

基于 STM32 的智能线性位移传感器信号处理系统设计

姬宪法¹ 李传江²

(1. 空军第一航空学院 信阳 464000; 2. 上海师范大学信息与机电工程学院 上海 201418)

摘要: 线性位移传感器(LVDT)是一种高精度、高可靠性的直线位移传感器,广泛应用于工业自动化领域中的位移测量系统中。针对目前的传感器存在线性度和智能性偏低的问题,设计了以 AD698 为模拟调理系统核心用以处理 LVDT 信号,以 STM32F407 作为数字调理系统核心用以计算 AD698 的输出的采样信号。采用模拟信号和数字信号相结合的方案,综合了模拟信号处理率的高可靠性、高适应性和数字信号处理器中进行非线性拟合解决非线性的优点。实验结果表明该系统具有设计结构简单、功能强大、性价比高以及易操作等优点。

关键词: 线性位移传感器; 调理电路; 直线位移传感器; AD698

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Design of signal processing system for intelligent linear displacement sensor based on the STM32

Ji Xianfa¹ Li Chuanjiang²

(1. Institute of Air Force's First Aviation, Xinyang, 464000, China; 2. Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 201418, China)

Abstract: LVDT linear displacement sensor is a high-precision, highly reliable linear displacement transducer, widely used in the displacement measurement system in the field of industrial automation. Currently, there is a common problem that the linearity and intelligence performance of the sensor is on the low side, for that reason, the AD698 is choose as of the core of simulation control system, with STM32F407 as the core of the digital control system. In order to realize the high dependability and adaptability of analog signal rate and reach the advantages of solving nonlinear by digital signal processor, we adopt the scheme of the combination of analog signal processing and digital signal processing. The experiments show that the system has advantages of simple design structure, powerful function, high cost performance, easy operation etc.

Keywords: LVDT; control circuit; linear displacement sensor; AD698

1 引言

线性位移传感器(linear variable differential transformer, LVDT)^[1-4]因其优良可靠的性能在工业控制中得到了广泛的应用。在国外 LVDT 的发展比较迅速,涌现了一批有名的 LVDT 生产厂家如美国的 Measurement、Macrosensors、Schaevitz,英国的 SE、Solartron,德国的 Schultz。对于 LVDT 传感器本身的研究主要集中在铁芯材料的研究,线圈绕制工艺的改进和封装制造工艺的提升。除了传感器本身对 LVDT 精度有着较大影响外,其信号调理电路也有重要影响。LVDT 的输入为交流电压,其输出

也为交流电压,由于制作工艺的原因还含有一定的零点电压残余,在实际的信号调理过程中需要对残余电压进行处理,对其输出交流信号进行整流、放大和滤波,同时需要计算交流输出的均方根值或将交流输出转换为直流输出。目前较为成熟的调理电路方案结合了振荡器、相敏解调器、滤波器和放大器等电路^[5-6]。

根据不同的实现方案主要分为模拟信号处理和数字信号处理两类^[7-8]。模拟信号处理的分立元件较多,难于调试,受环境影响较大。数字信号处理元件数量较少,集成化程度高,可以在软件上实现更多的功能。

20 世纪末以来,随着数字电路的发展,很多学者提出

了完全的数字信号调理电路^[9-10]。即激励源电路采用 DAC 数模转换器产生经过功率放大后激励原边绕组,而数据接收部分则直接将副边线圈的输出 AD 采样收集。最后在芯片中采用合适的处理算法对输出值分析。这种纯数字处理的方法的优点是可以采用更为合适的算法来对正弦信号的有效值进行处理,可以解决由于传统生产工艺导致的器件缺陷引起的误差。还可以采用相关的算法进行滤波和补偿。这种方案一般采用 DSP 作为处理器件,能够实现较高的带宽和精度。但是纯数字信号的处理方案也有一些缺点导致还没有在工业中广泛应用,一是数字信号处理电路的晶振频率较高,不适用于电磁环境复杂的工作地点。其工作可靠性无法得到保证;二是数字信号处理芯片价格较高。相比于传统的模拟处理方案,数字电路的代价较大。

针对纯数字电路处理方式与纯模拟电路处理电路的不足,本文采用一种模拟处理方案和数字处理方案相结合的处理方法,借助于现有模拟处理方案的高可靠性,高适应性,辅以数字信号处理,减小模拟信号处理的温度漂移和非线性漂移,设计一种智能的 LVDT 信号调理电路。

2 LVDT 的工作原理和系统总体设计

常见的 LVDT 为三段式结构,其结构剖面电路简图如图 1 所示。一般的 LVDT 主要包括一个原边线圈,两个副边线圈和一个移动铁芯。两个副边线圈反向串接,形成差动输出。LVDT 的测量原理建立在电磁线圈互感上,从物理意义上来讲,LVDT 的测量精度是无穷大的。副边线圈由交流电压激励,频率一般在 100 Hz 到 1 kHz,幅度在 0.5~10 Vrms。与此同时两个副边线圈中则会产生互感电压。其输出电压为 $U_o = U_{s1} - U_{s2}$ 。又由于铁芯的存在,给原边线圈到副边线圈的互感提供了磁通路,所以副边线圈的互感变化随着铁芯的位移变化而线性改变。由于磁路

的相关问题,LVDT 的线性量程为一个范围,可以采用软件补偿的方法来增加 LVDT 的线性范围从而提高量程。

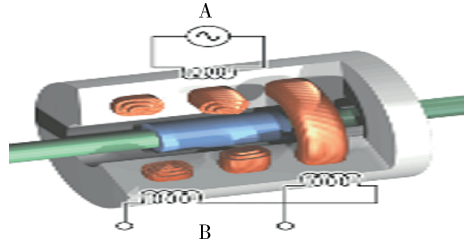


图 1 LVDT 的结构剖面

针对上述工作原理,本文方案包含两个部分,模拟处理部分和数字处理部分。其中模拟处理部分主要功能是产生一个正弦激励信号来激励 LVDT 传感器的原边部分,同时将副边的输出处理称为一个与机械位移呈正比例的直流电压信号,这里采用高度集成的 AD698 芯片实现模拟信号处理,只需要少量的外围无源器件即可以工作。数字信号处理部分主要完成 AD 采样、数字滤波处理、线性化处理、显示、数字输出和模拟输出(DA)等功能,采用 STM32 处理器实现,采用软件的方式实现数字化处理功能。

3 模拟信号处理系统设计

AD698 是一款通用的 LVDT 信号处理系统。它能够以较高的重复精度将 LVDT 传感器的位移量转换为直流电压量。AD698 中内置一个高精度 RC 振荡器,一个功率放大器用以产生激励 LVDT 传感器原边线圈。两个同步解调器用以解码原边和副边的电压。芯片采用的比较器决定了输出电压与输入电压的比值。在之后通过一个滤波器和放大器来调制输出信号。模拟信号处理的电路如图 2 所示。该模块设计的主要任务是设定振荡频率、振荡幅值、满量程电压和电压漂移补偿参数。

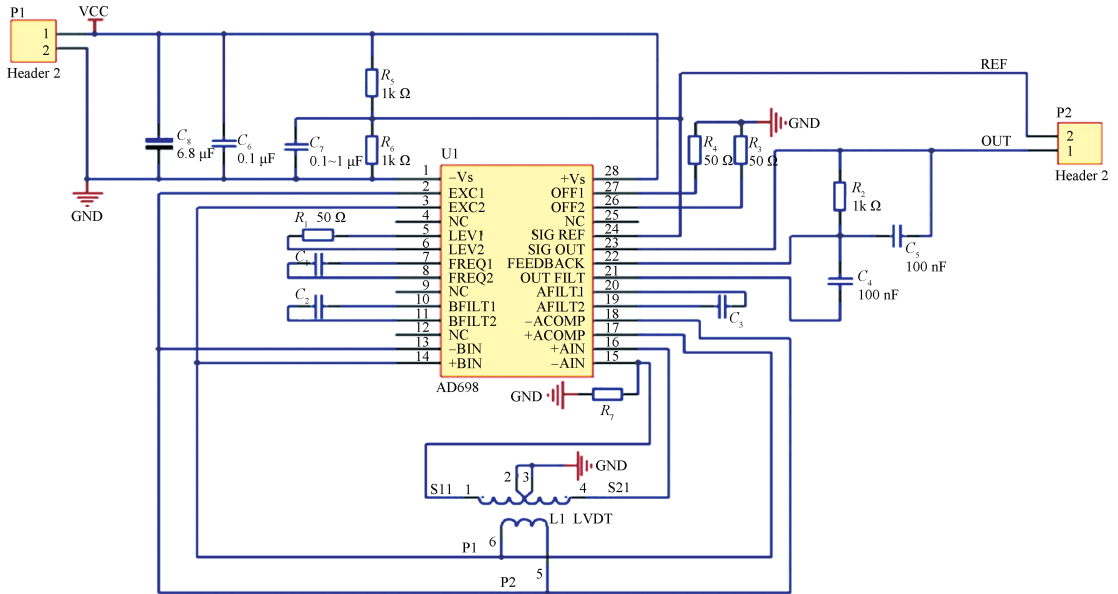


图 2 信号调理电路

3.1 设定振荡频率

振荡频率由传感器所需带宽 $f_{\text{SUBSYSTEM}}$ 确定,通常 250 Hz 的带宽足以满足大多数系统。根据公式 $f_{\text{excitation}} = 10 \times f_{\text{SUBSYSTEM}}$ 来确定^[11-12],则 250 Hz 带宽的系统其激励频率为 2.5 kHz。最终选择一个合适电容值将系统的激励频率设定在 2.5 kHz。根据以式(1)来确定 C_1 值。

$$C_1 = \frac{35 \mu\text{FHz}}{f_{\text{Excitation}}} \quad (1)$$

3.2 设定振荡幅值

幅值的设定一般满足在满量程的情况下原边的激励电压为 1.0 ~ 3.5 V_{rms},而副边的感应电压为 0.25 ~ 3.5 V_{rms}。这样的情况下传感器的线性度和噪声抑制都很好。本设计中首先确定最优的激励电压幅值 V_{EXC} 。对于一个四线制的 LVDT 传感器来说,决定其电压变送比 (VTR) 的是传感器在满量程情况下按照式(2)的计算值。

$$\text{VTR} = \text{LVDT}_{\text{sensitivity}} \times \text{Maximum Stroke Length from Null} \quad (2)$$

$\text{LVDT}_{\text{sensitivity}}$ 即 LVDT 的灵敏度一般在 LVDT 的参数表中给出。

可以参考阻值-输出的曲线选择一个 R_1 的阻值,从而来确定输出幅值的大小。在外围电容 C_2 、 C_3 与 C_4 的选择上,为了获得合适的带宽。选值遵从如下公式:

$$C_2 = C_3 = C_4 = 10^{-4} \text{Farad} \frac{\text{Hz}}{f_{\text{SUBSYSTEM}}} (\text{Hz}) \quad (3)$$

如果带宽需求为 250 Hz,则:

$$C_2 = C_3 = C_4 = 10^{-4} \text{Farad} \frac{\text{Hz}}{250 \text{ Hz}} = 0.4 \mu\text{F} \quad (4)$$

3.3 设定满量程电压

R_2 为设置输出满量程电压的电阻。该值的选择遵循以下公式:

$$\text{VTR} = S \times d = \frac{A}{B} \quad (5)$$

式中: d 为量程,则输出电压的最大值由式(6)确定:

$$v_{\text{out}} = S \times d \times 500 \mu\text{A} \times R_2 \quad (6)$$

对于例如 $v_{\text{out}} = \pm 10 \text{ V}$, $d = \pm 0.1 \text{ inch}$,可以计算 R_2 。

$$R_2 = \frac{20 \text{ V}}{2.4 \times 0.2 \times 500 \mu\text{A}} = 83.3 \text{ k}\Omega \quad (7)$$

3.4 设置电压漂移补偿

选择合适的 R_3 和 R_4 的阻值来设置一个或正或负的输出电压。按照如下计算:

$$v_{\text{OS}} = 1.2 \text{ V} \times R_2 \times \left(\frac{1}{R_3 + 2 \text{ k}\Omega} - \frac{1}{R_4 + 2 \text{ k}\Omega} \right) \quad (8)$$

如果电路中不需要校正调节,则可以将 R_3 与 R_4 置零。如果想要设计一个电路产生 0 ~ 10 V 的输出电压,其量程为 0.1 ft,将 V_{out} 设置为 10 V, d 设置为 0.2 inch,解关于 R_2 的方程。

由于本方案采用单电源供电,所以还需对 R_5 与 R_6 、 C_5

进行设置。有几条设计要求:

$$R_5 + R_6 \leq V_{\text{ps}}/100 \mu\text{A} \quad (9)$$

在 R_5 上的压降应该大于以下值:

$$2 + 10 \text{ k}\Omega \left(\frac{1.2 \text{ V}}{R_4 + 2 \text{ k}\Omega} + 250 \mu\text{A} \frac{v_{\text{out}}}{4 \times R_2} \right) \text{V} \quad (10)$$

旁路电容 C_5 的值在 0.1 ~ 1 μF 。

4 数字处理系统设计

4.1 硬件系统

数字信号处理器选用 STM32F407,其内部带有 12 位高精度 ADC,其采样频率高达 2.4 MSPS,可以满足该系统的精读要求。AD698 的输出信号采样后,即可以借助 STM32F407 的计算力做数字信号处理。

4.2 软件设计

嵌入式 MCU 内部程序的结构如图 3 所示。先将 AD 采样过来的数据做数字滤波处理,然后进行非线性校正处理,最后将处理的测量结果通过串口输出并在 OLED 上进行显示。

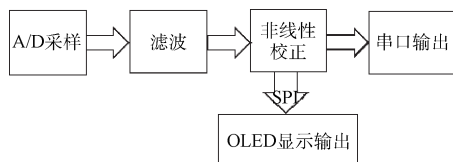


图3 软件结构

软件系统包括 ADC 模块、滤波模块、非线性校正模块、显示模块和串口通信模块。ADC 模块主要是建立初始函数、读取函数。考虑到过高的采样速度会影响采样精度,这里设置采样频率为 5 000 Hz。滤波模块采用多次采样值取均值的平滑滤波方法。

非线性校正模块采用 BP 神经网络方法,离线训练采用 Matlab 工具实现,训练得到权值和阈值,在线计算时只需采用已经训练的权值、阈值和滤波后的电压值代入模型即可得到对应的位移量。显示模块采用 SPI 通信方式,完成通信后设置相关寄存器即可以完成显示。串口通信模块主要完成将测量结果输出的功能,调用 STM32F407 的固件虚拟串口 1 实现通信。

5 实验结果与分析

为验证本设计方案的精度,采用卡夫威尔 OK-TOOLS YB5001C25 mm 外径千分尺作为测量仪器,该千分尺的精度为 0.001 mm。实验系统如图 4 所示,实验方法如下:

- 1) 将 LVDT 与千分尺固定于水平试验台上,两者探头良好接触;
- 2) 千分尺每次转动 1/10 周,前进 0.05 mm 记录输出电压;
- 3) 测满 LVDT 的量程。

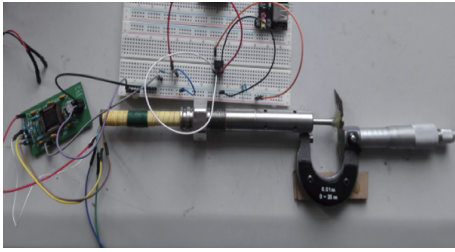


图4 实验系统

将测满 LVDT 量程的 200 组数据结果线性拟合绘制数据曲线如图 5 所示。其中,蓝色实线是测量的结果,红色虚线是用最小二乘线性化处理后的误差最小的直线逼近,纵轴是电压输出量(单位:V),横轴是位移量(单位:mm)。不做校正时的非线性率达到了 3% 以上。若采用 BP 神经网络进行非线性化建模,用其中的 150 组数据作为样本训练 BP 神经网络,另外 50 组作为测试。处理后的非线性度优于 0.3%。

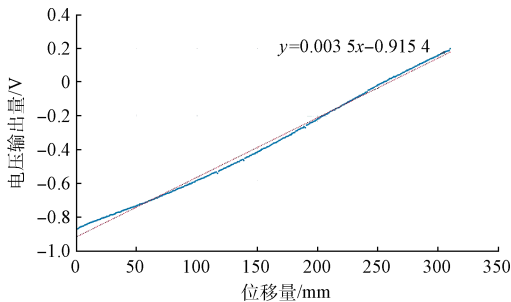


图5 实验结果线性拟合图

6 结论

本文的设计从实用性出发,设计并制作了 LVDT 的信号处理系统。采用模拟处理与数字处理相结合的方式兼顾了性能与成本的实际需要,实验表明系统设计的非线性度优于 0.3%,可以满足大部分工业场合高精度、高可靠性、高性价比的测量需要。目前,系统设计因尚未增加微机接口,数据的采集、处理及自动控制功能有待完善,完善后更具有良好的实用价值。

参考文献

[1] 王龙,史丽晨,王海涛. 基于 LVDT 的新型信号调理电路的设计[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(3): 953-955, 958.

- [2] 成贤锴,查卿,钟君,等. 基于 LVDT 位移传感器狭缝调整装置的研制[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(11): 43-45, 52.
- [3] 郭敏,李月贞. 基于 LVDT 的微小位置测量系统设计[J]. 现代电子技术, 2010, 33(7): 151-153.
- [4] 王敬辉,刘静,赵睿. 基于 AD534 的新型 LVDT 信号调理器设计[J]. 电子世界, 2014 (10): 95-96.
- [5] 葛川,李朋志,徐立松,等. 电阻应变式位移传感器电路设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(6): 58-61.
- [6] 何宴辉,汪理虎,刘涛. 基于幅频自校准的高精度 LVDT 模拟器设计[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(7): 268-271.
- [7] 王明辉,王辉,赵凤军. 基于 DBF-SCORE 的 Ka SAR-GMTI 信号处理方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(6): 37-41.
- [8] 张亚维,史强强,张乐. 机载压电传感器调理电路的设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(3): 114-117.
- [9] 江杰,常焰锋. 基于 LVDT 微位移测量系统中 AD698 的应用[J]. 化工自动化及仪表, 2012, 39(3): 413-415.
- [10] JIANG D, SHAN Y, WANG D Y, et al. Research on magnetic levitation absolute vibration measurement method in vehicles [J]. Instrumentation, 2014, 1(2): 38-49.
- [11] 李美花,闫卫平,王颖,等. 微传感器阵列多通道数据采集和处理系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(2): 311-317.
- [12] 杨继森,李小雨,张静,等. 时栅位移传感器动态误差模型及修正算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2548-2555.

作者简介

姬宪法,1970 年出生,硕士,毕业于河南科技大学,现任空军第一航空学院教授,目前主要研究方向为飞机航电设备自动测试技术等。

E-mail:whmjxf@163.com

李传江,1978 年出生,博士,毕业于上海大学,现任上海师范大学副教授,目前主要研究方向为计算机自动检测与控制、智能测控仪表、先进控制理论及其应用等。

E-mail:licj@shnu.edu.cn