

液体火箭发动机试验负推力修正

赵万明, 王军钢

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 推力大小是表征火箭发动机性能的关键指标。液体火箭发动机地面试验中, 推力参数的测量准确性关系到比冲的准确计算和对发动机性能的正确评价。发动机试验中影响推力准确测量的因素很多, 其中负推力是一项重要因素。主要介绍液体火箭发动机试验中, 推力测量系统的组成与测量技术, 重点讨论产生负推力的因素和负推力修正技术。

关键词: 发动机试验; 推力测量; 负推力修正

中图分类号: V434.3-33 文献标识码: A 文章编号: 1672-9374 (2010) 06-0056-06

Correction of negative thrust in liquid rocket engine tests

ZHAO Wan-ming, WANG Jun-gang

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

Abstract: Thrust is one of the key parameters of the rocket engine performance. The accuracy of thrust measurement in liquid rocket engine testing is important to the impulse and the engine performance evaluation. Negative thrust is one of the important factors influencing the accuracy of thrust measurement in liquid rocket engine testing. The reason of negative thrust generation, negative thrust correction technique and the thrust measurement in the liquid rocket engine testing is described in this paper.

Keywords: rocket engine testing; thrust measurement; negative thrust modification

0 引言

大型液体火箭发动机地面试验中, 推力参数是测量精度较高的参数之一。目前大型液体火箭发动机试验推力参数测量不确定度可达到 0.2%~0.5%。不确定度较高的主要原因是推力测量系统采取了现场原位校准, 现场校准状态和试车状态

完全一致, 最大限度的减少了系统误差。工程测量中, 测量误差通常由系统误差和随机误差组成, 系统误差一般由固定因素引起, 其大小和方向基本不变, 系统误差可以进行修正。一般测量系统中系统误差比随机误差所占比例大, 消除或减小系统误差, 基本解决了误差的主要部分。推力测量系统采用原位现场校准, 消除了主要误差。但推力参数测量中, 负推力也是系统误差的

收稿日期: 2010-03-17; 修回日期: 2010-08-16

作者简介: 赵万明 (1958—), 男, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机试验

一部分,由于校准时间和方式的不同,产生负推力的部分因素现场校准中没有消除。液体火箭发动机地面试验中,负推力指发动机工作过程中由已知、固定的外界因素产生的与推力方向相反的一种力,该力减小了发动机正常工作状态下输出的推力大小。负推力数值大小与泵前管路和发动机头腔的介质充填量、入口压力大小、试验系统的推力架和泵前管路结构形式、推进剂温度、高空模拟及地面试验等因素有关。常规常温发动机负推力修正一般通过理论计算和简单试验可以获得比较准确的修正值。但低温介质发动机负推力修正值是既不固定,又没有规律可循,其数值大小对推力测量准确度有较大影响。因此,研究液体火箭发动机推力测量技术,特别是负推力修正技术和方法,对新型低温介质发动机研制和准确客观评价发动机性能有着重要意义。

1 推力测量系统构成与原理

研究推力准确测量技术和负推力修正方法就必须研究推力测量系统的结构组成和测量原理。液体火箭发动机试验推力测量系统主要由试车架、力源加载系统及测量系统组成。试车架主要由定架、动架、预紧力装置及弹性约束件等组成。图1是一个典型的大型发动机垂直式试车架结构形式。其中,定架固定在试车台主体地基上,动架和发动机连接,测量传感器安装在动架和定架之间。动、定架力分界面由两端分别固定在动、定架上的弹性约束件和分别固定在动、定架上的推进剂管路上的波纹管构成。弹性约束件是试车架的关键环节,设计上应垂直于推力轴线,并能承受一定的横向力(一般要求额定推力15%),轴向约束力小于额定推力的0.15%。动架、弹性约束件及波纹管组成的动架系统应保证99%的被测力值传递到测量传感器上。预紧力装置的作用是:利用杠杆原理通过砝码将动架拉紧,使定架、测量传感器及动架三者之间没有缝隙,且测量传感器提前受到一定预紧力值,减小发动机启动瞬间对动架和传感器的冲击。预紧力一般取额定推力的5%~30%。

力源加载系统主要由力源加载装置、基准力传感器等组成。力加载装置和基准传感器试验前

对推力测量系统进行原位校准,试验过程不参加、不工作。一般要求基准力传感器的精度比测量传感器的精度高一个数量级,力源加载装置在每一档力值上应稳定。

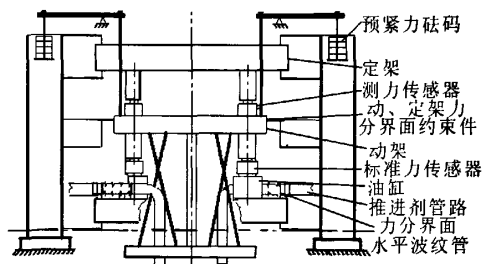


图1 垂直式发动机试车架

Fig. 1 Vertical thrust frame of engine testing

测量系统主要由测量传感器、传输电缆、信号调理器、数据采集装置、关键参数实时显示及数据处理分析装置等组成,如图2所示。其中,信号调理器对传感器输出的毫伏级电压信号进行滤波、放大、隔离。数据采集装置对调理后的信号进行实时采集、实时存盘、实时传输。实时显示装置将采集系统实时传输的推力参数计算成物理量进行显示。

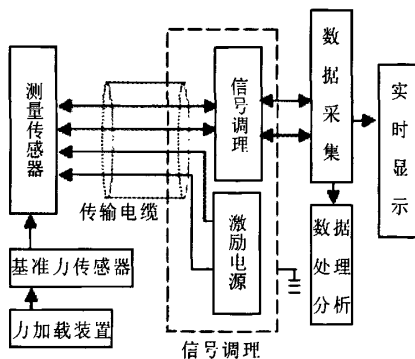


图2 测量系统原理框图

Fig. 2 Diagram of measurement system

推力参数的测量过程和原理是,发动机试验前对推力测量系统进行现场原位校准。方法是:力源加载系统通过固定在定架上的油缸顶动架或砝码直接拉动架,获得和试验时推力同方向的N档基准力值(通常手动加载时选择6档),力值通过基准力传感器、动架传递到测量传感器上,

测量传感器输出的电压信号经信号调理后数据采集装置采集数据。重复三遍,用最小二乘法将基准推力传感器输出的各档计算标准力值与采集系统记录的测量传感器各档对应电压值拟合曲线,获得全系统的斜率。公式(1)至公式(4)为校准计算公式,其中公式(4)表征系统的线性与相关性,一般情况下相关性应 0.999 以上。发动机试验时数据采集装置采集的测量传感器输出电压值减去零位后与斜率相乘,加上推力修正值就是发动机试验时产生的实际推力值。

$$y=a+bx \quad (1)$$

$$a=y-bx \quad (2)$$

$$b=\frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3)$$

$$\gamma=\frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (4)$$

$$\bar{y}=\frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}; \quad \bar{x}=\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5)$$

式中: y 为校准时施加的基准力值, kN; x 为校准时测量系统采集电压值, mV; b 为系统斜率, kN/mV; a 为校准截距, kN; n 为校准分档档数; x_i 为校准时测量采集各档电压值, mV; \bar{x} 为校准时测量系统采集的所有档力值电压的平均值, mV; y_i 为校准时每一档所加的基准力值, kN; \bar{y} 为校准时加载的所有档基准力值平均值, kN; γ 为两变量之间的相关系数。

试车架中除垂直式结构外,还有水平式和倾斜式结构形式。图 3 是一种典型的水平式试车架,小型和姿轨控发动机一般采用水平式试车架。倾斜式试车架是将水平式试车架倾斜一定角度(一般 $5^\circ \sim 45^\circ$)。不同结构形式的试车架具有不同的特点,垂直式试车架有利于提高推力测量准确性,便于摇摆和多机并联试车,缺点是大型液体火箭发动机试车台主体建筑高度高,需建立水冷式导流槽。水平和倾斜式试车架能有效降低试车台主体高度,便于安装高空模拟装置,但对推力测量准确性有一定影响。

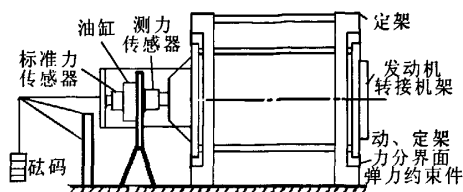


图 3 水平式发动机试车架

Fig. 3 Horizontal thrust frame of engine testing

2 负推力修正

推力参数测量中,物理量的计算如公式(6)所示:

$$F=b(u_s-u_0)+\Delta F \quad (6)$$

式中: F 为试验过程实时测量的推力值, kN; b 为系统校准斜率, kN/mV; u_s 为试验过程中实时采集的电压值, mV; u_0 为试验前推力为零位时记录的电压值, mV; ΔF 为推力修正值, kN。

不同的发动机、不同的试车架结构形式、常温和低温推进剂及地面和高空模拟试车,其 ΔF 的大小和所含的内容是不一样的。

2.1 常规推进剂发动机推力修正

使用常温常规推进剂,发动机试车架为垂直式结构的推力测量系统, ΔF 通常考虑有以下几方面。

1) 入口压力产生的负推力

推进剂管路与推力作用线平行时(用于力分界面的波纹管安装方向与推力轴线平行),入口压力产生的负推力

$$F_p=(p_y+p_r-2p_a) \times A_p \times 10^3 \quad (7)$$

式中: F_p 为泵前入口压力产生的负推力值, kN; p_y 、 p_r 为氧化剂和燃料管路波纹管处的压力, Pa; A_p 为波纹管中径计算面积, m^2 ; p_a 为当地大气压强, MPa。

2) 推进剂质量产生的负推力

泵前管路介质充填量及发动机介质充填量的重力方向和推力方向相反或有夹角,产生的负推力

$$F_q=(\bar{v}_y \rho_y + \bar{v}_R \rho_R) \times g_q \times \cos \alpha \times 10^3 \quad (8)$$

式中: F_q 为推进剂质量产生的负推力值, kN; \bar{v}_y 、 \bar{v}_R 为和推力平行的泵前氧化剂及燃料管路

(产生的重力和推力反方向的部分)到发动机推力室喷注器面之间的总容积, m^3 ; ρ_{y} 、 ρ_{R} 为氧化剂和燃料的密度, kg/m^3 ; $\cos\alpha$ 为介质重力作用线与推力作用线的夹角余弦值; g_{e} 为试验区重力加速度。

3) 附加排气产生的正向推力

常规推进剂发动机地面试车中,蒸发器和降温器排气产生的正向力和推力方向一致,而发动机飞行过程中两器产生的力分别用于氧化剂和燃料贮箱增压,地面试车中应减掉该力

$$F_{\text{r}} = \sum p_{\text{r}} A_{\text{r}} \cos\alpha \times 10^3 \quad (9)$$

式中: F_{r} 为附加排气产生的力, kN ; p_{r} 为排气管出口处压强, MPa ; A_{r} 为排气管出口处面积, m^2 ; $\cos\alpha$ 为排气方向与推力作用线夹角。

考虑上述问题时应注意三点:

1) 发动机试车架为水平结构,发动机则水平安装,泵前管路的力分界面波纹管安装方向和推力方向垂直,则不用考虑发动机介质充填量,只考虑入口压力和附加排气产生的推力修正;

2) 发动机试车时,喷管高速火焰流反作用于喷管,喷管传力到试车架产生推力。大多数水平式试车架现场校准时,标准力值采用向后拉动架方式。对于较大推力的发动机尾喷管推动架和拉动架加载标准力值获得的斜率有一定差异,应通过试验得到两者差异值,每次对拉动架校准的斜率进行修正;

3) 发动机的推力主要由一定质量的高能介质在推力室燃烧,喷管出口产生的高速燃气速度远远大于介质进入发动机燃烧室的速度而产生,推力修正时不考虑介质动量因素。但在某些特定条件下,如较长的发动机入口管路及力分界面波纹管轴向方向均和推力方向平行,地面试车的介质动量状态和飞行状态差异较大时,要考虑动量修正因素。动量修正一定要有理由、客观、准确,一般情况下,不进行动量修正。

2.2 低温推进剂发动机负推力修正

低温发动机试验中,产生负推力的因素多,负推力数值大,推力修正复杂,用于常温推进剂的许多修正理论和技术在低温情况不适用。主要原因是低温条件下发动机及泵前管路的预冷变形产生的应力大,对推力的影响程度比其他任何因素都大。如我国正在研制的某型号高压补燃液氧

煤油发动机预冷后出现如下特殊现象:预冷后产生的负推力多数在 $10 \sim 18 \text{ kN}$ 范围内,另一种型号在 $1 \sim 5 \text{ kN}$ 范围内,数值不固定;在低温情况下,入口压力产生的负推力无法使用入口压力乘泵前波纹管面积的常规方法来计算;同一台发动机不下台的情况下,第一次试车和第二次试车产生的负推力不一样;更换液氧泵前波纹管或对泵前管上的连接螺钉进行一次紧固,负推力也会发生变化等。这些特殊现象和常温介质的发动机试验截然不同。结果导致液氧煤油发动机地面试验无法用试验或计算得到一个固定的负推力修正值,部分成熟的常规发动机试验推力修正方法在低温介质发动机上不适用。但经过两种型号的液氧煤油发动机多年研制试验,通过对低温条件下推力变化情况研究分析,初步找到并掌握了一种较为合理、理想的负推力修正方法。在方法的探索过程中,曾做了以下基础研究工作。

1) 发动机安装后,在发动机预冷的情况下,燃料系统抽真空充填燃料后,进行系统不增压(入口压力为静液柱压力)、增压(入口压力分别为试车稳定段额定压力和开车前压力)情况下的低温推力现场校准。低温现场校准应至少进行三次。可以专门进行低温试验,也可以利用试车前进行试验。低温现场校准的目的是获得常温和低温状态下,现场校准斜率差异的稳定性,增压与不增压及压力大小对负推力的影响程度。

2) 统计每次试车时 -2 s 的推力零位(可以取 $-2 \sim -1 \text{ s}$ 的平均值),预冷及增压过程压力与推力的关系。掌握低温条件下增压与推力关系的变化范围。

3) 常温、低温条件下力传递系数试验。掌握低温条件下力传递是否满足要求。

通过上述试验和统计分析,可知:

1) 校准状态完全一样的情况下,同一次试车常温现场校准和低温现场校准的斜率差异大小及范围;

2) 低温试车状态下,入口压力大小和负推力的基本关系及变化范围。获得每兆帕压力产生多少负推力的范围和多次试验开车前统计的增压与推力变化平均值;

3) 低温、常温状态下,推力系统力传递情况。一般情况下,常温状态力传递系数高(行业

标准要求 99% 以上), 低温状态力传递系数略低一些。力传递系数的差异已体现在常温和低温校准斜率中, 一般不用再考虑此因素。如果低温力传递系数和常温力传递系数差异较大 (2% 以上), 应分析原因。多数情况下是发动机和泵前管路安装应力太大所致, 应设法改进或在下次发动机试验泵前管路安装时注意工艺方法。

2.2.1 低温斜率修正

推力系统的校准斜率对测量结果影响较大, 必须确保斜率的准确性。通过对不同发动机、不同型号、不同试车台的液氧煤油发动机进行低温和常温推力系统现场校准, 发现低温条件下校准斜率比常温校准斜率略大一些, 主要原因是液氧泵前波纹管及管路从环境温度骤降到 $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后变形应力所致。从多次低温试验结果看, 两个型号的发动机低温和常温斜率差异在 $0.05\%\sim 0.1\%$ 范围内。如果常温介质的推力参数基本测量不确定度为 0.5% , 当常、低温校准斜率差异在 0.1% 范围内, 对斜率可不做修正, 试车就用常温状态下取得的斜率。如果同状态下多次常、低温试验校准斜率差异大于 0.1% (基本不确定度的 20%), 而且差异相对稳定, 建议通过 5 次以上的差异平均值对每次常温校准斜率进行修正。当泵前管路变化较大、波纹管更换或间隔一定的试车次数 (如 10 次), 应进行一次低温校准, 验证推力斜率差异的稳定性。

2.2.2 低温负推力修正方法

低温状态下发动机负推力修正内容和常温发动机基本相同。高压补燃液氧煤油发动机在垂直式试车台试验时, 一般考虑入口压力, 介质充填量和预冷变形产生的负推力。介质充填量产生的负推力基本固定, 而入口压力产生的负推力线性不好但有一定范围, 唯有预冷变形产生的负推力没有规律, 而且影响了入口压力产生的负推力线性。但对于每一次试验而言, 发动机冷透后负推力基本稳定, 开车前入口压力增压到预定值且稳定时, 推力值基本在较小范围波动, 此时的推力值可以认为是本次试车的负推力值, 在这种情况下, 将开车前 $-2\sim 0\text{ s}$ 的推力平均值作为本次试验的负推力修正值更合理一些。这是因为, 在开车前如果不考虑入口压力比试车稳定段入口压力高这个因素外, 推力值应为零。把 $-2\sim 0\text{ s}$ 推力值

修正为零是液氧煤油发动机研制以来负推力修正的新技术。 -2 s 时的推力值包含了预冷变形、入口压力增压、介质充填量等所有产生负推力的因素, 是一种理想、客观且比较合理的方法。由于每次试验 -2 s 的推力值不同, 导致每次试验负推力修正值不一样, 液氧煤油发动机研制初期地面试验负推力就是这样修正的。

把 -2 s 推力值修正为零基本解决了低温发动机负推力修正问题, 比较理想客观, 但不准确。因为开车前入口压力高, 稳定段入口压力低, 压差产生的负推力对测量准确性有影响。无论是常温还是低温发动机, 除边界条件试验外, 额定工况下的发动机试验开车前氧化剂和燃料入口压力之和减去试车稳定段入口压力之和是一个相对固定值。通过静态情况下的低温压力现场校准获得了每兆帕压力产生多少推力 (kN/MPa) 值, 并统计多次试车前入口压力增压时推力变化情况, 两者综合分析确定比较准确的 kN/MPa 系数, 开车前入口压力之和与稳定段入口压力之和的差值乘该系数加上负号就是 -2 s 时实际推力值。如某型号试验和统计的结果是每 1 MPa 产生 $6\sim 8\text{ kN}$ 的负推力, 开车前和稳定段压力差平均值是 0.2 MP 左右, -2 s 的推力修正值确定值 -1.5 kN 。将 -2 s 推力值修正为该负数, 低温负推力修正更准确了。该修正方法的指导思想是开车前, 当入口压力正好为稳定段入口压力值时推力修正值应为零, 这种修正方法对于负推力不固定的低温发动机来说, 简单, 客观, 准确。

2.3 影响推力准确测量的其他因素

在推力参数测量中, 除正常的负推力修正外, 还有其他一些因素对推力测量结果有影响。

1) 大型发动机试验中, 有些型号发动机按额定工况启动, 中途入口压力过载, 按额定工况或低于额定工况关机。负推力修正时按额定工况进行修正, 没有考虑高、低工况变化对负推力的影响。

2) 大型发动机试验中, 有些推力系统采用多个 (四个或两个) 传感器并联方式进行测量。在该方式中要求做到: 一是多个并联传感器的灵敏度一致性应优于传感器的自身精度; 二是试车架分配到每只并联传感器上的力基本均匀; 三是传感器激励源现场校准时和热试车时保持稳定一

致;四是校准过程基准传感器和测量传感器的同心度及试验过程推力轴线和试车架中心线重合性要好。

3) 发动机试验现场校准用基准传感器一般是一年校准一次,最热的夏天和最冷的冬天使用 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的计量校准系数,对于温度稳定性较差的传感器校准斜率带来一定的误差。可采用高稳定性基准传感器,并进行高低温度校准试验。如果温度变化对斜率的影响不能忽略,则可考虑对基准传感器进行超过一定温度范围的斜率修正。

4) 小型发动机水平安装于真空舱内的高空模拟试验中,某些测量系统推力使用的零位是通大气时记录的零位。真空舱抽真空后,推力传感器、试车架及管路等装置因压力的变化,开车前多数情况出现负推力,数据处理时按开车前推力值为零的原则进行修正。

5) 小推力轨姿控发动机试验中,由于高压、脉冲点火等因素,发动机入口推进剂管路和控制气动阀的管路多数没有采用金属软管或波纹管,而直接使用不锈钢硬管和发动机硬连接。静态条件下现场校准时获得的斜率和零位,在试验动态状态下出现一定的偏差,推力越小,硬管连接影响的因素越大,又无法进行真实情况动态校准。此时较好的方法是根据试验流阻、压力要求和现场条件,泵前管路选择较细的管子,而且与推力方向一致的管路选择短一些,与推力方向垂直的管路选择长一些。这样,减小了硬管路对推力测量的影响。

6) 无论常温、低温、高空模拟等试验,发动机关机后短时间(如一秒)内,如果入口压力、介质充填等状态和点火前基本相同,此时的负推力值和点火前应基本一致。如有较大差异时,应主要考虑传感器受环境温度影响,零位发生漂移。

3 结束语

火箭发动机的推力大小是衡量发动机性能的

重要参数之一,测量值能否反映发动机的固有特性主要取决于测量的准确性。影响推力测量准确性的主要因素有:试车架结构形式、弹性约束件和波纹管的性能、基准力加载装置、传感器、采集装置、现场校准方式、数据处理及负推力修正方法等,虽然现场原位校正最大限度的消除了系统误差,但负推力修正在系统误差中占有一定比例。如某常规发动机负推力修正值约占额定值的 0.5% ,某低温发动机负推力修正值约占额定值的 $0.8\%\sim 1.2\%$ 。可见,低温介质发动机负推力修正值对测量准确性有显著影响。由于不同的发动机在不同的试验系统会产生不同的负推力,根据试验系统实际情况,深入全面研究推力测量系统,分析影响推力测量的各种因素,通过分析、研究及试验,探索不同情况、不同条件的发动机试验负推力修正方法。只要坚持负推力修正有根据、有理由、客观、合理的原则,负推力修正一定会取得良好的效果。

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] 朱子环. 管路流体对氢氧发动机推力测量的影响分析[J]. 低温工程, 2008 (2): 47-50.
- [3] 王克昌. 液体火箭发动机试验数据处理与数据协调策略[J]. 火箭推进, 2002, 28 (1): 3-4.
- [4] 张明信. 固体火箭发动机推力终止试验技术探讨[J]. 固体火箭技术, 2000, 23 (4): 2-3.
- [5] 件宗华. 小推力火箭发动机推力测试系统温度影响研究[J]. 传感器与微系统, 2009, 28 (1): 7-9.
- [6] 吴惠明. 发动机试车台推力测量系统中心加载现场校准技术研究[J]. 计测技术, 2009, 29 (1): 29-30.
- [7] 朱子环. 液体火箭发动机试验推力校准控制系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (11): 1575-1577.
- [8] 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): 55-58.
- [9] 朱子环. 液体火箭发动机试验推力测量传感器并联影响研究[J]. 火箭推进, 2010, 36 (2): 60-62.
- [10] 李永兵, 匡波, 张中伟, 等. 低温推进剂输送系统循环预冷非稳态数值模拟研究[J]. 低温工程, 2009 (1): 39-48.

(编辑: 马杰)