

## 面积比对变工况泵性能稳定性影响的研究

赵瑞勇, 张翠儒, 刘军年, 张晶辉  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 对不同面积比下某型变工况低比转速燃料泵的特性及稳定性进行了研究, 发现减小面积比, 泵水力损失相对较小, 扬程特性曲线在大流量点趋于平坦; 增大面积比, 水力损失相对增大, 扬程特性曲线在大流量点趋于陡峭。不同面积比下的泵稳定性研究表明, 低工况下泵流量小, 比转数低, 泵稳定工作特别要使用大的面积比, 泵效率会相比降低; 高工况下泵流量大, 比转数较高, 泵稳定工作区域较宽, 小的面积比可使泵扬程和效率值提高。

**关键词:** 变推力发动机; 离心泵; 低比转速; 面积比; 燃料泵稳定性

**中图分类号:** V434.2-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 04-0035-06

## Investigation on influence of different area ratio on stability of centrifugal pump with variable working conditions

ZHAO Ruiyong, ZHANG Cuiru, LIU Junnian, ZHANG Jinghui  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Characteristics and stability on the low specific speed centrifugal pump with variable working conditions at different area ratio was investigated. The results show that the decrease of the area ratio will induce the efficiency increase and make the lift characteristic curve tend to smooth, and the increase of area ratio will increase the hydraulic loss and make the lift characteristic curve tend to craggedness. The stability investigation on pump at different area ratio shows that, in part-load working condition, the pumping flow is small and specific speed is low, so a high area ratio is required for stable work of the pump, otherwise the pumping efficiency will be decreased; in over flow working condition, the pumping flow is large, the specific speed is high, and the stable working region of the centrifugal pump is wide, but the lower area ratio can increase the efficiency and lift of the centrifugal pump.

**Keywords:** variable thrust engine; centrifugal pump; low specific speed; area ratio; fuel pump stability

收稿日期: 2016-05-09; 修回日期: 2016-06-31

作者简介: 赵瑞勇 (1984—), 男; 工程师, 研究领域为液体火箭发动机涡轮泵技术

## 0 引言

某型变工况发动机用燃料泵曾在工程阶段出现了低工况流量-扬程 S 型突升不稳定。作为小推力泵压式发动机供应系统的核心部件,燃料泵实现小流量、高扬程、大范围变工况工作技术难度很大。同时为了提高燃料泵功率密度,泵的单级扬程和转速要高,因此该型离心式燃料泵的比转速极低(设计点比转速=25)。由于低比转速高速离心泵的叶轮流道长而窄,在小流量工况下很容易在诱导轮进口产生回流,叶轮流道里容易产生流动分离,叶轮-蜗壳容易产生尾流-射流等现象,致使各项损失增加,出现流动参数(如出口压力)波动,造成小流量下泵的噪声和振动很剧烈,表现为小流量工作不稳定性<sup>[2-4]</sup>。小流量工作不稳定性是低比转速高速离心泵必须要解决的关键难题之一。

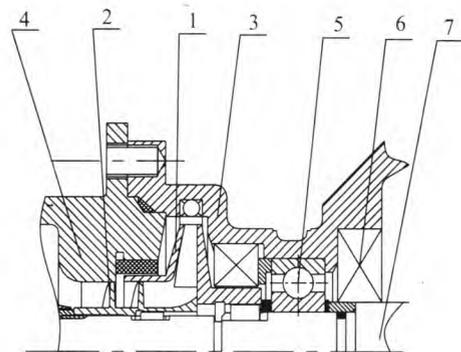
离心泵小流量工况下流动不稳定性及其控制一直是研究的重点和难点。在改善泵不稳定性方面的研究,多数学者主要针对叶轮进行优化设计,提出设置产生预旋的前置导叶,斜切叶轮出口边,减少叶片数,选取较小的叶片出口角和叶轮出口宽度,设计变螺距诱导轮和复合叶轮等方法<sup>[5-7]</sup>。H.H.Anderson 首次提出了离心泵的面积比原理,指出叶轮出口过流面积与泵体喉部面积之比乃是泵扬程、流量和轴功率等特性的主要决定因素,给出扬程系数、流量系数和比转速与面积比的关系曲线,并通过试验验证了面积比原理预测的泵性能与实际的泵性能相当吻合<sup>[8]</sup>。Anderson 的面积比  $Y$  定义为叶轮叶片间的出口面积 ( $F_2$ ) 与泵体喉部面积 ( $F_3$ ) 之比。该理论的核心思想是从定量的角度讲叶轮和泵体两大主要水力部件合理匹配。R.C.Worster 首次用数学证明了 Anderson 所提出的面积比原理的科学性<sup>[9]</sup>。国内学者袁寿其等对面积比进行了理论分析和试验研究<sup>[10]</sup>,用面积比绘制的扬程系数和流量系数的形式来修正标准化的设计数据,从整体上把叶轮和泵体这两大水力部件联系在一起,具有其科学性。杨军虎等依据离心泵的面积比原理<sup>[11-12]</sup>,推导得出了离心泵面积比的计算公式,体现了面积

比值与叶轮、蜗壳的水力参数关系。黎义斌等为解决超低比转数小流量不稳定、有驼峰、效率低,大流量轴功率易过载等问题,从改进离心泵水力设计参数和过流部件的匹配关系入手,对某型离心泵进行了改型设计,达到了提高水力性能的要求<sup>[13]</sup>。文献 [14] 指出,影响离心泵最大轴功率的主要因素是面积比。面积比是叶轮几何参数和喉部面积的相对值,反映叶轮和蜗壳的匹配关系。可以推测,改变低比转速离心泵面积比后,很可能会改善流场在叶轮出口与蜗壳联合作用时出现的二次流等流动混掺现象,从而改变泵的相应特性,达到控制变工况低比转速离心泵的小流量运行不稳定。

本文基于面积比 ( $F_2/F_3$ ) 原理对某型变工况低比转速燃料泵开展了小流量扬程特性不稳定的试验研究,获得了变工况低比转速泵的小流量不稳定工程控制方法及其稳定工作边界,为保障某型变工况泵宽流量范围的工作稳定性和低比转速高速离心泵的设计提供了重要的参考价值。

## 1 研究对象

基于面积比原理开展低比转速离心泵宽流量范围性能稳定性试验研究的水泵模型是某型变工况发动机燃料泵,主要由进口管、叶轮、蜗壳及出口管等组成。叶轮为闭式,叶片采用大小复合式。试验泵的结构形式如图 1 所示。



1-Impeller; 2-Inducer; 3-Volute; 4-Inlet components;  
5-Bearing; 6-Seal; 7-Axis

图 1 某型燃料泵结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of one fuel pump

表 1 给出了该试验泵的主要设计参数, 其中泵变工况工作流量、转速及扬程范围按照无因次流量比  $Q/Q_d$ 、扬程比  $H/H_d$ 、转速比  $N/N_d$  给出。

表 1 试验泵性能参数

Tab. 1 Performance parameters of test pump

泵类型	设计比 转速	流量比	扬程比/%	转速比
燃料泵	25	0.75~1.25	50~104	0.70~1.20

泵试验系统主要包括泵试验台、控制系统、测试系统、液流系统、摄像监控系统、设备故障监控系统和辅助系统。泵试验台由传动电机、变速箱、扭矩仪及对接口组成。辅助系统由抽真空及空气增压系统、润滑系统组成, 如图 2 所示。

某型燃料泵特性试验扬程采用测量泵进口和出口压力给出, 功率采用扭矩测功给出, 其主要测试设备精度如表 2 所示。

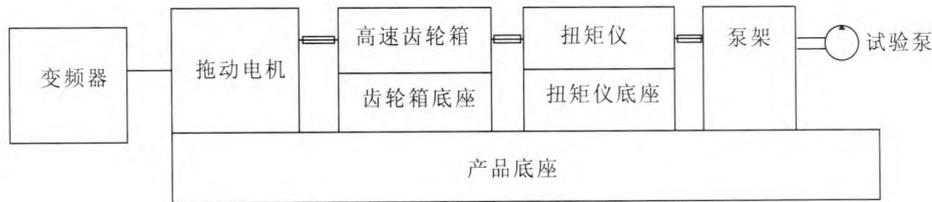


图 2 泵水力试验台结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of hydraulic power test platform for pump

表 2 试验测试设备精度

Tab. 2 Accuracy of testing equipments

试验台仪表设备	型号	量程	精度
入口压力传感器	EJA430A	0~3 MPa	0.002 5
出口压力传感器	EJA430A- EBS3A-69ED	0~10 MPa	0.002 5
扭矩仪	JN338-1000A	0~50 N.m	0.005
流量计	LTmag-MFE-32	0~2 L/s	0.005

比转速变工况泵性能影响的规律。表 3 给出了变工况泵 1.0 倍流量下泵的主要试验结果参数。

不同面积比下泵流量-扬程特性曲线的变化规律如图 3 所示。

试验看出: 在小流量区 (0.6~0.8 倍流量), 扬程随面积比的增大有所增大, 且最高扬程点随着面积比的增大向小流量区偏移。对于某型变工况燃料泵, 当面积比达到  $Y=22.8$  时, 能够保证在大于 0.7 倍流量范围内, 发动机全工况工作中泵的扬程特性均为负斜率 (稳定特性)。编号为 AWR-006 试验泵, 当面积比  $Y=24.82$  时, 该泵在大于 0.6 倍流量范围内已经完全消除了流量扬程特性线的正斜率段, 全流量范围内扬程特性曲线呈单调平滑下降 (稳定特性)。在大流量区 (1.0~1.25 倍流量), 随面积比的增大扬程明显减小, 且面积比越大泵扬程特性曲线越陡峭, 面积比越小泵扬程特性曲线越平坦。从试验泵 AWR-001, AWR-002, AWR-003 及 AWR-004 试验数据可以看出, 对于该型燃料泵, 当其面积比  $16.61 \leq Y \leq 21.57$  时, 在发动机变推力工作范围内 (0.7~1.25 倍流量), 泵扬程特性曲线出现了正斜率上升段 (不稳定特性), 且面积比越小, 该不稳定区越宽。

## 2 宽流量范围离心泵稳定性的结果及讨论

### 2.1 面积比对泵性能特性的试验

对某型变工况燃料泵 (对应流量比范围 0.75~1.25) 保持离心轮、诱导轮、进口组件不变, 设计加工 6 组不同蜗壳喉部面积的试验泵组进行宽流量范围泵扬程比 ( $H/H_d$ ) - 流量比 ( $Q/Q_d$ )、效率-流量比 ( $Q/Q_d$ ) 特性开展试验研究, 绘制出不同面积比下对应的泵特性曲线, 得出面积比对低

表3 主要试验参数

Tab. 3 Main testing parameters

试验泵号	试验转速 ( $r \cdot \min^{-1}$ )	设计点 (1.0 倍流量)			流量比	喉部面积 /mm <sup>2</sup>	面积比
		扬程比	效率/%	比转速			
AWR-001	35 000	1.0197	38.8	27.84	0.6~1.38	27.04	16.61
AWR-002	35 000	1.0156	40.1	27.93	0.6~1.38	21.64	20.75
AWR-003	35 000	1.0135	39.6	27.97	0.6~1.38	21.23	21.15
AWR-004	35 000	1.0042	37.3	28.17	0.6~1.38	20.82	21.57
AWR-005	35 000	0.9729	35	28.84	0.6~1.38	19.62	22.88
AWR-006	35 000	0.9490	35.1	29.37	0.6~1.38	18.09	24.82

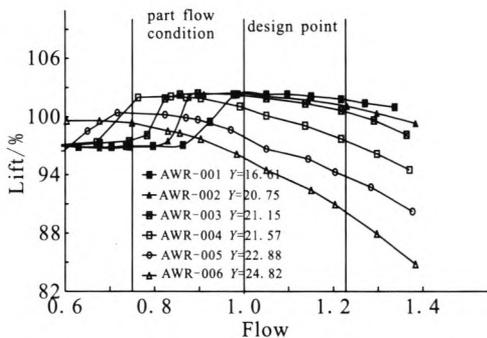


图3 不同面积比下流量-扬程特性曲线

Fig. 3 Curves of flow-lift characteristics at different area ratio

不同面积比下泵流量-效率特性曲线的变化规律如图4。

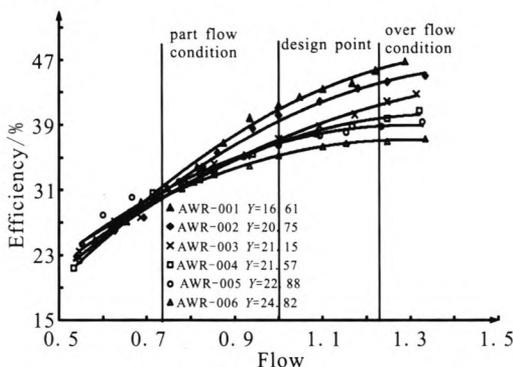


图4 不同面积比下流量-效率特性曲线

Fig. 4 Curves of flow-efficiency characteristics at different area ratio

从图4中的试验结果可以发现：随着面积比的增大泵效率曲线斜率逐渐变小，也就是说面积比越大，泵效率曲线越平缓，最高效率点向小流量区偏移；面积比越小，泵效率曲线越陡峭，最高效率点向大流量区偏移；在小流量区（0.6~0.8倍流量），相同流量点下不同面积比对泵效率影响变化不太大；在大流量区（1.0~1.25倍流量）相同流量点的泵效率随着面积比的增大呈减小的态势，面积比越大泵效率越低。

试验结果表明：工程型号用泵或者泵制造厂对泵性能范围及小流量稳定性控制采用改变蜗壳泵喉部面积的方式是有效的，而且比较简单易行。但从试验曲线同样可以看出，所取泵面积比对泵的外特性影响很大，其规律为减小泵面积比，在流量增大时，水力损失相对较小（效率偏高），且可使泵的最高效率点偏向大流量，并使流量扬程特性曲线在大流量点趋于平坦；增大泵面积比，在减小流量时，水力损失相对增大（效率偏低），且使泵的最高效率点偏向小流量，同时使流量扬程特性曲线在大流量点趋于陡峭。

### 2.2 面积比对泵性能特性的数值模拟

为了进一步探究不同面积比对某型变工况低比转速燃料泵的性能影响规律，基于ANSYS-Fluent对表3中的AWR-001/002/004/005/006

(因 AWR-003 泵面积比与 AWR-004 接近, 未进行计算) 5 种不同面积比的模型泵进行了数值仿

真, 图 5 给出了设计点下某型燃料泵在 5 种不同面积比下泵中截面的速度和流线分布。

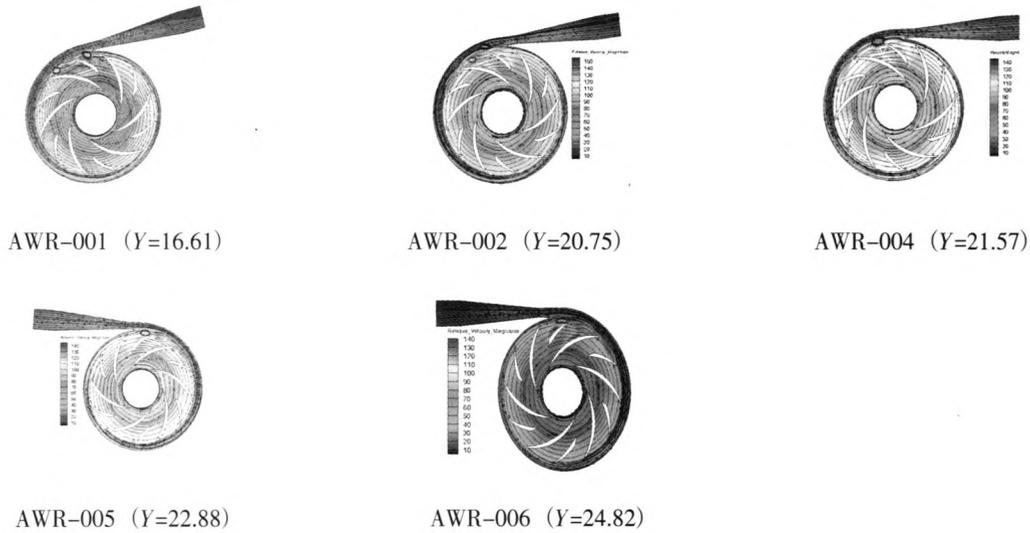


图 5 不同面积比下某型泵中截面速度流线

Fig. 5 Flow lines of cross-section velocity of a certain pump at different area ratio

从图 5 数值模拟结果可以看出, 设计流量下, 某型变工况燃料泵在面积比  $Y < 21.57$  时, 对应 AWR-001/002 两台泵均在叶轮出口出现了两个旋涡, 且随着面积比的增加, 旋涡位置表现为由叶轮出口向下游迁移的趋势, 旋涡大小相比减小; 当  $Y > 21.57$  时, 对应 AWR-004/005/006 三台泵在叶轮出口处出现了一个旋涡, 且位置基本接

近固定, 旋涡大小有减小的发展趋势。可以看出, 对于某型燃料泵, 正是由于通过改变其面积比, 达到了改善叶轮与蜗壳部件之间的流动, 通过合理的面积比匹配减少了叶轮出口与蜗壳之间的由于回流及速度迁移引起的旋涡损失, 从而改善了泵的不稳定工作。

表 4 某型变推力发动机燃料泵宽流量范围面积比与工况比转速变化规律

Tab. 4 Relation between area ratio and working condition specific speed of fuel pump of a variable thrust engine in wide flow range

流量比	比转速					
	16.61	20.75	21.15	21.57	22.88	24.82
0.55	22.04*	21.25*	21.38*	21.10*	21.06*	21.09*
0.62	23.39*	22.93*	22.83*	22.69*	22.66*	22.82
0.70	23.96	23.98*	23.95*	23.88*	24.18	24.45
0.78	24.40*	24.43*	24.51*	24.68	24.81	25.10
0.85	25.51*	25.76*	25.54*	25.74	26.06	26.36
0.93	26.84	26.91*	26.89*	27.18	27.36	28.12
1.00	27.84	27.93	27.97	28.17	27.38	29.39
1.10	29.18	29.18	29.20	29.66	28.84	31.45
1.15	30.12	30.46	30.48	31.06	30.55	32.59
1.25	30.90	31.48	21.56	32.49	31.72	34.75

注: \* 为比转速负斜率点, 非稳定

### 2.3 变工况泵稳定性边界探讨

按照泵比转速的定义形式,研究了变工况泵不同(工况)流量下,泵的工况比转速(综合反映流量、扬程、转速特性)与面积比的规律,给出了某型变工况燃料泵不同流量(工况下)下,泵工况比转速与面积比的变化规律及其稳定工作边界,如表4所示。

从表4试验结果表明,对于变工况泵如果流量很小,其工况比转数较低,泵稳定工作特别要使用高的面积比,但是泵效率会因较大的面积比而相比较低;如果在大流量,工况比转数较高,泵稳定工作区域较宽,在保持叶轮结构参数不变的前提下,合理通过增大蜗壳喉部面积(减小面积比)可以得到较高的扬程和平坦的流量-扬程曲线,同时对应的泵效率值亦相比较较高。

## 3 结论

以某型变工况涡轮泵工程型号为对象,通过试验研究了变工况低比转速高速离心泵性能稳定性及其控制,结果表明:

1) 在保持叶轮不变的条件下,对于工程型号用泵或者泵制造厂对泵性能范围及小流量稳定性控制采用改变蜗壳泵喉部面积的方式是有效的,而且比较简单易行。

2) 减小面积比,流量增大时,水力损失相对较小(效率偏高),且可使泵的最高效率点偏向大流量,并使流量扬程特性曲线在大流量点趋于平坦;增大面积比,在减小流量时,水力损失相对增大(效率偏低),且使泵的最高效率点偏向小流量,同时使流量扬程特性曲线在大流量点趋于陡峭。

3) 对于变工况泵,流量(比)越大,其对面积比的敏感程度越低,对应不同面积比的稳定工作范围越宽;流量(比)越小,其对面积比的敏感程度越高,对应不同面积比的稳定工作范围越窄,基本规律为小流量对应低比转速和大面积

比。

4) 某型发动机在其变推力工况范围内,其燃料泵稳定工作对应的面积比范围为  $21.57 \leq Y \leq 24.82$ ,为工程型号研制及变工况低比转速泵设计提供了指导。

### 参考文献:

- [1] 关醒凡.现代泵技术手册[M].第1版.北京:宇航出版社,2011.
- [2] 朱祖超,超低比转速高速离心泵的理论研究及工程实现[J].机械工程学报,2000(36):30-33.
- [3] ZHU Zuchao, CHEN Ying. Experimental study on high-speed centrifugal pumps with different impellers[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2002, 15(4): 372-375.
- [4] 张德胜,施卫东.低比转速离心泵内部流场分析及试验[J].农业工程学报,2010(26):108-112.
- [5] 张剑慈,朱祖超.提高离心泵性能的试验研究[J].流体机械,2008,36(4):1-3.
- [6] 崔宝玲,朱祖超.长中短叶片离心叶轮内部流动的数值模拟[J].推进技术,2006,27(3):243-247.
- [7] 韩建宇.低比转速离心泵性能曲线驼峰问题的研讨[J].水泵技术,2004(4):24-27.
- [8] ANDERSON H H. Submersible pumps and their applications[M]. England: The Trade dtechnical press Limited, 1986.
- [9] WORSTER R C. The flow in volutes and its effectson centrifugal pump performance[J]. Proc Meeh E, 1963, 177(31):50-60.
- [10] 袁寿其,曹武陵,陈次昌.面积比原理和泵的性能[J].农业机械学报,1993,24(2):36-40.
- [11] 杨军虎,张人会,王春龙,等.低比转速离心泵的面积比原理[J].兰州理工大学学报,2006,32(5):53-55
- [12] 杨虎军,张人会,王春龙,等.计算离心泵面积比和蜗壳面积的方法[J].机械工程学报,2006,42(9):67-70.
- [13] 黎义斌,王洋.无过载超低比转速离心泵改型设计[J].排灌机械,2006,24(2):7-9
- [14] 袁寿其.低比转速离心泵理论与设计[M].北京:机械工业出版社,1997.

(编辑:马杰)