

水击压力传感器现场校准方法研究

混 平, 单 琳, 刘 军, 耿 直

(西安航天动力试验研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 介绍了发动机试验水击压力测量的重要性, 水击压力传感器进行现场校准方法研究的必要性。通过分析水击压力产生机理、水击压力传感器测量原理, 以及对国内外动态校准系统比较分析, 设计了水击压力传感器现场校准系统, 提出水击压力传感器现场校准装置设计指标、工作方式, 校准装置设计难点, 同时介绍了现场校准系统的关键技术。并重点论述了水击压力传感器现场校准方法, 对水击压力传感器现场试验数据和发动机试验数据进行了比对, 分析了水击压力现场校准装置的设计可行性。最后利用校准装置进行了水击压力传感器现场校准试验, 对现场校准数据进行计算分析, 得到水击压力传感器灵敏度系数、系统校准曲线和上升时间等。还针对试验中水击压力测量干扰信号提出了抗干扰措施。

关键词: 水击压力; 现场校准; 抗干扰

中图分类号: V416-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 03-0093-06

Research on field calibration method of water hammer pressure sensor

HUN Ping, SHAN Lin, LIU Jun, GENG Zhi

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

Abstract: The importance of the water hammer pressure measurement and the necessity of the field calibration method of the water hammer pressure sensor for rocket engine are introduced in this paper. Based on the analyses on generation principle of water hammer pressure, measurement principle of water hammer pressure sensor and dynamic calibration systems at home and abroad, a field calibration system of the water hammer pressure sensor was designed, and the design indexes, working mode and difficulty in design of the field calibration device for the water hammer pressure sensor were proposed. The field calibration method of the water hammer pressure sensor is discussed in this paper. The field test data of the water hammer pressure sensor and engine test data are compared. The design feasibility of the water hammer pressure field calibration device is analyzed. The field calibration test of the water hammer pressure sensor was carried out with the designed calibration device. The sensitivity coefficient, system calibration curve and the rise time of the water hammer pressure sensor

收稿日期: 2016-02-16; 修回日期: 2016-04-30

基金项目: 国防科工局计量课题(项目编号 JSJC2013203A001)

作者简介: 混平 (1977—), 女, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验测控技术

were got after calculation and analysis of the data from the field test. In addition, the anti- interference measures are also put forward in allusion to the interference signal in water hammer pressure measurement.

Keywords: water hammer pressure, field calibration, calibration data

0 引言

液体火箭发动机水击压力参数是指在液体火箭发动机试验点火和关机瞬间, 由于发动机入口阀门的快速开启和关闭导致推进剂的流速发生突然变化, 瞬间产生的水击压力。水击压力大小与发动机入口管路结构、阀门开关速度、打开或关闭前介质流速、压力等有关, 而水击压力大小是发动机结构、主阀、试验系统入口管路及试车架结构可靠性设计等的主要参考依据。

目前液体火箭发动机试验中水击压力测量采用传感器稳态压力静态现场校准方式, 而实际试验中主要是瞬态冲击方式。从以往液体发动机试验数据来看, 开机段和关机段的水击压力通常在短短的几毫秒内达到峰值, 变化非常迅速。水击压力传感器和测量系统的动态性能与静态性能存在较大差异, 直接使用静态校准系数进行动态数据处理, 处理结果不能真实反映水击压力动态特性, 影响了水击压力测量数据的准确性。为了使测量结果更加真实、有效, 有必要开展液体火箭发动机水击压力传感器现场校准方法研究。

1 水击压力现场校准

发动机试验中水击压力测量原理是水击压力传感器将感知到的管路压力转化为电量, 通过测量电缆传输和信号调理 (即对电信号的调理、A/D 转换、滤波及放大等), 最终将水击压力电信号传递到数据采集系统, 并由数据采集系统记录。目前测量用水击压力选用传感器频响 50 kHz, 固有频率大于 100 kHz, 灵敏度为 1~1.4 mV/V, 传感器前置膜片需具有较好的动态性能。目前在水击压力测量时水击压力传感采用静态校准方式, 即对水击压力传感器通过标准压力校验仪加载定值压力, 水击压力传感器输出信

号方式获得校准系数, 而水击压力传感器在实际应用中是测量瞬态冲击压力, 因此水击压力传感器的动态性能比静态性能更重要, 通过对水击压力传感器进行动态校准, 才能获得准确的水击压力测量结果。

对压力传感器的动态校准方式依据动态激励信号类型基本上分为: 阶跃压力、周期性压力 (主要为正弦压力) 及脉冲压力 (主要为半正弦压力) 三类。国外从上世纪 60 年代起开展了广泛的研究, 拥有了多种动态压力校准设备, 颁布了 ANSI B88.1-1972A Guide For the Dynamic Calibration of Pressure Transducers。我国从上世纪 70 年代开始了压力动态校准理论研究, 随后建立了实验室环境脉冲压力校准装置、激波管压力校准装置及落锤压力校准装置等等, 但大多是在实验室环境的压力传感器动态校准。由于水击压力测量现场环境和实验室环境差异较大, 因此进行水击压力传感器现场校准更有意义。

1.1 水击压力现场校准的基本概念

水击压力测量系统的性能指标包括静态性能指标和动态性能指标。静态性能指标反映了系统的静态特性, 主要有线性度、重复性及迟滞等; 动态性能指标通过时间域表示, 如时间常数 T , 响应时间 t_s , 上升时间 t_r 及工作频带来反映系统的动态特性。在对测试系统进行特性分析时, 不能只考虑静态性能指标, 因为即使是 2 个静态性能相当的测试系统同时测量同一点的压力变化时, 2 条快速记录的曲线形状差异较大。

1.2 水击压力现场校准系统原理及组成

水击压力传感器现场校准原理是比较, 也叫相对比较, 是将被校准的传感器与通过绝对法校准的标准传感器相比较得到被校传感器的灵敏度、上升时间及工作特性曲线等。该校准方法是将标准传感器和测试用传感器对称地安装在水击压力

现场校准系统管路同一截面上, 使两者在任何时刻都经受同一时刻的冲击激励。当受到冲击时, 信号由数据采集系统模块同时记录, 并对记录信号进行比较分析, 进而得到系统斜率。

水击压力现场校准系统主要由介质容器、快速阀门、标准传感器、被校准水击传感器、自动控制装置及数据采集装置等相应的配套设备组成。水击压力传感器现场校准系统原理组成框图见图 1。

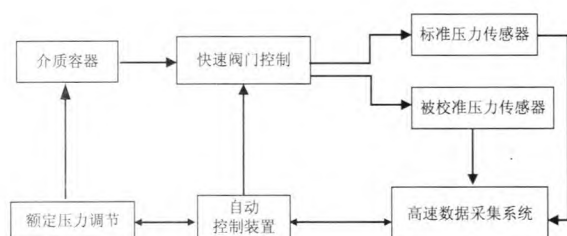


图 1 水击压力传感器现场校准组成框图

Fig. 1 Composition block diagram of field calibration system for water hammer pressure sensor

1.3 水击压力现场校准系统设计

水击压力现场校准系统设计: 根据现场环境及水击压力传感器校准原理, 设计通过快速阀门产生水击压力, 压力自动调节技术控制水击压力的大小, 节流孔板方式实现对介质流速进行控制, 稳定水击压力产生的初始边界条件; 通过调节快速阀门开启速度, 改变水击压力发生条件, 获得不同水击压力值。根据实际水击压力传感器测量工作范围, 设计的水击压力现场校准系统校准范围为 1~10 MPa, 校准频带范围为 0.2~3 kHz, 上升时间不大于 5 ms。水击压力传感器现场校准系统设计原理图见图 2。

系统工作时, 推进剂供应系统内加注推进剂, 通过压力调节装置设定推进剂初始压力, 控制系统控制快速阀门快速开闭产生水击; 通过安装在管道截面上的被测传感器和标准传感器分别测量水击压力值, 并由高速数据采集系统采集传感器信号; 通过被校准传感器和标准传感器所测数据比较, 得出幅值灵敏度、输出时间和幅值

等。水击压力传感器的安装接口、安装力矩与发动机试验工作状态保持一致, 尽可能减小传感器安装过程对校准结果的影响。动态校准的过程能够比较准确地反映水击压力传感器在实际工作环境下动态特性。

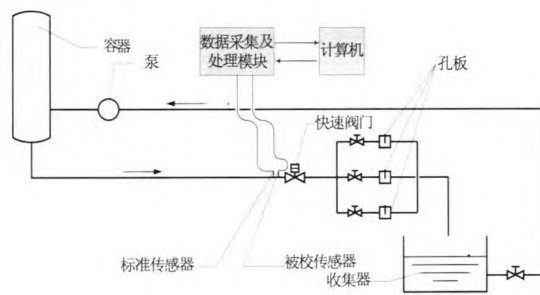


图 2 水击压力现场校准系统原理图

Fig. 2 Principle diagram for field calibration system of the water hammer pressure

水击压力传感器现场校准以标准压力传感器测量结果为基准, 对被校准水击压力传感器测量进行比对分析, 获得被校准压力传感器的灵敏度系数、响应时间及上升时间等。因此, 对标准压力传感器性能要求较高, 通过对市场上测压传感器的技术指标及应用效果比对后, 选用了 Endvoc 压力传感器作为标准测压传感器, 其主要技术指标为: 量程 2 000 Psi, 灵敏度 1.05 mV/Psi, 非线性 0.25% FSO, 共振频率 900 kHz, 冲击极限 1 000 g。

1.4 水机压力校准系统设计技术难点

水击压力传感器现场校准系统设计关键一是稳定可控的水击压力发生源产生, 解决办法是利用自动控制技术调节校准装置压力, 同时利用加装节流孔板方式, 对管路介质流速进行控制, 稳定水击压力产生的初始条件; 二是快速阀门装置设计, 阀门设置高压室和低压室 2 个介质腔, 在高压室和低压室之间用阀芯顶杆密封隔离。采用脆性材料断裂的方法来提高阀杆的开阀速度, 利用不同尺寸的脆性材料和改变简支梁模型来控制不同的断裂力值, 利用一个单活塞杆双行程的液压缸 (密封液压缸) 来提高阀杆的密封力并使脆性材料断裂, 控制阀门以不同的速度打开。

1.5 水击压力现场校准系统调试

水击压力现场校准系统搭建后进行了现场调试试验, 调试试验数据曲线图见图 4, 某次发动机试验水击压力测量的曲线图见图 5。

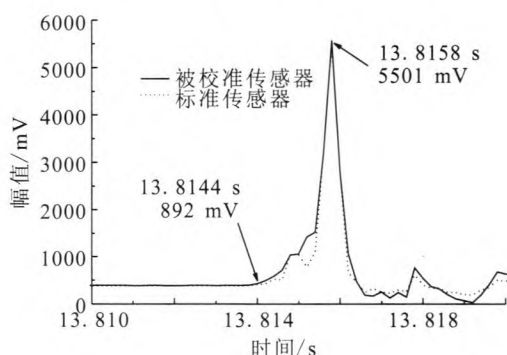


图 3 利用水击压力校准系统校准某次数据曲线

Fig. 3 Data from a certain test with water hammer pressure field calibration system

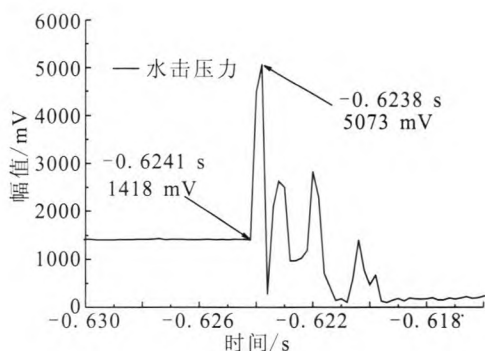


图 4 某次发动机试验水击压力曲线

Fig. 4 Water hammer pressure curve of one engine test

从图 3 和图 4 分析, 图 3 曲线上升时间为 1.6 ms, 图 4 曲线上升时间为 1.7 ms, 水击压力校准系统产生水击压力上升时间和发动机试验水击压力上升时间接近, 水击压力峰值在同量级范围内, 说明校准系统设计符合设计要求, 能够模拟发动机地面试验水击压力产生。

2 水击压力现场校准及校准数据分析

2.1 水击压力现场校准数据处理方法

水击压力传感器的动态灵敏度可以由以下公式计算:

$$K_i = \frac{A_i}{p_i}$$

式中: p_i 为对应标准压力传感器输出的压力幅值峰值; A_i 为对应于被校准压力传感器输出的信号的幅值峰值; $i=1,2,3,\dots,n$ 。

水击压力传感器的上升时间为传感器输出从稳定值的 10% 上升到水击压力信号峰值的时间, 上升时间是研究水击压力传感器的幅频特性的重要参数之一。

2.2 水击压力传感器现场校准试验

利用水击压力现场校准系统进行校准时将标准水击压力传感器和被校准水击压力传感器对称安装在校准装置管道上, 传感器的安装接口及安装力矩将和发动机地面试验保持一致, 安装力矩 40 N·m, 校准时由标准传感器和被校准水击压力传感器同时输出信号进行采集。为了准确的获取校准数据, 首先要保证校准装置及安装方式要与真实的使用环境一致, 校准装置产生的压力信号的幅值和频率, 应接近发动机试验的压力。

根据水击压力传感器在实际应用中的范围, 校准范围从 1 MPa 校准至 6 MPa, 共进行 10 个点的标定。由水击压力校准系统按照设定的水击压力值, 控制压力调节装置对贮箱初始压力进行调节, 控制校准装置的压力值范围在 2~5 MPa 之间, 通过标准传感器和被校准传感器同时测量水击信号, 并将校准数据进行对比和分析, 总结校准数据变化规律, 水击压力输入的压力信号与输出压力信号之间的传递关系。通过水击压力现场校准系统加载 5 MPa 压力, 重复进行 10 次现场校准, 用贝塞尔公式进行计算, 获得水击压力测量结果的在最佳频带范围的分散性。

2.3 水击压力传感器现场校准数据分析

利用水击压力现场系统分档加载产生水击压力信号, 现场校准数据见表 1, 对校准数据利用最小二乘法进行拟合, 获得校准直线方程 $P = 0.226007 + 0.00097 \cdot V_e$, V_e 为传感器输出电压值; P 为计算压力传感器物理量。

用水击压力现场校准系统进行 10 次同档位重复性校准, 获得的数据见表 2。利用贝塞尔法

计算获得校准数据的标准偏差为 1.119%, 上升时均在 5 ms 以内。

表 1 传感器试验数据
Tab. 1 Test data of sensor

遍 数	标准压力峰值/MPa	被校准压力传感器 输出电压峰值/mv
1	1.862 6	1 685.9
2	2.038 2	1 887.2
3	2.517 5	2 374.4
4	2.907	2 784.6
5	3.876	3 734.9
6	4.302	4 207.1
7	4.874 9	4 729.3
8	5.675 5	5 549.3
9	6.171 7	6 113.8
10	6.301 8	6 369.2

通过对水击压力传感器现场校准试验及现场校准数据比对分析, 得到传感器工作直线方程、上升时间; 对校准数据比对分析, 得到水击压力

传感器现场校准数据一致性较好。上升时间在 1.2 ms 左右, 符合水击压力测量要求, 水击压力现场校准数据能作为发动机试验水击压力测量提供准确依据。

2.4 试验中降噪措施

试验中发现每次采集的信号均有一定噪声, 分析原因是由地回路干扰引起。在传感器中, 如果同一根接地导线两端不在同一地点接地, 在负载不平衡或有其他因素影响时, 会使中线两端电位不等于 0, 就会在大地、导体和电源之间形成环路。这个地环路的电流会产生干扰现象, 传感器信号和干扰信号就会叠加在一起。在水击压力信号测量中解决干扰的措施主要有:

1) 利用测量电缆的选择与铺设方法抑制干扰信号传输线即测量电缆是测量系统的重要组成部分, 主要选用正规厂家生产的双胶屏蔽电缆。在铺设时应注意对易产生噪声的导线尽量远离低电平信号线, 避免把它们捆扎在一起或平行走线; 对测量电缆布线时应力求短、直并固定好电缆; 低电平信号传输线布线时避免通过产生噪声的设备; 在满足阻抗匹配的情况下尽量减少电路的输入阻抗。

表 2 传感器试验数据
Tab. 2 Test data of sensor

序号	标准压力传感器 峰值/MPa	标准压力传感器 上升时间/ms	被校准压力传感 器输出峰值/V	被校准压力传感 器上升时间/ms	灵敏度/MPa
1	4.780	1.2	4.794 3	1.2	1.003 0
2	4.737	1.1	4.753 5	1.1	1.003 5
3	4.775	1.3	4.769 3	1.3	0.998 8
4	4.782	1.2	4.787 1	1.2	1.001 1
5	4.780	1.3	4.744 3	1.3	0.992 5
6	4.815	1.2	4.809 3	1.2	0.998 8
7	4.823	1.1	4.831 1	1.1	1.001 7
8	4.758	1.1	4.763 3	1.1	1.001 1
9	4.802	1.3	4.839 4	1.3	1.007 8
10	4.713	1.2	4.716 2	1.2	1.000 7

2) 利用信号放大器对干扰的抑制

由于水击压力传感器的输出信号一般都比较微弱,并在传输过程中易受环境的电磁干扰,为此在缓变测量系统中,在信号调节器输入端增加滤波放大环节,对信号采用放大-滤波-放大的形式,通过这种方式达到消除部分干扰的目的。

3) 利用滤波器来抑制干扰

由于测量环境中的各种电子干扰以及测量系统本身的影响,通常测量信号中会有多种频率成分的噪声,噪声有时会淹没正常的输入信号,在这种情况下需要采取滤波措施,抑制不需要的噪声。滤波器的作用是选出有用的频率信号,抑制杂乱无用的频率信号,使一定频率范围内的信号通过,且衰减很小,而在此频率范围以外的信号衰减很大,从而提高系统的信噪比,达到抑制干扰的作用。

4) 利用水击压力测量系统在信号采集环节机壳接地一点接地方式有效抑制干扰。

3 结束语

利用研制的水击压力现场校准系统,对水击压力传感器进行了现场动态校准试验,并对现场校准数据进行了分析计算,得到了水击压力传感器的动态灵敏度系数。在此基础上分析了影响水击压力测量的干扰因素,给出了去除干扰的方法。为发动机水击压力的动态特性分析和提高液体火箭发动机试验水击压力参数准确测量奠定基础。

参考文献:

- [1] 崔海涛,刘庆明.冲击波压力传感器测试系统的动态标定[J].流体力学实验与测量,2004,3(18):7-10.
- [2] 王维赉.动态压力测量方法[M].北京:中国计量出版社,

1986.

- [3] 程启华.瞬态压力测量中压力管道频率特性分析[J].电子测量技术,2007,30(2):1-2.
- [4] JJG 624-89 压力传感器动态校准[S].北京:中国计量出版社,1990.
- [5] QJ20147-2012 液体火箭发动机试验动态压力测量方法[S].北京:中国航天标准化研究所出版,2013.
- [6] 杨吉祥. CGY-450 高压传感器校准装置研制与应用[J]. 计量与测试技术,2005 32(3):4-7.
- [7] 孔德仁,朱明武,李永新,等.压力传感器准静态“绝对校准”[J].传感器技术,2001,20(12):32-34.
- [8] 范静,杨军,李程.基于激光测试技术的脉冲式压力校准方法[J].南京理工大学学报,2000,24(3):261-264.
- [9] 陈卓如.工程流体力学[M].河北:高等教育出版社,1992.
- [10] 朱明武,梁人杰,柳光辽,等.动压测量[M].北京:国防工业出版社,1985.
- [11] 王树人.水击理论与水击计算[M].北京:清华大学出版社,1981.
- [12] 沈冰妹,卜玉,刘瑞敏.运载火箭动力系统试验承力环的静力试验[J].火箭推进,2014,40(6):85-91.
SHEN Bingmei, BU Yu, LIU Ruimin. Static test of support ring used in launch vehicle power system test [J]. Journal of rocket propulsion, 2014, 40(6): 85-91.
- [13] 左博,张蒙正.凝胶推进剂直圆管中剪切速率与表观粘性实验研究[J].火箭推进,2007,33(4):12-15.
Zuo Bo, Zhang Mengzheng. Experimental investigation of the apparent viscosity and the shear rate of gelled propellant in straight round pipe [J]. Journal of rocket propulsion, 2007, 33(4): 12-15.
- [14] 左博,张蒙正,张玫.凝胶推进剂模拟液直圆管压降计算及误差分析[J].火箭推进,2008,34(1):26-29.
Zuo Bo, Zhang Mengzheng, Zhang Mei. Calculation and error analysis of pressure drop of gelled propellant simulants in the pipe [J]. Journal of rocket propulsion, 2008, 34(1): 26-29.

(编辑:马杰)