

文章编号: 1000-8055(2010)04-0847-05

全弹性稳态微小流量测量系统

张莘艾¹, 汤海滨¹, 李 欣², 刘 宇¹, 王海兴¹, 施陈波¹

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;

2. 中国航天科技集团公司 航天推进技术研究院
北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 介绍了一种采用质量测量法的液体微小流量测量系统的工作原理与工作过程. 系统采用全弹性连接方法设计, 避免了常规质量测量法流量测量装置中非弹性连接管路造成的测量误差. 采用压力补偿方法, 修正由于压强对增压气体密度的影响. 并以酒精为测试液体, 进行了 5 种工况下流量测量试验. 试验结果表明, 该套微小流量测量系统工作稳定、可靠, 可以精确测量出液体稳态微小流量.

关 键 词: 液体微小流量测量; 全弹性连接方法; 质量测量法; 压力修正; 稳态流量

中图分类号: V439.2

文献标识码: A

Full elastic steady-state micro flow measurement system

ZHANG Xin-ai¹, TANG Hai-bin¹, LI Xin², LIU Yu¹,
WANG Hai-xing¹, SHI Chen-bo¹

(1. School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology,

Academy of Aerospace Propulsion Technology,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100074, China)

Abstract: The operating principle and process of a liquid micro flow measurement system using mass measurement method were presented in this paper. This micro flow measurement system was designed by elastic link method to prevent the measurement error caused by rigid pipeline. The pressure compensator in this system can improve the measurement accuracy by means of modifying the density variation caused by pressure. Five different flow rates of alcohol measurement experiments were conducted with this new micro flow measurement system. The results show that the full elastic steady mass measurement method for micro flow measurement system works steadily and reliably. It can measure the liquid micro flow rate accurately.

Key words: liquid micro flow measurement; full elastic link method;

mass measurement method; pressure correction; steady-state flow rate

随着微型机械和微型机电系统的发展, 研究更加先进、实用的微小流量控制与测量系统已成

为迫切需要^[1-2]. 在航空、航天领域, 微小流量控制与测量技术有着广阔的应用需求, 常用液体流量

收稿日期: 2009-04-20; 修订日期: 2009-06-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50836007)

作者简介: 张莘艾 (1981 -), 男, 上海人, 博士生, 研究领域为空间电推进与特种推进.

测量仪表如椭圆齿轮流量计、涡轮流量计、浮子流量计等,本身流量测量范围比较大;同时,由于存在泄漏、摩擦和随温度而变的黏性影响等,难以满足特殊要求下对液体微小流量精确测量的要求。

推进剂流量控制与测量是以 N_2H_4 为推进剂的电弧加热发动机研制与应用中的关键技术。小功率电弧加热发动机 N_2H_4 工作流量非常小,一般仅为 $10 \sim 60 \text{ mg/s}^{[3-5]}$,常规流量控制测量装置无法满足 Arcjet 推进剂流量控制与测量的精度与可靠性要求,给发动机的研制工作增加了难度。因此,研究者常常采用流量测量技术成熟的 N_2 、 H_2 混合模拟 N_2H_4 的分解产物进行试验研究^[6-10],但由于 N_2 、 H_2 混合物与 N_2H_4 分解产物有一定区别,所以不能完全反映发动机以 N_2H_4 为推进剂的实际工况。

为配合以 N_2H_4 为推进剂的电弧加热发动机工程样机研制工作,本文设计研制了一套稳态质量测量法微小流量测量系统,系统采用全弹性连接设计方法,避免了输送管路对质量测量法流量测量带来的误差影响。使用酒精对该全弹性稳态微小流量测量系统进行验证。试验证明,该套微小流量测量系统可较准确测量液体的微小流量,具有良好的重复性与可靠性,测量相对误差小于 2%。它的成功研制也为开展 N_2H_4 电弧加热发动机工程样机研制提供了保障。

1 试验装置与测量方法

1.1 工作原理

该流量测量系统由增压配气台、贮箱增压气体缓冲罐、全弹性微小流量测量装置、推进剂供给开关以及数据采集控制等五部分组成,系统示意图如图 1 所示。

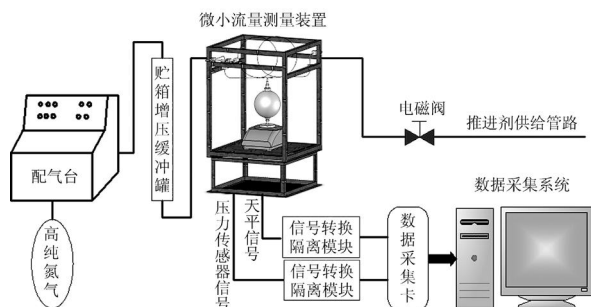


图 1 全弹性稳态微小流量测量系统示意图

Fig. 1 Micro flow measurement system diagram

使用中调节增压配气台向推进剂贮箱供给恒定压力的氮气,用以挤压推进剂贮箱内推进剂。为了避免由于增压气体压力不稳定而产生的流量供给不稳定的现象,在增压气体进入推进剂贮箱之前设计了一个容积为 70 L 的气体缓冲罐。通过缓冲罐的增压气体,经过贮箱增压气体进口管路进入贮箱,挤压贮箱内的推进剂实现对发动机给定流量的推进剂供给。为精确控制推进剂的供给,在推进剂贮箱出口管路上设有开关响应时间短的单稳电磁阀。数据采集控制系统给出阀门开关信号,并记录电磁阀打开瞬间、关闭后电子天平的示数、贮箱压力和推进剂供给的时间,再经过数据处理软件获得经过压力补偿的质量流率。

电磁阀打开前和关闭后天平的质量示值包括推进剂贮箱质量、推进剂质量、增压气体质量、以及由于全弹性连接管路在内压作用下产生的弹性应力的等效质量。分别对电磁阀开启前与关闭后的流量测量装置建立质量状态方程

$$M_{t1} = M_z + M_{p1} + M_{g1} + M_{e1} \quad (1)$$

$$M_{t2} = M_z + M_{p2} + M_{g2} + M_{e2} \quad (2)$$

式中 M_t 、 M_z 、 M_p 、 M_g 、 M_e 分别代表电子天平显示的总质量、推进剂贮箱质量、贮箱内推进剂质量、贮箱内增压气体质量和管路弹性应力的等效质量。由于采用恒压挤压方式供给推进剂,全弹性连接管路前后受力情况完全相同,管路由于内压产生弹性应力的等效质量近似相同。由质量状态方程(1)和(2),得到

$$\Delta M_t = \Delta M_p + \Delta M_g \quad (3)$$

$$\Delta M_t = \Delta V_p \rho_p + \Delta V_g \rho_g \quad (4)$$

式中 ΔV 代表前后两个状态贮箱内推进剂体积变化量,有 $\Delta V_p = \Delta V_g = \Delta V$,代入方程(4)

$$\Delta M_t = \Delta V (\rho_p + \rho_g) \quad (5)$$

$$\Delta V = \Delta M_t / (\rho_p + \rho_g) \quad (6)$$

液体推进剂压缩性小,即可认为整个状态的密度保持不变;增压氮气的密度需要根据贮箱内压力进行压力补偿修正^[11]。采用理想气体补偿法,获得相应工况下贮箱内增压氮气的密度。

$$\rho_g = pM / RT \quad (7)$$

式中 p 为贮箱压力; M 为氮气的相对分子质量; R 为气体常数; T 为气体温度。

$$\Delta M_p = \Delta M_t - \Delta V \rho_g \quad (8)$$

$$\dot{m} = \frac{\Delta M_p}{\Delta t} \quad (9)$$

1.2 机械结构

增压气配气台功能是为推进剂供给提供给定稳定压力的挤压气体,其中设有气体减压阀、过滤器、手阀、压力表,所有设备安装在配气台机械柜中,实现了模块化设计,便于试验过程中的操作。增压气体缓冲罐采用无缝钢管焊接制成,具有可靠的结构强度。增压气体与推进剂供给管路采用外径为 6 mm 的钢管制成,管路采用标准球头连接,推进剂供给管路与接头材料均选取为 1Cr18Ni9Ti。

全弹性微小流量测量装置包括支撑架组件、精密分析天平、推进剂贮箱、全弹性连接管路和压力补偿单元,示意图如图 2 所示。

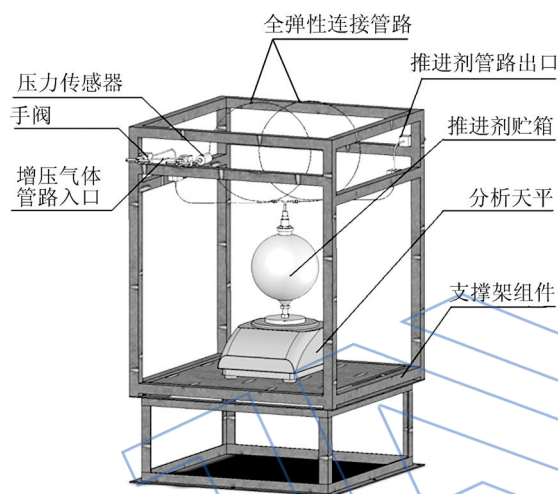


图 2 全弹性微小流量测量装置示意图

Fig.2 Schematic structure of micro flow measurement system

支撑架组件采用角铁焊接而成,支撑架底座通过螺钉固定在水平地面上,避免由于支撑架振动对天平测量产生影响。支撑架底座与上支撑架之间采用螺杆连接,螺杆不仅能将上支撑架固定在支撑架底座上,同时还能调节设置在上支撑架上天平安放平台的水平。上支撑架设有用于安放天平的平台和安装手动截止阀、压力传感器和管路的横梁,保证工作过程中各元器件稳定工作。

推进剂贮箱容积为 2 L,设计压强 4 MPa,箱体采用钛合金制成,具有可靠的结构强度与耐腐蚀性。为保证贮箱平稳放置在天平上,在贮箱底部设有一个圆盘形铝制底座。贮箱入口处采用球头螺母连接密封,在球头螺母后端分别焊有贮箱增压气体进口管路与推进剂出口管路。

为避免增压气体与推进剂输送对分析天平质量测量产生影响,对测量装置内部的供给管路进行了全弹性设计^[12]。流量测量装置内增压气体管路和推进剂供给管路均采用直径 2 mm 的金属钢管,弯成弹簧状的弹性连接管路一端焊接在推进剂贮箱上,一端被弹性管固定块固定在支撑架上,保证使用过程中稳定性。全弹性连接管路的安装过程中,首先确定贮箱在天平上的位置,然后调整弹性管固定块在支撑架上的位置,尽量保证弹性管路处于自由状态,连接管路安装示意图如图 3 所示。

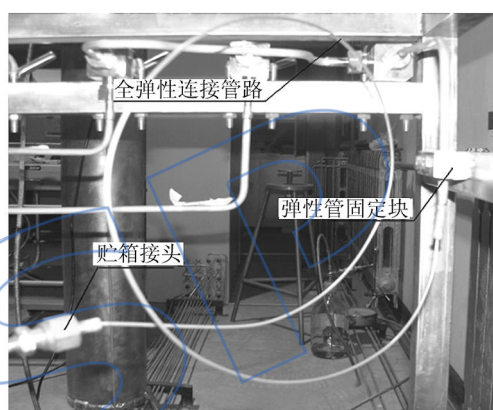


图 3 全弹性连接管路安装图

Fig.3 Schematic of the elastic tubes in the system

1.3 精密分析天平

天平选用梅特勒-托利多生产的 PL4002-IC 精密电子天平,量程为 4 100 g,可读性为 0.01 g,具有简单称量、百分比称量、计件称量、动态称量、加減称量等功能。天平内置砝码自动校准,确保称量结果的准确性,设有液晶显示屏显示读数,同时配有内置 RS232 通讯接口,可以连接打印机、电脑等外围设备实现数据采集。天平外壳材料为工程塑料,确保天平轻便、坚固,可以承受推进剂轻度腐蚀。

为验证天平测量性能,对天平进行了测量精度校验试验,结果如表 1 所示。采用最小二乘法拟合对数据进行处理,得到天平重复性误差为 0.008%,线性误差为 $\pm 0.001\%$,精度为 0.010%。

1.4 压力传感器

为测量贮箱内实际压强以便对质量测量进行压力补偿,在该套微小流量测量系统中设计了压力补偿单元,即在试验过程中通过压力传感器测

表 1 天平测量精度校验试验结果(单位 :kg)
Table 1 Results of balance verification (unit :kg)

检定点 质量	回程一		回程二		回程三	
	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程
0	1.500 02	1.500 03	1.500 03	1.500 04	1.500 01	1.500 02
0.5	2.000 01	2.000 03	1.999 99	2.000 02	2.000 02	2.000 03
1.0	2.500 04	2.500 07	2.500 03	2.500 08	2.500 04	2.500 09
1.5	3.000 06	3.000 10	3.000 08	3.000 11	3.000 07	3.000 10
2.0	3.500 11	3.500 13	3.500 12	3.500 16	3.500 10	3.500 18
2.5	4.000 08	4.000 10	4.000 07	4.000 10	4.000 08	4.000 11

得推进剂贮箱内压力,数据采集系统采集压力传感器信号,并通过数据采集系统分析软件对测得的推进剂流量进行压力补偿修正,使测量具有更高的准确性.压力传感器选用扩散硅型压力传感器,性能稳定可靠,抗过载能力强.

1.5 数据采集控制系统

数据采集控制系统由传感器、光电隔离模块、数据采集卡、计算机、电气信号控制台等组成,图 4 为系统示意图.

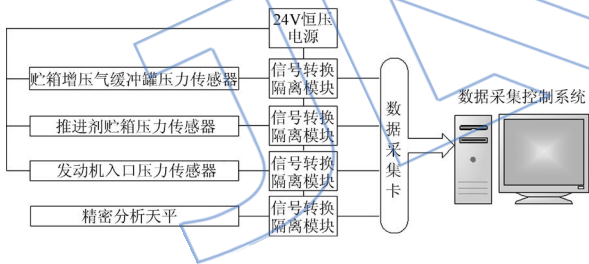


图 4 数据采集控制系统示意图
Fig. 4 Data acquisition system diagram

压力传感器与精密分析天平输出信号经过转换隔离模块接入端子卡,最后进入数据采集卡.由于采用信号转换隔离模块使被测信号系统与计算机之间完全电气隔离,具有较高的输入阻抗和共模抑制比,有效降低干扰.信号转换隔离模块型号为 AM-T-U5/I4,输入信号为 4~20 mA,输出信号为 0~5 V,采用 24 V 直流稳压电源供电,精度为 0.2%,线性度为 0.1%.数据采集卡采用中泰计算机技术研究所生产的 PCF8360A 数据采集卡,具有单端 32 路/双端 16 路输入通道,输入精度为 12 bit,最大采样频率为 500 kHz.试验过程中采用单端 32 路输入通道模式,输入信号为 0~5 V.端子卡采用中泰生产的 PS003 型号端子

卡与 PCF8360A 数据采集卡配套使用.
数据采集软件利用 Visual Basic 6.0 开发环境开发的 32 位 Windows 程序,程序采用可视化编程方法,使系统具有良好的操作界面,操作简单方便.主要功能包括系统设置、通道标定、数据采集、数据处理以及试验数据图形化显示,系统采集频率为 1 000 Hz.

2 试验结果和讨论

2.1 试验内容与步骤

1) 推进剂贮箱水压试验

为检验推进剂贮箱结构强度与密封性能,首先进行了推进剂贮箱水压试验.试验中将推进剂贮箱加满酒精,采用逐级加压方式对推进剂贮箱进行加压,初始压强为 1 MPa,每次递增 1 MPa,每增加一次贮箱压力后,停顿 2 min 观察贮箱压强变化情况,若无泄漏现象继续增压.达到最高压力 4 MPa 后,保压 30 min 检验贮箱密封性.试验结果表明,在 4 MPa 增压气体作用下,装有酒精的贮箱保压 30 min 后无明显泄漏现象,结构强度满足使用要求.

2) 推进剂贮箱实际容积测量

分别测量空推进剂贮箱与加满酒精后推进剂贮箱质量,获得推进剂贮箱粗略的实际容积.在相同安装状态下分别测得两者质量为 1 030.68 g 和 2 633.12 g,进而得到推进剂贮箱实际容积约为 2 L.

3) 微小流量测量系统验证性试验

试验中,调节配气台实现推进剂贮箱压强从 1.1 MPa 增加到 1.8 MPa,其中设有 5 个工况,每个工况持续时间为 10 s,这主要是考虑贮箱容积有限,同时降低由于工作时间过短推进剂在出口

电磁阀关闭一瞬间损失的质量对流量测量产生的影响.数据采集系统采集流量测量装置的输出信号,经过压力补偿获得 10 s 内稳态质量流量.

为验证该流量测量精度,使用容器接收推进剂供给管路出口流出的酒精,每次称量对应工况流出酒精的质量,将测量装置测量获得的流量与实际酒精总量/时间进行比较,获得流量装置的测量精度.

2.2 试验结果与分析

表 2 给出了流量测量系统验证性试验结果.表 2 中, M_t , ΔM_p , $\dot{m}$ 分别代表电子天平显示的总质量、推进剂消耗量和推进剂流量.下标“mes”、“re”分别代表测量值和实际值.试验结果表明,设计研制的全弹性稳态微小流量测量系统能够较为准确测得推进剂稳态流量,测量相对误差小于 2 %.

表 2 流量验证试验结果
Table 2 Results of the mass flow measuring test

序号	p/MPa	M_{t1}/g	M_{t2}/g	$\Delta M_{\text{pmes}}/\text{g}$	$\Delta M_{\text{pre}}/\text{g}$	$\dot{m}_{\text{mes}}/(\text{g/s})$	$\dot{m}_{\text{re}}/(\text{g/s})$	误差/ %
1	1.13	2061.82	1963.60	96.54	98.48	9.65	9.85	1.97
2	1.13	1959.58	1862.55	95.37	97.28	9.54	9.73	1.96
3	1.30	1858.35	1755.55	100.78	102.41	10.08	10.24	1.59
4	1.57	1754.23	1642.25	109.33	111.12	10.93	11.11	1.61
5	1.78	1643.28	1524.74	115.36	117.54	11.54	11.75	1.86

3 结 论

为配合低功率肼电弧发动机工程样机的研制,设计了一套适用于液体恒压供给模式微小流量测量的全弹性稳态微小流量测量系统.测量系统内气体与推进剂输送管路采用弹簧状不锈钢细管,消除了附件连接对于微小流量测量的影响;设计压力补偿单元,对质量流量测量进行了压力补偿进而获得更加真实的测量结果.该套系统工作稳定、可靠,并成功测量了以酒精为推进剂不同供给工况下的质量流率,测量相对误差小于 2 %.该套流量测量系统对待测液体种类具有良好的适应性,因而具有较广泛的应用范围.

参考文献:

[1] 程斌,杨尚平,马骏骑,等.浅谈我国流量测量研究的现状[J].中国仪器仪表,2005,10:42-45.
CHENG Bin, YANG Shangping, MA Junqi, et al. Brief introduction of the domestic current situation of flow measurement research [J]. China Instrumentation, 2005, 10: 42-45. (in Chinese)

[2] 张学庆.流量测量的意义及流量传感器的现状[J].石油化工自动化,2005(5):99-101.
ZHANG Xueqing. Status and significance of flow sensor [J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2005 (5) :99-101. (in Chinese)

[3] Knowles S C, Yano S E. Design, testing and integration of a flight-ready hydrazine arcjet system [R]. AIAA-89-

2720,1989.

[4] Knowles S C, Yano S E, Aadland R S. Qualification and life testing of a flight design hydrazine arcjet system [R]. AIAA-90-2576,1990.

[5] Mclean C H, Lichon P G, Sankovic J. Life demonstration of a 600-second mission average arcjet [R]. AIAA-94-2866,1994.

[6] Hamley J, Sankovic J. A soft-start circuit for arcjet ignition [R]. AIAA 93-2396,1993.

[7] Viertel Y E, Schmitz H D, Riehle M, et al. Development and test of a 1 kW hydrazine arcjet system [R]. AIAA 96-2960,1996.

[8] Cruciani G, Deininger W D. A 300-hour endurance test of an arcjet thruster at 1 kW [R]. AIAA 93-1900,1993.

[9] Hardy T L, Curran F M. Low power DC arcjet operation with hydrogen/ nitrogen/ ammonia mixtures [R]. AIAA 87-1948,1987.

[10] Hagg T W, Curran F M. Arcjet starting reliability: a multi-start test on hydrogen/ nitrogen mixtures [R]. AIAA 87-1061,1987.

[11] 芦满涛.气体体积流量测量中温度和压力修正的必要性[J].冶金自动化,2008,32(4):43-45.
LU Mantao. Necessity of temperature and pressure correction in measurement of gas volume flow [J]. Metallurgical Industry Automation, 2008, 32(4) :43-45. (in Chinese)

[12] 汤海滨,刘畅,向民,等.微推力全弹性测量装置[J].推进技术,2007,28(6):703-706.
TANG Haibin, LIU Chang, XIANG Min, et al. Full elastic microthrust measurement equipment [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(6) :703-706. (in Chinese)