

(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
2022 年 7 月 28 日 (28.07.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/156192 A1

(51) 国际专利分类号:
B62D 57/024 (2006.01) **B25J 11/00** (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2021/111595

(22) 国际申请日: 2021 年 8 月 9 日 (09.08.2021)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202110071015.7 2021 年 1 月 19 日 (19.01.2021) CN
202110706142.X 2021 年 6 月 24 日 (24.06.2021) CN

(71) 申请人: 山东大学 (SHANDONG UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国山东省济南市历下区经十路
17923 号, Shandong 250061 (CN)。

(72) 发明人: 王正方 (WANG, Zhengfang); 中国山东省
济南市历下区经十路 17923 号, Shandong 250061
(CN)。 王静 (WANG, Jing); 中国山东省济南市

历下区经十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。
康文强 (KANG, Wenqiang); 中国山东省济南市历
下区经十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。 刘
涵池 (LIU, Hanchi); 中国山东省济南市历下区
经十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。 万玉
壮 (WAN, Yuzhuang); 中国山东省济南市历下区
经十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。 隋青
美 (SUI, Qingmei); 中国山东省济南市历下区经
十路 17923 号, Shandong 250061 (CN)。

(74) 代理人: 济南圣达知识产权代理有限公司
(JINAN SHENGDA INTELLECTUAL PROPERTY
AGENCY CO., LTD.); 中国山东省济南市历
下区经十路 17703 号华特广场 B510 室,
Shandong 250061 (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,

(54) Title: WALL-CLIMBING ROBOT SYSTEM FOR RAPID NON-DESTRUCTIVE TESTING OF HIDDEN DEFECTS OF CUL-
VERT AND SLUICE AND METHOD

(54) 发明名称: 用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统和方法

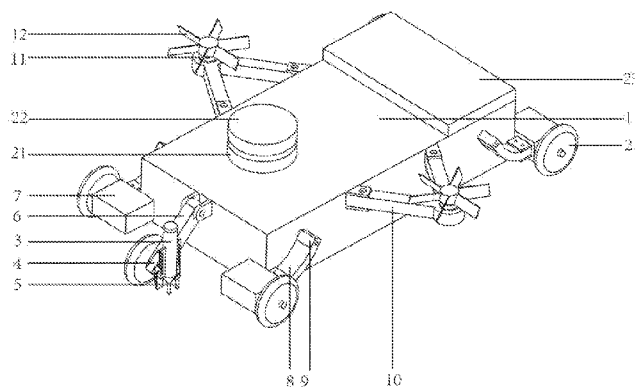


图 1

(57) Abstract: A wall-climbing robot system for rapid non-destructive testing of hidden defects of culvert and sluice and a method. The robot system comprises a robot body (1); a navigation positioning system and a moving system, which are mounted on the robot body (1); an automatic knocking detection system, which is mounted at the front end of the body (1); a mobile ultrasonic rapid detection system, and a corrosion detection system; a dual-power system, consisting of a non-contact negative pressure adsorption device and rotor wing propulsion devices, the non-contact negative pressure adsorption device being mounted at the bottom of the body (1), and the rotor wing propulsion devices being mounted on two sides of the body (1); and a total controller, which is in communication with the navigation positioning system, the moving system, the automatic knocking detection system, the mobile ultrasonic rapid detection system, the corrosion detection system, and the dual-power system, respectively. The system can identify internal defect positions and categories by means of ultrasonic data, and perform concrete dielectric constant inversion and disease identification on any length of continuous measurement line geological radar data.



CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, 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, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, 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, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

一 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统及方法。该机器人系统包括机器人车体(1); 导航定位系统和移动系统, 均安装于机器人车体(1)上; 自动敲击检测系统, 其安装于车体(1)前端; 移动式超声快速检测系统和锈蚀检测系统; 双动力系统, 由非接触式负压吸附装置和旋翼助推装置组成, 非接触式负压吸附装置安装于车体(1)底部, 旋翼助推装置安装于车体(1)两侧; 总控制器, 其与导航定位系统、移动系统、自动敲击检测系统、移动式超声快速检测系统、锈蚀检测系统和双动力系统分别相互通信。该系统能够通过超声数据识别内部缺陷位置与类别, 并对任意长度连续测线地质雷达数据进行混凝土介电常数反演和病害识别。

用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统及方法

技术领域

本发明属于无损检测领域，尤其涉及一种用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统及方法。

背景技术

本部分的陈述仅仅是提供了与本公开相关的背景技术信息，不必然构成在先技术。

水闸是修建在河道、堤防上的一种低水头挡水、泄水工程。汛期与河道堤防和排水蓄水工程配合，发挥控制水流的作用。在涵闸建设时，会出现混凝土的施工缺陷，例如空洞，裂缝等外观质量缺陷，在涵闸使用过程中往往会出现混凝土的碳化、钢筋锈蚀、裂缝、氯离子侵蚀等病害，随着时间的推移，包括涵闸在内的多数水工建筑物在使用过程中老化、病害情况日益突出，涵闸安全隐患严重，病险涵闸数量庞大，为预防灾难的发生，亟需对涵闸内隐蔽缺陷进行全方位检测。

已有的对涵闸安全的检测方式有回弹法、超声-回弹综合法及钻芯法等，且均需要人工完成，但其存在弊端：一方面人工检测既费时又费力并且存在一定的危险，另一方面会对涵闸造成损伤。除此之外可通过安装传感器对涵闸进行检测，但只能对涵闸的局部进行检测，并不能实现全方位的检测，目前已有的探地雷达，超声检测仪等设备已应用于混凝土内部结构的探测，并且可到达很好的效果。采用机器人搭载仪器设备进行检测的方式处于不断发展之中，例如：河海大学在其申请的专利文献“一种基于巨磁电阻元件的闸门检测机器人及检测方法”（专利申请号：201811173150.7，申请日：2018.10.09，申请公布号 CN109324112A）提出了将磁探伤传感器安装于检测机器人之上，用于检测闸门表面的缺陷，但其并不能检测闸门内部空洞、钢筋锈蚀等病害，且巡检速度较慢；河海大学在其申请的专利文献“一种基于相控阵超声波探伤仪的闸门检测装置及检测方法”（专利申请号：201811172523，申请日：2018.10.09，申请公布号 CN109324121A）中设计的检测机器人搭载有超声波相控阵矩阵探头，并可进行扫射式检测，但其不能够完成快速普测，检测效率低；山东大学在其申请的专利文献“用于桥隧结构病害无损检测诊断的自动爬墙式雷达光电机器人系统”（专利申请号：201810565136，申请日：2018.06.04，申请公布号 CN108731736A）中利用旋翼系统的反推力使机器人紧贴于桥隧结构表面进行内部病害的检测，该技术由于反推力有限，难以搭载多种设备。

基于地质雷达识别涵闸内隐蔽缺陷是系统的关键环节。伴随着新一代信息技术的快速发

展，国内外将信号处理、图像处理、人工智能等技术用于基于地质雷达剖面图的自动解释。研究主要围绕基于地质雷达图像的目标识别展开，识别方法包括霍夫变换、小波变换、支持向量机、聚类、卷积神经网络等方法，可以定位目标体的类别和大致位置，但不能估计目标体的准确形态。并且，采用上述方法进行识别均存在以下问题：（1）地质雷达通常采用“边走边测”工作模式形成一条长测线地质雷达数据，而在地质雷达数据中，地下结构内部的目标体的反射呈现近似双曲线特性，同一目标体反射的双曲线波形不仅仅与目标体所对应空间位置的地质雷达数据有关，而且和其周围的地质雷达数据相关。当对数据进行裁剪后分成短测线 B-Scan 后，某一目标体特别是位于裁剪边界位置的目标体，其反射波形极可能被截断，导致在局部短测线 B-Scan 中目标体反射波形不完整或存在干扰。在此情况下对短测线 B-Scan 结果进行处理进而拼接，会导致连续测线的目标体识别结果的不连续，难以处理任意长度连续测线的地质雷达数据。（2）现有方法将介电常数的反演与病害识别过程割裂，不能同时实现介电常数反演与病害类型识别。而实际上，基于同一组地质雷达数据既可以实现混凝土介电常数的反演，也可以完成对病害的准确识别，并且二者存在一定相关性。但现有方法没有充分考虑两个任务之间的关联关系，仅实现反演或者识别单一任务，无法充分挖掘其相互促进关系，同时实现反演与识别两个任务。例如：山东大学在其申请的专利文献“一种基于深度学习的探地雷达智能反演方法”（专利申请号：202010723091.7，申请日：2020.01.08，申请公布号 CN111781576A）中提出的一种基于深度学习的探地雷达智能反演方法，可以利用地质雷达数据端到端地重建地下介电常数分布。但是该方法适用于处理固定长度的短测线地质雷达数据，在连续长测线雷达数据反演过程中容易造成连续测线的目标体反演的数值不连续和形状错位。而且该方法也用于实现了基于探地雷达数据反演介电常数这一单一功能，没有在实现介电常数反演的同时对目标体的类型进行识别。

发明人发现，目前主要采用的涵闸隐蔽缺陷检测技术主要存在以下问题：（1）目前对涵闸隐蔽缺陷的检测以人工检测为主，不能实现自动检测，存在检测效率低并且难以对涵闸进行大面积细致性检测，难以准确地判断涵闸是否安全，既耗时又费力。（2）目前用于混凝土超声探测的超声探头只能实现固定位置检测，难以实现移动式检测，检测效率低。（3）目前对涵闸内部钢筋锈蚀的检测，主要采用半电池电位法，对环境要求高，检测效率低，只能完成抽样检测，难以完成对涵闸内钢筋锈蚀的全方位自动检测。（4）采用上述方法进行反演与识别会导致连续测线的目标体成像结果的不连续或反演的数值不连续，难以处理任意长度连续测线的地质雷达数据，而且现有方法将介电常数的反演与病害识别过程割裂，不能同时实现介电常数反演与病害类型识别。

发明内容

为了解决上述背景技术中存在的技术问题，本发明提供一种用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统及方法，其利用机器人搭载雷达和超声探头，能够对涵闸隐蔽缺陷进行全方位的检测。

本发明的第一个方面提供一种用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统。

一种用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统，包括：

机器人车体；

导航定位系统和移动系统，均安装于机器人车体上；

自动敲击检测系统，其安装于车体前端；

移动式超声快速检测系统和锈蚀检测系统，均安装于车体底部；

双动力系统，由非接触式负压吸附装置和旋翼助推装置组成，非接触式负压吸附装置安装于车体底部，旋翼助推装置安装于车体两侧；

总控制器，其与导航定位系统、移动系统、自动敲击检测系统、移动式超声快速检测系统、锈蚀检测系统和双动力系统分别相互通信。

本发明的第二个方面提供一种用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统的工作方法。

一种用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统的工作方法，包括：

启动双动力系统，使机器人吸附于被侧面，双动力系统在检测过程中实时监测机器人的贴合力；

导航定位系统完成路径规划，进入快速普查模式，启动自动敲击检测系统和锈蚀检测系统，移动系统以高速度移动，利用自动敲击检测系统、锈蚀检测系统、多目全景相机和导航定位系统，实现对缺陷区域的快速普查以及缺陷的粗略识别和定位；

根据快速普查模式所获得的缺陷定位信息，重新进行路径规划，进入精细检测模式，爬壁机器人移动系统以高速移动至缺陷位置，到达缺陷位置后，根据缺陷的类型选择性开启移动式超声快速检测系统和锈蚀检测系统，同时移动系统改为低速移动，移动式超声快速检测系统运行时，总控制器根据压力传感器信息控制旋转伸缩装置，用于保持各滚珠式超声探头的贴合力相同且稳定，每完成一处缺陷检测爬壁机器人均以高速移动至另一缺陷位置，检测过程中低速移动，待所有缺陷检测完毕，爬壁机器人返回原点，完成对缺陷区域的精细检测；

基于超声获取的数据采用基于深度学习的识别方法进行处理，采用基于可变形卷积旋转区域检测深度神经网络识别内部缺陷位置与类别，采用融合时序信息的“反演-识别”多任务深度神经网络从多组超声探测数据中对内部病害连续成像。

进一步地，所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统的工作方法，还包括同时反演混凝土介电常数及识别病害，其具体过程为：

对不同应用场景的地质雷达设备提取实际发射子波信号，将其作为仿真建模源子波信号进行正演，生成相应的地质雷达剖面图，其共同建立的介电常数分布图和目标类别标签形成数据对，构成仿真训练数据集；

构建地质雷达智能反演与识别模型，基于仿真训练数据集，训练所述地质雷达智能反演与识别模型；

建立真实训练数据集，基于真实训练数据集和迁移学习方法微调所述地质雷达智能反演与识别模型；

利用微调后的地质雷达智能反演与识别模型对真实雷达检测数据进行介电常数反演和病害识别。

与现有技术相比，本发明的有益效果为：

(1) 本发明的移动式超声快速检测系统通过采用滚珠式超声探头，实现移动式超声检测，通过安装架中的弹性装置，实现了滚珠式超声探头与被测面贴合，通过压力传感器监测实时贴合力，通过控制旋转伸缩装置，保持了各超声探头贴合力稳定，实现了测量数据的一致性；而且在滚珠式超声探头中，通过将万向移动滚珠与超声探头相结合，实现了移动式超声探测，通过软质耦合块将万向移动滚珠与超声探头耦合，实现了超声波的传递，通过弹性装置增加耦合力，减少了超声波能量的损失。

(2) 本发明的前置自动敲击检测系统，通过采用电磁敲击装置，实现自动敲击检测，通过自动敲击控制器控制两电磁铁配合，实现了不同频率不同力度的敲击，通过声音接收器接收声音信号，通过与移动轮配合，实现了移动式自动敲击。

(3) 本发明的双动力系统，通过非接触式负压吸附装置，提供机器人主要贴合力，通过旋翼助推系统，提供辅助动力，通过总控制器根据压力传感器和力矩传感器反馈的贴合力信息进行控制，当非接触负压吸附装置所提供的气压达到上限，但仍不满足贴合力需求时，开启旋翼助推装置，实现动力补充。

(4) 本发明的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统的工作方法，通过将检测过程分为快速普测和精细检测，实现了对涵闸的全方位检测，通过快速普测确定隐蔽缺陷的具体位置，根据粗略检测所获得的缺陷位置，实现了对隐蔽缺陷的精细检测，既能实现对涵闸全方位检测，又能保证检测的效率和质量。

(5) 本发明创新性提供了一种用于任意长度连续测线地质雷达数据的混凝土介电常数反演和病害识别方法，利用深度神经网络模型对任意长度连续测线的地质雷达检测数据实现

自动化反演和识别。该方法采用卷积神经网络与递归神经网络相结合进行上下文特征提取与交互,充分利用连续测线不同位置局部短测线 B-Scan 数据之间关联关系提升拼接处病害特征的一致性,解决了拼接位置病害形态与介电常数数值的不连续问题,适用于任意长度连续测线地质雷达数据处理。

(6) 本发明充分挖掘地质雷达反演与识别任务的相互依赖关系,利用一个网络结构同时实现了同时实现了介电特性反演与病害类型、位置及形状的准确识别,实现了地质雷达反演任务和识别任务的特征共享,提升了模型泛化能力。

(7) 本发明通过模拟仿真方式获取“地质雷达剖面图-介电常数分布图&目标类别标签”数据对,通过采用多种背景介质和病害填充介质进行组合,能够得到充分的介电常数分布图和目标类别标签训练数据;采用与实际地质雷达子波频率和相位一致的雷克子波作为仿真数据正演的源子波,并对仿真数据进行预处理,使得仿真地质雷达检测数据更贴近真实地质雷达检测数据,为后续模型在真实地质雷达检测数据上的泛化能力提供了保障。

(8) 本发明还获取了任意长度连续测线的真实地质雷达检测数据,利用数据增强技术构建了真实地质雷达数据训练数据集。并采用了迁移学习方法,利用真实训练数据集微调基于仿真数据训练的智能反演与识别训练网络模型,使得智能反演与识别网络模型学习到真实地质雷达检测数据分布,能够更准确的识别真实混凝土结构病害。

(9) 本发明提出的方法能够用于混凝土无损检测、道路病害检测、工程地质勘察等领域,实现基于任意长度连续测线探测的结构内部介电特性的精细反演与病害类型、位置及形状的准确识别。

本发明附加方面的优点将在下面的描述中部分给出,部分将从下面的描述中变得明显,或通过本发明的实践了解到。

附图说明

构成本发明的一部分的说明书附图用来提供对本发明的进一步理解,本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明,并不构成对本发明的不当限定。

图 1 为本发明实施例的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统的整体框图;

图 2 为本发明实施例的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统剖面图;

图 3 为本发明实施例的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统仰视图;

图 4 为本发明实施例的自动敲击装置结构示意图;

图 5 为本发明实施例的移动式超声探头结构示意图;

图 6 为根据实施例一所示的用于任意长度连续测线地质雷达数据的混凝土介电常数反演与病害识别方法的流程图;

图 7 为根据实施例一所示的任意长度连续测线地质雷达智能反演与识别网络结构示意图；

图 8 为根据实施例一所示的基于 DenseUnet 的局部短测线空间特征提取结构示意图；

图 9 为根据实施例所示的长测线时空特征交互结构示意图

图 10 为根据实施例所示的仿真地质雷达检测数据；

图 11 为根据实施例所示的仿真介电常数分布图；

图 12 为根据实施例所示的仿真目标类别标签；

图 13 为根据实施例所示的任意长度连续测线地质雷达智能反演与识别预测的介电常数分布图；

图 14 为根据实施例所示的任意长度连续测线地质雷达智能反演与识别网络预测的目标类别标签。

其中，1. 车体，2. 移动轮，3. 电磁敲击装置，301. 敲击锤，302. 自动敲击装置外壳，303. 安装板，304. 第一电磁铁，305. 第二电磁铁，306. 第一弹性装置，307. 第二弹性装置，4. 测距编码器，5. 声音接收器，6. 中间移动轮连接杆，7. 驱动电机，8. 刚柔弧形杆，9. 力矩传感器，10. 旋翼助推装置，11. 旋翼电机，12. 旋翼，13. 地质雷达，14. 滚珠式超声探头，1401. 万向滚珠，1402. 软质耦合块，1403. 超声探头，1404. 弹性装置，1405. 柱状外壳，1406. 盖子，1407. 滚珠，15. 移动式超声探头安装框架，16. 压力传感器，17. 第三弹性装置，18. 负压吸附电机，19. 负压吸附装置，20. 气压传感器，21. 多目全景相机，22. 激光雷达，23. 旋转伸缩装置。

具体实施方式

下面结合附图与实施例对本发明作进一步说明。

应该指出，以下详细说明都是例示性的，旨在对本发明提供进一步的说明。除非另有指明，本文使用的所有技术和科学术语具有与本发明所属技术领域的普通技术人员通常理解相同含义。

需要注意的是，这里所使用的术语仅是为了描述具体实施方式，而非意图限制根据本发明的示例性实施方式。如在这里所使用的，除非上下文另外明确指出，否则单数形式也意图包括复数形式，此外，还应当理解的是，当在本说明书中使用术语“包含”和/或“包括”时，其指明存在特征、步骤、操作、器件、组件和/或它们的组合。

如图 1-图 3 所示，本实施例的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统，包括机器人车体；导航定位系统和移动系统，均安装于机器人车体上；自动敲击检测系统，其安装于车体前端；移动式超声快速检测系统和锈蚀检测系统，均安装于车体底部；双动力系统，

由非接触式负压吸附装置和旋翼助推装置组成，非接触式负压吸附装置安装于车体底部，旋翼助推装置安装于车体两侧；总控制器，其与导航定位系统、移动系统、自动敲击检测系统、移动式超声快速检测系统、锈蚀检测系统和双动力系统分别相互通信。

如图 5 所示，移动式超声快速检测系统采用滚珠式超声探头阵列，实现超声触点的浮动耦合与移动式检测，探头柱状外壳 1405 内部一端的球形腔室中装有万向滚珠 1401，万向滚珠采用金属、陶瓷等透声性能好的材料，球形腔室内壁装有滚珠 1407，可提高万向滚珠滚动流畅性，采用软质耦合块 1402 连接万向滚珠与超声探头，所述软质耦合块一端与超声探头 1403 声发射端（或接收端）粘合，另一端具有球面凹槽，用于与万向滚珠贴合，在柱状外壳内部加入超声耦合液，用于填充软质耦合块与万向滚珠之间的空隙，超声探头另一端与弹性装置 1404 连接，用于辅助耦合。探头柱状外壳上部还设置有盖子 1406。

此处需要说明的是，软质耦合块可采用聚胶脂软性塑料、氯丁橡胶、浇注型聚氨酯橡胶等声衰减系数小的材料，本领域技术人员可根据实际情况具体选择。

具体地，若干滚珠式超声探头 14 安装于机器人内部后侧的移动式超声探头安装框架 15，组成超声阵列，滚珠式超声探头上部连接压力传感器 16，用于监测实时贴合力，压力传感器另一端连接第三弹性装置 17，用于提供贴合力，弹性装置另一端装有旋转伸缩装置 23，用于调节贴合力，总控制器根据压力传感器信息调节旋转伸缩装置 23，实现各滚珠式超声探头 14 贴合力相同且稳定，通过超声检测控制器控制每个超声探头的超声信号的发射与接收，接收的信息输入总控制器进行处理。

如图 4 所示，自动敲击检测系统采用电磁敲击装置 3，所述装置包括用于敲击的敲击锤 301，敲击锤另一端与第一电磁铁 304 相连安装于敲击装置外壳内部，第二电磁铁 305 固定于敲击装置外壳 302 上部，所述两电磁铁受自动敲击控制器控制与内部的第一弹性装置 306 和第二弹性装置 307 配合，实现自动敲击，电磁敲击装置和测距编码器 4 安装于机器人前部中间移动轮，测距编码器 4 用于定位，声音接收器 5 安装于自动敲击装置后侧贴近地面的位置，所述自动敲击检测系统完成缺陷区域快速检测。敲击装置外壳 302 设置有安装板 303。

在具体实施中，锈蚀检测系统采用一种基于地质雷达的两步交错检测模式观测混凝土中钢筋的锈蚀状态，地质雷达 13 安装于机器人车体底部后侧，第一步为粗测，通过在任意方向行走，获取雷达测线剖面图(B-Scan)，采用基于深度神经网络的钢筋快速定位算法，确定钢筋排布方向；第二部进行锈蚀诊断，沿钢筋布设方向进行扫描，以不同位置的时域信号(A-Scan)振幅等特征参量变化，判别当前位置的锈蚀程度与锈蚀位置。

在本实施例中，双动力系统包含非接触式负压吸附装置 19 和旋翼助推装置 10，所述非接触式负压吸附装置安装于机器人车体内部中间部位且配有气压传感器 20，所述旋翼助推装

置安装于机器人车体两侧，力矩传感器 9 安装于移动系统的刚柔弧形杆 8 连接车体的一端，用于监测实时贴合力，负压吸附装置与旋翼助推装置均与总控制器连接，总控制器根据力矩传感器 9 和气压传感器 20 信息控制是否启动旋翼助推装置，当非接触负压吸附装置所提供的气压达到上限，但仍不满足贴合力需求时，开启旋翼助推装置，实现动力补充。旋翼助推装置 10 包括旋翼电机 11 和旋翼 12，旋翼电机 11 用于带动旋翼 12 旋转。非接触负压吸附装置由负压吸附电机 18 提供动力。

具体地，移动系统包括刚柔弧形杆、车轮、驱动电机和力矩传感器。采用刚柔弧形杆 8 连接机器人车体 1 与车轮，用于减震和传递贴合力，驱动电机 7 与移动轮 2 连接，实现机器人的移动和转向，连接车体的一端安装有力矩传感器 9，用于监测机器人的实时贴合力。中间移动轮连接杆 6 连接在机器人前部两个移动轮 2 之间。

在本实施例中，所述导航定位系统包括多目全景相机 21 和激光雷达 22，采用多目全景相机检测涵闸表面病害，采用激光雷达实现涵闸检测区域自动构图。

本实施例的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统的工作原理为采用“快速普查→精细检测”的检测模式，其具体步骤包括：

步骤（1）：启动机器人双动力系统，使机器人吸附于被侧面，双动力系统在检测过程中实时监测机器人的贴合力，当非接触式负压吸附装置 19 所提供的贴合力满足需求时，不需开启旋翼助推装置 10，反之，需开启旋翼助推装置，实现贴合力补充；

步骤（2）：导航定位系统完成路径规划，进入快速普查模式，启动自动敲击检测系统和锈蚀检测系统，移动系统以高速度移动，电磁敲击装置 3 以固定频率敲击被侧面，由声音接收器 5 接收声音信号，同时雷达发射和接收电磁波，微型多目全景相机 21 拍摄检测区域表面，实现对缺陷区域的快速普查，接收的信息由总控制器进行信息处理，完成缺陷的粗略识别和定位；

步骤（3）：根据快速普查模式所获得的缺陷定位信息，重新进行路径规划，进入精细检测模式，爬壁机器人移动系统以高速移动至缺陷位置，到达缺陷位置后，根据缺陷的类型选择性开启移动式超声快速检测系统和锈蚀检测系统，同时移动系统改为低速移动，移动式超声快速检测系统运行时，总控制器根据压力传感器 16 信息控制旋转伸缩装置 23，用于保持各滚珠式超声探头的贴合力相同且稳定，每完成一处缺陷检测爬壁机器人均以高速移动至另一缺陷位置，检测过程中低速移动，待所有缺陷检测完毕，爬壁机器人返回原点，完成对缺陷区域的精细检测；

基于超声获取的数据采用基于深度学习的识别方法进行处理，采用基于可变形卷积旋转区域检测深度神经网络识别内部缺陷位置与类别，采用融合时序信息的“反演-识别”多任务

深度神经网络从多组超声探测数据中对内部病害连续成像。

不同混凝土结构缺陷形态复杂多样，然而由于衍射、反射、散射等影响，超声图像中的缺陷响应与混凝土缺陷实际形状往往不能一一对应。为了从超声图像中准确识别混凝土缺陷的响应和同相轴形态，本实施例构建了基于可变形卷积的混凝土缺陷响应与位置智能识别方法，引入了可根据缺陷形态任意变化形状的可变形卷积代替传统的规则形状卷积，自适应的提取不同缺陷的同相轴的形态，从而发现并定位任意方向分布的缺陷。

针对移动测量的特点，设计融合时序信息的“反演-识别”多任务深度神经网络，解决了长测线下的内部混凝土缺陷的连续成像问题。与常规的仅基于卷积的编码-解码网络不同，本方法设计了时空特征提取模块以融合不同时刻测量数据的时空信息。首先将多个时刻的测试数据并联输入编码解码网络，其次，重点将解码后的特征并联输入基于 ConvLSTM 的时空特征提取模块，挖掘前后时刻超声数据的相关性，记忆并融合上一时刻测量结果中涵盖波速、界面的高维特征信息，准确重建连续的缺陷界面与形态。在此基础上，设计多任务分支输出，同时输出缺陷的类型和波速分布，实现了缺陷识别与波速反演一体化。

在另一实施例中，用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统的工作方法，还包括同时反演混凝土介电常数及识别病害，如图 6 所示，其具体过程为：

步骤 S1：建立仿真训练数据集。

针对隧道衬砌病害结构检测问题，建立相应仿真数据集。所述步骤 S1 具体包括：

步骤 S101：构建多种长度的隧道衬砌结构介电常数分布图和目标类别标签。

具体地，对背景介质、病害内部介质、病害数量及病害位置等随机组合，根据每一种组合方式均生成一幅衬砌结构剖面的介电常数分布图。对于每一幅剖面介电常数分布图，根据其包含的各目标体类别，生成与剖面介电常数分布图对应的一副目标类别标签。

其中，隧道衬砌结构模型包含长度为 5m、10m、15m 等长度的衬砌模型，以模拟出符合实际的多种连续测线长度。

所述背景介质包括素混凝土、钢筋混凝土等多种背景介质，所述病害包括空洞、不密实、裂缝、脱空、断层、溶洞等，病害内部介质为水、空气、泥、岩石等介质。

所述目标体类别依据介电常数模型中的目标进一步分为：钢筋、背景、无水空洞、无水不密实、无水裂缝、无水脱空、无水断层、无水溶洞、含水空洞、含水不密实、含水裂缝、含水脱空、含水断层、含水溶洞等，以更好地识别隧道衬砌内目标体类别。

步骤 S102：采用与实际地质雷达子波频率和相位一致的雷克子波作为仿真数据建模的源子波，来对每一介电常数分布图进行正演，生成相应的地质雷达剖面图，并采用直达波去除、增益调整、噪声添加等方法对其进行预处理，来提高真实数据的适应性。

其中，所述正演采用 FDTD 方法。

所述直达波去除是用获得的仿真地质雷达数据减去其没有病害波形所在道的数据；所述增益调整是通过对比生成仿真地质雷达数据所用的雷克子波和地质雷达设备对着空气采集的空采直达波的幅值水平，对仿真数据的增益进行调整，使其处于同一维度；所述噪声添加是通过在不同现场的背景介质的地质雷达数据进行采集，并从 0-1 之间随机选择不同的比例将其添加到仿真地质雷达数据中。

步骤 S103：通过获得的相应处理后的地质雷达剖面图（如图 10），相应的介电常数分布图（如图 11）和目标类别标签（如图 12），得到多组“地质雷达剖面图-介电常数分布图&目标类别标签”数据对，将每组数据对中的介电常数分布图和目标类别标签数据作为地质雷达剖面图的标签，建立仿真训练数据集。

步骤 S2：构建并训练任意长度连续测线地质雷达智能反演与识别网络模型

所述步骤 S2 具体包括：

步骤 S201：构建任意长度连续测线地质雷达智能反演与识别网络结构

所述任意长度连续测线地质雷达智能反演与识别网络结构采用“局部短测线空间特征提取结构→长测线时空特征交互结构→介电常数反演与目标识别双任务结构”相级联的实现方式。如图 7 所示，所述任意长度连续测线地质雷达智能反演与识别网络结构以任意长度连续测线地质雷达检测数据 D^n ($n \in [1, N]$) (N 是数据集中全部连续测线地质雷达检测数据的数量) 为输入，首先采用步长为 S_1 的滑动窗口将 D^n 顺序切割为局部短测线 B-Scan 剖面序列 $\{D_k^n | k=1, \dots, K\}$ (K 为 D^n 被切割后的固定大小的局部短测线 B-Scan 剖面个数)。然后，局部短测线空间特征提取结构并行地对每个局部短测线 B-Scan 剖面 D_k^n 进行空间上下文特征提取，得到特征序列 $\{F_k^n | k=1, \dots, K\}$ 。接着，长测线时空特征交互结构以 $\{F_k^n | k=1, \dots, K\}$ 为输入，通过特征序列内的双向时空信息融合，提取包含具有相对稳定的目标特征（包括形状、类别和介电常数）的增强特征序列 $\{E_k^n | k=1, \dots, K\}$ 。然后，介电常数反演与目标识别双任务结构并行处理每一个局部短测线 B-Scan 剖面 D_k^n 的增强特征 E_k^n ，重建对应的介电常数分布图 P_k^n 和识别目标类别标签 I_k^n 。最后，通过步长为 S_2 的滑动窗口将 $\{P_k^n | k=1, \dots, K\}$ 和 $\{I_k^n | k=1, \dots, K\}$ 顺序拼接在一起，重叠位置取平均值，以获得整条连续测线的介电常数图 P^n 和目标类别标签 I^n 。

具体包括三个结构：

(1) 局部短测线空间特征提取结构，采用多个并行的全卷积网络结构实现。每个全卷积网络结构单独处理从任意长度连续测线中不同位置提取的各个局部短测线 B-Scan 剖面 D_k^n ，对其进行空间上下文特征提取，形成任意长度连续测线地质雷达检测数据的特征序列 $\{F_k^n | k=1, \dots, K\}$ 。

作为一种实现方式，所述全卷积网络结构利用 DenseUnet 网络实现。如图 8 所示，所述 DenseUnet 结构由一个一个编码路径和一个解码路径组成，编码路径中包含 4 个卷积层、4 个最大池化层和 4 个密集块结构，解码路径包含 4 个卷积层、4 个转置卷积层和 4 个密集块结构，编解码路径之间采用一个卷积层连接。所述编码路径通过逐步下采样将地质雷达检测数据压缩为高级抽象特征，解码路径通过逐步上采样操作获得隧道衬砌内部空间结构的初步表征。所述卷积层结构卷积核大小为 3×3 ，步长为 1，通道数为 64，以提取地质雷达探测数据中的空间特征。编码路径每个密集块后连接最大池化层，最大池化层内核大小为 2×2 ，步长为 2，下采样后的输出被送入下一个编码路径密集块。解码路径的每个转置卷积层连接密集块前，转置卷积过滤器大小为 4×4 大小，步长为 2，通道数为 64，。上采样后的输出与来自相应编码路径密集块进行通道维度的拼接，然后送入下一个解码路径密集块。所述密集块结构包含 3 个串联的卷积层结构，卷积层卷积核大小为 3×3 ，步长为 1，通道数为 64，每个卷积层将之前所有卷积层的输出信息添加到自身输出，用于促进梯度的流动，更好的学习地质雷达数据的表征。同时，编码路径和解码路径中相应的密集块结构间采用跳层连接，可以将编码过程中的空间信息传递到隧道衬砌内部结构的解码过程。

所述局部短测线空间特征提取结构对任意长度连续测线中提取的不同位置的各个局部短测线 B-Scan 剖面数据进行空间上下文特征提取，形成地质雷达剖面数据至混凝土内部结构空间信息的初步映射。

(2) 长测线时空特征交互结构，采用一层的 Bi-ConvLSTM 结构实现。所述 Bi-ConvLSTM 实现局部短测线 B-Scan 剖面特征序列 $\{F_k^n | k=1, \dots, K\}$ 中的双向时空信息融合，通过前向（地质雷达探测方向的正向）和后向（地质雷达探测方向的反向）局部短测线 B-Scan 特征的自适应信息融合，生成包含局部短测线 B-Scan 剖面之间的空间上下文信息的增强特征序列 $\{E_k^n | k=1, \dots, K\}$ ，以用于反演或识别具有连续形状、类别和介电常数值隧道衬砌内部目标。

作为一种实现方式，如图 9 所示，所述长测线时空特征交互结构包括一层 Bi-ConvLSTM 结构。所述 Bi-ConvLSTM 包含一个前向 ConvLSTM 层，一个反向 ConvLSTM 层以及一个卷积层。

所述 Bi-ConvLSTM 以局部短测线空间特征提取结构所提取的地质雷达数据特征序列 $\{F_k^n | k=1, \dots, K\}$ 为输入, 前向 ConvLSTM 层在每个局部短测线 B-Scan 剖面之间沿着地质雷达探测方向向前传递隐藏状态 $\overrightarrow{H_k^n}$ 和记忆细胞 $\overrightarrow{C_k^n}$, 后向 ConvLSTM 层在每个局部短测线 B-Scan 剖面之间沿着地质雷达探测方向的反向向后传递隐藏状态 $\overleftarrow{H_k^n}$ 和记忆细胞 $\overleftarrow{C_k^n}$ 。对于每一个输入的局部短测线剖面特征 F_k^n , Bi-ConvLSTM 单元将对应的前向隐藏状态 $\overrightarrow{H_k^n}$ 和后向隐藏状态 $\overleftarrow{H_k^n}$ 在通道维度上连接, 然后通过一个卷积层得到最终的包含局部短测线 B-Scan 剖面空间上下文信息的增强特征。所述 ConvLSTM 内卷积结构及卷积层卷积结构均采用 3×3 大小卷积核, 步长为 1, 通道数为 64。

所述长测线时空特征交互结构融合任意长度连续测线中提取的不同位置的局部短测线 B-Scan 数据特征之间的双向时空信息, 保证连续测线隧道衬砌结构介电常数反演结果和目标体识别结果的连续性与准确性。

(2) 介电常数反演与目标识别双任务结构, 采用多个并行的两分支卷积网络结构实现, 每个并行的两分支卷积网络结构单独处理每个局部短测线 B-Scan 剖面 D_k^n 经长测线时空特征交互结构提取的增强特征 E_k^n , 同时重建隧道衬砌结构介电常数分布和识别病害类型、位置及轮廓。

作为一种实现方式, 所述两分支卷积网络结构宝包括反演任务分支和识别任务分支, 每个分支包括 1 个卷积层和 1 个激活函数。其中, 反演任务分支首先采用 1 层卷积层以降低输入特征维度, 卷积核大小为 1×1 , 步长为 1, 通道数为 1。识别任务分支首先采用 1 层卷积层以降低输入特征维度, 卷积核大小为 1×1 , 步长为 1, 通道数为 9。最后, 在反演分支的尾部连接一个 sigmoid 激活函数以回归介电常数分布图, 识别分支连接一个 softmax 函数以分类目标类别。

所述介电常数反演与目标识别双任务结构同时重建混凝土结构介电常数分布和识别病害类型、位置及轮廓, 实现地质雷达反演任务和识别任务的特征共享, 增强模型泛化能力。

步骤 S202: 基于仿真训练数据集, 训练任意长度连续测线地质雷达智能反演与识别网络模型

基于仿真训练数据集, 采用均方误差 (MAE)、结构相似性指数 (SSIM) 与 Lovasz_Softmax 相结合的损失函数, 利用 ADAM 优化算法对任意长度连续测线地质雷达智能反演与识别网络模型进行优化, 训练得到任意长度连续测线地质雷达智能反演与识别网络模型。

步骤 S3: 建立真实训练数据集, 并采用迁移学习方法得到适用于地质雷达实际探测数据的任意长度连续测线地质雷达智能反演与识别网络模型。

所述步骤 S3 具体包括:

步骤 S301: 建立真实训练数据集

对地质雷达实际探测的连续测线地质雷达剖面数据、依据实际现场建立的介电常数模型以及目标类型标签进行对应的水平方向的随机裁剪和双线性插值以进行数据增强, 建立真实训练数据集。

步骤 S302: 基于真实训练数据集, 采用迁移学习方法得到适用于地质雷达实际探测数据的任意长度连续测线地质雷达智能反演与识别网络模型。

利用真实训练数据集微调基于仿真数据训练的智能反演与识别训练网络模型, 使得任意长度连续测线智能反演与识别网络模型学习到真实地质雷达检测数据分布, 能够更准确的识别真实衬砌结构的病害。

步骤 S4: 利用任意长度连续测线地质雷达智能反演与识别网络模型对实际采集到的连续测线地质雷达检测数据进行介电常数反演和病害识别, 得到相应的介电常数分布图和目标类型标签。

将训练好的适用于实际数据的智能反演与识别模型参数代入到构建的智能反演和识别网络中, 即可得到可以进行实际应用的预测模型。然后, 利用 Pyqt 界面开发工具进行了图形界面的开发, 生成可供用户使用的界面, 用户可以任意选择采集到的连续测线地质雷达检测数据输入图形界面, 然后所述预测模型就会对所述地质雷达检测数据进行反演和识别, 生成介电常数分布图和目标类别标签, 如图 13 和图 14 所示, 生成的介电常数分布图和目标类别的存储位置可以由用户自行选择。

根据介电常数分布图和目标类别标签能够还原连续测线测得的衬砌结构的背景介质、病害形态、病害中的填充介质以及病害类别, 从而达到病害检测的目的。

当然, 上述实施例中, 参数的设计、网络的架构等都可以根据具体工况、场景进行更改, 这是本领域技术人员容易想到的, 理应属于本发明的保护范围, 在此不再赘述。

以上所述仅为本公开的优选实施例而已, 并不用于限制本公开, 对于本领域的技术人员来说, 本公开可以有各种更改和变化。凡在本公开的精神和原则之内, 所作的任何修改、等同替换、改进等, 均应包含在本公开的保护范围之内。

权利要求 14

- 1、一种用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统，其特征在于，包括：
机器人车体；
导航定位系统和移动系统，均安装于机器人车体上；
自动敲击检测系统，其安装于车体前端；
移动式超声快速检测系统和锈蚀检测系统，均安装于车体底部；
双动力系统，由非接触式负压吸附装置和旋翼助推装置组成，非接触式负压吸附装置安装于车体底部，旋翼助推装置安装于车体两侧；
总控制器，其与导航定位系统、移动系统、自动敲击检测系统、移动式超声快速检测系统、锈蚀检测系统和双动力系统分别相互通信。
- 2、如权利要求 1 所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统，其特征在于，所述导航定位系统包括多目全景相机和激光雷达，多目全景相机用于检测涵闸表面病害，激光雷达用于实现涵闸检测区域的自动构图。
- 3、如权利要求 1 所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统，其特征在于，所述移动系统包括刚柔弧形杆、车轮、驱动电机和力矩传感器；所述刚柔弧形杆连接机器人车体与车轮，用于减震和传递贴合力；驱动电机与车轮连接，以实现机器人的移动和转向；力矩传感器连接在机器人车体的一端，用于监测机器人的实时贴合力。
- 4、如权利要求 1 所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统，其特征在于，所述自动敲击检测系统为电磁敲击装置，所述电磁敲击装置包括用于敲击的敲击锤，敲击锤另一端与第一电磁铁相连，第一电磁铁和敲击锤安装于敲击装置外壳内部，第二电磁铁固定于敲击装置外壳上部，两个电磁铁受自动敲击控制器的控制并与敲击装置外壳内部的弹性装置配合，实现自动敲击。
- 5、如权利要求 4 所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统，其特征在于，所述自动敲击检测系统还包括声音接收器，所述声音接收器安装在电磁敲击装置后侧贴近地面的位置，声音接收器与自动敲击控制器相连，自动敲击控制器与总控制器相连。
- 6、如权利要求 1 所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统，其特征在于，所述移动式超声快速检测系统采用滚珠式超声探头阵列，每个滚珠式超声探头包括探头和万向滚珠，万向滚珠设置在球形腔室中，球形腔室设置在探头柱状外壳内部，万向滚珠与超声探头采用软质耦合块连接，所述软质耦合块一端与超声探头声发射端或接收端粘合，另一端具有球面凹槽，用于与万向滚珠贴合，柱状外壳内部设有超声耦合液，用于填充软质耦合块与万向滚珠之间的空隙，超声探头另一端与弹性装置连接，用于辅助耦合。
- 7、如权利要求 6 所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统，其特征在于，

滚珠式超声探头上部连接压力传感器，用于监测实时贴合力，压力传感器另一端连接弹性装置，用于提供贴合力；弹性装置另一端装有旋转伸缩装置，用于调节贴合力；总控制器用于根据压力传感器信息调节旋转伸缩装置，实现各滚珠式超声探头贴合力相同且稳定；每个超声探头与超声检测控制器相连，超声检测控制器与总控制器相连。

8、如权利要求 1 所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统，其特征在于，所述锈蚀检测系统为基于地质雷达的两步交错检测模式观测混凝土中钢筋的锈蚀状态系统，该系统被配置为：通过在任意方向行走，获取雷达测线剖面图，采用基于深度神经网络的钢筋快速定位算法，确定钢筋排布方向；沿钢筋布设方向进行扫描，以不同位置的特征参量变化，判别当前位置的锈蚀程度与锈蚀位置。

9、如权利要求 3 所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统，其特征在于，所述非接触式负压吸附装置配有气压传感器，总控制器用于根据力矩传感器和气压传感器信息控制是否启动旋翼助推装置，当非接触负压吸附装置所提供的气压达到上限，但仍不满足贴合力需求时，开启旋翼助推装置，实现动力补充。

10、一种如权利要求 1-9 中任一项所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统的工作方法，其特征在于，包括：

启动双动力系统，使机器人吸附于被侧面，双动力系统在检测过程中实时监测机器人的贴合力；

导航定位系统完成路径规划，进入快速普查模式，启动自动敲击检测系统和锈蚀检测系统，移动系统以高速度移动，利用自动敲击检测系统、锈蚀检测系统、多目全景相机和导航定位系统，实现对缺陷区域的快速普查以及缺陷的粗略识别和定位；

根据快速普查模式所获得的缺陷定位信息，重新进行路径规划，进入精细检测模式，爬壁机器人移动系统以高速移动至缺陷位置，到达缺陷位置后，根据缺陷的类型选择性开启移动式超声快速检测系统和锈蚀检测系统，同时移动系统改为低速移动，移动式超声快速检测系统运行时，总控制器根据压力传感器信息控制旋转伸缩装置，用于保持各滚珠式超声探头的贴合力相同且稳定，每完成一处缺陷检测爬壁机器人均以高速移动至另一缺陷位置，检测过程中低速移动，待所有缺陷检测完毕，爬壁机器人返回原点，完成对缺陷区域的精细检测；

基于超声获取的数据采用基于深度学习的识别方法进行处理，采用基于可变形卷积旋转区域检测深度神经网络识别内部缺陷位置与类别，采用融合时序信息的“反演-识别”多任务深度神经网络从多组超声探测数据中对内部病害连续成像。

11、如权利要求 10 所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统的工作方法，其特征在于，还包括同时反演混凝土介电常数及识别病害，其具体过程为：

对不同应用场景的地质雷达设备提取实际发射子波信号，将其作为仿真建模源子波信号进行正演，生成相应的地质雷达剖面图，其同建立的介电常数分布图和目标类别标签形成数据对，构成仿真训练数据集；

构建地质雷达智能反演与识别模型，基于仿真训练数据集，训练所述地质雷达智能反演与识别模型；

建立真实训练数据集，基于真实训练数据集和迁移学习方法微调所述地质雷达智能反演与识别模型；

利用微调后的地质雷达智能反演与识别模型对真实雷达检测数据进行介电常数反演和病害识别。

12、如权利要求 11 所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统的工作方法，其特征在于，对不同应用场景的地质雷达设备提取实际发射子波信号，将其作为仿真建模源子波信号进行正演，进行正演的具体过程包括：对不同应用场景确定地质雷达设备，提取该地质雷达设备的空采直达波作为子波，采用与该地质雷达设备子波频率和相位一致的雷克子波作为建模的源子波，每一副介电常数分布图进行正演，生成相应的地质雷达剖面图。

13、如权利要求 11 所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统的工作方法，其特征在于，地质雷达剖面图同建立的介电常数分布图和目标类别标签形成数据对的具体过程包括：将不同应用场景测量所得的背景噪声随机叠加到仿真雷达检测数据中，得到背景与子波接近真实的仿真数据；建立混凝土结构介电常数分布图和目标类别标签两种标签，得到“地质雷达剖面图-介电常数分布图与/或目标类别标签”数据对。

14、如权利要求 11 所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统的工作方法，其特征在于，所述地质雷达智能反演与识别模型包括级联的局部短测线空间特征提取结构、长测线时空特征交互结构和介电常数反演与目标识别双任务结构。

15、如权利要求 14 所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统的工作方法，其特征在于，所述局部短测线空间特征提取结构，采用多个并行的全卷积网络结构，每个全卷积网络结构用于单独处理从任意长度连续测线中不同位置提取的各个局部短测线 B-Scan 剖面，对其进行空间上下文特征提取，形成任意长度连续测线地质雷达检测数据的特征序列。

16、如权利要求 14 所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统的工作方法，其特征在于，所述长测线时空特征交互结构，采用一层 Bi-ConvLSTM 结构，用于实现局部短测线 B-Scan 剖面特征序列中的双向时空信息融合，通过地质雷达探测方向的正向和地质雷达探测方向的反向的局部短测线 B-Scan 特征的自适应信息融合，生成包含局部短测线

B-Scan 剖面之间的空间上下文信息的增强特征序列，以实现反演或识别具有连续形状、类别和介电常数值混凝土内部目标。

17、如权利要求 14 所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统的工作方法，其特征在于，所述介电常数反演与目标识别双任务结构，采用多个并行的两分支卷积网络结构，每个并行的两分支卷积网络结构用于单独处理每个局部短测线 B-Scan 剖面经长测线时空特征交互结构提取的增强特征，同时重建混凝土介电常数分布和识别病害类型、位置及轮廓。

18、如权利要求 11 所述的用于涵闸隐蔽缺陷快速无损检测的爬壁机器人系统的工作方法，其特征在于，建立真实训练数据集的具体过程包括：对地质雷达实际探测的连续测线地质雷达剖面数据、依据实际现场建立的介电常数模型以及目标类型标签进行对应的水平方向的随机裁剪和双线性插值以进行数据增强，建立真实训练数据集。

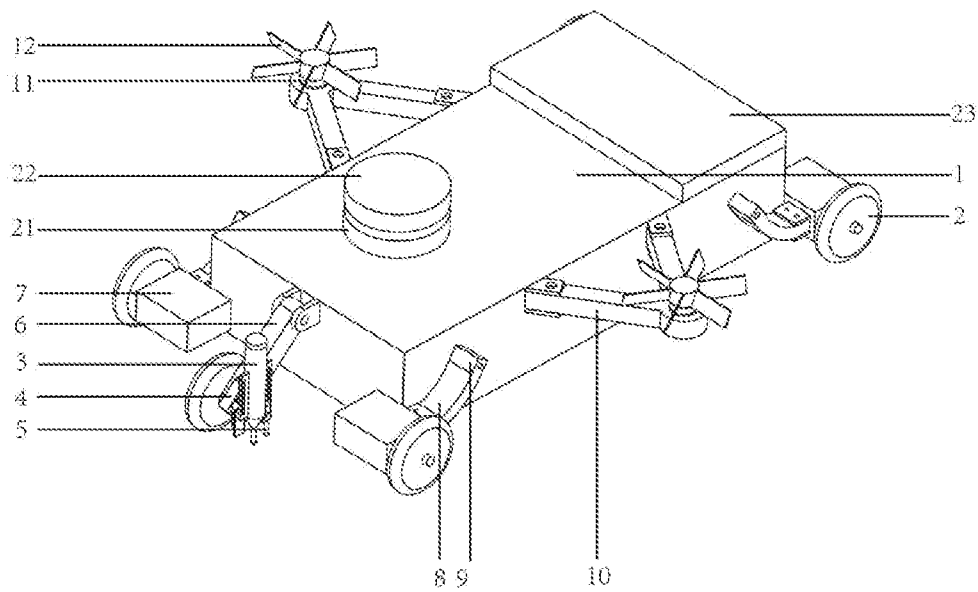


图 1

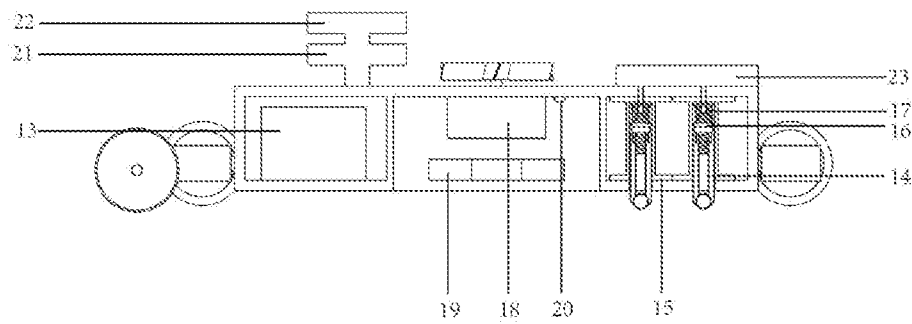


图 2

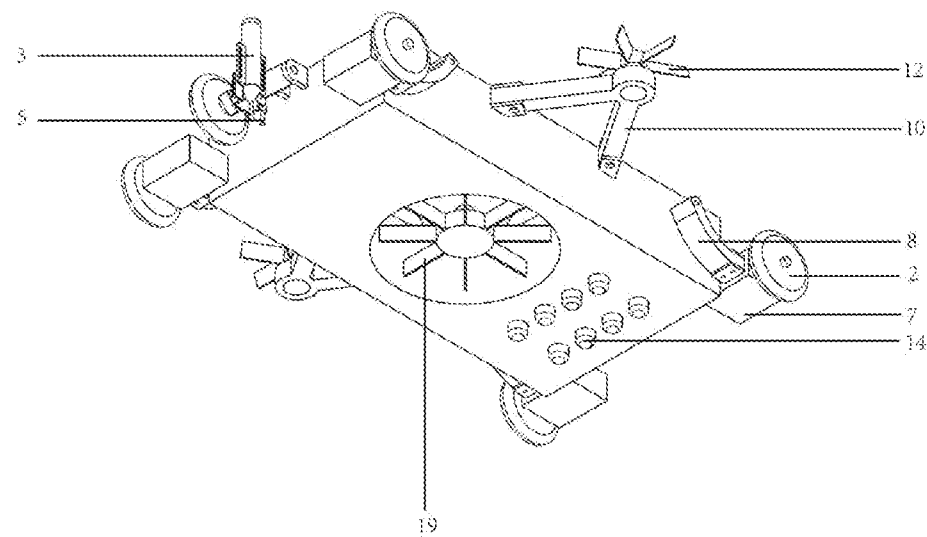


图 3

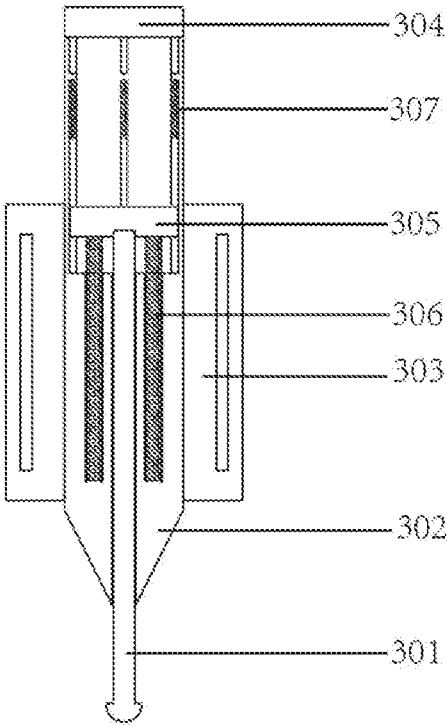


图 4

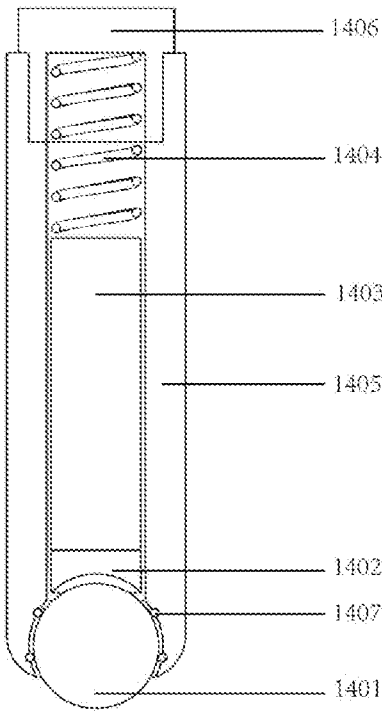


图 5

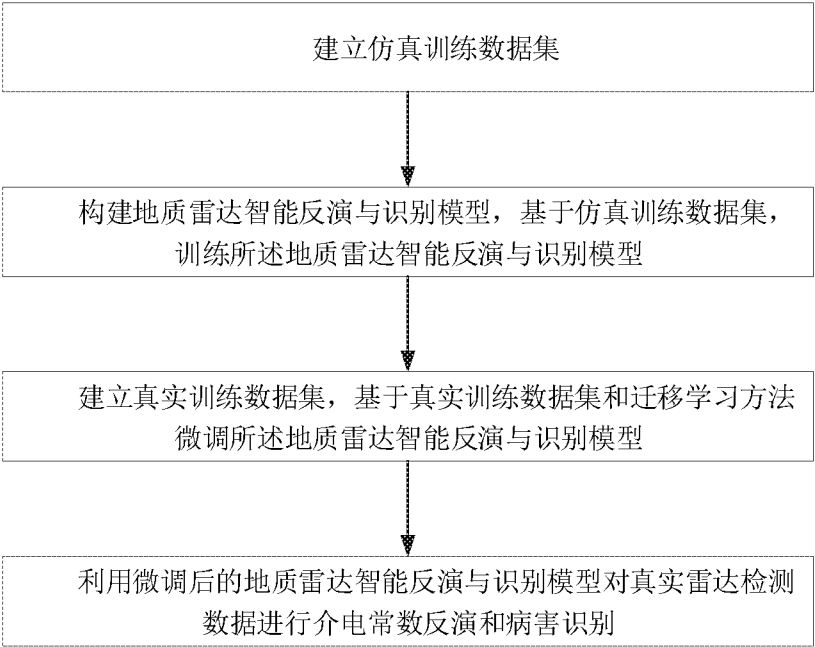


图 6

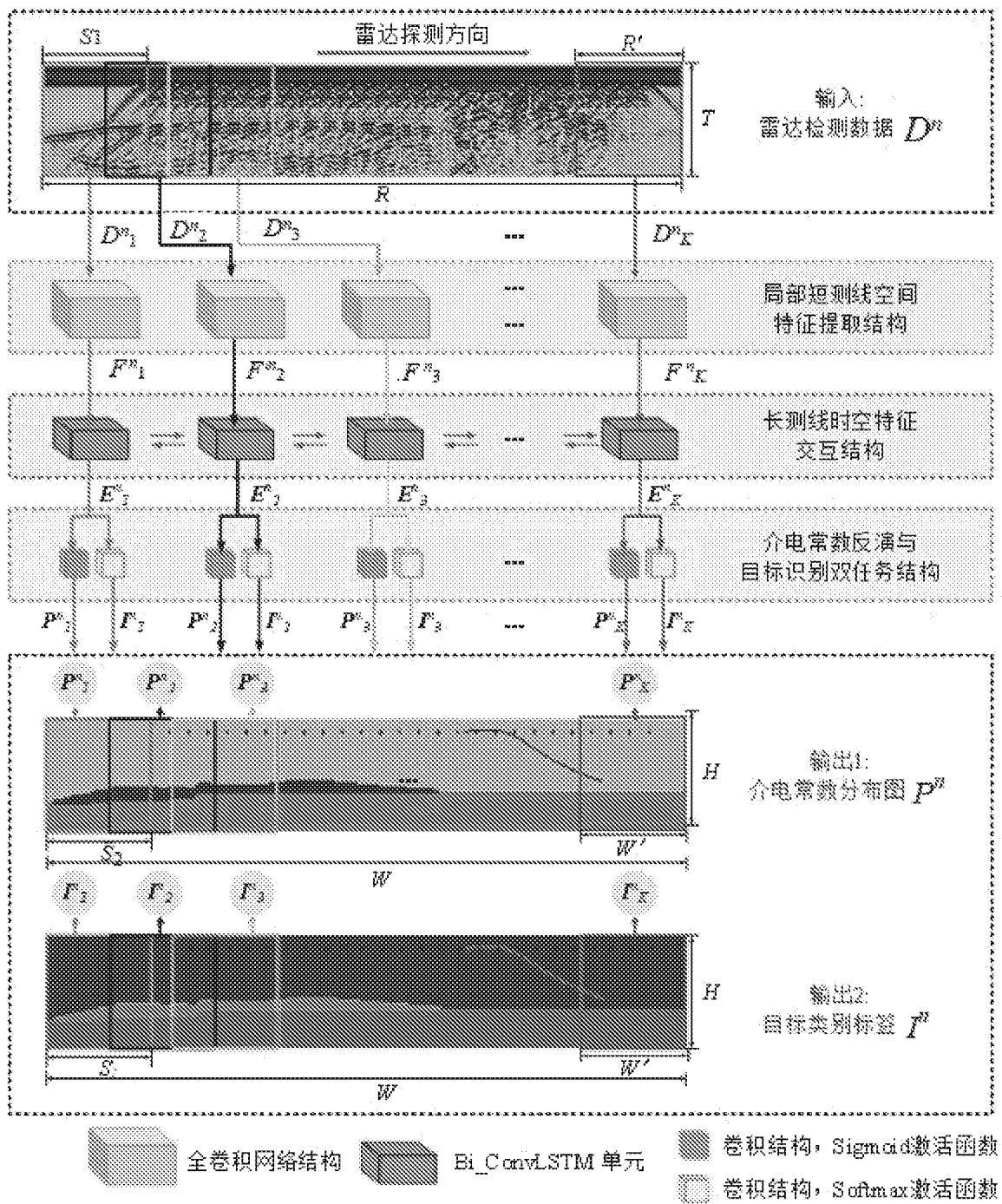


图 7

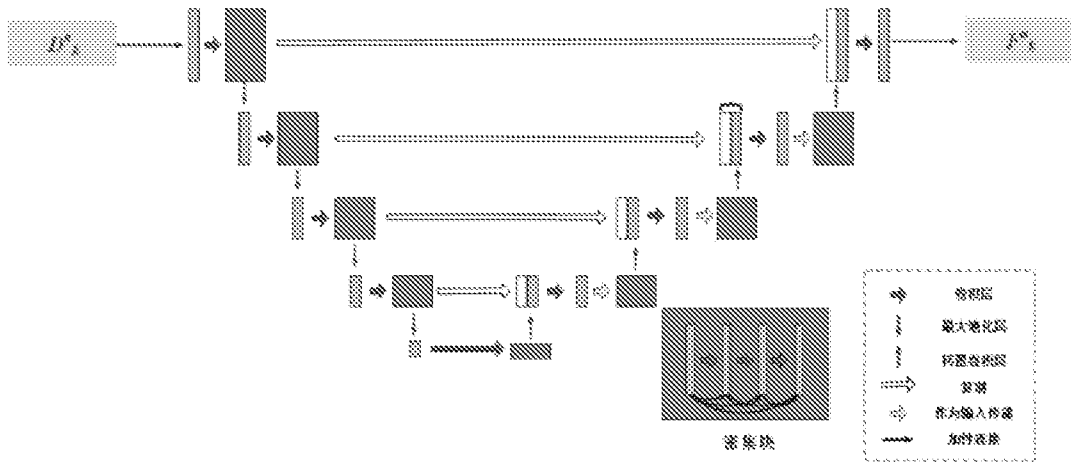


图 8

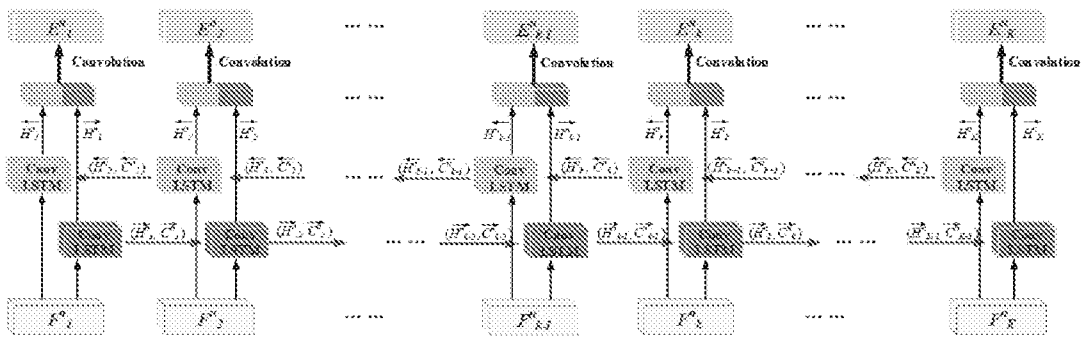


图 9

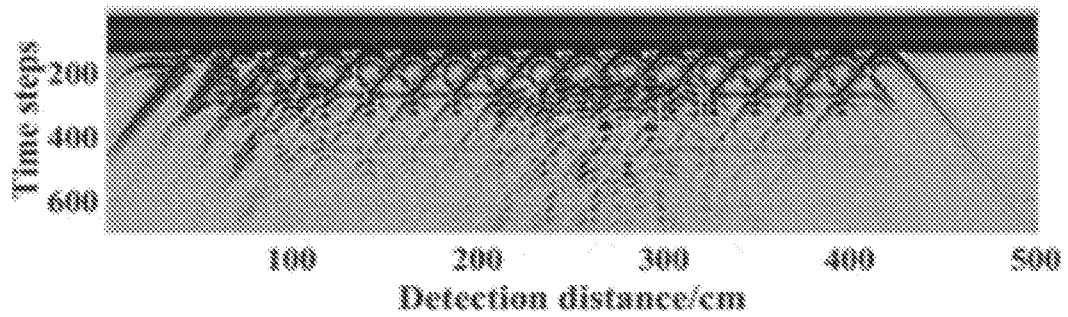


图 10

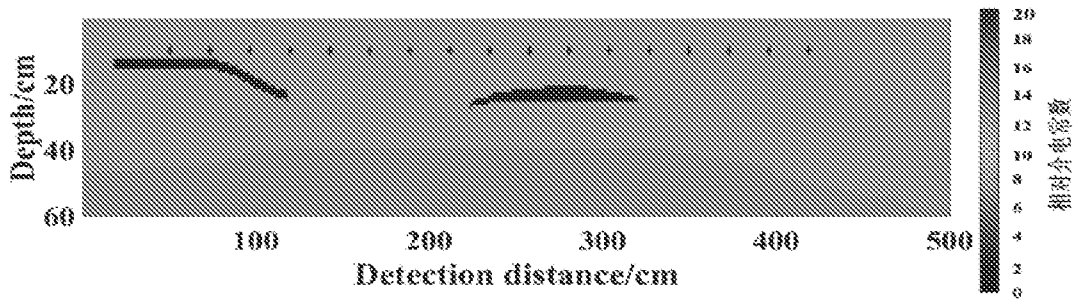


图 11

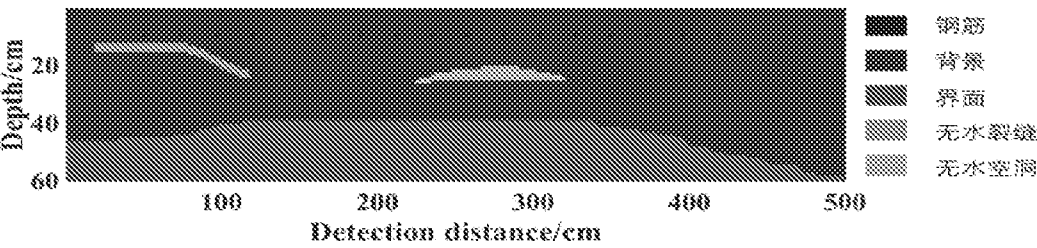


图 12

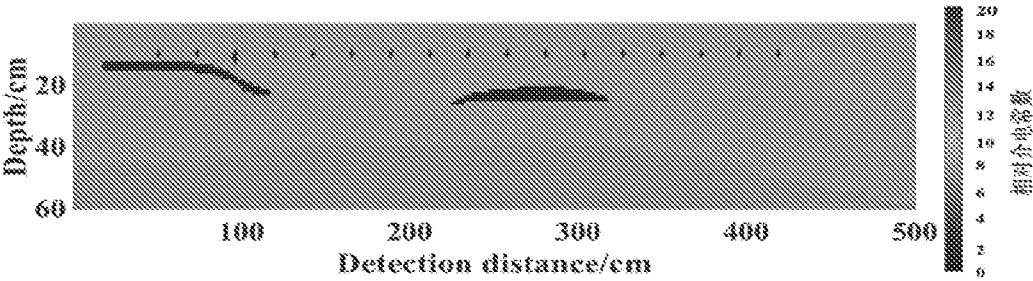


图 13

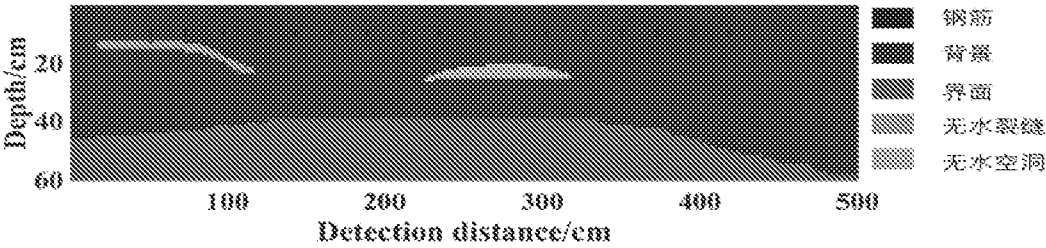


图 14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/111595

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B62D 57/024(2006.01)i; B25J 11/00(2006.01)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)

B62D; B25J

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; CNABS; VEN; CNKI: 爬壁, 爬墙, 机器人, 旋翼, 滚珠, 滚轮, 移动, 滚动, 球, 超声, 探头, 锈蚀, 压力传感器, 雷达, wall, climb+, robot, rotor, wing, roll+, ball, ultrasonic, probe, detect+, head, corrosion, pressure, sensor

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 112917483 A (SHANDONG UNIVERSITY) 08 June 2021 (2021-06-08) claims 1-10	1-10
Y	CN 109795571 A (ZHEJIANG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 24 May 2019 (2019-05-24) description, paragraphs 29-34, and figures 1-6	1-9
Y	CN 207207653 U (WANG, Zhicheng) 10 April 2018 (2018-04-10) description, paragraphs 25-45, and figures 1-6	1-9
Y	CN 209745884 U (GUODIAN BOILER AND PRESSURE VESSEL INSPECTION CO., LTD.) 06 December 2019 (2019-12-06) description, paragraphs 25-30	6
Y	CN 111751392 A (GUANGZHOU UNIVERSITY) 09 October 2020 (2020-10-09) description, paragraphs 48-81	8
A	CN 110865128 A (SHANGHAI RESEARCH INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES CO., LTD.) 06 March 2020 (2020-03-06) description, paragraphs 36-43, and figures 1-6	1-18
A	CN 111781576 A (SHANDONG UNIVERSITY) 16 October 2020 (2020-10-16) entire document	1-18



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

“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

28 October 2021

Date of mailing of the international search report

12 November 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

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

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/111595**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 205554355 U (ZHEJIANG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 07 September 2016 (2016-09-07) entire document	1-18
A	US 2019353819 A1 (SCHLUMBERGER TECHNOLOGY CORPORATION) 21 November 2019 (2019-11-21) entire document	1-18

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/111595

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	112917483	A	08 June 2021	None	
CN	109795571	A	24 May 2019	None	
CN	207207653	U	10 April 2018	None	
CN	209745884	U	06 December 2019	None	
CN	111751392	A	09 October 2020	None	
CN	110865128	A	06 March 2020	None	
CN	111781576	A	16 October 2020	None	
CN	205554355	U	07 September 2016	None	
US	2019353819	A1	21 November 2019	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/111595

A. 主题的分类 B62D 57/024(2006.01)i; B25J 11/00(2006.01)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) B62D; B25J 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)) CNTXT;CNABS;VEN;CNKI:爬壁,爬墙,机器人,旋翼,滚珠,滚轮,移动,滚动,球,超声,探头,锈蚀,压力传感器,雷达,wall, climb+, robot, rotor, wing, roll+, ball, ultrasonic, probe, detect+, head, corrosion, pressure, sensor																													
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 112917483 A (山东大学) 2021年 6月 8日 (2021 - 06 - 08) 权利要求1-10</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>CN 109795571 A (浙江工业大学) 2019年 5月 24日 (2019 - 05 - 24) 说明书第29-34段, 图1-6</td> <td>1-9</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>CN 207207653 U (王志成) 2018年 4月 10日 (2018 - 04 - 10) 说明书第25-45段, 图1-6</td> <td>1-9</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>CN 209745884 U (国电锅炉压力容器检验有限公司) 2019年 12月 6日 (2019 - 12 - 06) 说明书第25-30段</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>CN 111751392 A (广州大学) 2020年 10月 9日 (2020 - 10 - 09) 说明书第48-81段</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 110865128 A (上海市建筑科学研究院有限公司) 2020年 3月 6日 (2020 - 03 - 06) 说明书第36-43段, 图1-6</td> <td>1-18</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 111781576 A (山东大学) 2020年 10月 16日 (2020 - 10 - 16) 全文</td> <td>1-18</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 205554355 U (浙江科技学院) 2016年 9月 7日 (2016 - 09 - 07) 全文</td> <td>1-18</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 112917483 A (山东大学) 2021年 6月 8日 (2021 - 06 - 08) 权利要求1-10	1-10	Y	CN 109795571 A (浙江工业大学) 2019年 5月 24日 (2019 - 05 - 24) 说明书第29-34段, 图1-6	1-9	Y	CN 207207653 U (王志成) 2018年 4月 10日 (2018 - 04 - 10) 说明书第25-45段, 图1-6	1-9	Y	CN 209745884 U (国电锅炉压力容器检验有限公司) 2019年 12月 6日 (2019 - 12 - 06) 说明书第25-30段	6	Y	CN 111751392 A (广州大学) 2020年 10月 9日 (2020 - 10 - 09) 说明书第48-81段	8	A	CN 110865128 A (上海市建筑科学研究院有限公司) 2020年 3月 6日 (2020 - 03 - 06) 说明书第36-43段, 图1-6	1-18	A	CN 111781576 A (山东大学) 2020年 10月 16日 (2020 - 10 - 16) 全文	1-18	A	CN 205554355 U (浙江科技学院) 2016年 9月 7日 (2016 - 09 - 07) 全文	1-18
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																											
PX	CN 112917483 A (山东大学) 2021年 6月 8日 (2021 - 06 - 08) 权利要求1-10	1-10																											
Y	CN 109795571 A (浙江工业大学) 2019年 5月 24日 (2019 - 05 - 24) 说明书第29-34段, 图1-6	1-9																											
Y	CN 207207653 U (王志成) 2018年 4月 10日 (2018 - 04 - 10) 说明书第25-45段, 图1-6	1-9																											
Y	CN 209745884 U (国电锅炉压力容器检验有限公司) 2019年 12月 6日 (2019 - 12 - 06) 说明书第25-30段	6																											
Y	CN 111751392 A (广州大学) 2020年 10月 9日 (2020 - 10 - 09) 说明书第48-81段	8																											
A	CN 110865128 A (上海市建筑科学研究院有限公司) 2020年 3月 6日 (2020 - 03 - 06) 说明书第36-43段, 图1-6	1-18																											
A	CN 111781576 A (山东大学) 2020年 10月 16日 (2020 - 10 - 16) 全文	1-18																											
A	CN 205554355 U (浙江科技学院) 2016年 9月 7日 (2016 - 09 - 07) 全文	1-18																											
☒ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																													
<table border="0"> <tr> <td> * 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 “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 </td> <td> “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 </td> </tr> </table>			* 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 “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																									
* 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 “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		国际检索报告邮寄日期																											
2021年 10月 28日		2021年 11月 12日																											
ISA/CN的名称和邮寄地址		受权官员																											
中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国 北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		徐媛 电话号码 86-010-62089943																											

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	US 2019353819 A1 (SCHLUMBERGER TECHNOLOGY CORP) 2019年 11月 21日 (2019 - 11 - 21) 全文	1-18

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/111595

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	112917483	A	2021年 6月 8日	无	
CN	109795571	A	2019年 5月 24日	无	
CN	207207653	U	2018年 4月 10日	无	
CN	209745884	U	2019年 12月 6日	无	
CN	111751392	A	2020年 10月 9日	无	
CN	110865128	A	2020年 3月 6日	无	
CN	111781576	A	2020年 10月 16日	无	
CN	205554355	U	2016年 9月 7日	无	
US	2019353819	A1	2019年 11月 21日	无	