

涡轮泵超低工况性能研究

白东安

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 对于泵压式变推力发动机和先进的冲压发动机, 需要涡轮泵变工况工作, 涡轮泵变工况性能是该类发动机研究的一个重点。结合上面级验证性发动机试车, 对游机涡轮泵变工况的性能和稳定性进行分析研究。通过泵全流量特性试验和汽蚀试验, 得出泵能够在额定流量点 25% 处稳定工作的结论。对涡轮工况变化后的燃气参数、入口压力、出口压力及效率进行分析, 认为涡轮也能够稳定工作。给出了游机涡轮泵可以参加验证性试车的结论, 并得到了发动机试车的验证。

关键词: 涡轮泵; 变工况; 性能研究

中图分类号: V434.21

文献标识码: A

文章编号: (2008) 03-0013-04

Research on the turbo-pump performance under ultra-low operation condition

Bai Dong'an

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

Abstract: The capability of turbo-pump working in variable conditions is required and important for pump-pressurized variable thrust rocket engine and ramjet propulsion. Combining with a test of the upper stage rocket engine, the performance and stability of the turbo-pump at low condition are studied in this paper. Through the full flow characteristic and cavitation tests of pump, it is concluded that the pump can work stably in 25% rated flow condition. The analyses of gas parameter, inlet pressure, outlet pressure and efficiency of turbo under varied conditions indicated that the turbo can also work stably. The conclusions made above are verified by engine test.

Key words: turbo-pump; variable conditions; performance research

收稿日期: 2008-01-14; 修回日期: 2008-03-20。

作者简介: 白东安 (1966—), 男, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机涡轮泵设计。

1 引言

对于泵压式变推力发动机和先进的冲压发动机, 需要涡轮泵大范围变工况工作, 涡轮泵大范围变工况性能是该类发动机研究的一个重点。

结合一次上面级发动机验证性试车, 对涡轮泵变工况的性能和稳定性进行了试验和分析研究。验证性上面级发动机要求推力 10kN, 为了选择合适的涡轮泵, 发动机系统论证后决定采用现有游机涡轮泵, 而验证性发动机泵的工作流量点仅为游机涡轮泵额定工况的 25%。由于涡轮泵工作参数变化大, 为此对涡轮泵的变工况下工作性能进行详细的分析, 给出了可以参加试车的结论, 并得到了发动机试车的验证。

2 泵变工况性能研究

为获得小流量下泵特性, 进行了燃料泵和氧化剂泵全流量特性试验, 以氧化剂泵为例, 绘制的试验曲线见图 1、图 2 及图 3, 泵的全流量汽蚀特性见图 4。该泵额定流量约 7L/s, 扬程约为 6.5MPa, 效率 67%。低工况验证性试车发动机泵流量点为 1.8L/s, 从试验曲线可以看出, 该点效率约为 30%, 显著偏低。通过泵的全流量特性的研究, 得出以下结果:

(1) 在全流量区域内, 泵的扬程值波动范围约 10%。在小流量区域, 特性曲线存在“驼峰”现象, 但不是很严重, 不影响泵正常工作;

(2) 在额定流量点之前, 效率随流量变化较大; 在额定流量点附近效率变化趋缓;

(3) 功率随流量的变化规律基本是一条等斜率的直线;

(4) 泵全流量汽蚀表明, 在约为额定流量点的 1/2 到额定流量点之间, 泵的净正抽吸压头 $NPSH$ 值是随流量的减小而减小的, 但小于额定点的 1/2 后, $NPSH$ 值逐步增大, 在 1/4 额定流量点 $NPSH$ 值为额定流量点的一倍。超过额定点以后, $NPSH$ 值急剧增大, 在额定流量点 140% 处, $NPSH$ 值为额定点的 6 倍。

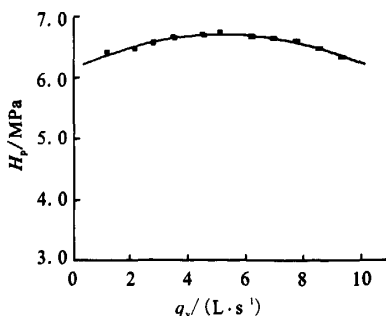


图 1 扬程-流量试验曲线

Fig.1 Head-flow curve

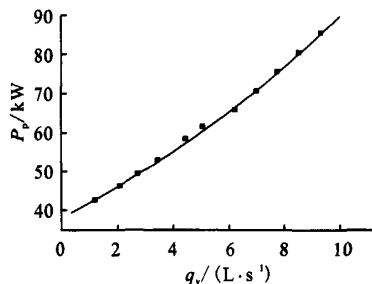


图 2 功率-流量试验曲线

Fig.2 Power-flow curve

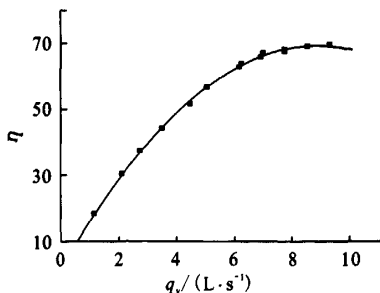


图 3 效率-流量试验曲线

Fig.3 Efficiency-flow curve

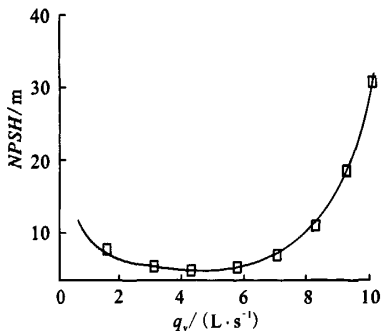


图 4 全流量汽蚀试验曲线

Fig.4 Full flow cavitation curve

泵在小流量下性能偏低的原因是由于在小流量下损失加大(泵在设计流量时水力损失最小)。小流量下,在叶轮进口和出口会出现强烈的回流,使摩擦损失加大,水力滞止损失加大,从而使轮盘损失加大。小流量下,容积损失也加大,使得小流量下泵的效率偏低。

试验表明,随着泵流量的减少,泵净正抽吸压头 $NPSH$ 值是降低的。但随着流量进一步减小,泵的 $NPSH$ 值急剧增大。这是由于在小流量工况下,泵汽蚀特性发生变化,形成泵在小流量下泵的净正抽吸压头高于额定流量点。对于大于额定点流量的工况,净正抽吸压头 $NPSH$ 值有增大的趋势。

3 涡轮变工况分析

根据验证性试车发动机系统调整计算的功率平衡计算结果,涡轮的功率和流量比额定流量小,但由于泵在小流量点试验的效率偏低,涡轮功率与游机涡轮功率相差不大,约为游机的 70%。下面从几个方面分析工况变化后对涡轮的性能影响。

3.1 涡轮燃气参数分析

涡轮燃气流量减小后,涡轮入口压力减小约 1MPa,燃气温度减小约 16℃,计算得出对 RT 值的影响约为 0.5%,影响甚微,不会对涡轮绝热功造成明显影响。

3.2 涡轮工作稳定性分析

(1) 涡轮最小出口压力

对于冲击式涡轮,为了保证涡轮性能稳定,在选择涡轮出口压力时,应使得出口压力比环境压力高 10% 以上。

根据验证性试车发动机涡轮入口压力和涡轮压比,计算得到涡轮出口压力 $p_{\infty}=0.21\text{MPa}$,而涡轮排气管压降约 0.08MPa,计算排气管出口压力 $p_{\text{管}}=0.13\text{MPa}$;地面大气压力 $p_a=0.09\text{MPa}$;计算得到 $(p_{\text{管}}-p_a)/p_a>45\%$ 。因此,涡轮可正常工作。

(2) 涡轮排气管内燃气能否到音速的分析

要保证排气管最小截面上的气体流速达到音

速,涡轮出口压力与环境压力之比应满足:

$$p_{\infty}/p_a \geq \delta$$

其中

$$\delta = [(k+1)/2]^{k/(k-1)}$$

式中,绝热指数 $k=1.25$ 。计算得到 $\delta=1.8$,这样 $p_{\text{管}}/p_a=2.37>1.8$ 。

因而,在排气管内燃气能够达到音速。这样环境压力变化不会对涡轮的性能造成干扰。

3.3 涡轮效率影响分析

由于涡轮效率的影响因素主要是速比 u/c ,影响绝对速度 c 的是燃气的 RT 值和压比,计算得出验证性试车在相同转速下涡轮效率与游机涡轮效率相差不到 0.5%。因而计算涡轮效率时仍可采用现有游机涡轮效率计算公式。

4 泵的温升估算

泵工作时会有能量损失,损失的机械能部分转化为热能。

泵中功率的损失即单位时间内能量的转化,它所产生的能量为:

$$\Delta N = (1-\eta)N = (1-\eta)q\rho gH/\eta$$

每秒流过泵的流体质量为 q ,单位为 kg/s ,假设所有的能量均传给液体,则每千克液体得到的能量为:

$$(1-\eta)gH/\eta$$

设液体的热容为 c_p ,根据传热计算,得到液体的温升为:

$$\Delta t = (1-\eta)gH/\eta/c_p = (1-\eta)\frac{\Delta p \times 10^6}{\rho}/\eta/c_p$$

可见,推进剂流过泵,温度是上升的,其温升与泵效率和扬程有关。

计算的推进剂温升见表 1。

从表 1 可见,泵工作时,偏二甲胍温升为 7℃,按最高入口温度 25℃计算,泵出口温度为 33℃,小于沸点温度 63℃,不会发生汽化。按照氧化剂泵最高入口温度 20℃计算,泵出口温度达到 27℃。但由于泵出口压力高达 7MPa,在 0.15MPa 时的沸点已达 30℃,也不会发生汽化。

表 1 推进剂的温升计算结果
Tab.1 The calculated results of temperature rise

泵别	0.1MPa 时推 进剂沸点/℃	0.15MPa 时推 进剂沸点/℃	扬程 Δp /MPa	泵效率	20℃比热容 /(J/kg·K)	温升/℃
氧化剂泵	21.15	30	7	0.30	1515	8
燃料泵	63.10	—	7	0.32	2733	7

作正常，性能稳定，与调整值吻合。

5 发动机试车验证

游机涡轮泵带动一个燃烧室进行了验证性试车，发动机工作中涡轮泵工作正常，性能稳定，与调整值吻合。

6 结论

(1) 泵全流量试验表明，在小流量下效率偏低，净正抽吸压头 *NPSH* 值增大。但泵性能稳定，且泵温升不会造成推进剂的汽化，泵能够正常工作。

(2) 验证性试车的涡轮工况与额定点差别不是很大，涡轮效率可以采用原有的计算方法，涡轮出口压力能够保证稳定工作。

(3) 验证性发动机试车结果表明，涡轮泵工

参考文献：

[1] 阿列玛索夫 B E. 火箭发动机原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.

[2] 黄智勇, 李晶旻, 黄红. 高工况涡轮泵轴系状态对工作可靠性的影响[J]. 火箭推进, 2007, 33(1): 32-35.

[3] 沃尔科夫 E B. 火箭发动机静、动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1978.

[4] 奥夫夏尼科夫 B B. 高转速叶片泵[M]. 北京: 机械工业出版社, 1975.

[5] 莫什金 E K. 液体火箭发动机动力学过程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1964.

[6] 严俊峰, 陈炜. 基于遗传算法的低比转速高速泵优化设计[J]. 火箭推进, 2006, 32(3): 1-7.

(编辑：马 杰)

(上接第 48 页)

[4] Letouneau S, Famili A, Matwin S. Data Mining for Prediction of Aircraft Component Failure[J]. IEEE Intelligence Systems: Special Issue on Data Mining. Amsterdam, Netherlands, August: Fall, 1999: 59-56.

[5] Blair J, Shirkhodaie A. Diagnosis and Prognosis of Bearing Using Data Mining and Numerical Visualiztion Techniques [C]. Proceedings of the 33rd Southeastern Symposium on System Theory. Athens Ohio U.S.A 2001: 395-399.

[6] 杨文献, 姜节胜. 基于数据挖掘的柴油机气门故障诊断技

术研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(10): 25-29.

[7] 张育林, 吴建军, 朱恒伟, 等. 液体火箭发动机健康监控技术[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1998.

[8] Yuan Xiaofeng, Xu Hualong, Chen Shuhong. An Improvement on the Constrained Association Rule Mining Algorithm [C]. Proceedings of the 1st International Conference on Digital Information Management, Bangalore India: Dec, 2006: 205-208.

(编辑：陈红霞)