

# 磁通门直流互感器感应调制纹波传递特性研究

黄漫吉 冯卓明 杨孝慧 易鑫春 赵建安

(华中科技大学集成电路学院 武汉 430074)

**摘要:** 仪器校准、直流配网电流监测等应用场景对于磁通门直流互感器(DCCT)的精度要求极高,输出信号中的纹波需尽可能小,其中感应调制纹波是此类互感器的主要输出纹波,有必要对系统中感应调制纹波的传递特性进行建模分析并研究相应的抑制方法。因此,针对磁通门 DCCT 的典型结构,提出了一种感应调制纹波传递模型,分析了感应调制纹波的耦合与传导机理,基于系统磁路特性推导出感应调制纹波的传递函数表达式,提取了影响感应调制纹波抑制效果的关键因素,为磁通门 DCCT 闭环反馈结构的系统参数设计提供理论依据。实验结果表明,通过传递模型指导设计后,互感器样机基频输出纹波衰减了 53.4 dB,符合理论模型的推论。

**关键词:** 感应调制纹波;纹波抑制;磁通门;直流互感器

中图分类号: TM933; TM45; TN06 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1050

## Study of transmission characteristics of induced modulation ripple in fluxgate-based direct current transformers

Huang Manji Feng Zhuoming Yang Xiaohui Yi Xinchun Zhao Jian'an

(School of Integrated Circuit, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Fluxgate-based direct current transformer (DCCT) is widely used in applications such as instrument calibration and current monitoring in DC power distribution, where extremely high precision is required. To meet the demand, the ripple in the output signal must be minimized, with induced modulation ripple being the dominant component of the output ripple. Therefore, it is essential to model and analyze the transmission characteristics of the induced modulation ripple and investigate corresponding suppression methods. Based on the typical structure of fluxgate-based DCCT, a transmission model for induced modulation ripple was proposed. The coupling and propagation mechanisms of the ripple were analyzed, and a transmission function was derived according to the magnetic characteristics of the system. Key factors affecting the suppression of induced modulation ripple were identified, providing a theoretical basis for the design of parameters in closed-loop feedback structures. The results show that, with the model's guidance, the output ripple at the fundamental frequency of the prototype is attenuated by 53.4 dB, consistent with the theoretical predictions.

**Keywords:** induced modulation ripple; ripple suppression; fluxgate; direct current transformer

## 0 引言

磁通门直流互感器 (direct current transformer, DCCT) 是目前直流输配电系统中重要的电能感知与系统保护二次设备<sup>[1]</sup>。此类传感器利用法拉第电磁感应定律检测交变电流,并通过引入磁调制技术将电流测量范围拓展到直流,具有高精度、宽频带、高可靠性等优点<sup>[2]</sup>。

由于磁通门 DCCT 具有多磁芯多绕组的磁头特性<sup>[3-5]</sup>,磁路结构复杂,容易产生感应调制纹波。感应调制纹波是指由调制源输出的激磁信号因变压器效应耦合到副边而产

生的、具有与激磁信号相同的基波和奇次谐波频率的纹波信号。感应调制纹波是磁通门 DCCT 的主要输出纹波来源,直接影响测量精度<sup>[6]</sup>,进而对待测设备的安全稳定运行产生影响,如磁成像仪器输出模糊、电缆继电保护设备错误动作等,所以必须对磁通门 DCCT 中的感应调制纹波加以抑制。以下相关研究中给出了不同的解决方案:王农<sup>[7]</sup>基于自激式双磁芯磁调制器和磁积分器技术设计了一种三磁芯四绕组的磁头结构,并从电路角度分析磁积分器对感应调制纹波的抑制作用。田新良等<sup>[8]</sup>提出多点零磁通技术方案,在直流零磁通检测环路中引入负反馈控制,通过磁通补

偿的方式抑制感应调制纹波,但同时增加了磁头电路复杂度。王东兴等<sup>[9]</sup>由互感器激励波形入手,对检测头处的磁芯差异程度进行分析,提出了一种调制纹波的数学模型。张哲璇等<sup>[10]</sup>设计了一种混合铁心的磁头结构,并通过高灵敏度的磁场传感器来检测并处理感应调制纹波。

因此,针对现有磁通门 DCCT 中普遍存在的感应调制纹波问题,本文在已有研究基础上,提出一种感应调制纹波传递模型,研究感应调制纹波在系统中的传递特点,分析闭环反馈环节对感应调制纹波的抑制效果,给出相应系统传递函数表达式,定量地度量系统中的感应调制纹波,并提出感应调制纹波抑制方法,为磁通门 DCCT 的电路设计提供理论依据。

## 1 磁通门 DCCT 原理

### 1.1 工作原理

磁通门 DCCT 包括磁调制器及解调器、交流检测器、反馈控制电路、补偿电路等<sup>[11]</sup>,其中反馈控制电路由比例-积分器和功率放大器组成,电路结构如图 1 所示。互感器检测头由 3 个磁芯组成,其中  $C_1, C_2$  为一组双磁芯磁调制器的检测头,用于检测直流待测信号;  $C_3$  作为交流零磁通检测器检测头,用于检测交流待测信号与感应调制纹波信号。补偿绕组  $W_s$  缠绕在堆叠放置的 3 个磁芯上,绕组中流入由反馈补偿电路产生的补偿电流  $I_s$ ,以抵消待测电流  $I_p$  产生的磁场<sup>[12]</sup>,使得互感器磁芯始终保持在零磁通的动态平衡状态<sup>[13]</sup>,待测电流与补偿电流满足安匝关系,从而实现原边待测电流的测量<sup>[14]</sup>。

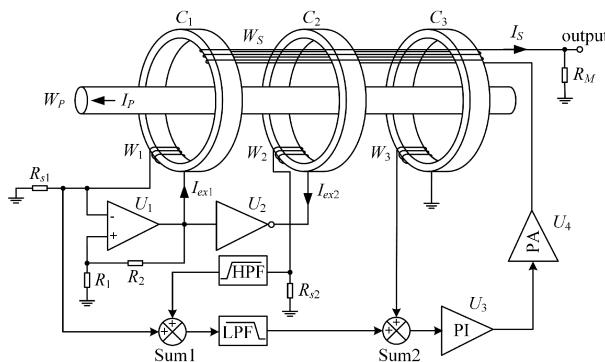


图 1 磁通门 DCCT 结构

Fig. 1 Structure of fluxgate-based direct current transformer

### 1.2 感应调制纹波来源

正常工作时,运算放大器  $U_1$  会输出一个交变的方波信号作为恒压激励源,绕组  $W_1$  中流过激磁电流  $I_{ex1}$ ,激励磁芯  $C_1$  至周期性往复饱和的状态<sup>[15]</sup>。双磁芯调制器中的第二调制磁芯  $C_2$  用于检测磁势平衡<sup>[16]</sup>,理想情况下,单位增益反相器  $U_2$  输出一个与激励源等大反向的激磁电压信号,绕组  $W_2$  中流过激磁电流  $I_{ex2}$ ,使磁芯  $C_2$  也处于周期性往复饱和的状态,且  $C_1$  和  $C_2$  中的激磁磁通刚好幅值相等而

相位相反,故合成磁通为零<sup>[17]</sup>,不会在原、副边中产生感应电动势,理论上不会产生感应调制纹波。

然而,由于材料和工艺的限制,  $C_1, C_2$  磁芯不可能完全一致,两磁芯中的激磁磁通很难做到完全等大反相。并且,对于  $C_1$  磁芯,调制器激励形式为自激,  $C_2$  磁芯则是他激式激励,两磁芯的工作状态不一致,导致激磁磁通实际上并不是等大反相的,故合成磁通不为零,从而产生感应调制纹波  $I_r$ ,其时域与频域特性分别如图 2(a) 和 (b) 所示。本文旨在研究以比例-积分控制器为核心的闭环反馈电路对感应调制纹波的抑制作用。

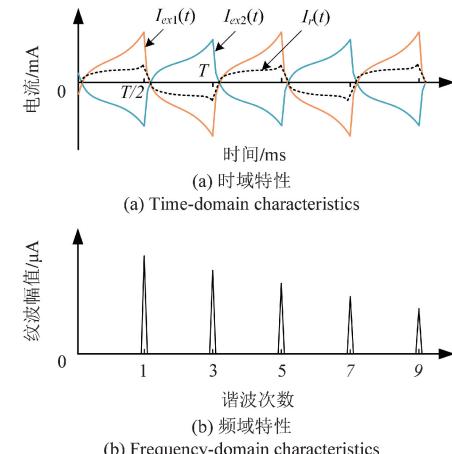


图 2 感应调制纹波示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of the induced modulation ripple

## 2 感应调制纹波传递模型

感应调制纹波由双磁芯调制器中两磁芯的激磁磁通不对称产生,故当闭环系统处于零磁通平衡的状态时,纹波电流  $I_r(s)$  与待测电流  $I_p$  无关。纹波电流  $I_r(s)$  通过电磁感应耦合到副边,从而产生感应调制纹波  $I_{rs}(s)$ 。据此,在互感器系统绝缘可靠、忽略绕组间的寄生电容的条件下,基于图 1 结构提炼出感应调制纹波在系统中的传递框图,如图 3 所示。

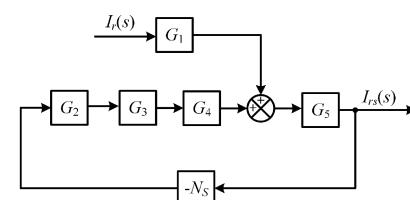


图 3 纹波传递系统框图

Fig. 3 Ripple transfer block diagram

根据系统传递框图列出系统传递函数:

$$\frac{I_{rs}(s)}{I_r(s)} = \frac{G_1 G_5}{1 + N_s G_2 G_3 G_4 G_5} \quad (1)$$

$G_1$  为感应调制纹波通过磁路耦合到副边绕组产生的感应电压  $E_{N_s}(s)$  与纹波电流  $I_r(s)$  之间的传递函数;

$$G_1 = \frac{E_{N_s}(s)}{I_r(s)} = \frac{s \cdot N_1 N_s \mu_0 \mu_e A_e}{l_e} = \frac{s N_1 N_s}{R_m} \quad (2)$$

式中:  $N_1$  和  $N_s$  分别为  $W_1$  和  $W_s$  的绕组匝数;  $R_m$  为磁阻,  $R_m = l_e / (A_e \mu_0 \mu_e)$ ;  $\mu_e$ 、 $A_e$  和  $l_e$  分别为磁芯的相对有效磁导率、有效横截面积和有效磁路长度。

$G_2$  为交流零磁通检测器对副边绕组磁势的传递函数, 根据图 1 所示的绕组同名端和电流参考方向,  $G_2$  的  $s$  域表达式可以写为:

$$G_2 = \frac{E_{N_3}(s)}{-I_{rs}(s) N_s} = -\frac{s N_3 \mu_0 \mu_e (3A_e)}{l_e} = -\frac{3s N_3}{R_m} \quad (3)$$

式中:  $E_{N_3}(s)$  为交流磁通检测绕组  $W_3$  上的感应电动势;  $I_{rs}(s) N_s$  为副边绕组交流磁势;  $N_3$  为  $W_3$  的绕组匝数。

$G_3$  为比例-积分器 PI 的一阶传递函数:

$$G_3 = -K_{PI} \left( 1 + \frac{1}{s\tau_1} \right) \quad (4)$$

式中:  $K_{PI}$  为比例系数;  $\tau_1$  为积分时间常数。

$G_4$  为功率放大器 PA 的传递函数。若 PA 的闭环增益为  $K_{PA}$  并且其单位增益带宽足够大, 那么其传递函数可以近似表示为:

$$G_4 = K_{PA} \quad (5)$$

$G_5$  为闭环系统中副边电流与副边绕组端电压之间的传递函数:

$$G_5 = \frac{1}{R_M + Z_s} = \frac{l_e}{R_M l_e + s \mu_0 \mu_e N_s^2 (3A_e)} = \frac{R_m}{R_M R_m + 3s N_s^2} \quad (6)$$

式中:  $R_M$  为副边绕组  $W_s$  的负载电阻;  $Z_s$  为副边绕组  $W_s$  的复阻抗。

将各个子系统公式(2)~(6)代入式(1)中, 得到系统传递函数:

$$\frac{I_{rs}(s)}{I_r(s)} = \frac{N_1 N_s \tau_1 s}{(3\tau_1 N_s^2 + 3K_{PI} K_{PA} N_3 N_s \tau_1) s + R_M R_m \tau_1 + 3K_{PI} K_{PA} N_3 N_s} \quad (7)$$

$$\text{令 } \alpha = \frac{3N_s + 3K_{PI} K_{PA} N_3}{N_1}, \beta = \frac{3K_{PI} K_{PA} N_3 N_s + R_M R_m}{N_1 N_s}, \text{ 则}$$

式(7)可以进一步化简为:

$$\frac{I_{rs}(s)}{I_r(s)} = \frac{s}{\alpha s + \beta} \quad (8)$$

绘制式(8)系统的特性曲线如图 4 所示, 本文感应调制纹波传递模型具有微分特性, 具体描述为:

1) 运算放大器的高开环增益使得系统在频率为 0 时增益值最小, 对于感应调制纹波而言, 频率趋近于 0, 系统的抑制能力趋近于无穷大。

2) 以系统增益下降 3 dB 处作为转折点, 转折点角频率

$\omega_c$  满足  $\frac{|I_{rs}(j\omega_c)|}{|I_r(j\omega_c)|} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{1}{\alpha}$ , 转折点增益  $A_{fc} = 20\log\left(\frac{\sqrt{2}}{2\alpha}\right)$ 。在比例-积分器的作用下, 系统对于小于转折点角频率  $\omega_c$  的频率范围内的感应调制纹波抑制作用更为显著。

3) 系统增益随频率的增加而增加, 即系统对感应调制纹波的抑制能力随频率增加而降低, 抑制比最大值为  $1/\alpha$ , 系统增益最大值  $A_{dB} = 20\log(1/\alpha)$ , 而磁通门 DCCT 结构通常满足  $N_1 < N_s$ , 故  $1/\alpha < 1$  恒成立, 说明闭环反馈结构对感应调制纹波恒有抑制作用。

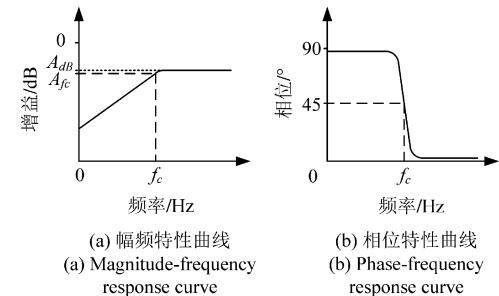


图 4 感应调制纹波传递模型系统特性曲线

Fig. 4 System characteristic curve of the induced modulation ripple transfer model

根据系统频率响应特性, 由式(8)推导转折点角频率  $\omega_c$  和转折点频率  $f_c$  的理论值:

$$\begin{aligned} \frac{|I_{rs}(j\omega_c)|}{|I_r(j\omega_c)|} &= \frac{\omega_c}{\sqrt{\alpha^2 \omega_c^2 + \beta^2}} = \frac{\sqrt{2}}{2\alpha} \\ \omega_c &= \frac{\beta}{\alpha} \\ f_c &= \frac{\beta}{2\pi\alpha} \end{aligned} \quad (9)$$

代入  $\alpha$  与  $\beta$ , 得到转折点频率  $f_c$  的表达式:

$$f_c = \frac{\frac{3K_{PI} K_{PA} N_3 N_s}{\tau_1} + R_M R_m}{2\pi N_s (3N_s + 3K_{PI} K_{PA} N_3)} \quad (10)$$

由式(10)可知,  $f_c$  与  $\tau_1$  呈反比。且由于  $R_M R_m \ll \frac{1}{\tau_1}$ ,  $R_M$  和  $R_m$  对系统零极点的影响极小, 对于转折点频率和时间常数的影响极小, 可以认为本文模型的感应调制纹波抑制效果主要取决于比例-积分器电路参数, 与负载电阻  $R_M$  和磁芯材料参数  $R_m$  取值无关。

### 3 实例与分析

#### 3.1 样机制作

根据图 1 所示电路结构设计并制作了互感器样机。磁芯  $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$  的尺寸一致, 且均由铁基纳米晶带材 1K107B 加工而成, 该材料具有高磁导率、高非线性、低矫顽力、低损耗等特点。磁芯的具体物理特性和几何参数如表 1 所示。原边绕组  $W_1$ 、 $W_2$  和  $W_3$  的绕组匝数均为 300,

副边绕组  $W_s$  的匝数为 1 000。比例-积分器选用精密运放 OP27G, 具有高单位增益、高压摆率、低噪声等特点。功率放大器选用 LM1875 T, 具有外围电路简单、输出功率大、带载能力强等特点。功率放大器闭环增益  $K_{PA} = 1$ , 系统基波频率  $f_{self} = 210$  Hz。实际应用中负载电阻  $R_M$  常取 1~10 Ω, 本文为了便于在测试过程中记录和分析纹波抑制效果, 选用 100 Ω 的负载电阻。

表 1 磁芯参数

Table 1 Magnetic core parameters

有效横截面积	有效磁路长度	有效相对磁导率	饱和磁感应强度
$A_e/cm^2$	$l_e/cm$	$\mu_e$	$B_s/T$
0.275	16.1	80 000	1.25

### 3.2 模型验证

为了验证模型特性与转折点频率等特征点, 设计了两组比例-积分器参数, 使测试 a 的转折点频率  $f_{ca} = 1 260$  Hz, 测试 b 的转折点频率  $f_{cb} = 614$  Hz, 且两组实验样机的转折点增益  $A_{fc}$  相等。首先利用 FFT 工具提取两组实验样机的输入、输出谐波成分和谐波幅值, 分析感应调制纹波实际抑制效果, 再用 Matlab 计算两组实验样机的系统增益值, 最后将实测增益值与理论计算值进行对比, 结果如图 5 所示。

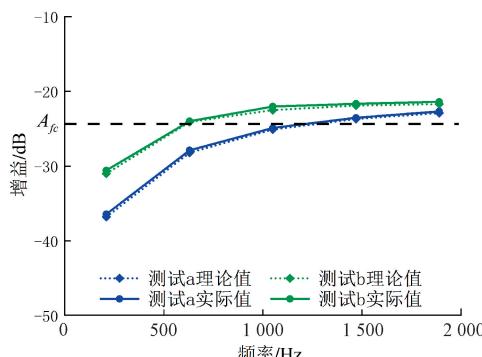


图 5 模型特性验证

Fig. 5 Model feature verification

由测试结果可以看出: 1) 测试 a 和测试 b 的纹波特性均符合本文模型特点, 即随着频率的增加, 系统增益值增加, 纹波抑制能力变差; 2) 实测两组实验样机的转折点增益  $A_{fc}$  处的频率值均与设计的转折点频率一致; 3) 对于相同的基波频率  $f_c$ , 理论转折点频率越大, 系统纹波抑制能力越强, 表现为特性曲线整体向右平移。

为了分析模型参数对纹波抑制效果的具体影响, 设计了多组比例-积分器参数的对比实验, 结果如图 6 所示。从图 6(a)可以看出, 当比例系数  $K_{PI}$  一定时, 时间常数  $\tau_1$  越小, 转折点频率  $f_c$  越大, 各次谐波频率处的增益值降低, 纹波抑制性能越好, 与式(10)所描述的特性一致。从图 6(b)可以看出, 当时间常数  $\tau_1$  一定时, 随着比例系数  $K_{PI}$  的增

加, 模型的  $\alpha$  值减小, 转折点增益  $A_{fc}$  也减小, 对应特性曲线整体向下平移, 与模型结论完全吻合, 且转折点频率  $f_c$  也略有增加。

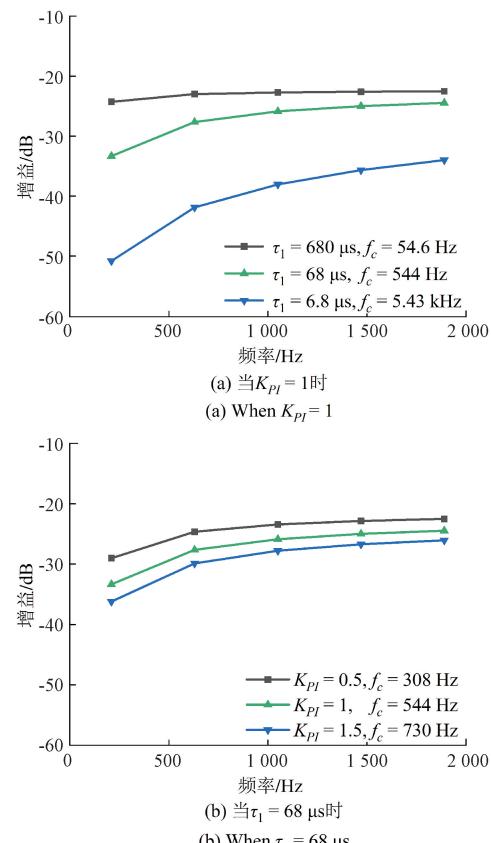


图 6 模型参数对纹波抑制效果的影响

Fig. 6 Impact of model parameters on ripple suppression performance

### 3.3 模型应用

根据模型特性与验证结果, 总结出利用本文模型设计电路参数的方法: 在磁通门 DCCT 磁头参数确定的情况下, 根据抑制需求确定转折点频率  $f_c$ , 通过传递函数得到  $K_{PI}$  和  $\tau_1$  对应关系, 从而设计比例-积分器电路参数。

需要注意的是, 纹波抑制效果的最优解受限于元器件取值:

1) 通过增加比例系数  $K_{PI}$  来降低转折点增益  $A_{fc}$  并增加转折点频率  $f_c$ , 意味着积分电阻增加, 但同时增大了时间常数  $\tau_1$ , 反而阻碍转折点频率的增加。

2) 通过降低时间常数  $\tau_1$  来增加转折点频率  $f_c$ , 意味着积分电容减小, 而在比例-积分器电路设计中, 积分电容过小将不利于稳态反馈平衡的建立。故转折点频率并不是设计得越大越好, 参数间相互制约, 需要结合实际需求与电路稳定性进行设计。

例如抑制需求为基波频率处的增益值小于  $-50$  dB, 根据上述方法重新设计电路参数, 使用 FFT 工具测量原、副边各次谐波处感应调制纹波, 并与上节中的测试 a、测试 b 两组实验样品的测试结果进行对比, 列出各组样机在前七

次谐波频率下的感应调制纹波抑制性能如表 2 所示,绘制电流幅值对比曲线如图 7 所示。可以看出,优化后副边各次谐波的感应调制纹波电流幅值都有明显降低,基频处幅值由原边的 0.958 mA 经抑制后下降到副边的 2.053 μA,实际增益为-53.4 dB,与理论设计值相符;并且发现优化后副边的三次谐波幅值大于一次谐波幅值,这是由于感应调制纹波在低频处受到的抑制作用更强,抑制效果随着频率的增加而下降造成的,与前文中的结论一致。

表 2 各次谐波频率下感应调制纹波的增益值

Table 2 Gain of induced modulation ripple at each harmonic frequency

组别	谐波次数				dB
	1	3	5	7	
测试 a	-36.4	-27.9	-24.9	-23.5	
测试 b	-30.6	-23.4	-22.1	-21.7	
优化后	-53.4	-43.1	-38.7	-35.8	

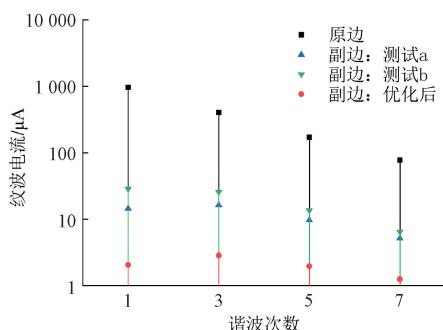


图 7 纹波幅值对比

Fig. 7 Ripple amplitude comparison

### 3.4 性能分析

用示波器记录样机时域输出波形如图 8 所示,经过本文模型指导电路参数设计,改进后的样机感应调制纹波的抑制性能得到显著优化,输出信号纹波幅值明显降低。

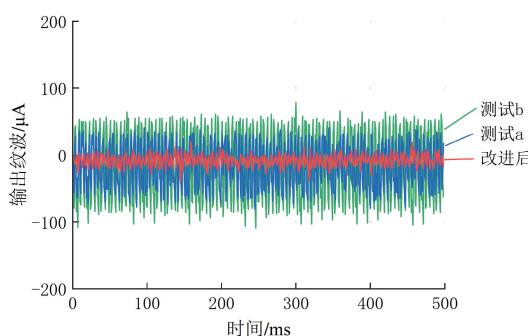


图 8 输出纹波对比

Fig. 8 Output ripple comparison

在样机 0~600 A 的测量范围内进行了测量精度和纹波系数的测试,相对误差优于 0.005%,纹波幅值波动不超

过 1.68 μA。结果表明,纹波抑制效果不受待测电流的影响,也即系统内的感应调制纹波来源于自激式调制器,与外部待测电流无关。

此外,进行了感应调制纹波抑制性能稳定性测试:样机原边开路,连续 7 天每天定时记录副边负载上的纹波各次谐波幅值。结果表明,纹波幅值波动平缓,最大变化量约为 0.43 μA,证明样机对感应调制纹波的抑制性能在长期运行的条件下也能保持稳定。

## 4 结 论

本文提出一种基于磁通门 DCCT 的闭环反馈电路中比例-积分器的参数优化方法,在不增加系统复杂度的情况下抑制感应调制纹波。通过分析磁路、电路特性,推导了模型的传递函数表达式,建立了磁通门 DCCT 感应调制纹波传递模型,为感应调制纹波抑制效果的评估提供了理论依据。

通过研究得出以下结论:磁通门 DCCT 中感应调制纹波的传递具有微分特性,在小于转折点频率的频率范围内,抑制能力随频率的增加而降低;合理设计转折点频率、时间常数等关键参数可以优化感应调制纹波的抑制效果;本文方法还可以与其他专用纹波抑制方案结合,进一步优化纹波性能,为高精度磁通门 DCCT 输出纹波优化提供了一种新的解决方案。

## 参 考 文 献

- [1] 袁尧鑫,陈威.面向配用电的集成化自激磁通门直流电流传感器设计[J].电器与能效管理技术,2022(7):41-49.
- [2] YUAN Y X, CHEN W. Design of integrated self-excited fluxgate DC current sensor for power distribution [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(7): 41-49.
- [3] 周峰,李鹤,李文婷,等.大电流测量传感技术综述[J].高电压技术,2021, 47(6): 1905-1920.
- [4] ZHOU F, LI H, LI W T, et al. Review of high current measurement and sensing technology[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1905-1920.
- [5] VELASCO-QUESADA G, ROMAN-LUMBRERAS M, CONESA-ROCA A, et al. Design of a low-consumption fluxgate transducer for high-current measurement applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(2): 280-287.
- [6] 李泽沛,彭延峰,何宽芳,等.基于 Simulink 的零磁通电流传感器动态误差分析[J].电子测量技术,2020, 43(17): 66-73.
- [7] LI Z P, PENG Y F, HE K F, et al. Dynamic error analysis of zero magnetic current sensor based on Simulink [J]. Electronic Measurement Technology,

- 2020, 43(17): 66-73.
- [5] DING ZH W, WANG J F, LI CH SH, et al. A wideband closed-loop residual current sensor based on self-oscillating fluxgate[J]. IEEE Access, 2023, 11: 134126-134135.
- [6] 郭来祥. 磁调制器的理论和计算(三)[J]. 电测与仪表, 1978(8): 3-8.  
GUO L X. Theory and calculation of magnetic modulators (3) [J]. Electrical Management & Instrumentation, 1978(8): 3-8.
- [7] 王农. 精密测量直流大电流的自激振荡磁通门法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
WANG N. Self-oscillating fluxgate technology for precision measurement of DC high current [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [8] 田新良, 钱麒羽, 付伟. 磁通门电流传感器的多点零磁通技术[J]. 电测与仪表, 2018, 55(z1): 21-25.  
TIAN X L, QIAN Q Y, FU W. Multi-point zero flux technology of the fluxgate current transducers [J]. Electrical Management & Instrumentation, 2018, 55(z1): 21-25.
- [9] 王东兴, 朱燕燕, 李瑞, 等. 磁调制DCCT调制噪声及测量方法研究[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(1): 178-184.  
WANG D X, ZHU Y Y, LI R, et al. Study on modulation noise and its measurement method of DCCT with magnetic modulation[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(1): 178-184.
- [10] 张哲璇, 陈柏超, 田翠华, 等. 基于混合铁心的新型电流互感器研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(1): 9-24.  
ZHANG ZH X, CHEN B CH, TIAN C H, et al. Research on a novel current transformer based on composite core[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(1): 9-24.
- [11] 周力任, 朱力, 潘洋. 直流电流比较仪解调方式的研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3): 148-152.  
ZHOU L R, ZHU L, PAN Y. Research on the demodulation methods of DC current comparator[J]. Electrical Management & Instrumentation, 2020, 57(3): 148-152.
- [12] 张长富, 陈为. 电流检测技术: 原理、特点与应用[J]. 磁性材料及器件, 2022, 53(1): 95-105.  
ZHANG CH F, CHEN W. Current detection technology: principle, characteristics and applications[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2022, 53 (1): 95-105.
- [13] 周力任, 朱力, 潘洋. 直流电流比较仪闭环传递特性的理论研究与试验验证[J]. 电气应用, 2021, 40(7): 30-36.  
ZHOU L R, ZHU L, PAN Y. Theoretical research and experimental verification on the closed-loop transfer characteristic of DC current comparator[J]. Electrotechnical Application, 2021, 40(7): 30-36.
- [14] VEINOVIC S, PONJAVIC M, MILIC S, et al. Low-power design for DC current transformer using class-D compensating amplifier[J]. IET Circuits, Devices & Systems, 2018, 12(3): 215-220.
- [15] 罗宁昭, 杨锋, 张挺, 等. 数字式大口径直流漏电流传感器设计[J]. 海军工程大学学报, 2020, 32 (6): 83-89.  
LUO N ZH, YANG F, ZHANG T, et al. Design on digital large-diameter DC leakage current sensor[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2020, 32(6): 83-89.
- [16] 张煌辉, 董琪琪, 方杰, 等. 一种零磁通电流传感器适配装置的研制与应用[J]. 电测与仪表, 2023, 60(3): 195-200.  
ZHANG H H, DONG Q Q, FANG J, et al. Development and application of a zero-flux current sensor adaptive device[J]. Electrical Management & Instrumentation, 2023, 60(3): 195-200.
- [17] XIAO X, SONG H T, LI H B. A high accuracy AC+DC current transducer for calibration [J]. Sensors, 2022, 22(6), 2214.

## 作者简介

黄漫吉, 硕士研究生, 主要研究方向为磁通门电流传感器技术。

E-mail: m202272900@hust.edu.cn

冯卓明(通信作者), 副研究员, 博士, 主要研究方向为微弱电磁信号检测、磁通门电流传感器。

E-mail: feng\_zm@hust.edu.cn