

异构双核构架下的脉冲涡流信号实时小波去噪

邱选兵¹, 魏计林¹, 崔小朝^{1*}, 夏春华²

(1. 太原科技大学 应用科学学院, 太原 030024; 2. 山西行政学院 信息网络教研部, 太原 030006)

(* 通信作者电子邮箱 cuixiaochao@sohu.com)

摘要:针对工业现场的脉冲涡流(PEC)信号,设计了基于异构双核 OMAP3530 的实时嵌入式去噪的硬件与软件系统。分析了适用于实时去噪的小波基的选择,完成了基于 DB4 小波基的 Penalty 阈值法、B-M 阈值法、默认阈值法的 Matlab 去噪仿真实验,并给出了均方根误差(RMSE)和信噪比(SNR)。结合 OMAP3530 硬件平台,讨论了基于 DSPLINK 的异构双核构架的数据共享方法,并提出一种基于固定步长滑动窗口的实时去噪算法。通过计算机仿真与实验结果表明:该系统具有信噪比高、实时性强、数据吞吐率大的优点,满足连铸现场自动检测要求。

关键词:脉冲涡流;实时去噪;嵌入式操作系统;异构双核;DSPLINK

中图分类号: TN911; TP368 **文献标志码:** A

Real-time wavelet denoising for pulsed eddy current signal based on heterogeneous dual-core

QIU Xuanbing¹, WEI Jilin¹, CUI Xiaochao^{1*}, XIA Chunhua²

(1. School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China;

2. Department of Information Network Teaching, Shanxi Administrative Institute, Taiyuan Shanxi 030006, China)

Abstract: In order to denoise the Pulsed Eddy Current (PEC) signal from industrial field, a real-time hardware and software system based on heterogeneous dual-core OMAP3530 was designed. First, how to select a wavelet basis was analyzed in the real-time process. The Matlab denoising model based on DB4 wavelet threshold method including Penalty method, B-M method and default method was established, and the Root of Mean Square Error (RMSE) and Signal-to-Noise Ratio (SNR) of the denoising model were given. With reference to the OMAP3530 hardware platform, the system software design of data sharing based on DSPLINK of heterogeneous dual-core was discussed. A real-time filtering algorithm based on fixing length step window was promoted to denoise the PEC signal. The simulation and experimental results indicate that the real-time denoising system has the features of high SNR, strong real-time and high throughput rate to satisfy the requirements of auto-testing on the casting production line.

Key words: Pulsed Eddy Current (PEC); real-time denoising; embedded operation system; heterogeneous dual-core; DSPLINK

0 引言

高温铸坯热送热装及直接轧制(Continuous Casting Directrolling, CC-DR)工艺是一项系统性新技术,促进了炼钢—连铸—热轧生产的一体化。减少铸坯表面缺陷和内部缺陷的各种技术措施以及热态下铸坯质量的检测技术,是实现 CC-DR 的支撑技术之一^[1-2]。半成型铸坯如果能在生产线上进行实时无损检测,并采用一定的分离装置将含缺陷的铸坯剔除,对于提高企业的生产效率、节约成本和降低能耗、消除潜在的危^险有着重要的意义。

脉冲涡流(Pulsed Eddy Current, PEC)是一种被广泛使用和有效的电导性材料无损检测方法之一。法国钢铁研究院第一次利用电涡流对连铸半成品进行了无损缺陷检测研究^[3],德国蒂森公司等利用多通道和多组探头相结合的技术,对深度为 3 mm 的裂纹和缺陷进行了研究^[4];2003 年,贾慧明等^[5]对 1 100 ℃ 以上高温连铸板坯的表面缺陷进行在线无损检测

的实验研究。重庆大学的欧阳奇科研团队^[1-2]采用涡流检测法和基于红外和激光的图像处理方法,进行了一系列的连铸钢坯缺陷检测研究。

连铸钢坯的涡流检测中,由于温度高(1 000 ℃ 以上)、湿度大、环境恶劣,PEC 信号受到钢坯氧化皮、被测材料属性、测量噪声、提离效应、连铸生产线环境等各种干扰^[6-7],信噪比低,因此如何从复杂的干扰噪声背景中提取出钢坯缺陷信号,获得 PEC 的峰值和峰值时间等时域特征量成为了缺陷的定量检测的必要前提^[1-2,8-9]。

小波变换被称为继傅里叶变换后的又一个里程碑式的方法,在时域和频域都具有较高的分辨率,国内外学者对小波在涡流去噪中的应用进行了一系列的研究工作。周德强等^[7]对脉冲涡流非平稳信号进行了小波阈值法去噪的仿真实验,与传统的有限脉冲响应(Finite Impulse Response, FIR)、无限脉冲响应(Infinite Impulse Response, IIR)数字低通滤波方法进行比较,并对实际的脉冲涡流信号进行了消噪,信噪比

收稿日期:2012-08-16;修回日期:2012-09-23。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61178067)。

作者简介:邱选兵(1980-),男,四川内江人,讲师,博士研究生,主要研究方向:材料无损检测、嵌入式系统、信号处理; 魏计林(1957-),男,河北深县人,教授,主要研究方向:嵌入式系统、光学; 崔小朝(1962-),男,山西临汾人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:计算流体力学、工程应用、高效连铸; 夏春华(1958-),男,山西太原人,副教授,主要研究方向:嵌入式系统。

(Signal-to-Noise Ratio, SNR) 达 21 dB。王俊英等^[10] 在 Matlab 中,以 sym5 为小波基,研究了软阈值进行 5 层小波脉冲涡流信号进行去噪,去噪效果较好。彭学文等^[11] 比较了强制消噪法、软阈值消噪法和不同熵准则的小波包消噪法,指出 Threshold 熵准则法效果最好。Ma 等^[12] 研究了基于小波分析涡流信号奇异点的瞬态检测和监测。上述研究的 PEC 去噪都是基于离线式或半离线式的去噪研究,即利用计算机对缺陷信号进行去噪的仿真分析,然而实时对工业生产线的 PEC 信号去噪的研究还鲜有报道。

在实际的工业生产线上,由于环境恶劣、电磁干扰、温度湿度等原因,无法采用一般台式计算机,某些场合可以采用工业计算机;另一方面需要检测系统在非常短的时间内(微秒级)对检测做出反应,一般的通用计算机难以在如此短的时间内完成,故必须采用快速的实时处理器如 DSP 处理器。文献[13-14]报道了一种实时或是准实时的点对点的小波滤波(去噪)的方法,在数据的更新中提出了一种滑动窗口的思想,即对一个固定的窗口内数据进行滤波,每次更新数据时,只需将数据窗口移动到下一个点。这种方法需要每次固定长度滤波在每个点的采样周期内完成,例如 10 μ s,等价于 100 kHz 数据吞吐率,然而实际的嵌入式处理器或是通用处理器难以在如此短的时间内完成固定长度点(如 256)或是更多点的实时去噪。

目前,嵌入式信号处理一般采用 ARM 结合 DSP 的处理平台,即 ARM 负责信号的采集、控制、传递、共享等工作;DSP 负责数字信号的实时处理,ARM 与 DSP 之间通过 HPI(Host Peripheral Interface)、共享 RAM、串口等方式进行数据的传递^[15-17]。这种构架的数据传输延时长,效率低,实时性不高。Texas Instrument 在 2009 年推出的低功耗工业级的异构双核的处理器 OMAP3530,此芯片内部集成了 720 MHz 的 ARM-A8 核、520 MHz 的 C64 + DSP 核,ARM 和 DSP 之间通过 TI 提供的 DSPLINK 进行数据的交换,适合多媒体、视频等实时嵌入式处理平台^[18-20]。综上所述,本文根据实时生产线的检测需求,选择 OMAP3530 作为嵌入式处理平台,利用其内部高效的数据的传递与共享机制,实现信号的高效实时去噪。设计了异构双核实时检测平台,建立了 DB4 小波基的 penalty 阈值法、B-M(Birge-Massart)阈值法、默认软阈值法(Donoho 阈值)等去噪模型,并提出了一种更加实用的固定滑动窗口滤波算法,实验证明该算法能有效去除噪声,提高实时性,为后续的连接钢坯缺陷的快速识别提供了保障。

1 基于异构双核的脉冲涡流实时无损检测系统

基于异构双核 OMAP3530 的缺陷检测硬件平台由 PEC 传感器阵列、基于 Cortex-M3 的多通道嵌入式数据采集与电机驱动板(简称采集板)、OMAP3530 涡流去噪与识别平台、LCD 显示器、键盘输入以及电源模块等部分组成,如图 1 所示。PEC 传感器阵列位于钢坯上下表面,各交叉放置 8 个。PEC 传感器阵列外部采用高温隔离保护装置,该保护装置采用风冷和水冷相结合的方式。采集板通过步进电机控制铸坯上下表面相互交错的涡流传感器阵列在垂直于钢坯运动方向的移动;并实时采集脉冲涡流探头感应到的脉冲涡流缺陷信号。缺陷识别通过 OMAP3530 处理器完成,结果显示在 LCD 显示器上,系统参数(如去噪的小波基选择、缺陷识别算法选

择等)通过键盘输入。

2 小波分析理论

2.1 连续小波变换

对于函数 $\varphi(x) \in L^2(\mathbf{R})$, 如果满足容许性条件即:

$$C_{\varphi} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

则称 $\varphi(x)$ 为“母小波”, $\Psi(\omega)$ 是 $\varphi(x)$ 的傅里叶变换^[21]。

如果对于一个平方可积函数(对应能量有限信号) $f(x) \in L^2(\mathbf{R})$, 则连续小波变换为:

$$CWT_x^{\varphi}(\tau, s) = \Psi_x^{\varphi}(\tau, x) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \varphi^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) dt \quad (2)$$

其中: s 为小波的尺度函数,等价于频率的倒数。

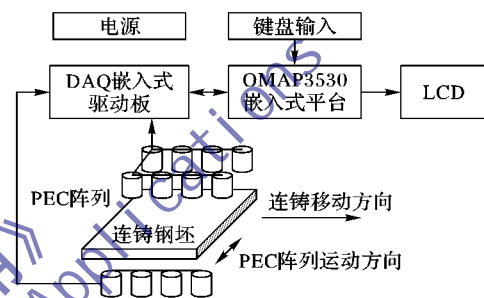


图1 系统工作原理

2.2 小波的分解和重构

小波的分解与重构多采用 Mallat 的多分辨分析思想以及塔式算法^[22]。小波的多分辨分析采用一组可以相互包含的空间来表示信号的投影。将信号在这些特殊的子空间进行投影,并得到一系列的小波系数。小波的分解与重构在数学上和二通道数字滤波器组属于同一表现形式,故在数字信号处理中,一般采用数字滤波器组来实现小波变换。

2.3 小波去噪理论

对于一个含噪信号,信号的有用信息一般是一种缓慢变换的即对应低频,而各种噪声(如高斯噪声)一般都是高频信息^[23-24]。对其进行 N 层小波分解,将得到一系列的细节系数和第 N 层的近似系数,根据前面的假设,通过一定方式来抑制从第 1 层一直到第 N 层的细节系数(高频信息),然后进行信号的重构,从而实现信号的去噪。

抑制细节系数分为软阈值法和硬阈值法两种:硬阈值是将小波分解后的细节系数的绝对值小于或等于阈值的设置为零,此法容易在某些点产生间断;软阈值是在硬阈值的基础上将边界出现不连续的点收缩到零,有效地避免间断。一般来说,经过硬阈值去噪的信号更为粗糙,而软阈值具有很好的数学特性,去噪后的信号比较光滑。

3 PEC 信号实时小波去噪实现

3.1 小波基的选择

在实时信号去噪中,小波基的选择与信噪比、算法复杂度、处理时间等综合因素有关。文献[13-14]分析了具有正交和紧支撑性质的小波基(如 DB4)比较适合实时小波降噪要求,因为小波变换及其逆变换都可用矩阵形式的线性正交变换简洁地解释,理论分析与实验分析表明,具有二阶或三阶消失矩的 Daubechies 小波适合实时降噪。同时,在计算机中

的小波变换是通过一系列的卷积来实现的,故小波基的长度也是必须考虑的因素。在 OMAP3530 的 DSP 核中,充分利用直接块存储器读写指令 `_amem8_const` 以及 `_amem8` (8 字节对齐访问,每个系数保存为 Q.15 格式,字节数为 2),因此必须保证小波系数的长度为 4 的整数倍。综上所述,选择长度为 8 的 DB4 作为去噪小波基。

3.2 PEC 信号的小波去噪 Matlab 实验

PEC 信号的 Matlab 仿真实验平台如图 2 所示。在图 2 仿真实验平台中,电源模块为 CPU 部分、Direct Digital Synthesizer (DDS) 部分、A/D 部分、驱动电路等电路提供电源。CPU 采用低功耗 STM32F103RE,与 DDS 信号合成芯片 AD9851 采用串口通信方式,产生的正弦波通过其内部的比较器,输出 1 kHz 的方波信号,再由驱动电路驱动 PEC 探头的激励线圈。在 PEC 的底部对称地放置了两个线性霍尔传感器 AD22151,用于拾取涡流场强,并经过差分放大,滤波等调理整形后输入到 AD7656 中,CPU 通过并口方式快速读取 A/D 转换值。实验中用泰克示波器 TDS3210B 采集经过调理后的 PEC 信号并存储,计算机通过以太网读取存储示波器中的信号,并在 Matlab 中进行数据的去噪仿真实验。

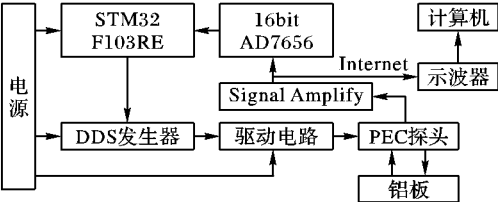


图 2 脉冲涡流去噪仿真实验平台

为了实验方便,实验采用铝板来模拟实际的连铸钢坯,采用厚度为 10 mm,长度为 200 mm,宽度为 100 mm 的铝块作为标准试件,加工的横向裂纹的纵向剖面示意图如图 3 所示。考虑到涡流场有效的作用区域,在试件的上表面均匀地加工了 4 个裂纹,裂纹之间的间距为 40 mm,每条裂纹宽度均为 3 mm,但其深度从 2 mm 逐步增加到 8 mm。

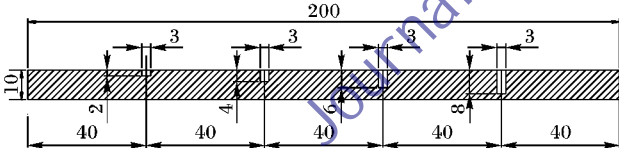


图 3 试件结构

在 Matlab 中,调用泰克提供的读取波形函数,由于示波器的采样频率为 1 MHz,每一幕的图像点数为 10 000,故采样时间为 10 ms。数据在进行仿真时,直选取了其中 4 000 个点,如图 4 所示。

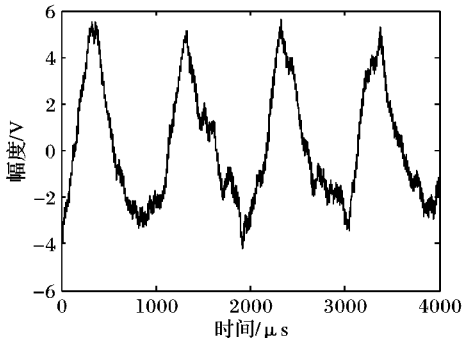


图 4 典型 PEC 差分信号

图 5 为选择 DB4 小波基,分别通过 Penalty 软阈值法、B-

M 硬阈值法、默认软阈值法小波去噪后的波形图。

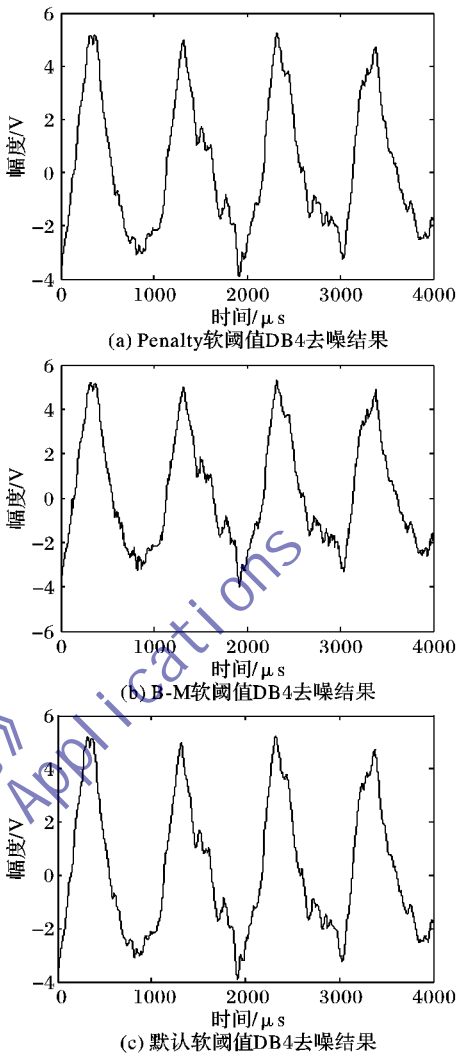


图 5 PEC 信号去噪波形

表 1 为以上三种阈值法去噪后的均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 和信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)。仿真结果表明,采用 DB4 小波基能够比较好地去除 PEC 噪声,其 *RMSE* 在 0.16 以内,保留了原信号的特征,同时信噪比在 19 dB 以上,有效的抑制噪声,B-M 硬阈值和默认软阈值测信噪比 Penalty 软阈值要高, *RMSE* 也较小。

表 1 涡流信号去噪的均方根误差和信噪比

阈值算法	RMSE	SNR/dB
Penalty 软阈值法	0.1540	19.5026
B-M 硬阈值法	0.1449	20.1429
默认软阈值法	0.1536	19.5166

3.3 异构双核小波实时去噪设计

双核实时去噪的软件流程如图 6 所示,数据采集板通过 SPI (Serial Peripheral Interface) 与 OMAP 3530 通信 (图中未画出)。OMAP3530 的 ARM 端移植了嵌入式操作系统 Linux,其内核版本为 2.6.23。运行在 Linux 平台的 Qt/Embedded (QT) 通过 Serial Peripheral Interface (SPI) 驱动程序实现与数据采集板的通信,通过 DSPLINK 驱动程序实现与 DSP 内核通信。QT (General Purpose Processor, GPP 应用程序) 负责读取数据采集板的 PEC 采集数据,并通过 DSPLINK 传递给 DSP 内核,缺陷信号的分析,显示以及储存。运行在 DSP 核的 PEC 信号

去噪实时优化算法通过 DSPLINK 模块(直接读写存储器方式)与 ARM 端的 Qt 程序进行数据交换。PEC 信号的实时去噪由 DSP 端处理,DSP 程序软件针对 TI 的 C64+ 内核进行最优化编译处理,其中包括采用线性编译器、设置优化等级,使用 C6000 内联函数以及优化库函数,展开循环、合理安排软件流水等优化方法,达到实时去噪的目的。本文着重研究 DSP 端的小波实时去噪算法,其他相关的部分省略。

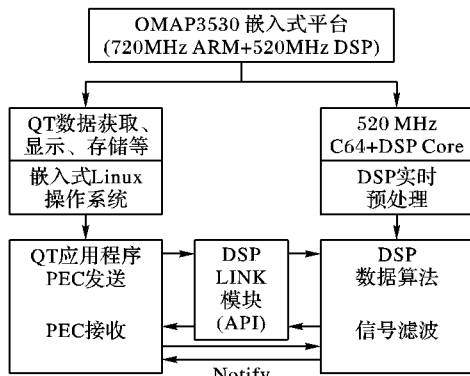


图6 信号去噪流程

在 PEC 实时处理中,数据采集板与运行 Linux 的 OMAP3530 平台的数据通信采用高速 16 位 SPI 通信方式,通信速率为 24 Mb/s,则每秒钟数据的为 $24/8 = 3$ MB,而每个点的数据位数为 16 位,故每一秒传输的 1.5×2^{20} 个点,实际测量的点数为 1×2^{20} 左右。AD7656 的采样周期实测为 $6.52 \mu\text{s}$,采样率为 153 kHz,为了减小数据的冗余和实际数据的处理时间能力,本文采用每三个点取平均,故等效的实际数据采样率为 51 kHz(周期为 $6.52 \mu\text{s} \times 3 = 19.6 \mu\text{s}$)。按照文献[13~14]算法,则要保证实时的点对点的滤波,则要求每个点的处理时间在 $6.52 \mu\text{s} \times 3 = 19.26 \mu\text{s}$ 之内,而系统的数据延时如图 7 所示,粗略计算总的延时为 $1200 \mu\text{s}$,已经远远超过了采集信号的更新周期 $19.26 \mu\text{s}$ 。

SPI传输 延时	Linux系统的 SPI延时	数据从QT端 到DSP端延时	DSP内核的 小波去噪延时	数据从DSP端 到QT端延时
3	1~5	<100	400~1000	100
总共约1200				

图7 数据延时(单位: μs)

因此本文采用了一种改进滑动串口的实时去噪方法。滑动窗口的长度依然设置为 256,但是每次数据的更新选择为 64 个点,见图 8,其中 N 表示每个时刻的数据点, $T_0 \sim T_2$ 为时刻, n 为输入数据, n' 为输出数据,数字表示采样点。图 8 中,在输入数据长度小于滤波窗口时,输入数据直接输出到输出数据中,当到达滤波长度时,开始滤波。双核处理器和数据采集板之间的通信长度设为 64 个点,即每次数据更新长度。在 T_1 时刻,滤波完成后,将数据作为输出数据输出;等待下一包 64 个点数据的到达,在 T_2 时刻,将旧的数据即 $N = n_0, \dots, n_{63}$ 丢弃,并将新到达的数据放在输入队列的后面,然后进行小波滤波,完成后将新数据即 $n'_{256} \sim n'_{319}$ 输出到输出数据中,以此类推,每个滤波时刻,只需将滤波窗口移动一个固定的长度即 64 即可。

由于每个时刻点数据的更新点为 64 个点,周期为 $19.26 \times 64 = 1232.64 \mu\text{s}$,而 DSP 的实时去噪处理时间为 $1200 \mu\text{s}$ 左右,故满足数据的更新要求,实现了数据的满吞吐

量工作。

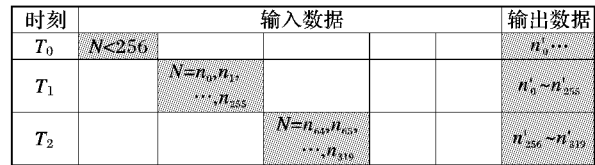


图8 滑动窗口滤波示意图

4 实验结果

数据的吞吐率(Throughput Rate, TR)为实时去噪的一个重要参数,定义为每秒钟去噪数据点数,TR 越大,表明数据的实时性更好,处理能力更强。而根据以上分析,在 DSP 中,滤波即为卷积,小波基的表现形式都是一样,即为 8 个 Q.15 的数据,故采用哪种阈值算法表现形式一样,而只与分解和重构的层数有关,所以本文只实测了采用 DB4 的不同层数(1~5)的数据去噪平均时间以及相应的 RMSE 和 SNR,如表 2 所示。

表2 PEC 不同层数的去噪平均时间以及相应的 RMSE 和 SNR

小波去噪层数	DB4 去噪 平均时间单位/ μs	RMSE	SNR/dB
1	452	0.2510	10.2100
2	678	0.2011	15.3120
3	890	0.1524	17.2210
4	987	0.1440	19.9438
5	1050	0.1422	21.7860

注:以上测试数据为 100 次平均值。

从表 4 的信号去噪平均时间可以看出,小波去噪在 3 层和 4 层时,信号的去噪处理在时间和去噪效果上综合是最优的,其 RMSE 接近于 0.14,此时的 SNR 为 19 dB 左右。按照改进实时固定滑动窗口的算法数据的处理延时为 $1000 \mu\text{s}$ 左右,那么每个点的等效去噪时间为 $1000/64 = 15.625 \mu\text{s}$,等效的数据吞吐率为 64 kHz($> 51 \text{ kHz}$),满足了 A/D 采集的满负载的吞吐率。

5 结语

根据连铸工业现场 PEC 噪声,本文提出了基于异构双核处理器 OMAP3530 的实时小波去噪方法。讨论了噪声来源,并根据实时去噪要求分析了小波基的选择方法。在 Matlab 中对脉冲涡流信号进行了基于 DB4 的 Penalty 阈值法、B-M 阈值法、默认阈值法等 Matlab 去噪,验证了 DB4 小波去噪效果。在此基础上,设计了基于 OMAP3530 的实时小波去噪平台软硬件系统,介绍了双核异构核的通信机制,提出了一种改进的固定滑动窗口实时滤波方法,提高了系统的实时性和数据吞吐率。通过仿真与实验证明此平台在 3 层到 4 层时去噪达到最优,信噪比为 19 dB,数据平均吞吐率为 51 kHz,满足了连铸现场自动检测的实时性、高吞吐率、稳定可靠性、抗干扰能力等要求。

参考文献:

- [1] 欧阳奇, 张敏, 赵立明. 基于脉冲涡流技术的连铸坯表面缺陷检测[J]. 中国机械工程, 2010, 21(10): 1235-1239.
- [2] OU Y Q, ZHANG L Z, ZHAO L M, et al. A method study of recognizing the defect type for the continuous casting slab by pulsed eddy current[J]. Advanced Materials Research, 2011, 233/234/235: 2424-2427.

- [3] SOLEIMANI M, LIONHEART W R B, PEYTON A J, *et al.* A three dimensional inverse finite element method applied to experimental eddy current imaging data[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2006, 12(5): 1560–1567.
- [4] MEILLAND P, METZ M. Novel multiplexed eddy current array for surface crack detection on rough steel surface[EB/OL]. [2010-10-10]. <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.4.8.1.pdf>.
- [5] 贾慧明, 范弘, 张克, 等. 1100℃以上高温连铸板坯表面缺陷的模拟在线无损检测[J]. 钢铁研究学报, 1994, 6(1): 81–86.
- [6] 陈德智, 唐磊, 盛剑霓, 等. 由小波变换的模极大值快速重构信号[J]. 电子学报, 1998, 26(9): 82–85.
- [7] 周德强, 田贵云, 王海涛, 等. 小波变换在脉冲涡流检测信号中的应用[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(10): 115–117, 120.
- [8] SOPHIAN A, TIAN G Y, TAYLOR D, *et al.* A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed eddy current NDT[J]. NDT & E International, 2003, 36(1): 37–41.
- [9] YANG B F, LUO F L, HAN D. Research on edge identification of a defect using pulsed eddy current based on principal component analysis[J]. NDT & E International, 2007, 40(4): 294–299.
- [10] 王俊英, 朱目成. 基于小波变换的脉冲涡流信号降噪[J]. 制作业自动化, 2011, 33(4): 61–64.
- [11] 彭学文, 付跃文. 脉冲涡流检测信号的消噪处理[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(16): 3715–3719.
- [12] MA X, PEYTON A J. Feature detection and monitoring of eddy current imaging data by means of wavelet based singularity analysis[J]. NDT & E International, 2010, 43(8): 687–694.
- [13] 赵君, 刘卫国, 谭博. 永磁同步交流牵引系统准实时小波降噪研究[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(6): 926–932.
- [14] XIA R, MENG K, QIAN F. Online wavelet denoising via a moving window[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(9): 897–901.
- [15] 张力, 刘正熙. ARM 与 DSP 之间视频数据可靠传输的设计与实现[J]. 计算机应用, 2009, 29(S2): 198–200.
- [16] 仇洁婷, 陈儒军, 何展翔, 等. Linux2.6 内核下同步串行通信驱动的开发与应用[J]. 计算机应用, 2010, 30(3): 850–853.
- [17] 鲍可进, 姚成. 基于双核数字信号处理器的人脸识别门禁系统[J]. 计算机应用, 2010, 30(9): 2553–2555, 2558.
- [18] 蒋建春, 曾素华, 岑明. 一种基于异构双核处理器的嵌入式操作系统构架设计[J]. 计算机应用, 2008, 28(10): 2686–2689.
- [19] 周天一, 徐剑, 李海森, 等. 基于 OMAP3530 的声/光一体化成像系统[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 2115–2119.
- [20] 曾启明, 廖江海, 纪震. 基于 OMAP3530 的多参数监护仪设计[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2010, 27(2): 247–252.
- [21] DAUBECHIES I. 小波十讲[M]. 李建平, 杨万年, 译. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [22] MALLAT S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674–693.
- [23] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613–627.
- [24] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425–455.

(上接第 848 页)

6 结语

针对基本遗传算法求解高维背包问题易于陷入局部最优状态, 本文结合生物免疫系统的克隆选择原理, 提出一种克隆选择免疫遗传算法。通过不同高维的背包问题测试算法的性能, 统计分析结果表明, 本文算法对于求解高维背包问题凸显其优越性, 但算法执行效率有待提高, 接下来需进一步改进算法提高其执行效率, 降低算法计算复杂度。

参考文献:

- [1] LIU H Y, NIE S Z. Solving the 0-1 knapsack problem with polynomial-time quantum algorithm[C]// Proceedings of the Communications in Computer and Information Science. Berlin: Springer, 2012: 377–384.
- [2] 王娜, 向凤红, 毛剑琳. 改进的自适应遗传算法求解 0-1 背包问题[J]. 计算机应用, 2012, 32(6): 1682–1684.
- [3] 马炫, 刘庆. 求解多背包问题的人工鱼群算法[J]. 计算机应用, 2010, 30(2): 469–471, 494.
- [4] SINGH R P. Solving 0-1 knapsack problem using genetic algorithms[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Communication Software and Networks. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 591–595.
- [5] ZHONG Y H, NIE S Z. Polynomial-time quantum algorithms for the 0-1 knapsack problem[J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2012, 4(5): 510–512.
- [6] 田建立, 晁学鹏. 求解 0-1 背包问题的混沌遗传算法[J]. 计算机应用研究, 2012, 28(8): 2838–2839, 2879.
- [7] WANG R, GUO N, XIANG F H, *et al.* An improved quantum genetic algorithm with mutation and its application to 0-1 knapsack problem[C]// Proceedings of 2012 International Conference on Measurement, Information and Control. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 484–488.
- [8] BASU S K, BHATIA A K. A naive genetic approach for non-stationary constrained problems[J]. Soft Computing, 2006, 10(2): 152–162.
- [9] SIMOES A, COSTA E. Improving the genetic algorithm's performance when using transformation[C]// Proceedings of the Sixth International Conference on Neural Networks and Genetic Algorithms. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2003: 175–181.
- [10] SIMOES A, COSTA E. An immune system-based genetic algorithm to deal with dynamic environment: diversity and memory[C]// Proceedings of the Sixth International Conference on Neural Networks and Genetic Algorithms. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2003: 168–174.
- [11] 王则林, 吴志健. 格雷码混合遗传算法求解 0-1 背包问题[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(8): 2906–2908.
- [12] BORRADAILE G, HEERINGA B, WILFONG G. The knapsack problem with neighbour constraints[J]. Journal of Discrete Algorithms, 2012, 16: 224–235.
- [13] 王晓东. 计算机算法设计与分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [14] 钱淑渠, 武慧虹, 涂歆. 动态免疫优化算法及其在背包问题中的应用[J]. 计算机工程, 2011, 37(20): 216–218, 222.