

Circuit Design and Performance Analysis of Magnetostrictive Liquid Level Sensor^{*}

YAN Qing-wei, ZHAO Yu-long^{*}, JIANG Zhuang-de

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xian Jiaotong University, 710049, China)

Abstract: The structure, circuit module and the principle of the magnetostrictive liquid level sensor are introduced. This sensor utilizes the magnetostrictive effect and inverse magnetostrictive effect of giant magnetic material, the liquid level can be measured by the time interval between interrogation pulse and the echo pulse. The interrogation pulse module, echo pulse module, PWM module, voltage adjust circuit are designed. Then, we analyzed the factors of affecting precision and stability. The experiment data indicate that the modularized level sensor has excellent dynamic and static performance and can adjust circuit parameter flexibly. Therefore, the transducer has been more intelligent and the whole performance was improved.

Key words: magnetostrictive; PWM; torsion elastic wave; liquid level sensors

EEACC: 7230

磁致伸缩液位传感器的电路设计及性能分析^{*}

颜庆伟, 赵玉龙^{*}, 蒋庄德

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 介绍了磁致伸缩液位传感器的结构、工作机理以及电路模块化的实现方法, 研究实现了脉冲电流发射、回波接收、差模电压放大、脉宽调制、电压调整电路的模块化设计。分析了影响传感器精度和稳定性的可能因素, 给出了液位传感器的实验数据, 测试结果表明, 这种模块化的液位传感器, 可灵活地调整电路参数和实现同时多点测量, 具有很好的动静态特性, 提高了传感器的整体性能, 使传感器更加智能化。

关键词: 磁致伸缩; 脉宽调制; 扭转弹性波; 液位传感器

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)05-0777-04

磁致伸缩液位传感器利用磁性材料的磁致伸缩效应和磁致伸缩逆效应, 通过测量发射电流脉冲和接收到回波信号之间的时间间隔来确定具体的位置信息。由于传感器敏感元件与测量介质之间不直接接触, 该类传感器具有测量精度高、测量位移大、使用寿命长、线性度高、迟滞特性和重复性好、可靠性高的优点, 这些特点是其他同类测量仪表所无法比拟的, 因此这种传感器在国外广泛应用于石油、化工、轻工、纺织等行业。国外量程高达 18 m 的磁致伸缩液位传感器准确度可达到 0.025 %FS 或 0.508 mm, 并且可以同时测量液位、界面和温度等多个参数, 形成了系列化产品^[1]。虽然我国在该类磁性材

料的制备技术方面已经达到国际先进水平, 但是应用研究则明显落后于西方发达国家, 此类产品目前还处于研究阶段^[2]。本文就磁致伸缩液位传感器的电路机理及相关性能做出了讨论。

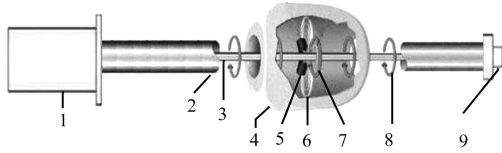
1 磁致伸缩传感器原理

磁致伸缩液位传感器主要由波导丝、回波接收器、信号处理电路、浮球(内置环形磁铁)、测杆、电子仓、阻尼装置等构成, 如图 1 所示。

脉冲发生装置以固定频率给波导丝发送激励电流脉冲, 由安培环路定理, 在波导丝周围感应出环形磁场, 浮球中的环形磁铁也形成一个固定的轴向

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50535053, 50475085); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助(NCET-05-0842)

收稿日期: 2007-09-17 **修改日期:** 2007-11-03



1-电子仓及波检测器;2-测杆;3-波导丝;4-浮球;5-浮球内环形磁铁;6-浮球磁铁磁场;7-扭转波;8-脉冲电流激发的磁场;9-阻尼装置

图1 磁致伸缩传感器结构图

磁场。根据 Widemann 效应^[3],在这两个磁场的正交作用下,形成一个扭转弹性波,分别向波导丝两边传播。磁致扭转弹性波的波速在恒温下为固定值

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1)$$

其中: G 为波导丝的弹性剪切模量; ρ 为波导丝的密度。

当扭转弹性波传到波检测器一端时,由于磁致伸缩逆效应(Villari 效应),使波导丝的长度发生微小变化,检测线圈中的磁通量发生变化,产生感应电动势,通过检测发射激励电流脉冲到接收到回波电压脉冲信号之间的时间差就可以确定位置磁铁和波检测器之间的距离,也即液面和感应线圈之间的距离,再由时间-电压或者时间-电流转换模块实现信号输出;扭转弹性波传到末端时被阻尼装置减弱吸收,以免对测量精度造成干扰。

2 磁致伸缩液位传感器的电路模块实现

磁致伸缩液位传感器的电路原理框图如图2所示。在周期脉冲发生模块中,由晶振和计数器调节控制时钟频率,向波导丝发送激励电流脉冲信号;信号拾取模块中,检测线圈感知接收回波信号,噪声信号为共模信号,而扭转波信号为差模信号,因此经信号的滤波和差模放大后,进行零位或峰值检波,确定扭转弹性波信号从浮球处传到检测线圈的时间,以脉冲宽度反映扭转弹性波在波导丝中的传播时间;在每一个周期内对电压比较电路处理后的脉冲信号积分,经过过压保护电路和放大电路后调整到合适

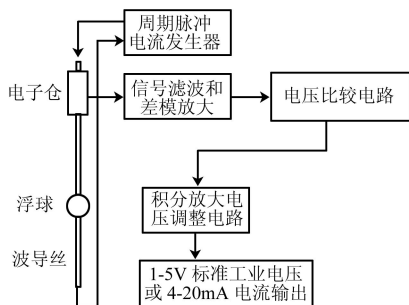


图2 电子信号处理系统原理框图

的输出电压,将位置信息以符合 HART 协议的标准电流信号形式输出^[4]。

该处理电路中涉及的关键技术有:

需要产生一个足够能量的周期激励脉冲电流信号,该脉冲信号在波导丝周围感应出周期脉冲环形磁场,需要足够大的电流强度。

扭转弹性波信号的拾取、滤波和末端弹性波的吸收以及电压比较处理,决定了传感器性能的好坏。

利用脉宽调制技术(PWM),实现电压峰值或零位比较检波,通过发射电流脉冲到接收到回波信号确定扭转弹性波在波导丝中的传播时间。

对周期脉冲电压信号积分,实现电压到电流的转换输出。

2.1 周期脉冲电流产生模块

试验做一个量程为 2 m 的液位传感器,扭转波波速根据波导丝材料成分的不同而相差较大,大概为 3 000 m/s,最远处扭转弹性波传到波检测器处的时间为 0.667 ms,对于晶振发出的时钟信号进行分频处理,选取的脉冲周期应该大于扭转弹性波在波导丝中的最长传播时间。由于发射的电流脉冲信号对于检测到优化的信号来说起着重要的作用,而信噪比取决于电流脉冲周期和脉冲幅度^[5]。图3中, Q_2 的基极输入时钟脉冲信号,在2处由于 Q_1 的开和关而产生反冲电压,从而产生需要的脉冲电流^[6]。

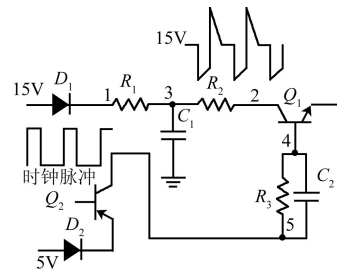


图3 脉冲发生电路

2.2 回波接收模块

扭转弹性波信号的检测拾取、滤波是设计传感器回波接收模块的关键技术,因此回波信号的耦合和滤波放大电路显得尤其重要,它决定了能否采集到稳定的回波信号。由于线圈接收到的传感器振动、热噪声等干扰信号为共模信号,扭转波信号为差模信号,采用差模放大,提高共模抑制比的方法增强回波信号可信度^[7]。图4为回波差模放大电路, U_1 和 U_2 对检测到的信号滤波放大后,由 U_3 对这两个信号差模放大,为后续的处理电路得到了较好的信号。

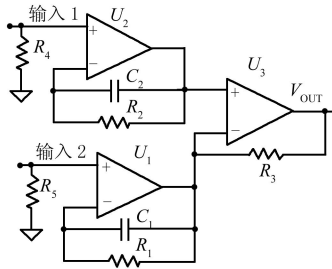


图 4 回波差模放大电路

2.3 脉宽调制电路

电压比较电路是工业控制中经常遇到的信号处理方法,主要作用是根据电路性能的需要,预先设定好一个门限电压,实现输入信号电压与门限电压的比较,从而输出高、低电平。如图 5 所示,利用差模放大后的电压信号与门限电压比较,产生一个 PWM 信号,脉冲宽度与发射激励电流脉冲和接收到电压脉冲的时间间隔成线性比例。

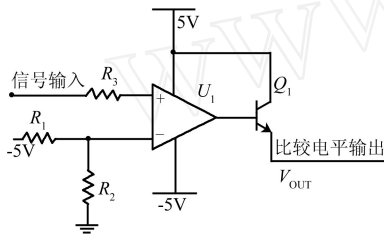


图 5 电压比较电路

2.4 积分放大电路

积分电路将经过 PWM 的脉冲信号积分后得到电压平均值,通过调整电路参数将电压值转换到合适的电压范围,从而转换成工业标准的 1~5 V 电压信号或 4~20 mA 电流信号。如图 6 所示,将 PWM 信号积分放大后得到一个稳定的电压均值,将传感器的位置信号转换成了电压均值,电压幅度随着浮球位置的改变呈线性变化。

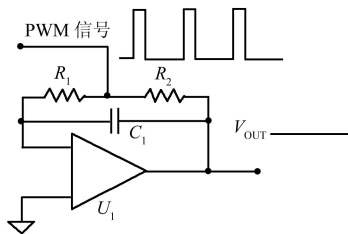


图 6 电压积分输出电路

3 传感器性能测试及分析

磁致伸缩液位传感器的输出为数字电压或电流信号,因此测量误差表现在系统误差上,主要取决于波导丝材料性能的稳定性,波导丝表面光滑度,材料缺陷的多少,电路系统性能的稳定性和抗干扰能力,特别是环境温度变化使液体密度变化

产生的误差以及由于温度变化使扭波波速变化引起的误差。

3.1 线性度

在传感器测量的 0~2 m 范围内,移动浮球,每隔 20 cm 记一组数据,测量 50 组数据。

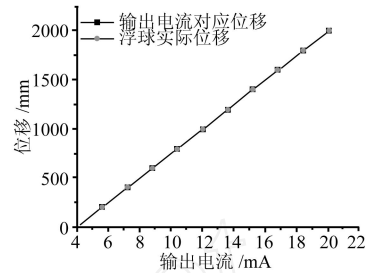


图 7 磁致伸缩液位传感器线性度曲线

线性度公式为

$$e_l = \pm \frac{\max}{Y_{FS}} \times 100\% \tag{2}$$

式中: e_l 为非线性误差, \max 为最大非线性绝对误差, Y_{FS} 为满量程值。

$$\max = (8.8078 - 8.8) \times 125 \text{ mm} = 0.975 \text{ mm}$$

$$e_l = \pm 0.975 / 2000 \times 100\% \pm 0.049\%$$

从图 7 中可以看出,输出电流对应的位移与浮球实际位移曲线拟合得很好,线性度高。

3.2 迟滞特性

将浮球在测杆的正反两个方向量程内来回移动,测量范围为 0~2 m,数据如图 8 所示,每隔 20 cm 测一个数据。

由迟滞误差公式

$$r_H = \pm \frac{1}{2} \frac{H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \tag{3}$$

其中 H_{\max} 为正反行程输出最大差值。

由图中可以得到 $H_{\max} = 1.3 \text{ mm}$,因此 $r_H = \pm 0.0325\%$,该传感器的迟滞特性良好。

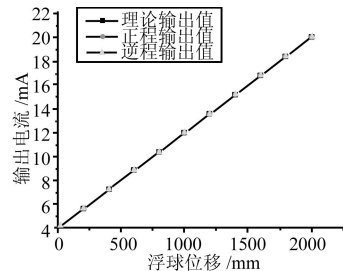


图 8 磁致伸缩液位传感器迟滞特性曲线

3.3 稳定性

把浮球放在测杆的同一位置处,环境温度稳定在 20℃,每隔 1 h 记录一次数据所得结果如表 1 所示;改变环境温度,使传感器处于 0~40℃ 之间,记录的数据表 2 所示:

表1 恒温 20 下输出电流随时间变化

时间/h	0	1	2	3	4	5	6	7	8
电流/mA	8.800 8	8.801 0	8.801 0	8.800 7	8.800 9	8.801 3	8.801 2	8.800 8	8.800 9
对应位移/mm	600.1	600.125	600.125	600.087 5	600.112 5	600.162 5	600.15	600.1	600.112 5

表2 变化温度下输出电流随温度变化

时间/h	0	1	2	3	4	5	6	7	8
电流/mA	8.808 9	8.808 5	8.809 4	8.807 4	8.810 6	8.815 2	8.816 4	8.813 7	8.814 1
对应位移/mm	601.112 5	601.062 5	601.175	600.925	601.325	601.9	602.05	601.712 5	601.762 5

由表1可以得出:传感器在恒定室温下的时漂稳定性误差为0.075 mm,恒温下传感器的稳定性能良好。

由表2可以看出在0~40之间的温漂稳定性误差为1.125 mm,因此可见温度对于传感器的稳定性有较大影响,主要由于材料性能随着温度的变化而发生变化,引起扭转转速的变化,此外温度变化对电子元器件的影响也是造成较大误差的原因,可以考虑加入温度补偿电路来减小由于温度变化造成的系统误差^[8]。

4 结论

磁致伸缩位移传感器经实验测试,性能稳定,位置磁铁在测杆的不同位置处均能被准确地反映出来,脉冲激发电路设计出来后用multisim模拟后效果理想,与实际电路中的结果一致。传感器拾取到的回波信号经过滤波,差模放大,电压比较后实现脉宽调制,电压积分,限压保护等一系列处理电路后示波器波形明显。传感器的线性度,迟滞特性,重复性以及稳定性均达到了工业产品标准,为该类传感器的研究和生产应用给出了一定的实际依据。

参考文献:

- [1] 王卫东. 磁致伸缩式液面计[J]. 炼油化工自动化, 1997, (6): 60-63.
- [2] 郭义杰. 超磁致伸缩材料发展及其应用现状研究[J]. 机电工程, 2004, 21(4): 55-59.
- [3] Tzannes N S. Joule and Wiedemann. Effects- The Simultaneous Generation of Longitudinal and Torsional Stress Pulses in Magnetostrictive Materials[J]. IEEE Trans On Sonics and Ultrasonics, 1966, 13(2): 33-41.
- [4] 李怀洲, 李庆山, 孙振伟等. 磁致伸缩位移传感器信号处理电路的研究与实现[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 138-141.
- [5] Affanni A, Guerra A, Dallagiovanna L et al. Design and Characterization of Magnetostrictive Linear Displacement Sensors [C]// Instrumentation and Measurement Technology Conference. Como Italy, 2004: 206-209.
- [6] 冯红亮, 肖定国, 徐春广等. 脉冲超声传感器激发/接收电路设计[J]. 仪器技术与传感器, 2003, (11): 30-32.
- [7] 孙可, 袁梅. 磁致伸缩液位传感器信号拾取关键技术的研究[J]. 测控技术, 2005, 24(12): 15-18.
- [8] Berezovskaya B S, Yu Mukaev R. Enhancement of Temperature Stability of Magnetostrictive Sensors[C]// Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceeding. 2004: 17-19.



颜庆伟(1982-),男,西安交通大学精密仪器及机械专业硕士研究生,主要从事MEMS高温压力传感器和磁致伸缩液位检测技术研究, yanqw @stu. xjtu. edu. cn



蒋庄德(1955-),男,西安交通大学机械工程学院教授,博导,精密工程研究所所长;主持完成了16项国家重大项目并获得25项国家发明专利;主要研究方向为MEMS传感器、微电机、微系统、精密测量、光电检测与控制系统, zdjiang @mail. xjtu. edu. cn



赵玉龙(1968-),男,西安交通大学机械工程学院教授,博导,陕西MEMS研究中心副主任;主持参与完成了19项国家863计划项目并获得14项国家发明专利;主要研究方向为MEMS传感器、微电机、微系统, zhaoyulong @mail. xjtu. edu. cn