

# 硬标签插磁调频装置控制系统设计与试验

蔡晓霞<sup>1</sup>, 张西良<sup>2</sup>, 盛庆元<sup>1</sup>, 陈科行<sup>1</sup>

(1. 绍兴职业技术学院 机电工程与交通学院, 浙江 绍兴 312000;

2. 江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 针对目前无源电子硬标签生产过程, 传统硬标签谐振频率检测技术用于插磁调频控制存在的不足, 设计用于插磁调频装置的控制系統; 提出了基于电容补偿原理的单线圈敏感硬标签谐振频率传感技术, 建模仿真分析基于此技术的信号幅值比和相位差变化特性, 发现相位差值和极性都存在反转特性; 以此为基础设计以 MSP430F149 单片机为控制中心, 控制产生固定频率信号源, 相位检测和相位极性判别电路; 以相位变化为控制系统提供反馈信号, 采用相位差值反转特性实现下压高低速切换, 相位极性反转特性完成下压的控制决策, 有效给出了一种不需扫频、不受互感系数时变特性影响的压磁调频控制系统; 以生产 58 kHz “中榔头” 硬标签进行测试, 数据分析表明, 此套控制系统高速运行在 20 mm/s, 低速为 5 mm/s 时, 硬标签谐振频率控制误差在  $\pm 75$  Hz 内, 方差为 0.0006~0.0008 kHz, 运行稳定。

**关键词:** 硬标签; 插磁; 调频; 电容补偿

## Design and Test of Control System for Hard Tags Insert Magnetic Rod Adjustment Frequency Device

Cai Xiaoxia<sup>1</sup>, Zhang Xiliang<sup>2</sup>, Sheng Qingyuan<sup>2</sup>, Chen Kexing<sup>2</sup>

(1. Shaoxing Vocational & Technical College School of Mechanical and Electrical Engineering and Transportation, Shaoxing 312000, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In view of the current passive electronic hard label production process, the traditional hard label resonance frequency detection technology is not enough for the insert magnetic rod to adjust frequency control device. The resonant frequency sensing technology of single coil sensitive hard tag based on capacitance compensation principle is proposed. Modeling and simulation analysis of signal amplitude ratio and phase difference variation characteristics based on this technology found that both phase difference and polarity have inversion characteristics. Based on this, the circuit is designed with MSP430F149 single chip microcomputer as control center, fixed frequency signal source, phase detection and phase polarity discrimination. The phase change is used to provide feedback signal for the control system, and the phase difference reversal characteristic is used to realize high and low speed switching, and the phase polarity reversal characteristic is used to complete the control decision of pressing down. This is a kind of frequency modulation control system of inserted magnetic bar, which does not need frequency sweeping and is not affected by the time-varying characteristics of mutual inductance. The production of 58 kHz “medium hammer” hard tags was tested, data analysis showed that when the control system runs at a high speed of 20 mm/s and a low speed of 5 mm/s, the control error of hard label resonance frequency is within  $\pm 50$  Hz and the variance is 0.0006~0.0008, and the operation is stable.

**Keywords:** hard tags; insert magnetic rod; adjustment frequency; capacitance compensation

## 0 引言

无线射频识别即射频识别技术 (RFID), 是自动识别技术的一种, 目前在工农业领域有广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。电子商品防盗 (EAS) 技术也采用了 RFID。EAS 系统中的电子标签质量是整个系统能可靠运行的保障。基于声磁工作原理的 EAS 系统大都采用一种固定工作频率的硬标签<sup>[3]</sup>。目前, 在硬标签生产过

程中, 有一道插磁调频工序——将磁棒插入绕有线圈的骨架中, 以调整待调频硬标签线圈电感值, 使线圈电感与其串联电容组成的 RLC 回路谐振频率符合行业要求<sup>[4-5]</sup>。

查阅现有文献, 现有的硬标签谐振频率检测技术按探头结构可分单线圈、双线圈、三线圈、四线圈<sup>[6-10]</sup>。杨成忠<sup>[11]</sup>研究了单线圈传感器模型和双线圈传感器模型结构特点, 得出双线圈传感器更加适合应用于工程。朱亚萍<sup>[12]</sup>等在电路参数仿真分析基础上, 研究了双线圈传感器线圈匝数和空间结构参数对输出响应灵敏度影响。李佳骏<sup>[13]</sup>利用 HFSS 磁场仿真软件研究了不同形状单、双线圈的理论测试误差。为克服单、双线圈测量的理论误差, 专利 CN106443826A<sup>[10]</sup>提供一种四线圈结构, 可有效消除中心频率偏移。盛庆元等<sup>[9,14]</sup>人基于差分设计思路, 提出了三线圈探头结构, 设计的传感器测试硬标签谐振频率精度优于市

收稿日期: 2020-03-08; 修回日期: 2020-04-01。

基金项目: 绍兴市公益项目 (2018C10007)。

作者简介: 蔡晓霞 (1978-), 女, 浙江天台人, 副教授, 硕士, 主要从事设备远程智能维护与智能控制方向的研究。

通讯作者: 盛庆元 (1988-), 男, 浙江兰溪人, 讲师, 硕士, 主要从事电磁传感器设计、专机设备研发和农业生物环境参数检测技术方向的研究。

售 EAS 频率检测仪 (E-X5006AM)。牛元海<sup>[15]</sup>、So-ham<sup>[16]</sup>、王焱<sup>[17]</sup>分别在 EAS 扫频信号源, 线圈耦合影响因素, 检测器方面进行了相关研究。

在插磁装置方面, 文献较少, CN108268929A<sup>[18]</sup>、CN107239079A<sup>[19]</sup>专利提供了不同形式的插磁机械装置及其相应的控制电路与控制方法。如 CN108549265A 提出一种基于模糊控制的无源电子硬标签插磁控制方法, 以三线圈传感技术, 结合模糊控制算法, 提高了插磁硬标签谐振频率精确度控制。

可现有硬标签谐振频率检测技术为机器插磁控制提供控制信号存在缺陷, 既检测时硬标签与检测探头之间的互感系数  $M$  是不变的, 而在插磁过程中,  $M$  随磁棒插入骨架深度随时变化, 需要配合复杂的控制方法。文献 [18] 中的恒频控制压入步骤和跳频控制压入步骤控制方法, 文献 [20] 中的基于模糊控制算法, 可以一定程度上提高压磁调频精度, 可无法消除原理误差。

为解决上述问题, 本文设计一种硬标签插磁调频机控制系统, 采用单线圈探头, 设有电容补偿环节, 基于相位差变化特性, 设计以相位差信号为控制系统提供反馈信号的控制电路, 以期提高插磁调频精度和效率。

## 1 硬标签调频原理与插磁调频核心部件

### 1.1 硬标签调频原理

硬标签的内部结构 (图 1a) 是一个电容电感串联回路, 其可等效为 LCR 串联电路。判定标签是否合格的标准之一是看硬标签在规定谐振频率范围内是否产生谐振。目前, 在硬标签生产过程中, 硬标签谐振频率的调整是通过将磁棒插入绕有线圈的骨架中, 以调整硬标签谐振回路中电感值大小, 使硬标签电感和电容组成的串联回路谐振频率符合行业要求, 此过程称为插磁调频工序。

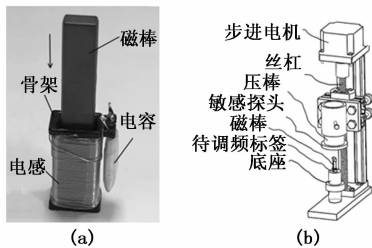


图 1 硬标签的实物图与插磁调频装置图

### 1.2 插磁调频核心部件

硬标签的插磁调频核心部件由步进电机、丝杆组成, 如图 1 (b) 所示。控制单元控制步进电机, 可实现丝杆上下移动, 压块下移时将磁棒压入到待调频的硬标签骨架中。此部件下移控制的关键在于获取硬标签谐振频率信号为控制系统提供反馈信号, 并使得磁棒插入的深度满足硬标签的工作谐振频率。

## 2 传感电路设计原理与分析

### 2.1 传感电路设计原理

控制系统采用单线圈探头, 传统的单线圈探头检测硬

标签谐振频率的电路模型如图 2 (a), 硬标签的电路结构可等效为图 2 (a) 中的右半部分, 由  $L_2$ ,  $C_2$ ,  $R_2$  串联。 $R_1$  为精密电阻,  $L_1$  为单线圈敏感探头等效电感,  $M$  为单线圈敏感探头与硬标签线圈电感之间的互感系数。图 2 中左右电路各部分电压电流向量关系如下:

$$\dot{I}_1 Z_1 + Mj\omega \dot{I}_2 = \dot{U}_s \quad (1)$$

$$\dot{I}_{22} + Mj\omega \dot{I}_1 = 0 \quad (2)$$

式 (1)、(2) 中的  $Z_1$  为  $R_1$ 、 $L_1$  串联总阻抗,  $Z_2$  为  $R_2$ 、 $C_2$ 、 $L_2$  串联总阻抗。

由式 (1) ~ (2) 可得精密电阻  $R_1$  两端的电压  $U_0$  向量为:

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_1 R_1 = R_1 \frac{\dot{U}_s}{Z_1 + \frac{M^2 \omega^2}{Z_2}} = R_1 \frac{\dot{U}_s}{R_1 + j\omega L_1 + \frac{M^2 \omega^2}{R_2 - j \frac{1}{\omega C_2} + j\omega L_2}} \quad (3)$$

依据式 (3), 文献 [3-4] 研究表明通过扫频法, 获取幅频特性曲线, 谐振频率定义为最大值幅值对应频率  $f_{\max}$  和最小值对应频率  $f_{\min}$  的算术平均值, 显然, 这种方法不利于提高插磁调频效率。

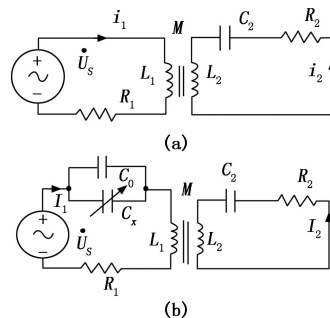


图 2 传感电路设计原理图

改进设计电路, 在信号源端增加补偿环节, 如图 2 (b) 所示。信号源频率  $\omega$  大小设置为控制目标硬标签谐振频率  $\omega_0$ , 并通过调节可调电容  $C_x$ , 使得  $\omega_0 L_1 = 1/(\omega_0 C_{\text{总}})$ 。在这种情况下, 式 (3) 更改变形可得式 (4)。

$$\frac{\dot{U}_s}{\dot{U}_0} = (R_1 + \frac{M^2 \omega_0^2}{R_2 - j \frac{1}{\omega_0 C_2} + j\omega_0 L_2}) / R_1 \quad (4)$$

显然式 (4) 中,  $L_2$  值变化, 对应的  $U_s$ 、 $U_0$  信号的幅值比和相位差也随之变化, 进而可以敏感待插磁调频硬标签的谐振频率。

### 2.2 传感电路模型仿真分析

#### 2.2.1 模型的定性分析

在硬标签插磁调频过程中电感  $L_2$  增大, 敏感探头与硬标签电感  $L_2$  之间的互感系数  $M$  也变大, 对式 (4) 的幅值变化定性分析较难。从相位角度分析可知: 角频率为  $\omega_0$  时, 硬标签  $L_2$ ,  $C_2$ ,  $R_2$  串联等效电路总阻抗容抗性时, 信号  $U_s$  相位超前信号  $U_0$ ; 硬标签  $L_2$ ,  $C_2$ ,  $R_2$  串联等效电路

总阻抗成感性时, 信号  $U_s$  相位滞后信号  $U_0$ ; 硬标签  $L_2$ ,  $C_2$ ,  $R_2$  串联等效电路总阻抗成阻性时, 信号  $U_s$  与信号  $U_0$  相位一致。

在硬标签生产插磁过程中, 信号  $U_s$  相位先超前  $U_0$ , 后滞后  $U_0$ , 信号  $U_s$  与信号  $U_0$  相位一致时, 是磁棒插入深度的最佳控制点。

### 2.2.2 模型的定量分析

借助 mutilism 电路设计软件, 以厂家生产 58 kHz “中榔头” 硬标签提供的参数,  $C_2$  取 1 700 pF,  $R_2$  取 14  $\Omega$ ; 探头  $L_1$  选择市售 490  $\mu$ H 线圈, 匹配电容值  $C_{总}$  取 15.367 nF, 信号源频率设置为 58 kHz, 对电感  $L_2$  变化,  $U_s$ 、 $U_0$  信号的幅值比和相位差随之变化的关系进行仿真, 同时考虑下压过程  $M$  变化, 对  $M$  变化引起的影响也进行仿真。采用 mutilism 的 parameter sweep 功能, 选择 AC Analysis 模式, 将仿真结果导出到 EXCEL, 绘制参仿真结果见图 3。

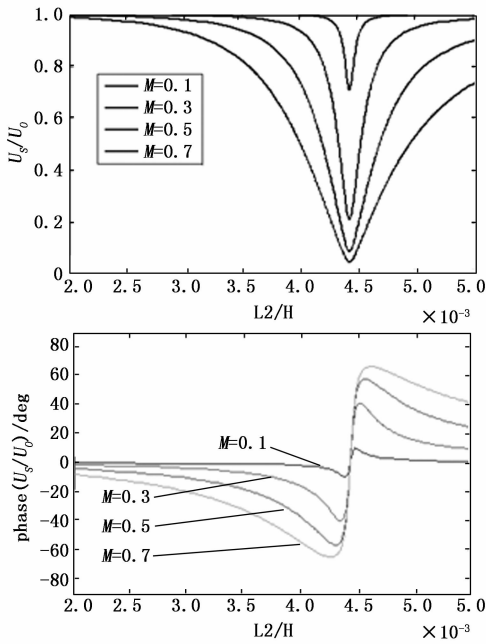


图 3 电路幅值比、相位差仿真图

通过图 3 可知,  $M$  不影响对幅值比和相位差的变化趋势; 幅值比最小, 相位差为零对应的  $L_2$  相等, 并且此  $L_2$  与  $C_2$  串联计算的谐振频率与激励信号频率相等; 随  $L_2$  增大,  $U_0$  先滞后  $U_s$ , 且相位差先变大后变小, 出现反转特性,  $L_2$  进一步增大相位差极性反转。通过比较幅值比、相位差变化特征, 本文采用相位差为反馈控制信号, 利用相位差先变大后变小特性, 在最大滞后相位差之前采用快压, 最大滞后相位差之后采用慢压, 并将相位差极性反转 (由滞后变为超前) 特性提供完成下压过程的触发信号。

## 3 控制系统设计

本控制系统配合双路压磁调频机设计, 其基本工作过程, 将压磁调频硬标签放置于底座中, 链条传输带将底座输送置压棒正下方, 左右步进电机分别下压, 完成插磁调

频过程后, 左右步进电机反转提起压棒, 完成一次压磁调频过程。

### 3.1 硬件总体结构

本控制系统以 MSP430 为控制核心设计, 主要由开关电源、位置传感器、步进电机驱动器、激励信号源等信号处理模块等构成, 其硬件结构如图 4 所示。

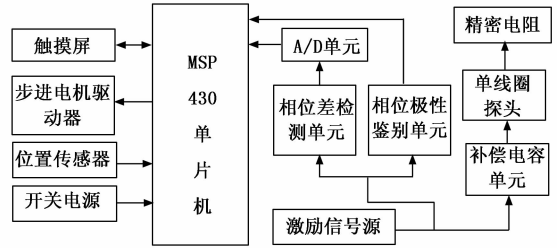


图 4 控制系统硬件结构简图

### 3.2 硬件详细设计

本控制系统需主从两路控制板, 设计的主从电路主要电路原理图如图 5 所示, 核心电路介绍如下。

#### 3.2.1 激励信号源设计

激励信号源采用了 AD9833 芯片, 它是 ADI 公司生产的一款低功耗, 可编程波形发生器。输出频率范围为 0~12.5 MHz, 精度可以达到 0.004 Hz, 3 线 SPI 接口易于与各种主流微控制器兼容。芯片设置为正弦波输出, 幅值 0.6 VPP 左右, 输出阻抗为 200  $\Omega$ 。图 5 中的信号 JP3 端子分别与发射线圈两端相连。

#### 3.2.2 相位差检测单元

插磁调频装置以信号  $U_s$ 、 $U_0$  相位差为控制信号, 设计的鉴相电路以 AD8302 为核心, 提供模拟电压信号输出 AA0。AD8302 是 ADI 公司的用于 RF/IF 幅度和相位测量的单片集成电路, 能同时测量从低频到 2.7 GHz 频率范围内的两输入信号之间的幅值比和相位差。信号测量范围为 -60~0 dBm, 相位检测的范围 0°~180°, 对应电压输出范围 0~1.8 V, 输出电压灵敏度为 10 mV/度, 测量误差小于 0.5°。

#### 3.2.3 相位极性鉴别单元

另外, 相位极性鉴别单元, 信号  $U_s$ 、 $U_0$  分别经过零比较器 A 和过零比较器 B 整形为方波信号, 再经过边沿 D 触发器处理。

TLV3502 双通道比较器, 实现了高速度 (40 ns) 与低功耗 (40  $\mu$ A) 的完美组合, 采用极小型封装, 具有轨至轨输入、低偏移电压 (1 mV) 和大输出驱动电流等特性。SN74LVC1G79 器件是一种的单路正缘触发 D 型触发器。当数据输入 (D) 处的数据满足设置时间要求时, 将该数据传输到时钟脉冲正向缘上的 Q 输出。

#### 3.2.4 A/D 转换单元

A/D 转换单元采用 ADS1115 芯片, 它是兼容 I<sup>2</sup>C 的 16 位高精度低功耗模数转换器, 自带可编程放大电路, 可提供从  $\pm 256$  mV 到  $\pm 6.144$  V 的输入范围, 执行转换数据速

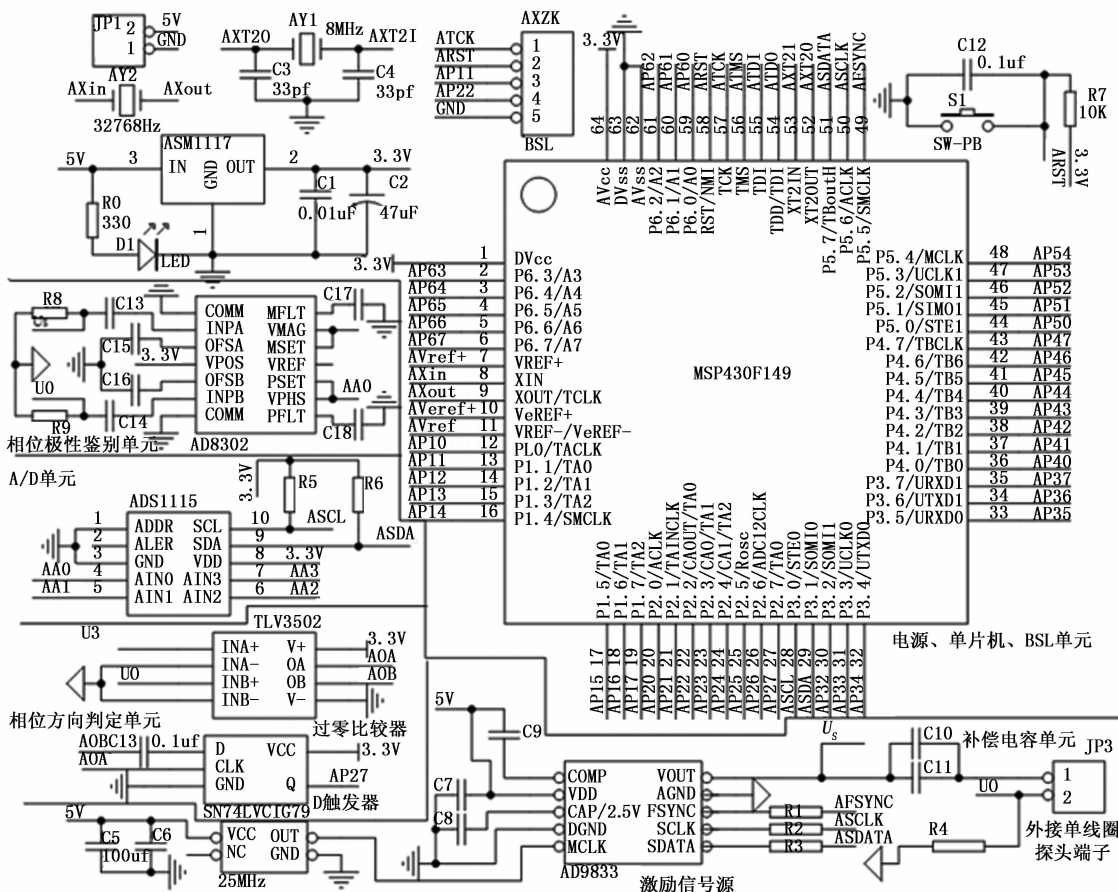


图 5 主要模块单元的电路原理图

率高达每秒 860 个样本。配置寄存器值高低字节设为 0xC6、0xe3, 即选择通道 0、满量程 1.024 V, 最快采样率工作。

其他部分电路属电路常规设计, 本文中不再做详细阐述。

### 3.3 控制系统软件设计

系统选用 IAR for MSP430 专业集成开发环境, 应用 C 语言进行编程。系统软件采用模块化设计思想, 主要由主程序、AD9833 驱动程序、ADS1115 驱动程序、液晶触摸屏驱动程序等几个模块构成, 各驱动程序的编程可参考相应说明书。主从工作流程框图和压磁调频软件流程图如图 6、图 7 所示。

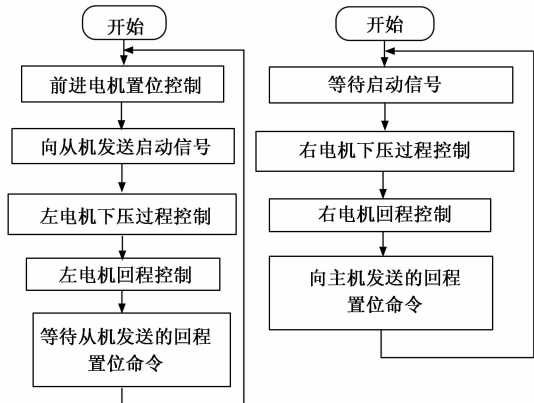


图 6 主从工作流程框图

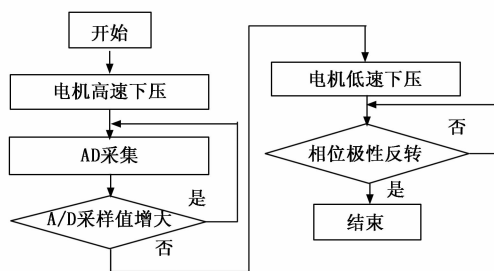


图 7 压磁调频软件流程图

## 4 试验与结果分析

### 4.1 测试方法

以用于声磁防盗系统, 工作频率为 58 kHz 的无源硬标签为对象, 从合作厂家提供的待调频“中榔头”型硬标签中抽取 20 对, 放入图 1 (b) 底座中, 设置压磁调频压棒下移高速为 20 mm/s, 低速为 5 mm/s。启动控制系统, 自动完成每个硬标签插磁调频过程。

插磁后断开电容电感焊接引脚, 用市售 3060 型扫频仪检测硬标签谐振频率。为说明本装置的插磁性能, 随机抽取等数人工插磁的硬标签的谐振频率为对比 (人工插磁采用骨架与磁棒是间隙配合通过胶水固定)。根据测试数据, 调高信号源频率至 58.05 kHz 再进行试验, 测试数据如表 1 所示。

表 1 测试数据分析表

单位: kHzp

		谐振频率										最大误差	极差	方差
压磁调频机	人工	58.121	58.065	58.090	57.917	57.937	57.903	58.015	58.069	57.947	57.958	0.138	0.235	0.0066
		57.921	58.138	58.120	58.061	58.043	58.015	58.100	58.094	57.915	57.934			
	58.000	57.950	57.934	57.985	57.978	58.030	58.021	57.964	57.957	58.010	57.969	-0.066	0.096	0.0006
		57.990	57.986	58.010	57.987	57.965	57.980	58.012	57.962	57.975	57.982			
	58.050	58.051	58.060	57.982	57.990	58.005	58.047	58.004	58.049	58.058	57.986	0.069	0.087	0.0008
		57.992	58.025	57.993	58.025	58.042	58.019	57.986	58.069	58.038	58.018			

4.2 数据分析

据表 1 可知, 两次试验双路压磁调频机控制硬标签谐振频率的最大误差分别为 -66 Hz、69 Hz, 控制精度比人工 (人工控制最大误差 138 Hz) 提高了一倍左右; 人工插磁调频方法极差范围 235 Hz, 而机器仅为 90 Hz 左右, 产品质量的波动性也大为降低; 对方差进一步分析, 压磁调频机控制的硬标签谐振频率方差降低了一个数量级, 仅为 0.000 6、0.000 8, 效果明显。另外, 进行了连续插磁 200 个试验, 谐振频率误差都在 ±75 Hz 内 (剔除电容电感引脚焊接不合格品), 此设备对“中榔头”插磁调频的平均速度为 2.14 s/个, 是熟练人工效率的 3 倍左右。

5 结束语

针对目前无源电子硬标签生产过程, 传统硬标签谐振频率检测技术用于插磁调频控制存在的不足, 设计用于插磁调频装置的控制策略。该系统包括以 MSP430F149 处理器为核心控制电路及其配套控制策略组成。其核心是基于电容补偿原理的单线圈敏感硬标签谐振频率传感技术, 采用了硬标签调频频率值为发射信号频率, 以相位变化为控制系统提供反馈信号, 采用相位差值反转特性实现下压高低速切换, 相位极性反转特性完成下压控制的控制决策。

以生产 58 kHz “中榔头”型电子硬标签进行测试, 数据分析表明, 当此套控制系统高速运行在 20 mm/s, 低速为 5 mm/s 时, 硬标签谐振频率控制误差在 ±75 Hz 内, 方差为 0.0006~0.0008, 运行稳定。本技术为机器下压磁棒调频提供了技术支持, 下一步可针对不同类型的硬标签试验在合理控制精度前提下, 匹配最快下压速度, 开发相应的智能速度匹配程序; 另一面可研制自动上料环节, 研制全自动插磁调频机, 完全实现此工序的智能自动生产。

参考文献:

[1] 胡宏梅, 姜子祥. 基于 RFID 技术的超市快速结算系统的设计与实现计算机测量与控制 [J]. 2018, 26 (5): 116-119.  
 [2] 李波涛, 张宝英, 赵世坡, 等. UHF RFID 温度标签的研究及其在开关柜温度监测系统中的应用 [J]. 电测与仪表, 2017, 54 (4): 117-122.  
 [3] 康雪娟, 马文华, 林钰人. 基于 ARM Cortex-M3 的声磁商品电子防盗系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24

(10): 263-266.  
 [4] ISO/IEC 18046-3-2007, Information technology-Radio frequency identification device performance test methods-Part 3: Test methods for tag performance [S]. 2011.  
 [5] Vilnius. ERC REPORT 44, Sharing between inductive systems and radio communication systems in the band 9-135 kHz [S]. Sesimbra, 1997.  
 [6] 赵万年. 硬标签天线的研究与设计 [D]. 西安: 西北大学, 2009.  
 [7] 宋小锋, 杨成忠. 电子防盗无源硬标签检测电路的参数优化 [J]. 杭州电子科技大学学报, 2011, 31 (4): 157-160.  
 [8] 盛庆元, 蔡晓霞, 汪稼威, 等. EAS 硬标签质量参数检测装置 [P]. CN106443826A, 2017-02-22.  
 [9] 盛庆元, 蔡晓霞, 朱 丹. 三线圈式无源电子标签质量参数检测技术研究 [J]. 传感技术学报, 2017, 30 (11): 1653-1659.  
 [10] Gao L J, Lu Z, Maode M. Low Cost RFID Security Protocol Based on Rabin Symmetric Encryption Algorithm [J]. Wireless Personal Communications, 2017, 96 (1): 683-696.  
 [11] 杨成忠, 陈高强. 基于互感耦合原理的传感器设计 [J]. 机电工程, 2011, 28 (5): 590-593.  
 [12] 朱亚萍, 郑卫红, 徐巍华, 等. 电子无源硬标签质量在线检测传感器的研制 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2012, 46 (4): 719-724, 738.  
 [13] 李佳骏. 防盗电子标签检测技术研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013.  
 [14] 蔡晓霞, 盛庆元, 朱 丹. 硬标签质量参数检测传感器设计及测试 [J]. 自动化仪表, 2017, 38 (3): 66-69.  
 [15] 牛元海, 刘太君, 叶 焱, 等. 一种 EAS 扫频信号源的设计与实现 [J]. 无线电通信技术, 2014, 40 (6): 93-96.  
 [16] Soham, Chatterjee, Archana, et al. Design Optimisation for an Efficient Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles [J]. Energy Procedia, 2017, 117: 1015-1023.  
 [17] 王 焱. 基于 FPGA 的一体式射频 EAS 检测器设计与实现 [D]. 郑州: 郑州大学, 2016.  
 [18] 盛庆元, 朱 丹, 汪泽军, 等. 一种双路无源硬标签插磁装置及其控制方法 [P]. 浙江: CN108268929A, 2018-07-10.  
 [19] 盛庆元, 潘文彬, 徐煌俊, 等. 一种硬标签插磁装置及其控制方法 [P]. 浙江: CN107239079A, 2017-10-10.  
 [20] 朱 丹, 盛庆元, 陈科行. 无源电子硬标签插磁控制系统设计与实现 [J]. 测控技术, 2018, 37 (8): 154-157.