

# 液体火箭发动机涡轮泵健康监控系统\*

谢光军, 胡海峰, 秦国军, 胡萋庆, 温熙森

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**为了提高液体火箭发动机涡轮泵的安全性,降低其故障带来的破坏性,设计了某型液体火箭发动机涡轮泵健康监控系统(TP-HMS),工程实现了TP-HMS的测试硬件子系统、实时故障检测子系统、试车后数据分析子系统和实时数据库支持子系统等,讨论和分析了TP-HMS的功能和执行流程,然后利用历史试车数据与转子试验平台数据对TP-HMS中的多特征参量自适应阈值综合决策算法(MATA)进行了离线和实时在线验证,利用自适应时频谱对测试数据作进一步的分析。结果表明,MATA没有发生误检测情况,并具有实时故障检测的能力;自适应时频谱能有效抑制时频交叉项的干扰,准确给出故障信号的时间和频率信息。因此,TP-HMS适合于液体火箭发动机涡轮泵健康状态监控。

**关键词:**液体火箭发动机;涡轮泵;健康监控;实时故障检测;试车后数据分析

中图分类号:V434+.21 文献标识码:A

## The Health Monitoring System of Turbopump for Liquid Rocket Engine

XIE Guang-jun, HU Hai-feng, QIN Guo-jun, HU Niao-qing, WEN Xi-sen

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

**Abstract:** In order to enhance the safety of liquid rocket engine (LRE) turbopump and minimize the damage of its faults, a health monitoring system of turbopump (TP-HMS) is designed for a large LRE. After the realization of the subsystems for signal acquisition, real-time fault detection, post test data analysis and real-time database support, the function and the flow of execution are investigated and analyzed. Then, the multi-feature adaptive threshold compositive decision-making algorithm (MATA) is validated with the historical data from LRE test as well as real-time data from rotor test platform. To obtain the information of fault signals, the adaptive spectrogram is applied in the data analysis. It is shown that MATA can detect the faults in real time and give no false alarm in this case. Through the application of adaptive spectrogram, the cross-term interference is suppressed. The time frequency information is obtained accurately. Therefore, the conclusion is drawn that the TP-HMS design is suitable for the health monitoring of LRE turbopump.

**Key words:** liquid rocket engine; turbopump; health monitoring; real-time fault detection; post test data analysis

在液体火箭发动机的发展进程中,源于可靠性和安全性的需求,其健康监控问题越来越受到重视<sup>[1,2]</sup>。而涡轮泵在泵压式液体火箭发动机中占有较高的故障概率,大部分故障都与其有关<sup>[3]</sup>,并且涡轮泵是唯一无法通过试车后返厂检查来确定其结构健康状况的部件<sup>[4]</sup>。因此,涡轮泵的状态监测与故障诊断不仅可以有效地降低涡轮泵乃至整个发动机的故障程度,减小故障损失,而且为火箭发动机的不解体交付提供了可靠的依据。

美国已有三套涡轮泵专用健康监控系统投入使用,即飞行加速度计安全关机系统(FASCOS)<sup>[5]</sup>、实时振动监测系统(RTVMS)<sup>[6]</sup>和试验后故障诊断系统(PTDS)<sup>[7]</sup>,其中FASCOS和RTVMS应用于实时涡轮泵故障检测。尽管如此,该国仍然继续研究和探索涡轮泵健康监控新技术,如在先进健康管理系统(AHMS)<sup>[8]</sup>中,利用数字信号处理器发展了新的实时振动红线监控算法,监控涡轮泵转子的不平衡问题;马歇尔空间飞行中心(MSFC)则利用涡轮测试设备(TTE)和计算流体动力学(CFD)分析方法,对涡轮泵

\* 收稿日期:2004-12-17

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。

转子叶片压力的不稳定性进行测量与预测<sup>[9]</sup>,等等。而国内虽然涡轮泵状态监控与故障诊断系统(TCMD2000)<sup>[10]</sup>和 YF-75 状态监控与故障诊断工程应用系统(CMFDS)<sup>[11]</sup>曾参与了液体火箭发动机的地面试车过程,但是,到目前为止,这两套系统还没有在涡轮泵健康监控中得到很好的应用。问题的关键在于,TCMD2000 在实时故障检测方面的工作还需要深入;CMFDS 由于实时故障检测算法计算量的影响,还有待于进一步完善。

针对国内目前的情况,急需建立一套完整的涡轮泵健康监控系统,以提高火箭发动机试车过程的安全性、可靠性和操作人员的工作效率,以及为火箭发动机的不解体交付提供可靠的依据。

## 1 系统设计与实现

系统设计主要包括测试硬件子系统、实时故障检测子系统、试车后数据分析子系统和实时数据库支持子系统等设计。

### 1.1 测试硬件子系统

由于涡轮泵测量参数大部分都是振动参数,所以其信号的采样频率高、数据量大,对实时监测系统的硬件要求比较高。为此,本文选择了 NI 公司的嵌入式实时控制器和 PXI 数据传输总线。嵌入式实时控制器的优点是功耗小、可靠性高、实时性强;PXI 总线在数据宽度、数据速率、性价比等方面都优于 VXI 总线,并且 PXI 具有优良的机械特性和电器特性以及规范的软件标准。图 1 是 TP-HMS 的测试硬件系统,它主要由测试对象(涡轮泵)、信号拾取模块(传感器组)、信号调理模块、PXI 数据采集模块、PXI 嵌入式实时控制器、以太网交换机、TP-HMS 及实时数据库支持子系统等组成。

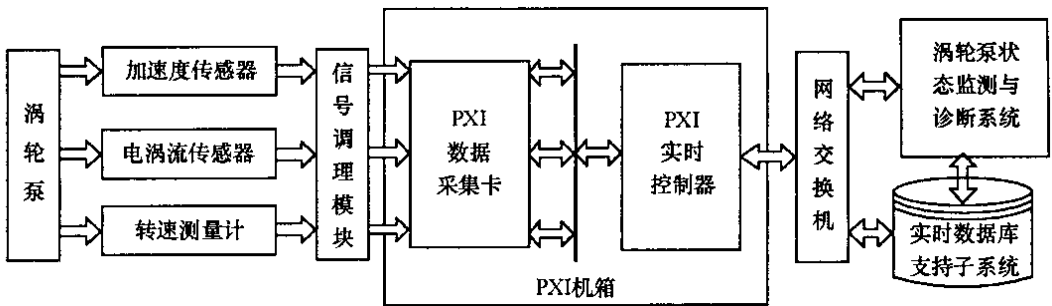


图 1 TP-HMS 测试硬件子系统组成框图

Fig.1 The framework of test hardware for TP-HMS

### 1.2 实时故障检测子系统

由于液体发动机涡轮泵工作在极端的物理条件下,其故障会带来不可估量的破坏性,而且涡轮泵转速与振动信号的频率比较高,信号的变化趋势比较快,所以,在涡轮泵振动信号处理算法上,做了认真仔细的考虑,为了确保故障检测的正确性、及时性,以及故障分析的有效性,确定了短数据均值自适应阈值算法(SDM-ATA)、多特征参量自适应阈值综合决策算法(MATA)、多特征参量自适应相关阈值算法(MACTA)和阶次分析方法的实时涡轮泵状态监测算法。

### 1.3 试车后数据分析子系统

由于实时故障检测子系统仅对涡轮泵的状态异常和故障与否做出判断,并不对故障进行分析与定位,为此,本文研制了涡轮泵的试车后数据分析子系统,它主要包括信号预处理、时域分析、频域分析、联合时频分析、基于 AR 模型的超分辨率谱分析、小波分析,以及适合于微弱信号检测的随机共振(SR)<sup>[12,13]</sup>分析等。其中,时域分析包括峰值、谷值、均方根值、均值、标准方差、偏度、峭度以及波峰因素分析;频域分析包括 FFT 变换、Hilbert 变换、功率谱和信号谐波谱分析;联合时频分析包括短时傅立叶变换(STFT)、Cone-Shaped 分布、Choi-Williams 分布、Wigner-Ville 分布、Gabor 展开以及自适应时频谱算法;小波分析包括小波变换和小波包分析。

### 1.4 实时数据库支持子系统

TP-HMS 在实时监测涡轮泵状态时,一方面需要调用涡轮泵系统的故障模式,另一方面需要实时存

储大量的测试数据和分析结果。在进行试车后数据分析时,同样需要调用涡轮泵的故障模式,同时还需要调用历史试车数据。为了提高 TP-HMS 的工作效率,本文组建了实时数据库支持子系统。该系统以数据库为数据中心,由数据提交、数据使用、数据安全管理等几个部分组成。

## 2 系统功能简介

虽然,TP-HMS 是针对某型火箭发动机涡轮泵设计的,但是它也适用于其它型号火箭发动机涡轮泵的状态监测与故障诊断。总体说来,该系统具有如下主要功能:

- (1) 能分析不同格式的数据(如 \*.lvm, \*.dat 等),并能具有原始数据预处理的功能;
- (2) 能实时监测涡轮泵的工作状态,实时进行异常和故障报警,并能动态实时显示监测结果与系统信息;
- (3) 能显示关键参数(如氢、氧涡轮泵转速等)名称、数值、变化趋势和试车时间;
- (4) 能显示涡轮泵转子的轴心轨迹曲线和监测参数的统计特性等;
- (5) 具有数据传输的自我诊断能力,不对测量系统造成任何影响;
- (6) 具有试车过程、监测参数和涡轮泵状态信息的自动记录功能;
- (7) 能自由选择监测参数与数据分析算法;
- (8) 提供了试车后数据分析功能与应用程序软件包,可以进行试车后数据分析与定位,并提供有用的故障诊断信息;
- (9) 提供了实时数据库支持的功能,能实时将采集数据、涡轮泵状态信息存储于数据库,并能对数据分析算法提供数据服务;
- (10) 具有系统升级的功能,用户可以对系统结构进行修改,同时还可以对数据库进行修改、补充和完善。

## 3 系统执行流程分析

TP-HMS 系统执行流程见图 2。当系统程序运行后,首先配置数据采集装置的参数,然后判断数据采集装置是否可以正常工作。若不能正常工作,则进一步配置和检测数据采集装置,否则进行数据采集、实时数据处理,以及涡轮泵状态判定。若状态正常,则继续监测;否则报警,并可切换到试车后数据分析子系统进行故障或异常分析。实时数据库一方面可以存储采集到涡轮泵振动原始数据;另一方面可以存储实时数据处理子系统或试车后数据分析子系统处理的结果,同时也为它们提供故障模式数据支持。

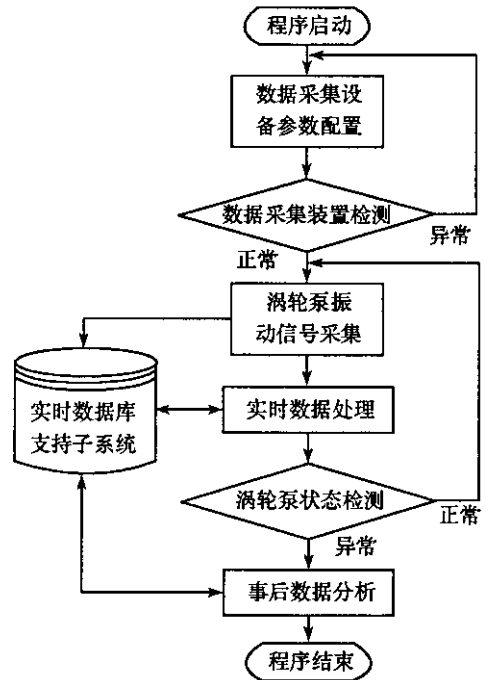


图 2 TP-HMS 执行流程

Fig.2 The flow of TP-HMS execution

## 4 系统试验验证

TP-HMS 研制的实时故障检测算法有 4 种,试车后数据分析算法包括六大方面,限于篇幅,本文仅对 TP-HMS 的实时故障检测 MATA 算法和试车后数据分析自适应时频谱分析算法进行试验验证。

### 4.1 MATA 实时故障检测算法验证

MATA 算法是在 ATA 算法<sup>[3]</sup>和综合判别方法<sup>[4]</sup>的基础上发展而成的,与这两种方法相比,它具有以下优势 (1) 将测量参数的峰值因子、一步自相关系数、峭度因子和裕度因子等 6 种特征参量作为检测指标,避免单一特征参量所造成的信息量少和误诊断的现象 (2) 检测过程中能够自适应地调节阈值,避免了固定阈值与实际测量数据不匹配的情况 (3) 剔除了故障数据对特征参量阈值的影响,避免了阈值自适应迎合故障数据的尴尬局面 (4) 具有一定的信息融合综合决策的能力。

为了验证 MATA 算法对某型液体火箭发动机涡轮泵故障检测的有效性和实时故障检测能力,本文利用该型液体火箭发动机的历史试车数据和转子试验平台数据对 MATA 算法进行了离线和实时在线验证。在 MATA 算法离线验证时,同时监测该型液体火箭发动机涡轮泵的氢泵轴向振动、氢泵径向振动等 9 个参数,并实时计算每个参数的峰值因子、一步自相关系数等多个特征参量。图 3 为某次试车氢泵轴向异常振动特征参量及其自适应阈值曲线。根据图 3 可以得出,在 121s 时,涡轮泵轴向振动存在明显的异常现象,这与实际试车情况完全吻合。为了验证 MATA 算法实时故障检测与报警效果,以便应用于液体火箭的发动机地面试车涡轮泵状态监测之中,本文通过某型转子试验平台,进行了 12 次转子实时故障检测与报警试验(8 次正常试验、4 次碰摩试验)。在正常试验中,MATA 算法没有存在误检测的情况,在转子碰摩试验中,MATA 算法的检测结果见表 1。根据 TP01 ~ TP04 次试验的 MATA 算法实时检测转子碰摩故障的结果,可以得出该算法的碰摩检测时间与实际碰摩时间之间存在 500ms 左右的延迟。其原因是 PXI 数据采集机箱到实时监控计算机之间采用以太网的方式传输数据,这种数据传输方式很不稳定,而且具有较大的延迟,从而造成故障检测时间具有较大的滞后;另外,由于仅由一台 PC 计算机承担 MATA 算法的计算任务,而该算法本身也需要一定的计算时间。

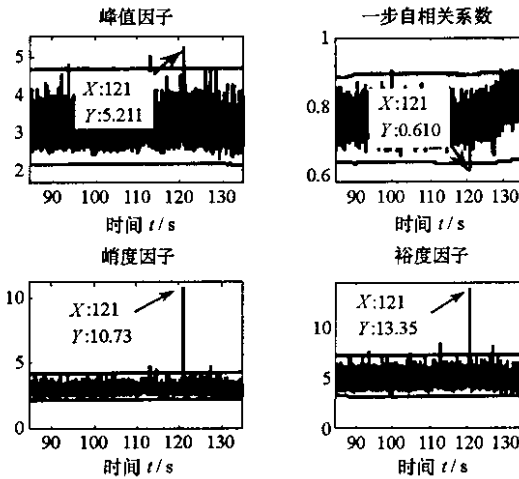


图 3 氢泵轴向异常振动特征参量及其自适应阈值曲线  
Fig.3 The curve of abnormal hydrogen turbopump axial Vibration features and its adaptive thresholds

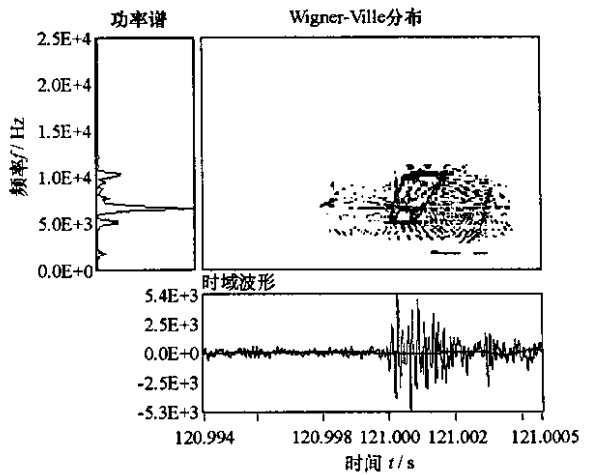


图 4 氢泵轴向异常振动波形、功率谱和 Wigner-Ville 分布时频谱

Fig.4 The wavefor , power spectrum and Wigner-Ville Distribution of abnormal hydrogen turbopump axial Vibration

#### 4.2 自适应时频谱数据分析算法验证

自适应时频谱分析算法与其它时频分析算法相比,其突出的特点是具有较强的时频交叉项干扰抑制能力。图 4 和图 5 分别为某次试车至 121s 时氢泵轴向振动出现异常现象时的 Wigner-Ville 分布时频谱和自适应时频谱。根据图 4 和图 5,发现自适应时频谱能很好地抑制交叉项的干扰,而 Wigner-Ville 分布时

频谱存在十分严重的交叉干扰现象,因此,自适应时频分析能更好地提取信号的时频特征。图 6 和图 5 分别为不同次试车时正常/异常氢泵振动信号的自适应时频谱。根据图 6 可以得出,氢泵正常时,其轴向振动时频谱中氢泵转速(频率为 667Hz)的 2 倍频、6 倍频、10 倍频和 12 倍频处存在较大的频率分量;而根据图 5 可以得出,氢泵异常时,其轴向振动时频谱中氢泵转速的 2 倍频、6 倍频和 12 倍频处的频率分量明显减小,10 倍频处的频率分量急剧增大。根据这一现象以及涡轮泵的结构特性,可以推断出涡轮泵的转子叶片可能存在故障。通过试车后分解发现,的确是涡轮泵转子叶片已经脱落。

表 1 MATA 算法的转子碰摩实时故障检测

Tab.1 The real-time fault detection of rotor rub-impact in MATA

测试序号	实际碰摩时间(s)	MATA 算法故障发现时间(s)
TP01	140.2	140.611
TP02	95.3	95.876
TP03	123.5	124.124
TP04	71.7	72.032

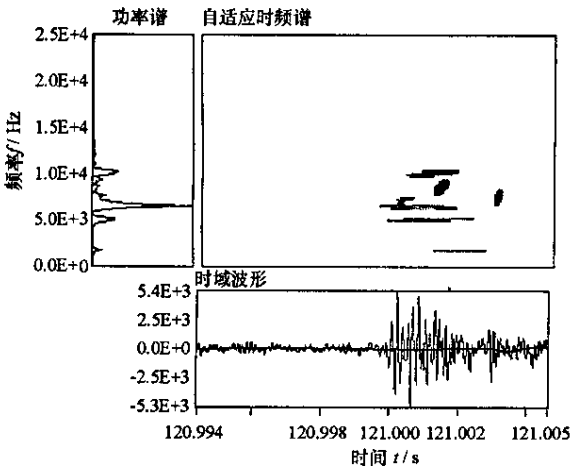


图 5 氢泵轴向异常振动波形、功率谱和自适应时频谱

Fig.5 The waveform , power spectrum and adaptive spectrogram of abnormal hydrogen turbopump axial vibration

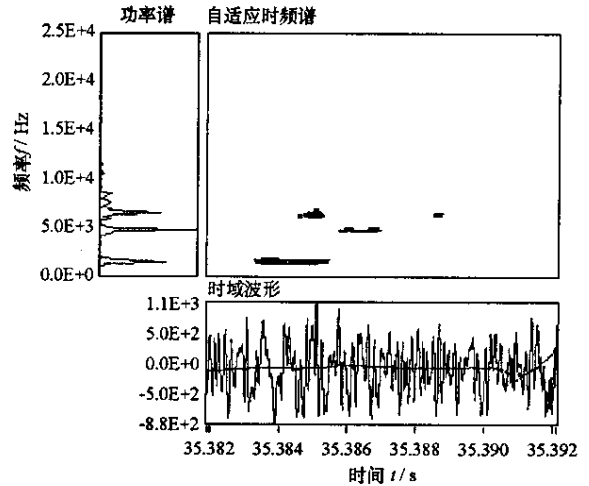


图 6 氢泵轴向正常振动波形、功率谱和自适应时频谱

Fig.6 The waveform , power spectrum and adaptive spectrogram of normal hydrogen turbopump axial Vibration

### 5 结 论

TP-HMS 通过试车数据的离线考核和转子试验平台数据的实时验证 结果表明 :

(1) TP-HMS 的 SDM-ATA 算法、MATA 算法、MACTA 算法和阶次分析算法比较适合于实时故障检测 因此 ,它对液体火箭发动试车过程的涡轮泵健康状态监控具有重要意义 ;

(2) TP-HMS 的时域分析、频域分析、联合时频域分析、模型分析、小波分析和 SR 分析方法比较适合于试车后数据分析 因此 ,它对液体火箭发动涡轮泵故障原因分析与故障定位具有重要的作用 ;

(3) TP-HMS 不仅集成了实时故障检测子系统与试车后数据分析子系统 ,而且结合了传统的信号分析方法与先进的数据处理算法 ;

(4) TP-HMS 实时数据库子系统不仅能实时存储采集的原始数据 ,也能实时存储 TP-HMS 处理的数据结果 ,并且能实时为 TP-HMS 提供故障模式支持。

TP-HMS 美中不足之处在于实时故障检测具有一定的延迟 ,但是 ,可以将实时故障检测算法以硬件 (如 DSP 模块 )来实现 这样就可以达到真正意义上的实时故障检测的目的。

### 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 ] DiMaggio S J , Sako B H . Basic system Identification for Condition Monitoring of Turbopumps [ A ] . Aerospace Conference [ C ] , IEEE Proceedings , 2001 ( 7 ) : 3189 - 3200 .

[ 3 ] 朱恒伟. 液体推进剂火箭发动机地面试车故障检测与诊断研究 [ D ] . 长沙 : 国防科技大学 , 1997 .

[ 4 ] 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 .

[ 5 ] Coffin T , et al . Specialized Data Analysis of SSME and Advanced Propulsion System Vibration Measurements [ R ] . NASA Contractor Technology Reports , 1994 ( N94 - 29868 ) .

[ 6 ] Fiorucci T R , Lakin D R II , Reynolds T D . Advanced Engine Health Management Applications of the SSME Real-time Vibration Monitoring System [ A ] . 36<sup>th</sup> AIAAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference , Huntsville , Alabama , July 17 - 19 , 2000 ( AIAA - 2000 - 3622 ) .

[ 7 ] Surko P Zakrajsek J F . PTDS : Space Shuttle Main Engine Post Test Diagnostic Expert System for Turbopump Condition Monitoring [ A ] . SAE Technical Paper Series , Aerotech 92 Anahelm , California , October 5 - 8 , 1992 SAE922059 .

[ 8 ] Jue F , Kuck F . Space Shuttle Main Engine ( SSME ) Options for the Future Shuttle [ A ] . 38<sup>th</sup> AIAAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit , Indianapolis , Indiana , America , July 7 - 10 , 2002 ( AIAA 2002 - 3758 ) .

[ 9 ] Hudson S T , Zoladz T F , Dorney D J . Rocket Engine Turbine Blade Surface Pressure Distributions : Experiment and Computations [ J ] . Journal of Propulsion and Power , 2003 , 19 ( 3 ) : 364 - 373 .

[ 10 ] 于潇 , 廖明夫 , 赵冲. 液体火箭发动机涡轮泵状态检测与故障诊断系统研究 [ J ] . 导弹与航天运载技术 , 2002 , 25 ( 4 ) : 54 - 58 .

[ 11 ] 杨尔辅 , 张振鹏 , 刘国球 . 等 . YF - 75 发动机状态监控与故障诊断工程应用系统的研制 [ J ] . 推进技术 , 1997 , 18 ( 1 ) : 65 - 72 .

[ 12 ] 胡芑庆. 转子碰摩非线性行为与故障辨识的研究 [ D ] . 长沙 : 国防科技大学 , 2001 .

[ 13 ] 杨定新 , 胡芑庆 . 随机共振在微弱信号检测中的数值仿真 [ J ] . 国防科技大学学报 , 2003 , 25 ( 6 ) : 91 - 94 .



