

一种基于磁阻芯片的电流互感器闭环式设计

朱旺峰, 袁嫣红, 孙芝凤

(浙江理工大学教育部现代纺织装备技术工程研究中心, 杭州 310018)

摘要: 介绍一种闭环电流互感器。该互感器是一种基于磁阻芯片传感电流的电子线路补偿式电流互感器。与传统互感器不同,该互感器采用闭环反馈传感机理。分析该互感器的工作原理、工作过程以及系统性能。通过与开环式互感器的理论对比分析并结合测试过程的具体实验数据,论述了闭环电流互感器的优越性。测试表明:这种采用闭环形式的电流互感器较开环形式的电流互感器精度高,抗干扰能力强,稳定性好,在性能上有很大的改善。

关键词: 磁阻; 闭环; 电流; 互感器

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A

0 引言

磁阻传感器灵敏度高、线性度好、响应速度快、温度稳定性好,能够对微弱磁场信号进行传感,可用于电流测量系统中^[1-2]。但是由于其对磁场的感应有一定的范围限制,且存在磁滞现象,因此,当其应用于电流测量时,对系统的测量范围和精度有一定的影响。陈科球等^[3]介绍了一种基于 InSb-In 薄膜磁阻元件制成的磁阻传感器的电流测量方法。其利用磁场变化同时改变两个 InSb-In 磁阻元件阻值这一特性,设计分压处理电路来实现电流的测量。此种方法,由于受供电电压的影响,其输出电压范围不大,因而电流的测量范围也很有限,只能测量 0.05~12 A 的电流。文献^[4]论述了一种基于磁阻传感器的闭环电流测量系统,采用闭环测量方式,改善了稳定性、抗干扰能力、测量精度,但其测量范围太小应用受到限制。本文介绍一种基于磁阻芯片采用闭环系统测量电流的互感器。采用闭环测量方式来保证系统精度,通过提高系统驱动电流能力来增加电流测量范围。实验结果表明,该电流互感器比开环式电流互感器精度高、抗干扰能力强;比一般闭环式电流互感器测量范围广^[5-6]、响应速度快、频率响应范围宽。可用于开关柜、电动汽车、地铁供电系统以及工业电

流监控测量系统,是一种很具有发展潜力的互感器。

1 闭环电流互感器的原理

本文的闭环电流互感器系统构成如图 1 所示。

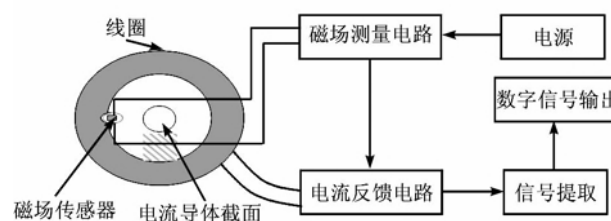


图 1 闭环电流互感器组成

系统由磁场测量电路、电流反馈电路、信号提取模块、电源模块以及数字信号输出模块组成。其工作原理为:被测电流流过铁芯线圈中心的导体,电磁感应铁芯内部产生磁场。铁芯缺口处泄出部分磁场,磁场传感器感应铁芯缺口处的磁场,根据测得的磁场信号由电流反馈电路产生合适的电流加载到铁芯线圈上,产生的反向磁场来补偿由被测电流产生的磁场。如此,形成一个闭环系统,可使铁芯内部和磁场传感器处磁场接近零,而反馈电流与流过导体的被测电流具有一定的比例关系。通过分析反馈电流可以计算出被测电流。

闭环电流互感器的测量原理如图 2 所示。

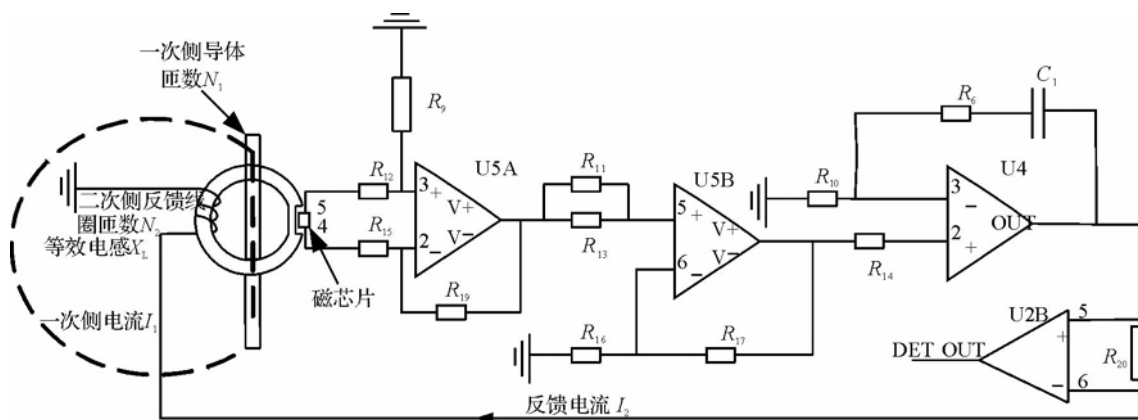


图2 闭环电流互感器原理

这是一种负反馈自动补偿式的有源电流互感器^[7]，其工作过程为：当一次侧有电流流入时，产生初级电流。电流产生磁场，由铁芯聚集作用于磁环空隙中的磁阻芯片上，磁阻芯片产生电压输出，通过一级差分放大，二级电压放大和三级电压功率放大，产生一正比于磁阻芯片感应电压的电压。该电压作用于绕在铁芯上的反馈线圈，形成与一次侧电流相反的二次电流，同样产生的磁场也与一次侧电流产生的相反。当达到平衡时，铁芯中磁场相互抵消，缺口处剩磁接近为零。即被测电流产生的磁场和反馈电流产生的磁场的和接近为零，此时，磁阻芯片的电压输出趋于零，反馈回路形成与一次侧电流成比例的电流。

由以上分析可知，这种闭环电流互感器的工作过程是一个动态平衡的过程。其平衡建立所需的时间很短暂。输入端的任何变化都会引起系统的变化，导致系统平衡的破坏。一旦系统失去平衡，磁阻芯片就会有电压输出，后级电路经过电压功率放大作用于反馈线圈产生反馈电流使系统达到新的平衡^[8]。

2 系统性能分析

本文闭环电流互感器模块框图如图3所示。

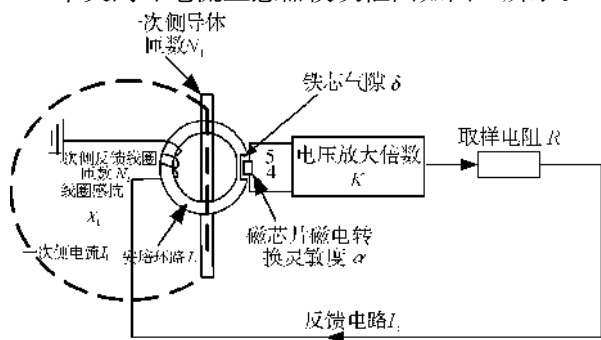


图3 闭环电流互感器模块组成

一次侧被测电流在缺口处产生磁感应强度：

$$B_1 = \alpha N_1 I_1 \quad (1)$$

二次侧反馈电流在缺口处产生磁感应强度：

$$B_2 = \alpha N_2 I_2 \quad (2)$$

其中： α —铁芯电磁转换灵敏度； N_1 —一次侧导体穿过铁芯线圈的匝数； I_1 —一次侧电流； N_2 —二次侧反馈线圈匝数； I_2 —二次侧反馈电流。

一次侧被测电流在磁阻芯片上产生电压：

$$V_{m1} = \beta B_1 = \beta \alpha N_1 I_1 \quad (3)$$

其中： β —磁阻芯片磁电转换灵敏度。

反馈电流在磁阻芯片上产生电压：

$$V_{m2} = -\beta B_2 = -\beta \alpha N_2 I_2 \quad (4)$$

磁阻芯片上感应电压：

$$V_m = V_{m1} + V_{m2} = \beta \alpha (N_1 I_1 - N_2 I_2) \quad (5)$$

由欧姆定律可得：

$$I_2 = \frac{KV_m}{X_L + R} \quad (6)$$

其中： X_L —线圈等效阻抗； R —取样电阻阻值； K —电压放大倍数。

由式(5)式(6)得：

$$I_2 = \frac{N_1 I_1}{\left(\frac{X_L + R}{K\beta\alpha} + N_2 \right)} \quad (7)$$

设线圈电感为 L ，线圈等效电阻为 R_f ，则：

$$X_L = R_f + j\omega L \quad (8)$$

所以：

$$I_2 = \frac{N_1 I_1}{\left(\frac{R + R_f + j\omega L}{K\beta\alpha} + N_2 \right)} \quad (9)$$

令： $\Delta = \frac{R_f + R + j\omega L}{K\beta\alpha}$ 为系统误差。

从上式可以看出，系统误差与采样电阻、电压放大倍数、线圈等效电阻、等效电感以及铁芯电磁转换灵敏度、磁阻芯片的磁电转换灵敏度有关。其中铁

芯电磁转换灵敏度与铁芯大小、材质以及开口形状、位置有关,为了提高系统性能应合理设计铁芯,使铁芯的电磁转换灵敏度较大。磁阻芯片的磁电转换灵敏度与磁阻芯片性能有关,在磁阻芯片的选型上,应尽量选取线性度好、灵敏度高的磁阻芯片。对于线圈应选择电感较小的线圈,因为电感量影响测量电流的相位与系统响应速度。放大倍数的选取应合理分配且足够大。采样电阻应合理选择,太大了影响系统功耗,太小了采样电压信号也较小,易造成采样不准确。

由式(9)得系统响应时间^[11]:

$$\tau = \frac{L}{R_f + R + N_2 k \beta \alpha} \quad (10)$$

当铁芯的形状材料一定,磁阻芯片选定时,系统响应时间与反馈线圈匝数、线圈等效电阻、线圈等效电感以及取样电阻相关。增加系统的取样电阻阻值,增大系统放大倍数都可以提高系统的响应速度,但线圈匝数增大,电感量也会增大,响应反而变慢。

根据以上的理论分析及反复试验对比,笔者设计的电流互感器,取样电阻 $R=1\Omega$,线圈等效电阻 $R_f=0.91\Omega$,线圈等效电感 $L=4.3\text{ mH}$,系统电压放大倍数 $K=1\ 000$,铁芯电磁转换灵敏度 $\alpha=0.56\text{ Oe/A}$,磁阻芯片磁电转换灵敏 $\beta=6\text{ mV/Oe}$,反馈线圈匝数 $N_2=200$ 。当测量交流 50 Hz 电流时, $\omega=2\pi f=100\pi$ 。

由式(9),计算系统相对误差时,不考虑电感对系统电流相位的影响可得:

系统相对误差

$$\text{err} = \frac{R_f + R}{N_2 K \beta \alpha} = \frac{1 + 0.91}{200 \times 1\ 000 \times 6 \times 10^{-3} \times 0.56} = 0.002\ 84$$

由式(10),可得系统响应时间:

$$\tau = \frac{L}{R_f + R + N_2 k \beta \alpha} = \frac{4.3 \times 10^{-3}}{0.91 + 1 + 200 \times 1\ 000 \times 6 \times 10^{-3} \times 0.56} = 6.38\ \mu\text{s}$$

3 性能对比

电流互感器的磁电转换单元采用的是磁阻芯片 MMLP57F。MMLP57F 磁阻芯片是基于隧道磁电阻效应^[12](TMR)的传感器。该芯片灵敏度高、功耗低、温度稳定性好、频率响应范围宽,可用于检测微弱磁场信号;其体积小,可靠性高,在自动化技术、家用电器、商品识别、卫星定位、导航系统以及精密测量技术方面具有广阔的应用前景。但其对磁场的感应有一定的范围限制,在磁感应强度为 $0\sim 30\text{ Oe}$ 范围内,其输出电压与磁场大小成正比。当磁感应

强度超出 30 Oe 时,其输出电压与磁场线性度较差。图4为 MMLP57F 磁阻芯片感应磁场与输出电压关系曲线,图5为磁阻芯片感应一次侧电流与磁阻芯片输出电压关系曲线。

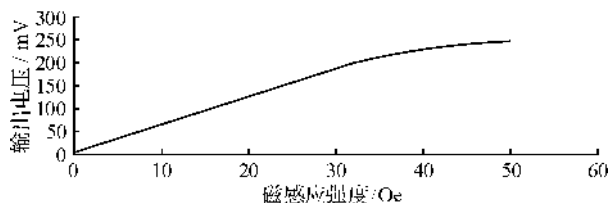


图4 感应磁场与磁阻芯片输出电压关系曲线

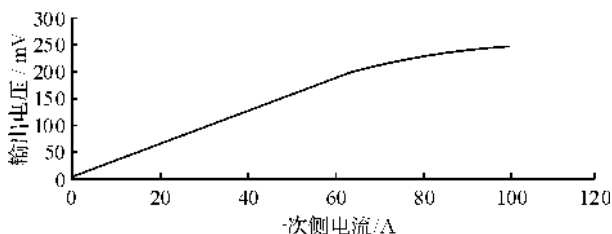


图5 一次侧电流与磁阻芯片输出电压关系曲线
开环形式的电流互感器系统构成如图6所示。

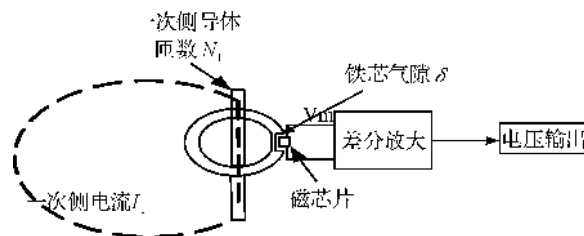


图6 基于磁阻芯片的开环测量系统

当采用开环测试系统时,电流信号产生的磁场经铁芯放大,由磁阻芯片进行磁电转换,然后经差分放大后其输出电压与一次侧电流关系曲线如图7所示。

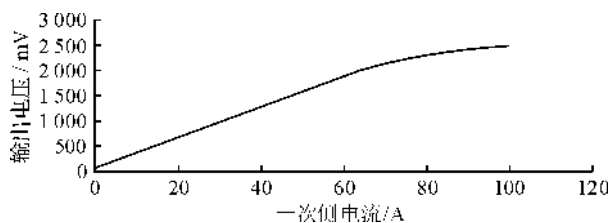


图7 开环系统一次侧电流-输出电压关系曲线

从图7中可以看出,开环系统的线性范围小测量范围有限。这是由磁阻芯片的性能决定的。

当采用闭环测量系统时,当一次侧电流改变时,系统马上失去平衡,磁阻芯片就会产生差分电压,经后级电路放大形成反馈电流,使系统重新达到平衡。由于反馈电流的存在使铁芯开口处磁场很小接近为零,磁阻芯片始终处于其线性工作区,因此其测量的线性范围得到扩大。图8是设计实现的闭环电流互感器的一次侧电流与采样电阻电压关系曲线。

从图8可以看出,采样电阻上的电压与被测电流(一次侧电流)的线性度好。闭环系统的测量范围已与磁阻芯片的线性度无关,主要由闭环的稳定性决定,因此可以大大提高其测量范围。

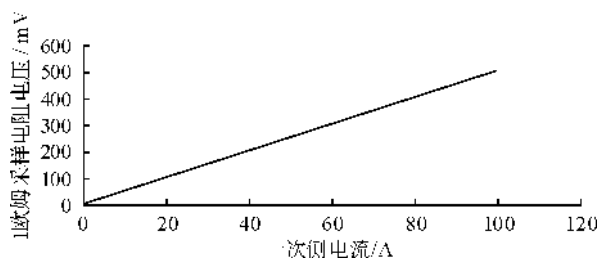


图8 闭环电流互感器采集电阻电压-电流关系曲线

4 结 语

理论分析表明采用闭环形式的电流互感器,可以大大提高测量范围,提高测量的精度。但闭环系统结构相对复杂,系统各个模块之间相互影响较大,因此要合理设计各个模块并将它们组成一个有机的整体,才能使其测量效果达到最佳。

参考文献:

- [1] Johann H, Gunther S, Rupert C, et al. Anisotropic magnetoresistance effect field sensors. [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2000, 304(8853): 788-791.
- [2] Gurzhin S G, Zhule V I, Nikitin S V. Sensors based on new magnetoresistive effects[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 72(3): 648-661.
- [3] 陈科球, 黄钊洪. 基于 InSb-In 共晶体薄膜磁阻元件电流传感器的应用[J]. 微纳电子技术, 2007, 44(7): 200-202.
- [4] 曾一凡, 匡卫华. 反馈式磁阻传感器小电流检测系统的研究[J]. 计量学报, 2013, 34(1): 41-44.
- [5] 李 鹤, 李 前, 章述汉, 等. 直流输电用零磁通直流电流互感器的研制[J]. 高压电技术, 2012, 38(11): 2981-2985.
- [6] 李 莉, 才 滢. 零磁通直流电流传感器及其在电流标准源中的应用[J]. 宇航计测技术, 2006, 5(1): 37-64.
- [7] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 259-303.
- [8] 王福才, 林海军, 高 宏, 等. 磁平衡式电流传感器的设计及其在电量测量中的应用[J]. 电测与仪表, 1994, 31(6): 14-15.
- [9] 胡友秋, 程福臻, 叶邦角. 电磁学与电动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 151-155.
- [10] 贾起民, 郑永令, 陈暨耀. 电磁学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 415-419.
- [11] 秦曾煌, 姜三勇. 电工学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 98-102.
- [12] 吉吾尔·吉里力, 拜山·沙德克. 隧道磁电阻效应的原理及应用[J]. 材料导报, 2009, 23(14): 338-340.

Closed-loop Design of Current Transformer Based on Magnetic Reluctance Chip

ZHU Wang-feng, YUAN Yan-hong, SUN Zhi-feng

(Modern Textile Equipment and Technology Engineering Research Center, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This paper introduces a closed-loop current transformer which is an electronic circuit compensating current transformer with current sensing based on magnetic reluctance chip. Different from traditional transformer, this transformer uses closed loop feedback sensing mechanism. This paper analyzes the working principle, working process and system performance of this transformer and discusses the superiority of closed-loop current transformer through theoretical contrastive analysis on open loop transformer in combination with the specific experimental data in the test process. The test shows that closed-loop current transformer has a high precision, strong capacity of resisting disturbance, good stability and improved performance compared to open loop current transformer.

Key words: magnetic reluctance; the closed-loop; current; transformer

(责任编辑: 张祖尧)