**发明名称： 一种钢管混凝土空鼓检测爬壁机器人及其检测方法**

**申请人： 东南大学**

**发明人：高康，****纪衍哲**

**发明人所在学院： 土木工程学院\_\_**

**第一发明人身份证号：\_** **610402198806255593**

**第一发明人座机：\_\_\_\_ 手机：\_\_\_\_**

**E-mail: \_ gaokang@seu.edu.cn \_\_\_**

**联系人座机：\_\_\_025-83793232\_\_ 手机：\_\_\_\_\_18092847569\_\_\_\_\_\_\_\_**

**E-mail: \_\_\_\_\_gaokang@seu.edu.cn**

**（若学生是第一发明人，必须要有老师的联系电话和邮箱）**

**若有共同申请单位，则需提供以下信息：**

**共同申请人地址：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**共同申请人邮编：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**共同申请人法人代码：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**专利代理委托书（向代理人索要或在专利局网站下载）**

**代理机构：南京经纬专利商标代理有限公司**

**代理人：石艳红 代理人执业证：3220019918.1**

**手机： 18651605420 e-mail:** [**shiyanhong0168@163.co**](mailto:shiyanhong0168@163.co)**m**

东南大学知识产权办公室沈廉

电话： 83793039或13815880480

E-mail: zzcq@seu.edu.cn 或[seusl@163.com](mailto:seusl@163.com)

**申请人：**东南大学

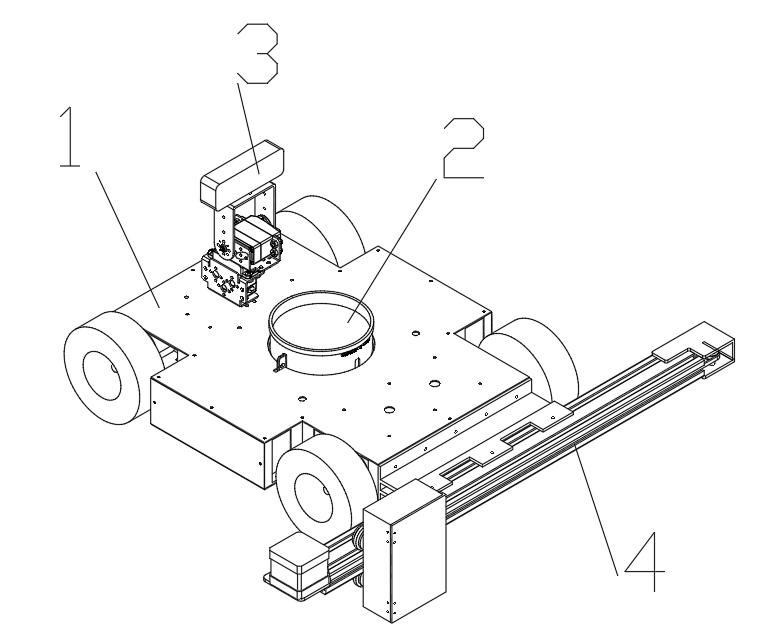
**地址：**211189 江苏省南京市江宁区东南大学路2号

**发明人：高康，纪衍哲**

**说明书摘要**

本发明属于土木工程结构检测技术领域，具体涉及一种瓷砖空鼓检测爬壁机器人及其检测方法。该爬壁机器人包括运动模块、吸附模块、空鼓检测模块以及控制与通信模块。运动模块包括机器人底盘及设置在底盘两侧的运动机构，用于驱动机器人在建筑外墙瓷砖表面爬行；吸附模块设置在机器人底盘底部中部，由涵道风机和柔性密封结构构成的负压密封腔组成，用于在瓷砖表面形成稳定负压吸附力，使爬壁机器人可靠附着于竖向瓷砖墙面。空鼓检测模块设置于机器人底盘一侧或尾部，包括沿机器人宽度方向布置的直线滑台、安装在滑块上的敲击电磁铁和拾音器，以及包覆敲击电磁铁和拾音器的隔音罩；直线滑台在滑台驱动电机带动下驱动敲击电磁铁和拾音器沿宽度方向往复移动，对同一停靠位置下覆盖范围内的瓷砖进行逐点敲击检测，从而扩大检测面积并提高检测效率。控制与通信模块包括机载计算单元、电机驱动板、电源模块及无线通信模块，机载计算单元分别与拾音器、直线滑台驱动电机、敲击电磁铁和运动机构电连接，并连接深度相机和惯性测量单元 IMU，运行视觉惯性 SLAM 算法，对深度相机与 IMU 数据进行融合，实时估计爬壁机器人在墙面坐标系中的位姿并构建墙面三维地图。机载计算单元对拾音器采集的原始敲击声波先通过深度学习降噪网络进行去噪处理，再对去噪后的声波执行时频变换生成时频图，将时频图输入深度学习分类网络，实现瓷砖空鼓与实心状态的自动识别，并将各检测点的空鼓识别结果映射至 SLAM 建立的墙面地图和建筑立面图。本发明实现了涵道风机负压吸附、滑台扫描敲击、声学深度学习识别与视觉惯性建图一体化，可在高层建筑瓷砖外墙上实现高效、可靠的自动空鼓检测。

**摘要附图**



摘要图

**权利要求书**

1. 一种瓷砖空鼓检测爬壁机器人，其特征在于，包括：

运动模块、吸附模块、空鼓检测模块以及控制与通信模块；

所述运动模块包括机器人底盘和设置在所述机器人底盘两侧的运动机构，所述运动机构包括驱动电机和与所述驱动电机连接的驱动轮，用于驱动机器人在瓷砖墙面上爬行；

所述吸附模块设置在所述机器人底盘底部中部，由涵道风机和柔性密封结构构成的负压密封腔组成，用于在瓷砖表面形成稳定负压吸附力，使爬壁机器人可靠附着于竖向瓷砖墙面；

所述空鼓检测模块设置于所述机器人尾部，包括沿机器人宽度方向布置的直线滑台、安装在滑台滑块上的敲击电磁铁和拾音器，以及包覆所述敲击电磁铁和所述拾音器的隔音罩，所述直线滑台通过滑台驱动电机驱动，使所述敲击电磁铁和所述拾音器沿机器人宽度方向往复移动，对同一停靠位置下覆盖范围内的瓷砖进行逐点敲击检测；

所述控制与通信模块包括机载计算单元和电机驱动板，所述机载计算单元分别与所述拾音器、所述滑台驱动电机和所述敲击电磁铁连接，所述电机驱动板与所述运动机构和所述涵道风机连接；

所述机载计算单元被配置为：按照预设节奏控制所述敲击电磁铁对瓷砖表面进行一次或多次脉冲敲击，并采集所述拾音器的声学信号，对声学信号进行深度学习降噪处理和时频图转换，再将所述时频图输入空鼓分类网络，输出瓷砖空鼓检测结果。

根据权利要求1所述的瓷砖空鼓检测爬壁机器人，其特征在于：

所述驱动轮外表面覆有高摩擦橡胶层；所述驱动电机为直流减速电机或无刷直流电机，通过所述电机驱动板分别控制左右两侧驱动轮的转速和转向，以实现机器人在墙面上的直行、转弯及原地转向。

根据权利要求1所述的瓷砖空鼓检测爬壁机器人，其特征在于：

所述柔性密封结构包括柔性密封圈、橡胶圈和柔性密封垫中的至少一种，所述柔性密封结构采用硅胶、橡胶或聚氨酯等弹性材料制成，用于补偿瓷砖缝隙和表面不平整，提高负压密封效果；所述涵道风机用于从负压密封腔内部抽吸空气，通过调节所述涵道风机的转速调节吸附力大小。

根据权利要求1所述的瓷砖空鼓检测爬壁机器人，其特征在于：

所述敲击电磁铁为直线运动型电磁铁，其输出端安装敲击头，敲击头前端采用金属圆柱或半球形端部，利用所述直线滑台沿机器人宽度方向运动实现对墙面上不同位置瓷砖的重复敲击。

根据权利要求1所述的瓷砖空鼓检测爬壁机器人，其特征在于：

所述拾音器为电容式或电动式高灵敏度麦克风，通过支架安装在敲击电磁铁邻近位置，其拾音方向指向瓷砖墙面；所述拾音器通过屏蔽线与机载计算单元的音频采集模块电连接。

根据权利要求1所述的瓷砖空鼓检测爬壁机器人，其特征在于：

所述隔音罩采用金属或硬质塑料壳体，内侧粘贴多层吸声材料，形成包覆所述敲击电磁铁和所述拾音器的封闭腔体；所述隔音罩朝向墙面一侧设置开口，开口边缘贴附柔性密封垫，使敲击区域与外界环境隔离，以降低涵道风机噪声和环境噪声对拾音器的影响。

根据权利要求1所述的瓷砖空鼓检测爬壁机器人，其特征在于：

所述机载计算单元内部部署深度学习降噪网络，用于对拾音器采集的原始声波进行降噪处理；所述深度学习降噪网络为卷积递归网络（CRN）、U-Net 结构网络、全卷积编码–解码网络或其等效网络中的至少一种。

根据权利要求1所述的瓷砖空鼓检测爬壁机器人，其特征在于：

所述机载计算单元还被配置为：对降噪后的声波信号进行短时傅里叶变换或梅尔频率倒谱系数变换，生成时频图或梅尔谱图，并将其输入卷积神经网络分类器；所述分类器为 ResNet、EfficientNet、MobileNet 或其等效网络，用于输出瓷砖空鼓或实心类别标签及其置信度。

根据权利要求1所述的瓷砖空鼓检测爬壁机器人，其特征在于：

所述机载计算单元通过无线通信方式与地面工作站连接，将各敲击点的空间位置与对应的空鼓识别结果进行关联，基于建图坐标系生成建筑立面瓷砖空鼓分布图，并在地面工作站界面上以颜色或符号进行可视化展示。

根据权利要求1至9任一项所述的瓷砖空鼓检测爬壁机器人，其特征在于：

所述机载计算单元还连接有深度相机和惯性测量单元 IMU，深度相机用于获取墙面深度信息和图像信息，IMU 用于获取机器人的加速度与角速度信息；所述机载计算单元运行视觉惯性 SLAM 算法，对深度相机与 IMU 数据进行融合，实时估计爬壁机器人在墙面坐标系中的位姿并构建墙面三维稠密或半稠密地图，各空鼓检测点的空间坐标记录在所述三维地图坐标系中。

一种利用如权利要求1至10任一项所述的瓷砖空鼓检测爬壁机器人实现的瓷砖空鼓检测方法，其特征在于，包括如下步骤：

S1，壁面附着、SLAM 建图与巡检路径规划：启动所述吸附模块中的涵道风机，使机器人附着在瓷砖墙面上；开启深度相机和 IMU，机载计算单元运行视觉惯性 SLAM 算法，在机器人沿墙面初始运动过程中完成地图初始化，并实时更新墙面三维地图和机器人位姿；在所述地图或建筑立面平面图上规划机器人爬行路径和检测点分布，控制所述运动模块驱动机器人沿预设路径爬行或定点停靠；

S2，节奏敲击与声学信号采集：在每个预设检测点，所述机载计算单元控制直线滑台将敲击电磁铁和拾音器移动至目标瓷砖区域，并以设定频率驱动敲击电磁铁对瓷砖表面进行一次或多次脉冲敲击，同时控制拾音器采集对应的声学信号；

S3，深度学习降噪：所述机载计算单元将采集到的原始声波片段输入深度学习降噪网络，输出降噪后的声波信号；

S4，时频图生成与空鼓分类：所述机载计算单元对降噪后的声波信号进行时频变换生成时频图，将所述时频图输入空鼓分类网络，得到瓷砖空鼓或实心的分类结果及其置信度；

S5，结果记录与地图映射：所述机载计算单元将每个检测点在视觉惯性 SLAM 地图坐标系中的空间位置与对应的分类结果进行关联，形成瓷砖空鼓检测数据集，并将检测结果映射到三维墙面地图及其对应的建筑立面图，实现空鼓区域的标记和统计。

根据权利要求11所述的检测方法，其特征在于：

在步骤 S2 中，所述敲击频率、敲击次数以及敲击强度根据瓷砖类型和基层厚度进行参数设定；相邻敲击之间的时间间隔大于声波衰减时间，以避免相邻敲击信号互相干扰。

根据权利要求11所述的检测方法，其特征在于：

在步骤 S4 中，当空鼓分类网络输出的空鼓置信度低于预设阈值时，将该检测点标记为“疑似空鼓”，并在地面工作站界面上以不同颜色或符号显示，以提示人工复核或在该区域增加敲击次数。

**说明书**

**一种瓷砖空鼓检测爬壁机器人及其检测方法**

**技术领域**

本发明涉及土木工程结构检测技术领域，尤其涉及一种用于建筑外墙瓷砖空鼓自动检测的瓷砖空鼓检测爬壁机器人及其检测方法。

**背景技术**

建筑外墙瓷砖饰面因装饰效果好、耐久性高而被广泛应用于住宅、公共建筑及市政工程中。长期服役过程中，受温湿度变化、结构变形、材料收缩和施工质量等因素影响，瓷砖与基层砂浆或混凝土之间容易产生脱空，即通常所说的“空鼓”病害。空鼓区域在风荷载、温度应力或偶发冲击作用下容易导致瓷砖开裂甚至整块脱落，存在较大的安全隐患。

现有工程实践中，瓷砖空鼓检测主要依赖人工登高敲击或使用手持式检测设备在脚手架、吊篮上逐块检查。该方式检测效率低、劳动强度大，且高空作业安全风险突出，施工准备时间和成本也较高，难以满足大面积外墙定期检测的需求。

为降低人员登高风险，近年来有研究尝试利用无人机平台搭载红外热像仪或可见光相机，对瓷砖外墙进行远距离巡检。然而，无人机在瓷砖空鼓检测方面仍存在明显不足：一是无人机多通过搭载红外摄像头在一定安全距离外获取外墙表面温度场分布，属于非接触的远距离被动检测方式，难以实现类似敲击的接触式激励。瓷砖空鼓与实心区域之间的温差往往很小且受外界环境影响显著，其热异常易被日照强弱、立面朝向、风速变化、空调外机散热以及雨水干湿状态等因素掩盖；同时，瓷砖表面的反射率、发射率差异以及污渍、幕墙构造遮挡等也会引入较大干扰。加之无人机与墙面存在一定观测距离，红外图像的空间分辨率有限，难以在单块甚至半块瓷砖尺度上稳定分辨细微的温度差异，因此红外热像所反映的表面温度信息与瓷砖—基层之间真实的粘结状况关联度有限。二是无人机姿态受风速和气流干扰较大，悬停精度有限，难以在单块瓷砖尺度上实现稳定、重复的观测。三是无人机载重和续航能力受限，难以搭载敲击电磁铁、拾音器等接触式声学检测装置，也难以在大面积外墙上进行连续、高密度的精细检测。

与无人机远距离检测方式相比，爬壁机器人能够通过负压吸附或其他附着方式紧贴外墙表面，在瓷砖近距离甚至接触状态下布置敲击和拾音装置，更适合开展接触式声学空鼓检测。然而，已有的爬壁机器人多用于视觉裂缝检测或简单的锤击采集，普遍存在吸附方式适应性差、自动化程度不高、声学信号抗风机噪声能力不足以及检测结果难以与墙面空间位置精确对应等问题，难以满足高层建筑瓷砖外墙大面积、定量化空鼓检测的工程需求。

因此，有必要开发一种专用于瓷砖空鼓检测的爬壁机器人系统，将涵道风机负压吸附、滑台驱动的自动敲击扫描、深度学习声学信号处理以及视觉惯性 SLAM 建图与结果映射有机集成，在保证高空作业安全性的前提下，提高瓷砖空鼓检测的效率和可靠性。

**发明内容**

本发明要解决的技术问题是，针对现有瓷砖空鼓检测中人工高空作业安全性差、无人机红外检测对空鼓识别能力有限以及现有爬壁检测系统噪声抑制和空间定位能力不足等缺陷，提供一种瓷砖空鼓检测爬壁机器人及其检测方法，使建筑外墙瓷砖空鼓能够在同一爬壁平台上完成自动敲击检测、深度学习降噪与智能识别，并通过视觉惯性 SLAM 建图实现检测结果与墙面空间位置的精确关联，从而提高检测效率和检测可靠性，降低高空作业风险。

为解决上述技术问题，本发明采用的技术方案是：

一种瓷砖空鼓检测爬壁机器人，包括运动模块、吸附模块、空鼓检测模块以及控制与通信模块。

所述运动模块包括机器人底盘和设置在机器人底盘两侧的运动机构，运动机构包括驱动电机和与驱动电机连接的驱动轮，通过分别控制两侧驱动电机的转速和转向，实现爬壁机器人在瓷砖墙面上的直行、转弯及原地转向。

所述吸附模块设置在机器人底盘的底部中部，由涵道风机和柔性密封结构构成的负压密封腔组成，柔性密封结构采用硅胶、橡胶或聚氨酯等弹性材料制成，用于补偿瓷砖缝隙和表面不平整；涵道风机与负压密封腔连通，工作时从密封腔内部抽吸空气，使腔内气压低于外界大气压，从而在机器人底盘与瓷砖墙面之间产生稳定的负压吸附力，使爬壁机器人可靠附着于竖向或倾斜瓷砖墙面。

所述空鼓检测模块设置于机器人尾部，包括沿机器人宽度方向布置的直线滑台、安装在滑台滑块上的敲击电磁铁和拾音器，以及包覆敲击电磁铁和拾音器的隔音罩。直线滑台通过滑台驱动电机驱动，带动敲击电磁铁和拾音器沿机器人宽度方向往复移动，在机器人单次停靠位置下依次对一条瓷砖带上的多个位置进行敲击检测，从而扩大单次停靠的检测宽度，提高检测效率。敲击电磁铁的输出端安装敲击头，敲击头前端采用金属圆柱或半球形端部，用于与瓷砖表面接触并施加脉冲激励；拾音器为高灵敏度麦克风，安装在敲击电磁铁邻近位置，拾音方向指向瓷砖墙面，用于采集敲击引起的声学信号。隔音罩采用金属或硬质塑料壳体，内侧粘贴多层吸声材料，朝向墙面一侧开口，开口边缘设置柔性密封垫，工作时与瓷砖表面贴合，在敲击区域形成局部半封闭空间，从而有效屏蔽涵道风机噪声和环境噪声对拾音器的干扰。

所述控制与通信模块包括机载计算单元、电机驱动板、电源模块和无线通信模块。机载计算单元分别与拾音器、敲击电磁铁、滑台驱动电机以及运动机构相连，并与电机驱动板、电源模块配合实现运动控制和执行机构驱动；机载计算单元通过无线通信模块与地面工作站建立通信链路，用于在机器人与地面工作站之间传输检测结果、工作状态及控制指令。

机载计算单元还连接深度相机和惯性测量单元IMU，深度相机用于获取机器人前方或侧方瓷砖墙面的图像与深度信息，IMU用于获取机器人的加速度和角速度；机载计算单元运行视觉惯性SLAM算法，对深度相机和IMU数据进行融合，实时估计爬壁机器人在墙面坐标系中的六自由度位姿，并逐步构建墙面三维稠密或半稠密地图，各空鼓检测点的空间坐标记录在该地图坐标系中，为检测结果的立面映射和后续维修定位提供统一的空间基准。

机载计算单元内部部署深度学习降噪网络和空鼓分类网络。深度学习降噪网络用于对拾音器采集的原始敲击声波进行降噪处理，优选采用卷积递归网络（CRN）、U-Net结构网络或其等效网络中的至少一种，通过对大量混合噪声样本和对应干净敲击信号样本的训练，实现对涵道风机噪声、环境背景噪声和机器人自身机械噪声的自适应抑制，输出具有高信噪比的去噪声波。空鼓分类网络优选为 ResNet、EfficientNet、MobileNet 或其等效的卷积神经网络分类器，用于对去噪后敲击信号的时频图进行自动特征提取和空鼓/实心状态分类。

本发明还提供一种利用上述瓷砖空鼓检测爬壁机器人实现的瓷砖空鼓检测方法，包括如下步骤：

步骤S1，对机器人进行壁面附着、SLAM建图与巡检路径规划：启动吸附模块中的涵道风机，使负压密封腔内形成负压，令机器人附着在瓷砖墙面上；开启深度相机和IMU，机载计算单元运行视觉惯性SLAM算法，在机器人沿墙面初始运动过程中完成地图初始化，并实时更新墙面三维地图和机器人位姿；在所述地图或建筑立面平面图上规划机器人爬行路径和检测点分布，控制运动模块驱动机器人沿预设路径爬行或定点停靠。

步骤S2，进行节奏敲击与声学信号采集：在每个预设检测点，机载计算单元控制滑台驱动电机带动直线滑台，将敲击电磁铁和拾音器沿机器人宽度方向移动至目标瓷砖区域；随后按照设定频率、敲击次数和敲击强度驱动敲击电磁铁对瓷砖表面进行一次或多次脉冲敲击，拾音器同步采集对应的声学信号，机载计算单元记录各敲击的时间戳和机器人在SLAM地图中的位姿。

步骤S3，执行深度学习降噪：机载计算单元将采集到的原始声波片段输入深度学习降噪网络，得到去噪后的声波信号。敲击间隔时间设定大于声波在瓷砖及基层中的衰减时间，以避免相邻敲击信号互相干扰。

步骤 S4，进行时频图生成与空鼓分类：机载计算单元对去噪后的声波信号进行短时傅里叶变换或梅尔频率变换，生成振幅谱图、功率谱图或梅尔谱图等时频图像，并进行归一化和尺寸统一处理；将所述时频图输入空鼓分类网络，网络输出该检测点对应的“空鼓”“实心”或“疑似空鼓”等类别标签及其置信度。当空鼓置信度低于预设阈值时，将该检测点标记为“疑似空鼓”，可根据需要增加敲击次数或在报告中提示人工复查。

步骤S5，进行结果记录与地图映射：机载计算单元将每个检测点在视觉惯性SLAM地图坐标系中的空间位置与对应的空鼓分类结果进行关联，形成瓷砖空鼓检测数据集，并通过无线通信模块发送至地面工作站；地面工作站在墙面三维地图及其投影的建筑立面图上绘制各检测点，空鼓区域以高亮颜色或符号标记，疑似空鼓区域采用不同颜色或虚线边界表示，实现瓷砖空鼓检测结果在建筑立面上的可视化展示和统计分析。

本发明具有如下有益效果：

一，在单一爬壁机器人平台上集成运动模块、吸附模块、空鼓检测模块以及控制与通信模块，通过机载计算单元实现从自动敲击、声学信号采集、深度学习降噪与空鼓识别到检测结果立面映射的完整流程，避免传统“搭脚手架+人工敲击”的高风险、低效率作业模式，显著提高瓷砖空鼓检测效率和作业安全性。

二，采用涵道风机与柔性密封结构构成的负压密封腔，实现对竖向瓷砖墙面的稳定附着，柔性密封结构能够适应瓷砖缝隙和表面不平整，在保证附着可靠性的同时兼顾爬行阻力和机动性，适用于多种外墙瓷砖饰面构造。

三，空鼓检测模块采用沿机器人宽度方向布置的直线滑台，驱动敲击电磁铁和拾音器在单次停靠位置下对一条瓷砖带进行逐点扫描，极大扩大单次停靠的检测覆盖宽度，减少机器人在墙面上的移动次数，从而提高整体检测效率，更适合大面积外墙瓷砖立面的高密度检测。

四，通过在敲击电磁铁和拾音器外侧设置隔音罩，并在隔音罩内侧粘贴多层吸声材料、在开口边缘设置柔性密封垫，在敲击区域形成局部半封闭空间，有效抑制涵道风机及环境噪声，使拾音器采集的敲击声波信号具有更高信噪比，为后续深度学习降噪与空鼓识别提供更干净的原始数据。

五，在机载计算单元上部署深度学习降噪网络和空鼓分类网络，对敲击声波进行端到端的降噪和时频图分类，相比传统的谱减、带通滤波及人工经验判别方法，更能充分挖掘空鼓与实心状态在频带能量分布、共振持续时间等方面的细微差异，提高空鼓识别的准确率和鲁棒性。

六，通过深度相机和IMU组成的视觉惯性SLAM系统，在检测过程中实时构建墙面三维地图并估计爬壁机器人位姿，将每个敲击检测点的空间坐标精确映射至SLAM地图坐标系及其对应的建筑立面图，实现瓷砖空鼓检测结果的空间可视化与精确定位，为后续维修方案制定、危险等级评估和维修成本估算提供直观可靠的空间信息，具有良好的工程应用前景。

**附图说明**

为了更清楚地说明本发明具体实施方式或现有技术中的技术方案，下面将对具体实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图是本发明的一些实施方式，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

图1 为本发明瓷砖空鼓检测爬壁机器人的整体结构示意图。

图2 为本发明运动模块与吸附模块（涵道风机）的内部结构示意图。

图3 为本发明吸附模块的底部结构示意图。

图4 为本发明视觉模块的结构示意图。

图5 为本发明空鼓检测模块的分解结构示意图。

1运动模块；2吸附模块；3视觉模块；4检测模块；11小车底盘；12驱动电机；13车轮；21涵道风机；22风机连接件；23密封垫圈；31深度相机；32舵机云台1；33舵机云台2；41检测模块连接件；42同步带滑台；43隔音罩；44敲击电磁铁；45拾音器；46隔音罩盖板。

**具体实施方式**

下面结合附图对本发明的实施方式进一步说明。

下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步详细说明。本领域普通技术人员应当理解，在不背离本发明构思的前提下，可以对以下实施例中的具体结构和参数进行调整，这些调整均落入本发明的保护范围之内。

如图1所示，本实施例的瓷砖空鼓检测爬壁机器人主要包括运动模块1、吸附模块2、视觉模块3以及空鼓检测模块4。这些模块集成在机器人底盘11上，由控制与通信模块统一协调控制。

如图2所示，运动模块1包括机器人底盘11以及设置在底盘两侧的运动机构。运动机构包括多个驱动电机12和驱动轮13。驱动轮13优选覆盖高摩擦橡胶层，通过电机驱动板分别控制两侧驱动轮13的转速和转向，实现机器人在竖向墙面上的直行、转弯及原地转向。

如图2和图3所示，吸附模块2设置在机器人底盘11的底部中部。它主要由涵道风机21和柔性密封结构（如图3中的风机连接件22和密封垫圈23）构成的负压密封腔组成。工作时，涵道风机21从密封腔内部抽吸空气，使腔内气压低于外界大气压，从而产生强大的负压吸附力，使机器人可靠地附着在瓷砖墙面上。密封垫圈23采用硅胶、橡胶或聚氨酯等弹性材料制成，用于补偿瓷砖缝隙和表面不平整，保证密封效果。

如图4所示，视觉模块3包括深度相机31和用于调节相机姿态的舵机云台32。视觉模块3与惯性测量单元IMU配合，由机载计算单元运行视觉惯性SLAM算法。深度相机31用于获取墙面深度信息和图像信息，IMU用于获取机器人的加速度与角速度信息，二者数据融合后可实时估计机器人在墙面坐标系中的位姿并构建墙面三维地图。

如图5所示，空鼓检测模块4设置于机器人尾部，通过检测模块连接件41固定在机器人底盘11上。该模块的核心是一个沿机器人宽度方向布置的直线滑台42。在滑台的滑块上，安装有敲击电磁铁44和拾音器45。

本发明的关键创新点在于，敲击电磁铁44和拾音器45被一个隔音罩43及隔音罩盖板46所包覆。隔音罩43的壳体内侧粘贴有多层吸声材料，其朝向墙面的一侧设置开口，开口边缘贴附柔性密封垫。在检测时，该柔性密封垫贴合瓷砖表面，形成一个局部的、半封闭的声学空间。这能极大降低来自吸附模块的涵道风机21的强噪声和环境噪声对高灵敏度拾音器45的干扰。

控制与通信模块包括机载计算单元、电机驱动板、电源模块和无线通信模块。机载计算单元是整个系统的核心，它连接所有执行器（驱动电机12、涵道风机21、直线滑台42的驱动电机、敲击电磁铁44）和传感器（拾音器45、深度相机31、IMU）。

本发明所提供的一种瓷砖空鼓检测方法，具体通过上述结构实现，包括如下步骤：

步骤S1（附着与建图）：启动涵道风机21，使机器人吸附在墙面。控制运动模块1移动，同时视觉模块3（深度相机31和IMU）开始工作，机载计算单元运行SLAM算法构建地图并实时定位。

步骤S2（扫描敲击）：机器人停靠在指定位置后，控制空鼓检测模块4工作。直线滑台42带动隔音罩43内的敲击电磁铁44和拾音器45沿宽度方向扫描。在每个检测点，敲击电磁铁44对瓷砖进行脉冲敲击，隔音罩43内的拾音器45同步采集声学信号。

步骤S3（降噪）：机载计算单元将采集到的原始声波输入第一深度学习降噪网络（如CRN或U-Net），对混杂的风机噪声等进行处理，输出降噪后的干净声波信号。

步骤S4（分类）：机载计算单元对降噪后的声波信号进行时频变换（如短时傅里叶变换），生成时频图（Spectrogram）。随后，将该时频图输入第二深度学习分类网络（如ResNet或EfficientNet），网络输出“空鼓”、“实心”或“疑似空鼓”的分类结果。

步骤S5（结果映射）：机载计算单元将S4得到的分类结果，与S1中SLAM系统提供的当前检测点空间坐标相关联。最终，所有检测结果被映射到三维地图或建筑立面图上，以颜色或符号进行可视化展示，生成瓷砖空鼓分布图。

通过上述实施方式可以看出，本发明在单一平台上集成了稳定吸附、滑台扫描、物理隔音、算法降噪和SLAM建图定位功能 ，实现了高层建筑外墙瓷砖空鼓的高效、安全和智能化检测。

**说明书附图**

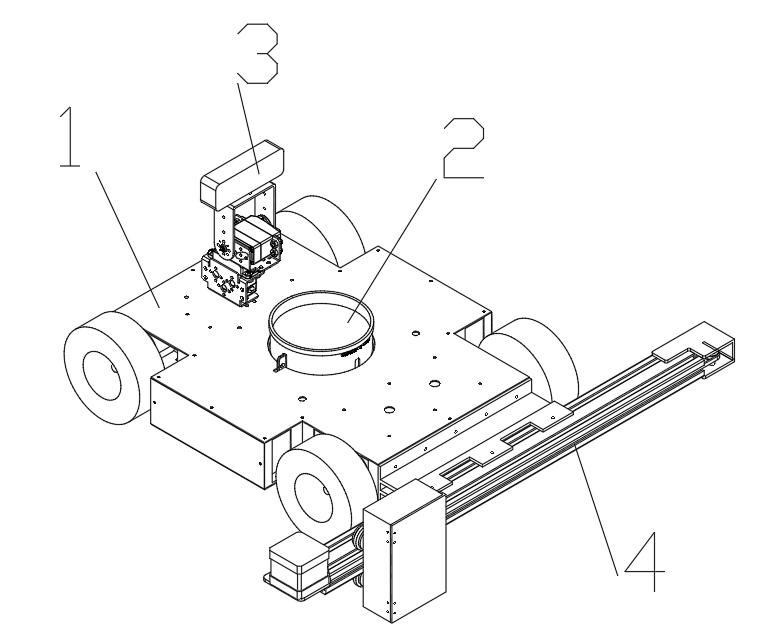


图1

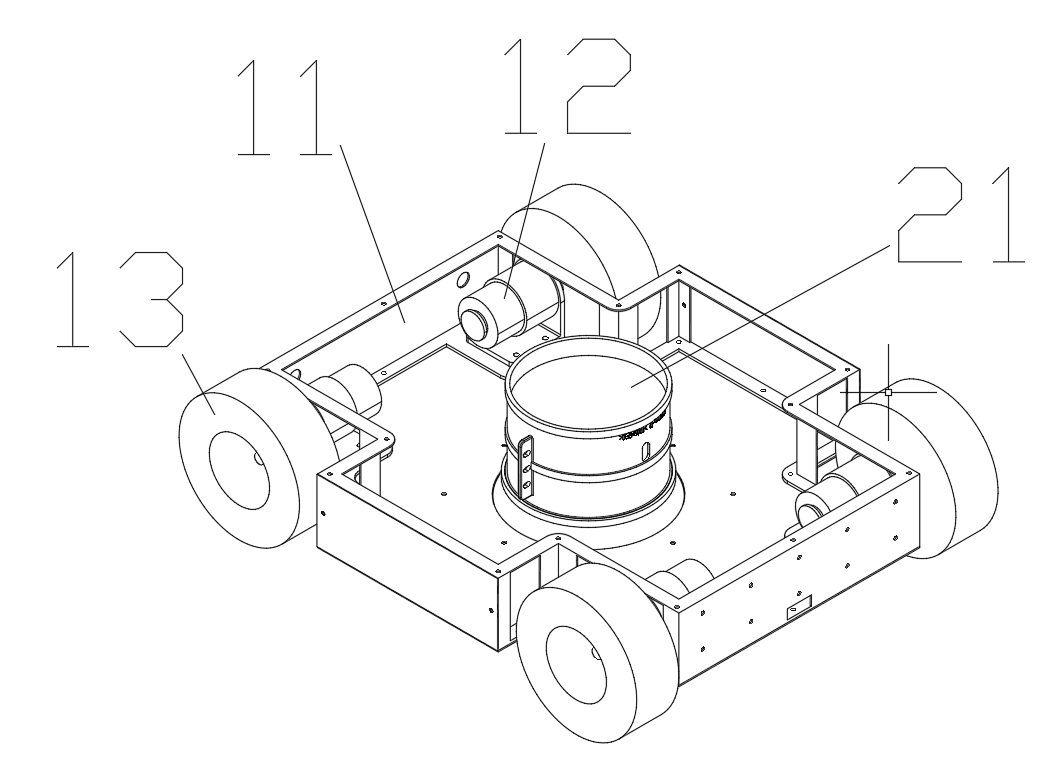


图2

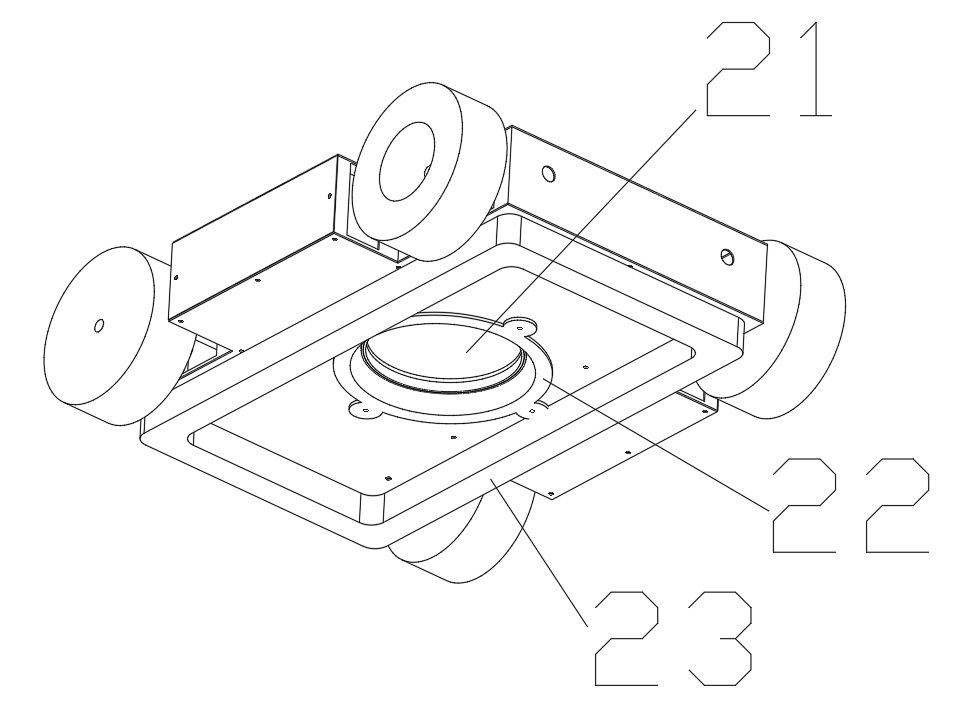


图3

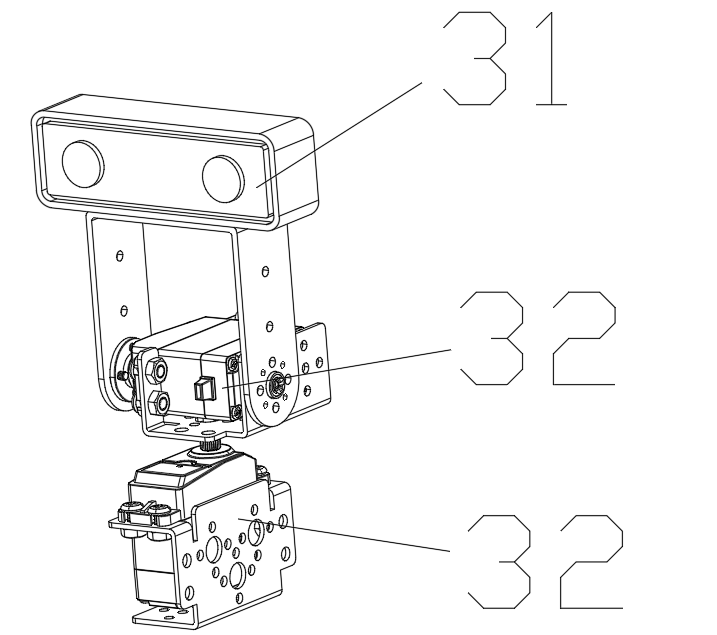


图4

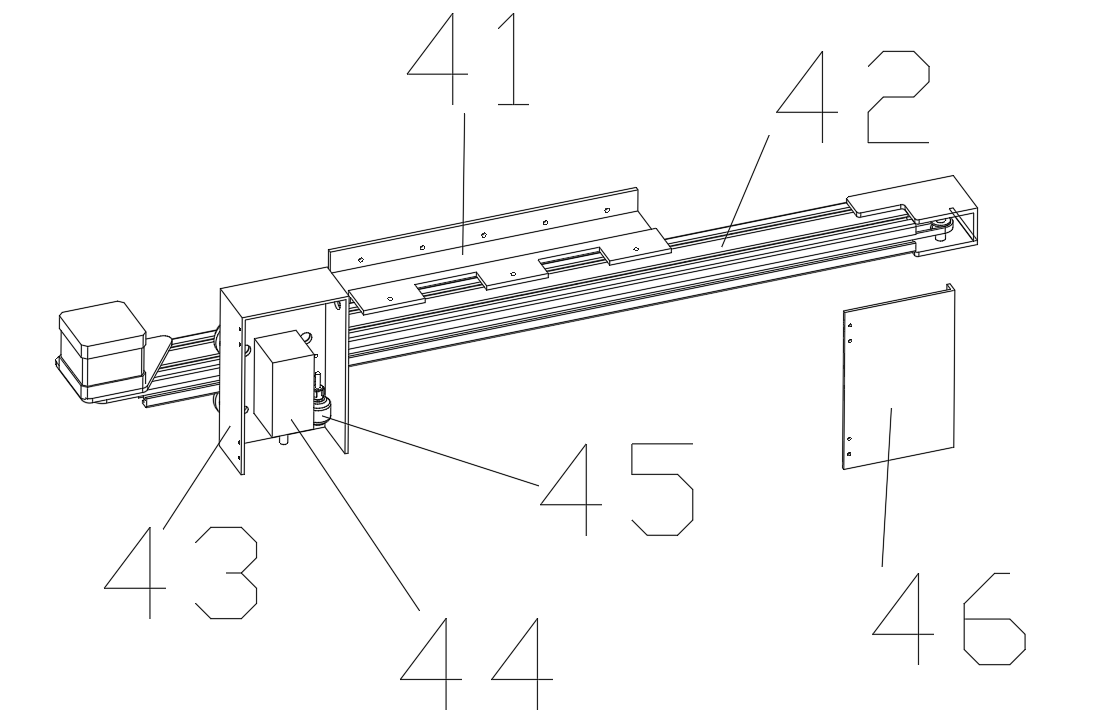


图5

图6

图7