

文章编号: 2097-1974(2024)04-0095-06

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20240416

# MEMS 传感器及其在引信高动态环境中的应用

相干, 黄贇, 高宗, 龙小武  
(北京航天长征飞行器研究所, 北京, 100076)

**摘要:** 当前在引信环境力敏感中, 常使用高动态环境下过载作为一级动作要素, 通常以惯性模块在过载加速度下的运动行程来作为一级动作使用, 惯性模块受限于机械运动, 在电气系统中不易集成、可测试性较差。针对以上问题提出并设计了一种基于微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 传感器技术, 实现引信高动态环境下的动作, 介绍了 MEMS 过载识别系统原理、组成及功能、软件工作流程及地面试验验证情况。试验结果表明, 该环境力识别方式适用范围广, 可以显著提升引信系统设计灵活性, 易于系统集成。

**关键词:** 引信; 高动态; MEMS; 滤波电路; 过载

中图分类号: TJ43; V44

文献标识码: A

## MEMS Sensor and Application in the Fuze High Dynamic Environment

XIANG Gan, HUANG Ze, GAO Zong, LONG Xiaowu  
(Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing, 100076)

**Abstract:** Currently, in fuze two levels of environmental force arming, high dynamic overload is often used as one insurance element. Generally, one arming method is used of the inertia mass block's movement trip under trajectory overload. Mass blocks are limited by mechanical movement and are difficult to integrate in fuze systems, and is poor in testability. A scheme based on MEMS sensor technology is proposed and designed to arm the fuze. The principle, composition, function of the system, software workflow and the test and verify situation are introduced. This method has a wide scope of use can improve the flexibility of fuze systems and is easy to system integration.

**Keywords:** fuze; high dynamic; micro-electro-mechanical system; filter circuit; overload

### 0 引言

随着微电子、微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)、芯片集成技术的进步, 引信系统也向小型化、一体化方向发展, 以求最大化提高引信的安全性、可靠性及可测试性水平, 提高引战配合效率。近几年中国 MEMS 技术在引信领域中的应用, 尤其是在引信安全保险系统中的应用已经成为引信研究的一个重要方向<sup>[1-4]</sup>。

引信安全与解除保险部分功能用于敏感飞行器飞行过程中两级不同环境力, 机电引信中一般使用惯性模块在飞行器飞行中某一加速度下的运动行程来解除保险控制, 但惯性模块在引信系统中可测试性较差, 不易集成使用<sup>[5]</sup>。

利用 MEMS 加速度传感器, 通过相关电路设

计, 能够代替机械惯性块, 实现加速度开关的小型化、固态化。本文在某电气系统研制中, 利用 MEMS 加速度传感器敏感弹道高动态环境, 通过和控制电路进行集成, 能够根据不同弹道过载阈值实现解除保险安全控制, 提高了引信系统设计的灵活性和可靠性。

### 1 安全控制器硬件电路设计

安全控制器作为远程控制终端, 和弹载飞控机采用 CAN 总线接口进行信息及指令交互。安全控制器主要由 DSP 处理器电路、一级动作电路、状态监测电路、供配电电路、火工品电路、RS422 接口电路、MEMS 传感器采集电路、CAN 接口电路等组成。设备原理见图 1。

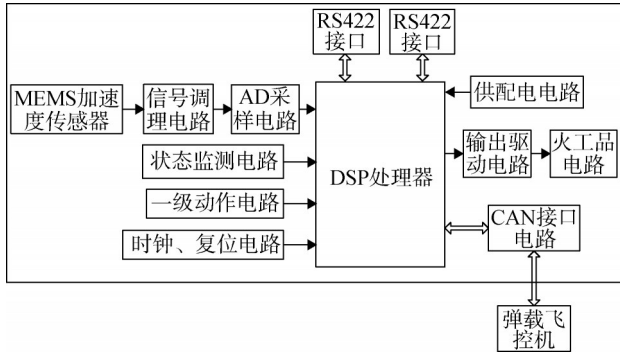


图1 安全控制器原理

Fig.1 Block diagram of safety controller principle

### 1.1 电路原理

硬件电路以TI公司的TMS320F28335芯片为控制核心，加速度传感器采用美国COLIBRYS公司生产的MEMS加速度传感器VS系列产品，量程为±10g，灵敏度为200 mV/g，分辨率小于0.6 mg，工作带宽为2 400 Hz。设计了2路RS422接口与安全机构和测距模块进行数据交互。与弹载飞控机通信设计了CAN接口电路，通信速率为500 kbit/s。

一级动作电路通过敏感飞行中某种环境力形式给出，通过3路光电耦合器隔离采样，实现冗余识别，在DSP程序中采用表决方式对一级信号进行判决，满足一级动作条件时，控制一级火工品电路动作，驱动安全机构拔销器拔销，解除安全机构电雷管火工品的一级隔离。

MEMS加速度传感器输出的信号无法被DSP直接采样，其输出信号需经过调理电路、低通滤波电路、高精度运放电路和限幅控制电路后，进入AD采样电

路。MEMS信号调理电路组成如图2所示。

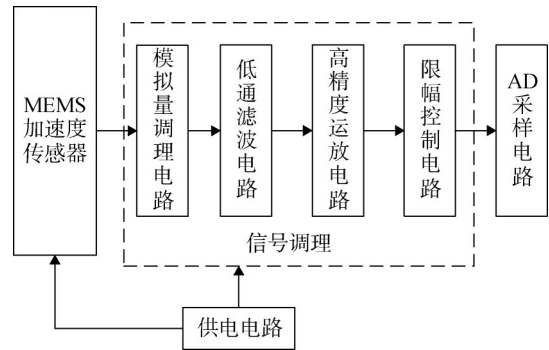


图2 MEMS信号调理电路组成

Fig.2 Block diagram of signal conditioning circuit

传感器信号经信号调理电路限幅控制后，进入DSP芯片AD模块采集，DSP片内自带16通道、12位ADC采集模块，最高采样速率为12.5 MHz。

### 1.2 低通滤波电路

滤波电路采用十阶线性相位（贝塞尔）滤波器，相位失真小，理论上信号频率为1.5倍截止频率时信号衰减为57 dB，2倍截止频率时为60 dB，6倍截止频率时超过80 dB。线性相位滤波器LTC1569采用单电源供电+5 V供电，输入信号范围 $V_{pp}=3.6 V$ ，加速度敏感单元输出信号范围为0.5~4.5 V，需通过高精度调理电路，以满足LTC1569输入信号范围。

该滤波电路如图3所示，图3中电阻R5用于设置LTC1569的低通截止频率，R7、R8、C7、C3用于设置二阶低通滤波电路的截止频率，R6、R7用于调节放大倍数。

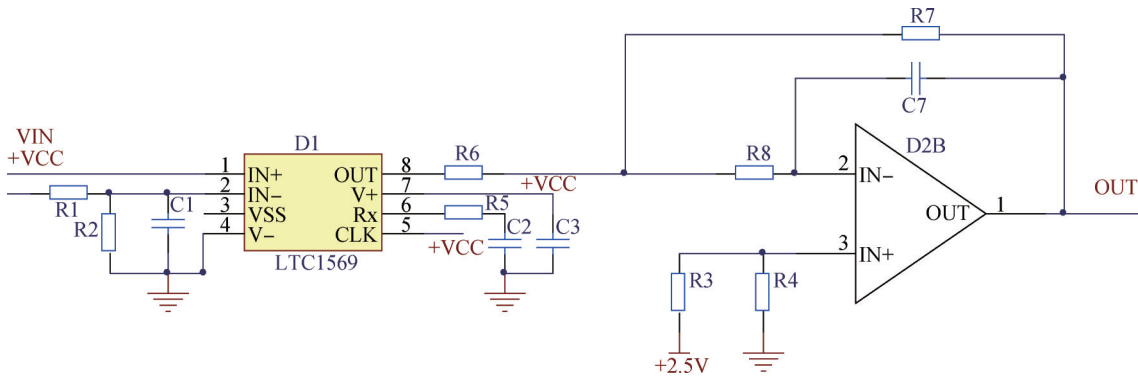


图3 低通滤波电路

Fig.3 Low pass filter circuit

该滤波器直流偏置误差小（±8 mV之内），能满足信号输出精度和一致性的要求。但是输出信号会附加开关噪声，设计中采用二阶无限增益低通滤波电路

以滤除LTC1569自身产生的噪声，截止频率选为50 Hz。采用二阶无限增益低通滤波电路后，输出信号反相，采用反相电路使信号恢复至原始相位。

### 1.3 运放电路

为满足模拟信号输出范围和对应的特定过载值的设计要求，对滤波输出的信号进行减法调理，减去 MEMS 敏感头输出信号中的基准偏置电压，并对其放

大处理，使输出电压量程为 0~2.5 V。运放电路原理如图 4 所示。为保证输出模拟信号 2% 的精度，各级调理电路均采用高精度电阻。

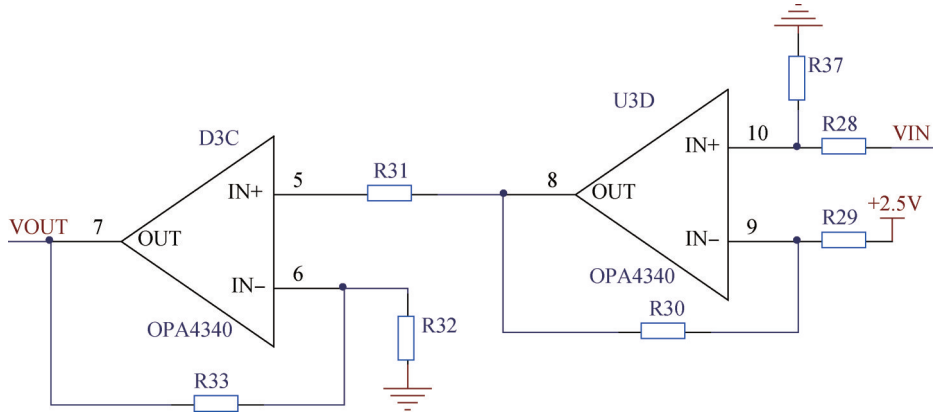


图4 高精度运放电路

Fig.4 High-precision amplifier circuit

## 2 MEMS 过载识别的软件设计

安全控制器软件采用模块化设计，采用 C 语言和汇编混合编程，程序运行于 TMS320F28335 芯片中。程序采用分层化设计，分为硬件物理层、总线接口层和功能层 3 个层级。3 个层级逐级调用，底层硬件变

动不影响顶层软件调用关系，分层封装使软件功能架构清晰，便于各模块扩展，易于软件升级。

### 2.1 软件架构

软件整体架构如图 5 所示。

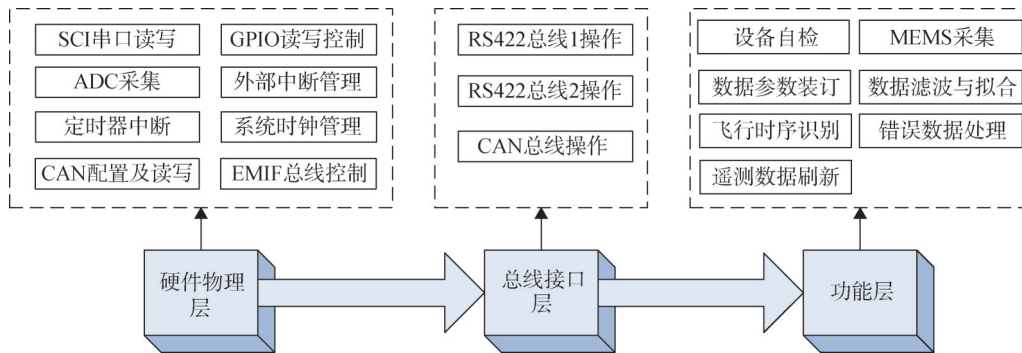


图5 软件整体架构

Fig.5 Overall software framework

a) 硬件物理层用于对 DSP 硬件各外设寄存器进行配置和操作，对芯片内部 RAM 和 Flash 存储空间进行地址分配，实现各硬件外设的控制操作和状态读取，硬件物理层分为系统时钟管理、SCI 串口读写与中断操作、GPIO 读写控制、ADC 采集、CAN 配置与读写、定时器中断、外部中断处理等，将对底层硬件操作封装为若干功能函数供总线接口层调用。

b) 总线接口层包括 RS422 总线操作和 CAN 总线操作，422 总线分别用于与测距模块和安全机构的串

口通信，CAN 总线用于与弹载飞控机进行数据交互，422 总线接口实现了串口标准帧组帧、CRC 校验、数据区填充与提取、帧头帧尾识别等操作。RS422 串口波特率为 115 200 bit/s，奇校验，全双工模式。CAN 采用中断方式，波特率为 500 kbit/s，半双工模式。CAN 总线接口层实现了时序指令提取、读缓冲区和写缓冲区数据读写、指令响应处理等功能，其中对硬件的操作通过调用物理层各功能函数进行。

c) 功能层实现流程和时序控制，根据全弹飞行

时序编写,接收弹载飞控机时序指令,实现与系统内各设备自检、装订、时序指令识别、周期性遥测数据刷新、错误数据处理重试、MEMS采集、数据滤波与拟合、各逻辑控制等操作。

### 2.2 软件控制流程

整个软件流程见图6。需要注意的是在未完成硬件配置初始化情况下,顶层软件无法调用底层函数,此时无法响应外部指令,配置过程大致需150 ms。

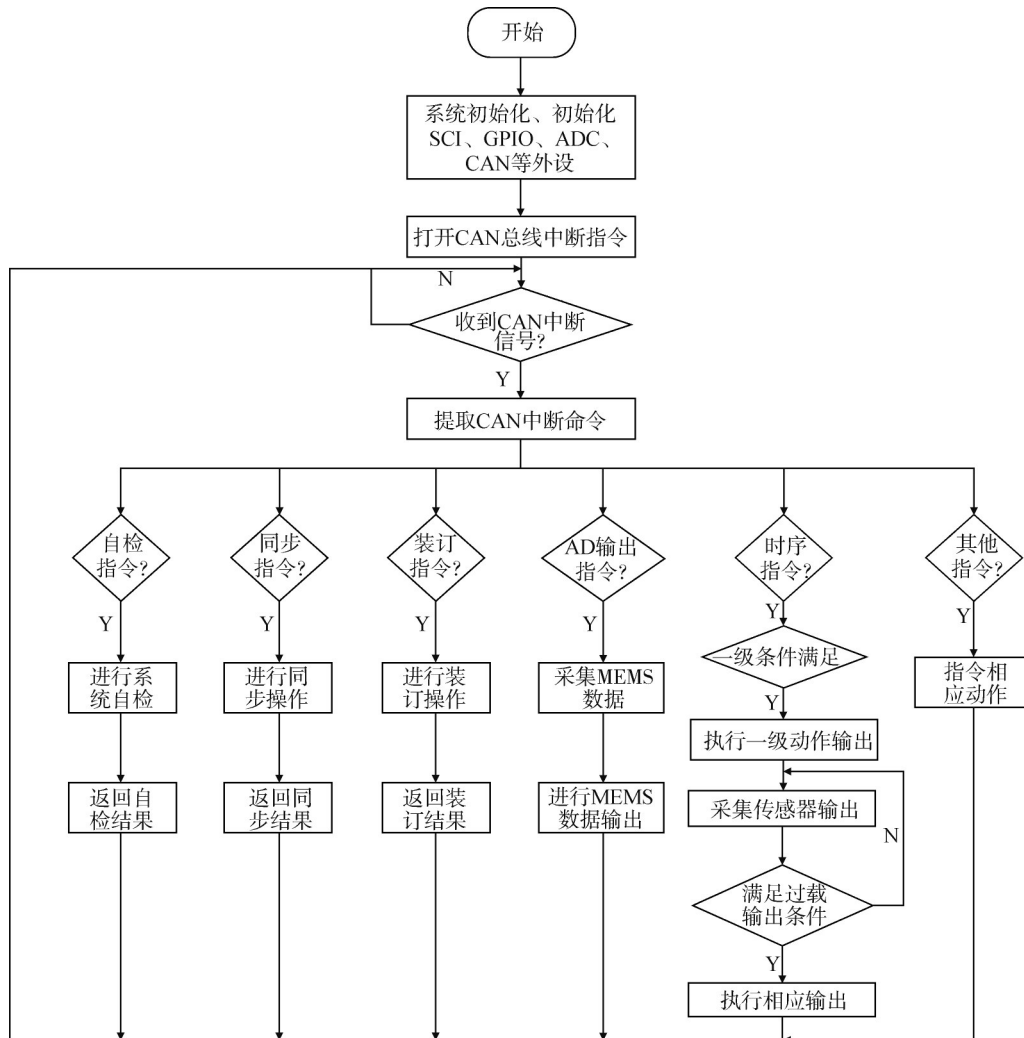


图6 顶层软件流程

Fig.6 Top level software flowchart

### 2.3 飞行过载解保方法

MEMS数据采集在一级条件满足后开始执行,在飞行器飞行中法向过载变化较大时,通过滑窗方式,在每一个采集窗口期 $T_0$ ,通过AD中断方式连续采集 $N$ 个电压值,将电压数据缓存进DSP内部RAM,对数据做如下处理:

- a) 去掉采集数据中明显过大、过小数据,剔除AD电压野值;
- b) 对去掉野值后的数据进行均值处理,求出平均值;
- c) 在该时间窗内,如果均值大于某一阈值 $a_0$ ,

记该均值为 $a_1$ ;

d) 开启下一时间窗采集周期,重复步骤a~c,若满足步骤c,则记录该均值为 $a_2$ ,否则舍弃 $a_1$ 和 $a_2$ ,重新开启下一采集时间窗;

e) 继续进行重复步骤a~c,若满足步骤c,则记录该均值为 $a_3$ ,否则舍弃 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ ,重新开启下一采集时间窗。

当且仅当 $a_3 > a_2 > a_1 > a_0$ 时,认为过载满足二级动作条件,DSP程序控制GPIO口完成二级动作操作,驱动相应火工品动作,同时将遥测数据进行更新处理。

MEMS数据采集处理流程见图7。 $T_0$ 滑窗周期根

据弹道过载情况可以调整。

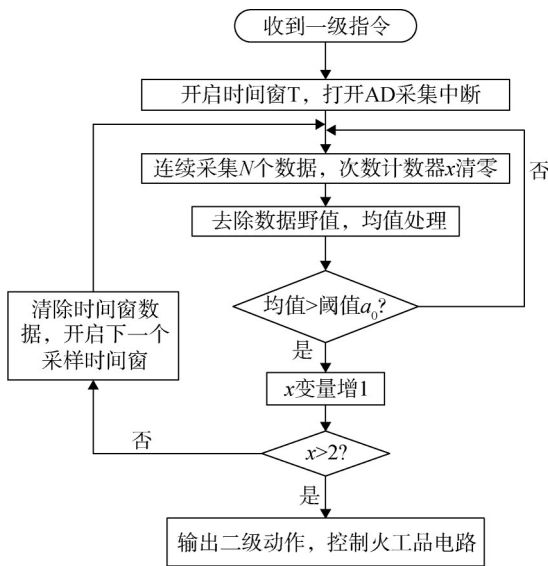


图7 MEMS 数据采集处理流程

Fig.7 MEMS data collection and processing flow

### 3 实施效果

该安全控制器在设计完成后进行了地面加速度试验和全系统电气试验，试验中获取了MEMS加速度输出数据，对相关数据进行了分析比对。

#### 3.1 单机离心试验验证情况

安全控制器在加速度实验室进行了离心标定试验，测试现场如图8所示，测试结果如表1所示，可以看出MEMS实际输出过载值与理论输出过载值一致性良好，误差均在1%范围内。



图8 离心试验现场

Fig.8 Centrifuge test site

表1 离心试验测试结果

Tab.1 Centrifuge test results

试验加速度/g	理论值/V	实际采样值/V	误差/%
0	0	0.001791	0.07
1	0.25	0.24	-0.40
2	0.5	0.489	-0.44

续表 1

试验加速度/g	理论值/V	实际采样值/V	误差/%
3	0.75	0.736	-0.56
4	1	0.988	-0.48
5	1.25	1.24	-0.40
6	1.5	1.492	-0.32
7	1.75	1.748	-0.08
8	2	2.004	0.16
9	2.25	2.263	0.52
10	2.5	2.494	-0.24

### 3.2 系统试验情况

在某次全系统电气产品试验技术测量中，内部MEMS传感器零位电压数值如图9所示，数据均保持在0.00~0.07 V，满足设计值0~0.25 V要求。

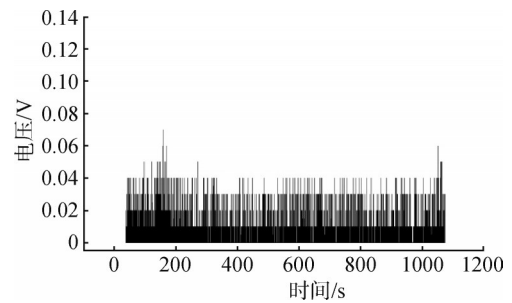


图9 传感器数据零位电压

Fig.9 Zero position voltage of sensor data

该试验中，将MEMS输出电压采集后通过CAN总线返给弹载遥测系统，通过与弹载惯组数据比对，可以看出MEMS输出过载曲线与惯组输出数据基本吻合，数据一致性良好，通过对遥测数据进行分析，可以看出安全控制器采集过载加速度准确，动作时刻和实际飞行情况吻合，实现了预期功能。

### 4 结束语

基于MEMS加速度传感器敏感引信高动态环境，实现相应控制的安全控制器已经成功应用于引信电气系统，经试验证明MEMS传感器敏感精度高，电路设计灵活，能够解决惯性块装弹后不易测量问题，易于根据不同动态环境设置对应阈值，飞行环境适应性强，易于实现引信系统功能集成。

随着MEMS技术的日益成熟，越来越多的引信功能单元趋向于使用MEMS技术来代替机械结构件实现安全与解除保险逻辑控制，该设计方案具有广泛的适用范围和较高的实用价值。

## 参 考 文 献

- [1] 马少杰. 引信工程基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.  
MA Shaojie. Fundamental of fuze engineering[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010.
- [2] 王辅辅, 姜文忠. 微机电技术在引信中的应用综述[J]. 探测与控制学报, 2016, 38(3): 22-28.  
WANG Fufu, LOU Wenzhong. Overview of the the application of micro electro-mechanical technology in fuzes[J]. Journal of Detection & Control, 2016, 38(3): 22-28.
- [3] 高建忠. 微型引信 MEMS 安装置及其关键技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2008.  
GAO Jianzhong. Research on micro fuze MEMS security device and its key technologies[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2008.
- [4] 刘靖, 石庚辰. 微机电系统技术及在引信中的应用[J]. 现代引信, 1999(3): 20-26.  
LIU Jing, SHI Gengchen. Overview of the the application of micro electro-mechanical technology in fuzes[J]. Modern Fuze, 1999(3): 20-26.
- [5] 孙磊, 张河, 周晓东. 一种微机电(MEMS)引信安全系统[J]. 探测与控制学报, 2004, 26(2): 10-12.  
SUN Lei, ZHANG He, ZHOU Xiaodong. Design of micro electro-mechanical system fuze[J]. Journal of Detection & Control, 2004, 26(2): 10-12.

## 作 者 简 介

- 相干 (1979—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为引信系统设计。  
黄贲 (1989—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为弹载电子设备设计。  
高宗 (1985—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为引信系统设计。  
龙小武 (1977—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为引信系统设计。

(上接第 46 页)

- [3] LI Huitong, ZHAO Yang, HUANG Yixin. Missile stage separation simulation considering complex factors[C]. Hangzhou: IEEE 2015 34th Chinese Control Conference, 2015.
- [4] 沈治, 朱广生, 吴亚东, 等. 基于爆炸激波管的固体火箭级间热分离天地差异研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51(10): 85-97.  
SHEN Zhi, ZHU Guangsheng, WU Yadong, et al. Differences of chamber pressure variations during stage separation between flight and detonation-shock-tube-based ground tests[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2021, 51(10): 85-97.
- [5] 杨钢, 徐小威, 高隆隆, 等. 高压气体定容充放气的特性[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(3): 42-46.  
YANG Gang, XU Xiaowei, GAO Longlong, et al. Characteristics of isovolumetric charge and releasing of high-pressure gas[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010, 36(3): 42-46.
- [6] 李超, 梁浩, 王飞, 等. 容器放气性能研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 163-165.  
LI Chao, LIANG Hao, WANG Fei, et al. A study of the outgassing characteristic of a vessel[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(1): 163-165.
- [7] 王保国. 气体动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.  
WANG Baoguo. Gas dynamics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005.
- [8] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2007.  
SHEN Weidao, TONG Jungeng. Engineering thermodynamics[M]. 4th edition. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [9] SZENTE V, MOZER Z, TAJTI A. Experimental investigation on pneumatic components[C]. Budapest: Proceedings of the 12th International Conference on Fluid Flow Technologies, 2003.

## 作 者 简 介

- 李晓豪 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固体火箭发动机试验技术与装备。  
潘武贤 (1982—), 男, 研究员, 主要研究方向为固体发动机测试技术。  
李广武 (1962—), 男, 研究员, 主要研究方向为导弹武器安全性试验与测试技术。  
左红星 (1987—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为固体火箭发动机地面试验技术。  
罗驭川 (1995—), 男, 工程师, 主要研究方向为固体火箭发动机地面试验技术。