

# 液氧/煤油发动机多余物自动检测技术

牛书锋, 张国悦

(西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 多余物的控制是航天型号产品研制生产过程中的关键, 多余物检查及排除是保证火箭发动机可靠工作的重要环节。针对 1 200 kN 液氧煤油发动机总装后不能进行多余物检测的问题, 采用机械转台将被检查产品进行滚动, 使存在于发动机内腔的金属多余物与其内壁发生碰撞和滑动, 在此过程中产生的声信号以弹性波的形式传播到产品外壁, 通过声发射传感器监测该信号, 并转化成相对应的电信号输出, 给出多余物有无的判定信息和存在位置的参考信息。通过对发动机多余物自动检测中浮动环及电磁干扰噪声的屏蔽, 以及发动机整机多余物自动检测中发动机滚动的转速、传感器的阈值以及触发信号同步接收时间等工艺参数的研究, 得到了发动机多余物检测的最佳工艺参数, 实现了 1 200 kN 液氧煤油发动机整机多余物自动检测。

**关键词:** 液氧/煤油发动机; 多余物; 自动检测; 声发射; 传感器阈值

**中图分类号:** V261      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-9374(2019)04-0069-05

## Automatic detection technology of redundancy in LOX/kerosene engine

NIU Shufeng, ZHANG Guoyue

(Xi'an Space Engine Company Limited, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** The redundancy control is the key to the development and production of aerospace products, and the inspection and elimination of redundancy is an important part of ensuring the reliable operation of rocket engine. In order to solve the problem that the redundancy detection cannot be carried out after the final assembly of 1 200 kN LOX/kerosene engine, the inspected product is rolled by a mechanical turntable, so that the metal redundancy existing in the engine cavity collides and slides with the inner wall. During this process, the generated acoustic signal is transmitted to the outer wall of the product in the form of elastic wave. The signal is monitored by the acoustic emission sensor and converted into a corresponding electrical signal output. The determination information of redundancy and the reference information of its existence position are given. Through the shielding of the floating ring and electromagnetic interference noise in the automatic detection of engine, as well as the research on the engine rolling speed, the sensor threshold and the synchronous reception time of the trigger signal, etc., the optimum process parameters for engine redundancy detection are obtained. The automatic redundancy detection of 1 200 kN LOX/kerosene engine has been realized.

收稿日期: 2017-11-30; 修回日期: 2018-10-22

作者简介: 牛书锋(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究领域为材料加工工程

**Keywords:** LOX/kerosene engine; redundancy; automatic detection; acoustic emission; sensor threshold

## 0 引言

液体火箭发动机是运载火箭或航天器的推进系统,随着我国航天事业的飞速发展,对液体火箭发动机提出了更高的可靠性要求。液体火箭发动机多余物为内腔中存在的与产品规定状态无关的物质,发动机的制造需要通过诸多工艺环节完成,在焊接、装配等工艺过程中,由于管理或技术措施落实不到位,装焊完成后会在产品内腔形成多余物。在液体火箭发动机工作过程中,多余物将严重影响发动机的工作可靠性,引起运转部件损坏、阀门控制失效等故障,直接导致火箭飞行试验失败<sup>[1-2]</sup>。

多余物的控制是航天型号产品研制生产过程中的关键,多余物检查及排除是保证发动机可靠工

作的重要环节。目前由于条件限制,液氧/煤油发动机总装后,尚未进行整机状态多余物滚动检测,给发动机质量留下隐患。为确保交付发动机质量,提高发动机多余物检测的有效性,开展了发动机多余物自动检测工艺技术研究<sup>[3-5]</sup>,通过声发射传感器采集多余物在发动机滚动过程中的声波信号实现多余物的自动检测<sup>[6]</sup>。

## 1 发动机多余物自动检测系统介绍

### 1.1 系统结构及组成

多余物自动检测系统主要由主控系统、信号预处理系统、信号连续传递机构、信号处理系统、数据采集系统、计算机及专用检测软件等组成,系统结构如图1所示。

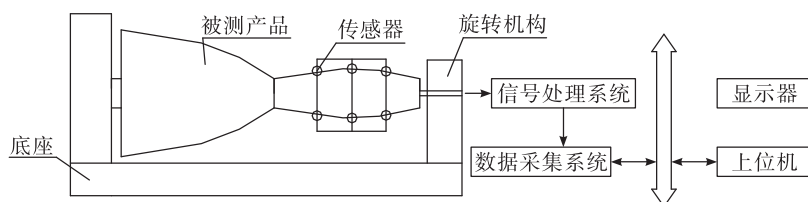


图1 多余物自动检测系统结构图

Fig.1 Structure of automatic redundancy detection system

### 1.2 检测原理

声发射是指因能量的快速释放而导致材料局部发出瞬态弹性波的现象,其本质也是一种机械波。在不同的应用场合,声发射波的频率范围通常可以从几赫兹到几兆赫兹。一般而言,人耳无法听见该信号,而需要高灵敏度的传感器来辅助监测,从而声发射传感器应运而生<sup>[7-8]</sup>。

发动机多余物自动检测技术是通过将被检查产品进行滚动,使存在于产品内腔的金属多余物与其内壁发生碰撞和滑动。在此过程中产生的声信号以弹性波的形式传播到产品的外壁,通过声发射传感器监测此信号,并转换成相对电信号输出<sup>[9-10]</sup>。通过信号处理系统对信号进行数据校正,经过上位机内的软件进行信号分析、波形处理与综合判定,然后将波形及判定信息进行动态显示,并给出多余物有无的判定信息和存在位置的参考信息。

### 1.3 检测方式

#### 1.3.1 检测方法和步骤

由于液氧/煤油发动机结构比较复杂,检测点数量多,声发射传感器可采集距其800 mm(机械连接)以内的多余物信号,根据发动机的结构和传感器可检测范围,并通过多次试验设计16组传感器进行声发射信号检测,选用谐振式窄带声发射传感器,声发射传感器将声发射信号转化为交流信号,并经前置放大器放大后,该交流信号一般含有各种噪声信号并且仅为毫伏级<sup>[11-12]</sup>。因此,在前置放大器后设计调理电路(包含滤波器和功率放大器),来对信号进一步放大和滤波,最终实现多余物有无判定和提供多余物存在位置参考信息。通过对检测信号的采样分析,由系统软件通过程序运行判定是否存在多余物信号。通过对首次采集的信号进行分析,若存在多余物,再对存在疑似多余物的区域

进行详细检测分析。然后在此区域内布置多组传感器进行第二次或多次检测,进一步确定多余物小区域范围和位置。图2为多余物信号采集处理系统图。

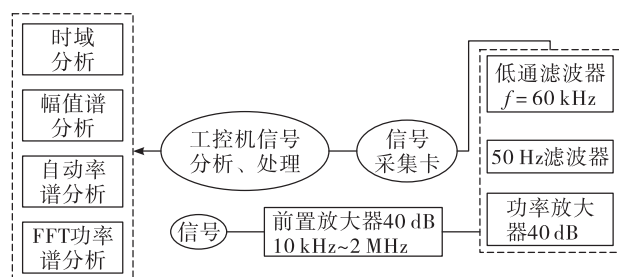


图2 多余物信号采集处理系统图

Fig. 2 Signal acquisition and processing system for redundancy

### 1.3.2 可检测多余物类型

可检测多余物类型包括产品内腔活动的金属焊渣及装配过程中掉入产品内部并可活动的螺钉、螺母、垫片、密封垫、铅封及保险丝等具有一定尺寸及重量的颗粒状金属多余物<sup>[13]</sup>。

### 1.3.3 系统检测精度

系统采用高灵敏度声发射传感器,最高精度可以采集到体积和重量相当于  $\Phi 1$  mm 钢珠大小的多余物信号。

## 2 浮动环及电磁干扰噪声屏蔽技术

### 2.1 浮动环响声干扰和电磁干扰

在开展液氧/煤油发动机多余物检测工艺试验时,发现涡轮增压内的浮动环在发动机转动过程中会不时发出响声,由于浮动环的尺寸和重量较大,多余物检测系统的多个传感器都能检测到浮动环响声信号,检测系统判定为多余物,影响了发动机多余物检测结果的判定。针对涡轮增压内浮动环的响声影响<sup>[14]</sup>,开展了浮动环干扰响声影响规律的试验研究。为了检测发动机浮动环的响声,将原本用于检测环境噪音的16号传感器固定在离浮动环最近的导管组件上,这样16号传感器既能接收到浮动环响声,也可以接收到环境噪音及其他干扰信号,通过试验发现浮动环每次发出响声时总有6~10个传感器会同时接收到触发信号,并且

固定在导管组件上的16号传感器每次都能接收到触发信号。

另外,在液氧/煤油发动机多余物自动检测时,传感器经常会不时地接收到干扰信号,检测系统判定为多余物。根据干扰信号的波形初步判定为电磁干扰,通过对周围设备的排查没有发现干扰源,而且干扰信号出现的时间和每次持续的时间都毫无规律,因此开展了电磁干扰影响规律的试验研究。通过试验发现电磁干扰每次出现时总有8~16个传感器同时接收到触发信号,并且阈值越低的传感器越容易接收到干扰信号。图3为电磁干扰信号的波形图。

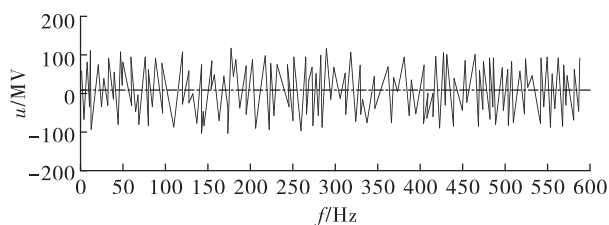


图3 电磁干扰信号波形图

Fig. 3 Oscillogram of electromagnetic interference signal

### 2.2 干扰信号屏蔽方法

浮动环响声与电磁干扰对发动机多余物检测的影响规律有共同的特点,即干扰出现时至少有6个以上传感器同时接收到触发信号。通过研究,在多余物检测系统后处理软件中增加干扰信号屏蔽处理功能,可有效消除干扰信号的影响<sup>[15]</sup>,具体方法如下:

将固定在导管组件上的16号传感器确定为检测发动机浮动环响声和电磁干扰的基准,软件后处理以该通道信号为判定基准,第16通道有触发信号且其它通道A秒内同时有触发信号时(A值可调),默认为浮动环响声或电磁干扰引起的非多余物信号,系统判断为无多余物;第16通道无触发信号,其他通道有触发信号时,系统判断有多余物。图4为屏蔽干扰后的多余物检测信号(人为放置的多余物)。

## 3 发动机多余物自动检测工艺参数研究

针对液氧/煤油发动机总装过程中可能产生多余物的类型和大小,开展了多余物检测工艺参数研

究,通过试验确定了发动机滚动的转速、传感器的阈值和触发信号同步接受时间。

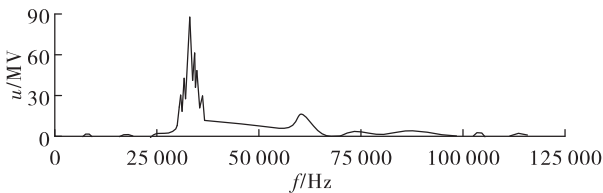


图 4 屏蔽干扰后的多余物输出信号

Fig. 4 Output signal of redundancy after shielding interference

3.1 发动机滚动转速的确定

发动机多余物滚动检查设备的转速范围为 1 ~ 30 转/min。将发动机安装在机械转台上后,在发动机机架侧杆上捆绑内腔有多余物的标准试件,在试件上安装传感器进行检测。进行了发动机转速从 1 ~ 30 转/min 的检测试验。结果表明,转速较低时,多余物在试件内的撞击次数少,传感器检测到的多余物信号的次数也较少;转速较高时发动机自身的振动量较大,转动平稳性较差,综合考虑确定发动机滚动的转速为 8 转/min。

3.2 传感器阈值的确定

传感器阈值是指能激发传感器的最小能量值,为电压值。通过对发动机装配过程可能产生的多余物进行梳理,主要有密封垫、铅封、卡尺上的螺钉、螺栓、螺母、垫片、铁屑、保险丝等。采用  $\Phi 1\text{ mm}$ 、 $\Phi 2\text{ mm}$ 、 $\Phi 4\text{ mm}$ 、 $\Phi 6\text{ mm}$  及  $\Phi 8\text{ mm}$  标准钢球和定尺度的保险丝、铁屑、密封垫等试件进行传感器的阈值确定试验,试验结果如表 1 所示。试验结果表明,发动机装配过程可能产生的多余物的传感器阈值为 0.08 ~ 0.004,且当传感器阈值大于 0.028 时,系统稳定、检测结果准确;当传感器阈值低于 0.028 时,容易出现噪声,造成误判(分析认为是发动机转动过程中自身振动引起的信号,而非多余物造成的信号)。综合考虑,将 1 ~ 15 号传感器阈值设定为 0.028。由于 16 号传感器是检测发动机浮动环响声和电磁干扰的基准,将 16 号传感器的阈值设定为 0.015(阈值低于其他传感器),使其更容易接收到浮动环响声和电磁干扰信号。

3.3 触发信号同步接受时间的确定

触发信号同步接收时间是指在 16 号传感器与

其他传感器同时接收触发信号的最短时间。系统可设定的最小值为 20 ms,且可按 20 ms 的倍数增加。从 20 ~ 200 ms 进行发动机多余物检测试验,当时间小于等于 40 ms,由于浮动环响声传到发动机某些传感器测点的时间大于 40 ms,系统判定为有多余物;当时间大于等于 60 ms 时,系统检测稳定,没有出现误判现象,综合考虑将 1 ~ 15 号传感器与 16 号传感器同时接收触发信号的时间设定为 60 ms。

表 1 多余物类型与传感器阈值对照表

Tab. 1 Comparison between redundancy type and sensor threshold

多余物类型	传感器阈值/V
$\Phi 1\text{ mm}$ 钢球	0.015
$\Phi 2\text{ mm}$ 钢球	0.018
$\Phi 4\text{ mm}$ 钢球	0.028
$\Phi 6\text{ mm}$ 钢球	0.050
$\Phi 8\text{ mm}$ 钢球	0.190
$\Phi 0.5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 保险丝	0.004
$3\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 铁屑	0.004
L4 密封垫	0.030
T4 密封垫	0.032
M5 垫片	0.028
M5 螺母	0.084
M5 螺栓	0.150
铅封	0.050
卡尺上的螺钉	0.080

4 验证试验

在确定发动机多余物自动检测的转速、传感器的阈值和触发信号同步接受时间 3 个工艺参数后,用液氧/煤油发动机样机进行了多余物模拟检测试验。将 1 ~ 14 号传感器固定在发动机上,15 号传感器固定在标准试件上,标准试件捆绑在发动机机架侧杆上,在标准试件内分别放置 L4 密封垫、T4 密封垫、铅封、卡尺上的螺钉、M5 螺栓、M5 螺母和 M5 垫片,系统均能检出多余物,而且没有误判。

此外,开展了发动机内腔多余物验证试验,分解发动机导管与氧预压泵连接处,将 M5 螺母系

绳放入导管内,固定在导管上的10号传感器可检测到多余物信号,其他传感器无触发信号,检测结果准确可靠。

## 5 结语

通过试验研究,获得了液氧/煤油发动机多余物自动检测中发动机浮动环和电磁干扰噪声屏蔽方法,确定了发动机多余物自动检测工艺参数。形成的发动机多余物自动检测技术、干扰信号屏蔽方法以及自动检测工艺参数的确定,为其他型号发动机多余物的检测提供了技术借鉴。

### 参考文献:

- [1] 谭永华. 中国重型运载火箭动力系统研究[J]. 火箭推进, 2011, 37(1): 1-6.  
TAN Y H. Research on power system of heavy launch vehicle in China[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(1): 1-6.
- [2] 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.
- [3] 刘国球, 任汉芬, 朱宁昌, 等. 液体火箭发动机原理[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [4] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [5] 戚乐, 赵国强, 陈金豹, 等. 航天发动机多余物自动检测系统[J]. 宇航计测技术, 2014, 34(1): 61-66.
- [6] 戚乐. 航天发动机多余物检测系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [7] 戴光, 徐彦廷, 李伟, 等. 声发射技术的应用与研究进展[J]. 东北石油大学学报, 2001, 25(2): 95-98.
- [8] 严心涛. 基于声发射的阀门泄漏检测方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [9] 郑世才. 航天产品活动多余物的检测[J]. 上海航天, 1997(5): 56-60.
- [10] 王育红, 郑世才, 胥维勋, 等. 活动多余物的检测[J]. 宇航计测技术, 1996, 16(3): 55-58.
- [11] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [12] 孙宏明. 运载火箭与推进系统[J]. 火箭推进, 2000, 26(3): 1-4.  
SUN H M. Launch Vehicle and Propulsion System[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2000, 26(3): 1-4.
- [13] 王辉, 李护林, 崔超海. 发动机总装多余物控制浅析[J]. 火箭推进, 2003, 29(2): 28-32.  
WANG H, LI H L, CUI C H. Analysis on Control of Redundant Material in Engine Assembly[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2003, 29(2): 28-32.
- [14] 杜天恩. 高压液体火箭发动机新结构密封[J]. 推进技术, 2000, 21(4): 16-19.
- [15] 陈海峰, 刘晓, 赵政社, 等. 液体火箭发动机试验噪声测试分析[J]. 火箭推进, 2014, 40(3): 83-90.  
CHEN H F, LIU X, ZHAO Z S, et al. Noise detection in test of liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014, 40(3): 83-90.

(编辑: 马 杰)