

# 基于多幅连续相关法的超声检测信号的缺陷识别技术

任明照, 黄永巍, 高东海

(中国铁道科学研究院 金属及化学研究所 无损检测事业部, 北京 100081)

**摘要:**相关法是时域中描述信号相似性特征的一种常用分析方法。文章基于数字相关法, 针对超声检测中的大量检测回波信号, 提出了一种多幅连续相关的处理方法, 以实现超声检测信号的缺陷追踪与识别, 并在实际检测试验中采用该方法对 A 型扫查的大量超声自动化检测信号进行处理, 不仅有效地排除了随机干扰, 同时保留了缺陷信号的完整信息, 缺陷识别稳定、快速, 识别准确率可达 90% 以上。

**关键词:**超声检测; 相关法; 缺陷识别

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2012)04-0038-04

## Defect Recognition of Ultrasonic Testing Signals Based on Multi-Frame Correlation

REN Ming-Zhao, HUANG Yong-Wei, GAO Dong-Hai

(China Academy of Railway Sciences, Metals and Chemistry Research Institute,  
Nondestructive Test Department, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Correlation is a useful method to describe the similarity between signals in time domain. Based on digital correlation, a new method of multi-frame correlation is introduced to process large amount of inspection signals and complete defect recognition in the experiment of ultrasonic testing, and in this process, the multi-frame correlation method not only eliminates the random disturbing signals, but also acquires a high correct rate beyond 90% of defect recognition.

**Keywords:** Ultrasonic testing; Correlation; Defect recognition

超声波检测是根据超声波在被检工件中传播时, 遇到工件内部的缺陷阻碍而产生超声波的反射、透射、衍射等物理现象, 来推断缺陷及其特征的一种无损检测方法, 是现行的五大常规无损检测方法之一, 在目前工业检测领域应用非常广泛。超声波检测的缺陷识别技术一直以来都是该领域研究的难题和热点, 为此国内外的研究人员开展了大量的工作, 进行缺陷识别技术的研究。

现行大多数超声检测仪器的缺陷识别主要靠检测人员来完成, 通过设置波高闸门, 获取缺陷回波幅度与声程等方面的信息, 再结合检测人员的专业知

识和经验, 对缺陷回波做出判定。这种缺陷识别过程完全依赖于检测人员, 受其专业知识、技能和经验等主观因素影响很大, 而且效率非常低, 不利于大批量超声波检测的过程。为此, 国内外研究工作者开展了大量的缺陷识别技术研究, 越来越多的新技术被引入到这个领域, 如小波变换、人工神经网络<sup>[1-2]</sup>等, 应用到焊缝、管道等被检工件的缺陷识别与分类, 取得了一定的效果。

笔者从超声波检测回波信号的时域特性入手, 根据高速检测中缺陷回波在连续多次检测信号中都具备很强的相似性, 提出了一种多幅连续相关的方法, 从大量的超声检测回波信号中追踪与识别缺陷回波信号。区别于常见的单幅或少量几幅超声检测信号的时域和频域处理方法, 多幅连续相关法有效利用了缺陷多次检测的大量信息, 并在这个基础上

收稿日期: 2011-11-07

作者简介: 任明照(1979—), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事超声检测信号处理、超声自动化检测系统和超声信号处理软件开发。

为缺陷的识别提供了相关系数和缺陷回波序列长度等有力判据,确保了缺陷识别的高准确率。

## 1 数字相关法简介

在信号处理中经常要研究两个信号的相似性,或一个信号经过一段延迟后自身的相似性,以实现信号的检测、识别与提取等,相关法就是为此而提出,用来描述信号的相似性的重要方法。相关法不仅在抑制随机干扰、提高信噪比<sup>[3]</sup>等方面是一种行之有效的手段,而且在信号识别等方面有着广泛的应用。

相关法有两个重要的统计量,分别是相关函数和相关系数<sup>[4]</sup>。考虑到现今多数情况下的信号处理工作都是通过计算机来完成的,所涉及到的信号都是离散的数字信号,对连续域中的模拟信号的处理一般也是先经过抽样,使其成为数字信号,再输入计算机进行处理,因此笔者简单介绍一下离散的数字信号的相关函数与相关系数的定义。

设  $x(n)$ ,  $y(n)$  是两个能量有限的确定性信号,并考虑到实际工作中处理的都是有限长信号,所以假定信号  $x(n)$  序列长为  $N_1$ , 信号  $y(n)$  序列长为  $N_2$ 。同时由于信号处理的过程几乎都是在计算机内完成的,  $x(n)$ ,  $y(n)$  的下标  $n$  不能为负数,要求它们是因果信号,即:

$$\begin{cases} x(n) & n = 1, 2, \dots, N_1 \\ y(n) & n = 1, 2, \dots, N_2 \end{cases}$$

定义  $x(n)$  和  $y(n)$  的互相关函数为:

$$r_{xy}(m) = \sum_{n=1}^{N_1+N_2+1} x(n)y(n+N_2-m) \quad (1)$$

式中  $m=1, 2, \dots, N_1+N_2+1$

$$\begin{aligned} x(n) & \begin{cases} x(n) & n = 1, 2, \dots, N_1 \\ 0 & n = N_1 + 1, \dots, N_1 + N_2 + 1 \end{cases} \\ y(n) & \begin{cases} y(n) & n = 1, 2, \dots, N_2 \\ 0 & n = N_2 + 1, \dots, N_1 + N_2 + 1 \end{cases} \end{aligned}$$

相当于给  $x(n)$  补  $N_2-1$  个零, 给  $y(n)$  补  $N_1-1$  个零, 将它们的长度都扩充到  $N_1+N_2-1$ 。

有了相关函数的定义, 很容易得到  $x(n)$  和  $y(n)$  的相关系数的定义如下:

$$\rho_{xy}(m) = \frac{r_{xy}(m)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N_1} x^2(n)} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{N_2} y^2(n)}} \quad (2)$$

式中  $m=1, 2, \dots, N_1+N_2+1$ 。

式(1)和式(2)中的  $r_{xy}(m)$  和  $\rho_{xy}(m)$  都是长度

为  $N_1+N_2-1$  的一维序列, 在进行相关性分析时一般会选取它们的最大值  $r_{\max}$  和  $\rho_{\max}$  作为特征值, 来描述序列  $x(n)$  和  $y(n)$  的相关性。根据许瓦兹(Schwarz)不等式可以证明  $|\rho_{xy}(m)| \leq 1$ , 因此  $\rho_{xy}(m)$  又称归一化的相关系数。当  $x(n)=y(n)$  时,  $\rho_{\max}=1$ , 两个信号完全相关(相等); 当  $x(n)$  和  $y(n)$  有某种程度的相似时,  $\rho_{\max}$  在  $-1 \sim 1$  之间取值。笔者将以相关系数序列  $\rho_{xy}(m)$  的最大值  $\rho_{\max}$  作为特征值, 来进行缺陷回波的追踪与识别。

## 2 多幅连续相关法

多幅连续相关法是以数字相关法为基础, 根据缺陷回波的固定特性, 以相邻两次检测信号中缺陷回波的相关系数为特征值, 来追踪和识别缺陷回波的方法。

### 2.1 应用基础

多幅连续相关法是建立在大量的超声检测数据基础上的, 特别是对于连续扫查和自动化检测。以超声波直探头为例, 在进行超声波 A 型检测中, 当超声波探头以一定速度  $v$  平稳地扫查过被检工件表面, 若探头扫过的区域对应的工件内部存在缺陷, 缺陷在探头检测方向上的有效反射长度为  $l$ , 如图 1 所示, 那么在扫查过程中, 探头中心落在缺陷上的时间  $\Delta t$  为:

$$\Delta t = \frac{l}{v} \quad (3)$$

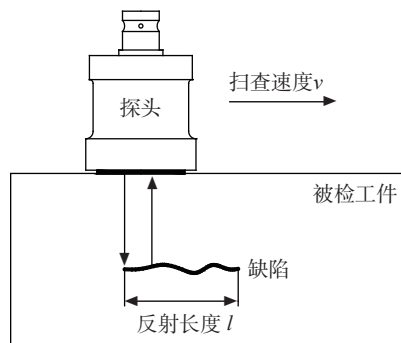


图1 超声波探头扫查工件

在  $\Delta t$  内连续采集到的检测回波帧数  $n_f$  由超声波检测仪器的重复频率  $f_h$  和  $\Delta t$  决定:

$$n_f = f_h \cdot \Delta t = f_h \cdot \frac{l}{v} \quad (4)$$

根据这个检测过程, 很容易得到以下结论:

(1) 在  $\Delta t$  时间内, 探头采集到的检测回波, 每一帧都包含缺陷回波。

(2) 在  $\Delta t$  时间内采集的检测回波中, 任意相邻

的两次检测回波中的缺陷回波在位置、形状上都有很强的相关性。

(3) 在有效检测到缺陷回波的  $\Delta t$  内,采集的检测回波帧数  $n_f$  越大,相邻两次检测回波中的缺陷回波的相关性越强。

上面三点充分说明了缺陷回波在连续多次检测信号中的固定特性,多幅连续相关法正是建立在这个基础上。

## 2.2 计算步骤

以 2.1 中的检测过程为例,探头在扫查被检工件的过程中,总共得到  $N_f$  帧检测回波,其中包含有效检测到缺陷回波的检测回波帧数  $n_f$ 。采用多幅相关法追踪与识别缺陷回波的步骤如下:

(1) 设定相关系数  $\rho_{\max}$  的阈值  $\rho_{\max}^t$ ,  $\rho_{\max}^t$  的取值与有效检测到缺陷的检测回波帧数  $n_f$  有关,当  $n_f$  越大,  $\rho_{\max}^t$  的取值可以越接近 1,一般取值在 0.8~0.95 之间。

(2) 检测回波预处理,搜索每帧检测回波中幅度值超过一定阈值的波峰,作为疑似缺陷回波,如图 2 中的粗线描绘的波峰区域,准备下一步处理。这里需要说明一下,搜索波峰时的幅度阈值取值一般在 20%~40%之间,其取值大小产生的影响见后文所述。

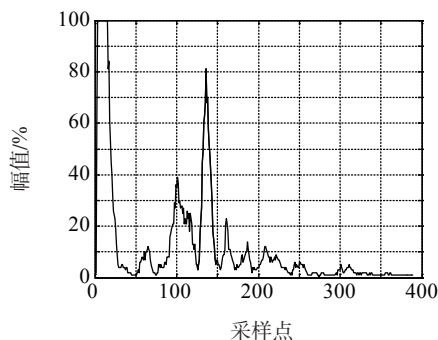


图 2 波峰搜索示意图

(3) 根据所需检测的声程范围,去掉掉落在检测范围外的波峰信号。在检测过程中,一般只需要考察一定声程范围内的缺陷回波,那么可以根据探头声速、零位校正偏移和采样频率计算出每个波峰信号对应的声程位置,判断其是否位于需要检测的声程范围之内,如果是则保留,否则删除掉该波峰信号。比如检测回波的始波,以及始波附近的探头固定波,都位于探头零位之前,不在检测范围之内,可以直接删除,减小后续处理的运算量。

(4) 以前面得到的波峰信号为处理对象,用

$\{W^k\}$  表示第  $k$  次检测波形的所有波峰的集合,用  $W_p^k$  表示第  $k$  次检测波形中的第  $p$  个波峰,用  $\{D_i\}$  表示搜索到的疑似缺陷集。以  $\{W^k\}$  的波峰  $W_p^k$  为缺陷追踪的起点,遍历第  $k+1$  次检测波形中的所有波峰  $\{W^{k+1}\}$ ,与  $W_p^k$  作相关系数运算,有以下两种情况:① 如果在  $\{W^{k+1}\}$  的所有波峰与  $W_p^k$  的相关系数  $\rho_{\max} < \rho_{\max}^t$ ,表明  $W_p^k$  是伪缺陷波峰信号,或者  $W_p^k$  已经是疑似缺陷波峰序列的尾部。② 如果找到  $\{W^{k+1}\}$  中与  $W_p^k$  的相关系数  $\rho_{\max} \geq \rho_{\max}^t$  的波峰  $W_q^{k+1}$ ,表明  $W_p^k$  和  $W_q^{k+1}$  可能是两次检测到的同一个缺陷的反射回波,将  $W_p^k$  和  $W_q^{k+1}$  作为一个缺陷回波序列,记录在缺陷集  $\{D_i\}$  中,如果缺陷集  $\{D_i\}$  已经有缺陷序列的尾部是  $W_p^k$ ,那么只需要将  $W_q^{k+1}$  加入这个缺陷序列,记录在  $W_p^k$  的后面,接下来  $W_q^{k+1}$  为缺陷追踪的起点,重复  $W_p^k$  的过程,直到出现第①条中的情况或搜索完全部检测波形。

(5) 对  $\{W^k\}$  中  $W_p^k$  后面的波峰,重复(4)中的过程,直到  $\{W^k\}$  中的所有波峰都曾作为缺陷追踪的起点被遍历到。

(6) 对  $\{W^k\}$  后面的波峰集合,重复(4)和(5)中的过程,直到全部检测波形都被处理完。

(7) 处理疑似缺陷集合  $\{D_i\}$ 。遍历  $\{D_i\}$  中的所有疑似缺陷序列,每个序列的长度代表着这个疑似缺陷被连续检测到的频次,频次越高越能反映缺陷的固定性质,因此可以设定缺陷序列长度的阈值  $F_d$ ,如果疑似缺陷序列的长度大于  $F_d$ ,可以判定为真实缺陷回波,否则,判为伪缺陷回波。

以上便是多幅相关法进行缺陷追踪与识别的全过程,其中(4)和(5)的运算过程相当于一个多叉树的遍历过程,算法复杂,运算量比较大。实际处理时从检测波形的第一帧的第一个波峰  $W_1^1$  开始,直到全部处理完毕。补充说明一点,计算步骤(2)中所述幅度阈值,当其取值较小时,搜索到的波峰会增多,加大后面的运算量,而追踪到疑似缺陷序列会加长,增加缺陷判定的可靠性;反之,会减小运算量,降低判定的可靠性。

## 3 多幅连续相关法的试验验证

由前面叙述可知,多幅相关法是建立在大量的检测数据上的,其中检测到缺陷回波的数据越多,后期缺陷追踪和识别的准确率就会越高,结果会越稳定。根据式(4),如果要增加检测到缺陷回波的数据  $n_f$ ,一是增加超声波检测仪器的重复频率  $f_b$ ,二是



减小扫查速度  $v$ 。在这里,笔者为了提高缺陷识别的准确率和稳定性,同时不降低检测效率,特地定制了一台多功能超声波探伤仪,它可以通过软件灵活调节重复频率  $f_h$ ,调节范围为 500~20 000 Hz。

以一个内部有自然裂纹缺陷的工件为检测对象,将多功能超声波探伤仪重复频率设置为 5 kHz,采用 2.5P6×8 的超声波双晶直探头 A 型检测方式,对工件内部的自然裂纹进行扫查。检测数据采用 DMA 的方式高速存入内存空间,以 Microsoft Visual C++ 6.0 为平台编写多幅相关算法软件,进行缺陷回波的追踪与识别,结果如表 1。

表 1 缺陷识别数据

参数	试验序号		
	1	2	3
相关系数阈值 $\rho_{\max}$	0.9	0.9	0.9
波形总数 $N_f$	340	337	336
疑似缺陷波峰序列长度 $n_f$	162	283	197
缺陷波峰序列长度阈值 $F_d$	20	20	20
缺陷判定	是	是	是

以表 1 中试验序号为 1 的一系列数据为例,用预设的相关系数阈值  $\rho_{\max}=0.9$  去处理全部 340 帧检测波形,追踪到一个疑似缺陷波峰的序列,长度为 162,远大于设定的缺陷波峰序列长度阈值  $F_d=20$ ,因此可充分判定该波峰序列为缺陷回波。图 3 是试验 1 中缺陷波峰序列前 8 次波峰,可以看出在连续检测中缺陷波峰的强相关性。

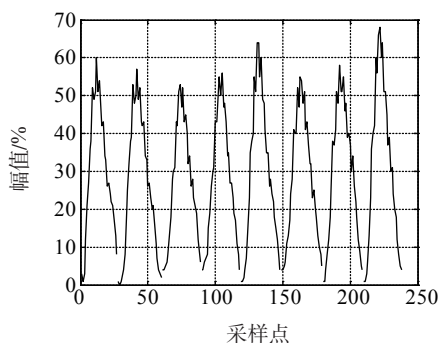


图 3 连续 8 次缺陷波峰序列

笔者通过大量的重复试验得出,采用多幅连续相关法对缺陷回波进行追踪时,合理地设置相关系数阈值  $\rho_{\max}$ ,可以有效去除噪声等随机干扰波,再结合设定的缺陷波峰序列长度阈值  $F_d$  进行判定,当检测过程平稳、检测到缺陷波的有效检测数据足够多时,缺陷识别的准确率可达到 90% 以上。

## 4 结语

针对 A 型扫查的大量超声检测数据,根据相邻两次检测数据中缺陷回波的强相关性,以数字相关法为基础,提出了一种多幅连续相关的方法,来追踪和识别缺陷回波。在缺陷识别过程中,将相关系数、缺陷波峰序列长度、检测声程等多个信息融合进行数据处理,不仅有效地去除了随机噪声干扰,而且在缺陷识别上取得了很高的准确率和可靠性。最后通过大量的检测试验,验证了多幅连续相关法的可靠性和准确率,取得了良好的效果。

## 参考文献:

- [1] 黄民,李功. 焊缝超声无损检测中的缺陷智能识别方法[J]. 北京信息科技大学学报, 2009, 24(2): 33—36.
- [2] 师小红,徐章遂,郭怡. 构件裂纹缺陷的超声识别[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(6): 556—558.
- [3] 李伟,罗雄彪. 基于相关技术的超声检测信号处理[J]. 无损检测, 2005, 27(6): 297—299.
- [4] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.



(上接第 37 页)

中产生新振动模式的概率。结果验证了其可简便可靠地评估桩基混凝土不同深度不同剖面的匀质性。

## 参考文献:

- [1] 吴新璇. 混凝土无损检测技术手册[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.
- [2] Daubechies I. The wavelet transform, time frequency localization and signal analysis[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1990, 36(5): 961—1005.
- [3] 陶新民,徐晶,杜宝祥,等. 基于小波域广义高斯分布的轴承故障诊断方法[J]. 机械工程学报, 2009, 10(45): 62—67.
- [4] 李强,王太勇,冷勇刚,等. 近似熵测度的自适应随机共振研究[J]. 物理学报, 2007, 12(56): 6803—6806.
- [5] 胥永刚,李凌均,何正嘉. 近似熵及其在机械设备故障诊断中的应用[J]. 信息与控制, 2002(6): 547—549.
- [6] Pincus S M. Approximate entropy as a measure of system complexity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 1991, 88(6): 2297—2301.
- [7] Pincus S M, Goldberger A L. Physiological time-series analysis: What does regularity quantify[J]. The American Physiological Society, 1994, 266 (4Pt 2): H1643—56.