

# 双曲梁传感器推力测量技术应用

刘丽宁, 李志勋

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 为提高小推力发动机的测量精度, 对原测量误差大、测量结果易受环境情况影响的应变梁推力测量装置进行了改进。改进后采用双曲梁推力测量系统。从安装、校准等方面介绍了系统的改进措施及实际应用情况。试验结果表明, 双曲梁推力测量系统测量精度高, 内阻输出低、抗电干扰性能好。

**关键词:** 推力测量; 力传感器; 数据分析

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2009) 06-0057-05

## Application of dual-curved-beam sensor in thrust measurement

Liu Lining, Li Zhixun

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

**Abstract:** For improvement of thrust level measurement accuracy of liquid rocket engine, measurement system modification was conducted. The previously used strain-beam system was replaced by dual-curved-beam measuring system. System modification measures and application results were introduced in this paper. Test results show that the dual-curved-beam measuring system has higher accuracy and better environment adaptability.

**Key words:** thrust measurement; force sensor; data analysis

## 0 引言

小推力发动机主要用于轨道控制、姿态控制、末速修正等。提高推力的测量精度可以更准

确地了解发动机工作特性, 对提高导弹和航天器的控制精度、提高推进剂的利用率及延长航天器寿命有着重要意义。但由于推力值较小, 测量容易受到各种外界因素的影响, 精确测量更是存在一定困难。这里结合试验过程和数据, 对小推力

收稿日期: 2009-05-13; 修回日期: 2009-08-17。

作者简介: 刘丽宁 (1965—), 女, 工程师, 研究领域为发动机试验测控技术。

测量的工艺技术进行了分析,提出了改进措施。

## 1 应变梁结构推力测量装置的缺点

在以往的小推力测量系统中,主要运用应变梁结构形式的传感器进行稳态小推力测量,这种结构形式的推力装置经过多年的试验使用,通过对大量试验数据的分析总结发现存在如下不足,主要有:

(1) 应变梁结构的推力测量装置测量精度较低,测量精度 $<10\%$ 。

(2) 推力测量装置的动架与定架之间的安装以及产品安装和推进剂主管的安装存在较大的安装应力,并且该应力试验前不能充分释放,在试验过程中由于应力的释放引起的测量误差较大。

(3) 在试验过程中,应变梁的状态明显因温度、振动、环境气体流场、管路、测量系统的活动电缆等因素综合作用而发生变化,造成传感器的零位漂移较大影响测量精度。

(4) 目前的标定采用 $0.02\%$ 精度标准砝码,用细不锈钢丝连接后通过一个滚动轴承将砝码产生的垂直力变为水平力,作用在与应变梁连接的标定框上,以砝码重力作为施加在应变梁上的标准力,而应变梁实际感受到的力值受轴承静摩擦力、标定框与应变梁的安装同轴度、不锈钢丝是否完全在推力轴线上等因素影响,因此实际感受的力值低于标准力,摩擦力将引起传感器斜率( $b$ 值)的变化,曾经做过的验证得出最大偏差可达 $1.5\%$ ,造成推力测量数值的不准确。

以往的推力测量方式已经影响了参数的精度,尤其是推力室高空模拟试验,推力测量已无法满足试验任务要求。

## 2 影响应变梁结构推力测量装置精度的原因

经分析认为,影响应变梁结构推力测量装置精度的原因主要有以下几点:

(1) 应变梁结构的推力测量装置动态频响低,推力过渡参数失真。

通常连续工作的发动机,推力的高频分量只占工作能量很小部分,反映推力前沿高频部分为 $f=0.45/\tau$  ( $\tau$ 为上升时间)。要求包括发动机/台架/测力传感器在内的系统固有频率为 $3\sim 10f$  (即 $135\sim 450\text{Hz}$ )。对推力测量装置在安装一台姿控发动机及推进剂管路的情况下,用瞬时剪断砝码悬丝施加载力脉冲的方法测量装置的动态特性,获得的装置频响为 $72\text{Hz}$ 。由于双组元发动机研制中,将过渡参数纳入了设计指标,而应变梁结构形式的测量传感器组成的系统固有频率低于 $100\text{Hz}$ ,台架系统固有频率较低,导致过渡参数测量失真。

(2) 应变梁结构推力测量装置容易受工艺系统的影响,引起推力偏心。

台架/发动机/传感器必需是高刚度系统,而应变梁结构形式的系统刚性较差,试验过程中推力系统的位移量较大,造成推力测量误差较大。

(3) 应变梁结构推力测量装置受温度影响较大。

由于应变梁与发动机安装为一体,在试验过程中,极易受到传导热和辐射热的影响。另外,安装预紧力不够、表面光洁度过低时,均产生非线性,造成动态波形失真。

因此需要对应变梁结构的小推力测量系统进行必要的改进。

## 3 测量系统的改进

经过对大量小推力发动机推力测试相关资料的研究,并结合多年发动机测试工作的经验,确定采用小量程应变式双曲梁测力传感器组成推力测量装置,进行发动机试验的推力测量。

### 3.1 应变式双曲梁测力传感器结构及技术指标

应变式双曲梁测力传感器采用LY12-CS铝合金,为弹性材料的双孔平行梁结构。

其工作部厚( $h$ )及固有频率( $f_n$ )分别为

$$h = \sqrt{\frac{3kFl_1 \times 10^3}{2Ebs}} \quad (1)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Ebh^3}{4l_1^3m}} \quad (2)$$

式中,  $k$  为应变灵敏系数;  $F$  为力;  $l_1$  为工作梁长度;  $E$  为材料弹性模量;  $b$  为梁宽;  $s$  为传感器输出灵敏度;  $m$  为运动部件质量。

该传感器的技术指标如下: 量程 50N (许可范围 10~100N); 过载 120%; 输出灵敏度 0.7mV/V; 综合精度 0.05%; 绝缘 1000MΩ; 固有频率 400~500 Hz; 工作温度 -10~55℃ (补偿范围), 温度系数 0.005%/℃。该传感器精度高, 输出灵敏度高, 抗干扰能力强, 测量性能比应变梁结构测量装置有了较大的提高。

3.2 双曲梁传感器推力测量系统及改造措施

针对应变梁测量系统存在的问题, 对工艺系统做了改进, 采用双曲梁传感器组建推力测量系统, 如图 1 所示。

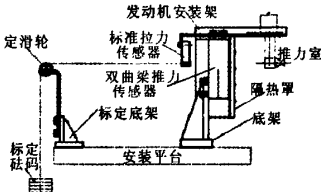


图 1 双曲梁传感器推力测量系统

Fig.1 Dual-curved-beam sensor thrust measurement system

采取的改进措施如下:

- (1) 双曲梁传感器体积较小, 将传感器安装到一个用隔热材料制成的盒中, 以降低环境温度对传感器的影响, 减小了传感器的零位漂移。
- (2) 在安装应力方面, 双曲梁传感器并不直接安装到定架框内, 安装方式相对简单, 影响因素较少, 降低了安装应力对测量传感器的影响。
- (3) 重新设计加工了刚度高的转接架、隔热罩, 加大施加的预紧力, 使推力测量系统脱离非线性区间, 提高系统的固有频率。
- (4) 对工艺系统的连接管路进行了规范处理, 各管路走向应从定架到动架再到发动机, 管路对称布置, 定、动架间的测力补偿管应垂直于推力轴线, 并可可靠固定。

4 推力装置静态校准方法的改进

推力测量系统的原理框图如图 2 所示。

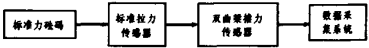


图 2 推力测量系统原理

Fig.2 Principle of the thrust measurement system

为了消除力传导挂线与滑轮之间的摩擦力对推力测量数据的误差, 对传统的标定方式进行了改进, 标定方法如下:

(1) 传感器的标定采用将拉力传感器作为标准, 也就是先将拉力传感器置于垂直状态, 用标准砝码作为力源对拉力传感器进行垂直标定, 按照最小二乘法计算出直线方程。

(2) 将拉力传感器与推力装置串联在一起, 即把标准力传感器水平安装在推力系统轴线上, 用标准砝码经滑轮把垂直力转变为水平力, 进行水平标定, 用垂直标定的拉力传感器斜率与水平标定的拉力传感器各标定档位输出电压的平均值  $V_x$  减去零位电压输出平均值  $V_0$  相乘, 求出拉力传感器水平状态的力值, 即各标定档位的真实值  $F$ 。

即  $F=(V_x-V_0)b \quad x=1,2,3,4,5$

式中,  $F$  为标准力档位值;  $b$  为拉力传感器垂直标定时的斜率;  $V_x$  为拉力传感器水平标定各档位输出电压平均值;  $V_0$  为拉力传感器水平标定零位电压平均值。

(3) 以此  $F$  作为标定档位, 用最小二乘法计算出推力传感器截距  $A$ 、斜率  $b$ 、相关系数  $R$ 、标准偏差  $S$ 。

5 小推力测量系统改进后的应用

5.1 推力系统试验前的静态标定

试验准备过程中对传感器进行标定, 并对推力传感器标定结果进行修正, 其过程如下:

(1) 对拉力传感器进行垂直标定, 标定按 6 档升回程三遍进行, 标定结果: 截距  $A=-0.3724$ ; 斜率  $b=17.6202$ ; 相关系数  $R=1.000$ ;  $S_2=0.000237$ 。

(2) 对拉力传感器与推力传感器串联进行水平标定, 标定按 6 档升回程三遍进行, 拉力传感器水平标定结果: 截距  $A=2.4821$ ; 斜率  $b=17.7713$ ; 相关系数  $R=0.99995$ ,  $S_2=0.003378$ 。

(3) 推力传感器水平标定结果：截距  $A=-0.3437$ ；斜率  $b=11.7000$ ；相关系数  $R=0.99992$ ； $S_2=0.004087$ 。

(4) 计算各标定档位的真实值，用此档位值计算推力传感器的斜率，其结果截距  $A=-0.1521$ ；斜率  $b=11.6005$ ；相关系数  $R=0.99996$ ； $S_2=0.00278$ 。

## 5.2 标定数据对比

推力传感器水平标定后，不考虑摩擦力的影响，用标准砝码档位计算的斜率（ $b$  值）为 11.7，用拉力水平标定后求出的真实加载档位计算的斜率（ $b$  值）为 11.6005，从计算结果可以看出两种状态下推力传感器的斜率（即  $b$  值）两者具有 0.86% 的误差。依据该  $b$  值（11.6005）计算推力，便可减少由滑轮摩擦力带来的 0.86% 的误差，提高了推力测量精度。

## 5.3 试验数据对比及测量工艺改进

推力装置改造完成后参加了试验（试验 A），其试验的推力及室压数据对比曲线见图 3（图中的推力  $F$ 、室压  $p_c$  均采用无量纲）。

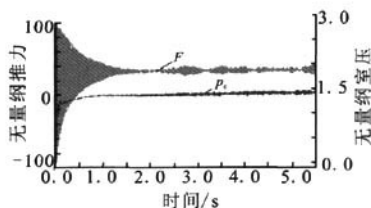


图3 试验室压、推力曲线（试验 A）

Fig.3 Chamber pressure and thrust curves (test A)

从推力及室压数据对比图可知，室压数据相对比较稳定而对应的推力数据则出现震荡。经分析，其原因主要是推力装置与发动机联接的转接架质量较大，系统固有频率较小动架的质量大、频率低、振幅大而引起振荡。

针对上述试验中出现的问题，又对转接架连接器重新加工，减轻了动架的质量，提高固有频率，固有频率约为 50Hz，并通过悬挂 15N 预紧力作为减小阻尼振荡的方法，测量工艺改进后进行了试验（试验 B），试验推力及室压数据对比见图 4（图中的推力  $F$ 、室压  $p_c$  均采用无量纲）。在该次试车中，在增加转接架固有频率的同时，数

据处理时进行带阻滤波。此方法主要是运用 Origin 软件的 FFT 功能对数据进行 45Hz 的滤波，在该次试验中有效地改善了推力振荡问题。

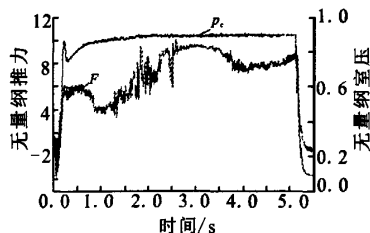


图4 试验室压、推力曲线（试验 B）

Fig.4 Chamber pressure and thrust curves (test B)

此次试验中，在发动机第一次点火（5 秒）时发现推力不稳，分析后认为，推进剂入口管路手动阀门和放液阀的安装带来了较大的状态不稳定的约束力，在第一次点火（5 秒）时此力的释放引起推力不稳。对此提出将推进剂入口管路的手动阀门安装位置改变，远离推力装置并进行有效固定，以减少外界约束力对推力测量的影响。

经改进后参加了地面试验和高空模拟试验，试验（试验 C）的推力数据及室压数据对比曲线见图 5（图中的推力  $F$ 、室压  $p_c$  均采用无量纲）。

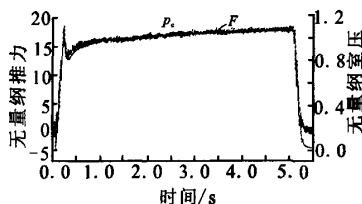


图5 改进后的试验室压、推力曲线（试验 C）

Fig.5 Chamber pressure and thrust curves with modified test device (test C)

图中可看出推力随室压变化一致，表明推力振荡、系统安装应力等问题已得到较好改善。

## 6 结论

(1) 采用双曲梁传感器的推力测量装置具有精度高、内阻输出低，抗电干扰性能好的优点。

(2) 推力测量装置经多次试验验证，有效地解决了受安装管路和环境温度的影响所引起的测

量误差增大问题, 表明系统的频响指标和稳态小推力测量的精确度得到了极大的提高, 满足了试验任务要求。

(3) 由于小推力测量的固有特点, 仍然存在影响测量精度的诸多因素, 进一步提高系统的刚性、提高固有频率等问题有待于进一步研究。

参考文献:

[1] 卞水恩, 张文声. 脉冲火箭发动机动态推力测量系统

[J]. 试验技术通讯. 1981, 1(1): 1-27.  
[2] 张迎新. 火箭发动机参数测量技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1987.  
[3] 刘伟亮, 吴建军. 机电一体化推力测量系统的研制及应用[J]. 火箭推进, 2004, 12(6): 50-54, 49.  
[4] 王洪业. 传感器工程 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1997.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 56 页)

式中,  $K_\epsilon$  表示应变片的灵敏度系数;  $\epsilon_t$  就是由于温度变化引起的附加应变。

在公式(9)中,  $\alpha$  的数量级一般为  $\mu\epsilon$ , 而  $S$  的数值通常为 2.0 左右, 由此可以看出由温度变化引起的附加应变与试件应变具有相同的量级, 不可忽视。由于温度变化而引起附加应变片电阻的变化或者造成了虚假应变, 给测量试件应变带来误差。因此, 需要对动应变测量采取温度补偿。由图 3 进一步可知, 动应变测量采用的是桥路, 故在工艺方法上应采取桥路补偿法, 即: 由于在动应变测量方法上, 应变片仅仅是作为平衡电桥的一个臂测量应变的, 利用电桥的和差特性, 电桥的输出反映相邻桥臂电阻值变化相减的结果。

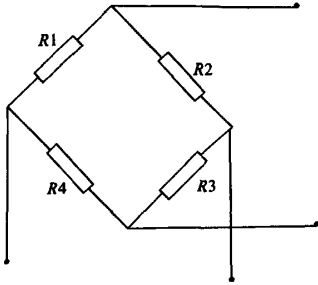


图 4 动应变系统的桥式电路

Fig.4 Schematic of dynamic strain system bridge circuit

如图 4 所示,  $R_1$  为工作片,  $R_2$  为补偿片工作片。 $R_1$  粘贴在发动机需要被测量的部位, 补偿片  $R_2$  自由固定在被测试部位或其附近, 使  $R_2$

不受力。当温度发生变化时, 工作片  $R_1$  和补偿片  $R_2$  的电阻都发生变化, 但温度变化是相同的, 即  $\Delta R_1 = \Delta R_2$ , 因  $R_1$ 、 $R_2$  接在相邻的桥臂上, 所以对电桥输出的影响互相抵消掉, 从而起到温度补偿作用。

5 结束语

研制的这套动应变测量系统, 在深入研究应变片粘贴工艺的基础上, 针对应变测量中的干扰源, 寻找抑制电磁干扰、静电干扰和电压干扰的措施, 有效解决了小信号测量中的干扰问题。同时, 针对现有系统温度变化对动应变测量的影响, 提出了动应变温度补偿的工艺方法。该方法应在以后的试验和工作中逐步实施, 以提高动应变测量系统准确度和可靠性。

参考文献:

[1] 张子中, 李贵军. 应力测试过程中抗干扰技术研究[J]. 石油机械, 2003, 增刊第 31 卷: 80-82.  
[2] 郑秀瑶, 谢大吉. 应力应变电测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.  
[3] 天津大学. 电阻应变仪测试技术[M]. 北京: 科学出版社, 1980.

(编辑: 王建喜)