

基于特征频段 RMS 值的发动机故障实时监测方法

孙百红¹, 田 川²

(1. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100; 2. 空军装备部驻西安地区军事代表局, 陕西 西安 710100)

摘 要: 发动机试车数据分析在发动机故障诊断中发挥着重要作用, 某型号发动机试车多次出现关键部位焊缝开裂及燃料泄漏等故障, 根据液体火箭发动机试车不同阶段信号特点, 给出了试车信号的处理和分析方法, 对该型号发动机 16 次试车振动信号进行处理、分析及对比, 得到了正常和出现故障的试车信号频域的不同特征, 提出一种基于特征频段 RMS 值的发动机故障识别方法, 此方法可以用于发动机试车过程故障的实时监测, 对于确保试车产品安全、预防试车破坏性灾难具有一定的实际意义。

关键词: 特征频段; RMS 值; 故障诊断; 实时监测

中图分类号: V433 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2019)04-0074-05

The fault real-time monitoring method for engine based on RMS value of characteristic frequency band

SUN Baihong¹, TIAN Chuan²

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2. Xi'an Military Representative Bureau of Air Force Equipment, Xi'an 710100, China)

Abstract: The analysis of test data plays an important role in engine fault diagnosis. Several faults, such as cracking of weld seam and fuel leakage, have occurred in key parts of an engine during hot test. According to the signal characteristics of different stages of liquid rocket engine test, the processing and analysis methods of test signal were given, and the vibration signals of 16 tests of this type engine were processed, analyzed and compared. The different characteristics of the normal and unnormal tests data were obtained and a method of engine fault identification based on RMS (Root Mean Square) value of the characteristic band was proposed. This method can be used in fault real-time monitoring for engine tests, which is useful for ensuring safety of tested engine and preventing catastrophic consequence during hot-tests.

Keywords: characteristic frequency band; RMS value; fault diagnosis; real-time monitoring

0 引言

液体火箭发动机研制过程中要进行大量的地

面热试车考核, 发动机及其组件在试车过程中要承受其系统本身产生的振动、冲击、噪声及压力脉动等复杂动态载荷的作用, 过大或是异常的动力学环

收稿日期: 2019-03-04; 修回日期: 2019-05-09

基金项目: 装发部预先研究项目(4140040202)

作者简介: 孙百红(1975—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机信号处理与分析技术

境有时会引起发动机结构和设备的失效或者破坏,严重时发动机被烧毁、试车台被严重破坏。准确有效地测量、分析发动机试车过程中的动态响应,对发动机研制至关重要,也是获取发动机动力学环境最直接、最有效的手段,是发动机结构设计、改进和定型最具有说服力的依据。对出现故障的试车,不同故障以不同的特征形式表现出来,认真处理分析包含着故障信息的试车信号,有助于确定故障类型、性质及其产生的原因,有助于掌握各种故障的特征,以便采取相应的措施,减少和预防故障重现。对成功试车,处理分析这些动态响应信号有助于了解发动机及其组件不同工况下的动力学特征,从而为故障分析提供对比依据,对发动机可靠性增长试车前风险分析、试车过程中状态监测、试车后性能评估、试车故障诊断分析及发动机组件力学环境试验设计等方面都具有极其重要的作用^[1]。

1 试车动态信号处理与分析方法

1.1 试车信号的分类及特征

液体火箭发动机试车速变信号可以分为以下4类:平稳随机信号、非平稳随机信号、瞬态信号及周期信号与随机信号的叠加。发动机工作过程中,传感器测量到的信号主要以后两类最为常见。发动机的启动、关机过程就是比较明显的时变、瞬态信号特征,发动机转级过程表现为非平稳随机信号,发动机稳定工作段通常近似为一个平稳的各态历过程,测量信号则以周期信号与随机信号的叠加为主要特征。

液体火箭发动机的“心脏”——泵系统,其试车振动信号主要表现为旋转机械转速频率及由其结构叶片数相关的倍频以及流体噪声等,发动机的燃烧组件如发生器、推力室等其试车振动信号特征主要表现为燃烧主频、燃烧振荡、燃烧噪声及由旋转机械传递而来的转速及其倍频等。

1.2 试车信号的分析方法

液体火箭发动机试车过程动态信号一般需要进行时域、频域以及时频域分析。时域主要关注发动机启动与关机动作产生的冲击时刻及幅值以及冲击过后信号的变化趋势走向、全程时域幅值及 RMS (Root-Mean-Square, 均方根) 曲线的变化情况,频域主要关注发动机稳态工作段的频率成分及其幅值、指定频段内的 RMS 值大小;时频分析主要关注发动机

工作过程频率成分及幅值随时间变化情况。

根据液体火箭发动机热试车不同工作段的信号特点及关注点,试车速变信号分析的内容、步骤及方法如图1所示^[2-4]。

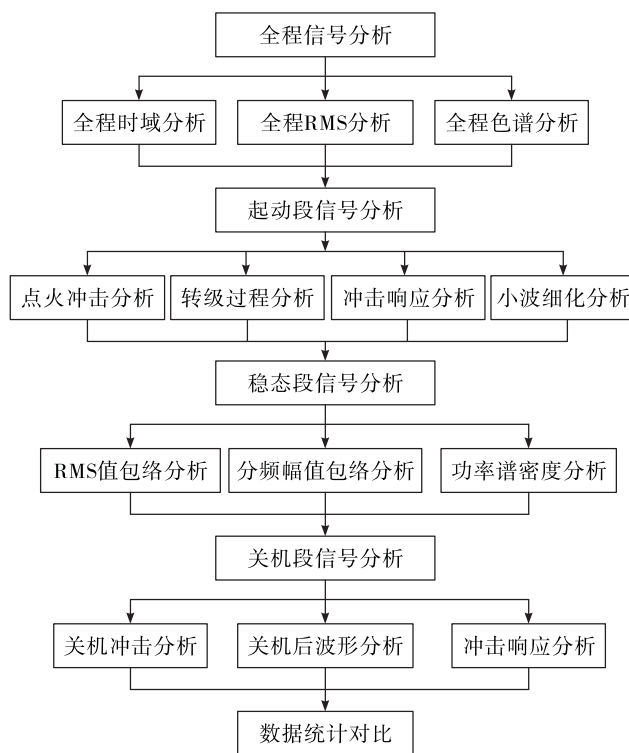


图1 发动机试车动态信号分析方法

Fig. 1 The analysis method of dynamic data from rocket engine tests

2 某发动机试车信号分析

某型号发动机试车多次出现结构焊缝开裂、燃料泄漏并起火等故障,图2是试后检查发现焊缝开裂情况,图3是试车过程中的燃料泄漏情况。采用发动机信号分析方法,对该发动机16次试车某组件的振动信号进行对比分析,包括3次出现故障的试车和13次没有出现故障的试车信号。已知该发动机每次试车先试额定工况后试过载工况,启动和关机信号分析没有发现异常,以下是稳态段信号的分析情况。

2.1 频谱分析

某振动参数稳态段频谱分析如图4所示,图4(a)是出现故障的试车的频谱,图4(b)是大部分没有出现故障的试车的频谱,横轴为频率,纵轴为幅值。可见当发动机试车出现故障时,频谱中位于970~

1 000 Hz 之间的分频最为突出;没有出现故障时,频谱中发动机 1 010 ~ 1 030 Hz 之间的分频(发动机主转速某倍频)占主导,而 970 ~ 1 000 Hz 之间的分频没有明显表现。



图 2 某结构焊缝开裂

Fig. 2 The weld-line crack of engine component



图 3 试车过程燃料泄漏

Fig. 3 The leakage of engine fuel

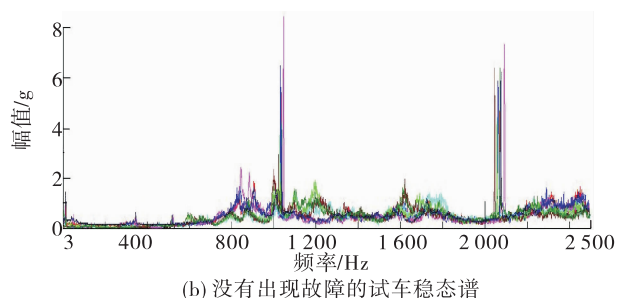
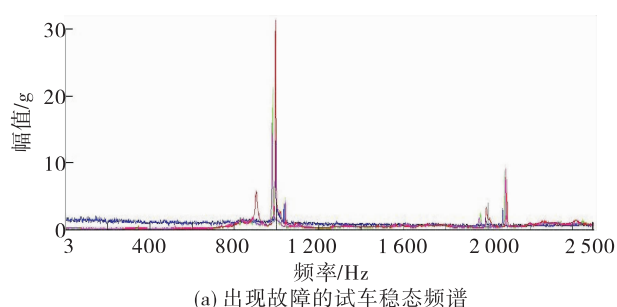


图 4 稳态段频谱

Fig. 4 The spectrum of vibration stationary-signal

然而,并不是只要出现 970 ~ 1 000 Hz 之间的分频发动机就必然出现故障。图 5 是 16 次试车 970 ~ 1 000 Hz 之间的分频的最大幅值对比,可见:其中有 5 次试车分频幅值明显高于其他次试车,但实际试车只有其中 3 次试车出现了结构局部损伤破坏等故障。

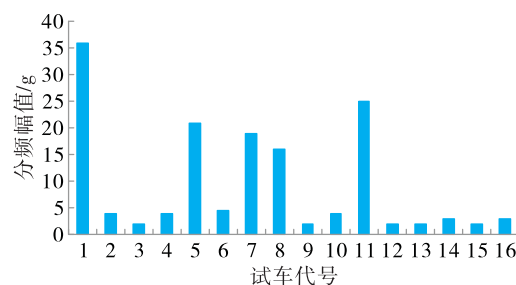


图 5 分频幅值对比

Fig. 5 Frequency-amplitude comparison

2.2 振动全频段 RMS 值分析

该发动机试车速变信号采样频率 12.56 kHz, 分析最大频率 5 kHz。则某频段内的 RMS 值为

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{A_0^2}{2} + \sum_{i=1}^{i=k-1} A_i^2 + \frac{A_k^2}{2}} \quad (1)$$

式中 A_i 为 f_i 对应的幅值, $i=1, 2, \dots, k-1$ 。

该参数 16 次试车全频段 RMS 值对比分析如图 6 所示,可见,从全频段无法识别出故障试车。这是因为全频段的振动综合值既包含了故障信号又含有正常信号的贡献量。

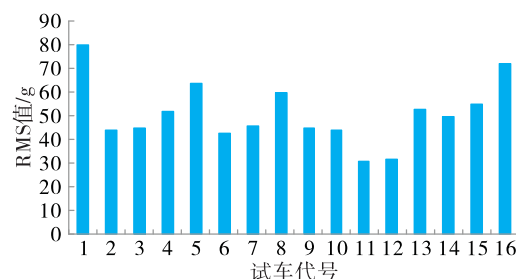


图 6 全频段 RMS 值对比

Fig. 6 RMS of the full-band comparison

3 信号故障特征提取

关注特征频段 970 ~ 1 000 Hz 内 RMS 值,16 次试车对比分析如图 7 所示,可见 1,7,11 次特征频段

内的 RMS 值远大于其他次试车,而这 3 次试车恰好为出现局部破坏等故障的试车,因此,特征频段内的 RMS 值能够很好地识别出故障试车。

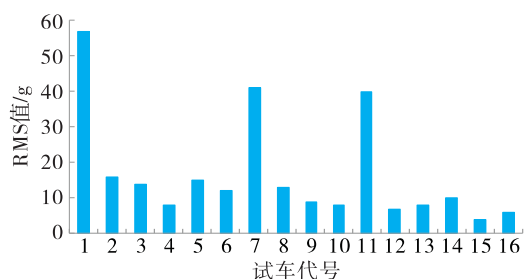


图7 特征频段 RMS 值对比

Fig. 7 RMS of the characteristic frequency band for stationary-signal

对特征全频段进行全程瀑布图细化分析,如图 8~图 10 所示。由图 8 可知,对于大部分没有出现任何故障的试车,其信号频域在起动时刻也会出现 970~1 000 Hz 之间的明显分频,但起动结束后,此分频消失。由图 9 可知,当发动机试车出现故障时,其频域必然出现明显的介于 970~1 000 Hz 之间的分频,且其幅值随着时间持续增大。由图 10 可知:对于两次出现明显的幅值较大的特征频率但没有发生局部损坏的试车,其瀑布图表现为幅值较大的 970~1 000 Hz 之间的分频在 150 s 左右,幅值明显减小。

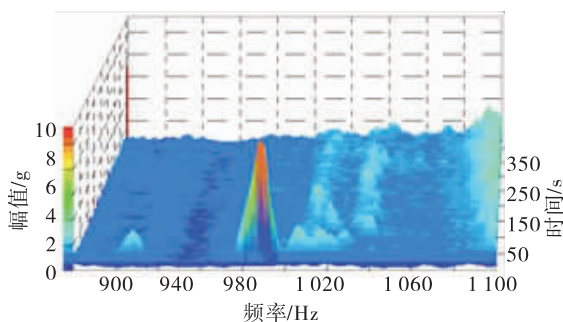


图8 正常试车特征频段全程瀑布图

Fig. 8 The full-time domain waterfall of the characteristic frequency band for normal tests

4 故障分析及预防

通过上述分析可见:发动机试车速变数据包含

着大量有用信息,是评估发动机运行状态的不可缺少的组成部分。发动机试车速变信号的分析不仅要关注信号的时域信息,更要关注其频域信息,不仅要关注信号的振动量级还要关注信号的频率成份,不仅要关注频率成份的幅值,更要关注幅值随时间的变化情况,只有这样,才能全方位、多角度对信号进行深层次的挖掘和分析。

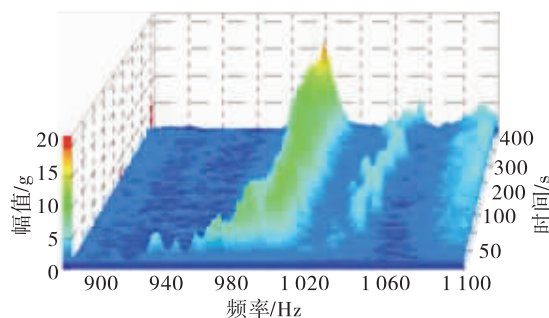


图9 出现故障的试车特征频段全程瀑布图

Fig. 9 The full-time domain waterfall of the characteristic frequency band for unnormal tests

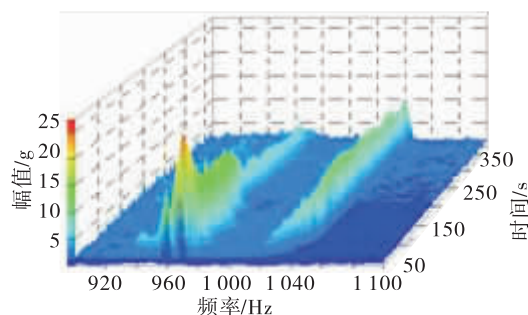


图10 某次试车特征频段全程瀑布图

Fig. 10 The full-time domain waterfall of the characteristic frequency band for a certain test

该型号发动机某次飞行数据也出现了量级较大的、处于 970~1 000 Hz 之间的分频,且其飞行残骸断口处呈现疲劳条纹,另外通过计算发现该发动机组件的一阶纵向声学频率与该分频相接近。结合试车速变数据分析结果,显然,发动机试车过程中存在的 970~1 000 Hz 之间的分频是导致发动机结构破坏主要原因。当试车信号出现此分频且其幅值随时间或者工况不断增大时,发动机结构由于受到持续的、大量级的耦合共振而出现疲劳裂纹,从而会导致发动机结构焊缝开裂或是燃料泄漏等故障。

随着现代传感器技术及计算机应用技术的高度发展,在多个行业已经实现对试验过程的测量信号进行实时分析和监测^[5-10]。针对该发动机试车信号故障特征,可以在发动机试车过程中对信号特征频段的 RMS 值进行实时监控,在发动机试车至 150 s 左右时(工况调整),一旦发现监测对象没有衰减反而有增大趋势,可以马上实施手动紧急关机,故障进一步发展恶化,对试车产品及试车台造成更大的破坏和损失。

5 结 语

给出了液体火箭发动机信号分析方法,对某型号发动机 16 次试车振动数据进行对比分析,找到了正常的试车与出现故障的试车的数据的异同,提取到了故障识别的特征量,提出了一种基于特征段 RMS 值的故障识别方法,此方法可以用于发动机试车过程故障的实时监测,对于确保试车产品、预防试车破坏性灾难具有一定的实际意义。

参考文献:

- [1] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [2] 李舜酩,李香莲. 振动信号的现代分析技术与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [3] 孙百红,李锋. 连续小波变换与信号时频分析[J]. 火箭推进,2003,29(6):7-11.
- SUN B H, LI F. Continuous wavelet transform and time-frequency analysis of signals [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2003, 29(6):7-11.
- [4] 奥法尼德斯. 信号处理导论[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
- [5] 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.
- [6] 马红宇,刘站国,徐浩海,等. 液氧煤油发动机地面试车故障监控系统研制[J]. 火箭推进,2008,34(1):45-48,58.
- MA H Y, LIU Z G, XU H H, et al. Development of a fault monitoring system for LOX/kerosene engine ground hot-test [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2008, 34(1):45-48,58.
- [7] 杨尔辅,张振鹏,崔定军. 液发推力室和涡轮泵故障监测与诊断技术研究[J]. 北京航空航天大学学报,1999,25(5):619-622.
- [8] 赵雷刚. 发动机台架试验过程实时监测与预警方法研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
- [9] 周曼曼. 基于嵌入式的航空发动机实时监测与故障诊断系统开发[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
- [10] 陶辉,贺石中. 基于在线油液监测的海上钻井平台发动机故障报警预测[J]. 润滑与密封,2017,42(7):111-116.

(编辑:马 杰)