

火箭发动机试验电磁阀电流隔离式测量电路

凌思睿, 丁博深

(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘要:火箭发动机地面试验中,需要对发动机和试验工艺系统的大量电磁阀进行控制和状态记录,要求电磁阀电流测量系统具有较高的静态精度和动态性能。为解决传统测量方法存在的问题,使用DC-DC模块和TPS717进行隔离供电,INA240放大 $10\text{ m}\Omega$ 采样电阻上的电压,AMC1311进行信号隔离,INA826调整增益并输出,实现了一种集成式的电流测量电路。误差分析表明电路总不可校正误差为 0.144% 。对实物电路板进行了校准测试,校准后精度优于 0.025% ,满量程 -3 dB 带宽为 110 kHz ,可广泛应用于火箭发动机试验等电流测量任务中。

关键词:电流测量;电磁阀;隔离;反电势抑制;温漂

中图分类号:V433, TM933.1 文献标识码:A 文章编号:1672-9374(2020)05-0102-07

Isolated solenoid valve current measurement circuit in rocket engine test

LING Sirui, DING Boshen

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: In the ground test of rocket engine, a large number of solenoid valves in the engine and test process system were needed to be controlled and record state. The solenoid current measurement system was required to have high static accuracy and dynamic performance. Aiming at the problems in traditional application, an integrated current measurement circuit was realized. The DC-DC modules and TPS717 were used for isolated power supply. Voltage on the $10\text{ m}\Omega$ shunt resistor was amplified by an INA240 and was isolated by an AMC1311. An INA826 was used for gain adjustment and output. In error analysis, test and calibration prove that the total uncorrectable error of the circuit is 0.144% . The calibrated accuracy is better than 0.025% . The -3 dB bandwidth of full output range is 110 kHz . This circuit can be widely used in the driving of various applications of current measurement such as in rocket engine tests.

Keywords: current measurement; solenoid valves; isolation; inverse voltage suppression; temperature drift

收稿日期:2020-02-11;修回日期:2020-03-25

基金项目:国防科技工业技术基础质量与可靠性项目([2018]1621)

作者简介:凌思睿(1988—),男,硕士,工程师,研究领域为液体火箭发动机地面试验测控技术

0 引言

火箭发动机是火箭、卫星等各类航天器的动力来源。在地面试验时,需要对发动机和试验工艺系统的大量电磁阀进行控制和状态记录,确保系统正常运行。因此,电磁阀电流参数的获取至关重要。一方面,电磁阀通电时的电流大小是阀门工作状态的判断依据;另一方面,电磁阀开启和关断时的电流曲线用于计算阀门响应特性参数^[1-2]。火箭发动机设计单位对电磁阀电流测量系统的常见性能要求为:静态精度优于0.5~1%, -3 dB带宽不小于10~20 kHz。

在火箭发动机试验中,传统的电流测量方法是在电磁阀回路中串联一个0.5 Ω 以下的高功率水泥电阻或铝壳电阻并测量其两端电压差^[3-4],但此种方法存在如下问题:①采样电阻本身精度只有1%,温度系数高达100~300 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 。电阻上耗散功率导致的温漂加上后端电路约 $\pm 0.1\%$ 的误差,精度不能满足要求;②采样电阻位于电源高侧时,其共模电压可高达30 V以上,超出了大部分数据采集系统的输入电压范围,必须使用独立的信号隔离模块把负载回路隔离,带来高昂的成本;③电阻位于低侧时,无法检测出电源正端的对地故障,而且负载电流在地线上产生的干扰电压会耦合进测量系统。此外,还可以利用霍尔电流传感器进行测量^[5-6],但其测量精度较低,一般只能用在要求不高的试验工艺系统上。

为解决上述问题,本文设计了一种具有电流采样、信号放大和隔离输出功能的电磁阀电流测量电路,增益可根据需求调整,适用于高侧或低侧电磁阀电流测量。

1 整体方案

本文的电流测量电路主要分为电流检测电路、隔离电路、输出电路3个部分,如图1所示。电流检测电路部分主要功能是在电磁阀电流上串联小阻值采样电阻,再用电流检测放大器 INA240 把电阻两端电压放大。该电压经隔离放大器 AMC1311 隔离后,利用仪表放大器 INA826 转为单端电压信号输出到数据采集系统。2个 DC-DC 模块为输入和输出端提供独立的隔离供电。在最大3 A的电磁阀电流下,采样电阻 R_{SHUNT} 两端电压为30 mV,隔离放大

100倍后输出3 V电压,电流测量灵敏度为1 V/A。

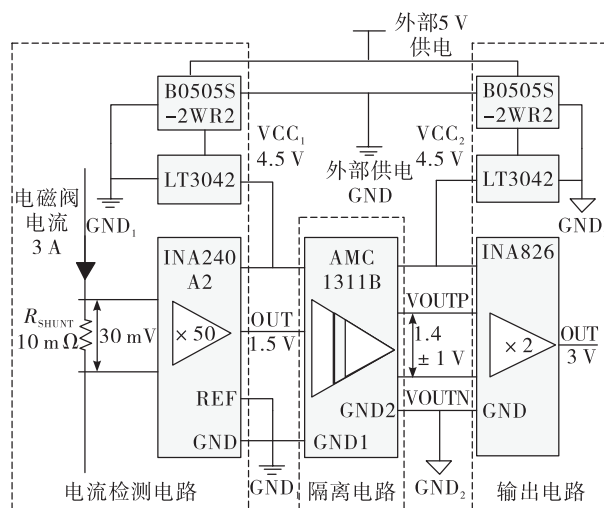


图1 电流测量电路功能框图

Fig. 1 Functional block diagram of the current measurement circuit

2 供电电路设计

为保护后端器件并隔离干扰,把外部5 V供电经过2个隔离式 DC-DC 模块后,输出2路5 V的隔离电源,分别为电流测量电路输入和输出端供电,实现了电气隔离。选用了金升阳公司的 B0505S-2WR2 隔离非稳压 DC-DC 模块。该产品适用于:①输入电压比较稳定(电压变化范围 $\pm 10\%$);②输入输出之间要求隔离电压 $\leq 1\,500\text{ VDC}$;③对输出电压稳定度要求不高。其关键参数为:开关频率100 kHz,纹波电压75 mV_{p-p},输出电压5.5 V,最大电流400 mA,效率高达84%,能满足本设计的供电需求。

DC-DC 电路原理如图2所示。图中 $C_1 = C_2 = 4.7\text{ }\mu\text{F}$,与6.8 μH 的差模电感 L_{DM} 组成了电磁干扰滤波器,防止外部交流线路产生的噪声进入。 $C_{\text{OUT}} = 10\text{ }\mu\text{F}$ 为输出滤波电容。需要注意的是,电路输出最小负载不能小于额定负载的10%。

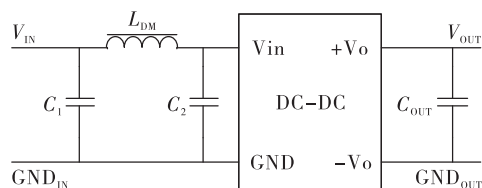


图2 DC-DC 电路原理图

Fig. 2 Functional block diagram of the DC-DC circuit

电流检测电路中的精密放大器需要低噪声电源供电。在隔离式 DC-DC 模块供电的基础上,用高电源抑制比(Power Supply Rejection Ratio, PSRR)的低压差线性稳压器(Low-Dropout, LDO)进行后期稳压。根据电流检测电路各放大器的输入输出范围,选择了凌力尔特(Linear Technology)公司生产的 LT3042 型 LDO 芯片,其内部为一个高精度电流基准后接一个高精度电压缓冲器,是当前业界 PSRR 最高的稳压器之一^[7],在 100 kHz 处的 PSRR 高达 78 dB,可以有效减小 DC-DC 模块产生的开关噪声。其关键参数为:最大输出为 200 mA 时,压差 350 mV、输出噪声 0.8 μV 。

LDO 电路原理如图 3 所示。LT3042 内部 100 μA 电流源从 SET 引脚引出,在 R_{SET} 上产生的电压经缓冲后输出,有 $V_{\text{OUT}} = 100 \mu\text{A} \cdot R_{\text{SET}}$ 。根据 DC-DC 模块的输出特性和电流测量的需求,选择 $R_{\text{SET}} = 45.3 \text{ k}\Omega$,即可设置 $V_{\text{OUT}} = 4.5 \text{ V}$ 。然而要获得理想的精度、稳定性和带宽,必须注意:① C_{IN} 和 C_{OUT} 均选择 4.7 μF ,低 ESR 和低 ESL, X7R 电介质的陶瓷电容;② R_{SET} 选择 10 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 的低温漂电阻;③用低漏电流的 $C_{\text{SET}} = 10 \text{ nF}$ 旁路 SET 引脚上的干扰;④在电路板两面用电位与 V_{OUT} 相等的保护环把 SET 引脚保护起来,并彻底清洁电路板,防止电流泄漏;⑤输出电压反馈信号 OUTS 应直接从 C_{OUT} 的正端取;⑥ R_{SET} 、 C_{SET} 的负端应从 C_{OUT} 的负端取,并使 C_{IN} 和 C_{OUT} 负端之间的距离尽量短。

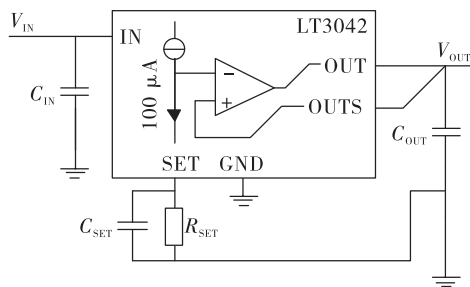


图 3 LDO 电路原理图

Fig. 3 Functional block diagram of the LDO circuit

3 电流检测电路设计

3.1 采样电阻

火箭发动机电磁阀常用电流范围约 0.5 ~ 1.5 A。选用了厚声公司 Metal Strip 系列金属箔电阻,精度

1%,阻值为 10 m Ω ,温度系数仅为 $\pm 30 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 。额定功率 3 W,尽可能减小温升。

3.2 电流检测放大器

为了放大采样电阻上的 30 mV 电压,选用 TI 公司的 INA240A2 精密电流检测放大器,其固定增益 50 V/V,也可根据测量需要选取其他增益的型号。该芯片输入共模电压范围能覆盖常用发动机电磁阀的工作电压。具有增强型 PWM 抑制功能,可有效减小负载通断电时共模电压变化而产生的输出瞬变及恢复纹波^[8]。采用零温漂架构,关键参数为:输入失调电压 $\pm 5 \mu\text{V}$,漂移 $\pm 50 \text{ nV}/^{\circ}\text{C}$,输入偏置电流 90 μA ,带宽 400 kHz,输出电压可低至 1 mV,非常适合用于测量火箭发动机电磁阀电流。电流检测放大器电路设计如图 4 所示。采样电阻到 INA240 输入端的引线应使用开尔文连接方式从焊盘中心引出,并使引线长度相同。REF1、REF2、GND 引脚和电源去耦电容的负端应在一处单点接地。

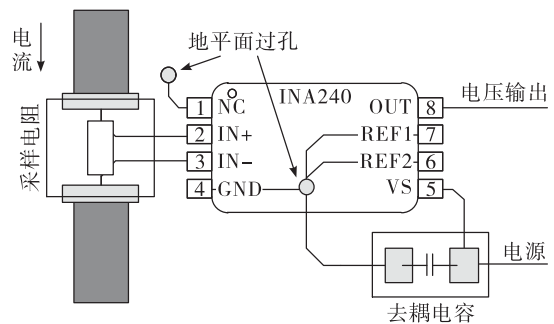


图 4 电流检测放大器电路原理图

Fig. 4 Functional block diagram of the current sensing circuit

3.3 反电势抑制

火箭发动机电磁阀是典型的感性负载,从通电状态断开时,其两端会产生数十到上百伏的反向电动势^[9],超出了电流检测放大器允许的共模电压范围,导致芯片烧毁。最常规的对策是用续流二极管与感性负载并联,可以释放线圈中的能量并迅速把反电势钳位^[10]。但是在火箭发动机电磁阀控制电路中为了加快能量释放和电磁阀关闭速度,经常会使用一个电阻与二极管串联后再与线圈并联,如图 5 中 D_1 和 R_1 所示。 D_1 是续流二极管,常用 1N4007; R_1 具体阻值根据发动机设计单位的要求选择或者短接。此时反电势尖峰的持续时间更短,但共模电压(Common Mode Voltage, V_{CM})峰值仍有数

十伏^[11],后端芯片不能承受。

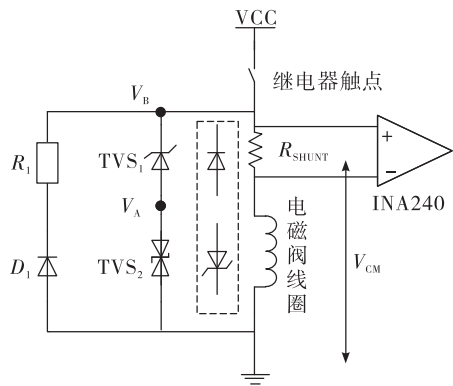


图 5 反电势抑制电路原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the back EMF(Electro-motive Force) suppression circuit

瞬态抑制二极管(Transient Voltage Suppressor, TVS)的两端加载超过其反向击穿电压(Break Down Voltage, V_{BD})的尖峰脉冲时,能以纳秒级的速度降低自身阻抗,使两端维持在钳位电压(V_{CLAMP}),具有响应速度快、瞬态功率大、漏电流低等优点。本文据此设计了改进的反电势抑制电路,关键元件 TVS₂为反向偏置的 TVS 二极管,如虚线框中所示。继电器触点断开时,TVS₂迅速击穿,把 V_A 钳位在 V_{CLAMP} 。此时 TVS₁也正向导通,因此 $V_B \approx -(V_{CLAMP} + 0.7)V$ 。继电器触点闭合时,TVS₁令本支路反向截止。在真实发动机电磁阀上测试了国内外 10 种标称 $V_{BD} < 4\text{ V}$ 的低电压 TVS 二极管,结果如表 1 所示。

表 1 10 种低电压 TVS 二极管钳位电压测试结果

Tab. 1 Clamping voltage test result of 10 low voltage TVS

生产厂家	型号	钳位电压/V
AMAZING(晶焱科技)	AZ6225-01F	4.7
Leiditech(雷卯电子)	ESD2511CDN	5.3
Leiditech(雷卯电子)	LC03CI	6.3
BORN(伯恩半导体)	PESD3V3L1BA-N	8.2
SINO-IC(光宇睿芯)	SEBLC03C	9.3
Applied Power(江苏应能)	AU3321D5	5.9
VISHAY(威世)	MSP3V3HM3/89A	6.3
VISHAY(威世)	VESD01-02V-G-08	5.7
PROTEK	PSD03-LF-T7	6.5
Littelfuse(美国力特)	SP4020-01FTG-C	6.6

仅有晶焱科技的双向 TVS 二极管 AZ6225 - 01F 可将 V_A 钳位在 -5 V 以内,使 R_{SHUNT} 上的 V_{CM} 满足 INA240 极限参数($-6 \sim 90\text{ V}$)的要求。TVS₁选用型号为 SMAJ54A 的 TVS 二极管,其反向漏电流仅 $1\text{ }\mu\text{A}$,可以提供额外的过压保护,也可以使用普通二极管。

3.4 隔离放大器

火箭发动机电磁阀的电源电压通常在 30 V 附近,大大超出常见数据采集系统允许的共模电压范围。此外,负载的地线上动态电流较大且与测量地之间存在一定阻抗,容易引入干扰信号。工程上一般采取电气隔离的手段解决安全和干扰问题。常见的模拟信号隔离方案有 4 种:①以 AD215、DataForth SCM5B 等为代表的独立隔离模块^[12-13],采用变压器耦合,性能最好但体积、功耗和价格都很高;②基于嵌入式系统,在 A/D 和 D/A 之间进行数字隔离^[14-15],一般精度和速度不能兼得;③利用精密线性光耦 HCNR201 等搭建电路^[16-17],使用比较灵活,但其温度系数较大;④基于 $\Delta - \Sigma$ 调制和开关键控调制(On-off Keying, OOK),电容隔离的隔离放大器^[18],在各种指标上取得了较好的平衡,如 ISO224 和 AMC1xxx 系列。

本文选用了 TI 公司的 AMC1311B 隔离式精密放大器,针对隔离式电压测量进行优化,增强型电隔离高达 7 kV ^[19]。其关键参数为:输入失调电压 $\pm 0.4\text{ mV}$,漂移 $\pm 3\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$,增益漂移 $5\text{ ppm}/^\circ\text{C}$,带宽 275 kHz 。可接受 $-0.1 \sim 2\text{ V}$ 的单端输入,并转化为单位增益的差分输出。可以有效地把电流检测侧和输出侧隔离,同时保持较高的精度。隔离放大器电路设计如图 6 所示,两侧的去耦电容都选用 1206 封装的陶瓷电容,输入输出信号线应尽可能短,并从电容和地层之间走线。

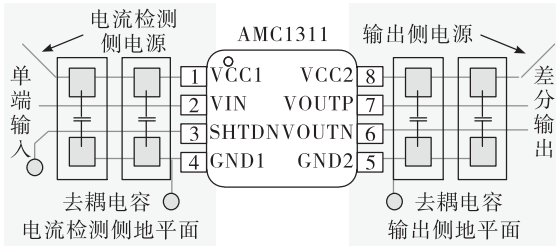


图 6 隔离放大器电路原理图

Fig. 6 Schematic diagram of the isolation amplifier circuit

3.5 仪表放大器

由于 AMC1311B 输出为 $1.44 \pm 1 \text{ V}$ 的差分信号,为了适应发动机试验台上不同的数据采集系统,需要把差分信号转成单端信号。仪表放大器是一种低成本、高性能的解决方案。本文选用了 TI 公司的 INA826,输入失调电压为 $\pm 40 \text{ }\mu\text{V}$,漂移为 $\pm 0.4 \text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$,带宽在 500 kHz 以上。仪表放大器电路设计如图 7 所示,增益设置电阻为固定电阻 R_{G1} ($47 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) 和可调电阻 R_{G2} ($5 \text{ k}\Omega$, $100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) 串联,可以减小可调电阻温漂产生的影响。增益设置为 2,可调范围约 $\pm 5\%$,覆盖采样电阻容差及前面 2 级放大器的初始增益误差。增益设置电阻对寄生电容敏感,应把附近的地层去除^[20]。

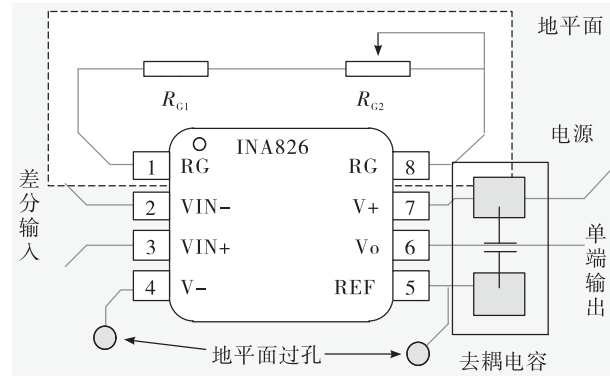


图 7 仪表放大器电路原理图

Fig. 7 Schematic diagram of the instrumentation amplifier circuit

4 测量误差分析

电流的测量精度除了取决于电路本身特性,还与电磁干扰、电缆阻抗等众多外部因素相关。其中一些误差如增益误差等容易进行校准,下面将只讨论包含温漂、噪声等在内的不可校正误差,统一折算到各级的输入端电压进行分析。由于本电路一般集成安装于机柜内,设环境温度为 $25 \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

4.1 基本误差

基本误差包括运放输入失调电压、输入偏置电流、共模信号等系统固有的不可校正误差源,如表 2 所示。

表 2 基本不可校正误差估算

Tab. 2 Uncorrectable error estimation of basic errors	
误差源	误差/ppm
INA240 输入失调电压	333
INA240 输入偏置电流	60
INA240 共模信号	251
AMC1311 输入失调电压	27
AMC1311 非线性	266
INA826 总输入失调电压	67
INA826 共模信号	10

4.2 温漂

温漂包括采样电阻、运放输入失调电压、增益等参数因为温度变化产生的漂移,如表 3 所示。

表 3 温漂导致的不可校正误差估算

Tab. 3 Uncorrectable error estimation of temperature drift	
误差源	误差/ppm
采样电阻温漂	900
INA240 输入失调电压温漂	100
INA240 增益温漂	30
AMC1311 输入失调电压温漂	120
AMC1311 增益温漂	300
AMC1311 非线性温漂	40
INA826 总输入失调电压温漂	28
INA826 增益温漂	600
INA826 增益设置电阻温漂	216

4.3 噪声

噪声误差主要考虑各级放大电路的电压噪声,如表 4 所示。

表 4 噪声导致的不可校正误差估算

Tab. 4 Uncorrectable error estimation of noise	
误差源	误差/ppm
INA240 输入电压噪声	700
AMC1311 输出电压噪声	147
INA826 输入电压噪声	20

4.4 总误差估算

上述各项误差之间是相互独立的,使用均方根方法对各项误差进行合成,估算出在 $25 \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ 的范

围内,总不可校正误差约为 0.1449%。其中温漂导致的误差最大,因此应尽可能保持使用环境和元件温度稳定,如加强机柜通风,在采样电阻上安装散热片等。

5 校准与测试

5.1 静态校准

为评估电流检测电路的静态精度,利用普源 DL3021A 电子负载的恒流模式调整负载电流,Keithley 2000 六位半数字多用表测量电流和输出电压,进行 3 个循环后用最小二乘法拟合工作直线。其中 1 个循环的结果如表 5 所示。测试结果显示其非线性 0.023%,重复性 0.030%,迟滞 0.028%,未校准时综合精度优于 0.09%,校准后工作直线的综合精度优于 0.025%。

表 5 稳态校准结果

Tab. 5 Calibration result of static measurement

实际值/A	原始 测量值/A	校准后 测量值/A	校准后 相对误差/%
0.500 060 8	0.499 171 1	0.500 088 9	0.001
0.999 244 9	0.998 054 3	0.999 191 0	-0.002
1.500 018	1.498 602	1.499 958	-0.002
1.999 998	1.998 491	2.000 067	0.002
2.499 995	2.497 614	2.499 409	-0.020
2.999 802	2.998 135	3.000 149	0.012
2.999 758	2.998 248	3.000 262	0.017
2.499 95	2.497 453	2.499 247	-0.023
2.000 048	1.998 675	2.000 251	0.007
1.499 92	1.498 666	1.500 022	0.003
1.000 023	0.998 940 3	1.000 077	0.002
0.500 054 5	0.499 231 9	0.500 149 7	0.003

5.2 动态响应测试

利用泰克 AFG3011C 波形发生器产生正弦波和方波信号,用普源 MSO5072 示波器测试输出信号,结果显示本电路小信号 -3 dB 带宽为 235 kHz;受 INA826 的压摆率限制,满量程输出时 -3 dB 带宽为 110 kHz。方波信号测试结果如图 8 所示,上升时间 1.88 μ s,下降时间 1.86 μ s,动态性能满足发动机电磁阀电流测量要求。

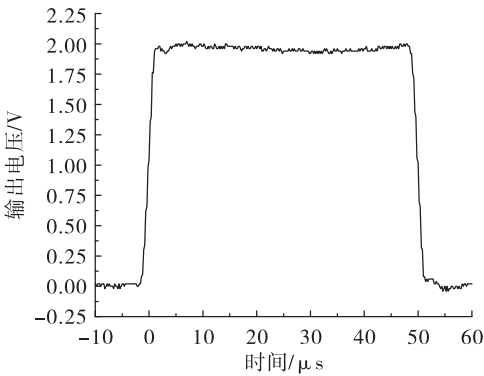


图 8 电路阶跃响应

Fig. 8 Step response of the circuit

5.3 电磁阀负载测试

用本电路测量某型号火箭发动机电磁阀的电流信号,如图 9 所示。在额定电流 1.65 A 时,噪声为 2.53 mA,比传统测量方法下降了 84%,取得了良好的应用效果。

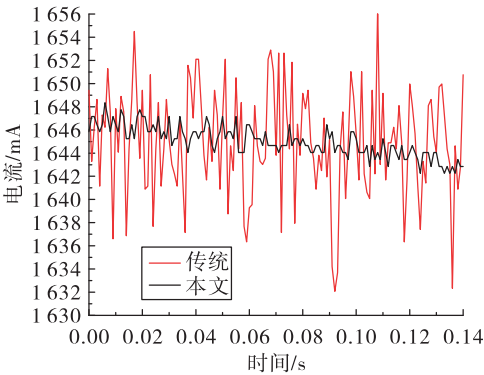


图 9 本文电路与传统测量方法测量效果对比

Fig. 9 Comparison of the effect between this circuit and traditional measurement methods

6 结语

本文设计的电磁阀电流测量电路具有电流采样、信号放大、隔离输出功能。反电势抑制电路确保其在感性负载下可靠工作。误差分析得出本电路的总不可校正误差为 0.144 9%。实物电路板校准后精度优于 0.025%,满量程 -3 dB 带宽为 110 kHz,与传统测量方法相比,在性能和成本上均具有明显优势,如表 6 所示。本电路已于多个火箭发动机试验台中使用,对采样电阻和增益进行适应性修改后,也可应用于其他电流测量任务中。

表 6 两种测量方法性能价格对比
Tab. 6 Performance and price comparison of two measurement methods

项目	测量要求	传统方法	本文方法
静态精度(含温漂)/%	0.5~1	1.5~2	0.145
-3 dB 带宽/kHz	10~20	10 ⁴	110
上升时间/ μ s	—	35	1.88
理论噪声/mV _{P-P}	—	2.145	10
物料成本/元	—	1 300	150

参考文献:

[1] 张卫东,李力,张茂森,等.基于虚拟仪器和 PXI 总线的电磁阀控制系统研制[J].火箭推进,2015,41(1):112-116.
ZHANG W D, LI L, ZHANG M S, et al. Development of solenoid valve control system based on virtual instrument and PXI bus[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(1): 112-116.

[2] 郝贵欣,周吉,张华.一种电磁阀智能测试系统[J].火箭推进,2013,39(5):92-97.
HAO G X, ZHOU J, ZHANG H. Intelligent testing system for solenoid valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(5): 92-97.

[3] 刘万龙,牛向楠,李全令,等.一种姿轨控发动机地面试验控制系统设计[J].火箭推进,2015,41(2):114-117.
LIU W L, NIU X N, LI Q L, et al. Design of a ground test control system for attitude and orbital control engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(2): 114-117.

[4] 孙新新,常莹.电磁阀电流曲线测试电路的设计[J].计量技术,2019(4):3-5.

[5] 王明迪,李建勋.霍尔电流传感器在阀门电流测试中的应用[J].微型电脑应用,2009,25(11):17-19.

[6] 赵闻达,苏永清.电磁阀驱动电源电流检测系统的精度分析[J].测控技术,2017,36(2):153-156.

[7] Analog Devices. LT3042 20V、200mA、超低噪声、超高 PSRR RF 线性稳压器数据手册 [EB/OL]. [2020-02-

22]. https://www.analog.com/media/cn/technical-documentation/data-sheets/3042f_chs.pdf.

[8] Texas Instruments. INA240 具有增强型 PWM 抑制功能的高侧和低侧双向零漂移电流检测放大器数据表 (Rev. B) [EB/OL]. [2020-02-22]. <http://www.ti.com/cn/lit/ds/symlink/ina240.pdf>.

[9] 沈福东.浅谈直流感性负载消除反电动势电路设计[J].科技创新导报,2012,9(15):55.

[10] 余力凡,马红梅.运载火箭控制系统电磁继电器消反峰电路分析与 MULTISIM 仿真[J].计算机测量与控制,2017,25(11):55-57.

[11] 弭艳,张红霞,马兵兵,等.基于双向 TVS 的电磁阀加速释放电路研究[J].计算机测量与控制,2019,27(8):182-187.

[12] 林时放,王建新,陈洲,等.一种基于 AD215 模块的低压电器通断试验电压测量装置[J].科技创新与应用,2016(30):50.

[13] 张亚维,史强强,姚锋刚.机载高速多通道隔离放大器设计[J].国外电子测量技术,2018,37(4):107-112.

[14] 孙建军,于克泳.隔离型 $\Sigma-\Delta$ 调制器技术在电机控制电流采样中的应用[J].电子产品世界,2018,25(12):56-58.

[15] 郑荟民.一种非标测试行业的隔离精密电压采集模块[J].通信电源技术,2019,36(11):82-83.

[16] 王博,仲维彬.基于 HCNR201 线性光耦的飞机高压信号隔离电路设计[J].中国科技信息,2019(24):28-29.

[17] 叶克江.线性光电耦合器的进一步线性化[J].压电与声光,2019,41(5):760-764.

[18] 张红勇,方军.ISO124P 器件为核心的隔离电路设计浅析[J].机电工程技术,2013,42(9):103-106.

[19] Texas Instruments. AMC1311x 高阻抗 2V 输入增强型隔离放大器数据表 (Rev. A) [EB/OL]. [2020-02-22]. <http://www.ti.com/cn/lit/ds/symlink/amc1311.pdf>.

[20] Texas Instruments. INA826 具有轨到轨输出的高精度、200 μ A 电源电流、3V 至 36V 电源仪表放大器数据表 (Rev. F) [EB/OL]. [2020-02-22]. <http://www.ti.com/cn/lit/ds/symlink/ina826.pdf>.