

# 基于振动检测的发动机故障诊断算法研究

陈海峰, 赵政社, 张少博

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 基于振动检测的发动机故障诊断算法, 分析发动机发生故障时振动信号所具有的特征和故障诊断指标选择, 对振动信号预处理、特征提取、状态识别和诊断决策分别进行了介绍, 研究出采用振幅和频率两参量包络曲线法诊断发动机故障的算法, 通过发动机热试车验证了采用发动机振动检测来判断发动机故障的算法的正确性。

**关键词:** 振动测量; 故障诊断; 算法

**中图分类号:** V414-34   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-9374 (2012) 06-0062-08

## Research on liquid rocket engine fault diagnosis algorithm according to vibration detection

CHEN Hai-feng, ZHAO Zheng-she, ZHANG Shao-bo

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

**Abstract:** A rocket engine fault diagnosis algorithm based on the vibration signal detection is proposed in this paper. The characteristics of vibration signal as the engine fault occurs are analysed. The selection of fault diagnosis indexes, vibration signal pretreatment, feature extraction, state identification and diagnosis decision are introduced respectively in the scheme. The algorithm that adopts the envelope curve method of amplitude and the vibration frequency parameters to diagnose the engine fault was studied. The engine hot test verified the correctness of the algorithm, which adopts the detection method of rocket engine vibration signal to judge the engine fault.

**Keywords:** vibration detection; fault diagnosis; algorithm

## 0 引言

液体火箭发动机试验是一项复杂的系统工程, 具有高风险、高费用、试验时间短及故障发生迅速等特点。振动数据采集及其测量是试车测

量环节之一。目前, 缓变参数故障诊断系统已经应用于发动机试车之中, 振动参数比稳态参数能更快地反映发动机的性能变化, 但目前通过振动参数测量来诊断发动机故障的系统还处于理论研究和探索阶段。俄罗斯早在 60 年代就针对补燃循环发动机地面试车开展了基于振动参数的

收稿日期: 2012-05-31; 修回日期: 2012-06-20

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2009JY05)

作者简介: 陈海峰 (1977—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机振动测量技术

模型监测研究,并于 1964 年建成了液氧/煤油发动机振动故障诊断系统。美国马歇尔空间飞行中心 (MSFC) 于 1996 年研制成功了“实时振动监测系统” RTVMS,并应用于航天飞机主发动机涡轮泵的振动分析与研究之中,目前美国在液体火箭发动机试车中得到实际应用的振动检测算法与系统仅有监测航天飞机主发动机 (SSME) 的加速度计安全关机系统 (FASCOS)。目前我国基于振动参数的液体火箭发动机故障诊断系统与技术,仅处于理论和诊断方法研究方面。多数诊断方法主要是以故障源为样本的比对技术的诊断方法,其存在的问题主要表现在:第一,故障诊断算法复杂,实时性差,绝大多数算法只能离线使用;第二,诊断方法单一,振动测量属于随机过程,既包含信号的时域,也包含信号的频域,绝大多数算法只能对其中一个域的数据进行检测与处理分析。

本文在振动数据测量与分析的基础上,分别从数据分析和可靠性检测两方面论述了振动数据可靠性检测与分析算法的原理及在试车中的应用和验证,对基于振动信号的发动机故障诊断进行了初步探索。

## 1 振动信号故障特征及物理量选择

为准确有效地掌握发动机的工作状态,必须首先取得准确的诊断信息。当发动机发生故障时,发动机工作状态将会有重大变化,其振动幅值和振动频谱也将随之发生明显的变化,因此测量和分析振动信号的时域和频域变化,是研究发动机故障诊断的基础。时域分析是研究信号的形态随时间变化的规律,抽取必要的特征量(如幅值、周期及局部的上升时间与下降时间等)以作为对信号判断与识别的依据;频域分析则是研究信号的能量或功率随时间变化的规律,从而为信号的进一步处理提供依据和手段。

频谱是在频域中对原信号的分布情况进行描述,通常能够提供比时域波形更加直观的特征信息。频谱(功率谱和幅值谱等)是通过傅里叶变换获取的,其可用于发动机故障诊断。在发动机

试车过程中,观察对振动总量级贡献较大和幅值较高的谱峰,分析产生这些频率分量的原因,同时观察振动频谱中幅值较小和增长很快的频率分量,这些分量往往预示着发动机故障的产生和发展。特别当一些在原频谱图上并不存在或比较微弱的频率分量突然出现并急剧增大时,极有可能在较短时间内破坏发动机的正常工作状态。因此,在频谱分析中不仅要注意各分量的绝对大小,更应当注意各谱峰的发展变化趋势。一般来讲,当发动机出现故障时,在相应的频谱上会出现两个特征:一个特征是振动幅值的上升,振动幅值上升主要是指指数个测量频带振动总能量的上升,并包含其中某个单一频率(特别是主突频)的上升。同时还要观察振动值是否已达到和超出有关理论标准参考值或是多次试车统计出来的参考值。另一个特征是谱型的变化,即在频谱上出现新的单一成份,或频谱上出现新的频带峰群,以及这些新的频率和频带峰群的幅值变化突然增大。根据上述振型变化,再结合以往若干次试车的历史数据综合分析,可对发动机的故障模式做出判断。对于振动测量常选用以下指标。

### 1.1 振幅

振幅是表示发动机振动严重程度的一个指标,可用位移或加速度来表示。根据振幅监测,可判断出发动机的振动状态和工作是否稳定。

### 1.2 频率

频率是分析振动原因的依据。通常,不同的振动源其频率一般也是不同的。对于液体火箭发动机来说,振动频率与发动机转速有一定的倍数关系。因此用频率来观察发动机工作状态是一种简便而且实用的故障诊断方法。频谱分析在故障诊断中占有重要地位,因为一切实际发生的复杂振动信号都能把它分解为各种频率成份,发动机出现不同类型的故障,其振动频率的组成是不相同的。通过对发动机振动或噪声信号进行频率分析,可以判断出发动机的实际工作状态。

## 2 发动机故障诊断

发动机的振动信号是典型的随机信号,在发

动机启动和关机阶段具有局部冲击信号的特点，在进行故障诊断算法选择和设计时，要考虑振动信号的特点。通过振动信号来判别发动机工作状

态是否正常，需要经过振动信号预处理、特征提取、状态识别和诊断决策 4 个阶段才能完成，其诊断原理如图 1 所示。

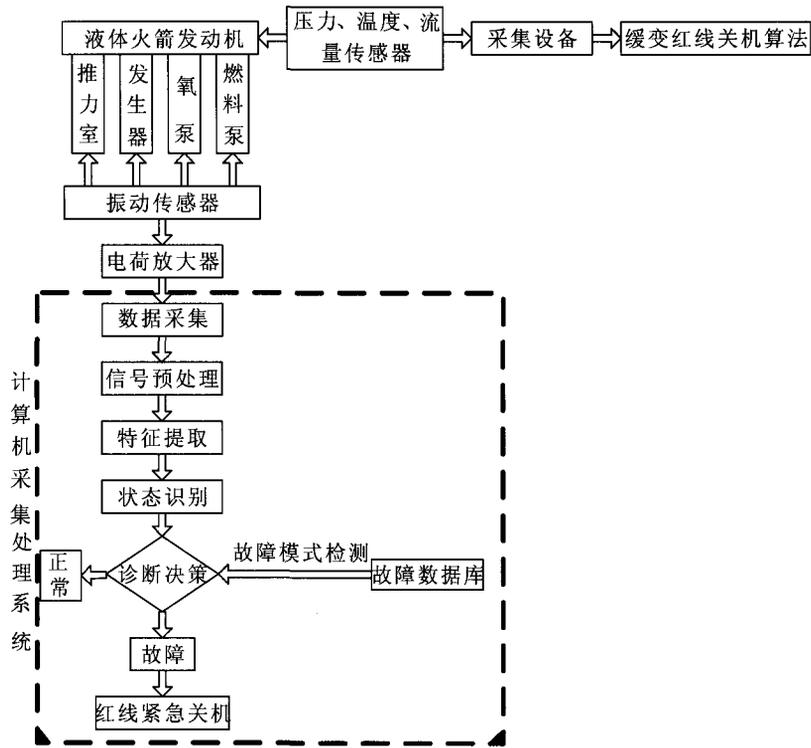


图 1 发动机故障诊断原理图

Fig. 1 Schematic diagram of engine fault diagnosis

### 2.1 信号预处理

数据处理的基本思想是把原始信号分解成待处理、有效及有用的信号，对该信号进行算法的处理加工，然后再生成为信号的预处理结果。信号预处理有以下 3 种算法。

#### 2.1.1 中心化处理算法

检测到的振动信号是随机振动与周期振动相叠加的结果，因而在数字时间序列  $x(n\Delta t)$  中，不应该有明显的趋势项，如果有则是由其他原因造成的，必须消除，否则会使得到的频谱产生畸变，尤其会使低频段失真过大。中心化处理就是消除混在数字时间序列中的趋势项。处理时对每帧采样值应用公式 (1) 进行计算：

$$x'(n\Delta t) = x(n\Delta t) - \overline{x(n\Delta t)} \quad (1)$$

式中： $n=0,1,2$ ； $x(n\Delta t)$ 为数字时间序列； $\overline{x(n\Delta t)}$ 为数字时间序列的平均值； $x'(n\Delta t)$ 为中心化处理得到

的数字时间序列。

#### 2.1.2 时域加权处理算法

时域加权处理可以减少遗漏项。方法是在对数字时间序列  $x(k)$  的  $N$  个值做离散傅里叶变换前，先乘以数据窗  $w(k)$ ，然后再对乘积  $x(k) \cdot w(k)$  做离散傅里叶变换，可得到一个离散变换对：

$$x(k)w(k) \leftrightarrow \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(i)w(n-i) \quad (2)$$

式中： $N$  为截断时间  $T$  内获得的采样值个数  $N = \frac{T}{\Delta t}$ 。

#### 2.1.3 平均化处理算法

用傅里叶变换 (FFT) 方法求频谱时，其估计的均方误差太大，为解决该问题，需进行平均化处理。在数据处理时，对一个振动信号不是从头一直采样到底，而是把整个信号划分成  $M$  个基本长度段，在每个基本长度段上采集  $N$  个数据，称

为一帧, 然后对每一帧数据做 FFT 处理, 共得到  $M$  帧频域数据。为了降低均方误差, 按不同使用要求, 对所得到的  $M$  帧频域数据进行不同的平均化处理, 线性平均用于时间波形和线性谱分析, 可提高分析信号的信噪比, 线性平均必须使各记录信号同步; 均方根平均 (RMS) 主要用于功率谱分析, 可以提高统计精度; 指数平均主要针对当前测量数据, 对过去数据加权按指数规律衰减, 可得出频率峰值包络曲线。

## 2.2 特征提取

理论和实践表明: 振动信号高频部分出现故障发展征兆时, 发动机将会出现工作异常; 振动信号低频部分出现异常时, 发动机故障已经发生。因此振动信号高频成份出现异常对诊断发动机故障的发生有着重要作用, 而振动信号低频部分出现异常则可判明发动机故障模式。因此, 振动信号的特征提取常常是基于频域来完成的, 可采用下述提取算法。

### 2.2.1 基频识别算法

每种型号的发动机都有固定的振动突频, 这些突频与发动机的主涡轮泵转速密切相关, 通过对主涡轮泵转速的计算可以算出该型发动机的主基频点。当发动机自身出现故障时, 这些主突频点的位置和幅值将会发生变化, 通过在频谱图中找到有关的主基频点也就找到了故障的部位。一般情况, 发动机故障状态部位激起的各阶谐频振动幅值总是渐减的, 而基频则比较高, 常以基频信号幅值增大作为故障状态的判别依据。

### 2.2.2 谐频识别算法

谐频识别法是根据谐频的间距来判断基频, 从频谱图中找出若干等间距的谱峰, 通过对平均间距的确定可从中找出高阶谐频上所隐藏的故障信息。

### 2.2.3 包络线分析法

包络分析法就是提取载附在振动高频信号上的低频信号, 即把调制在振动高频段上的低频故障信息解调到低频进行分析处理, 以提取故障信息。发动机试验过程中的大多数干扰和噪声能量一般均集中在低频段, 在该处理过程中, 由于剔除了环境振动干扰和噪声, 所以减小了干扰和噪

声对振动检测信号中的中、低频分量的影响。因此, 利用包络技术分析振动高频部分中的故障信息可以提高信噪比。

### 2.2.4 小波包识别法

信号分析的主要目的是寻找简单有效的信号变换方法使信号所包含的特征能显示出来。小波包具有可以将信号按任意时频分辨率分解的特点, 将不同频段的信号分解到相应的频段中, 然后再根据需要所需频段内的信号进行重构, 重构的信号与原来的信号长度一样, 最后对重构的信号进行特征提取。

### 2.2.5 状态识别法

振动特征数据是指通过 FFT 等相关信号处理手段, 从振动的时域信号中提取的相关数据, 其中包括振动信号的总振值、发动机主频及其各个倍频的幅值和残余量等。总振值是指振动时域信号曲线的最大值, 各个倍频的幅值是通过 FFT 变换或其他信号处理算法将振动信号的时域信号转化为频域信号即频谱, 然后再在振动信号的频谱中提取相关特定频率点上的幅值。残余量是指振动信号的总级值减去已经提取的各个倍频上的幅值后残余的部分, 用来反映除去各个特征频率外其他频率上振动能量的大小。

## 3 发动机试车故障数据库

在统计发动机试车故障数据时, 发现许多故障产生在发动机的启动阶段, 而该阶段的故障数据保留得很少, 这对建立故障模式和进行故障影响分析带来了困难。为此, 要对历史试车数据进行研究和总结, 开展故障仿真研究。在发动机故障检测与诊断技术研究中, 首先要了解清楚发动机的故障情况及其特征数据, 以确定故障模式, 从而选定与之相适应的算法, 为此就需要一个标准的、能用来记录故障现象、原因和故障数据的数据库。把多年以来液体火箭发动机研制中发生的故障情况、故障数据和典型的正常数据管理起来, 把专家经验保存起来, 把故障仿真所得的数据贮存起来, 建立一个适用的故障数据库, 该数据库要有合理的结构设计完善的功能设计。所

谓合理的结构设计是指它能够体现出液体火箭发动机故障的特点及故障模式与影响分析的结果；完善的功能是指应该满足液体火箭发动机故障检测与诊断的基本要求。

### 4 振动信号故障决策算法

#### 4.1 振幅故障决策算法

由于任何测量信号都可以看成由若干个函数复合而成的复杂波动，故设液体火箭发动机测量数据归一化模型为：

$$f(t)=f^*(t)+e(t)+s(t) \tag{3}$$

式中： $f^*(t)$ 为测量信号的真实值； $e(t)$ 为测量信号的误差； $s(t)$ 为测量信号的噪声。

对于振动信号公式（3）表示的物理意义在于： $f^*(t)$ 为振动信号中的平稳分量； $e(t)$ 为由于仪器或测量系统所带来的测量误差； $s(t)$ 为随机非平稳分量。在对信号 $f(t)$ 进行消噪处理时， $f^*(t)$ 含有信号的实际测量值肯定需要保留； $e(t)$ 含有测量系统的状态信息，也需要保留； $s(t)$ 含有干扰、噪声信息和异常数据，需要予以滤除。由上述分析可以进一步简化测量数据的归一化模型为：

$$x_k = \dot{x}_k + s_k \quad (k=1, 2, 3 \dots, M) \tag{4}$$

式中： $x_k$ 为测量的原始信号； $\dot{x}_k$ 为测量的有用数据值； $s_k$ 测量中的噪声数据。

在理论上，噪声服从正态分布，即  $s_k \sim N(0, \sigma_1^2)$ 。其中  $\sigma_1^2$  为噪声的方差，它主要是由于测量系统本身或测量过程本身的随机性造成的，是不可预期的。设  $X$  为发动机工作期间振动测量参数的测量值，它是随机变量，在正常情况下，其方差  $D(X)=\sigma^2$ ，数学期望  $E(X)=\mu$ ，则参数的正常区间为： $[\mu-n\sigma, \mu+n\sigma]$ 。由于发动机试车的测量参数数据样本是有限的，可以将其延拓为具有有限的均值和方差的某种分布。因此可以得到上述公式的正常区间，其带宽系数  $n$  由其本身的分布规律确定。

在概率统计中，方差通常是用标准差来表示的，数学期望  $\mu$  通常是用平均值来表示的，平均

值反映了随机变量变化的总体水平，而方差则反映随机变量取值的分散程度。同时，大量的研究表明，正常情况下振动特征参数随时间的波动应遵循正态分布。根据概率论和数理统计，服从正态分布的随机变量，在给定的一组样本下，其样本值落在  $\mu \pm \sigma$  或  $\mu \pm 3\sigma$  范围内的概率分别为 68.3% 和 99.7% (如图 2 所示)。其中， $\mu$  和  $\sigma$  的数学定义如下：

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{5}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n-1}} \tag{6}$$

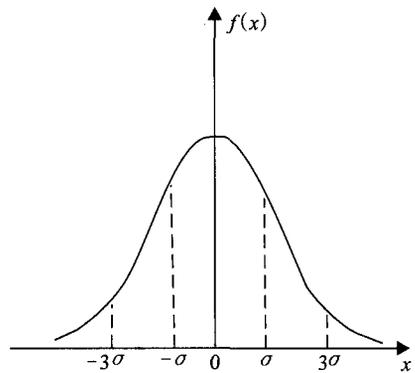


图 2 正态分布原理图

Fig. 2 Schematic diagram of normal distribution

为了保证所获取的振动参数幅值阈值致信度，则选取  $\mu \pm 3\sigma$  范围作为幅值阈值的包络范围。如上分析可知，落在该范围内的振动信号波形其所获得的参数数据正确性达到 99.7%，由此可以诊断出试车过程中，该振动参数与同型号同一参数具有一致性，且获得的数据准确可信。具体的做法为：把同一型号 5 次或 5 次以上相同数据使用以上方法求出参数阈值曲线，然后可以采用两种方法对所获得的曲线进行处理：一种方法是把这几次求得的阈值曲线相加后做以平均求出这几次平均阈值曲线，作为同型号试车相同参数测量数据准确性的一个判别域；另一种方法就是找出这几次阈值曲线范围最小的一个，作为同型号试车相同参数测量数据准确性的判别域。在计算出

各个参数阈值后, 还要综合考虑振动参数在一段时间内的检测结果数值才能做出判别。以上述准则作为理论基础并结合下述 3 个准则, 可完成发动机工作状态故障检测。

#### 4.1.1 超限量准则

当一个参数的测量数据超过阈值带后, 则计算出该参数这一时刻测量值与阈值的差, 只有在此差值大于带宽系数与方差的乘积时, 才能判断该参数可能出现异常。

#### 4.1.2 持续性准则

对于一个检测参数, 只有连续出现几次异常之后, 才能最终判断该参数出现异常。

#### 4.1.3 多参数准则

只有同时出现若干个以上异常参数时, 才能认为发动机工作出现异常。

为保证在数据出现尖脉冲 (也叫工程野点) 时不影响对数据判断的准确性, 需要对数据中尖脉冲数据点进行剔除, 因为异常值的存在, 会产生一系列的虚假频率成份, 剔点处理的方法就是连续地产生采样方差的更新值, 用以替换尖脉冲数据。

其表达式为:

$$s_i^2 = \overline{x_i^2} - (\overline{x_i})^2 \quad (7)$$

式中:  $\overline{x_i^2}$  为数据平均后, 再平方的数值;  $\overline{x_i}$  为数据平方后, 再平均的数值。

按下式检查数据点  $x_{i+1}$  判别它是否为野点:

$$\overline{x_i} - ks_i < x_{i+1} < \overline{x_i} + ks_i \quad (8)$$

式中:  $k$  为剔点系数, 一般取 3~5。

如果上式成立则  $x_{i+1}$  值为保留点, 如果上式不成立则  $x_{i+1}$  值为应舍去点。应用新的值  $\hat{x}_{i+1}$  代替它。  $\hat{x}_{i+1}$  按外推法进行计算, 其式如下:

$$\hat{x}_{i+1} = x_i + (x_i + x_{i-1}) \quad (9)$$

## 4.2 频率故障决策算法

定型发动机, 物理结构是固定的, 发动机工作时主突频振动位置也是固定的; 性能稳定的发动机, 在特定工作段内的突频特征点是基本不发生变化的。当发动机工作过程中出现故障时, 振

动幅值和振动频谱也将发生明显的变化, 主要表现在测量信号在某一时间区间段内的频谱图会出现逐渐增大的趋势, 更重要的故障特征在于频谱图中的信号突频分量会明显增多。例如, 火箭发动机正常稳定工作时, 推力室内压力的脉动是经常存在的, 这些脉动一般是很偶然的, 在频谱上的表现基本是连续的, 只有少量可辨别的尖峰。一旦发动机工作不稳定, 频谱上在一个或多个频率处则会呈现大的集中的振动能量。

在正常情况下, 特定频率点上的突频值会在一定范围内变动, 其变化范围上下限由历次试车数据统计得到:

$$x_{\min}(k) \leq x(k) \leq x_{\max}(k) \quad (10)$$

如果连续 3 次或 4 次超过该范围, 则表明发动机发生了故障或将要发生故障。该故障检测方法称为阈值检验法。

## 5 发动机故障诊断算法验证

考虑到编程和实际应用的需要, 基于振动测量的发动机故障诊断的算法流程实现原理图如图 3 所示。该流程沿用了建立发动机故障诊断系统的基本思路, 主要从流程上给出算法实现的基本步骤。在该流程图中, 故障决策是整个算法流程的核心, 在本文中主要采用振幅故障决策算法和频率故障决策算法, 其具体的算法验证如下。

### 5.1 振幅故障决策算法验证

根据发动机故障诊断流程, 采用振幅故障决策算法求得振动参数幅值阈值曲线见图 4。该振幅故障决策算法的数据阈值包络线是经过 5 次同型号试车数据得到的, 其区间内包含的曲线为同型号第 6 次试车时同一参数的实测数据曲线, 从图 4 可看出, 采用阈值包络方法可以有效地把测试数据的有效范围较好的表现出来, 同时振动参数幅值阈值曲线与实测参数数据曲线的包络形状完全一致, 这说明该方法的正确性。振幅故障决策算法不仅为测量数据准确性判断提供了可靠依据, 亦为故障诊断提供了一种有效地检测算法。

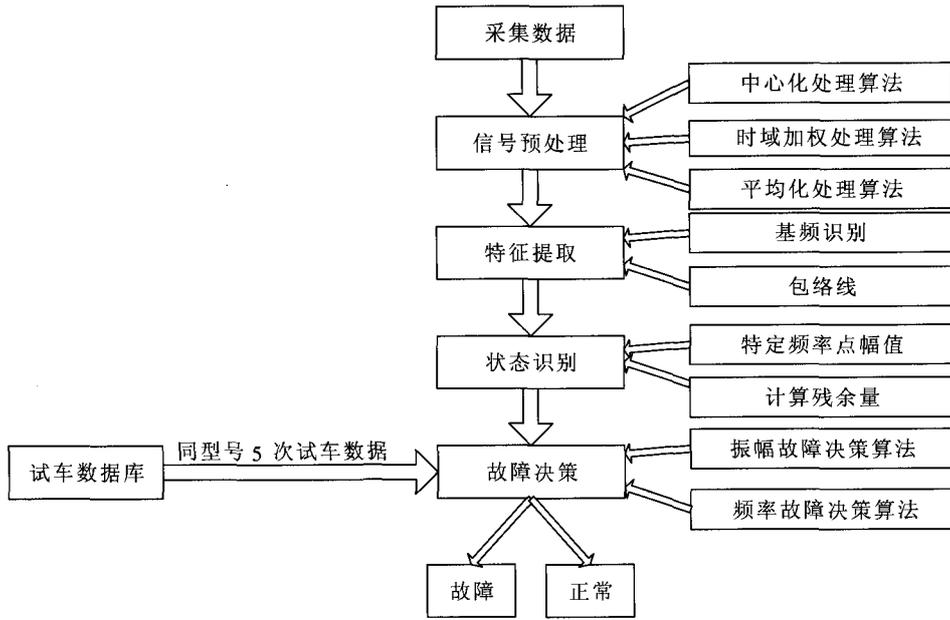


图3 发动机故障诊断的算法流程实现原理图

Fig. 3 Schematic diagram to realize workflow of engine fault diagnosis algorithm

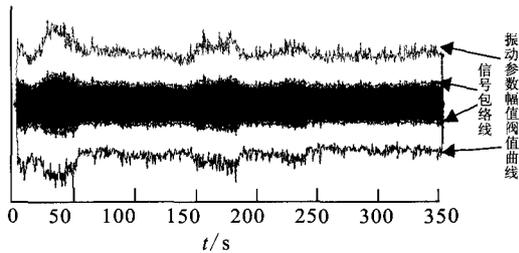


图4 测试数据阈值包络线

Fig. 4 Envelope curve of test data threshold

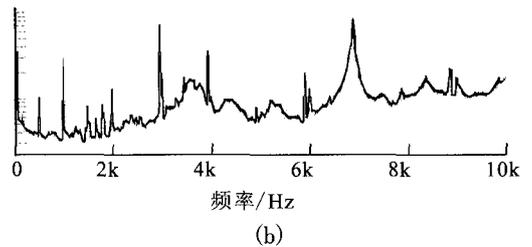
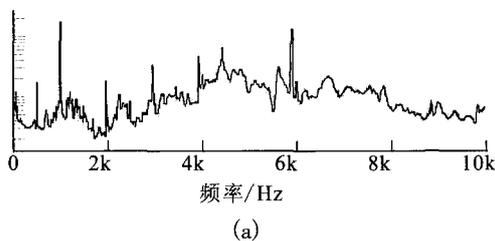


图5 振动故障信号的频谱图

Fig. 5 Spectrum images of vibration signal as engine fault occurs

### 5.2 频率故障决策算法验证

图5是某此试车发动机出现故障时某2个振动参数的频谱图，依据上述频率故障诊断理论，从图5中可以看出，其频谱图中的信号突频点明显增多，且突频值整体有增大的趋势存在，这说明发动机工作不正常。



(a)

## 6 结束语

通过研究液体火箭发动机振动检测和故障诊断，得出了发动机振动检测和故障诊断系统的组成结构，对发动机振动信号预处理、特征提取、状态识别和诊断决策进行了详细的介绍，得出了采用振动数据诊断发动机故障的算法，并通过发动机热试车检测出的振动信号时域包络幅值曲线和频域频率数值曲线成功验证了发动机故障决策算法的正确性。

上述采用振动检测数据分析与处理的算法不

仅可以应用于常规和液氧/煤油发动机的故障检测与诊断, 而且还有望推广应用于重型运载系统、运载火箭飞行、飞船飞行及空间站运行等在线故障检测与诊断之中。

#### 参考文献:

- [1] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.  
 [2] 张贤达. 信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.  
 [3] 闫俊伏, 谭兴响. 振动测量参数在故障诊断中的分析[J]. 山西电力, 2008 (2): 32-33.

- [4] 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, 2003.  
 [5] 申弢, 黄树红. 振动故障信号奇异性指数的统计特征研究[J]. 振动工程学报, 2003, 16(4): 476-479.  
 [6] OPPENHEIM A V, SCHAFER R W. 离散时间信号处理[M]. 刘树棠, 黄建国, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 575-586.  
 [7] 王洪杰. 齿轮泵的振动信号研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1996, 28(4): 17-21.  
 [8] 郝鹏, 马建仓. 基于 DSP 测量的捷联惯导系统设计[J]. 电子设计工程, 2011, 19(24): 120-122.  
 [9] 崔岩岩, 霍亮生, 李响. 基于 VC++ 的发动机 ECU 测试系统的研究与设计[J]. 电子设计工程, 2011, 19(10): 28-30.

(编辑: 马 杰)

(上接第 61 页)

根据以往经验, K4202 高温合金浇注温度不超过 1 545 ℃, 所以 2 批试验件的浇注温度分别选取 1 530±5 ℃和 1 540±5 ℃。根据 2 批试验件的实验结果发现, 浇注温度为 1 540±5 ℃时铸件质量最佳。

通过综合考虑以上因素, 采用以上浇注系统和浇注温度试制出 K4202 高温合金出口管精密铸件。铸件分别经 X 射线探伤、荧光探伤、打压、尺寸检验和力学性能 5 个检验工序, 具体检验结果如表 2 所示。从表 2 可以看出, 各项检验结果都达到了技术条件所规定的要求。

### 3 结论

1) 通过 3 种出口管铸件的工艺试验, 发现 K4202 高温合金适合铸造一些尺寸较小的零件, 铸件基本没有内部疏松、气孔等缺陷。

2) 通过分析和试验确定的出口管精密铸造工艺方案是可行的, 铸件经过检验符合技术要求, 通过了发动机的试车考核。

3) 小孔径三维扭曲弯管可以应用真空熔模

精密铸造的方法生产, 为以后复杂内壁、小孔径等其他加工方法难以成型的零件生产研制奠定了坚实的技术基础。

#### 参考文献:

- [1] 王建明, 邵冲, 赵明汉, 等. K4202 镍基铸造高温合金的组织研究[J]. 现代制造工程, 2007 (9): 91-93.  
 [2] 佟天夫, 陈冰, 姜不居. 熔模铸造工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.  
 [3] 姜不居. 熔模精密铸造[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.  
 [4] 林柏年. 特种铸造[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2004.  
 [5] 李俊涛, 陈兴福, 吴剑涛, 等. K423A 机匣部件精铸工艺研究[J]. 铸造, 2006, 55(3): 249-251.  
 [6] 汤鑫. 高温合金整体叶轮铸造技术的研究进展[J]. 航空材料学报, 2005, 25(3): 56-62.  
 [7] 安阁英. 铸件形成理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.  
 [8] 黄乾尧, 李汉康. 高温合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.  
 [9] 熊玉华, 李培杰. 铸造工艺参数和细化剂对 K4169 高温合金铸态组织的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(5): 529-538.

(编辑: 陈红霞)