



(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.); 中国山东省济南市经十路17703号华特广场B308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, 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:

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

portion, and is used for carrying out multi-scale measurement on apparent diseases and internal diseases of a tunnel structure that are at the same position but with different depths, and transmitting measured disease information to a control portion (5); and the control portion (5), which is configured to build a disease diagnosis model based on a deep neural network. A data set is constructed by using historical apparent disease and internal disease information, and the disease diagnosis model is trained based on the deep neural network; and multi-scale measurement information is received in real time, and the types, positions, contours and dielectric properties of internal and apparent diseases are automatically identified.

(57) 摘要: 提供了一种隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统、浮动贴合装置、多功能云台以及基于雷达探测数据进行目标体智能识别的方法。其中, 隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统包括: 行走部; 支撑部, 其设置在行走部上; 支撑部包括可旋转伸缩台架, 可旋转伸缩台架上设置有并行工作的双机械臂(3, 4); 检测部, 其安装在支撑部上, 用于对隧道结构同一位置不同深度范围的表观病害和内部病害进行多尺度检测, 并将检测的病害信息传送至控制部(5); 控制部(5), 其被配置为构建基于深度神经网络的病害诊断模型; 利用历史表观病害和内部病害信息构建数据集, 训练基于深度神经网络的病害诊断模型; 实时接收多尺度检测信息并自动识别出内部及表观病害的类型、位置、轮廓及介电属性。

## 隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统及方法

### 技术领域

本公开属于隧道检测与诊断领域，尤其涉及一种隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统及方法。

### 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。

随着公路、铁路、地铁等隧道陆续投入运营，其运营期结构安全健康服役的重要性越发突显，在其长期服役过程中，由于结构性能劣化、自然环境变化、周边环境扰动、施工质量差异等因素共同作用，大量运营隧道存在诸如衬砌开裂、内部脱空、渗水漏泥等结构隐蔽病害。

上述病害极易导致结构性能退化，隧道寿命折减，甚至影响行车安全，引发安全事故，严重威胁隧道健康服役。亟需针对隧道内部隐蔽病害的准确、高效检测及诊断装备与方法对隧道结构表观及内部的病害进行检测与诊断，为隧道结构的病害治理提供科学依据。

发明人发现，目前主要采用的隧道结构表观及内部病害检测技术主要存在以下问题：

(1) 目前对隧道结构内部病害检测以人工巡检为主，采用人工手持地质雷达或借助升降台车的方式，检测效率低、便捷性差、成本高。

(2) 现有的隧道巡检机器人检测方法单一，大多搭载视频图像、激光点云等设备，少数搭载红外成像设备，对隧道结构表面的裂缝、脱落及渗漏水病害进行检测，无法检测结构的内部病害，尚未实现隧道衬砌结构病害由表及里的多尺度精细检测。

(3) 可用于隧道结构内部病害检测的雷达及超声等无损检测技术仅能检测到混凝土衬砌内部厘米级损伤，难以对毫米级损伤进行精细检测。

(4) 目前对内部损伤的诊断主要依赖工程经验，具有一定主观性，难以有效保证对病害诊断的准确性，且智能化水平低。

### 发明内容

为了解决上述问题，本公开的第一个方面提供一种隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统，其可对隧道结构进行自动化巡检，并对毫米级损伤进行精细检测与智能诊断，可极大地提高衬砌病害检测和诊断的便捷性与准确性。

为了实现上述目的，本公开采用如下技术方案：

一种隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统，包括：

行走部；

支撑部，其设置在行走部上；所述支撑部包括可旋转伸缩台架，可旋转伸缩台架上设置有并行工作的双机械臂；

检测部，其安装在支撑部上，用于对隧道结构同一位置不同深度范围的表观病害和内部病害进行多尺度检测，并将检测的病害信息传送至控制部；

控制部，其被配置为：

构建基于深度神经网络的病害诊断模型；

利用历史表观病害和内部病害信息及已标注的像素级病害类型，构建数据集，训练基于深度神经网络的病害诊断模型；

实时接收病害信息并输入至训练后的病害自动识别与诊断模型，自动识别出病害类型、位置及轮廓。

进一步地，所述行走部包括机器人平台，所述机器人平台两侧设置有履带；所述机器人平台底部还对称设置有若干个可伸缩轨道轮，所述可伸缩轨道轮之间通过联动机构共同伸缩，以实现在不同洞径的隧道内

运行。

进一步地，所述双机械臂中的一条机械臂为多关节蛇形机械臂，另一条机械臂为检测装置内置式负载测量臂。

进一步地，所述检测部包括：

激光 3D 扫描仪，其安装在可旋转伸缩台架上，用于采集包含隧道衬砌表面的裂缝及渗漏水病害的隧道全景图像信息；

雷达及超声成像装置，放置于多关节蛇形机械臂顶端，雷达用于获取较深层病害，超声成像装置用于获取隧道衬砌表面裂缝的深度及宽度；

X 光背散射装置，其内置于检测装置内置式负载测量臂中，用于对隧道衬砌表面裂缝内部进行毫米级测量。

进一步地，所述控制部，还配置为：

将实时接收病害信息及自动识别出病害类型保存至历史数据库中；

利用历史数据库中的数据重新对病害诊断模型进行训练，得到更新后的病害诊断模型；

利用更新后的病害诊断模型进行病害诊断。

进一步地，所述控制部，还配置为：

对隧道环境进行定位及构图，并对行走部进行路径规划。

一个或多个实施例提供了一种浮动贴合装置，设于可伸缩机械臂末端，包括：

壳体，所述壳体内用于安装无损检测设备；

所述壳体外表面设有一个或多个可伸缩弹力轮，用于与隧道衬砌被测表面贴合，且每个可伸缩弹力轮均内置测力传感器，用于感测与隧道衬砌被测表面之间的贴合力；所述壳体外表面还设有激光测距传感器阵列，用于监测贴合装置与被测表面之间的距离；

所述测力传感器和激光测距传感器阵列均与控制器连接，控制器根据贴合力和距离信息调整所述浮力贴合装置与被测表面之间的相对位置。

进一步地，所述可伸缩弹力轮包括连接在壳体外表面的杆件，所述杆件的末端与测力传感器的一端连接，测力传感器的另一端与弹簧的一端连接，所述测力传感器和弹簧均置于柱状容纳腔内，所述柱状容纳腔远离杆件的一端封堵，另一端开口，且开口的大小使得柱状容纳腔能够套设于所述杆件外部；所述柱状容纳腔封堵的一端外部通过支架连接行走轮。

进一步地，所述激光测距传感器阵列至少安装于所述壳体的三个侧面，其中一个侧面为朝向前进方向的侧面。

进一步地，所述壳体内还设有无损检测设备固定台，所述无损检测设备固定台上预留能够安装不同探测设备探头的卡槽；

所述无损检测设备固定台包括一个水平导轨和与该水平导轨垂直连接的两个竖直导轨；所述水平导轨的两端分别设有一个齿轮，与设于壳体内部两个相对侧面上的齿条分别相啮合；所述水平导轨用于固定无损检测设备的一侧设有齿条；两个竖直导轨通过齿轮与水平导轨上的齿条相啮合。

进一步地，所述壳体朝向前进方向的外表面还设有避障监测装置，由激光雷达和监控摄像头组成，均与控制器连接，用于监测运行过程中前方衬砌的表面信息。

进一步地，所述折叠式弓形撑开装置包括多段相互连接的支撑架，且相邻两段支撑架之间通过转轴旋转连接，由减速机驱动；每段支撑架上均设有与其方向一致的电动导轨，所述浮动贴合装置通过滑轮与电动导轨连接，能够沿电动导轨移动。

进一步地，电动导轨两端均设有激光测距传感器，用于感测与被测表面之间的距离；减速机输出轴设

有扭矩传感器，用于感测两个支撑杆之间的旋转角度；所述减速机、激光测距传感器和扭矩传感器均与控制器连接，控制器根据各支撑杆之间的角度，以及与被测表面之间的距离，通过控制减速机调整各段支撑架之间的角度。

进一步地，滑轮上设有位置传感器，用于感测浮动贴合装置在相应电动导轨上的位置。

一个或多个实施例提供了一种多功能云台，设于机器人平台上，所述云台中设有多个检测模块，包括激光测距模块和多个病害检测模块，均与控制器连接；其中，所述激光测距模块设于中心，多个病害检测模块设于激光测距模块的周围；

控制器基于激光测距模块所测的与被测表面之间的距离，控制多个病害检测模块的朝向，使得多个病害检测模块对同一目标区域进行成像。

进一步地，所述多个病害检测模块包括：三维建模和变形检测模块、裂缝和脱落检测模块和渗漏检测模块；

所述云台为半球形，半球切面上设有四个孔洞，用于容纳三维建模和变形检测模块的激光发射单元、裂缝和脱落检测模块的可见光摄像头、渗漏检测模块的红外摄像头与激光测距模块的激光发射单元，且四个孔洞大小均为激光发射单元或摄像头旋转预留一定额外空间；其中，激光测距模块的激光发射单元位于中心，可见光摄像头、红外摄像头分别等间距设于其两侧，且三者共线。

进一步地，所述多个病害检测模块包括：三维建模和变形检测模块、裂缝和脱落检测模块和渗漏检测模块；

多个检测模块均通过支撑机构固定多功能云台内部；其中，激光测距模块设置于支撑机构中间，裂缝和脱落检测模块和渗漏检测模块分别设置于激光测距仪两侧，且通过转向电机设于支撑机构上。

进一步地，所述云台为半球形，且两侧分别通过横滚电机连接于U形支架内；所述U形支架通过竖滚电机连接在移动载体上；其中，所述横滚电机和竖滚电机上均设有转矩传感器，U形支架上设有三轴陀螺仪，均与控制器连接。

进一步地，所述多个检测模块在云台中的位置，根据各检测模块的初始重力信息，以及各检测模块的重心相对三个电机转轴的偏移量信息，进行初始化，以保证云台的稳定性。

一个或多个实施例提供了一种基于雷达探测数据进行目标体智能识别方法，包括如下步骤：

获取计算机模拟数据集，所述数据集包括多组探地雷达数据剖面图-目标体标签图数据对；

采用深度学习网络，基于所述数据集训练得到目标体识别模型；

获取实时采集到的雷达检测数据，采用所述目标体识别模型进行目标体识别。

进一步地，构建计算机模拟数据集包括：

针对多种、背景介质、形状、尺寸及分布的地下工程目标体的介电常数模型进行模拟；

对于每一介电常数模型进行正演，分别生成不同频率的雷达数据剖面图，得到多组探地雷达数据剖面图-目标体介电常数模型数据对；

对于每一组探地雷达数据剖面图-目标体介电常数模型数据对中的目标体介电常数模型进行轮廓识别，将轮廓范围以内的像素值赋值为相应的类型标识码，得到多组探地雷达数据剖面图-目标体标签图数据对。

进一步地，所述深度学习网络模型架构包括：用于对雷达检测数据剖面图进行特征提取的时间维度压缩网络结构、用于对每个特征通道进行编码的自编码网络结构，和用于对每个特征通道进行解码的标签图解码网络结构；

所述时间维度压缩网络结构包括6层依次级联的卷积结构，其中，第2层卷积结构的输出端还连接残差块的输入端，残差块的输出端连接至第3层卷积结构的输入端；

所述自编码网络结构包括 4 层全连接层；

所述标签图解码网络结构包括 6 层依次级联的卷积结构，其中，第 2 层卷积结构的输出端还连接残差块的输入端，残差块的输出端连接至第 3 层卷积结构的输入端。

进一步地，还获取多组真实的探地雷达数据剖面图-目标体标签图数据对，对得到的目标体识别模型进行调参。

本公开的有益效果是：

本公开的隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统，包括检测部和控制部，利用检测部对隧道结构同一位置不同深度范围的表观病害和内部病害进行多尺度检测，并将检测的病害信息传送至控制部；在控制部中利用训练完成的病害诊断模型，自动识别出病害类型，实现了检测与智能诊断一体化及自动化，避免了主观人为诊断导致的漏报误报隐患，保证了对病害诊断的准确性。

本公开提供的浮动贴合装置为“力-距”浮动贴合装置，通过可伸缩弹力轮与衬砌被测表面贴合，通过可伸缩弹力轮内置的测力传感器获取贴合力，通过贴合装置上的激光测距传感器阵列获取与被测表面之间距离，基于与被测表面之间贴合力 and 距离调整浮动贴合装置与被测表面之间的贴合程度，既保证了浮动贴合装置能够时刻与被测表面贴合，又保护了装置不会因被测表面的凹凸不平受到损坏；

本公开提供的“多目”云台包括多个病害检测模块，并将其中的激光测距模块作为中心，以其测得的与被测表面之间的距离作为参照，对可见光摄像头和红外摄像头方向进行修正，保证了针对同一目标区域进行成像，有利于后续的综合评判。

本公开提供的线阵双目成像系统能够通过图像标定确定病害匹配点的像素坐标，根据匹配点间相对坐标估算出病害的大小，提高了检查效率。

本公开提供的基于雷达检测数据的目标体识别方法，能够实现雷达检测过程中，针对异常目标体的实时检测。

## 附图说明

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

图 1 为本公开实施例提供的隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统示意图；

图 2 为本公开实施例提供的超声成像装置示意图；

图 3 为本公开实施例提供的控制部结构框图及各部分关系；

图 4 为本公开实施例提供的病害检测流程图；

图 5 (a) 为本公开提供的裂缝病害原因实施例 1；

图 5 (b) 为本公开提供的裂缝病害原因实施例 1 的识别结果；

图 5 (c) 为本公开提供的裂缝病害原因实施例 2；

图 5 (d) 为本公开提供的裂缝病害原因实施例 2 的识别结果；

图 5 (e) 为本公开提供的脱落病害原因实施例 1；

图 5 (f) 为本公开提供的脱落病害原因实施例 1 的识别结果；

图 5 (g) 为本公开提供的脱落病害原因实施例 2；

图 5 (h) 为本公开提供的脱落病害原因实施例 2 的识别结果；

图 5 (i) 为本公开提供的脱落与裂缝多病害原因实施例 1；

图 5 (j) 为本公开提供的脱落与裂缝多病害原因实施例 1 的识别结果；

图 5 (k) 为本公开提供的脱落与裂缝多病害原因实施例 2；

图 5 (l) 为本公开提供的脱落与裂缝多病害原因实施例 2 的识别结果；

图 6 为本公开实施例中机械臂、可折叠弓形撑开装置与浮动贴合装置整体连接结构示意图；

图 7 为本公开实施例中用于隧道衬砌无损检测的浮动贴合装置结构示意图；

图 8 为本公开实施例中可折叠弓形撑开装置折叠后的示意图；

图 9 为本公开实施例中激光测距传感器阵列在贴合装置外表面侧壁的布局示意图；

图 10 为本公开实施例中贴合装置控制方法流程图示意图；

图 11 为本公开实施例中多功能云台结构示意图；

图 12 为本发明一个实施例提供的探地雷达智能识别方法流程图；

图 13 为本发明一个实施例中所建立仿真的数据集的地下结构模型；

图 14 为本发明一个实施例中所建立仿真的数据集的探地雷达检测数据；

图 15 为本发明一个实施例中所构建的时间维度压缩的网络结构；

图 16 为本发明一个实施例中所构建的空间分布特征自编码和标签图解码的网络结构；

图 17 为本发明一个实施例提供的探地雷达智能识别系统；

图 18 为本发明一个实施例提供的探地雷达智能识别系统的工作流程图；

图 19 (a) - 图 19 (c) 分别为本发明一个实施例的雷达检测数据、实际标签图和目标体检测结果；

图 20 (a) - 图 20 (c) 分别为本发明又一实施例的雷达检测数据、实际标签图和目标体检测结果；

图 21 (a) - 图 21 (c) 分别为本发明又一实施例的雷达检测数据、实际标签图和目标体检测结果。

其中，1. 机器人平台，2. 可旋转伸缩台架，3. 多关节蛇形机械臂，4. 检测装置内置式负载测量臂，5. 控制部，6. 超声成像装置，7. X 光背散射装置，8. 雷达，9. 隧道表面，10. 履带，11. 可伸缩轨道轮，12. 联动机构，13. 液压杆，14. 步进电机，15. 激光 3D 扫描仪，16. 激光脉冲震源，17. 超声相控阵列，18. 测距传感器，19. 弹性轮，20. 液压机构，21. X 射线源及辐射屏蔽，22. 可折叠单光子探测器阵列，23. 姿态精密控制单元，24. 自主行进控制子系统，25. 多协议通信子系统，26. 机械臂控制子系统，27. 检测控制子系统，28. 电源及充电系统，29. 处理器模块，30. 浮动搭载装置，31. 折叠式弓形撑开装置，32. 浮动贴合装置，33. 避障监控装置，34. 控制器，32-1 铰链，32-2 减速机，32-3 激光测距传感器，32-4 位置传感器，32-5 扭矩传感器，32-6 支撑杆，32-1 壳体，32-2 无损检测设备固定台，32-3 激光测距传感器阵列，32-4 避障监测装置，32-5 可伸缩弹力轮，32-6 测力传感器。

## 具体实施方式

下面结合附图与实施例对本公开作进一步说明。

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

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公开的示例性实施方式。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。

在本公开中，术语如“上”、“下”、“左”、“右”、“前”、“后”、“竖直”、“水平”、“侧”、“底”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，只是为了便于叙述本公开各部件或元件结构关系而确定的关系词，并非特指本公开中任一部件或元件，不能理解为对本公开的限制。

本公开中，术语如“固接”、“相连”、“连接”等应做广义理解，表示可以是固定连接，也可以是一体地连接或可拆卸连接；可以是直接相连，也可以通过中间媒介间接相连。对于本领域的相关科研或技术人员，可以根据具体情况确定上述术语在本公开中的具体含义，不能理解为对本公开的限制。

本实施例的一种隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统，包括行走部、支撑部、检测部和控制部。

在具体实施中，如图 1 所示，所述行走部包括机器人平台 1，所述机器人平台 1 两侧设置有履带 10。履带用于在公路隧道行进。

在其他可选实施方式中，所述机器人平台 1 底部还对称设置有若干个可伸缩轨道轮 11，所述可伸缩轨道轮 11 之间通过联动机构 12 共同伸缩，以实现在不同洞径的隧道内运行。

需要说明的是，本实施例的联动机构包括：链条、齿轮或连杆。

本领域技术人员也可采用其他现有的联动结构来实现。

具体地，履带和轨道轮分别在控制部的控制作用下，通过相应驱动机构的驱动作用下带动机器人平台运动。

在具体实施中，支撑部设置在行走部上；所述支撑部包括可旋转伸缩台架，可旋转伸缩台架上设置有并行工作的双机械臂。

具体地，所述双机械臂中的一条机械臂为多关节蛇形机械臂 3，另一条机械臂为检测装置内置式负载测量臂 4。

多关节蛇形机械臂 3 和检测装置内置式负载测量臂 4 通过可旋转伸缩台架 2 与机器人平台 1 相连接，可旋转伸缩台架 2 顶部通过液压杆 13 控制垂直升降，并通过步进电机 14 控制平台水平伸出，多关节蛇形机械臂 3 和检测装置内置式负载测量臂 4 置于可旋转伸缩台架 2 顶部。其中，液压杆 13 和步进电机 14 均与控制部相连。

作为一种实施方式，所述检测装置内置式负载测量臂包括位于后臂、中臂和前臂，所述后臂与可旋转伸缩台架 2 相连，所述后臂与中臂的关节点与液压机构 20 相连，所述液压机构用于辅助提升检测装置内置式负载测量臂的负载能力。

在具体实施中，检测部安装在支撑部上，用于对隧道结构同一位置不同深度范围的表现病害和内部病害进行多尺度检测，并将检测的病害信息传送至控制部。

具体地，所述检测部包括但不限于激光 3D 扫描仪 15、雷达 8、超声成像装置 6 和 X 光背散射装置 7。

激光 3D 扫描仪 15 安装在可旋转伸缩台架 2 上，用于采集包含隧道衬砌表面的裂缝及渗漏水病害的隧道全景图像信息。

雷达 8 与超声成像装置 6 设于多关节蛇形机械臂顶端，雷达 8 可选用 GHz/THz 宽频段雷达，用于获取较深层衬砌病害。

超声成像装置 6 用于获取隧道衬砌表面裂缝的深度及宽度。如图 2 所示，超声成像装置 6 设置有激光脉冲震源 16 与超声相控阵列 17 两类激震源，对于隧道内壁表面较为平滑区域采用激光超声技术（如公路隧道顶部、地铁隧道等），利用非接触式的激光脉冲激震源产生弹性波，对于表面有阻燃材料的公路隧道两侧采用超声相控激震。

雷达 8 与超声成像装置 6 内嵌于浮动搭载装置 30，其中搭载装置 30 包括测距传感器 18、弹性轮 19。采用测距传感器 18 精密控制相控阵列与隧道表面距离，弹性轮 19 设有力矩传感器，可控制超声及雷达与被测结构表面的紧贴程度。

X 光背散射装置 7 内置于检测装置内置式负载测量臂 4 中，用于对隧道衬砌表面裂缝内部进行毫米级测量。X 光背散射装置 7 的供电及水冷散热系统内置于中臂，以减轻顶端前臂负重，X 射线源及辐射屏蔽 21 内置于顶端筒形前臂内，可折叠单光子探测器阵列 22 环形布设与前臂顶部，前臂单独设置姿态精密控制单元 23，以控制该测量臂完成伸缩及旋转等多角度精细动作。

在具体实施中，如图 3 所示，控制部 5 包括：自主行进控制子系统 24、多协议通信子系统 25、机械臂控制子系统 26、检测控制子系统 27、电源及充电系统 28、以及深度学习超级处理器模块 29。深度学习



超级处理器模块 29 内置 Deeplab、GAN、Faster R-CNN 等深度学习算法，上述算法首先对表观病害图像、雷达 B-Scan 图像、X 光背散射图像、超声图像等表观及内部病害图像数据进行训练，建立病害诊断模型。

具体地，控制部，其被配置为：

构建基于深度神经网络的病害诊断模型；

利用历史表观病害和内部病害信息及已标注的像素级病害类型，构建数据集，训练基于深度神经网络的病害诊断模型；

实时接收病害信息并输入至训练后的病害自动识别与诊断模型，自动识别出病害类型、位置及轮廓。

以表面病害识别为例：表观病害主要指隧道衬砌表面的裂缝、剥落、渗水病害。采用 Deeplab 深度学习网络进行表观病害识别，Deeplab 网络的特点是采用空洞卷积结构，可以在特征编码过程中充分提取高层次特征并同时保留很好的位置信息不丢失，提高病害识别的精细度，且不增加计算量。具体步骤为：首先，对采集到的表观病害图片进行预处理，主要是图片裁剪与数据增广。然后对图像进行像素级标注，标注出每一个像素点病害的类型，并区分训练集与验证集。将制作好的标签和对应的原图输入到 Deeplab 网络进行训练，待多轮迭代网络模型收敛后获得病害识别模型。最后将实时采集的雷达图像作为测试集输入到训练好的 Deeplab 网络模型，网络输出的图像去除了原图片中其他非病害信息，只保留原图中裂缝、剥落、渗漏水等不同类型病害的轮廓，进而实现病害类型及轮廓的自动识别。

所述控制部，还配置为：

对隧道环境进行定位及构图，并对行走部进行路径规划。

基于激光 SLAM 及视觉 SLAM 等技术对光照不均匀的隧道环境进行定位及构图，利用内置于超级处理器模块的深度学习全景分割算法规划进行路径规划。

本实施例的隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统的工作方法，包括：

激光 3D 扫描仪可同时获取三维激光点云信息及其对应位置的图像信息，可同时为激光 SLAM 及视觉 SLAM 技术提供可靠数据。本实例中采用激光 SLAM 及视觉 SLAM 技术主要目的有二：一是机器人行进路劲规划，用于控制机器平台在隧道中行走；二是检测机械臂检测路劲规划，用于定位重点检测区域，并控制机械臂移动至重点检测区域进行检测。

对于目的一，主要采用激光 SLAM 技术，考虑隧道中光照等环境，激光 SLAM 技术更加稳定。其具体过程为：采用激光 3D 扫描仪扫描隧道环境，获取点云信息；通过对不同时刻两片点云的匹配与比对，确定机器平台在隧道中的位置，即所处公里数、距离隧道边墙尺寸等，完成对机器人自身的定；机器平台移动，采用栅格地图表示法确定移动机器人平台及隧道底板、侧壁、拱顶及各类障碍物在栅格地图中的坐标，构建栅格地图；最后采用 dynamic window approach (DWA) 等算法规划机器平台的行径路径。

对于目的二：需要采用激光 SLAM 与视觉 SLAM 协同，共同完成检测路径的规划。基本原则为：以视觉 SLAM 技术确定具体重点区域位置，基于获取的表面图像采用 ORB-深蓝等常规构图算法对隧道表面病害进行构图，通过深度学习等病害识别算法分析，确定病害类型、轮廓及位置，进而划定重点区域。此时采用激光 SLAM 技术作为辅助，确定障碍位置，进而控制机械臂动作，对裂缝、渗漏较多的重点位置进行检测。

行走部以一定速度在隧道中运动；

支撑部上的检测部对隧道结构同一位置不同深度范围的表观病害和内部病害进行多尺度检测，并将检测的病害信息传送至控制部；

控制部构建基于深度神经网络的病害诊断模型；利用历史表观病害和内部病害信息及已标注的像素级病害类型，构建数据集，训练基于深度神经网络的病害诊断模型；实时接收病害信息并输入至训练后的病害自动识别与诊断模型，自动识别出病害类型、位置及轮廓；

完成一个重点区域检测后，自动移动到下一个重点检测区域进行监测。

该方法还包括：

控制部将实时接收病害信息及自动识别出病害类型保存至历史数据库中；利用历史数据库中的数据重新对病害诊断模型进行训练，得到更新后的病害诊断模型；利用更新后的病害诊断模型进行病害诊断。诊断结果如图 5 (a) -图 5 (l) 所示。

具体地，如图 4 所示，本实施例的隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统的工作流程为：

行走部以一定速度在隧道中运动；

支撑部上的检测部对隧道结构同一位置不同深度范围的表观病害和内部病害进行多尺度检测，并将检测的病害信息传送至控制部；

从采集的内部环境全景信息提取隧道结构表面的裂缝及渗漏信息，基于 Deeplab 等像素预测算法对内部及表面裂缝、渗漏水等多类病害进行诊断，将表面裂缝以及渗漏水密集区域标记为重点检测区域，初步规划检测区域；

蛇形机械臂控制器发出命令，控制蛇形机械臂带动雷达动作，采用宽频段雷达对隧道衬砌结构内部空洞等病害进行检测，采用深度学习目标检测算法快速标记内部病害区域，采用雷达智能识别算法识别病害，同时利用激光超声成像装置重点检测，获取裂缝的深度及宽度；

忽略无病害区域及病害较少的区域，仅以雷达及超声成像装置检测到的裂缝及空洞较多的区域再次作为重点区域，控制大负载机械测量臂动作，利用X光背散射装置对该区域结构内部的毫米级裂缝进行精细测量；

完成一个重点区域检测后，自动移动到下一个重点检测区域进行监测。

在具体实施中，基于深度学习算法处理探地雷达采集的 B-SCAN 图像，实现隧道内部空洞、脱空、裂缝、不密实多病害的同时分类和快速定位；其中，采用深度目标检测算法以及雷达智能识别算法等对病害进行识别。

## 实施例二

在实施例一的基础上，本实施例提供了一种可伸缩机械臂，用于设于机器人平台上。

所述机械臂为可伸缩机械臂，如图 6 所示，其工作端末端，即延长臂末端通过折叠式弓形撑开装置 2 连接浮动贴合装置。具体地，机械臂采用的是工业用机械臂，机械臂的延长臂用于将浮动贴合装置移动到衬砌表面的附近。

所述折叠式弓形撑开装置 31 包括多段相互连接的支撑架，本实施例中为四段，且相邻两段支撑架之间通过转轴旋转连接，所述转轴通过减速机驱动；所述减速机的传动输出轴上设有扭矩传感器。在相邻两段支撑杆的连接处的外层还设有铰链，用于限制旋转角度在 0-120° 范围之内。每段支撑架上均设有与其方向一致的电动导轨，每个电动导轨上均设有滑轮，浮动贴合装置 32 通过法兰固定到每一个滑轮上，可沿电动导轨移动。

电动导轨的滑轮上安装位置传感器 31-4，用于感测浮动贴合装置在电动导轨上的位置。通过浮动贴合装置在导轨上的运动，能够使得浮动贴合装置到达指定测点或测线处，以及达到避障的目的。

每一个电动导轨两端均设有激光测距传感器 31-3，用于感测导轨两端与被测表面之间的距离。

如图 7 所示，所述浮动贴合装置 32 包括：壳体 32-1，所述壳体 32-1 外表面设有一个或多个可伸缩弹力轮 32-5，所述一个或多个可伸缩弹力轮 32-5 均用于与隧道衬砌被测表面紧密贴合，且每个可伸缩弹力轮 32-5 内均设置测力传感器 32-6，用于感测贴合装置与被测表面之间的贴合力；具体地，所述可伸缩弹力轮 32-5 包括连接在壳体 32-1 外表面的杆件，所述杆件的末端与测力传感器 32-6 的一端连接，测力传感器 32-6 的另一端与弹簧的一端连接，所述测力传感器和弹簧均置于柱状容纳腔内，所述柱状容纳腔远离杆件的一端封堵，另一端开口，且开口的大小使得柱状容纳腔能够套设于所述杆件外部；所述柱状容纳腔封堵的一端外部通过支架连接行走轮。进行病害检测时，所述行走轮紧贴被测表面，压力通过弹簧传递至测力传感器，从而测得贴合装置与被测表面之间的贴合力。

所述壳体 32-1 外表面还设有激光测距传感器阵列 32-3，用于监测贴合装置与被测表面之间的距离。

所述测力传感器 32-6 和激光测距传感器阵列 32-3 均与控制器连接，在设备运行过程中，实时将贴合装置与被测表面之间的贴合力 and 距离信息传输至控制器，控制器根据贴合力 and 距离信息调整贴合装置与被测表面之间的相对距离，保证在贴合装置始终与被测表面贴合的前提下装置的安全。

**作为一种实施方式**，所述壳体为立方体形状，每个浮动贴合装置均设有四个可伸缩弹力轮 32-5，分别位于浮动贴合装置底面的四个底角处，在可伸缩弹簧轮中内置弹簧测力传感器用于反馈整个贴合过程的贴合力，四个轮采用麦克纳姆轮，能够使“力-距”浮动贴壁装置在与隧道衬砌表面接触运动过程中滑动运动，以保证检测设备在检测过程中的连续性。

如图 9 所示，每个浮动贴合装置的侧面安装激光测距传感器阵列 32-2，可采用三角形或者菱形布设方式。三角形布设方式即在前进方向的侧面和前进方向左右的两个侧面安装激光测距传感器阵列 32-2；菱形布设方式即在浮动贴合装置的四个侧面均安装激光测距传感器阵列 32-2。通过布设多个激光测距传感器，能够完整的判断一小块区域是否平整。完成的步骤是首先前进方向的激光传感器当检测到距离变化时，在判断中间的激光传感器是否有距离变化，从而可以判断是某一个点还是一个区域的凹凸不平。

在机械臂托举“力-距”浮动贴合装置到达隧道衬砌表面测点位置时，可以根据激光传感器和弹簧测力器反馈回来的信号，配合机械臂可实时的调整“力-距”浮动贴合装置和衬砌表面的间距，保证检测设备检测的精度。

所述壳体 32-1 朝向前进方向的外表面还设有避障监测装置 32-4，由激光雷达和监控摄像头组成，用于监测运行过程中前方衬砌的表面信息；

激光雷达和监控摄像头将运行过程中获取的前方衬砌表面信息传递到控制器，控制器再通过 Fast-RCNN 或 Faster-RCNN 等识别算法识别出前方的障碍物后，协同控制机械臂和贴合装置的位姿产生预警避障动作。

所述壳体内还设有无损检测设备固定台 32-2，用于固定所述无损检测设备 33，用于检测隧道衬砌结构的内部病害。所述无损检测设备固定台 32-2 上预留用于固定超声探测器、探地雷达或太赫兹检测设备探头等无损检测设备的卡槽。为了使得无损检测设备固定的更为牢固，提高检测稳定性和精度，所述壳体内部相对的两个侧面分别设有一齿条；所述无损检测设备固定台包括一个水平导轨和与该水平导轨垂直连接的两个竖直导轨；所述水平导轨的两端分别设有一个齿轮，与两个齿条分别相啮合；所述水平导轨用于固定无损检测设备的一侧设有齿条；两个竖直导轨通过齿轮与水平导轨上的齿条相啮合。上述齿轮均连接驱动电机，驱动电机与控制器连接，通过控制水平导轨在壳体内部的相对位置、竖直导轨之间的距离，使得浮动贴合装置内能够固定不同大小不同形状的无损检测设备。用于固定无损检测设备的卡槽设于水平导轨上。

所述壳体底面，即朝向被测装置的一面设有透明盖体。可以采用亚克力板、聚丙烯板、聚苯板等材料，这种材料对雷达波探测方向信号没有影响。

壳体其他部分和折叠式弓形导轨和延长臂采用碳纤维、纳米纤维等轻量化材料，上述材料能极大地降低装置自身的重量，能够搭载更重的无损检测设备，能满足在移动探测过程中检测设备的稳定。

上述减速机、扭矩传感器、激光测距传感器和位置传感器均连接至控制器，可以实时测量与被测区域的表面距离以及弓形展开导轨的角度信息，各导轨两端距离被测表面的距离信息，控制器根据反馈回的导轨间的旋转角度和距被测表面的距离，通过减速机实时调整各转轴的旋转角度，使得展开后的弓形撑开装置能够贴合不同弧度的衬砌表面。

所述折叠式弓形撑开装置 31 的结构不仅实现了隧道衬砌病害检测过程中对不同弧度衬砌表面的适应性，在不运行的状态下，还便于收纳，如图 8 所示。

所述机械臂和控制器均安装在病害检测机器人的移动平台上，用于实现所述多轴机械臂装置、折叠式弓形撑开装置 31、搭载检测设备的浮动贴合装置 32 和避障监控装置 33，多个装置的联动控制，保证检测设备与隧道衬砌内壁的精密贴合与快速移动。

如图 10 所述，病害检测机器人启动后，首先初始化机械臂，将可折叠弓形撑开装置展开并送至被测表面附近；所述控制器实时接收浮动贴合装置上的测距传感器、测力传感器发送的感测信息、避障监测装置发送的前方被测表面信息、可折叠弓形撑开装置上测距传感器发送的感测信息等，协同控制机械臂、可

折叠弓形撑开装置的调整，具体控制过程如下：

(1) 判断可折叠弓形撑开装置展开后位置最高的电动导轨的接触力是否大于最小接触力，若否，调整机械臂，使该导轨上的浮动贴合装置与被测表面更为紧密贴合；若是，进入步骤(2)；本实施例中位置最高的电动导轨为从下往上第二个的导轨；

(2) 判断各导轨的端部与衬砌表面的距离是否均在设定范围内，若否，获取距离不在设定范围内的导轨编号，调整可折叠弓形撑开装置，使该导轨的端部与被测表面的距离均在设定范围内；若是，初始化结束，病害检测机器人运动，进行表面病害检测，进入步骤(3)；

(3) 运动过程中，判断是否有停止信号，所述停止信号包括病害检测结束信号；若是，控制病害检测机器人停止运行；若否，判断是否存在导轨与被测表面的接触力大于设定的最大接触力，若是，生成重新初始化停止信号，控制病害检测机器人停止运动，进入步骤(4)；

(4) 判断位置最高的电动导轨接触力是否大于设定的最大接触力，若是，调整机械臂放松位置最高的电动导轨上的浮动贴合装置与被测表面之间的贴合；若否，调整可折叠弓形撑开装置，返回步骤(2)。

在运动过程中，时刻判断浮动贴合装置的激光测距传感器传回来的距离数据，在任意一个导轨上的浮动贴合装置与衬砌表面距离判定规则是：当在前进方向上先判断第一个激光测距传感器的距离是否在设定的范围内，若在指定的范围内，则继续运动，若不在指定的范围内，则判断第二个和第三个激光测距传感器测量的距离是否在指定的范围内，若在指定的范围内，则不改变贴合装置的距离，若不在指定的范围内，则停止运动重新进行贴合操作。

移动平台运动过程中，根据避障监测装置发送的前方被测表面信息判断前方是否存在障碍物，当存在障碍物时，根据障碍物大小、形状和位置选择一种或多种避障方式，避障方式包括：调整浮动贴合装置在电动导轨上的位置、调整可折叠弓形撑开装置中各支撑杆之间的旋转角度，以及调整机器臂的伸缩长度。例如，若障碍物很小，调整浮动贴合装置在电动导轨上的位置即可实现避障。

本实施例的浮动贴合装置为“力-距”浮动贴合装置，通过可伸缩弹力轮与衬砌被测表面贴合，通过可伸缩弹力轮内置的测力传感器获取贴合力，通过贴合装置上的激光测距传感器阵列获取与被测表面之间距离，基于与被测表面之间贴合力和距离调整浮动贴合装置与被测表面之间的贴合程度，既保证了浮动贴合装置能够时刻与被测表面贴合，又保护了装置不会因被测表面的凹凸不平受到损坏；

且浮动贴合装置上，激光测距传感器阵列布设于浮动贴合装置的多个侧面，保证了能够对浮动贴合装置与被测表面整个贴合面的监测，保障了设备的安全；

本实施例的浮动贴合装置内设置无损检测设备固定台，并预留超声探测器、探地雷达、太赫兹等检测设备探头的卡槽，能够根据用户需求安装无损检测设备；

本实施例的浮动贴合装置设于由多段支撑杆连接而成的可折叠弓形撑开装置上，通过测距传感器实时监测多段支撑杆与被测表面之间的距离，根据距离调整多段支撑杆之间的角度，使得运行过程中，可折叠弓形撑开装置的多段支撑杆能够适应于隧道衬砌不同弧度的表面。

### 实施例三

在实施例一的基础上，本实施例提供了一种多功能云台，可设于机器人平台上。

所述多功能云台，如图 11 所示，为半球形，通过支架设于车体上方，本实施例中为 U 型支架，半球形多功能云台夹持在 U 型支架内，具体地，所述多功能云台的两侧通过分别通过横滚电机与支架连接，使得云台能够进行俯仰运动，所述支架通过竖滚电机连接在车体上方，使得云台能够进行水平方向上的旋转。

为了实时感测和精准控制云台的运动，本实施例还设置多个传感器，包括三轴陀螺仪和转矩传感器，其中，陀螺仪设于支架上，转矩传感器设于各个电机上，分别用于获取云台转动加速度和转动角度信息，以及电机的转矩信号，并发送至控制器。所述陀螺仪和转矩传感器，均与控制器连接。控制器接收陀螺仪发送的转动方向、角速度、转动加速度信息，以及三个转矩传感器发送的力矩信息，通过预设的云台摆动程序，结合图像处理所得的图像畸变反馈与电机力矩反馈信息，对三个驱动电机的转动发生干预信号，分

别且实时调控三个驱动电机转速。

所述多功能云台中设有用于病害检测的多个检测模块，均与控制器连接。所述多个检测模块包括：三维建模和变形检测模块、裂缝和脱落检测模块、渗漏检测模块和激光测距模块。其中，三维建模和变形检测模块用于对隧道表面衬砌进行建模，用于隧道的整体观测；裂缝和脱落检测模块主要由可见光摄像头构成，负责拍摄隧道表面衬砌的光学影像，用于检测肉眼可见的隧道表面衬砌的裂缝和脱落；渗漏检测模块主要由红外线热成像摄像头构成，负责拍摄隧道表面或浅层可能出现的低温区域，用于检测隧道内部可能出现的渗漏；激光测距模块主要由激光测距仪构成，负责采集“像-物”距离，提供图像空间与物理空间的转换关系，为后续的危害几何参数评估，采样图像的规格校准，多病害的数据叠加等一系列病害数据分析提供支持。

所述多功能云台的托载平台外壳为不锈钢或塑料合金材质，呈半球状，半球切面上设有四个孔洞，用于容纳三维建模和变形检测模块的激光发射单元、裂缝和脱落检测模块的可见光摄像头、渗漏检测模块的红外摄像头与激光测距模块的激光发射单元，且四个孔洞大小均大于各自所容纳的激光发射单元或摄像头的大小，为其旋转提供一定空间，构成一个“四目”装置。其中，裂缝和脱落检测模块的可见光摄像头、渗漏检测模块的红外摄像头与激光测距模块的激光发射单元的位置关系满足：三者在同一水平线上，并且，激光测距模块的激光发射单元位于中心，可见光摄像头和红外摄像头分别位于该激光发射单元的两侧，且与激光发射单元的距离相等。本实施例中，红外摄像头与可见光摄像头分别以 5 厘米间距安置在激光测距仪两侧。

所述三维建模和变形检测模块、裂缝和脱落检测模块、渗漏检测模块和激光测距模块均通过支撑机构固定多功能云台内部。其中，激光测距模块设置于支撑机构中间，裂缝和脱落检测模块和渗漏检测模块分别设置于激光测距仪两侧，且通过转向电机设于支撑机构上，两个转向电机分别用于控制裂缝和脱落检测模块和渗漏检测模块的转向，使得在病害检测过程中裂缝和脱落检测模块的可见光摄像头、渗漏检测模块的红外摄像头的视野中心与激光测距模块的激光发射单元的点位三点重合，对完全相同的隧道衬砌表面进行成像。由于两个检测设备存在间隔距离，所以在不调整摄像头拍摄角度的情况下，红外摄像头与可见光摄像头虽指向相同，但拍摄的衬砌表面仍存在些许误差，导致后续病害数据融合时出现位置偏差，造成病害等级评估错误，故通过每个检测设备下方安装的小角度转向电机，所述控制器结合测距仪的距离信息与多图像匹配校正的反馈信息，发送控制信号实时调整各个所述转向电机的转动角度，将左右两侧的检测设备分别向中间转动相应的角度，角度的具体数值结合激光测距仪反馈的距离信息，通过控制器的图像处理单元计算后得出。通常情况下，两侧转向电机转动的角度值相同且方向相反，使得可见光图像中心、红外线图像中心与激光测距点位。三维建模和变形检测模块的位置可位于激光测距仪的上方或下方，在此不做限定，其位置设定以保证云台稳定性为准。

四个检测模块的安装位置与其重量相关，目的是保证云台在快速往复摆动过程中的稳定性。预先获取各个检测模块的重力信息，通过托载平台内部的支撑机构的分配，并且，支撑机构上各检测模块的两侧均加装限位块，使得各装置在摆动过程中重心不发生过大偏移，保证驱动电机的转速不受重心偏移的影响。此处对获取重力信息的具体方式不做限定。本实施例通过获取转矩信息、转动信息，并根据检测装置的初始重力信息，确定检测装置的重心相对三个驱动电机的转轴的偏移量信息，通过控制器的计算获得偏移量信息，并根据偏移量信息对云台进行重心初始化。

移动客户端和综合病害检测装置的控制器之间通过无线通讯模块连接，实时接收无线通讯模块发出的隧道衬砌结构病害检测结果，以及发送控制信号至控制器。

所属的移动客户端分为安装在电脑上主客户端与安装在移动电话上的从客户端，通过电脑上安装的应用程序可以接收来自隧道检测车的全部数据，同时可以发送即时的控制信号至隧道检测车，用于人为干预

可能出现的特殊情况；安装在移动电话上的从客户端支持安卓平台以及 iOS 平台，可以实时接收来自隧道检测车的检测数据与部分关键信息。

一种隧道衬砌结构病害综合检测工作方法，包含如下工作步骤：

S1. 在每一次检测作业开始前，控制器通过无线通讯模块接收移动客户端发送的启动指令，控制移动载体、云台和各检测模块启动；其中，所述启动指令包括本次病害检测作业的路线、云台的摆动速度和移动载体的移动速度；同步执行步骤 S2、S3、S4；

S2. 多功能云台在接收到所述启动指令后，按照程序调整云台朝向移动平台正右方并开始沿隧道横剖面做定速的摆动动作；具体地，所述摆动速度可通过可见光和红外成像质量确定，当摆动速度过大时，图像畸变程度过大就无法执行准确的判断；

S3. 智能移动载体在接收到所述启动指令后，按照程序预设的速度和路线执行前进动作；

S4. 综合检测装置接收到所述启动指令后，自动调整检测模块，保证不同的检测模块拍摄同一目标区域：各个检测模块和激光测距模块同时启动，同步执行拍摄动作；在移动载体前进期间，随多功能云台的摆动，同时且同步的拍摄相同隧道衬砌的图像，所述激光测距模块实时记录当前图像的中心点的距离信息，并分别且同时将综合数据传输至所述控制器进行图像处理；

S5. 控制器中的图像与数字采集器接收到所述综合检测装置发出的综合数据后，发送至所述图像处理器并对综合数据进行处理与分析，后将结果发送到大容量储存单元，同时将病害关键信息通过无线信号收发器发送至移动客户端；

S6. 移动载体行驶至预设终点后，控制器发送停机指令，装置停机。

步骤 S2 中，当云台进入正式工作状态后，竖滚电机将多功能云台的方位旋转至车体正右方，两个横滚电机驱动夹持的球机做快速的往复摆动动作，驱动半球状的托载平台进行相应动作，通常情况下，摆动角速度大于  $180^\circ$  /秒，驱动电机转速实时回传，控制器结合多元信息动态调整云台转速。

步骤 S4 中，控制器实时接收激光测距模块发送的与当前被测表面的距离信息，根据红外摄像头、可见光摄像头与激光发射模块之间的距离，以及激光发射模块与被测表面之间的距离，计算红外摄像头、可见光摄像头需偏转的角度，使左右两个摄像头拍摄完全相同的区域。

本实施例中，因为红外摄像头和可见光摄像头各自间隔激光测距仪的距离均等于 5 厘米，如激光测距仪反馈的距离信息为  $D$ （单位：m），可得小角度转动电机的转动角度约等于  $\arctan \frac{0.05}{D}$ ，通常情况下，所述小角度转动电机的转动角度小于 2 度，可使得左右两个摄像头拍摄完全相同的区域，角度的旋转会造成拍摄图像的些许畸变，可通过距离信息对畸变图像进行校准和修正，最终获得相同区域的隧道衬砌表面图像。

步骤 S5 中，图像处理具体方法如下：

S501 三维建模和变形检测模块获取隧道衬砌结构表面的轮廓和变形信息；裂缝和脱落检测模块获取目标区域可见光波段的图像信息；渗漏检测模块获取隧道衬砌结构表面目标区域的红外光波段图像信息；激光测距模块获取隧道衬砌结构表面目标区域与多功能云台的距离信息。

S502 各检测模块采集的图像数据进行预处理，使得可见光图像与红外线图像的分辨率、尺寸相同，结合激光测距的距离信息，可得出该图像上下边界之间的角度范围、图像左右边界之间的实际距离，通过以上信息对拍摄的连续图像进行离散采样，获取不同区段、不同角度的采样图像，采样图像分为可见光采样图像与红外线采样图像。

S503 通过语义分割神经网络分别对可见光采样图像与红外线采样图像进行病害的识别与标记。

S504 获取隧道三维建模后，各个采样图像结合对应的多功能云台仰角信息以及车辆行驶位置信息，将图像首尾相拼，左右相连，并贴附在隧道三维模型对应的位置上。

S505 隧道衬砌表面病害结果分析，其中包括：根据裂缝、脱落、渗漏病害所测量的几何参数，对病害的严重程度进行打分，分数与危险等级呈正相关；计算数据叠加后的综合病害图像中所有病害的分数总和，并根据分数高低进行排序。

所述 S505 中，将可见光拍摄到的裂缝与脱落图像作为底图，附加红外图像中可能出现的渗漏病害，结合距离信息估计所有病害的几何参数并依照危险等级的高低进行评分。

每张图像记录智能移动载体获取的位置信息与多功能云台获取的角度信息，后将所得结果输出至客户端。

通过综合病害评分以及三维可视化，维修人员能够快速对病害程度划分优先级，并且快速定位到病害的相应位置，有助于及时维修。

当控制器得出隧道病害图像处理结果后，会将全部病害数据结果分发至一个主客户端与多个从客户端。主客户端由一台计算机构成，从客户端可为手机或计算机；主客户端同时负责接收车辆运行信息，其中包括电池燃料剩余、电池温度、使用寿命，车辆位置与速度，通常情况下，隧道检测车按照预设的程序进行工作，但遇到特殊情况或人为干预的情况下，隧道检测车优先依照主客户端发送的指令执行，该指令优先级为最高级。该方法可以保证处理信息同时发送至检测方与维修方，提高隧道表面衬砌病害的处理效率。

本实施例采用多个病害检测模块，包括激光测距模块、可见光成像、红外成像模块以及激光雷达，搭建了“多目”云台，并将激光测距模块作为中心，以其测得的与被测表面之间的距离作为参照，对可见光摄像头和红外摄像头方向进行修正，保证了针对同一目标区域进行成像，有利于后续的综合评判。

本实施例基于多个病害检测模块的初始重量和在云台中的重心位置，对所述多个病害检测模块在云台中的重心分配进行初始化，保证了云台在运行过程中的稳定性。

本实施例通过“多目”云台在实现多种病害检测的同时，还基于所测得的病害进行综合评分，并通过移动客户端进行可视化，通过综合评分结果，相关的维护人员可以根据病害的复杂程度和危险等级进行工作协调，优先处理危险且复杂的隧道病害，大幅提高工作效率；

本实施例基于三维点云数据进行隧道三维重建，将基于可见光和红外图像检测的病害识别结果以及评分结果叠加到三维模型中，有助于维修人员能够快速对病害程度划分优先级，并且快速定位到病害的相应位置进行维修。

本实施例将锂电池引入隧道检测工作，避免了频率的充电，提高了检测效率。

#### 实施例四

实施例一和二中均涉及了探地雷达，本实施例提供了一种基于深度学习的探地雷达智能识别方法，用于在病害检测过程中，基于探地雷达信号实现病害等目标体的检测，包括如下步骤：

一种基于探地雷达的地下工程目标体智能识别方法，如图12所示，包括以下步骤：

步骤S1、获取计算机模拟数据集，所述数据集包括多组探地雷达数据剖面图-目标体标签图数据对。

本实施例的识别方法主要针对隐蔽的异常体或病害，包括地下工程的混凝土钢筋及结构病害，每一类目标体均赋予一个唯一的类型标识码。当然，本实施例的识别方法还能应用于破碎、溶洞、断层等地质异常体、路面裂缝、沉降等路面病害，以及地下的各类管道。

图13和图14分别为计算机模拟数据集中的隐蔽目标体标签图和探地雷达数据剖面图。构建多组探地雷达数据剖面图-目标体标签图数据对的方法为：

针对多种、背景介质、形状、尺寸及分布的地下工程目标体的介电常数模型进行模拟；

对于每一介电常数模型进行正演，分别生成不同频率的雷达数据剖面图，得到多组探地雷达数据剖面图-目标体介电常数模型数据对；

对于每一组探地雷达数据剖面图-目标体介电常数模型数据对中的目标体介电常数模型进行轮廓识别，

将轮廓范围以内的像素值赋值为相应的类型标识码，得到多组探地雷达数据剖面图-目标体标签图数据对。

标签图根据目标体类型对目标体进行像素级标注，不同类型目标体的轮廓用不同的像素值进行区分。

步骤S2、构建探地雷达智能识别深度学习网络架构；

所述的探地雷达智能识别深度学习网络一共由16层组成，包括6层时间维度压缩的网络结构、4层空间分布特征自编码的网络结构、6层标签图解码的网络结构三部分。

如图15所示，本实施例采用时间维度压缩网络结构用于探地雷达检测数据的特征提取。所述6层时间维度压缩网络结构由 $3 \times 1$ 和 $3 \times 3$ 的卷积结构和残差块组成；其中，每层卷积结构包括两次卷积操作（即做两次卷积运算），第一次卷积操作采用 $3 \times 1$ 卷积、步长为2压缩时间维度，第二次卷积操作采用 $3 \times 3$ 卷积、步长为1稳定特征。残差块将第2层卷积的输出与第4层的卷积连接到一起，可以防止梯度消失并解决网络的退化问题。结合图15和图16可以看出，异常体的雷达反射信号在雷达剖面图中表现为抛物线形状，且一条抛物线对应一处病害，由于通常输入深度神经网络的雷达剖面图在时间维度上数据量远大于其空间维度数据量，导致直接采用常规卷积（如 $3 \times 3$ 、 $5 \times 5$ 等卷积）进行特征提取，难以保证异常体特征提取的完整性。因此首先采用一维卷积进行时间维度压缩，解决时间维度-空间维度数据量不平衡的问题，保证目标体反射信号特征的完整提取，与作为模型输出的目标体标签图中目标体的数量一致。

如图16所示，采用4层全连接层组成的自编码器网络结构和6层上卷积与残差块组成的标签图解码器网络结构。其中，4层自编码器分别对每个特征通道进行编码，自动学习每一个特征通道内探地雷达检测数据剖面图与目标体标签图中目标体的空间对应性。自编码器网络结构通过采用全连接结构单独抽取时间压缩后提取的每一层特征，针对每一层特征自动学习异常体类型和雷达发射信号的空间对应性，并生成与标签图尺寸相同维度的特征图，方便解码。6层解码器采用卷积核大小为 $4 \times 4$ 或 $3 \times 3$ 的卷积对自编码器输出的特征图进行上采样，残差块将第12层卷积（解码器的第2层卷积）的输出与第14层的卷积（解码器的第4层卷积）连接到一起，防止梯度消失并解决网络的退化问题，来构建最终识别的标签图。

步骤S3、训练深度学习模型，并获得深度学习模型的参数，得到目标体识别模型。

所述深度学习模型采用计算机模拟的数据集并使用Focal Loss或者Cross-Entropy Loss和Lovasz-Softmax Loss相结合作为损失函数进行训练，所述计算机模拟的数据集由多种频率的探地雷达数据及其对应的隐蔽目标体标签图组成，将其一起输入到深度学习模型中来训练深度学习模型。

步骤S4、获取多组真实的探地雷达数据剖面图-目标体标签图数据对，对模型参数微调，得到适用于真实数据的探地雷达智能识别模型。

获取真实的多组探地雷达数据剖面图-目标体标签图数据对作为测试集，具体地，真实探测的雷达检测数据剖面图，并根据其中的目标体进行标注，得到目标体标签图。采用少量真实数据分别对使用不同损失函数训练的模型参数微调，可以得到两种适用于真实数据的探地雷达智能识别模型，所述探地雷达智能识别模型可以采用混淆矩阵、PA、MPA、MIoU和FWIoU等评价指标进行性能评价。

基于上述方法，本实施例还提供了一种基于探地雷达的地下工程目标体识别系统，如图19所示，包括：主机-天线一体式探地雷达、嵌入式控制模块、触控屏。其中，所述一体式探地雷达与嵌入式控制模块连接，触控屏与嵌入式控制模块连接，嵌入式控制模块中内嵌探地雷达智能识别模型。

所述一体式探地雷达通过以太网或无线Wifi两种数据传输方式与嵌入式控制模块连接。

触控屏与嵌入式控制模块通过USB连接，实现双向通信与人机交互。

所述嵌入式控制模块具有扩展通讯接口，PCIe接口连接4G模块，采用Wifi或4G将实时探地雷达检测数据和识别结果传输到移动手机端、平板电脑和计算机等电子设备中，实现地下工程结构的实时显示。

所述触控屏用于输入探地雷达采集的启停控制指令、采集模式选择、道数设置，输出并显示探地雷达检测数据与识别结果。其中，探地雷达的采集模式包括时间模式和距离模式，用户可以对这两种模式进行



选择，并对探地雷达采集数据的道数进行设置，到达所设置道数的探地雷达检测数据将会传输到深度学习嵌入式控制模块来进行识别。

如图18所示，所述探地雷达智能识别系统的工作方法如下：

步骤1：系统上电，嵌入式控制模块将启停控制、采集模式选择、道数设置等人机交互指令传输至触控屏并显示，触控屏接收用户关于探地雷达采集模式的选择，以及探地雷达传输数据道数的设置，生成启动指令发送至嵌入式控制模块，控制一体式探地雷达开始探测工作；

步骤2：嵌入式控制模块接收探地雷达实时采集的数据，判断是否到达用户设置的道数，若达到所述道数，将数据传输至探地雷达智能识别模型；若没有到达所设置的道数，就继续进行采集，直到采集的数据到达所设置的道数，再进行数据的传输；

步骤3：嵌入式控制模块通过探地雷达智能识别模型，对接收到的数据进行目标体检测，并对检测结果进行实时输出；当检测出目标体时，生成目标体标签图，输出并显示所述目标体标签图以及相应的探地雷达检测数据，进行报警。图19(a)-图19(c)、图20(a)-图20(c)、图21(a)-图21(c)分别为针对三个雷达检测数据剖面图的检测结果示意图。

所述探地雷达检测数据和识别的标签图不仅可以传输到触控屏进行显示，还可以通Wifi或4G实时传输到移动手机端、平板电脑和计算机等电子设备中，实现地下工程结构的实时显示。最后需要判断探地雷达采集数据是否完成，若没有完成就继续上述流程，完成之后，探地雷达智能识别系统结束工作。

所述嵌入式控制模块采用基于NVIDIA Pascal™ 架构的高性能、低功耗的深度学习嵌入式主控模块 NVIDIA® Jetson™。嵌入式操作系统具有性能高、体积小、功耗低等特点，可装载Ubuntu系统并内嵌深度学习算法，直接运行基于PyTorch框架的神经网络，控制探地雷达检测数据的采集、探地雷达检测数据和识别的标签图的显示与数据的传输。

其中，所述步骤3中针对目标体的识别方法具体参见上述实施例一的相关说明部分。

本实施例还提供了一种电子设备，包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序，所述处理器执行所述程序时实现上述方法。

本实施例还提供了一种计算机可读存储介质，其上存储有计算机程序，该程序被处理器执行时实现上述方法。

本实施例建立了基于雷达检测数据的目标体识别模型，能够实现雷达检测过程中，针对异常目标体的实时检测。

本实施例通过模拟仿真的方式获取雷达检测图-目标体标签图数据对作为训练数据，获取针对多种、背景介质、形状、尺寸及分布的地下工程目标体的雷达检测剖面图和目标体标签图，使得训练数据有足够的数量，也为后续模型的泛化能力提供了保障；并且，模型训练后还获取真实的数据对作为测试数据，对训练得到的模型进行调参，保证了能够得到适用于真实环境雷达检测数据的目标体识别。

本实施例在针对雷达检测数据进行特征学习时，首先采用了一维卷机进行时间维度压缩，解决了时间维度-空间维度数据量不平衡的问题，保证目标体反射信号特征的完整准确提取，为后续特征的空间对应性学习提供了保障，保证了模型精度。

本实施例还提供了一种目标体识别系统，能够准确识别剖面图中目标体的轮廓，并且通过对雷达剖面图的连续检测，还能够还原出地下工程目标体的形状。

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。

## 权利要求书

1、一种隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统，其特征在于，包括：

行走部；

支撑部，其设置在行走部上；所述支撑部包括可旋转伸缩台架，可旋转伸缩台架上设置有并行工作的双机械臂；

检测部，其安装在支撑部上，用于对隧道结构同一位置不同深度范围的表观病害和内部病害进行多尺度检测，并将检测的病害信息传送至控制部；

控制部，其被配置为：

构建基于深度神经网络的病害诊断模型；

利用历史表观病害和内部病害信息及已标注的像素级病害类型，构建数据集，训练基于深度神经网络的病害诊断模型；

实时接收病害信息并输入至训练后的病害自动识别与诊断模型，自动识别出病害类型、位置及轮廓。

2、如权利要求 1 所述的一种隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统，其特征在于，所述行走部包括机器人平台，所述机器人平台两侧设置有履带；所述机器人平台底部还对称设置有若干个可伸缩轨道轮，所述可伸缩轨道轮之间通过联动机构共同伸缩，以实现在不同洞径的隧道内运行。

3、如权利要求 1 所述的一种隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统，其特征在于，所述双机械臂中的一条机械臂为多关节蛇形机械臂，另一条机械臂为检测装置内置式负载测量臂。

4、如权利要求 3 所述的一种隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统，其特征在于，所述检测部包括：

激光 3D 扫描仪，其安装在可旋转伸缩台架上，用于采集包含隧道衬砌表面的裂缝及渗漏水病害的隧道全景图像信息；

雷达及超声成像装置，放置于多关节蛇形机械臂顶端，雷达用于获取较深层病害，超声成像装置用于获取隧道衬砌表面裂缝的深度及宽度；

X 光背散射装置，其内置于检测装置内置式负载测量臂中，用于对隧道衬砌表面裂缝内部进行毫米级测量。

5、如权利要求 1 所述的一种隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统，其特征在于，所述控制部，还配置为：

将实时接收病害信息及自动识别出病害类型保存至历史数据库中；

利用历史数据库中的数据重新对病害诊断模型进行训练，得到更新后的病害诊断模型；

利用更新后的病害诊断模型进行病害诊断。

6、如权利要求 1 所述的一种隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统，其特征在于，所述控制部，还配置为：

对隧道环境进行定位及构图，并对行走部进行路径规划。

7、一种浮动贴合装置，其特征在于，设于可伸缩机械臂末端，包括：

壳体，所述壳体内用于安装无损检测设备；

所述壳体外表面设有一个或多个可伸缩弹力轮，用于与隧道衬砌被测表面贴合，且每个可伸缩弹力轮均内置测力传感器，用于感测与隧道衬砌被测表面之间的贴合力；所述壳体外表面还设有激光测距传感器阵列，用于监测贴合装置与被测表面之间的距离；

所述测力传感器和激光测距传感器阵列均与控制器连接，控制器根据贴合力 and 距离信息调整所述

浮力贴合装置与被测表面之间的相对位置。

8、如权利要求 7 所述的一种浮动贴合装置，其特征在于，所述可伸缩弹力轮包括连接在壳体外表面的杆件，所述杆件的末端与测力传感器的一端连接，测力传感器的另一端与弹簧的一端连接，所述测力传感器和弹簧均置于柱状容纳腔内，所述柱状容纳腔远离杆件的一端封堵，另一端开口，且开口的大小使得柱状容纳腔能够套设于所述杆件外部；所述柱状容纳腔封堵的一端外部通过支架连接行走轮。

9、如权利要求 7 所述的一种浮动贴合装置，其特征在于，所述激光测距传感器阵列至少安装于所述壳体的三个侧面，其中一个侧面为朝向前进方向的侧面。

10、如权利要求 7 所述的一种浮动贴合装置，其特征在于，所述壳体内还设有无损检测设备固定台，所述无损检测设备固定台上预留能够安装不同探测设备探头的卡槽；

所述无损检测设备固定台包括一个水平导轨和与该水平导轨垂直连接的两个竖直导轨；所述水平导轨的两端分别设有一个齿轮，与设于壳体内部两个相对侧面上的齿条分别相啮合；所述水平导轨用于固定无损检测设备的一侧设有齿条；两个竖直导轨通过齿轮与水平导轨上的齿条相啮合。

11、如权利要求 7 所述的一种浮动贴合装置，其特征在于，所述壳体朝向前进方向的外表面还设有避障监测装置，由激光雷达和监控摄像头组成，均与控制器连接，用于监测运行过程中前方衬砌的表面信息。

12、如权利要求 7 所述的一种浮动贴合装置，其特征在于，机械臂末端通过折叠式弓形撑开装置连接浮动贴合装置；所述折叠式弓形撑开装置包括多段相互连接的支撑架，且相邻两段支撑架之间通过转轴旋转连接，由减速机驱动；每段支撑架上均设有与其方向一致的电动导轨，所述浮动贴合装置通过滑轮与电动导轨连接，能够沿电动导轨移动。

13、如权利要求 12 所述的一种浮动贴合装置，其特征在于，电动导轨两端均设有激光测距传感器，用于感测与被测表面之间的距离；减速机输出轴设有扭矩传感器，用于感测两个支撑杆之间的旋转角度；所述减速机、激光测距传感器和扭矩传感器均与控制器连接，控制器根据各支撑杆之间的角度，以及与被测表面之间的距离，通过控制减速机调整各段支撑架之间的角度。

14、如权利要求 7 所述的一种浮动贴合装置，其特征在于，滑轮上设有位置传感器，用于感测浮动贴合装置在相应电动导轨上的位置。

15、一种多功能云台，其特征在于，设于机器人平台上；所述云台中设有多个检测模块，包括激光测距模块和多个病害检测模块，均与控制器连接；其中，所述激光测距模块设于中心，多个病害检测模块设于激光测距模块的周围；

控制器基于激光测距模块所测的与被测表面之间的距离，控制多个病害检测模块的朝向，使得多个病害检测模块对同一目标区域进行成像。

16、如权利要求 15 所述的一种多功能云台，其特征在于，所述多个病害检测模块包括：三维建模和变形检测模块、裂缝和脱落检测模块和渗漏检测模块；

所述云台为半球形，半球切面上设有四个孔洞，用于容纳三维建模和变形检测模块的激光发射单元、裂缝和脱落检测模块的可见光摄像头、渗漏检测模块的红外摄像头与激光测距模块的激光发射单元，且四个孔洞大小均为激光发射单元或摄像头旋转预留一定额外空间；其中，激光测距模块的激光发射单元位于中心，可见光摄像头、红外摄像头分别等间距设于其两侧，且三者共线。

17、如权利要求 15 所述的一种多功能云台，其特征在于，所述多个病害检测模块包括：三维建模和变形检测模块、裂缝和脱落检测模块和渗漏检测模块；

多个检测模块均通过支撑机构固定多功能云台内部；其中，激光测距模块设置于支撑机构中间，裂缝和脱落检测模块和渗漏检测模块分别设置于激光测距仪两侧，且通过转向电机设于支撑机构上。

18、如权利要求 15 所述的一种多功能云台，其特征在于，所述云台为半球形，且两侧分别通过横滚电机连接于 U 形支架内；所述 U 形支架通过竖滚电机连接在移动载体上；其中，所述横滚电机和竖滚电机上均设有转矩传感器，U 形支架上设有三轴陀螺仪，均与控制器连接。

19、如权利要求 15 所述的一种多功能云台，其特征在于，所述多个检测模块在云台中的位置，根据各检测模块的初始重力信息，以及各检测模块的重心相对三个电机转轴的偏移量信息，进行初始化，以保证云台的稳定性。

20、一种基于雷达探测数据进行目标体智能识别方法，其特征在于，包括如下步骤：

获取计算机模拟数据集，所述数据集包括多组探地雷达数据剖面图-目标体标签图数据对；

采用深度学习网络，基于所述数据集训练得到目标体识别模型；

获取实时采集到的雷达检测数据，采用所述目标体识别模型进行目标体识别。

21、如权利要求 20 所述的一种基于雷达探测数据进行目标体智能识别方法，其特征在于，构建计算机模拟数据集包括：

针对多种、背景介质、形状、尺寸及分布的地下工程目标体的介电常数模型进行模拟；

对于每一介电常数模型进行正演，分别生成不同频率的雷达数据剖面图，得到多组探地雷达数据剖面图-目标体介电常数模型数据对；

对于每一组探地雷达数据剖面图-目标体介电常数模型数据对中的目标体介电常数模型进行轮廓识别，将轮廓范围以内的像素值赋值为相应的类型标识码，得到多组探地雷达数据剖面图-目标体标签图数据对。

22、如权利要求 20 所述的一种基于雷达探测数据进行目标体智能识别方法，其特征在于，所述深度学习网络模型架构包括：用于对雷达检测数据剖面图进行特征提取的时间维度压缩网络结构、用于对每个特征通道进行编码的自编码网络结构，和用于对每个特征通道进行解码的标签图解码网络结构；

所述时间维度压缩网络结构包括 6 层依次级联的卷积结构，其中，第 2 层卷积结构的输出端还连接残差块的输入端，残差块的输出端连接至第 3 层卷积结构的输入端；

所述自编码网络结构包括 4 层全连接层；

所述标签图解码网络结构包括 6 层依次级联的卷积结构，其中，第 2 层卷积结构的输出端还连接残差块的输入端，残差块的输出端连接至第 3 层卷积结构的输入端。

23、如权利要求 20 所述的一种基于雷达探测数据进行目标体智能识别方法，其特征在于，还获取多组真实的探地雷达数据剖面图-目标体标签图数据对，对得到的目标体识别模型进行调参。

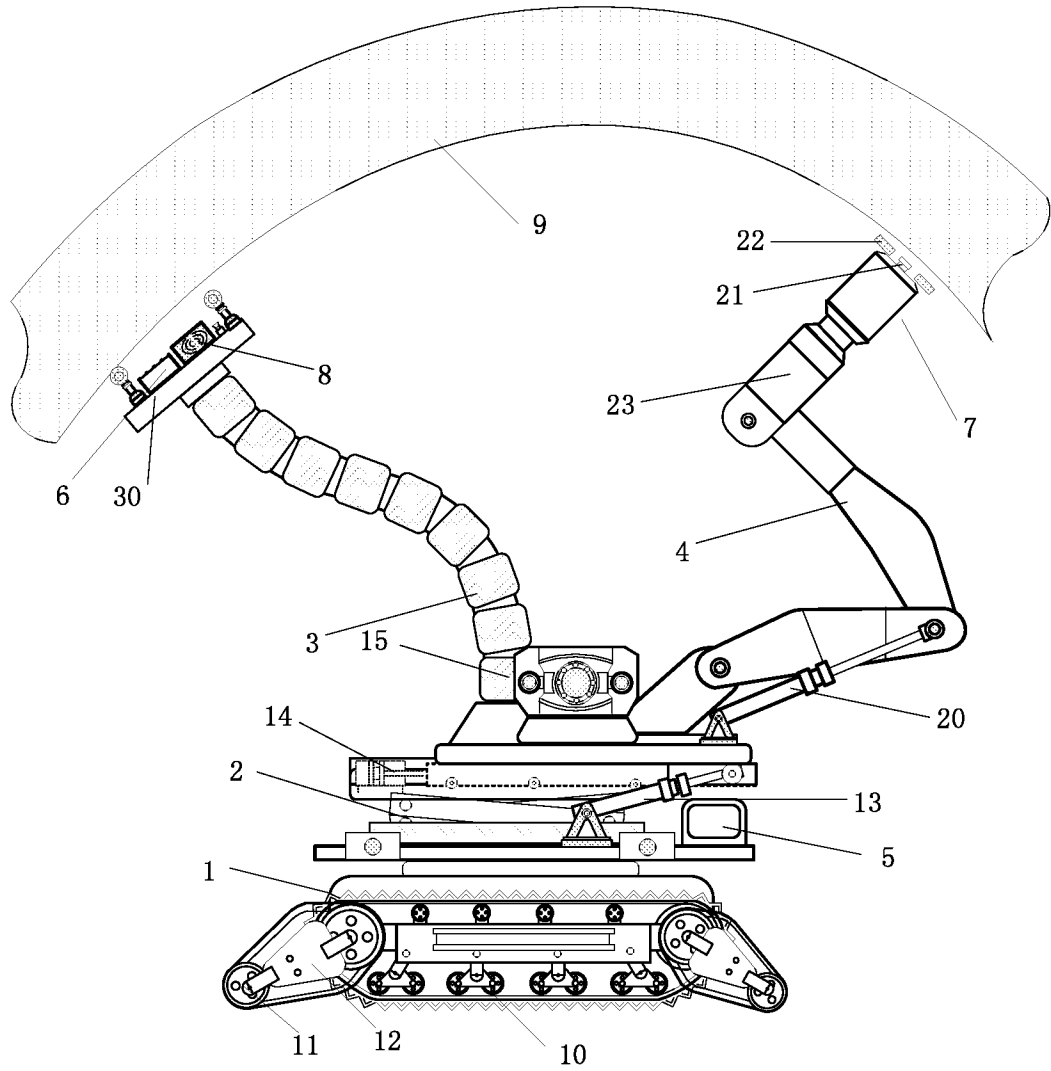


图 1

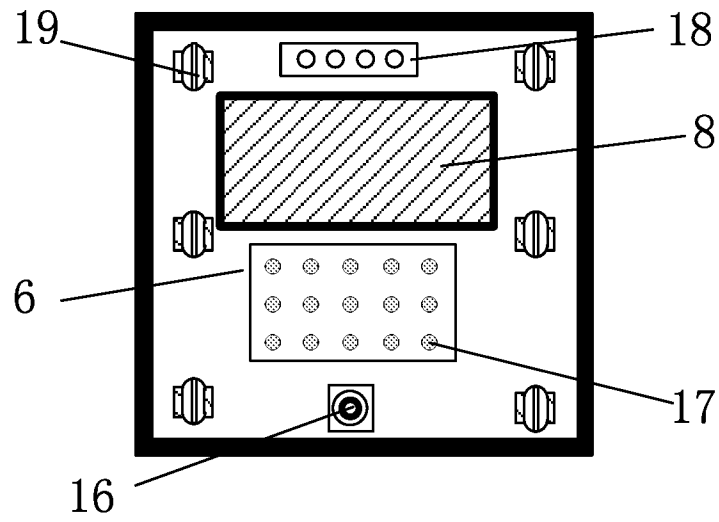


图 2

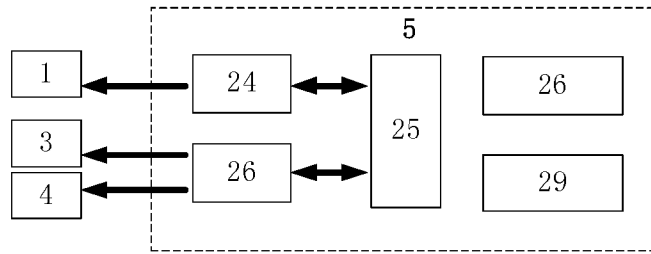


图 3

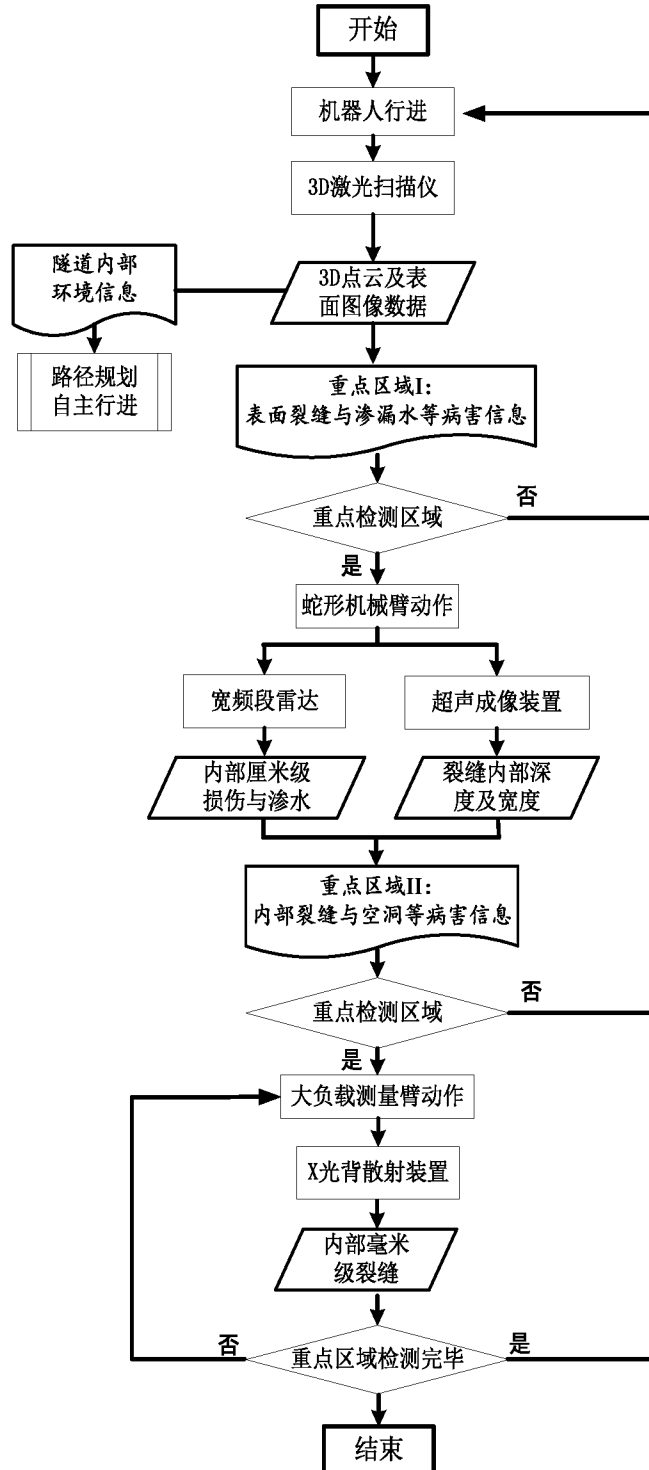


图 4

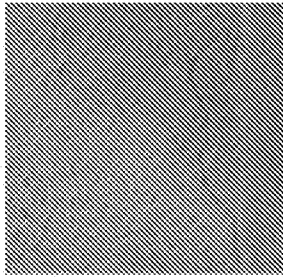


图 5 (a)

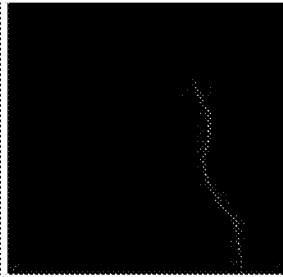


图 5 (b)

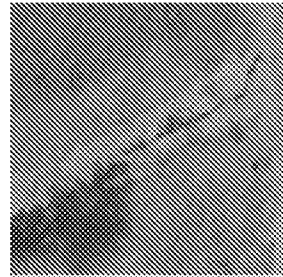


图 5 (c)

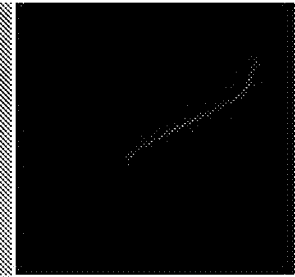


图 5 (d)

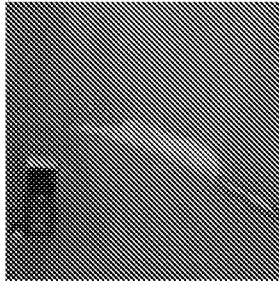


图 5 (e)

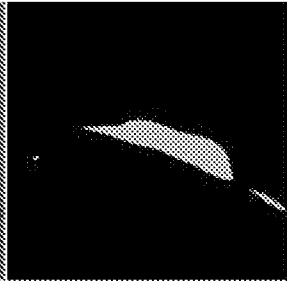


图 5 (f)

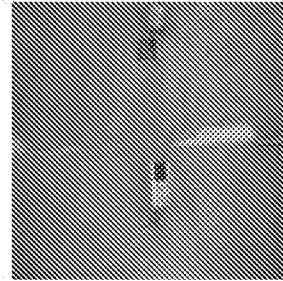


图 5 (g)

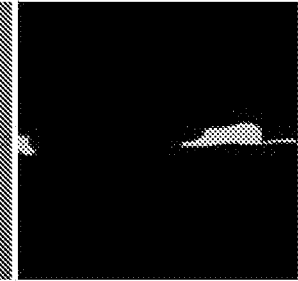


图 5 (h)

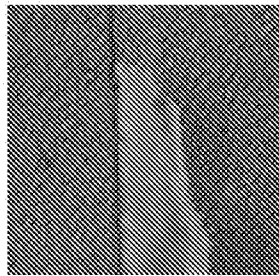


图 5 (i)

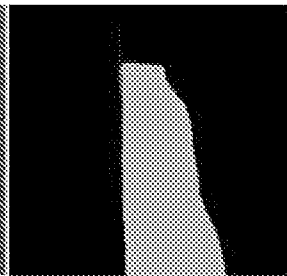


图 5 (j)

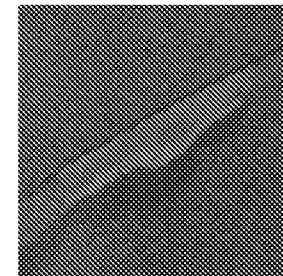


图 5 (k)

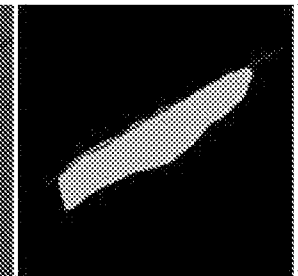


图 5 (l)

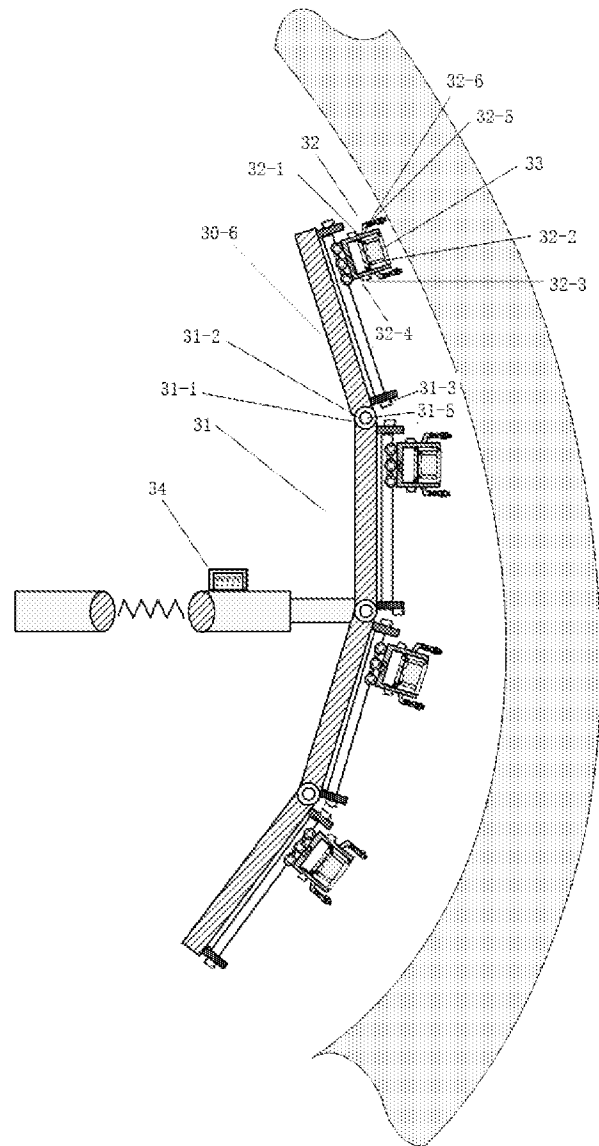


图 6

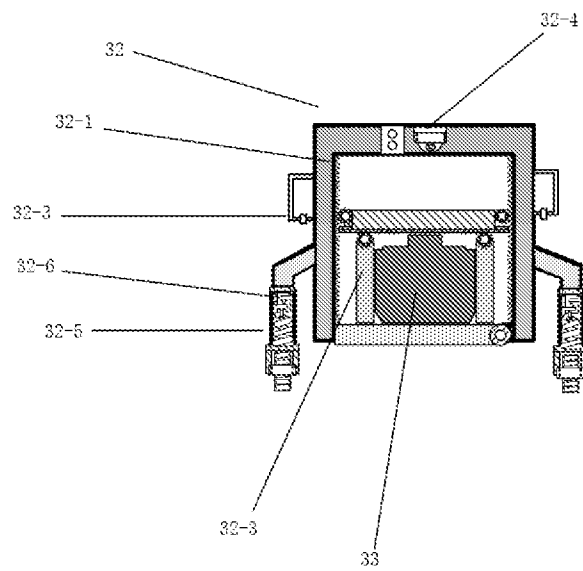


图 7



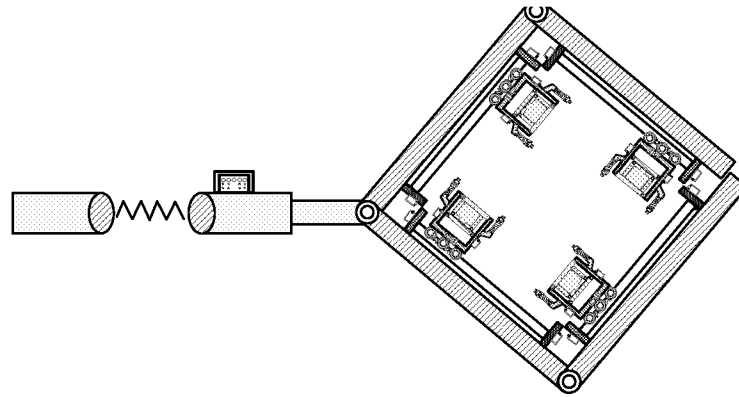


图 8

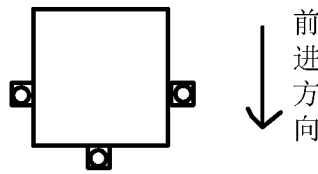


图 9

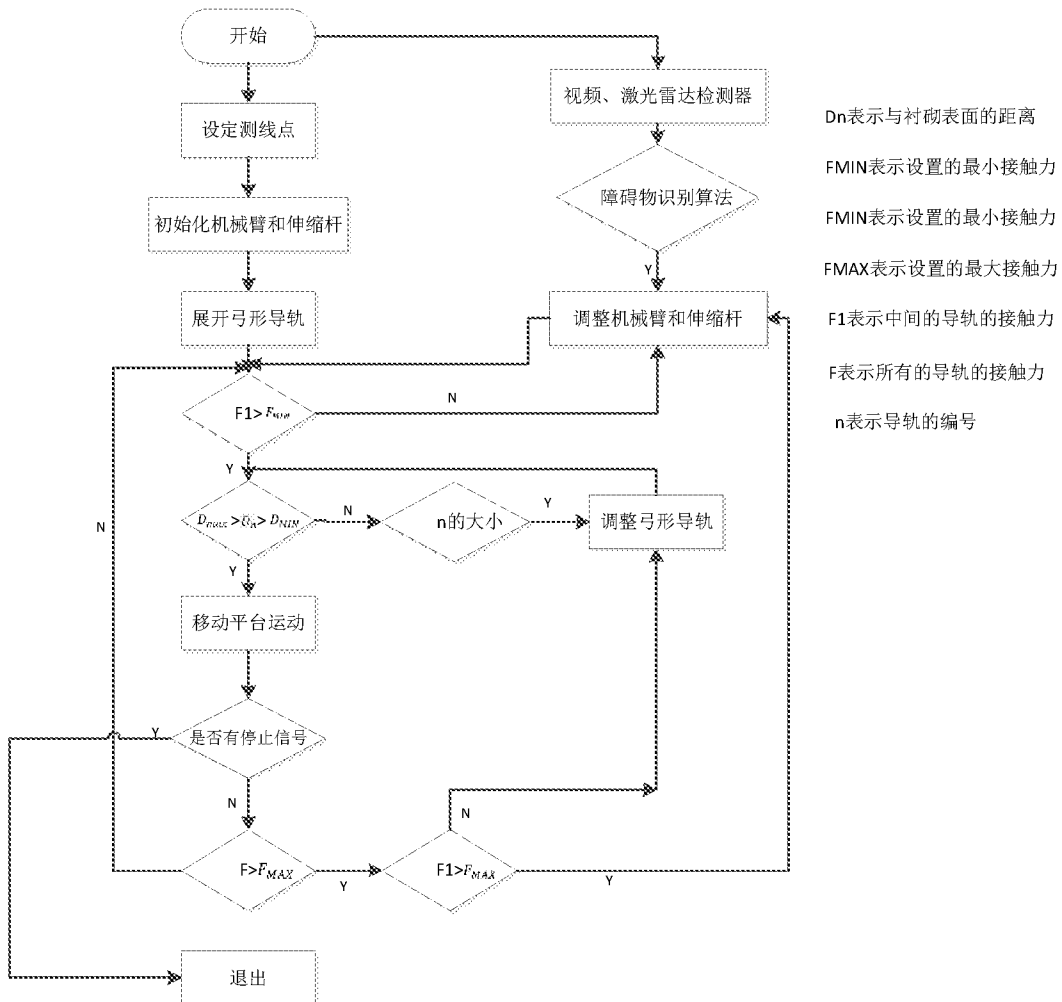


图 10

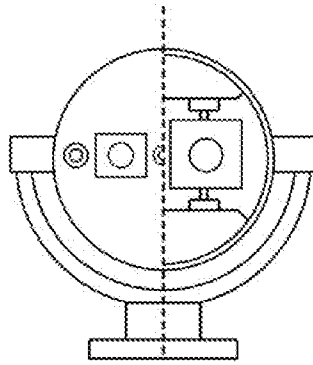


图 11

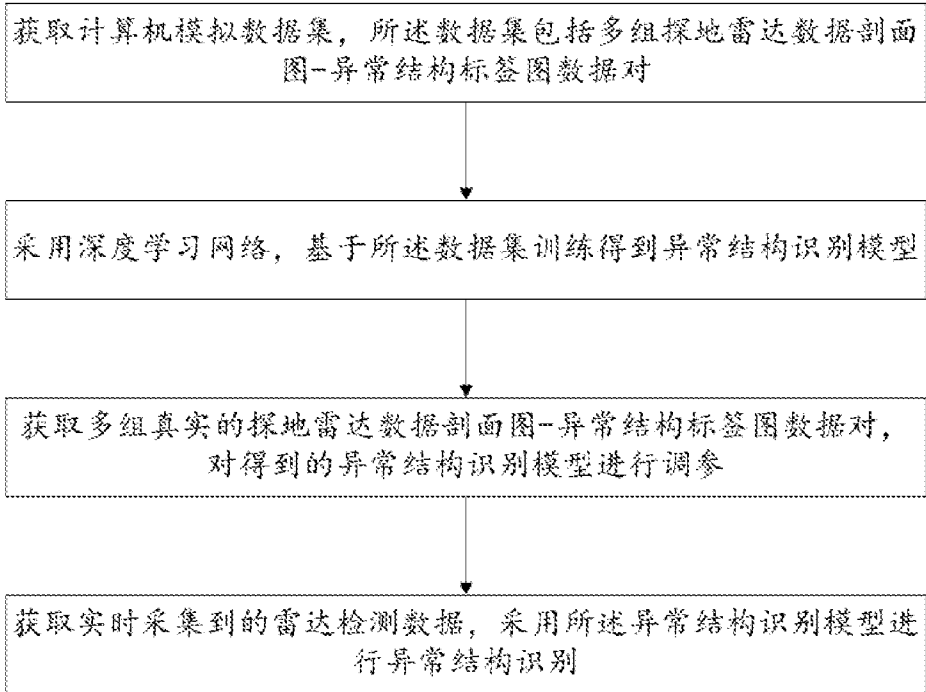


图 12

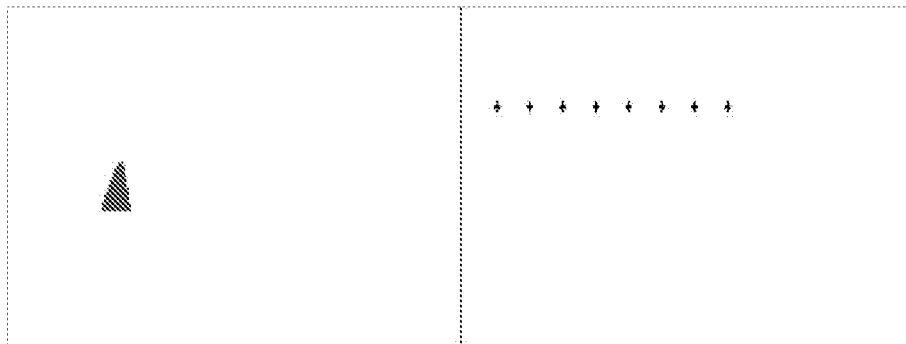


图 13

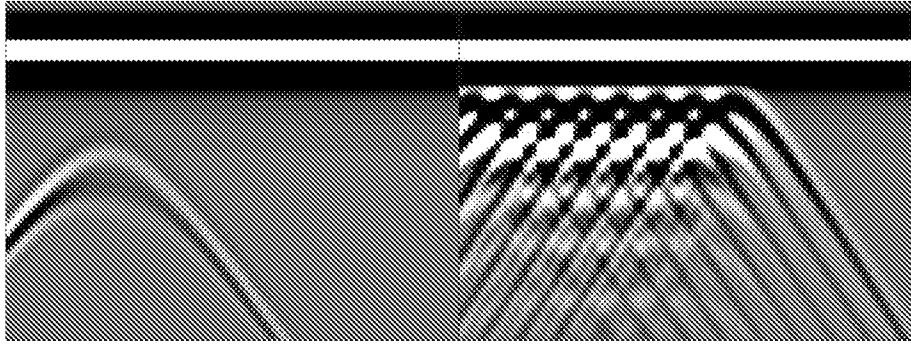


图 14

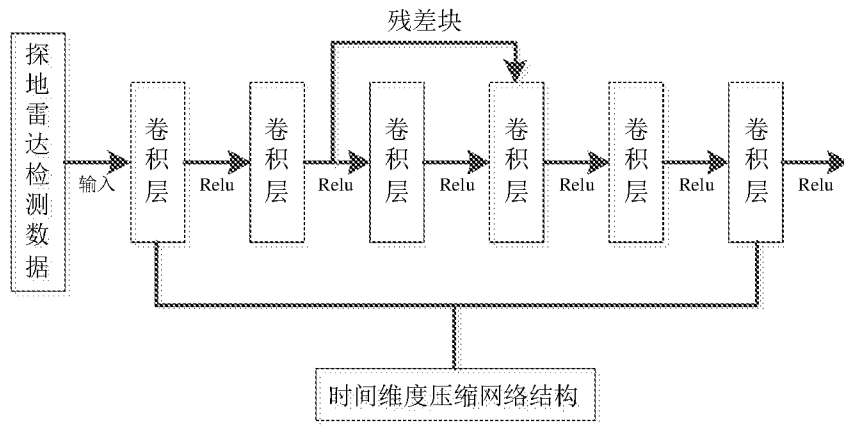


图 15

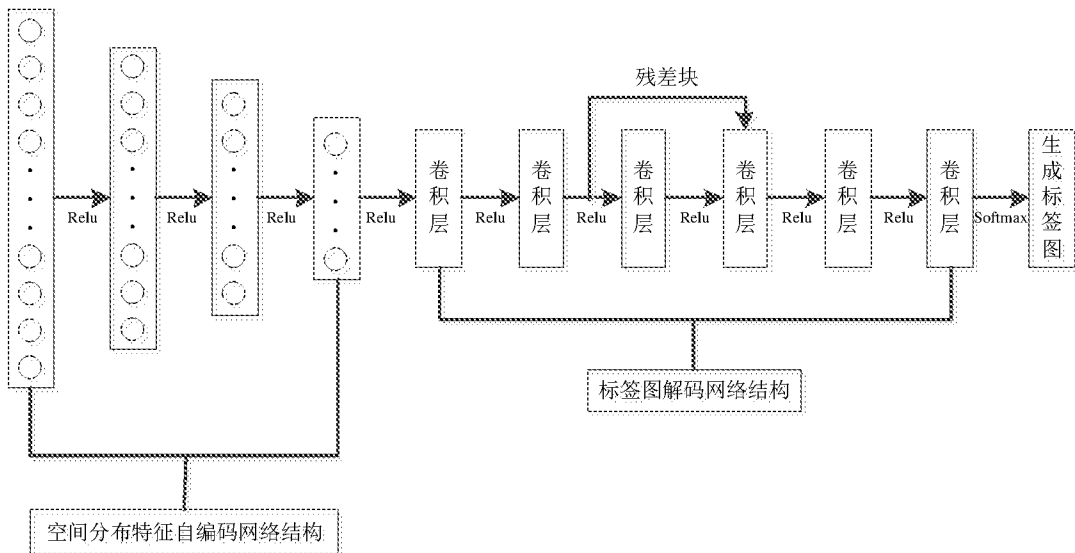


图 16

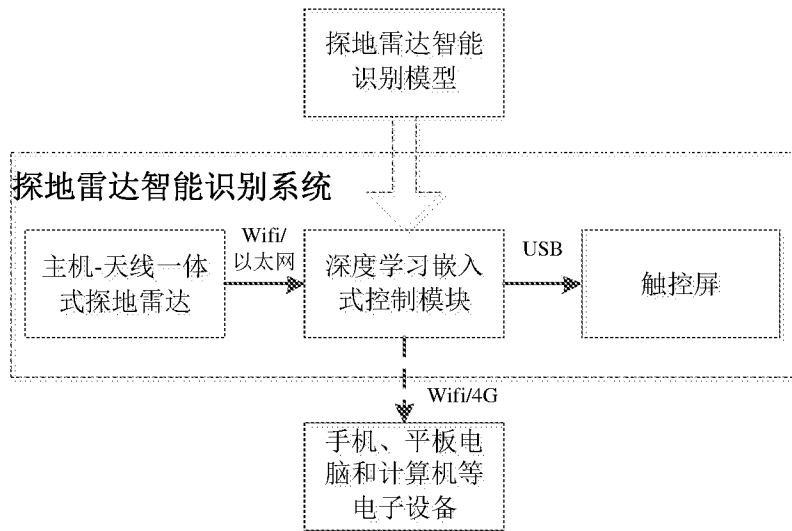


图 17

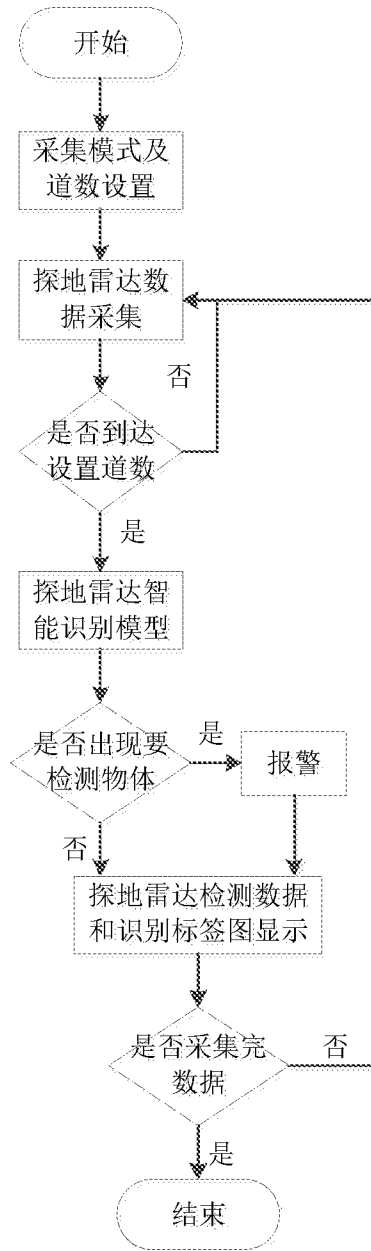


图 18

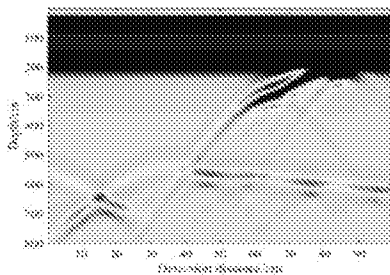


图 19 (a)

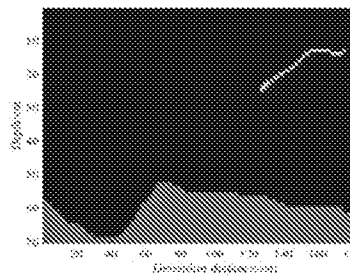


图 19 (b)

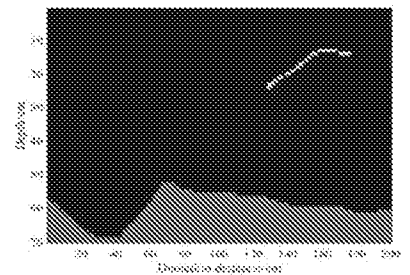


图 19 (c)

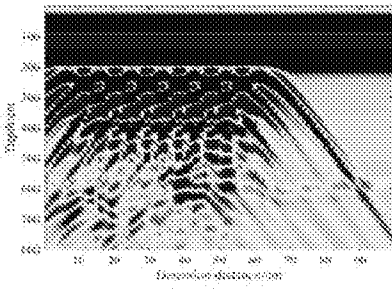


图 20 (a)

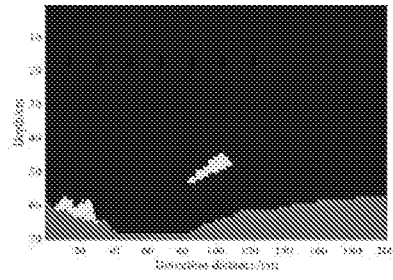


图 20 (b)

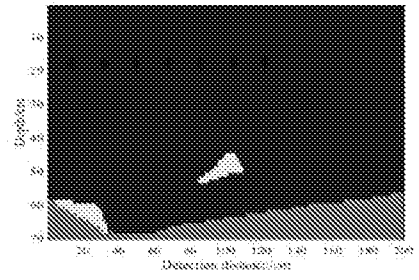


图 20 (c)

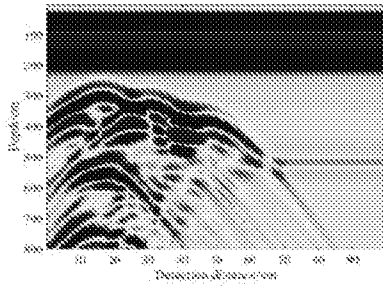


图 21 (a)

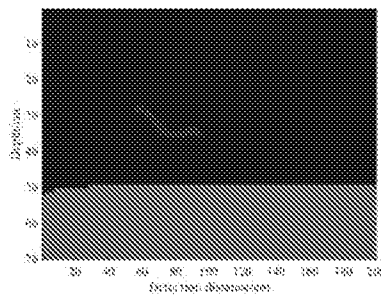


图 21 (b)

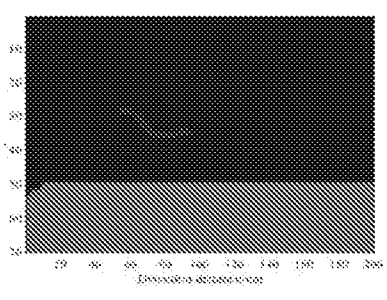


图 21 (c)

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/119581

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b>		
G01N 21/88(2006.01)i; G01S 7/41(2006.01)i; G01S 13/88(2006.01)i; G06N 3/04(2006.01)i; G01N 23/203(2006.01)i; B25J 5/00(2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01S 7; G01S 17; G01S 13; G01N 21; G01N 23; G06N 3; B25J; G01B 11		
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) CNABS, CNTXT, CNKI, IEEE, VEN: 隧, 桥, 管道, 廊, 检测, 检查, 诊断, 识别, 探测, 病害, 损害, 深度学习, 神经网络, 机械臂, 机器人, 贴, 抓, 弹力, 伸缩, 弹簧, 云台, 力, 距离, 探地雷达, 地质雷达, 介电常数, tennel?, detect+, invest+, diagnos+, inspect+, arm?, neural network?, deep+ study+, CNN, DNN, ground radar?, geological radar?, robot		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 111323764 A (SHANDONG UNIVERSITY) 23 June 2020 (2020-06-23) claims 1-7, description, paragraphs 45-60	20-23
PX	CN 111160204 A (SHANDONG UNIVERSITY) 15 May 2020 (2020-05-15) description, paragraphs [0031] and [0054]-[0060]	20-23
PX	袁玮等 (YUAN, Wei et al.). "地质雷达法隧道衬砌质量检测台车设计研究 (Study on the Design of Tunnel Lining Quality Inspection Trolley Based on Geological Radar Method)" <i>现代隧道技术 (Modern Tunnelling Technology)</i> , No. S1, 15 December 2019 (2019-12-15), ISSN: 1009-6582, pp. 179-181	1-6
X	徐辉 (XU, Hui). "基于深度学习的隧道衬砌病害GPR探测智能反演与识别方法 (Tunnel Lining Diseases GPR Detection Intelligent Inversion and Identification Methods Based on Deep Learning)" <i>中国优秀硕士学位论文全文数据库 (工程科技II辑) (Science-Engineering (B), China Master's Theses Full-Text Database)</i> , No. 09, 15 September 2019 (2019-09-15), ISSN: 1674-0246, pp. 11-79	20-23
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> 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 <b>30 December 2020</b>		Date of mailing of the international search report <b>07 January 2021</b>
Name and mailing address of the ISA/CN <b>China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088 China</b> Facsimile No. (86-10)62019451		Authorized officer  Telephone No.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	童峥 (TONG, Zheng). "基于深度学习和探地雷达技术的路面结构病害检测研究 (Research on Pavement Distress Inspection Based on Deep Learning and Ground Penetrating Radar)" 中国优秀硕士学位论文全文数据库(基础科学辑) ( <i>Basic Sciences, China Master's Theses Full-text Database</i> ), No. 01, 15 January 2019 (2019-01-15), ISSN: 1674-0246, pp. 28-45	20-23
X	CN 105512635 A (LUDONG UNIVERSITY) 20 April 2016 (2016-04-20) description, paragraphs 88-178	20-23
X	CN 107621626 A (CHINA UNIVERSITY OF MINING AND TECHNOLOGY, BEIJING) 23 January 2018 (2018-01-23) description, paragraphs 21-49	20-23
X	CN 108303426 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 20 July 2018 (2018-07-20) description, paragraph 0043	15-19
Y	CN 209132427 U (SHANXI TRANSPORTATION RESEARCH INSTITUTE) 19 July 2019 (2019-07-19) description, paragraph 0020, figures 1-5	1-6
Y	CN 108731736 A (SHANDONG UNIVERSITY) 02 November 2018 (2018-11-02) description, paragraphs 62-71	1-6
Y	CN 109262583 A (GUANGDONG POWER GRID COMPANY et al.) 25 January 2019 (2019-01-25) description, paragraphs 35-43, figures 1-2	1-6
Y	CN 108229461 A (SHANGHAI TONGYAN CIVIL ENGINEERING TECHNOLOGY CO., LTD.) 29 June 2018 (2018-06-29) description, paragraphs 23-31	1-6
Y	CN 110161043 A (TONGJI UNIVERSITY et al.) 23 August 2019 (2019-08-23) description, paragraph 65	7-14
Y	CN 106501866 A (SHANDONG UNIVERSITY) 15 March 2017 (2017-03-15) description, paragraph 49	7-14
A	CN 209311671 U (CHINA RAILWAY YANFENG CHENGDU SCIENCE AND TECHNOLOGY CO., LTD.) 27 August 2019 (2019-08-27) entire document	1-6
A	CN 110270975 A (CHINA RAILWAY SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.) 24 September 2019 (2019-09-24) entire document	7-14
A	CN 201989147 U (SHENYANG SIASUN ROBOT & AUTOMA CO., LTD.) 28 September 2011 (2011-09-28) entire document	15-19
A	JP 2008020426 A (TEIKOKU SEKKEI JIMUSHO KK. et al.) 31 January 2008 (2008-01-31) entire document	1-23
A	KR 20110066360 A (4DCULTURE INC.) 17 June 2011 (2011-06-17) entire document	1-23



**Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)**

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

- [1] Independent claim 1 relates to a multi-scale detection and smart diagnosis system for tunnel structural damage.
- [2] Independent claim 7 relates to a floating and attaching apparatus.
- [3] Independent claim 15 relates to a multi-functional gimbal.
- [4] Independent claim 20 relates to a method for performing smart target recognition on the basis of radar detection data.
- [5] Independent claims 1, 7, 15, and 20 do not share a same or corresponding technical feature, and therefore do not share a special technical feature that contributes to the prior art, and therefore do not share a technical relationship, and thus do not form a single general inventive concept, and do not satisfy the requirement for unity in PCT Rules 13.1 and 13.2.

1.  As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2.  As all searchable claims could be searched without effort justifying additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.
3.  As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
4.  No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

- Remark on Protest**
- The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.
  - The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.
  - No protest accompanied the payment of additional search fees.

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

International application No.

**PCT/CN2020/119581**

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	111323764	A	23 June 2020	None			
CN	111160204	A	15 May 2020	None			
CN	105512635	A	20 April 2016	None			
CN	107621626	A	23 January 2018	CN	107621626	B	31 August 2018
CN	108303426	A	20 July 2018	CN	207816842	U	04 September 2018
CN	209132427	U	19 July 2019	None			
CN	108731736	A	02 November 2018	WO	2019233222	A1	12 December 2019
				CN	108731736	B	14 June 2019
				US	2020142052	A1	07 May 2020
CN	109262583	A	25 January 2019	CN	209007531	U	21 June 2019
CN	108229461	A	29 June 2018	None			
CN	110161043	A	23 August 2019	US	20200353956	A1	12 January 2020
CN	106501866	A	15 March 2017	None			
CN	209311671	U	27 August 2019	None			
CN	110270975	A	24 September 2019	CN	210361284	U	21 April 2020
CN	201989147	U	28 September 2011	None			
JP	2008020426	A	31 January 2008	JP	5002756	B2	15 August 2012
KR	20110066360	A	17 June 2011	KR	101165509	B1	13 July 2012

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/119581

<p><b>A. 主题的分类</b></p> <p>G01N 21/88(2006.01)i; G01S 7/41(2006.01)i; G01S 13/88(2006.01)i; G06N 3/04(2006.01)i; G01N 23/203(2006.01)i; B25J 5/00(2006.01)i</p> <p>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</p>																	
<p><b>B. 检索领域</b></p> <p>检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)</p> <p>G01S 7; G01S 17; G01S 13; G01N 21; G01N 23; G06N 3; B25J; G01B 11</p> <p>包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献</p> <p>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))</p> <p>CNABS, CNTXT, CNKI, IEEE, VEN: 隧, 桥, 管道, 廊, 检测, 检查, 诊断, 识别, 探测, 病害, 损害, 深度学习, 神经网络, 机械臂, 机器人, 贴, 抓, 弹力, 伸缩, 弹簧, 云台, 力, 距离, 探地雷达, 地质雷达, 介电常数, tennel?, detect+, invest+, diagnos+, inspect+, arm?, neural network?, deep+ study+, CNN, DNN, ground radar?, geological radar?, robot</p>																	
<p><b>C. 相关文件</b></p> <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 111323764 A (山东大学) 2020年 6月 23日 (2020 - 06 - 23) 权利要求1-7, 说明书第45-60段</td> <td>20-23</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>CN 111160204 A (山东大学) 2020年 5月 15日 (2020 - 05 - 15) 说明书[0031], [0054]-[0060]段</td> <td>20-23</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>袁玮 等. "地质雷达法隧道衬砌质量检测台车设计研究" 现代隧道技术, 第S1期, 2019年 12月 15日 (2019 - 12 - 15), ISSN: 1009-6582, 第179-181页</td> <td>1-6</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>徐辉. "基于深度学习的隧道衬砌病害GPR探测智能反演与识别方法" 中国优秀硕士学位论文全文数据库(工程科技II辑), 第09期, 2019年 9月 15日 (2019 - 09 - 15), ISSN: 1674-0246, 第11-79页</td> <td>20-23</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 111323764 A (山东大学) 2020年 6月 23日 (2020 - 06 - 23) 权利要求1-7, 说明书第45-60段	20-23	PX	CN 111160204 A (山东大学) 2020年 5月 15日 (2020 - 05 - 15) 说明书[0031], [0054]-[0060]段	20-23	PX	袁玮 等. "地质雷达法隧道衬砌质量检测台车设计研究" 现代隧道技术, 第S1期, 2019年 12月 15日 (2019 - 12 - 15), ISSN: 1009-6582, 第179-181页	1-6	X	徐辉. "基于深度学习的隧道衬砌病害GPR探测智能反演与识别方法" 中国优秀硕士学位论文全文数据库(工程科技II辑), 第09期, 2019年 9月 15日 (2019 - 09 - 15), ISSN: 1674-0246, 第11-79页	20-23
类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求															
PX	CN 111323764 A (山东大学) 2020年 6月 23日 (2020 - 06 - 23) 权利要求1-7, 说明书第45-60段	20-23															
PX	CN 111160204 A (山东大学) 2020年 5月 15日 (2020 - 05 - 15) 说明书[0031], [0054]-[0060]段	20-23															
PX	袁玮 等. "地质雷达法隧道衬砌质量检测台车设计研究" 现代隧道技术, 第S1期, 2019年 12月 15日 (2019 - 12 - 15), ISSN: 1009-6582, 第179-181页	1-6															
X	徐辉. "基于深度学习的隧道衬砌病害GPR探测智能反演与识别方法" 中国优秀硕士学位论文全文数据库(工程科技II辑), 第09期, 2019年 9月 15日 (2019 - 09 - 15), ISSN: 1674-0246, 第11-79页	20-23															
<p><input checked="" type="checkbox"/> 其余文件在C栏的续页中列出。</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。</p> <p>* 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                      "&amp;" 同族专利的文件</p>																	
国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期																
2020年 12月 30日	2021年 1月 7日																
ISA/CN的名称和邮寄地址	授权官员																
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	杨士林 电话号码 86-(010)-62085717																

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
X	童峥. “基于深度学习和探地雷达技术的路面结构病害检测研究” 中国优秀硕士学位论文全文数据库(基础科学辑), 第01期, 2019年 1月 15日 (2019 - 01 - 15), ISSN: 1674-0246, 第28-45页	20-23
X	CN 105512635 A (鲁东大学) 2016年 4月 20日 (2016 - 04 - 20) 说明书第88-178段	20-23
X	CN 107621626 A (中国矿业大学北京) 2018年 1月 23日 (2018 - 01 - 23) 说明书第21-49段	20-23
X	CN 108303426 A (华中科技大学) 2018年 7月 20日 (2018 - 07 - 20) 说明书第0043段	15-19
Y	CN 209132427 U (山西省交通科学研究院) 2019年 7月 19日 (2019 - 07 - 19) 说明书第0020段, 图1-5	1-6
Y	CN 108731736 A (山东大学) 2018年 11月 2日 (2018 - 11 - 02) 说明书第62-71段	1-6
Y	CN 109262583 A (广东电网有限责任公司 等) 2019年 1月 25日 (2019 - 01 - 25) 说明书第35-43段, 附图1-2	1-6
Y	CN 108229461 A (上海同岩土木工程科技股份有限公司) 2018年 6月 29日 (2018 - 06 - 29) 说明书23-31段	1-6
Y	CN 110161043 A (同济大学 等) 2019年 8月 23日 (2019 - 08 - 23) 说明书第65段	7-14
Y	CN 106501866 A (山东大学) 2017年 3月 15日 (2017 - 03 - 15) 说明书第49段	7-14
A	CN 209311671 U (中铁岩锋成都科技有限公司) 2019年 8月 27日 (2019 - 08 - 27) 全文	1-6
A	CN 110270975 A (中铁西南科学研究院有限公司) 2019年 9月 24日 (2019 - 09 - 24) 全文	7-14
A	CN 201989147 U (沈阳新松机器人自动化股份有限公司) 2011年 9月 28日 (2011 - 09 - 28) 全文	15-19
A	JP 2008020426 A (TEIKOKU SEKKEI JIMUSHO KK. 等) 2008年 1月 31日 (2008 - 01 - 31) 全文	1-23
A	KR 20110066360 A (4DCULTURE INC.) 2011年 6月 17日 (2011 - 06 - 17) 全文	1-23

## 第III栏 缺乏发明单一性的意见(续第1页第3项)

本国际检索单位在该国际申请中发现多项发明，即：

- [1] 独立权利要求1涉及一种隧道结构病害多尺度检测与智能诊断系统；
- [2] 独立权利要求7涉及一种浮动贴合装置；
- [3] 独立权利要求15涉及一种多功能云台；
- [4] 独立权利要求20涉及一种基于雷达探测数据进行目标体智能识别方法。
- [5] 独立权利要求1、7、15、20之间不存在相同或相应的技术特征，因此不具有对现有技术作出贡献的特定技术特征，因此不存在技术关联，从而不属于一个总的发明构思，不满足PCT实施细则13.1和13.2有关单一性的要求。

- 1.  由于申请人按时缴纳了被要求缴纳的全部附加检索费，本国际检索报告涉及全部可作检索的权利要求。
- 2.  由于无需付出有理由要求附加费的劳动即能对全部可检索的权利要求进行检索，本单位未通知缴纳任何加费。
- 3.  由于申请人仅按时缴纳了部分被要求缴纳的附加检索费，本国际检索报告仅涉及已缴费的那些权利要求，具体地说，是权利要求：
  
- 4.  申请人未按时缴纳被要求缴纳的附加检索费。因此，本国际检索报告仅涉及权利要求书中首先提及的发明；包含该发明的权利要求是：

## 对异议的意见

- 申请人缴纳了附加检索费，同时提交了异议书，适用时，缴纳了异议费。
- 申请人缴纳了附加检索费，同时提交了异议书，但未在通知书规定的时间期限内缴纳异议费。
- 缴纳附加检索费时未提交异议书。

国际检索报告  
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/119581

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	111323764	A	2020年 6月 23日	无	
CN	111160204	A	2020年 5月 15日	无	
CN	105512635	A	2016年 4月 20日	无	
CN	107621626	A	2018年 1月 23日	CN	107621626 B 2018年 8月 31日
CN	108303426	A	2018年 7月 20日	CN	207816842 U 2018年 9月 4日
CN	209132427	U	2019年 7月 19日	无	
CN	108731736	A	2018年 11月 2日	WO	2019233222 A1 2019年 12月 12日
				CN	108731736 B 2019年 6月 14日
				US	2020142052 A1 2020年 5月 7日
CN	109262583	A	2019年 1月 25日	CN	209007531 U 2019年 6月 21日
CN	108229461	A	2018年 6月 29日	无	
CN	110161043	A	2019年 8月 23日	US	20200353956 A1 2020年 1月 12日
CN	106501866	A	2017年 3月 15日	无	
CN	209311671	U	2019年 8月 27日	无	
CN	110270975	A	2019年 9月 24日	CN	210361284 U 2020年 4月 21日
CN	201989147	U	2011年 9月 28日	无	
JP	2008020426	A	2008年 1月 31日	JP	5002756 B2 2012年 8月 15日
KR	20110066360	A	2011年 6月 17日	KR	101165509 B1 2012年 7月 13日