

# 应变测试技术应用于发动机质心偏移研究

王文龙, 赵政社, 混 平, 刘英元

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 为研究液体火箭发动机的质心偏移情况, 在发动机传力构件上合理分布测量点, 对发动机机架、推力室与机架连接压杆、推力室头部等多个区域的缓应变参数进行了测量, 通过对测量数据的处理与分析, 得出了发动机质心偏移情况的初步判断。

**关键词:** 发动机试车; 缓应变; 质心偏移

**中图分类号:** V433-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2011) 02-0076-05

## Application of strain testing technology in research on centroid shift of rocket engine

WANG Wen-long, ZHAO Zheng-she, HUN Ping, LIU Ying-yuan

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

**Abstract:** The method of slow strain testing for the liquid-propellant rocket engine is introduced in the paper. In order to research the centroid shift of the liquid-propellant rocket engine, the detecting points are reasonably collocated on the force transmission constructional elements to detect the slow strain parameters of the engine frame, pressure lever between thrust chamber and engine frame, and front-end of thrust chamber. The preliminary judgement for the centroid shift of the liquid-propellant rocket engine was achieved after the processing and analysis of the detected data.

**Keywords:** rocket engine test; slow strain; centroid shift

## 0 引言

应变电测技术是一项成熟的测量测试技术, 它是基于电阻应变片和电阻应变仪 (或采集系统) 的一种常规测量方法。由于它适应性强, 易于掌握, 能在复杂的工作条件下进行测量, 因此

成为一种广泛应用的测量手段。在发动机试验中, 各种参数的准确测量数据是试车工作的最终产品。试车数据反映发动机工作状态的常规数据 (推力、压力、流量等) 的同时, 为了满足发动机可靠性增长中的性能研究, 需要提供更加丰富的数据类型, 用于进行更多项目的发动机性能研究。某常规型号发动机抽检试车不仅是对发动机

收稿日期: 2010-02-22; 修回日期: 2010-07-09

作者简介: 王文龙 (1982—), 男, 硕士。研究领域为液体火箭发动机试验技术

可靠性、稳定性的批次性验证, 同时对发动机的某项特性研究也进行了探索。在某型号试车过程中, 为了对发动机质心偏移情况进行研究, 结合现场试验测试条件, 采用了缓应变参数测量和位移参数测量两种方式, 本文介绍了缓应变参数的测量与研究结果。

## 1 缓应变测量与应用

应变是对物体变形程度的反应, 研究构件在载荷、温度等条件下内外部应力和变形的分布情况, 尤其是危险部位的最大应力和变形。

目前常用的应变测量技术是电阻应变测试。它采用电阻应变片作为传感元件将构件表面应变转化为电阻变化。然后使用采集系统的配桥电路把电阻变化转换成电压变化, 经过采集系统 A/D 转换、滤波、放大后进行记录。最后, 通过数据处理将电压值换算为应变值。在做具体研究时可由所测应变换算出应力。

应变片测量应变的工作原理是基于金属丝的电阻随机械变形而变化的一种特性。取长度为  $L$ , 直径为  $D$ , 截面积为  $A$ , 电阻率为  $\rho$  的金属丝, 则其电阻  $R$  为

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

通过换算可得

$$\frac{dR}{R} = K\varepsilon \quad (2)$$

式中:  $R$  为应变片阻值,  $\Omega$ ;  $K$  为电阻丝的灵敏度系数;  $\varepsilon$  为应变值,  $\mu\varepsilon$ 。

由式 (2) 知, 电阻丝的电阻变化率与应变值是线性关系, 因此可以通过测量应变片的电阻变化来获得应变值。在实际测量中, 电阻变化被转换为电压量的变化, 计算公式如式 (3)

$$\varepsilon = B \times (V - V_0) \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon$  为应变值,  $\mu\varepsilon$ ;  $B$  为斜率,  $\mu\varepsilon/\text{mV}$ ;  $V$  为实测电压值,  $\text{mV}$ ;  $V_0$  为原始电压值,  $\text{mV}$ 。

应变值反映的是物体的变形情况, 如果需要研究物体应力分布的情况, 则需要将应变换算为应力。应变换算为应力的方法如下:

一个复杂的杆系结构在载荷作用下, 有些杆件可简化为二力构件, 这些构件就可按一维问题分析其应力应变, 也就是说, 先测量沿着杆件轴线方向的应变, 然后换算成应力和杆件的内力。

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4)$$

$$N_{\text{内}} = A\sigma = AE\varepsilon \quad (5)$$

式中:  $N_{\text{内}}$  为杆件的内力;  $\sigma$  为应力,  $\text{N}$ ;  $E$  为材料的弹性模量;  $A$  为杆件的横截面积,  $\text{m}^2$ 。

对于二维应变和其他特殊结构的应变应力计算, 需要按照广义虎克定律列出方程组计算。 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  分别代表两个方向上的应变,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分别代表两个方向上的应力,  $\tau_{\text{max}}$  代表两个方向上最大应力分布。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{E}{1-\mu} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) \\ \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) \\ \tau_{\text{max}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \end{array} \right. \quad (6)$$

目前, 应力应变电测技术已广泛应用于国防、化工、机械、以及土木建筑、交通部门的生产和科研工作。尤其在大型机械、复杂构件、桥梁、管道的应力应变研究中发挥着越来越重要的作用, 近年来, 随着测试测量技术的不断发展, 其应用范围又扩展到航空、航天等高科技技术研究中, 如, 在火箭发动机试验中就广泛采用了应变测量技术, 用于研究发动机构件在高温、高压、真空、强振动等恶劣环境下的应力分布和变形情况。

## 2 发动机试车中的缓应变参数测量

发动机试车是一项耗费大、危险高的系统工程, 在发动机试车过程中, 不仅要保证发动机顺利工作, 更加需要注意的是要获取发动机在工作状态中的各项信息, 这些信息就是测量数据。这些数据通过各种类型的传感器、转接环节、辅助环节、采集系统存入计算机。作为试车的最终结果进行保存, 并供进一步研究使用。

缓应变参数是在火箭发动机试车中一项具有特殊研究意义的参数,应变数据能够反映发动机传力构件在试车过程中产生的变形和应力变化情况。准确地研究发动机构件的应力分布就可以有效地对发动机进行“加强”或“减负”,提高发动机的可靠性。同时,由于应变片的粘贴不需要对发动机本身进行任何处理,不会影响发动机的试车状态。因此,应变测量在火箭发动机试验中比较容易实现,在发动机测点位置上粘贴电阻丝应变片后,只需要搭配相应的采集电缆、采集系统和数据处理软件即可。因此,拓展应变测量在发动机地面试验中的应用范围很有意义。

3 发动机质心偏移研究

3.1 质心偏移测量原理

在某发动机试车中,需对其工作中的质心偏移情况进行研究,所谓质心偏移是指发动机的质心在参考于其主推力方向(即发动机的轴向)产生了偏移,也就是说发动机推力偏离轴向。为了进行此项研究,结合试验区的试验条件,在该次试车中设置了缓应变测点,用于对发动机在试车过程中的质心偏移情况进行观测和研究。

本次应变测量的目的是分析发动机在试车过程中的质心偏移情况,使用应变的测量手段主要是看发动机在哪个方向上有偏大的力输出。首先,在测量过程中应变测点的位置都是在杆件上,可以使用二维杆件进行应力分析;其次,由应力应变计算公式(4)和(5)可以看出,当杆件的材料和横截面积一样的时候,应力和应变是成正比的。因此,力的变化就可以通过应变的变化来进行分析,在对结果的分析中,通过对应变情况的分析,可以确定力的方向。在后面的数据分析中,由于测量杆件的材料均相同,横截面积均一样,因此,对应变变化情况的分析与杆件内力分析的结果是一致的。

3.2 应变测点分布

发动机平面分布图见图1。

缓应变测点分布情况如下:机架是发动机与试车架连接的核心构件,机架在每个象限都有2

根拉杆,在4个象限上拉杆的方向和角度是对称的,通过在机架的4个象限拉杆的对称位置布置应变测点,相互参考,可以对质心偏移情况进行分析。因此,在机架上布置了较多测点。第一象限的2个拉杆各粘贴一个应变片,第三象限在其中1个拉杆粘贴应变片(本应与一象限对称布置2个,但由于现场条件限制,只能粘贴1个),第二象限和第四象限分别对称在2个拉杆上下粘贴应变片(在一个拉杆上下同时粘贴应变片,是为了对拉杆弯曲变形情况进行判断),所有应变片均粘贴在拉杆中心位置,共计11个测点。

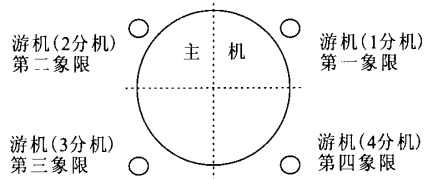


图1 发动机平面分布

Fig. 1 Plain view of rocket engine

推力室与机架连接压杆(发动机内部力传递杆件,4个杆件相互独立)在每个象限都有一根,它是发动机各个着力点与机架连接的传力构件,压杆的变形直接反映了发动机在各个着力点传力平衡情况。因此,在每根拉杆上下位置对称粘贴2个应变片,总共8个测点。发动机推力室头部位位于发动机中心向上位置的一根圆柱形传力构件直径较大,因此,在圆柱形对应于机架拉杆方向的每个象限各粘贴1个应变片,共4个测点。

总体测点布置涵盖了发动机各个传力构件,在试车中,发动机的质心偏移情况主要从发动各传力构件的力传递均衡情况反应,通过对称布置应变测点,分析数据,研究发动机质心偏移。

3.3 数据分析

通过对缓应变数据初步分析后发现,各个测点位置在试车过程中均有不同程度的应变值,且方向均是受压(方向朝上),与发动机试车(垂直工位)的推力方向一致,应变值存在较大差异,各测点在开车后应变值迅速增大,0.8 s后数据基本进入稳定段(缓慢增大),主机关机时应变值迅速减小,0.06 s后数据进入稳定段,直至

游机关机。关机后, 数据有小幅变化, 但变化不大。缓应变数据整体变化趋势与试车进程完全相符, 数据能够正确反映发动机工况变化。

### 3.3.1 机架上缓应变数据分析

发动机支架是发动机安装到试车架的连接装置, 承载着发动机与试车架的力传递。发动机支架在 4 个方向上各有 2 根拉杆, 拉杆的材料、长度、安装角度均一致, 通过式 (5) 可以看出, 当材料、横截面积一样时, 同样应变情况下杆件承受的内力也相同。因此, 发动机支架上的测点应变数据对比能够直接反应发动机的力传递情况。如图 2 所示,  $\varepsilon_{27}$  位于第一象限,  $\varepsilon_{17}$ 、 $\varepsilon_{18}$ 、 $\varepsilon_{19}$ 、 $\varepsilon_{20}$  位于第二象限,  $\varepsilon_{25}$ 、 $\varepsilon_{26}$  位于第三象限,  $\varepsilon_9$ 、 $\varepsilon_{11}$ 、 $\varepsilon_{13}$ 、 $\varepsilon_{15}$  位于第四象限。

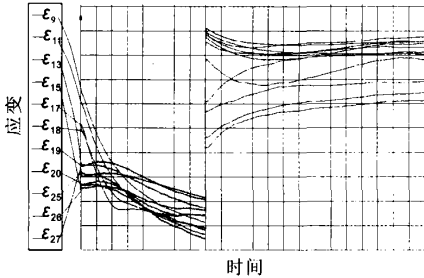


图 2 机架测点应变变化图

Fig. 2 Strain variation of measuring points on support mount

通过对支架上的 11 个测点数据进行初步对比, 11 个测点的应变数据整体变化情况一致, 均是开车后迅速增大, 然后在一个区内缓慢增大。主机关机后迅速降低。从整体变化情况来看, 发动机支架所受的力方向平衡, 发动机支架上各个测点的应变值在如果考虑到拉杆存在的个体差异, 应变量的不同在很大程度上是由于拉杆自身导致的, 未发现明显的质心偏移现象。

通过进一步分析数据曲线发现, 有些杆件的发生弯曲现象, 在二象限和四象限所测的 4 根拉杆采用的是每个杆中心的上下两侧对称粘贴应变片, 通过数据看出, 杆件的上部和下部所粘贴的应变片的变形程度是不同的, 尤其通过主机关机后的数据曲线可以明显的看出, 同一个杆件上的两个应变数据产生较大差别, 杆件发生了弯曲变形, 杆件弯曲变形程度的大小也可以反映力的

偏移情况, 从开机到主机关机段数据看出, 二象限 ( $\varepsilon_{17}$ 、 $\varepsilon_{18}$ 、 $\varepsilon_{19}$ 、 $\varepsilon_{20}$ ) 每根杆上、下两个测点变形程度有较大差别 (如图 2), 且均是下面应变量大, 上面应变小, 可以判断均产生了向上弯曲, 弯曲程度大于四象限 ( $\varepsilon_9$ 、 $\varepsilon_{11}$ 、 $\varepsilon_{13}$ 、 $\varepsilon_{15}$ )。也就是说, 试车时二象限在拉杆产生了较大的弯曲变形, 承受了较大的力。

另一方面, 通过曲线在开车段的变化情况进行分析, 二象限与四象限杆件下面测点均反映较迟缓, 在一段时间后数据才进入稳定段, 对比进入稳定段的速度, 二象限较快, 而四象限较慢, 进入稳定段后, 二象限的弯曲程度又大于四象限, 进一步证明, 二象限承力更快, 更大, 也就是说, 发动机产生了向二象限的质心偏移。

由于一、三象限没有杆件下方测点, 而上方测点的变化情况基本一致, 因此, 无法判别杆件的弯曲变形程度。

### 3.3.2 推力室与机架连接压杆上缓应变数据分析

连接压杆是发动机装配时自身结构中的传力构件。拉杆在 4 个象限各有一根, 材料、横截面积一样, 根据式 (5), 应变直接反映杆件受力情况, 但此处杆件长度、安装位置、角度均不同, 对质心偏移情况的判断有影响, 拉杆的应变数据反应发动机将力通过拉杆传递时每个方向拉杆所受力的情况。测点分布情况是,  $\varepsilon_4$ 、 $\varepsilon_8$  位于第一象限,  $\varepsilon_3$ 、 $\varepsilon_7$  位于第二象限,  $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_6$  位于第三象限、 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_5$  位于第四象限, 如图 3 所示。

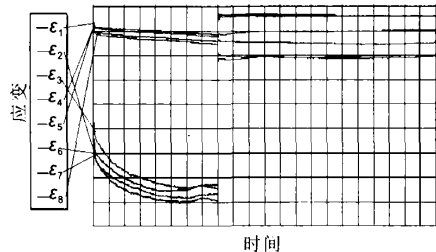


图 3 推力室与机架连接压杆处应变图

Fig. 3 Strain of connecting rod between thrust chamber and support mount

通过对 4 个拉杆上的应变数据进行对比发现, 在第二象限和第三象限的 4 个测点的应变数

据稳定段应变值很大,而第一象限和第四象限4个测点的应变数据稳定段应变值较小,两者差异较大,初步判断发动机产生了向二、三象限的质心偏移。但应变值的差异同样受到拉杆长度和安装位置的影响,质心偏移的程度需要通过对比拉杆长度、角度的不同进行详细分析,此工作需在后续研究中完善。

### 3.3.3 推力室头部缓应变数据分析

推力室头部是在推力室顶部的一个直径较大的圆柱形推力传递装置,推力室头部4个方向上的力传递情况可以反应发动机中心位置推力传递时的力平衡情况。推力室头部在4个方向上各有一个测点。如图4所示, $\varepsilon_{16}$ 为第一象限、 $\varepsilon_{12}$ 为第三象限、 $\varepsilon_{10}$ 为第四象限。

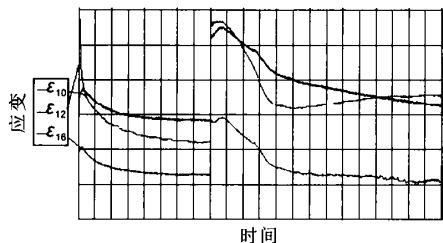


图4 推力室头部测点应变图

Fig. 4 Strain of measuring points on thrust chamber head

由于第二象限的应变片在开车后失效,只能看到其他三个方向上的应变变化情况。通过对推力室头部应变数据分析,应变值均较小,各个方向上的应变值差异较小,这是由于推力室头部杆件横截面积大,刚性高,在试车时,产生的变形量很小,因此,如果考虑到应变片粘贴位置的影响,无法准确的反映发动机的质心偏移情况。又因为二象限测点传感器失效,影响了结果判断,此项数据仅作为参考。

## 4 结论

应变数据的测量是间接反应发动机力传递情况的一种手段,除了发动机力传递引起应变变化外,测点位置的选择、材料的差异、测量过程中的干扰(如温度变化)均对应变测量值产生影响,因此,应变数据需要结合其他测量手段(如

位移、推力矢量)进行综合分析才能得到准确合理的结论。

通过以上分析可以看出,机架上的应变数据反映出,二象限产生了质心偏移,在推力室与机架连接压杆上反映出的力传递情况是朝二、三象限产生了质心偏移。同时,位移测量结果显示,发动机朝二象限产生质心偏移。结合位移和应变测量结果,得到的结论是:发动机在试车过程中产生了质心偏移,偏移方向是二象限,三象限的质心偏移情况有待进一步验证。

将应变测量方法应用于发动机质心偏移的研究中并得到了与位移测量方式基本一致的结果。今后的研究将着眼于更加精确地测量发动机结构数据和缓应变数据,计算出在试车中每个时段质心偏移量的具体数值。

### 参考文献:

- [1] 郑秀媛,谢大吉. 应力应变电测技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [2] 张彦兵,陈树礼,冯小利. 几种常用应变测试技术的比较分析[J]. 山西建筑, 2006, 32 (3): 77-78.
- [3] 唐家鹏,某卫星. 液体火箭发动机推力偏心测试技术研究[J]. 机械管理开发, 2008, 23 (1): 25-26.
- [4] 颜雄雄,耿卫国. 小发动机推力矢量的测量 [J]. 推进技术, 2000, 21 (3): 15-19.
- [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): 51-55.
- [6] 蒙上阳,李荣,沈先锋,等. 固体火箭发动机药柱主动段飞行时应力应变分析 [J]. 固体火箭技术, 2008, 31 (5): 466-470.
- [7] 王中道,赵中立,途志华,等. 应变片法测量低温材料线膨胀系数[J]. 低温工程, 1999 (1): 19-21.
- [8] 王海荣,黄琦兰. 基于 AVR ATmega169 的张力检测仪设计[J]. 现代电子技术, 2006, 29 (22): 9-11.
- [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): 59-62.
- [10] 混平. 缓变测量系统的干扰及抑制方法 [J]. 火箭推进, 2007, 33 (2): 59-62.

(编辑: 陈红霞)