



东润丘成桐科学奖(物理)竞赛 Dongrun-Yau Science (Physics) Award

参赛队员: 孔 睿 雯

学 校: 山东省实验中学

省 份: 山东省

指导教师: 庄桥, 石磊

论文题目: 大足鼠耳蝠外耳对回波调控的实验性探究

大足鼠耳蝠外耳对回波调控的实验性探究

山东省实验中学 孔睿雯

摘要

蝙蝠是唯一能够飞翔的哺乳动物, 经过长期进化形成了一套复杂的生物声呐系统, 该系统可以在黑暗的世界里满足它们探知、捕食和相互联络的各种需求, 具有多功能、自适应性等许多目前人工天线和声呐系统所不具备的优越性能。大足鼠耳蝠是一种会捕鱼的蝙蝠, 具有超强的生物声呐系统, 在飞行时能够从"水波涟漪"的水面下发现猎物的存在。因此大足鼠耳蝠声呐系统的深入研究对于高性能智能天线和水下声呐系统的设计具有重要的意义。

本项目根据蝙蝠回声定位原理, 设计制作了仿生蝙蝠实验装置, 研究了大足鼠耳蝠外耳(耳廓和耳屏)对接收声场的调控规律。主要工作如下:

(1) 设计了基于多轴云台的仿生蝙蝠声呐实验系统装置, 仿生蝙蝠头部模型采用从微型 CT 扫描的蝙蝠样品断层切面图像中三维重建结构模型, 并采用 3D 打印技术制作而成, 保留了蝙蝠的自然生理结构。在模型的口腔和耳道内安装有微型超声波换能器, 模拟蝙蝠超声波的发射和接收。在舵机的驱动下, 可实现仿生蝙蝠模型的水平摇摆、竖直俯仰, 基本反映了蝙蝠在回声定位的动作和姿态。

(2) 基于上述实验平台, 分别对无外耳模型(无耳屏, 无耳廓)、无耳屏模型和完整模型三种蝙蝠头部模型进行了实验和分析, 研究了蝙蝠耳廓和耳屏对接收声场的调控规律。实验结果表明: 在水平平面内, 蝙蝠耳朵对声信号接收的方向性主要是由蝙蝠耳廓的形状和方位决定的, 蝙蝠耳屏的贡献不大; 在垂直平面内, 蝙蝠耳屏的缺失会降低蝙蝠在垂直平面一定范围内对回波信号的接收幅度, 说明耳屏对于蝙蝠在垂直方向的定位起到重要的作用。

总之, 蝙蝠在目标探测过程中通过不断地变换耳廓的形状和耳屏的空间指向, 以便在回声最强的方向上收集信号, 并通过两耳接收回波的声压幅度和到达时间差来判断目标的位置。我们实验获得的数据和结论与前人的成果以及蝙蝠的行为目的基本相符合, 不但可以合理解释蝙蝠外耳各部分的生物学作用, 而且对深入理解蝙蝠的生物声呐系统以及高性能智能天线和水下声呐系统的设计具有重要意义和价值。

关键词: 蝙蝠; 声呐系统; 耳廓; 耳屏; 回声定位; 超声波

目 录

- 一、研究背景及目的.....3
 - 1.1 选题背景.....3
 - 1.2 研究现状.....4
 - 1.3 研究意义.....5
 - 1.4 大足鼠耳蝠及其声呐特征.....6
 - 1.5 研究目的和研究思路.....7
- 二、研究过程与技术路线.....8
 - 2.1 实验仪器介绍.....8
 - 2.2 仿生蝙蝠头部模型的制备.....8
 - 2.2.1 蝙蝠样本的采集.....8
 - 2.2.2 蝙蝠头部 3D 数字结构的构建.....9
 - 2.2.3 蝙蝠头部 3D 打印模型的制作.....10
 - 2.3 仿生蝙蝠声呐实验装置的制作.....10
 - 2.4 实验方法.....13
- 三、实验结果与分析.....14
- 四、创新点.....17
- 五、总结与展望.....18
- 参考文献.....19
- 致 谢.....20

一、研究背景及目的

1.1 选题背景

当夜晚来临时, 在乡下或者城郊可以看到蝙蝠在黑暗中自由飞翔, 并利用回声定位进行导航和捕食昆虫。蝙蝠通过对自身发射声波回声的分析, 获得周围环境的声音“图像”, 从而能够准确地捕食猎物 and 避开障碍物, 如图 1.1 所示。

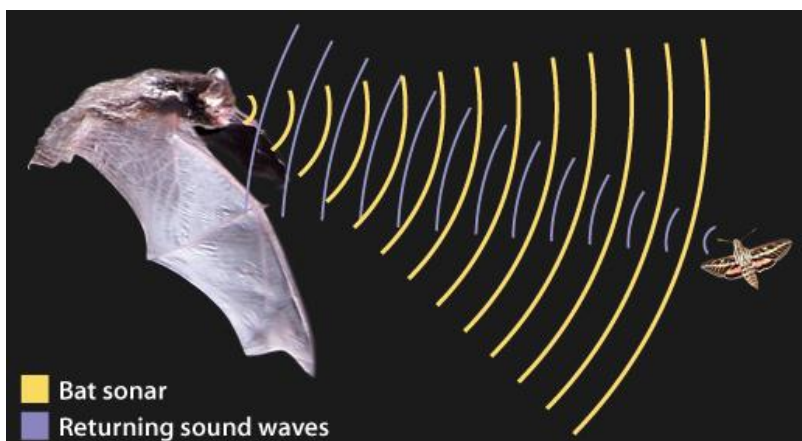


图 1.1 蝙蝠利用回声定位捕食昆虫

关于蝙蝠如何在夜晚捕食昆虫的研究始于十八世纪末期。1772 年, 意大利科学家 Lazzaro Spallanzani 将蝙蝠与猫头鹰两种夜行动物放在具有微弱灯光的密室内, 发现它们均能辨识方位和躲避障碍物, 但在完全黑暗的密室内, 只有蝙蝠能轻易的辨识方位并且躲避障碍物, 而猫头鹰则常常撞上飞行路径上的障碍物。因此他认为蝙蝠可能利用“第六感”来辨识方位^{[1][2]}。

1798 年, 瑞士科学家 Charles Jurine 在实验中发现: 若将蝙蝠一侧的耳朵堵住, 蝙蝠就丧失方向感并且无法躲避障碍物, 因此推论蝙蝠可能是利用耳朵来“看”东西。Spallanzani 对 Jurine 的实验进行了重复和改进, 获得了相同的结果, 因此他认为听觉是蝙蝠导航和避障能力的重要组成部分, 可惜这一观点很难被当时的科学家们所接受, 并遭到人们的嘲笑^[3]。

1930 年, 美国哈佛大学的学生 Donald R. Griffin 利用一种可转换超声波为可听声波的特殊仪器, 发现蝙蝠是利用超声波来辨识方位和目标定位, 解开了蝙蝠如何在黑暗中分辨方位的谜题, 并提出回声定位一词来描述蝙蝠利用超声波辨识方位的行为^[4]。蝙蝠在回声定位时所用的特殊声纳系统一般称为生物声纳, 以区别

于军事、交通或工业上所使用的人工声纳。

蝙蝠的回声定位系统一般来说由发声部分、接收部分和定向部分构成^[5]。蝙蝠的咽喉肌很发达,可以快速有力地收缩产生超声波,然后将超声波由嘴或鼻子发射出去,同时利用耳朵不断地收集来自猎物或障碍物的回声。当回声进入蝙蝠耳朵以后会在内耳的耳蜗内将声波信号转换成神经信号,蝙蝠发达的中枢神经系统能利用发射超声波与返回超声波的变化,精确侦测目标的位置、移动方向、速度和目标大小。

蝙蝠的回声定位机能对于蝙蝠的生活是很重要的,其声纳系统的高度进化使得蝙蝠开辟了独特的生态位——黑暗的天空,避开与鸟类在空中的生存竞争。千万年来,蝙蝠正是利用了这一独特的优势使得种群生存和繁衍下来。

蝙蝠声纳系统是一个十分复杂精巧的系统,不仅可以在无光的环境下满足它们探知环境、捕食和相互联络的各种需求,而且具有多功能、自适应性等许多目前人工天线系统所不具备的优越性能。迄今为止,人们尚不能建立一个完整准确的模型来完全掌握它的原理,人类现有的雷达和声纳系统不论从体积、重量还是灵敏度、精确性、抗干扰能力等方面都不能与蝙蝠的生物声纳系统相媲美。

1.2 研究现状

人类通过模仿蝙蝠的回声定位系统发明了“探路仪”,这是对仿生学最有力的支持。最近几年来,蝙蝠仿生学的研究与人工智能、语音识别的结合,为蝙蝠的声学研究提供了新的生命力。

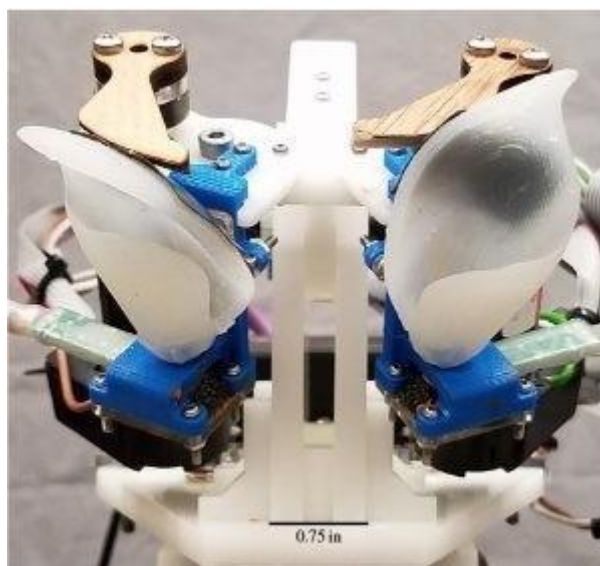


图 1.2 模仿菊头蝠的人造耳

蝙蝠的生物声呐系统利用超声波脉冲,可以比人造声呐装置更精确地对声音进行定位。为了模仿蝙蝠的这种超能力,2016年山东大学泰山学者 Rolf Müller 教授带领他在美国弗吉尼亚理工学院的团队,设计制作了一种人造蝙蝠耳^[6](如图 1.2 所示),它能准确地对谈话者进行定位,并大大提高自动语音识别系统的精确度。

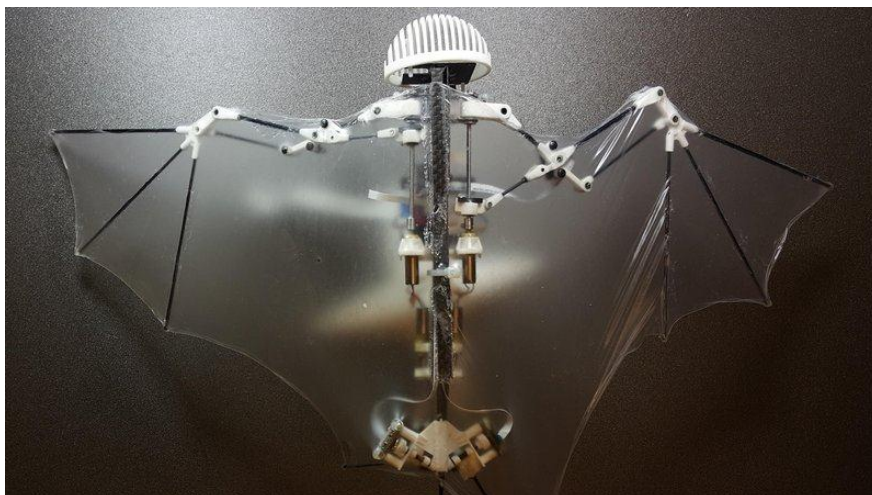


图 1.3 蝙蝠无人机---Bat Bot

2017年2月,美国伊利诺伊大学和加州理工学院的科研人员从模仿蝙蝠的飞行机制出发,设计制作了一款蝙蝠无人机 Bat Bot^[7],如图 1.3 所示。该无人机非常轻便,由微处理器、6 自由度惯性测量单元、直流电机、碳纤维框架、硅基薄膜机翼、3D 打印部件等组成,总重量仅为 92 克,飞行起来酷似蝙蝠。

1.3 研究意义

在当前的信息时代,天线作为通信系统的一部分各个领域发挥着重要的作用。随着无线通信技术的发展,传统的天线已不能完全满足人们的需要,因此能够自动调整波束方向智能天线技术被广泛的研究。

经过千万年的进化,大部分蝙蝠已经进化出了一套完整的声呐系统,声呐系统的天线主要包括超声波发射器(嘴或鼻子)和接收器(外耳)。与由多个天线单元构成的智能天线相比,蝙蝠可以仅通过单个天线(耳朵)实现对接收声场进行调控,这为新型智能天线的设计提供了一个非常好的依据。

尽管声波与电磁波的产生本质是不同的,但是它们在传播时表现出来的特点与性质有很多相似的地方,因此研究这些蝙蝠外耳结构与波束形成之间的关系有助于人类提高电磁波天线的设计水平^{[8][9]}。

1.4 大足鼠耳蝠及其声呐特征

大足鼠耳蝠(*Myotis ricketti*)原来在我国各地均有分布, 现在主要分布于我国的东南地区, 常常栖息在丘陵或山区、岩洞及城墙石缝内, 是一种具有食鱼特性的蝙蝠^[10] (见图 1.4 和图 1.5)。



图 1.4 喜欢捕鱼的大足鼠耳蝠

大足鼠耳蝠成体一般体重为 20~30g, 头体长度为 60~65mm, 前臂长度为 53~58mm。大足鼠耳蝠的耳廓较短, 耳屏较狭小, 不到耳廓长度的一半。大足鼠耳蝠最典型的形态特征是后足发达, 爪子十分尖锐, 如同鱼钩, 后足长度大约 20mm, 相当于其它食昆虫类鼠耳蝠后足长度的 2~3 倍, 这也是其被命名为大足鼠耳蝠的原因。



图 1.5 大足鼠耳蝠的声呐系统

本文的大足鼠耳蝠样本采集于我国安徽省韭山, 其发出的超声波信号为 FM 型, 主频约为 38kHz, 扫频范围为 27~73kHz。大足鼠耳蝠的回声定位信号适合

在背景噪声较低的开阔环境捕食^{[11][12]}，若大足鼠耳蝠在草地近地面捕食昆虫，背景产生的回声容易干扰由猎物反射的回声，大足鼠耳蝠难以从回声中获得猎物的准确方位信息，而相对平静的水面，对大足鼠耳蝠来说噪声干扰要小得多，因此大足鼠耳蝠喜欢在平静的湖边或水库边捕食鱼类。

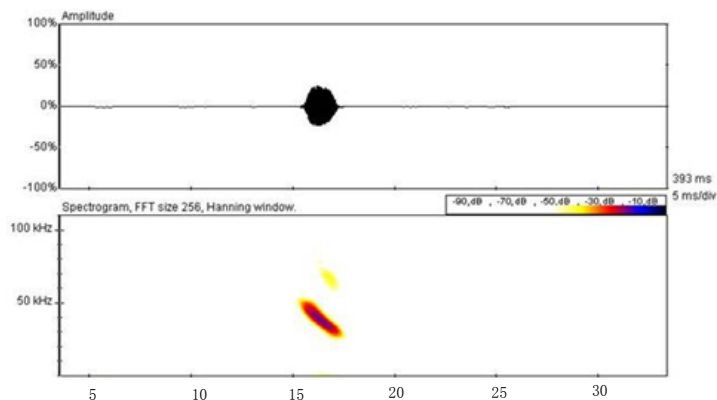


图 1.6 大足鼠耳蝠 FM 声呐信号

1.5 研究目的和研究思路

本项目以大足鼠耳蝠的声呐系统为研究对象，通过对无外耳模型（无耳屏，无耳廓）、无耳屏模型和完整模型三种蝙蝠头部模型进行实验和比较分析，来揭示蝙蝠外耳(耳廓和耳屏)对接收声场的调控规律。具体研究思路如图 1.7 所示。

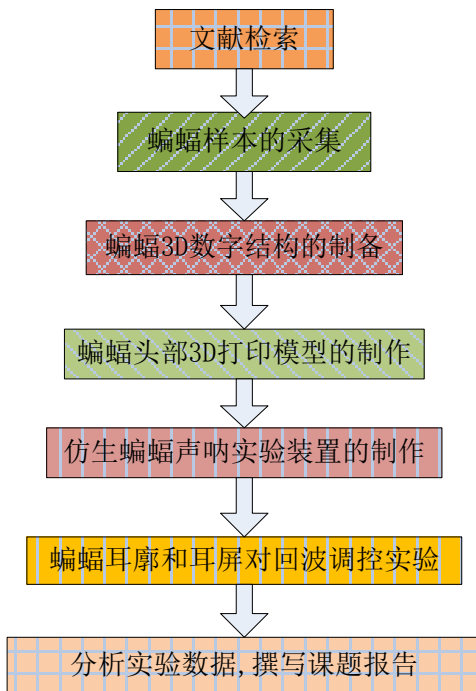


图 1.7 本项目的研究思路

二、研究过程与技术路线

2.1 实验仪器介绍

整个实验过程需要的实验仪器主要包括：

- 微型 X 射线扫描仪（型号：Skyscan1172）
- 3D 打印机（型号：Ultimaker 2+ Extended）
- 仿生蝙蝠声呐实验装置（自制，申请发明专利，申请号：201611239457.3）
- 信号源（型号：DG1021）和示波器（型号：U1620A）
- 计算机及图像处理软件

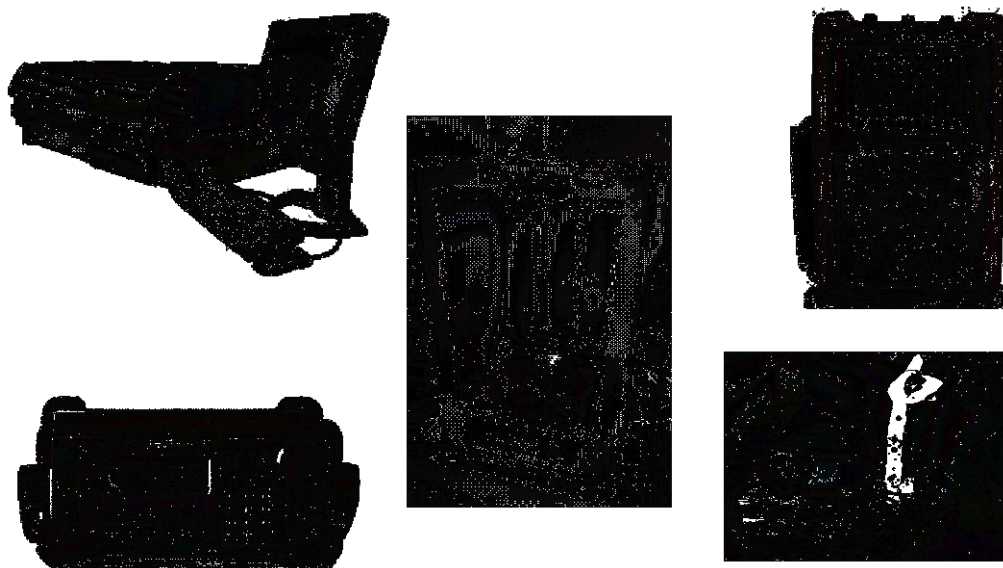


图 2.1 实验所需的主要仪器

2.2 仿生蝙蝠头部模型的制备

2.2.1 蝙蝠样本的采集

蝙蝠喜欢生活在阴暗潮湿的环境中，如山洞、矿坑、岩缝或古建筑的房顶、天花板中，还有一种蝙蝠(如扁颅蝠)栖息在狭小的竹筒中。在蝙蝠栖息环境周围，只要有足够的水和食物，蝙蝠就可以繁衍生长。

根据不同种类蝙蝠栖息环境的不同，可采用不同捕获方法。例如在湖、水库边可以搭建雾网，在丛林里可以搭建蝙蝠陷阱，在山洞内用手抄网直接捕获蝙蝠。在我国北方，蝙蝠一般有冬眠的习惯，蝙蝠冬眠的地方一般在山洞里，这时节采

集蝙蝠样本比较容易。

捕获的蝙蝠一般放到专门制作的蝙蝠袋中，以便带回实验室做进一步测量。在实验室内，不但需要测量蝙蝠样本的品种、性别、体重以及翼展、前肢长度等体态数据，而且需要对蝙蝠样本及其关键部位的声纳器官拍照存档，便于与后期 CT 扫描图像进行对比。此外，在实验室内还需要利用超声波记录仪记录蝙蝠在静止状态和自由飞行状态下的声音信号。这些工作结束后，部分蝙蝠样本需要浸泡在 80% 的酒精溶液中并置于冷藏柜内，防止样品腐烂，以备制作蝙蝠 3D 模型时使用，其它蝙蝠样本可以放在实验室内饲养，也可以放归大自然。



图 2.2 在老师的带领下，在山东省长清牛毛洞捕捉蝙蝠

2.2.2 蝙蝠头部 3D 数字结构的构建

蝙蝠头部三维数字模型的构建是一个比较繁琐的过程，主要包含蝙蝠头部 CT 扫描和图像后期处理两个步骤。

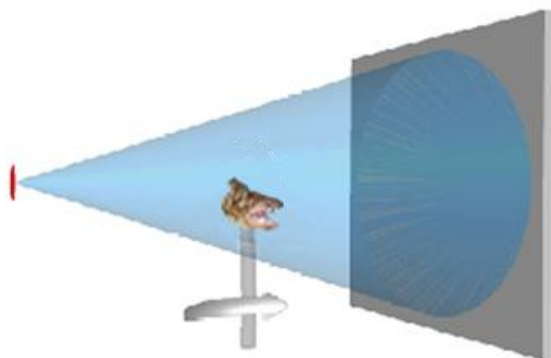


图 2.3 大足鼠耳蝠头部样本 CT 扫描示意图

蝙蝠头部 CT 扫描利用一台型号为 Skyscan1172 的微型 X 射线扫描仪。将蝙蝠头部样本放在扫描仪的载物台上，载物台每旋转一定的角度扫描仪扫描一次，这里选取的旋转步长为 0.9° 。由于若完成一个样本的完整 3D 图像数据采集，样本需要旋转 180° ，因此可以得到 200 张 X 射线投影图，扫描过程示意图如图 2.3 所示。

蝙蝠头部样本的 X 射线投影图首先经过计算机处理得到一组具有不同灰度等级的断层图像，然后将这些断层图像经过高斯滤波和二值化处理，最终得到只有两个灰度等级（黑、白）的图片，利用这些图片进行三维重构，就得到了蝙蝠头部的三维数字结构。

蝙蝠头部三维数字结构的构建，主要是为下一步 3D 打印做准备，这种数字模型保留了蝙蝠声呐系统的全部生理特征，如图 2.4 所示。

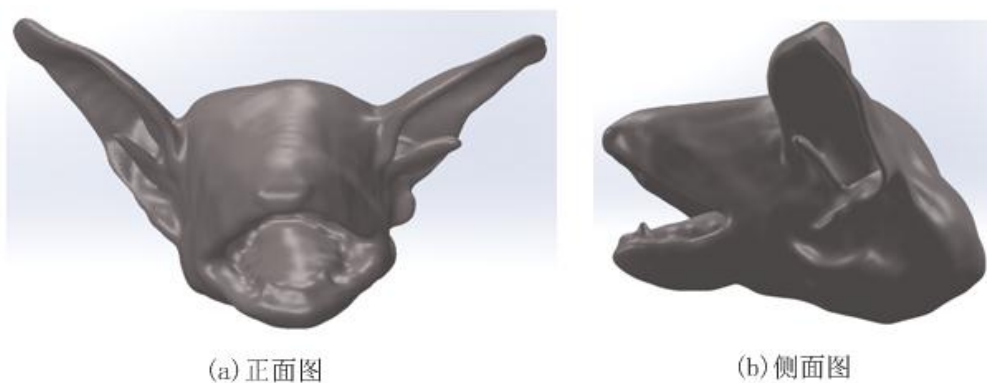


图 2.4 大足鼠耳蝠头部 3D 数字模型

2.2.3 蝙蝠头部 3D 打印模型的制作

该项目所使用的蝙蝠头部模型是利用 3D 打印技术得到的，如图 2.5 所示。3D 打印技术是一种快速成型技术，该技术以数字模型文件为基础，采用粉末状塑料或金属等可粘合材料，并在计算机的控制下，通过逐层打印的方式来构造物体的三维结构。STL 文件是 3D 打印机能够读取的最常见的数字模型文件类型。

本研究项目采用的 3D 打印机型号为 Ultimaker 2+Extended，模型打印精度为 $100\mu\text{m}$ ，使用材料为工程塑料 ABS。

2.3 仿生蝙蝠声呐实验装置的制作

目前基于蝙蝠超声波回波定位的仿生蝙蝠声呐系统存在以下不足：首先蝙蝠

东润丘成桐科学奖（物理）竞赛活动参赛作品

发出的声音频率范围通常在 25kHz 至 100kHz 之间，而目前常用的压电式超声换能器体积庞大，且工作在固定频率，无法满足仿生蝙蝠声呐科学研究的要求；其次蝙蝠头部的生理结构对于蝙蝠声呐系统的指向性和灵敏度具有重要的影响，而目前广泛采用单发单收、单发双收(一嘴两耳)蝙蝠模型过于简单，无法真实反映蝙蝠复杂生理结构对声场调控的影响；现有的声呐测量装置，通常仅对某一固定方向进行目标检测，且功能单一，大大限制了使用范围。

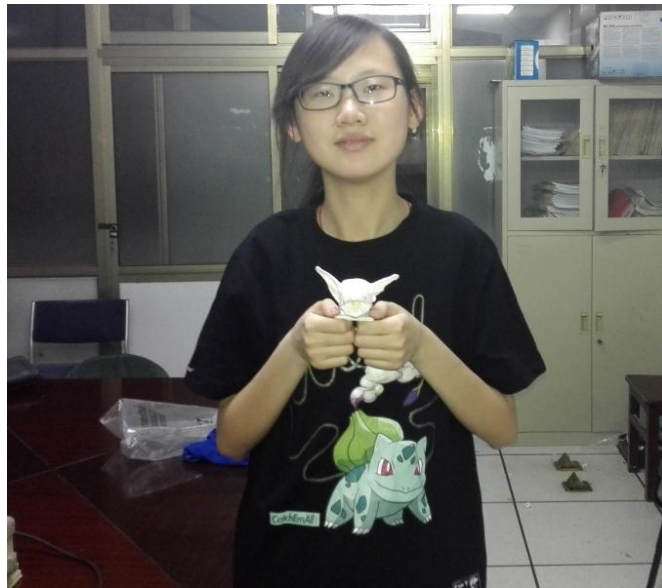


图 2.5 利用 3D 打印技术制备的大足鼠耳蝠头部模型

为了克服上述现有技术的不足，设计了一种基于多轴云台的仿生蝙蝠声呐实验系统装置，包括仿生蝙蝠模型、机械本体和电气控制系统^[13]，如图 2.6 所示。

机械本体包括水平转台、U 形支架和云台基座，水平转台固定在云台基座上面，控制 U 形支架摆动的舵机固定于水平转台的转盘上，水平转台和 U 形支架分别由独立舵机驱动。仿生蝙蝠模型固定连接于 U 形支架上，在舵机的驱动下，可实现仿生蝙蝠模型的水平摇摆、竖直俯仰，真实地反映了蝙蝠在回声定位的动作和姿态。

电气控制系统包括 Arduino Uno 开发板、舵机、超声波换能器、信号调理电路模块、LCD 显示屏、控制键和电源，其控制电路原理图如图 2.7 所示。Arduino Uno 是一款便捷灵活、方便上手的开源电子原型平台，非常适合我们中学生电子爱好者入门使用，在本装置中主要完成控制键的识别、舵机的驱动、以及超声波模块的数据处理及显示等功能。



图 2.6 自制的仿生蝙蝠声呐实验装置

超声波发射换能器现在采用 ProWave 公司的压电式超声波换能器，在将来的工作中，考虑采用宽频带的静电式超声波换能器，如 SensComp 公司的 7000 系列或 600 系列。发射调理电路可以由常用的超声波测距模块 HC-SR04 改造，但考虑到本实验需要发射的超声波功率变化范围较大，超声波换能器由信号源 DG1021 直接驱动。

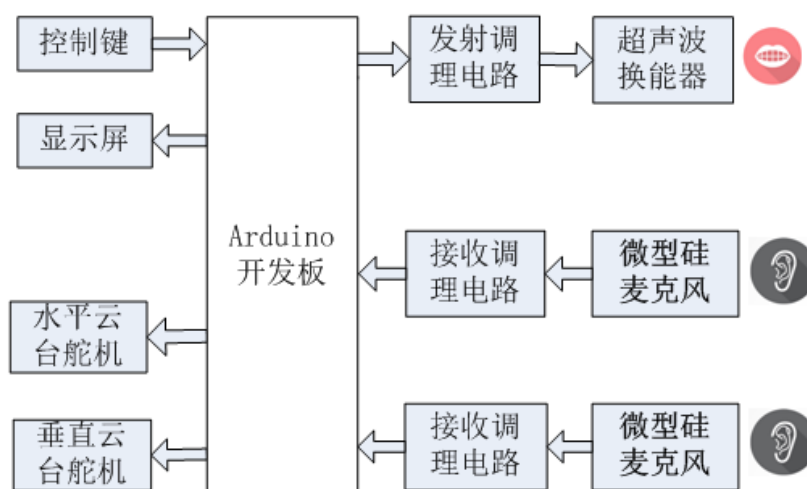


图 2.7 仿生蝙蝠声呐装置内部控制电路原理图

超声波接收传感器采用 Knowles 公司的超声波微型硅麦克风 FG-23329（如图 2.8 所示）或 SPU0410LR5H，尺寸只有 2-3mm，可直接塞入蝙蝠模型的耳道内，在 100KHz 频率范围内具有良好的灵敏度。接收调理电路模块由超声波测距模块 HC-SR04 改造而成，可以实现微型硅麦克风信号的滤波和放大。



图 2.8 可插入蝙蝠模型耳道内的微型硅麦克风

2.4 实验方法

将仿生蝙蝠声呐装置放在一个工作台上（如图 2.9 所示），在蝙蝠头模型正前方 1.5m 处放置超声波信号发生器（由信号源 DG1021 和超声波换能器 40ST16P 组成），可以连续发出超声波信号，这里选用的超声波频率为 38kHz，即大足鼠耳蝠的主频。



图 2.9 实验装置及实验过程

为了减少超声波在室内反射的影响，可以在实验装置周围设置吸波海绵。通过控制键设定不同的方位角和仰角，可以将蝙蝠模型指向空间的任一方向，将蝙蝠头部模型耳朵内的微型硅麦克风接收到的超声信号经过滤波放大并记录下来，从而得到蝙蝠头部模型在整个空间的接收声音信号的分布。为了分析蝙蝠耳廓和耳屏对接收声场的作用，我们分别对三种蝙蝠头部模型：无外耳模型（无耳屏，无耳廓）、无耳屏模型和完整模型进行了实验、比较和分析。

三、实验结果与分析

利用上述实验装置, 将蝙蝠头部模型耳朵内的微型硅麦克风接收到的超声信号经过滤波放大并记录下来, 可以得到蝙蝠耳朵在不同方向对声信号的接收幅度。为了减少误差, 可采用多次测量取平均值的方法对数据处理。

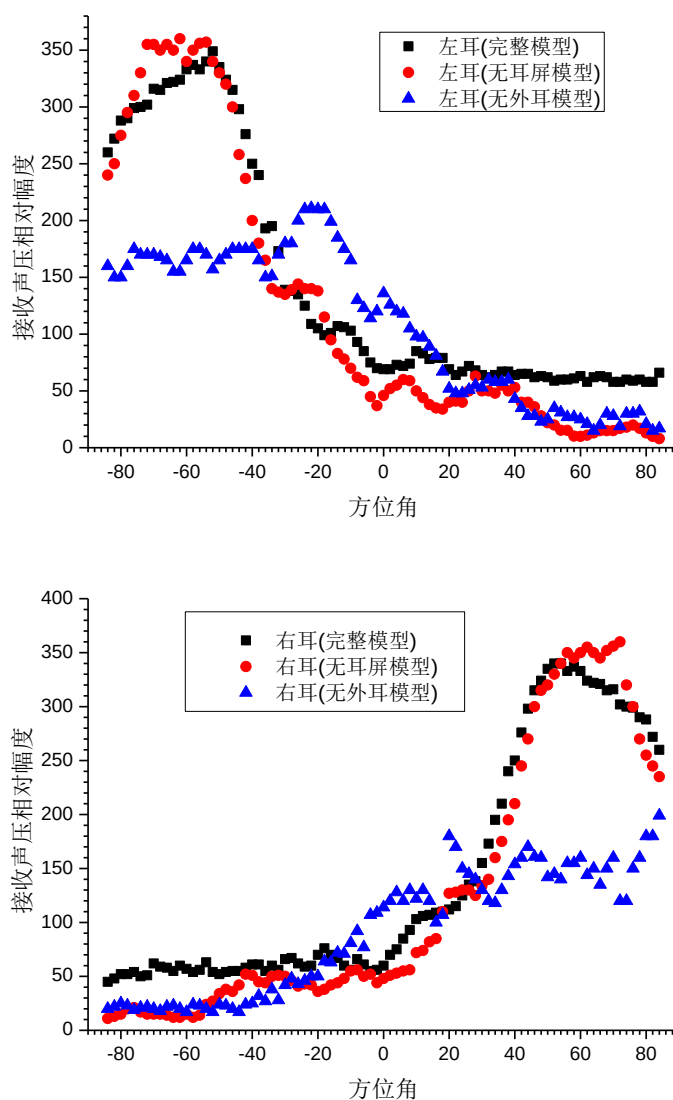


图 3.1 不同蝙蝠模型在水平平面的接收声压幅度与超声波入射方位角的关系

图 3.1 给出了三种蝙蝠模型在水平平面的接收声压幅度与超声波入射方位角的关系。从图中可以看出, 在水平平面内, 蝙蝠耳朵对声信号接收的方向性主要是由蝙蝠耳廓的形状和方位决定的, 蝙蝠耳屏的贡献不大。此外, 我们发现, 蝙蝠的确是左右耳协调工作的, 一个耳朵侧重于一侧的信号接收, 这与前人的

东润丘成桐科学奖（物理）竞赛活动参赛作品

研究预测相一致，证明了我们的实验结果是可靠的。进一步的，耳廓对超声波的调控能力较强，影响能力最大近一倍（无耳廓和有耳廓的对比），也就是说，如果我们的结论正确，对目前的声呐系统具有很高的改进指导意义，为声呐信号采集性能的提高提供了一个思路：如果我们能够像蝙蝠耳朵那样，给声呐接收信号的传感器也设计制造一个耳廓，当频率匹配时就能把接收性能提高一倍，即同样功率下探测距离提高一倍，同时传感器的接收方向性也得到提高。

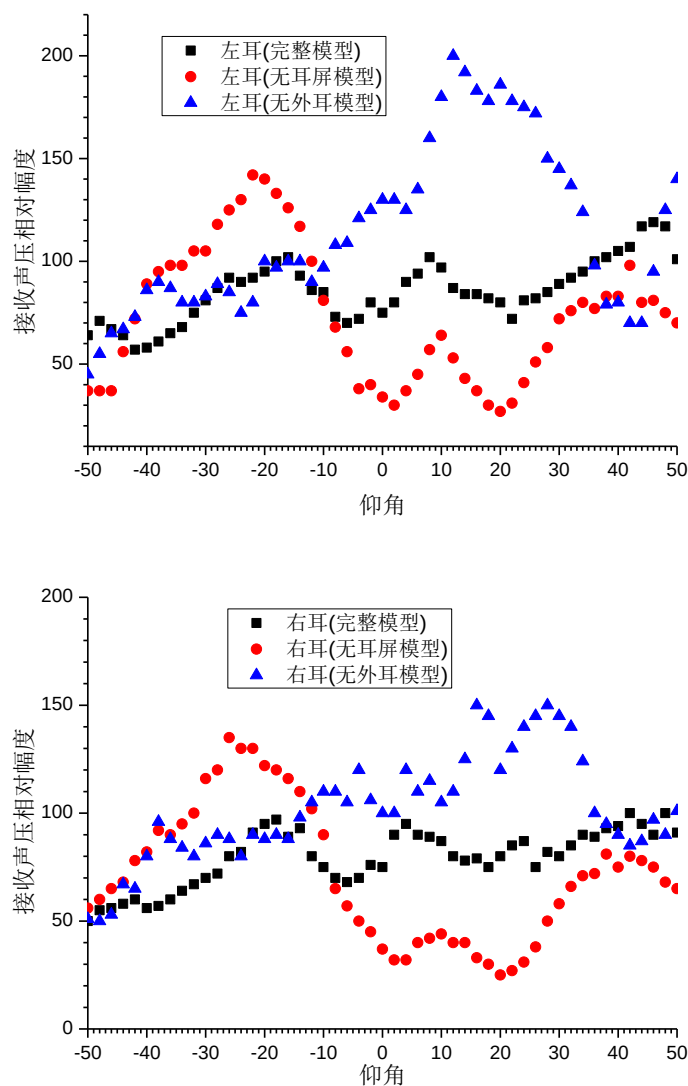


图 3.2 不同蝙蝠模型在垂直平面的接收声压幅度与超声波入射仰角的关系

图 3.2 给出了三种蝙蝠模型垂直平面的接收声压幅度与超声波入射仰角的关系。从图中可以看出，耳屏对超声波入射信号的作用分为两部分，当超声波源在水平仰角 -10° 上时，耳屏起增强接收信号的作用，当超声波源在水平仰角 -10°

以下时,耳屏起衰减信号的作用。在实验中,我们还发现耳屏指向的改变会大大影响蝙蝠在垂直平面接收超声波信号的方向性,这说明耳屏对于蝙蝠在垂直方向的定位起到重要的作用,这也不难解释国外科学家在观察试验中发现耳屏被黏住的蝙蝠在扑食时屡屡失手的原因。此外,大足鼠耳蝠外耳在水平仰角为 -16° 附近具有较高的灵敏度,这可能与其长期捕鱼的习性相关,因为它所有的猎物都在水中,蝙蝠要飞翔在水面上扑食,也就是在蝙蝠探测水平面以下,因此大足鼠耳蝠外耳在这一区间增强信号接收的强度是有益的,也是必要的。另外,耳廓对来自蝙蝠前上方的超声波信号起到衰减作用,正是减少了空间杂音对其扑食过程的干扰。

总之,蝙蝠在目标探测过程中通过不断地变换耳廓的形状和耳屏的空间指向,以便在回声最强的方向上收集信号,并通过两耳接收回波的声压幅度和到达时间差来判断目标的位置。我们实验获得的数据和结论与前人的成果以及蝙蝠的行为目的基本相符合,不但可以合理解释蝙蝠外耳各部分的生物学作用,而且对深入理解蝙蝠的生物声呐系统以及高性能智能天线和水下声呐系统的设计具有重要意义和价值。

四、创新点

该项目创新点主要体现在以下几个方面：

(1)本项目的仿生蝙蝠头部模型采用从微型 CT 扫描的蝙蝠样品断层切面图像中三维重建结构模型，并采用 3D 打印技术制作而成，保留了蝙蝠的自然生理结构。

(2)本项目的超声波接收传感器采用 Knowles 公司的超声波微型硅麦克风，尺寸只有 2-3mm，可直接塞入蝙蝠模型的耳道内，在 100KHz 频率范围内具有良好的灵敏度。

(3)本项目采用多轴云台，在舵机的驱动下，可实现仿生蝙蝠模型的水平摇摆、竖直俯仰，基本反映了蝙蝠在回声定位的动作和姿态。

(4)本项目是多科性交叉性的研究，涉及生物学、声学、电子学、信号处理、机械控制等学科，还采用了 CT 断层扫描技术和 3D 打印技术。

五、总结与展望

本项目根据蝙蝠回声定位原理,设计制作了基于多轴云台的仿生蝙蝠声呐实验系统装置,并利用该实验装置对蝙蝠外耳对回波信号的调控规律进行了研究,基本可以反映出蝙蝠外耳在接收回波信号时的基本规律。

蝙蝠的回声定位是一个非常复杂的过程,涉及超声波信号的发射、传播、接收和处理等多个环节,目前的实验尚不能完全真实反映蝙蝠回声定位的整个过程。为了进一步研究蝙蝠的声呐系统,计划从以下两个方面开展工作:

(1) 初步的实验测试表明,蝙蝠外耳对于不同频率回波具有不同的最大声压接收方向,下一步工作的重点是研究蝙蝠外耳对不同频率回波的选择特性。

(2) 仿生蝙蝠声呐实验装置可以满足目前的实验工作,但实验过程比较耗时。在下一步工作中,实现声呐实验装置与计算机的接口,由计算机自动控制实验进程,提高工作效率。

参考文献

- [1] D. R. Griffin. Echolocation by blind men, bat and radar[J]. Science, 1944, 100(2609): 589-590
- [2] D. R. Griffin. Listening in the dark[M]. Ithaca: Cornell University Press, 1986: 57-80
- [3] 任晁逊. 这奇异的“飞老鼠”能用耳朵“看”东西吗? 蝙蝠声呐系统的发现[J]. 生命世界, 2010,(1):40-43
- [4] Suga N. Biosonar and neural computation in bats[J]. Sci.Am. 1990,262(6):60-68
- [5] 吴飞健, 陈其才. 蝙蝠听觉器的“视”功能[J]. 生物学通报, 1997,32(7):16-18
- [6] R.Müller, A.Gupta, and H.Zhu. Dynamic substrate for the physical encoding of sensory information in bat biosonar[J]. Phys.Rev.Lett.,2017,118(15):158102
- [7] Ramezani¹, S.Chung, and S.Hutchinson¹.A biomimetic robotic platform to study flight specializations of bats[J]. Science Robotics,2017,2(3): eaal2505
- [8] Q. Zhuang, R. Müller. Noseleaf furrows in a horseshoe bat act as resonance cavities shaping the biosonar beam[J]. Phys. Rev. Lett., 2006, 97(21): 218701
- [9] Q. Zhuang, R. Müller. Numerical study of the effect of the noseleaf on beamforming in a horseshoe bat[J]. Phys. Rev. E., 2007, 76(5): 051902
- [10] 马杰,张礼标,梁冰等.北京房山大足鼠耳蝠食鱼性及回声定位信号[J].动物学研究. 2003, 4(4):265-268
- [11] 冯江,李振新,陈敏等. 拖网式食鱼蝠——大足鼠耳蝠的形态、回声定位声波及捕食策略[J]. 生态学报,2003,23(9):1712-1718
- [12] 马杰,梁冰,张劲硕,张俊鹏等. 北京地区大足鼠耳蝠主要食物及其食性组成的季节变化[J]. 动物学报, 2005 ,51(1):7-11
- [13] 孔睿雯,庄桥. 一种基于多轴云台的仿生蝙蝠声呐实验系统装置[P].发明专利, 申请号: 201611239457.3, 申请公布号: CN106772328A

致 谢

感谢我的学校——山东省实验中学,“为每位学生创造主动发展的无限空间”的教育理念为我们创新能力的培养提供了必要的条件和良好的氛围,使我们积极探索,大胆创新,勇于实践。

感谢我的论文指导老师——山东建筑大学的庄桥老师和山东省实验中学的石磊老师的悉心指导,其中每一次发现问题、分析问题、解决问题的过程都让我学到许多知识,他们在百忙之中给予了无私的指导和帮助。在此,谨向两位老师致以崇高的敬意和衷心的感谢。

感谢山东大学微电子学院的王福勋老师,在论文修改和实验方面提出了极其宝贵的意见。

感谢我所有的任课老师,是他们的鼓励和鞭策,使我在高中阶段的学习有了更大的提高,我的数学、物理、化学、语文、英语和生物六科总成绩稳定在年级前 5%,并以优异的成绩考入了省实验中学创新班。

感谢我的爸爸和妈妈,这十六年来对我悉心的照顾和教导,以后我一定努力学习,不辜负你们的希望。

感谢我的同学和朋友,与你们在一起,使我的学习和生活增添了无穷的乐趣,充实了我的每一天。