

doi:10.11857/j.issn.1674-5124.2017.08.027



高精度小电流恒流源的设计与实现

李骏霄¹, 王雪梅¹, 许哲¹, 官章健², 吴桐¹

(1. 火箭军工程大学控制工程系, 陕西 西安 710025; 2. 96714 部队, 福建 三明 365000)

摘要: 目前以 TL431 稳压管搭建的恒流源电路存在小电流输出状态下输出精度较低, 温度跨度大时工作电路的温漂较大, 且不具备抑制温漂能力, 在飞行器系统测试过程中无法全面地满足指标需求。该文对 TL431 恒流源做出改进, 加入精密运算放大器 OP77 及 π 型滤波电路以保证输出精度, 设计温度系数互补的电阻网络, 通过调整合适的补偿点降低恒流源整体温漂。实验结果表明: 改进后恒流源具有低温漂、高精度的优越性能。

关键词: 小电流; 高精度; 低温漂; 恒流源

文献标志码: A **文章编号:** 1674-5124(2017)08-0136-05

Design and realization of high precision and small current constant current source

LI Junxiao¹, WANG Xuemei¹, XU Zhe¹, GUAN Zhangjian², WU Tong¹

(1. Department of Control Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;
2. PLA, No.96714 Troop, Sanming 365000, China)

Abstract: The constant current source circuit, built by TL431 voltage regulator, has many disadvantages such as low output accuracy under small current output conditions, the huge temperature drift of working circuit under large temperature span conditions and the disability to inhibit the temperature drift, thus it cannot meet index requirements when testing aircraft system. In this paper, the constant current source was improved: ensured the output accuracy by adding precision operational amplifiers OP77 and π -type filter circuit, designed a resistor network with complementary temperature coefficient, adjusted the appropriate compensation point to reduce the overall temperature drift of the constant current source. Finally, a small constant current source with low temperature drift and high precision was designed and the experiment result show that the improved constant current source has superior performance.

Keywords: small current; high precision; low temperature drift; constant current source

0 引言

恒流源在现代计量测试领域应用十分广泛^[1], 文献[2]中提出使用恒流源供电可以提高标准灯的稳

收稿日期: 2017-02-03; 收到修改稿日期: 2017-04-01

作者简介: 李骏霄(1993-), 男, 山东曲阜市人, 硕士研究生, 专业方向为控制系统通用测试方法研究。

定性, 文献[3]中提到用恒流源测电阻可以获得比伏安法更高的精度。在对飞行器进行系统测试时, 飞行器运动参数的激励通常通过小电流恒流源来产生, 因此对于小电流恒流源的精度和稳定性提出了较高的要求。由于飞行器测试发射环境复杂, 外界温度变化跨度较大, 所以在保证小电流恒流源精度设

计的前提下,还必须对其温漂进行有效控制,提高稳定性。

以往由分离器件设计实现的恒流源,多采用 MOS 管、电压调整器件等,在环境温度变化时,通常无法保证输出电流的稳定性,同时电路设计复杂,占用空间较大,不利于电路的小型化、集成化^[4]。

TL431 与晶体管搭建的恒流源就是很常见的一种恒流源电路,它的原理简单、精密度高、温漂小,但这种恒流源的电源电压变化会影响输出电流大小,且负载的变化对恒流源影响也较大,影响其应用范围^[5]。本文以 TL431 恒流源电路为基础,进行了改进设计,通过仿真和实验验证了改进设计的小电流恒流源具有精度高、低温漂的特点。

1 常见 TL431 恒流源电路基本工作原理

常见的 TL431 恒流源由 TL431 元件和 NPN 三极管共同组成。电路原理图如图 1 所示,图中 R_s 为基准电阻,电流从 VCC 流向 I_{sink} 。恒流源的输出理论上为 $I_{\text{sink}} = V_+/R_s$ (A),恒流源的负载接在 V_+ 与 I_{sink} 中间^[6]。

分析 TL431 恒流源电路:电路中可控精密稳压源 TL431 起电压基准的作用,即 R_s 上流过的电流恒定不变。由元件性质可知 NPN 的集电极电流和发射极电流近似相等,通过这种方式使得 I_{sink} 保持恒定。若要产生小电流,则电阻 R_s 需要具备较高的阻值。由于高值电阻及 TL431 元件受温度变化会产生温漂,所以恒流源输出电流将会受到温度的影响^[7-8]。这一特性在输出电流为小电流的情况下尤为明显。

2 恒流源改进设计方案

2.1 整体改进方案

考虑到飞行器测试对环境的特殊要求,在本设计中将恒流源工作的环境温度视为主要影响因素。目前,提高电路温度稳定性的方法主要有恒温槽温度控制和局部温度控制,这两种方式均需要增加附加的电路和器件,增加了电路的体积和功耗,将会影响器件的寿命和可靠性^[9-10]。本文设计中利用低温漂电阻来进行温度补偿。在电路中设计正负温度系数不同的两种电阻网络,将正温度系数电阻和负温度系数电阻串接,使电路整体温度系数与电压基准温度系数互补,通过调整合适的补偿点来降低整个系统的温度系数,提高其温度稳定性。

综合考虑测试系统现有状况及工程现实可行性,分析并做出如下改进:

- 1) 利用 TL431BID 稳压器产生 2.5 V 稳定电压;
- 2) 加入精密运算放大器 OP77 保证压差;
- 3) 采用 $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 高精度可调电阻 R_2 、 R_4 ,同精

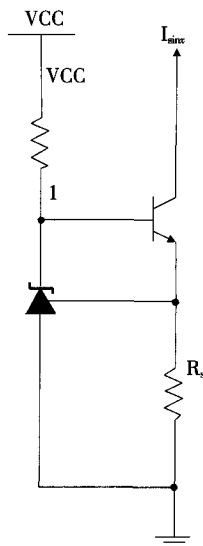


图1 TL431与三极管组成的常见恒流源

度负温度系数可调电阻 R_3 、 R_5 ;

4) 加入 π 型滤波电路。

恒流源改进设计电路如图 2 所示。

2.2 主要改进设计

2.2.1 TL431BID 高精度稳压器

在电路中使用最高等级稳压器 TL431BID 来代替传统 TL431 稳压器,其初始精度为 B 级(0.5%),工作温度为 I 级($-40 \sim 85^\circ\text{C}$),封装类型为 SOP-8。使用 TL431BID 高精度稳压器可以保证恒流源核心硬件在温度变化较大时正常工作。

2.2.2 OP77 运算放大器

采用 OP77 低电压飘移运算放大器,其特性为低失调电压、低失调电压漂移、低输入偏置电流、低压噪声密度,低温漂系数。由于 TL431BID 在正常工作过程中会产生 $-100 \sim 150 \text{ mA}$ 的阴极电流,这将会对恒流源输出电流产生干扰,所以在设计中加入 OP77 运放,用以吸收 TL431 BID 的工作电流。保证采样电阻两端的压差稳定及输出电流的恒定。

2.2.3 电阻

在电阻选择上,主要采用 $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 高精度可调电阻,利用其组合产生的温度系数抵消 TL431BID 元件的温度系数。 R_1 作为限流电阻,其目的是使 TL431BID 元件达到其正常工作的电流。 $R_2 \sim R_5$ 作为可调控制电阻,进行带载时输出电流的调整校准。 R_6 为滑动变阻器,其作用为实现恒流源电流输出微调。电路中使用 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 、 R_6 组合使用所形成的温度补偿系数抵消 TL431BID 器件的温度系数。通过调节可调电阻阻值来调整恒流源输出值。设计中将大电阻分散

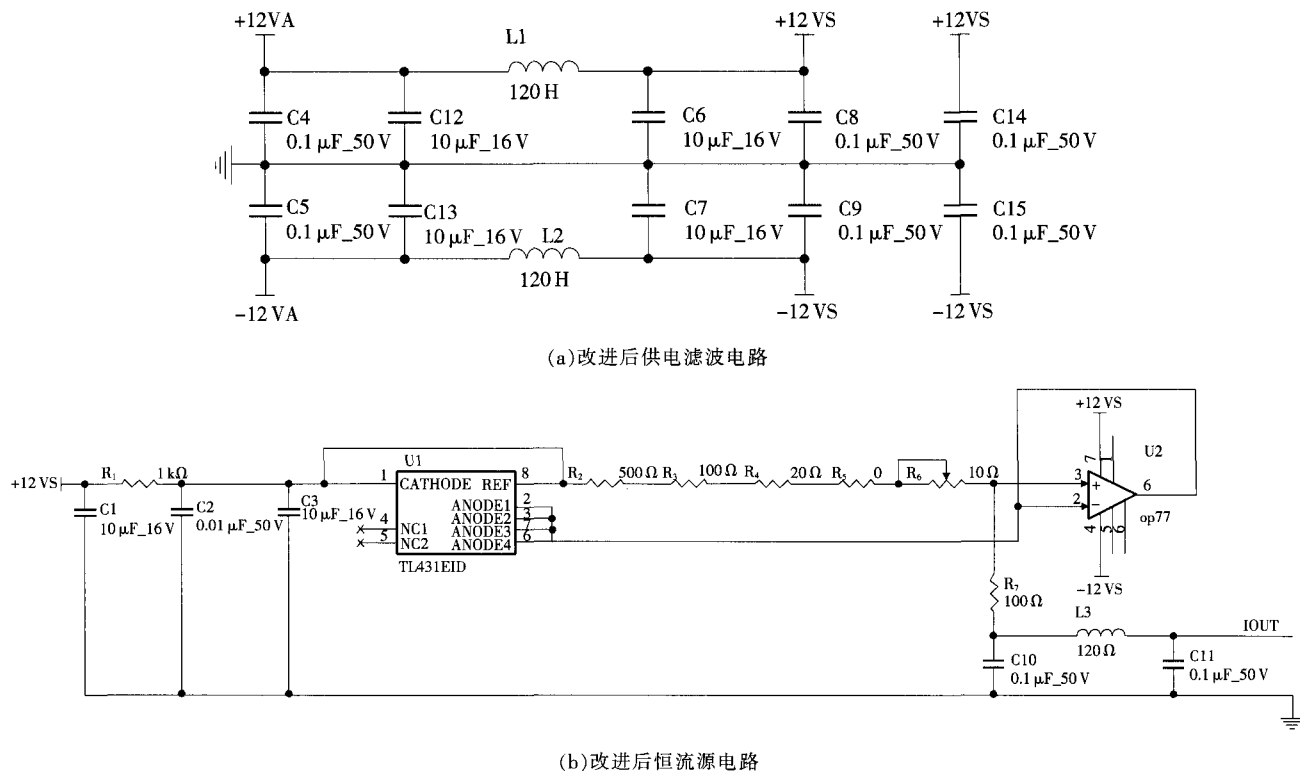


图2 恒流源主体电路设计图

为 $R_2 \sim R_5$ 4个串联小电阻组合,可利用 R_2 、 R_4 的正温漂抵消 R_3 、 R_5 的负温漂,整体达到更低的漂移量。另外,将大电阻分散为 $R_2 \sim R_5$ 4个125:25:5:1的等比值电阻,也可以提高恒流源面对不同负载情况下的可调范围和调整精度,在一定程度上分散了元器件工作过程中的热能损失分布,减少了恒流源工作过程中的自身产热所导致的温度变化。

2.2.4 滤波电路

滤波电路常用于滤去整流输出中的纹波。在恒流源中加入滤波电路,可以使输出纹波系数降低,起到稳定输出、提高精度的作用。本设计中滤波电路分为3部分:

1)在12V标准电压源中加入 π 型滤波电路,减少电源的输入噪声,同时为TL431BID和OP77提供稳定的基准电压源,提高恒流源稳定性^[11]。

2)在输入端基准电阻两侧加入滤波电路,保证TL431BID稳压器的稳定性和输入电流精度。

3)在输出端加入滤波电路,去除芯片噪声^[12],保证小电流输出精度。

3 恒流源改进前后性能对比

由于在仿真电路中,电子元件均为理想状态,只能通过计算不同温度下的电阻温漂来模拟温度变化,无法进行恒流源精度验证,故在仿真中仅分析恒

流源电路在不同温度下的输出情况。

3.1 改进前后恒流源温度性能仿真分析

采用Multisim软件搭建仿真电路,仿真电路如图2(b)所示。由于弹上系统所需恒流源输出值为定值,若输出电流为4mA时,分析电路可得出电流计算公式如下:

$$I_{out} = V_{ref} / (R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6) = 4 \text{ mA}$$

改进后恒流源电路中输出4mA时的电阻数据,如表1所示。

表1 电阻数据对应表

参数	电阻				
	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
阻值/ Ω	500	100	20	0	3.75
温度系数/ $(10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	5	-5	5	-5	-30

对于仿真电路,假定20 $^\circ\text{C}$ 为恒流源准确输出4mA的温度环境。根据电阻温度系数计算出温度变化后的阻值,以100 Ω 为例,其温度系数为 $-5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,温度变化10 $^\circ\text{C}$ 后的阻值变化为 $100\Omega \times 10 \times (-5) \times 10^{-6} = -5 \text{ m}\Omega$ 。

以此为依据进行电路中电阻阻值调整,模拟空载时温度对恒流源电路的影响。改进前后仿真电路温度变化时输出电流变化对比如表2、表3所示。

表 2 改进前恒流源受温度影响的电流变化仿真结果

温度/℃	期望值/mA	改进前恒流源输出/mA	漂移量/%
-20	4	3.7000	8
-10	4	3.7800	6
0	4	3.8400	4
10	4	3.9200	2
20	4	4.0000	0
30	4	4.0800	2
40	4	4.1600	4
50	4	4.2400	6

表 3 改进后恒流源受温度影响的电流变化仿真结果

温度/℃	期望值/mA	改进后恒流源输出/mA	漂移量/%
-20	4	3.9996	0.0100
-10	4	3.9997	0.0075
0	4	3.9998	0.0050
10	4	3.9999	0.0025
20	4	4.0000	0
30	4	4.0001	0.0025
40	4	4.0002	0.0050
50	4	4.0003	0.0075

由表中的仿真结果可得,在仿真理想状态下,改进后电路受温度变化所带来的影响更小,克服了改进前的缺点,性能得到了提升。

3.2 改进后恒流源的工程实现

按照图 2 电路设计图搭建实验滤波电路及恒流源电路,器件与型号保持一致。利用 Cadence 软件绘制 PCB 双层板卡并印刷制作测试用例,其中上层板卡作为主要功能板卡,下层板卡作为滤波供电板卡,PCB 设计图如图 3 所示。

在设计中采用的 TL431 稳压器及 OP77 运

算放大器,因其具有一定的发热量,所以在布线时应将这些器件尽可能地远离基准电阻等元件。由于恒流源电路中电阻的温度系数用以补偿电路温漂,而导带的温度系数与电阻温度系数相差几个数量级,对电路的影响较大,所以在设计时要求连接电阻的导带电阻必须尽量小。通常使用加宽、增厚的方式设计导带,以减小导带电阻。

3.3 改进前后恒流源实验结果

经过仿真实验可以看出改进后恒流源具有优良的性能,但在实际电路中由于除电阻外的各部分电路也会受到温度的影响,并且电路工作会产生一定的温度,和理想情况下电路还是有一定的区别,所以很有必要通过实物实验进行验证。考虑到在实际情况中,恒流源负载为固定值,所以在实验过程中以空载情况为例。实际应用于测试系统中时,应在不同的负载下通过调整高精度可调电阻 $R_2 \sim R_5$ 实现输出电流校准。

3.3.1 输出精度对比

在恒流源设计中加入了 3 组滤波电路,其目的是消除抖振,保证输出电流精度。在实验中,将传统 TL431 恒流源和改进后高精度小电流恒流源同时通电工作,保持温度为 20℃ 不变,待恒流源稳定工作后,采用安捷伦数字万用表对恒流源输出电流进行测量,每隔 15 min 测一组数据,共测 10 组作为判断其输出精度的依据。测量数据如表 4 所示。

根据表中实验数据,选取电流最大波动值除以恒流源额定电流 4 mA 即为恒流源精度。经计算可得,改进前恒流源在 20℃ 温度下准确度为 2.69%,改进后恒流源在 20℃ 温度下准确度为 0.1%。可以看出改进后恒流源在输出精度上有了很大程度的提高。

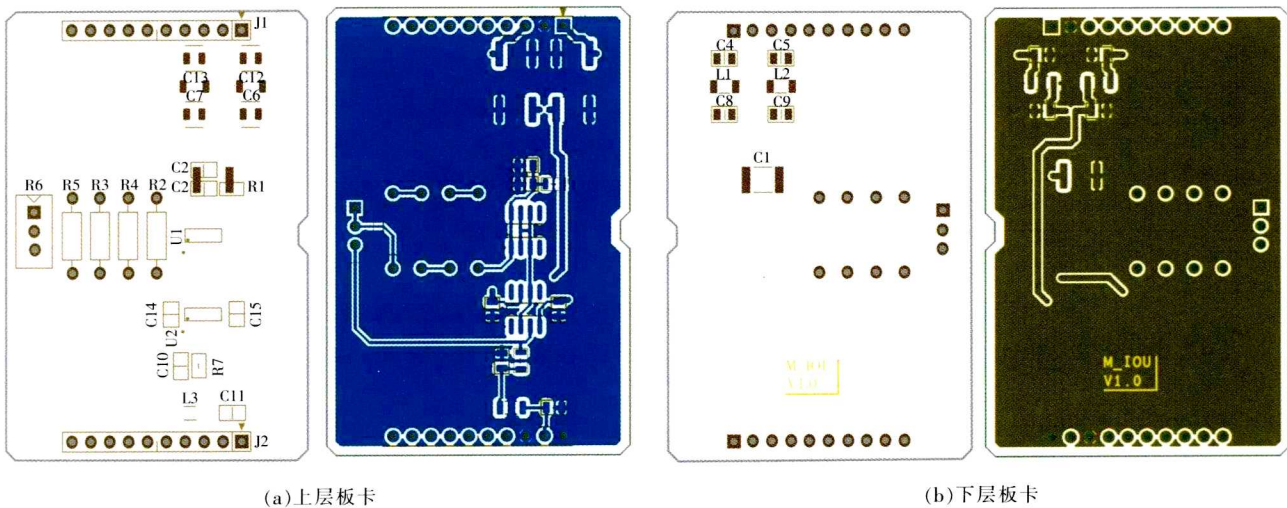


图3 双层板卡PCB设计图

表 4 改进前后恒流源输出精度对比

序号	期望值/mA	改进前恒流源输出/mA	改进后恒流源输出/mA
1	4	4.107 5	3.999 8
2	4	3.996 9	4.000 1
3	4	3.982 3	4.000 3
4	4	4.099 8	4.000 2
5	4	4.002 1	3.999 6
6	4	4.000 5	3.999 9
7	4	3.995 2	4.000 1
8	4	4.011 2	4.000 0
9	4	4.026 1	4.000 2
10	4	4.099 6	4.000 1

3.3.2 抑制温漂性能对比

模拟温度变化环境的方法一般采用外加热源和温控箱两种方式,前者通过电热吹风产生温度环境,使用温度计来进行温度标定,这种方法的优点是易于实现,缺点在于电热吹风产生的温度环境不稳定,温度计标定精度不高;较之外加热源法,后者可以产生精准稳定的温度环境,所以在实验中采用温控箱来模拟温度变化。

将实验电路接 12 V 电源后置于温控箱中,通过温控箱产生实验所需的温度环境,温度变化范围与仿真分析中一致。初始温度设定为-20℃,温度变化步长设置为 10℃,在测量时保持温度恒定,采用安捷伦数字万用表对恒流源输出电流进行测量,同一温度下测 5 组数据求其平均值作为输出电流值。

对于改进前后的电路,恒流源输出-20~50℃过程中电流随温度的变化过程如表 5、表 6 所示。

表 5 改进前恒流源受温度影响实验结果

温度/℃	期望值/mA	改进前恒流源输出/mA	漂移量/%
-20	4	3.705 5	7.36
-10	4	3.775 2	5.62
0	4	3.804 6	4.88
10	4	3.858 4	3.54
20	4	3.992 0	0.20
30	4	4.048 3	1.21
40	4	4.121 0	3.03
50	4	4.213 2	5.33

表 6 改进后恒流源受温度影响实验结果

温度/℃	期望值/mA	改进后恒流源输出/mA	漂移量/%
-20	4	3.998 3	0.042 5
-10	4	3.998 9	0.027 5
0	4	3.999 3	0.017 5
10	4	3.999 8	0.005
20	4	4.000 1	0.002 5
30	4	4.000 5	0.012 5
40	4	4.000 9	0.022 5
50	4	4.001 2	0.03

从表 6 中可以看出,-20~50℃温度环境下,改进后的恒流源受温度影响大大减小,在温度变化环境下的工作适应能力得到增强。由改进后恒流源仿真分析结果可知,在电源电压为 12 V,负载为空载情况下,改进后的恒流源在很大程度上抑制了元器件温度漂移带来的输出误差。

3.3.3 输出稳定性对比

利用 Matlab 软件对输出电流值进行绘制,结果如图 4 所示。

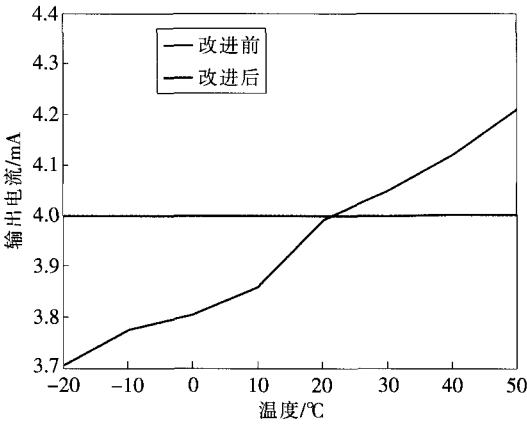


图4 输出电流拟合曲线

根据表 5、表 6 计算改进前恒流源输出电流平均值为 3.9398mA,改进后恒流源输出电流平均值为 3.9999mA,将表中的测量数据代入电流稳定度公式,得到改进前稳定度:

$$\frac{\Delta I_0}{I_0} = \frac{1}{3.9398} \sqrt{\frac{(3.9398-3.7055)^2+(3.9398-3.7752)^2+(3.9398-3.8046)^2+(3.9398-3.8584)^2+(3.9398-3.9920)^2+(3.9398-4.0483)^2+(3.9398-4.1210)^2+(3.9398-4.2132)^2}{8}} \approx 43 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$$

改进后稳定度:

$$\frac{\Delta I_0}{I_0} = \frac{1}{3.9999} \sqrt{\frac{(3.9999-3.9983)^2+(3.9999-3.9989)^2+(3.9999-3.9993)^2+(3.9999-3.9998)^2+(3.9999-4.0001)^2+(3.9999-4.0005)^2+(3.9999-4.0009)^2+(3.9999-4.0012)^2}{8}} \approx 243 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$$

表5 实测和仿真截割功率统计值

参数实测与 仿真值	截割功率/kW			变异系数
	均值	标准差	均方根	
实测值	183.171 6	89.131 4	200.111 1	0.482 7
仿真值	f=6	162.371 6	68.271 5	182.713 6
	f=7	199.472 6	117.342 6	236.371 2
相对偏差/%	f=6	-11.36	-23.40	-8.69
	f=7	8.90	31.65	18.12

通过比较实测和仿真数据以及拟合曲线可知,本文建立的数学模型仿真得到的截割功率动态曲线与实测曲线是比较接近的。出现较大偏差的原因主要是仿真模型没有将截割时煤层条件的突变、长时间工作引起的截割头热变形等因素考虑进去。

4 结束语

通过分析掘进机截割头在实际工作中的性能参数,建立截割头在掘进过程中的数学模型,并对仿真数据与实际数据进行比较分析,可知本文建立的数学仿真模型可以很好地预测截割头掘进的性能。

参考文献

- [1] 王佩勋. 悬臂式掘进机横向截割时稳定性研究[J]. 煤矿机械, 2009(5): 64-66.

- [2] 李军利, 廉自生, 李元宗. 悬臂式掘进机工作机构动力学建模与仿真[J]. 煤矿机械, 2008(10): 30-33.
- [3] 董磊, 任家骏, 王喜胜, 等. 悬臂式掘进机回转机构的建模与动力学仿真[J]. 煤炭科学技术, 2009(6): 83-85.
- [4] 徐明生, 姚金蕊, 罗曼, 等. 悬臂式巷道掘进机的选型研究[J]. 采矿技术, 2008(2): 62-63.
- [5] 宋金标, 孙方相, 胡振南, 等. EBZ260 纵轴式掘进机截割头的设计计算[J]. 煤矿机械, 2013(9): 16-18.
- [6] 刘炜煌, 韩振南, 张倩倩, 等. EBZ-160 型掘进机截割头最佳运动参数确定方法[J]. 矿山机械, 2014(7): 15-18.
- [7] 龚循仁, 张立祥, 范学群. 横轴式掘进机截割机构运动分析[J]. 煤矿机械, 2013(7): 115-116.
- [8] 徐晓锋, 张亚柱. 硬岩悬臂式掘进机截割部摆动驱动力计算[J]. 煤矿机械, 2013(1): 17-18.
- [9] 刘英林. EBZ-135 掘进机截割头结构优化设计[J]. 煤炭工程, 2011(9): 12-14.
- [10] 史秀宝, 卢米奇, 曹志娟. 基于 Matlab 的纵轴式掘进机截割头切削过程的模拟研究[J]. 工矿自动化, 2010(1): 37-39.

(编辑: 李妮)

(上接第 140 页)

可以看出, 较之于原电路, 改进后恒流源电路稳定度有着明显提高, 具有良好的输出稳定性。

4 结束语

本文设计了一种利用温度系数补偿的方法, 实现了-20~50℃温度变化下可以稳定输出高精度小电流的恒流源的设计。通过 PCB 印刷测试电路板, 对测试用例进行测试结果分析, 得出测试恒流源在温度变化时仍然具有稳定的高精度小电流输出, 具备飞行器测试中高精度、低温漂的要求。设计电路中仅使用常用的架上产品, 成本较低, 易于工程实现, 具有较好的应用价值和前景。高精度小电流恒流源的设计使用为飞行器测试过程中的一系列测量提供了稳定恒定电流输出, 可提升飞行器测试系统的精确性、可靠性和环境适应性。

参考文献

- [1] 田俊杰, 董威, 陈静, 等. 基于场效应管的恒流源设计[J]. 中国测试, 2009, 35(1): 127-130.
- [2] 穆云田. 基于单片机控制的直流恒流源设计[D]. 天津: 河北工业大学, 2007.

- [3] 韩彦中, 王斧, 赵熙林. 标准灯供电电源设计[J]. 中国测试技术, 2003, 29(4): 31-32.
- [4] 魏杰. 高精度可调直流恒流源设计及实现[J]. 仪表技术, 2016(5): 44-46.
- [5] 刘艳, 汪毅. 一种常见精密恒流源的改进与应用[J]. 电测与仪表, 2011(4): 93-96.
- [6] Motorola Inc. TL431-programmable precision references[Z]. America: Motorola, 2008.
- [7] 雷开卓, 侯建平, 黄建国, 等. TL431 的原理及应用研究[J]. 电源技术应用, 2001(4): 34-36.
- [8] 王波, 戴曙光. 高稳定性数控恒流源设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(8): 14-18.
- [9] 卫永琴, 高建峰. 一种恒流源电路的巧妙设计[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(9): 1170-1172.
- [10] 蔡璇. 一种应用于温度控制系统的恒流源加热电路[J]. 山西电子技术, 2014(4): 8-10.
- [11] 党玉杰, 董全林, 孙茂多. 高稳定度恒流源的研究与影响因素分析[J]. 电源技术, 2016(4): 122-125.
- [12] 李宏生, 万德钧. 一种高精度恒流源的设计与分析[J]. 光学精密工程, 1996, 6(4): 87-94.

(编辑: 李妮)