

经验交流

文章编号:1671-251X(2014)01-0080-04 DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2014.01.021  
彭婷婷,周义仁.螺线管式磁感应钢丝绳断丝检测系统设计[J].工矿自动化,2014,40(1):80-83.

## 螺线管式磁感应钢丝绳断丝检测系统设计

彭婷婷<sup>1</sup>, 周义仁<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学 测控技术研究所, 山西 太原 030024;  
2. 太原理工大学 水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:**针对现有钢丝绳损伤检测采用人工检查或定期换绳的方法,存在效率低、成本浪费严重及安全性差等问题,设计了螺线管式磁感应钢丝绳断丝检测系统。系统检测原理:当钢丝绳出现断丝时,磁导率会相应降低,磁阻变大,电感量减小,从而导致线圈磁场不平衡并产生感应电动势,根据该感应电动势的大小可判断出钢丝绳断丝的状况。试验结果表明,该系统克服了传统电磁检测技术不能精确检测钢丝绳内部出现断丝的缺陷,检测精度可达95%以上。

**关键词:**钢丝绳;螺线管式;缺陷检测;电磁感应;传感器;信号采集

中图分类号:TD534.6 文献标志码:A 网络出版时间:2013-12-31 09:47

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13272/j.issn.1671-251x.2014.01.021.html>

Design of detection system of solenoid magnetic induction for broken steel wire rope

PENG Tingting<sup>1</sup>, ZHOU Yiren<sup>2</sup>

(1. Institute of Measuring and Controlling, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;  
2. College of Water Conservancy Science and Engineering, Taiyuan University of Technology,  
Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In view of problems of low efficiency, serious wasting cost and poor safety of existing steel rope damage detection methods which using artificial method to inspect and regularly replacing steel rope, a detection system of solenoid magnetic induction for broken steel wire rope was designed. The detection theory of the system is: when broken wire occurs, the permeability will be reduced accordingly, reluctance increases, and the inductance decreases, and then induced electromotive force will be generated because of the imbalance magnetic field of coil. According to the induced electromotive force, the situation of broken wires can be determined. The experiment results show that the system overcomes defects that traditional electromagnetic detection technology cannot accurately detect internal broken wire rope, and accuracy can reach above 95%.

**Key words:** steel wire rope; solenoid; defect detection; electromagnetic induction; sensor; signal acquisition

### 0 引言

钢丝绳作为重要的提升、起重、运输设备中的常

见构件,被广泛应用于矿井、冶金、建筑等领域中,而且由于其自身的高危性,被视为工业领域中的“生命线”。钢丝绳在使用过程中,由于受到恶劣环境的影

收稿日期:2013-05-07;修回日期:2013-10-25。

作者简介:彭婷婷(1988—),女,广西百色人,硕士研究生,研究方向为新型传感器及其自动化检测, E-mail:376530436@qq.com。通讯作者:周义仁。

响以及自身的疲劳、腐蚀和磨损等原因,常常会产生缺损或者断丝的现象,从而导致工作强度下降,更为严重的会产生事故,危及设备和人身财产的安全<sup>[1-2]</sup>。由此可见,对钢丝绳的损伤进行检测是一件势在必行的事情。

目前,国内外存在多种检测钢丝绳损伤的方法,使用最多的是人工检查或是定期换绳方法<sup>[3]</sup>。人工检查只能观测钢丝绳表面的损伤,无法观察到其内部的缺损情况。另外,该方法效率很低,影响生产效率而且浪费人力资源。而定期换绳方法则会产生钢丝绳的浪费,加大了生产成本,同时因为不能保证断绳事故是否发生在换绳之前,也不能确保钢丝绳的使用安全。钢丝绳检测仪器使用最多的是电磁检测原理<sup>[4-5]</sup>,主要包括感应线圈、霍尔元件以及磁阻传感器等。这些方法都存在一个共同的缺点——不能检测钢丝绳内部出现的断丝。

为此,本文根据电磁感应检测原理,设计了螺线管式磁感应钢丝绳断丝检测系统。一旦钢丝绳出现断丝就会造成中央次级线圈磁场不平衡,进而产生感应电动势,根据感应电动势的大小,即可判断出钢丝绳断丝的状况。

## 1 系统硬件设计

螺线管式磁感应钢丝绳断丝检测系统的硬件组成如图 1 所示。该系统选择 MSP430F149 单片机作为控制芯片,主要包括传感器模块、信号预处理模块、距离检测模块、CAN 总线通信模块、数据采集模块以及报警电路等。MSP430F149 是低功耗的 16 位单片机,工作电压范围为 1.8~3.6 V;内部自带 2 个 16 位的定时器、1 个快速 12 位 AD 转换器、2 个通用同步/异步触发控制器;60 KB 的 FLASH 和 2 KB 的 RAM,这就为系统的设计和开发提供了很大的便利性<sup>[6]</sup>。

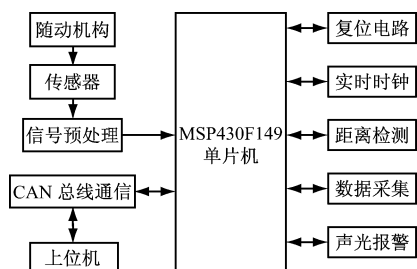


图 1 螺线管式磁感应钢丝绳断丝检测系统硬件组成

### 1.1 传感器检测原理分析

钢丝绳内部出现断丝时,由于磁感应强度的变化非常小,使得感应线圈的磁通量的变化也很微弱。

为了使检测传感器能够准确捕获断丝信号,就必须增大磁通量的变化率。有 2 种方法可以实现:一是通过增加原来线圈的匝数,使得感应线圈中获得较大的感应电动势,进而增大磁通变化率,但是这种做法会造成传感器体积过大;二是设法使钢丝绳在完好状态下的磁场为零,即原磁场的磁通量为零,只要磁通有变化,就会产生明显的变化率。

基于以上思路,传感器的检测原理:在一个具有磁惰性的管子上缠绕 3 组线圈,管子外侧两边的初级线圈由交流电源激励,并反相串联使得这 2 个初级线圈产生的磁场相反,使得处于管子中央的次级线圈的磁场被相互抵消而处于零磁场状态,而次级线圈则与系统的处理电路相连。将钢丝绳穿过该磁惰性管子,相当于一根铁芯,由于钢丝绳具有很好的导磁性,为空气的上百倍,若钢丝绳内部或者外部产生断丝,导磁率就会突然降低,磁阻变大,电感量减小,进而导致 3 组线圈出现磁场不平衡现象,此时处于中央位置的次级线圈就会产生感应电动势。这样钢丝绳断丝的程度可根据感应电动势的大小来直接判定。原理如图 2 所示。

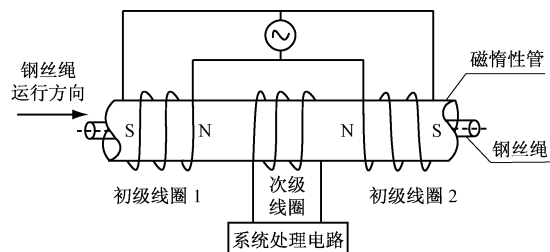


图 2 螺线管式钢丝绳断丝检测传感器原理

图 2 中,管子两端的初级线圈完全相同,只是方向相反。下面以管子左边的初级线圈为例介绍检测原理。在钢丝绳完好的情况下,左边线圈产生的电感  $L$  为<sup>[7]</sup>

$$L = \mu N_1^2 \pi \frac{\sqrt{r^2 + l^2} - r}{l^2} \quad (1)$$

式中: $\mu$  为磁化后钢丝绳的相对磁导率; $N_1$  为初级线圈 1 的匝数; $r$  为磁惰性管的半径; $l$  为初级线圈 1 的轴向长度。

当  $l/r > 5$  时,初级线圈 1 内部的磁场近似为均匀磁场,则式(1)可近似变换为

$$L \approx \frac{\mu N_1^2 \pi r^2}{l} \quad (2)$$

当钢丝绳出现断丝时,对应的那部分线圈的电感值为

$$L_1 = \mu_0 N_1^2 \pi r_a^2 \frac{\sqrt{r_a^2 + l_a^2} - r_a}{l^2} \quad (3)$$

式中:  $\mu_0$  为空气的相对导磁率;  $r_a$  为一根钢丝的半径;  $l_a$  为断丝的长度。

假设  $2r_a \approx l_a$ , 将其代入式(3)消去  $l_a$ , 式(3)可以简化为<sup>[6]</sup>

$$L_1 \approx \frac{1.236 \mu_0 N_1^2 \pi r_a^3}{l^2} \quad (4)$$

所以, 将式(4)和式(2)相比即可得出电感变化率为

$$\frac{L_1}{L} = 1.236 \frac{\mu_0}{\mu} \left( \frac{r_a}{r} \right)^2 \frac{r_a}{l} \quad (5)$$

由于钢丝绳和空气的导磁率都是确定的, 当传感器的结构参数( $r, l$ )确定之后, 一根钢丝的半径  $r_a$  越大, 电感量的变化率也越大, 磁通量的变化率也越大。而  $E = -\frac{d\phi}{dt}$  (负号表示方向),  $\phi = BS$  ( $B$  为磁感应强度;  $S$  为磁场垂直穿过线圈的面积)。所以传感器输出的电压也会越大, 且电压的幅值与钢丝的半径有关, 故可由半径的大小来判断断丝的数量。

## 1.2 信号预处理

信号预处理模块包括前置放大电路、滤波电路以及 AD 转换电路。对次级线圈产生的信号进行放大滤波, 并将微弱信号放大, 滤除杂波, 转换为 0~5 V 的电压信号, 最后再经过 AD 转换电路将检测信号转换为可由单片机识别的数字信号。

前置放大电路具有很高的输入阻抗和共模抑制比, 主要将传感器电极之间的电势差进行放大, 同时抑制电极和地面之间的同相干扰信号。在本设计中, 采用低功耗、高精度运算放大器 OP97 作为前置放大器, 且放大倍数为 10 倍。图 3 为前置放大电路原理图。

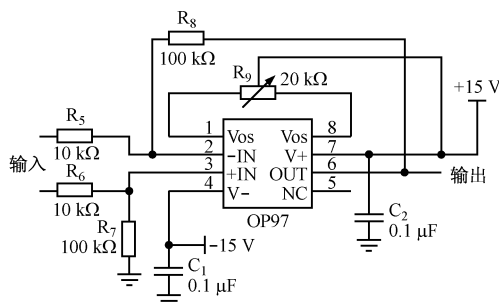


图 3 前置放大电路原理

检测信号经过前置放大电路以后, 信号由原来的差动信号变为单端信号, 其输出幅度相对较小, 此时还不能直接输入 AD 转换电路当中, 还需经过再次放大, 而因为测量电路本身存在噪声信号, 且输入信号较小, 故在本设计中加入了一个二阶低通滤波电路来完成杂散信号的抑制作用。低通滤波电路如图 4 所示。

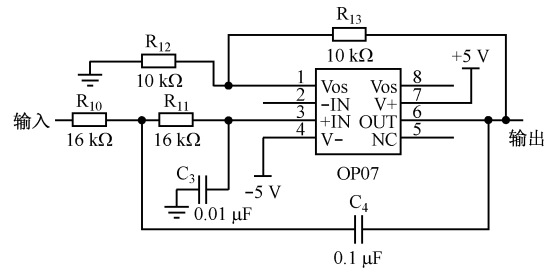


图 4 低通滤波电路

## 1.3 CAN 总线通信模块

CAN 网络是现场总线的一种串行总线网络, 经常使用于工业控制网络中, 通常 CAN 网络是由 CAN 控制器和总线组成。CAN 总线具有硬件实现简单、数据通信同时具有实时性和灵活的特点<sup>[8]</sup>。它的各智能节点可以根据工艺控制的要求来主动发送采集数据, 不需要工控机进行轮询操作, 这样就可以节省网络上的数据流量, 达到提高数据传输效率的目的。CAN 控制器可以以 PCI 卡的形式插到计算机的 PCI 插槽里, 也可以 USB 形式连接到上位机, 或使用以太网实现连接。本系统单片机与上位机之间采用 CAN 总线通信方式, MSP430 F149 系列单片机可通过 CAN 总线接口将数据连接到 CAN 总线上, 实现与上位机的通信。

## 1.4 距离检测模块

为了了解钢丝绳发生损伤的具体位置, 以便于进行维护, 需要进行距离检测。距离检测不仅能够测出损伤的具体位置, 还能根据检测信号计算出钢丝绳的运动速度。在本系统中采用光电旋转编码器测量距离。在光电旋转编码器的运动轴上固定连接一个直径为  $d$  的滚轮, 通过钢丝绳的运动来驱动滚轮转动, 并带动编码器。该编码器能以极小的间隔来分段定位钢丝绳, 发出的一系列脉冲经过处理后可传送到单片机中。精确定位的计算公式<sup>[9]</sup>为

$$S = na \quad (6)$$

式中:  $S$  为损伤位置与起始测点位置之间的距离;  $n$  为单片机测得的脉冲数;  $a$  为单个脉冲所代表的距离长度。

这样, 检测从开始到钢丝绳发生损伤位置所产生的脉冲数, 再利用式(6)就可以精确地知道缺损处离起始测点的位置距离。

## 2 系统软件设计

螺旋管式磁感应钢丝绳断丝检测系统的软件主要包括主程序、AD 转换、数据处理、单片机与上位机的通信和上位机操作界面的软件设计等。使用 C 语言进行程序的编写, 系统软件流程如图 5 所示。

光电编码器旋转一圈就会产生一个脉冲,进而对单片机产生一次中断,系统在每一次中断采集一次数据,并完成 AD 转换,这样直到全部数据采集完后,再把数据发送至上位机进行处理和显示。

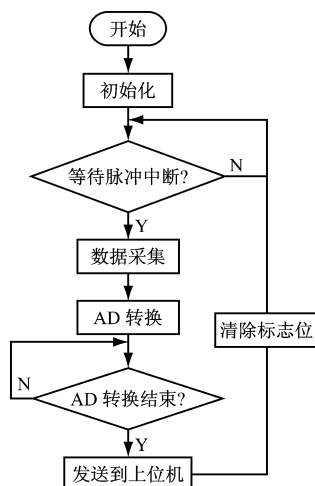


图 5 系统软件流程

上位机的钢丝绳检测软件是在 VC++6.0 集成开发环境下,利用 DAQBench 控件建立友好操作界面,实现数据的接收、存储和显示功能。DAQBench 控件支持 VC++6.0 环境,是一种测量和自动化应用的 ActiveX 控件的集合,具有开发成本低、执行效率高、开放性强、程序弹性大和易于扩充等优点。当前 DAQBench 包含用户界面控件、信息集成控件、SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) 控制单元、分析库控件等<sup>[10]</sup>。检测软件采用多线程同步技术进行设计,包括数据接收线程、存储数据线程和实时数据显示即绘制实时曲线线程。通过软件的设计为钢丝绳后期的数据分析处理、预知维护和缺陷分类工作提供了基础数据,为安全运行和钢丝绳高效运行奠定了基础。

### 3 试验结果分析

根据上述原理设计了螺线管式新型钢丝绳断丝检测系统,并在试验室搭建试验平台做了大量的试验。在试验过程中选用一根  $\varnothing 24.5(6 \times 19)$  的钢丝绳作为检测样绳,钢丝绳的长度约为 5 m,并人为地在钢丝绳上加工 5 处不同程度断丝(包括钢丝绳内部和外部),检测速度小于 5 m/s。在检测时,让待测钢丝绳从传感器左边的孔穿过,然后对其上电,光电编码器随着钢丝绳的运行而同步旋转,记录脉冲数。检测到的试验结果如图 6 所示。

从图 6 中可看出,钢丝绳完好时,电压没有发生明显跳变;而当内部或外部出现断丝时,螺线管式断

丝检测传感器出现磁场不平衡,次级线圈就会产生明显的电压值。而且在试验过程中发现:测量断丝时,在外部比在内部所测得的信号强,且内部断丝信号的强度与断丝的程度有关,若断丝程度越大,则信号越强。当出现严重断丝时,如缺损情况超出国家标准,系统通过控制声光报警电路给出报警信息,提示进行钢丝绳的更换工作。经过多次试验证明,本系统的检测准确率可达 95% 以上。

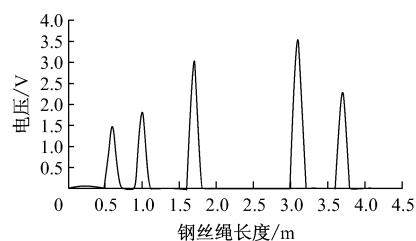


图 6 钢丝绳试验数据结果

### 4 结语

螺线管式磁感应钢丝绳断丝检测系统以 MSP430F149 低功耗单片机为控制芯片,采用多线程同步技术,实现了对钢丝绳定位和定量检测,克服了传统电磁检测法不能精确检测钢丝绳内部出现断丝的缺点。试验结果表明,该系统检测准确率高,可以达到 95% 以上,能满足工程现场的测量指标。

#### 参考文献:

- [1] 彭克青,华钢.矿用钢丝绳损伤检测系统关键技术的研究[J].机电技术,2010,24(5):141-143.
- [2] 袁方,胡斌梁,周知进.在役钢丝绳缺陷检测方法的研究现状与展望[J].机械设计与制造,2010(2):260-262.
- [3] 高寒.矿井提升钢丝绳霍尔元件检测法[J].机械制造与研究,2012,41(1):45-46.
- [4] 陶德馨,爱丽斯佳.基于弱磁探伤的钢丝绳无损检测技术[J].中国工程机械学报,2009,7(1):96-99.
- [5] 李国勇.钢丝绳实时在线检测系统研发[D].北京:北京邮电大学,2010.
- [6] 魏小龙.MSP430 系列单片机接口技术及系统设计实例[M].北京:北京航空航天大学出版社,2002.
- [7] 张三慧,减庚媛,华基美.电磁学[M].北京:北京科学技术出版社,1987.
- [8] 陈伟.基于 MSP430 的 CAN 总线智能通讯板设计[J].仪表技术与传感器,2010(7):54-56.
- [9] 张一兵,刘笑达,周义仁.钢丝绳断丝在线检测装置的研究[J].太原理工大学学报,2012,43(1):25-27.
- [10] 吴银川,严正国,苏娟.基于 DAQBench 的数据采集系统设计[J].仪器仪表用户,2008,15(3):35-36.