

基于小波分解的钢丝绳断丝信号抗混滤波电路参数分析

漆爱冬¹, 胡笑奇², 胡小平², 季晓明²

(1. 浙江嘉利(丽水)工业股份有限公司, 浙江 丽水 323010; 2. 丽水学院 工程与设计学院, 浙江 丽水 323000)

摘要:设计了钢丝绳损伤信号的抗混滤波电路, 基于小波分析方法, 对钢丝绳损伤信号进行了分解, 探明了断丝信号的频带分布; 通过信号的功率谱分析, 确定了抗混滤波电路的截止频率, 计算了抗混滤波电路的关键参数值。

关键词:钢丝绳; 断丝; 小波分析; 抗混滤波

中图分类号: TD532

文献标识码: A

文章编号: 1671-5322(2016)03-0060-03

断丝是钢丝绳损伤的主要形式, 工程上常用目测法和手试法判断断丝的数量和程度。该方法虽然直观、易于操作, 但由于人工操作严重依赖于检测者的技术水平, 容易产生漏检; 另外, 若断丝的断口隐藏于绳股的内部, 则人工方法很难准确地检测出来。

基于这种现状, 近年来涌现出很多新的检测方法, 如电磁法^[1]、振动法^[2]、涡流法^[3]等等, 其中基于霍尔检测原理的电磁法得到了广泛应用。其原理可以描述为: 首先将钢丝绳进行饱和磁化, 若在工作过程中出现断丝, 则可通过霍尔元件捕捉到由于断丝而产生的漏磁场, 将其转换为电信号后上传到上位机显示, 作为判断钢丝绳损伤程度的依据。在整个检测过程中, 将断丝信号从采集信号中分离出来是该方法的核心环节。本文通过小波分解将采集到的信号进行时频分析, 确定断丝信号的频率范围; 在此基础上通过功率谱分析, 确定抗混滤波电路的截止频率, 从而计算抗混滤波电路的关键参数。

1 损伤信号的采集与传输

由 n 个霍尔元件采集到的 n 个信号 U_1, U_2, \dots, U_n , 经过信号预处理后, 进入抗混滤波电路, 经过数模转换后, 由单片机上传到上位机, 将损伤

信号在上位机上显示出来, 如图 1 所示。

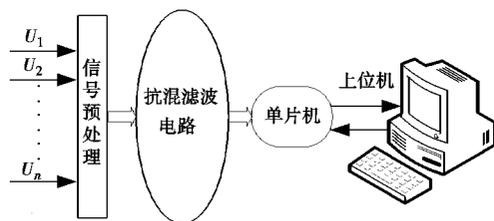


图 1 信号的采集及其与上位机通讯

Fig. 1 Acquisition of signal and communication with upper computer

由霍尔元件获取的钢丝绳信号是模拟信号, 必须要转换为数字信号才能在上位机上准确显示。在转换过程中需遵循采样定理:

$$f_s \geq 2f_m \quad (1)$$

式中: f_s 为系统的采样频率, Hz; f_m 为带限信号的最高频率, Hz。

由式(1)可知, 要使模拟信号完整地转换为数字信号, 其采样频率必须大于或等于模拟信号最大频率的 2 倍, 否则在上位机上由数字信号还原得到的模拟信号将产生混叠和失真。可见, 要消除混叠和失真, 要么增加采样频率, 要么降低信号的最高频率, 而增加采样频率要受到硬件条件的限制, 因此, 通过硬件滤波将高频噪声滤除是较

收稿日期: 2016-01-23

基金项目: 浙江省科技厅公益性项目(2013C31101); 浙江省科技厅 2012 年生态省建设目标责任制考核重大科技项目(浙科发社【2012】293); 浙江省丽水市科技局 2012 年第 4 批科技计划资助项目(20120421)

作者简介: 漆爱冬(1968—), 男, 浙江丽水人, 工程师, 主要研究方向为机电一体化。

为合理的方法。

本文所采用的抗混滤波电路如图2所示。该电路中,运算放大器为同相输入,输入阻抗很高,输出阻抗很低,滤波器相当于一个电压源,其优点是电路性能稳定、增益容易调节。

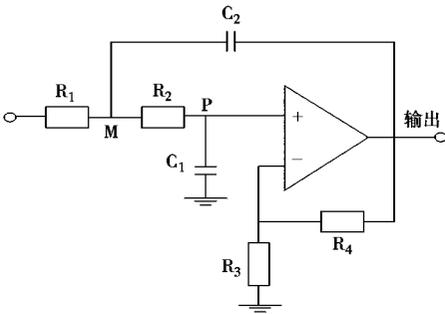


图2 抗混滤波电路

Fig. 2 Anti-aliasing filter circuit

2 钢丝绳断丝信号的小波分解

要获取图2所示抗混滤波电路的参数值,首先要确定所采集到的信号中断丝信号的频带分布。本文采用小波变换的方法对信号进行处理。

在钢丝绳断丝损伤检测中,关注的是断丝处局部范围中的信号特性,这就需要时频域分析,而小波分析就是典型的时频域分析方法。由于小波变换同时具有时域和频域的良好局部化性质,随着信号不同频率成分在时域取样的疏密自动调节,可以对信号任意细节加以分析。所以小波变换是对钢丝绳断丝信号频谱分析比较理想的数学工具^[4]。

通过小波变换的多分辨率分析,将原始信号按一定的尺度分解成几个具有不同分辨率的分量,而且这些分量能够不失真地重建原始信号^[5]。现以一个3层的分解来说明多分辨率的原理,其小波分解树如图3所示。

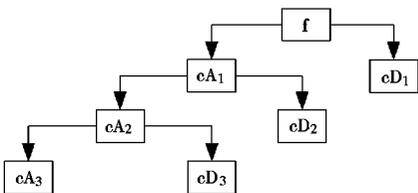


图3 小波分解树

Fig. 3 Wavelet decomposition tree

从图3可以明显地看出,分解具有如下关系: $f = A_3 + D_3 + D_2 + D_1$ 。如果要进行进一步地分解,可以把低频部分 A_3 分解成低频部分 A_4 和高频部分 D_4 ,以下再分解依次类推。

在6股钢丝绳($\phi 10$)表面制造一处断丝,断口长度2 mm,如图4所示。将钢丝绳穿过直流励磁器的2个极靴,对其进行饱和励磁,在钢丝绳上方5 mm处布置一个霍尔元件,在电机的拖动下,钢丝绳以0.5 m/s的速度在励磁器内沿着轴线方向运动。由于断口的出现,磁力线将会泄露出来,被布置在上方的霍尔元件捕捉,并将磁信号转换为电信号。



图4 钢丝绳断丝

Fig. 4 Broken wire of wire rope

现对这一钢丝绳断丝记录信号进行3层小波分解,小波基为 DB_4 ,原始记录信号如图5所示,小波3次分解后重构的信号如图6所示。图5和图6中横坐标为采样点数,纵坐标为信号电压, A_3 是第3层低频小波系数重构的结果, D_1 、 D_2 、 D_3 则是由第1、第2、第3层高频小波系数重构所得到的信号。

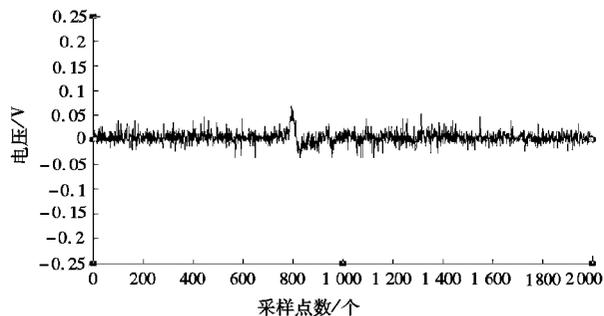


图5 钢丝绳断丝原始信号

Fig. 5 Original signal of broken wire

对比图5、图6可以看出,断丝信号在细节方面得到很大的衰减,因此在 D_1 、 D_2 、 D_3 中没有表现,而在 A_3 中却表现明显,这充分说明断丝信号集中在低频段。

3 抗混滤波电路参数的确定

将图 5 所示的钢丝绳断丝信号,求其快速傅

里叶变换,并作功率谱分析,功率谱密度函数如图 7 所示。

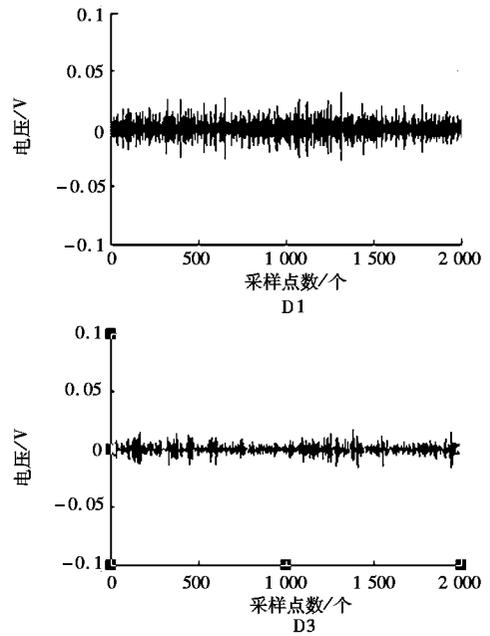
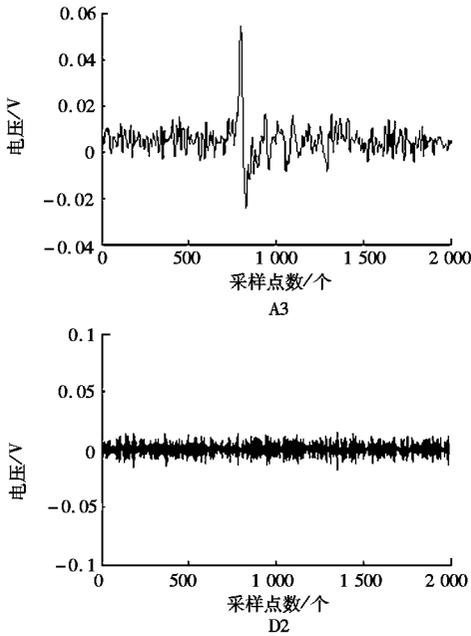


图 6 小波三次分解后重构的信号

Fig. 6 Reconstructed signal of a third - level wavelet decomposition

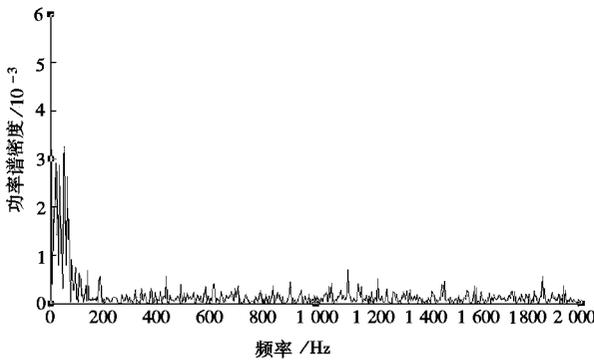


图 7 断丝信号的功率谱密度

Fig. 7 Power spectral density of broken wire signal

由上述小波分析的结果可知,钢丝绳的断丝和股波信号集中在低频段,噪声信号主要集中在高频段。再结合图 7 所示的功率谱密度图可清楚地看到低频段的能量主要集中在 200 Hz 以内,这为确定抗混滤波电路的截止频率提供了依据。

根据图 2 所示的电路设计,取抗混滤波电路的截止频率:

$$f_0 = 200 \text{ Hz} \tag{2}$$

取 $C_1 = C_2 = C, R_1 = R_2 = R$, 根据集成运放同相输入端点及 M 点处的节点电流方程式,可得此滤波电路的传递函数为^[6]:

$$A_u(s) = \frac{A_{up}(s)}{1 + [3 - A_{up}(s)]sRC + (sRC)^2} \tag{3}$$

式中 $A_{up}(s)$ 为同相比例运算放大器的电压放大倍数。

此滤波电路,只有当 $A_{up}(s) < 3$, 即分母中 s 的一次项系数大于零时,电路才能稳定工作,而不产生自激振荡。本文取

$$C_2 = C_1 = 0.1 \mu\text{F} \tag{4}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \tag{5}$$

联立以上 4 式,得

$$R_1 = R_2 = 32 \text{ k}\Omega \tag{6}$$

因在电路中,要求运算放大器的正向输入端和反向输入端对地的电阻要平衡,即:

$$R_1 + R_2 = R_3 // R_4 \tag{7}$$

令 $R_3 = R_4$, 将 $R_1 = R_2 = 32 \text{ k}\Omega$ 带入(7),得:

$$R_3 = R_4 = 128 \text{ k}\Omega \tag{8}$$