

## 基于转子固有频率的涡轮泵故障检测方法\*

谢光军, 胡萋庆, 秦国军, 胡海峰, 胡雷

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**为了有效地检测液体火箭发动机涡轮泵的故障,分析了某型液体火箭发动机的 28 次历史试车数据,得到了涡轮泵转子的一阶、二阶和三阶临界转速以及轴向固有频率的数值,研究了这 4 个转子固有频率幅值的稳定性及对涡轮泵故障的敏感性,得出了它们具有较强的稳定性和故障敏感性的结论。在此基础上,提出并验证了基于转子固有频率的涡轮泵故障检测方法。结果表明,基于转子的一阶、二阶和三阶临界转速以及轴向固有频率幅值能有效地检测涡轮泵的故障。

**关键词:**液体火箭发动机;涡轮泵;故障检测;转子固有频率

中图分类号:V434+.21 文献标识码:A

## Research on Turbopump Fault Detection Based on Rotor Intrinsic Frequency

XIE Guang-jun, HU Niao-qing, Qin Guo-jun, HU Hai-feng, HU Lei

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** To detect faults of a liquid rocket engine (LRE) turbopump effectively, a turbopump fault detection approach based on rotor intrinsic frequency is presented in this paper. First of all, 28 LRE historical test data were analyzed, from which the values of the first, second and third order critical frequency and the axial intrinsic frequency were achieved. After that, the stability and turbopump fault sensitivity of this four rotor intrinsic frequencies were researched, from which we found that their intrinsic frequency amplitudes had high stability and fault sensitivity. Finally, the turbopump fault detection approach was validated by LRE historical test data. The results show that the turbopump faults can be detected effectively by using the amplitudes of rotor first, second and third order critical frequency as well as axial intrinsic frequency.

**Key words:** liquid rocket engine; turbopump; fault detection; rotor intrinsic frequency

液体火箭发动机健康监控技术是航天推进领域的研究热点<sup>[1-2]</sup>。涡轮泵在液体火箭发动机中占有较高的故障率,目前其健康状况还无法通过返厂检查来确定,因此涡轮泵健康监控技术及系统的研究显得尤为重要<sup>[3-5]</sup>。在涡轮泵故障检测中,基于涡轮泵振动信号的时域统计特征,研究了多种自适应实时故障检测算法<sup>[6-8]</sup>和新异类检测技术<sup>[9-10]</sup>,并以此为基础,研究了涡轮泵故障检测系统<sup>[4-5,11]</sup>,通过了某型液体火箭发动机时长分别为 120s 和 500s 的两次点火试车考核,都取得了很好的效果。

当然,涡轮泵的故障不仅在信号的时域特征上有所表现,而且在其频率特征上也会有所反映。文献[3]利用转子同步旋转频率及其倍频对航天飞机主发动机(SSME)的高压燃料和氧化剂涡轮泵的健康状态进行监测,并在斯坦尼斯航天中心(SSC)获得成功应用。转子固有频率同样也是衡量涡轮泵状态的重要特征,对于它的研究,主要集中于临界转速的计算方法方面<sup>[12-13]</sup>。在故障检测方法研究方面,文献[14]虽然提及转子的二阶、三阶临界转速可以作为故障检测特征,但是没有给出具体的原因及检测结果,所以,开展基于转子固有频率的涡轮泵故障检测方法研究具有十分重要的意义。

为此,本文分析了某型液体火箭发动机的历史试车数据,提取了涡轮泵转子的一阶、二阶、三阶及轴向固有频率,研究了它们幅值的稳定性及对涡轮泵故障的敏感性,并应用于涡轮泵故障检测中。结果表

\* 收稿日期:2006-03-01

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(2002AA722070);国家自然科学基金资助项目(50375153)

作者简介:谢光军(1976—),男,博士生。

明,基于转子固有频率幅值,可以有效地检测涡轮泵的故障。

## 1 涡轮泵转子固有频率分析

涡轮泵转子固有频率主要包括横向和轴向固有频率两种。对于横向固有频率,这里主要分析其一阶、二阶和三阶临界转速;对于轴向固有频率,仅分析一阶轴向固有频率。这样做的原因是,某型液体火箭发动机涡轮泵工作在转子的二阶及三阶临界转速之间,当其发生故障时,容易激发转子的上述4个固有频率。

### 1.1 临界转速分析

通常将涡轮泵转子系统简化为单圆盘转子系统,其临界角速度  $\omega_{cn}$  的方程组可描述为

$$\omega_{cn}^4 - \frac{J_p}{J_d} \Omega \omega_{cn}^3 - (\omega_{rr}^2 + \omega_{\varphi\varphi}^2) \omega_{cn}^2 + \frac{J_p}{J_d} \Omega \omega_{rr}^2 \omega_{cn} + \omega_{rr}^2 \omega_{\varphi\varphi}^2 - \omega_{r\varphi}^2 \omega_{\varphi r}^2 = 0 \quad (1)$$

式中  $\omega_{rr}^2 = k_{rr}/m$ ;  $\omega_{r\varphi}^2 = k_{r\varphi}/m$ ;  $\omega_{\varphi\varphi}^2 = k_{\varphi\varphi}/J_d$ ;  $\omega_{\varphi r}^2 = k_{\varphi r}/J_d$ ;  $J_p$ 、 $J_d$  分别为圆盘的极转动惯量和赤道转动惯量;  $k_{rr}$  为圆盘沿  $o'x$  (或  $o'y$ ) 方向有单位移动时在  $o'x$  (或  $o'y$ ) 方向所需加的力;  $k_{\varphi\varphi}$  为圆盘绕  $o'x$  (或  $o'y$ ) 轴有单位转角时对  $o'x$  (或  $o'y$ ) 轴所需加的力矩;  $k_{r\varphi}$  为圆盘绕  $o'x$  (或  $o'y$ ) 轴有单位转角时在  $o'y$  (或  $o'x$ ) 所需加的力;  $k_{\varphi r}$  为圆盘沿  $o'x$  (或  $o'y$ ) 方向有单位转角时对  $o'y$  (或  $o'x$ ) 轴所需加的力矩;  $o'$  表示圆盘中心;  $\Omega$  为转子的转动角速度。

根据式(1)求出临界角速度  $\omega_{cn}$  (取其绝对值)后,除以  $2\pi$ ,再从小到大依次排列,前3个数值对应的就是转子的一阶、二阶和三阶临界转速(即  $f_{c1}$ 、 $f_{c2}$  和  $f_{c3}$ )。

式(1)所示的临界转速的计算方法有传递矩阵法和有限元法<sup>[12-14]</sup>等。这些方法在计算过程中,一般需要设置许多的假设或约束,得到的结果往往与实际情况有较大的出入。模态、空转试验虽然较前述方法前进了一步,但是它得到的结果也不是发动机真实试车环境下的。本文通过分析某型液体火箭发动机的28次试车(其中24次试车涡轮泵正常,4次试车涡轮泵异常)数据,得到了涡轮泵转子的一阶、二阶和三阶临界转速,见图1(a)。该图为TF01次试车燃料涡轮泵轴向振动120.832~121.037s的频谱。图1(a)中,1X表示转子的同步旋转频率,其数值等于673.828Hz;  $f_{c1}$ 、 $f_{c2}$  和  $f_{c3}$  分别表示转子的一阶、二阶和三阶临界转速,其数值分别为190.430Hz、478.515Hz和957.039Hz。文献[14]通过涡轮泵重量的理论计算与实际测量以及有限元分析和模态、空转试验等方法,得出了某型液体火箭发动机燃料涡轮泵转子(与本文研究对象一致)的一阶、二阶和三阶临界转速,见表1。与本文相比,它得到的一阶、二阶临界转速数值明显偏小,三阶的略微偏大。造成这种结果的一个重要的原因是发动机实际试车中,涡轮泵的限位器会改变其转子的固有频率<sup>[15]</sup>,而它没有考虑这一点。

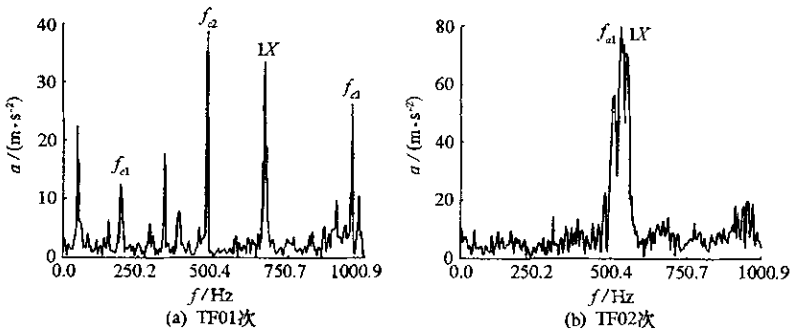


图1 涡轮泵转子的固有频率

Fig.1 The rotor intrinsic frequency of a LRE turbopump

表1 某型液体火箭发动机燃料涡轮泵转子的临界转速(单位:Hz)

Tab.1 The critical frequency of a LRE fuel turbopump rotor (unit: Hz)

阶次	计算重量下	实测重量下	有限元分析	模态、空转试验
$f_{e1}$	151.57	145.60	148.60	130.00 ~ 150.00
$f_{e2}$	396.87	385.50	437.00	380.00 ~ 420.00
$f_{e3}$	979.08	1043.00	987.20	966.67 ~ 1033.33

## 1.2 轴向固有频率分析

转子轴向固有频率  $f_{a1}$  的计算公式为

$$f_{a1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\tilde{K}/M} \quad (2)$$

其中

$$\tilde{K} = K \left( 1 + \frac{M}{M_S} \right) \quad (3)$$

式(2)和式(3)中,  $M_S$  表示涡轮泵壳体的质量,  $K$  和  $M$  分别为涡轮泵转子的刚度与质量。

文献[16]指出 WP13 状态的转子轴向固有频率  $f_{a1}$  约为 550Hz。本文分析了 28 次试车数据后,发现某型液体火箭发动机燃料涡轮泵转子的一阶轴向固有频率  $f_{a1}$  为 527.345Hz,见图 1(b)(该图为 TF02 次试车燃料涡轮泵轴向 12.4576 ~ 12.6624s 的频谱)。该频率是当转子旋转频率等于 546.875Hz 时被激发的,这与文献[16]的分析结果比较吻合。

## 2 固有频率特征的稳定性与故障敏感性研究

虽然通过数据分析的手段,得出了与实际试车情况更相吻合的涡轮泵转子固有频率,但是它们能否作为涡轮泵故障检测的特征,还得经受稳定性和对涡轮泵故障的敏感性的分析。

### 2.1 稳定性研究

特征的稳定性可以通过其行稳定量  $S_\theta$  来衡量<sup>[17]</sup>,其定义如下:

$$S_\theta = - \sum_{i=1}^N [ |\gamma_i - \bar{\gamma}| \ln(1 - |\gamma_i - \bar{\gamma}|) ] (0.3466N) \quad (4)$$

其中,  $N$  为特征的样本数;  $\gamma_i$ 、 $\bar{\gamma}$  分别表示利用最大值归一化后的特征值及其均值。

利用式(4),同样利用 28 次试车数据,对涡轮泵转子固有频率  $f_{e1}$ 、 $f_{e2}$ 、 $f_{e3}$  和  $f_{a1}$  幅值的稳定性进行了分析。表 2 给出了 TN02 次发动机试车(燃料涡轮泵状态正常,其转子旋转频率为 708.008Hz)燃料涡轮泵轴向振动  $V_{ha}$ 、燃料涡轮泵径向 1 振动  $V_{hr1}$ 、燃料涡轮泵切向振动  $V_{ht}$ 、燃料涡轮泵径向 2 振动  $V_{hr2}$ 、氧化剂涡轮泵轴向振动  $V_{oa}$ 、氧化剂涡轮泵径向振动  $V_{or}$  和氧化剂涡轮泵切向振动  $V_{ot}$  的转子固有频率幅值的稳定行为量,据表可得这些振动信号的转子固有频率幅值稳定行为量的平均值都小于 0.05,表明它们具有较强的稳定性(一般而言,如果  $S_\theta < 0.5$  则表示特征是稳定的);表 3 为 TN01 ~ TN05 五种不同批次发动机试车(燃料涡轮泵状态都正常,其转子旋转频率依次为 703.125Hz、708.008Hz、698.242Hz、688.477Hz 和 693.359Hz)燃料涡轮泵轴向振动  $V_{ha}$  的转子固有频率幅值稳定行为量,据表可得它们的平均值也均小于 0.05,表明它们同样具有较强的稳定性。

表 2 TN02 次发动机试车各向振动固有频率幅值的稳定行为量

Tab.2 The Behavior Stabilizability of rotor intrinsic frequency amplitude for TN02 LRE test all vibrations

名称	$V_{ha}$	$V_{hr1}$	$V_{ht}$	$V_{hr2}$	$V_{oa}$	$V_{or}$	$V_{ot}$	平均值
$f_{e1}$	0.0467	0.0361	0.0426	0.0366	0.0452	0.0381	0.0235	0.0384
$f_{e2}$	0.0480	0.0380	0.0481	0.0475	0.0481	0.0408	0.0458	0.0452
$f_{e3}$	0.0527	0.0375	0.0405	0.0437	0.0668	0.0476	0.0409	0.0471
$f_{a1}$	0.0439	0.0309	0.0506	0.0496	0.0365	0.0502	0.0502	0.0446

表 3 五种不同批次发动机试车燃料涡轮泵转子固有频率幅值的稳定行为量

Tab.3 The behavior stabilizability of rotor intrinsic frequency amplitude for five different batches of LRE fuel turbopump

名称	TN01	TN02	TN03	TN04	TN05	平均值
$f_{c1}$	0.0397	0.0467	0.0498	0.0404	0.0373	0.0428
$f_{c2}$	0.0395	0.0480	0.0650	0.0454	0.0406	0.0477
$f_{c3}$	0.0412	0.0527	0.0570	0.0344	0.0310	0.0433
$f_{a1}$	0.0415	0.0439	0.0409	0.0469	0.0344	0.0415

2.2 故障敏感性研究

为了衡量固有频率特征对涡轮泵故障的敏感程度,本文针对涡轮泵出现的脉冲型和磨损型两类故障,分别定义如下故障敏感度计算公式:

$$S_p = \frac{\left| \theta(k_p) - \frac{1}{M_2 - M_1} \sum_{k=M_1}^{M_2} \theta(k) \right| + \frac{1}{M_2 - M_1} \sum_{k=M_1}^{M_2} \theta(k)}{\frac{1}{M_2 - M_1} \sum_{k=M_1}^{M_2} \theta(k)} \times 100\% \quad (5)$$

$$S_w = \frac{\frac{1}{L_2 - L_1} \sum_{k=L_1}^{L_2} \left| \theta(k_w) - \frac{1}{M_2 - M_1} \sum_{k=M_1}^{M_2} \theta(k) \right| + \frac{1}{M_2 - M_1} \sum_{k=M_1}^{M_2} \theta(k)}{\frac{1}{M_2 - M_1} \sum_{k=M_1}^{M_2} \theta(k)} \times 100\% \quad (6)$$

其中,  $\theta$  表示固有频率特征,  $M_1$  和  $M_2$  表示无故障时  $\theta$  的起始和终止时刻,  $\theta(k_p)$  表示脉冲故障时的  $\theta$  值,  $\theta(k_w)$  表示磨损故障时的  $\theta$  值,  $L_1$  和  $L_2$  表示磨损故障时  $\theta$  的起始和终止时刻(对于  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $L_1$  和  $L_2$  根据文献 4-5 提出的涡轮泵实时故障检测子系统对发动机试车数据的检测结果确定。本文中,原始振动数据的采样频率  $f_s = 50\text{kHz}$ , 统计特征  $\theta$  每次计算的样本数  $N = 10\ 240$ )。

表 4 转子固有频率幅值对燃料涡轮泵故障的敏感度(单位:%)

Tab.4 The sensitivity of rotor intrinsic frequency amplitude for fuel turbopump fault (unit:%)

名称	$f_{c1}$	$f_{c2}$	$f_{c3}$	$f_{a1}$
TF01(脉冲 1)	278.4	524.9	316.3	147.2
TF01(脉冲 2)	317.8	232.9	165.7	200.2
平均值(脉冲型)	298.1	378.9	241.0	173.7
TF02(磨损型)	176.0	608.3	134.0	613.5

在 28 次发动机试车中,TF01 和 TF02 两次试车时涡轮泵出现了异常(出现异常前,两次试车燃料涡轮泵转子的旋转频率依次为 673.828Hz 和 683.594Hz),并分别具有脉冲型和磨损故障的特征。其中,TF01 次试车在发动机启动 120.832s 和 127.181s 时,各发生一次转子叶片脱落,出现了较大的脉冲,TF02 次试车在发动机启动 29.696s 后涡轮泵转子出现磨损现象。这两次试车燃料涡轮泵轴向振动  $V_{ha}$  的波形分别见图 2(a)和图 2(b),固有频率  $f_{c1}$ 、 $f_{c2}$ 、 $f_{c3}$  和  $f_{a1}$  的幅值变化的时间历程分别见图 2(c)和图 2(d)。据图 2(c)可知,在第二次脉冲时,转子同步旋转频率  $1X$  及转子固有频率出现跳变,其原因是转子叶片脱落造成转子的质量和扬程等发生改变。TF01 次和 TF02 次试车中固有频率  $f_{c1}$ 、 $f_{c2}$ 、 $f_{c3}$  和  $f_{a1}$  幅值对燃料涡轮泵故障的敏感度见表 4。其中,脉冲 1、脉冲 2 和平均值分别表示 TF01 次试车出现脉冲型故障时,固有频率幅值的故障敏感度及其平均值;磨损型为 TF02 次试车出现磨损故障时,固有频率幅值的故障敏感度。据表 4 可知,对于 TF01 次试车中的脉冲型故障,得出转子的一阶、二阶和三阶临界转速  $f_{c1}$ 、 $f_{c2}$  和  $f_{c3}$  幅值的相对平均变化率都高于 241.0%,对于 TF02 次试车中的磨损型故障,转子二阶固有频率  $f_{c2}$  和轴向固有频率  $f_{a1}$  幅值的相对变化率甚至高于 608.3%。所以,这些固有频率幅值对涡轮泵故障是相

当敏感的。

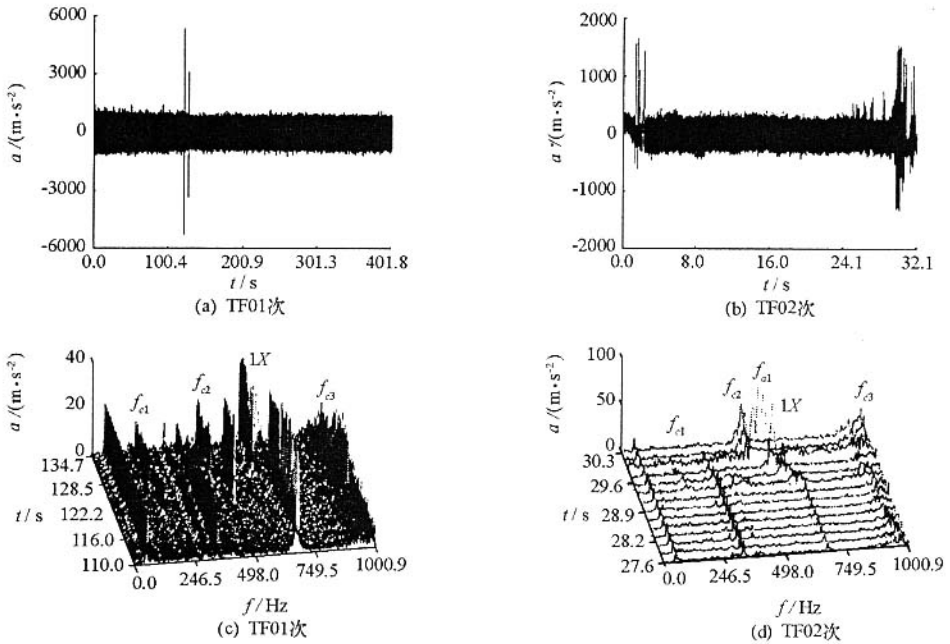


图2 涡轮泵轴向振动波形及其转子固有频率幅值变化的时间历程

Fig.2 The waveform of turbopump axial vibration and changes course of rotor intrinsic frequency amplitudes

### 3 固有频率特征在涡轮泵故障检测中的应用

涡轮泵转子固有频率  $f_{c1}$ 、 $f_{c2}$ 、 $f_{c3}$  和  $f_{a1}$  的幅值具有较好的稳定性和故障敏感性,因此可以用于涡轮泵的故障检测中。图3展示了TN05次试车(燃料涡轮泵正常,其转子旋转频率为693.359Hz)和TF03次试车(燃料涡轮泵异常,异常前转子旋转频率为678.711Hz)转子固有频率  $f_{c1}$ 、 $f_{c2}$ 、 $f_{c3}$  和  $f_{a1}$  的幅值变化的时间历程。其中,图3(a)与图3(b)、图3(c)与图3(d)、图3(e)与图3(f)、图3(g)与图3(h)以及图3(i)与图3(j)分别表示TN05次和TF03次试车的原始波形、转子的一阶、二阶和三阶临界转速以及轴向固有频率幅值的时间变化历程。据图可知,TN05次试车涡轮泵正常时,转子固有频率幅值没有发生突变的现象,而TF03次试车涡轮泵异常时,转子的一阶和二阶临界转速以及轴向固有频率幅值出现了明显的突变现象。在分析其它次试车数据时,发现当涡轮泵正常时,转子固有频率的幅值同样也没有发生突变的现象;当涡轮泵异常时,前文已研究了TF01~TF03次试车转子固有频率的变化情况,均出现了转子固有频率被激发的现象。对于TF04次试车,转子二阶和三阶临界转速同样被激发了(限于篇幅,这里不给出图形结果)。也就是说,当涡轮泵异常时,其转子固有频率  $f_{c1}$ 、 $f_{c2}$ 、 $f_{c3}$  和  $f_{a1}$  将被激发,但不一定全部被激发。利用转子固有频率被激发且幅值产生突变的特性,可以有效地检测涡轮泵的故障。

### 4 结论

通过某型液体火箭发动机28次试车数据的分析与验证,结果表明:

(1)该型发动机涡轮泵转子的一阶、二阶和三阶临界转速的数值分别为190.430Hz、478.515Hz和957.039Hz;其轴向固有频率为527.345Hz;

(2)转子的一阶、二阶和三阶临界转速及轴向固有频率幅值具有较强的稳定性和故障敏感性;

(3)涡轮泵正常时,其转子的一阶、二阶和三阶临界转速及轴向固有频率不会被激发;涡轮泵异常时,它们将被激发(但不一定全部被激发),且其幅值产生突变。基于该特性,可以有效地检测涡轮泵的故障。

基于转子固有频率的故障检测方法,如果结合数字信号处理器(DSP)技术,将有望应用于涡轮泵实时故障检测中。

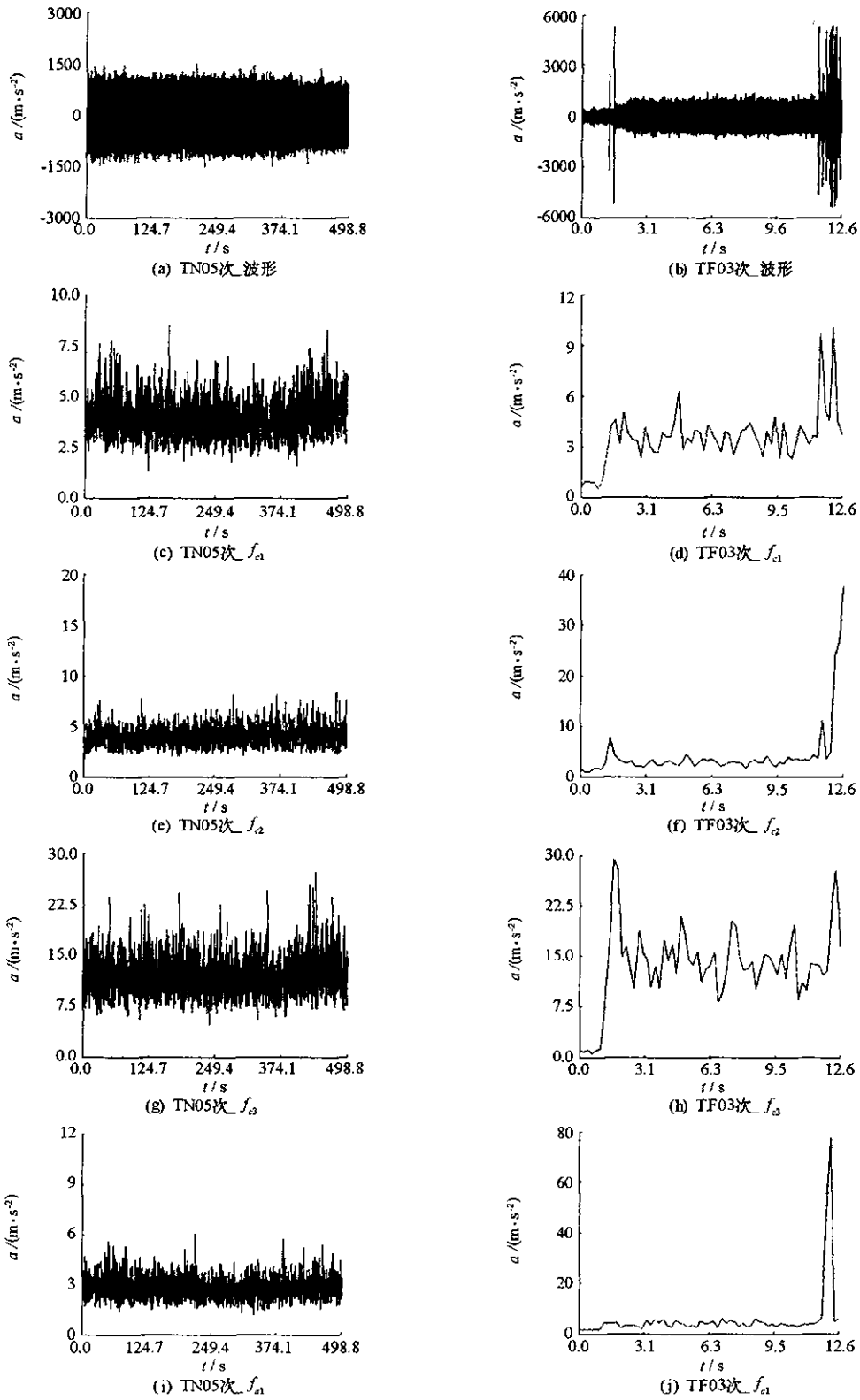


图 3 发动机试车涡轮泵正常和异常时转子固有频率的故障检测结果

Fig.3 The fault detection result of rotor intrinsic frequency under turbopump normal and abnormal in LRE tests

比较程式化,便于工程实现,所以借助于计算机编程可以较好地实现计算分析。

## 参考文献:

- [1] Gertsbakh I B, Kordonskiy K B. Models of Failure [ M ]. Springer-Verlag ,1969.
- [2] Taylor H M, Karlin S. An Introduction to Stochastic Modeling [ M ]. Academic Press ,1984.
- [3] Bogdanoff J L, Koziñ F. Probabilistic Models of Cumulative Damage [ M ]. John Wiley & Sons ,1985.
- [4] Kubat P, Lam C Y T. Optimal Monitoring Strategies for Slowly Deteriorating Repairable systems [ J ]. IEEE Transactions on Communications ,1992 , 40 :661 - 665.
- [5] 江龙平,等.系统退化法在转子系统可靠性评估中的应用 [ J ].机械强度 ,2002 ,24 :17 - 20.
- [6] Durham S D, Padgett W J. Cumulative Damage Models for System Failure with Application to Carbon Fibers and Composites [ J ]. Technometrics , 1997 ,39 :34 - 44.
- [7] Abdelmonem A H, Ryzin G J V. A Method for Evaluating the Effects of Performance Degradation on Communication Network Applications [ J ]. IEEE , 1990 :1307 - 1313.
- [8] Al-Shareef H, Dimos D. Accelerated Life-time Testing and Resistance Degradation of Thin-film Decoupling Capacitors [ J ]. IEEE ,1996 :421 - 425.
- [9] Bagdonavicius V, Bikelis A. Non-parametric Estimation from Simultaneous Degradation and Failure Time Data [ J ]. Statistica Sinica Ser. I ,2002 , 335 :183 - 188.
- [10] Bagdonavicius V, Nikulin M S. Estimation in Degradation Models with Explanatory Variables [ J ]. Lifetime Data Analysis ,2000 ,7 :85 - 103.
- [11] 张金槐,唐雪梅. Bayes 方法 [ M ]. 国防科技大学出版社 ,1990.
- [12] Berger O. Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis ( Second Edition ) [ M ]. Springer-Verlag New York Inc. ,1985.
- [13] 本书编写组. 现代数学手册. 随机数学卷 [ M ]. 武汉 :华中科技大学出版社 ,1999.

(上接第 115 页)

## 参考文献:

- [1] 陈启智. 液体火箭发动机故障检测与诊断研究的若干进展 [ J ]. 宇航学报 ,2003 ,24(1) :1 - 10.
- [2] Jue F, Kuck F. Space Shuttle Main Engine ( SSME ) Options for the Future Shuttle [ R ]. AIAA 2002 - 3758 ,2002.
- [3] Davidson M, Stephens J. Advanced Health Management System for the Space Shuttle Main Engine [ R ]. AIAA 2004 - 3912 ,2004.
- [4] Xie G J, Hu N Q, Wen X S, et al. Health Monitoring System of Turbopump [ R ]. AIAA 2005 - 3948 ,2005.
- [5] 谢光军,胡海峰,秦国军,等.液体火箭发动机涡轮泵健康监控系统 [ J ]. 国防科技大学学报 ,2005(3) :40 - 44.
- [6] 谢光军,胡葛庆,温熙森,等.涡轮泵实时故障检测的短数据均值自适应阈值算法 [ J ]. 推进技术 ,2005 ,26(3) :202 - 205.
- [7] 谢光军,李俭川,胡葛庆,等.涡轮泵实时故障检测的多特征参量自适应阈值综合决策算法 [ J ]. 中国机械工程 ,2005(13) :1184 - 1187.
- [8] 谢光军,胡葛庆,胡雷.涡轮泵实时故障检测的改进自适应相关阈值算法 [ J ]. 推进技术 ,已录用.
- [9] Xie G J, Hu N Q, Qin G J, et al. Features Selection and Bootstrap Threshold Estimation Algorithm for Turbopump Real-time Fault Detection [ A ]. 56th International Astronautical Congress [ C ], IAC - 05 - CA. P. 09 ,2005.
- [10] 胡雷. 涡轮泵试车数据分析及新异类状态检测技术研究 [ D ]. 长沙 :国防科技大学学位论文 ,2005.
- [11] Xie G J, Qiu Z, Qin G J, et al. Real-time Turbopump Health Monitoring System Based on Vibration Measurement [ A ]. In : WEN T. D. ed. ISTM/2005 [ C ], Beijing : International Academic Publishers/World Publishing Corporation ,2005 :2286 - 2290.
- [12] 张小龙. 涡轮泵转子系统的临界转速及次同步进动研究 [ D ]. 西安 :西北工业大学学位论文 ,2000.
- [13] 郑贇韬,田爱梅,王晓军. 基于 QZ 算法的涡轮泵转子临界转速有限元计算 [ J ]. 推进技术 ,2004 ,25(2) :114 - 117.
- [14] 王慧. 基于振动参量的涡轮泵健康状况判别方法的研究 [ D ]. 北京 :中国航天科技集团公司 ,2003.
- [15] 应桂炉,王梦魁. 氢涡轮泵转子非线性振动 [ J ]. 强度与环境 ,1994(1) :1 - 7.
- [16] 应桂炉,万黎明. 氢涡轮泵转子轴周振动 [ J ]. 强度与环境 ,1994(3) :16 - 22 ,37.
- [17] 刘刚,曲梁生. 应用 Bootstrap 方法构造机械故障特征库 [ J ]. 振动工程学报 ,2002 ,15(1) :106 - 110.





