

固体火箭发动机试验架性能试验方法*

侯 向 荣

(航天工业总公司 401 所, 西安, 710000)

摘 要: 在总结固体火箭发动机试验架的设计、性能试验与使用的基础上, 介绍了试验架的静态性能及动态性能试验系统的组成、技术要求、操作程序和数据处理方法。作为非标准机械设备的试验架, 是固体火箭发动机静止试验中推力测试的主要误差源, 控制这一环节, 为提高固体火箭发动机推力测试的准确性提供了保证。

主题词: 固体推进剂火箭发动机, 地面试车台, 燃烧试验, 推力测量, 推力计, 误差控制

TESTING METHODS FOR PROPERTIES OF TEST RIG USED FOR SOLID ROCKET MOTORS

Hou Xiangrong

(The 401st Research Institute of China Aerospace Corporation, Xi'an, 710000)

Abstract: A summary on design, property tests and application experiences of test rigs used for solid rocket motor is presented in this paper. Measuring systems of static characteristic and dynamic characteristic of test rigs are also intraduced as well as their composition, technical requirments, operating procedure and data processing methods. Since the largest error of measured thrust in rig firing tests of solid rocket motors mainly results from the test rig by controlling his error accuracy for thrust measurement of solid rocket motors would be improved.

Keywords: Solid propellant rocket engine, Ground test seand, Combustion test, Thrust measurement, Thrust meter, Error control

1 前 言

为准确测量发动机的推力、燃烧室压强等参数, 必须要有一个满足测试要求的试验架与

* 本文 1993 年 10 月 17 日收到

记录系统的精度相匹配。而发动机所用的试验架是非标准机械产品,其精度要比电子仪器的精度低得多,所以它是推力测量中的最大误差源。为了控制推力测量误差,需要规定试验架的静态性能和动态性能指标要求,同时还应规定与之相匹配的试验架性能试验和评定方法。这对于提高固体火箭发动机推力测量的准确性是十分重要的。

2 试验架的作用与分类

在发动机的地面静止试验中,试验架是发动机的载体,试验架的精度直接影响着发动机推力测量精度及控制系统的工作质量。所以,设计试验架时,除了应考虑适应发动机最大推力必须具有的刚度外,还应考虑试验架对于推力-时间曲线上升段和下降段有较好的频率响应特性。同时,还有较理想的阻尼比和分辨率。这即是说,既要求试验架轻巧、灵活,又要其承力部件刚度大、变形小。这就要求试验架的设计者应对其性能要求进行全面的综合平衡,在保证其刚度指标的前提下,尽可能减少动架质量,以提高其轴向测力精度和固有频率。

目前,常用的试验架分为柔性试验架和非柔性试验架两种。柔性架的动、定架之间多用板簧连接,其精度比非柔性架高得多,甚至可以高出一个数据级。柔性试验架的轴向静态精度通常高于0.2%,而非柔性试验架的轴向静态精度多在2.0%左右。故柔性试验架多用原位校准方式进行试验前的校准,而非柔性试验架只需用现场校准方式进行推力校准,精度也就满足要求了。

就结构性能而言,非柔性试验架一般较为坚固耐用,而柔性试验架则比较单薄,易于损坏。所以,非柔性试验架主要用于发动机研制初期的结构试验或有缺陷发动机的销毁试验;柔性试验架主要用于发动机研制后期的性能试验。

本文主要介绍带有原位校准装置的柔性试验架的性能试验与评定方法,包括试验系统的组成、技术要求、操作程序、数据处理与性能评估等。其中的数据处理方法也适用于非柔性试验架的性能试验。

3 静态性能试验

3.1 试验内容

试验架的静态性能主要有:非线性误差、滞后性误差、重复性误差、理论精度或折合精度、分辨率等。试验架的这些性能指标必须在其投入使用前获得。如果不了解试验架的静态性能是否满足设计要求就用于发动机试验,势必在试验架和发动机的安装中带来盲目性,以至于给参数测量带入一些不必要的误差。所以,只有通过试验架的静态性能试验,才能了解在最大推力作用下的动架位移量和最佳安装状态,指导以后的试验安装工作,并作为制定安装工艺规程的依据。

3.2 试验大纲

为了更好地进行试验架的性能试验,试验前应制定一个试验大纲,一般应包括以下内容:

- a. 需要测试的试验架性能参数名称及代号;
- b. 测试系统的组成及技术要求;
- c. 试验装置安装程序与要求;
- d. 试验方法与步骤;
- e. 试验数据处理方法;
- f. 试验架性能评估。

3.3 静态精度试验系统

3.3.1 系统组成

试验架静态精度试验系统的组成与发动机正式试验时一样,主要有:发动机、试验架、原位校准装置、记录系统等。最好使用真实的发动机进行试验,如果条件不允许,可使用模拟发动机进行试验,以便得到真实的试验结果。

3.3.2 技术要求

为了减少试验测试中的误差,信号传输线应尽量不使用接插件而使用独根电缆。如确需使用接插件时,应利用硅胶将接插件灌封起来,以防止由此带进干扰。同时,应把显示传感器输出的仪器放置在现场。

目前,国内的测试水平为:高精度试验架对于发动机平衡段的推力测试精度高于或等于 0.5%。按照计量检定原则,试验架的精度应高于推力测试精度的 1/3~1/5,即高精度试验架的精度应在 0.10%~0.17%之间。由此可知,传感器与记录系统的综合精度应在 0.02%~0.06%范围内。只要传感器的精度能够满足要求,记录系统的精度一般是没有问题的。

3.3.3 操作程序

试验架的静态精度试验,应按照发动机正式试验时的操作规程进行安装。安装完成后,进行系统预热和调节,同时对系统进行一次全面检查。如没有问题,对试验架施加一发动机最大推力的 0.1%~5%的预紧力,以消除安装间隙。然后,预加三次校准满量程力值,观察零点输出情况,待满足要求后,用静态校准法进行试验架的静态性能试验。逐级加载和卸载,稳定后记录数据。试验校准级数不少于 6 级(包括零点),总数据不少于 33 个。

3.3.4 数据处理

对试验架静态性能试验中得到的数据,应用最小二乘法进行处理。首先求出校准工作直线方程,然后分别求出试验架的三项误差:

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\delta_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{2Y_{FS}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\delta_R = \pm \frac{3\sigma}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: δ_L ——试验架的非线性误差;

δ_H ——试验架的滞后性误差;

δ_R ——试验架的重复性误差;

σ ——标准偏差;

$\Delta L_{\max}$ ——工作直线与校准曲线之间的最大偏差; Y_{FS} ——工作传感器的满量程输出值;

$\Delta H_{\max}$ ——同一校准级正、反行程校准曲线之间的最大差值;

最后,分别求出试验架的理论精度或折合精度,计算公式如下:

$$A = \pm \frac{B + 3\sigma}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (4)$$

$$A_c = \pm \sqrt{\delta_L^2 + \delta_H^2 + \delta_R^2} \quad (5)$$

式中: A ——试验架静态理论精度;

A_c ——试验架静态折合精度;

B ——工作传感器的系统误差限,在数据值上取传感器的正、反行程曲线与校准工作直线之间的最大差值。

3.4 分辨率试验

试验架分辨率试验的装置与精度试验装置相同。对于小型发动机的试验架,原位校准时可以用砝码加载,还可同时用千分表记录试验架在加载状态下的位移变化量。为了能够准确地记录试验架的分辨率数值,试验前应将千分表预置一读数,以便消除其初始不灵敏造成的误差。试验方法也与精度试验相同,只是加载级数比精度试验时要多。试验前,记录系统打零线,然后逐渐加载,同时从记录系统显示仪器和千分表两方面监视信号输出变化情况,当记录系统显示有信号输出时,试验结束。此时所加载荷即为试验架的分辨率。

4 动态性能试验

4.1 试验内容

试验架的动态性能,主要包括试验架的固有频率和阻尼比,它们影响发动机推力-时间曲线上上升段和下降段力值测量的准确性。只有严格控制试验架的动态性能指标,才能确保发动机推力测量的准确度。

在固体火箭发动机试验中,常出现推力-时间曲线抖动过大的情况,这不但给数据处理带来困难,而且严重影响了推力测量准确性,这种情况尤其在小型发动机试验中常见。目前,常用加阻尼器、加滤波器等方法消除抖动。这两种方法往往给推力特征值的测量带来不利影响,而目前用传递函数法进行补偿的技术还不十分成熟。

笔者认为,如能从发动机试验架设计上着手,提高其固有频率及阻尼比,另外对测力组件施加一个预紧力,以此来消除机械零、部件之间的间隙,即可全部达到或大部分达到消除曲线抖动的问题。这种想法,已有部分试验架的设计中进行了实践,并取得了成功。

4.2 动态性能试验系统组成

试验架的动态性能试验系统共有三部分组成,即发动机-试验架组合系统、激励系统和记录系统。激励力可以用爆炸螺栓产生的负阶跃力,小型发动机的试验架也可用锤击法产生激励力。

4.2 技术要求

为了真实地模拟发动机试验时的点火冲击力,必须沿发动机-试验架组合体的轴线施加激励力。尤为重要的是,激励装置的安装不应影响发动机-试验架组合体的动态特性产生明显的影响。另外,还应保证发动机-组合体的约束条件,应与发动机地面点火试验时的完全一致。

为掌握发动机的质量变化,对发动机-试验架组合体固有频率和阻尼比的影响,在进行动态性能试验时,应至少用发动机点火前和点火后两种质量状态进行动态性能测试。

4.4 操作程序

试验前,应按照如下步骤进行工作:

- 按照要求安装试验架和发动机(或模拟发动机);
- 安装传感器和千分表,并将千分表预置一读数;
- 安装激励力产生装置(爆炸螺栓、加力螺杆和支架等);
- 将传感器、激励电源和记录系统接通;
- 进行系统预热和调节;
- 施加预紧力,该力值的量级应与发动机预示的最大推力量级相同(至少不应小于预示

最大推力的 50%)。同时,人工记录千分表在该力值作用下动架的位移量。

然后,把爆炸螺栓与电源接通,将其引爆。于是系统受到一个负的阶跃力的作用,发动机与试验架组合系统便随之产生振荡。与此同时,记录系统开始记录系统的振荡曲线。

4.5 数据处理

由于发动机-试验架组合体不是一个理想的单自由度二阶线性系统,所以它对激励信号的响应曲线与理想系统的响应曲线不太相同。在数据处理时,可以把发动机-组合体对激励信号的响应曲线,简化为理想的单自由度二阶线性系统的响应曲线。在模拟记录系统记录的曲线上,计算出单位时间(1s)内的波形数,即为组合系统的固有频率。也可按照公式(6)和公式(7)分别计算固有频率和阻尼比:

$$f_0 = 1/T_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (6)$$

$$\zeta^2 = \delta^2 / 4\pi^2 + \delta^2 \quad (7)$$

$$\delta = \ln \eta \quad (8)$$

$$\eta = A_i / A_{i+2} \quad (9)$$

式中: f_0 ——二阶线性系统固有频率; T_0 ——响应曲线固有周期;
 ζ ——二阶线性系统阻尼比; δ ——计算值;
 η ——计算值; A ——振荡曲线半波幅值。

当然,如果直接从曲线上数出系统的固有频率,则利用公式(6)求阻尼比就非常方便。上述公式(6)~(9)所给出的计算方法是经过近似处理的,因此发动机-试验架组合系统的固有频率和阻尼比也是近似表达值。另外,还可以使用千分表的读数求得试验架组合系统的固有动态特性。这个方法是:将千分表测得的试验架在阶跃力作用下的最大位移量,代入公式(10),即可求得组合系统的固有频率:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{F}{\Delta l \cdot M} \quad (10)$$

式中: F ——记录系统测得的激励力值;
 Δl ——千分表记录的在激励力作用下动架的最大位移量;
 M ——发动机或发动机壳体与动架的总质量。

5 性能评估

5.1 试验架静态性能评估

试验架静态性能的评估需要做好两件工作:一是验证静态精度试验的结果是否满足该试验架的设计要求;二是必须明确给出试验架的最佳安装状态参数。如果试验结果满足设计要求,就要进行多次静态性能试验(至少进行3次),以便给出试验架的安装状态重复性,为以后控制发动机试验时的安装误差提供依据。

5.2 试验架动态性能评估

试验架动态性能的评估,主要是检查试验结果是否符合设计要求。一般情况下,大型发

动机与试验架组合体的固有频率不低于 30Hz, 小型的一般在 90~120Hz 范围内, 中型的则在大型的与小型的之间。

发动机-试验架组合体的阻尼系数, 取决于它的固有频率和固有周期, 最佳值应在 0.6~0.7 之间。但是实际情况是, 试验架的阻尼系数均小于最佳值, 而多在 0.1~0.5 范围内。然而, 试验架的设计者不应盲目追求阻尼系数的最佳值, 以免损害了试验架的静态性能。而应以发动机的推力-时间曲线平衡段满足公式 (11) 的条件为原则:

$$\left| \frac{F_i - F_m}{F_m} \right| \leq 15\% \quad (11)$$

式中: F_i ——发动机推力-时间曲线平衡段上出现的最大峰值;

F_m ——推力-时间曲线平衡段的平均力值。

5.3 试验报告

根据试验架静态性能与动态性能的评估结果, 做出试验架能否用于发动机地面试验的结论。并根据试验过程中出现的问题, 给出试验架使用过程中可能出现问题的解决方法, 同时还应对试验架的使用与维护提出合理的意见。

(上接第 62 页)

5 主要结论

(1) 经实际使用证明, 实时体积形变非接触测试系统, 工作可靠, 性能稳定、体积形变测量分辨率高、实验结果重复性好。可用于测定和研究材料的体积应变随压力变化规律, 体积蠕变柔量、体积松弛模量和初始气孔率。

(2) 得到几种固体推进剂的体积模量、体积柔量和初始气孔率, 体积松弛模量和体积蠕变柔量的变化曲线。

参 考 文 献

- [1] Ferry J D. Viscoelastic Properties of Polymers. 3rd Ed. New York: Wiley, 1980
- [2] Wogsland Neal C. An Apparatus for Measuring the Bulk Modulus of Solid Propellants. BRL Technical Note No. 1321
- [3] Wang D T, Beckwith S W. Determination of Solid Propellant Effective Modulus Using Internal Pressure Blowdown Tests and in situ Transducers. AIAA-82-1100