

压力传感器静态校准方法改进

王文龙, 耿直, 乔江辉, 徐峰
(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 对目前发动机试验采用的压力传感器校准方法存在的问题进行了分析, 针对这些问题, 提出了一种压力传感器自动静态现场校准方法, 该方法能减少对于压力标准源精度的依赖以及检定循环次数并提高校准工作效率。

关键词: 液体火箭发动机试验; 压力传感器; 静态校准; 现场校准

中图分类号: V434+.3-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 03-0080-05

Improvement of static calibration method for pressure sensors

WANG Wen-long, GENG Zhi, QIAO Jiang-hui, XU Feng
(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The problems existing in the available calibration methods of pressure sensors used in the rocket engine test are analyzed in this paper. In order to solve these problems, an automatic static calibration method of the linear pressure sensor is proposed. This method can improve the calibration efficiency of pressure sensors and make up for the weakness of the current calibration methods by reducing the dependence on the accuracy of the pressure standard source and cycle times of the calibration.

Keywords: liquid rocket engine test; pressure sensor; static calibration; calibration on spot

0 引言

液体火箭发动机热试车的目的是检验发动机工作的可靠性和发动机系统工作的协调性, 获得发动机的性能参数。发动机试车的最终产品是试车数据, 试车数据可以准确反映发动机的推力、

流量、压力和温度等工作性能参数。因此, 发动机试验测量数据的准确性在发动机热试车中非常重要。

为了提高测量数据的准确性, 发动机试验台测量系统对测量传感器尽量采用现场原位校准的方法, 即将试验系统的数据采集装置、转接环节、电缆及传感器现场连接好后进行系统校准

收稿日期: 2011-08-13; 修回日期: 2011-12-16

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

获得传感器的输出特性。由于现场校准的传感器特性曲线包含整体数据采集通道的系统特性, 因此可以有效降低测量数据的系统误差, 提高数据的准确性。

1 压力传感器的现场校准方法

压力数据是发动机试车中一项重要参数, 它是发动机试车中最为核心的数据之一。在液体火箭发动机故障监测技术中, 应用最多的就是压力数据。发动机各组件的工作状态几乎都可以通过压力数据来判断。通常, 一次试车的压力数据少则十几个, 多则几十个, 在试车中具有非常关键的作用。

目前液体火箭发动机试验中, 压力传感器已实现现场原位静态校准, 校准方法如下:

1) 将压力标准源放置到测量前端, 连接好采集系统到传感器的通道, 将传感器连接到压力标准源上, 见图 1。

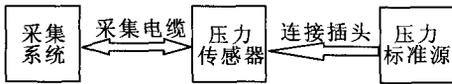


图 1 压力传感器校准连接图

Fig. 1 Block diagram of pressure sensor calibration

2) 用压力标准源加压, 采用多次进程加压的方法, 操作岗位加好标准源后, 通知采集系统记录, 采集岗位记录所测数据。

3) 根据所加压力和所测数值计算传感器对

应通道的整体系统输出特性。

4) 输出曲线计算采用的原理为最小二乘法, 其数学表达式如下:

$$Y = a + bx \tag{1}$$

式中: Y 为校准时施加的标准值; x 为测量系统输出值。

校准线的斜率用下式求出:

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \tag{2}$$

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

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

式中: $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$; $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$; n 为校准分档档数;

x_i 为校准时测量系统的记录值; y_i 为校准时每一档所加的标准值; γ 为两变量之间的相关系数。

2 现有校准方法存在的问题

应用现有校准系统进行几个有针对性的校准加压试验, 通过对试验数据以及试验方法的分析, 找出目前校准方法存在的问题。

2.1 校准试验

2.1.1 标准值加压试验

通过给系统加载一个固定的标准值, 在操作人员不同和操作时间不同的情况下进行数据统计与对比, 结果见表 1。

表 1 标准值加压试验数据

Tab. 1 Test data after pressurization in standard value

加压标准/ 1.2 MPa	操作人员 A		操作人员 B		对比
	电压/mV	压力/MPa	电压/mV	压力/MPa	
第 1 次	5 184.63	1.199 6	5 206.6	1.204 8	0.433
第 2 次	5 182.80	1.195 8	5 207.21	1.201 5	0.475
第 3 次	5 185.85	1.196 5	5 210.27	1.202 2	0.57

从以上对比试验可以看出：在不同操作人员和不同加载时间的情况下，校验精度的影响将很有可能达到 0.5%，而压力传感器校验精度要求为 0.3%，无法满足要求。

2.1.2 通道对比试验

通过使用同一传感器在不同采集通道上进行人工校验，进行校验数据的对比，结果见表 2 所示。

表 2 通道对比试验数据
Tab. 2 Data of channel contrast test

通道 1 第 1 次(a_1)	通道 1 第 2 次(a_2)	差值/%	通道 2(b_1)	差值/%
44.86	44.56	0.6	45.3	1
1 372.07	1 371.46	0.04	1 373.9	0.1
2 698.36	2 698.36	0	2 700.2	0.06
4 022.52	4 022.22	0.01	4 024.35	0.05
5 344.54	5 344.54	0	5 347.9	0.06
6 663.82	6 663.21	0.01	6 666.56	0.04

从以上对比试验可以看出：人工操作的随机误差比较难以控制，尤其是个别点可能出现较大偏差值，影响整个校验精度。

2.2 问题分析

2.2.1 人工操作使得准确性变差

在实际操作中分为前端岗位人员和后端岗位人员。前端岗位人员负责连接前端传感器、校准源和加压，待压力稳定后通知后端进行记录；后端岗位人员负责后端通道连接和启动校准程序，得到前端通知后记录采集数据。前端岗位一般为 2~3 人，后端一般为 1~2 人。前、后端都采用耳机通讯。在这样一个多人参与、前后端配合的校准过程中，出错率同时增加，校准准确性变差。

2.2.2 长时间重复性校准中的误差分析

在现用的校准方法中，传感器测试样本容量为 3 次，每次按 6 点计算，一个循环的检定大约需要 10 min，则整个校准约需半小时以上，在长时间重复性校准过程中将产生误差。

首先，传感器本身特性发生变化会给校准结果带来附加误差。从实测数据中也可以看出，每次同档位测试数据都比前次在同一点的测试值稍

大，这是通电后零位漂移引起的随机误差，随机误差随着时间的增加出现的可能性同时增加。

其次，标准源重复性误差。在校准中是假设标准源误差忽略不计的，但实际上，标准源在多次重复性校准过程中会给校准结果带来影响。

2.2.3 用测量点的重复性估值代替整个量程上的重复性

使用中压力传感器的校准点为 6 个，如果测量量程较大，则点与点之间的距离较大，非校准点上的真实情况未能反映。此外，在计算传感器重复性时，是按每个校准点的重复性估计的，非校准点上的重复性并未能涉及，所以由校准得到的重复性指标只是对传感器少数几个校准点上重复性的综合结果，故很难反映传感器在整个量程上真实的重复性指标。

2.2.4 每个校准点上的测试次数较少

每个校准点上测试随机误差服从正态分布，而正态分布均值和标准偏差用其估计值代替。由于估计值是真值的统计量，其估计精度总体数字特征精度随样本容量的增大而提高。因此，现用的 3 次 18 点的测试容量估计精度不高。

3 校准方法的改进

随着校准设备和电子技术的发展, 针对目前存在的问题, 传感器的静态校准方法可进行有效的改进, 从而提高校准方法的准确性和效率。

3.1 技术途径

通过对现用校准方法中存在问题的研究, 可以归纳出以下 3 条解决问题的途径:

- 1) 利用计算机程序控制代替手动记录的工作, 提高可靠性;
- 2) 利用计算机的快速采集特点增加样本容量及校准点数;
- 3) 利用计算机与压力源配合, 使压力缓慢上升, 进而完成快速的准静态校准, 减弱校准结果对压力源精度的依赖。

3.2 改进方案

根据以上所提出的问题和解决途径, 设计出如图 2 所示的校准系统, 系统的工作原理是: 在采集计算机中接入标准传感器和被标传感器, 标准传感器的精度需高于被标传感器一个数量级; 将两个传感器同时接入一个压力源, 这样就能够保证两个传感器所加的压力是相同的, 也就保证了计算机采集数据的准确性。整个校准过程的数据记录都是根据程序判断自动实现的, 消除了人工操作的误差。通过程序对标准传感器压力值与设定档数值的判断比较, 记录被标传感器的数据。因为计算机的计算速度和采集速度都在微秒级, 在这样小的时间段中, 压力值的变化非常有限, 可以达到准确记录。同时, 可以大大增加采集样本容量和校准点数, 将原来的 6 档可以改变为 18 档, 达到更高的传感器量程覆盖率。

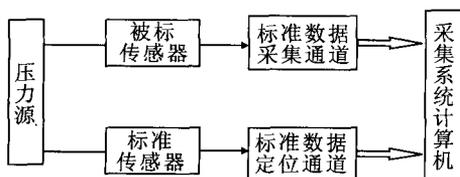


图 2 改进校准系统连接图

Fig. 2 Block diagram of improved calibration system

3.3 改进方案的工作方式

图 2 所示的校准系统的最大特点是不需要压力的精确定位, 并且可以在 2 个甚至 1 个循环的测试中完成压力传感器的校准, 如果加入控制接口, 就可以实现全自动校准。

当图 2 系统工作时, 先连接好系统线路, 开启系统, 系统预热 30 min, 接着给压力源匀速加压至传感器的最大校准压力, 进行正行程校准, 接着直接给压力源匀速通大气, 进行反行程校准, 直到压力源压力回零, 系统校准完毕。

由于压力随时间变化是连续且单调的, 必然由一个方向通过各校准点, 为了叙述方便, 设某被标传感器的量程为 0~50 MPa, 在该量程范围内进行 6 点校准, 若按平均分配校准点原则, 各校准点为: 0 MPa, 10 MPa, 20 MPa, 30 MPa, 40 MPa, 50 MPa。

在系统工作时, 设标准定位通道的 A/D 转换处于连续转换状态, 其转换速度尽可能快 (系统的实际速度为 100 次/s), 计算机连续采集标准定位通道数据, 并与机内存储的设定值比较, 如果二者相等, 则程序控制转入校准数据的采集。由此, 标准定位通道完成了确定设定值 (即校准点) 位置的工作。

在计算机确定了校准点位置继而转入校准数据采集通道之后, 计算机控制该通道进行数据采集, 顺序如下:

- 标准传感器数据;
- 被标传感器数据 1;
- 被标传感器数据 2;
- 被标传感器数据 m ;
- 标准传感器数据。

3.4 改进方案的优点

在实际工作中, 由于速度很快, 完成所有数据采集所需时间很短, 因此完全可以满足对每一点的准确采集。另外, 对被标传感器进行多次采集可以增加样本容量, 此外还可以减少校准循环次数, 即用每次循环增加样本容量来弥补由于减少循环次数带来的影响。使用该系统进行静态校准时, 其指标计算方法所依据的理论没有改变, 只是具体指标的计算方法做相应的变动。因此,

这样的校准方法可以得到正确且更加准确的校准结果。

3.5 方案可行性分析

结合某试验区测量系统现状,在该方案中,采集系统可以使用在用的 Picific 6000 系统,它的最高采样速率 200 kS/s,保证绝对的时间相关性。系统总速率可达 4 MS/s,完全可以满足高速采集的要求。压力源可以采用 DPI615 压力校准仪,该校准仪能够显示和传输标准传感器的压力数据,校准仪使用的标准传感器的精度为 0.05%。目前在用的压力传感器校准精度要求为 0.3%,满足精度要求。

综上所述,利用现有设备就可以建立改进的压力传感器校准系统。

4 结论

现用的压力传感器校准方法是一种人工加压、人工判断及人工记录的方法,整个系统起主导作用的是各个操作岗位的准确配合和正确操作,同时,这种校准方法也存在着整个校准过程长和样本容量低等问题。改进的校准方法基本达到自动校准,计算机自动完成采集,不需要人工判断和记录数据,由于人工操作的大大减少,校准过程也变得更快速且记录数据可有效增加,传感器校准时整个量程的覆盖率也得到了提高,校准结果更加准确。

参考文献:

- [1] 刘迎春,叶湘滨. 传感器原理设计与应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1998.
- [2] 胡寿涛. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [3] 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.

- [4] 付正. 2 MN 推力测量自动校准系统设计[J]. 火箭推进,2008,34(6)12:36-39.
- [5] 叶湘滨,张文娜. 压力传感器动态性能分析及改进[J]. 传感器技术,2002(2):11-14.
- [6] 唐纯谦. 力值计量标准现状及研究进展[J]. 中国测试,2009(5):11-16.
- [7] 腾勤,陈利明. 发动机进气歧管压力传感器的标定与建模研究[J]. 车用发动机,2006(2):40-45.
- [8] 王峰,董小瑞. 引信压力传感器动态标定实验装置的设计[J]. 中北大学学报(自然科学版),2007,1(28):83-86.
- [9] 中华人民共和国机械工业部. GB/T 15478-1995 压力传感器性能试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,1995.
- [10] 中国航天工业总公司. QJ28A-98 压力传感器静态性能不确定度计算方法[S]. 北京:中国航天工业总公司708所,1998.
- [11] 孙诚,王雪梅,张艳红. 连接计算机并口的数据采集系统[J]. 电子设计工程,2011,19(16):48-50.
- [12] 肖俊旺,夏静. 基于 LabVIEW 的火箭试验数据处理方法[J]. 电子设计工程,2011,19(4):38-40.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18806-2002 电阻应变式压力传感器总规范[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [14] 姬俊锋,吴进中,马利亚,等. 液体推进剂发动机试验多工况流量控制方法[J]. 火箭推进,2011,37(2):71-75.
- [15] 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):1-6.
- [16] 毛顿,郭庆平. LabVIEW 中用 DataSocket 技术实现网络化应用[J]. 现代电子技术,2002(3):70-71,85.
- [17] 张大有,温世仁,武东健,等. 一种新的动态压力校准装置[J]. 宇航计测技术,2011,31(6):15-20.
- [18] 黄俊钦. 测试系统动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1996.
- [19] 张颖立,唐小明,何文龙,等. 基于 DDS 的多通道信号源设计[J]. 现代电子技术,2011,34(24):177-180.
- [20] 郭霄峰 主编. 液体火箭发动机试验[M]. 北京:宇航出版社,1990.
- [21] 何炳林,张焕文,梁柱扬,等. 基于 ADS1252 的数据采集模块设计[J]. 现代电子技术,2011,34(13):139-141.

(编辑:陈红霞)