

Design of Purely Inductive Principle-Based Steel Grid Scale Displacement Sensor

FANG Jian, CHEN Jianrong, ZANG Jinjie, HU Jianling*

(School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou Jiangsu 215006, China)

Abstract: Displacement sensor is one of the most important sensor technology in the modern scientific research and industrial production. Based on purely inductive principle, a steel grid displacement measurement system is designed. This system includes an ARM based signal processing mainboard, excitation coils, induction coils, and steel grid scale. The displacement is calculated according the acquired induction signal. Its performance is tested with the aid of a laser interferometer. Testing results show that the sensor has the measuring resolution of $1\ \mu\text{m}$, and the measuring precision is about $10\ \mu\text{m}$ within measuring range of 35 cm. In addition, the sensor supports non-linear measurement and has higher practicability.

Key words: sensor technology; displacement sensor; electromagnetic induction; planar coils; steel grid scale

EEACC: 7320C

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2019.01.038

全感应式钢栅位移传感器设计

方 健, 陈建荣, 臧金杰, 胡剑凌*

(苏州大学电子信息学院, 江苏 苏州 215006)

摘 要: 位移传感器技术是一项对现代科学研究和工业生产有着重要影响的传感器技术, 基于电磁感应原理, 设计了一套钢栅位移传感系统。整个系统由基于 ARM 的信号处理主板、激励线圈、感应线圈和钢栅尺构成。主板通过感应信号的检测和计算得到位移信息。使用激光干涉仪进行了性能测试, 测试结果表明, 传感器分辨率达到 $1\ \mu\text{m}$, 在 35 cm 的量程内位移误差在 $10\ \mu\text{m}$ 左右。系统运行稳定, 结构简单易维护, 并且可以支持非直线测量, 具有较高的实用性。

关键词: 传感器技术; 位移传感器; 电磁感应; 平面线圈; 钢栅尺

中图分类号: TH822

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2019)01-0201-05

位移传感器在高精度数控机床、航空航天、石油化工等重要领域有着广泛应用。各行各业尤其是现代化工业对位移传感器的精度、小型化、抗干扰和数字化等等要求越来越高^[1]。

常见的位移传感器有光栅尺、球栅尺、磁栅尺等。光栅尺是基于光的透射和反射现象制成, 具有高精度与高分辨率, 但成本极其昂贵^[2]。球栅尺采用全封闭结构, 抗污染能力强且寿命长^[3]。磁栅尺由于磁栅传感器具有非接触、量程大和精度高等性能, 因此市场需求也比较高, 其良好的性能和相对低廉的成本, 使其具有巨大的应用开发潜力和市场前景^[4]。但磁栅尺利用对磁性薄膜充磁来实现磁栅的磁性, 会存在消磁和磁滞的现象, 运行不稳定且不方便。

本文在磁栅尺原理的基础上, 参考 AMO 感应式测量原理^[5], 设计了基于全感应原理的位移传感器, 采用微多层技术设计的平面线圈替换磁栅尺的

磁头和静态磁栅, 去除磁性物件, 无消磁危险和磁滞反应, 使用方便。

1 磁栅尺工作原理

磁栅位移传感器具有非接触、量程大、精度高、可靠性高、寿命长、安装维护方便等特性。因良好的性能以及相对低廉的成本, 近年来在测控领域的应用不断增加, 年增长率达到了 20% ~ 30% 左右。传统的磁栅结构如图 1 所示^[6]。

传统磁栅尺以不导磁的材料作为磁基, 在上层均匀镀上一层磁膜, 并录上磁极性正负交错、间距相等的磁信号格栅做成静态的磁栅^[7]。磁头间距为 $(m \pm 1/4)\lambda$, 其中 m 为正整数, λ 为一组磁条的长度。输出电压为:

$$e_1 = E_0 \sin(2\pi/\lambda) \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$e_2 = E_0 \cos(2\pi/\lambda) \sin(\omega t) \quad (2)$$

E_0 为磁通量大小相关系数。由上式可见,通过将第 1 组磁头的激励电流移相 45° ,并将两组磁头信号求和,通过相位检测法,即可测得位移量的变化^[8-9]。

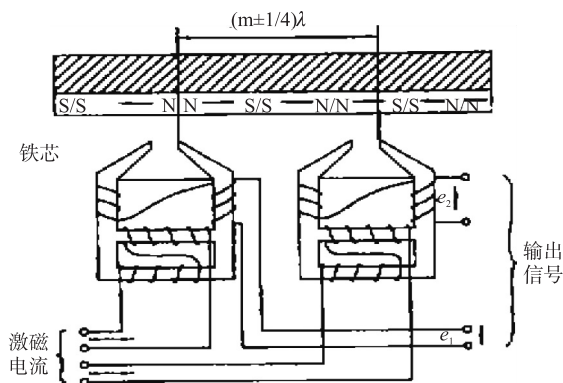


图 1 磁栅传感器结构图

2 全感应式位移传感器原理

传统磁栅尺身必须要满足一定要求的磁栅合金制成,且磁性薄膜需要在高精度的专用录磁设备上录磁来实现磁栅尺的磁性,这就使得其制作成本较为昂贵。此外,磁头在滑动过程中可能造成的摩擦还会导致录磁信号有可能被擦掉。为解决上述问题,本论文参考 AMO 感应式测量原理,利用电磁感应原理,使用平面线圈替换磁栅尺的磁头,且用钢栅尺替换静态磁栅。从而没有磁性元件,所以相对于磁栅尺结构有成本低、寿命长和可靠性高等优点。系统结构如图 2 所示。

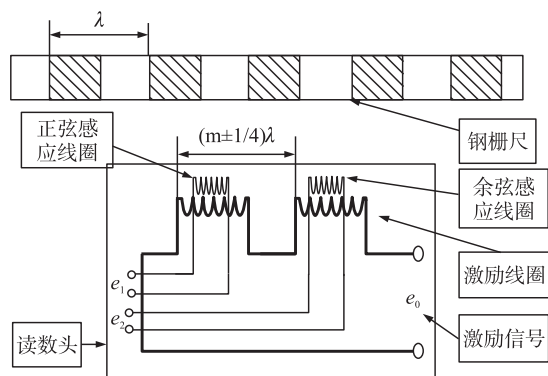


图 2 磁栅位移传感器工作示意图

图 2 中上半部为等间隔镂空的钢栅尺,下半部为由激励线圈和感应线圈构成的平面线圈模块。当正弦交流信号施加到激励线圈上,变化的电压会在钢栅尺附近形成一个变化的磁场,感应线圈在这个变化的磁场中会因电磁感应而得到感应电动势^[10]。由式(1)和式(2)可知,相邻两组感应线圈之间会产生相位差为 $\pi/2$ 的感应电动势。即选择一组感应线圈的信号为正弦信号时,相邻的一组感应线圈的信号则为余弦信号。当读数头在尺身上进行非接触的自由移动时,感应线

圈与栅格的相对位置也会发生变化,因此激励线圈与感应线圈之间的互感系数 M 也会发生变化,从而会造成感应电动势幅度的变化。由此,可以根据当前位置两组感应线圈的正弦与余弦信号,计算得到当前位置对应的角度值 α ,该值以栅格长度为周期在 $0 \sim 360^\circ$ 之间变化,从而可以根据连续两次测量得到的角度值计算得到两次测量间的位移值 s 如式(3)所示:

$$s = \frac{\alpha - \alpha'}{360} \times \lambda \quad (3)$$

式中: α 为当前测量得到的角度值, α' 为上次测量得到的角度值, λ 为栅格间距。假设在连续两次测量间隔内位移不会超过半个栅格间距的长度(可以通过控制测量间隔保证)。在连续移动的过程中,还需判断相邻两次测量是否跨越一个栅格,同时需要判断出位移的方向,并依此计算得到当前的绝对位移 d ,如式(4)所示:

$$d = N \times \lambda + \frac{\alpha - \alpha'}{360} \times \lambda \quad (4)$$

式中: N 为栅格个数。 N 的计算方法如下:

(1) 当前角度大于 180° ,上次保存的角度小于 180° ,且两者之差大于 180° ,则认为滑块往后退了,栅格数需要减 1。

(2) 当前角度小于 180° ,上次保存的角度大于 180° ,且两者之差大于 180° ,则认为滑块往前进了,栅格数需要加 1。

(3) 其他情况则认为在同一栅格内发生的位移,则栅格数保持不变,只记录角度值。

3 全感应式位移传感器设计

3.1 硬件系统设计

本文的钢栅位移传感器是以型号为 STM32F415 的 ARM 处理器为核心。系统由信号处理核心板、激励线圈、感应线圈、钢栅尺构成,信号处理核心板包括微处理器 STM32F415、激励信号产生电路、感应信号接收电路、电源电路等组成,同时系统设计采用 UART 接口上传测量得到的位移数据给上位机,系统框图如图 3 所示。

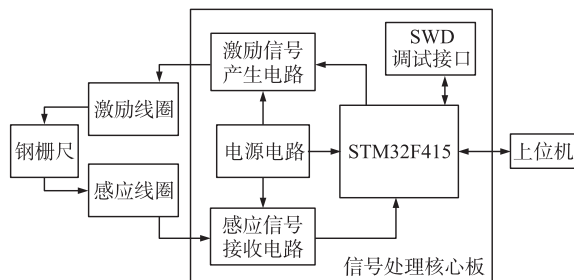


图 3 磁栅传感器硬件总体框图

在系统启动之后,初始化 STM32F415。随后对 GPIO 进行初始化,将 I/O 口根据系统设计的功能要求进行相应的功能配置。接着对定时器 1、2、3 分别初始化,设置预分频计数器的值,配置相匹配的引脚输出和相应的捕获中断触发方式。其中定时器 1 用于激励信号 PWM 波的生成,定时器 2 用于处理位移数据并进行相应的位移量计算,定时器 3 用来进行 AD 采样。随后对 UART 模块进行初始化,配置其波

特率等相关参数。在程序执行的时,定时器 1 首先会控制 PWM 频率并传输到激励信号产生电路中,定时器 3 控制对感应信号进行 AD 采样的频率,并把采样数据以 DMA 的传输方式放入缓存区。定时器 2 与定时器 1 进行级联,由定时器 1 对其进行触发,定时器 2 以 4 kHz 的频率触发中断,中断程序对 AD 采样到的感应信号数据进行处理并计算位移量。在接收到上位机的 UART 数据请求中断中断后,将测量结果通过 UART 发送到上位机。软件流程图如图 9 所示。

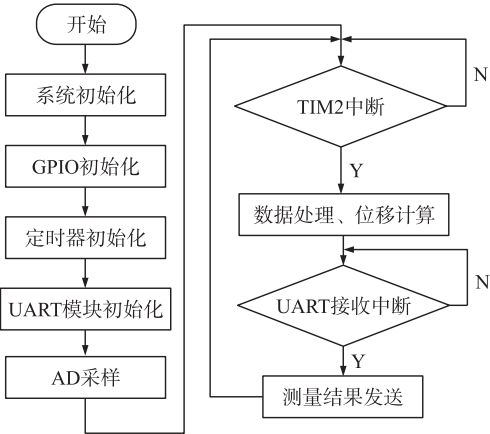


图 9 系统软件流程图

使用 STM32 的 ADC1 与 ADC2 分别采集正弦和余弦感应信号,并利用 DMA 实现数据的搬移和乒乓缓冲区技术实现数据接收。在接收到一帧数据接收完成的中断时,中断服务程序首先关闭 ADC 与 DMA,清除中断标志,然后读取乒乓缓冲区标志,并根据乒乓缓冲区标志重置 DMA 的目的地址,随后重启 ADC 和 DMA 进行下一帧数据的接收。处理程序根据乒乓缓冲区标志读取相应缓冲区中的数据计算出当前角度值并记录下来,再依据上次的记录值判断此次角度变化有没有大于 180°,依据第 2 节介绍的方法,判断是前进还是后退并记录 N 数值变化。最后依据前后角度的变化的值和增减的栅格数量计算出当前位移量。数据处理及位移计算流程如图 10 所示。

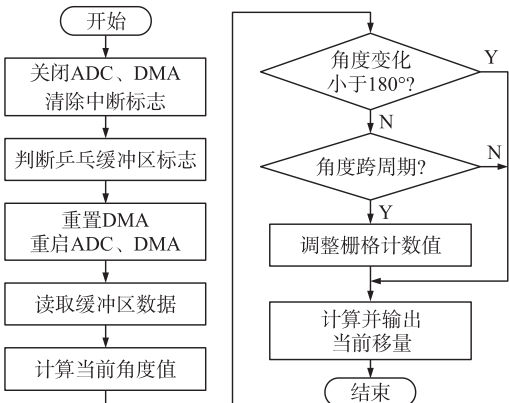


图 10 数据处理及位移计算流程图

5 系统测试与性能分析

本文所设计的全感应式位移传感器通过与激光干涉仪的测量结果进行比较来完成精度的测试。本论文在测试中,使用 RENISHAW 公司的 ML10 Gold 激光干涉仪,其分辨率达到了 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ^[11],足以对本钢栅位移传感系统进行精度测试。在测量开始时,先对激光干涉仪与磁栅位移传感器同时进行清零操作,设定激光干涉仪以 5 mm 为单位进行位移,逐次对上位机中读取到的系统测量值进行记录。以激光干涉仪为基准,对应点标准值与系统测量的结果采用线性拟合算法进行误差补偿^[12],并将拟合方式运用于随后的测量中。表 1 给出了拟合后测量的部分结果。

表 1 测量结果

激光干涉仪 测量值 / μm	第 1 次 测量值 / μm	第 2 次 测量值 / μm	第 3 次 测量值 / μm	最大 误差	平均 绝对 误差
10 000	9 992	9 991	9 995	-9	7
30 000	29 996	29 997	29 991	-9	5
90 000	90 002	90 004	89 997	10	5
170 000	170 010	170 008	170 005	10	8
270 000	269 989	270 001	269 997	-11	4
350 000	349 988	349 990	349 992	-12	10

由表 1 可见,本方案中基于 STM32F415 的磁栅位移测量系统运行稳定,工作正常,在量程为 35 cm 的情况下,分辨率为 $1\text{ }\mu\text{m}$,测量误差小于 $12\text{ }\mu\text{m}$,符合设计要求。

常见的位移传感器产品例如武汉驰栅科技的静磁栅尺^[13],英国 newall 公司的 MICROSYN 系列的球栅尺以及德国 SIKO 公司的 MSK5000 系列磁栅尺^[14]。性能如表 2 所示。

表 2 国内外位移传感器与钢栅尺性能对比

位移传感器	分辨率	支持非直线测量
静磁栅尺	1 mm	是
newall 球栅尺	0.005 mm	否
SIKO 磁栅尺	$1\text{ }\mu\text{m}$	否
钢栅尺	$1\text{ }\mu\text{m}$	是

静磁栅尺虽然分辨率只有 1 mm,其测量范围为 $0.01\text{ m}\sim 2\text{ }000\text{ m}$,且支持非直线测量。球栅尺的测量精度受球栅中球体直径精度影响,且球体之间相互挤压,也会出现误差。而钢栅尺的尺身由不锈钢以高精密光学蚀刻而成,所以比球栅尺有更高的精度,同时还可以制成弯曲的尺身实现非直线测量。相比于磁栅尺,没有磁性物件,避免消磁和磁滞现象,具有更高的寿命和稳定性。

6 总结

随着工业 4.0 概念的不断深入,传感器技术的应用也越来越广泛,其中位移传感器作为工业生产中不可或缺的测量和控制部分。而本文完成的磁栅位移传感器,分辨率达到了 $1\ \mu\text{m}$,在 35 cm 的量程内位移误差在 $10\ \mu\text{m}$ 左右。系统运行稳定,结构简单易维护,且支持非直线测量,成本低。完全符合现在工业化的需求。

参考文献:

- [1] 蒋恺. 基于 ARM 的磁致伸缩位移传感器设计与实现[D]. 苏州:苏州大学,2013.
- [2] 曲家骐,王季秩. 伺服控制系统中的传感器[M]. 机械工业出版社,2001:10-15.
- [3] 李蓉,鲁双全. 球栅技术进程及应用[J]. 电子测试 2009(8):10-14.
- [4] 张江陵,季国钧. 电子计算机外部设备设计原理(下册)[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1995:15-18.
- [5] 武汉恒源控制系统工程有限公司. 角度测量系统-基于 AMOSIN ⑩感应测量原理[Z]. 武汉恒源控制系统工程有限公司. 2008.
- [6] 陈亮. 磁栅绝对位移传感器的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [7] 张怀,王广君. 基于 FPGA 的高精度电磁信号采集系统设计[J]. 电子技术应用,2013(8):88-90,94.
- [8] 李瑾. 磁栅位移传感器[J]. 机械工程与自动化,2014,2(1):200-201.
- [9] Puangmali P. Mathematical Modeling of the Intensity-Modulated Bent-Tip Optical Fiber Displacement Sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2010,59(2):283-291.
- [10] 武丹,李剑,韩焱. 一种基于电磁感应原理的角位移参数测量方法[J]. 传感技术学报,2017,30(2):211-217.
- [11] 卢业坚. 利用 RENISHAW 激光干涉仪对 Nikon 编码器精度进行补偿的方法[J]. 科技与创新,2016(22):84-86.
- [12] 田晓丹,张会新,刘文怡,等. 温度补偿型光纤光栅位移传感器[J]. 电子器件,2016,39(3):576-580.
- [13] 王修文. 磁栅位移传感器的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [14] 胡鹏. 绝对式磁栅传感器的设计与研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.



方健(1993-),男,苏州大学在读硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统设计,数字信号处理,深度学习,20155228035@suda.edu.cn;



胡剑凌(1973-),通信作者,男,博士,教授,现在苏州大学电子信息学院工作。主要研究方向为无线通信、数字信号处理、多媒体信号处理与传输、嵌入式系统设计,jlhu@suda.edu.cn;



陈建荣(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统设计,数字信号处理;



臧金杰(1990-),男,苏州大学硕士研究生(已毕业),主要研究方向为嵌入式系统设计,网络通信。