Eddy Current Displacement Sensor Based on Digital Lock-in Amplifier*

*LI Chang, ZHOU Songbin**

(*Institute of Intelligent Manufacturing, Guangdong Institute of Intelligent Manufacturing, Guangzhou Guangdong* 510075, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of low linearity and complex circuit structure of eddy current displacement sensor, the digital phase-locked amplification technology is adopted to measure the sensor coil loss, and then the displacement through the coil loss is measured, which makes full use of the STM32F3 series MCU chip resources. In-chip digital-to-analog converter with DMA controller cooperates to generate excitation signal, analog-to-digital converter with DMA controller cooperates to collect signal, and the floating-point arithmetic runs the digital phase-locked amplifier algorithm. Finally, a new type of eddy current displacement sensor is realized by using the on-chip digital-to-analog converter to output the values after linear calibration. The circuit of the sensor is simple, the linearity is better than 0.51%, and the dynamic response time is less than 2 ms.

Key words: digital lock-in amplifier; eddy current displacement sensor; phase measurement; amplitude measurement; impedance measurement

EEACC: 7230S **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2022.02.032

基于数字锁相放大器的电涡流位移传感器*

李 昌, 周松斌*

(广东省科学院智能制造研究所, 广东 广州 510075)

摘 要: 针对电涡流位移传感器电路结构复杂、线性度低等问题, 采用数字锁相放大技术来测量传感器线圈损耗, 再通过线圈损耗测量位移大小。充分利用了 STM32F3 系列单片机的片内资源: 片内数模转换器与 DMA 控制器配合产生激励信号, 模数转换器与 DMA 控制器配合采集信号, 浮点运算器运行数字锁相放大器算法, 最后用片内数模转换器输出线性校准后的数值, 实现了一种新型的电涡流位移传感器。传感器的电路简洁, 线性度优于 0.51%, 动态响应时间小于 2 ms。

关键词: 数字锁相放大器; 电涡流位移传感器; 相位测量; 幅度测量; 阻抗测量

中图分类号: TP212.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2022)02-0445-05

电涡流位移传感器, 用于非接触式测量传感器与金属表面的位移。其原理是: 激励信号加载在感应线圈上, 感应线圈周围存在交变磁场, 该磁场靠近金属物体时产生涡流效应。受涡流效应的影响, 线圈的损耗与电感量发生变化。线圈靠近不同金属材料时, 线圈电感量变化方向不确定, 但线圈损耗一定变大[1]。本文采用通过测量线圈损耗的大小来测量线圈位移。

目前电涡流位移传感器理论研究比较充分, 而电涡流位移传感器设计方面还没有完善的方案。从已有文献中发现, 电涡流位移传感器一般采用振荡器或者 DDS 产生激励信号, 用检波电路或者绝对值电路测量线圈两端信号幅度作为输出[2,3]。为了减小温漂、提高稳定性, 采用差分检测技术[4,5]或神经网络拟合、单片机拟合的方法[6]来实现线性化输出[7,8]。传感器包含多个电路模块, 系统较为复杂, 难以集成在安装空间较小的探头中。当激励频率达到 100 kHz 时, 绝对值电路精度下降。绝对值电路

项目来源: 国家自然科学基金青年基金(6180022835); 广东省自然科学基金(2020A1515010768); 广州市产业技术重大攻关计划(201902010040); 广东省重点领域研发计划(2019B010154002)

收稿日期: 2021-01-20 **修改日期**: 2021-05-11

只能检测线圈信号的幅度,线圈信号与激励信号相位差无法测量,所以无法提取线圈损耗的大小。

STM32F3 序列单片机具有 DMA 传输的 DAC 与 ADC,并且具有浮点运算器。DMA 控制 DAC 输出正弦表,可产生激励信号;DMA 控制双路 ADC 采样,可同时采集激励信号,响应信号;采样信号用数字锁相放大器进行幅度和相位测量[9];根据激励信号,响应信号的幅度和相位,计算线圈阻抗,阻抗实部为线圈损耗;再用实验的方法获取位移与损耗的数值关系;最后根据该数值关系实现传感器输出线性化。

1 电涡流位移传感器电路结构

电涡流位移传感器的电路结构如图 1 所示。包含电流源激励电路、STM32F3 单片机、输出电路。

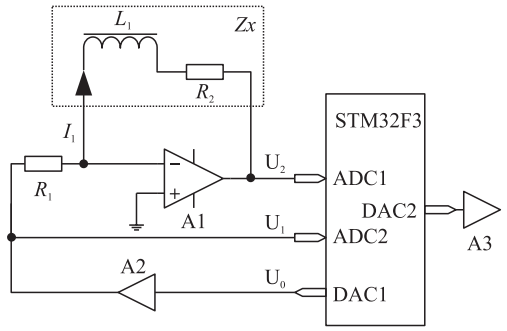


图 1 电涡流位移传感器电路结构

其中 STM32F3 单片机 DAC1 输出正弦采样序列,形成信号 U_0。图中 A1 为运放,信号 U_0 通过缓冲器 A2 产生激励信号 U_1,将 U_1 的幅度与相位用复数 $\dot{U}_1$ 表示。U_1 加载在 R_1 两端,形成电流 I_1。电流 I_1 流过传感器线圈 L_1 与电阻 R_2 上,在运放 A1 输出端产生电压 U_2。R_2 与传感器线圈 L_1 串联,用来减少信号相移,保证运放工作时的相位裕量。R_1、R_2 为精密电阻,A3 为输出电路。

测量时,L_1、R_2 串联阻抗设为 $\dot{Z}_x$,作为一个整体测量。得到 $\dot{Z}_x$ 后减去 R_2 即可得到 L_1 的阻抗 $\dot{Z}_{L1}$。对于 $\dot{Z}_x$,加载在 $\dot{Z}_x$ 两端电压为 U_2。将 U_2 的幅度与相位用复数 $\dot{U}_2$ 表示。流过 $\dot{Z}_x$ 的电流为 $\dot{I}_1=\dot{U}_1/R_1$,通过采集 U_2、U_1 可得到 $\dot{Z}_x$ 两端的电压 $\dot{U}_2$ 与流过的电流 $\dot{I}_1$,进而计算 $\dot{Z}_x=\dot{U}_2/\dot{I}_1$ 的数值。

单片机 ADC1、ADC2 对 U_2、U_1,同步采样得到采样序列 $U_2(n)$、$U_1(n)$。采用数字锁相放大器的方法测量 $\dot{U}_2$、$\dot{U}_1$ 的幅度与相位,DAC2 用于输出测量结果。

2 幅度与相位的测量方法

数字锁相放大器由正交参考信号、数字相乘器、数字低通滤波器组成。如图 2 所示,$X(t)$ 为输入信号,$\sin(\omega t)$ 与 $\cos(\omega t)$ 为两路正交参考信号。输入信号与正交参考信号相乘对应的输出信号分别为 $Y_I(t)$ 与 $Y_Q(t)$;信号 $Y_I(t)$ 与 $Y_Q(t)$ 经过低通滤波器输出信号分别为 $I(t)$ 与 $Q(t)$。

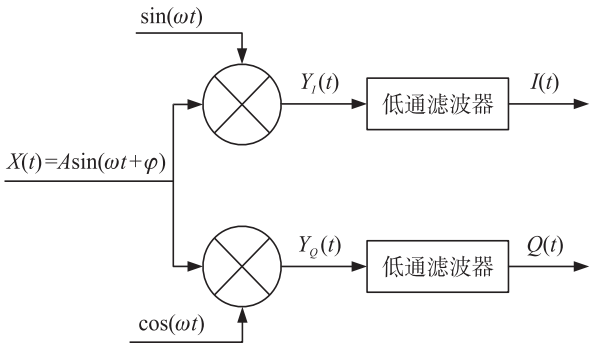


图 2 数字锁相放大器结构

将输入信号定义为 $X(t)=A\sin(\omega t+\varphi)$,可得:

$$Y_I(t)=\frac{A}{2}[\cos(\varphi)-\cos(2\omega t+\varphi)] \tag{1}$$

$$Y_Q(t)=\frac{A}{2}[\sin(\varphi)+\sin(2\omega t+\varphi)] \tag{2}$$

经过低通滤波器后,$Y_I(t)$ 与 $Y_Q(t)$ 中交流分量被滤除,输出直流分量:

$$I(t)=\frac{A}{2}\cos(\varphi) \tag{3}$$

$$Q(t)=\frac{A}{2}\sin(\varphi) \tag{4}$$

根据式(3)、(4)可得输入信号 $X(t)$ 的幅度 A 与相位 φ 分别为:

$$A=2\sqrt{I^2+Q^2} \tag{5}$$

$$\varphi=\arctan(Q/I) \tag{6}$$

根据式(5)、(6)可求得信号的幅度 A 与相位 φ,其中相位 φ 为采样信号与参考信号之间的相位差。

3 传感器线圈损耗测量

在单片机 DMA 控制器的操作下,设置激励信号 S_1 的频率为 f。ADC1、ADC2 进行同步采样,采样率为 f_s,采样率 f_s 为激励信号频率 f 的 N 倍,这样每个信号周期有 N 个采样点。对信号 U_2、U_1 进行同步采样得到采样序列 $U_2(n)$、$U_1(n)$。在单片机内部生产正交参考信号:$R_I(n)=\sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$ 与 $R_Q(n)=$

$\cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$。采样序列与正交参考信号的样点数都为 kN 个,k 为整数。

设信号 $U_2(n)$ 的幅度为 A_2,相位为 φ_2;信号 $U_1(n)$ 的幅度为 A_1,相位为 φ_1。可得:

$$I_{U2}=\frac{\sum_{n=0}^{kN-1}(U_2(n)\cdot R_I(n))}{kN}=\frac{A_2}{2}\cos(\varphi_2) \quad (7)$$

$$Q_{U2}=\frac{\sum_{n=0}^{kN-1}(U_2(n)\cdot R_Q(n))}{kN}=\frac{A_2}{2}\sin(\varphi_2) \quad (8)$$

$$I_{U1}=\frac{\sum_{n=0}^{kN-1}(U_1(n)\cdot R_I(n))}{kN}=\frac{A_1}{2}\cos(\varphi_1) \quad (9)$$

$$Q_{U1}=\frac{\sum_{n=0}^{kN-1}(U_1(n)\cdot R_Q(n))}{kN}=\frac{A_1}{2}\sin(\varphi_1) \quad (10)$$

由于 STM32F3 序列单片机无法实现同时采样。ADC1 和 ADC2 之间存在固定的采样触发间隔,所以要进行相位修正。设触发间隔为 t_i,激励信号频率 f,采样相位差 $\varphi_i=2\pi f t_i$。假设信号 $U_2(n)$ 采样相位超前,对测量得到的信号进行修正得:

$$I_{U2c}=\frac{A_2}{2}\cos(\varphi_2-\varphi_i) \quad (11)$$

$$Q_{U2c}=\frac{A_2}{2}\sin(\varphi_2-\varphi_i) \quad (12)$$

由于单片机计算反正切函数和做除法运算时,需要消耗较多的时间,不能发挥浮点运算器的优势,计算 I_{U2c} 与 Q_{U2c} 时,根据 $\cos(\varphi_2-\varphi_i)=\cos(\varphi_2)\cdot\cos(\varphi_i)+\sin(\varphi_2)\cdot\sin(\varphi_i)$ 求解。用乘法运算代替反三角函数运算,减少运算时间。

根据式(9)~式(12)可得:

$$\dot{U}_2=2(I_{U2c}+\mathrm{j}Q_{U2c}) \quad (13)$$

$$\dot{U}_1=2(I_{U1}+\mathrm{j}Q_{U1}) \quad (14)$$

根据式(13)、式(14)可得:

$$\dot{Z}_x=\dot{U}_2/\dot{I}_1=R_1\dot{U}_2/\dot{U}_1=$$

$$R_1\left(\frac{\dot{I}_{U2c}\cdot I_{U1}+Q_{U2c}\cdot Q_{U1}}{I_{U1}^2+Q_{U1}^2}+\mathrm{j}\,\frac{Q_{U2c}\cdot I_{U1}-Q_{U1}\cdot I_{U2c}}{I_{U1}^2+Q_{U1}^2}\right) \quad (15)$$

根据电涡流位移传感器的电路结构,电感线圈 L_1 的阻抗 $\dot{Z}_{L1}$ 为:

$$\dot{Z}_{L1}=\dot{Z}_x-R_x \quad (16)$$

根据式(15)、(16)可计算线圈 L_1 的损耗 R_{L1} 为:

$$R_{L1}=R_1\left(\frac{I_{U2c}\cdot I_{U1}+Q_{U2c}\cdot Q_{U1}}{I_{U1}^2+Q_{U1}^2}\right)-R_2 \quad (17)$$

3　电涡流位移传感器程序设计

STM32F3 序列单片机的 DAC 响应频率达到 1 MHz。定时器触发 DMA 向 DAC1 传输正弦序列,触发频率为 1 MHz。用 DMA 循环的方式传输 10 个点组成的正弦序列,输出 100 kHz 的激励信号。单片机 ADC 采样频率最高能到 5 MHz。定时器触发 ADC1 与 ADC2 同步采样,触发频率为 1.2 MHz,相当于激励信号每个周期采集 12 个点。采样结果由 DMA 传输,用 DMA 循环传输的方式,每个循环传输 240 个采样样点。DAM 传输有两个中断,分别是 DMA 半数中断与 DMA 完成中断。正交参考信号一个周期也预置为 12 个点,长度为 120 个点的浮点数。在两个 DMA 中断内,根据两路采样信号和两个正交参考信号,通过数字锁相放大算法计算线圈损耗;再根据损耗和位移关系,用数据拟合的方法得到位移;最后把位移大小输出到 DAC2。

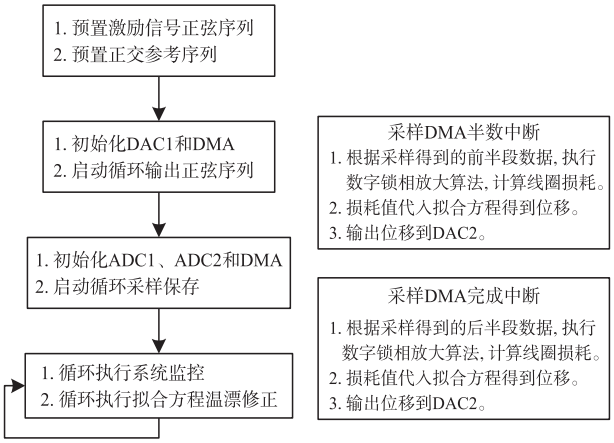


图 3　程序的基本流程

传感器线性校准和温漂补偿通过单片机算法实现。首先用实验的方法收集传感器线圈在不同温度 T_n,不同位移 D_n 对应的损耗值 R_n,在单片机的后台程序采集线圈温度 T_x;接着根据实验收集的数据,求解出 T_x 最接近的位移 D_x 与对应的损耗值 R_x;再用最小二乘法,可拟合得到一个多项式函数;最后在采样 DMA 中断程序中,计算结果代入该多项式函数,可得线性校准后的位移。详细过程参考《高动态电涡流位移传感器温度实时补偿算法》[10]。

4　电涡流位移传感器性能测试

传感器静态测试装置如图 4。用铁架台安装各个单元,从上到下分别为电涡流传感器、金属圆盘、支撑柱、微调 Z 轴。其中微调 Z 轴调整精度为 10 μm。

表 1 是实验得到的线圈损耗与位移关系表。实验中使用锰铜丝绕制线圈,锰铜丝温漂低,有利于提高传感器的稳定性。线圈感应对象为 2 mm 厚的铝板。线圈磁场有效作用距离大约等于线圈半径[11],实验用的线圈半径为 21.6 mm,最大测量距离设定为 10 mm。

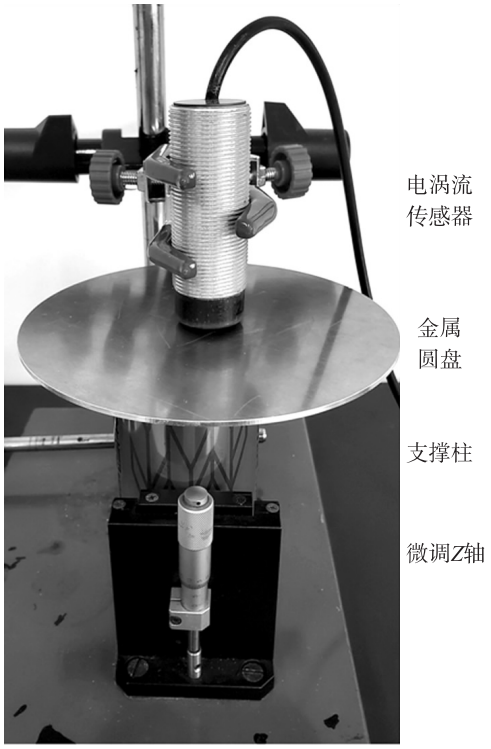


图 4 传感器静态测试装置

表 1 线圈损耗与位移(25 ℃)

位移/mm	损耗/Ω	位移/mm	损耗/Ω
0	51.983	6	41.720
1	47.788	7	41.485
2	45.301	8	41.340
3	43.691	9	41.250
4	42.713	10	41.195
5	42.102		

采样 DMA 中断内测量线圈损耗,经过线性校准和温漂补偿算法[10]得到线圈的位移。位移大小通过 DAC2 输出。实验测量线圈位移量与 DAC2 输出电压,如表 2。传感器供电电压为 24 V,工作电流为 34 mA,线性度为 0.51%。

根据表 2 数据可绘制线圈位移与输出电压关系图,如图 5 所示。

动态测试装置包含电机、可转动的亚克力圆盘组成的电动转盘。电动转盘上贴有金属箔,当电涡流传感器接近转盘,传感器能够间歇性、周期性地感应到金属面和非金属面。传感器输出信号呈方波状,通过测量方波边沿跳变时间,可得到传感器的响应时间。图 6 为动态测试装置,图 7 为输出波形。

表 2 线圈位移与输出电压

位移/mm	电压/V	线性度/%	位移/mm	电压/V	线性度/%
0	0.188	0.18	6	6.188	0.23
1	1.189	0.14	7	7.185	0.11
2	2.204	−0.04	8	8.182	0.1
3	3.208	−0.11	9	9.179	−0.06
4	4.227	−0.33	10	10.186	−0.1
5	5.242	−0.51			

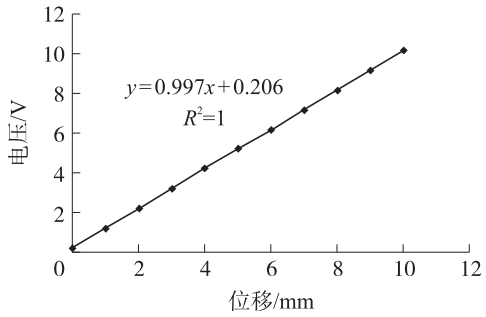


图 5 线圈位移与输出电压

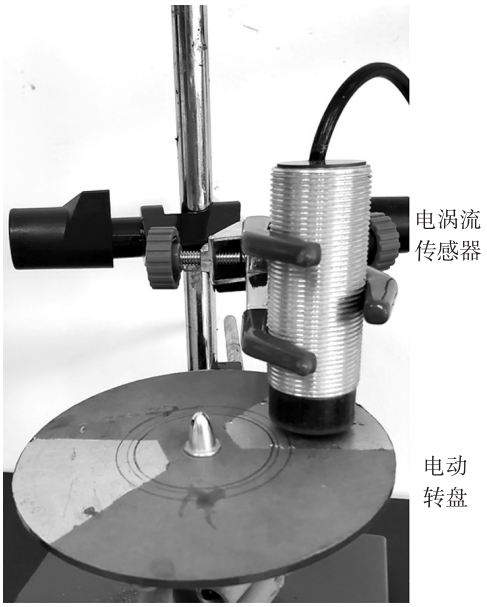


图 6 动态测试装置

由图 7 动态输出波形可知,传感器输出的最大值与最小值之间,需要的跳变时间为 1.820 ms,具有较高的动态响应能力。

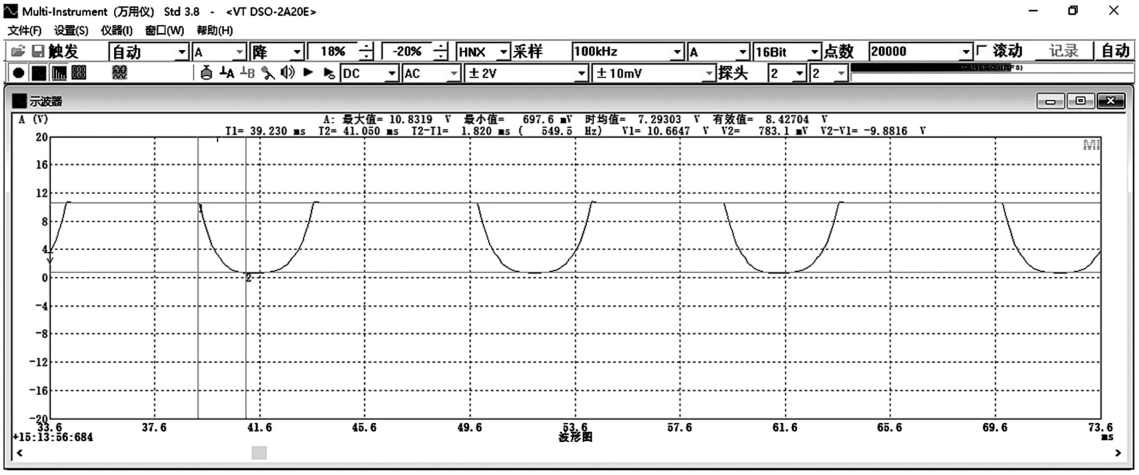


图 7　传感器动态测试波形

5　结论

数字锁相放大器不需要外部参考信号,就能够准确地测量采集信号的幅度与相位,相比起传统的幅度相位测量方法,具备结构简单,精度高,稳定性好等优点。STM32F3 序列单片机集成高速 DAC、ADC,既可以输出激励信号,又可采集响应信号;同时包含浮点运算器,可做数字信号处理。结合数字锁相放大器与 STM32F3 序列单片机的特点,实现了一种电路结构简单、稳定性高、线性度好、动态响应高的电涡流位移传感器。

参考文献:

[1] 王燕. 电涡流检测的有限元仿真分析[D]. 南昌:华东交通大学,2008.

[2] 吕云腾. 高温电涡流位移传感器分析与设计[D]. 杭州:浙江大学,2014.

[3] 许德章. 电涡流传感器信号调理电路的设计[J]. 自动化仪表,1998,19(6):37-38.

[4] 秦庆. 双线圈电涡流位移传感器理论与实验研究[D]. 南京:东南大学,2017.

[5] 丛华,张德魁,赵鸿宾. 电涡流传感器温度稳定性研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),1999,39(10):65-68.

[6] 王露. 电涡流传感器温度补偿方法的研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.

[7] 李移,曹现刚. 电涡流位移传感器曲线拟合方程式的研究[J]. 煤矿机械,2013,34(1):94-96.

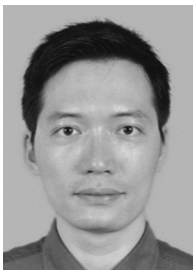
[8] 于鹏,许媛媛. 利用插值法和曲线拟合法标定电涡流传感器[J]. 中国测试技术,2007,33(1):139-141.

[9] 任泽龙,刘松,梁亨茂,等. 谐振式 MEMS 磁传感器数字锁相放大器设计[J]. 传感器与微系统,2019,38(4):86-88.

[10] 李昌,周松斌,韩威. 高动态电涡流位移传感器温度实时补偿算法[J]. 现代电子技术,2018,41(5):132-134.

[11] 王洪波. 亚纳米精度电涡流传感器[D]. 合肥:中国科学技术大学,2015.

李　昌(1985—),硕士,工程师,主要研究领域为信号采集与处理技术;



周松斌(1978—),博士,研究员,主要研究领域为智能传感器技术。