

用于古币鉴别的增量磁导率动态检测方法

石 玉^{1,2,3}, 刘小鹏¹, 王晨汐¹, 李开宇^{1,2,3}

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016;
2. 文物无损检测与安全溯源江苏省文化和旅游重点实验室, 南京 210016;
3. 高速载运设施无损检测监控技术工业和信息化部重点实验室, 南京 210016)

摘要: 为了实现铁质文物的数字化鉴别, 构建其数字化基因特征, 对铁质文物的电磁无损检测进行了研究; 根据增量磁导率信号对铁质文物外部纹理特征、内部孔隙、材料性质等非常敏感的特点, 提出一种基于增量磁导率的电磁无损检测技术用于文物的鉴别; 设计硬件检测系统提取不同古币样本的增量磁导率信号; 采用经验模态分解提取电磁信号特征, 构建不同古币的平均包络基因图和基因序列; 引用相关度和欧式距离等指标, 比较不同古币基因序列的差异性从而实现古币的鉴别; 研究结果显示, 基于增量磁导率的古币检测方法在鉴别不同古币时具有较好的灵敏度与分辨力, 该鉴别方法可以作为后续文物保护工作的参考依据。

关键词: 增量磁导率; 古币鉴别; 电磁检测; 经验模态分解; 基因序列

MIP Dynamic Testing Method for Ancient Coin Identification

SHI Yu^{1,2,3}, LIU Xiaopeng¹, WANG Chenxi¹, LI Kaiyu^{1,2,3}

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China;

2. Non Destructive Testing and Safety Traceability of Cultural Relics, Jiangsu Provincial Key Laboratory of
Culture and Tourism, Nanjing 210016, China;

3. Nondestructive Detection and Monitoring Technology for High Speed Transportation Facilities,
Key Laboratory of Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing 210016, China)

Abstract: To achieve digital identification of iron relics and construct their digital genetic characteristics, research on electromagnetic non-destructive testing of iron relics is conducted. By using magnetic incremental permeability (MIP) signals to detect the high sensitive features of iron artifacts such as external characteristics, internal voids, and material properties, an electromagnetic non-destructive testing technique was proposed to identify relics. A hardware detection system was designed to extract the MIP signals from various ancient coin samples. Empirical mode decomposition was employed to extract the feature of electromagnetic signals, thus establishing average envelope genetic maps and genetic sequences for different coins. By introducing the metrics of correlation coefficient and Euclidean distance and comparing genetic sequence differences, the discrimination of ancient coins was realized. Research results demonstrate that the MIP-based method exhibits favorable sensitivity and resolution in distinguishing different ancient coins, and provides a reference basis for subsequent cultural relic conservation efforts.

Keywords: MIP; ancient coin identification; electromagnetic testing; empirical mode decomposition; gene sequence

收稿日期:2025-01-16; 修回日期:2025-02-25。

基金项目:中央高校基本科研业务(NJ2024015);国家重点研发计划高温承压类特种设备损伤精准检测技术装备研发及示范应用(2022YFC3005000);南京航空航天大学科研基地创新基金(NJ2024043)。

作者简介:石 玉(1973-),女,博士,讲师。

通讯作者:刘小鹏(2002-),男,硕士研究生。

引用格式:石 玉,刘小鹏,王晨汐,等.用于古币鉴别的增量磁导率动态检测方法[J].计算机测量与控制,2025,33(12):22-27,50.

0 引言

传统的文物检测和鉴别方法可能会对文物造成一定的影响, 如从文物上移动小部分材料进行测试会对文物造成不可逆的物理损伤, 某些化学分析方法会导致文物材料的永久改变等^[1]。同时, 传统文物检测严重依赖专家个人经验的影响, 缺乏客观性与一致性。

无损检测技术具有非破坏性、可重复性及高灵敏度等特点^[2-3], 在文物检测领域中具有举足轻重的地位。文献[4]利用X射线荧光分析仪对故宫博物院藏兽面纹青铜鼎进行无损分析, 准确得出其金属成分为铜—锡二元合金。文献[5]通过高光谱成像技术检测石质文物, 采集了不同环境风化砂岩的可见光—近红外(VNIR, visible and near-infrared)和短波红外(SWIR, short-wave infrared)光谱数据, 确定其主要风化赋存环境。文献[6]对铁质文物样品进行能谱CT定量分析, 通过物质分解算法来评估铁质文物样本里基物质的构成比例。利用先进的检测方法, 最大限度地确保文物的安全性、完整性并实现其长期保存, 是现代文物保护的主流方向。

增量磁导率(MIP, magnetic incremental permeability)是一种新型的电磁无损检测方法, 其在不接触情况下可以用来检测物质的表面特征变化和微观结构特性^[7-9], 已经在诸多领域中得到应用。文献[10]根据增量磁导率特性对比分析了多项磁参量, 实现了对65 Mn钢板表面镀镍层厚度的检测。文献[11]研究了瞬态小电流信号下钢轨的局部磁滞曲线, 并用增量磁导率计算钢轨频变阻抗曲线。文献[12]利用有限元分析方法探究了管道表面缺陷对于管道内部涡流场和磁导率的影响规律, 通过增量磁导率检测油气管道缺陷。

增量磁导率在检测铁质文物的微观特性和结构变化方面具有显著优势。与X射线荧光分析相比, X射线辐射可能会对文物基体造成一定的损伤, 且不能测量物质的形貌特征, 对微观组织变化不敏感。与高光谱成像技术相比, 高光谱成像技术主要用于测量物质宏观表面, 不能用于测微观组织结构。与能量谱CT相比, 能量谱CT可以反映物质内部三维结构, 但不能解析微观组织结构特征。

不同铁质古币文物由于铸造工艺、保存方法和年代等原因, 会导致外部形貌(如纹理)和内部结构(如孔隙)、材质等存在差异, 利用电磁信号进行检测时, 这些差异会导致增量磁导率信号的不同, 这为利用增量磁导率对古币进行无损检测提供了依据^[13-14]。本文搭建了专用电磁无损检测系统, 通过探头在古币上移动, 动态采集古币移动状态下的增量磁导率信号, 提取信号特征并构建古币唯一的基因序列, 从而实现对古币的鉴别。

1 基于增量磁导率的古币检测系统构建

1.1 增量磁导率基本原理

磁导率是表示材料磁化难易程度的物理量^[15], 而增量磁导率是材料磁化过程中可逆磁畴运动导致磁导率变化大小的物理量^[16]。相邻的两个磁畴间原子的自旋取向无法发生突变, 故两个磁畴之间一定存在着一个过渡区域, 该过渡区域具有一定的厚度, 被称为畴壁。可逆磁化运动是指磁性材料在外部磁化场上叠加的高频激励下, 磁畴发生相应的偏转或移动, 在撤销该磁化场后, 磁畴还可以恢复到初始的磁化状态。可利用高频激励源在磁滞回线上叠加小磁滞环, 来影响磁性材料的磁化退磁过程中增量磁导率的变化^[17]。

铁磁性材料的组织成分、晶粒尺寸、晶界面积、偏析、位错、掺杂等微观组织结构在决定材料机械性能的同时, 也会影响磁畴的成型、畴壁厚度、磁畴翻转、畴壁能及磁晶各向异性等。在磁滞曲线中(如图1所示), 磁性材料的磁畴大小、分布和掺杂沉淀等因素都会影响磁导率的变化部分^[18], 所以增量磁导率与磁性材料内部的微观结构特性密切相关。由物理应变、化学腐蚀等因素所导致的材料内部微观结构变化都会引起增量磁导率的变化, 故增量磁导率用于铁磁性材料的疲劳状态^[19]、应力应变^[20]、塑性形变^[21]等的检测时, 具有极高的灵敏度。

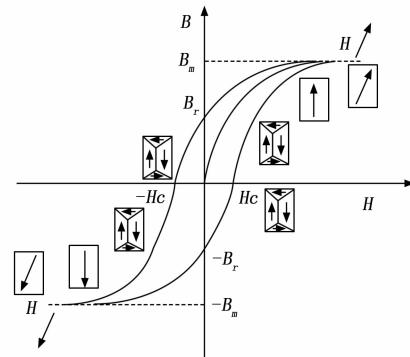


图1 磁滞曲线与对应的磁畴变化

增量磁导率的计算公式如下所示:

$$\Delta\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (1)$$

式中, μ 为材料的磁导率, $\Delta\mu$ 为材料的增量磁导率。与常规的电磁检测不同, 增量磁导率的电磁信号激励源主要有两个^[22]: 一个为低频激励磁场, 其作用是作为偏置磁场缓慢驱动磁畴运动, 使其能够完整遍历磁滞回线; 另一个激励源为高频磁场, 作用是在磁滞回线周期内不同时间节点叠加增量磁场 ΔH , 引起磁感应强度 ΔB 的变化^[23], 如图2所示。

增量磁导率对材料的微观组织结构特征(晶粒大

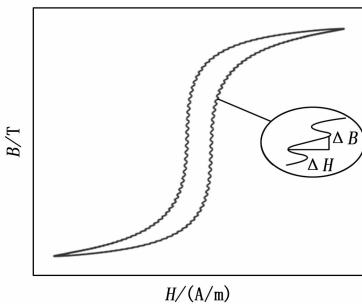


图 2 叠加高频激励后的磁滞回线

小、晶体缺陷、残余应力梯度等)极为敏感。当古币在铸造过程中经历不同的冷却速率或热处理工艺时,会导致晶粒生长模式和位错分布的显著差异,进而影响磁导率特性,这些微观结构变化可以通过增量磁导率信号进行有效表征。同时,古币在长期保存过程中可能因环境因素发生腐蚀或机械损伤,这些变化会改变材料的微观结构和磁性特性,而增量磁导率技术能够捕捉到这些微小的变化与特征,为古币的鉴别提供依据。

1.2 基于增量磁导率的古币检测方案

本文研究对象为铁磁质古币样本,为了消除古币位置移动所带来的误差,本文设计了专用模具以固定古币。实验采用三维移动平台实现检测探头的扫描过程,控制探头扫描的起始点与终止点的位置不变。设古币样本横轴方向从左到右为扫描路径1,纵轴方向从上到下为扫描路径2。同时,操控三维移动平台使检测探头匀速对古币样本1和2进行扫描,分析移动状态下增量磁导率信号的变化情况。

提离效应是电磁检测中的一种常见现象^[24],当探头与被测物表面之间的距离(即提离)发生变化时,会对检测信号的性质与强度造成一定影响。由于古币表面通常存在制造工艺留下的纹理,这些纹理凹凸不平的特性会使检测过程中的提离发生变化,从而影响增量磁导率信号的强度发生变化,故增量磁导率信号包含了古币表面的纹理信息。同时,古币在使用及存放过程中也会出现不同程度的磨损、腐蚀等,每个古币的损伤特征都是不同的,它们会对古币表面纹理和微观结构产生影响。在检测过程中,这些损伤特征同样也会影响所提取电磁信号,即增量磁导率信号也包含了古币磨损、腐蚀等状况信息,从而增强了古币基因序列的唯一性。

在设计检测方案过程中,控制探头与被测古币样本表面之间的距离是设计检测方案的关键之一,本文通过控制模具滑轮位置确保探头与古币整体表面的提离距离为1.8 mm。该提离距离下避免了探头与古币表面的直接接触,使探头能够平稳对古币样本表面进行扫描,同时确保增量磁导率信号的灵敏度与稳定性,避免因提离距离过大造成信号幅值的衰减,有效减小了检测误差。

1.3 古币的增量磁导率硬件系统设计

增量磁导率检测系统产生激励磁场对被测古币磁化,通过检测探头拾取增量磁导率信号,对信号调理后由A/D采集卡输入到上位机,上位机进行信号处理和特征提取等,从而获得古币的基因序列。增量磁导率检测系统的硬件构成主要包括以下部分:1)电磁信号高频激励源和低频激励源;2)检测探头;3)信号调理电路;4)增量磁导率信号采集模块;5)上位机系统。具体结构如图3所示。

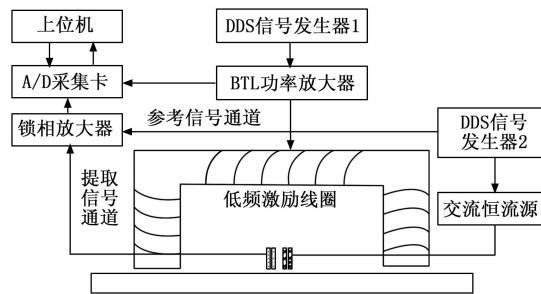


图 3 增量磁导率检测系统设计总体框图

检测探头由铁氧体磁芯、低频激励线圈、高频激励线圈与提取线圈组成。通过实验验证,线圈匝数对检测系统的灵敏度和信噪比有着显著影响。匝数过多可能导致阻抗过高,且会导致探头制作工艺复杂;匝数过少则可能降低检测信号强度。低频激励线圈缠绕在U型铁氧体磁芯上,由直径为1 mm的铜线制成,线圈匝数为720圈。提取线圈和高频激励线圈同轴绕制在同一圆柱磁芯上,放置在U型磁芯中间,高频激励线圈高度略高于提取线圈,均由直径为0.24 mm的铜线制成,绕制匝数分别为240圈和420圈,外部由绝缘层包裹。

检测探头工作时需要两个交流激励信号源,通常情况下,检测所需要的高频信号源产生的信号频率应为低频信号源产生的信号频率的100倍以上,低频信号在遍历整个磁滞曲线的同时,频率不能过高,否则会导致磁畴不能有效翻转。同时高频信号的频率也应控制在合理范围,太高会导致趋肤深度过小,磁场不能充分渗透材料整体。初始激励信号由两个直接数字频率合成器(DDS, direct digital synthesizer)产生,分别为30 V/10 Hz和1 V/5 kHz。由于低频激励源的功率要求较高,采用桥式推挽功率放大电路(BTL, balanced transformer less)进行功率放大,其输出功率不小于40 W。高频激励源功率需求较低,采用单LM3886构成的交流恒流源实现高频信号的功率放大。检测探头的激励线圈在高频和低频激励信号作用下产生交变磁场对古币样本进行磁化。

采用检测探头提取增量磁导率信号时,由于被测物件外部纹理特征与内部微观结构存在差异,会导致涡流

线圈的阻抗产生变化, 从而进一步影响所提取 MIP 信号的幅值与相位。本文设计了基于正交矢量型锁相放大器的信号调理电路, 提高了系统的灵敏度与稳定性, 用于解调和提取所检测的增量磁导率信号, 其结构框架如图 4 所示。

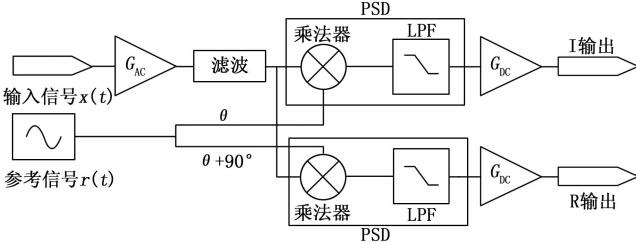


图 4 正交矢量型锁相放大器框图

增量磁导率信号 $x(t)$ 经过信号通道后会被交流放大, 为提高相敏检波器 (PSD, phase sensitive detector) 的动态范围, 对放大的信号进行初步滤波, 以去除部分噪声干扰。PSD 由乘法器和低通滤波器 (LPF, low-pass filter) 组成, 参考信号 $r(t)$ 与相移 90° 后的 $r(t)$ 分别作为 PSD 的基准信号, 相敏检波后经低通滤波和直流放大 (G_{DC}) 可得到两路输出信号, 两路输出信号分别为增量磁导率信号的实部输出 (R 输出) 与虚部 (I 输出), 可进一步提取信号的幅值信息与相位信息, 如式 (2) 所示:

$$\begin{cases} V_s(t) = \sqrt{u_R^2(t) + u_I^2(t)} \\ \theta(t) = \arctan \frac{uI(t)}{uR(t)} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $V_s(t)$ 为幅值信息, $\theta(t)$ 为相位信息, $uR(t)$ 为实部输出, $uI(t)$ 为虚部输出。

信号经过锁相放大器后, 被 A/D 信号采集模块所采集, 并进一步在上位机中实现增量磁导率信号的分析处理与特征提取。

1.4 古币的增量磁导率检测指标

为了准确地分析古币样本 MIP 信号检测的重复性, 引入相关度的概念。设 (X_1, X_2, \dots, X_n) 为一个 n 维随机向量, \mathbf{R} 是其 n 阶相关矩阵, 其中的元素 ρ_{ij} 表示第 i 个随机向量和第 j 个随机变量之间的皮尔逊相关系数, 定义为:

$$\rho_{ij} = \frac{Cov(X_i, X_j)}{\sigma_i \sigma_j} \quad (3)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \cdots & \rho_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $Cov(X_i, X_j)$ 是 X_i 和 X_j 的协方差, σ_i 和 σ_j 是 X_i 和 X_j 的标准差。通过引入皮尔逊相关系数, 可以量化不同信号之间的线性关系强度。

为了进一步分析古币检测的数据可靠性, 引入欧式距离 (Euclidean Metric) 的概念, 欧式矩阵提供了数据点之间距离的量化信息。对于空间中的两个点 $P_1 = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n})$ 和 $P_2 = (x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n})$, 它们在 n 维空间中的欧式距离 d 可以表示为:

$$d(P_1, P_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{2i} - x_{1i})^2} \quad (5)$$

2 构建古币基因序列

基因序列作为古币的特征标识, 用于表征古币的各种属性与特征。为了多维度探究古币的基因序列, 需要提取古币在不同检测条件下的特征值。利用检测探头分别以不同的速率和方向对两个不同的古币样本 1 和 2 进行线性扫描, 得到古币关于增量磁导率的原始信号, 用于后续特征值的提取分析。扫描速率分别为 4 mm/s 和 6 mm/s, 方向分别为扫描路径 1 和路径 2, 本文开展了重复性实验验证数据的一致性和可靠性, 同时通过对不同古币样本的特征值来验证基因序列的唯一性。

2.1 MIP 原始信号的提取

探头在扫描的过程中, 由于被测古币每个探测点的表面纹理特征与内部微观特性不同, 得到的增量磁导率原始信号会存在显著差异。以每个探测路径的探测点数为横轴, 提取出的 MIP 信号为纵轴, 可得到各个探测点与 MIP 信号的对应关系。图 5 中 (a) 和 (b) 分别为 1 号古币以 4 mm/s 和 6 mm/s 的速度沿着路径 1 探测时的 MIP 原始幅值信号变化图。

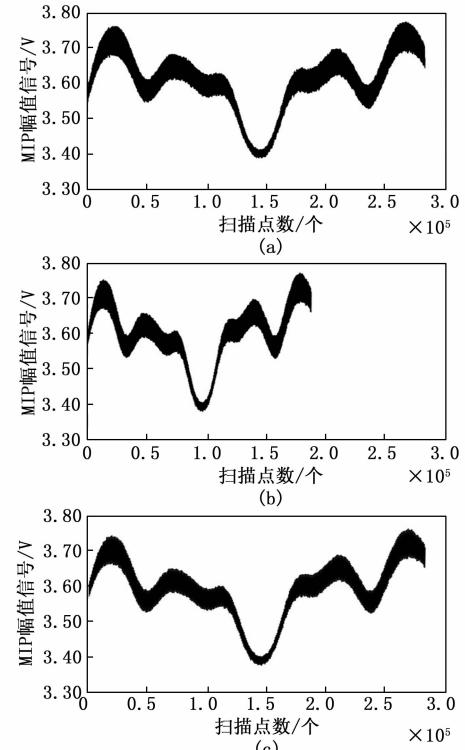


图 5 MIP 原始信号的处理

由于探头扫描速度不同, 得到的原始 MIP 信号的点数存在差异性, 需要对其进行归一化处理, 即对扫描速度较大的数据样本进行线性插值处理。图 5 中 (c) 为 (b) 经过插值处理后的 MIP 原始幅值信号变化图。

2.2 经验模态分解

经验模态分解 (EMD, empirical mode decomposition) 用于处理非线性与非平稳信号, 是一种自适应性时间频率分析方法, 其可以将包含多个频率的复杂信号分解为若干个本征模态函数 (IMF, intrinsic mode function)。本文引入 EMD 提取 MIP 信号幅值特征, 分解后的每一个 IMF 具有单一频率成分简单震荡模式, 如式 (6) 所示:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t) \quad (6)$$

式中, $x(t)$ 为原始幅值信号, $c_i(t)$ 为 IMF 分量, $r(t)$ 为残余分量。其中, i 表示经验模态分解的层数。1 号古币以 4 mm/s 的速度沿着路径 1 探测的 MIP 原始幅值信号经过 EMD 分解后的信号如图 6 所示。

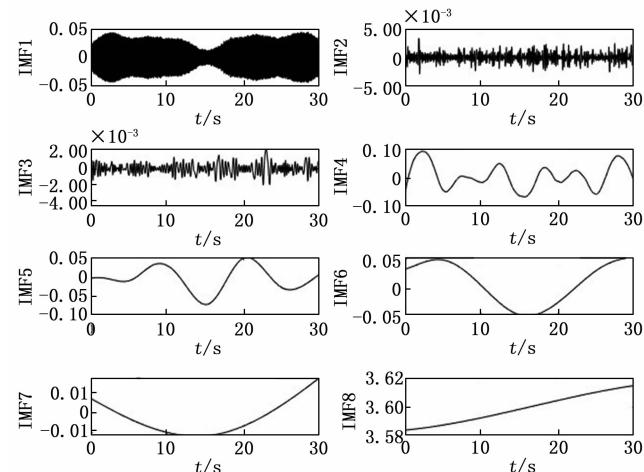


图 6 EMD 分解

平均包络线能够自适应地捕捉信号中的多尺度特征, 常用于描述信号的瞬时幅度平均变化趋势, 本文提出了利用平均包络线来构建古币样本的基因序列图谱。将不同古币扫描状态下的 MIP 原始幅值信号经过 EMD 分解, 保留信噪比较高的分量 IMF4 至 IMF8, 以提高特征提取的准确性, 通过特征融合算法将各分量的信息整合为一个统一的平均包络线, 表征古币增量磁导信号的基因序列, 用于构建平均包络基因图, 并作为后续古币基因序列图谱的组成成分。

3 实验结果

3.1 相同古币的重复性实验

将检测探头以相同的速率和相同的路径对同一古币样本进行重复扫描, 得到关于古币重复性的平均包络基

因图。图 7 为扫描速度为 4 mm/s 时古币样本 1 的重复性实验 MIP 平均包络基因图。

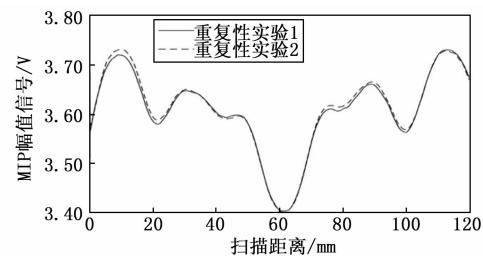


图 7 重复性实验曲线

引用公式 (3) 和公式 (4), 计算古币样本 1 在两次实验中不同速度和不同扫描路径下的重复性相关度矩阵, 如表 1 所示。表中上侧和左侧栏目分别为第一次和第二次实验数据项名称。

表 1 古币 1 重复性实验相关度矩阵

第一次实验		4 速		6 速	
		路径 1	路径 2	路径 1	路径 2
第二次实验	路径 1	0.998 4	0.846 9	0.988 3	0.843 6
	路径 2	0.854 1	0.995 0	0.807 1	0.990 1
4 速	路径 1	0.990 6	0.858 0	0.983 3	0.861 3
	路径 2	0.870 6	0.987 1	0.843 4	0.983 2
6 速	路径 1	0.990 6	0.858 0	0.983 3	0.861 3
	路径 2	0.870 6	0.987 1	0.843 4	0.983 2

从表中对角线可以看出, 相同两次古币的检测速度和方向都一致时其相关系数均在 0.98 以上, 具有高度相关性, 同时也表明检测数据具有良好的稳定性和一致性。进一步对同一枚古币在相同检测方向而不同检测速度的情况下开展实验, 检测结果也表现出高度的相关性, 说明检测速度的差异不会改变古币的特征属性, 其基因序列与古币自身属性相关, 具有唯一性。

引用公式 (5) 计算经过插值变化后古币样本的 MIP 幅值信号的欧式距离, 古币样本 1 的重复性实验欧式矩阵 D_{11} 为:

$$D_{11} = \begin{bmatrix} 3.044 & 23.634 & 8.716 & 23.731 \\ 24.152 & 6.344 & 26.098 & 6.881 \\ 9.016 & 22.589 & 8.282 & 22.371 \\ 22.610 & 6.120 & 22.368 & 7.108 \end{bmatrix} \quad (7)$$

古币样本 2 的重复性实验欧式矩阵 D_{22} 为:

$$D_{22} = \begin{bmatrix} 6.630 & 24.170 & 10.564 & 23.517 \\ 20.393 & 6.189 & 19.378 & 9.364 \\ 13.938 & 19.397 & 5.713 & 18.463 \\ 20.311 & 9.955 & 18.491 & 7.603 \end{bmatrix} \quad (8)$$

将欧式矩阵对角线元素与其他元素进行对比, 对角线元素值越小表明重复性实验中的两次实验数据差异越小, 其可重复性就越高。上述两个欧式矩阵的对比显示, 该检测方法能够进行实验的复现并获得相同的结果。通过对重复性实验相关度和欧式距离的分析, 表明

基于增量磁导率的古币鉴别方法在古币特征提取方面具有稳定性, 且构建的古币样本基因序列具有唯一性, 增强了研究的透明度与可靠性。

3.2 不同古币的对照实验

为了进行古币的对照分析, 本文采用了材质、尺寸均相同且同一批生产的古币 1 和古币 2。将检测探头以 4 mm/s 的速率按照检测路径 1 分别对古币 1 和古币 2 进行扫描, 得到在该检测条件下的 MIP 原始幅值信号, 通过 EMD 分解提取平均包络线, 构建两种古币的平均包络基因对照图, 如图 8 (a) 所示。为了验证不同检测条件对结果的影响, 进一步改变检测速率和检测路径, 分别对古币 1 和古币 2 重复上述检测过程。最终, 在 4 种不同的检测条件下获得了对应的平均包络基因对照图, 分别如图 8 (a) ~ (d) 所示。

从所得的平均包络基因对照图中可以观察到, 在相同的检测条件下, 不同古币表现出显著不同的基因序列特征。例如, 图 (a) 显示古币 1 和古币 2 的 MIP 幅值信号峰峰值相差较大, 两个古币的基因序列存在明显差异。

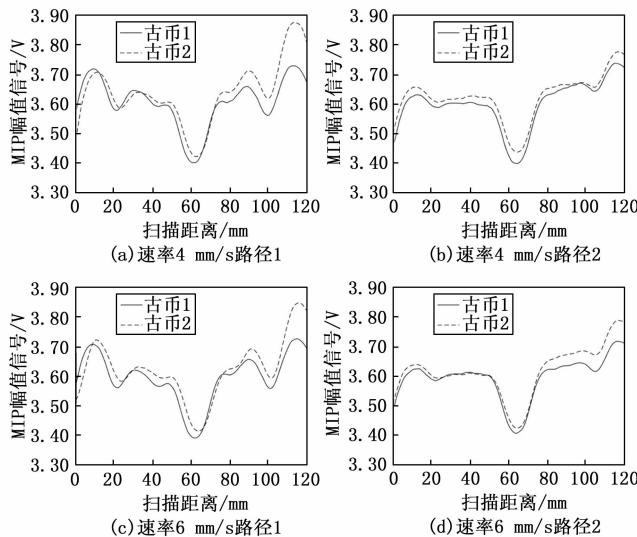


图 8 不同古币在不同条件下的平均包络基因对照图

对古币基因序列进行进一步分析, 计算古币样本 1 和 2 在不同检测条件下 MIP 幅值信号的欧氏距离, 得到古币样本 1 和古币样本 2 欧式矩阵 D_{12} :

$$D_{12} = \begin{bmatrix} 31.169 & 23.734 & 24.509 & 27.180 \\ 32.638 & 15.505 & 27.711 & 16.742 \\ 38.257 & 28.373 & 29.825 & 31.681 \\ 32.287 & 15.086 & 27.389 & 15.466 \end{bmatrix} \quad (9)$$

对照实验中, 欧式矩阵对角线元素的值与重复性实验相比明显增大, 表明古币 1 和古币 2 在相同的条件下进行检测时, 其基因序列存在显著差异。

3.3 结果

将重复性实验和对照实验测得的欧式矩阵的迹 (J)

作为欧几里得度量的标准, 如表 2 所示。从表中可以看到, 重复性实验中的度量值较小, 表明该古币检测方法具有较好的稳定性, 能够在相同条件下能够产生一致的结果, 确保了实验的可重复性和可信度。而对照实验中的度量值较大, 则表明该检测方法能够有效区分不同古币之间的差异, 具有较好的分辨能力。

表 2 欧式矩阵的迹

矩阵	D_{11}	D_{22}	D_{12}
J	24.778	26.135	91.965

4 结束语

文物资源属于宝贵的不可再生资源, 其保护和研究至关重要, 本文提出了基于增量磁导率的电磁检测技术用于古币的鉴别, 并引用相关度、欧氏距离等参数评估古币鉴别实验的准确性。实验证明, 通过增量磁导率检测构成的古币基因序列具有客观性与唯一性, 该检测方法既能从古币外部轮廓特征进行识别, 又能依据内部结构特征对古币进行深度解析, 同时还可以利用古币的磨损、腐蚀等损伤特征对不同古币加以辨别。该鉴别方法不仅能够区分不同材质的古币, 还能识别同一材质, 但制造工艺或使用历史不同的古币, 为文物基因库的建立提供理论支持, 同时有助于深入研究古代铸造技术和经济发展, 提供有价值的数据支持。

参考文献:

- [1] 薛宏涛. 文物修复与保护的探索与思考 [J]. 有色金属 (冶炼部分), 2025 (1): 172.
- [2] 张志刚, 张 岩, 吴文平, 等. 基于 X 射线数字成像的 GIS 设备缺陷无损检测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32 (6): 35~41.
- [3] 李 超, 张志杰, 陈昊泽, 等. 基于 ZYNQ 的涡流无损检测系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (8): 56~61.
- [4] 王有亮, 高 飞, 荀 艳. 故宫博物院藏兽面纹青铜斝的保护修复研究 [J]. 中国文物科学, 2020 (2): 70~75.
- [5] 王 鑫, 程 远, 张若愚, 等. 基于高光谱成像技术的石质文物风化赋存环境分类方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62 (10): 1037005.
- [6] 刘跃东, 周 琰, 彭启晗, 等. 能谱 CT 在铁质文物定量分析中的应用 [J]. 中国体视学与图像分析, 2024, 29 (2): 85~93.
- [7] STASHKOV A N, SCHAPOVA E A, NICHIPURUK A P, et al. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel [J]. NDT&E International, 2021, 118 (11): 102398.

(下转第 50 页)