

# PE管道的近场微波成像及缺陷定量表征

雒明世<sup>1</sup>, 张蒙蒙<sup>1</sup>, 方阳<sup>2</sup>

(1. 西安石油大学计算机学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安交通大学航天航空学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 为有效对聚乙烯(PE)管道内部缺陷进行检测, 采用微波无损检测技术对PE管道进行检测及缺陷定量。针对PE管道缺陷图像的提取, 提出了一种基于主成分分析(PCA)杂波抑制成像增强方法。针对已增强图像, 使用阈值分割技术提取缺陷特征。实验结果表明, 所提方法能有效对PE管道进行成像并对缺陷进行凸显, 其成像质量优于未进行杂波抑制的图像, 与理论值进行对比, 缺陷定位的平均相对误差为2.38 mm, 缺陷面积相对误差为13.25%。

**关键词:** 聚乙烯管道; 无损检测; 微波成像; 缺陷表征

**中图分类号:** TE973

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2023180

## Near-field microwave imaging and quantitative characterization of defects in PE pipeline

LUO Mingshi<sup>1</sup>, ZHANG Mengmeng<sup>1</sup>, FANG Yang<sup>2</sup>

1. School of Computer Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

2. School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

**Abstract:** In order to effectively detect internal defects in polyethylene (PE) pipeline, microwave non-destructive testing technology was used to detect and quantify defects in PE pipelines. A clutter suppression imaging enhancement method based on principal component analysis (PCA) was proposed for extracting defect images from PE pipelines. Threshold segmentation techniques were used to extract defect features from the enhanced images. Experimental results demonstrate that the proposed method can effectively image PE pipelines and highlight defects. The imaging quality is superior to that of images without clutter suppression. Compared to theoretical values, the average relative error in defect localization is 2.38 mm, and the relative error in area quantification is 13.25%.

**Keywords:** polyethylene pipeline, non-destructive testing, microwave imaging, defect characterization

## 0 引言

近年来, 高性能聚乙烯(PE, polyethylene)材料在能源化工、城市建设、油气输送等领域应用越来越广泛, 发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。在石油化工领域, 由于PE材料具有耐腐蚀、绝热性能好、内层表面粗糙度低等优势<sup>[2]</sup>, 其使用比例大幅度提升, 有些甚至已经代替金属成为某些管道的主要结构材料。虽然PE管道由于其高性能被广泛应用于油气传输,

但受制造工艺、材料特性、工作环境等影响, 管道在生产、运输、存储、施工安装、试压等过程中会出现各类缺陷, 常见的缺陷问题包括孔洞、分层、焊接处渗漏、机械损伤、树脂缺失和裂纹等<sup>[3]</sup>。

由于PE管道内部产生的缺陷往往是肉眼无法辨别的, 因此通过无损检测技术对PE管道内部缺陷进行检测以确保管道的完整性及安全性显得尤为重要。常规的无损检测方法有超声波检测<sup>[4]</sup>、射线<sup>[5]</sup>、涡流检测<sup>[6]</sup>、红外热成像技术<sup>[7]</sup>和声发射<sup>[8]</sup>。

收稿日期: 2023-06-05; 修回日期: 2023-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.52107009)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.52107009)

每种无损检测方法都有其特定的优缺点及应用方向<sup>[9]</sup>。相较于其他无损检测技术,基于微波的无损检测技术更具优势<sup>[10]</sup>,如检测速度快,灵活性强,可以实现动态非接触检测;贯穿介电材料能力强,能够深入介质区域;传输性能强,在传输过程中不易受恶劣环境的影响;微波探测的信号为电信号,易于对回波信号进行后处理实现高分辨成像等。

近年来,国内外相关研究人员围绕微波成像 PE 管道检测开展了相关研究。Haryono 等<sup>[11]</sup>利用 K 波段开放式圆形波导对管材中的空洞缺陷进行了无损探测,并获得了很高的探测精度。在对圆形波导实验分析的基础上,针对相同的孔洞缺陷,2020 年,Rahman 等<sup>[12]</sup>比较了在宽频率范围内工作的各种近场探针,使用不同波段的矩形波导和圆波导对 PE 管道内外侧的孔洞缺陷进行了检测,结果显示,K 波段下的矩形波导检测内部缺陷能力更强,矩形波导对 PE 管道检测性能更好,定量分析了使用这些探头进行 PE 管道微波无损检测的相对性能和有效性。为验证微波无损检测技术对 PE 管道的全面适用性,众多学者针对 PE 管道的其他缺陷(减薄、接头焊缝等)进行了实验验证。例如,2019 年,韩方勇等<sup>[13]</sup>对广泛应用于油气田地面工程油气集输的在役管道进行了微波成像,实验中缺陷类型包含分层、管体内部圆形气泡和冲蚀缺陷以及壁厚减薄,通过观察微波图像的颜色变化可分辨出缺陷类型和尺寸大小。2022 年,车飞等<sup>[14]</sup>对 PE 燃气管热熔接头进行了微波检测,对一道焊缝进行了微波缺陷表征,结果验证了微波无损检测技术对热熔接头内部异常的检测适用性。Murphy 等<sup>[15]</sup>在各种聚乙烯接头上进行了现场实验,在不同波段下对含有孔洞等焊缝缺陷的 PE 管道热熔接头进行检测,建立了微波无损检测结果与机械测试结果之间的相关性。Carrigan 等<sup>[16]</sup>对不同环境下高密度聚乙烯管道上的裂缝和外管道损失进行了光栅扫描。通过对天线和管壁之间微小变化的分析,选择一个最佳频率,在这个频率下,对管材中的裂缝缺陷进行了无损检测,并获得了较高的检测精度。Ghasr 等<sup>[17]</sup>采用 Ka 波段开口波导对高密度 PE 管道的裂纹缺陷进行了检测。微波重建结果表明,该系统对管道内壁圆形锯齿口的检测具有较高的分辨率。综上所述,伴随着科学技术的进步与发展,微波技术凭借其自身的优势,在 PE 无损检测方面得到广泛应用。从国内外研究的总体情况来看,微波近场成像技术还

处于迅速发展阶段,国外理论和应用相对成熟,已在 PE 材料的无损检测上得到了广泛的应用。

目前,针对微波近场成像无损检测技术<sup>[18]</sup>的研究虽取得一定进展,但其仍存在成像对比度较低,依靠人工判别的问题<sup>[19]</sup>。针对上述问题,本文开展了 PE 管道的近场微波成像及缺陷自动定量表征方法研究。首先,基于微波反射成像原理,建立了平面扫描成像检测几何模型,在此基础上,提出一种主成分分析(PCA, principal component analysis)方法对回波数据的杂波进行抑制,增强目标信息。其次,利用获取的高分辨图像,开展 PE 材料缺陷识别及定位方法研究。根据微波图像特点,提出一种基于最大值滤波的微波图像缺陷检测算法,并利用 Otsu 阈值分割算法将微波图像分为缺陷目标和背景两部分,实现了对 PE 管道缺陷数量、位置及面积等信息的定量检测。最后,搭建实验系统,设计加工尺寸为 300 mm×600 mm、外径为 320 mm、壁厚为 10 mm 的带缺陷 PE 管道试件,并在实物样件管道内壁设计 4 个孔洞缺陷样本,验证所提方法的有效性。

## 1 基于 PCA 的平面扫描的增强成像

在单探头平面扫描成像中,需要在整个扫描平面上进行一步一停扫描,此过程可视为在一个位置停下来进行发射和接收信号,然后移动到下一个位置继续发射和接收信号,从而获取目标回波数据<sup>[20]</sup>。基于微波反射原理,本文建立了微波近场高分辨成像模型,如图 1 所示。

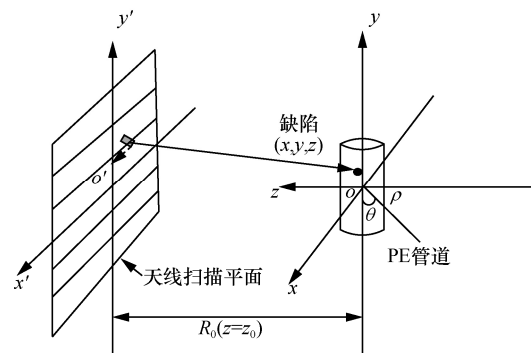


图 1 微波近场高分辨成像模型

图 1 中,  $x$  为方位向,  $y$  为高度向,  $z$  为距离向。通过发射频率步进信号对缺陷目标进行处理。采样探头沿着  $x$  轴正方向依次扫描,扫描空间轨迹形成一平面,即  $x'o'y'$  扫描面。 $R_0$  为扫描平面  $x'o'y'$  到被检目标中心的距离。被检测目标的中心为直角坐标系的原点。 $(\rho, \theta, y)$  为柱面坐标系。

柱面坐标系到直角坐标系的映射关系为

$$\begin{cases} x = \rho \cos \theta \\ y = y \\ z = \rho \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $(\rho, \theta, y)$  为管材在柱面坐标系的坐标,  $(x, y, z)$  为相对应的直角坐标系的坐标。

在二维冠状面成像中, 需要在  $z = z_0$  平面上进行一步一步扫描, 可以看作在一个位置停下来进行发射和接收信号, 然后移动到下一个位置继续发射和接收信号, 从而获取被测目标反射回波数据。收集扫描平面  $z = z_0$  上反射场信息, 在  $z = z_0$  平面的回波信号记为  $s(x, y; z = z_0)$ 。在扫描获取数据过程中会受到复杂环境影响, 例如, 城市区域或者电磁干扰较大的地方会对回波信号造成干扰引入杂波信号。另外, 回波信号在传播过程中也会受到衰减的影响, 导致信号强度减弱, 使杂波信号相对较大。总体来说, 获取的回波数据中存在杂波的原因包括环境干扰、多径效应、目标反射特性、接收器噪声以及信号衰减和散射。这些因素都会对回波信号产生干扰和混叠, 降低成像系统的性能和质量。因此, 需要进行杂波抑制来减少这些干扰, 提高成像结果的准确性和可靠性。为了抑制杂波影响, 引入 PCA 实现杂波抑制<sup>[21]</sup>。通过使用 PCA 对回波数据进行线性变换, 将数据矩阵大小从原始的像素空间变换到新的主成分空间。PCA 处理过程中, 对特征向量的特征值进行排序处理, 其中, 数值较大的特征值通常对应相关性较强的被测目标信号, 数值较小的特征值通常对应相关性较差的噪声。通过对比反演图像的质量效果, 选取保留主成分向量的相干积累信号进行信号重构, 从而实现对回波数据噪声的去除, 进而凸显缺陷目标。

假设扫描过程中, 在  $x$  扫描方向上具有  $n$  个扫描点, 在  $y$  扫描方向上具有  $m$  个扫描点, 那么回波数据  $s(x', y'; z = z_0)$  实质为一个  $m \times n$  的矩阵, 将其表示为  $\mathbf{s}$ , 即

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中,  $s_{ij}$  表示第  $(i, j)$  位置回波数据,  $i=1, 2, \dots, n$ ,  $j=1, 2, \dots, m$ 。

PCA 具体实现过程如下。

### 1) 数据预处理

令  $\mathbf{L} = \mathbf{s}^T * \mathbf{s}$ , 对相干累加数据实现标准化, 从而消除变量在量纲上的影响, 即

$$\bar{\mathbf{L}}_{ij} = \mathbf{L}_{ij} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \mathbf{L}_{ij} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{L}_{ij}$  表示第  $(i, j)$  位置采样数据,  $*$  表示向量积。

### 2) 协方差矩阵计算

将标准化后的数据矩阵  $\bar{\mathbf{L}}_{ij}$  构建成一个协方差矩阵  $\mathbf{C}_s$ , 即

$$\mathbf{C}_s = \text{cov}(\mathbf{s}) = \frac{1}{n-1} \bar{\mathbf{L}}_{ij} \bar{\mathbf{L}}_{ij}^T \quad (4)$$

该矩阵描述了数据中不同特征之间的相关性。

### 3) 特征值分解

对协方差矩阵  $\mathbf{C}_s$  进行特征值分解, 得到特征值和对应的特征向量  $\mathbf{Z}$ , 即

$$\mathbf{C}_s = \mathbf{Z} \mathbf{D} \mathbf{Z}^T \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{D} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$  表示降序排序的特征值对角矩阵,  $\lambda_i$  表示  $\mathbf{D}$  的特征值。  $\mathbf{Z} = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_m)$  表示特征值所对应的特征向量,  $\mathbf{u}_i$  表示协方差矩阵的特征值对应的正交单位向量, 描述了数据中的主要变化方向, 即主成分。

### 4) 主成分选择重构信号

数据矩阵  $\mathbf{s}$  通过特征向量  $\mathbf{Z}$  获取主成分向量  $\mathbf{Y}$ , 即

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Z}^T \mathbf{s} \quad (6)$$

将特征值从大到小排序, 选择前  $k$  个特征值对应的特征向量作为主成分, 其中  $k$  是用户预先设定的参数<sup>[22]</sup>。通常情况下, 对选择的前  $k$  个主成分向量进行相干累加即可实现对信号的重构, 抑制了杂波, 提高了信号的信噪比。可计算得出前  $k$  个主成分所对应的贡献率  $\alpha$ , 即

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (7)$$

已有研究通过贡献率确定保留的主成分个数, 但实际选取的合适主成分个数与应用的对象有较大的关联, 因此本文根据实际图像处理的效果来确定所保留的主分量的个数。

将经过 PCA 处理后的回波数据用  $\mathbf{s}^*$  表示, 即

$$\mathbf{s}^* = \mathbf{s}_y * Y' - \bar{\mathbf{s}} \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{s}_y = \mathbf{s} * \mathbf{Y}$ ,  $\bar{\mathbf{s}}$  为矩阵  $\mathbf{s}$  的均值。

经过 PCA 杂波抑制后, 将对杂波抑制后的回波数据进行成像算法处理。二维成像的目的就是获取  $z=0$  处各散射中心反射系数的等效分布  $g(x', y'; z=0)$  [23], 就波谱展开理论讨论,  $g(x', y'; z=0)$  与  $z=0$  平面内散射场强分布即  $E(x, y; z=0)$  存在映射关系。假设沿着  $z$  正方向传播波的空间域频谱为  $F(k_x, k_y; z=0)$ , 则它与目标平面电场量分布  $E(x, y; z=0)$  存在如下关系

$$E(x, y; z=0) = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k_x, k_y; z=0) e^{-jk_x x - jk_y y} dk_x dk_y \quad (9)$$

其中,  $k_x$  和  $k_y$  分别表示与空间坐标  $x$  和  $y$  对应的空间波数分量。

在待测位置平面  $z=z_0$  处, 已知量平面内散射场强分布为

$$E(x, y; z=z_0) e^{jk_z z_0} = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k_x, k_y; z=z_0) e^{-jk_x x - jk_y y} dk_x dk_y \quad (10)$$

对近场方位成像中波谱理论展开研究, 在平面  $z=0$  处有

$$E(x, y; z=0) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k_x, k_y; z=z_0) \cdot \exp\left(j\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} z_0\right) \text{circ}\left(\frac{k_x^2 + k_y^2}{k^2}\right) \cdot \exp[-j(k_x x + k_y y)] dk_x dk_y \quad (11)$$

其中,  $\mathbf{k} = \frac{2\pi f}{c}$  为波数矢量,  $f$  为波频率。circ( $\cdot$ ) 为圆域函数, 表示为

$$\text{circ}\left(\frac{k_x^2 + k_y^2}{k^2}\right) = \begin{cases} 1, & k_x^2 + k_y^2 < k^2 \\ \frac{1}{2}, & k_x^2 + k_y^2 = k^2 \\ 0, & k_x^2 + k_y^2 > k^2 \end{cases} \quad (12)$$

所以传递函数为

$$H(k_x, k_y) |_{z=z_0 \rightarrow 0} = \text{circ}\left(\frac{k_x^2 + k_y^2}{k^2}\right) e^{j\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} z_0} \quad (13)$$

圆域函数 circ 将积分区域限制在  $k_x^2 + k_y^2 \leq k^2$  的圆形区域内, 可以看出, 并不是平面波谱的所有成分都对总场的叠加有贡献, 只有平面光谱中传播方向满足圆形域函数 circ 的部分有贡献。由式(13)可知, 从扫描平面到  $z=0$  的目标成像过程中, 空间波谱就像一个二维带通滤波器。其在半径为波数矢量的圆域内、圆域上以及圆域外的幅频响应分别为  $1$ 、 $\frac{1}{2}$  和  $0$ 。通带内, 已知在采样平面  $z=z_0$  上的回波数据为  $s(x', y'; z=z_0)$ , 由波谱展开理论可得

$$g(x', y'; z=0) = \int_{K_x} \int_{K_y} \left[ F(k_x, k_y; z=z_0) \cdot H(k_x, k_y) |_{z=z_0 \rightarrow 0} \right] e^{-jk_x x - jk_y y} dk_x dk_y \quad (14)$$

其中,  $g(x', y'; z=0)$  表示最终的反演像函数。

$F(k_x, k_y; z=z_0)$  为  $z=z_0$  空间域频谱, 可由在  $z=z_0$  平面上的回波信号  $s(x', y'; z=z_0)$  经过二维傅里叶变换  $\text{FT}_{2D}$  得到, 即

$$F(k_x, k_y; z=z_0) = \int_{-\frac{L_x}{2}}^{+\frac{L_x}{2}} \int_{-\frac{L_y}{2}}^{+\frac{L_y}{2}} (s(x', y'; z=z_0) e^{-jk_x x - jk_y y}) dx dy \quad (15)$$

其中,  $L_x$  和  $L_y$  为扫描平面对应范围。

在 PCA 去除信号噪声后, 对重构信号进行傅里叶变换获取空间域频域, 即

$$F'(k_x, k_y; z=z_0) = \int_{-\frac{L_x}{2}}^{+\frac{L_x}{2}} \int_{-\frac{L_y}{2}}^{+\frac{L_y}{2}} \mathbf{s}^* e^{-jk_x x - jk_y y} dx dy \quad (16)$$

$$\text{令 } g_f(k_x, k_y; z=0) = F'(k_x, k_y; z=z_0) e^{-j\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} z_0},$$

该式表示目标的二维空间谱。

至此, 通过对二维空间谱做二维逆傅里叶变换, 表示算法推导已完成, 可得到目标的散射分布函数。即目标成像表达式为

$$g(x', y', z=0) = \text{IFT}_{2D(k_x, k_y)} (g_f(k_x, k_y; z=0)) = \text{IFT}_{2D(k_x, k_y)} \left\{ F'(k_x, k_y; z=z_0) e^{-j\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} z_0} \right\} = \text{IFT}_{2D(k_x, k_y)} \left\{ \left[ \text{FT}_{2D(k_x, k_y)} \text{FT}_{2D(k_x, k_y)} \mathbf{s}^* \right] e^{-j\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} z_0} \right\} = \text{IFT}_{2D(k_x, k_y)} \left\{ \left[ \text{FT}_{2D(k_x, k_y)} \text{FT}_{2D(k_x, k_y)} \text{PCA}[s(x', y'; z=z_0)] \right] \cdot e^{-j\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} z_0} \right\} \quad (17)$$

以上为近场二维冠状面成像算法原理推导, 联

合 PCA 和波谱重构的平面扫描的 PE 管道微波二维成像流程如图 2 所示。

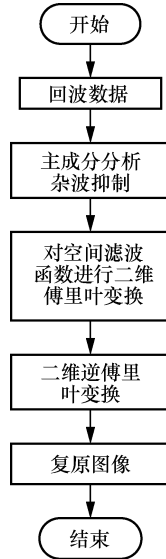


图2 联合 PCA 和波谱重构的平面扫描的 PE 管道微波二维成像流程

## 2 基于图像处理的缺陷定量表征

本节基于 PCA 杂波抑制的二维成像算法, 得到 PE 管道的微波缺陷图像, 并研究 PE 管道缺陷识别算法对微波图像进行缺陷定量表征。为了增强缺陷特征, 本文提出一种基于最大值滤波的微波图像缺陷检测算法, 利用阈值分割算法将微波图像分为缺陷目标和背景两部分, 同时对缺陷的数量、位置及面积等信息进行了判别, 实现了对 PE 管道的微波缺陷的定量检测。另外, 搭建实验系统, 设计加工尺寸为 300 mm×600 mm、外径为 320 mm, 壁厚为 10 mm 的带缺陷 PE 管道试件, 并在实物样件管道内壁设计 4 个孔洞缺陷样本, 验证所提方法的有效性。

### 2.1 最大值滤波

为了进一步提高图像清晰度, 抑制噪声的干扰, 在获取 PE 管道的微波缺陷图像后, 对微波图像进行滤波降噪。常用的 4 种滤波方式<sup>[24-25]</sup>为均值滤波、中值滤波、最大值滤波和最小值滤波, 经过分析每种方式处理图像时的侧重点, 为待处理的缺陷图像选择适当的滤波方法, 即最大值滤波。

最大值滤波是以邻域像素最大值作为输出图像的像素值。对于最大值滤波来说, 选取一个区域  $S$ , 将该区域内灰度值最大的像素点作为中心点  $(x, y)$  的灰度值。最大值滤波表达式为

$$f(x, y) = \text{Max}[(s, t)], (s, t) \in S_{xy} \quad (18)$$

在实际应用中, 由于使用周围灰度值最大的像素点值来替代原始像素, 从而忽略了 PE 管道缺陷边缘像素点。

### 2.2 Otsu 阈值分割

对微波缺陷图像进行滤波后, 需要对其进行缺陷定量表征。为了增强缺陷特征, 本文提出一种基于 Otsu 阈值分割算法的微波图像分割算法<sup>[26-27]</sup>, 将微波图像分为缺陷目标和背景两部分, 从而实现了对缺陷的准确表征。

Otsu 阈值分割是一种全局阈值算法<sup>[28]</sup>, 它根据类间最大差异自动确认阈值, 因此被称为最大类间差异阈值法, 是目前最具代表性和最有效的阈值分割算法。

假设一个给定的灰度图像分为  $L$  个不同的灰度级, 那么灰度级  $i$  出现的概率为

$$P_i = \frac{n_i}{MN}, \sum_{i=0}^{L-1} P_i = 1, P_i \geq 0 \quad (19)$$

其中,  $n_i$  表示灰度级为  $i$  的像素数,  $MN$  表示总像素数。

假设阈值  $T$  将图像分为  $A_1$  和  $A_2$  两类,  $A_1$  像素灰度取值范围为  $[0, t]$ ,  $A_2$  像素灰度取值范围为  $[t+1, L-1]$ <sup>[29]</sup>。像素归类到  $A_1$  和  $A_2$  的概率分别为

$$P_1(t) = \sum_{i=0}^t P_i, P_2(t) = \sum_{i=t+1}^{L-1} P_i \quad (20)$$

像素归类到  $A_1$  和  $A_2$  的灰度均值分别为  $\mu_1$  和  $\mu_2$ , 图像全局灰度均值为  $\mu$ , 则

$$\mu_1(t) = \frac{\sum_{i=0}^t iP_i}{P_1(t)}, \mu_2(t) = \frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} iP_i}{P_2(t)}, \mu = \sum_{i=0}^{L-1} iP_i \quad (21)$$

根据式(20)和式(21), 可计算  $A_1$  和  $A_2$  的类间方差为

$$\sigma^2(t) = P_1(t)[\mu_1(t) - \mu]^2 + P_2(t)[\mu_2(t) - \mu]^2 \quad (22)$$

那么 Otsu 算法的选取阈值  $T_{\text{opt}}$  就等于  $\sigma^2(t)$  的最大值, 即

$$T_{\text{opt}} = \text{Max}_{0 \leq t \leq L-1} \{\sigma^2(t)\} \quad (23)$$

### 2.3 缺陷表征结果及分析

为验证所提成像算法的有效性, 本文设计加工了含有孔洞的缺陷试样, 用以模拟真实生产及在役 PE 管道的孔洞缺陷。PE 管道的缺陷纵切面示意如图 3 所示。

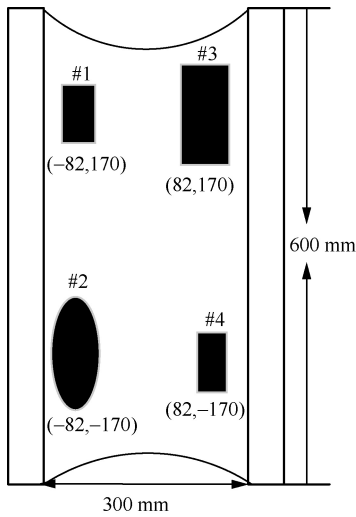


图 3 缺陷纵切面示意

为实验所设计的管道试件内径为 300 mm，长度为 600 mm。其中，内壁孔洞缺陷为 4 个，分别将其标号为#1、#2、#3 和#4。已知理想状态各个缺陷柱面坐标为(155,120°,170)、(155,120°,-170)、(155,60°, 170)、(155,60°,-170)。由映射关系可得缺陷在直角坐标系中相对应的坐标为(-82,170,-130)、(-82, -170,-130)、(82,170,-130)、(82,-170,-130)，管件缺陷的设计面积为 1 250 mm<sup>2</sup>、3 140 mm<sup>2</sup>、5 000 mm<sup>2</sup> 和 2 300 mm<sup>2</sup>。

基于扫描成像原理，进行 PE 管道缺陷的微波近场检测实验研究，设计的微波近场检测实验系统示意如图 4 所示。该系统主要由计算机、矢量网络分析仪、X-Y-Z 三维扫描平台、矩形波导探头和 PE 管道试件组成。

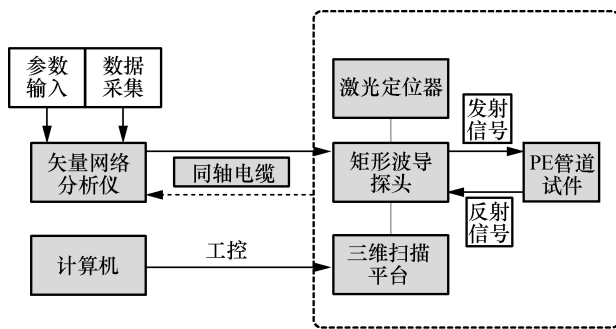


图 4 微波近场检测实验系统示意

根据成像原理以及实验系统的研究，并搭建实验平台验证算法有效性。Rahman 等<sup>[12]</sup>在宽频率范围内使用不同波段的矩形波导对 PE 管道内外侧的孔洞缺陷进行了检测。结果显示，Ka 波段下的矩形波导检测内部缺陷能力更强，对 PE 管道性能更好。

考虑到微波检测频段(26.5~40 GHz)和实验所用矩形波导探头，本文实验采用 Ka 波段入射微波。实验中使用矩形波导探头与矢量网络分析仪端口连接，向外辐射 Ka 波段入射微波，并接收由异质界面反射的回波数据。

实验获取的基于平面扫描的二维成像如图 5 所示，成像基本上保留了 PE 管道的冠状几何特征，图像效果较精细，能比较准确地表现出详细的缺陷特征。另外，通过数值仿真可知，在保证实验中有缺陷管道成像质量的前提下，选取 2 个主向量即可对回波信号进行完全反演成像，运用式(8)便可得到由主向量逆构成的信号向量。PCA 算法进行杂波抑制处理和最大值滤波的成像结果分别如图 6 和图 7 所示。

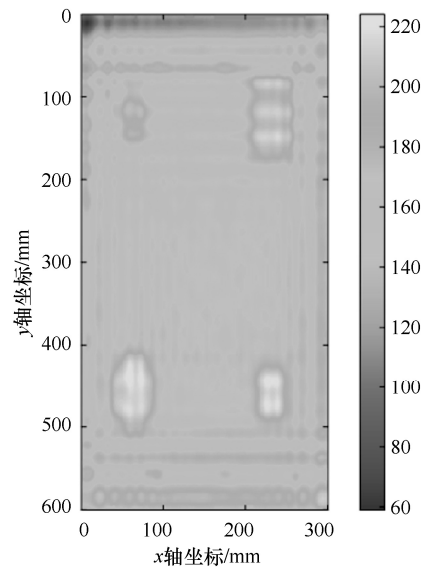


图 5 基于平面扫描的二维成像效果

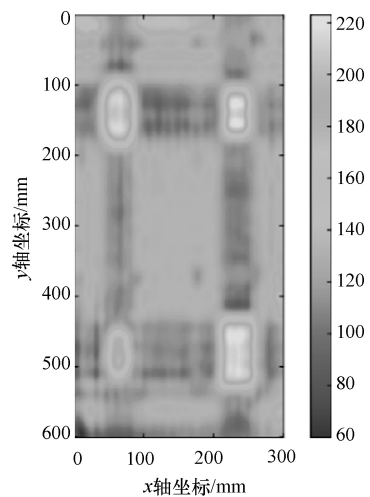


图 6 PCA 算法进行杂波抑制处理的成像结果

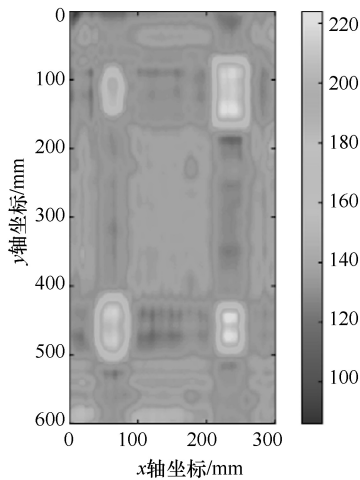


图 7 PCA 算法进行最大值滤波的成像结果

为验证 PCA 杂波抑制和最大值滤波效果，引入峰值信噪比 (PSNR, peak signal-to-noise ratio) 作为判断标准。PSNR 的计算式为

$$PSNR = 10 \lg \left( \frac{(2^n - 1)^2}{MSE} \right) \quad (24)$$

$$MSE = \frac{1}{HW} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W (X(i, j) - Y(i, j))^2 \quad (25)$$

其中,  $H$  和  $W$  表示图像的高度和宽度,  $X$  表示干净图像,  $Y$  表示噪声图像, MSE (mean square error) 表示均方误差。

本文方法与基准方法 (传统波数域二维成像方法) 成像后图像的 PSNR 对比如表 1 所示。PCA 杂波抑制后的图像峰值信噪比变大, 证明引入 PCA 算法对回波数据进行杂波抑制, 可有效提高成像后图像的图像质量。实验结果表明, 本文方法通过 PCA 杂波抑制使缺陷特征信息更清晰, 具有较高的分辨率。经过最大值滤波处理后的图像中缺陷与背景的差异跟未处理前相比更加清晰, 较好地保存了缺陷边缘的细节, 图像清晰视觉效果更好, 有利于进一步的图像分割。

表 1 本文方法与基准方法成像后图像的 PSNR 对比

方法	峰值信噪比/dB
基准方法	14.325
本文方法-PCA 杂波抑制	15.365
本文方法-最大值滤波	15.546

针对管道缺陷数量、位置以及缺陷面积的定量表征, 本文采用基于 Otsu 阈值分割技术对缺陷区域进行提取, 从而进一步实现缺陷的数量、位置和大

小的定量表征。图 8 展示了 Otsu 阈值分割算法分割后的缺陷图像。从图 8 可知, Otsu 阈值分割算法可有效地对微波图像的缺陷目标和背景进行分割, 且具有较好的分割效果。

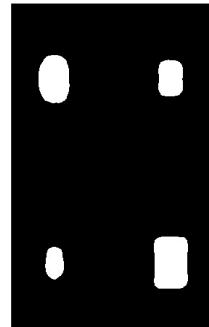


图 8 Otsu 阈值分割算法分割后的缺陷图像

在上述针对 PE 管道的扫描结果进行一系列处理后, 即可对缺陷进行表征。表征结果如图 9 所示, 结果显示 PE 管道试件存在 4 个缺陷, 分别记为 #1、#2、#3 和 #4。通过统计缺陷所占像素点大小即可求出各缺陷面积。计算结果如表 2 所示。

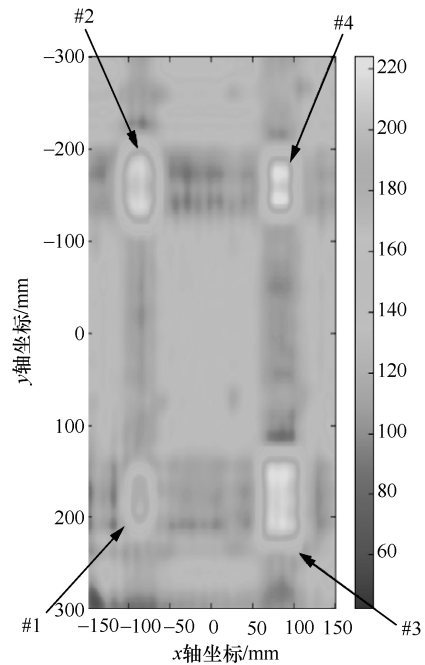


图 9 缺陷表征结果

表 2 缺陷表征结果

缺陷标号	缺陷中心位置	缺陷面积/mm <sup>2</sup>
#1	(-80,168)	1 000
#2	(-80,-169)	2 794.6
#3	(80,169)	4 150
#4	(80,-169)	2 185

为了验证本文方法的性能，将本文方法检测到的缺陷质心坐标及面积和 PE 管道试件的缺陷质心及面积之间的相对误差作为评价指标。由于使用的 PE 管道内壁的 4 个缺陷都位于靠近扫描平面的一侧，因此直接将 PE 管道真实缺陷在二维扫描平面进行投影，以获取真实 PE 管道的缺陷质心坐标及面积。式(26)表述了模型推断的缺陷质心与 PE 管道缺陷质心差异。通过度量算法模型预测的缺陷质心与真实 PE 管道缺陷质心坐标间的欧氏距离，来判断检测算法模型对缺陷位置的判断精准度。缺陷面积相对误差的计算式如式(27)所示。通过计算算法模型推断的表征缺陷面积与 PE 管道真实缺陷面积相对误差，来判断模型对缺陷形状的检测性能。

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (26)$$

其中， $d$  为缺陷质心的距离， $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  为两缺陷质心坐标。

$$D_{rate} = \frac{S - S^*}{S} \quad (27)$$

其中， $D_{rate}$  表示缺陷面积相对误差， $S^*$  表示表征缺陷面积， $S$  表示真实缺陷面积，可通过统计缺陷所占像素点的大小获得。

缺陷的位置和面积大小被表征后，为了进一步检验成像算法和图像处理对微波图像缺陷的表征能力，将表征后缺陷与试件缺陷的质心位置和面积大小进行比较。由于成像图是经过固定步长扫描圆柱试件反演得到的，因此反演图像与实物是等

比例对照的。缺陷的质心决定缺陷位置，面积确定缺陷尺寸大小。表征前后质心的距离越接近 0，并且面积相对误差越接近 0，则证明对缺陷的表征效果越好。表 3 和表 4 展示了反演后的缺陷质心缺陷面积表征对比。对比结果验证了本文对微波图像缺陷进行定量表征的处理方法的有效性。

### 3 结束语

本文基于微波反射原理，建立基于平面扫描的二维高分辨成像机制并搭建相关实验平台获取回波数据。并在此基础上，提出一种基于主成分分析的缺陷成像方法。该方法可有效对回波数据进行杂波抑制，增强目标信息。针对微波图像的特点，利用图像分割技术对缺陷区域进行提取，进一步实现缺陷数量、位置和面积的定量表征。结果显示表征前后缺陷质心的平均距离为 2.38 mm，缺陷的面积相对误差达到 13.25%，从而验证缺陷定量表征算法的有效性。在对 PE 管道试件加工时，机器的加工精度有限，使管道缺陷面积与设计缺陷面积间存在误差，从而对图像的表征结果产生影响。

#### 参考文献：

- [1] AMINEH R K, RAVAN M, SHARMA R. Nondestructive testing of nonmetallic pipes using wideband microwave measurements[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(5): 1763-1772.
  - [2] 潘义洋. 无机非金属材料的应用与发展研究[J]. 中国设备工程, 2022(22): 237-239.
- PAN Y Y. Application and development of inorganic non-metallic materials[J]. China Plant Engineering, 2022(22): 237-239.

表 3 反演缺陷质心表征对比

缺陷标号	缺陷设计质心	表征质心	质心距离/mm	距离平均值/mm
#1	(-82,170)	(-80,168)	2.82	2.38
#2	(-82,-170)	(-80,-169)	2.23	
#3	(-82,170)	(-80,169)	2.23	
#4	(82,-170)	(80,-169)	2.23	

表 4 反演后缺陷面积表征对比

缺陷标号	缺陷设计面积/mm <sup>2</sup>	表征面积/mm <sup>2</sup>	面积相对误差	面积相对误差均值
#1	1 250	1 000	20%	13.25%
#2	3 140	2 794.6	11%	
#3	5 000	4 150	17%	
#4	2 300	2 185	5%	

- [3] LI Z, WANG P, HAIGH A, et al. Review of microwave techniques used in the manufacture and fault detection of aircraft composites[J]. *The Aeronautical Journal*, 2020, 125: 1283.
- [4] GRESIL M, POOHSAL A, CHANDARANA N. Guided wave propagation and damage detection in composite pipes using piezoelectric sensors[J]. *Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring*, 2017, 188: 148-155.
- [5] 何慧娟. 含缺陷聚乙烯燃气管道热熔接头力学性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- HE H J. Study on mechanical properties of hot welding joint of polyethylene gas pipeline with defects[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [6] 仵蕾燕. 激光线扫描激发超声检测钢轨踏面缺陷方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- WU L Y. Method for detect rail tread defect by laser line scan excitation ultrasound[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [7] 朱志彬. 基于持续激励红外热像技术的聚乙烯管热熔接头缺陷检测[J]. *焊接学报*, 2018, 39(2): 44-48, 88, 130, 131.
- ZHU Z B. Defect detection of polyethylene pipe thermal fusion joint based on continuous excitation infrared thermography technology[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(2): 44-48, 88, 130, 131.
- [8] CHANDARANA N, LANSIAUX H, GRESIL M. Characterisation of damaged tubular composites by acoustic emission, thermal diffusivity mapping and TSR-RGB projection technique[J]. *Applied Composite Materials*, 2017, 24(2): 525-551.
- [9] GHOLIZADEH S. A review of non-destructive testing methods of composite materials[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2016, 1: 50-57.
- [10] MUKHERJEE S, SHI X, DATTA S, et al. Enhancement of microwave time reversal imaging using metallic reflectors[J]. *NDT & E International*, 2020, 110: 102192.
- [11] HARYONO A, RAHMAN M S U, ABOU-KHOUSA M. Inspection of non-metallic pipes using microwave non-destructive testing (NDT)[C]//*Proceedings of 2018 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 219-222.
- [12] RAHMAN M S U, HARYONO A, ABOU-KHOUSA M A. Microwave non-destructive evaluation of glass reinforced epoxy and high density polyethylene pipes[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2020, 39(1): 26.
- [13] 韩方勇, 李金武, 王一帆, 等. 玻璃钢管的微波无损检测技术[J]. *石油规划设计*, 2019, 30(3): 7-10, 50.
- HAN F Y, LI J W, WANG Y F, et al. Microwave nondestructive testing technology of glass steel pipe[J]. *Petroleum Planning & Engineering*, 2019, 30(3): 7-10, 50.
- [14] 车飞, 朱丽丽, 王一帆, 等. 燃气PE管道热熔接头的微波无损检测应用[J]. *管道技术与设备*, 2022(3): 41-44.
- CHE F, ZHU L L, WANG Y F, et al. Microwave nondestructive testing application of butt fusion joints for gas PE pipeline[J]. *Pipeline Technology and Equipment*, 2022(3): 41-44.
- [15] MURPHY K, LOWE D. Evaluation of a novel microwave based NDT inspection method for polyethylene joints[C]//*ASME 2011 Pressure Vessels and piping Conference*. [S.l.:s.n.], 2011: 321-327.
- [16] CARRIGAN T D, FORREST B E, ANDEM H N, et al. Nondestructive testing of nonmetallic pipelines using microwave reflectometry on an in-line inspection robot[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(2): 586-594.
- [17] GHASR M T, YING K, ZOUGHI R. 3D millimeter wave imaging of vertical cracks and its application for the inspection of HDPE pipes[C]//*Proceedings of the 40th Annual Review of Progress In Quantitative Nondestructive Evaluation*. [S.l.]: AIP Publishing LLC, 2014: 1581, 1531-1536.
- [18] 田贵云. 电磁无损检测传感与成像[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- TIAN G Y. Sensing and imaging for electromagnetic nondestructive testing [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2020.
- [19] YUAN B, QIAN Z, ZHANG C Z, et al. A critical review on the technique and mechanism of microwave-based denitrification in flue gas[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 120(10): 144-157.
- [20] 刘婕. 近场毫米波三维全息成像算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- LIU J. Research on near-field millimeter wave 3D holographic imaging algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [21] NAI X Z, YU Z Z, SONG Y D. Rethinking unsupervised texture defect detection using PCA[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 163: 107470.
- [22] 董仕佳. 基于PCA噪声预估的视频降噪及无参考质量评价研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- DONG S J. Research on video denoising and no-reference quality evaluation based on PCA noise prediction[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [23] CHIZH M, ZHURAVLEV A, RAZEVIK V, et al. Broadband microwave imaging for foam insulation diagnostics[C]//*Proceedings of 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1887-1894.
- [24] 褚致弘, 张逸竹, 曲秋红, 等. 高空空间分辨率高可见度的太赫兹光谱成像研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(2): 356-362.
- CHU Z H, ZHANG Y Z, QU Q H, et al. Terahertz spectral imaging with high spatial resolution and high visibility[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(2): 356-362.
- [25] 黄志健, 赵志强, 赵旌含. 相关滤波跟踪算法的改进预处理技术[J]. *福建电脑*, 2021, 37(10): 32-34.

HUANG Z J, ZHAO Z Q, ZHAO J H. Improved preprocessing technology for tracking algorithm based on correlation filtering[J]. Fujian Computer, 2021, 37(10): 32-34.

- [26] YI S H, CHIN L C. Analyzing a series of thermal infrared images to identify defects using a hybrid approach that combines robust principal component analysis and image segmentation[J]. NDT & E International, 2023: doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102818.

- [27] 肖夏伟, 陈苏怡, 朱伟兴. RGB-双边滤波增强的二维 Otsu 阈值分割算法[J]. 计算机时代, 2022(8): 34-38.

XIAO X W, CHEN S Y, ZHU W X. Two-dimensional Otsu threshold segmentation algorithm enhanced by RGB-bilateral filtering[J]. Computer Era, 2022(8): 34-38.

- [28] 李青蔚, 杜立杰, 杨亚磊, 等. TBM 掘进岩渣图像分割与识别方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(5): 803-813.

LI Q W, DU L J, YANG Y L, et al. Segmentation and recognition method of rock muck image during tunnel boring machine construction[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(5): 803-813.

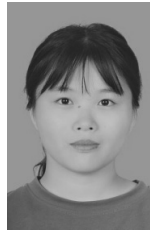
- [29] 姚金宝, 张义民, 张凯. 基于动态分组和权重学习教与学算法的 Otsu 图像阈值分割[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(10): 191-197, 237.

YAO J B, ZHANG Y M, ZHANG K. Otsu image threshold segmentation based on dynamic grouping and weight learning teaching and learning algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2022, 39(10): 191-197, 237.

### [作者简介]



雒明世 (1966- ), 男, 陕西咸阳人, 西安石油大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为现代通信网理论、无线传感器网络、智能数字油田、工业互联网新型通信协议与组网技术等。



张蒙蒙 (1997- ), 女, 河南濮阳人, 西安石油大学硕士生, 主要研究方向为计算机应用技术、微波成像。



方阳 (1988- ), 男, 陕西渭南人, 博士, 西安交通大学助理教授, 主要研究方向为微波/毫米波近场高分辨成像及其应用、微波无损检测、图像处理等。