



· 物理学 ·

基于开环增益的 DCCT 线性误差测量方法

王东兴^{1 2} 朱燕燕² 李 瑞² 李德明² 郭春龙²

(1. 中国科学院大学, 北京 100864; 2. 中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201204)

摘要: DCCT(DC current transducer) 凭借其优良的性能成为直流大电流检测的关键精密设备, 而传统的电流传感器线性度测量评估方法是使用更高精度级别的测量设备来完成测量、校准等工作。为了既降低 DCCT 线性度测试设备的要求又给出有效的线性度指标, 文中分析了零磁通电流传感器的线性误差产生机制, 导出了 DCCT 线性误差和开环增益的反比例关系, 确定了一种提高 DCCT 线性度的方法。同时, 根据 DCCT 的零磁通工作原理, 提出一种基于开环增益的线性误差测量和估计方法。用该文提出的方法和传统的测试方法对 SinapDCCT-200A 的线性度进行评估, 两种方法测试结果一致, 证明了该文提出的线性度测量方法的有效性, 同时表明 SinapDCCT-200A 的线性度优于 3×10^{-6} 。

关键词: 线性误差; DCCT; 开环增益; 零磁通

中图分类号: TM933. 14 **文献标识码:** A **DOI:** 10. 16152/j. cnki. xdxbr. 2018-03-004

A linearity error measurement method based on open-loop gain in DCCT

WANG Dongxing^{1 2}, ZHU Yanyan², LI Rui², LI Deming², GUO Chunlong²

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China;

2. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract: With excellent performance, DCCT(DC current transducer) is considered as the key device for measuring large DC current. To measure the linearity of current measuring device in the traditional way, testing devices with higher precision level are demanded for measuring and calibrating. Aiming at measuring the linearity with lower performance on device and conditions, this work analyzed the generating mechanism of linearity error of current transducer with zero-flux, and deduced the inversely proportional relationship between linearity error and open-loop gain of DCCT. A method for improving the linearity of DCCT was proposed. Meanwhile, a linearity measuring and estimating method based on open-loop gain was proposed according to the working principle of DCCT with zero flux. The linearity of SinapDCCT-200A was assessed with the proposed linearity measuring method and traditional linearity testing method respectively. The consistent results validated the effectiveness of the proposed linearity measuring method. It also demonstrated that the linearity of SinapDCCT-200A was better than 3×10^{-6} .

收稿日期: 2017-11-12

基金项目: 科技部国家重点研发计划资助项目(2016YFC0105402)

作者简介: 王东兴, 男, 河南林州人, 博士生, 高级工程师, 从事高精度电流传感器研究。

通讯作者: 李德明, 男, 福建永安人, 研究员, 博士生导师, 从事多种加速器物理设计与工程组织、电源及控制系统的设计实施研究。

Key words: linearity error; DCCT; open-loop gain; zero-flux

DCCT(DC current transducer) 是科研、医疗、军事等使用高精度电流源の場合广泛使用的电流检测和电流采样部件,尤其在电流稳定性要求不大于 1×10^{-5} 的大电流测量中更是无可替代^[1-4]。其凭借高稳定、高分辨率、温度系数小和良好的线性度^[5],成为高精度大电流检测的关键设备^[6],但传统的电流测量设备线性度测量方法是使用更高精度级别的电流源和测量设备来完成测量、标定等工作^[2,4-6]。DCCT 的线性误差通常小于 5×10^{-6} ^[5-6],且其量程范围从 mA 到 kA, DCCT 的线性度评估对测试设备性能和测试条件提出了苛刻要求,因此,传统的电流传感器线性度测量方法^[7-9]限制了 DCCT 的线性度测量相关工作的开展。

为了既能降低 DCCT 线性度测试设备和条件的要求,又能给出有效的线性度指标,本文分析了零磁通电流传感器的线性误差产生机制,导出了 DCCT 线性误差和开环增益的反比例关系,确定了一种提高 DCCT 线性度的方法。同时,根据 DCCT 的零磁通工作原理,提出一种基于开环增益的线性误差测量和估计方法。文中利用线性误差和开环增益的反比例关系,以 RL 磁调制解调电路和包络检波为基础,制作了量程为 200A 的 SinapDCCT-200A。以 LEM IT-200A 电流传感器为参考,用传统的传感器背靠背线性度测试方法测量 Sinap DCCT-200A 的线性度,证明了本文提出的线性度测量评估方法可行有效,测试结果表明两种方法等效,且 SinapDCCT-200A 的线性度好于 3×10^{-6} 。

1 DCCT 原理及其线性误差机理

隔离式直流大电流测量通常利用被测电流所产生的磁场为基础^[10],DCCT 是利用磁芯的直流磁通信号在次级电路上产生与被测电流(初级)方向相反数量相同的安匝数(即磁通),实现磁芯的直流磁通趋近于零,读取次级电流完成直流电流的隔离测量^[5]。

通常,DCCT 磁芯 Core 由高磁导率的软磁材料构成,被测电流 I_p 和补偿电流 I_s 成为磁芯 Core 上的两个绕组:初级绕组 N_p 、次级绕组 N_s (如图 1 所示)。其中, N_p, N_s 分别为初级和次级线圈匝

数, Z_f, Z_1 是运算放大器的反馈网络阻抗; r 是 N_s 绕组的电阻; R_b 是 I_s 的采样电阻。初级电流和次级电流在磁芯 Core 上产生的磁通 Φ_p, Φ_s 分别为

$$\Phi_p = \frac{N_p \cdot I_p \cdot \mu \cdot A}{l}, \tag{1}$$

$$\Phi_s = \frac{N_s \cdot I_s \cdot \mu \cdot A}{l} \tag{2}$$

其中 μ 为磁芯的磁导率; A 为磁芯的截面积; l 为磁芯的磁路长度。在传感器正常工作时,初级电流和次级电流在磁芯 Core 上产生的总磁 Φ 通为

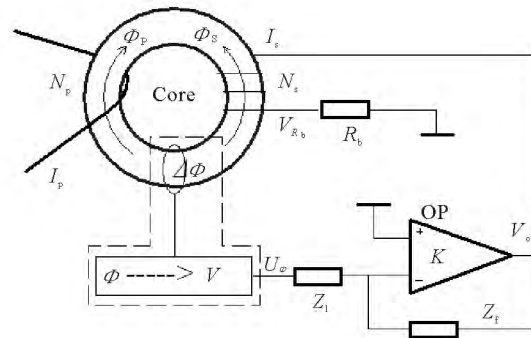
$$\Phi = \Phi_p + \Phi_s = 0. \tag{3}$$


图 1 DCCT 的原理图
Fig. 1 The block of DCCT

则有以下关系式

$$I_p \cdot N_p = I_s \cdot N_s, \tag{4}$$

$$I_s = \frac{V_{R_b}}{R_b}. \tag{5}$$

I_p 的测量值 I_p' 可表示为

$$I_p' = \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{V_{R_b}}{R_b}. \tag{6}$$

图 1 所示的零磁通电流传感器构成闭环控制系统^[11]类似于运算放大器^[12],其开环增益为

$$G = - \frac{N_s}{(R_b + r)} \cdot \frac{Z_f}{Z_1} \cdot S. \tag{7}$$

其中 S 是磁通(或电流)转换为电压的灵敏度^[6,13-14]。系统误差的传递函数为

$$E = \frac{\Delta I}{I_p} = \frac{1}{1 + G}, \tag{8}$$

根据式(8)可得

$$\Delta I = E \cdot I_p = \frac{1}{1 + G} \cdot I_p, \tag{9}$$

当 $G \gg 1$ 时,式(9)可写为

$$\Delta I = E \cdot I_p \approx \frac{1}{\frac{N_s}{R_b + r} \cdot \frac{Z_f}{Z_1} \cdot S} \cdot I_p, \quad (10)$$

实际使用中,参量 N_p, N_s, R_b 是确定值,被测电流的测量值和真实值之差 $\Delta I = I_p - I_p'$,受 I_p 和 $\frac{Z_f}{Z_1} \cdot S$ 影响,线性度中的非线性误差通常表示为^[15-16]

$$\delta = \frac{\Delta I_{\max}}{I_p} \times 100\%。 \quad (11)$$

根据式(10),在 $\frac{Z_f}{Z_1} \cdot S$ 取固定值的情况下, I_p 的量程越大, ΔI 出现最大值的可能越大。同时 ΔI 与 $\frac{Z_f}{Z_1} \cdot S$ 成反比关系,也即在同样的量程下, ΔI 可能的最大值随着 $\frac{Z_f}{Z_1} \cdot S$ 值增大而减小。合理控制 $\frac{Z_f}{Z_1} \cdot S$ 能有效降低 DCCT 的线性误差,从而使 DCCT 的线性度达到期望值。通常情况下,为方便电流测量,初级匝数 N_p 和次级匝数 N_s 通常取固定值,相应的次级绕组的总阻抗也是固定的。检测磁通的磁调制状态不变的情况下,运算放大器 OP 的增益 $\frac{Z_f}{Z_1} \cdot S$ 成为影响零磁通电流传感器线性误差的决定因素。

2 DCCT 设计及线性误差测量方法

2.1 DCCT 设计方案

根据上海光源磁铁电源对 DCCT 的指标要求,本文 DCCT 设计要求如表 1 所示。

表 1 DCCT 设计要求

Tab.1 Design requirements of DCCT

指标	要求
初、次级电流比例	1:1 000
初级最大被测电流	200A
次级最大输出电流	200mA
次级电流取样电压	5V
线性度	$\leq 5 \times 10^{-6}$
24 小时稳定度	$\leq 5 \times 10^{-6}$

由 DCCT 的原理图可知,高精度电流传感器 DCCT 由 3 部分组成:①初、次级电流共同作用的磁芯,实现 Φ_p, Φ_s 的叠加;②图 1 中虚线框内的磁通检测,提供非零磁通信号;③运算放大器 OP,提供相应的次级补偿电流。本文以钴基软磁材料作为初、次级电流共同作用的磁芯,以磁调制方式

作为检测磁通的方法。采用图 2 所示的磁调制电路实现磁通检测,其中,虚线左边是以 RL 电路为基础的磁调制部分,虚线右边是以包络检波为基础的解调部分。根据式(9)和式(10),线性度优于 5×10^{-6} 则构成其开环直流增益至少需要 2×10^5 ;按照满量程初级、次级电流比例为 1 000 计算,则图 1 所示的运算放大器 OP 需要至少有 200mA 的电流输出能力;考虑到次级线圈内阻和电流取样电阻的输出电压,则运算放大器 OP 的输出电压至少需要 10V。因此,选用 TI 公司的 LM3886 作为 DCCT 的运算放大器 OP^[17]。

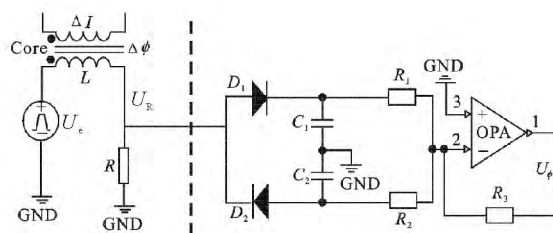


图 2 磁调制及解调电路

Fig.2 The circuit of magnetic modulation and demodulation

2.2 基于开环增益的 DCCT 线性误差测试方法

DCCT 是闭环负反馈系统,如图 1 所示,因此,可以利用反馈放大器原理和其开环增益估计 DCCT 的线性误差。为了获得 DCCT 闭环状态下的开环增益,本文在图 1 所示的运算放大器 OP 输出点作为测试点,并构成负反馈系统,如图 3 所示。其中 $R_f = R_1, V_{dc} = 10V$ 。图 4 是 DCCT 开环增益测试系统的方框图。根据梅森公式,图 5 所示系统的传递函数可写为

$$U_o = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{N_s}{R_b + r} \cdot \frac{Z_f}{Z_1} \cdot S}{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{N_s}{R_b + r} \cdot \frac{Z_f}{Z_1} \cdot S} \cdot U_i。 \quad (12)$$

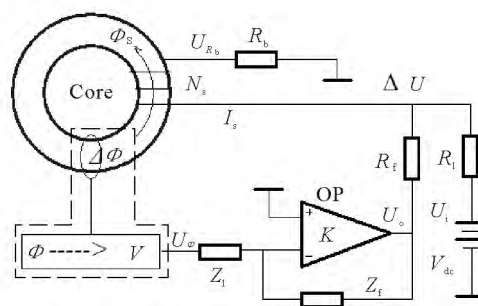


图 3 DCCT 开环增益测试示意图

Fig.3 The block of DCCT for open-loop gain testing

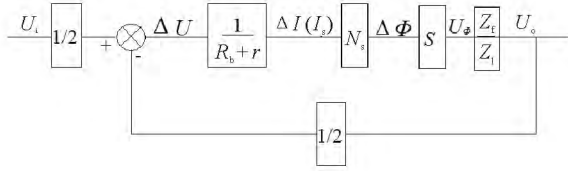


图 4 DCCT 开环增益测试系统框图

Fig. 4 System chart of DCCT for open-loop gain testing

其开环增益为

$$G_1 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{N_s}{R_b+r} \cdot \frac{Z_f}{Z_1} \cdot S. \quad (13)$$

当 $G_1 \gg 1$ 时,整理式(11)得

$$G_1 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{N_s}{R_b+r} \cdot \frac{Z_f}{Z_1} \cdot S = \frac{U_o}{\Delta U}. \quad (14)$$

对比式(7)和式(13)可以看出,DCCT 正常工作时的开环增益 G 和 DCCT 增益测试电路的开环增益 G_1 的关系为

$$G = 2 \cdot G_1. \quad (15)$$

因此,可以通过测量 $U_o, \Delta U$ 获得 DCCT 的开环增益 G_1 ,根据式(14)可以获得正常工作时 DCCT 开环增益,从而获得 DCCT 的线性误差范围,同时,可以通过改变 Z_f/Z_1 调控 DCCT 的开环增益,从而调控 DCCT 的线性误差。

3 DCCT 线性误差仿真及测试结果

本文选取两个 SinapDCCT-200A 进行开环增益及线性误差评估,分别命名为 1#和 2#。依照图 3 所示电路,取 $R_f = R_1 = 1k\Omega, V_{dc}$ 从 0V 到 10V 变化,查看 ΔU 的变化。根据式(13),10V 与 ΔU 的比值即为 DCCT 测试状态的开环增益 G_1 。对同一个 DCCT 而言,其 N_s, R_b, r 及灵敏度 S 都是固定的参数,为了验证不同开环增益 G 对线性误差的影响,本文以改变 Z_f/Z_1 的方式来达到改变 DCCT 开环增益 G 。 Z_1 选用电阻 510k Ω ,根据式(12)调整 Z_f 即等效调整开环增益 G 。实验中因磁调制灵敏度 S 不同,根据 1#和 2#的稳定工作点分别选择不同的 Z_f/Z_1 值。其中,1#的 Z_1 选用电阻 510k Ω ; 2#的 Z_1 选用电阻 250k Ω ; Z_f 分别选择为 2M $\Omega, 4 M\Omega, 6 M\Omega$ 。分别对 1#和 2#做 5 次测量并平均,结果见表 2 和表 3 所示。

同时,用传统的传感器背靠背连接测量同一个电流^[1],如图 5 所示。电流 I_p 流经传感器 B 时,电流方向与传感器标称的流入流出方向一致,

电流 I_p 流经传感器 A 时,电流方向与传感器标称的流入流出方向相反。理想情况下,相同线性误差的传感器 A, B 的次级电流量值相等、方向相反,则没有电流流经 R_b , TEST 点对地电压为零;当 A 和 B 的线性度不一致时,传感器 A, B 的次级电流值不相等,则有电流流过 R_b , 在 TEST 点有对地电压。通过测量 TEST 电压,获传感器 A, B 之间的线性度差异。

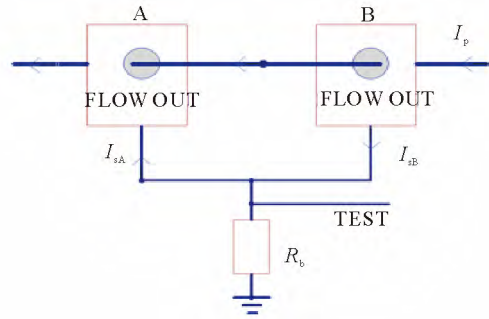


图 5 两个 DCCT 背对背测试连接图

Fig. 5 The connection of two DCCT by back to back

为了验证利用开环增益获得的 DCCT 的线性度,实验以 DANFYSIK 856 为稳流电源提供电流,采用 SinapDCCT-200A 与 LEM IT-200S 背对背连接方式测试同一电流,如图 5 所示。从 TEST 读取两个电流传感器次级电流的差在采样电阻 R_b 上形成的电压。测试中,被测电流 I_p 以 20A 为步进单位从 0A 到 200A,每个电流 I_p 值持续 10min,取 TEST 的稳定状态平均值 \bar{U} 。以 I_p 为 X 轴、以 \bar{U} 为 Y 轴作线性拟合,其线性偏差的标准差见图 6 的标准差(std)。不同 Z_f/Z_1 的情况下,最大偏差(即最大 ΔI)见表 2、表 3 中的最大偏离(Max deviation)列。其中,LEM IT-200S 的参数手册上标称其线性度优于 3×10^{-6} 。本文在不同的 Z_f/Z_1 情况下,分别测试了 1#和 2#,测试结果如图 6(a)和图 6(b)所示。

根据实验结果,可得到以下结论:

1) 从图 6(a)和图 6(b)可以看出,随着开环增益 G 的增大,被测电流 I_p 与测量值 I_p' 差值 ΔI 的最大值成反比例下降,即增大 DCCT 的开环增益可以降低 DCCT 的线性误差,提高其线性度。实际电路中,开环增益受分布参数的影响不能无限提高,通常在线性度和稳定度之间折中取舍,以满足实际测量需要。

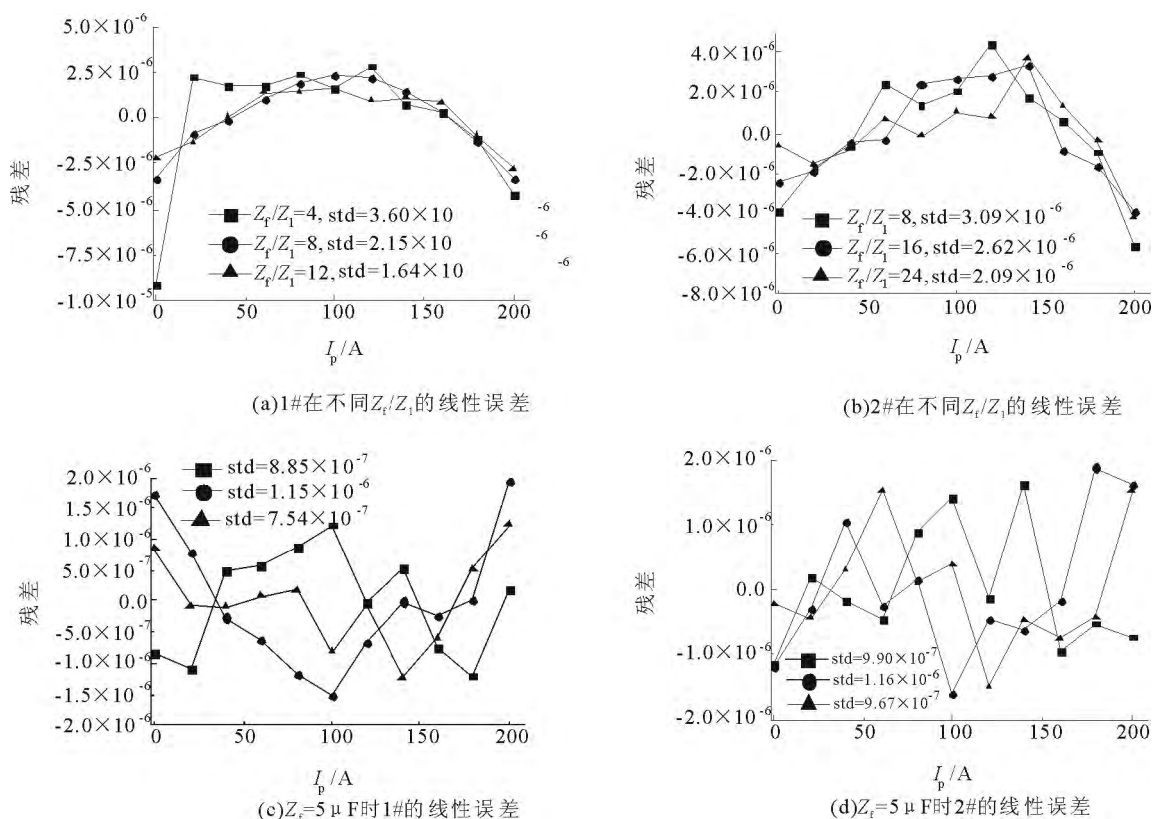


图6 1#和2#SinapDCCT-200A 的线性误差

Fig. 6 The linear error of 1# and 2# SinapDCCT-200A

表2 1#DCCT 开环增益与线性偏差

Tab. 2 Open gain and linear error of 1# DCCT

Z_f/Z_1	$\Delta U/\mu V$	$G1$	$1/G$	Max deviation
4	45	2.22×10^5	2.25×10^{-6}	9.06×10^{-6}
8	30	3.33×10^5	1.50×10^{-6}	3.37×10^{-6}
12	15	6.67×10^5	7.50×10^{-7}	2.74×10^{-6}
∞	10	1.00×10^6	5.00×10^{-7}	1.474×10^{-6}

表3 2#DCCT 开环增益与线性偏差

Tab. 3 Open gain and linear error of 2# DCCT

Z_f/Z_1	$\Delta U/\mu V$	$G1$	$1/G$	Max deviation
8	70	1.43×10^5	3.50×10^{-6}	5.61×10^{-6}
16	35	2.86×10^5	1.75×10^{-6}	3.92×10^{-6}
24	13	7.69×10^5	6.50×10^{-7}	4.21×10^{-6}
∞	10	1.00×10^6	5.00×10^{-7}	1.684×10^{-6}

2) 从表2和表3中可以看出,在 $Z_f=5\mu F$ 时, $Z_f/Z_1 = \infty$,DCCT的直流增益能够达到 2.00×10^6 ,从理论上能保证DCCT的线性误差小于 5×10^{-6} 。1#和2#SinapDCCT-200A在 $Z_f=5\mu F$ 时,以LEM IT-200S为参考,背对背测量的线性最大偏差3次平均值分别为 1.47×10^{-6} 和 1.68×10^{-6} 。

由于LEM IT-200S的标称线性误差小于 3×10^{-6} ,受此限制,有理由推断SinapDCCT-200A的线性精度优于 3×10^{-6} 。

3) 表2和表3中1# 2#的测量值 $1/G$ 与最大偏离(Max deviation)列都随 Z_f/Z_1 的增加而减小,符合式(9)和式(10)所示。

4) 表 2 和表 3 所列最大偏差均小于图 6 中给出的各数据标准差的 3 倍。根据统计学原理,则表中所列数据有 95% 以上可信度。

4 结 语

DCCT 是一种性能优良的电流传感器,使用传统方法测量和评估其线性度往往需要提供苛刻的测试条件。本文通过分析零磁通电流传感器的线性误差产生机制,推导出了利用其开环增益 G 测量和估计其线性误差的方法,降低了其线性误差测量对测量设备的依赖程度。分析文中式(10)和式(11),得出在其测量范围内 I_p 的量值越大, ΔI 出现最大值的可能增大,导致 DCCT 的线性误差增大。通过式(9)可以看出, ΔI 随开环增益增加而变小,降低了其可能的最大值,从而减小了 DCCT 的线性误差。该结论对研制低线性误差的磁平衡电流传感器提供了指导意见。

本文用开环增益测量电流传感器线性度的方法完成了两个 SinapDCCT-200A 线性度测量和评估。验证了 DCCT 线性度与开环增益 G 的反比例关系,实验结果表明, SinapDCCT-200A 相对于 LEM IT-200S 的线性度优于 2×10^{-6} ,因此,可以推断 SinapDCCT-200A 线性度优于 3×10^{-6} 。

参考文献:

- [1] WANG N, ZHANG Z H, LI Z K, et al. Design and characterization of a low-cost self-oscillating fluxgate transducer for precision measurement of high-current [J]. IEEE Sensors Journal 2016, 16(9): 2971-2981.
- [2] 陈斌, 陈素颖, 程健, 等. 高精度直流传感器 DCCT 标准测试系统 [J]. 中国物理 C, 2008(S1): 43-45.
- [3] KIM S C, SHON Y G, SUNG C W, et al. High current unipolar magnet power supply system at the PLS-II storage ring [C] // Proceedings of IPAC 2012 2012.
- [4] 唐俊龙, 李德明, 沈天健, 等. 数字化电源精密电流传感器性能影响的分析 [J]. 传感器与微系统, 2010, 29(11): 79-81.
- [5] UNSER K B. The parametric current transformer, a

beam current monitor developed for LEP [C] // Aip Conference. American Institute of Physics, 1992: 226-275.

- [6] 王东兴, 朱燕燕, 李瑞, 等. 磁调制零磁通电流传感器状态监测方法 [J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版) 2018, 45(3): 1-6.
- [7] LUONG V S, NGUYEN A T, NGUYENB A T. Exchange biased spin valve-based gating flux sensor [J]. Measurement, 2018, 115: 173-177.
- [8] WU Zhiyi. A wide linearity range current sensor based on piezoelectric effect [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(11): 3298-3301.
- [9] 李深旺, 郭志忠, 张国庆, 等. 集磁环式光学电流互感器的自校正测量方法 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 197-202.
- [10] 赵云峰. 100A 直流大电流标准及检定系统 [J]. 宇航计测技术, 2002, 22(5): 31-35.
- [11] YANG Xiaoguang, LIU Hang, WANG Yuanyuan, et al. A giant magneto resistive (GMR) effect based current sensor with a toroidal magnetic core as flux concentrator and closed-loop configuration [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(3): 1-5.
- [12] 刘莉, 杨银堂. 高温 6H-SiCCMOS 运算放大器的设计 [J]. 西北大学学报(自然科学版) 2010, 40(2): 219-222.
- [13] 郭来祥. 磁调制器的理论与计算(一) [J]. 电测与仪表, 1978(6): 13-21.
- [14] 揭秉信. 磁调制器的理论分析与计算 [J]. 仪器仪表学报, 1982, 3(1): 57-63.
- [15] 孙德辉. 传感器线性度计算方法的研究 [J]. 仪器仪表标准化信息, 1987(2): 1-12.
- [16] 唐凯豪, 胡红利, 李林, 等. 基于自适应滤波法的静电传感器转速测量 [J]. 西北大学学报(自然科学版) 2016, 46(4): 497-500.
- [17] VELASSCO-QUESADA G, ROMÁN-LUMBRERAS M, PÉREZ-DELGADO R, et al. Class H power amplifier for power saving in fluxgate current transducers [J]. IEEE Sensors Journal 2016, 16(8): 2322-2330.

(编辑 李静)