

# 基于漏磁检测机理的钢丝绳小缺陷 精确化识别系统研究

钟小勇, 陈科安

(江西理工大学 理学院, 江西 赣州 341000)

**摘要:** 针对电磁检测法中钢丝绳小缺陷产生的漏磁信号比较微弱、往往容易漏检, 采用 STM32 处理器及 AD7606 模数转换等器件设计了钢丝绳小缺陷精确化识别系统; 在硬件上, 采用了稳定的双励磁回路结构, 多通道均匀密布的集成 HALL 元件拾取漏磁信号, 经微弱信号放大、滤波, 小距离等间隔采样, 高精度数据采集等方法提高信噪比; 在软件上, 采用了 FFT、数字滤波剔除股波干扰; 经试验表明, 该系统能够较准确地检测钢丝绳上的小缺陷, 同时也能检测大的缺陷, 准判率大于 90%, 较好地满足了现场钢丝绳检测要求。

**关键词:** 钢丝绳; 小缺陷; 识别; 漏磁场; 霍尔传感器

## Research on Precise Recognition System of Steel Wire Rope' Small Defects Based on Magnetic Flux Leakage Testing Method

Zhong Xiaoyong, Chen Kean

(School of Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** Aiming at the weak magnetic flux leakage signals generated by small defects of steel wire rope in electromagnetic detection method, which were often easy to be missed, an accurate identification system for small defects of steel wire rope was designed by using STM32 processor, AD7606 analog-to-digital conversion and other devices. In hardware, a stable double excitation circuit structure was adopted, multi-channel uniform and densely distributed integrated HALL elements picked up magnetic leakage signals, and the signal-to-noise ratio was improved by methods such as weak signal amplification and filtering, small-distance equidistant sampling, high-precision data acquisition, etc. In the software, FFT and digital filtering were used to eliminate the interference of the wave. Tests show that the system can accurately detect small defects on steel wire ropes, and can also detect large defects. The accurate judgment rate is more than 90%, which is better satisfied to the requirements of on-site steel wire rope detection.

**Keywords:** steel wire rope; small defect; recognition; magnetic flux leakage; HALL sensor

## 0 引言

钢丝绳作为提升、起重和牵引系统中的承载构件, 在冶金、矿山、煤炭、建筑、港口、石油钻探领域, 以及机械行业、空中旅游架空索道、斜拉桥、电梯行业有着极为广泛的应用<sup>[1]</sup>。钢丝绳使用过程中, 由于受到各种因素的影响, 如摩擦、腐蚀、过载、疲劳、冲击<sup>[2]</sup>, 钢丝绳会因此产生各种缺陷, 导致其承载能力下降, 甚至可能会瞬间断裂造成事故发生。

由于电磁检测法不受钢丝绳表面油垢及尘埃的影响, 是目前钢丝绳无损检测中的首选方法<sup>[3-4]</sup>, 但是钢丝绳呈复杂的螺旋型结构, 磁化的钢丝绳自身产生股波信号, 对缺陷信号而言, 是始终存在的干扰。由于小缺陷产生的漏磁信号一般比较微弱<sup>[5]</sup>, 加之现场检测时钢丝绳难于避免会

产生晃动, 当钢丝绳缺陷较小时, 各种噪声很可能把对检测有用的缺陷信号淹没。而小缺陷对钢丝绳的承载力同样会造成影响, 目前电磁检测法对这类小缺陷定量诊断和评估的时候, 误差较大、准确性不高, 尚不能满足现场检测要求<sup>[6]</sup>。为了提高漏磁检测诊断中对缺陷的分析精度, 特别是对小缺陷的分析精度, 本文从硬件和软件上寻求新的方法和结构, 提高测量信号的信噪比, 有效地提取缺陷特征量, 实现钢丝绳小缺陷精确化识别。

## 1 系统总体方案设计

本系统利用永磁体对被检钢丝绳进行磁化, 当钢丝绳存在缺陷时, 缺陷周围将产生扩散漏磁场<sup>[7]</sup>。分布于钢丝绳周围的磁敏元件检测钢丝绳表面及其周围的漏磁场, 并将漏磁信号转化为模拟电信号。该模拟信号经调理电路处理, 送至 A/D 采集模块转换为数字信号, 然后经微处理器程序分析、反演得出钢丝绳的缺陷状态及完好程度, 并在 LCD 显示器上显示检测到的漏磁信号波形以及最后的检测、分析结果。钢丝绳缺陷识别系统的硬件框图如图 1 所示。

图 1 中有钢丝绳通常由多股钢丝螺旋型捻制而成, 不论其单根钢丝形状如何, 最终钢丝绳周向一般成圆形。为

收稿日期: 2019-06-20; 修回日期: 2019-07-30。

基金项目: 国家自然科学基金(51665019); 江西省自然科学基金(20161BAB206145)。

作者简介: 钟小勇(1964-), 男, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事无损检测、嵌入式系统及应用等方向的研究。

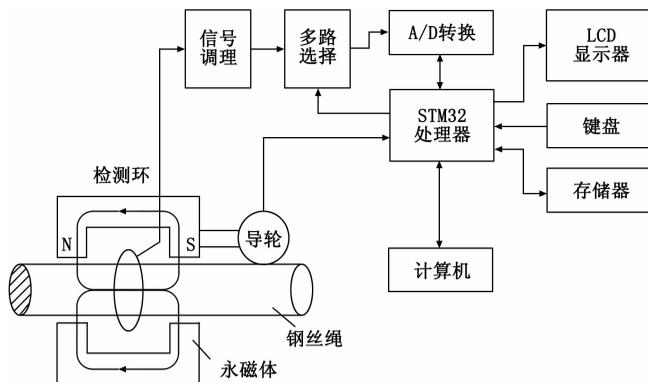


图 1 系统的硬件框图

了便于检测，传感器的内径往往要大于钢丝绳直径。当采用传统的单回路励磁，钢丝绳容易在传感器内部晃动，钢丝绳的磁化状态将会发生突变，造成漏磁信号的忽大忽小，从而给后续的信号分析带来困难<sup>[8]</sup>。本系统采用独特的双回路励磁结构（见图 1 的传感器部分）。该结构具有对称的上、下两条励磁回路，通过合理地布置励磁源可以避免磁力线的闭合、干涉等其它影响，使钢丝绳在检测过程中能得到有效地磁化。这样，钢丝绳的晃动对漏磁信号的影响明显减小，较大程度上提高了传感器输出信号的稳定性，减少了干扰噪声。虽然传感器硬件结构更为复杂，但这有利于提高钢丝绳小缺陷的检测精度。

## 2 系统硬件设计

### 2.1 检测元件

在电磁感应检测方式中，常用感应线圈作检测元件，感应线圈要求有足够多的匝数以保证检测灵敏度，其尺寸较大。定量分辨力受到感应线圈轴向宽度的限制难于提高<sup>[9]</sup>，对小缺陷尤其如此。为了克服电磁感应检测方式的缺陷，提高钢丝绳小缺陷的分辨力，本系统以磁敏元件为检测元件。磁敏元件的类型较多，其中性能比较突出的有 HALL 元件和磁敏二极管、磁敏三极管。相对而言，磁敏二极管及磁敏三极管线性范围比较窄，难以用于动态范围比较宽，又要求比较精确的测量，因而本系统最终采用结构尺寸较小、灵敏度较高、输出信号不受检测速度影响的集成 HALL 元件检测漏磁场。由于单个的 HALL 元件检测范围较小，本系统采用在钢丝绳周向均匀分布集成 HALL 元件组成 360 度检测环，检测钢丝绳周围的漏磁场。

单个 HALL 元件最大检测角如图 2 所示。当检测元件沿圆周逆时针移至 P1 点位置，超过 P1 就无法正确识别缺陷，对应的角度为  $\theta_1$ ；当检测元件沿圆周顺时针移至 P2 点位置，超过 P2 就无法正确识别缺陷，对应的角度为  $\theta_2$ ，则最大检测角： $\theta_{max} = \theta_1 + \theta_2$

所需检测元件的个数：

$$N \geq 360/\theta_{max} \quad (1)$$

所需元件的个数通过理论计算，并结合具体实验确定，本系统选取  $N$  为 32，即系统有 32 个检测通道。

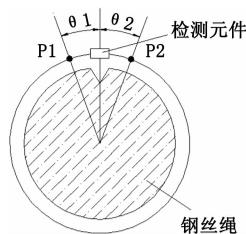


图 2 HALL 元件最大检测角示意图

### 2.2 信号放大电路

信号调理电路包括前置阻容耦合、微弱信号放大器 and 用于抑制高频干扰的低通滤波器。所用 HALL 元件工作电压范围 4.5~6 V，当没有外界磁场时，其静态输出电压约为 2.5 V 左右。在信号放大之前，加一级 RC 阻容耦合电路，其作用：一是隔直耦合；二是高通滤波。隔直耦合放大电路如图 3 所示。由于钢丝绳为螺旋形结构，当钢丝绳被磁化后，钢丝绳表面始终存在因股波引起的漏磁场，经磁敏元件产生股波信号，是始终存在的干扰。当钢丝绳缺陷信号比较微弱时，往往淹没股波信号中；但与缺陷信号相比，股波信号的频率比较低。因此，本系统中先在硬件电路上采用高通滤波器抑制股波信号的干扰，把信噪比提高到一定的程度，然后在后续的软件分析中再做进一步处理。另外，由于钢丝绳小缺陷产生的漏磁场较微弱，本系统用一级微弱放大器将信号放大至  $-5 \sim +5$  V，以满足后续模/数转换的要求。

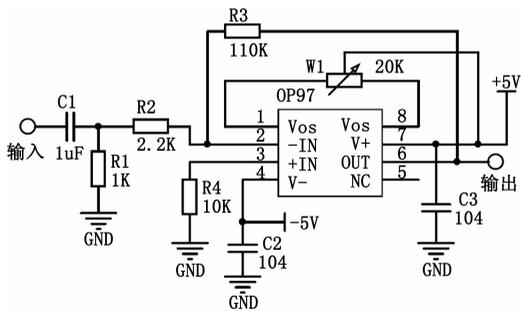


图 3 隔直耦合放大电路

### 2.3 等空间间隔采样

磁化后的被检钢丝绳，其漏磁场分布是钢丝绳空间位置上的不变量，钢丝绳周围的漏磁场取决于钢丝绳上的缺陷状况。在检测过程中，要做到匀速检测是很困难的。若按常规的事先设定好采样频率进行等时间间隔采样，检测速度的变化就会造成采集钢丝绳漏磁信号在空间轴上被拉伸或压缩。这样，各采样点之间钢丝绳上的间隔距离不一致，获取的采集数据会受到检测速度变化的影响，从而导致后续程序在数据分析及缺陷定量识别时的困难。因此，在钢丝绳检测中，一般采用等空间采样的方法，它不仅降低了后续数据分析处理难度，同时还可精确记录缺陷的空间位置信息。等空间间隔采样有多种方法，本系统采用脉冲编码器实现。在检测过程中，传感器导轮与钢丝绳产生相对运动，从而带动编码器转动，钢丝绳每移动相同的距

离间隔, 编码器发出 1 个等距离间隔脉冲 (与运动速度无关)。该脉冲送至双施密特触发器 74LS221 一个触发端第 10 脚 (参见图 4 等间隔采样脉冲整形电路), 经过电路整形后的脉冲 (74LS221 第 5 脚) 送至 STM32 处理器, 启动等空间间隔采样。

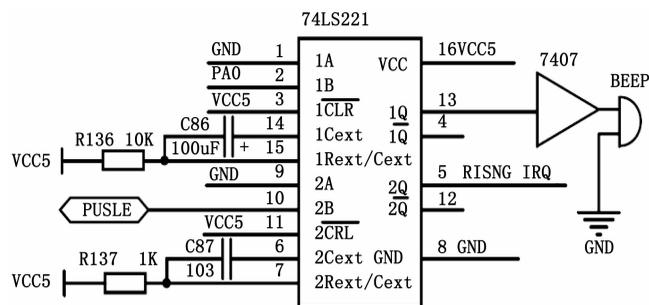


图 4 等间隔采样脉冲整形电路

采样间隔的选取主要与传感器所检测的最细钢丝绳直径等因素有关, 一般通过最细钢丝绳直径上, 不同损伤的检测实验来确定采样间隔, 再由采样间隔确定传感器导轮直径及编码器光栅目数等其它有关加工参数。设传感器导轮直径为  $D$ , 编码器光栅目数为  $M$ , 每个脉冲代表对应钢丝绳上的距离 (也即采样间隔):

$$\Delta S = \pi D / M \quad (2)$$

本系统导轮直径 70 mm, 选用 200 目光栅,  $\Delta S = \pi \times 70 / 200 \approx 1.1$  mm

钢丝绳走过的长度  $L$  可采用以下公式计算:

$$L = N \Delta S \quad (3)$$

式中,  $N$  为收到的总脉冲个数,  $\Delta S$  为采样间隔。另外, 在图 4 中, STM32 的 PA0 接至双施密特触发器 74LS221 另一个触发端第 2 脚, 经电路整形、扩宽脉冲宽度, 74LS221 第 13 脚输出, 再经过 7407 驱动蜂鸣器, 当检测到断丝时, 通过置 STM32 的 PA0 上升沿, 系统能实现鸣叫报警功能。

### 2.4 A/D 转换电路

HALL 元件检测的漏磁信号, 经信号调理电路后, 送至 A/D 转换电路, 将模拟信号转为数字信号。考虑到系统既要检测大的缺陷, 又要能检测小的缺陷, A/D 转换芯片要有足够的分辨力<sup>[10]</sup>。A/D 转换电路采用了高精度 16 位、8 通道 200KSPS 的 AD7606 芯片, 因系统有 32 个 HALL 检测通道, 共需要 4 片 AD7606。每片 AD7606 的控制信号线除片选信号外, 其余逻辑完全一致, A/D 转换电路如图 5 所示。A/D 转换电路采用单电源 +5 V 供电, 芯片 AD7606 在单电源供电情况下, 能够支持双极性  $-10 \sim +10$  V 或  $-5 \sim +5$  V 信号输入。4 片 AD7606 的 RANGE 引脚均接为低电平, 所有通道模拟输入范围设定为  $-5 \sim +5$  V。

AD7606 的引脚 PAR/SER/BYTE SEL 接为低电平, 将 A/D 转换结果设置为并行的 16 位输出。AD7606 的 DB0~DB15 接至 STM32 处理器的 FSMC\_D0~FSMC\_D15。AD7606 的 RESET 引脚接至 STM32 处理器的 PB7, 上电后在初始化程序中置 PB7 高电平宽度  $\geq 50$  ns, 复位 AD7606

芯片。所有 AD7606 的引脚 CONVST A、CONVST B 都已连接在一起 (CONVST) 至 STM32 处理器的 PA8、通过置 PA8 为低电平, 32 个通道同时采样钢丝绳上的漏磁场, 实现同步采样。当 STM32 处理器置 PA8 为高电平 (已接至 AD7606 的 CONVST), 模数转换过程开始, 同时 AD7606 的 BUSY 自动为高电平; 转换结束后, AD7606 的 BUSY 自动变为低电平。当 A/D 结束后, STM32 处理器通过分别置每片 AD7606 的 CS 引脚为低, 可依次读取 32 个通道的转换数据。

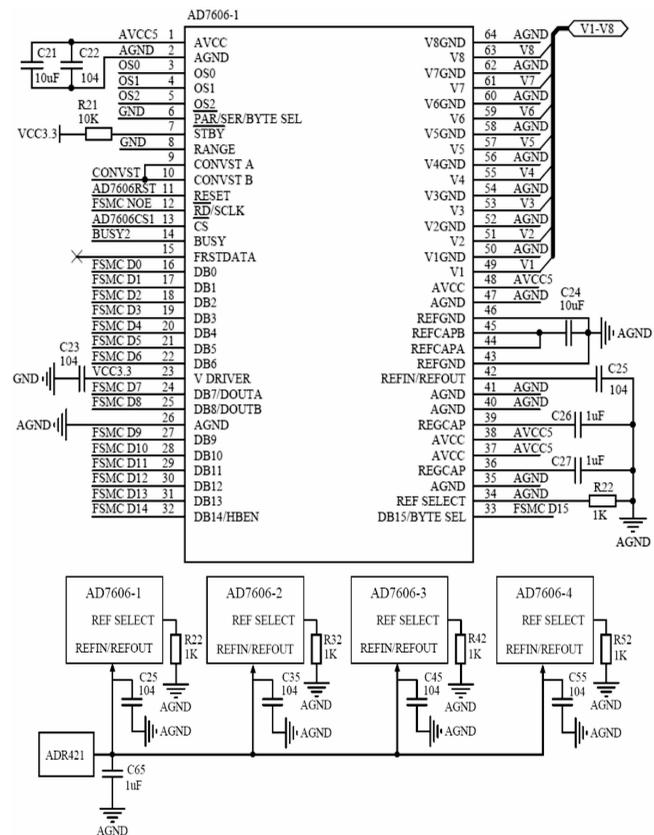


图 5 A/D 转换电路

AD7606 的引脚 PAR/SER/BYTE SEL 接为低电平, 将 A/D 转换结果设置为并行的 16 位输出。AD7606 的 DB0~DB15 接至 STM32 处理器的 FSMC\_D0~FSMC\_D15。AD7606 的 RESET 引脚接至 STM32 处理器的 PB7, 上电后在初始化程序中置 PB7 高电平宽度  $\geq 50$  ns, 复位 AD7606 芯片。所有 AD7606 的引脚 CONVST A、CONVST B 都已连接在一起 (CONVST) 至 STM32 处理器的 PA8、通过置 PA8 为低电平, 32 个通道同时采样钢丝绳上的漏磁场, 实现同步采样。当 STM32 处理器置 PA8 为高电平 (已接至 AD7606 的 CONVST), 模数转换过程开始, 同时 AD7606 的 BUSY 自动为高电平; 转换结束后, AD7606 的 BUSY 自动变为低电平。当 A/D 结束后, STM32 处理器通过分别置每片 AD7606 的 CS 引脚为低, 可依次读取 32 个通道的转换数据。

AD7606 片内每个通道均有独立的采样保持器, 如前所

述硬件上已将 4 片 AD7606 的 CONVST A、CONVST B 引脚连接在一起，所以 STM32 处理器可以同时启动所有 32 个通道同步采样，采集钢丝绳上同一横截面上的漏磁信号。这样，有利于相邻通道的数据融合，对钢丝绳上的小缺陷分析尤为重要。由于实现了所有通道的同步采样，在 A/D 转换结束后，读取 A/D 转换数据的先后通道次序对钢丝绳缺陷分析检测没有任何影响。

AD7606 有数字滤波与过采样功能，它的 OS0、OS1、OS2 三个引脚分别接到与 STM32 处理器的 PA6、PA7、PA8，可选择设置过采样倍数。在本系统中，为了兼顾小缺陷检测，采样频率较高，PA6、PA7、PA8 都接地，将 AD7606 设置成无过采样。另外，虽然 AD7606 内部集成了 2.5 V 电压基准，但它的温漂较大，小缺陷检测时对电压基准的要求较高，因此将 AD7606 的 REF SELECT 引脚接成逻辑低电平，选用外部电压基准。系统选用温度系数小、电压为 2.5 V 的基准芯片 ADR421 作为所有 4 片 AD7606 外部基准源，如图 5 所示。这样，可将温漂对芯片精确度的影响降至较低，因而模数转换绝对精度较高。

### 3 系统软件设计

识别系统软件设计主要包括 STM32 系统的初始化，设置被检钢丝绳直径、规格、检测长度，等待指令进行数据采样，对采集的数据初步处理、定性判别缺陷；当完成所需检测的钢丝绳长度、到达检测终点后，对所有数据进行分析、定量识别缺陷数量及位置信息，根据指令要求将数据发至上位机，进一步图形可视化显示。软件流程框图如图 6 所示。

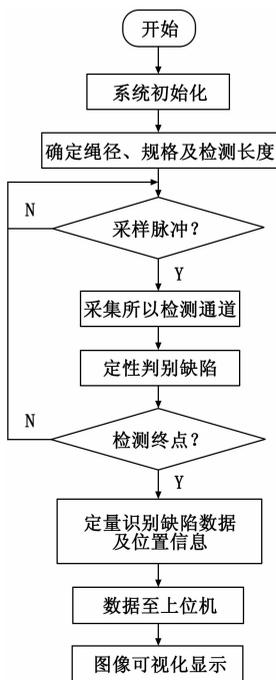


图 6 软件流程框图

在硬件上经过双回路励磁，高通滤波、放大，小距离等间隔采样，高精度多通道的模数转换，信噪比有所改善，但钢丝绳固有的螺旋性结构引起的股波信号依然是始终伴随的干扰。经过数据分析小缺陷信号的频率高于股波信号的频率，在软件的定量识别程序中，对模数转换后的数据进行快速傅里叶变换 FFT，在频域股波信号幅度远大于缺陷信号幅度。软件上，比较容易判断股波信号的频率范围，然后根据股波信号的频率进行数字带阻滤波，能有效地剔除股波信号的干扰，从而识别钢丝绳上的细小缺陷。整个系统软件在 Keil MDK 集成环境下采用 C 语言、利用 STM32 固件库编写而成。

### 4 实验结果与分析

试验样件为直径 24 mm，6×37 结构的顺捻提升钢丝绳，是一种典型的提升钢丝绳，常应用于各种起重、提升和牵引设备，有一定的代表性。试件钢丝绳单根钢丝直径 1.1 mm、比较细小，断丝引起的漏磁信号比较微弱。实验过程中，钢丝绳固定在支架上，将传感器安装在钢丝绳上，沿钢丝绳轴向移动传感器，使传感器与钢丝绳作相对运动。相对运动速度不要求均匀，变化范围控制在 0.3~3 m/s 即可，这是比较容易实现的，也适合现场钢丝绳运行时可能会抖动引起速度变化的情况。然后，通过以下实验考察本钢丝绳缺陷识别系统检测信号特性及系统对缺陷的准判能力。

#### 4.1 检测信号强度与磁化强度的关系

图 7 为试件钢丝绳上某根断丝，断口宽度为 1 mm 时，检测元件输出信号与磁化强度的关系曲线。从图 7 中可看出，在曲线起始阶段（磁化强度为 1~4 kAm<sup>-1</sup>）随着磁化强度的增大，检测元件输出信号强度增加，二者呈线性关系；当磁化强度大于 4 kAm<sup>-1</sup>，输出信号增加幅度开始趋缓；当磁化强度继续增加，到达磁饱和后约 8 kAm<sup>-1</sup>，输出信号强度增加很少，保持在比较稳定的数值。实验表明：为了提高检测元件输出信号强度，传感器应磁化钢丝绳至饱和状态，这样不仅可以提高检测信号的强度，也有利于检测信号的稳定，为后续断丝数量的分析提供基础条件。

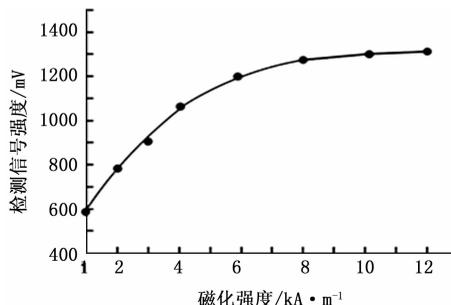


图 7 检测信号强度与磁化强度关系

#### 4.2 检测信号强度与断口宽度的关系

检测信号输出电压与断丝的断口宽度的关系如图 8 所

对钢丝绳上的细小缺陷，其漏磁信号比较微弱，虽然

示。从图 8 中可以看出: 在曲线起始阶段, 即断口宽度在 0.6 mm 以下, 检测信号输出电压随断口宽度增加而增加, 呈线性关系, 随后变化趋于缓慢。分析表明, 钢丝绳断口宽度增大, 其产生的漏磁场强度增大, 当断口宽度大到一定程度后, 如大于 1.2 mm, 漏磁场强度的变化减弱, 从而检测信号输出电压的变化缓慢。因此, 在程序分析中本系统根据检测信号的波形, 综合考虑了断口宽度的影响。

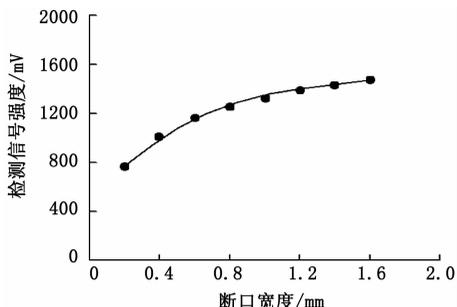


图 8 检测信号强度与断口宽度关系

### 4.3 检测信号强度与断丝数量的关系

随着钢丝绳断丝数量增加, 其附近漏磁场增加, 检测元件输出信号随之增强。检测信号输出电压与断丝数量的关系如图 9 所示, 当断丝数量在 3 根以下, 检测信号强度与断丝数量呈线性关系; 断丝数量增加到一定程度如 4 根以上, 由于检测元件尺寸等限制, 检测信号输出信号呈非线性增加。这时应对左右相邻检测元件输出的信号进行数据融合, 才能准确判断钢丝绳上断丝的数量。

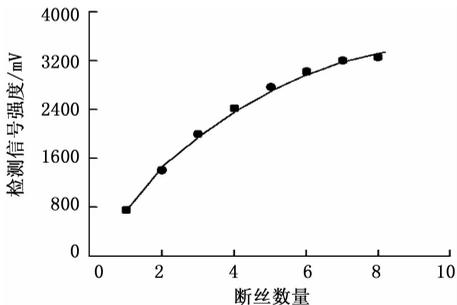


图 9 检测信号强度与断丝数量关系

### 4.4 系统检测缺陷的准确率

在上述钢丝绳试件上 (直径 24 mm, 6×37 结构的顺捻承载钢丝绳), 在 5 处不同截面上制作具有代表性的缺陷, 断丝数量分别是 1 至 5 根。用本钢丝绳缺陷识别系统测试 100 次, 考查系统检测缺陷的准确率。检测缺陷的数据如表 1 所示。

实际测试结果表明: 当要求系统无错判时, 缺陷定量准确率 > 90%; 当允许系统误差为 1 根时, 缺陷定量准确率 ≥ 95%, 能满足实际使用要求。实验过程中, 传感器与钢丝绳相对移动的速度对检测结果没有影响, 这与霍尔检测元件输出电压与运动速度无关的特点完全相一致。另外, 本系统采用的是漏磁检测方法, 钢丝绳表面的油垢不影响霍尔

表 1 钢丝绳缺陷检测数据

序号	断丝根数	实验次数	无误判	±1 根断丝误判	±2 根断丝误判
1	2	100	93	4	3
2	1	100	95	5	0
3	3	100	92	4	4
4	5	100	91	5	4
5	4	100	91	5	4

元件对缺陷漏磁信号的拾取, 因此在实验及检测前不需要清洗钢丝绳表面, 较大地提高了本方法检测效率以及方法的实用性。

## 5 结束语

本文利用 STM32 处理器及模数转换芯片 AD7606 等器件设计了一种钢丝绳小缺陷精确化识别系统, 较为详细地阐述了该系统的双回路励磁结构, 漏磁信号拾取方式, 微弱信号放大电路, 等距离小间隔同步采样, 高精度、多通道模数转换等硬件及软件的设计。经相关试验表明: 该系统缺陷检测准确率高, 能够满足工矿等企业钢丝绳缺陷的检测要求。同时, 为其它铁质类材料的无损检测提供了有价值的参考。

### 参考文献:

- [1] 孟积渐. 国内外矿用钢丝绳无损检测技术及使用管理 [J]. 煤矿机械, 2018, 38 (8): 154 - 156.
- [2] 吴 澎, 花虎跃. 钢丝绳无损检测中存在问题的探讨 [J]. 无损检测, 2017, 39 (6): 65 - 68.
- [3] Torres V, Quek S, Fernandes B. Development of a scanning system to detect corrosion in wire bundles and pipes using magneto-resistive sensors [J]. Insight - Non - Destructive Testing and Condition Monitoring, 2011, 53 (2): 82 - 84.
- [4] 华晋伟, 王 兵, 邵 帅, 等. 基于漏磁原理的钢丝绳无损检测技术研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2014, 5: 38 - 39, 105.
- [5] 李兆星, 乔铁柱. 矿用钢丝绳断丝特征的识别 [J]. 煤矿安全, 2016, 47 (2): 123 - 126.
- [6] 沈功田, 王宝轩, 郭 锴. 漏磁检测技术的研究与发展现状 [J]. 中国特种设备安全, 2018, 33 (9): 43 - 52.
- [7] Onur, Y A. Condition monitoring of Koepe winder ropes by e - lectromagnetic non - destructive inspection [J]. Insight - Non - Destructive Testing and Condition Monitoring, 2012, 54 (3): 144 - 148.
- [8] 田 劼, 周俊莹, 王红尧, 等. 钢丝绳探伤多回路励磁检测方法研究 [J]. 矿业科学学报, 2018, 3 (2): 180 - 185.
- [9] Sun Yanhua, Liu Shiwei, He Lingsong, et al. A new detection sensor for wire rope based on open magnetization method [J]. Materials Evaluation, 2017, 75 (4): 501 - 509.
- [10] 孙燕华, 马文家, 田晓贺, 等. 基于 STM32F4 嵌入式的钢丝绳漏磁检测数据采集系统 [J]. 无损检测, 2018, 40 (9): 56 - 59, 67.