

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2025 年 2 月 20 日 (20.02.2025)



(10) 国际公布号
WO 2025/035512 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01N 27/83 (2006.01) **G06F 30/27** (2020.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2023/116749
- (22) 国际申请日: 2023 年 9 月 4 日 (04.09.2023)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202311034794.9 2023年8月16日 (16.08.2023) CN
- (71) 申请人: 清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园,
Beijing 100084 (CN)。
- (72) 发明人: 郭静波 (GUO, Jingbo); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。王艺钊 (WANG, Yizhao); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。胡铁华 (HU, Tiehua); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。
- (74) 代理人: 北京安信方达知识产权代理有限公司 (AFD CHINA INTELLECTUAL PROPERTY LAW

OFFICE); 中国北京市海淀区学清路 38 号 (B 座)21层2108, Beijing 100083 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF,

(54) Title: CRACK QUANTIFICATION METHOD AND APPARATUS BASED ON ORTHOGONAL TWINNING AND USED FOR OIL AND GAS PIPELINES, AND STORAGE MEDIUM

(54) 发明名称: 基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法及装置、存储介质

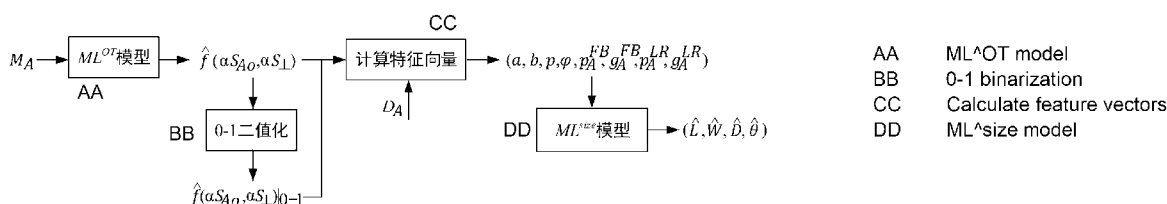


图 3B

(57) Abstract: A crack quantification method and apparatus based on orthogonal twinning and used for oil and gas pipelines, and a storage medium. The method comprises: acquiring a triaxial magnetic flux leakage measurement signal modulus value of an inner wall crack or an outer wall crack under a condition of a unidirectional direct-current excitation, and acquiring a dynamic magnetic signal or an eddy current signal under a condition of a dynamic magnetic field excitation that is orthogonal to the direct-current excitation; inputting the triaxial magnetic flux leakage measurement signal modulus value into a crack signal orthogonal twin model, so as to obtain a magnetic flux leakage enhancement estimation signal, wherein the magnetic flux leakage enhancement estimation signal is a function of an orthogonal twin triaxial magnetic flux leakage signal modulus value, the orthogonal twin triaxial magnetic flux leakage signal modulus value is a magnetic flux leakage response signal modulus value under a condition of a virtual orthogonal twin direct-current excitation, and the virtual orthogonal twin direct-current excitation and the unidirectional direct-current excitation are in the same plane and have equal magnitudes and perpendicular directions; and extracting feature vectors from the magnetic flux leakage enhancement estimation signal and the dynamic magnetic signal or the eddy current signal, and inputting the feature vectors into a crack scale estimation model, so as to obtain the size and inclination angle of a crack.

CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN,
TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法及装置、存储介质, 该方法包括: 获取在单向直流励磁条件下内壁裂纹或者外壁裂纹的三轴漏磁测量信号模值, 获取在与直流励磁正交的动态磁场激励条件下的动磁信号或涡流信号; 将所述三轴漏磁测量信号模值输入裂纹信号正交孪生模型, 得到漏磁增强估计信号, 所述漏磁增强估计信号为正交孪生三轴漏磁信号模值的函数, 所述正交孪生三轴漏磁信号模值为在虚拟正交孪生直流励磁条件下的漏磁响应信号模值, 所述虚拟正交孪生直流励磁与所述单向直流励磁同平面、大小相等且方向垂直; 从所述漏磁增强估计信号以及所述动磁信号或涡流信号中提取特征向量, 将所述特征向量输入裂纹尺度估计模型得到裂纹的尺寸和倾斜角。

基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法及装置、存储介质

本申请要求于 2023 年 8 月 16 日提交中国专利局、申请号为 2023110347949、发明名称为“基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法及装置、存储介质”的中国专利申请的优先权，其内容应理解为通过引用的方式并入本申请中。

技术领域

本公开实施例涉及但不限于裂纹检测技术领域，尤其涉及一种基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法及装置、存储介质，孪生的适用对象包括但不限于油气管道或输氢管道的管体裂纹信号、弯头裂纹信号、环焊缝裂纹信号，高铁钢轨裂纹信号、储罐底板裂纹等铁磁性金属材料裂纹信号。

背景技术

油气管道、输氢管道、高铁钢轨、石油储罐等铁磁性金属材料长期运营在复杂的自然环境和压力负荷中，在材料内部或内外壁出现应力裂纹、疲劳裂纹、脆性裂纹、氢致裂纹等微小裂纹，进而发展成为可见的裂隙或尺度较大的金属损失。裂纹是金属材料服役过程中各类缺陷的主要源头因素之一。

金属损失相对裂纹而言由于体积较大而更容易被检测，目前已经有多种比较成熟的技术可以准确检测、识别、量化金属损失缺陷。但是裂纹通常尺度较小，尤其是在检测速度大于 2m/s 的条件下，如果裂纹处于发生的起始阶段或服役过程中裂纹处于的较早发展阶段，对早期微小裂纹的检测、识别、量化难度更高。

同时，裂纹检测中裂纹响应信号与激励信号、激励方向、感测传感器等密切相关。例如，在油气管道单向漏磁（轴向 MFL 或环向 MFL）检测中，以励磁方向为基准，对于相同尺寸的裂纹，它的倾斜角模值越大，它的漏磁响应信号的幅值越大；它的倾斜角模值越小，它的漏磁响应信号的幅值越小。因此，轴向励磁条件下的轴向裂纹或裂隙信号非常微弱，甚至被业界认为无法实现工业级检测。改变轴向励磁为环向励磁可以提高轴向裂纹或裂隙信号的强度，但环向励磁检测器又对环向裂纹或裂缝的检测效果欠佳。为此，工业界出现了轴向励磁 MFL 检测器外加环向励磁 MFL 检测器的串行组合 MFL 检测器方案。很明显组合 MFL 检测器方案明显提升了设备制造成本和检测工程成本；同时传统 MFL 检测受其原理的制约，对微小裂纹的检测、识别、量化能力明显不足或根本无法实现。

发明内容

本公开实施例提供了一种基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法及装置、存储介质，

这里的“正交孪生”概念被定义为，在已知单向直流励磁的原始响应信号的情况下，得到与单向直流励磁同平面、大小相等、方向垂直的孪生磁场对应的响应信号，该响应信号被定义为“孪生响应信号”（例如孪生漏磁响应信号或孪生动磁/涡流响应信号），它与原始单向直流励磁的响应信号，即“原始响应信号”（例如原始漏磁响应信号或原始动磁或涡流响应信号）也构成孪生关系。通过联合处理“孪生响应信号”和“原始响应信号”，可以大幅度提高油气管道“小倾斜角裂纹”的量化精度，尤其是与励磁方向平行分布的裂纹的量化精度，包括裂纹的长度精度、宽度精度、深度精度、倾斜角精度等等。这里的“小倾斜角裂纹”是指以励磁方向为基准，正负偏差不超过 20° 倾斜角的裂纹。“正交孪生”的方法包括但不限于机器学习模型映射法、数学解析法、电路（或电磁）仿真法、硬件设备真实信号产生法等。将“原始响应信号”变换为“孪生响应信号”的过程定义为“正交孪生变换”。

本公开实施例采用的技术方案为：

本公开实施例提供了一种基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法，包括：获取在单向直流励磁条件下的内壁裂纹或者外壁裂纹三轴漏磁测量信号模值，获取在与直流励磁正交的动态磁场激励条件下的动磁信号或涡流信号，所述单向直流励磁指具有单一方向的直流励磁方式；将所述三轴漏磁测量信号模值输入裂纹信号正交孪生模型，得到漏磁增强估计信号，所述漏磁增强估计信号为仿真的正交孪生三轴漏磁信号模值的函数，所述正交孪生三轴漏磁信号模值为在虚拟正交孪生直流励磁条件下的三轴漏磁响应信号模值，所述虚拟正交孪生直流励磁与所述单向直流励磁同平面、大小相等且方向垂直；从所述漏磁增强估计信号以及所述动磁信号或涡流信号中提取特征向量，将所述特征向量输入裂纹尺度估计模型，得到裂纹的尺寸和倾斜角。

可选地，从所述漏磁增强估计信号以及所述动磁信号或涡流信号中提取特征向量，包括：根据所述漏磁增强估计信号得到至少一个第一特征值；根据所述动磁信号或涡流信号得到至少一个第二特征值；将所述第一特征值和第二特征值组成特征向量。

可选地，所述第一特征值包括：长轴、短轴、长轴倾斜角以及峰值，所述根据所述漏磁增强估计信号得到第一特征值，包括：根据预设的二值化阈值，对所述漏磁增强估计信号进行二值化处理，得到二值化漏磁信号；计算所述二值化漏磁信号的边缘轮廓的长轴、短轴、长轴倾斜角以及所述漏磁增强估计信号的峰值，将得到的长轴、短轴、长轴倾斜角以及峰值作为所述第一特征值；所述动磁信号或涡流信号包括前后线圈差分信号和左右线圈差分信号，所述第二特征值包括：所述前后线圈差分信号的峰值和峰-峰值间距，以及所述左右线圈差分信号的峰值和峰值间距。

可选地，所述裂纹信号正交孪生模型为通过卷积神经网络实现的自编码器模型，所述自编码器模型包括编码器部分和解码器部分；所述裂纹尺度估计模型为全连接神经网络。

可选地，所述漏磁增强估计信号为仿真最优三轴漏磁信号模值 S_{A0} 与仿真的正交孪生

三轴漏磁信号模值 $S_{\perp}$ 的函数 $f(\alpha S_{A0}, \alpha S_{\perp})$ ，所述仿真最优三轴漏磁信号模值 S_{A0} 是使 $\|\alpha S_A - M_A\|_F$ 最小的仿真三轴漏磁信号模值，其中 M_A 为所述三轴漏磁测量信号模值， S_A 为将裂纹尺度代入磁偶极子模型得到的仿真三轴漏磁信号模值， $\|\cdot\|_F$ 为矩阵的 Frobenius 范数， α 为调节因子； $S_{A0} = \sqrt{(S_{A0}^X)^2 + (S_{A0}^Y)^2 + (S_{A0}^Z)^2}$ ， S_{A0}^X 、 S_{A0}^Y 、 S_{A0}^Z 分别是仿真三轴漏

- 5 磁信号的 X 轴分量、Y 轴分量以及 Z 轴分量，所述 X 轴方向与所述单向直流励磁的激励方向相同，所述 Y 轴方向在所述油气管道平面内与所述 X 轴方向垂直，所述 Z 轴方向分别与所述 X 轴方向和 Y 轴方向垂直； $S_{\perp} = \sqrt{(S_{\perp}^X)^2 + (S_{\perp}^Y)^2 + (S_{\perp}^Z)^2}$ ， $S_{\perp}^X$ 、 $S_{\perp}^Y$ 、 $S_{\perp}^Z$ 分别是正交孪生三轴漏磁信号的 X 轴分量、Y 轴分量以及 Z 轴分量； $f(\alpha S_{A0}, \alpha S_{\perp}) = K \cdot \sqrt{(\alpha S_{A0})^2 + (\alpha S_{\perp})^2}$ ， $K \geq 1$ ；调节因子 α 表示等于 M_A 矩阵的最大元素除以初始矩阵的最大元素，所述初始矩阵为将裂纹实测尺度代入磁偶极子模型计算所得的仿真三轴漏磁信号模值组成的矩阵。
- 10

- 可选地，所述方法还包括：对于多个裂纹样本，使用在单向直流励磁条件下的三轴漏磁测量信号模值以及对应的所述漏磁增强估计信号训练所述裂纹信号正交孪生模型，其中，每个所述裂纹样本对应的漏磁增强估计信号通过如下方法生成：以所述裂纹样本的实测尺
- 15 度为初始的裂纹尺度；用 M_A 矩阵的最大元素除以初始矩阵的最大元素得到调节因子 α ， M_A 为所述三轴漏磁测量信号模值；计算 $\|\alpha S_A - M_A\|_F$ ，其中 S_A 为将裂纹尺度代入磁偶极子模型得到的仿真三轴漏磁信号模值， $\|\cdot\|_F$ 为矩阵的 Frobenius 范数；反复调节所述裂纹尺度，并将所述裂纹尺度输入裂纹磁偶极子模型，直到得到使 $\|\alpha S_A - M_A\|_F$ 最小的最优裂纹尺度，与
- 20 所述最优裂纹尺度对应的 S_A 即为仿真最优三轴漏磁信号模值 S_{A0} ；将所述最优裂纹尺度输入裂纹正交磁偶极子模型，得到所述仿真的正交孪生三轴漏磁信号模值 $S_{\perp}$ ；将所述 S_{A0} 与 $S_{\perp}$ 代入公式 $f(\alpha S_{A0}, \alpha S_{\perp}) = K \cdot \sqrt{(\alpha S_{A0})^2 + (\alpha S_{\perp})^2}$ ， $K \geq 1$ ，从而生成所述漏磁增强估计信号。

- 可选地，对于所述多个裂纹样本，使用在单向直流励磁条件下的三轴漏磁测量信号模值以及对应的所述漏磁增强估计信号训练所述裂纹信号正交孪生模型，包括：将每个裂纹
- 25 样本在单向直流励磁条件下的三轴漏磁测量信号模值以及对应的漏磁增强估计信号标记为一组正交孪生映射对；将 N 组正交孪生映射对按照比例 k ： $(1 - k)$ 随机拆分为训练集和测试集，其中， $0 < k < 1$ ；使用 $k \times N$ 组所述正交孪生映射对训练所述裂纹信号正交孪生模型，使用 $(1 - k) \times N$ 组所述正交孪生映射对测试所述裂纹信号正交孪生模型。

可选地，在训练所述裂纹信号正交孪生模型之后，使用所述特征向量训练所述裂纹尺

度估计模型,包括:将每个裂纹样本的第一特征值和第二特征值与对应的裂纹尺寸和倾斜角的真实值标记为一组裂纹尺度估计映射对;使用 $k \times N$ 组所述正交孪生映射对对应的裂纹尺度估计映射对进行所述裂纹尺度估计模型的训练,使用 $(1 - k) \times N$ 组所述正交孪生映射对对应的裂纹尺度估计映射对进行所述裂纹尺度估计模型的测试。

- 5 本公开实施例还提供了基于正交孪生的油气管道裂纹量化装置,包括:单向直流励磁条件下的漏磁传感器探头,单向直流励磁以及与直流励磁正交的动态磁场激励条件下的动磁或涡流传感器探头,存储指令、算法、模型的存储器,执行所述的油气管道裂纹量化方法的处理器,以及连接各个单元的总线系统。

本公开实施例还提供了一种存储介质,其上存储有计算机程序,该程序被处理器执行
10 时实现本公开任一实施例所述的基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法。

本公开实施例的基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法及装置、存储介质,通过依据多种检测原理的裂纹响应信号,确定裂纹的客观存在性。当裂纹信号的信噪比较低时,对裂纹信号实施正交孪生,得到裂纹对应的增强信号,然后基于正交孪生的增强裂纹信号,应用机器学习模型,实现对原始测量的微弱裂纹信号的高精度尺寸量化。

- 15 本公开实施例的油气管道裂纹量化方法,通过裂纹信号正交孪生模型,基于单向直流励磁条件,提出一种准确检测、辨识、量化微小裂纹,尤其是可以准确量化与励磁方向平行分布的裂纹的新方法新技术,对油气管道、输氢管道、高铁钢轨、石油储罐等重大基础设施的安全运营具有重要实际意义。

本公开的其它特征和优点将在随后的说明书中阐述,并且,部分地从说明书中变得显
20 而易见,或者通过实施本公开而了解。本公开的其他优点可通过在说明书以及附图中所描述的方案来实现和获得。

附图说明

附图用来提供对本公开技术方案的理解,并且构成说明书的一部分,与本公开的实施例一起用于解释本公开的技术方案,并不构成对本公开技术方案的限制。

- 25 图1为本公开示例性实施例一种油气管道裂纹椭球轮廓及正交磁场示意图;

图2为本公开示例性实施例一种基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法及装置、存储介质的流程示意图;

图3A为本公开示例性实施例一种基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法及装置、存储介质在模型训练阶段的框架结构图;

图 3B 为本公开示例性实施例一种基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法及装置、存储介质在模型使用阶段的框架结构图；

图 4A 为本公开示例性实施例一种“裂纹信号正交孪生模型”(ML^{OT})的损失函数迭代过程；

5 图 4B 为本公开示例性实施例一种“裂纹信号正交孪生模型”(ML^{OT})的确定系数迭代过程；

图 5A 为本公开示例性实施例一种“裂纹尺度估计模型”(ML^{size})的损失函数迭代过程；

10 图 5B 为本公开示例性实施例一种“裂纹尺度估计模型”(ML^{size})的确定系数迭代过程；

图 6A 为本公开示例性实施例对 0° 倾斜角裂纹的信号增强 3-D 效果图；

图 6B 为本公开示例性实施例对 0° 倾斜角裂纹的信号增强俯视效果图；

图 7A 为本公开示例性实施例对 3° 倾斜角裂纹的信号增强 3-D 效果图；

图 7B 为本公开示例性实施例对 3° 倾斜角裂纹的信号增强俯视效果图；

15 图 8A 为本公开示例性实施例对 18° 倾斜角裂纹的信号增强 3-D 效果图；

图 8B 为本公开示例性实施例对 18° 倾斜角裂纹的信号增强俯视效果图；

图 9 为本公开示例性实施例一种基于正交孪生的油气管道裂纹量化装置的结构示意图。

具体实施方式

20 为使本公开的目的、技术方案和优点更加清楚明白，下文中将结合附图对本公开的实施例进行详细说明。需要说明的是，在不冲突的情况下，本公开中的实施例及实施例中的特征可以相互任意组合。

25 除非另外定义，本公开实施例公开使用的技术术语或者科学术语应当为本公开所属领域内具有一般技能的人士所理解的通常意义。本公开实施例中使用的“第一”、“第二”以及类似的词语并不表示任何顺序、数量或者重要性，而只是用来区分不同的组成部分。“包括”或者“包含”等类似的词语意指该词前面的元件或物件涵盖出现在该词后面列举的元件或者物件及其等同，而不排除其他元件或者物件。

本公开提出“正交孪生”的概念，如图 1 所示，旨在仅有单一方向直流励磁 H_A 的条件下，虚拟孪生出与直流激励磁场同平面、大小相等、方向垂直的激励磁场 $H_{\perp}$ 产生的漏磁响应信号。然后通过联合处理原始响应信号与孪生响应信号从而得到漏磁增强估计信号，然后通过利用漏磁增强估计信号开展裂纹长、宽、深、倾斜角的估计，最终实现对裂纹尤其是小倾斜角裂纹的高精度量化。如图 1 所示，裂纹的倾斜角定义为裂纹椭圆轮廓的长轴方向与原始励磁方向 H_A 之间的夹角，范围为 $(-90^{\circ}, 90^{\circ}]$ 。本公开的裂纹量化方法适用于小倾斜角裂纹但不限于小倾斜角裂纹，这里的“小倾斜角裂纹”是指以励磁方向为基准，正负偏差不超过 20° 倾斜角的裂纹。本公开实施例中，单向直流励磁是指具有单一方向的直流励磁方式，包括但不限于现有的轴向直流励磁方式、环向直流励磁方式、螺旋直流励磁方式。

如附图 1 所示，在油气管道内壁上建立空间直角坐标系。以裂纹椭圆轮廓的几何中心为坐标原点，定义励磁方向（ H_A 方向）为 X 轴方向；在管道壁平面内与 X 轴方向垂直的方向为 Y 轴方向；与管道壁垂直并指向管道内部的方向为 Z 轴方向；Y 轴的反方向为 $H_{\perp}$ 方向；在管道壁平面内，裂纹椭圆轮廓的长轴方向为 X' 轴方向，相对 X 轴方向的倾斜角为 θ ；在管道壁平面内与 X' 轴垂直的方向为 Y' 轴方向，它相对 Y 轴方向的倾斜角为 θ ；与 Z 轴重合的方向为 Z' 轴方向；管道内油、气的流动方向为轴向；与轴向垂直并沿管道壁周向的方向为环向；与 Z 轴重合的方向为径向。

如图 2 所示，本公开实施例提供了一种基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法及装置、存储介质，包括如下步骤：

201、建立（训练）基于正交孪生的油气管道裂纹量化模型；

202、使用（测试）基于正交孪生的油气管道裂纹量化模型。

本公开实施例的裂纹量化方法以油气管道为例进行说明，在其它铁磁性金属材料中的实施步骤可参考此方法进行，本公开不再赘述。

在一些示例性实施方式中，参考图 3A，已知裂纹尺度及其响应信号，步骤 201 可以包括如下步骤：

1) 依据不同检测原理获得单向直流励磁条件下尺度为 (L, W, D, θ) 的裂纹响应微弱矩阵信号。依据不同检测原理采用 3 轴漏磁和 2 轴动磁或涡流传感器超高分辨集成探头获得单向直流励磁条件下尺度为 (L, W, D, θ) 的裂纹响应微弱矩阵信号，如获得在 A 方向直流励磁 H_A 条件下的三轴漏磁测量信号模值 $M_A(= \sqrt{(MFL_A^X)^2 + (MFL_A^Y)^2 + (MFL_A^Z)^2})$ ，以及

在 A 方向直流励磁场 H_A 条件下的动磁或涡流信号 D_A (D_A^{FB} , D_A^{LR})；其中 (L, W, D, θ) 分别为裂纹实际测量的长、宽、深、倾斜角； MFL_A^X , MFL_A^Y , MFL_A^Z 分别表示三轴漏磁测量信号的 X 轴分量, Y 轴分量以及 Z 轴分量； D_A^{FB} , D_A^{LR} 分别表示 3 轴漏磁和 2 轴动磁或涡流传感器超高分辨集成探头电路板前后线圈差分 (以下简称“前后差分”) 的动磁或涡流信号以及左右线圈差分 (以下简称“左右差分”) 的动磁或涡流信号。以上 M_A 和 D_A 都是矩阵信号。至少包括裂纹存在性的指示信号, 如 D_A^{FB} 和 D_A^{LR} 信号。裂纹存在性指示信号包括裂纹的边界信息。通过 D_A^{FB} 信号可以区分裂纹是内壁裂纹 (ID) 还是外壁裂纹 (OD)。

2) 在相同的 A 方向直流励磁场 H_A 条件下, 应用内壁裂纹磁偶极子模型或者外壁裂纹磁偶极子模型, 生成尺度 $(L^s, W^s, D^s, \theta^s)$ 虚拟裂纹的仿真三轴漏磁信号模值 $S_A (= \sqrt{(S_A^X)^2 + (S_A^Y)^2 + (S_A^Z)^2})$ 。其中, S_A 为矩阵信号, $(L^s, W^s, D^s, \theta^s)$ 分别为虚拟裂纹的长、宽、深、倾斜角, 属于中间变量, 其初始值可为对应已知的裂纹实测尺度 (L, W, D, θ) ; S_A^X , S_A^Y , S_A^Z 分别是仿真三轴漏磁信号的 X 轴分量, Y 轴分量以及 Z 轴分量。如果是内壁裂纹, 基于“内壁裂纹磁偶极子模型”, 由尺度 $(L^s, W^s, D^s, \theta^s)$ 计算 S_A^X , S_A^Y , S_A^Z 的公式为(1)式至(2)式; 如果是外壁裂纹, 基于“外壁裂纹磁偶极子模型”, 由尺度 $(L^s, W^s, D^s, \theta^s)$ 计算 S_A^X , S_A^Y , S_A^Z 的公式为(3)式至(5)式。其中, 其中, $f_{xX'}(\cdot)$, $f_{yX'}(\cdot)$, $f_{zX'}(\cdot)$ 分别为在 H_A 的 X' 轴分量激励下的磁偶极子 3 轴 (X' 轴、 Y' 轴、 Z' 轴) 积分算子; $f_{xY'}(\cdot)$, $f_{yY'}(\cdot)$, $f_{zY'}(\cdot)$ 分别为在 H_A 的 Y' 轴分量激励下的磁偶极子 3 轴 (X' 轴、 Y' 轴、 Z' 轴) 积分算子; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H/m})$ 为真空磁导率, μ_r 为饱和条件下的管壁相对磁导率; $\sigma_{x'}$ 为磁偶极子 X' 轴方向磁荷面密度, $\sigma_{y'}$ 为磁偶极子 Y' 轴方向磁荷面密度; 如果是内壁裂纹, h 为传感器集成探头的提离值, 如果是外壁裂纹, h 为裂纹处的管壁剩余壁厚与传感器集成探头的提离值之和。

$$\begin{cases} B_{Xtemp} = \frac{\mu_0 \sigma_{x'}}{4\pi} \cdot f_{xX'}(L^s, W^s, D^s, \theta^s, h) + \frac{\mu_0 \sigma_{y'}}{4\pi} \cdot f_{xY'}(L^s, W^s, D^s, \theta^s, h) \\ B_{Ytemp} = \frac{\mu_0 \sigma_{x'}}{4\pi} \cdot f_{yX'}(L^s, W^s, D^s, \theta^s, h) + \frac{\mu_0 \sigma_{y'}}{4\pi} \cdot f_{yY'}(L^s, W^s, D^s, \theta^s, h) \\ B_{Ztemp} = \frac{\mu_0 \sigma_{x'}}{4\pi} \cdot f_{zX'}(L^s, W^s, D^s, \theta^s, h) + \frac{\mu_0 \sigma_{y'}}{4\pi} \cdot f_{zY'}(L^s, W^s, D^s, \theta^s, h) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} S_A^X = B_{Xtemp} \cdot \sin\theta^s + B_{Ytemp} \cdot \cos\theta^s \\ S_A^Y = B_{Xtemp} \cdot \cos\theta^s - B_{Ytemp} \cdot \sin\theta^s \\ S_A^Z = B_{Ztemp} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} C_1 = \frac{2\mu_r}{\mu_r + 1} \\ C_2 = \frac{2\mu_r(\mu_r - 1)}{(\mu_r + 1)^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases}
B'_{Xtemp} = \frac{C_1\mu_0\sigma_{x'}}{4\pi} \cdot f_{xX'}(L^S, W^S, D^S, \theta^S, h) + \frac{C_1\mu_0\sigma_{y'}}{4\pi} \cdot f_{xY'}(L^S, W^S, D^S, \theta^S, h) \\
+ \frac{C_2\mu_0\sigma_{x'}}{4\pi} \cdot f_{xX'}(L^S, W^S, D^S, \theta^S, h + 2D^S) + \frac{C_2\mu_0\sigma_{y'}}{4\pi} \cdot f_{xY'}(L^S, W^S, D^S, \theta^S, h + 2D^S) \\
B'_{Ytemp} = \frac{C_1\mu_0\sigma_{x'}}{4\pi} \cdot f_{yX'}(L^S, W^S, D^S, \theta^S, h) + \frac{C_1\mu_0\sigma_{y'}}{4\pi} \cdot f_{yY'}(L^S, W^S, D^S, \theta^S, h) \\
+ \frac{C_2\mu_0\sigma_{x'}}{4\pi} \cdot f_{yX'}(L^S, W^S, D^S, \theta^S, h + 2D^S) + \frac{C_2\mu_0\sigma_{y'}}{4\pi} \cdot f_{yY'}(L^S, W^S, D^S, \theta^S, h + 2D^S) \\
B'_{Ztemp} = \frac{C_1\mu_0\sigma_{x'}}{4\pi} \cdot f_{zX'}(L^S, W^S, D^S, \theta^S, h) + \frac{C_1\mu_0\sigma_{y'}}{4\pi} \cdot f_{zY'}(L^S, W^S, D^S, \theta^S, h) \\
+ \frac{C_2\mu_0\sigma_{x'}}{4\pi} \cdot f_{zX'}(L^S, W^S, D^S, \theta^S, h + 2D^S) + \frac{C_2\mu_0\sigma_{y'}}{4\pi} \cdot f_{zY'}(L^S, W^S, D^S, \theta^S, h + 2D^S)
\end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases}
S_A^X = B'_{Xtemp} \cdot \sin\theta^S + B'_{Ytemp} \cdot \cos\theta^S \\
S_A^Y = B'_{Xtemp} \cdot \cos\theta^S - B'_{Ytemp} \cdot \sin\theta^S \\
S_A^Z = B'_{Ztemp}
\end{cases} \quad (5)$$

3)为使裂纹仿真产生的效果与裂纹实际测量的效果一致,建立目标函数和约束条件:

$$\min ||\alpha S_A - M_A||_F \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} O^S(L^S, W^S, D^S, \theta^S) = 1 \\ \theta^S = \theta \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\|\cdot\|_F$ 为矩阵的弗罗贝尼乌斯 (Frobenius) 范数, $O^S(L^S, W^S, D^S, \theta^S) = 1$ 为拟合裂纹轮廓的椭圆方程; 调节因子: $\alpha = \max(M_A) / \max(S_{A_initial})$, 等于 M_A 矩阵的最大元素除以初始矩阵的最大元素, 而初始矩阵 ($S_{A_initial}$) 即为将裂纹实测尺度 (L, W, D, θ) 代入磁偶极子模型计算所得的仿真三轴漏磁信号模值。通过调节虚拟裂纹尺寸 (L^S, W^S, D^S), 使上述目标函数(6)得以满足。使(6)得到满足的最优虚拟裂纹尺度记为 ($L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta$), 对应的仿真三轴漏磁信号模值记为 $S_{Ao} (= \sqrt{(S_{Ao}^X)^2 + (S_{Ao}^Y)^2 + (S_{Ao}^Z)^2})$ 。本文中, 裂纹尺度包括裂纹尺寸和倾斜角。

复杂的裂纹形状可以分解为简单条形轮廓的组合, 而条形轮廓可以抽象为长方体、椭球体、圆柱等简单的几何形状。

本公开实施例的裂纹量化方法中, 将裂纹轮廓近似为椭球体, 在另一些示例性实施方式中, 裂纹轮廓还可以近似为长方体、圆柱等形状, 本公开实施例对此不作限制。

4) 应用内壁裂纹正交磁偶极子模型或者外壁裂纹正交磁偶极子模型计算正交孪生三轴漏磁信号模值。在与 H_A 同平面、大小相等、方向垂直的孪生磁场 $H_\perp$ 激励的条件下 ($|H_\perp| = |H_A|$), 针对尺度为 ($L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta$) 的虚拟裂纹, 应用磁偶极子模型, 生成对应的漏磁响应信号模值, 即仿真的正交孪生三轴漏磁信号模值 $S_\perp (= \sqrt{(S_\perp^X)^2 + (S_\perp^Y)^2 + (S_\perp^Z)^2})$, 其中 $S_\perp^X$ 、 $S_\perp^Y$ 、 $S_\perp^Z$ 分别是仿真的正交孪生三轴漏磁信号的 X 轴分量, Y 轴分量以及 Z 轴分量。如果是内壁裂纹, 基于“内壁裂纹正交磁偶极子模型”, 由尺度 ($L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta$) 计算 $S_\perp^X$,

$S_{\perp}^Y, S_{\perp}^Z$ 的公式如(8)式至(9)式所示;如果是外壁裂纹,基于“外壁裂纹正交磁偶极子模型”,由尺度 $(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta)$ 计算 $S_{\perp}^X, S_{\perp}^Y, S_{\perp}^Z$ 的公式如(10)式至(12)式所示。其中, $\sigma_{xOT'}$ 为磁偶极子 X' 轴方向正交磁荷面密度, $\sigma_{yOT'}$ 为磁偶极子 Y' 轴方向正交磁荷面密度。

$$\begin{cases} B_{XOTtemp} = \frac{\mu_0 \sigma_{xOT'}}{4\pi} \cdot f_{xX'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h) + \frac{\mu_0 \sigma_{yOT'}}{4\pi} \cdot f_{xY'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h) \\ B_{YOTtemp} = \frac{\mu_0 \sigma_{xOT'}}{4\pi} \cdot f_{yX'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h) + \frac{\mu_0 \sigma_{yOT'}}{4\pi} \cdot f_{yY'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h) \\ B_{ZOTtemp} = \frac{\mu_0 \sigma_{xOT'}}{4\pi} \cdot f_{zX'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h) + \frac{\mu_0 \sigma_{yOT'}}{4\pi} \cdot f_{zY'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} S_{\perp}^X = -(B_{XOTtemp} \cdot \sin\theta + B_{YOTtemp} \cdot \cos\theta) \\ S_{\perp}^Y = -(B_{XOTtemp} \cdot \cos\theta - B_{YOTtemp} \cdot \sin\theta) \\ S_{\perp}^Z = -B_{ZOTtemp} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} C_1 = \frac{2\mu_r}{\mu_r + 1} \\ C_2 = \frac{2\mu_r(\mu_r - 1)}{(\mu_r + 1)^2} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} B'_{XOTtemp} = \frac{C_1 \mu_0 \sigma_{xOT'}}{4\pi} \cdot f_{xX'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h) + \frac{C_1 \mu_0 \sigma_{yOT'}}{4\pi} \cdot f_{xY'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h) \\ + \frac{C_2 \mu_0 \sigma_{xOT'}}{4\pi} \cdot f_{xX'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h + 2D_o^S) + \frac{C_2 \mu_0 \sigma_{yOT'}}{4\pi} \cdot f_{xY'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h + 2D_o^S) \\ B'_{YOTtemp} = \frac{C_1 \mu_0 \sigma_{xOT'}}{4\pi} \cdot f_{yX'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h) + \frac{C_1 \mu_0 \sigma_{yOT'}}{4\pi} \cdot f_{yY'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h) \\ + \frac{C_2 \mu_0 \sigma_{xOT'}}{4\pi} \cdot f_{yX'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h + 2D_o^S) + \frac{C_2 \mu_0 \sigma_{yOT'}}{4\pi} \cdot f_{yY'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h + 2D_o^S) \\ B'_{ZOTtemp} = \frac{C_1 \mu_0 \sigma_{xOT'}}{4\pi} \cdot f_{zX'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h) + \frac{C_1 \mu_0 \sigma_{yOT'}}{4\pi} \cdot f_{zY'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h) \\ + \frac{C_2 \mu_0 \sigma_{xOT'}}{4\pi} \cdot f_{zX'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h + 2D_o^S) + \frac{C_2 \mu_0 \sigma_{yOT'}}{4\pi} \cdot f_{zY'}(L_o^S, W_o^S, D_o^S, \theta, h + 2D_o^S) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} S_{\perp}^X = -(B'_{XOTtemp} \cdot \sin\theta + B'_{YOTtemp} \cdot \cos\theta) \\ S_{\perp}^Y = -(B'_{XOTtemp} \cdot \cos\theta - B'_{YOTtemp} \cdot \sin\theta) \\ S_{\perp}^Z = -B'_{ZOTtemp} \end{cases} \quad (12)$$

5) 针对内壁裂纹和外壁裂纹,分别获得 N 个不同尺寸、不同倾斜角的正交孪生映射对以及实测尺寸集合。上述步骤 1)至 4) 中的 $M_A, \alpha S_{Ao}, \alpha S_{\perp}$, 和实测尺度 (L, W, D, θ) 构成一一对应关系,定义第 i 组正交孪生映射对表示为 $(M_A^i, \alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$, 与之对应的实际测量尺度为 $(L_i, W_i, D_i, \theta_i)$; 则改变 (L, W, D, θ) 数值,即更换新的实测裂纹,重复执行步骤 1)至 4),直到针对内壁裂纹和外壁裂纹,分别获得 N 个不同尺寸、不同倾斜角的正交孪生映射对,即 $\{(M_A^i, \alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i), i = 1, 2, \dots, N\}$, 与之对应的实测尺度集合表示为 $\{(L_i, W_i, D_i, \theta_i), i = 1, 2, \dots, N\}$ 。

6) 针对内壁裂纹和外壁裂纹,分别按照比例 $k: (1-k)$ ($0 < k < 1$) 将 N 组正交孪

生映射对和实测尺度集合随机拆分为训练集和测试集，它们的数量分别为 $k \times N$ 个和 $(1-k) \times N$ 个。另外，针对内壁裂纹和外壁裂纹，分别从 $k \times N$ 个训练集中随机抽取一部分作为模型训练时的验证集。

7) 针对内壁裂纹和外壁裂纹，对于训练集，以 M_A^i 为输入，以 $f(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$ 为输出，
5 $i = 1, 2, \dots, k \times N$ ，搭建并训练机器学习模型 ML^{OT} ，将其命名为“裂纹信号正交孪生模型”，包含“内壁裂纹信号正交孪生模型”以及“外壁裂纹信号正交孪生模型”。其中， $f(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$ 表示对 $\alpha_i S_{Ao}^i$ 和 $\alpha_i S_{\perp}^i$ 进行逻辑运算，例如 $f(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i) = K \cdot \sqrt{(\alpha_i S_{Ao}^i)^2 + (\alpha_i S_{\perp}^i)^2}$ ， $K \geq 1$ ；显然， $f(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i) > \alpha_i S_{Ao}^i \approx M_A^i$ ，即经过正交孪生变换的输出信号得到增强。

8) 针对内壁裂纹和外壁裂纹，对于训练集，在第7)步的基础上，当 $i = 1, 2, \dots, k \times N$ ，
10 再将 M_A^i 输入到训练好的 ML^{OT} 模型中，得到 $k \times N$ 组估计结果 $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$ 。

9) 针对内壁裂纹和外壁裂纹，对于训练集，以 $TH = c * \max \hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$ 为阈值（ c 在0到1之间，示例性的， $c=0.5$ ），对 $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$ 进行0-1二值化处理，得到 $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)|_{0-1}$ ，其中 $i = 1, 2, \dots, k \times N$ 。

10) 针对内壁裂纹和外壁裂纹，对于训练集，通过 $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$ 和 $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)|_{0-1}$ 以及 D_A^i （ D_{Ai}^{FB} ， D_{Ai}^{LR} ）计算 $k \times N$ 组特征向量。 $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)|_{0-1}$ 的边缘轮廓通常为椭圆，记 $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)|_{0-1}$ 边缘轮廓的长轴为 a_i ，短轴为 b_i ，长轴的倾斜角为 φ_i ， $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$ 的峰值为 p_i ， D_{Ai}^{FB} 的峰-峰值为 p_{Ai}^{FB} ， D_{Ai}^{FB} 的峰-峰值间距为 g_{Ai}^{FB} ， D_{Ai}^{LR} 的峰值为 p_{Ai}^{LR} ， D_{Ai}^{LR} 的峰值间距为 g_{Ai}^{LR} ；当 $i = 1, 2, \dots, k \times N$ 时，共组成 $k \times N$ 组特征向量 $(a_i, b_i, p_i, \varphi_i, p_{Ai}^{FB}, g_{Ai}^{FB}, p_{Ai}^{LR}, g_{Ai}^{LR})$ 。

11) 针对内壁裂纹和外壁裂纹，对于训练集，以 $(a_i, b_i, p_i, \varphi_i, p_{Ai}^{FB}, g_{Ai}^{FB}, p_{Ai}^{LR}, g_{Ai}^{LR})$ 为输入，以 $(L_i, W_i, D_i, \theta_i)$ 为输出， $i = 1, 2, \dots, k \times N$ ，搭建并训练机器学习模型 ML^{size} ，将其命名为“裂纹尺度估计模型”，包含“内壁裂纹尺度估计模型”以及“外壁裂纹尺度估计模型”。

到此，训练好的 ML^{OT} 模型和 ML^{size} 模型共同组成了“裂纹量化模型”。

在一些示例性实施方式中，在第2阶段，“裂纹量化模型”的使用或者测试主要适用于
25 没有经过第1阶段模型训练的测试集或者真实油气管道上的新裂纹，参考图3B，步骤202可以包括如下步骤：

1) 依据不同检测原理获得单向直流励磁条件下裂纹响应微弱矩阵信号。如获得在 A 方向直流励磁场 H_A 条件下的三轴漏磁测量信号模值

$M_A (= \sqrt{(MFL_A^X)^2 + (MFL_A^Y)^2 + (MFL_A^Z)^2})$, 以及在 A 方向直流励磁场 H_A 条件下的动磁或涡流信号 D_A (D_A^{FB} , D_A^{LR})。至少包括裂纹存在性的指示信号, 如 D_A^{FB} 和 D_A^{LR} 信号。裂纹存在性指示信号包括裂纹的边界信息。通过 D_A^{FB} 信号可以区分裂纹是内壁裂纹 (ID) 还是外壁裂纹 (OD)。

5 2) 针对内壁裂纹或外壁裂纹, 将 M_A 信号输入到第 1 阶段训练好的 ML^{OT} (“内壁裂纹信号正交孪生模型”或“外壁裂纹信号正交孪生模型”) 中, 输出漏磁增强估计信号 $\hat{f}(\alpha S_{Ao}, \alpha S_{\perp})$ 。

3) 以 $TH = c * \max \hat{f}(\alpha S_{Ao}, \alpha S_{\perp})$ 为阈值, 对 $\hat{f}(\alpha S_{Ao}, \alpha S_{\perp})$ 进行 0-1 二值化处理, 得到 $\hat{f}(\alpha S_{Ao}, \alpha S_{\perp})|_{0-1}$, c 在 0 到 1 之间, 示例性的, $c=0.5$ 。

10 4) 通过 $\hat{f}(\alpha S_{Ao}, \alpha S_{\perp})$ 和 $\hat{f}(\alpha S_{Ao}, \alpha S_{\perp})|_{0-1}$ 以及 D_A (D_A^{FB} , D_A^{LR}) 计算特征向量 $(a, b, p, \varphi, p_A^{FB}, g_A^{FB}, p_A^{LR}, g_A^{LR})$ 。记 $\hat{f}(S_{Ao}, S_{\perp})|_{0-1}$ 边缘轮廓的长轴为 a , 短轴为 b , 长轴的倾斜角为 φ , $\hat{f}(\alpha S_{Ao}, \alpha S_{\perp})$ 的峰值为 p , D_A^{FB} 的峰-峰值为 p_A^{FB} , D_A^{FB} 的峰-峰值间距为 g_A^{FB} , D_A^{LR} 的峰值为 p_A^{LR} , D_A^{LR} 的峰值间距为 g_A^{LR} ; 由此组特征向量 $(a, b, p, \varphi, p_A^{FB}, g_A^{FB}, p_A^{LR}, g_A^{LR})$ 。

15 5) 将特征向量 $(a, b, p, \varphi, p_A^{FB}, g_A^{FB}, p_A^{LR}, g_A^{LR})$ 输入到第 1 阶段训练好的 ML^{size} (“内壁裂纹尺度估计模型”或“外壁裂纹尺度估计模型”) 中, 输出内壁或外壁裂纹尺度的估计值 $(\hat{L}, \hat{W}, \hat{D}, \hat{\theta})$ 。

6) 重复执行步骤 1) 至 5) 直到将第 1 阶段的测试集或者真实油气管道上的新裂纹全部量化完毕为止。

20 为了更好地理解本公开提供的基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法及装置、存储介质, 下面结合 $\phi 1016$ (X80 钢材, 15.30mm 壁厚) 油气管道裂纹量化这一示例性实施例对本公开的技术方案做进一步说明。

25 本实施例使用基于 3 轴漏磁和 2 轴动磁或涡流传感器超高分辨集成探头采集裂纹弱信号。3 轴漏磁是指包含漏磁场的轴向分量、径向分量以及环向分量; 2 轴动磁或涡流是指探头电路板可以同时采集前后差分的动磁或涡流信号以及左右差分的动磁或涡流信号。前后差分的动磁或涡流信号可以对 360° 全向裂纹进行检测和内外识别, 但是随着裂纹倾斜角模值的减小, 前后差分的动磁或涡流信号幅值逐渐降低; 而左右差分的动磁或涡流信号幅值却随着裂纹倾斜角模值的减小而增大; 两者形成互补、弥补对方的不足。因此利用 3 轴漏磁和 2 轴动磁或涡流传感器超高分辨集成探头可以确定裂纹是否存在, 判别内裂纹与外裂纹, 以及确定裂纹的可疑区域。

整个实施步骤共分为 2 个阶段，第 1 阶段为“裂纹量化模型”的建立阶段（模型训练阶段）；第 2 阶段为“裂纹量化模型”的使用阶段（模型测试阶段）。

在第 1 阶段，已知裂纹尺度及其响应信号，“裂纹量化模型”的建立（模型训练）步骤包括：

- 5 按照步骤 1)，利用轴向励磁方式的 3 轴漏磁和 2 轴动磁或涡流检测器开展对 $\varnothing 1016$ （X80 钢材，15.30mm 壁厚）人工裂纹油气管道的牵拉实验，由此获得人工裂纹的牵拉数据。采用轴向励磁意味着此时励磁方向（X 轴方向）与轴向重合，建立的坐标系正如附图 1 所示。首先在牵拉管道上加工 2160 个不同尺寸和不同倾斜角的人工裂纹作为模型训练的样本，其中包含 1080 个内壁裂纹(ID)以及 1080 个外壁裂纹（OD）；针对内壁裂纹
- 10 和外壁裂纹，分别随机分配其中 75%的样本（810 个）为训练集（用 train 标识），另外 25%的样本（270 个）为测试集（用 test 标识），而训练集中随机抽取 25%的样本（203 个）被定义为验证集（用 val 标识），它们的尺度分布区间如表 1 所示。将上述牵拉数据导入“裂纹原始样本标定软件”，在加工裂纹的已知区域，框选并导出裂纹原始样本数据文件，将其以 txt 格式保存，每个数据文件以裂纹实测的“长（L）-宽（W）-深（D）-倾斜角（ θ ）-内或外”命名，由此获得轴向励磁条件下不同尺度(L_i, W_i, D_i, θ_i)的裂纹响应弱信号 M_A^i 以及 D_A^i , $i = 1, 2, \dots, 2160$ 。其中，每个裂纹原始样本数据文件由 5 种矩阵数据组成，分别为漏磁轴向数据矩阵 MFL_A^X ，漏磁径向数据矩阵 MFL_A^Y ，漏磁环向数据矩阵 MFL_A^Z ，动磁或涡流前后差分数据矩阵 D_A^{FB} 和动磁或涡流左右差分数据矩阵 D_A^{LR} ，而且， $M_A (= \sqrt{(MFL_A^X)^2 + (MFL_A^Y)^2 + (MFL_A^Z)^2})$ 。针对内壁裂纹或外壁裂纹，训练集中 810 个样本为第
- 15
- 20 1 阶段训练“裂纹量化模型”做好准备，测试集中 270 个样本为第 2 阶段测试“裂纹量化模型”做好准备。

表 1 模型训练的样本分布

长度区间(mm)	宽度区间 (mm)	深度区间 (mm)	倾斜角区间(°)	内壁裂纹总数
[10, 60]	[0.2, 0.4]	[1.0, 3.9]	[-20, +20]	1080
长度区间(mm)	宽度区间 (mm)	深度区间 (mm)	倾斜角区间(°)	外壁裂纹总数
[10, 60]	[0.2, 0.4]	[1.0, 3.9]	[-20, +20]	1080

按照步骤 2)，提前测得牵拉实验的轴向励磁场 H_A 的大小，然后在相同的轴向励磁场条件下，针对内壁裂纹和外壁裂纹，分别对 1080 每一个不同尺寸和不同倾斜角的人工裂纹样本，以它们文件名记录的实测尺度 $(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S) = (L_i, W_i, D_i, \theta_i)$ 为初值，应用磁偶极子模型，生成虚拟裂纹的仿真三轴漏磁信号模值 $S_A^i = \sqrt{(S_{Ai}^X)^2 + (S_{Ai}^Y)^2 + (S_{Ai}^Z)^2}$ ，

- 5 $i = 1, 2, \dots, 1080$ ；如果是内壁裂纹，基于“内壁裂纹磁偶极子模型”，由尺度 $(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S)$ 计算 $S_{Ai}^X, S_{Ai}^Y, S_{Ai}^Z$ 的公式为(13)式至(14)式；如果是外壁裂纹，基于“外壁裂纹磁偶极子模型”，由尺度 $(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S)$ 计算 $S_{Ai}^X, S_{Ai}^Y, S_{Ai}^Z$ 的公式为(15)式至(17)式。其中， $f_{xX'}(\cdot), f_{yX'}(\cdot), f_{zX'}(\cdot)$ 分别为在 H_A 的 X' 轴分量激励下的磁偶极子 3 轴(X' 轴、 Y' 轴、 Z' 轴)积分算子； $f_{xY'}(\cdot), f_{yY'}(\cdot), f_{zY'}(\cdot)$ 分别为在 H_A 的 Y' 轴分量激励下的磁偶极子 3 轴(X' 轴、 Y' 轴、 Z' 轴)积分算子； $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}(\text{H/m})$ ，为真空磁导率， μ_r 为饱和条件下的管壁相对磁导率 $\sigma_{x'}^i$ 为与第 i 个人工裂纹样本对应的磁偶极子 X' 轴方向磁荷面密度， $\sigma_{y'}^i$ 为与第 i 个人工裂纹样本对应的磁偶极子 Y' 轴方向磁荷面密度；如果是内壁裂纹， h_i 为第 i 个人工裂纹样本处传感器集成探头的提离值，如果是外壁裂纹， h_i 为第 i 个人工裂纹样本处的管壁剩余壁厚与传感器集成探头的提离值之和。

$$15 \quad \begin{cases} B_{Xtemp}^i = \frac{\mu_0 \sigma_{x'}^i}{4\pi} \cdot f_{xX'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i) + \frac{\mu_0 \sigma_{y'}^i}{4\pi} \cdot f_{xY'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i) \\ B_{Ytemp}^i = \frac{\mu_0 \sigma_{x'}^i}{4\pi} \cdot f_{yX'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i) + \frac{\mu_0 \sigma_{y'}^i}{4\pi} \cdot f_{yY'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i) \\ B_{Ztemp}^i = \frac{\mu_0 \sigma_{x'}^i}{4\pi} \cdot f_{zX'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i) + \frac{\mu_0 \sigma_{y'}^i}{4\pi} \cdot f_{zY'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} S_{Ai}^X = B_{Xtemp}^i \cdot \sin\theta_i^S + B_{Ytemp}^i \cdot \cos\theta_i^S \\ S_{Ai}^Y = B_{Xtemp}^i \cdot \cos\theta_i^S - B_{Ytemp}^i \cdot \sin\theta_i^S \\ S_{Ai}^Z = B_{Ztemp}^i \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} C_1 = \frac{2\mu_r}{\mu_r + 1} \\ C_2 = \frac{2\mu_r(\mu_r - 1)}{(\mu_r + 1)^2} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} B_{Xtemp}^{i'} = \frac{C_1 \mu_0 \sigma_{x'}^i}{4\pi} \cdot f_{xX'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i) + \frac{C_1 \mu_0 \sigma_{y'}^i}{4\pi} \cdot f_{xY'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i) \\ + \frac{C_2 \mu_0 \sigma_{x'}^i}{4\pi} \cdot f_{xX'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i + 2D_i^S) + \frac{C_2 \mu_0 \sigma_{y'}^i}{4\pi} \cdot f_{xY'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i + 2D_i^S) \\ B_{Ytemp}^{i'} = \frac{C_1 \mu_0 \sigma_{x'}^i}{4\pi} \cdot f_{yX'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i) + \frac{C_1 \mu_0 \sigma_{y'}^i}{4\pi} \cdot f_{yY'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i) \\ + \frac{C_2 \mu_0 \sigma_{x'}^i}{4\pi} \cdot f_{yX'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i + 2D_i^S) + \frac{C_2 \mu_0 \sigma_{y'}^i}{4\pi} \cdot f_{yY'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i + 2D_i^S) \\ B_{Ztemp}^{i'} = \frac{C_1 \mu_0 \sigma_{x'}^i}{4\pi} \cdot f_{zX'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i) + \frac{C_1 \mu_0 \sigma_{y'}^i}{4\pi} \cdot f_{zY'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i) \\ + \frac{C_2 \mu_0 \sigma_{x'}^i}{4\pi} \cdot f_{zX'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i + 2D_i^S) + \frac{C_2 \mu_0 \sigma_{y'}^i}{4\pi} \cdot f_{zY'}(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S, h_i + 2D_i^S) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} S_{Ai}^X = B_{Xtemp}^{i'} \cdot \sin\theta_i^S + B_{Ytemp}^{i'} \cdot \cos\theta_i^S \\ S_{Ai}^Y = B_{Xtemp}^{i'} \cdot \cos\theta_i^S - B_{Ytemp}^{i'} \cdot \sin\theta_i^S \\ S_{Ai}^Z = B_{Ztemp}^{i'} \end{cases} \quad (17)$$

按照步骤3)，为使裂纹仿真产生的效果与裂纹实际测量的效果一致，针对内壁裂纹和外壁裂纹，分别对1080个不同尺寸和不同倾斜角的人工裂纹样本，逐一建立目标函数和约束条件：

$$\min ||\alpha_i S_A^i - M_A^i||_F \quad (18)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} O^S(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S) = 1 \\ \theta_i^S = \theta_i \end{cases} \quad (19)$$

其中，当 $i = 1, 2, \dots, 1080$ 时， $O^S(L_i^S, W_i^S, D_i^S, \theta_i^S) = 1$ 为与第 i 个人工裂纹样本对应的拟合裂纹轮廓的椭球方程；调节因子： $\alpha_i = \max(M_A^i) / \max(S_{A,initial}^i)$ ，表示 M_A^i 矩阵的最大元素除以第 i 个初始矩阵的最大元素，而第 i 个初始矩阵($S_{A,initial}^i$)即为将裂纹实测尺度(L_i, W_i, D_i, θ_i)代入磁偶极子模型计算所得的仿真三轴漏磁信号模值。以实测尺度(L_i, W_i, D_i, θ_i)为初值通过调节虚拟裂纹尺寸(L_i^S, W_i^S, D_i^S)，使上述目标函数(18)得以满足。

使(18)得到满足的最优虚拟裂纹尺度记为($L_{oi}^S, W_{oi}^S, D_{oi}^S, \theta_i$)，对应的仿真三轴漏磁信号记为 $S_{Ao}^i (= \sqrt{(S_{Aoi}^X)^2 + (S_{Aoi}^Y)^2 + (S_{Aoi}^Z)^2})$ 。

按照步骤4)，应用内壁裂纹正交磁偶极子模型和外壁裂纹正交磁偶极子模型分别计算2160个不同尺寸和不同倾斜角的人工裂纹样本的正交孪生三轴漏磁信号模值。在与 H_A 同平面、大小相等、方向垂直的孪生磁场 $H_\perp$ 激励的条件下($|H_\perp| = |H_A|$)，针对内壁裂纹或外壁裂纹，当 $i = 1, 2, \dots, 1080$ 时，针对尺度为($L_{oi}^S, W_{oi}^S, D_{oi}^S, \theta_i$)的虚拟裂纹，应用磁偶极子模型，生成对应的漏磁响应信号模值，即仿真的正交孪生三轴漏磁信号模值 $S_\perp^i (= \sqrt{(S_{\perp i}^X)^2 + (S_{\perp i}^Y)^2 + (S_{\perp i}^Z)^2})$ 。如果是内壁裂纹，基于“内壁裂纹正交磁偶极子模型”，由尺度($L_{oi}^S, W_{oi}^S, D_{oi}^S, \theta_i$)计算 $S_{\perp i}^X, S_{\perp i}^Y, S_{\perp i}^Z$ 的公式如(20)式至(21)式所示；如果是外壁裂纹，基于“外壁裂纹正交磁偶极子模型”，由尺度($L_{oi}^S, W_{oi}^S, D_{oi}^S, \theta_i$)计算 $S_{\perp i}^X, S_{\perp i}^Y, S_{\perp i}^Z$ 的公式如(22)式至(24)式所示。其中， $\sigma_{xOT'}^i$ 为与第 i 个人工裂纹样本对应的磁偶极子 X' 轴方向正交磁荷面密度， $\sigma_{yOT'}^i$ 为与第 i 个人工裂纹样本对应的磁偶极子 Y' 轴轴方向正交磁荷面密度。

$$\begin{cases} B_{XOTtemp}^i = \frac{\mu_0 \sigma_{xOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{xX'}(L_{oi}^S, W_{oi}^S, D_{oi}^S, \theta_i, h_i) + \frac{\mu_0 \sigma_{yOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{xY'}(L_{oi}^S, W_{oi}^S, D_{oi}^S, \theta_i, h_i) \\ B_{YOTtemp}^i = \frac{\mu_0 \sigma_{xOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{yX'}(L_{oi}^S, W_{oi}^S, D_{oi}^S, \theta_i, h_i) + \frac{\mu_0 \sigma_{yOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{yY'}(L_{oi}^S, W_{oi}^S, D_{oi}^S, \theta_i, h_i) \\ B_{ZOTtemp}^i = \frac{\mu_0 \sigma_{xOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{zX'}(L_{oi}^S, W_{oi}^S, D_{oi}^S, \theta_i, h_i) + \frac{\mu_0 \sigma_{yOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{zY'}(L_{oi}^S, W_{oi}^S, D_{oi}^S, \theta_i, h_i) \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} S_{\perp i}^X = -(B_{XOTtemp}^i \cdot \sin\theta_i + B_{YOTtemp}^i \cdot \cos\theta_i) \\ S_{\perp i}^Y = -(B_{XOTtemp}^i \cdot \cos\theta_i - B_{YOTtemp}^i \cdot \sin\theta_i) \\ S_{\perp i}^Z = -B_{ZOTtemp}^i \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} C_1 = \frac{2\mu_r}{\mu_r+1} \\ C_2 = \frac{2\mu_r(\mu_r-1)}{(\mu_r+1)^2} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} B_{XOTtemp}^{i'} = \frac{C_1\mu_0\sigma_{xOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{xX'}(L_{oi}^s, W_{oi}^s, D_{oi}^s, \theta_i, h_i) + \frac{C_1\mu_0\sigma_{yOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{xY'}(L_{oi}^s, W_{oi}^s, D_{oi}^s, \theta_i, h_i) \\ + \frac{C_2\mu_0\sigma_{xOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{xX'}(L_{oi}^s, W_{oi}^s, D_{oi}^s, \theta_i, h_i + 2D_{oi}^s) + \frac{C_2\mu_0\sigma_{yOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{xY'}(L_{oi}^s, W_{oi}^s, D_{oi}^s, \theta_i, h_i + 2D_{oi}^s) \\ B_{YOTtemp}^{i'} = \frac{C_1\mu_0\sigma_{xOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{yX'}(L_{oi}^s, W_{oi}^s, D_{oi}^s, \theta_i, h_i) + \frac{C_1\mu_0\sigma_{yOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{yY'}(L_{oi}^s, W_{oi}^s, D_{oi}^s, \theta_i, h_i) \\ + \frac{C_2\mu_0\sigma_{xOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{yX'}(L_{oi}^s, W_{oi}^s, D_{oi}^s, \theta_i, h_i + 2D_{oi}^s) + \frac{C_2\mu_0\sigma_{yOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{yY'}(L_{oi}^s, W_{oi}^s, D_{oi}^s, \theta_i, h_i + 2D_{oi}^s) \\ B_{ZOTtemp}^{i'} = \frac{C_1\mu_0\sigma_{xOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{zX'}(L_{oi}^s, W_{oi}^s, D_{oi}^s, \theta_i, h_i) + \frac{C_1\mu_0\sigma_{yOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{zY'}(L_{oi}^s, W_{oi}^s, D_{oi}^s, \theta_i, h_i) \\ + \frac{C_2\mu_0\sigma_{xOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{zX'}(L_{oi}^s, W_{oi}^s, D_{oi}^s, \theta_i, h_i + 2D_{oi}^s) + \frac{C_2\mu_0\sigma_{yOT'}^i}{4\pi} \cdot f_{zY'}(L_{oi}^s, W_{oi}^s, D_{oi}^s, \theta_i, h_i + 2D_{oi}^s) \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} S_{\perp i}^X = -(B_{XOTtemp}^{i'} \cdot \sin\theta_i + B_{YOTtemp}^{i'} \cdot \cos\theta_i) \\ S_{\perp i}^Y = -(B_{XOTtemp}^{i'} \cdot \cos\theta_i - B_{YOTtemp}^{i'} \cdot \sin\theta_i) \\ S_{\perp i}^Z = -B_{ZOTtemp}^{i'} \end{cases} \quad (24)$$

5 按照步骤 5)，针对内壁裂纹和外壁裂纹，分别获得 1080 个不同尺寸、不同倾斜角的正交孪生映射对以及实测尺寸集合。在上述步骤 1)至 4)中，针对内壁裂纹或外壁裂纹， $\{(M_A^i, \alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i), i = 1, 2, \dots, 1080\}$ 为 1080 个不同尺寸、不同倾斜角的正交孪生映射对，与之对应的实测尺度集合表示为 $\{(L_i, W_i, D_i, \theta_i), i = 1, 2, \dots, 1080\}$ 。

10 按照步骤 6)，针对内壁裂纹和外壁裂纹，本实施例拆分训练集和测试集的比例系数被设定的 $k = 0.75$ ，即训练集样本数占样本总数的 75%；而训练集中验证集的占比为 25%。

按照步骤 7)，针对内壁裂纹和外壁裂纹，对于训练集样本 (810 个)，以 M_A^i 为输入，以 $f(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i) = \sqrt{(\alpha_i S_{Ao}^i)^2 + (\alpha_i S_{\perp}^i)^2}$ 为输出， $i = 1, 2, \dots, 810$ ，搭建并训练机器学习模型 ML^{OT} ，即“裂纹信号正交孪生模型”，包含“内壁裂纹信号正交孪生模型”以及“外壁裂纹信号正交孪生模型”。本实施例具体采用卷积神经网络自编码器 (CNN Autoencoder) 算法
15 搭建了裂纹信号正交孪生模型。模型要求当 $i = 1, 2, \dots, 810$ 时，输入 M_A^i 为 200×200 的矩阵，

输出 $f(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$ 同样也是 200×200 的矩阵，两点之间的物理步进为 0.5mm。如果物理步进超过 0.5mm，可以进行三次样条插值。如果矩阵维度不满足要求，则以裂纹中心为矩阵中心，对超出 200 维度的边缘部分进行删减，对少于 200 维度的边缘部分进行补零。

本实施例设计的卷积神经网络自编码器共有 37 层结构，其中编码部分包含 18 层结构，

5 解码部分包含 19 层结构。使用 Python 语言搭建的网络架构如下：

```
class ConvAutoencoder: # 类定义
```

```
    @staticmethod # 静态方法
```

```
    def build(inputShape): # 定义方法
```

```
        # Encoder (编码器部分)
```

```
10         input_img = Input(shape=inputShape) # 输入层
```

```
         x = Conv2D(64, (7, 7), padding='same')(input_img) # 二维卷积层
```

```
         x = SpatialDropout2D(rate=0.3)(x) # 随机将 30% 的区域置零
```

```
         x = BatchNormalization()(x) # 数据批量标准化层
```

```
         x = ReLU()(x) # 以斜坡函数作为激活函数
```

```
15         x = MaxPooling2D((2, 2), padding='same')(x) # 二维池化层
```

```
         x = Conv2D(32, (7, 7), padding='same')(x) # 二维卷积层
```

```
         x = BatchNormalization()(x) # 数据批量标准化层
```

```
         x = ReLU()(x) # 以斜坡函数作为激活函数
```

```
         x = MaxPooling2D((2, 2), padding='same')(x) # 二维池化层
```

```
20         x = Conv2D(16, (7, 7), padding='same')(x) # 二维卷积层
```

```
         x = BatchNormalization()(x) # 数据批量标准化层
```

```
         x = ReLU()(x) # 以斜坡函数作为激活函数
```

```
         x = MaxPooling2D((2, 2), padding='same')(x) # 二维池化层
```

```
         x = Conv2D(8, (7, 7), padding='same')(x) # 二维卷积层
```

```
25         x = BatchNormalization()(x) # 数据批量标准化层
```

```
         x = ReLU()(x) # 以斜坡函数作为激活函数
```

```
         encoded = MaxPooling2D((1, 1), padding='same')(x) # 二维池化层
```

```
        # Decoder (解码器部分)
```

```

x = Conv2D(8, (7, 7), padding='same')(encoded)#二维卷积层
x = BatchNormalization()(x)#数据批量标准化层
x = ReLU()(x)#以斜坡函数作为激活函数
x = UpSampling2D((1, 1))(x)#二维上采样层
5  x = Conv2D(16, (7, 7), padding='same')(x)#二维卷积层
x = BatchNormalization()(x)#数据批量标准化层
x = ReLU()(x)#以斜坡函数作为激活函数
x = UpSampling2D((2, 2))(x)#二维上采样层
10 x = Conv2D(32, (7, 7), padding='same')(x)#二维卷积层
x = BatchNormalization()(x)#数据批量标准化层
x = ReLU()(x)#以斜坡函数作为激活函数
x = UpSampling2D((2, 2))(x)#二维上采样层
x = Conv2D(64, (7, 7), padding='same')(x)#二维卷积层
x = BatchNormalization()(x)#数据批量标准化层
15 x = ReLU()(x)#以斜坡函数作为激活函数
x = UpSampling2D((2, 2))(x)#二维上采样层
x = Conv2D(1, (7, 7), padding='same')(x)#二维卷积层
x = BatchNormalization()(x)#数据批量标准化层
decoded = Activation('relu')(x)#激活层
20 autoencoder = Model(inputs=input_img, outputs=decoded)#模型打包
return autoencoder#返回模型

```

上述 Python 语言代码中，Conv2D 表示二维卷积层，SpatialDropout2D 表示二维空间随机置零层，BatchNormalization 表示数据批量标准化层，ReLU 表示激活函数层，MaxPooling2D 表示二维池化层，UpSampling2D 表示二维上采样层，Activation 表示激活层。每一行 Python 语言表示一层结构，每层结构的输出作为下一层结构的输入，下一层结构的输出作为下下一层结构的输入。

按照步骤 8)，针对内壁裂纹和外壁裂纹，对于训练集样本（810 个），在第 7) 步的基础上，当 $i = 1, 2, \dots, 810$ ，再将 M_A^i 输入到训练好的 ML^{OT} 模型中，得到 810 组估计结果

$\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$ 。

按照步骤 9), 针对内壁裂纹和外壁裂纹, 对于训练集样本(810 个), 当 $i = 1, 2, \dots, 810$, 以 $TH = 0.5 * \hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$ 为阈值, 对 $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$ 进行 0-1 二值化处理, 得到 $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)|_{0-1}$ 。

- 5 按照步骤 10), 针对内壁裂纹和外壁裂纹, 对于训练集样本(810 个), 当 $i = 1, 2, \dots, 810$, 通过 $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$ 和 $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)|_{0-1}$ 以及 D_A^i (D_{Ai}^{FB} , D_{Ai}^{LR}) 计算 810 组特征向量。 $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)|_{0-1}$ 的边缘轮廓通常为椭圆, 记 $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)|_{0-1}$ 边缘轮廓的长轴为 a_i , 短轴为 b_i , 长轴的倾斜角为 φ_i , $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$ 的峰值为 p_i , D_{Ai}^{FB} 的峰-峰值为 p_{Ai}^{FB} , D_{Ai}^{FB} 的峰-峰值间距为 g_{Ai}^{FB} , D_{Ai}^{LR} 的峰值为 p_{Ai}^{LR} , D_{Ai}^{LR} 的峰值间距为 g_{Ai}^{LR} ; 当 $i = 1, 2, \dots, 810$ 时, 共组成
- 10 810 组特征向量 $(a_i, b_i, p_i, \varphi_i, p_{Ai}^{FB}, g_{Ai}^{FB}, p_{Ai}^{LR}, g_{Ai}^{LR})$ 。

- 按照步骤 11), 针对内壁裂纹和外壁裂纹, 对于训练集样本(810 个), 当 $i = 1, 2, \dots, 810$, 以 $(a_i, b_i, p_i, \varphi_i, p_{Ai}^{FB}, g_{Ai}^{FB}, p_{Ai}^{LR}, g_{Ai}^{LR})$ 为输入, 以 $(L_i, W_i, D_i, \theta_i)$ 为输出, 搭建并训练机器学习模型 ML^{size} , 即“裂纹尺度估计模型”, 包含“内壁裂纹尺度估计模型”以及“外壁裂纹尺度估计模型”。本实施例具体采用全连接神经网络 (DNN) 算法搭建了裂纹尺度估计模型。模型
- 15 要求当 $i = 1, 2, \dots, 810$ 时, 输入 $(a_i, b_i, p_i, \varphi_i, p_{Ai}^{FB}, g_{Ai}^{FB}, p_{Ai}^{LR}, g_{Ai}^{LR})$ 为 8×1 的向量, 输出 $(L_i, W_i, D_i, \theta_i)$ 是 4×1 的向量。

本实施例设计的全连接神经网络共有 5 层结构, 分别是 1 个输入层、3 个隐藏层、1 个输出层。使用 Python 语言搭建的网络架构如下:

```
classLWDmodel:#类定义
```

- ```
20 @staticmethod#静态方法
 def build(inputDim):#定义方法
 model=Sequential()#定义序贯模型
 model.add(Dense(10,input_dim=inputDim,kernel_initializer='random_normal',
activation='relu'))#输入层和隐藏层 1
25 model.add(Dense(10,kernel_initializer='random_normal',activation='relu'))#隐藏层 2
 model.add(Dense(10,kernel_initializer='random_normal',activation='relu'))#隐藏层 3
 model.add(Dense(4,kernel_initializer='random_normal'))#输出层
 return model#返回模型
```

上述 Python 语言代码中，Dense 用于实现全连接层，中间层有 10 个神经元，输出层有 4 个神经元，kernel\_initializer 为指定初始化方法的关键字，activation 为指定激活函数的关键字。

- 以“内壁裂纹信号正交孪生模型”为例，设置模型训练的迭代步数为 500，模型训练的迭代过程如图 4A、4B、5A、5B 所示。图 4A 是“裂纹信号正交孪生模型”( $ML^{OT}$ )的损失函数 (loss function) 迭代过程，图 4B 是“裂纹信号正交孪生模型”( $ML^{OT}$ )的确定系数 (coefficient of determination, 即  $R^2$ ) 迭代过程，迭代结束“裂纹信号正交孪生模型”( $ML^{OT}$ )的评价指标如表 2 所示。可见  $ML^{OT}$  模型经过收敛，训练集和验证集的损失函数 (loss) 最终都减小到 0.0002，说明  $ML^{OT}$  模型最终的均方误差 (MSE) 非常小，且没有出现拟合。
- 另一方面， $ML^{OT}$  模型训练集的确定系数最终达到 0.9371，验证集的确定系数最终达到 0.9281，说明  $ML^{OT}$  模型最终的拟合效果较好，基本满足正交孪生变换的要求。

表 2 迭代结束“裂纹信号正交孪生模型”( $ML^{OT}$ ) 的评价指标

| 训练集 loss | 训练集 $R^2$ | 验证集 loss | 验证集 $R^2$ |
|----------|-----------|----------|-----------|
| 0.0002   | 0.9371    | 0.0002   | 0.9281    |

- 以“内壁裂纹信号正交孪生模型”为例，图 5A 是“裂纹尺度估计模型”( $ML^{size}$ )的损失函数 (loss function) 迭代过程，图 5B 是“裂纹尺度估计模型”( $ML^{size}$ )的确定系数 (coefficient of determination, 即  $R^2$ ) 迭代过程，迭代结束“裂纹尺度估计模型”( $ML^{size}$ )的评价指标如表 3 所示。可见  $ML^{size}$  模型经过收敛，训练集的损失函数 (loss) 最终减小到 0.0044，验证集的损失函数 (loss) 最终减小到 0.0027，说明  $ML^{size}$  模型最终的均方误差 (MSE) 也非常小，且没有出现拟合。另一方面， $ML^{size}$  模型训练集的确定系数最终达到 0.9907，验证集的确定系数最终达到 0.9940，说明  $ML^{size}$  模型最终的拟合效果非常好，对裂纹长、宽、深、倾斜角的估计准确性非常高。

表 3 迭代结束“裂纹尺度估计模型”( $ML^{size}$ ) 的评价指标

| 训练集 loss | 训练集 $R^2$ | 验证集 loss | 验证集 $R^2$ |
|----------|-----------|----------|-----------|
| 0.0044   | 0.9907    | 0.0027   | 0.9940    |

在第 2 阶段，针对第 1 阶段未被训练的 270 个测试集样本开展模型测试。“裂纹量化

模型”的使用（模型测试）步骤为：

按照步骤 1)，依据不同检测原理获得单向直流励磁条件下裂纹响应微弱矩阵信号。在执行完第 1 阶段的步骤 1) 之后，已经在轴向励磁条件下，针对内壁裂纹或外壁裂纹，获得 270 个测试集样本的裂纹响应弱信号  $M_A^i$  以及  $D_A^i$ ， $i = 1, 2, \dots, 270$ 。其中，每个裂纹原始样本数据文件由 5 种矩阵数据组成，分别为漏磁轴向数据矩阵  $MFL_A^X$ ，漏磁径向数据矩阵  $MFL_A^Y$ ，漏磁环向数据矩阵  $MFL_A^Z$ ，动磁或涡流前后差分数据矩阵  $D_A^{FB}$  和动磁或涡流左右差分数据矩阵  $D_A^{LR}$ 。至少包括裂纹存在性的指示信号，如  $D_A^{FB}$  和  $D_A^{LR}$  信号。裂纹存在性指示信号包括裂纹的边界信息。通过  $D_A^{FB}$  信号可以区分裂纹是内壁裂纹（ID）还是外壁裂纹（OD）。

10 按照步骤 2)，针对内壁裂纹或外壁裂纹，对于测试集样本（270 个），当  $i = 1, 2, \dots, 270$ ，将  $M_A^i$  信号输入到  $ML^{OT}$ （“内壁裂纹信号正交孪生模型”或“外壁裂纹信号正交孪生模型”）中，输出漏磁增强估计信号  $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$ 。

按照步骤 3)，针对内壁裂纹或外壁裂纹，对于测试集样本（270 个），当  $i = 1, 2, \dots, 270$ ，以  $TH = 0.5 * \max \hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$  为阈值，对  $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$  进行 0-1 二值化处理，得到  $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)|_{0-1}$ 。

按照步骤 4)，针对内壁裂纹或外壁裂纹，对于测试集样本（270 个），当  $i = 1, 2, \dots, 270$ ，通过  $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$  和  $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)|_{0-1}$  以及  $D_A^i$ （ $D_{Ai}^{FB}$ ， $D_{Ai}^{LR}$ ）计算 270 组特征向量。 $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)|_{0-1}$  的边缘轮廓通常为椭圆，记  $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)|_{0-1}$  边缘轮廓的长轴为  $a_i$ ，短轴为  $b_i$ ，长轴的倾斜角为  $\varphi_i$ ， $\hat{f}(\alpha_i S_{Ao}^i, \alpha_i S_{\perp}^i)$  的峰值为  $p_i$ ， $D_{Ai}^{FB}$  的峰-峰值为  $p_{Ai}^{FB}$ ， $D_{Ai}^{FB}$  的峰-峰值间距为  $g_{Ai}^{FB}$ ， $D_{Ai}^{LR}$  的峰值为  $p_{Ai}^{LR}$ ， $D_{Ai}^{LR}$  的峰值间距为  $g_{Ai}^{LR}$ ；当  $i = 1, 2, \dots, 270$  时，共组成 270 组特征向量  $(a_i, b_i, p_i, \varphi_i, p_{Ai}^{FB}, g_{Ai}^{FB}, p_{Ai}^{LR}, g_{Ai}^{LR})$ 。

按照步骤 5)，针对内壁裂纹或外壁裂纹，对于测试集样本（270 个），当  $i = 1, 2, \dots, 270$ ，将特征向量  $(a_i, b_i, p_i, \varphi_i, p_{Ai}^{FB}, g_{Ai}^{FB}, p_{Ai}^{LR}, g_{Ai}^{LR})$  输入到  $ML^{size}$ （“内壁裂纹尺度估计模型”或“外壁裂纹尺度估计模型”）中，输出内壁或外壁裂纹尺度的估计值  $(\hat{L}_i, \hat{W}_i, \hat{D}_i, \hat{\theta}_i)$ 。

25 按照步骤 6)，针对内壁裂纹或外壁裂纹，确保第 1 阶段测试集的 270 个裂纹全部量化完毕为止。

图 6A、图 6B、图 7A、图 7B、图 8A、图 8B 分别是测试集样本中 3 组不同尺度内壁裂纹信号的正交孪生效果图，从左往右三幅图分别是原始输入的漏磁测量信号模值  $M_A$ ，图片标题为“输入信号”，经过  $ML^{OT}$  输出的漏磁增强估计信号  $\hat{f}(\alpha S_{Ao}, \alpha S_{\perp})$ ，图片标题为

“预测输出信号”；以及 $ML^{OT}$ 输出的理想信号 $f(\alpha S_{Ao}, \alpha S_{\perp})$ ，图片标题为“真实输出信号”。

图 6A 和图 6B 展示的是测试集中一个  $L=30\text{mm}$ ， $W=0.3\text{mm}$ ， $D=1.4\text{mm}$ ， $\theta = 0^\circ$  的内壁裂纹，经过 $ML^{OT}$ （“内壁裂纹信号正交孪生模型”）后信号增强效果图。可见，原始输入信号 $M_A$ 的漏磁场峰值仅有 10Gs，经过正交孪生变换之后， $ML^{OT}$ 输出信号的漏磁场峰值达到 120Gs，信号被增强 12 倍；此外，由于该裂纹样本的倾斜角 $\theta = 0^\circ$ ，属于轴向裂纹，图 6B 表明，原始输入信号 $M_A$ 呈现双峰特征，甚至无法分辨它是一个轴向裂纹，然而经过正交孪生变换之后， $ML^{OT}$ 输出信号 $\hat{f}(\alpha S_{Ao}, \alpha S_{\perp})$ 清楚反映了它的轴向裂纹特征，因而 $\hat{f}(\alpha S_{Ao}, \alpha S_{\perp})$ 信号对该轴向裂纹的尺度量化提供了有利条件。

图 7A 和图 7B 展示的是测试集中一个  $L=40\text{mm}$ ， $W=0.3\text{mm}$ ， $D=2.5\text{mm}$ ， $\theta = 3^\circ$  的内壁裂纹，经过 $ML^{OT}$ （“内壁裂纹信号正交孪生模型”）后信号增强效果图。可见，原始输入信号 $M_A$ 的漏磁场峰值仅有 12Gs，经过正交孪生变换之后， $ML^{OT}$ 输出信号的漏磁场峰值达到 150Gs，信号被增强 12.5 倍；同样，由于该裂纹样本的倾斜角 $\theta = 3^\circ$ ，属于小倾斜角裂纹，图 7B 表明，该裂纹经过正交孪生变换之后， $ML^{OT}$ 输出信号 $\hat{f}(\alpha S_{Ao}, \alpha S_{\perp})$ 增强了裂纹信号特征，为对其进行尺度的高精度量化提供了有利条件。

图 8A 和图 8B 展示的是测试集中一个  $L=60\text{mm}$ ， $W=0.4\text{mm}$ ， $D=2.9\text{mm}$ ， $\theta = 18^\circ$  的内壁裂纹，经过 $ML^{OT}$ （“内壁裂纹信号正交孪生模型”）后信号增强效果图。可见，原始输入信号 $M_A$ 的漏磁场峰值仅有 60Gs，经过正交孪生变换之后， $ML^{OT}$ 输出信号的漏磁场峰值达到 200Gs，信号被增强 3.3 倍，因而 $ML^{OT}$ 输出信号也有利于该裂纹的高精度量化。

通过对测试集 270 个内壁裂纹的估计误差进行区间估计，在 90% 的置信度下，计算结果如表 4 所示。可见，内壁裂纹的长度估计误差的置信区间为 $(-1.046\text{mm}, 1.026\text{mm})$ ，宽度估计误差的置信区间为 $(-0.006\text{mm}, 0.005\text{mm})$ ，深度估计误差的置信区间为 $(-0.214\text{mm}, 0.193\text{mm})$ ，倾斜角估计误差的置信区间为 $(-2.282^\circ, 2.452^\circ)$ 。综上所述，本公开的基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法及装置、存储介质具有非常高的尺度量化精度。

表 4 裂纹量化模型估计误差的置信区间

| $Error_L(\text{mm})$ | $Error_W(\text{mm})$ | $Error_D(\text{mm})$ | $Error_\theta(^{\circ})$ |
|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
| $(-1.046, 1.026)$    | $(-0.006, 0.005)$    | $(-0.214, 0.193)$    | $(-2.282, 2.452)$        |

本公开实施例还提供了基于正交孪生的油气管道裂纹量化装置，包括：1) 3 轴漏磁

和 2 轴动磁/涡流传感器超高分辨集成探头, 可实现采集前后差分动磁/涡流信号以及左右差分动磁/涡流信号; 2) 存储指令、算法、模型的存储器; 3) 执行基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法的处理器; 4) 显示量化结果的显示器; 5) 连接各个单元的总线系统。

在一个示例中, 如图 9 所示, 基于正交孪生的油气管道裂纹量化装置可包括: 3 轴漏磁和 2 轴动磁/涡流传感器超高分辨集成探头 910、存储器 920、处理器 930、显示器 940 和总线系统 950, 其中, 3 轴漏磁和 2 轴动磁/涡流传感器超高分辨集成探头 910、存储器 920、处理器 930、显示器 940 通过该总线系统 950 相连; 3 轴漏磁和 2 轴动磁/涡流传感器超高分辨集成探头 910 用于检测并获得单向直流励磁条件下尺度为  $(L, W, D, \theta)$  的裂纹响应微弱信号, 包括 3 轴漏磁信号和前后差分动磁/涡流信号和左右差分动磁/涡流信号; 存储器 920 用于存储指令及“裂纹信号正交孪生模型”和“裂纹尺度估计模型”等, 处理器 930 用于执行存储器 920 存储的指令, 以通过基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法进行裂纹量化。具体地, 处理器 930 可以分别训练“裂纹信号正交孪生模型”和“裂纹尺度估计模型”; 可对不同倾斜角的裂纹弱信号进行增强并进行尺度估计; 最后通过显示器 940 将量化结果显示出来。

应理解, 存储器 920 可以包括只读存储器和随机存取存储器, 并向处理器 930 提供指令和数据, 包括所述的“裂纹信号正交孪生模型”和“裂纹尺度估计模型”等。存储器 920 的一部分还可以包括非易失性随机存取存储器。例如, 存储器 920 还可以存储设备类型的信息。

处理器 930 可以是中央处理单元 (Central Processing Unit, CPU), 处理器 930 还可以是其他通用处理器、数字信号处理器 (DSP)、专用集成电路 (ASIC)、现场可编程门阵列 (FPGA) 或者其他可编程逻辑器件、分立门或者晶体管逻辑器件、分立硬件组件等。通用处理器可以是微处理器或者该处理器 930 也可以是任何常规的处理器等。

显示器 940 除了显示裂纹的量化结果之外, 还可以通过裂纹分析软件显示存储器 920 中的裂纹检测数据。

总线系统 950 除包括数据总线之外, 还可以包括电源总线、控制总线和状态信号总线等。

在实现过程中, 基于正交孪生的油气管道裂纹量化装置所执行的处理可以通过处理器 930 中的硬件的集成逻辑电路或者软件形式的指令完成。即本公开实施例的基于正交孪生的油气管道裂纹量化装置步骤可以由硬件处理器执行完成, 或者用处理器 930 中的硬件及软件模块组合执行完成。软件模块可以位于随机存储器, 闪存、只读存储器, 可编程只读存储器或者电可擦写可编程存储器、寄存器等存储介质中。该存储介质位于存储器 920, 处理器 930 读取存储器 920 中的信息, 结合其硬件完成上述方法的步骤。为避免重复, 这里不再详细描述。

本公开实施例还提供了一种存储介质，该存储介质存储有可执行指令，该可执行指令被处理器执行时可以实现本公开上述任一实施例提供的基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法；此外，存储介质还可以存储裂纹量化模型，包括“裂纹信号正交孪生模型”和“裂纹尺度估计模型”；对所述的小倾斜角裂纹，分别使用训练好的“裂纹信号正交孪生模型”和“裂纹尺度估计模型”进行量化。

本领域普通技术人员可以理解，上文中所公开方法中的全部或某些步骤、系统、装置中的功能模块/单元可以被实施为软件、固件、硬件及其适当的组合。在硬件实施方式中，在以上描述中提及的功能模块/单元之间的划分不一定对应于物理组件的划分；例如，一个物理组件可以具有多个功能，或者一个功能或步骤可以由若干物理组件合作执行。某些组件或所有组件可以被实施为由处理器，如数字信号处理器或微处理器执行的软件，或者被实施为硬件，或者被实施为集成电路，如专用集成电路。这样的软件可以分布在计算机可读介质上，计算机可读介质可以包括计算机存储介质（或非暂时性介质）和通信介质（或暂时性介质）。如本领域普通技术人员公知的，术语计算机存储介质包括在用于存储信息（诸如计算机可读指令、数据结构、程序模块或其他数据）的任何方法或技术中实施的易失性和非易失性、可移除和不可移除介质。计算机存储介质包括但不限于 RAM、ROM、EEPROM、闪存或其他存储器技术、CD-ROM、数字多功能盘（DVD）或其他光盘存储、磁盒、磁带、磁盘存储或其他磁存储装置、或者可以用于存储期望的信息并且可以被计算机访问的任何其他的介质。此外，本领域普通技术人员公知的是，通信介质通常包含计算机可读指令、数据结构、程序模块或者诸如载波或其他传输机制之类的调制数据信号中的其他数据，并且可包括任何信息递送介质。

虽然本公开所揭露的实施方式如上，但所述的内容仅为便于理解本公开而采用的实施方式，并非用以限定本公开。任何本公开所属领域内的技术人员，在不脱离本公开所揭露的精神和范围的前提下，可以在实施的形式及细节上进行任何的修改与变化，但本公开的保护范围，仍须以所附的权利要求书所界定的范围为准。

## 权利要求书

1. 一种基于正交孪生的油气管道裂纹量化方法, 包括:

获取在单向直流励磁条件下内壁裂纹或者外壁裂纹的三轴漏磁测量信号模值, 获取在与直流励磁正交的动态磁场激励条件下的动磁信号或涡流信号, 所述单向直流励磁指具有  
5 单一方向的直流励磁方式;

将所述三轴漏磁测量信号模值输入裂纹信号正交孪生模型, 得到漏磁增强估计信号, 所述漏磁增强估计信号为仿真的正交孪生三轴漏磁信号模值的函数, 所述正交孪生三轴漏磁信号模值为在虚拟正交孪生直流励磁条件下的三轴漏磁响应信号模值, 所述虚拟正交孪生直流励磁与所述单向直流励磁同平面、大小相等且方向垂直;

10 从所述漏磁增强估计信号以及所述动磁信号或涡流信号中提取特征向量, 将所述特征向量输入裂纹尺度估计模型, 得到裂纹的尺寸和倾斜角;

所述正交孪生被定义为, 在已知单向直流励磁的原始响应信号的条件下, 得到与单向直流励磁同平面、大小相等、方向垂直的孪生磁场对应的响应信号, 得到的响应信号被定义为孪生响应信号, 所述孪生响应信号与所述原始响应信号构成孪生关系, 将所述原始响应信号变换为所述孪生响应信号的过程定义为正交孪生变换。  
15

2. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中, 从所述漏磁增强估计信号以及所述动磁信号或涡流信号中提取特征向量, 包括:

根据所述漏磁增强估计信号得到至少一个第一特征值;

根据所述动磁信号或涡流信号得到至少一个第二特征值;

20 将所述第一特征值和第二特征值组成特征向量。

3. 根据权利要求 2 所述的方法, 其中, 所述第一特征值包括: 长轴、短轴、长轴倾斜角以及峰值, 所述根据所述漏磁增强估计信号得到第一特征值, 包括:

根据预设的二值化阈值, 对所述漏磁增强估计信号进行二值化处理, 得到二值化漏磁信号;

25 计算所述二值化漏磁信号的边缘轮廓的长轴、短轴、长轴倾斜角以及所述漏磁增强估计信号的峰值, 将得到的长轴、短轴、长轴倾斜角以及峰值作为所述第一特征值;

所述动磁信号或涡流信号包括前后线圈差分信号和左右线圈差分信号, 所述第二特征

值包括：所述前后线圈差分信号的峰值和峰-峰值间距，以及所述左右线圈差分信号的峰值和峰值间距。

4. 根据权利要求 2 所述的方法，其中，所述裂纹信号正交孪生模型为通过卷积神经网络实现的自编码器模型，所述自编码器模型包括编码器部分和解码器部分；所述裂纹尺度估计模型为全连接神经网络。

5. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述漏磁增强估计信号为仿真最优三轴漏磁信号模值 $S_{Ao}$ 与仿真的正交孪生三轴漏磁信号模值 $S_{\perp}$ 的函数 $f(\alpha S_{Ao}, \alpha S_{\perp})$ ，所述仿真最优三轴漏磁信号模值 $S_{Ao}$ 是使 $\|\alpha S_A - M_A\|_F$ 最小的仿真三轴漏磁信号模值，其中 $M_A$ 为所述三轴漏磁测量信号模值， $S_A$ 为将裂纹尺度代入磁偶极子模型得到的仿真三轴漏磁信号模值，

10  $\|\cdot\|_F$ 为矩阵的 Frobenius 范数， $\alpha$ 为调节因子；

$S_{Ao} = \sqrt{(S_{Ao}^X)^2 + (S_{Ao}^Y)^2 + (S_{Ao}^Z)^2}$ ， $S_{Ao}^X$ 、 $S_{Ao}^Y$ 、 $S_{Ao}^Z$ 分别是仿真三轴漏磁信号的 X 轴分量、Y 轴分量以及 Z 轴分量，所述 X 轴方向与所述单向直流励磁的激励方向相同，所述 Y 轴方向在所述油气管道平面内与所述 X 轴方向垂直，所述 Z 轴方向分别与所述 X 轴方向和 Y 轴方向垂直；

15  $S_{\perp} = \sqrt{(S_{\perp}^X)^2 + (S_{\perp}^Y)^2 + (S_{\perp}^Z)^2}$ ， $S_{\perp}^X$ 、 $S_{\perp}^Y$ 、 $S_{\perp}^Z$ 分别是正交孪生三轴漏磁信号的 X 轴分量、Y 轴分量以及 Z 轴分量；

$$f(\alpha S_{Ao}, \alpha S_{\perp}) = K \cdot \sqrt{(\alpha S_{Ao})^2 + (\alpha S_{\perp})^2}, K \geq 1;$$

调节因子 $\alpha$ 表示等于 $M_A$ 矩阵的最大元素除以初始矩阵的最大元素，所述初始矩阵为将裂纹实测尺度代入磁偶极子模型计算所得的仿真三轴漏磁信号模值组成的矩阵。

20 6. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述方法还包括：

对于多个裂纹样本，使用在单向直流励磁条件下的三轴漏磁测量信号模值以及对应的所述漏磁增强估计信号训练所述裂纹信号正交孪生模型，其中，每个所述裂纹样本对应的漏磁增强估计信号通过如下方法生成：

以所述裂纹样本的实测尺度为初始的裂纹尺度；

25 用 $M_A$ 矩阵的最大元素除以初始矩阵的最大元素得到调节因子 $\alpha$ ， $M_A$ 为所述三轴漏磁测量信号模值；

计算 $\|\alpha S_A - M_A\|_F$ ，其中 $S_A$ 为将裂纹尺度代入磁偶极子模型得到的仿真三轴漏磁信

号模值,  $\|\cdot\|_F$  为矩阵的 Frobenius 范数;

反复调节所述裂纹尺度, 并将所述裂纹尺度输入裂纹磁偶极子模型, 直到得到使  $\|\alpha S_A - M_A\|_F$  最小的最优裂纹尺度, 与所述最优裂纹尺度对应的  $S_A$  即为仿真最优三轴漏磁信号模值  $S_{Ao}$ ;

- 5 将所述最优裂纹尺度输入裂纹正交磁偶极子模型, 得到所述仿真的正交孪生三轴漏磁信号模值  $S_{\perp}$ ;

将所述  $S_{Ao}$  与  $S_{\perp}$  代入公式  $f(\alpha S_{Ao}, \alpha S_{\perp}) = K \cdot \sqrt{(\alpha S_{Ao})^2 + (\alpha S_{\perp})^2}$ ,  $K \geq 1$ , 从而生成所述漏磁增强估计信号。

7. 根据权利要求 6 所述的方法, 其中, 对于所述多个裂纹样本, 使用在单向直流励磁条件下的三轴漏磁测量信号模值以及对应的所述漏磁增强估计信号训练所述裂纹信号正交孪生模型, 包括:

将每个裂纹样本在单向直流励磁条件下的三轴漏磁测量信号模值以及对应的漏磁增强估计信号标记为一组正交孪生映射对;

- 15 将  $N$  组正交孪生映射对按照比例  $k: (1-k)$  随机拆分为训练集和测试集, 其中,  $0 < k < 1$ ;

使用  $k \times N$  组所述正交孪生映射对训练所述裂纹信号正交孪生模型, 使用  $(1-k) \times N$  组所述正交孪生映射对测试所述裂纹信号正交孪生模型。

8. 根据权利要求 7 所述的方法, 其中, 在训练所述裂纹信号正交孪生模型之后, 使用所述特征向量训练所述裂纹尺度估计模型, 包括:

- 20 将每个裂纹样本的第一特征值和第二特征值与对应的裂纹尺寸和倾斜角的真实值标记为一组裂纹尺度估计映射对;

使用  $k \times N$  组所述正交孪生映射对对应的裂纹尺度估计映射对进行所述裂纹尺度估计模型的训练, 使用  $(1-k) \times N$  组所述正交孪生映射对对应的裂纹尺度估计映射对进行所述裂纹尺度估计模型的测试。

- 25 9. 一种基于正交孪生的油气管道裂纹量化装置, 包括: 单向直流励磁条件下的漏磁传感器探头, 单向直流励磁以及与直流励磁正交的动态磁场激励条件下的动磁或涡流传感器探头, 存储指令、算法、模型的存储器, 执行如权利要求 1 至 8 中任一项所述的油气管

道裂纹量化方法的处理器，以及连接各个单元的总线系统。

10. 一种存储介质，其上存储有基于正交变生的油气管道裂纹量化方法的程序，该程序被处理器执行时实现如权利要求 1 至 8 中任一项所述的油气管道裂纹量化方法。

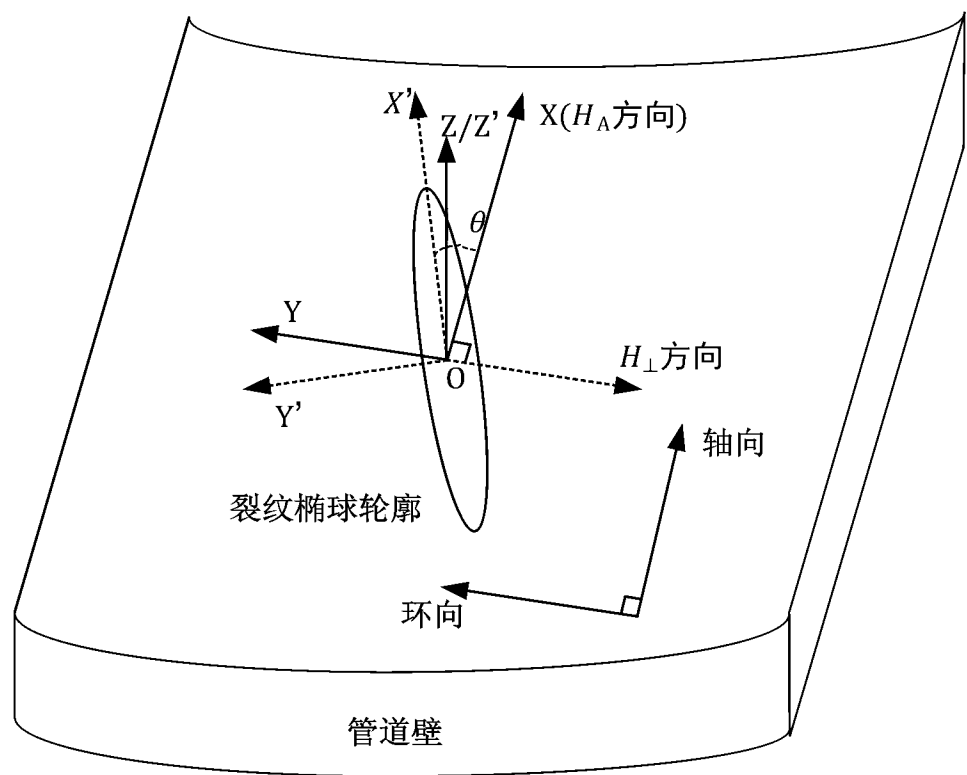


图 1

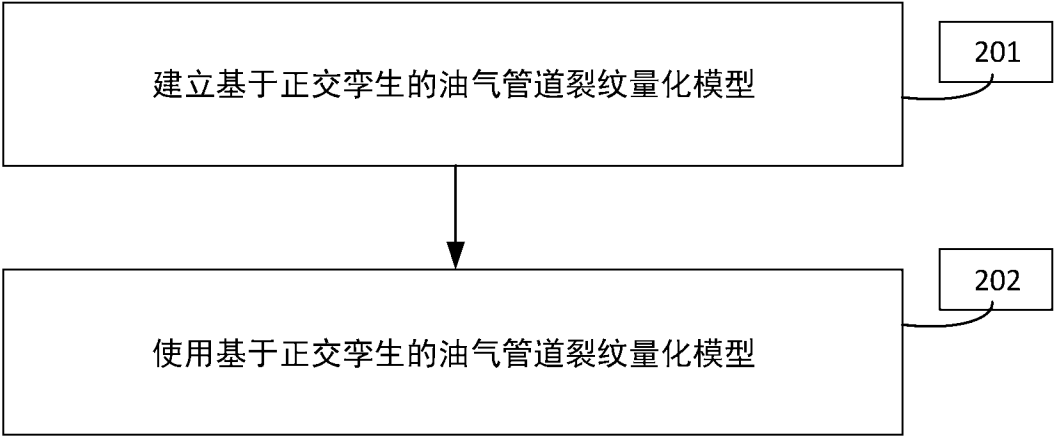


图 2

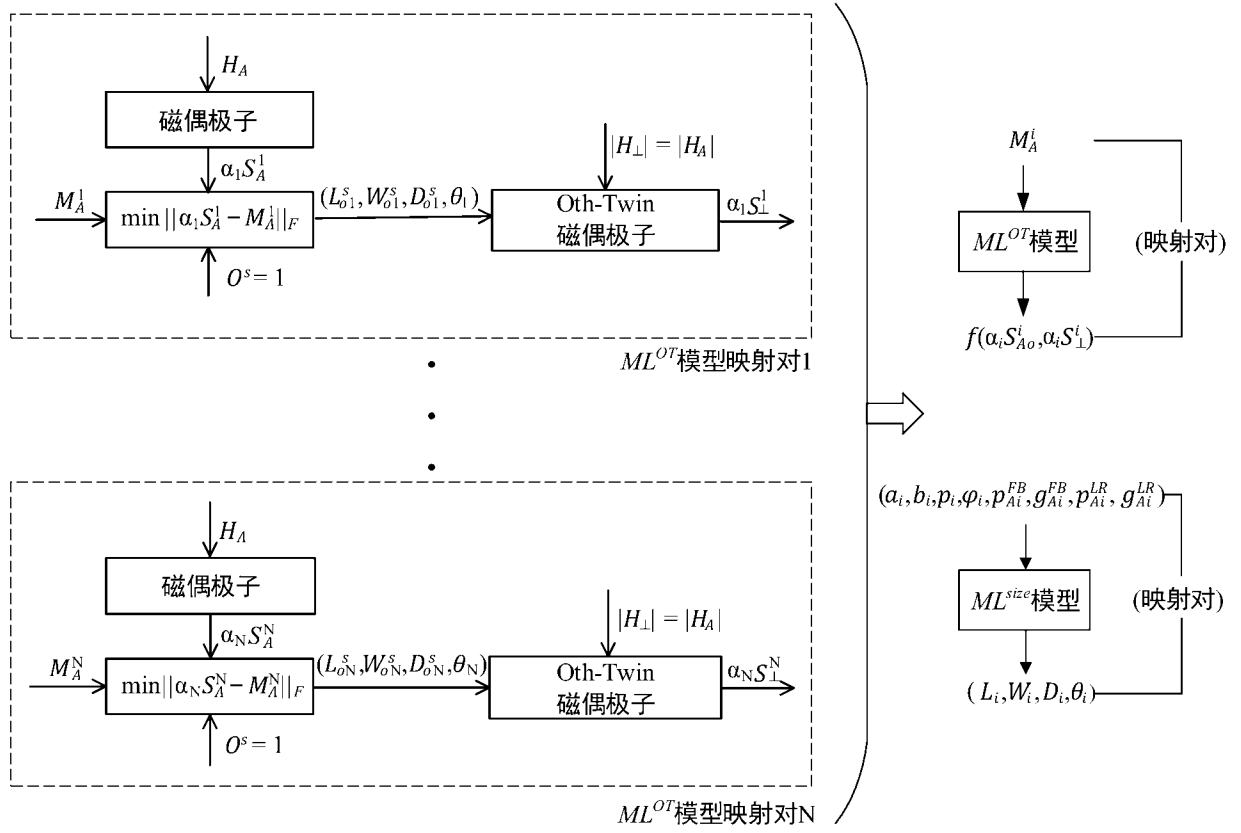


图 3A

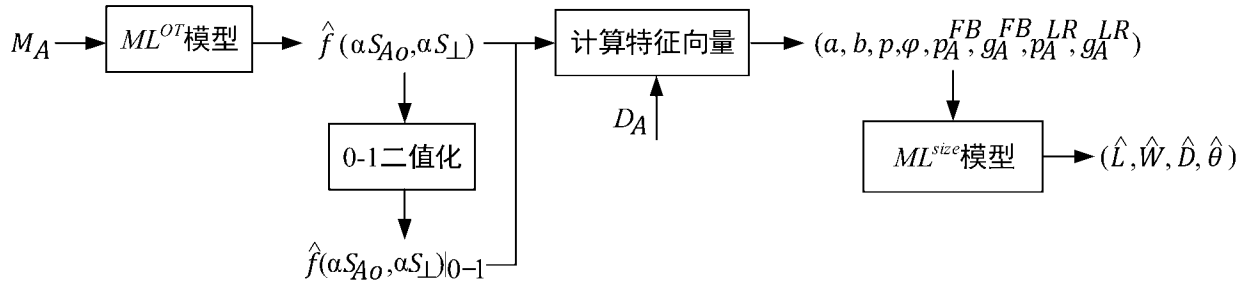


图 3B

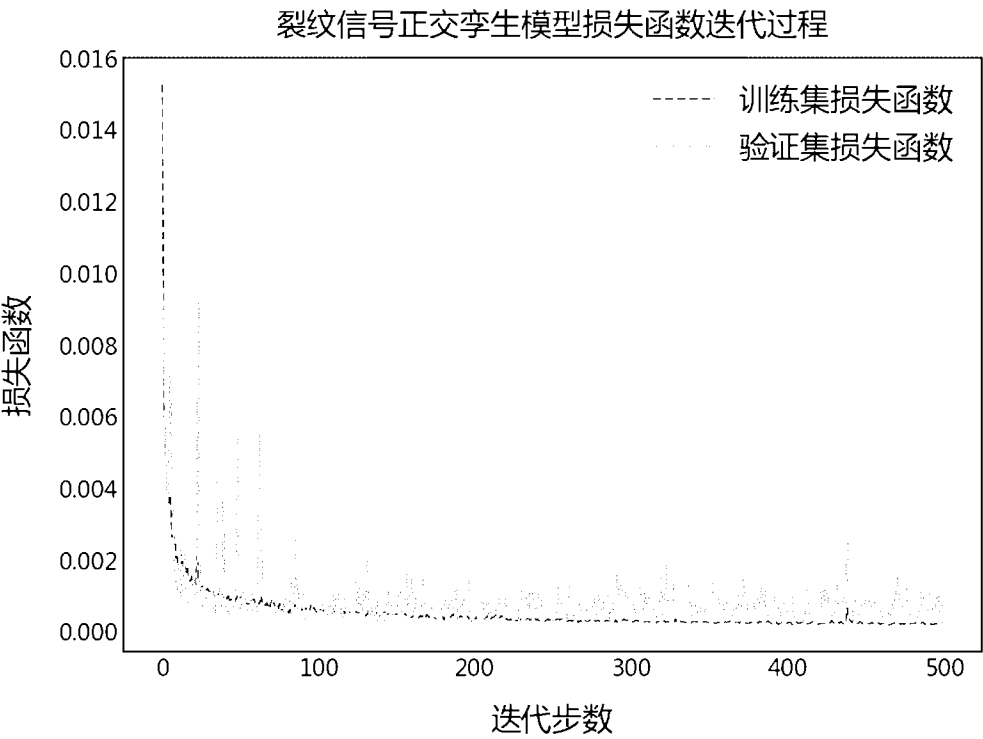


图 4A

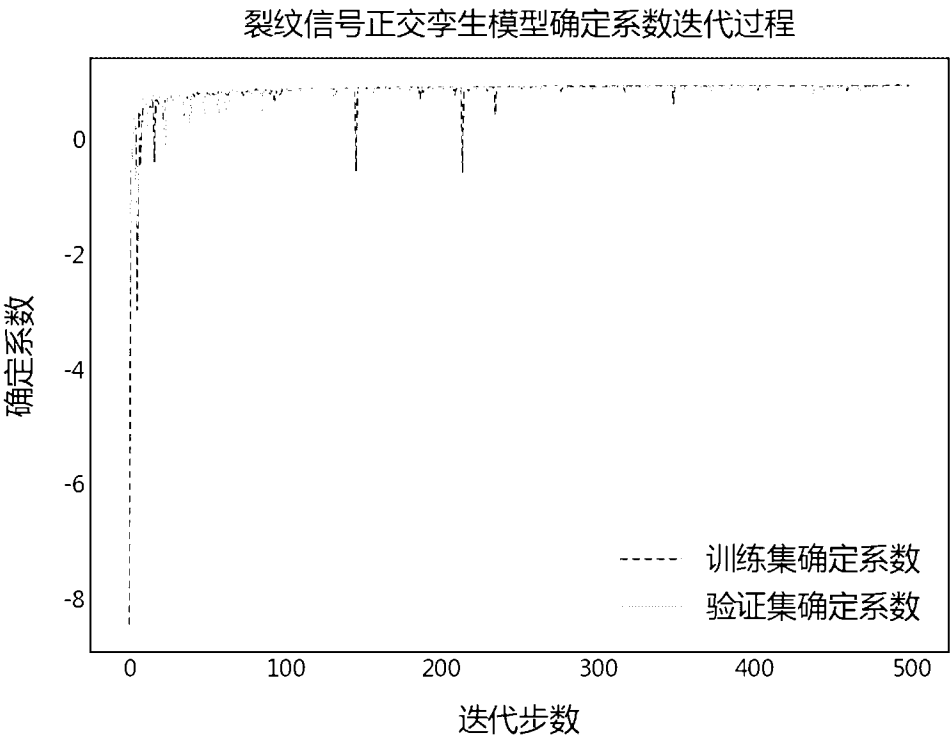


图 4B

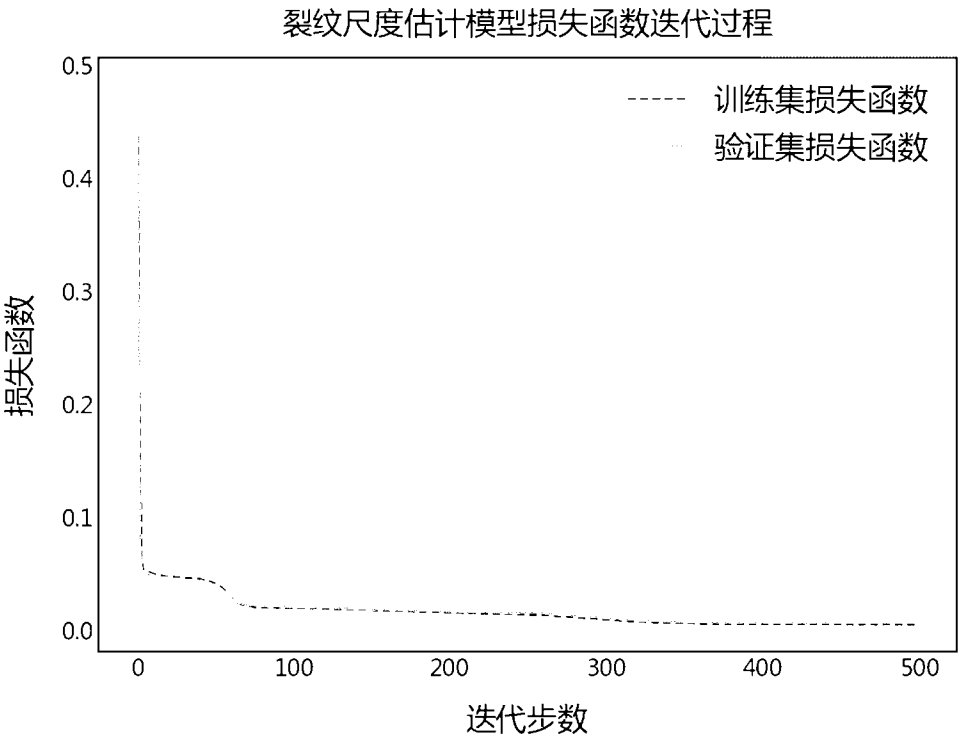


图 5A

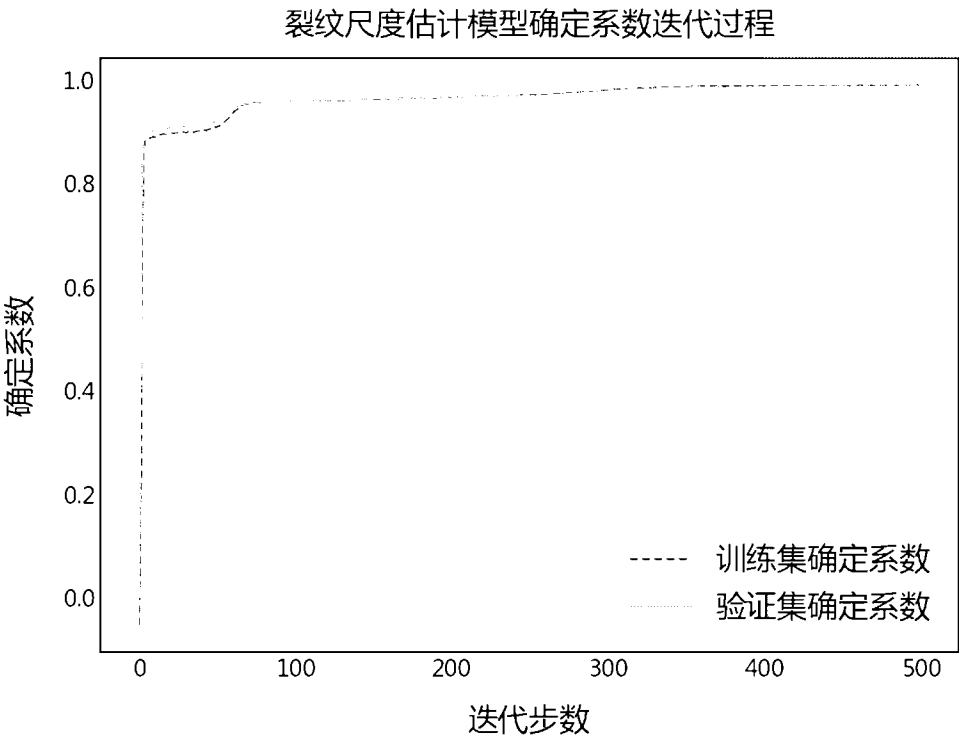


图 5B

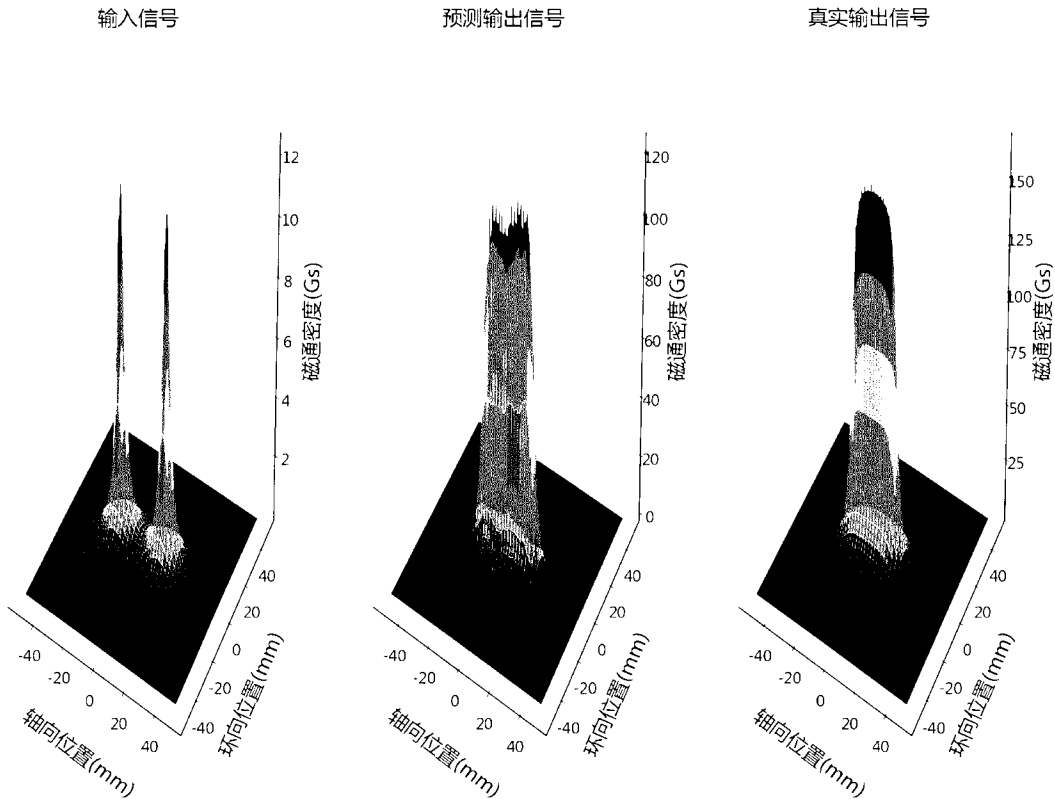


图 6A

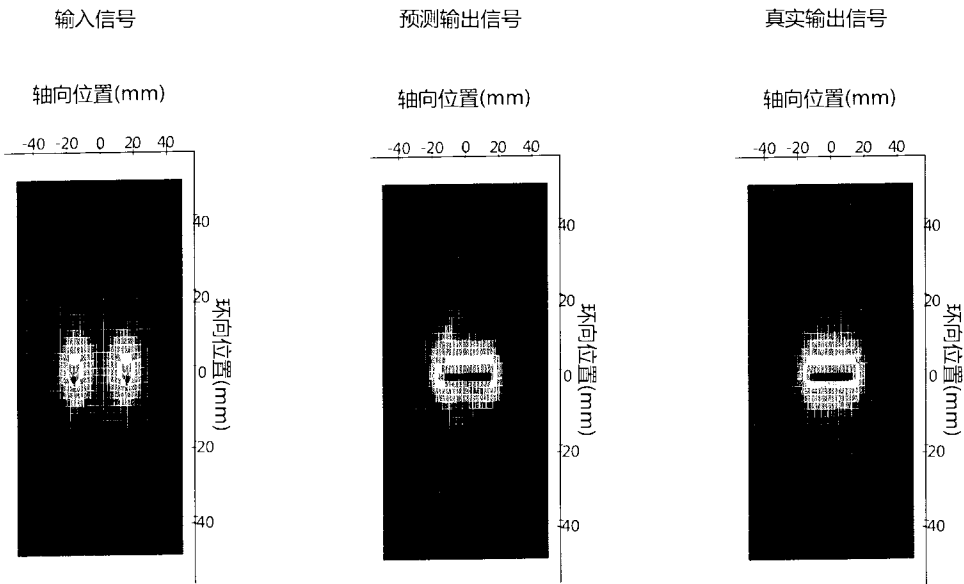


图 6B

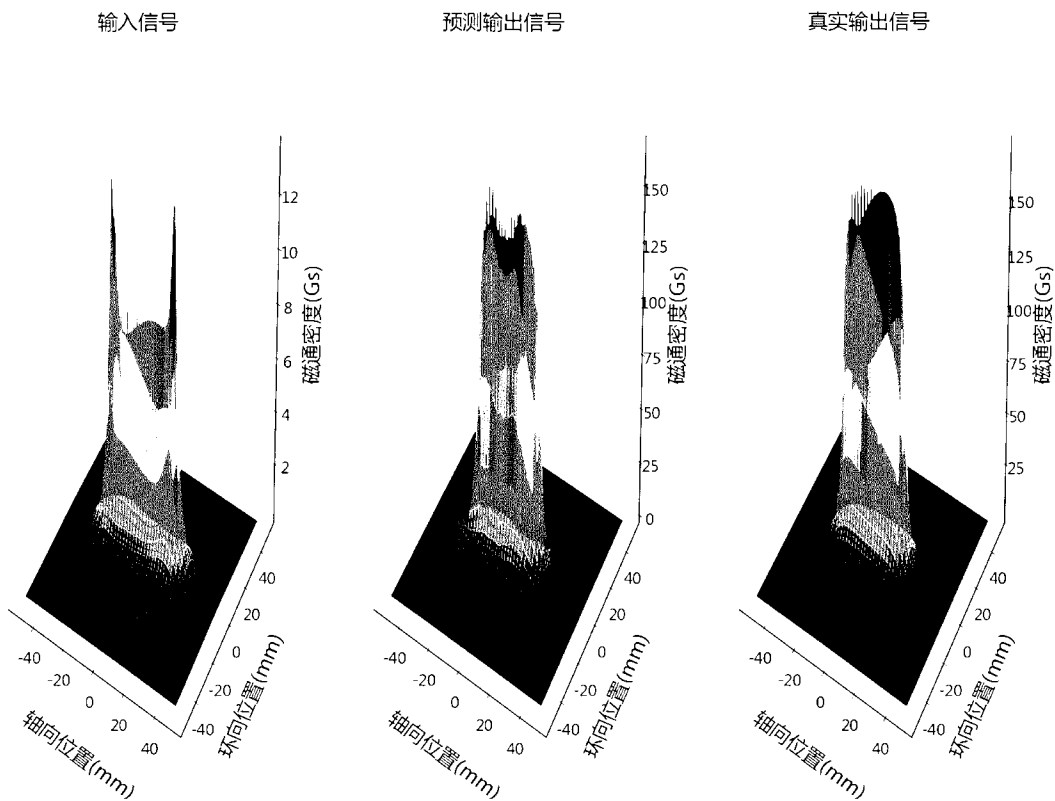


图 7A

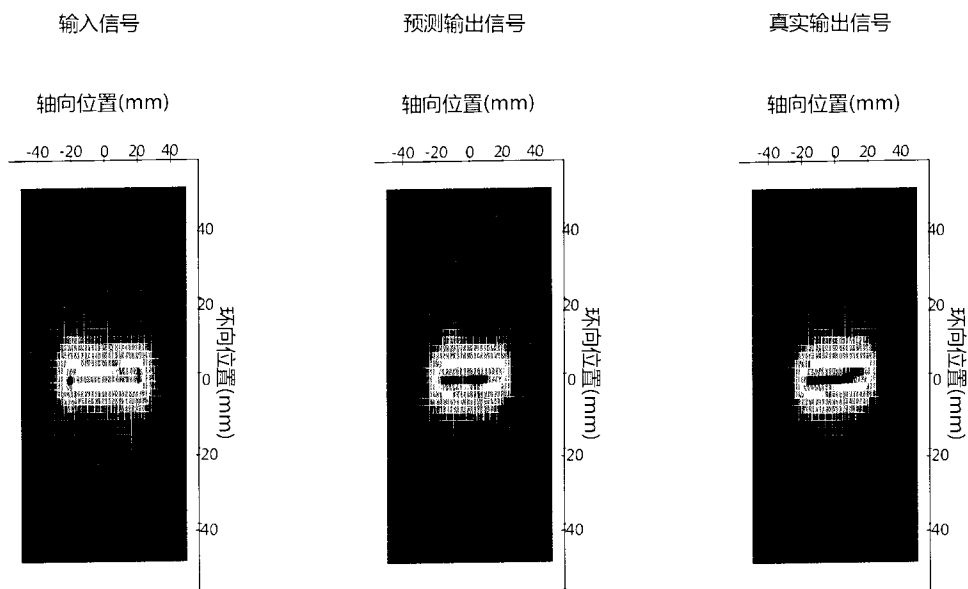
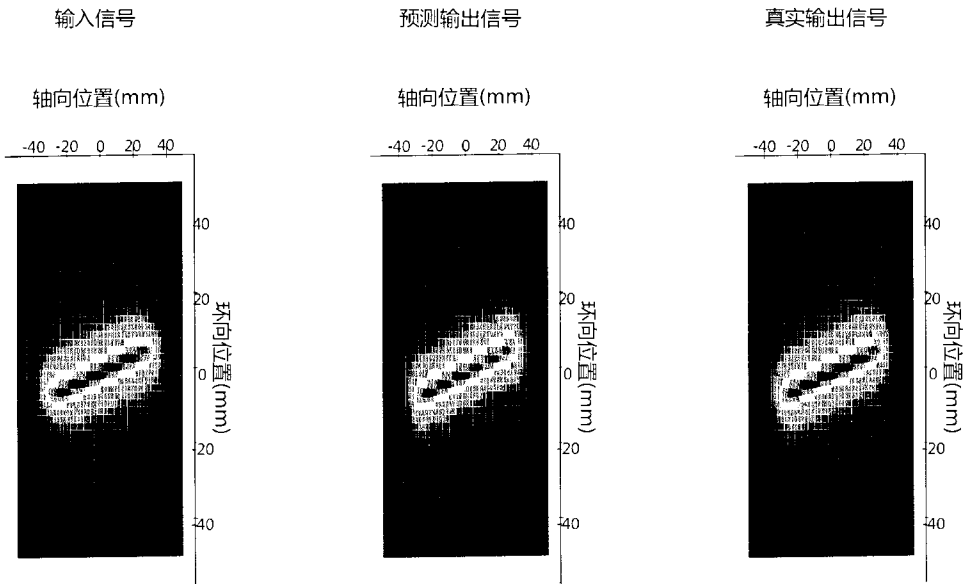
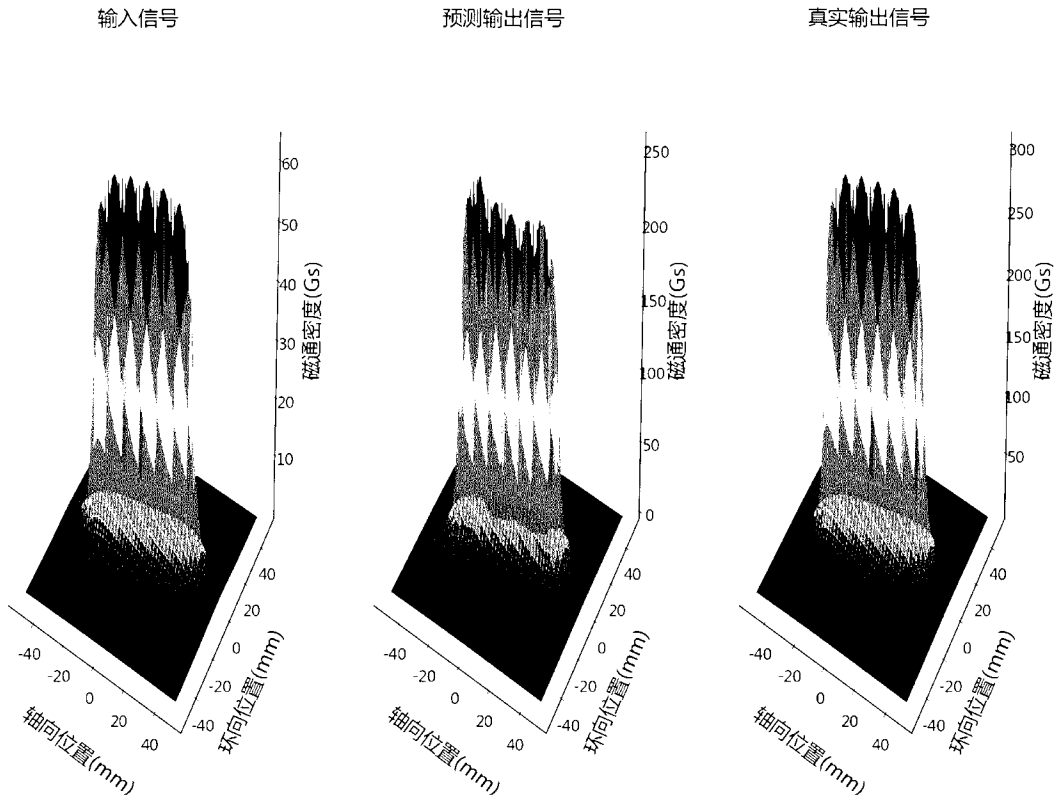


图 7B



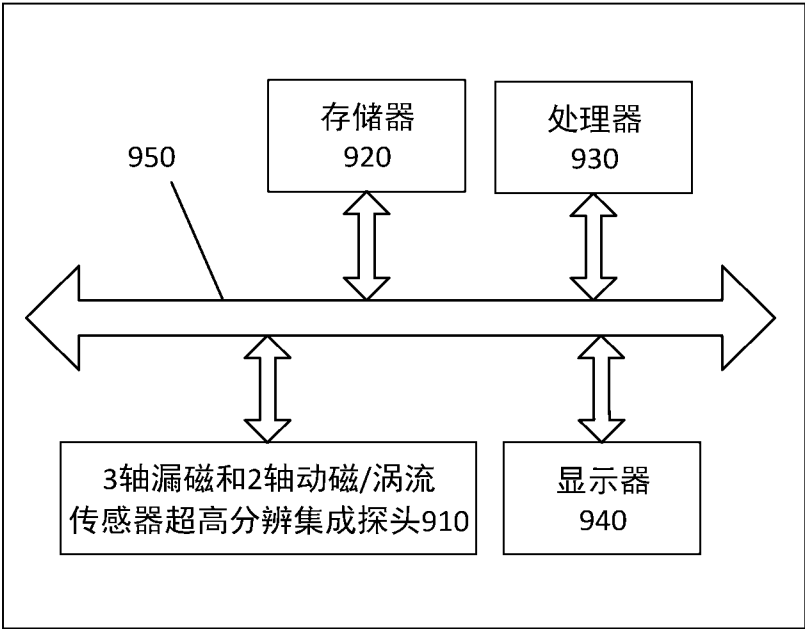


图 9

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2023/116749

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

G01N27/83(2006.01)i; G06F30/27(2020.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: G01N27/-、G06F30/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNTXT, ENTXT, ENTXTC, VEN, WPABS, CNKI: 清华大学, 郭静波, 管 2d (裂缝 or 裂纹), 正交 4D 孪生, 励磁, 漏磁, 三轴, 多轴, 单向 4d 磁, 正交 4D 变换, pip+ 2D crack+, Twin+ 4D orthog+, magnet+ 4D leak+

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                       | Relevant to claim No. |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | CN 114636754 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 17 June 2022 (2022-06-17)<br>entire document                                        | 1-10                  |
| A         | CN 101261246 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 10 September 2008 (2008-09-10)<br>entire document                                   | 1-10                  |
| A         | CN 105092696 A (BEIJING UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 25 November 2015 (2015-11-25)<br>entire document                       | 1-10                  |
| A         | CN 106648541 A (SHANXI UNIVERSITY) 10 May 2017 (2017-05-10)<br>entire document                                           | 1-10                  |
| A         | CN 109100416 A (NORTHEASTERN UNIVERSITY) 28 December 2018 (2018-12-28)<br>entire document                                | 1-10                  |
| A         | CN 115308297 A (NATIONAL OIL & GAS PIPE NETWORK GROUP CO., LTD. et al.) 08 November 2022 (2022-11-08)<br>entire document | 1-10                  |



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“D” document cited by the applicant in the international application

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

20 November 2023

Date of mailing of the international search report

05 December 2023

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/  
CN)  
China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District,  
Beijing 100088

Authorized officer

Telephone No.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2023/116749

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                | Relevant to claim No. |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | CN 115586245 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) 10 January 2023 (2023-01-10)<br>entire document                                               | 1-10                  |
| A         | CN 115758084 A (TSINGHUA UNIVERSITY et al.) 07 March 2023 (2023-03-07)<br>entire document                                                                         | 1-10                  |
| A         | CN 115809583 A (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTION OF STATE GRID LIAONING ELECTRIC POWER SYPPPLY CO., LTD. et al.) 17 March 2023 (2023-03-17)<br>entire document | 1-10                  |
| A         | CN 115809595 A (SHENYANG JIANZHU UNIVERSITY) 17 March 2023 (2023-03-17)<br>entire document                                                                        | 1-10                  |
| A         | US 2002153883 A1 (KOREA ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE) 24 October 2002 (2002-10-24)<br>entire document                                                         | 1-10                  |
| A         | US 2003128887 A1 (NEC. CORP.) 10 July 2003 (2003-07-10)<br>entire document                                                                                        | 1-10                  |
| A         | US 2023003626 A1 (MITSUBISHI ELECTRIC CORP.) 05 January 2023 (2023-01-05)<br>entire document                                                                      | 1-10                  |
| A         | US 2023049804 A1 (MITSUBISHI ELECTRIC CORP.) 16 February 2023 (2023-02-16)<br>entire document                                                                     | 1-10                  |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/CN2023/116749**

| Patent document cited in search report |            |    | Publication date (day/month/year) | Patent family member(s) |              |    | Publication date (day/month/year) |
|----------------------------------------|------------|----|-----------------------------------|-------------------------|--------------|----|-----------------------------------|
| CN                                     | 114636754  | A  | 17 June 2022                      | None                    |              |    |                                   |
| CN                                     | 101261246  | A  | 10 September 2008                 | None                    |              |    |                                   |
| CN                                     | 105092696  | A  | 25 November 2015                  | None                    |              |    |                                   |
| CN                                     | 106648541  | A  | 10 May 2017                       | None                    |              |    |                                   |
| CN                                     | 109100416  | A  | 28 December 2018                  | None                    |              |    |                                   |
| CN                                     | 115308297  | A  | 08 November 2022                  | None                    |              |    |                                   |
| CN                                     | 115586245  | A  | 10 January 2023                   | None                    |              |    |                                   |
| CN                                     | 115758084  | A  | 07 March 2023                     | None                    |              |    |                                   |
| CN                                     | 115809583  | A  | 17 March 2023                     | None                    |              |    |                                   |
| CN                                     | 115809595  | A  | 17 March 2023                     | None                    |              |    |                                   |
| US                                     | 2002153883 | A1 | 24 October 2002                   | KR                      | 20040045936  | A  | 05 June 2004                      |
|                                        |            |    |                                   | KR                      | 100447482    | B1 | 07 September 2004                 |
|                                        |            |    |                                   | FR                      | 2823852      | A1 | 25 October 2002                   |
|                                        |            |    |                                   | FR                      | 2823852      | B1 | 12 November 2004                  |
|                                        |            |    |                                   | US                      | 6677748      | B2 | 13 January 2004                   |
| US                                     | 2003128887 | A1 | 10 July 2003                      | DE                      | 10300057     | A1 | 14 August 2003                    |
|                                        |            |    |                                   | DE                      | 10300057     | B4 | 16 July 2009                      |
|                                        |            |    |                                   | US                      | 7203374      | B2 | 10 April 2007                     |
|                                        |            |    |                                   | JP                      | 2003209842   | A  | 25 July 2003                      |
|                                        |            |    |                                   | JP                      | 4336789      | B2 | 30 September 2009                 |
| US                                     | 2023003626 | A1 | 05 January 2023                   | DE                      | 112020006580 | T5 | 17 November 2022                  |
|                                        |            |    |                                   | WO                      | 2021149170   | A1 | 29 July 2021                      |
|                                        |            |    |                                   | JP                      | 6789452      | B1 | 25 November 2020                  |
|                                        |            |    |                                   | JPWO                    | 2021149170   | A1 | 29 July 2021                      |
| US                                     | 2023049804 | A1 | 16 February 2023                  | DE                      | 112020006650 | T5 | 24 November 2022                  |
|                                        |            |    |                                   | WO                      | 2021152811   | A1 | 05 August 2021                    |
|                                        |            |    |                                   | JPWO                    | 2021152811   | A1 | 05 August 2021                    |
|                                        |            |    |                                   | JP                      | 7158609      | B2 | 21 October 2022                   |

A. 主题的分类

G01N27/83(2006.01)i; G06F30/27(2020.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC: G01N27/-、G06F30/-

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNTEXT, ENTXT, ENTXTC, VEN, WPABS, CNKI: 清华大学,郭静波, 管 2d (裂缝 or 裂纹), 正交 4D 孪生, 励磁, 漏磁, 三轴, 多轴, 单向 4d 磁, 正交 4D 变换, pip+ 2D crack+, Twin+ 4D orthog+, magnet+ 4D leak+

C. 相关文件

| 类 型* | 引用文件, 必要时, 指明相关段落                                                    | 相关的权利要求 |
|------|----------------------------------------------------------------------|---------|
| A    | CN 114636754 A (清华大学) 2022年6月17日 (2022 - 06 - 17)<br>全文              | 1-10    |
| A    | CN 101261246 A (清华大学) 2008年9月10日 (2008 - 09 - 10)<br>全文              | 1-10    |
| A    | CN 105092696 A (北京工业大学) 2015年11月25日 (2015 - 11 - 25)<br>全文           | 1-10    |
| A    | CN 106648541 A (山西大学) 2017年5月10日 (2017 - 05 - 10)<br>全文              | 1-10    |
| A    | CN 109100416 A (东北大学) 2018年12月28日 (2018 - 12 - 28)<br>全文             | 1-10    |
| A    | CN 115308297 A (国家石油天然气管网集团有限公司 等) 2022年11月8日 (2022 - 11 - 08)<br>全文 | 1-10    |
| A    | CN 115586245 A (南京航空航天大学) 2023年1月10日 (2023 - 01 - 10)<br>全文          | 1-10    |

☒ 其余文件在C栏的续页中列出。

☒ 见同族专利附件。

\* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2023年11月20日

国际检索报告邮寄日期

2023年12月5日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局  
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

授权官员

苏秦

电话号码 (+86) 028-62968028

| C. 相关文件 |                                                                                |         |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 类 型*    | 引用文件，必要时，指明相关段落                                                                | 相关的权利要求 |
| A       | CN 115758084 A (清华大学 等) 2023年3月7日 (2023 - 03 - 07)<br>全文                       | 1-10    |
| A       | CN 115809583 A (国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院 等) 2023年3月17日 (2023 - 03 - 17)<br>全文        | 1-10    |
| A       | CN 115809595 A (沈阳建筑大学) 2023年3月17日 (2023 - 03 - 17)<br>全文                      | 1-10    |
| A       | US 2002153883 A1 (KOREA ATOMIC ENERGY RES.) 2002年10月24日 (2002 - 10 - 24)<br>全文 | 1-10    |
| A       | US 2003128887 A1 (NEC. CORP.) 2003年7月10日 (2003 - 07 - 10)<br>全文                | 1-10    |
| A       | US 2023003626 A1 (MITSUBISHI ELECTRIC CORP.) 2023年1月5日 (2023 - 01 - 05)<br>全文  | 1-10    |
| A       | US 2023049804 A1 (MITSUBISHI ELECTRIC CORP.) 2023年2月16日 (2023 - 02 - 16)<br>全文 | 1-10    |

国际检索报告  
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2023/116749

| 检索报告引用的专利文件 |            |    | 公布日<br>(年/月/日) | 同族专利 |              |    | 公布日<br>(年/月/日) |
|-------------|------------|----|----------------|------|--------------|----|----------------|
| CN          | 114636754  | A  | 2022年6月17日     | 无    |              |    |                |
| CN          | 101261246  | A  | 2008年9月10日     | 无    |              |    |                |
| CN          | 105092696  | A  | 2015年11月25日    | 无    |              |    |                |
| CN          | 106648541  | A  | 2017年5月10日     | 无    |              |    |                |
| CN          | 109100416  | A  | 2018年12月28日    | 无    |              |    |                |
| CN          | 115308297  | A  | 2022年11月8日     | 无    |              |    |                |
| CN          | 115586245  | A  | 2023年1月10日     | 无    |              |    |                |
| CN          | 115758084  | A  | 2023年3月7日      | 无    |              |    |                |
| CN          | 115809583  | A  | 2023年3月17日     | 无    |              |    |                |
| CN          | 115809595  | A  | 2023年3月17日     | 无    |              |    |                |
| US          | 2002153883 | A1 | 2002年10月24日    | KR   | 20040045936  | A  | 2004年6月5日      |
|             |            |    |                | KR   | 100447482    | B1 | 2004年9月7日      |
|             |            |    |                | FR   | 2823852      | A1 | 2002年10月25日    |
|             |            |    |                | FR   | 2823852      | B1 | 2004年11月12日    |
|             |            |    |                | US   | 6677748      | B2 | 2004年1月13日     |
| US          | 2003128887 | A1 | 2003年7月10日     | DE   | 10300057     | A1 | 2003年8月14日     |
|             |            |    |                | DE   | 10300057     | B4 | 2009年7月16日     |
|             |            |    |                | US   | 7203374      | B2 | 2007年4月10日     |
|             |            |    |                | JP   | 2003209842   | A  | 2003年7月25日     |
|             |            |    |                | JP   | 4336789      | B2 | 2009年9月30日     |
| US          | 2023003626 | A1 | 2023年1月5日      | DE   | 112020006580 | T5 | 2022年11月17日    |
|             |            |    |                | WO   | 2021149170   | A1 | 2021年7月29日     |
|             |            |    |                | JP   | 6789452      | B1 | 2020年11月25日    |
|             |            |    |                | JPWO | 2021149170   | A1 | 2021年7月29日     |
| US          | 2023049804 | A1 | 2023年2月16日     | DE   | 112020006650 | T5 | 2022年11月24日    |
|             |            |    |                | WO   | 2021152811   | A1 | 2021年8月5日      |
|             |            |    |                | JPWO | 2021152811   | A1 | 2021年8月5日      |
|             |            |    |                | JP   | 7158609      | B2 | 2022年10月21日    |