



国家知识产权局

100095

北京市海淀区温泉镇创客小镇社区配套商业楼 15#楼一层 142 室
北京劲创知识产权代理事务所（普通合伙） 徐家升(18618167512)

发文日:

2020 年 06 月 10 日



申请号或专利号: 202010520509.4

发文序号: 2020061001177570

专 利 申 请 受 理 通 知 书

根据专利法第 28 条及其实施细则第 38 条、第 39 条的规定, 申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日、申请人和发明创造名称通知如下:

申请号: 202010520509.4

申请日: 2020 年 06 月 08 日

申请人: 浙江大学

发明创造名称: 一种动物听觉评估检测装置及方法

经核实, 国家知识产权局确认收到文件如下:

说明书附图 每份页数:5 页 文件份数:1 份

说明书摘要 每份页数:1 页 文件份数:1 份

专利代理委托书 每份页数:2 页 文件份数:1 份

说明书 每份页数:12 页 文件份数:1 份

发明专利请求书 每份页数:5 页 文件份数:1 份

权利要求书 每份页数:3 页 文件份数:1 份 权利要求项数: 7 项

实质审查请求书 每份页数:1 页 文件份数:1 份

专利发明人排名:
第一发明人: 林康宁
第二发明人: 符洁敏

俞晓峰
2020.08.19

提示:

1. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时, 可以向国家知识产权局请求更正。
2. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 再向国家知识产权局办理各种手续时, 均应当准确、清晰地写明申请号。
3. 国家知识产权局收到向外国申请专利保密审查请求书后, 依据专利法实施细则第 9 条予以审查。

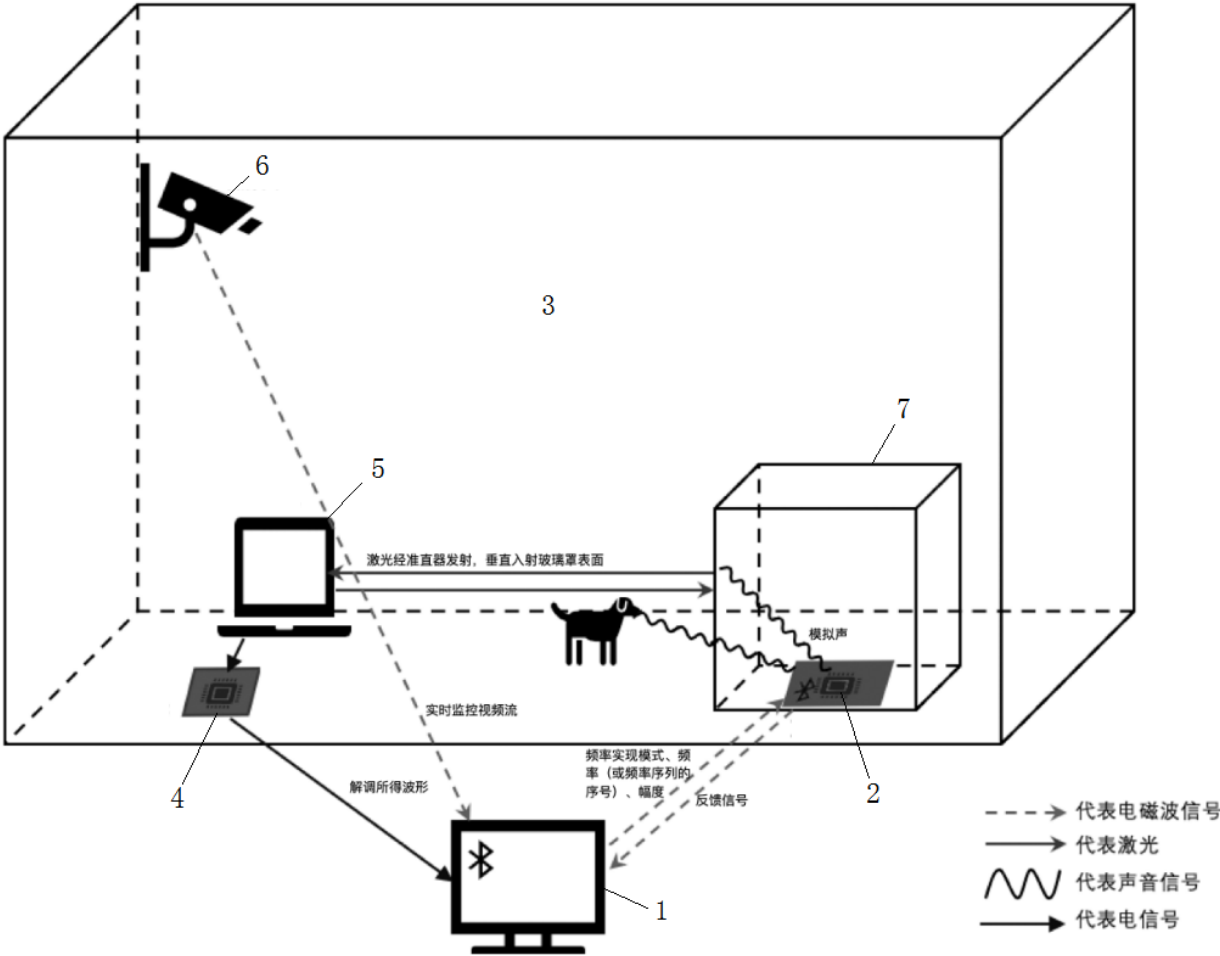
审 查 员: 自动受理

审查部门: 专利局初审及流程管理部

200101
2019.11

纸件申请, 回函请寄: 100088 北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 国家知识产权局受理处收
电子申请, 应当通过电子专利申请系统以电子文件形式提交相关文件。除另有规定外, 以纸件等其他形式提交的文件视为未提交。

本发明公开了一种动物听觉评估检测装置及方法，包括系统控制端、无线控制发生模块、远程声场发生系统、FPGA 模块、光纤激光测振仪、WIFI 监控摄像头和玻璃罩，无线控制发生模块装配在玻璃罩内，系统控制端与无线控制发生模块无线通讯。本发明提出的动物听觉评估检测装置及方法，具有如下优点：1、实现远距离的声音检测，避免了将传感设备置于动物身旁所带来的问题。2、发声模块在一种模式下发出特定频率、幅度的声音信号，另一种模式下发出特定幅度、频率为变化序列的声音信号，可以更加契合动物的听觉习惯。3、加入了动物反应监控模块监控模拟声时动物的反应，通过视频与音频的结合，有利于动物听觉的评估。



1. 一种动物听觉评估检测装置，其特征在于，包括系统控制端（1）、无线控制发生模块（2）、远程声场发生系统（3）、FPGA 模块（4）、光纤激光测振仪（5）、WIFI 监控摄像头（6）和玻璃罩（7），无线控制发生模块（2）装配在玻璃罩（7）内，系统控制端（1）与无线控制发生模块（2）无线通讯，无线控制发生模块（2）与光纤激光测振仪（5）无线通讯，光纤激光测振仪（5）的输出端与 FPGA 模块（4）的输入端相连，FPGA 模块（4）的输出端与系统控制端（1）相连，WIFI 监控摄像头（6）的信号发送端与系统控制端（1）相连；

系统控制端（1）：用于无线控制发生模块（2）发送声音信号的频率及幅度数据，并接收无线控制发生模块（2）回传的反馈信号，同时观察光纤激光测振仪（5）输出的解调后的振动波形；

所述无线控制发生模块（2）置于玻璃罩（7）内，发出与频率、幅度数据相对应的声音信号，以引起玻璃罩（7）表面振动，传输给动物的听觉系统；所述无线控制发生模块（2）向系统控制端（1）发送反馈信号，确认当前发出的信号频率与幅度；

所述远程声场发生系统（3）通过光纤传感器检测动物所在区域实际模拟声的频率和功率，光纤传感器的调制光信号经准直器垂直入射至玻璃罩（7）表面并反射回准直器，从而解调出玻璃罩（7）表面的振动波形，以反映动物所在区域实际模拟声的频率和功率。

2. 如权利要求 1 所述的一种动物听觉评估检测装置，其特征在于：WIFI 监控摄像头（6）与系统控制端（1）通过 wifi 连接，用于观察在无线控制发生模块（2）发出特定频率、幅度的模拟声时动物的反应。

3. 如权利要求 1 所述的一种动物听觉评估检测装置，其特征在于：所述玻璃罩（7）与待测动物保持的距离不大于 30m。

4. 如权利要求 1 所述的一种动物听觉评估检测装置，其特征在于：所述

无线控制发生模块（2）采用蓝牙控制发生模块，蓝牙控制发生模块包括微处理器、电源、信号发生器、蓝牙模块、单片机、无源蜂鸣器、一级滤波器、一级放大器、DDS 集成芯片和 D/A 转换集成芯片，其中单片机采用芯片 U0 作为主芯片，主芯片 U0 的型号为 STM32F，DDS 集成芯片采用芯片 U1，芯片 U1 的型号为 AD9834，D/A 转换集成芯片采用芯片 U4，芯片 U4 的型号为 AD5620；所述蓝牙模块与单片机电性连接，单片机与信号发生器电性连接，信号发生器的输出端与一级放大器的输入端电性连接，一级放大器的输出端与一级滤波器的输入端电性连接，一级滤波器的输出端与无源蜂鸣器的输入端电性连接；所述单片机与微处理器电性连接，微处理器、信号发生器、蓝牙模块、单片机、无源蜂鸣器均与电源电性连接。

5. 如权利要求 1 所述的一种动物听觉评估检测装置，其特征在于：所述远程声场发生系统（3）通过光纤传感器检测动物所在区域实际模拟声的频率和功率，光纤传感器包括激光器、PZT 环、马赫增德尔干涉仪、环形器、准直器、光电探测器、FPGA 模块（4）；激光器经过 PZT 环进行高频调制，再经光耦合器使输入马赫增德尔干涉仪的光信号分成调制光信号和参考光信号，其中调制光信号经过环形器和准直器垂直入射至玻璃罩（7）表面并反射回准直器，利用多普勒效应将振动信号耦合进光信号，从马赫增德尔干涉仪输出的两路信号经光电探测器输出电信号，两路电信号作差后输入 FPGA 模块（4），依次经过减法模块、混频模块、微分交叉相乘模块、积分模块以及高通滤波模块。

6. 如权利要求 1 所述的一种动物听觉评估检测装置，其特征在于：所述无线控制发生模块（2）中的微弱信号发生由低功耗的直接数字频率合成 DDS 芯片和低功耗 DAC 实现。

7. 一种如权利要求 1 所述的动物听觉评估检测的方法，其特征在于，包括如下步骤：

S1: 将系统控制端（1）、无线控制发生模块（2）、远程声场发生系统（3）、FPGA 模块（4）、光纤激光测振仪（5）、WIFI 监控摄像头（6）和玻璃罩（7）置于安静的环境中，将无线控制发生模块（2）中的硬件电路置于玻璃罩（7）内，并使待测动物离开玻璃罩（7）的距离不大于 30m；

S2: 使用蓝牙连接系统控制端（1）与远程声场发生系统（3），用以远程控制频率产生模式、声音信号的频率和幅度；首先，暂停发出声音信号，在一段时间内，保持环境安静，监控动物的状态；

S3: 系统控制端（1）每次向无线控制发生模块（2）发送三个数值，包括频率产生模式选择数值、频率数值、幅度数值；在模式一下，单片机向 DDS 模块传输频率数值序列，使 DDS 模块产生幅度不变、频率变化的波形；在模式二下，DDS 模块产生幅度固定、频率也固定的正弦波形，从而使无线控制发生模块（2）发出特定频率、幅度的声音；

S4: 监控动物的若动物出现移动位置、抬头、改变动作、眼珠转动等与安静状态时不同的反应，则判定动物能够听到微弱声音。同时使用远程声场发生系统（3）测量小动物所处位置的声音信号的幅度与频率，并记录，用于量化小动物对微弱声音的感知能力；

S5: 重复步骤 S3、步骤 S4，找出动物能够感知的声音信号范围；

S6: 对检测得到的实验数据进行筛选，得出结论。

一种动物听觉评估检测装置及方法

技术领域

本发明涉及到听觉评估检测技术领域，特别涉及一种动物听觉评估检测装置及方法。

背景技术

通过测量动物听觉，可以帮助人们了解动物的健康状态，这对于预防疾病和防止扩散能起到帮助。

评估动物听觉需要检测动物所在区域实际模拟声的频率和功率，现有技术中，检测动物所在区域的声音，需要将机械式的声音检测设备设置在动物附近。一方面机械式的声音检测设备精度不高，难以检测微弱声音信号，另一方面将庞大的机械式声音检测设备置于动物旁边，容易受到环境噪声的干扰，并且可能对待测动物造成惊吓，也不利于设备维护。

基于上述存在的缺陷，提出一种动物听觉评估检测装置及方法。

发明内容

本发明的目的在于提供一种动物听觉评估检测装置及方法，实现远距离的声音检测，避免了将传感设备置于动物身旁所带来的问题，发声模块在一种模式下发出特定频率、幅度的声音信号，另一种模式下发出特定幅度、频率为变化序列的声音信号，可以更加契合动物的听觉习惯；加入了动物反应监控模块监控模拟声时动物的反应，通过视频与音频的结合，有利于动物听觉的评估，以解决上述背景技术中提出的问题。

为实现上述目的，本发明提供如下技术方案：一种动物听觉评估检测装置，包括系统控制端、无线控制发生模块、远程声场发生系统、FPGA 模块、光纤激光测振仪、WIFI 监控摄像头和玻璃罩，无线控制发生模块装配在玻璃罩内，系统控制端与无线控制发生模块无线通讯，无线控制发生模块与光纤激光测振仪无线通讯，光纤激光测振仪的输出端与 FPGA 模块的输入端相连，

FPGA 模块的输出端与系统控制端相连，WIFI 监控摄像头的信号发送端与系统控制端相连；

系统控制端：用于无线控制发生模块发送声音信号的频率及幅度数据，并接收无线控制发生模块回传的反馈信号，同时观察光纤激光测振仪输出的解调后的振动波形。

所述无线控制发生模块置于玻璃罩内，发出与频率、幅度数据相对应的声音信号，以引起玻璃罩表面振动，传输给动物的听觉系统；所述无线控制发生模块向系统控制端发送反馈信号，确认当前发出的信号频率与幅度。

所述远程声场发生系统通过光纤传感器检测动物所在区域实际模拟声的频率和功率，光纤传感器的调制光信号经准直器垂直入射至玻璃罩表面并反射回准直器，从而解调出玻璃罩表面的振动波形，以反映动物所在区域实际模拟声的频率和功率。

优选地，所述 WIFI 监控摄像头与系统控制端通过 wifi 连接，用于观察在无线控制发生模块发出特定频率、幅度的模拟声时动物的反应。

优选地，所述玻璃罩与待测动物保持的距离不大于 30m。

优选地，所述无线控制发生模块采用蓝牙控制发生模块，蓝牙控制发生模块包括微处理器、电源、信号发生器、蓝牙模块、单片机、无源蜂鸣器、一级滤波器、一级放大器、DDS 集成芯片和 D/A 转换集成芯片，其中单片机采用芯片 U0 作为主芯片，主芯片 U0 的型号为 STM32F，DDS 集成芯片采用芯片 U1，芯片 U1 的型号为 AD9834，D/A 转换集成芯片采用芯片 U4，芯片 U4 的型号为 AD5620；所述蓝牙模块与单片机电性连接，单片机与信号发生器电性连接，信号发生器的输出端与一级放大器的输入端电性连接，一级放大器的输出端与一级滤波器的输入端电性连接，一级滤波器的输出端与无源蜂鸣器的输入端电性连接；所述单片机与微处理器电性连接，微处理器、信号发生器、蓝牙模块、单片机、无源蜂鸣器均与电源电性连接。

优选地，所述远程声场发生系统通过光纤传感器检测动物所在区域实际模拟声的频率和功率，光纤传感器包括激光器、PZT 环、马赫增德尔干涉仪、环形器、准直器、光电探测器、FPGA 模块；激光器经过 PZT 环进行高频调制，再经光耦合器使输入马赫增德尔干涉仪的光信号分成调制光信号和参考光信号，其中调制光信号经过环形器和准直器垂直入射至玻璃罩表面并反射回准直器，利用多普勒效应将振动信号耦合进光信号，从马赫增德尔干涉仪输出的两路信号经光电探测器输出电信号，两路电信号作差后输入 FPGA 模块，依次经过减法模块、混频模块、微分交叉相乘模块、积分模块以及高通滤波模块。

优选地，所述无线控制发生模块中的微弱信号发生由低功耗的直接数字频率合成 DDS 芯片和低功耗 DAC 实现。

本发明提供的另一技术方案：一种动物听觉评估检测的方法，包括如下步骤：

S1：将系统控制端、无线控制发生模块、远程声场发生系统、FPGA 模块、光纤激光测振仪、WIFI 监控摄像头和玻璃罩置于安静的环境中，将无线控制发生模块中的硬件电路置于玻璃罩内，并使待测动物离开玻璃罩的距离不大于 30m；

S2：使用蓝牙连接系统控制端与远程声场发生系统，用以远程控制频率产生模式、声音信号的频率和幅度；首先，暂停发出声音信号，在一段时间内，保持环境安静，监控动物的状态；

S3：系统控制端每次向无线控制发生模块发送三个数值，包括频率产生模式选择数值、频率数值、幅度数值；在模式一下，单片机向 DDS 模块传输频率数值序列，使 DDS 模块产生幅度不变、频率变化的波形；在模式二下，DDS 模块产生幅度固定、频率也固定的正弦波形，从而使无线控制发生模块发出特定频率、幅度的声音；

S4: 监控动物的若动物出现移动位置、抬头、改变动作、眼珠转动等与安静状态时不同的反应, 则判定动物能够听到微弱声音。同时使用远程声场发生系统测量小动物所处位置的声音信号的幅度与频率, 并记录, 用于量化小动物对微弱声音的感知能力;

S5: 重复步骤 S3、步骤 S4, 找出动物能够感知的声音信号范围;

S6: 对检测得到的实验数据进行筛选, 得出结论。

与现有技术相比, 本发明的有益效果是: 本发明提出的动物听觉评估检测装置及方法, 具有如下优点:

1、通过将发声模块置于玻璃罩内, 将玻璃罩置于待测动物旁边, 以玻璃罩表面的振动代表动物所在点声音的频率、振幅, 通过光纤传感器检测玻璃表面振动波形实现了高精度声音检测; 同时利用准直器发射调制激光并接收反射光信号的方式检测出玻璃表面振动, 该方式可实现远距离的声音检测, 避免了将传感设备置于动物身旁所带来的问题。

2、发声模块在一种模式下发出特定频率、幅度的声音信号, 另一种模式下发出特定幅度、频率为变化序列的声音信号, 可以更加契合动物的听觉习惯。

3、加入了动物反应监控模块监控模拟声时动物的反应, 通过视频与音频的结合, 有利于动物听觉的评估。

附图说明

图 1 为本发明的系统场景布置图;

图 2 为本发明的系统构成框图;

图 3 为本发明的发声模块中单片机的电路原理图;

图 4 为本发明的蓝牙控制发声模块中 DDS 集成芯片的电路原理图;

图 5 为本发明的蓝牙控制发声模块中 D/A 转换集成芯片的电路原理图;

图 6 为本发明的远程声场检测模块的工作框图;

图 7 为本发明的方法实施的流程图。

图中：1、系统控制端；2、无线控制发生模块；3、远程声场发生系统；4、FPGA 模块；5、光纤激光测振仪；6、WIFI 监控摄像头；7、玻璃罩。

具体实施方式

下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

请参阅图 1-2，一种动物听觉评估检测装置，包括系统控制端 1、无线控制发生模块 2、远程声场发生系统 3、FPGA 模块 4、光纤激光测振仪 5、WIFI 监控摄像头 6 和玻璃罩 7，无线控制发生模块 2 装配在玻璃罩 7 内，玻璃罩 7 与待测动物保持的距离不大于 30m，系统控制端 1 与无线控制发生模块 2 无线通讯，无线控制发生模块 2 与光纤激光测振仪 5 无线通讯，光纤激光测振仪 5 的输出端与 FPGA 模块 4 的输入端相连，FPGA 模块 4 的输出端与系统控制端 1 相连，WIFI 监控摄像头 6 的信号发送端与系统控制端 1 相连。

系统控制端 1：用于无线控制发生模块 2 发送声音信号的频率及幅度数据，并接收无线控制发生模块 2 回传的反馈信号，同时观察光纤激光测振仪 5 输出的解调后的振动波形。

其中：无线控制发生模块 2 置于玻璃罩 7 内，发出与频率、幅度数据相对应的声音信号，以引起玻璃罩 7 表面振动，传输给动物的听觉系统；无线控制发生模块 2 向系统控制端 1 发送反馈信号，确认当前发出的信号频率与幅度。

请参阅图 6，远程声场发生系统 3 通过光纤传感器检测动物所在区域实际模拟声的频率和功率，光纤传感器的调制光信号经准直器垂直入射至玻璃罩 7 表面并反射回准直器，从而解调出玻璃罩 7 表面的振动波形，以反映动物所

在区域实际模拟声的频率和功率。

其中：WIFI 监控摄像头 6 与系统控制端 1 通过 wifi 连接，用于观察在无线控制发生模块 2 发出特定频率、幅度的模拟声时动物的反应。

其中：无线控制发生模块 2 采用蓝牙控制发生模块，蓝牙控制发生模块包括微处理器、电源、信号发生器、蓝牙模块、单片机、无源蜂鸣器、一级滤波器、一级放大器、DDS 集成芯片和 D/A 转换集成芯片，其中单片机采用芯片 U0 作为主芯片，主芯片 U0 的型号为 STM32F，DDS 集成芯片采用芯片 U1，芯片 U1 的型号为 AD9834，D/A 转换集成芯片采用芯片 U4，芯片 U4 的型号为 AD5620；所述蓝牙模块与单机电性连接，单片机与信号发生器电性连接，信号发生器的输出端与一级放大器的输入端电性连接，一级放大器的输出端与一级滤波器的输入端电性连接，一级滤波器的输出端与无源蜂鸣器的输入端电性连接；所述单片机与微处理器电性连接，微处理器、信号发生器、蓝牙模块、单片机、无源蜂鸣器均与电源电性连接。

请参阅图 3-5，芯片 U0 的 PA4 与芯片 U1 的 D15 相连，芯片 U0 的 PA5 与芯片 U1 的 D14 相连，芯片 U0 的 PA6 与芯片 U1 的 D13 相连，芯片 U0 的 PA7 与芯片 U1 的 D11 相连，芯片 U0 的 PB0 与芯片 U1 的 D9 相连，芯片 U0 的 PB1 与芯片 U1 的 D10 相连，保证 DDS 集成芯片正常发生信号，并实现信号频率的控制；芯片 U0 的 PB10 与蓝牙模块的 RXD 相连，芯片 U0 的 PB11 与 TXD 相连，实现系统控制端 1 与发声模块的信息交互，单片机的 PB12 与 D/A 转换集成芯片的 D5 相连，芯片 U0 的 PB13 与 D/A 转换集成芯片的 D6 相连，芯片 U0 的 PB15 与 D/A 转换集成芯片的 D7 相连，控制 D/A 转换集成芯片输出特定幅度的电平，间接控制信号的幅度；其余管脚保证单片机正常工作；D/A 转换集成芯片的 D3、D4 与 DDS 集成芯片的 D1 通过电阻 RSET 相连，D/A 转换集成芯片发送特定幅度的电平至 DDS 集成芯片，从而控制输出正弦波的幅度；DDS 集成芯片的 D20 与无源蜂鸣器的正极相连，DDS 集成

芯片发出的正弦波触发无源蜂鸣器发出声音信号。

通过蓝牙远程控制无源蜂鸣器发出不同频率、功率的声音，因此可以作为微弱声音发生系统，由于测量需要密闭、隔音的环境，蓝牙控制装置可在一定距离外控制装置发声，因此更加有利于系统功能的实现。采用 DDS 集成芯片来控制声音信号的频率，使用 DAC 芯片间接控制声音信号的幅度，实现精确调控发声系统的频率与功率，尤其是微弱声音信号，使用特定型号的 DDS 芯片，可以包含大多动物可听声音频率范围；而且 DDS 芯片产生的波形频率调制梯度较小，可满足精确调控声音频率的要求。

由于动物对某特定频率序列的敏感程度较高，编程使单片机可以实现对于频率的不同模式控制，并将特定的频率数值序列写入单片机，包括由低到高渐变，由高到低渐变，频率高低跳变的不同序列；系统控制端 1 每次向蓝牙控制发声模块发送三个数值，包括频率产生模式选择数值、频率数值（如果模式选择模式一，则此项选相应的频率数值序列对应的序号）、幅度数值。在模式一下，单片机向 DDS 模块传输频率数值序列，使 DDS 模块产生幅度不变、频率变化的波形；在模式二下，DDS 模块产生幅度固定、频率也固定的正弦波形。通过产生频率变化的波形，得到特定变化频率的模拟声信号，可以观察动物对某一频率序列的敏感程度，以及在该序列下动物能感知的最低功率的声音信号。

DDS 模块的实现以 AD9834 芯片为例，AD9834 芯片内置相位调制和频率调制功能，从而研究不同的频率、音量下，动物对声音信号的感知能力；为了调制输出信号的幅度，使用一个低功耗的 D/A 转换集成芯片来设置满量程电流。D/A 转换集成芯片的基准电压是内部基准电压 V_{REF} 和外部电阻 R_{SET}

的函数： $I_{ref} = \frac{V_{ref}}{R_{set}}$ ，其中 V_{ref} 是 D/A 转换集成芯片的内部基准电压，典型值

为 1.2V, RSET 电阻的典型值为 6.8k。D/A 转换集成芯片的满量程电流是基准电流的倍数, AD9834 的满量程电流为:

$$I_{FULLSCALE} = 18 \times (V_{ref}/R_{set})$$

如果 D/A 转换集成芯片的 FS ADJUST(D1)链接到一个可变电压, 则满量程电流为:

$$I_{FULLSCALE} = 18 \times (V_{ref} - V_{DAC})/R_{set}$$

改变 V_{DAC} 可改变满量程电流, 从而改变 DDS 集成芯片的电压输出。

请参阅图 6, 远程声场检测模块的工作原理如下: 基于 FPGA 的 PGC 内调制方式, 具有低成本、便携化、性能稳定的特点; 蓝牙控制的发声模块发出微弱声音信号后, 声音信号传播进空气, 到达玻璃罩 7 内壁后使玻璃表面发生振动, 远程声场检测模块可通过检测玻璃罩 7 表面的振动情况, 间接检测出声音信号的频率与幅度; 由于玻璃罩 7 离动物的距离足够小, 因此声音信号传递到动物耳中的衰减小, 可以近似用玻璃罩 7 表面的振动代表动物所在点声音的频率、振幅, 因此用光纤传感器检测玻璃表面振动波形可以代表传播进动物耳中的信号波形, 利用激光可实现远距离的声音检测, 避免了将传感设备置于动物身旁所带来的问题。

以下为系统原理介绍: 窄线宽的激光光源输出, 首先用 PZT 环做高频相位调制, 角频率为 ω_c 。经过 1×2 耦合器后分成信号光和参考光两路。其中, 信号光从端口 1 进入环形器, 再通过端口 2 进入准直器中, 通过准直器后垂直入射向玻璃罩 7 表面。无源蜂鸣器的振动信号传递到玻璃罩 7 表面, 由于激光的多普勒效应, 振动信号引起光相位变化, 从而耦合进信号臂的光相位信息, 表示为扰动信号 $p(t)$, 并且反射回准直器。信号光和参考光继续传播, 再经过 2×2 耦合器后通过 2 个光电探测器 PD 输出。此时, 两光电探测器的输出

的形式可以表示为：

$$I_1 = A + 2B\cos(\Delta\varphi)$$

$$I_2 = A - 2B\cos(\Delta\varphi)$$

其中， $\Delta\varphi$ 是信号臂与参考臂之间的相位差，A、B 为与光源强度等系统参数有关的常量，有：

$$\Delta\varphi = C\cos(\omega_c t) + p(t)$$

其中， ω_c 为调制的角频率，C 为调制幅度。

两光电探测器经过一减法器后的输出为：

$$I = 4B\cos((\Delta\varphi))$$

信号经光电探测器后，该输出经过 ADC 采样芯片输入 FPGA 进行数字域的信号处理。该部分由以下模块组成：减法模块、混频模块、微分交叉相乘模块、积分模块以及高通滤波模块；以下为 FPGA 模块 4 中信号依据 PGC 解调原理进行的处理。

首先将输出信号分为相同的两路，分别用 FPGA 内通过直接数字频率合成产生的频率为 ω_c 和 $2\omega_c$ 的正弦信号进行混频。通过低通滤波后可以得到包含待测低频信号的两路正交信号：

$$V_1 = -BJ_1(C)\sin[p(t)]$$

$$V_2 = -BJ_2(C)\cos[p(t)]$$

其中， $J_1(C)$ 为 1 阶 Bessel 函数， $J_2(C)$ 为 2 阶 Bessel 函数。

两路包含待测低频信号的正交信号再经过微分交叉相乘（DCM）运算，微分后的信号如下：

$$V_1' = -BJ_1(C)p'(t)\cos [p(t)]$$

$$V_2' = BJ_2(C)p'(t)\sin [p(t)]$$

再进行交叉相乘运算，如下所示：

$$V_1'V_2 = B^2J_1(C)J_2(C)p'(t)\cos^2 [p(t)]$$

$$V_2'V_1 = -B^2J_1(C)J_2(C)p'(t)\sin^2 [p(t)]$$

进行差分运算得：

$$\begin{aligned} V_1'V_2 - V_2'V_1 &= B^2J_1(C)J_2(C)p'(t)\cos^2 [p(t)] + B^2J_1(C)J_2(C)p'(t)\sin^2 [p(t)] \\ &= B^2J_1(C)J_2(C)p'(t) \end{aligned}$$

对所得信号积分得

$$\int (V_1'V_2 - V_2'V_1) dt = B^2J_1(C)J_2(C)p'(t) = B^2J_1(C)J_2(C)p(t)$$

其系数 $B^2J_1(C)J_2(C)$ 可由 $V_1 \cdot V_2$ 取峰值得到，最终可解调得到 $p(t)$ 。由于 $p(t)$ 中包含直流初始相位差以及一些环境噪声低频影响，因此经过一个高通滤波，再将滤波后的信号用电缆输出至系统控制端 1 观察其波形，得到微弱声音信号的幅度数量级。

蓝牙控制发生模块具有两种工作模式：

- 一、通过发出特定频率、幅度的声音信号。
- 二、发出特定幅度、频率为变化序列的声音信号，以契合动物的听觉习惯。

蓝牙控制发生模块的工作过程如下：

系统控制端 1 与蓝牙模块进行蓝牙通信，系统控制端 1 向蓝牙模块发送包含工作模式、工作频率或者频率序列编号、工作幅度的信息，蓝牙模块接收信息后，将信息发送给单片机；单片机接收信息后，一方面将信息转换成

相应的电平，电平由引脚输出到信号发生器模块；信号发生器的管脚接收到电平后，会输出相应频率、幅度的信号；信号发生器输出的信号经过一级放大器、一级滤波器后，输出到无源蜂鸣器；无源蜂鸣器受电流控制，发出声音信号。

其中：远程声场发生系统 3 通过光纤传感器检测动物所在区域实际模拟声的频率和功率，光纤传感器包括激光器、PZT 环、马赫增德尔干涉仪、环形器、准直器、光电探测器、FPGA 模块 4；激光器经过 PZT 环进行高频调制，再经光耦合器使输入马赫增德尔干涉仪的光信号分成调制光信号和参考光信号，其中调制光信号经过环形器和准直器垂直入射至玻璃罩 7 表面并反射回准直器，利用多普勒效应将振动信号耦合进光信号，从马赫增德尔干涉仪输出的两路信号经光电探测器输出电信号，两路电信号作差后输入 FPGA 模块 4，依次经过减法模块、混频模块、微分交叉相乘模块、积分模块以及高通滤波模块。

其中：无线控制发生模块 2 中的微弱信号发生由低功耗的直接数字频率合成 DDS 芯片和低功耗 DAC 实现，提高了微弱信号的精度。

请参阅图 7，一种动物听觉评估检测的方法，包括如下步骤：

第一步：将系统控制端 1、无线控制发生模块 2、远程声场发生系统 3、FPGA 模块 4、光纤激光测振仪 5、WIFI 监控摄像头 6 和玻璃罩 7 置于安静的环境中，将无线控制发生模块 2 中的硬件电路置于玻璃罩 7 内，并使待测动物离开玻璃罩 7 的距离不大于 30m；

第二步：使用蓝牙连接系统控制端 1 与远程声场发生系统 3，用以远程控制频率产生模式、声音信号的频率和幅度；首先，暂停发出声音信号，在一段时间内，保持环境安静，监控动物的状态；

第三步：系统控制端 1 每次向无线控制发生模块 2 发送三个数值，包括频率产生模式选择数值、频率数值、幅度数值；在模式一下，单片机向 DDS

模块传输频率数值序列，使 DDS 模块产生幅度不变、频率变化的波形；在模式二下，DDS 模块产生幅度固定、频率也固定的正弦波形，从而使无线控制发生模块 2 发出特定频率、幅度的声音；

第四步：监控动物的若动物出现移动位置、抬头、改变动作、眼珠转动等与安静状态时不同的反应，则判定动物能够听到微弱声音。同时使用远程声场发生系统 3 测量小动物所处位置的声音信号的幅度与频率，并记录，用于量化小动物对微弱声音的感知能力；

第五步：重复步骤 S3、步骤 S4，找出动物能够感知的声音信号范围；

第六步：对检测得到的实验数据进行筛选，得出结论。

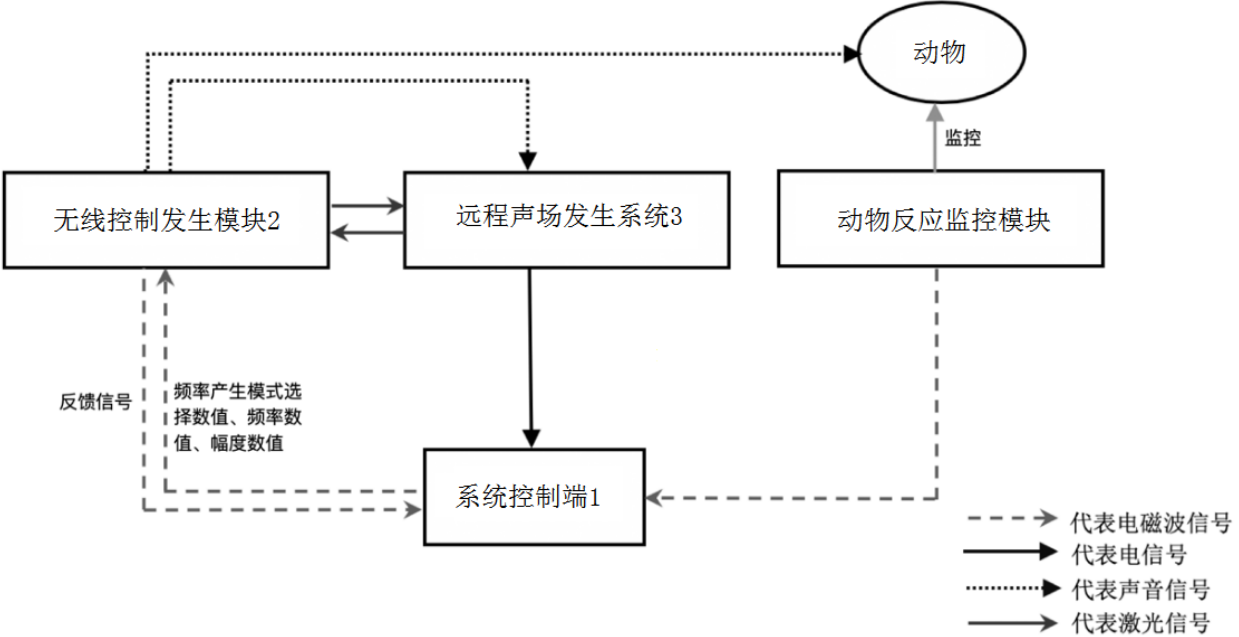
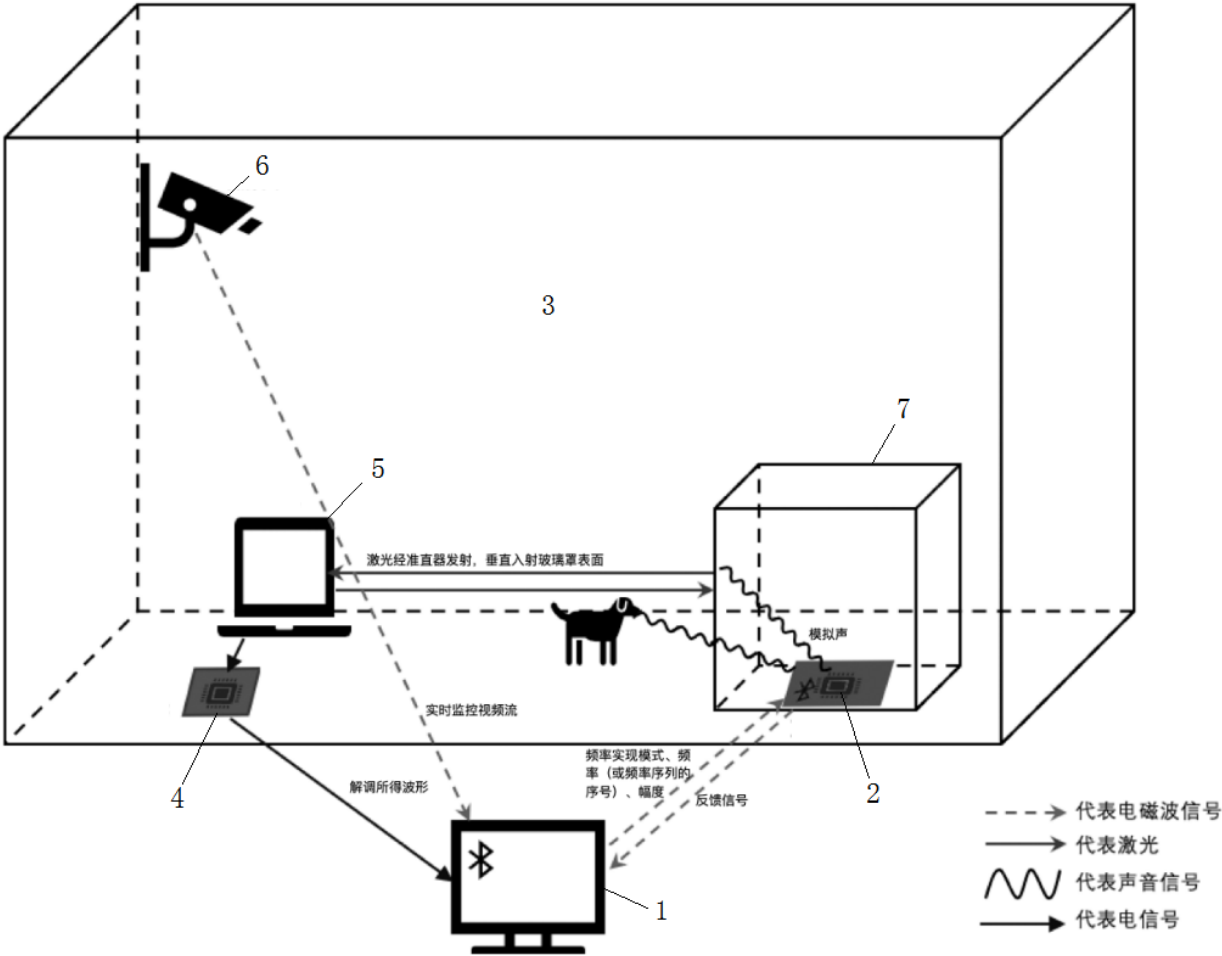
综上所述，本发明提出的动物听觉评估检测装置及方法，具有如下优点：

1、通过将发声模块置于玻璃罩 7 内，将玻璃罩 7 置于待测动物旁边，以玻璃罩 7 表面的振动代表动物所在点声音的频率、振幅，通过光纤传感器检测玻璃表面振动波形实现了高精度声音检测；同时利用准直器发射调制激光并接收反射光信号的方式检测出玻璃表面振动，该方式可实现远距离的声音检测，避免了将传感设备置于动物身旁所带来的问题。

2、发声模块在一种模式下发出特定频率、幅度的声音信号，另一种模式下发出特定幅度、频率为变化序列的声音信号，可以更加契合动物的听觉习惯。

3、加入了动物反应监控模块监控模拟声时动物的反应，通过视频与音频的结合，有利于动物听觉的评估。

以上所述，仅为本发明较佳的具体实施方式，但本发明的保护范围并不局限于此，任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内，根据本发明的技术方案及其发明构思加以等同替换或改变，都应涵盖在本发明的保护范围之内。



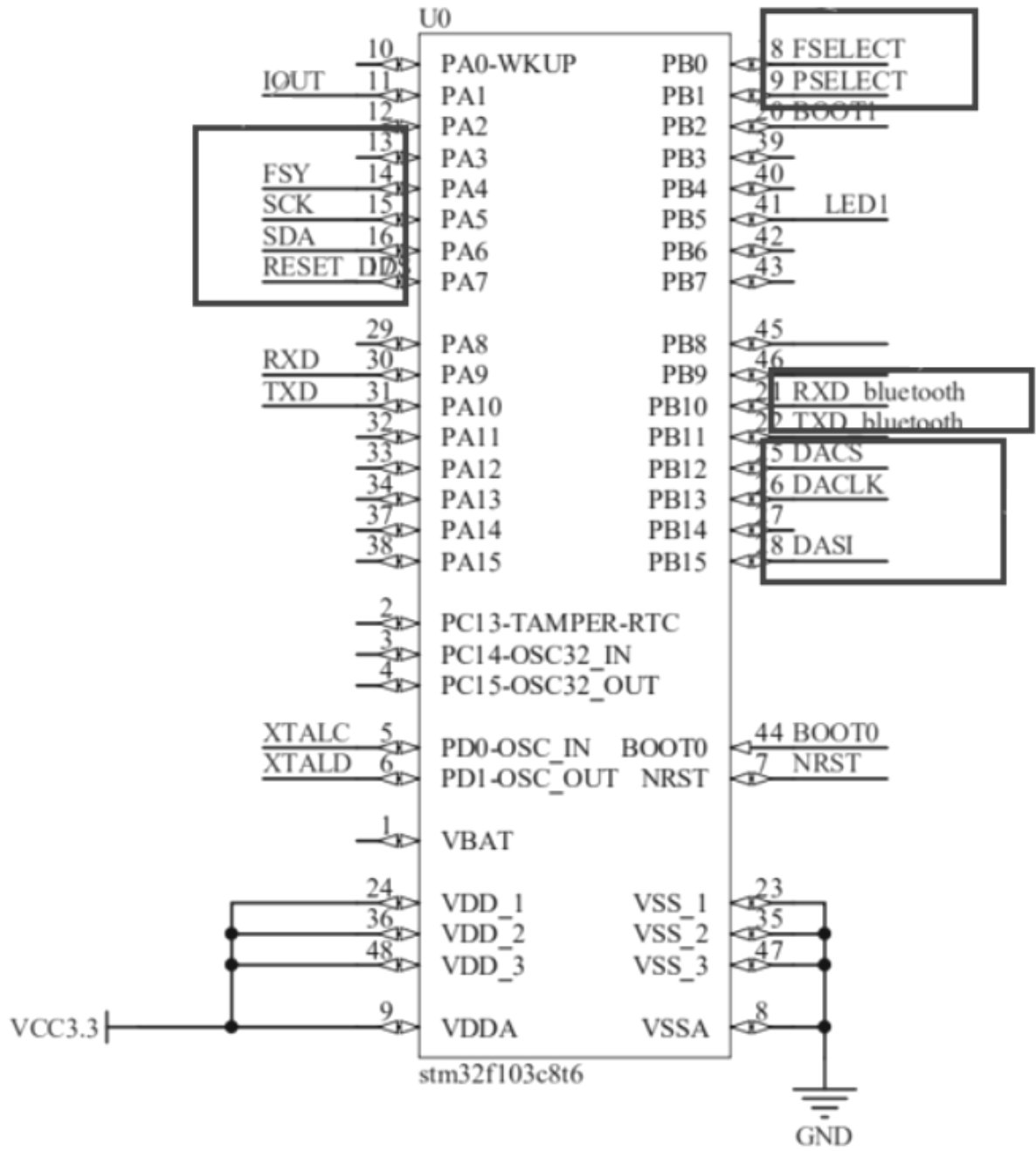


图 3

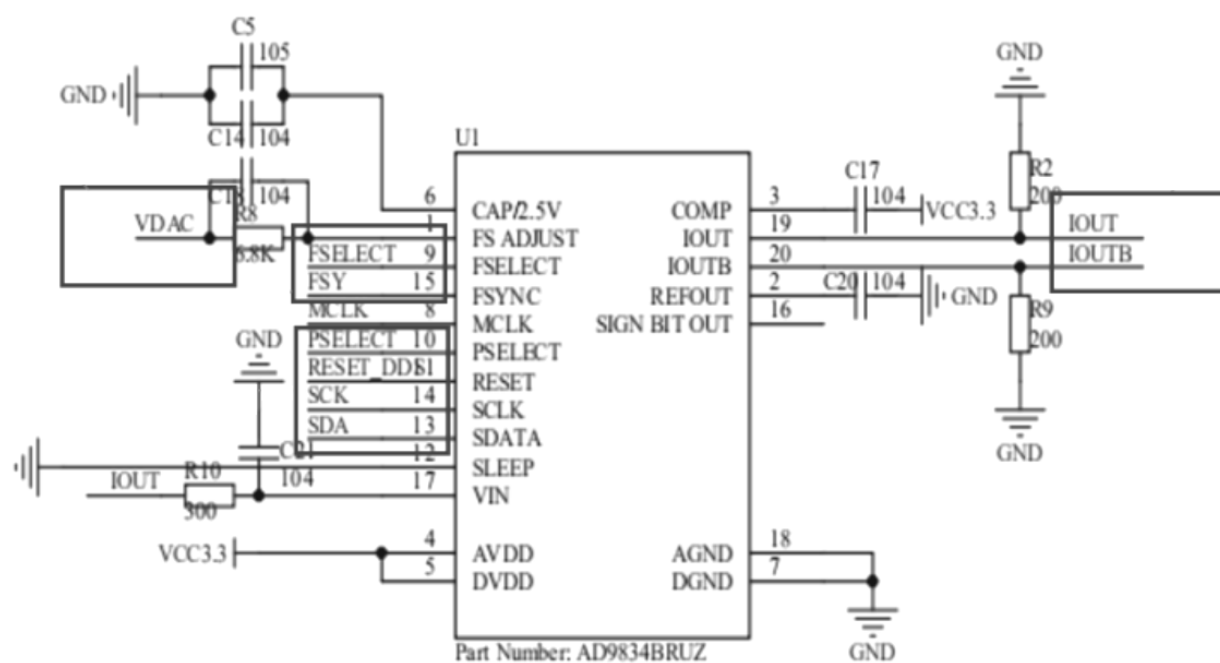


图 4

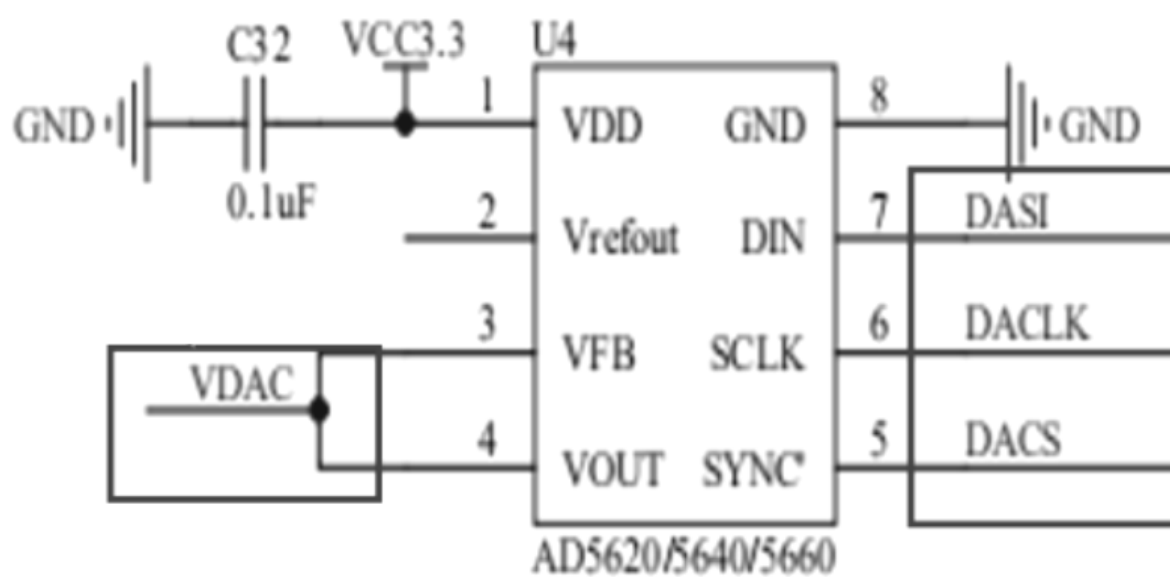


图 5

4

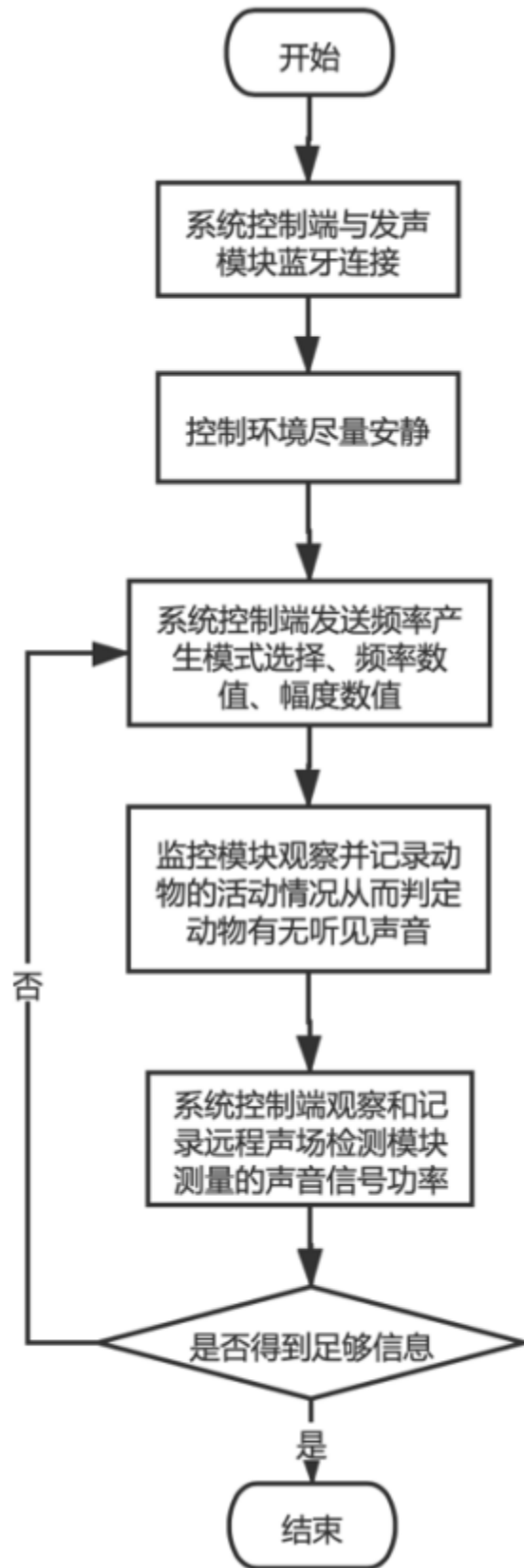


图 7