

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

张惠军

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 介绍了科氏力质量流量计的原理及其在凝胶发动机试车中的应用, 并对热试车的测量数据进行了分析。

关键词: 凝胶推进剂; 火箭发动机; 科氏力质量流量计

中图分类号: V436

文献标识码: A

文章编号: (2004)06-0055-06

Application of Coriolis Force Mass Flowmeter in Gelled Propellant Rocket Engine Test

Zhang Huijun

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

Abstract: The principle of coriolis force mass flowmeter and its application in gelled propellant rocket engine test are introduced, results of the test are also analyzed.

Key words: gelled propellant; rocket engine; coriolis force mass flowmeter

1 引言

凝胶推进剂(gelled propellant)是介于固体与液体之间的一种火箭发动机推进剂。由于具有高密度、高燃烧能量、高安全性、易长期储存等优点, 越来越受到国内外相关机构的重视。美国、俄罗斯、乌克兰已经成功进行了凝胶推进剂发动机的热试车及飞行试验, 国内的研究也取得了比

较大的进展。

如何精确测量凝胶推进剂的流量是凝胶发动机热试车时需要解决的一个比较重要的问题。凝胶推进剂是一种时间依赖的非牛顿粘弹性液体, 使用常规的流量计是不可取的, 因为它们是在恒定牛顿粘度下压降与流速的关系原理上的。由于科氏力质量流量计利用科氏力原理测量质量流量, 与流体的温度、压力、粘度、电导率及流量特性无关, 所以考虑用它来测量推进剂流量。

收稿日期: 2004-07-28; 修回日期: 2004-08-12。

作者简介: 张惠军(1971—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机测试技术。

依据发动机热试验的要求、测量系统和工艺系统的状况,从仪器的功能、介质相容性、量程范围、测量精度、信号输出方式、操作适应性、安全性等方面出发,经过认真考察,选用了德国 E+H 公司的 Promass 83F08 (08 为口径) 分离 (传感器与变送器) 型科氏力质量流量测量系统。该系统可以测量质量流量,同时还可以测量流体的密度和温度,选用耐酸碱材料保证与推进剂的相容性,其最大满量程范围是从 $0\text{g/s} \sim 555.556\text{g/s}$,最大测量误差为 $\pm 0.105\%$,环境适应性较强,安全防爆结构设计可以适应发动机热试要求条件。

2 科氏力质量流量计流量测量原理

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、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。

科氏力质量流量计通常由传感器和变送器组成。测量管是传感器的重要组成部分,常见测量管的形式有以下几种: S 形测量管、U 形测量管、双 J 形测量管、B 形测量管、单直管形测量管、双直管形测量管、U 形测量管、双环形测量管。直管型一般尺寸较小,不易积气,易于清洗,但由于其振动系统刚度大,谐振频率高,相位差小,电信号处理较困难。为了降低谐振频率,管壁必须较薄,而较薄的管壁会使耐磨性和抗腐蚀性变

差。弯管型的振动系统刚度较低,电信号容易处理,可选用较厚的测量管壁,其耐磨性和抗腐蚀性较好,但由于形状复杂,容易积存残渣和气体,引起误差,结构尺寸也较大。

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里奥利加速度

$$\vec{a}_c = 2\vec{v} \cdot \vec{n} \quad (1)$$

流体微元所受到的科里奥利力

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

在流量计中,由测量管的振动代替恒定的角速度 \vec{v} 。科里奥利力和流过管道的流体密度和流速成正比 (即质量流量),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,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里奥利加速度和科里奥利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。

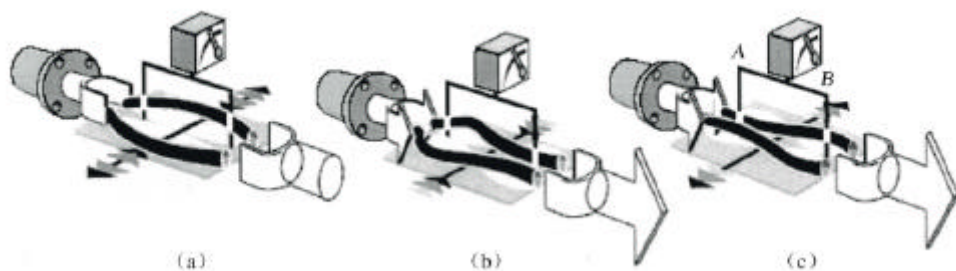


图 1 科氏力质量流量计测量原理

Fig.1 Measurement principle of coriolis force mass flowmeter

根据振动方程和所受的科里奥利力, 可以得到两侧检测点的振动信号相位差和质量流量成正比的结论:

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

式中, K 为常数; E 为弹性模量; Q_m 为质量流量; Δq 是相位差。可见, 知道了相位差, 就可以得到流体的质量流量。

由于测量管以一定的共振频率进行振动, 振动频率随流体的密度变化而变化, 因此共振频率就是流体密度的函数, 因此质量流量计可以测量流体的密度。

在 Promass 83F 流量计测量管中带有 Pt100 温度电极, 可以测量流体的温度, 测出的温度用于流量测量的温度补偿。

3 测量系统构成及工作原理

利用现有的测量系统资源, 在地面热试车时使用了如图 2 所示测量方案。可以看到, 由于选用了传感器与变送器分离的系统, 传感器可以安装到试车前台工艺管路上, 而变送器可以安装到较远的安全的地方, 两者通过一根 20 米长的电缆相连。对于 Promass F 型传感器测量管按要求必须水平安装, 由于采用了弯管结构, 水平安装时, 必须考虑流体的特性, 对凝胶而言为了防止其在弯曲处积聚, 所以安装时弯曲面向上。

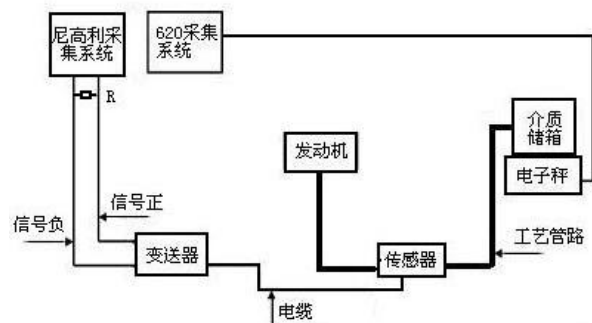


图2 流量测量系统结构

Fig.2 Structure of flow measurement system

另外还要考虑流量计的抗振性, Promass F 所能允许的振动加速度小于 $1g$, 频率范围在 $10\text{Hz} \sim 150\text{Hz}$ 之间, 如果传感器所在管道有振动, 就需要采取相应的减振或隔振措施, 传感器安装时要

尽量避免振动干扰源 (如电机、泵、风机等), 以防其影响测量精度。

安装传感器时应尽量避免应力产生: 安装过程中, 管道和传感器连接的力度以及传感器水平度、垂直度等没有达到标准, 都会产生应力。一旦应力产生, 测量管产生的科氏力会产生偏向, 导致测量不准。所以安装时, 最好用水平仪、垂直仪等工具帮助进行校正。

流量计的信号输出有电流和脉冲/频率两种方式, 我们使用了 $4\text{mA} \sim 20\text{mA}$ 电流方式, 如图 2 所示。变送器输出的流量电流信号经过传输电缆到测量系统, 在正负信号线间接一个 250Ω 的标准电阻, 将电流信号转换为电压信号后可以用尼高利采集系统来测量流量的变化。

由于初次使用质量流量计测量凝胶推进剂流量, 采用电子秤测量介质质量的变化换算流量作为备份, 电子秤在使用前需用标准法码进行标定。

另外变送器还需要一台较高功率的 24V 直流电源为其提供动力。

硬件连接完成后, 需要通过变送器面板进行相应的设置, 系统加电后开始自检, 自检成功, 就可以利用光敏键设置和查看系统信息。对于电流输出方式, 需要设置的是最小流量和最大流量值, 也就是设定流量测量的范围: 4mA 电流对应的流量值一般为 0g/s ; 20mA 电流对应测量上限, 选用的型号, 最大设置流量即满量程是 555.556g/s , 量程比大于 $1000:1$, 流量超过预设的满量程时不会使放大器过载。之后要对流量计的电气连接、接地、信号接线等是否达到要求进行检查, 如有必要, 还要对流量计进行零点调整。零点调整指的是在零流量条件下, 将输出置于零的过程。零点调整过程中, 先把流量计下游阀门关闭, 保证整个测量管充满介质, 并对流量计上电预热, 以消除温度变化对零点的影响, 再进行零点调整。要完成最终的测量, 还需对尼高利系统的采集软件做相应的设置, 如流量所用通道的电压范围、偏置值、滤波值、采样速率、转化成物理值时的 A 、 B 系数等, 其中 A 、 B 值需要根据流量计的设置来决定。以实际试验的设置为例, 4mA 对应的电压是 1V , 对应的流量是 0g/s ; 20mA 对应的电压是 5V , 流量是 20g/s 。可以得到流量电

压关系直线方程为:

$$Q_m = -5 + 5u \quad (4)$$

式中, u 为尼高利采集系统的输入电压。

另外一种流量测量构造方案是进行高空模拟试验时采用的。与前者的不同之处是增加了 Neff620 采集系统和试车数据实时显示系统, 如图 3。Neff620 采集系统实际是两套系统, 一个是 100 系列; 一个是 600 系列。取样电阻接到 100 系列信号调理端, 600 系列接入的是经 100 系列调理后的信号, 尼高利也与 100 连接, 它接入的是经 100 放大后的信号。600 系列通过串口与实时显示系统进行通讯, 试车时可以对流量信号进行实时监视。与前一种构造不同的是 Neff620 系统采集到的电压信号不是直通的, 需要找出输入电压的通过或衰减特性, 所以使用标准电源通过在输入端加标准电压对其进行标定, 600 系列、尼高利系统需要同时参加。

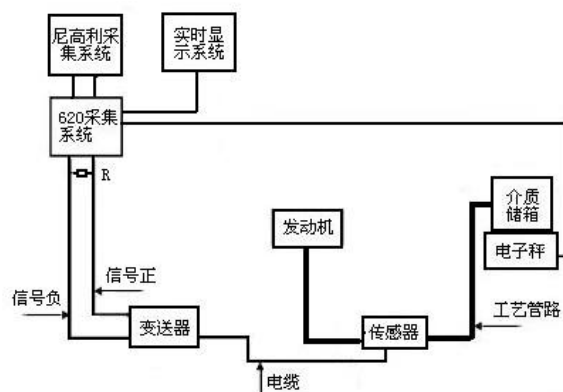


图 3 带实时显示的流量测量系统结构

Fig.3 Structure of flow measurement system with real time display

表 1 是电压标定数据及各种参量关系的确立过程。

表 1 Neff620 100 系列电压标定结果 (单位: V)

Tab.1 Calibration result of Neff620 100 series

各档位标准电压	0.0000	1.0000	2.0000	3.0000	3.9900	4.9900
第一升程电压	-0.0024	0.8166	1.6366	2.4566	3.2766	4.0947
第一回程电压	-0.0022	0.8166	1.6366	2.4566	3.2766	4.0947
第二升程电压	-0.0020	0.8166	1.6366	2.4566	3.2766	4.0953
第二回程电压	-0.0022	0.8166	1.6366	2.4566	3.2766	4.0953
第三升程电压	-0.0022	0.8166	1.6368	2.4566	3.2766	4.0951
第三回程电压	-0.0022	0.8166	1.6366	2.4566	3.2766	4.0951

使用最小二乘法, 拟合出线性方程:

$$u = A + Bu_1 = 0.0033 + 1.2185u_1 \quad (5)$$

$$Q_m = a + bu_1 \quad (6)$$

$$Q_m = a + bA + bBu_1 = a + 0.0033b + 1.2185bu_1 \quad (7)$$

式中, $A = 0.0033$; $B = 1.2185$ 。由流量计设定可知, $u = 5 \text{ v}$ 时, $Q_m = 20 \text{ g/s}$; $u = 1 \text{ v}$ 时, $Q_m = 0 \text{ g/s}$ 。因此有质量流量与流量计输出电压的关系方程:

$$Q_m = -4.9836 + 6.0924u_1 \quad (8)$$

公式 (8) 中常数就是 100 系列进行物理转换时需要的参数。用与 100 系列相同的方法, 拟合出电压的传递关系线性方程:

$$u = A + Bu_1 = -0.0006 + 1.0010u_1$$

式中, $A = -0.0006$; $B = 1.0010$ 。导出质量流量与流量计输出电压的关系方程:

$$Q_m = -5.0099 + 5.0164u_1 \quad (9)$$

公式(9)中常系数是600系列进行物理转换时需要的参数。

表2 Neff620 600系列电压标定结果(单位: V)

Tab.2 Calibration result of Neff620 600 series

各档位标准电压	0.0000	1.0000	2.0000	3.0000	3.9900	4.9900
第一升程电压	0.0009	0.9987	1.9961	2.9946	3.9921	4.9897
第一回程电压	0.0007	0.9987	1.9965	2.9944	3.9922	4.9897
第二升程电压	0.0008	0.9987	1.9961	2.9946	3.9921	4.9896
第二回程电压	0.0008	0.9987	1.9960	2.9944	3.9921	4.9896
第三升程电压	0.0007	0.9989	1.9962	2.9946	3.9919	4.9897
第三回程电压	0.0007	0.9989	1.9965	2.9944	3.2721	4.9897

尼高利进行相同的过程,得出转化物理值所需的A、B系数,在采集程序相应位置完成设置。数据实时显示程序中需要设置的A、B系数与600系列相同。

完成了软硬件的准备工作后就可以参加热试车。需要注意的是在流量计使用完后,为了防止介质在测量管中凝结,需要及时地清洗,由于Promass F传感器允许测量的介质温度可达200℃,可以使用高温热水对测量管进行清洗,再用氮气吹干。

4 试验数据及分析

经过热试车得到了多组流量数据,由于流量和室压直接相关,所以以此做参照,做简单分析。图4和图5分别是根据地面热试车5秒程序记录数据绘制的时间历程曲线,可以看到流量数据从时序和变化趋势上都与室压保持一致,流量在平稳段基本保持在11g/s左右,应该说介质在测量管路中能够保持畅通。

图6和图7则是根据高空模拟热试车5秒程序记录数据绘制的时间历程曲线,同样可以看到流量数据在时序以及动态过程和平稳过程上都与室压保持一致。

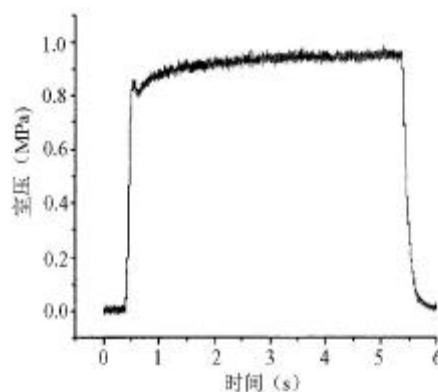


图4 地面热试发动机室压变化曲线

Fig.4 Curve of chamber pressure in rocket engine hot-firing

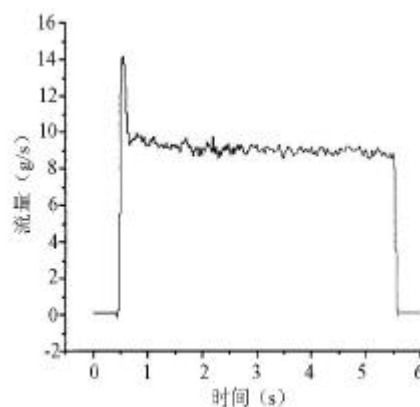


图5 地面热试发动机流量变化曲线

Fig.5 Curve of flow in rocket engine hot-firing

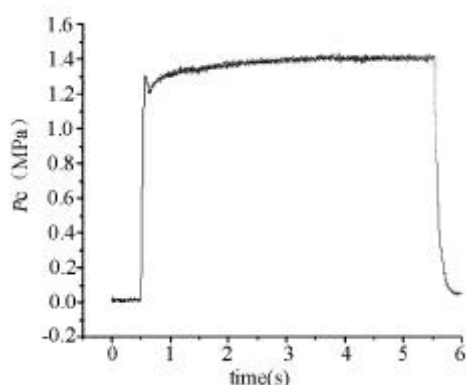


图6 高空模拟热试验发动机室压变化曲线

Fig.6 Curve of chamber pressure in altitude simulation test

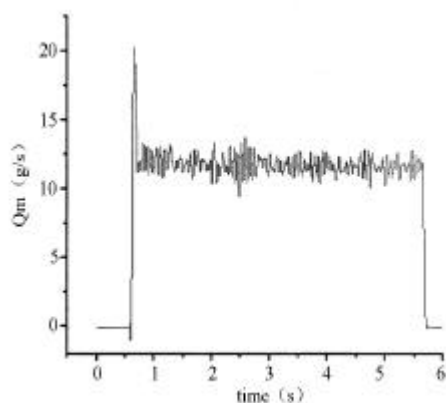


图7 高空模拟热试验发动机流量变化曲线

Fig.7 Curve of flow in altitude simulation test

以高模试车的一个5秒数据为例,将测得室压反算值与两种流量测量方法实测值做比较,如表3所示。其中, Q_{m1} 为设计流量值; Q_{m2} 为质量流量计所测发动机各个平稳工作时间段流量平均值; Q_{m3} 为根据称重方法所得发动机各个平稳工作时间段流量平均值。

表3 设计流量值与两种实测流量值的比较

Fig.3 Comparison of designed flow and two real values

时间段 (s)	Q_{m1} (g/s)	Q_{m2} (g/s)	Q_{m3} (g/s)
1.0~2.0	11.30	11.69	12.01
2.0~3.0	11.54	11.76	10.80
3.0~4.0	11.63	11.59	10.06

从表中所列数据计算发现,质量流量计所测流量与设计值最大偏差为3%左右,而称重流量与设计值的最大偏差达7%,噪声(一部分来自电子称的电噪声,一部分是工艺管路流体激振产生)较大,且其响应滞后时间大于1s。可以得出结论:使用电子秤的称重法测量小流量是比较粗略的,受环境影响较大,数据的可信度较低。

需要注意的是由于质量流量计本身的动态响应特性,有70ms左右的滞后时间,在进行发动机性能分析时需要作相应的处理。

5 结论

通过地面和高空模拟热试验测量数据分析可以得出结论,用科氏力质量流量计测量凝胶推进剂流量的方法是可行的,测量数据准确可靠。与其它流量计相比,科氏力质量流量计用于凝胶推进剂发动机试验流量测量时具有高精度、良好的介质动态适应性、稳定的环境适应能力、使用方便等优点。使用科氏力质量流量计解决了凝胶推进剂姿控火箭发动机流量测量的问题,为完成以后的各型号凝胶推进发动机试验任务建立了基础,也为提高试验水平积累了有益的经验。

参考文献:

- [1] 全猛, 科里奥利质量流量计动态特性的研究 [DB/OL], <http://www.sensorok.com>, 2004-04.
- [2] 周有平, 科氏力质量流量计的使用与维护[J], 化工自动化与仪表, 2004, (1).
- [3] 李旭, 科氏力质量流量计的工作原理和典型结构特性 [DB/OL], <http://www.sensorok.com>, 2004-04.
- [4] 刘冬玲, 科氏力质量流量计响应时间对检定的影响 [J], 工业计量, 2003, (3).
- [5] 樊尚春, 宋明刚, 直管式科氏质量流量计对脉动响应的研究[J], 北京航空航天大学学报, 2003, (1).

(编辑: 马杰)