

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.05.06

液体火箭发动机多维力测量装置原位校准技术研究

李志勋¹, 王宏亮¹, 赵印明², 陈柯行²

(1. 西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100; 2. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 受试验现场诸多因素的影响, 多维力传感器实验室校准系数已不适用于液体火箭发动机试验现场测试使用。针对液体火箭发动机多维力测量装置开展现场原位校准方法研究, 对真空环境干扰、管路约束力以及温漂等影响因素进行了分析。结果表明, 该方法能有效降低多维力测量装置的不确定度, 为多维力测量领域的现场校准提供了参考。

关键词: 液体火箭发动机; 多维力测量装置; 现场原位校准; 管路约束力; 真空环境

中图分类号: TB93

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)05-0026-05

Research on In-situ Calibration Techniques of Multi-dimensional Force Measuring Device for Liquid Rocket Engine

LI Zhixun¹, WANG Hongliang¹, ZHAO Yinming², CHEN Kexing²

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China;

2. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Due to many factors in the test site, the calibration coefficient of multi-dimensional force sensor in laboratory has not been applicable to the liquid rocket engine test site. The in-situ calibration method for the liquid rocket engine multi-dimensional force measurement device is studied in the paper. The influence factors of vacuum environment, pipeline binding force and temperature drift are also analyzed. The results show that the calibration method can effectively reduce the uncertainty of the multi-dimensional force measuring device, and provide a reference for the in-situ calibration in the field of multi-dimensional force measurement.

Key words: liquid rocket engine; multi-dimensional force measuring device; in-situ calibration; pipeline binding force; vacuum environment

0 引言

火箭发动机多维力测量技术一直以来是发动机测试领域所关注的重点^[1]。近年来, 六分力测试转台和六分力天平已成为火箭发动机试验领域广为采用的多维力测量方式, 发动机设计过程中也已逐步将真空多维力测量列为常态化试验需求。其中文献[2-3]采用了六分力测试转台的测试方案, 文献[4-5]采用了六分力天平的测试方案。受传感器安装状态、推进剂供应管路约束、现场环境温度变化等影响, 多维力传感器出厂时的实验室校准系数, 已不适用于液体火箭发动机试验现场测试使用。

目前, 关于如何测准和测全发动机多维力已成为试验过程高度关注的问题。为提高多维力测量精度, 针对发动机多维力测量装置开展试验现场原位校准技术研究, 建立了一套多维力测量与现场原位校准一体化装置, 重点解决真空环境远程控制、精确自动校准问题, 通过分析真空、温度、管路约束等对多维力测

量的影响, 提出相应的解决措施, 降低试验系统各个环节对多维力测量所造成的不利影响, 为发动机多维力测量提供了保障条件。

1 多维力测量与校准系统原理与组成

发动机多维力测量与校准一体化装置主要由推力测量系统、推力原位校准系统、数据采集与显示系统组成, 系统原理如图 1 所示。多维力传感器作为被校准对象, 标准力传感器用于溯源; 力源加载装置用于提供标准力源, 采用伺服电机与电动缸方式加载标准力源。

多维力测量系统由定架、推进剂供应管路、控制气管路、测量线缆、力源加载转换器、多维力传感器、采集系统、采集计算机及解耦软件构成。力源加载转换器设计为圆盘形式, 用于连接标准力源加载电动缸与多维力传感器将标准力源加载力传递到多维力传感器上。测量时, 力源加载转换器则用于连接发动机与

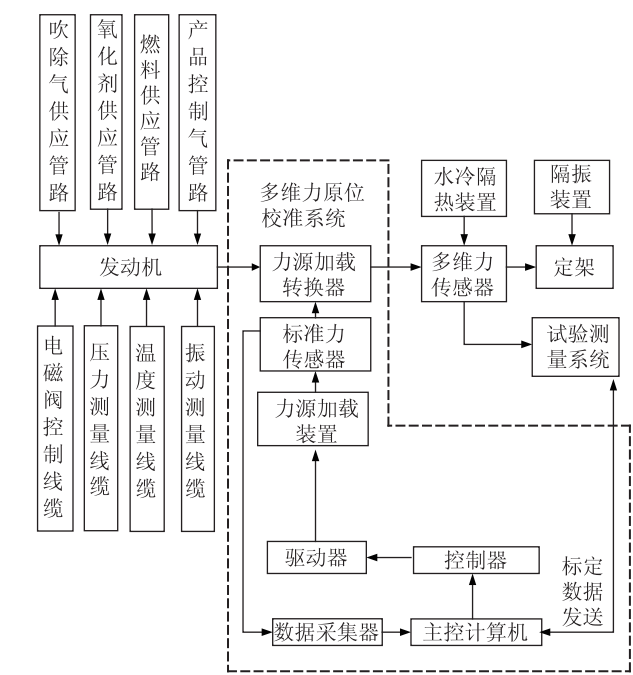


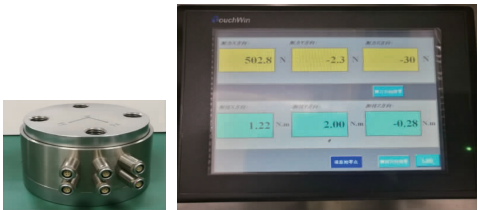
图1 校准系统示意图

多维力传感器，其实物如图2所示。校准软件用于实现校准过程的自动化控制以及校准后的数据处理，实现X向、Y向、Z向、X轴扭矩、Y轴扭矩、Z轴扭矩的校准，测量与现场校准装置。



图2 多维力测量与现场原位校准一体化系统

多维力原位校准装置用于实现发动机点火前推进剂供应管路、控制气管路、测量线缆约束下的校准；多维力传感器是四柱式高精度电阻应变式力传感器，为被校对象^[6]，如图3所示。



(a) 传感器样机 (b) 配套仪表样机屏幕

图3 传感器样机及配套仪表样机

2 多维力测量装置自动快速精确校准技术

2.1 自动快速精确校准技术

发动机点火试验在高空模拟试验舱内进行，而真空舱为卧式结构，如图4所示。进行推力测量时，发动机安装状态为水平安装。发动机进行高空模拟试验时舱门封闭，扩压器后端蒸汽引射系统工作维持真空，由于蒸汽引射系统的工作时间有限，发动机必须在有限的时间内完成高空模拟试验的性能测量与校准过程。试验时间紧、成本高是发动机高空模拟试验的一个显著特点^[7]，这要求多维力原位校准系统具备真空环境下标准力源的精确加载、力源加载的快速、远程以及自动控制的特点。

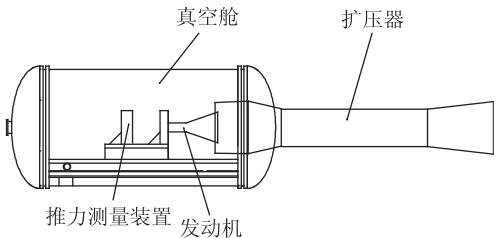


图4 发动机火箭试验系统

采用基于电动缸的力源加载方式，控制原理如图5所示。为实现标准力源的自动快速加载功能，主要采取精确加载、快速加载及远程自动控制技术。

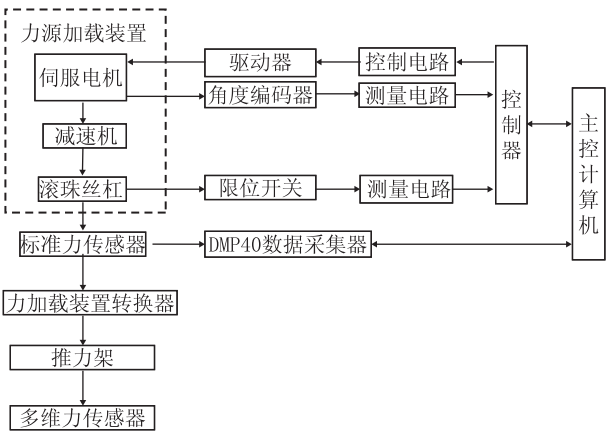


图5 自动快速校准力加载控制原理

1) 精确加载技术

标准力传感器误差优于0.005%，DMP40测量误差优于0.003%，可确保标准力源的测量误差优于0.01%。标准力源加载通过对伺服电机的细分控制^[8]来实现，当标准力传感器测量值与设定值的偏差小于0.3%时，停止电机转动并维持不少于5s的稳定时间。

2)快速加载技术

采用模糊控制器技术对力源加载过程进行快速调节。按照标准测量力值与设定值的偏差大小,将力源加载过程分为两段:大偏差段和小偏差段^[9],大偏差段大于等于80%,小偏差段小于等于20%。在大偏差段控制电动缸以较高的位移速度进行运动,实现短时间内小超调的条件下到达小偏差区。在小偏差段控制电动缸以低的位移速度进行运动,消除扰动及滞后的影响,实现对力源加载的高精度控制。

3)远程自动控制技术

真空环境下的推力现场校准必须解决远程自动加载力源的问题。主控计算机放置于远端测控中心,与DMP40数据采集器和控制器建立远程通讯连接,校准软件按照六档三遍^[10]的预定程序控制电动缸进行力源加载,如图6所示,加载档位不少于33档,每档驻点时间可调(最长10 s)。

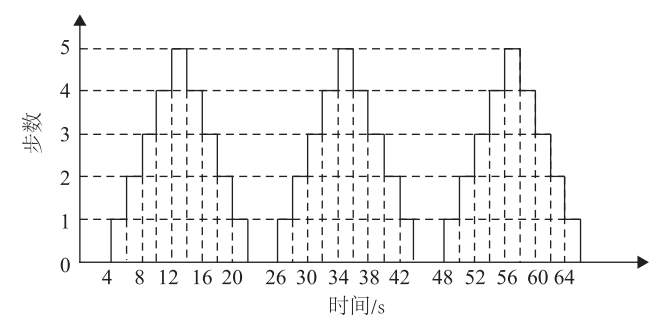


图6 典型控制程序图

2.2 自动加载性能测试

在100 Pa真空环境下,采用自动校准软件分别对 F_x (水平), F_y (垂直), F_z (主推), M_x , M_y , M_z 进行力源加载输出调试,其测试数据见表1。

表1 标准力源输出		
名称	标准力源加载档位(三遍六档)	最大偏差/%
F_x	0, 200, 400, 600, 800, 1000	0.0029
F_y	0, 200, 400, 600, 800, 1000	0.0014
F_z	0, 2000, 4000, 6000, 8000, 10000	0.0016
M_x	0, 40, 80, 120, 160, 200	0.0042
M_y	0, 40, 80, 120, 160, 200	0.0037
M_z	0, 20, 40, 60, 80, 100	0.0018

由表1知, F_x , F_y , F_z 标准力值的输出误差均优

于0.03%, M_x , M_y , M_z 扭矩的输出误差均优于0.05%。每一个方向按照三遍六档的加载时间由手动加载的40 min缩短为自动加载的12 min,实现了快速校准功能。

3 多维力测量不确定度影响因素分析及解决措施

3.1 温度影响分析

受发动机点火过程中热辐射及热传导的影响,多维力传感器各个测力组件的弹性模量特性发生改变,导致推力测量的零位及灵敏度出现偏差。为分析发动机多维力测量过程中的温漂影响,将整套多维力测量系统放置于高低温试验箱内,如图7所示,对其进行不同温度环境下的推力原位校准。

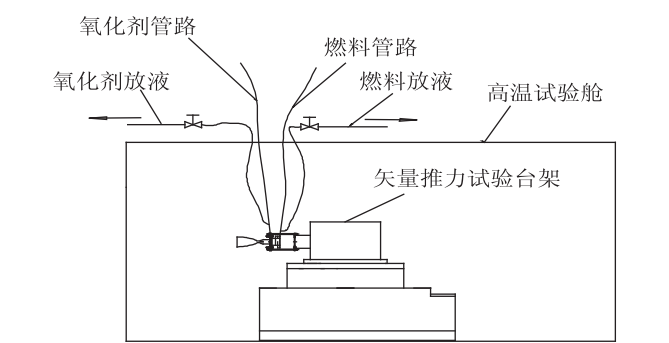


图7 高温环境下的推力校准

采用高低温试验箱分别建立0, 20, 40, 60, 80℃等温度环境条件,开展多维力测量装置的校准工作,以获取不同温度条件下的多维力校准数据(表2)。由表2知,随着环境温度变化对传感器的系数有一定影响,最大影响量达到了0.5%。需要对多维力测量装置采取必要的防隔热措施,降低多维力传感器和标准力传感器受温度变化的影响。采用带水冷隔热装置后,再次对装置进行温度环境变化校准测试,结果显示采取隔热防护后(图8),测量装置受温度的影响降低。

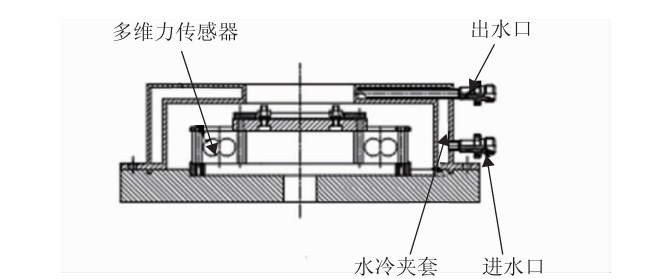


图8 传感器水冷隔热罩

表2 不同温度下的校准测试

名称	不同温度下的校准系数		校准系数 偏差/%	隔热后校准 系数偏差/%
	22℃	80℃		
F_x 系数	30.461	30.336	0.41	0.21
F_y 系数	44.935	44.764	0.38	0.17
F_z 系数	174.659	173.943	0.41	0.31
M_x 系数	16.136	16.073	0.39	0.12
M_y 系数	7.351	7.318	0.45	0.24
M_z 系数	2.649	2.636	0.5	0.15

3.2 管路安装影响分析

推进剂供应管路是影响发动机推力测量不确定度的重要因素之一。受管路增压、高温及振动环境的影响，管路约束力呈非线性变化^[11]，在 100 Pa，22℃ 环境下，分别对连接在测量装置上的氧化剂管路增压 3 MPa、燃料管路增压 3 MPa，并对多维力测量装置进行原位校准，获取相应的系数(表 3)。采用硬管连接测量装置，因管路安装状态的影响，装置各向系数在管路增压后变化较大，尤其是在扭矩方向，需要对管路采取柔性设计以降低其安装误差造成的测量不确定度。

目前推进剂供应管路通常采用缠绕式结构来增加管路柔性、降低管路刚度，减小管路约束力。为满足管路“柔性+刚性”的设计要求，将推进剂供应管路设计成“Z”字型，如图 9 所示，在整体结构上保证入口管路垂直于主推力方向，并使氧化剂和燃料管道对称于主推力轴线。对于发动机入口附近的管路，设计为“U”型结构(近似为弹簧结构原理)^[12]，可将发动机点火所产生的微小位移消耗掉，减少入口管路带来的约束力。

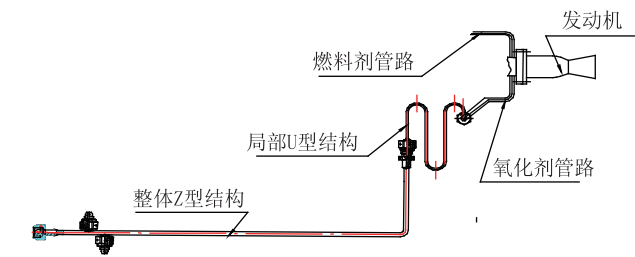


图9 推进剂供应管路设计

采取柔性设计后，管路在增压后对 F_x ， F_y ， F_z 的系数影响明显小，对 M_x ， M_y ， M_z 力矩的系数影响有一定程度的降低。

表3 管路增压前后校准系数

名称	校准系数		校准系数 偏差/%	柔性设计校准 系数偏差/%
	管路不增压	管路增压		
F_x 系数	30.461	31.009	2.50	0.80%
F_y 系数	44.935	45.7047	2.71	0.713
F_z 系数	174.659	175.262	0.92	0.345
M_x 系数	16.136	16.372	2.46	0.55
M_y 系数	7.351	7.686	4.55	1.557
M_z 系数	2.649	2.980	12.51	4.505

3.3 真空环境影响分析

22℃ 条件下，分别在常压、50 kPa，1 kPa，100 Pa 环境下对多维力测量传感器进行原位校准，由表 4 知，真空环境对校准系数影响较小。

表4 不同真空环境下的校准系数

名称	不同环境条件下的校准系数				最大 偏差/%
	常压	50 kPa	1 kPa	100 Pa	
F_x 系数	30.461	30.461	30.462	30.462	0.003
F_y 系数	44.935	44.935	44.936	44.936	0.002
F_z 系数	174.659	174.659	174.662	174.662	0.002
M_x 系数	16.136	16.136	16.139	16.139	0.02
M_y 系数	7.351	7.351	7.355	7.355	0.02
M_z 系数	2.649	2.652	2.654	2.654	0.18

4 结论

随着多维力测试技术在液体火箭发动机试验领域的逐步应用，真空环境下的原位校准工作显得尤为重要，已成为提高多维力测量精度的重要措施之一。针对某型号试验所用的多维力测量装置，本文开展了现场原位校准技术研究，分析了多维力测量装置不确定度的影响因素。试验测试结果表明：

- 1)快速自动校准系统加载精度高，分力力值加载误差均优于 0.03%，扭矩的输出误差均优于 0.05%。每一个方向按照三遍六档的加载时间由手动加载的 40 min 缩短为自动加载的 12 min，实现了快速校准功能。
- 2)真空气压环境对推力校准系数影响较小，可忽略不计。而环境温度对推力校准系数影响明显，最大

影响量达到了 0.5%，有必要对矢量力测量传感器采用隔热防护措施。

3) 试验管路增压对 M_x , M_y , M_z 力矩的校准系数影响明显, 最大影响量达到了 4.5%，管路增压下的原位校准是有必要的。

参 考 文 献

- [1] 庄杰, 李建勋. 490N 喷管发动机轴向推力测试系统精度分析[J]. 微型电脑应用, 2010, 1(26): 51–54.
- [2] 高长银, 孙宝元. 火箭发动机推力矢量测量平台的原理与结构[J]. 压电与声光, 2010, 32(3): 480–483.
- [3] 段武斌. 大吨位六分力测量系统原位标定及数据处理方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009: 1–4.
- [4] 王洪博, 李程, 曾吾, 等. 矢量推力模拟加载及测试校准技术研究[J]. 计测技术, 2015, 35(51): 83–85.
- [5] 史乃青. 小力值推力矢量测试研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 1–5.
- [6] 赵印明, 陈柯行, 梁继新, 等. 一种四柱式高精度电阻应变式力传感器[J]. 计测技术, 2017, 37(S1): 129–133.
- [7] 侯敏杰. 高空模拟试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
- [8] 古玉雪, 张小妍, 李华忠, 等. 基于 FPGA 的步进电机细分控制研究[J]. 航空发动机, 2016, 42(6): 18–22.

- [9] 朱子环, 贾洁, 耿卫国, 等. 液体火箭发动机试验推力自动校准加载系统的研制[J]. 宇航计测技术, 2014, 34(2): 30–33.
- [10] 纵瑞奇. 喷管模型试验器六分力天平的校准及调试[J]. 自然科学: 文摘版, 2016(3): 00237–00238.
- [11] 林君哲, 周恩涛, 杜林森, 等. 航空发动机管路系统振动机制及故障诊断研究综述[J]. 机床与液压, 2013, 41(1): 163–164.
- [12] 郝青华, 赵文军, 洪振军, 等. 某 U 型弹簧钢零件的形变工艺技术分析[J]. 新技术新工艺, 2017(5): 79–81.

收稿日期: 2018–06–19; 修回日期: 2018–06–28

基金项目: 国防技术基础科研项目(JSJL2015203B029)

作 者 简 介



李志勋(1979–), 男, 高级工程师, 硕士, 自 2005 年至今, 一直从事液体火箭发动机试验技术研究工作, 主持承担了十余项国防军工领域的重大项目及课题研究, 解决了发动机复杂试验环境下实时控制、精确测量、数据传输、数据存储等关键技术问题, 提出了多种测试新方法, 发表了十余篇科技论文, 获得了多项发明专利, 积累了大量的火箭发动机试验测试技术经验。

《化学分析计量》2018 年第 5 期目次

标准物质

血液中乙醇含量检测用标准物质的研制

水中亚硝酸根离子标准物质的研制

分析测试

凝胶渗透色谱-气相色谱-串联质谱法测定牛奶中的两种光引发剂

高效液相色谱法同时测定苹果中 3 种糖及主成分分析和聚类分析

表面增强拉曼光谱法快速检测纺织品中的偶氮染料

微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定砂仁中的铜、铅、砷、镉

液相色谱-质谱法测定运动饮料中 9 种水溶性维生素

纳米银石墨烯修饰电极-电化学法测定血清中的过氧化氢

GC-MS 法检测泡沫地垫中的甲酰胺

超高效液相色谱-串联质谱法测定水产品中的硝基呋喃代谢物

惰性气体熔融-热导法测定硅材料中的氧

磁力搅拌-离子选择电极法测量铜精矿中的水溶性氟

高效液相色谱法测定金属涂层罐中 9 种双酚类环氧衍生物的迁移量

滴定法测定矿物中铀

超高效液相色谱-串联质谱法快速测定粮谷中的玉米赤霉烯酮

凯氏定氮法测定土壤中水解性氮样品处理条件的三维响应曲面优化

电感耦合等离子体原子发射光谱法测定锡铅合金中的锡

碱红 T-Fenton 试剂荧光光谱法测定一次性纸杯中的双酚 A

气相色谱-三重四级杆质谱法测定禽蛋及蛋制品中氟虫腈残留量

液液微萃取-气相色谱法测定地表水中五氯酚

微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定淀粉制品中的铬、铅、铝、镍、铁

高效液相色谱-原子荧光光谱法测定化妆品中的无机汞、甲基汞、乙基汞

高效液相色谱-串联质谱法检测茶叶中痕量草铵膦、草甘膦及其代谢物氨基甲酸酯残留

气相色谱法测定聚碳酸酯中的二氯甲烷

数据处理

质谱代谢组学数据预处理方法研究

计量技术

脉冲安培检测器-离子色谱仪的校准

标准气体稀释装置校准方法

实验室管理

基于能力验证结果分析液化石油气组分检测中关键技术

综述

二氧化碳同位素标准物质研究进展

分子荧光光谱技术在原油及石油产品上的应用