

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108704

阵列导波检测数据分段式混合压缩算法研究*

骆英 王志昊 秦云 徐桂东

(江苏大学高端装备关键结构健康管理国际联合研究中心 镇江 212013)

摘要: 针对阵列导波检测中形成的大量数据对后续传输与存储所构成的挑战,本文提出了一种分段式混合压缩算法。基于损伤散射信号的高幅值及相关性特征,将检测数据划分为高、低保真段两部分。在高保真段设计了 LOPCM 无损压缩方法,在低保真段则应用 JPEG 有损压缩算法,以此兼顾压缩比与损伤信号的保真度。构建实验平台获取实测信号并实施压缩;对比验证了 LOPCM 方法的有效性;考察信号整体的误差指标,并结合重构数据成像结果,评估了分段式混合压缩算法对成像精度的影响。结果表明,该算法能够在保证损伤成像精度的基础上有效减少数据量,相较于仅采用无损或有损压缩能更好地满足阵列导波检测中对数据压缩的需求。

关键词: 阵列导波检测;数据压缩;高保真;信号分段

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Segmental hybrid compression algorithm of array guided
wave detection data

Luo Ying Wang Zhihao Qin Yun Xu Guidong

(International Joint Research Center for Health Management on Key Structure of the High-End
Equipment in Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming at the challenge to subsequent transmission and storage caused by large amount of data in array guided wave detection, a segmental hybrid compression algorithm is proposed in this paper. Based on the high amplitude and correlation characteristics of damage scattering signal, the detection data is divided into high and low fidelity segments. To consider both compression ratio and the fidelity of damaged signal, LOPCM lossless compression method is designed for the high-fidelity segment, and JPEG lossy compression algorithm is applied for the low fidelity segment. After constructing experimental platform, the measured signals are obtained and compressed. The effectiveness of LOPCM method was verified by comparison. The influence of the piecewise hybrid compression algorithm on the imaging accuracy is evaluated by investigating the overall error index of the signal and combining with the reconstructed data imaging results. The results show that the proposed algorithm can effectively reduce the amount of data while ensuring the accuracy of damage imaging, and it can better meet the requirements of data compression in array guided wave detection than only using lossless or lossy compression.

Keywords: array guided wave detection; data compression; high fidelity; signal segmentation

0 引言

因具有检测距离远、对微小损伤敏感的优势,超声导波技术被广泛应用于大型板状结构的检测中^[1-2]。阵列导波技术通过在空间布置传感器阵列,能更多地捕获声场的分布信息,从而提高对结构损伤的检测精度,成为导波技术的发展趋势^[3]。其在检测过程中所采集所形成的原始数据量庞大,增加了传输时间和存储成本,与仪器低功耗、小型化

的发展方向相悖。

数据压缩通过减少甚至消除数据中冗余,以一种更接近信息本质的描述来代替原有冗余的描述,可有效化解数据量庞大的问题^[4-5]。数据压缩通常可分为无损压缩与有损压缩:无损压缩能实现原数据完美重构,但很难达到高压缩比;有损压缩则通过丢弃部分细节信息,能大大缩减数据体积。

在导波检测领域,已有一些数据压缩算法的研究。其

收稿日期:2021-12-27

* 基金项目:国家自然科学基金重点国际合作(11520101001)项目资助

中童允等^[6]制定了分段降采样的压缩方案,根据数据范围动态调整压缩比,其实现简单但对损伤信号的保真度低;黄松岭等^[7]则采用神经网络提取特征值的方式实现压缩,其压缩比高但算法复杂且信号细节丢失较为严重;王云飞^[8]在远程检测系统中应用了基于小波变换和 LZW 的两级压缩方案,其未能充分利用各通道信号间的相关性。张长沿^[9]提出了基于压缩感知的解决方案,设计了波形字典和新型重构算法,其重构效率以及重构精度有待进一步提高。对于阵列导波检测数据,上述方案并未充分利用通道间的相关性;其次为取得较高压缩比,多数方案为有损压缩,对损伤信号的保真度有待提高。

本文设计了应用于阵列导波检测数据的分段式混合压缩算法:通过组建数据矩阵并采用二维压缩方法,有效消除阵列数据的时空冗余;其次对信号实施划分,将无损压缩与有损压缩结合,以兼顾损伤信号的保真度和整体的压缩比。工作安排如下:分析了阵列导波数据的特点,以及存在的数据冗余;提出了分段式混合压缩算法,包括信号段划分方法以及分段后各部分所采用的压缩方法;最后搭建实验平台,对所采集的实验信号实施压缩,完成算法性能评估。

1 阵列导波数据特点分析

在阵列导波检测中,指定换能器在被测工件表面或内部激发超声波,并由传感阵列接收回波数据,作为判断工件内部缺陷的数据源。每一次激励与接收,构成一个检测周期。

图 1 为 16 阵元线阵在单个检测周期内由 1 号阵元激励,8、9、10 号阵元拾取,且与健康信号作差得到的导波场信号。其中损伤信号部分隐含了如时域波包到达时间、信号幅值以及频域频率成分等丰富的损伤特征信息,为避免影响后续诊断结果的精确性,在压缩时有必要保留其全部细节。而其余部分包括干扰模态及一些环境噪声等则对失真具有较高的容限。损伤信号占比小以及其相关性高的特点,使其具有良好的可压缩性,也为后续压缩指明了方向。

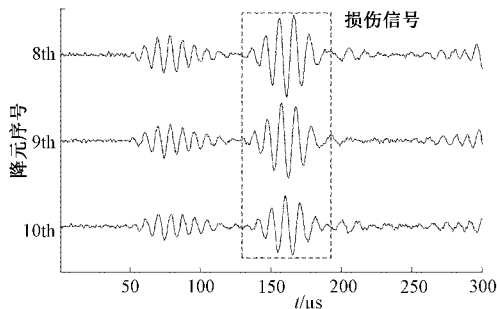


图 1 阵列导波数据特点分析

数据由信息和冗余组成,因而冗余性分析是实施数据压缩的基础。阵列导波信号中的数据冗余可概括为:信号数值分布不均匀引起的统计冗余、相邻采样点间的时间冗余以及邻近阵元信号间的空间冗余等。

2 分段式混合压缩算法

分段式混合压缩算法结构如图 2 所示。为能更好地利用阵列导波信号的时空冗余,将各阵元所采集的一维时序信号并列组建为二维矩阵。然后通过信号段划分方案将矩阵信号分为包含损伤信号的高保真段以及余下部分组成的低保真段。在高保真段,设计了基于最优预测和上下文建模的无损压缩方法(lossless compression based on optimal prediction and context modeling, LOPCM),在低保真段,则应用了 JPEG 有损压缩算法。

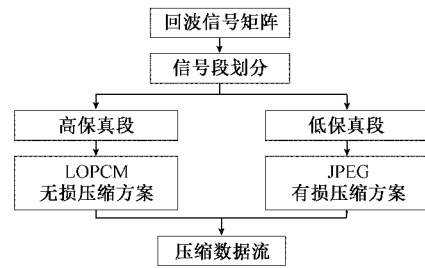


图 2 分段式混合压缩方案结构图

2.1 信号段划分方法

检测信号的分类最常用阈值法,其虽容易实现、实时性好,但存在边界划分粗糙、易受噪声影响的不足。本文提出了改进的双阈值法,可克服边界不准确的问题;同时通过滑动窗匹配法实现对相邻阵元信号的划分,降低了噪声对准确性的影响。整体信号段划分方法如图 3 所示。

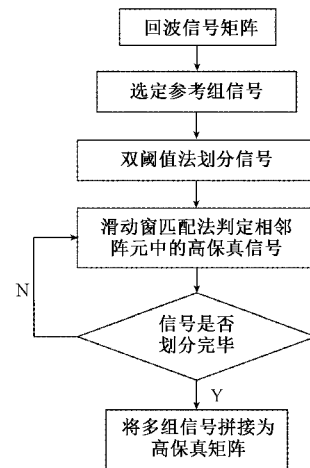


图 3 信号段划分方法

1) 双阈值法

首先选择位于阵列中心位置传感器的信号为参考,采用基于局部峰值点的包络线拟合算法^[10]求取信号包络,该方法不易受噪声影响且计算简单,其运算过程如下:

$$Env_{ref} = Interp(Locol_{max}(I_{x_{ref}})) \quad (1)$$

其中, $Locol_{max}$ 为求取局部极大值操作, $Interp$ 为插值操作, Env_{ref} 为所得到的信号包络。

基于所获得的信号包络,采用双阈值法进行高保真信号的划分,具体过程如下:

(1) 计算阈值 TH_{low} 、 TH_{high} , 将高于阈值 TH_{high} 的部分判定为高保真信号主体;

(2) 以步骤 1 中判定的信号为基础,将其边界向左右两侧进行扩张,直至低于阈值 TH_{low} ;

(3) 继续扩张该信号边界,同时判断边界点是否为极小值。若是,则停止扩张,并将其标记为最终边界点;否则继续扩张。

高阈值可滤除噪声的影响,提高定位损伤信号的准确性;而低阈值能够细化边界,使结果更准确和完整。本文所采用阈值如式(2)、(3),式中 Max 为求取最大值计算, $Mean$ 为求取均值计算。

$$TH_{low} = Mean(|x_{ref}|) \quad (2)$$

$$TH_{high} = 3 * TH_{low} \quad (3)$$

2) 滑动窗匹配法

不同于噪声信号的随机性,相邻阵元的损伤信号具有较高的相关性。由于所比较的信号具有相同量纲,考虑到运算复杂度,采用了曼哈顿距离作为相似性度量指标,其计算公式为:

$$d_m(X, Y) = \sum_{j=1}^l |x_j - y_j| \quad (4)$$

式中: X, Y 表示序列集合, x, y 表示集合中的元素, l 表示元素个数。

以双阈值法得到的信号为基准,采用滑动窗匹配法可实现相邻阵元信号的划分,具体过程为:

(1) 以基准信号构建窗,记录其在原信号中的位置信息。

(2) 从相邻阵元信号的同一位置起,进行偏移量为 $[-\Delta, \Delta]$ 的滑动(Δ 为最大偏移量,由阵元间距决定),并计算窗内信号的曼哈顿距离。截取出曼哈顿距离最短的部分,作为当前阵元信号中的高保真段,并记录偏移量。

(3) 将基准信号替换为步骤(2)中所得信号,并重复步骤(2),直至所有阵元信号划分结束。

最后,将所有分离出一维信号并列组合为高保真段,将余下信号首尾拼接得到低保真段。并记录首个信号位置以及其余信号的偏移值,以表示高保真信号在原矩阵中的位置信息。

2.2 高保真段压缩方法

高保真段矩阵引入了时延补偿量,使行间数据具有高相关性。由于其中包含有损伤诊断的关键信息,为使其在不失真的情况下得到有效压缩,针对性设计了 LOPCM 无损压缩方法,其整体结构如图 4 所示,包括最优预测、上下文建模及熵编码。

预测部分采用最小均方误差准则下的最优预测。相较于 CALIC、JPEG-LS 算法中的自适应预测,其具有预测准确度高优势,但难点在于计算模板的选取。而高保真矩

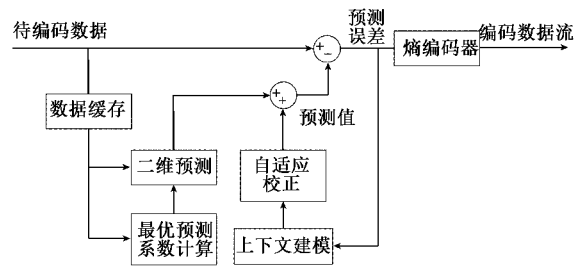


图 4 LOPCM 结构框图

阵的高相关性可化解这一问题,对此本文的预测模式如下:选择已知的相邻行作为模板计算最优预测系数,用于当前行的预测,并只在行变更时对预测系数更新。高相关性保证了预测效果,而系数更新的适时性使之具有较低的运算成本。以计算模板的数据为基础,最优预测系数的计算如下:

假设 K 时刻信号的预测值可以由过去 N 个采样点的线性组合计算得到:

$$\hat{X}_k = \sum_{i=1}^N a_i X_{k-i} \quad (5)$$

式中: X_{k-i} 表示 X_k 前第 i 个最近邻, a_i 为预测系数, N 为预测阶数。预测很难完全精确,真实值 X_k 与预测值 \hat{X}_k 之间存在预测误差 e_k , 其平方期望为:

$$\sigma_e^2 = E[e_k^2] = E[X_k - \hat{X}_k]^2 \quad (6)$$

基于 MMSE 最优预测目的就是使该值最小化。引入白相关函数且假定 X_k 为广义平稳的条件下,解出最优预测系数矩阵 $A = [a_1, a_2, \dots, a_N]$, 如式(7)所示。其中

$$R(k) \approx \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i x_{i-k}.$$

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(0) & R(1) & \dots & R(N-1) \\ R(1) & R(0) & \dots & R(N-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R(N-1) & R(N-2) & \dots & R(0) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R(0) \\ R(1) \\ \dots \\ R(N) \end{bmatrix} \quad (7)$$

在综合考虑预测效果和运算复杂度下, N 取值为 2。此外,为进一步降低数据的空间冗余,对残差矩阵实施纵向差分处理。若采用图 5 所示的预测模板,则预测部分的公式可总结为:

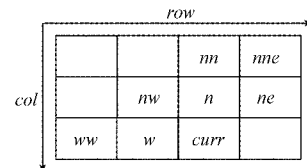


图 5 参考点模板

$$\hat{X}_{curr} = a_1 \cdot X_w + a_2 \cdot X_{nw} - e_n \quad (8)$$

式中: a_1, a_2 为预测系数, X_w, X_{nw} 为相应位置的信号值, e_n 为相应位置的预测残差。

在最优预测后,采用误差上下文建模方式进一步挖掘结构中的冗余。所采用的上下文模型为:

$$C = \{x_n, x_w, x_{nw}, x_{nr}, 2x_n - x_{nr}, 2x_w - x_{nw}\} \quad (9)$$

该上下文由 4 个临近位置数值以及两个代表凸凹性信息的差值构成。以 \hat{X}_{cur} 为阈值,将 C 量化为二进制数,便得到 64 个上下文模型,其能够在数据量相对较少的高保真段信号中提供较为完整的上下文信息。最后利用误差上下文的期望 $E\{e | C\}$ 便可完成对预测值的校正。

经过预测和误差上下文建模部分,得到了低时空冗余度的预测残差 ϵ 。最后将其送入熵编码器,使信息得到最精简的表达。此处采用了编码速度较快,同时易于实现的霍夫曼编码。

2.3 低保真段压缩方法

低保真段信号的重要性低,但考虑到实际信号复杂性,难免会出现部分损伤信号泄露在低保真段中的情况,为保证整体方案的容错性,在低保真段部分应用了 JPEG^[11] 无损压缩算法。JPEG 是一种应用广泛的二维压缩方法,通过舍弃信号细节信息其能够达到较高的压缩比。其编码流程如图 6,由数据分块、离散余弦(discrete cosine transform, DCT)变换、量化、编码 4 部分组成。

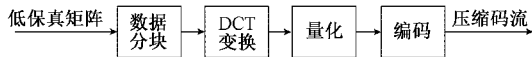


图 6 JPEG 编码流程图

在数据分块部分,考虑到矩阵宽度,将数据块大小定为 8×8 ,在完整包含信号能量的同时可减少补零操作。分块后对数据进行 DCT 变换,得到 DCT 系数矩阵 F 。然后采用量化系数矩阵对 DCT 变换后的矩阵进行非均匀量化,其过程为:

$$F_q = \text{round} \left(\frac{F}{Q_y * \alpha} \right) \quad (10)$$

式中: Q_y 为标准量化系数矩阵^[9], α 为比例因子(用以调节量化精度)^[4]。量化后对数据进行 Z 字排列,将矩阵降维,同时使连零数最大化。最后经过差分和游程编码处理,采用范式哈夫曼编码得到压缩码流。

3 阵列导波损伤检测实验与压缩性能验证

为验证分段式混合压缩算法在实验数据中的性能,搭建了如图 7 所示的实验平台。

图 7(a)为实验所用铝板及阵列布置图:铝板尺寸为 $1\ 000\ \text{mm} \times 1\ 000\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$,以铝板中心为坐标原点,以平行于其长、宽方向建立 x 、 y 坐标轴;将 16 个直径 10 mm 的压电片组成阵列,通过环氧树脂等间距耦合于铝板表面,其中 1 号阵元作为为激励,2~16 号作为接收。图 7(b)为 Vantage 32 系统,包括多通道采集系统和工作站控制器。为避免实验材料浪费及控制变量单一性,实验使用强磁铁来模拟试样中存在不同大小、不同位置及不同数量损伤的情况,

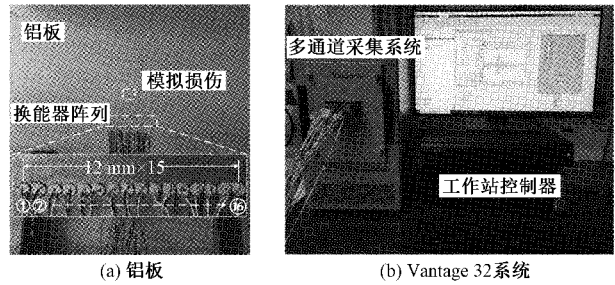


图 7 实验平台

具体布置情况如表 1 所示。实验中预先采集无损伤的健康信号,将各信号与健康信号相减得到各实验样本信号。

表 1 各样本损伤布置情况 mm

样本	损伤位置	半径
S1	(0,100)	5
S2	(0,100)	3
S3	(-20,100)	5
S4	(-8,100)	5
	(8,100)	5

3.1 高保真段无损压缩评价

为评估 LOPCM 方法的有效性,以常用的两种二维无损压缩算法 CALIC^[12]、JPEG-LS^[13] 作为对比,以各样本的高保真段为压缩对象,根据压缩前后的数据量计算压缩比(compression ratio, CR)指标:

$$CR = \frac{N_o}{N_c} \quad (11)$$

式中: N_o 表示原始数据量, N_c 表示压缩后数据量。

如表 2 所示的结果可知,相较于 CALIC 和 JPEG-LS 两种无损压缩算法,本文 LOPCM 方法在对实验数据高保真段的压缩中,能够取得更高的压缩比,且具有较好的稳定性。从压缩比均值上看,LOPCM 相比 CALIC 算法能够提高 14%,相比 JPEG-LS 算法能够提高 63%,优势显著。

表 2 实验样本高保真段的压缩比结果

样本	压缩算法		
	CALIC	JPEG-LS	LOPCM
S1_H	1.96	1.34	2.23
S2_H	1.92	1.33	2.22
S3_H	1.95	1.34	2.18
S4_H	1.98	1.44	2.26
Mean	1.95	1.36	2.22

3.2 整体误差指标评价

为对实施分段式混合压缩后信号整体上的失真情况加以衡量,引入了相对均方误差(percent root mean square difference, PRD)和峰值信噪比(peak signal to noise ratio,

PSNR)指标。其中 PRD 计算公式为:

$$PRD = \sqrt{\frac{N \cdot MSE}{\sum_{i=1}^n (x(i))^2}} \times 100\% \quad (12)$$

式中: MSE 为均方误差 (mean squared error), 其值为 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x(i) - x'(i))^2$, $x(i)$ 为原信号, $x'(i)$ 为解压缩后的信号。PSNR 如式(13)所示, 其中 B 为量化位数。

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{(2^B - 1)^2}{MSE} \right) \quad (13)$$

实验数据经分段式混合压缩下的结果如表 3 所示。通过 α 调节对低保真段的量化精度, 进而得到不同压缩比的结果。 α 取值较小时, 整体失真水平较低; 随着 α 的增大, 量化精度降低, 压缩比进一步提高, 同时也造成重构信号中更严重的误差。实际可根据带宽情况来适当调节压缩比。上述指标衡量了整体误差情况, 但不能提供有关信号质量的充分信息, 需进一步展开评估。

表 3 实验样本分段式混合压缩方案压缩结果

Data	α	0.5	1	2	4
S1	CR	5.63	6.40	7.25	8.12
	PSNR	49.42	46.10	42.94	39.99
S2	CR	5.95	6.88	7.79	8.83
	PSNR	49.40	46.09	43.05	40.06
S3	CR	5.87	6.72	7.65	8.68
	PSNR	49.27	46.11	43.15	40.10
S4	CR	5.73	6.52	7.35	8.22
	PSNR	49.67	46.58	43.65	41.17
	PRD	0.07	0.10	0.17	0.18

3.3 损伤成像结果评价

本节结合损伤诊断的一个重要方向——损伤成像, 来评估本算法对成像精度的影响。成像采用延时叠加算法^[14], 数据源取 S1 样本中不同压缩比的重构数据。预先对原始实验数据实施成像算法得到原像结果, 然后对不同压缩比重构信号进行成像, 并与原像结果相减并取绝对值得到绝对误差图, 结果如图 8 所示。为进一步比较说明, 采用 JPEG 算法对 S1 样本数据进行压缩和重构, 并基于重构数据进行成像及误差计算, 所得结果如图 9 所示。

由图 8 可直观看到, 与原像结果相比, 分段式混合压缩的成像误差主要存在于损伤以外的背景区域, 而在聚焦区域则能保持较低的失真水准。随着压缩比的提高, 增加的误差也均集中于背景区域, 因而对损伤成像精度的影响较低。而在图 9 即 JPEG 压缩的成像结果中, 误差大体均匀分布, 甚至在损伤处略高些。随着压缩比的提高, 损伤处的

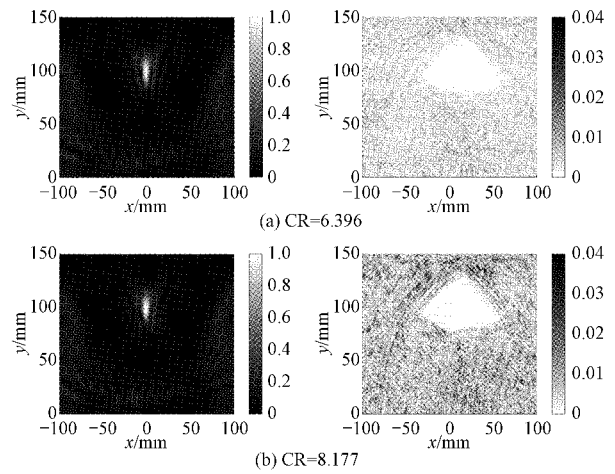


图 8 分段式混合压缩 S1 数据的成像结果及绝对误差

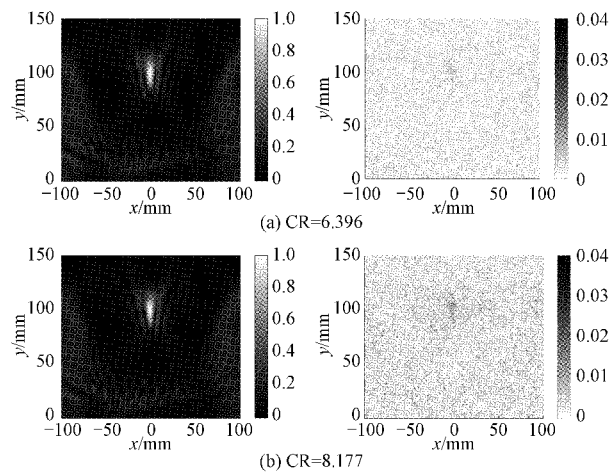


图 9 JPEG 压缩 S1 数据的成像结果及绝对误差

误差更为明显, 更容易影响成像结果的精确性。

为进一步客观评估成像质量, 引入了阵列性能指标 (array performance index, API)^[15], 其计算公式为:

$$API = \frac{S_{50\%}}{\lambda^2} \quad (14)$$

式中: $S_{50\%}$ 为损伤处幅值由最大值下降到 50% 之内的所有像素点面积, λ 为激励信号频率所对应得波长。由图 8、9 中的成像结果进一步计算得到对应的 API 指标如表 4 所示。

表 4 成像结果对应的 API 值及误差

原 API	19.007			
Data	图 8	图 9	图 8	图 9
CR	6.396	8.177	6.339	8.177
API	19.007	19.007	18.799	18.685
Error/%	0	0	1.09	1.69

当压缩比为 6.396 和 8.177 时, 图 8 损伤处的 API 误差均为 0; 而对于图 9, 当压缩比为 6.339 和 8.177 时, 损伤

处 API 误差分别为 1.09% 和 1.69%。可见,在相同压缩比的情况下,本文分段式混合压缩算法在损伤聚焦区域具有更低的误差。

上述结果表明,分段式混合压缩算法能够很好的保留损伤信息,达到利用非重要信号的部分失真提升整体压缩比的目的。而失真对最终成像精度的影响微乎其微,验证了该压缩算法的合理性和有效性。

4 结 论

为克服无损压缩方法压缩比低、有损压缩容易影响损伤信息准确性的弊端,本文结合阵列导波检测数据特点提出了一种分段式混合压缩算法。基于损伤散射信号所具备的高幅值和相关性特征制定了信号段划分方法,实现了损伤散射信号的聚类。针对高保真段高相关性特点,设计了 LOPCM 无损压缩方案。在低保真段则应用了 JPEG 压缩算法,提升整体方案压缩比的同时保证了容错性。实验数据的压缩结果表明:相比于 CALIC、JPEG-LS、LOPCM 压缩方案更行之有效;整体方案在有效保留损伤相关信息、保证损伤成像精度的同时,能够达到较高压缩比,且兼具合理性、可行性以及良好的适用性,为阵列导波及具有类似特点检测数据的压缩提供了新的参考方案和工程应用的途径。

参考文献

- [1] 何存富, 郑明方, 吕炎, 等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1713-1735.
- [2] NIU X, TEE K F, CHEN H P, et al. Excitation and propagation of ultrasonic guided waves in pipes by piezoelectric transducer arrays[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1065(22): 1-4.
- [3] 郑跃滨, 武湛君, 雷振坤, 等. 基于超声导波的航空航天结构损伤诊断成像技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2020, 63(18): 24-43.
- [4] 吴乐南. 数据压缩. 第 3 版[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [5] 陈建华. 数据无损压缩传输方法在阵列声波测井仪中的应用[J]. 电子测量技术, 2020, 43(13): 81-84.
- [6] 童允, 黄松岭, 赵伟. 油气管道电磁超声检测器数据压缩算法研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(10): 1619-1622.
- [7] 黄松岭, 魏争, 王坤, 等. 用于天然气管道缺陷 EMAT 导波检测的快速数据压缩方法研究[J]. 中国科技论文在线, 2014: 1-7.
- [8] 王云飞. 基于超声导波数据压缩的管道远程检测系统研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [9] 张长浩. 超声导波主动聚焦及数据压缩技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [10] 李延军, 曹中平, 严洪, 等. 基于局部峰谷点插值提取心音包络的一种新方法[J]. 航天医学与医学工程, 2010, 23(2): 133-136.
- [11] WALLACE, GREGORY K. The jpeg still picture compression standard [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1992, 38(1): xviii-xxxiv.
- [12] WU X L, NASIR M. Context-based, adaptive, lossless image coding [J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(4): 437-444.
- [13] WEINBERGER, MARCELO J, GADIEL S, et al. The loco-i lossless image compression algorithm: principles and standardization into jpeg-ls [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(8): 1309-1324.
- [14] MICHAELS J E, MICHAELS T E. Enhanced differential methods for guided wave phased array imaging using spatially distributed piezoelectric transducers[C]. American Institute of Physics, 2006: 837-844.
- [15] 温姣玲. 航空复合材料层压板钻孔分层缺陷相控阵检测方法研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.

作者简介

骆英, 教授, 主要研究方向为结构健康管理、基于力电效应的应变梯度传感器、智能压电传感与驱动器技术等。

王志昊, 硕士, 主要研究超声导波无损检测、数据压缩等。
E-mail: 1040508453@qq.com