

# 机电一体化推力测量系统的研制及应用

刘伟亮, 吴建军

(国防科技大学宇航与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 依据某型号发动机地面试验推力测量要求, 从推力测量原理、测量不确定度分析、推力校准、数据采集、数据处理等多方面开展研究, 成功地研制设计了机电一体化的推力测量系统。该系统在试车台上进行了实际试车。试验结果表明, 该系统稳定、可靠, 满足 0.5% 推力测量精度要求。

**关键词:** 推力测量; 不确定度; 推力校准

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2004)06-0050-06

## An Electromechanical Integrative System for Thrust Measurement

Liu Weiliang, Wu Jianjun

(School of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** This paper is written for the thrust measurement of liquid-solid engine. According to the request, the system scheme was designed after many facts about measurement have been considered adequately. And the system has a good effect during testing.

**Key words:** thrust measurement; confidence level; thrust calibration

### 1 引言

在液体火箭发动机的试验中, 推力作为发动机性能指标的一个重要参数, 直接反映发动机的设计性能。某型号发动机的推力测量实施工作起步晚、周期短, 通过改进传统的推力测量方法, 运用新的传感器技术、控制技术 & 特殊仪器设备, 研制成具有机电一体化特征的推力测量系统, 并

成功地在实际试车中得到应用, 为某型号发动机研制进度提供了技术保障。

### 2 系统组成

系统主要由数据测量处理设备、机械控制装置、推力测量装置、其它辅助装置及控制程序组成。主要分布在测量控制间、供气系统间以及试车间。图 1 明确标示了各部分仪器、仪表和设备

收稿日期: 2004-07-25; 修回日期: 2004-09-02。

作者简介: 刘伟亮 (1976—), 男, 硕士研究生, 研究领域为液体火箭发动机动态推力、动态压力试验技术研究。

之间的相互关系和功能。

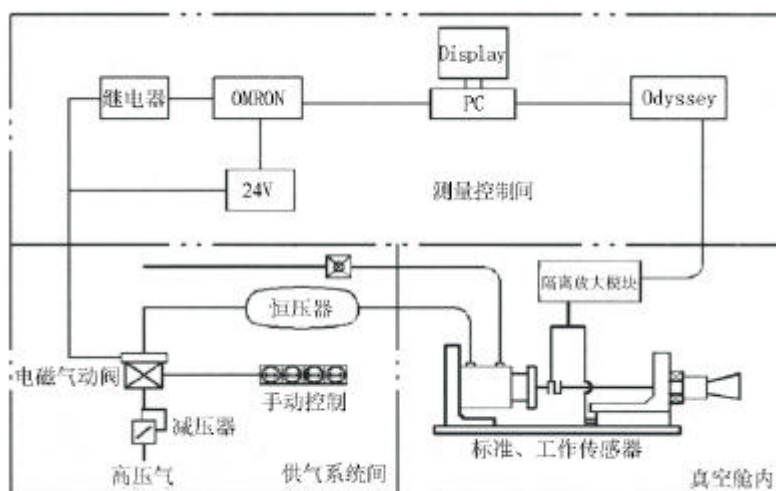


图 1 系统设备示意图

Fig.1 Sketch of system equipment

推力校准时,测量控制间的工控机对 OMRON (可编程控制器)发出校准程序,驱动位于供气系统间的压力调节盒,通过压力调节盒控制试车间校准机构的工作,并通过采集器及其数据处理程序计算出系统工作特性,并提供给实际试车时应用。

试车时,测量控制间的工控机对 OMRON 发出试车程序,驱动位于试车间的发动机工作,同时对 Odyssey (高速数据采集器)发出采集要求,

并启动试车数据处理程序从而完成推力测量的全过程。

系统的推力架部分构成如图 2 所示,将发动机通过转接架对接在试车台的动架上,试车台的动架与定架用经过特殊工艺制造和处理的弹簧片连接起来,再配以适当的传感器和外围设备,构成试车台推力架主体部分,整个推力架为一整体,可方便的进行安装和拆卸,即灵活、简便。

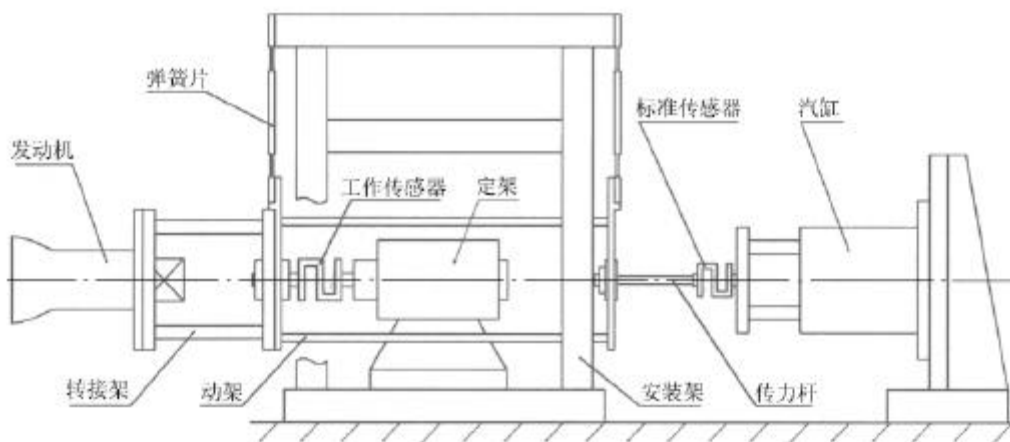


图 2 某型号发动机推力测量结构图

Fig.2 Structure drawing of thrust measurement

### 3 工作原理

该型号发动机的额定推力较大, 只要求轴向推力测量, 故推力测量系统的设计采用了传统的动、定架结构, 并结合新的控制技术、采集技术、自动数据处理技术和新型设备仪器, 使得该系统成为一个典型的机电一体化推力测量系统。

试车时, 发动机产生的推力使发动机和动架一起在推力轴线方向上产生位移, 作用在安装于动、定架之间的工作传感器上, 工作传感器产生的信号经隔离放大模块后进入高速采集器, 并通过预先的系统校准特性参数, 在高速数据采集器上实时显示发动机试车时产生的推力值。

### 4 推力校准

#### 4.1 在线校准

在线校准系统由发生器、供气系统、标准传感器、弹簧片、动架、定架、供气系统控制及数据采集处理等软硬件组成。

标准传感器具有高精度和稳定性等特点, 其校准数据见表 1。校准时通过供气控制程序使得气缸活塞前后运动, 从而模拟对标准传感器和工作传感器的加载和卸载过程, 取额定推力的 120%, 用数据采集器对标准传感器和工作传感器的信号同时采集, 最后通过数据处理程序、先前标定过的标准传感器特性数据和采集到的传感器信号进行计算, 系统精度为 0.14%。

表 1 标准传感器定点使用数据

Tab.1 The data of standard sensor

加载值 循环	0	10kg	20kg	30kg	40kg	50kg	60kg
1	4.126	12.60	21.10	29.61	38.12	46.63	55.15
	4.127	12.64	21.14	29.64	38.15	46.65	
2	4.127	12.62	21.11	29.63	38.14	46.65	55.17
	4.128	12.64	21.14	29.65	38.15	46.66	
3	4.128	12.62	21.12	29.63	38.14	46.65	55.17
	4.122	12.64	21.14	29.66	38.16	46.66	
传感器线性方程		$Y = 1.1756 \times (-4.84337)$				精度	0.14%

#### 4.2 在线校准方式的讨论

发动机试车时对工作传感器的作用方式是压, 而在线校准时对工作传感器的加载是通过拉来实现, 为了验证这两种方式对精度的影响, 通过下面的机构全模拟试车状态, 原理见图 3 所示。

通过对支架、丝杠、螺母、动架和定架等的有效连接。在并紧螺母时, 可做到模拟发动机对转接架的推力作用和校准时标准传感器的受拉状态以及试车过程中工作传感器的工作状态, 表 2

列出了全模拟试车状态时采集的数据和计算后所得的工作传感器系统特性参数 (在线校准的数据比较多, 在此不予列出), 可以看出, 全模拟试车状态时所得工作传感器特性值  $b$  相当稳定, 与在线校准时所得工作传感器特性值  $b$  误差在 0.23% 以下。全模拟状态支架等部件是验证的目的, 做的比较粗糙, 导致其  $b$  值比在线校准时要小, 但足以验证在线校准方式的合理性和有效性。

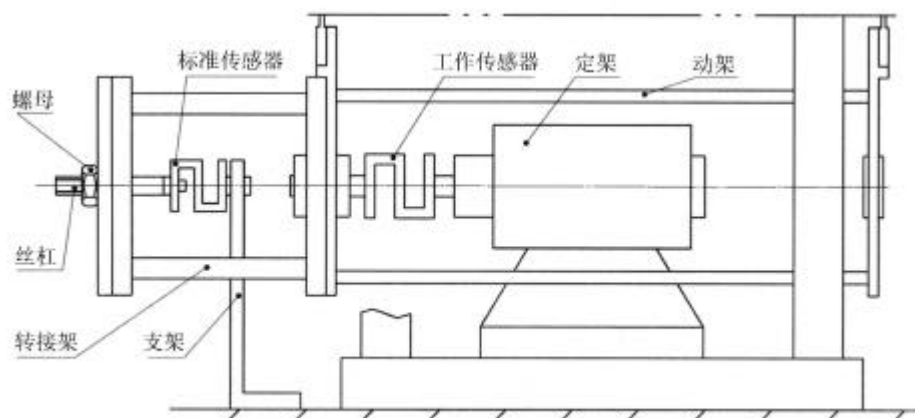


图3 全模拟试车状态结构图

Fig.3 Structure drawing in simulating test-state

表2 全模拟试车状态数据计算表(单位: mV)

Tab.2 The record data in simulating test-state

分 类		1	2	3	4	5	6	7
循环 1	标准	3.463	9.800	18.81	28.22	37.58	46.99	56.82
	工作	12.06	18.31	27.94	37.97	47.92	57.92	68.32
	标准	1.032	9.831	19.13	28.36	37.95	47.20	56.82
	工作	8.781	18.28	28.18	38.00	48.24	58.08	68.32
循环 2	标准	3.242	9.901	18.82	28.84	38.47	47.92	57.46
	工作	11.43	18.21	27.71	38.37	48.64	58.72	68.80
	标准	1.079	10.62	19.79	28.76	38.56	48.26	57.46
	工作	8.754	19.01	28.78	38.29	48.72	59.01	68.80
循环 3	标准	1.149	9.817	19.29	29.20	39.01	47.85	57.23
	工作	8.760	18.01	28.12	39.15	49.16	58.59	68.54
	标准	1.125	9.719	19.55	29.07	38.22	47.92	57.23
	工作	8.697	17.86	28.40	38.43	48.17	58.55	68.54
模拟校准		斜率 <i>b</i> (kg/mV)	1.1045、1.1034、1.1028				精 度	<i>U</i> <sub>2</sub> = 0.23%
在线校准			1.1062、1.1055、1.1065					

在安装好发动机、配置好推进剂管路以及安装传感器等附件以后,进行了实际试车前的在线

校验,从计算的结果来看,对系统的精度影响不大,系统精度仍然在0.14%。

## 5 不确定度分析

精确测量发动机的推力十分困难, 由于发动机产生推力到最后的数据处理有诸多因素影响, 所以考虑了可能的因素对推力测量的影响, 并进行了计算。本文参照航天工业部部标 QJ1789-89 对推力测量不确定度进行了分析和计算。

### 5.1 校准总误差

#### 5.1.1 标准偏差

标准传感器定点使用时标准偏差  $S_{11}$  由下式计算:

$$S_{11} = \frac{1}{2}(\hat{s}_j + \hat{s}_h) = 0.02\text{kg}$$

式中,  $\hat{s}_j$  为进程重复性标准偏差;  $\hat{s}_h$  为回程重复性标准偏差。标准传感器定点使用数据见表 1, 其校准推力测量系统的标准偏差

$$S_{21} = c_3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{n-2}} = 0.0339\text{kg}$$

校准总偏差

$$S_1 = \sqrt{S_{11}^2 + S_{21}^2} = 0.039\text{kg}$$

#### 5.1.2 系统误差

标准传感器定点标定时系统误差  $B_{11} = 0.0158\text{kg}$ , 其它误差源如标准传感器的安装误差

$$B_{21} = 3\hat{s}_{21} = 3C_2 \frac{W}{d_2} = 0.0114\text{kg}$$

标准传感器使用环境和校准环境相差在  $10^\circ\text{C}$  范围内, 所以由力源加载和使用环境引起的误差可忽略, 校准电系统的零漂误差为

$$B_{31} = C_2 \Delta y_{om} = 0.001\text{kg}$$

$$B_1 = \sqrt{B_{11}^2 + B_{21}^2 + B_{31}^2} = 0.0214\text{kg}$$

### 5.2 数据取得和数据处理总误差

标准偏差

$$S_2 = \sqrt{S_{12}^2 + S_{22}^2}$$

系统误差

$$B_2 = \sqrt{B_{12}^2 + B_{22}^2}$$

#### 5.2.1 试车前加载试验误差

标准偏差

$$S_{12} = C_3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y})^2}{n-1}} = 0.002\text{kg}$$

系统误差

$$B_{12} = |C_3 \bar{y} - X_b| = 0.005\text{kg}$$

#### 5.2.2 管路和发动机架引起的误差

对于试车时间相对较短、连接有推进剂供应管路的试车台, 每次试车时的状态都会有所不同, 导致其误差的不确定性; 发动机试车台推力架引起的误差主要是由把动架和定架连接起来的弹簧片产生, 包括其弹性模量、外形尺寸和安装等引起的误差, 制造工艺和技术条件决定其纵向刚度大, 所以只考虑横向刚度引起的标准偏差

$$S_{22} = k \cdot x = \frac{6EJ}{l(3L^2 - 6Ll + 4l^2)} \cdot x = 0.05\text{kg}$$

工作传感器蠕变误差

$$B_{22} = 0.05\text{kg}$$

因此

$$S_2 = \sqrt{S_{12}^2 + S_{22}^2} = 0.05\text{kg}$$

$$B_2 = \sqrt{B_{12}^2 + B_{22}^2} = 0.05\text{kg}$$

### 5.3 测量不确定度估计

总标准偏差

$$S = \sqrt{S_1^2 + S_2^2} = 0.063\text{kg}$$

总系统误差

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = 0.054\text{kg}$$

(下转第 49 页)

采用这种氩弧点焊的方法实施焊接后,球头尺寸能够很好地满足设计需要,将产品合格率由原来的 50% 左右提高至接近 100%,节约了大量财力和物力。现在这种方法已广泛应用于各类常温、高温和低温传感器的焊接生产。不仅大大提高了产品质量,同时取得了良好的经济效益。

## 4 压力传感器的焊接

压力传感器中有一个关键零件——膜片,它是整个传感器的核心部分,是用弹性材料加工而成的带有波形的弹性感压元件,根据实际工作时所要测量的压力不同波形尺寸也不同。传感器工作时就是靠膜片来感受压力的变化,从而传输出有效的压力数据。

焊接时要求将膜片与接管嘴及联接管嘴焊在一起,由于要承压,故两道焊缝的熔深要求接近 2mm。问题是若按常规方法进行氩弧焊接,焊接时的热量传导至膜片,膜片会因受热而产生变形,甚至使材料失去弹性,导致传感器测量数据不准确或者失效。

通过采取各种散热方法进行焊接后的结果比较,最终采取了直接水冷的工艺方法进行焊接。即:用螺纹联接件一端将待焊零件固定,另一端夹在三爪卡盘上,给膜片加一个专用水冷套,直

接注入冷水,然后进行焊接,保证焊接过程中膜片的最高温度不超过 100°C。一道环缝焊完后,冷却一段时间,并给水冷套内重新更换冷水,进行第二道环缝的焊接。

试验证明,采用这种工艺方法焊后的压力传感器工作状态良好,完全可以满足设计、生产的需要。

## 5 结论

断弧 TIG 焊比脉冲氩弧焊具有更强的调节焊件热量的能力,在不需要增加焊接设备投资的情况下,只要通过提高焊工操作技巧即可实现对细小零件的焊接,是一种切实可行的工艺方法。

旋压—焊接组合工艺对温度传感器敏感体的焊接是一种创新,它不仅简化了敏感体的设计结构形式,而且有利于传感器性能的提高,对提高生产效率及合格率也有非常明显的效果。

直接水冷焊接的方法用于一些热敏感元件也是一种行之有效的方法,它可以用普通的氩弧焊方法代替部分价格昂贵的高能焊(如:电子束焊、激光焊等)。

以上是近几年来在各类传感器焊接过程中摸索积累起来的一些经验,为军、民品任务的保质保量完成发挥了较为重要的作用。

(编辑:马杰)

\*\*\*\*\*

(上接第 54 页)

所以系统不确定度

$$U_1 = \pm \frac{B + 0.95S}{40} \times 100\% = \pm 0.29\%$$

## 6 结论

通过论证、推理、计算、设计、验证和参加实际试车,该系统的最大推力测量误差为

$$s = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} = \frac{\sqrt{0.29^2 + 0.23^2}}{100} = 0.37\%$$

即该系统满足 0.5% 推力测量精度要求,在实际试车时进行的推力校准数据表明:系统的测量精度满足 0.5% 的要求。

某型号发动机设计的机电一体化推力测量系统建成以后很快就服务于型号,在实际的试车中得到成功应用,系统稳定、可靠。

(编辑:马杰)