

基于 TI MSP430F169 的磁性材料磁滞特性的测量方法

颜幸尧¹, 胡美君¹, 阮健¹, 徐爱群²

(1. 浙江工业大学机电工程学院, 浙江 杭州 310032;

2. 浙江大学机电学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:对磁性材料磁滞特性参数的测量原理作了简单的介绍,分析了目前市场上常见 B/H 磁滞特性测量仪的硬件构成。针对目前仪器的不足,提出了基于 TIMSP430F169 系统芯片实现磁滞特性测量的新方法及其具体实现方案,并详细介绍了电流有效值和频率的数字合成以及高速 A/D 的实现方法。实验结果表明,与传统的测量方法相比,该方法大大与改善了系统的性能。

关键词:磁滞特性;磁性材料;测量

中图分类号:TM206 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-1841(2005)11-0043-03

Measuring Method of Hysteresis Character for Magnetic Material Based on TI MSP430F169 MCU

YAN Xing-yao¹, HU Mei-jun¹, RUAN Jian¹, XU Ai-qun²

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310032, China;

2. College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Briefly introduces the measuring principle of hysteresis character, analysis the hardware construction of B/H measuring devices sold in the market, aiming to the shortage of them, puts forward a new method based on MSP430F169 for measurement of hysteresis character and the scheme of realizing it. Compared with the traditional method, it improves the system's performance greatly.

Key Words: Hysteresis Character; Magnetic Material; Measurement

1 测量原理

饱和磁感应强度 B_s 、剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 是磁性材料最基本的 3 个磁滞特性^[1]参数。图 1 所示是一条典型的磁滞回线,它是 $H-B$ 平面上的一条闭合曲线,图中 H_{max} 为与最大磁化电流相对应的磁场强度。

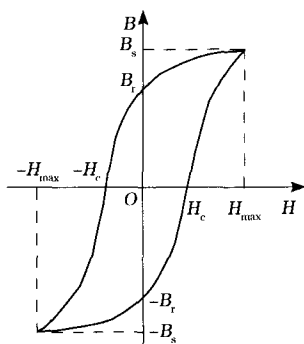


图 1 磁滞特性

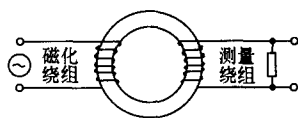


图 2 测量原理

如图 2,电流源产生一定频率和强度的电流,此时,在磁化绕组内及其周围产生与电流同频率,强度与电流成比例的交变磁场。交变磁场经磁环与测量绕组耦合,在测量绕组两端产生感应电动势 ϵ ^[3]。根据磁学理论,磁场强度 H 和磁环内磁感应强度 B 分别为^[4]

$$H = K_h \cdot I$$

式中: $K_h = N_h/L$; N_h 为磁化绕组匝数; L 为磁环平均

周长; I 为激励电流。

$$B = K_b \cdot \int \epsilon dt$$

式中: $K_b = 1/(N_b \cdot A_b)$; N_b 为测量绕组匝数; A_b 为样品的横截面积; ϵ 为感应电动势。

2 一般 B/H 测量仪的硬件构成

测量仪的硬件构成如图 3 所示。由图 3 可知,MCU 仅负责发送控制指令,数据的计算、分析、保存、显示等工作;而所有功能模块在空间上均独立于 MCU 之外,如 A/D 转换电路、高速计数器、压控振荡器、D/A 转换电路、S/H 电路、模拟开关电路等。分立的功能电路带来了以下几个不利的影响:

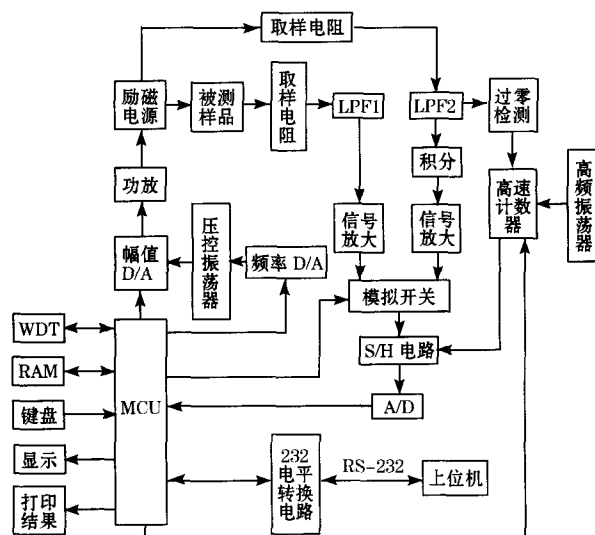


图 3 一般 B/H 磁滞特性测量仪的硬件构成

(1)受外部压控振荡器工作频率范围的影响,其工作频率范围受到很大限制,一般仅为 50 kHz 左右。

(2)集成度低,易受干扰,数据不稳定。

(3)几乎所有的分立功能电路都通过接口挂在外部总线上,通过外部总线与 MCU 交换数据,故在线路板上接口电路占了很大的面积,加上分立功能电路本身,整块线路板的面积比较大。有些频率很高的线,如高频振荡源引线,若其引线太长时,就需要考虑其天线效应。这就限制了仪器的最高工作频率。

(4)仪器易成为被干扰对象,其本身又是干扰源。

(5)励磁电流的频率及有效值精确度不高。

(6)一般采用 8 位机,运算和处理速度低,性能受到了很大的限制。

3 基于 TI MSP430F169 的 B/H 测试仪的硬件构成

其硬件构成框图如图 4 所示,虚线内为 TI MSP430F169^[5]芯片内部的功能模块,虚线外为芯片的外围电路。比较图 3 与图 4,省略了高速计数器模块、高频振荡源模块、外部频率控制 D/A 转换模块、压控振荡器模块、电流控制 D/A 转换器模块 2、外部积分电路、外部模拟开关、采样及 A/D 转换模块。

4 测试实现方法

4.1 电流的设定

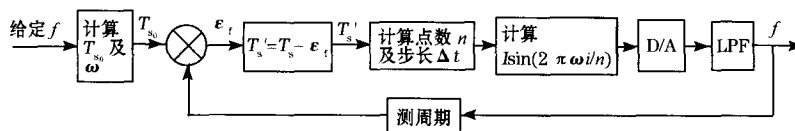


图 5 励磁频率调整原理图

(1)根据所键入的频率数据,计算出一个周期的时间 T_s 及 ω 。

(2)根据采样定律,计算每个周期内的采样点数 n 及步长 Δt ,点数需圆整到整数。

(3)根据一个周期内的点数,经查 $\sin()$ 函数表与插值运算,新构成一个 $I\sin(\omega t)$ 函数表。 I 为以前设定的电流幅值, $t = \frac{2\pi}{n}i$, 其中 n 为一个周期内采样点数; i 为第 i 个采样点。放在 RAM 中供数字频率合成用,幅值暂为原来设定的有效值下的幅值。

(4)利用片内定时器,每隔 Δt 产生一个中断,按顺序循环输出新表中的数据到 D/A,进行数模转换。

(5)经低通滤波器 LPF1 后,滤掉高频成分,形成连续平滑的正弦波,再经功率放大,形成设定频率的励磁电流。

(6)通过电流取样电阻、LPF2 及比较器,利用定时器实测电流的频率,并与设定频率进行比较,若误差 ϵ_f 在允许范围之外,则根据 ϵ_f 的实际情况,从原 T_s 加或减 ϵ_f ,形成新的 T'_s ,即 $T'_s = T_s \pm \epsilon_f$, $\omega = 2\pi/T'_s$ 。

(7)重复步骤(2)~(6),至频率满足精度要求为

4.1.1 电流频率的设定

根据待测元件的实际典型工作情况,设定工作电

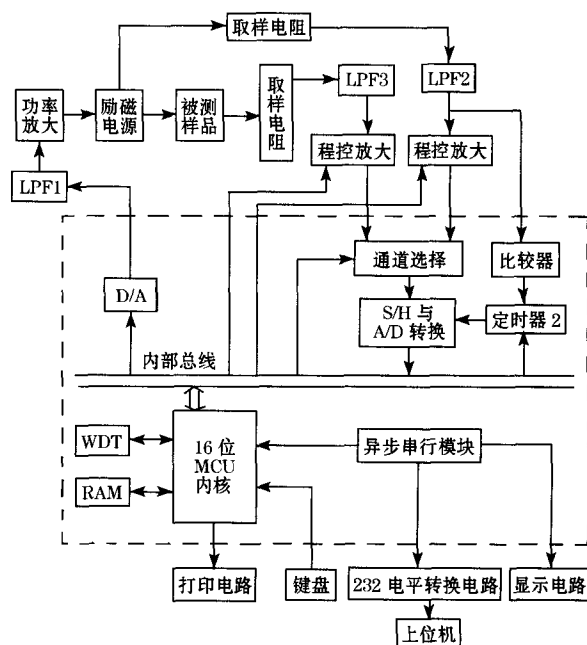


图 4 基于 TI MSP430F169 的 B/H 测试仪的硬件构成框图

流的频率 f 。频率的设定时,通过键盘键入需要的电流频率,按“确认”键后,系统自动对励磁电流的频率进行调整。原理如图 5 所示。

止。

4.1.2 电流有效值的调整

通过键盘键入需要的电流有效值,按“确认”键后,系统自动对励磁电流的有效值进行调整,如图 6。

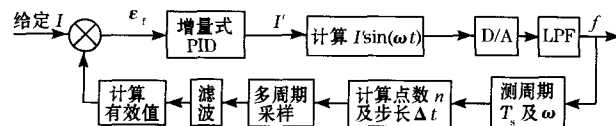


图 6 励磁电流幅值调整原理图

(1)不管目前设定值是多少,首先输出以前设定的电流强度。

(2)对实际励磁电流测周期,得到周期 T_s 。

(3)根据采样定律,计算每个周期内的采样点数 n 及步长 Δt ,点数需圆整到整数。

(4)对励磁电流进行多周期采样。

(5)经滤波后计算有效值,也即均方值。

(6)与设定值相比较,若误差 ϵ_f 在允许范围之外,则根据误差的实际情况,通过片内增量式 PID 算法得出了一个新的控制量 I' 。

(7)用 I' 及 ω ,经查表与插值运算,新构成一个 I'

$\sin(\omega t)$ 表,放入 RAM 中,供数字频率合成用。

(8)利用片内定时器,以每隔一个步长的时间产生一个中断,按顺序循环输出表中的数据到 RAM,进行数模转换。

(9)经低通滤波器滤掉高频成分,形成连续的平滑正弦波,再经功率放大,形成设定频率的励磁电流。

(10)重复步骤(4)~(9),直至电流有效值误差 ϵ_f 在允许的范围之内。

4.2 磁环参数的测量

H 的测量:由于激励磁场与激励电流成比例关系,故对激励电流的瞬时值进行采样,经换算后可得激励磁场。具体实现是在激励电流的采样电阻上取得电压信号后,经 LPF2 滤波,经增益可编程放大器后直接引入单片机,然后经通道选择,进行采保与 A/D 转换,所得数据暂存 RAM 中。

B 的测量:由于磁环次级的感应电动势对时间的积分与磁感应强度成比例,故对磁环次级的感应电动势的瞬时值进行采样,进行换算后可得磁感应强度。具体实现是通过磁环的次级绕组经取样电阻获得次级感应电动势,此感应电动势经 LPF1 后,经增益可编程放大器,直接引入单片机,然后经通道选择,进行采保与 A/D 转换,所得数据暂存 RAM 中。在一个周期采样完毕之后,进行数据处理,包括格式转换,加权积分、微分等,最后计算出 H_c 、 U_m 、 B_s 、 B_r 等参数。

H 与 B 的对应关系的实现: H 与 B 都是采用多周期采样,最后把数据按次序拼成一个周期的方法来实现各自的波形。实际采样时, H 与 B 是交错采样的,即:在第 i 点先采 H_i ,当下一个周期中的 i 点到来时,再在该点采 B_i 。把 H_i 及 B_i 按次序保存在 RAM 中,形成一个 $2 \times n$ 的矩阵:

$$R_{2 \times n} = \begin{bmatrix} H_1 & H_2 & H_3 & \cdots & H_n \\ B_1 & B_2 & B_3 & \cdots & B_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

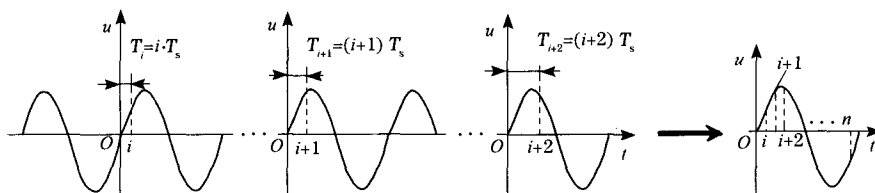


图 7 多周期采样原理

给定时器赋值。等比较器找到信号的过零点后,启动定时器,由定时器的溢出启动采保及 A/D 转换。最后在采完 1 个周期后,把所有点合成 1 个周期。

4.4 人机交互

参数的设定可通过键盘输入, $B-H$ 图形及参数输出通过串行通讯由点阵 LCD 模块进行显示,也可通过打印机接口进行打印。上位机可通过 RS-232 与测量仪进行通讯。

在式(1)中,列下标相同的 H 与 B 即是对应关系。

4.3 高速 A/D 采样及其实现

由于采样信号范围从 1 Hz ~ 500 kHz,而要使信号失真保持在允许范围之内,则应在每个周期内采集足够的点数。

4.3.1 励磁电流采样频率的确定

由于励磁电流为标准正弦波,故仅含有极少量的谐波分量,取 3 次以下谐波分量即可,则:

$$f_{\max} \approx 3f_b$$

式中: f_{\max} 为最高谐波频率; f_b 为基波频率。

则根据奈魁斯特采样定理得:

$$f_s \approx 2f_{\max} = 6f_b$$

式中 f_s 为采样频率。

即若要对电流进行无失真采样,其采样频率必须大于 6 倍的基频,最大工作频率为 500 kHz,则采样频率必须大于 3 MHz。

4.3.2 次级感应电动势采样频率的确定

感应电动势的波形含有丰富的高次谐波,对其作 FFT 变换后,发现其最高谐波分量在基波 15 次左右。但是,能量已经非常小。实践证明,9 次以上的谐波分量可忽略不计。因此,取 9 次谐波为最高谐波分量,则当基波频率为 500 kHz 时,采样频率至少为 9 MHz。

4.3.3 高速采样的原理及实现

由于 A/D 转换的最高转换速率仅为 200 kHz,为实现最高为 10 MHz 以上的采样速度,采用多周期采样,最后合成为一个周期的方案。原理如下:

如图 7,以过零点为基准,每次采样的时间向右延迟 T_s ,每次只采一点,当采完 1 个周期后,再把数据按次序拼成 1 个周期。

首先,通过内部高速比较器与定时器的配合使用,测出被测信号的周期,从而计算出每点的采样间隔时间 T_s 。其次,根据所采样点在整个周期中的位置,

5 软件设计

主程序流程图如图 8 所示。

频率调整:按正弦波,对每一点进行计算,数据经 D/A 输出。再由比较器及定时器 2 取得反馈,经与设定值比较后进行调整,直至满足要求。

有效值调整:在频率调整好的基础上,幅度调整到允许值范围以内。

(下转第 48 页)

信号的频率必须减少 N 或者减小 M 。减少数据点数会引起输出信号失真,而减小分频比则要求采用更快速度的 E^2 PROM 和 DAC,必然提高成本。

可以将减少数据点数和减小分频比结合。在 E^2 PROM 和 DAC 速度允许的范围内通过减小分频比,提高共享存储器地址变化频率,从而获得较高频率的输出信号。当需要更高频率信号时对共享存储器中的数据在时间上进行适当抽取,减小数据点数。抽取后要保证每个周期有足够的信号点数(不少于 10 点)且应为偶数,否则输出信号不平滑。即将可变时钟计数器改为可变时钟、可变步长计数器,其中步长就是数据的抽取率 L ,这样输出信号的频率就变为

$$f_0 = \frac{L \cdot f}{N \cdot M} \quad (4)$$

可编程逻辑器件内部所有逻辑采用 1 片 EPM 7128,用 AHDL 语言实现。

3.2 系统指标分析

由式(4)可知,输出信号的最高频率与系统时钟、分频比、每周期输出的点数有关。当 $N = 200$, $f = 60$ MHz,分频比 $M = 1$,每周期输出 10 点(即数据抽取率 $L = 20$),则输出信号的最高频率可达 6 MHz。

同样,频率分辨率也与系统时钟、分频比、每周期输出的点数有关。最高频率分辨率为 $f/200M$,分频比越大频率分辨率越高。由原理知,增加分频器位数

可以提高频率分辨率,实际应用中,使用了 24 位,分辨率理论可达 0.015 Hz,实际达到了 0.1 Hz。

4 结束语

由于采用了单片机和 CPLD,设计的信号源具有较大的灵活性和良好的可扩展性。在实际应用时,单片机采用常用 MCS8052, CPLD 采用 EPM7128, E^2 PROM 采用 128 K 存储器,输出添加了可编程增益控制器控制输出增益,在 E^2 PROM 中存储了多种信号样式,同时辅助单片机的控制实现多种信号样式的复合(叠加后存储在 E^2 PROM 中),对于复杂信号采用计算机导入的方法存入 E^2 PROM。因而,基本可以实现各种信号样式,以及彼此复合信号、多次谐波信号的复合等类型的信号。当系统时钟为 60 MHz 时,输出信号最高频率作为辅助信号源应用在科研开发中效果很好。

如果在 CPLD 中设计不同的逻辑并辅以相应的单片机程序,则系统也可作其他用途。如果把单片机换成 DSP,可以方便地观察各种数字信号处理的实际效果。

参考文献

- [1] 宋万杰. CPLD 技术及其应用. 西安:西安电子科技大学出版社, 2000.
- [2] 奥本海姆 A V, 谢弗 R W. 离散时间信号处理. 西安:西安交通大学出版社, 2001.
- [3] 何立民. 单片机应用系统设计. 北京:北京航空航天大学出版社, 2002.

(上接第 45 页)对 H 、 B 采样:包括采样频率的计算、分周期采样、相关数据的计算、信道分配、放大器增益的调节、滤波、加权积分、插值运算等。

6 实验结果

试样材料为 MN-ZN 铁氧体;试样尺寸为 30 mm × 14 mm × 12 mm (外径 × 内径 × 宽)。试样质量为 11.5 g;磁化绕组为 1 匝,线径为 12 股;测量绕组为 1 匝,线径为 12 股;励磁电流为 500 kHz, 0.500 A;测量温度为 25 °C。

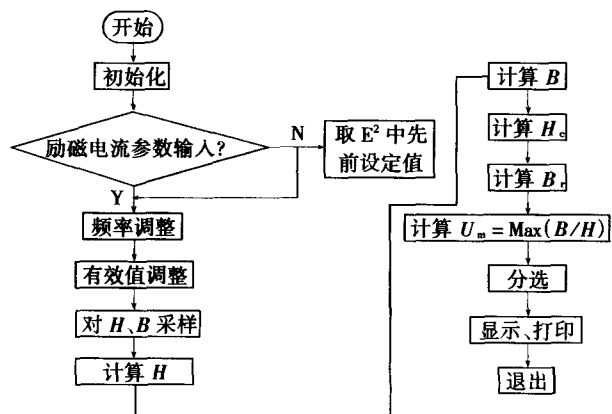


图 8 主程序流程图

实验结果数据: $B_s = 511.9$ mT, $B_r = 117.2$ mT, H_c

$= 13.709$ A/m, $U_m = 2581$ 。

在测量时发现,若测量时间过长,数据会有变化,这是由于磁环在交变磁场作用下,产生温升所致。

7 结论

采用 TI MSP430F169 片上系统来设计磁环参数测量仪,具有以下优点:(1)频率大大拓宽。(2)励磁电流稳定性好、精度高。电流有效值精度从 5 mA 提高到 1 mA 左右,稳定性从 ± 5 mA 提高到 ± 0.5 mA 左右。电流频率的精度在高频部分有所下降,低频部分有所提高,但稳定性很好,从原来的 1% 提高到 0.1% 左右。(3)测得的 H 、 B 数值的精度高。(4)集成度高,故系统工作稳定,数据重复性好。(5)对外干扰小。(6)抗干扰性好, MSP430 系列单片机为工业机,可在强干扰工业环境和环境温度 $-45 \sim +85$ °C 正常工作。

参考文献

- [1] 王剑君. 软磁动态特性智能化测试初探. 国际电子变压器, 2003 (6).
- [2] 岛村彦, 王臻, 兴法千洋, 等. 关于软磁材料的磁特性测试技术的最新动向, 国际电子变压器, 2002(11).
- [3] 陈士衡, 唐统一. 近代电磁测量. 北京:中国计量出版社, 1992.
- [4] 任吉林, 林俊明, 高春法. 电磁检测. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [5] 《TI MSP430F169IPM datasheet》Copyright 2002 - 2004, Texas Instruments Incorporated.