

主动式活塞凝胶流量标准装置的建立

常莹, 张周焕, 孙新新

(西安航天计量测试研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 凝胶推进剂是一种非牛顿粘弹性流体, 具有粘度高、压力触变性等特点, 在发动机实际试车中采用了科氏力质量流量计对凝胶推进剂在实际管路中的流量进行测量。西安航天计量测试研究所结合凝胶推进剂本身的压力触变特性, 对凝胶流量计的校准进行了深入地研究。基于主动式活塞液体流量标准装置的结构, 通过增设加压/泄压装置, 加装在线密度计, 设计了一套针对火箭发动机凝胶流量计的标准装置。该装置可以充分模拟凝胶流量计的实际使用工况, 实现凝胶流量计的实流模拟校准, 进而提高了瞬态流量的测量准确度。本套凝胶流量标准装置具有流量稳定、重复性好及测量范围大等特点, 其质量流量测量范围为19.44~3 611 g/s, 完全满足我国航天发动机在实际热试车和高空模拟试车中对凝胶推进剂质量流量测量的要求。

关键词: 主动式活塞体积分管; 凝胶流量计; 校准装置; 增压系统; 在线密度计

中图分类号: V513-33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 06-0080-05

Establishment of calibration device for active piston gel propellant flowmeter

CHANG Ying, ZHANG Zhou-huan, SUN Xin-xin

(Xi'an Aerospace Metrology and Measurement Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Gel propellant is a non-Newtonian viscoelastic fluid with high viscosity and pressure thixotropic characteristics. Coriolis mass flowmeter is used in the engine actual test to measure the gel propellant mass flow in the actual piping. According to the pressure thixotropic features of gel propellant, an in-depth research of gel flowmeter calibration was conducted in Xi'an Aerospace Measurement and Testing Institute. Based on the structure of active piston liquid flow standard device, a gel flowmeter calibration device was designed by adding a pressure boost/pressure relief device and online density meter. The device can fully simulate the actual working conditions of gel flowmeter to achieve the simulation calibration of gel propellant flowmeter, and thereby improve the measuring accuracy of the transient gel flow. This gel flow calibration device has features of stable flow, perfect reproducibility and wide measurement range. Its mass flow measurement range is

收稿日期: 2012-10-29; 修回日期: 2013-01-25

基金项目: 国防科工局技术基础课题(J032010B001)

作者简介: 常莹 (1983—), 女, 硕士, 研究领域为流量测试技术

19.44~3 611 g/s, which can fully meet the requirements of the gel propellant mass flow measurement of aerospace engines in real hot commissioning and altitude simulation test. The research laid a foundation for the subsequent function extension of the device.

Keywords: active piston volume; gel propellant flowmeter; calibrating device; pressure boost device; on-line densimeter

0 引言

瞬态流量的准确测量是发动机试验中的重要工作,对于新型发动机的设计、发动机的结构改进以及发动机热试车和高空模拟试车非常重要^[1]。凝胶推进剂属于非牛顿流体,静止贮存为类固态、粘性大,受剪切后粘性迅速下降,近似牛顿流体,使用常规的流量计无法对其进行准确测量,故选择了科氏力质量流量计对凝胶推进剂在实际管路中的质量流量进行测量(本文中简称凝胶流量计)。

质量流量计的传统校准方法是采用质量法,质量法属于离线检定,只能测平均流量,一般不能封闭运行且其关键部件换向器对粘度特别敏感,粘度大导致挂壁现象严重,影响测量精度,而凝胶推进剂的流变特性使得质量法不适宜于对凝胶流量计进行校准。本文采用主动式活塞体积管构成凝胶流量计标准装置的主标准器,它具有高精度、宽量程、适合高粘度、耐高压及全密闭运行等特点,在原油等高粘度流量计计量领域得到了广泛的应用,故该装置适宜于对凝胶流量计进行校准。美国加利布朗公司和中航工业第三零四研究所对主动式活塞体积管在水和原油等领域的校准应用进行了研究^[2-5]。

西安航天计量测试研究所结合凝胶推进剂本身的压力触变特性,对凝胶流量计的校准进行了深入研究。基于常规液体流量标准装置的结构^[6],通过增设加压/泄压装置,加装在线密度计,设计了一套针对火箭发动机凝胶流量计的标准装置。该装置可以模拟凝胶流量计的实际使用工况,进行瞬态流量的准确测量,实现凝胶流量计的实流模拟校准,提高了校准的准确度。

1 科氏力质量流量计工作原理

科氏力质量流量计是一种可以直接测量质量流量的流量计。它在原理上消除了温度、压力、流体状态及密度等参数的变化对测量精度的影响,可以适应气体、液体、两相流、高粘度流体和糊状介质的测量,是一种高精度的适应范围很广的流量测量工具^[9]。

科氏力是指物体在旋转系统中做直线运动时所受的力,科氏力质量流量计就是根据科氏力原理来测量流体质量流量的。下面以双管质量流量计为例简单介绍质量流量测量原理。由动力学原理可知,管道中流体的科氏加速度

$$a_c = 2\bar{\omega} \cdot \bar{v} \quad (1)$$

流体微元所受到的科氏力

$$dF_c = -dm \cdot \bar{a}_c = -2\bar{\omega} \cdot \bar{v} \cdot dm \quad (2)$$

在流量计中,由测量管的振动代替恒定的角速度 $\bar{\omega}$,科氏力的大小与流过管道的流体质量 dm ,流速 \bar{v} 成正比,即与流体的质量流量成正比。如图1所示,没有流体流过或流体停滞不流动时,管子形状如图1(a)所示,两根测量管同相振动,入口和出口相位差为零。当流体流过振动管道时,就产生和激振频率相同的科氏加速度和科氏力作用叠加在测量管上,于是管子产生了扭曲,入口处振动减速(图1(b)),出口处振动加速(图1(c))。当质量流量增加时,相位差(A-B)也增加,通过入口和出口的相位传感器就可以测量管子振动相位。用两根管子的反相振动来保持系统的平衡。

据振动方程和所受的科氏力,可以得出测量管两侧检测点的振动信号相位差和质量流量成正比的结论:

$$Q_m = (E/K) \cdot \Delta\theta \quad (3)$$

式中: K 为常数; E 为弹性模量; Q_m 为质量流

量; $\Delta\theta$ 为相位差。测得了相位差, 即可以得到流体的质量流量。

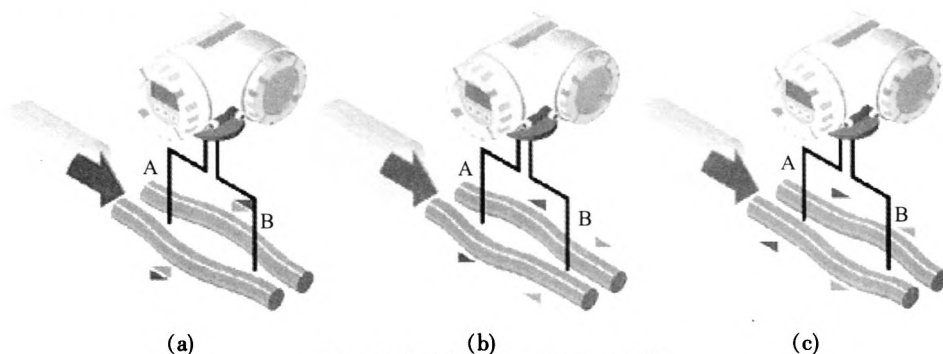


图 1 科氏力质量流量计工作原理

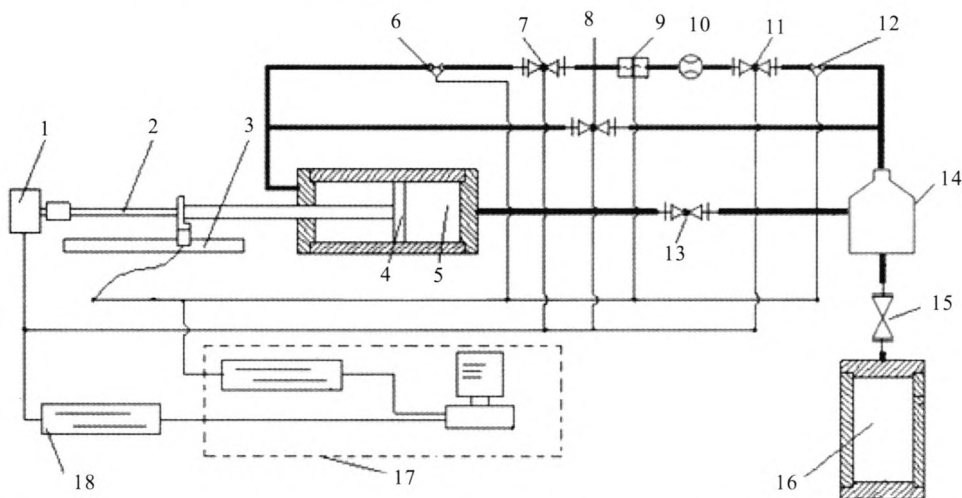
Fig. 1 Working principle of Coriolis mass flowmeter

2 主动式活塞凝胶流量标准装置

凝胶流量标准装置原理图如图 2 所示, 该装置主要包括机械系统、增压系统和数据采集处理系统 3 部分。

装置采用伺服电机驱动标准活塞缸 (体积管) 产生标准流量源, 活塞缸同时作为容积标准, 与光栅配合构成流量测量系统。具体的工作过程如下: 校准前将阀 1, 2, 3, 4 开启, 用增压系统将贮罐中的凝胶挤压到活塞体积管和管路中; 在校准行程中关闭阀门 3, 由电机通过传动

系统驱动活塞在主动体积管中运动, 产生标准流量源, 凝胶通过阀门 1、凝胶流量计、密度计和阀门 2 进入贮箱。光栅用于测量活塞行程 L , 活塞行程与活塞截面积 A 的乘积再除以运行时间 t 就得到体积流量 $Q_v = \frac{V}{t} = \frac{L \cdot A}{t}$, 密度 ρ 采用在线密度计进行测量, 则由主动式活塞体积管产生的质量流量 $Q_m = \frac{V}{t} \cdot \rho = \frac{L \cdot A}{t} \cdot \rho$ 。把 Q_m 与凝胶流量计相应的指示流量 Q_i 相比较, 即可确定凝胶流量计的误差, 从而达到校准流量计的目的。



1-电机; 2-丝杠; 3-光栅; 4-活塞; 5-活塞缸; 6-温度及压力传感器 T_1 、 P_1 ; 7-阀门 1; 8-阀门 3;
9-凝胶流量计; 10-密度计; 11-阀门 2; 12-温度及压力传感器 T_2 、 P_2 ; 13-阀门 4; 14-贮罐; 15-增/减压阀;
16-增压系统; 17-数据采集处理系统; 18-控制系统

图 2 主动式活塞凝胶流量标准装置原理图

Fig. 2 Schematic diagram of calibrating device for active piston gel flowmeter

2.1 机械系统

机械系统由标准流量源部件和流量测量部件组成。

2.1.1 标准流量源部件

标准流量源部件由伺服电机、滚珠丝杠、活塞、活塞缸、贮罐和管路等组成。流量的稳定是实现准确测量的前提, 由伺服电机、精密丝杠驱动活塞运动产生高稳定的凝胶流量源。本装置采用国外进行凝胶实验时常用的高压气体挤压方式产生流量源, 即使用高压气体将贮罐中的凝胶挤压到活塞体积管和管路中。如图 2 所示, 流量计上下游安装有温度传感器 (T_1 和 T_2) 和压力传感器 (P_1 和 P_2) 测量流体的温度和压力, 其中 P_1 和 T_1 用来测量主动式活塞体积管出口处凝胶的压力和温度, P_2 和 T_2 用来测量被校凝胶流量计处介质的压力和温度, 这 4 个参数可以进行主动式活塞体积管标准容积的压力和温度修正, 得到高精度的流量。

2.1.2 流量测量部件

活塞缸作为容积标准, 与光栅、在线密度计配合构成流量测量系统。由于凝胶推进剂流量测量采用的是科氏力质量流量计, 需以质量流量对其进行标定。而主动式活塞体积管标定的是体积流量, 故需要加装在线密度计连续实时地检测校准介质的密度值。由于凝胶具有的粘度高、压力触变性等特点, 普通的密度测量手段无法满足胶体密度测量的要求, 本装置中采用国际先进的谐振在线密度计, 采用一个振动管来测量密度。当流体密度改变, 密度计振动质量将发生改变, 振动质量的变化再影响谐振频率, 故测得密度计谐振频率即可得知流体密度。频率与密度的关系为:

$$\rho=K_0+K_1\cdot T+K_2\cdot T^2$$

式中: ρ 为液体密度; T 为密度计输出的振动周期; K_0 , K_1 , K_2 为传感器的常数, 在出厂时标定。

2.2 增压系统

采用挤压式系统供应凝胶推进剂, 增压系统能够稳定供应 3 MPa 的压力, 实现凝胶推进剂剪切变稀和稳定流动。

为实现有效和安全地控制气体的流量、压

力, 开启相应通路的阀门, 在高压段, 打开气瓶阀, 通过增压泵将气瓶压力提高到所需压力送入贮胶罐; 在中、低段, 打开气瓶阀, 通过减压器将气瓶压力减至工作所需压力送入贮胶罐。在进气路有一个低速增压阀和快速增压阀, 可通过选择进行低速或快速加压, 当压力与参考压力平衡后, 即可进行实验。在排气路有一个低速卸压阀和快速卸压阀, 当压力超过设定或降压时, 可通过选择进行低速或快速卸压, 当压力与参考压力平衡后, 即可进行实验, 达到安全控制的目的。

2.3 数据采集处理系统

数据采集处理系统主要由数据采集控制系统和上位机校准软件组成。

2.3.1 硬件设计

数据采集控制系统原理图如图 3 所示。主要采集量包含温度/压力信号、时钟信号, 光栅位移信号, 流量计模拟/频率信号、密度计频率信号等; 控制系统主要进行伺服电机的控制及反馈、阀门控制及反馈等。检定流量计时, 流量计数、光栅计数、时钟计数三者之间要求严格同步, 从而保证计算仪表系数的准确。数据采集控制系统采用模块化设计, 可以方便扩展, 升级系统功能, 主要模块包括研华公司 PCI1716 板卡、PCI1780 板卡及凌华 PCI8164 板卡等。

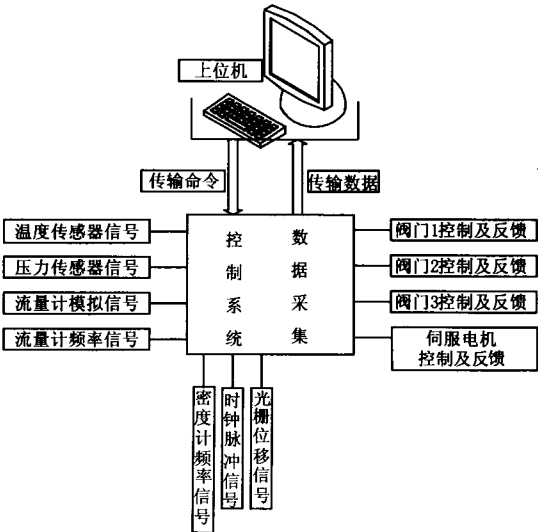


图 3 数据采集控制系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of data acquisition control system

2.3.2 上位机校准软件设计

上位机校准软件包括计算机处理系统和检定程序两部分。其中计算机处理系统主要用于对流量计检定参数的设置、检定数据采集、检定数据处理、数据存储打印、控制命令发送等功能。检定程序采用 Visual C++ 程序设计开发, 数据采用 Access 数据库或者 SQL 数据库进行管理。上位

机发送给控制系统的命令包括: 开始检定命令、活塞稳定时间、电机转速及位置控制及流量控制阀的开关等; 控制系统发送给上位机的数据包括: 检定完毕信号、光栅位移信号、流量计模拟/频率信号、密度计频率信号、时钟脉冲信号及温度/压力传感器信号等。校准软件程序流程图如图 4 所示。

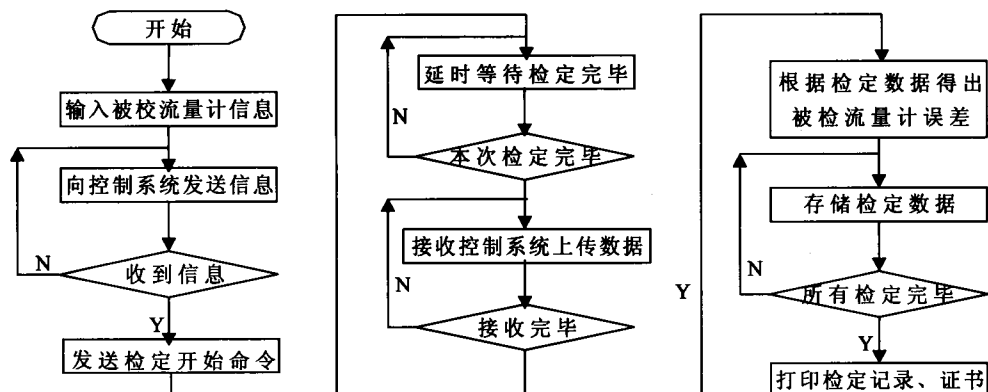


图 4 程序流程图

Fig. 4 Program flow chart

2.3.3 检定流程设计

在上位机设置好介质参数和被校流量计的参数之后, 上位机向控制系统发送检定命令和检定参数。控制系统收到上位机发出的检定命令以和检定参数之后, 开始检定被检流量计。检定流程如图 5 所示。

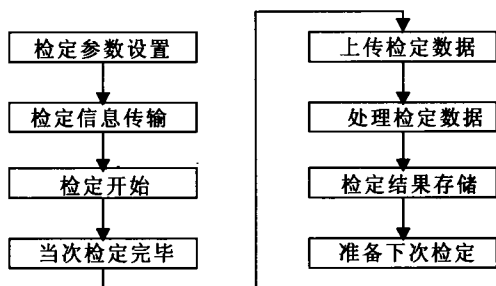


图 5 检定流程图

Fig. 5 Flow chart of detection

首先, 启动电机正转, 控制系统根据上位机要求的流量大小来控制电机转速。当电机转速达到稳定时, 启动校准软件, 开始采集被校流量计信号、活塞的初始位移、时钟信号和密度计的频

率信号, 当活塞位移达到上位机规定的距离时, 控制系统立即停止采集数据, 同时将检定数据存储。数据存储完毕后, 启动电机反转, 活塞退回到起始位置准备下一次检定。

控制系统将检定数据上传至上位机, 同时发出检定完毕信号。上位机收到数据和信号后, 根据数据计算仪表系数、重复性、线性度和基本误差等指标, 并将检定结果存储, 然后进行下一次检定, 直至所有检定完毕。最后, 检定完毕后计算机将所有检定结果存储、列表并根据程序规定的格式打印输出被检流量计的检定证书。

3 结论

凝胶推进剂是一种非牛顿粘弹性流体, 具有粘度高、压力触变性等特点, 而常规液体流量标准装置只能以牛顿流体作为校准介质, 故无法实现凝胶流量计真实介质的校准。因此针对凝胶推进剂的特殊流变性, 本文设计的主动式活塞凝胶流量标准装置通过增设加压/泄压装

(下转第 91 页)

- [4] 李卫平, 谭伟, 薛伟军, 等. 民用飞机发动机吊挂部段静力试验与静强度分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(6): 732-737.
- [5] 王琳, 刘罡. 某舱体结构主动段总体承载能力分析和试验验证[J]. 工程与试验, 2008 (4): 5-6.
- [6] 魏生道. 结构静力试验技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1988.
- [7] 杨川. 金属零部件失效分析基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 36.
- [8] 毛谦德. 袖珍机械设计师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

(编辑: 马 杰)

(上接第 84 页)

置、加装在线密度计, 充分模拟了凝胶流量计的实际使用工况, 实现了凝胶流量计的实流模拟校准, 提高了校准的准确度。该装置具有如下特点:

1) 流量稳定。由于流量值为活塞运行速度与活塞缸横截面积的乘积, 活塞由伺服电机带动, 而伺服电机的转速易于调整和控制, 因此容易使流量达到并稳定在设定流量点上。

2) 重复性好。从原理上看, 其重复性仅与活塞缸体面积的变化、光栅测量的重复性及密封圈的变形等因素有关, 而这些影响因素均很小。

3) 流量测量范围大。本装置体积流量测量范围为 $0.1 \sim 10 \text{ m}^3/\text{h}$, 标准模拟液的密度范围为 $700 \sim 1\,300 \text{ kg/m}^3$ ^[8-10], 将体积流量转换成质量流量, 则其测量范围为 $19.44 \sim 3\,611 \text{ g/s}$, 我所建立的凝胶流量计标准装置在流量测量范围方面可以满足我国航天发动机在实际热试车和高空模拟试车中对凝胶推进剂质量流量测量的要求。

参考文献:

- [1] 郭霄峰. 发动机试验[M]. 北京: 北京宇航出版社, 1990.
- [2] 孙策. 质量流量计的在线检定和离线检定[J]. 工业计量, 2007, 17(4): 27-29.
- [3] 宋永卓. 一种简便、实用的质量流量计检定 / 校准装置[J]. 中国计量, 2006 (2): 57-59.
- [4] 刘彦军. 活塞式液体流量标准装置[J]. 计量测试, 2002 (增刊): 34-36.
- [5] 管志坚. 光电开关在主动式活塞液体流量标准装置中的应用[J]. 计测技术, 2009, 29(2): 54-55.
- [6] 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.
- [7] 张蒙正. 凝胶推进剂直圆管流动特性探讨[J]. 火箭推进, 2007, 33(5): 1-6.
- [8] 左博. 凝胶推进剂直圆管中剪切速率与表观粘性实验研究. 火箭推进, 2007, 33(4): 12-15.
- [9] 左博. 凝胶推进剂模拟液直圆管压降计算及误差分析. 火箭推进, 2008, 34(1): 26-29.

(编辑: 马 杰)