

# 一种新型数字电感传感器的设计及应用

黄 健

(西京学院电子信息工程系, 西安 710123)

**摘要:** 传统电感测量中由于检测装置结构复杂、采用模拟接口, 抗干扰能力差, 精度不高, 针对这些缺点, 设计了一种低功耗的电感感测装置, 采用 TI 最新推出世界首款电感到数字转换器 LDC1000 做为探头, 通过 SPI 接口与 MSP430G2553 实现高速数据采集, 使得装置功耗降低, 体积减小, 数据处理方便快捷; 实验证明: 该装置能够在恶劣的环境中大大提高可靠性, 实现高灵敏度、高速数据处理且运算量小, 可应用在灰尘、污垢、油和潮湿等恶劣环境中。

**关键词:** LDC1000; TI; SPI 接口; MSP430

## A New Design and Application of Digital Inductive Sensor

Huang Jian

(Department of Electronics and Information Engineering, Xijing University, Xi'an 710123, China)

**Abstract:** Traditional inductive measure method have limited in application, such as inconvenience installation, complicated structure, poor performance of anti-interference, analogy interface, lower accurate etc. In order to resolve this problem, A detection device is introduced, which based on ultra-low-power MSP430, a probe is designed by Texas Instruments recently present LDC1000 which is the world's first inductance-to-digital converter, use an SPI interface connection to an MSP430G2553 in order to implement high-speed data transmission, these make the device low power dissipation, volume decrease, facilitating high-speed data processing. The test results show that the device can greatly improve the reliability in harsh environment, high reliable data collecting, high-speed data transmission and little computation, high sensitivity, can be used in the presence of dust, dirt, oil, and moisture.

**Keywords:** LDC1000; TI; SPI interface; MSP430

## 0 引言

电感式传感器是利用线圈自感和互感的变化以实现非电量电测的一种装置, 传感器利用电磁感应定律将被测非电量转换为电感或互感的变化。此类传感器主要用于位移测量和可以转换为位移变化的机械量(如力、张力、压力、压差、加速度、振动、应变、流量、厚度、液位、比重、转矩等)的测量。相较于其他类型的传感器, 电感式传感器以其结构简单可靠、分辨率高、对环境要求不高、抗干扰能力强等特点及优势, 广泛的应用于科研、工业生产的检测环节中。但目前常用电感式传感器频率响应较低, 快速动态场合不适用。必须经过转换电路, 才能输出电量。

TI 公司最近推出世界首款电感到数字转换器 LDC1000, 该款传感器提供低功耗、小封装、低成本的解决方案, 通过 SPI 接口方便的连接 MCU。LDC1000 可实现非接触式电感测量, 只需外接一个 PCB 线圈或者自制线圈即可。其对电感的检测并不是通过 Q 表测试线圈的电感量, 而是测试外部金属物体和与 LDC1000 线圈相连的测试线圈的空间位置关系。利用 LDC1000 设计一个金属检测装置可方便实现以下检测: 水平或垂直距离检测; 角度检测; 位移检测; 运动检测; 振动检测; 金属成分检测。可广泛应用在汽车、消费电子、计算机、

工业、通信和医疗领域。

## 1 电感传感器工作原理及系统方案

### 1.1 电感传感器工作原理

电感检测原理是物理中的电磁感应原理, 在 PCB 线圈或者自制线圈中加一个交流电(如图 1), 线圈周围就会产生交变电磁场, 这时如果有金属物体(如图 1 右边)进入磁场, 就会在金属物表明产生涡流(感应电流), 涡流电流跟线圈电流方向相反, 涡流产生的感应电磁场跟线圈的电磁场方向相反。涡流是金属物体的距离、大小、成分的函数。

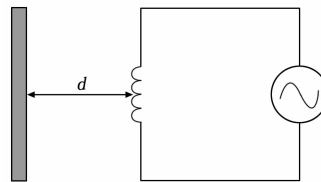


图 1 电感感应现象

涡流产生的反向磁场跟线圈耦合在一起, 就像产生另外一个次级线圈一样。这样 LDC1000 的线圈做为初级线圈, 涡流做为次级线圈, 形成变压器。如图 2 所示, 由于变压器的互感作用, 在初级线圈一端就能够检测到次级线圈的参数。

图 2 中  $L_s$  是初级线圈电感值,  $R_s$  是初级线圈的寄生电阻,  $L(d)$  是互感值,  $R(d)$  是互感的寄生电阻, 括号中的  $d$  表示它们是距离  $d$  的函数。

交变电流如果只加在电感上(初级线圈), 则在产生交变电磁场的同时也会消耗大量的能量。若在电感上并联一个电容,

收稿日期: 2014-12-02; 修回日期: 2015-01-09。

基金项目: 西京学院基金(XJ130224)。

作者简介: 黄 健(1973-), 男, 西京学院, 讲师, 硕士, 主要从事嵌入式和 IC 方向的研究。

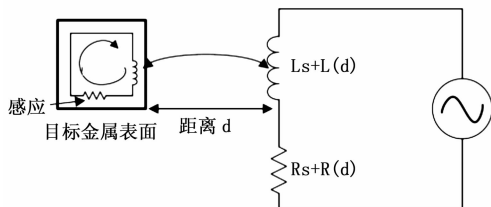


图 2 互感

由于 LC 的并联谐振，消耗能量则会大大减小，只会损耗在  $R_s$  和  $R(d)$  上。如图 3 所示，检测到  $R(d)$  的损耗就可以间接的检测到  $d$ 。

LDC1000 并不直接检测串联电阻，而是检测等效并联电阻，等效电路如图 4 所示。根据等效电路，可推得如下计算公式：

$$R_p(d) = (1 / (R_s + R(d))) * (L_s + L(d)) / C$$

$R_p(d)$  为等效并联电阻

$$R_p = (1 / R_s) * (L / C)$$

外部没有金属物时，去掉与  $d$  关联变量<sup>[1]</sup>。

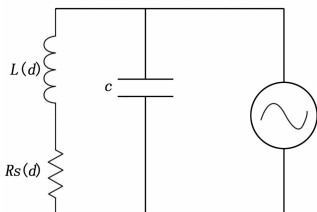


图 3 LC 谐振电路

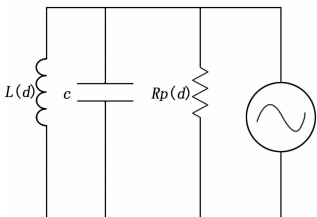


图 4 等效并联电路

## 1.2 系统方案

系统整体如图 5 所示，主控采用 MSP430G2553，该款 MCU 是 TI 公式出品的一款低功耗微处理器，功能强大，价格便宜<sup>[2]</sup>。通过 SPI 接口与 LDC1000 连接，在检测过程中，用电机带动探头检测金属物，LDC1000 前端的 PCB 电感线圈检测金属物体时，不同的距离将会返回不同的数字量，MCU 通过接收到的数字量计算出金属物同线圈之间的距离，然后送到显示单元 1602 液晶上进行显示<sup>[3]</sup>。

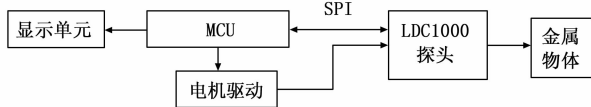


图 5 系统整体框图

## 2 详细设计及关键技术

### 2.1 MSP430G2553 与 LDC1000 的连接

MSP430G2553 与 LDC1000 的硬件连接如图 6 所示。通过 SDI、SDO、SCLK 三根数据线互连实现高速数据传送。其中 MSP430G2553 对 LDC1000 进行数据读写的时序如图 7 所示。

通信时遵循以下步骤：首先将片选信号 CSB 置低；然后将 MSP430G2553 通过 SDI 线向 LDC1000 写入访问寄存器地址，最高位为 0 表示写入，为 1 表示读出，剩余 7 位为寄存器地址；如果是读，SDO 线上发送来自其地址寄存器上的 8 位数据，如果是写命令，SDI 线接收来自 MSP430G2553 的 8 位数据并将其写入寄存器<sup>[4]</sup>。

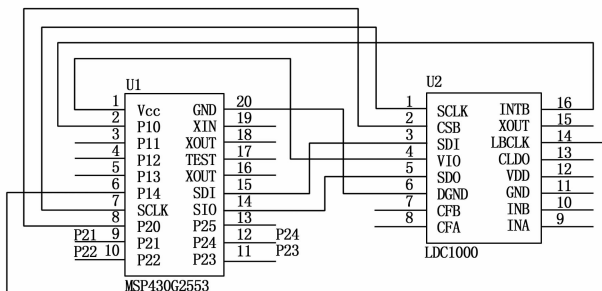


图 6 MSP430G2553 与 LDC1000 的硬件连接

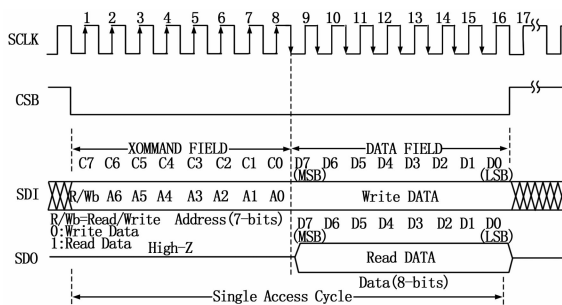


图 7 SPI 读写时序

### 2.2 寄存器设置及数据处理

如前面原理所述，为保证  $R_p$  的实际值落在采样区内，同时又保证足够的精度，要求合理的设置  $R_{pMAX}$  和  $R_{pMIN}$  的值<sup>[5]</sup>。可有两种方法确定该值，其一是实际测量，其二是通过软件算法比较获得该值。首先选取两个合适的值写入  $R_{pMAX}$  和  $R_{pMIN}$ ；将金属物体放到离探头最近的地方，此时涡流最大，将  $R_{pMIN}$  逐渐增大，当 code 的值（LDC1000 中寄存器 0x21 和 0x22 的平均值）接近 25 000 时的  $R_{pMIN}$  的值为设定值；将金属物放在离探头最远的地方，此时涡流最小，将  $R_{pMAX}$  的值逐渐减小，code 的值接近 3 000 时选择此时  $R_{pMAX}$  的值<sup>[6]</sup>。

### 2.3 $R_p$ 值计算公式

计算公式如下： $R_p = (R_{pMAX} * R_{pMIN}) / (R_{pMIN} * (1 - Y) + R_{pMAX} * Y)$ ，其中  $Y$  是 0x20 和 0x21 两个寄存器组成的 16 位数据的值除以 32768<sup>[7]</sup>。假设  $R_{pMAX} = 3 \text{ k}\Omega$ ， $R_{pMIN} = 2 \text{ k}\Omega$ ， $Y = 5000 / 32768 = 0.1526$ ，代入公式得：

$$R_p = (3000 * 2000) / (2000 * (1 - 0.1526) + 3000 * 0.1526) = 2.787 \text{ k}\Omega$$

### 2.4 滤波电容选择

LDC1000 对滤波电容的选择非常苛刻，要选择温度稳定性好、低泄漏、压电噪声低的电容。最优的电容值在 20 pF 到 100 nF 之间，电容值由 LC 谐振时常数决定<sup>[8]</sup>。为了减少寄生参数，滤波电容要尽量靠近芯片，走线短。

### 2.5 电机驱动电路设计

电机驱动电路采用 DRV8833，是 TI 推出的一款双通道 H

桥电机驱动芯片，该芯片的输入电压从 2.7~10.8 V，最大驱动电流可达到 2 A<sup>[9]</sup>。相比 L298 电机驱动芯片，体积非常小。采用电机驱动的主要目的是方便的控制探头移动，检测金属物。电机驱动电路如图 8 所示；其中 P21、P22、P23、P24 接 MSP430G2553 的 P21、P22、P23、P24，做为输入端控制电机的转速和方向；OUT1 和 OUT2 为一组输出，OUT3 和 OUT4 为另一组输出，共可连接两路直流电机。

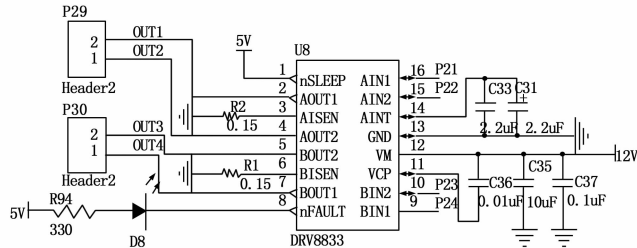


图 8 DRV8833 电机驱动电路

### 3 测试结果

等效并联电阻  $R_p$  表示的就是涡流损耗，并且与涡流损耗成反比。 $R_p$  越大，涡流损耗越小； $R_p$  越小，涡流损耗越大。回顾前面介绍的  $R_p$  与 code 之间的关系， $R_p$  决定信号采集的上下限。也可通过实验看出这个检查范围对检测精度的影响<sup>[10]</sup>。实验说明：金属物跟 LDC1000 的线圈固定一个距离用于参照。设定一个  $R_p\_Min$  值，将金属物远离，读 code 的值 (0x21 和 0x22 寄存器) 并平均，记为 min，然后将金属物放到固定位置，读 code 的值并平均记为 max。然后更换一个  $R_p\_Min$  值，继续实验，可得如下数据：

表 1 实验测试结果

$R_p\_Min(k\Omega)$	1.8	2.4	3.0	4.4	5.4	
min	3670	4740	6230	9135	11950	金属物远离探头
max	3710	4828	6376	9320	12230	金属物靠近探头
差值	40	88	146	185	280	涡流损耗

差值结合测试数据，适当增大  $R_p\_Min$  的值，可使得测

(上接第 2591 页)

### 4 结语

本文提出了一种无线网络传感器模型，该模型同时考虑了多个约束条件：多周期、最短距离和低能耗。随着周期数量增加，聚合差异会逐渐减少，随着约束距离的增加，随机差异会逐渐降低。数值实例和计算实验验证了该模型的有效性。

尽管数学模型的计算不会花费大量的时间，但大规模 WSN 可能需要更多的时间。因此，未来将开发一种现代启发式模型，使得计算时间降低到合理水平。

#### 参考文献：

[1] 范松博, 张永胜, 孙泽宇. 无线传感器网络中分簇路由由优化算法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (2): 493-498.  
 [2] Salami O, Bagula A, Anthony Chan H. Framework for link reliability in inter-working multi-hop wireless networks [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011, 53 (11): 2219-2228.  
 [3] 车楠. 无线传感器网络环境中节点布置问题研究 [D]. 哈尔滨:

量值 max 和 min 的差值加大，如果有金属物在该范围内，可清楚的测得距离与 code 值几乎成正比例<sup>[11]</sup>，因此可方便的探测到金属物体的位置、距离、旋转角度等。

### 4 结论

本文提出了一种新型电感数字传感器的设计，通过超低功耗 MSP430G2553 做为主控，以 TI 最新推出世界首款电感到数字转换器 LDC1000 做为探头，通过 SPI 接口实现高速数据采集，达到降低功耗、减小体积、数字接口的目的，使得数据处理更方便快捷。试验结果表明：该装置对金属物的检测快速、可靠、精度高、方便安装。可应用在灰尘、污垢、油和潮湿等恶劣环境中。

#### 参考文献：

[1] TI. LDC1000 电感数字转换器 [Z]. 上海, 2014, 21-23.  
 [2] 傅强, 杨艳. LaunchPad 口袋实验平台 [Z]. 德州仪器半导体公司, 2013, 99-102.  
 [3] 郭玉, 李彦梅, 王鹏. 基于电涡流传感器的硬币辨伪系统的设计 [J]. 传感技术学报, 2012, 25 (4): 557-560.  
 [4] TI. LDC1000 Evaluation Module User's Guide [Z]. American, 2014, 17-18.  
 [5] 石延平, 刘成文, 倪立学. 基于非晶态合金的动态轨道衡压磁电感式应力传感器的研究 [J]. 传感技术学报, 2009, 22 (12): 1704-1708.  
 [6] 鲍内豪, 蒋峰, 赵湛, 等. 基于非晶带巨磁阻抗效应的新型弱磁场传感器 [J]. 传感技术学报, 2006, 19 (6): 2380-2383.  
 [7] 解源, 钱俊岳. 基于非晶态合金的磁场传感器的研究 [J]. 电测与仪表, 2006, 43 (2): 59-61.  
 [8] 方东明, 赵小林, 王西宁, 等. 射频螺线管微电感的设计和仿真, 传感技术学报 [J]. 2006, 19 (5): 1878-1880.  
 [9] 沈建华, 杨艳琴, 等. MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.  
 [10] 王鹏, 秦道渝, 丁天怀, 等. 微小电感平面线圈的信号检测技术研究 [J]. 传感技术学报, 2007, 20 (10): 2333-2336.  
 [11] 谢维达, 许菁, 邵德荣. 基于电感式传感器的非接触测速定位方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (1): 38-41.  
 哈尔滨工业大学, 2012.  
 [4] 苏金树, 郭文忠, 余朝龙, 等. 负载均衡感知的无线传感器网络容错分簇算法 [J]. 计算机学报, 2014, 37 (2): 445-456.  
 [5] Khuller S, Purohit M, Sarpatwar K K. Analyzing the Optimal Neighborhood: Algorithms for Budgeted and Partial Connected Dominating Set Problems [C]. SODA, 2014, 43 (27): 1702-1713.  
 [6] Eom H Y, Melikov A. Approximation Method for QoS Analysis of Wireless Cellular Networks with Impatient Calls [J]. IEMS, 2010, 9 (4): 339-347.  
 [7] Samadian R, Noorhosseini S M. Probabilistic support vector machine localization in wireless sensor networks [J]. ETRI Journal, 2011, 33 (6): 924-934.  
 [8] 李睿, 李晋国, 陈浩. 两层传感器网络中安全分类协议研究 [J]. 通信学报, 2015, 36 (2): 57-64.  
 [9] 顾云丽, 徐昕, 侯荣涛, 等. 基于移动 Sink 的无线传感器网络任播路由协议 [J]. 计算机科学, 2013, 27 (12): 578-584.  
 [10] VRPTW Benchmark Problems [EB/OL]. http://web.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm, 2012.