

压电陶瓷在发动机推力测量中的应用研究^①

张学成

荆凤林 陶汉铭

(吉林工业大学机械工程学院, 长春, 130025) (航天工业总公司 31 所, 北京, 100074)

摘 要: 在发动机推力测量系统的原位校准中, 运用了压电陶瓷驱动装置准确快速控制力值的方法, 研制了原位校准自动化装置。该装置借助微机和自动控制技术, 通过控制作用于压电陶瓷驱动装置上的电场强度改变其输出位移, 达到精确控制力值的目的, 实现原位校准自动化。试验结果表明, 该装置可实现手动、半自动和全自动三种控制方式进行原位校准, 加值准确度高, 适用于所有喷气动力发动机的推力测量。

主题词: 火箭发动机, 推力测量, 自动校准, 压电陶瓷

分类号: V557.2, TB321

RESEARCH ON APPLICATION OF PIEZOELECTRIC CERAMIC TO THE ENGINE THRUST MEASUREMENT

Zhang Xuecheng

(Mechanical Engineering Inst., Jilin Univ. of Technology, Changchun, 130025)

Jing Fenglin Tao Hanming

(The 31st Research Inst., Beijing, 100074)

Abstract: The factors which affected the accuracy and the efficiency of engine thrust measurement in the calibration process were analyzed. The mechanical model of loading measurement in the calibration was established and the formulas for calculating the force of the loading system were deduced. The methods for automatizing the calibration with the piezoelectric ceramic driving device and the computer controlling technique were presented and expounded in detail. In this method, the force precise controlling was realized by controlling the electric field activated on the piezoelectric ceramic driving device. The principle and application of the automatic calibration facility are introduced with the test data listed. The method and facility also can apply to the thrust measurement of all aerojet engines.

Subject terms: Rocket engine, Thrust measurement, Automatic calibration, Piezoelectric ceramic

1 引 言

火箭发动机推力测量试验之前, 必须进行测量系统的原位校核。传统的手工操作原位校准, 存在着力值稳定困难、劳动强度大、工作效率低和数据可靠性差等缺点。由于原位校准的加力过程实质上是精确控制加载装置位移量的过程, 为此本文提出了运用可以输出精密微量位移的压电陶瓷驱动技术, 实现发动机推力测量系统的精密快速自动化原位校准的理论和

^① 收稿日期: 1998-04-07, 修回日期: 1998-05-07

方法,开发了试验装置并进行了试验研究。

2 原位校准的加载过程分析

发动机推力测量原位校准的加载过程,实际上是对串联安装的被校准的测力传感器和标准测力传感器施加弹性负荷,是一种叠置加荷方式,其加载装置可以简化为如图 1 所示的力学模型。图中假定每个器件均为线弹性元件,其中 K_1 为标准传感器弹性元件的刚度, K_2 为被检传感器弹性元件的刚度, K_3 为其它元件的综合刚度, ΔX_1 , ΔX_2 , ΔX_3 分别为上述三个元件在受作用力 P 后的相应变形量。

在施加装置产生位移 ΔX (即加载) 后,串联的弹性元件受力,根据虎克定律,有:

$$P = K_1 \cdot \Delta X_1 = K_2 \cdot \Delta X_2 = K_3 \cdot \Delta X_3 = K \cdot \Delta X \quad (1)$$

式中 K 为系统总刚度,且 $1/K = 1/K_1 + 1/K_2 + 1/K_3$; $\Delta X = \Delta X_1 + \Delta X_2 + \Delta X_3$ 。

可见力值 P 的精确程度在机械结构确定的情况下 (K 值一定),取决于 ΔX 的控制精度,并且施加的是弹性力。也就是原位校准的加载控制,实质上是控制施力装置的精密位移。理论和实验都表明^[1],对于作用有弹性负荷的施力装置,工作过程中在产生确定的位移 ΔX 后,力值 P 却是时间的函数,并且是无确定规律的。因此,如果加荷过程中要达到和保持某个确定的力值 P ,施力装置除了精确的位移 ΔX 以外,还必须能实时改变 ΔX 的大小,以补偿力值的变化。设力值控制目标为 P_0 ,力值偏差为 ΔP ,则有力值控制偏差的一般形式

$$\Delta P = P_0 - P \cdot \Delta X \quad (2)$$

为控制和调节力值,使 ΔP 趋于零,施力装置实现的位移分辨率应达到非常小的程度 (可达 $0.01 \mu\text{m}$ 以下),并且还应能快速响应,以保证工作效率。这是一般位移控制措施难以实现的。

3 压电陶瓷驱动技术及其在原位校准中的应用

压电陶瓷材料在外电场作用下产生形变,即存在“逆压电效应”,由多片压电陶瓷晶片叠置构成的“压电陶瓷驱动装置”的输出形变有如下关系^[2,3]:

$$\delta = d_{33} \cdot e \cdot h \cdot n - S_{33} \cdot (P/S) \cdot h \cdot n \quad (3)$$

式中 d_{33} 为材料在极化方向的压电应变常数, e 为外电场强度, h 为晶片厚度, n 为叠置的晶片数量, S_{33} 为极化方向的弹性柔顺系数, S 为晶片面积, P 为晶片受到的作用力

这种利用压电陶瓷驱动装置产生的微小位移,具有易于控制、响应快的特点。在足够的承载能力的前提下,只要精确控制了电场强度 e ,即可实现对微小位移的精细控制。据此制作的“压电陶瓷力发生装置”,串联安装于原位校准装置上 (见图 2),则当压电陶瓷产生位移时即施加了作用力。其作用原理同图 1 中由施力装置产生位移 ΔX ,从而施加载荷完全一样。但是压电陶瓷力发生装置本身的位移输出 δ 很小,故只宜用作力值精密调节控制。

运用压电陶瓷力发生装置实现发动机原位校准自动化的方法原理如图 2 所示,该系统包括加载装置、测量及控制系统。

原位校准工作时,控制仪首先通过电机驱动控制油缸作直线运动,使主轴缸产生位移

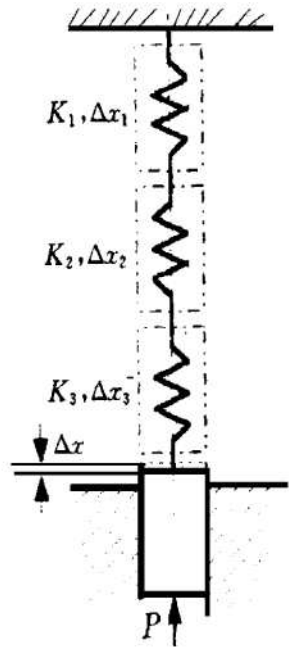


Fig. 1 The mechanical model of a build-up loading device

ΔX , 进行粗加载。当根据式 (1), (2) 的关系使力值 P 接近于目标值时, 控制油缸停止工作, 控制仪自动换至压电陶瓷力发生装置工作, 通过改变作用于其上的电场强度 e , 进行调节和跟踪并稳定目标力值, 实现精加载。从而完成原位校准的自动加载。

加载自动控制系统使原位校准时获得需要的稳定而准确的作用力, 此后即可校核测量系统的输出特性。全自动原位校准工作时, 首先由主控制微机向控制仪发出起始指令, 然后自控制加载装置对工件系统施加载荷, 并按照预先规定的程序施行加载、稳定及卸载的操作。每个力值测量点满足采样要求时, 控制仪即向主控微机发出采样允许指令, 同时通知其它装置工作。微机获取所需数据, 当其它装置工作完成时, 则开始下一测量点的工作。

4 试验研究

根据上述原理研制成功了规格为 200kN 和 600kN 的发动机推力测量原位校准装置, 并通过了技术鉴定。运用这些原位校准装置进行了大量试验, 测试结果表明, 它们能够实现以手动、半自动和全自动三种控制方式进行原位校准, 性能稳定可靠、重复性好、工作实现自动化。各项技术指标均达到并超过设计指标要求。

600kN 固体火箭发动机推力测量装置技术鉴定时全自动工作方式的试验数据结果如表 1。误差: 非线性 0.016%FS, 重复性 0.0078%FS, 滞后 0.065%FS, 总不确定度: 0.045%FS。校准中, 分辨率优于 0.00005, 稳定时间 5min 内实测结果最大变化值为 $1\mu\text{V}$, 稳定度优于 0.00005。

此外, 在保证了计量精度的基础上, 实现了原位校准过程自动化, 可以远离现场, 无人操作, 大大降低了劳动强度, 使操作人员脱离可能的不安全区域。每级载荷加载时间约为 30s, 力值稳定时间任意, 力值波动小于正负 0.003%FS, 工作效率大大提高。全部校准过程和方法均符合发动机推力测量系统校准的要求。自动化控制系统对测量系统及原位校准系统工作的计量性能无任何不利影响, 且可减少可能的人为误差。

当然, 由于原位校准装置采用液压驱动方式, 因而使系统较复杂, 而且维护困难, 容易造成环境污染, 今后可以考虑采用机械驱动方式。另外, 原位校准是静态校准, 忽略了动态

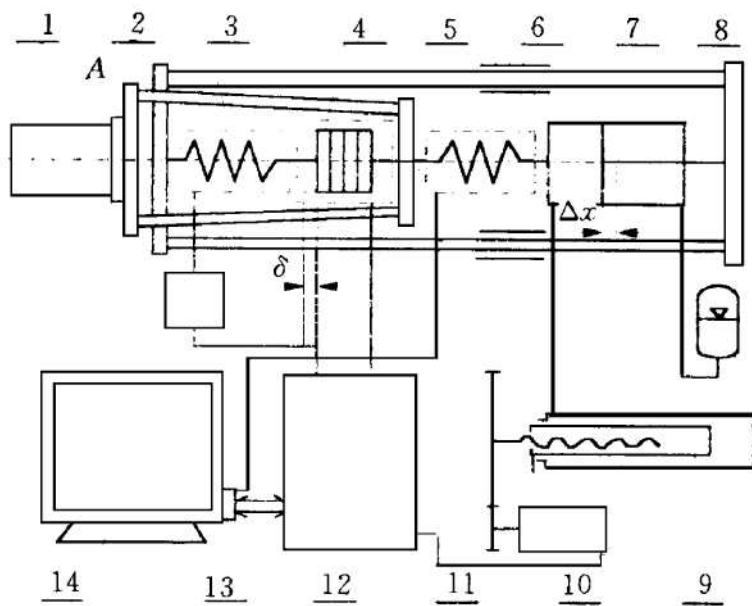


Fig. 2 Calibration system for engine thrust-measuring device

1. Engine 2. Thrust frame 3. Standard load cell
4. Piezoelectric ceramic actuator 5. Working load cell
6. Bed of the device 7. Actuating cylinder
8. Reverse frame 9. Storage unit
10. Controlling cylinder 11. Controlling motor
12. Controller 13. Standard instrument 14. Computer

性能对测量精度的影响, 这些问题需要进一步研究。

Table 1 A record of data while the 600kN calibration device were examined

Load/kN	Load up/ μ V				Load down/ μ V			
	1	2	3	Average	1	2	3	Average
0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	4214	4213	4214	4214	4235	4235	4235	4235
200	8435	8434	8435	8435	8447	8447	8446	8447
300	12656	12656	12655	12656	12664	12664	12664	12664
400	16878	16878	16878	16878	16883	16883	16883	16883
500	21103	21103	21103	21103				

5 结 论

(1) 本文提出和创立的运用压电陶瓷驱动技术实现发动机推力测量原位校准的方法和装置是有效的和实用的, 分析结论和试验研究结果是正确的。

(2) 试验研究表明, 运用压电陶瓷驱动技术的发动机原位自动校准装置和方法, 其力值准确度高, 性能稳定可靠。

(3) 由于不需要昂贵的自动控制装置即可实现自动化工作, 因而具有明显的效率高、成本低和操作简便可靠等优点。还由于火箭发动机的喷气动力与其它喷气动力发动机工作原理相似, 因此本文提出的装置适合于喷气动力发动机的推力测量校准使用。

参 考 文 献

- 1 张学成. 压电陶瓷在叠加式力标准机上的应用研究. 计量学报, 1993, 14(3): 218~223
- 2 全国电子科技情报网编. 压电陶瓷应用. 济南: 山东大学出版社, 1985.
- 3 张学成. 压电陶瓷力发生装置. 压电与声光, 1997, 19(3): 175~179