

基于数字反馈的单片铁损测试仪的设计与实现^{*}

苏英俩, 顾伟骊^{*}

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要:针对中小变压器和电机生产企业对电工钢片铁损现场检测的需求,利用基于数字反馈法的波形控制技术,研制了一款电工钢片单片铁损测试仪。首先采用 STM32F103RC 微控制器内部集成的 12 位 DAC 产生励磁信号;接着采样 U 型测试探头的磁感应强度信号以进行波形控制,使得磁感应强度及波形系数误差均小于 0.1%;最后同步采样励磁电流和感应电压,进行铁损计算。实验结果表明,该测试仪有效地保证了磁感应强度及波形系数误差均小于 0.1%,满足单片铁损测试过程中磁感应波形正弦的要求;提高了铁损测试速度和精度。

关键词:铁损测试仪;数字反馈;磁感应强度;波形系数

中图分类号:TH878;TP216

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)09-0072-04

Designment and implementation of single sheet tester based on digital feedback

SU Ying-liang, GU Wei-si

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at the small enterprises of transformer and electrical motor of iron loss on-site testing requirements, a single sheet tester based on digital feedback to control the waveform was designed. The 12-bit DAC of STM32F103RC was firstly used to produce the excitation current and the induced voltage was sampled, the errors of the flux density and waveform factor were adjusted within 0.1% by waveform controlling. Then the excitation current and induced voltage were synchronous sampled and the iron loss was calculated. The results show that, the errors of the flux density and waveform factor are both effectively ensured within 0.1% by the single sheet tester, the waveform of flux density can meet the requirement of sinusoidal. So the speed and accuracy of iron loss testing are improved.

Key words: single sheet tester; digital feedback; flux density; waveform factor

0 引言

铁损,即铁芯损耗,是指铁芯在 ≥ 50 Hz 交变磁场下磁化时所消耗的无效电能。因铁损造成的电量损失占各国全年发电量的 2.5%~4.5%^[1]。这种由于磁通变化受到各种阻碍而消耗的无效电能,转变成热量而损失掉,又引起电机和变压器等设备的温度升高。因此,铁损作为考核电工钢产品磁性的最重要指标,铁损值也作为划分产品等级的依据。

国际上普遍采用爱泼斯坦方圈法作为测量电工钢片铁损值的标准方法,我国采用 GB/T 3655-2008:《用爱泼斯坦方圈测量电工钢片(带)磁性能的方法》^[2]。然而,该测量方法存在几个缺点:①试样的制作很繁琐,需要剪切约 1 kg 的 30 mm×300 mm 试样;②在装入试样时很繁琐,试样在角部采用双塔塔连接方式;③需要进行去应力退火;④浪费大量试样材料^[3-4]。1974 年 T. Yamamoto 和 Y. Ohya 提出了单片铁损测试仪测量铁损的方法,经过多年的试用和改进,纳入了 IEC 标

收稿日期:2010-02-01

基金项目:浙江省科技厅资助项目(2007C21018)

作者简介:苏英俩(1984-),男,浙江苍南人,主要从事电工理论及其新技术方面的研究。E-mail:yingliangsu@163.com

通信联系人:顾伟骊,男,教授,硕士生导师。E-mail:gws@zjut.edu.cn

准:IEC60404-3^[5]。单片铁损测试优点是测试简便,可直接读出铁损值,而且仪器携带方便。变压器及电机等厂商在采购电工钢片时,常使用单片铁损测试仪进行现场测试来判断供货是否与样片一致。

工程上,在磁感应强度波形为正弦波条件下,以取向磁感应强度为 1.7 T 和无取向磁感应强度为 1.5 T 时的铁损值作为磁性能判定的一个重要基准。在进行铁损测试的过程中,由于磁化曲线的非线性,磁感应强度波形会出现畸变。传统的铁损测试设备均采用模拟反馈法来保证磁感应强度的正弦性;而模拟反馈法硬件电路复杂、控制波形的正弦性不高。

为此,笔者应用数字反馈法对磁感应强度及其波形系数进行调整,采用 ARM 微控制器实现数字反馈算法,硬件电路简单,并可保证磁感应强度幅值误差及波形系数误差均在 0.1% 以内。

1 单片铁损测试原理

利用绕有初级线圈 N_1 和次级线圈 N_2 的 U 形叠片电工钢片制成的测试探头置于测试电工钢片试样上,如图 1 所示。当对初级线圈中施加一定励磁电流后,测试探头与试样断面形成磁回路,测量由次级线圈产生的感应电压及初级线圈中的励磁电流,经过计算得出试样的铁损^[6]。

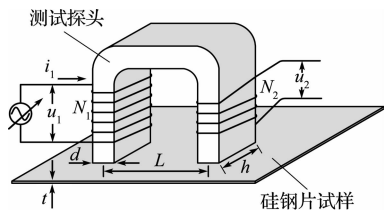


图1 铁损测试仪原理示意图

从能量的角度看,初级输入次级的瞬时功率为 $p_1 = u_1 i_1$,当磁力线为正弦波,并且忽略铜损和仪表及气隙损耗时,根据:

$$u_1 = u_2 \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

可得到试样铁损瞬时值:

$$p = u_1 i_1 = \frac{N_1}{N_2} u_2 i_1 \quad (2)$$

所求铁损在一个周期内的平均值^[7]为:

$$P = \frac{1}{T} \times \frac{N_1}{N_2} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \times \frac{N_1}{N_2} \int_0^T u_2 i_1 dt = \frac{N_1}{N_2} \times \overline{u_2 i_1} \quad (3)$$

式中 T —励磁电源周期; $\overline{u_2 i_1}$ —功率表读数,乘上匝数比就是试样的铁损值。

从而,单位质量的铁损值为:

$$P_s = P/m = \frac{1}{LhtD} \times \frac{N_1}{N_2} \times \overline{u_2 i_1} \quad (\text{W/kg}) \quad (4)$$

式中 L —磁路平均长度; h —测试探头宽度; t —试样厚度; D —试样密度。

2 数字反馈法的应用

2.1 磁感应强度大小的控制技术

DAC 产生正弦波的方法在于按特定时间顺序读取正弦波查询表中波形数据,然后将这些数字量转换成模拟量输出^[8]。对一个 12 位的 DAC 来说,正弦波幅值随变量 M 变化的计算式为:

$$f(x) = 2048 + M \sin \left(\frac{2\pi x}{1024} \right) \quad (5)$$

$$x = 0, 1, \dots, 1023; M = 0, 1, \dots, 2048$$

再根据磁感应强度峰值计算公式:

$$B_m = \frac{U_2}{4.444fN_2A} \quad (6)$$

式中 B_m —磁感应强度峰值; U_2 —次级线圈感应电压; f —励磁电源频率; A —电工钢片试样横截面积。

从而得到:

$$M = K \times \frac{N_1}{N_2} U_2 = 4.444fN_1AKB_m \quad (7)$$

式中 K —常数。

由式(7)可以看出 M 、 B_m 、 U_2 三者之间存在线性关系。由此,可以通过程序对 M 的设置来控制 DAC 产生正弦波的幅值,亦即控制磁感应强度。

根据上述分析,可得出磁感应强度调整过程如下:

$$\begin{cases} M(0) = U_{\text{ref}}/K \\ \Delta M(i) = (U_{\text{ref}} - U_2(i))/K, \quad i = 0, 1, 2, \dots \\ M(i+1) = \Delta M(i) + M(i) \end{cases} \quad (8)$$

式中 U_{ref} —希望在试样中产生的磁感应强度相对应的感应电压; $M(i)$ 、 $U_2(i)$ —第 i 次迭代值。

当误差 $E = |(U_{\text{ref}} - U_2(i))/U_{\text{ref}}| \leq 0.1\%$ 时,调整结束。

2.2 磁感应强度波形系数的控制技术

波形系数是电压有效值与平均值之比,正弦波波形系数为:

$$K_F = \frac{V_{\text{rms}}}{V_{\text{avg}}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T |f(t)| dt} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1.111 \quad (9)$$

波形调整过程如下:①DAC 输出正弦电压 U_1 ;②测量次级感应电压 U_2 ;③第 $i+1$ 次迭代电压 $U_1(i+1)$

1) 的波形由下式确定^[9]:

$$U_1(i+1) = U_1(i) - K_C(U_2(i) - U_{ref}) \quad (10)$$

式中 K_C —反馈系数。

只要 K_C 数值选择得当(例如取 0.5),当 $U_2(i)$ 与 U_{ref} 的差值足够大时,才能影响到第 $i+1$ 次迭代电压的波形表数值;而整个迭代过程只需执行若干步就能达到调整波形系数的目的。

3 系统的实现

在硬件方面,采用 STM32F103RC 作为主控微处理器来实现本研究的设计方案。STM32F103RC 是以 32 位的 ARM Cortex-M3 CPU 为核心,集成 12 位的 DAC 和 ADC。由于 STM32F103RC 集成的 DAC 输出信号为单极性梯形波,需经过二级低通滤波滤掉 50 Hz 以上的高频成份^[10];再经过反相、抬高电压、反相调整,得到十分平滑的正负对称的双极性正弦波。对正弦波信号进行功率放大后驱动测试探头;此时,测试探头与电工钢片试样之间形成磁回路。通过 12 位的 ADC 采样测试探头次级感应电压信号,接着在微控制器内进行波形调整算法处理;在满足条件后,两个 ADC 同时采样感应电压和励磁电流,计算铁损。系统整体硬件框图如图 2 所示。

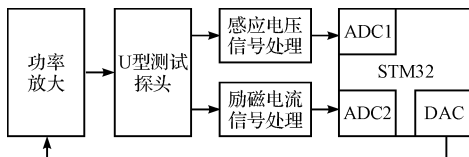


图 2 数字反馈式单片铁损测试仪框图

在程序设计方面,首先在 STM32F103RC 储存空间内建立一个数组,保存初始的 1 024 点正弦波形表数值,为 DAC 提供波形生成数据。为了节省空间,可以只保存 1/4 周期,即 256 点波形幅值数值^[11]。接着执行波形调整循环,磁感应强度调整和波形系数调整在同一个循环内,当采样电压信号的幅值和波形系数误差均小于 0.1% 时结束波形调整。然后启动 ADC 两路同步采样励磁电流和感应电压,将式(4)中的平均功率项代入离散化功率计算公式:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n i_n \quad (11)$$

可得到离散化铁损计算式:

$$P_s = \frac{1}{LhtD} \times \frac{N_1}{N_2} \times \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n i_n \quad (12)$$

式中 N —一个周期内的采样点数; u_n, i_n —感应电压和励磁电流采样值。

计算得到的铁损值显示在 LCD 上,系统程序流程图如图 3 所示。

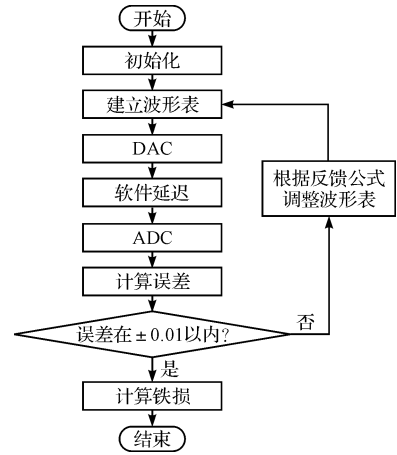


图 3 系统程序流程图

4 测试结果

根据上述设计方案,本研究研制了电工钢片单片铁损测试样机,其实物图如图 4 所示。对取向电工钢片试样 30QG130(1.7 T 情况下最大铁损不大于 1.30 W/kg)进行测试。由测试结果可以看出,各次测量得到的铁损值偏差很小,精度较高,测试结果如表 1 所示。



(a) 系统全图

(b) 输入/输出界面

图 4 电工钢片单片铁损测试样机实物图

表 1 电工钢片试样(30QG130)铁损测试值(W/kg)

序号	1	2	3	4	5	6
P15/50	0.964	0.979	0.965	0.971	0.971	0.983
P17/50	1.264	1.249	1.266	1.252	1.274	1.258

5 结束语

结合单片铁损测试的特点及电工钢片磁化曲线的非线性,笔者提出了先进行磁感应强度调整,后进行波形系数调整,并以二者的误差绝对值均满足小于 0.1% 为循环判断条件的数字反馈法。采用以 STM32F103RC 微控制器为核心来实现本研究的设计,利用微控制器内部集成的 DAC 产生励磁电流所需信号,经过波形控

制使得磁感应强度波形为正弦,最后同步采样励磁电流和感应电压信号进行铁损计算。

实验结果表明,用数字反馈实现波形控制,能够很好地保证磁感应强度及波形系数误差均小于0.1%,满足单片铁损测试过程中磁感应波形正弦的要求;从而使铁损测试过程速度快、测试结果精度高,能满足用户对电工钢片铁损测试的需要。

参考文献 (References):

- [1] 何忠治. 电工钢[M]. 北京:冶金工业出版社,1997:29-30.
- [2] 国家标准化工作委员会. GB/T 3655-2008 用爱波斯坦方圈测量电工钢片(带)磁性能的方法[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [3] SIEVERT J. 电工钢片磁性的计量问题[J]. 中国计量学院学报,2008(2):91-97.

(上接第71页)

对灯板的实时定位,即使灯板位置有了稍许改动,除去大于30°以上的偏转,系统都可以将其实时定位,从而保证了系统有了较高的精确度,如图6所示。



图6 有一定背景干扰下对灯板位置的高精度适应

实验结果表明,在高速情形下,如分辨率为640×480,本系统完全能够处理视频的检测及保存,检测也达到了较高的精确度。

4 结束语

本研究主要针对工业现场高速变化的指示仪表,采用机器视觉的方法,以高速工业相机代替人眼观察现场的仪表,并结合仪表特点,开发出一套适应性较强的高速识别算法。系统采用OSTU分割法、二值化、领域平均法平滑以及闭运算等一系列操作完成去噪也即图像预处理过程,采用Hough变换对各灯所在区域进行定位,并通过灰度的计算完成对灯状态的检测。实验结果表明,本研究采用的方法相对于传统识别算法,具有算法简明、实时性高、环境适应性强等特点,适用于灯排列基本线性的情况,而对其中Hough变换的扩展应用则可以使系统适用于非线性排列物体检测的情形。

- [4] 程志光,高桥则雄,博扎德·弗甘尼,等. 电气工程电磁热场模拟与应用[M]. 北京:科学出版社,2009:125-126.
- [5] IEC 60404-3 Ed. 2. 1: 2002, Magnetic materials. Part3: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetic sheet and strip by means of a single sheet tester[S].
- [6] 叶芬斌,[日]浅井博文,陈志明,等. 铁损测试仪的校准方法之研究(一)[J]. 电子质量,2003(10):20-21.
- [7] 淦君载,冯国华,王连弟. 电磁测量数字化及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1989:327-329.
- [8] 周乃明,施乾信,王兵. 采用C8051FO20 DAC产生任意波形[J]. 电子工程师,2006(8):27-29.
- [9] MATSUBARA K, TAKAHASHI N. Acceleration technique of waveform control for single sheet tester[J]. **IEEE Transactions on Magnetics**,1995,31(6):3400-3402.
- [10] [日]远坂俊昭. 测量电子电路设计——滤波器篇[M]. 北京:科学出版社,2006:21-25.
- [11] 白居易. 直接数字频率合成[M]. 西安:西安交通大学出版社,2007:23-24. [编辑:柴福莉]

参考文献 (References):

- [1] MCCALL C, MOHAN M. Video-based lane estimation and tracking for driver assistance: survey, system and evaluation [J]. **IEEE Transaction on Intelligent Transportation System**,2006,7(1):20.
- [2] 胡习林. 智能仪表直读装置中的图像处理及识别算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学自动化学院,2008.
- [3] LEE J W. A machine vision system for lane departure detection [J]. **Computer Vision Image Underest**,2002,86(1):52.
- [4] 尹传历,刘冬梅,宋建中,等. 基于视频图像的数字仪表读数自动识别[J]. 微计算机信息,2008,24(10):219-221.
- [5] ZHOU Yong, XU Rong, HU Xiao-feng, et al. A robust lane detection and tracking method based on computer vision[J]. **Measurement Science and Technology**,2006,21(14):736.
- [6] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理[M]. 阮秋琦,阮宇智,译. 2版. 北京:电子工业出版社,2008:462-478.
- [7] LI Qing, ZHENG Nan-ning, CHENG Hong. Springrobot: a prototype autonomous vehicle and its algorithms for lane detection [J]. **IEEE Transactions on Transportation System**,2004,5(4):300.
- [8] 李 梁,陈建勋. 基于二值图像的线检测法—蛙跳算法[J]. 计算机工程与设计,2009,30(10):2477-2479.
- [9] 范江涛,汪仁煌,周 武,等. 基于数字图像处理技术的针式仪表读取识别[J]. 广东工业大学学报,2007(12):76.
- [10] 杨喜宁,段建民,高德芝,等. 基于改进Hough变换的车道线检测技术[J]. 计算机测量与控制,2010,18(2):292-298.
- [11] 张 潮,汤心溢,李范鸣. 基于灰度峰谷点的快速识别定位算法[J]. 科学技术与工程,2007,7(9):1936-1938. [编辑:柴福莉]