

核电现场超声无损检测数据压缩^①

尹云¹, 刘波峰¹, 徐勇¹, 肖湘², 林卉¹, 李伟¹

¹(湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082)

²(中核武汉核电运行技术股份有限公司, 武汉 430223)

摘要: 在核电现场超声无损检测过程中, 由于检测范围广, 探头多, 海量原始数据被保存下来。因此设计数据压缩系统对超声无损检测在核电现场的应用起着重要的作用; 文中对现有数据压缩方法进行了研究, 提出了将待压缩的信号从一维空间转移到二维空间, 然后进行二维小波变换压缩, 实现了二维空间信号内和信号间的压缩。并与一维空间压缩的信号进行比较分析, 试验结果证明了该方案中压缩算法的有效性。

关键词: 超声无损检测; 小波变换; 数据压缩

Data Compressing in Nuclear Power Ultrasonic Nondestructive Detection

YIN Yun¹, LIU Bo-Feng¹, XU Yong¹, XIAO Xiang², LIN Hui¹, LI Wei¹

¹(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

²(China Nuclear Power Operation Technology Corporation. Ltd, Wuhan 430223, China)

Abstract: In nuclear power Ultrasonic nondestructive detection, because of the wide detection range and more probes, the amount of the acquired data are reserved. Therefore, the design of data compression system plays an important role in ultrasonic nondestructive detection application in nuclear power. Methods of existing data compression are studied. Transferring the signal to be compressed from the one-dimensional space to two-dimensional space are presented. And then it carries out two-dimensional wavelet compression, realizes the two-dimensional signal and spatial signals compression. It analyses and compares with a one-dimensional compression of the signal. Experimental results prove that this scheme of the algorithm is effective.

Keywords: ultrasonic nondestructive detection; wavelet; data compressing

在超声无损检测过程中, 由于超声探头数量多、采样频率高, 海量的检测数据被保存下来。而这些数据蕴藏了丰富的信息, 其对于被测物件的缺陷识别、数据挖掘具有重要的意义。但是由于数据量庞大, 数据以原型的形式长期保存下来需要大量的存储空间, 因此研究适合工程实际的数据压缩方法、降低海量数据中存在的冗余已成为无损检测的迫切需求。

基于小波变换的数据压缩方法在超声无损检测方面的应用已得到广泛研究。文献[1]采用小波变换实现数据的压缩, 压缩比率较低, 仅为 1.05; 文献[2]采用

小波变换和自适应算术编码相结合的方法对超声检测中大容量数据压缩算法进行研究; 文献[3]比较几种压缩方法的优缺点, 提出了采用小波变换、子带均匀量化和 LZW 编码的压缩算法在一定的程度上提高了压缩比。但这些压缩算法均是在一维空间对数据进行分析处理的。而超声检测数据的冗余分为 2 类, 即数据内的冗余和数据间的冗余, 如果只在一维空间对原始数据进行压缩处理, 数据内的冗余可以被高效降低, 而对于数据间的冗余则不是很有效。

为了进一步提高数据的压缩比, 本文研究了基于

① 基金项目: 国家核能开发项目(B030206)

收稿时间: 2010-07-29; 收到修改稿时间: 2010-08-27

二维小波变换的数据压缩算法。基本思想是首先将待压缩的数据从一维空间转换到二维空间，然后进行二维小波分解。由于二维小波分解的行列变换可以同时降低数据内和数据间的冗余，因此可以提高压缩效率。本文采用了某核电站提供的超声检测数据进行了超声检测数据压缩的研究。

1 超声无损检测原理

通常人耳能够听到的声波的频率范围在 20~20KHz 之间，而把频率超过 20KHz 的声波称为超声波。超声波本质上是一种机械波，产生依赖两个条件，一是有能够传播振动的弹性介质，二是有做机械振动的声源，而应用于超声无损检测的波有纵波，横波和表面波等。超声无损检测则是利用超声波在被测物件中传播时遇到不同声阻抗的两种介质的交界面，在界面处会产生反射、折射、衍射和波型转换等现象，来判断被测物件内部质量的一种重要的无损检测方法。超声无损检测可分为穿透法和反射法两类。穿透法是在被测物件相对两侧各放一个探头，其中一个向被测物件内发射超声波，另一个接收超声波。反射法需要采用一个既收又发的探头进行检测。两种方法都是根据接收信号的强弱来判断被测物件是否存在缺陷，缺陷波在时基轴上的位置根据声波传播特性可以确定缺陷在工件中的位置^[4]。本文采用纵波进行反射法无损检测。

2 小波变换

2.1 一维小波变换

小波是一个满足条件 $\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t)dt=0$ 的函数通过平移和伸缩而产生的一族小波函数 $\Psi_{a,b}(t)$ ，可用公式表示为：

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{1}$$

式中， $a, b \in \mathbf{R}$ ， $a \neq 0$ 。 a 为尺度因子， b 为平移因子。对于任意的一个函数 $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$ ，其连续小波变换(或积分小波变换)可定义为：

$$WT_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \tag{2}$$

式中， $a \neq 0$ 、 b 、 t 均为连续变量， $\overline{\Psi(x)}$ 表示 $\Psi(x)$ 的复共轭。

信号也可以由它的小波变换重构，其重构公式为：

$$f(t) = \frac{1}{C_{\Psi}} \iint \frac{1}{a^2} WT_f(a,b) \Psi_{a,b} da db \tag{3}$$

其离散化小波族可以写成：

$$\Psi_{j,k} = 2^{j/2} \Psi(2^j t - k) \tag{4}$$

相应地，离散小波变换可以写成：

$$WT\left(\frac{1}{2}, \frac{k}{2}\right) = f(t) \{2 \Psi(2t - k)\} dt \tag{5}$$

2.2 二维小波变换

对于任意的一个函数 $f(x,y) \in L^2(\mathbf{R}^2)$ ，其二维小波函数 $\psi(x,y)$ 满足条件：

$$\iint \psi(x,y) dx dy = 0 \tag{6}$$

则积分

$$(Wf)(a,b_1,b_2) = \frac{1}{a} \iint f(x,y) \overline{\Psi\left(\frac{x-b_1}{a}, \frac{y-b_2}{a}\right)} dx dy \quad a \neq 0 \tag{7}$$

称为 $f(x,y)$ 的二维连续小波变换。

取 $a=2$ ， $b_1=2^j k$ ， $b_2=2^j n$ ，则可得二维离散型小波变换

$$(Wf)(j,k,n) = \frac{1}{2^j} \iint_{\mathbf{R}^2} f(x,y) \overline{\Psi(2^{-j}x - k, 2^{-j}y - n)} dx dy \tag{8}$$

3 数据压缩

数据压缩的基本理论和压缩技术种类繁多、应用广泛，并正处于不断发展之中，有些分支还是当今研究的热点前沿。按照编码失真程度来分类，数据压缩主要有有损压缩和无损压缩两个分支。本文采用的二维小波变换的压缩方法是一种有损压缩。

3.1 小波变换数据压缩原理

小波变换的数据压缩原理是通过将信号分解为多个尺度，在每个尺度上，将对应的高频系数进行阈值量化处理，保存与信号相关的小波变换系数而抛弃与信号无关的小波变换系数值，从而实现压缩。其压缩步骤如图 1 所示，可分为信号的小波分解、高频系数的阈值量化处理以及对量化后的系数小波重构^[5]。



图 1 基于小波变换的压缩解压流程图

3.2 压缩与重构性能指标

数据压缩的指标可以从两个方面去考虑：压缩比和失真率。压缩比(R_c)定义为待压缩信号长度(N_0)与压缩后信号长度(N)的比值，如公式(9)所示。压缩比越大，

表示压缩效果好。

$$R_c = \frac{N_c}{N} \tag{9}$$

失真率反应了重构信号的恢复状况,失真率越小,说明压缩效果越好。设原始数据为 $S(n)$, 重构后数据为 $s(n)$,则失真率 M 为^[6]:

$$M = \frac{\|S(n) - s(n)\|_2}{\|S(n)\|_2} = \frac{\sqrt{\sum_N (S(n) - s(n))^2}}{\sqrt{\sum_N S^2(n)}} \tag{10}$$

4 超声检测数据压缩试验和分析

本文从核电现场超声检测所得数据中任取 60 组数据, 每组数据 1000 个采样点进行 Matlab 仿真试验分析。

4.1 二维小波变换数据压缩

二维小波变换数据压缩的实现步骤:

第一步: 将信号从一维空间转换到二维空间。本文采用的方法是将采样的数据放到矩阵中作为矩阵一列, 这样不仅有利于数据内的分解, 而且矩阵在列方向上的变化也将非常平稳。又因每列采样点数为 1000, 所以形成的二维矩阵在行方向和对角线方向上的变化也将比较平稳。由于二维矩阵可以看作是图像的数字表示, 因此也就形成了一幅平滑的图像。图 2 给出了所选的 60 组一维空间数据转换到二维空间的原始信号灰度图。

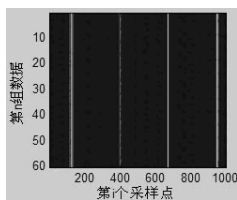


图 2 二维空间原始信号图

第二步: 进行小波分解。在小波分解过程中小波基的选取起着重要作用, 关系到数据压缩的效果以及是否能够还原信号特征。小波变换是用一系列的小波函数去逼近某个信号的过程, 其实质是分析信号在各频段上的分量与小波函数系的相似程度。因此必须根据所要分析的信号波形来选择小波基。一般从小波基的正则性, 正交性, 支撑集, 消失矩阶数四个方面考虑来选取合适的小波基。其中, 正交性、对称性和紧支撑性是选择小波基时最基本的参考要素, 但这三个

参考要素不能同时具备。另外, 希望分解后的小波系数尽量集中, 这就要求分解小波基具有尽可能高的消失矩阶; 压缩重构时, 量化误差造成的影响尽可能平滑, 这就要求重构小波具有尽可能高的正则性。目前应用比较多的小波有 Daubechies 小波、Morlet、Charri 和 B 样条小波等小波。Daubechies 小波具有紧支撑, 它的滤波器系数和 B 样条小波一样具有对称性, 同时 Daubechies 小波基保留了正交小波频带间相干性好的优点, 从而各个尺度上的小波系数之间基本上没有冗余信息, 而且它对不规则信号较灵敏。Daubechies 小波是一小波系列, 即通常所说的 DbN 小波($N \geq 1$, N 为正整数)。随着支集长度 N 的增加, 小波的分频能力会明显地增强, 但计算量也同时增大^[5]。本文综合分析各方面的要素后, 采用基本小波 $Db3$ 对信号进行 3 层小波分解。二维小波分解就是将图像作多尺度分解, 其 3 层分解过程如图 3 所示。即将图像分解为低频信息 L 和 高频信息 H , 然后分解低频信息 L 为低频部分 $LL1$ 和其高频信息 $LH1$; 对高频信息 H 分解为 $HL1$ 和 $HH1$, 反复该过程实现图像的多尺度小波分解。

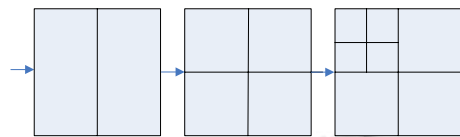


图 3 基于小波变换的图像三层分解

第三步: 对高频系数进行阈值量化处理。对高频系数阈值量化处理的方法有硬阈值法和软阈值法。则信号 s 的硬阈值表达式为(其中 λ 为阈值):

$$s = \begin{cases} x & |x| \geq \lambda \\ 0 & |x| < \lambda \end{cases} \tag{11}$$

信号 s 的软阈值表达式为:

$$s = \begin{cases} \text{sign}(x)(|x| - \lambda) & |x| \geq \lambda \\ 0 & |x| < \lambda \end{cases} \tag{12}$$

这两种方法得到了广泛的应用, 也能得到较好的效果。但是这两种方法本身也存在一定的缺陷。硬阈值由于其在 $\pm \lambda$ 处不连续会引起重构信号产生附加振荡。而软阈值法当 $|x| \geq \lambda$ 直接影响重构信号和真实信号的逼近程度。鉴于上述缺陷本文采用了一种软硬阈值折中的方法。其信号 s 的表达式为:

$$s = \begin{cases} \text{sign}(x)(|x| - \frac{\lambda}{2e^{\frac{a|x|}{\lambda}} - 1}) & |x| \geq \lambda \\ 0 & |x| < \lambda \end{cases} \quad \text{其中 } a > 0 \tag{13}$$

当 a 趋于 0 时为信号 s 的软阈值表达式, 当 a 趋向于 ∞ 时为信号 s 的硬阈值表达式。其中 λ 的取值由 Donoho 给出的 $\lambda = \sigma\sqrt{2\log(N)}$ 所得。其中 N 为信号的大小。

第四步: 对量化后的系数进行小波重构, 得到压缩后的图像。压缩后图像如图 4 所示。

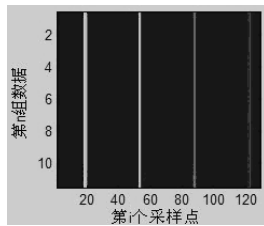


图 4 压缩后的二维空间信号图

从压缩后的 60 组数据任意抽取 2 组数据, 其在一维空间的信号图如图 5 所示。

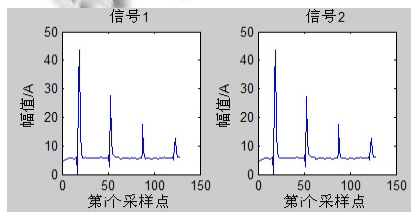


图 5 二维空间压缩后信号的一维空间图

4.2 一维小波变换数据压缩

对上述任意抽取的 2 组数据的原始进行一维小波压缩试验。其原始信号图如图 6 所示。

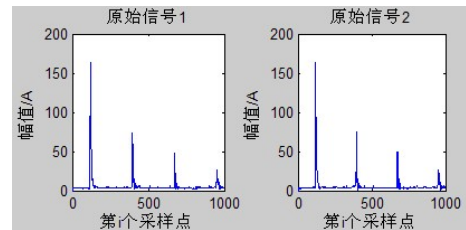


图 6 原始信号图

采用上述的小波基和阈值对其进行一维小波压缩, 所得压缩后的信号如图 7 所示

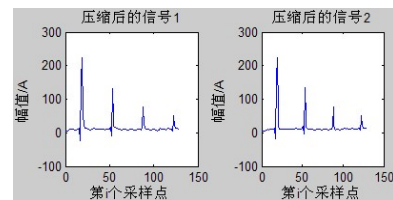


图 7 一维小波变换信号压缩图

4.3 试验结果分析

数据压缩和重构性能指标如表 1 所示。

表 1 压缩性能对照表

| 参 数 | 压缩方法 | | 一维小波变换 | | | 二维小波变换 | | |
|---------------|-------------------------|-------------------------|--------|-------------------------|-------------------------|--------|--|--|
| | 信号 1 | 信号 2 | 60 组信号 | 信号 1 | 信号 2 | 60 组信号 | | |
| 原始数据长度 (字节) | 8000 | 8000 | 480000 | 8000 | 8000 | 480000 | | |
| 压缩后数据长度 (字节) | 1032 | 1032 | 61920 | 1032 | 1032 | 11352 | | |
| 压缩比 (R_c) | 7.75 | 7.75 | 7.75 | 7.75 | 7.75 | 42.28 | | |
| 失真率 (M) | 1.1846×10^{-5} | 1.1684×10^{-5} | — | 1.1767×10^{-5} | 1.1606×10^{-5} | — | | |

通过图表比较分析可知, 基于二维小波压缩的总体压缩比约为 42.28, 压缩后的信号比较平滑, 压缩后单一信号压缩比和重构后信号失真率相对于一维小波压缩没有明显变化。而一维小波变换压缩后信号的总体压缩比仅为 7.75。从而基于二维小波压缩相对于基于一维小波压缩的优势在于其对于降低数据间的冗余

更为有效, 大大提高了信号的压缩比, 减少了总体数据的储存空间。试验表明基于二维空间的小波变换在处理一维空间信号方面具有较大的应用潜力。

5 结论

本文在现有超声检测数据压缩算法的基础上, 提 (下转第 49 页)

定时器中计数超值值的设置可以控制系统的反应灵敏度。

图 7 是采集步进电机的 QEP 脉冲获取电机的位置信息的 Labview 平台。

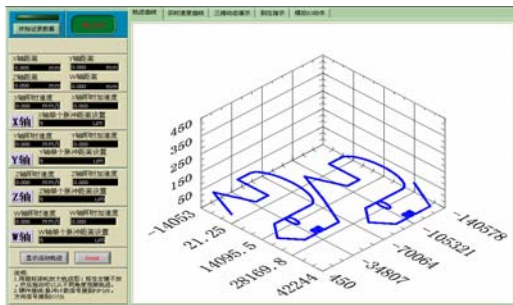


图 7 运动位置轨迹采集平台

5 总结与展望

实验证明：采用 GP 触摸屏作为开放式运动控制器的人机界面，具有直观、简洁、鲜明的特点，控制器能够稳定迅速的对触摸屏的命令做出正确的响应。当前，人机界面技术已经应用于更广泛的领域，渗透到了生产与生活的每个细节中去，成为现代化的潮流、人性化的体现。我们的 GP 触摸屏还有很大的开发空间，可以进一步增强它对数控系统的操作控制和相关数据的图形显示功能，并有良好的可移植性，能够应

用于其它的自动化设备系统中去，实现更可靠有效的人机信息交互。

参考文献

- 1 周竞. 数控机床的应用与发展. 装备制造, 2010, (4): 131-132.
- 2 朱毅然. 数控机床控制面板设计中的人机界面研究[硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- 3 季鑫源. GP 触摸屏扩展串口通信设计. 现代电子技术, 2010, (5): 145-146.
- 4 李喜东, 刘波涛, 刘刚. ModbusRTU 串行通讯协议在工业现场的应用. 自动化技术与应用, 2005, 24(7): 37-40.
- 5 崔鹏. 基于 MODBUS 协议智能控制系统设计. 山西电子技术, 2010, (3): 24-25.
- 6 Modbus over serial line specification & implementation guide V1.0. [2004-10-11]. <http://www.Modbus-IDA.org>
- 7 徐凤亮, 王宜怀. 嵌入式 Modbus/TCP 网关的设计与实现. 电子技术应用, 2010, (3): 104-106.
- 8 MARWEDEL P. Embedded System Design. 北京: 科学出版社, 2007.
- 9 文小玲, 余飞, 等. 基于 Modbus 协议的串口通信软件设计. 湖南工业大学学报, 2008, 22(6): 100-102.

(上接第 121 页)

出并设计了适用于超声检测数据的二维小波压缩方案。利用实际获取的核电站超声检测数据对算法进行了验证，试验结果证明了该方案中压缩算法的有效性。同时，对一维和二维小波压缩算法进行了对比分析，结果表明了二维小波压缩效率高，适合工程应用，有助于进一步推动超声检测技术的应用，同时也适用于其他检测技术海量数据的压缩与存储。

参考文献

- 1 Cardoso G, Saniie J. Data compression and noise suppression of ultrasonic NDE signals using wavelets. IEEE ultrasonics sympos-jum, 2003: 250-253.
- 2 闫浚, 阙沛文. 管道超声检测系统中数据压缩算法的实现. 计

算机测量与控制, 2007, 15(6): 717-719.

- 3 张维蕴. 超声检测信号压缩算法的研究[硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2005.
- 4 李雪. 超声检测系统中信号降噪算法与缺陷的人工神经网络识别方法的研究与实现[硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- 5 郭彬彬. 小波分析在电能质量扰动信号去噪与数据压缩中的应用[硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- 6 费铭微, 乐全明, 张沛超, 郁惟镛, 王忠民, 章启明, 周岚. 电力系统故障录波数据压缩与重构小波基选择. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 64-67, 97.