B2的流动情况相似,发现等螺距段的长度不足以抑制诱导轮出口流动的“扩张”趋势.由于结构尺寸限制,诱导轮轴向长度增加的尺度有限,只能增加诱导轮进口攻角,以减小诱导轮叶片转折角,从而减弱出口流动的“扩张”.增加入口攻角后的方案BD2内部流动与等螺距方案D相似,明显优于方案BD1,泵性能与方案D相当.

由于离心轮叶片出口背面流动分离,离心轮出口流动均匀性较差,对应诱导轮方案B1,B2和BD1离心轮与扩压器之间的压力脉动量级较大,如图4所示,其中RMS为离心轮出口压力脉动标准差.

分析不同诱导轮方案诱导轮叶片出口至离心轮叶片进口的流动情况,图5,6为诱导轮叶片出口位置、离心轮叶片进口位置以及诱导轮出口至离心轮进口流线上(约50%叶高位置)各位置的液流角变化情况,其中 γ 为诱导轮叶片相对高度, l 为诱导轮出口至离心轮入口流线的相对距离, β 为液流角.

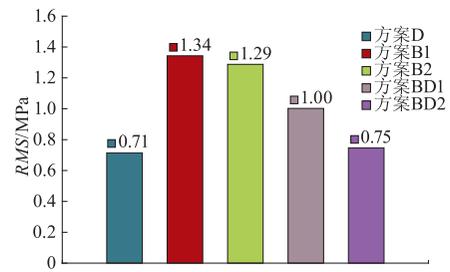


图4 离心轮与扩压器之间的压力脉动对比
Fig.4 Comparison of pressure fluctuation between impeller and diffuser

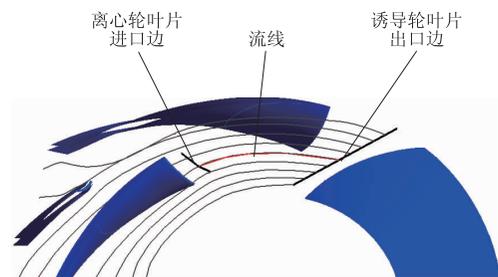
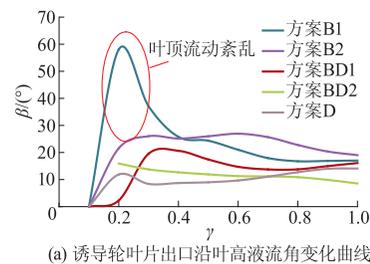
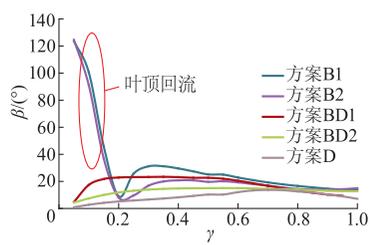


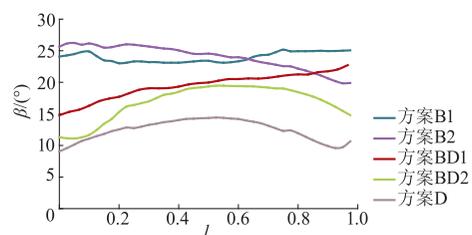
图5 诱导轮出口至离心轮入口流线示意图
Fig.5 Streamline from inducer outlet to impeller inlet



(a) 诱导轮叶片出口沿叶高液流角变化曲线



(b) 离心轮叶片进口沿叶高液流角变化曲线



(c) 诱导轮出口至离心轮入口流线上液流角变化曲线

图6 诱导轮出口与离心轮进口间液流角变化曲线
Fig.6 Curves of fluid flow angles between inducer outlet to impeller inlet

5种方案诱导轮叶片出口角相差不大,但介质流出诱导轮后液流角相差较大.2种变螺距方案诱

导轮与离心轮之间都出现了回流,诱导轮出口液流角相对较大;等螺距诱导轮出口的液流角最小;变螺距+等螺距结构方案诱导轮后的液流角介于两者之间.结合表2中诱导轮结构参数发现,诱导轮后液流角与诱导轮叶片转折角相关,转折角越大,出口液流角与叶片出口角相差得越多.

图3a中采用变螺距诱导轮时,液流从诱导轮出口至离心轮进口液流角较大,离心轮入口冲角相对较小(或为负冲角).考虑离心轮叶片进口流动匹配性,设计了加大进口冲角的离心轮方案2,与诱导轮BD1匹配,其计算结果见表3.

表3 离心轮方案2计算结果
Tab.3 Numerical results of impeller scheme 2

方案	$\eta_h/\%$	RMS/MPa	备注
BD1+离心轮1	83.5	1.00	离心轮2冲角增加2°
BD1+离心轮2	81.3	1.21	

加大离心轮进口冲角后,泵的性能并没有提升.由于进口角加大,保持叶片出口角不变,离心轮包角相应地减小,增加了流道扩张度,叶片出口背面的流动分离更严重,离心轮自身的损失增大,离心轮出口压力脉动量级增大.综合考虑汽蚀性能和效率,设计时采用变螺距+等螺距诱导轮方案BD2.

3 诱导轮与离心轮相对位置匹配分析

表征诱导轮与离心轮相对位置的参数有轴向距离和周向角度.分别对等螺距和变螺距2种诱导轮与离心轮的相对位置进行定常流场优化计算,以了解诱导轮与离心轮相对位置对泵性能的影响.考虑结构允许尺寸和泵机组的汽蚀性能^[11-12],计算时轴向距离的取值范围为5~40 mm,周向角度的取值范围为0°~51.4°,当诱导轮其中一个叶片出口边与离心轮叶片进口边轴向相对时为0°,诱导轮叶片向转动方向偏转时角度增加如图7所示.

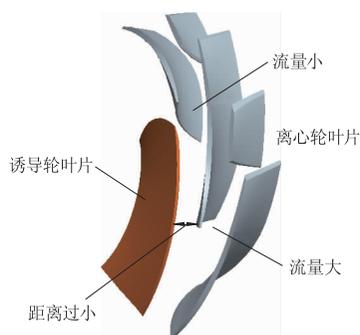


图7 诱导轮与离心轮的相对位置
Fig.7 Relative position of inducer and impeller

图8,9分别为等螺距诱导轮、变螺距诱导轮与离心轮相对位置对性能的影响.

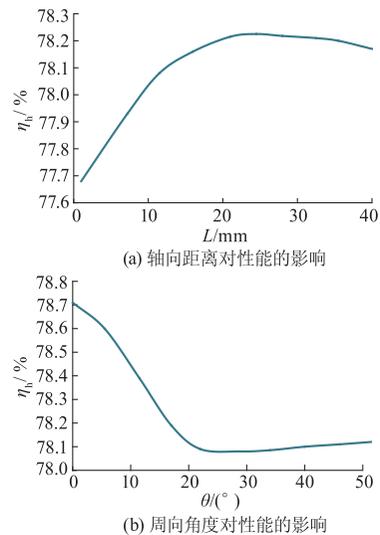


图8 等螺距诱导轮与离心轮相对位置对性能的影响
Fig.8 Influence of relative position of equal-pitch inducer and impeller on pump performance

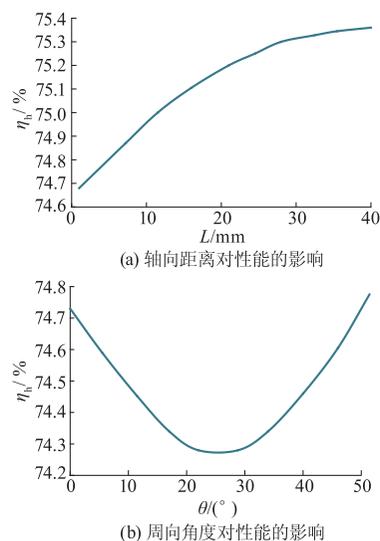


图9 变螺距诱导轮与离心轮相对位置对性能的影响
Fig.9 Influence of relative position of variable-pitch inducer and impeller on pump performance

由图7可知,诱导轮叶片与离心轮叶片的轴向距离过小时,离心轮叶片进口边距诱导轮叶片压力面距离较小,此时离心轮叶片对其背面的通道起“节流”作用,致使离心轮内相邻两通道流量不均匀,降低了泵机组的效率,增加了泵内部压力脉动量级.图8a,9a轴向距离对泵性能的影响曲线证明了这点,随着轴向距离的增加,泵水力效率上升.轴向距离增加至一定程度后,水力效率变化不大.图8b,9b为诱导轮与离心轮轴向距离L较小的情况下,周向角度对泵性能的影响曲线,周向角度 θ 变化

时图7中的最小距离也随之变化,进而影响泵的效率,可以预测当轴向距离较大时,周向角度对泵性能的影响会较小。

4 结 论

针对大流量高速离心泵,通过对不同诱导轮、离心轮方案及不同相对位置流场的仿真计算,得出以下结论:

1) 随着诱导轮叶片角的增加,诱导轮出口液流出现“扩张”趋势,叶片转折角越大,“扩张”趋势越明显。诱导轮出口保持一定长度的等螺距段,可有效抑制出口液流的“扩张”,诱导轮与离心轮的流动匹配性较好。

2) 与诱导轮方案对泵性能的影响相比,诱导轮与离心轮相对位置对泵性能的影响较小。诱导轮与离心轮轴向距离过小会造成离心轮内流动不均匀,影响泵的性能。

参考文献 (References)

- [1] 陈晖,张恩昭,谭永华,等. 高速平板诱导轮的结构设计与分析[J]. 火箭推进,2009,35(3):1-5.
Chen Hui, Zhang Enzhao, Tan Yonghua, et al. Geometry design and analysis of the high-speed rotational plate inducer[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2009, 35(3): 1-5. (in Chinese)
- [2] 潘中永,袁建平,杨敬江,等. 诱导轮与泵主叶轮的匹配关系研究[J]. 水泵技术,2000(3):7-9.
Pan Zhongyong, Yuan Jianping, Yang Jingjiang, et al. Study on matching of inducer and impeller[J]. Pump Technology, 2000(3): 7-9. (in Chinese)
- [3] 徐成波. 高速离心泵中诱导轮与离心轮的匹配关系研究[J]. 水泵技术,1997(3):6-8.
Xu Chengbo. Study on matching of inducer and impeller in high-speed centrifugal pump[J]. Pump Technology, 1997(3): 6-8. (in Chinese)
- [4] 朱祖超. 提高高速泵汽蚀性能的理论分析与实验研究[J]. 机械工程学报,1999,35(6):85-88.
Zhu Zuchao. Theoretical analysis and engineering implementation on achieving excellent suction performance of high speed centrifugal pumps[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(6): 85-88. (in Chinese)
- [5] 谭磊,曹树良. 中比转速离心泵叶轮的优化设计和数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(4):282-285.
Tan Lei, Cao Shuliang. Optimal design and numerical simulation for impeller of centrifugal pump with medium-high specific speed[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(4): 282-285. (in Chinese)
- [6] 孔繁余,黄建军,吕毅,等. 离心泵变螺距诱导轮的开发[J]. 排灌机械,2008,26(3):10-14.
Kong Fanyu, Huang Jianjun, Lü Yi, et al. Development of variable-pitch inducers in centrifugal pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2008, 26(3): 10-14. (in Chinese)
- [7] 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,2011,47(4):171-176.
Tang Fei, Li Jiawen, Chen Hui, et al. Study on cavitation performance of inducer with annulus inlet casing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(4): 171-176. (in Chinese)
- [8] Kyoung H L, Lee J M, Park J S, et al. A Study on cavitation interaction between inducer and impeller in turbopump[C]//40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2004.
- [9] Kosuke Ashihara, Akira Goto, Kenjiro Kamijo, et al. Improvements of inducer inlet backflow characteristics using 3-D inverse design method [C] // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2002.
- [10] 崔宝玲,朱祖超,林勇刚. 等螺距诱导轮内部流动的数值模拟[J]. 机械工程学报,2010,46(6):158-162.
Cui Baoling, Zhu Zuchao, Lin Yonggang. Numerical simulation of inner flow in equal-pitch inducer[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(6): 158-162. (in Chinese)
- [11] 唐飞,李家文,夏德新,等. 提高氧泵诱导轮汽蚀性能的方法研究[J]. 航空动力学报,2008,23(9):1743-1746.
Tang Fei, Li Jiawen, Xia Dexin, et al. Study of methodology for improving cavitation performance of liquid oxygen pump inducer [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(9): 1743-1746. (in Chinese)
- [12] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2011.

(责任编辑 朱漪云)