

# 发动机热试车数据测量误差分析及处理方法

徐 峰, 张少博, 陈海峰  
(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 对发动机试车测量误差进行了分类并提出了消弱误差的方法, 特别是对数据处理中最小二乘法的应用以及推力零位误差的消弱方法进行了阐述。验证表明, 这些分析及方法对数据误差的消弱是有效和可行的。

**关键词:** 发动机试车; 测量误差; 数据处理误差

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 04-0072-04

## Error analysis and processing of engine hot test data

XU Feng, ZHANG Shao-bo, CHEN Hai-Feng  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The classification of measured error in the process of engine test and the way to weaken the error are proposed. The application of least squares method in the specific data processing and the method to weaken the data zero error are presented. The confirmation result shows that the analysis on weakening of the data errors is valid and feasible.

**Keywords:** rocket engine test; measurement error; data processing error

## 0 引言

在发动机的研制过程中, 需要进行大量的热试车考核, 热试车中获取的各种数据是发动机设计、改进和定型最具有说服力的依据。发动机热试车过程是一个从启动到稳态再到关机的复杂过程, 其数据测量是一个受主观因素和客观因素综合影响的过程, 如何获取更加真实和可靠数据以

及如何判别被测数据的可信赖程度是发动机数据测试人员所要面临和必须解决的问题。

## 1 测量误差原因及解决方法

试验过程中任何数据的真值无论采用什么方法或使用多么高精度的仪器进行测量得到的都是近似值, 一切测量结果都含有误差。发动机热试车过程数据测量更是如此, 其中包含着由多种原

收稿日期: 2011-11-30; 修回日期: 2011-12-22

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2010JY02)

作者简介: 徐峰 (1978—), 男, 工程师, 研究领域为发动机测量技术与工程

因引起的误差。

1.1 测量工具引起的误差

由于测量工具、仪器和装置本身就带有误差，即使再精密，也不免会出现异常数据。在发动机热试车数据测量中，为了使数据更加接近真实值一般选择使用准确度和精度等级较高的测量工具或装置。如在使用活塞式压力校验装置校验压力传感器时，一级的装置校验出的数据就会比二级装置校验出的数据误差相对小些。

1.2 环境条件引起的误差

当使用的测量设备的工作环境条件偏离了标准环境条件时，也会给测量结果带来误差，这些环境条件包括：温度、湿度、气压、振动、外界电磁场等。如湿度过高引起的采集电缆绝缘性下降、外界振动引起的传感器输出数据异常、温度过低对试车状态的影响等常见问题。当环境温度变化大于传感器正常使用温度范围时，传感器变化将影响到测试系统精度。测量系统中的传感器零位数据受温漂影响是复杂的，很难给出传感器温漂的数学模型。实践证明，温度突变对传感器零漂影响最大，提前把传感器放在使用环境温度中可以大大减小温度突变的影响。

发动机热试时，电子仪器一般受环境因素影响较大，通常按照 SJ-943-75（电子仪器使用环境国家标准）规定采用表 1 所示标准使用条件。

表 1 发动机热试车电子仪器的标准使用条件  
Tab.1 Standard application conditions of electronic equipments for engine hot test

影 响 量	标准数值或范围
环境温度/℃	20±2
相对湿度/%	45-75
大气压强/MPa	0.065~0.100
交流供电电压/V	220±220×2%
交流供电频率/Hz	50±50×1%
直流供电电压	额定值
外界电磁干扰	应避免
通风	良好
阳光照射	避免直射

1.3 测量系统引起的误差

测量系统误差是由仪器的固有误差、测量工作条件以及人员的技能等引起的有规律的误差。根据系统误差是固定的或按一定规律变化的特性，对系统本身误差的处理一般从以下几个方面入手：设法检验出系统误差是否存在；分析可能造成系统误差的原因；采取措施来尽力消弱系统误差；设法估计出残存的误差的数值和范围。

发动机热试车对系统误差一般采用的方法是：采用以前大量试验证实可靠的校正系数，对测试数据进行修正；用已知结果的试验数据或标准数据和正在测量的数据进行对比试验；用其它可靠的检测方法与被测数据进行对比试验；用不同的人员检测，进行对比试验。已证实这些方法对消弱系统误差是科学和可靠的。

1.4 随机误差

随机误差是指在相同的条件下，多次重复测量同一个量，各次测量的误差时大时小，时正时负，杂乱的变化。在实际工作中，电源的突然波动、气温的变化、接触电阻的变化等都可能都是导致随机误差产生的原因。相对随机误差多数情况下变化无规律，但在一定的条件下变化也会是有规律的情况，只要选择有足够精度的测量工具，多次读数间总会有微小差别。对真空传感器校验时，绝压测量仪在每一压力档稳定时显示的数值总有 0.02 MPa 的变化，这时如果选择三遍六档或更多遍数来进行校验，可相应减小随机误差。

对多次测量和校验结果的分析，可以按以下步骤进行更精密和细致的评判：

- 1) 将多次测量值按先后顺序列出表格；
- 2) 求出被测值多次测量后的平均值  $\bar{x}$ ，

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n};$$

- 3) 求出多次测量值的剩余误差  $(x_i - \bar{x})$ ，理

论上， $\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) = 0$ ，用来验证计算是否正确；

- 4) 按照贝塞尔公式计算出测量值的标准偏差 S；

5) 如果  $|x_i - \bar{x}| > 3S$  时, 舍去一个最大数据, 并重新从 2) 算起;

6) 按照公式  $S_x = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{n(n-1)}}$ , 算出平均值的标准偏差  $S_x$ 。

通过计算出的  $\bar{x}$  值和  $S_x$  值运用到试验数据处理的相关公式中, 以更精确地消除和减弱随机误差对试验和校验数据的影响。

## 1.5 零位误差

### 1.5.1 推力零位误差

推力是发动机热试车主要测量参数之一, 推力零位的变化往往是多方面原因造成的。这其中最重要的一个原因是与推力架的材料形变有关。在一定的温度下, 典型的材料特性变化曲线变化见图 1。

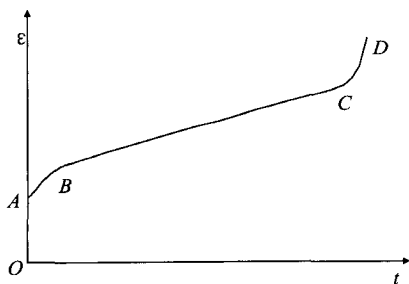


图 1 材料蠕变曲线

Fig.1 Material creep curve

材料受力变化过程如图所示分为三个阶段: OA 段为材料弹性变形阶段; AB 段为材料快速减速变化阶段; BC 段为材料慢速恒速变化阶段; CD 段则为加速变化阶段。

发动机热试车时, 试验台承力架在长时间应力作用下产生变形, 使得承力架轴向长度缩短, 板簧弹性阻力发生变化, 会造成推力测量系统的零位变化。OA 段弹性变形阶段造成的影响通过液压式原位校准可以排除, 而变化的影响主要集中在 AB 段。根据分析, 我们将 AB 段变化作为线性变化处理, 因此数据处理时, 我们可以尝试把测量数据前后零位之和的平均值作零位处理。

### 1.5.2 机械零位变化引起的零位误差

传感器机械零位变化主要是由于冲击力作用形成的。在火箭发动机点火试验过程中, 发动机推力上升是在很短的时间内完成的 (小于 0.1 s 的数量级)。特别是在板簧支承式水平试验台推力测量系统中, 传感器和动架组合体还会因此而发生振荡, 实际测量的推力-时间曲线中经常可以发现这种情况。传感器承力弹性件在大强度瞬间冲击力的作用下, 弹性体产生一定量的微小塑性变形, 引起电桥应变片电阻变化造成试验后测量系统推力零位数值的变化。

处理方法是试验后传感器进行校准工作, 获取变化后传感器的精度指标并用其进行数据处理, 由于传感器机械零位变化多为瞬间冲击变化, 可以用试验后零位作标准零位进行数据处理。

### 1.5.3 发动机安装引起的零位误差

当发动机安装不水平时, 发动机轴线与水平面有一夹角, 使发动机重力在水平面上有一分力。在固体发动机工作过程中, 由于发动机中的药量不断减少, 发动机药柱重力在传感器上的分力发生线性变化, 造成试验前后推力零位变化, 进而影响推力实测值的有效测量。

参考推力变化计算公式, 可知发动机工作中零位变化为

$$G_t(t) \frac{G_t}{t_b} \sin \alpha$$

式中:  $G_t(t)$  为  $t$  时刻药柱重力水平分力;  $\alpha$  为药柱轴线与水平面夹角;  $G_t$  为药柱总重量;  $t_b$  为燃烧时间;  $t$  为发动机燃烧任意时刻。

由于发动机安装不水平时造成零位变化, 可采用数据处理公式修正

$$F'(t) = F(t) + G_t(t)$$

式中:  $F'(t)$  为修正后的  $t$  时刻推力;  $F(t)$  为测量的  $t$  时刻推力。

### 1.5.4 振荡引起的零位误差

发动机试车时使用的推力传感器为一弹性体, 当突然失去外力作用后, 传感器以阻尼振荡方式逐渐归零。在板簧支承式水平试验台推力测

量系统中,传感器、试验架动架及发动机固定在一起,形成弹性振动系统,在发动机推力上升段和下降段时测量到的推力值存在明显的滞后、过冲和振荡等现象。由于振荡并不影响最后归零的精确度,建议将其简化为单自由度二阶振动系统公式。

### 1.5.5 小结

通过以上零位误差分析,针对热试车提出以下几点建议:

1) 对发动机试验测量数据零位变化记录要全面,包括:试验前传感器零位、试验前预紧零位和试验后零位;

2) 注意发动机、试验架和传感器试验前后的状态变化。发动机试验测量数据零位变化主要集中在试验架及传感器上,注意其状态变化并配合零位记录基本上可以分析出零位变化的原因;

3) 对于不同类型的试验台及发动机零位变化的原因进行数理统计,总结规律性,有助于提高试验分析水平;

4) 在很难找出原因或原因过于复杂难以进行精确数据处理的时候,采取前后零平均值作零位,使误差居中。

## 2 结束语

通过对发动机试车中存在的测量误差的分析,希望尽可能的消弱测量误差对发动机试车数据实测值的影响。同时在对测量数据进行处理时,不能简单地利用测量结果是否处于其标准值允许误差范围以内来判定工件或者产品是否合格,还必须考虑测量不确定度的影响。总之,在试车数据测量工作中应根据测量条件和对象的特点选

取更合适的测量手段并加强理论研究,进一步提高发动机试验参数测量的准确性。

### 参考文献:

- [1] 几何量实用测试手册编委会. 几何量实用测试手册(1) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [2] 杨龙麟. 电子测量技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [3] 蒋焕文. 电子测量[M]. 北京: 计量出版社, 1983.
- [4] 张俊杰. 测量误差及数据处理 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [5] 赵万明. 液氧/煤油发动机试车主要参数测量方法研究 [J]. 火箭推进, 2006, 32(5): 28-32.
- [6] 仲元. 小量程称重传感器的温漂及补偿[J]. 传感器应用技术, 1987, 5(4): 38-43.
- [7] 李金海. 误差理论与不确定度评定[M]. 中国计量出版社, 2003.
- [8] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [9] 张颖立, 唐小明, 何文龙, 等. 基于 DDS 的多通道信号源设计[J]. 现代电子技术, 2011, 34(24): 177-180.
- [10] 何炳林, 张焕文, 梁柱扬, 等. 基于 ADS1252 的数据采集模块设计[J]. 现代电子技术, 2011, 34(13): 139-141.
- [11] 肖俊旺, 夏静. 基于 LabVIEW 的火箭试验数据处理方法[J]. 电子设计工程, 2011, 19(4): 38-40.
- [12] 王文龙, 赵政社, 混平, 等. 耿直液体火箭发动机地面试车应变数据采集系统研制 [J]. 火箭推进, 2011, 37(3): 54-61.
- [13] 陈金豹, 赵晓东, 梁慧敏, 等. 星载电子设备多余物数据采集系统的设计[J]. 电子设计工程, 2011, 19(5): 125-128.
- [14] 朱明珠, 李军, 栾东海, 等. 基于 DSP 的某火箭发射装置控制系统设计[J]. 电子设计工程, 2011, 19(17): 74-76.
- [15] 张会新, 庞俊奇, 吴柯锐, 等. 弹载记录器实时监测模式的设计和实现[J]. 电子设计工程, 2009, 17(1): 1-2.

(编辑: 陈红霞)