Design of pA Level Leakage Current High Precision Measurement Module

ZHENG Gaoming[1*], SUN Feng[1], LI Huan[1], HU Yating[1], LIU Jing[1], LIU Yujie[1]
(China Zhenhua Group Yongguang Electronics Co., Ltd. (State-Owned Factory No. 873), Guiyang Guizhou 550018, China)

Abstract: Targeting at the problems of being difficult to measure the leakage current parameters of pA level in analog switches, operational amplifiers, optical couplers, etc., and low accuracy of test results, an integrated circuit using polystyrene capacitor as integrator is proposed to convert weak current into voltage value for measurement. In this module, the polystyrene capacitor with very low leakage current is used as the integrator, the input mismatch current is selected as fA level operation amplification, and the input bias voltage of the operational amplifier is zeroed by setting up a peripheral circuit. The difference between ceramic capacitor and polystyrene capacitor as integrators is compared. The test results show that the accuracy of using polystyrene capacitor is less than 1% in the weak current range of 10 pA~10 nA, which is obviously better than that of ceramic capacitor. The voltage variation of polystyrene capacitor is measured by integrating the polystyrene capacitor with a constant current of 100 pA at different times. The results show that the error of test accuracy is up to 0.87%.

Key words: integrating circuit; weak current; leakage current; bias voltage; unbalanced current; polystyrene capacitor
EEACC: 7230; 7310D **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.004

pA 级漏电流高精度测量模块的设计

郑高铭*, 孙 峰, 李 欢, 胡雅婷, 刘 京, 刘羽捷
(中国振华集团永光电子有限公司(国营第八七三厂), 贵州 贵阳 550018)

摘 要: 针对模拟开关、运算放大器、光耦等芯片的 pA 级漏电流参数难测、测试结果精度不高的问题, 基于电容积分电路, 将微弱 pA 级漏电流转化为电压值进行测量; 本测量模块采用漏电流极低的聚苯乙烯电容作为积分器, 选取输入失调电流为 fA 级的运算放大器, 并通过搭建外围电路对运算放大器的输入偏置电压调零; 试验比对了陶瓷电容与聚苯乙烯电容分别作为积分器的区别, 试验结果表明, 在 10 pA~10 nA 微弱电流范围内, 采用聚苯乙烯电容器的精度在 1%以内, 明显优于陶瓷电容; 测试了聚苯乙烯电容在 100 pA 恒定电流情况下积分不同时间的电压值变化, 结果表明, 测试精度误差最大为 0.87%。

关键词: 积分电路; 微弱电流; 漏电流; 偏置电压; 失调电流; 聚苯乙烯电容器
中图分类号: TN407 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0745-06

随着半导体技术的发展, 芯片的性能愈发强大, 对芯片电参数的精确度要求也越来越高, 芯片电流参数检测需求从 μA、nA 到 pA 级甚至达到 fA 级, 要满足该需求就需要更精准的测试电路[1]。目前针对微弱电流[2-3]的测试, 谭同等[4]采用了将微弱电流转换成电压进而放大电压信号的方法, 但其最高分辨率只能达到 90 pA; 王威等[5]设计了一种高阻型 I-V 转化皮安级电流检测电路, 其主要从器件的选型、内外层干扰屏蔽等方面考虑; 吴跃军等[1]根据高阻型 I-V 电路模型, 对 pA 级电流前置放大(pA)电路电流噪声的误差影响进行了分析。上述方法都是利用超大阻值的电阻将电流信号转化为电压信号, 阻值可达 10 GΩ[6]。电阻噪声大小与阻值相关, 而热噪声属于电阻器的本质特征, 无法避免也无法消除[7], 对于 pA 级超微弱电流, 其电路内部噪声的数值很有可能淹没目标电流, 并且, 电流通过电阻器件时会发热而导致电阻值发生变化, 从而产生测量误差[8]。

电容积分[9]法利用时间累积的方式消除电路白噪声, 并且积分电容器属于无损原件, 不会引入热噪声[10], 因此利用电容积分方式测量微弱电流[11-12]更具优势。然而积分电容器 C 的漏电是积分电路产生误差的主要原因之一[13], 普通陶瓷电容、钽电容的漏电流可达到 nA 级甚至 μA 级, 这对于测量 pA 级漏电流是不能忽略的, 并且运算放大器的输入失调电流、输入偏置电压过大也极大影响测量精度。

聚苯乙烯电容的绝缘电阻高达 100 GΩ, 其拥有极低漏电流, 这对于搭建积分电路测量 pA 级漏电流至关重要; 同时选择精密运算放大器, 其输入失调

收稿日期: 2024-09-02 修改日期: 2024-10-17

电流为 fA 级,并能搭建外围电路对该运放调零,尽可能减少电路对测试电流的影响。

1 测试原理

积分运算电路是一种应用比较广泛的模拟信号运算电路,简化图见图 1。在理想情况下,运放没有输入偏置电流,电容没有漏电流,根据运放的“虚短”“虚断”的特点,可知:

$$i_1=\frac{u_1}{R_1} \tag{1}$$

$$i_1=i_f \tag{2}$$

那么:

$$u_o=-u_c=-\frac{1}{C_F}\int i_f\mathrm{d}t=-\frac{1}{C_F}\int i_1\mathrm{d}t \tag{3}$$

因此,输出电压 u_o 与电流 i_1 存在积分关系,通过此公式能准确计算出目标电流值。

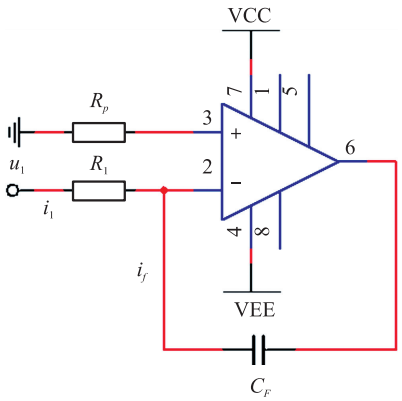

图 1 理想情况积分运算电路

然而实际中,运算放大器总存在输入偏置电流,积分电容也存在漏电流,如果运放的输入偏置电流与电容的漏电流较大,那么对于微弱电流,其可能淹没在电路中,无法准确测量。因此选择合适的电容积分器与运算放大器是精确测量 pA 级漏电流的关键。

2 测量模块设计

2.1 积分电容器的选取

积分电容器的性能决定了电容积分电路能否准确测量目标电流。普通陶瓷电容、钽电容的漏电流可达到 nA 级甚至 μA 级,在测试 pA 级电流时,目标电流淹没在电路中,无法准确测量出实际值。而聚苯乙烯的绝缘电阻很高,一般大于 100 GΩ,因此拥有极低漏电流的特点,能很大程度减小由于电容器漏电带来的测量精度误差。

2.2 测量电路

测量电路中核心元件为运算放大器,而运算放大器种类多种多样,其各参数性能也参差不齐,选择一款合适的运算放大器成为了关键因素。本测量模块中采用选取精密运算放大器 AD549L,其最大输入偏置电流为 60 fA,典型值为 20 fA,远小于测试目标电流,因此其偏置电流可忽略不计。

AD549L 其偏置电压可达 500 μV,由于运放输入偏置电压 V_{os} 的存在,也会导致测量结果不准确,因此需要对运算放大器调零。此运放可通过外接电位计对输入失调电压调零,尽可能降低输入失调电压对测试结果的影响。

为了有效抑制运算放大器会出现“积分漂移”的问题,在积分电容器 C 上并联电阻 R_1,引入直流负反馈,并且与运放搭配,形成跨阻电路。

同时,电路中选用 EE 系列精密金属膜电阻,其精度高(可达万分之一)、温度系数小、稳定性好;继电器选用干簧继电器,属于接触式,在断开时几乎不存在漏电现象。

运放 AD549L 工作需要-15 V、+15 V 电源,若直接从其他地方引来电源给运放供电,可能会将噪声、杂波带到运放中。在测量微弱电流时,需要电源尽可能纯净,因此需要增加稳压电压,使得电源和地较为干净。稳压器件选用 LM7815CT 与 LM7915CT 分别提供+15 V、-15 V 电源,在器件输入端放置一对 0.1 μF 陶瓷电容器与 10 μF 钽电容器作为旁路电容,目的是将系统中的高频噪声旁路到 GND,从而避免噪声进入器件的供电引脚;在器件输出端也放置一对 0.1 μF 陶瓷电容器与 10 μF 钽电容器作为去耦电容,防止器件工作时对外干扰[14]。

测量电路包含积分电路、调零电路、跨阻电路,如图 2 所示。

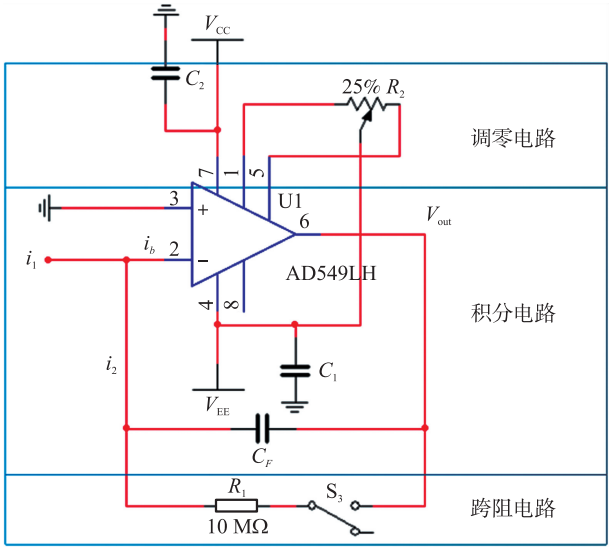

图 2 测量电路原理图

因为运放输入失调电流 i_b 典型值为 20 fA,忽略不计,因此 i_2 约等于 i_1。通过操控继电器 S_3 的通断来控制电路积分的开始与结束。当继电器 S_3 闭合时,由于聚苯乙烯绝缘电阻高达 100 GΩ,电流几乎流经电阻 R_1,此电路形成跨阻电路[15],其输出电压为:

$$V_{out_0}=-i_1\times R_1 \tag{4}$$

当继电器 S_3 断开时,开始对积分电容器 C_F 积分,积分时长为 t s,则输出电压为:

$$V_{out_1}=-i_1\times t/_{C_F}-V_{out_0} \tag{5}$$

式中:V_{out_0}为积分前初始电压值;

由此可推出目标电流 i_1:

$$i_1=-(V_{out_1}+V_{out_0})\times C_F/t \tag{6}$$

由式(3)可知,准确测量漏电流的因素包括继电器的通断时间、电容容值的准确度以及积分电路的漏电流大小。电容容值的测量可选择 E4981A 电容表等仪器进行测量,保证电容容值的准确度;继电器的通断时间一般为微秒级,对于积分时长为秒级的工况,其通断时间影响甚微;而整体积分电路的漏电流大小与元器件的选取至关重要,如选取的运放 AD549L 其漏电流为 20 fA,对于百皮安级别的测试可忽略不计;而电容电阻、继电器的漏电流不可忽略,因此选取拥有极低漏电流的聚苯乙烯电容、精密金属膜电阻,而干簧继电器在断开时,不存在漏电流现象。

3　电路仿真与试验

3.1　电路仿真

电路仿真基于 NI Multsim 14.0 软件进行,仿真电路如图 3 所示。

从仿真结果观察,运放输入偏置电流 I_b 为 12.7 pA(Multisim14.0 中器件 AD549L 的输入偏置电流参数 I_b 不准,查看芯片手册可知,实际典型值为 20 fA,最大为 60 fA),运放的失调电压 V_{os} 为 −295 μV。

当闭合开关 S_3 时,形成跨阻电路,由于运放输入失调电压的存在,其校准电流公式不能按照式(5)计算,校准电流 $I_1=(V_I-V_{os})/R_4=129$ pA;流经 R_1 的电流为 117 pA,那么计算值 $V_{out}=-I_2\times R_1+V_{os}=-1.465$ mV,仿真结果为−1.46 mV,计算值与仿真结果相符。

当断开开关 S_3 时,电路开始积分,实际积分的电流为 117 pA,积分电容器为 1 000 pF,积分 5 s 时,由式(6)可知,V_{out}理论值为 0.585 V,实际仿真结果为 0.588 V,计算值与仿真结果相符,积分仿真结果见图 4。

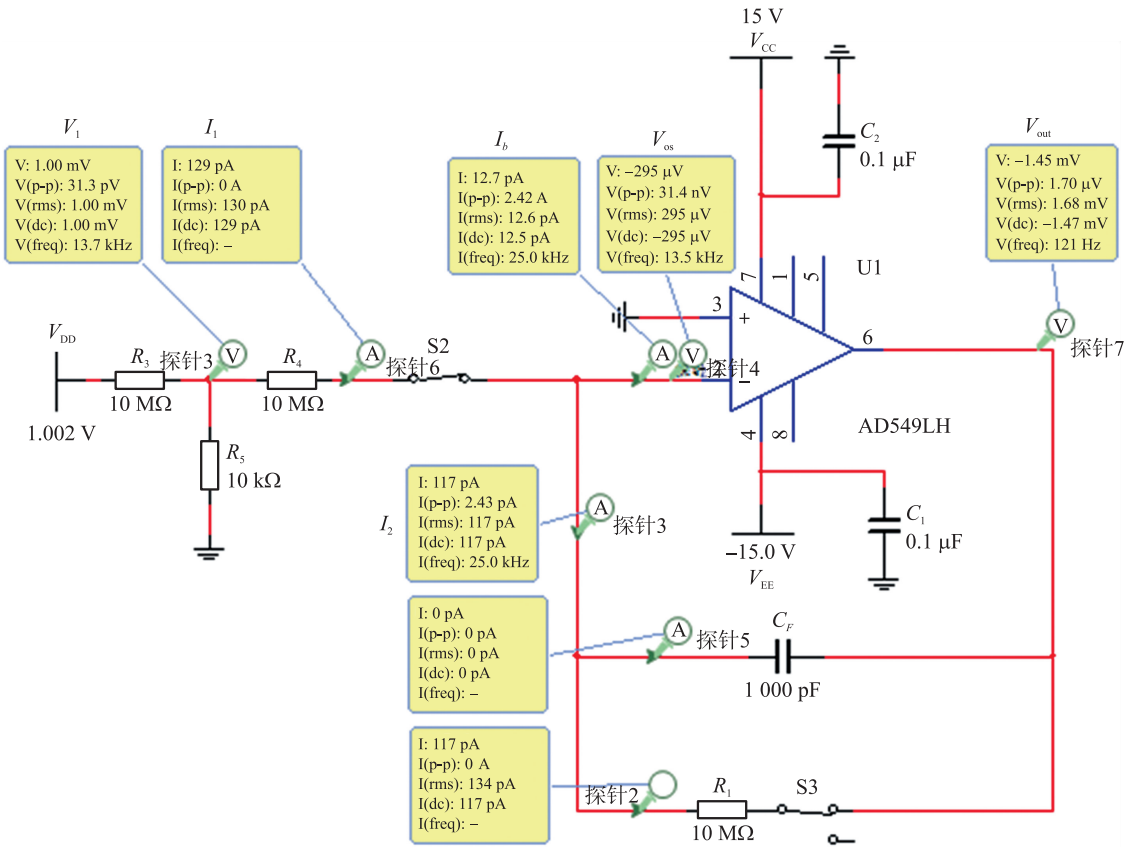

图 3　仿真电路

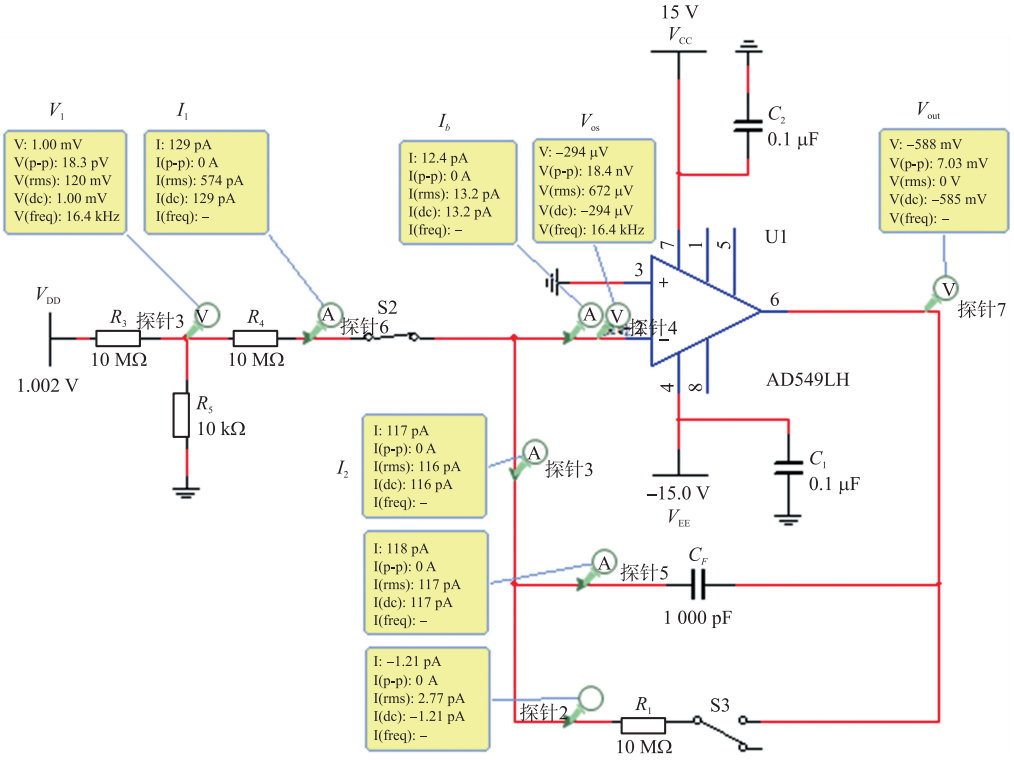

图 4 积分仿真结果

通过仿真可知：

①仿真电路中，运放的失调电压 V_{os} 造成了校准电流增大；实际电路中，需要对运放输入失调电压 V_{os} 调零，提高测试精度；

②仿真软件中，运放的偏置电流不准确，达到了 12.7 pA，据 AD549L 手册，应该是 20 fA 左右；

③仿真电路中，积分电容器 C_3 不存在漏流，但在实际电路测量微弱电流时，需要考虑电容器漏电问题。

3.2 试验测试与结果分析

在仿真的基础上，对电路进行了试验验证与结果分析。整个试验基于 ATE 测试机台 STS8205 进行，为电路提供电源、控制继电器的开闭，即控制积分时间、测量电路输出电压 V_{out} 并输出测试结果；借助示波器 MXR404A 观察积分时波形变化；通过七位半万用表 34470A 对输入失调电压调零并测量关键结点电压值。

由仿真结果可知，运放输入偏置电压调零是准确测量微弱电流的关键一步，因此在积分开始前，需要对运放进行调零。在电源都供上的情况下，闭合开关 S_3、S_2，用万用表测量运放的反向输入端，即 2 引脚，通过缓慢旋转电位计 3296 的旋钮，尽可能使得测量电压为 0 V，本次调零为 0.4 μV，满足电路精度要求。运放输入偏置电压调零结果见图 5。

调零完成之后，电路积分共分为三个阶段：

图 5 运放输入偏置电压调零结果

第一个阶段 t_1，积分准备阶段，闭合开关 S_3、S_2，其输出电压值 V_{out} 见式(5)；

第二个阶段 t_2，为积分阶段，闭合开关 S_2、断开开关 S_3 开始积分，输出电压值 V_{out} 见式(6)；

第三个阶段 t_3，为积分结束阶段，闭合开关 S_3、S_2，输出电压值与第一阶段相等。

微弱电流测试流程如图 6 所示。

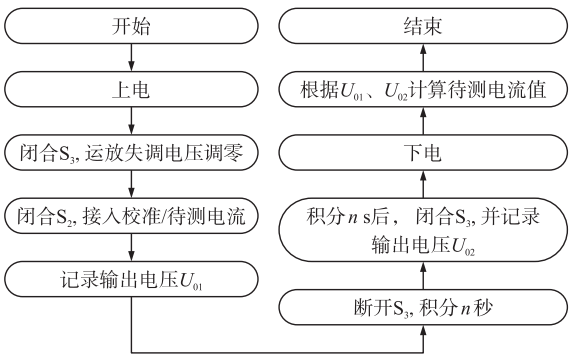

图 6 微弱电流测试流程图

在设定校准电流为 500 pA 的情况下,1 000 pF 聚苯乙烯电容器积分 5 s,理论电压变化值为 2.5 V,借助示波器观察,显示结果与理论值相符,示波器抓取波形见图 7。

本次试验中比对了聚苯乙烯电容器与普通陶瓷电容器对积分的影响。电路中电容器容值取 1 000 pF,积分时长为 5 s(由于运放供电为±15 V,最大输出电压小于 15 V,因此在 5 nA、10 nA 情况下,降低积分时长,保证运放输出值没有饱和),电流在 10 pF~10 nF 范围内进行测试,聚苯乙烯与陶瓷电容器测试结果对比如表 1 所示,误差精度对比图见图 8。同时,基于聚苯乙烯电容器积分电路,还测试了在 100 pA 电流下,积分不同时间(5 s~100 s)输出电压值的变化,结果见表 2,曲线拟合见图 9。

图 7　积分时的波形抓取

表 1　聚苯乙烯与陶瓷电容器测试结果比对

序号	校准电流/pA	积分电容器/pF	积分时间/s	V_{out}计算值/V	V_{out}变化值/V	反算测试电流/pA	精度/%	电容器类型
1	10	1 000	5	0.05	0.050 0	9.991 9	0.08	聚苯乙烯
2	20	1 000	5	0.1	0.099 9	19.989 4	0.05	
3	50	1 000	5	0.25	0.248 5	49.697 2	0.61	
4	100	1 000	5	0.5	0.502 6	100.512 1	−0.51	
5	200	1 000	5	1	0.992 7	198.532 4	0.73	
6	500	1 000	5	2.5	2.487 0	497.400 0	0.52	
7	1 000	1 000	5	5	4.969 2	993.834 8	0.62	
8	2 000	1 000	5	10	9.934 4	1 986.876 0	0.66	
9	5 000	1 000	2	10	9.958 8	4 979.400 0	0.41	
10	10 000	1 000	1	10	9.915 2	9 915.220 0	0.85	
1	10	1 000	5	0.05	0.077 1	15.410 3	−54.10	陶瓷电容器
2	20	1 000	5	0.1	0.152 9	30.583 4	−52.92	
3	50	1 000	5	0.25	0.295 2	59.046 0	−18.09	
4	100	1 000	5	0.5	0.547 8	109.558 0	−9.56	
5	200	1 000	5	1	1.042 1	208.416 0	−4.21	
6	500	1 000	5	2.5	2.429 0	485.797 9	2.84	
7	1 000	1 000	5	5	4.824 8	964.964 6	3.50	
8	2 000	1 000	5	10	9.425 7	1 885.134 2	5.74	
9	5 000	1 000	2	10	9.794 7	4 897.363 5	2.05	
10	10 000	1 000	1	10	9.888 3	9 888.310 0	1.12	

表 2　100 pA 电流下,积分不同时间的精度测试

序号	校准电流/pA	积分电容器/pF	积分时间/s	V_{out}计算值/V	V_{out}变化值/V	反算测试电流/pA	精度/%	电容器类型
1	100	1 000	5	0.5	0.502 0	100.392 5	−0.39	聚苯乙烯
2	100	1 000	10	1	1.004 6	100.457 4	−0.46	
3	100	1 000	20	2	2.017 4	100.867 8	−0.87	
4	100	1 000	30	3	3.019 8	100.659 7	−0.66	
5	100	1 000	40	4	4.014 2	100.355 9	−0.36	
6	100	1 000	50	5	5.025 8	100.515 6	−0.52	
7	100	1 000	60	6	6.020 4	100.339 2	−0.34	
8	100	1 000	70	7	7.000 0	100.000 4	0.00	
9	100	1 000	80	8	7.981 5	99.768 8	0.23	
10	100	1 000	90	9	8.974 7	99.719 3	0.28	
11	100	1 000	100	10	9.991 3	99.913 1	0.09	

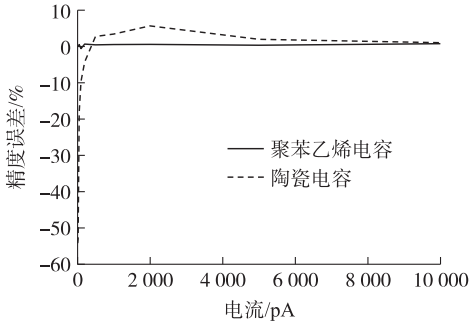

图 8 聚苯乙烯电容器与陶瓷电容器精度对比图

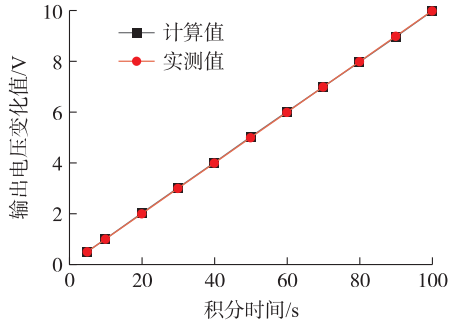

图 9 输出电压随积分时间变化曲线

从测试结果可以看出,陶瓷电容器在测试 pA 级超微弱电流时精度误差较大,最大误差达到 54.1%;而聚苯乙烯电容器在 10 pA~10 nA 电流区间,最大误差精度为 0.85%;基于聚苯乙烯电容器,在 100 pA 恒定电流下,时间从 5 s,10 s,…,100 s 积分,测试输出电压变化值,其测试精度最大误差为 0.87%,且线性拟合曲线与理想曲线基本一致。

基于上述,采用聚苯乙烯电容积分,将微弱电流转化为电压变化值的方式测量 pA 级微弱电流完全可行,并且采用聚苯乙烯电容器的测量效果优于陶瓷电容器。

4 结论

针对 pA 级漏电流的高精度测试,该测量模块利用聚苯乙烯电容作为积分器,选取输入失调电流为 fA 级的精密运放搭建积分电路,并外接电位计对运放进行调零。试验结果表明,在 10 pA~10 nA 微弱电流范围内,采用聚苯乙烯电容器的精度在 1%以内,明显优于陶瓷电容;在 100 pA 恒定电流情况下积分不同时间,测试精度误差最大为 0.87%。此测量模块已应用于半导体器件的 pA 级漏流测试中。

参考文献:

[1] 吴跃军,丁国清. pA 级超微弱电流前置放大电路的电流噪声及等效误差分析方法[J]. 传感技术学报,2022,35(5):595-599.

[2] 吴雄英. AD515A 在电压测量电路中的应用[J]. 电子质量,2006(12):4-5.

[3] 王森,李志忠,张振存. 异频小电流扫频式接地阻抗测试系统研究[J]. 黑龙江科学,2022,13(4):44-45.

[4] 谭同,何慧敏,李宝霞,等. 光电模块中微弱电流测量电路的设计与测试[J]. 电子设计工程,2017,25(9):6-9,13.

[5] 王威,崔敏,李孟委,等. pA 级电流信号检测电路设计[J]. 中北大学学报:自然科学版,2019,40(2):173-179.

[6] 张鹏. 亚 pA 级微弱电流放大器设计与测试[D]. 南京:南京邮电大学,2021.

[7] 李璎. 基于相关双采样技术的微弱电流检测前置放大电路设计[D]. 南京邮电大学,2020.

[8] 王营. 精密电流测试系统的研究[D]. 杭州:中国计量学院,2016.

[9] 王靖,楚明航,杨梦涛,等. 基于电压积分翻转电容法的微位移测量[J]. 电子器件,2022,45(5):1245-1251.

[10] 施恒壮. 微弱电流调理放大芯片的设计与测试[D]. 南京:南京邮电大学,2022.

[11] Li D X, Wang E Y, Feng X J, et al. Weak Current Induced by Coal Deformation and Fracture and Its Response to Mine Seismicity in a Deep Underground Coal Mine[J]. Engineering Geology,2023,315:107018.

[12] Li D X, Wang E Y, Jin D Q, et al. Response Characteristics of Weak Current Stimulated from Coal under an Impact Load and Its Generation Mechanism[J]. Sustainability,2023,15(3):2605.

[13] 毕满清. 模拟电子技术基础[M]. 北京:电子工业出版社,2008:238-240.

[14] 朱晓明,王玉皞,付世勇. 硬件十万个为什么(无源器件篇)[M]. 北京:北京大学出版社,2021:202-204.

[15] 胡红钱,高奇峰,吴雄喜,等. 高精度多量程微弱电流检测装置的研制[Z]. 杭州:浙江工业职业技术学院,2017.

郑高铭(1995—),男,四川遂宁,中北大学仪器与电子学院研究生,主要研究方向为电子元器件可靠性测试,943406542@qq.com。