0254-6124/2012/32(6)-841–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Li Ming, Yu Qiang, Zhai Guangjie, Sun Zhibin. Research of a mass flow controller for microgravity environment. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(6): 841-844

微重力环境中的气体质量流量控制器研究

李 明[1,2] 于 强[1] 翟光杰[1] 孙志斌[1]

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 提出了一种高可靠气体质量流量控制器设计. 介绍了该流量控制器的原理和结构. 通过比较不同的气体流量传感器和阀门, 选择了可满足空间科学实验设备可靠性要求的 MEMS 传感器和针阀. MEMS 质量流量计的输出电压 (代表实际气体流量), 经过减法电路放大和 A/D 采样之后, 与设定电压 (代表设定的气流流量) 进行比较, 差值信号输入给 PID 控制器, 由其输出步进电机的控制脉冲数和方向, 步进电机驱动器驱动电机调节流过针阀的气体流量, 使之与设定流量相等. 给出了利用该气体质量流量控制器控制氧气流量的实验结果. 该系统可实现流量的灵活调节, 并具备空间科学实验设备所要求的性能, 为未来在空间利用气体流量连续可调的质量流量控制计进行燃烧科学实验奠定了基础.

关键词 空间燃烧实验, 质量流量控制计, MEMS

中图法分类号 V 524

Research of a Mass Flow Controller for Microgravity Environment

LI Ming[1,2] YU Qiang[1] ZHAI Guangjie[1] SUN Zhibin[1]

1(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract A highly reliable method of mass-flow controller design is proposed. The controller is composed of 4 parts, *i.e.*, control circuit, Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS), needle valve and step motor. Different gas flow meters and control valves are compared, and then MEMS and needle valve are selected. The MEMS, as an integrated chip, has better vibration resistance and smaller size, and its working temperature can meet the space experimental requirements. The output voltage from MEMS is amplified by subtraction amplifier circuit, through A/D sampling and software filtering, and an output voltage value is obtained, which denotes the actual gas flow. By comparing the sampling value and the set value of gas mass flow, PID algorithm is used to count step motor control parameters, including the amount of pulse and the direction. Then the needle valve adjusts gas mass flow by step motor to reach the set value of gas mass flow. The experimental results are given by using this gas mass flow controller for oxygen flow control. The whole system can neatly

2010-08-21 收到原稿, 2010-11-01 收到修定稿

E-mail: liming@nssc.ac.cn

adjust gas flow in demand and reach the experimental requirements for space equipment. It lays the foundation of using mass flow controller in China's future space experiment.

Key words Space combustion experiment, Mass flow controller, MEMS

0 引言

燃烧是人类获取能源的主要途径 [1−2], 是涉及空气动力学、热力学和化学反应动力学等多种自然科学的物理现象 [3]. 微重力燃烧科学 [4] 可归为三类 [5]: 与系统防火安全有关的微重力燃烧 [6−7]、与发动机点火有关的微重力燃烧以及与空间应用有关的微重力燃烧. 在微重力燃烧实验中, 当燃料与氧化剂相互作用并具有足够的能量以生成产物分子时, 燃烧反应开始. 氧化剂与燃料混合过程中需对氧化剂流量进行控制, 氧化剂流量可对航天器的防火 [8] 以及燃烧实验结果产生重要影响.

美国国家航空航天局在微重力闷烧实验中, 使用节流阀以固定的气流速度提供氧化剂 [9]. 在 2006 年发射的实践 8 号上的微重力燃烧实验即聚胺酯泡沫闷烧实验中, 同样是使用节流阀以固定的气流速度提供氧化剂 [10]. 然而, 微重力燃烧实验要求可在较宽的流量范围内连续调节气体流量, 以得到更加准确、实用和有效的实验结果及数据. 在地面环境中普遍使用的气体质量流量计具有精度较高、自动调节方便等特点, 但是其机械和电控结构均未考虑空间实验的特殊要求, 特别是振动环境和热环境的要求 [11]. 振动环境包括试验和发射阶段的正弦振动、随机振动和冲击振动, 热环境包括热循环试验和热真空环境试验. 已有的质量流量控制器无法通过这些严格的试验. 空间微重力燃烧试验中尚未有使用气体质量流量控制器的先例.

本文通过对控制电路、传感器及控制阀的研究, 设计出小型化、模块化、高精度、高可靠, 适用于空间微重力燃烧实验的质量流量控制器, 并对其性能进行了测试.

1 质量流量控制器原理

质量流量控制器由控制电路、质量流量计、针阀、步进电机等部分组成, 如图 1 所示.

质量流量计的输出电压 (代表实际气体流量), 经过减法电路放大和 A/D 采样之后, 与设定电压 (代表设定的气流流量) 进行比较, 差值信号输入给 PID 控制器 [12], PID 控制器输出步进电机的控制脉冲数和方向, 步进电机驱动器驱动电机调节控制阀的流量, 使之与设定流量相等, 达到控制气体流量的目的.

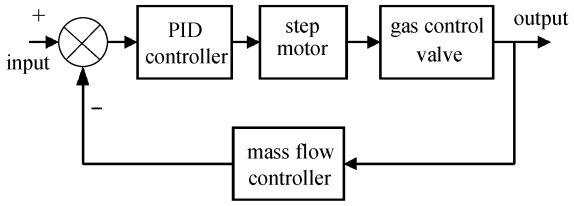


图 1 控制系统原理

Fig. 1 Control system diagram

2 质量流量计

用于测量流过管路或明渠流体流量的仪表通称为流量计. 微重力燃烧实验需要选用满足空间实验特殊要求的流量计. 流量计的种类繁多 [13], 各种类型的流量计使用场合、范围、特点也不尽相同. 按其测量目的可以分为体积流量计和质量流量计两大类 [14]. 本文讨论的是质量流量计.

质量流量计按测量方法分类有热式质量流量计和科里奥利质量流量计两种. 热式质量流量计不需要进行压力和温度修正, 直接测量气体的质量流量. 科里奥利质量流量计使用薄壁管测量, 测量精度高, 但对于密度小的流体无法测量.

鉴于空间科学实验设备的特殊性, 选择流量计主要考虑以下原则: 抗振动性能好, 体积小, 重量轻. 不同气体质量流量计的特性对比列于表 1.

从表 1 可以得出, MEMS 质量流量计能很好地满足空间科学实验要求的特殊性. 传统热式传感器是热丝式的, 如图 2(b) 所示. 传统热式传感器测量时气体须通过很细的薄壁管或者是热丝, 从原理上来说, 这种结构难以满足振动环境要求, 经受振动时会直接将传感器 (热丝) 振断, 从而导致其损坏失效. 而

MEMS 质量流量计传感器集成在一块小芯片上, 如图 2(a) 所示. 由于传感器集成在一块芯片上, 经过振动环境实验后, 不会影响传感器的测量精度; 同时, 芯片及其外围电路抗振加固技术已很成熟. 因此, MEMS 质量流量计满足空间实验抗振性能的要求, 可实现高可靠、小型化的设计指标.

MEMS 质量流量计采用热分布式测量原理, 流体的质量和流速与传感器上温度场的变化相关联. 即上下游有温度传感器, 中间有一个微热源, 气体从上游向下游流动, 通过测量上下游的温度差即可测出气体质量流量. 选取的 MEMS 质量流量计选型参数为: 流量范围 0~20 L·m^{-1}, 测量气体为氧气. 除此之外 MEMS 质量流量计还具有如下特点:

(1) 在单个芯片上集成多个传感器;
(2) 量程比达到 100:1;
(3) 零点稳定度高;
(4) 全量程高稳定性, 高精确度, 优良的重复性;
(5) 精度 ±1.5%;
(6) 量程 10~50 SLPM;
(7) 压力范围 0~0.5 MPa;
(8) 低功耗、低压损;
(9) 响应速度 10 ms.

表 1　流量计特点比较

Table 1　Flow meter features comparison

分类	结构特点	抗振性能好	体积小
孔板流量计	连接件多	×	×
涡轮流量计	轴承、转子	×	×
椭圆齿轮流量计	结构复杂	×	×
科里奥利质量流量计	薄壁测量管	×	×
旋进旋涡流量计	无机械可动部件	√	×
MEMS 质量流量计	传感芯片	√	√

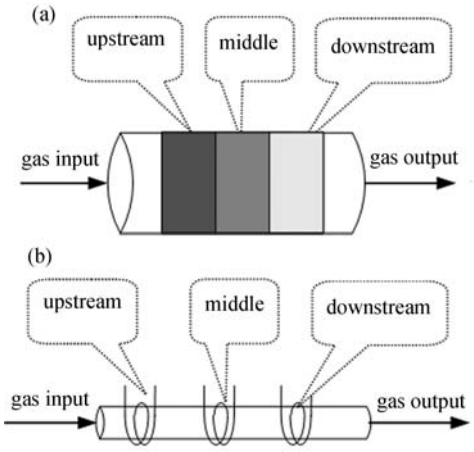


图 2　MEMS 传感器与传统热式传感器结构

Fig. 2　Structure of MEMS (a) and traditional thermal sensor (b)

3　气体流量控制阀

控制阀是在控制单元输出的控制信号作用下, 借助动力操作去改变介质流量的控制元件, 一般由执行机构和阀体组成. 各种控制阀的特点列于表 2.

从表 2 可以看出, 进行空间科学实验可选择针阀, 其既能灵活调节流量大小, 又能满足抗振性要求, 同时针阀的体积较小, 可实现高可靠、小型化的设计指标.

电磁阀一般由阀体、线圈、阀芯、弹簧组成, 如图 3(b) 所示. 电磁阀的原理是通过电磁力提起阀芯,

表 2　控制阀的特点比较

Table 2　Control valve features comparison

名称	能灵活调节流量	抗振性能好
电磁阀	×	×
球阀	×	√
针阀	√	√

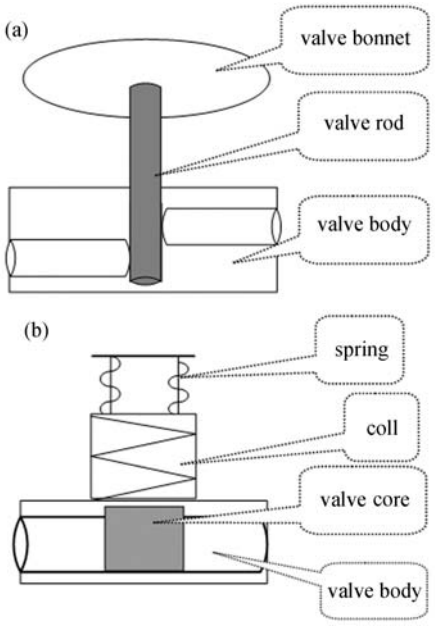


图 3　针阀和电磁阀结构

Fig. 3　Structure of needle valve (a), and electromagnetic valve (b)

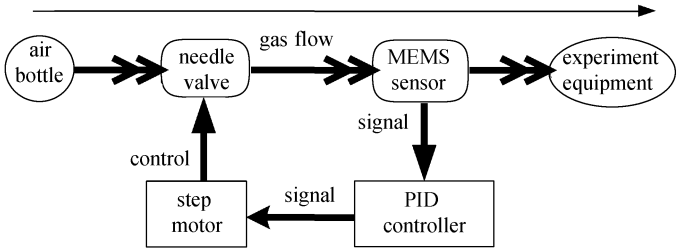


图 4 实验平台

Fig. 4 Experimental platform

依靠弹簧复位. 但只有常闭和常开两个状态, 不能连续调节流量, 且流量很难达到稳定; 更重要的是其结构上存在可运动 (非固定) 部件, 经过振动环境实验后, 其控制精度会受到严重影响, 甚至会被振碎, 因此无法满足空间实验设备抗振性能的要求.

针阀由阀体、阀杆、阀帽三部分组成, 整个结构无机械可移动部件, 如图 3(a) 所示. 阀杆与阀体之间靠锥面进行紧密配合, 阀杆和阀体的组成材料是 316 不锈钢, 室温时能承受约 34.4 MPa 的压力. 经过振动环境实验后, 针阀的测量精度不会受到影响, 同时针阀不会被振碎, 这使得其能够满足空间实验设备抗振性能的要求.

4 实验平台和实验结果

4.1 实验平台

模块化的质量流量控制器组装成一个系统, 搭建的实验平台如图 4 所示. 气瓶中的气体通过减压阀后进入针阀, 再接 MEMS 传感器, 然后输出接到实验舱. PID 控制器根据传感器的输出信号, 与设定的气体流量值比较之后, 对两者的差值进行 PID 运算, 使用运算结果控制步进电机, 步进电机调节通过针阀的气体流量.

4.2 实验结果

实验环境条件及参数设置如下. 实验气体为氧气, 压力 0.3 MPa, 采样时间 1 s, 气体流量设定值设定为 15 L·min^{-1}; PID 参数值分别为 $P = 445$, $I = 0.1$, $D = 0.01$. 6 min 内的实验结果如图 5 所示. 从实验结果可以看出, 流过质量流量传感器的气体流量值与设定值之间的稳态误差最大为 0.18 L·min^{-1}, 其控制精度为 1.2%, 达到较高的精度.

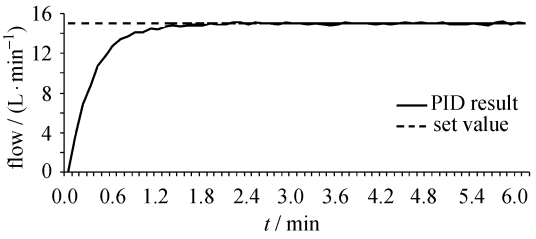


图 5 气体流量设定为 15 L·min^{-1} 时 PID 调节结果

Fig. 5 PID results when the set flow is 15 L·min^{-1}

5 结论

经过实验, 最终实现气体流量的灵活可调, 证明气体质量流量控制计的设计原理是正确的, 并且是可以实现的. 从原理上来看, 与其他种类的流量控制计相比, 该流量控制计能够经受得住空间实验设备所要求的振动环境试验, 这为中国未来空间科学燃烧实验中气体质量流量的控制奠定了基础.

下一步将要通过落塔实验对研制的气体质量流量控制器进行实验验证, 验证其是否能够在微重力条件下稳定地控制气体流量. 另外, 还需要验证其是否满足空间科学实验设备所必需的振动和温度环境试验要求.

参考文献

[1] Zhang Xia. Research advances on microgravity combustion [J]. *Adv. Mech.*, 2004, **34**(4):507-528. In Chinese (张夏. 微重力燃烧研究进展 [J]. 力学进展, 2004, **34**(4):507-528)

[2] Kong Wenjun, Zhang Xiaoqian. Opportunities and progress of research on combustion in microgravity [J]. *Combust. Sci. Tech.*, 1997, **3**(004):424-426. In Chinese (孔文俊, 张孝谦. 微重力环境下燃烧科学研究的机遇与进展 [J]. 燃烧

科学与技术, 1997, **3**(004):424-426)

[3] Ge Jiabin, Deng Minghua. Experimental equipment for micro-gravity combustion research and their application [J]. *Mech. Elec. Equip.*, 2004, **21**(001):24-26. In Chinese (葛佳宾, 邓名华. 微重力燃烧研究的实验设备及应用 [J]. 机电设备, 2004, **21**(001):24-26)

[4] Gu Yidong, Gao Ming. Mission of China's manned space science follow-up technology development and application of some thinking [C]//the 12th China's Space Science Society Space Exploration Professional Committee Conference, 2007

[5] Liu Chuhui, Chen Tianyi. Microgravity combustion in China manned space [J]. *Struc. Envir. Eng.*, 1994, **24**(4):32-39. In Chinese (刘春辉, 陈天翼. 载人航天中的微重力燃烧研究 [J]. 强度与环境, 1994, **24**(4):32-39)

[6] Xiao Yuan, Hu Jun, Wang Shuangfeng, *et al.* A narrow channel experimental study on flammability characteristics of thermally thin fuels under simulated microgravity conditions [J]. *J. Astron.*, 2010, **31**(7):1877-1882. In Chinese (肖原, 胡俊, 王双峰, 等. 微重力下热薄材料燃烧特性的窄通道实验研究 [J]. 宇航学报, 2010, **31**(7):1877-1882)

[7] Kong Wenjun, Wang Baorui, Lao Shiqi, *et al.* Study on fire initiation of wire insulations on board the satellite [J]. *Space Sci.*, 2008, **28**(1):22-32. In Chinese (孔文俊, 王宝瑞, 劳世奇, 等. 卫星搭载导线着火前期特性实验研究 [J]. 空间科学学报, 2008, **28**(1):22-32)

[8] Zhang Xia. Progress in fire safety research for manned spacecraft [J]. *Adv. Mech.*, 2005, **35**(1):100-115. In Chinese (张夏. 载人航天器火灾安全研究进展 [J]. 力学进展, 2005, **35**(1):100-115)

[9] King K M, Ross D H. Overview of the NASA microgravity combustion program [J]. *AIAA J.*, 1998, **36**(008):1337-1345

[10] Wang Shuangfeng, Yin Yongli. Microgravity smoldering combustion experiments aboard the China recoverable satellite SJ-8 [J]. *Space Sci.*, 2008, **28**(1):22-27. In Chinese (王双峰, 尹永利. 卫星搭载聚氨酯泡沫闷烧实验 [J]. 空间科学学报, 2008, **28**(1):22-27)

[11] Dai Feng, Tang Dexiao, Fu Yonghui, *et al.* Fatigue life-span analysis on spacecraft electronic components [J]. *Comp. Aided Eng.*, 2010, **19**(002):56-59. In Chinese (代锋, 唐德效, 付永辉, 等. 航天器电子元器件疲劳寿命分析 [J]. 计算机辅助工程, 2010, **19**(002):56-59)

[12] Yu Qiang, Yu Haofeng, Liu Wei. Integrated control for crystal growth furnace in space [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(1):87-92. In Chinese (于强, 俞号峰, 刘威. 空间晶体生长炉综合控制方法 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(1):87-92)

[13] Yu Tao. Selection of flowmeter [J]. *China Metrol.*, 2006 (Z1):42-43. In Chinese (余涛. 流量计选型之我见 [J]. 中国计量, 2006(Z1):42-43)

[14] Fu Chungan. Selections of mass flowmeters [J]. *Low Temp. Specialty Gases*, 2002, **20**(4):26-29. In Chinese (春干. 质量流量计的选用 [J]. 低温与特气, 2002, **20**(4):26-29)