

# 一种卫星轨控发动机流量校验系统

刘万龙, 田国华, 徐 鑫, 孙树江, 朱昊伟  
(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

**摘 要:** 针对目前计量部门对质量流量计校验精度只有 0.5% 且随时间波动的问题, 采用称重法对卫星轨控发动机试验用质量流量计进行现场校验, 采用真实推进剂作为校验介质, 校验时管道和流量计压力与发动机试验时管道和流量计压力一致。通过现场校验, 可以提高发动机试验流量测量的精度, 可以在符合精度要求的流量计中挑选精度较高的流量计作为试验用主流量计, 其他流量计作为备份流量计使用。

**关键词:** 轨控发动机; 流量校验; 称重系统; 质量流量计

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2015) 04-0109-04

## A flow calibration system for orbit-control engine of satellite

LIU Wanlong, TIAN Guohua, XU Xin, SUN Shujiang, ZHU Haowei  
(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

**Abstract:** As the uncertainty of the mass flow meter calibration results is 0.5% in metrology department, a weighing system was built to execute on-line calibration of the mass flow meters used in the test for satellite orbit-control engine. The calibration material used in the test was the true propellant. And the pressure of the propellant pipes and mass flow meters was as same as the pressure in the engine test. By the calibrations, the precision of the flow rate measurement in the test of the engine can be improved. The mass flow meter which has higher precision can be chosen as a main flow meter in the test for the orbit-control engine of satellite and the others can be used as candidates.

**Keywords:** orbit-control engine; flow calibration; weighing system; mass flow meter

## 0 引言

490 N 发动机是目前国内应用最广的卫星轨控发动机<sup>[1]</sup>。比冲是发动机一个重要的技术参数, 其由发动机推力除以流量得到。国内火箭发动机试验中通常使用质量流量计测量推进剂流量<sup>[2-3]</sup>。

质量流量计在计量部门标定时使用水作介质, 介质的不一致会影响测量结果<sup>[4]</sup>, 而且现场流量计工作管路压力、流量等工作环境也与计量部门不一致。称重测量是常用的流量计校验方法<sup>[5-6]</sup>, 因此, 基于国内外流量校验系统的设计经验<sup>[7-10]</sup>, 设计了一套卫星用轨控发动机流量称重校验系统。

收稿日期: 2014-12-26; 修回日期: 2015-02-27

作者简介: 刘万龙 (1982—), 男, 博士, 研究领域为火箭发动机试验及测试技术

对质量流量计进行了现场校验。校验时使用了真实试验推进剂，并采用发动机试验时增压的压力对推进剂管路和流量计进行增压，以保证校验状态与试验状态的一致性。

1 计量部门校验精度

目前计量部门对质量流量计的校验精度只有 0.5%，而且不同时期其校验结果也有一定的波动性。以一个质量流量计的校验数据为例，不同时期计量部门的校验结果与流量计理论输出结果相比较的偏差如表 1 所示。

表 1 质量流量计校验值与理论值相对偏差

Tab. 1 Relative deviations between calibrated values and theory data of a mass flow meter

校验日期	相对偏差/%
2005-9-12	-0.43
2006-9-14	-0.31
2007-9-6	-0.33
2007-11-28	-0.36
2008-4-18	-0.43
2008-4-26	-0.04
2009-4-7	-0.08
2009-8-14	-0.13

为了更好地说明流量计校验结果的波动性，将它们按时间轴绘图，如图 1 所示。从图中可以看出其波动性很大，而且没有规律。

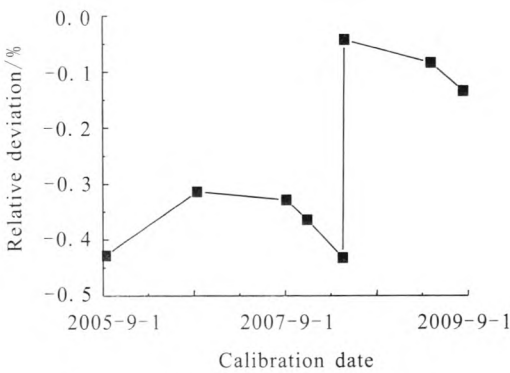
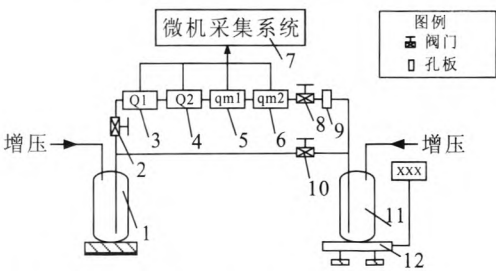


图 1  $q_m$  校验值与理论值相对偏差

Fig. 1 Relative deviations between  $q_m$  calibrated values and theory data

2 试验系统

流量校验时试验系统管路状态与 490 N 发动机试验时相同，采用 Pacific 6000 数据采集系统采集质量流量计的输出。试验系统组成如图 2 所示。图 3 是称重容器与高精度电子秤照片。



1-试车贮箱；2-出液手阀；3-涡轮流量计 1；4-涡轮流量计 2；5-质量流量计 1；6-质量流量计 2；7-Pacific 6000 数据采集系统；8-电磁阀；9-孔板；10-回液阀；11-称重容器；12-电子秤

图 2 质量流量计推进剂流量校验测量系统图  
Fig. 2 Schematic diagram of calibration system for propellant flow of mass flow meter



图 3 称重容器与高精度电子秤照片  
Fig. 3 Photograph of weighing tank and electronic scale

校验时通过增压模拟实际发动机试验时管路及流量计受压情况，利用孔板模拟实际流阻，采用保压称重，防止推进剂挥发。涡轮流量计 1 和涡轮流量计 2 安装在管路系统中，保证管路流阻与发动机试验状态一致。质量流量计 1 和质量流量计 2 同时在线校验，增加它们的数据一致性。

推进剂由试车贮箱经过出液手阀，涡轮流量计 1，涡轮流量计 2，质量流量计 1，质量流量计

2, 电磁阀和孔板流入称重容器。校验结束后推进剂从称重容器通过回液阀和出液手阀回到试车贮箱。流量校验时, 依次进行如下步骤: 管路放液充填; 将增压压力调整至姿轨控发动机试车时的额定压力; 调节孔板开度, 用其模拟发动机流阻; 高精度电子秤置零; 微机采集系统对流量计输出进行采集; 可编程控制器控制电磁阀打开额定时间; 微机采集系统停止采集; 高精度电子秤及质量流量计 (累计质量) 终止读数; 推进剂试车贮箱卸压; 称重容器推进剂回挤。

3 电子秤现场校验

使用砝码对电子秤进行现场校验, 消除管路应力等对测量的干扰。电子秤实际读数增量与实际砝码质量对照表如表 2 所示, 其拟合直线如图 4 所示。拟合直线方程为

$$y=0.9994x-0.0027 \tag{1}$$

式中:  $y$  为实际砝码质量;  $x$  为电子秤读数增量。

表 2 电子秤实际读数增量与实际砝码质量对照表  
Tab. 2 Comparison between incremental quantity of electronic-scale actual data and actual mass of weight

电子秤读数增量	实际砝码质量
0	0
45 048	45 002.0
47 992	47 957.8
50 935	50 911.2
53 912	53 887.4

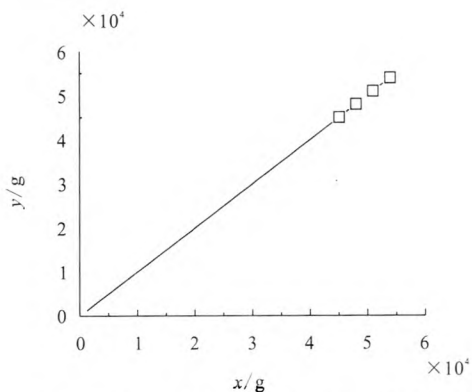


图 4 电子秤实际读数增量与实际砝码质量拟合曲线  
Fig. 4 Fitting curve for incremental quantity of electronic-scale actual value and actual mass of weight

4 试验数据分析

进行了 3 次流量校验试验。试验时 Pacific 6000 数据采集系统、阀门工作时序通过同样的时统信号控制。电子秤称重不记录试验的中间值, 只记录试验前质量和试验后质量。

将微机采集系统测量的数据与高精度电子秤测量的数据相比较, 得到各个流量计的计量部门校验结果 (根据计量部门校验公式计算得到质量流量, 对质量流量进行积分得到质量) 与称重结果的偏差。表 3 是称重与计算机采集结果对照表。表中,  $m$  指称重得到的质量,  $m_1$  和  $m_2$  分别指 Pacific 6000 数据采集系统测量得到的质量流量计 1 和质量流量计 2 的积分质量, 数据采集系统测量的瞬时质量流量按质量流量计 ( $q_m$ ) 最近一次计量部门校验公式计算。校验流程为 500 s,  $\eta_{m1}$  指  $m_1$  和  $m$  之间的相对偏差。  $\eta_{m2}$  指  $m_2$  和  $m$  之间的相对偏差。其公式如下

$$\eta_{m1} = (m_1 - m) / m \tag{2}$$

$$\eta_{m2} = (m_2 - m) / m \tag{3}$$

表 3 称重与数据采集系统采集结果对照表  
Tab. 3 Comparison of electronic scale measurement and the data acquisition system measurement

$m/g$	$m_1/g$	$m_2/g$	$\eta_{m1}/\%$	$\eta_{m2}/\%$
50 042	49 907	50 321	-0.27	0.56
50 661	50 568	50 990	-0.18	0.65
50 153	50 022	50 428	-0.26	0.55

从表 3 可以看出, 在这些校验中  $\eta_{m1}$  的范围为 -0.18% 到 -0.27%,  $\eta_{m2}$  的范围为 0.55% 到 0.65%; 质量流量计 1 的精度优于质量流量计 2 的精度, 试验中质量流量计 1 的数据可作为发动机试验推进剂流量数据, 质量流量计 2 的数据可作为备份参考值。

5 结论

针对目前计量部门对质量流量计的校验精度只有 0.5% 且随时间波动的问题, 采用称重法设

计了一套卫星轨控发动机试验用质量流量计现场校验系统,使用真实试验推进剂,并采用发动机试验时的增压压力对推进剂管路和流量计进行增压,通过检验试验得到以下结论:

1) 这种校验方式可以应用于流量计的标定中,采用真实介质校验结论可信度更高。

2) 通过校验可以在符合精度要求的流量计中挑选精度较高的流量计作为试验用主流量计,其他流量计作为备份使用。

#### 参考文献:

- [1] 周红玲,姜文龙,刘昌国.国内外卫星用液体远地点发动机发展综述[J].火箭推进,2011,37(5): 1-8.
- [2] 张惠军.科氏力质量流量计在凝胶推进剂火箭发动机试车中的应用[J].火箭推进,2004,30(6): 55-60.
- [3] 吴波. Promass83A 质量流量计在发动机试验中的应用

[J]. 火箭推进, 2005, 31(6): 57-60.

- [4] 罗凡,孙玉声.不同介质对质量流量计的校准误差影响[J].中国测试技术,2007,33(6): 52-54.
- [5] 纪纲.流量测量仪表应用技巧[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [6] 李长武,陈平,袁明,等.液体流量仪表在线校准方法及趋势[J].计量技术,2009,(4): 58-61.
- [7] 周士虎,张永华.流量计校验装置在航天发射场加注系统中的应用[J].石油工业技术监督,2001,17(4): 28-33.
- [8] SMITH D M, CARVER D B. Flow calibration of two hypersonic nozzles in the AEDC Heat-H2 high-enthalpy arc-heated wind tunnel, AIAA-1996-0913[R]. USA: AIAA, 1996.
- [9] KIRTLEY D E, ENGELMAN S F, FIFE J M. Analysis of xenon flow calibration techniques for electric thruster testing, AIAA-2002-3817 [R]. USA: AIAA, 2002.
- [10] 钟爱民.质量流量计自动校验控制系统的设计研究[D].上海:上海交通大学,2007.

(编辑:王建喜)

(上接第108页)

## 6 结束语

通过对液体火箭发动机试验数据解析入库模型的设计以及对解析入库关键技术的研究与应用,解决了试验数据批量入库存储与大数据解析入库的问题,为数据挖掘利用打下坚实的基础,为相关领域的试验数据解析入库提供设计参考。

#### 参考文献:

- [1] 王花梅,罗续业.海上试验场数据管理与应用系统的原型设计[J].海洋技术,2013,6(4): 06-08.
- [2] 邱丽丽,俞烽.异构数据动态交互平台设计与实现[J].计算机应用与软件,2013,12(3): 182-182.
- [3] 张冠军.基于XML异构系统间的数据交换技术[J].现代电子技术,2013,24(2): 45-47.
- [4] 陈硕颖,郑敏信,齐铂金,等.用于电池管理系统的数据存储系统设计[J].单片机与嵌入式系统应用,2014,14(1): 65-68.
- [5] 张恩,张广弟,兰磊.基于MongoDB的海量空间数据存储和并行[J].GEOSPATIAL INFORMATION, 2014, 12

(1): 22-23.

- [6] 韩晶,鄂海红,宋美娜,等.基于主体行为的非结构化数据模型[J].计算机工程与设计,2013,12(3): 04-08.
- [7] 韩翠峰.大数据带给图书馆的影响与挑战[J].图书与情报,2013,6(5): 37-40.
- [8] 林菲,张万军,孙勇.一种分布式非结构化数据副本管理模式[J].计算机工程,2013,12(4): 36-38.
- [9] 辛怀声,王鹏.基于XML的数据解析软件设计与实现[J].电脑知识与技术,2014,12(1): 18-20.
- [10] 刘波,苗彩,王国瓦,等.WITSML数据模式分析及应用[J].录井工程,2014,12(1): 27-29.
- [11] 武艳,谭献海.基于XML的异构数据转换的研究[J].铁路计算机应用,2013,12(10): 4-7.
- [12] 刘斌.基于元数据的海量试验数据管理系统研究与设计[J].微电子学与计算机,2012,12(4): 08-11.
- [13] 薛涛,刁明光,李建存,等.资源环境遥感海量空间数据存储、检索和访问方法[J].国土资源遥感,2013,12(2): 08-11.
- [14] 张蕊,李广云,王力,等.基于HDFS的海量激光点云数据分块存储方法研究[J].测绘通报,2014,12(3): 21-24.
- [15] 陈娜,张金娟,刘智琼,等.基于Hadoop平台的电信大数据入库及查询性能优化研究[J].移动通信,2014,12(7): 12-14.

(编辑:马杰)