

摘 要



在空气环境中蝙蝠能够利用它们的生物声纳系统实现超声波回声定位,具体表现为通过发射超声波声纳脉冲,利用从物体反射回来的回波来进行捕食或者导航。本文为研究蝙蝠的生物声纳回声定位机理,设计完成了一套基于移动平台的生物声纳系统,并通过该系统进行了仿生生物声纳目标探测识别的探索性研究。

首先本文根据模仿蝙蝠生物声纳的功能的要求完成了生物声纳系统的硬件设计和软件设计。硬件包括根据生物声纳特性确定系统硬件组成,完成超声波换能器选型、发射端信号调理电路和接收端信号调理电路的设计制作、电源模块电路的设计制作、系统信噪比改善、声纳头“嘴巴”转动控制的电机选用和控制器硬件电路设计制作。软件设计包括声纳发射脉冲的软件实现、回波信号接收的软件实现、声纳头“嘴巴”转动控制的上位机与下位机软件设计。

在基于移动平台的生物声纳系统研制的基础上,研究利用该系统进行了仿生物声纳目标探测识别的探索性研究。具体研究内容包括:根据蝙蝠的自然声纳探测策略设计了适用于本文移动平台的生物声纳探测策略;利用数字信号处理技术模仿动物听觉模型对回波信号预处理,包括 Gammatone 带通滤波、半波整流、低通滤波算法;利用间接水下目标定位方法对大足鼠耳蝠捕鱼机理展开了探索性研究,成功捕捉到鱼的游动轨迹,并根据误差传递函数得出在现有探测策略和算法下的定位误差;采用归一化互相关算法对模板和待匹配样本的二维声纳回波图像进行相似度判断,在本文设定的探测策略下开始了对复杂反射面植物目标的成功识别。

关键字: 仿生, 生物声纳, 探测策略, 回波信号预处理, 目标定位识别

Abstract

In the air, there are some marvelous animals-bats which can use their unique nature biosonar system to capture preys or navigate in darkness. The motivation of this work is to study the mechanism of bats' echolocation ability. An artificial biosonar system on mobile platform was designed for this work. Then this dissertation carried out some exploratory study of biosonar detection and classification.

To simulate the function of bats' biosonar organs, this work prepared the hardware and software environment for the biosonar system on mobile platform. The hardware preparations include the hardware section determining, ultrasonic transducer selection, the signal condition circuits design for emitting and receiving transducer, power circuit design, the SNR of system enhance, micro motors selection and the motor controller design for the rotation of sonar head's "mouth". And the software for sonar chirp generating and emitting, program for receiving the echo, the host computer software and slave MCU program for controlling the rotation of "mouth" are implemented to construct the software environment.

With the implemented biosonar system on the mobile platform, some efforts were performed for the bionic study of biosonar target detection and classification. Firstly, 5 sensing strategy which can be used by the mobile platform in our work were designed to simulate the bats' natural sensing strategy. Then an echo data processing algorithm which imitates the animal hearing model was introduced. It combines Gammatone bandpass filter, half wave rectification, and low pass filter together. After that, an experiment was conducted to study the mechanism of fishing bats' indirect localization. The test result indicates that our artificial biosonar system can locate the fish's swimming trace successfully, and a preliminary localization error of current sensing system is calculated by error transfer function. At last, normalized cross correlation is used to estimate the similarity between target's sonar image and the stored templates. With this algorithm, a plant target is classified successfully with the sensing strategy adopted in this paper.

Key word: bionic, biosonar, sensing strategy, echo data pre-processing, target detection and classification

1 绪论

1.1 蝙蝠生物声纳介绍

在自然界中，有两类与众不同的生物——蝙蝠和海豚，前者能够在黑暗中“看清”物体，后者擅长于在海洋中准确的识别定位猎物。他们的共同点是具有超声波回声定位能力，通过各自独特的生物声纳（Biology Sonar）系统发射和接收超声波脉冲，实现对目标和环境的探测。

在空中蝙蝠能够通过发射超声波脉冲和接收目标反射回来的回波信号来帮助它们在黑暗中自在的飞行^{[1][2]}。而且蝙蝠仅在它们能够发出自己的“滴”声的超声波脉冲时才飞行^[3]，如果它们的嘴巴被塞住，即便空间中存在其他的超声波源，它们也不会飞起来。为了感知目标和周围的环境，蝙蝠能够将接收到的声音信号转换为在脑海中的目标物体的空间形状特征映像^[4]。这种映像即是目标在蝙蝠脑海中的声纳回波图像^{[5][6]}。有些蝙蝠甚至能利用那些回波信号“像鸟儿一样飞翔在杂乱的夜里”同时避开宽度只有0.65mm的障碍物^[7]。另外有许多种类蝙蝠在不依赖视力的情况下能够轻易的捕获只有0.2mm大小的昆虫^[2]。一些研究人员认为，蝙蝠不仅能够感知黑暗中目标的位置信息，而且能够获得目标的三维结构特征，甚至是一棵拥有成千上万个反射面的树这样的目标也不在话下^[8]。研究指出蝙蝠在整个捕食过程都在发射超声波脉冲^[9]。蝙蝠的整个捕食过程包括三个阶段：搜索期、接近期、终止期，在不同的阶段蝙蝠发射的声纳脉冲波也不相同^[10]。在搜索期蝙蝠发射较长的超声波脉冲，这种脉冲具有较强的能量适于进行远距离探测，在接近期它们用更快的发射频率发射较短的超声波脉冲。在接近一个大目标时，它们会降低脉冲发射强度来保证回波强度适合于听觉系统的处理^[11]。

生物声纳是动物视觉的重要替代感知系统，它的主要功能包括嘴巴产生超声波脉冲、耳朵接收目标回波脉冲信号、大脑对回波信号分析和最终实现目标定位识别。其中具有生物声纳系统的动物通过比较回波信号与发射出去的超声波脉冲信号之间的特征差别，并结合记忆，大脑能够将不同的回波信号与其目标相对应起来最终实现目标环境定位识别。超过700种蝙蝠、数十种海豚、部分鸟类和鲸鱼拥有这一能力^[12]。但是作为典型的视觉依赖型生物，人类很难理解“利用超声波观察”这一概念，因为超声波和物体之间的相互作用是很不直观的，而且这样一种“主动”感知系统（辨听自身发出的超声波脉冲信号来识别周遭环境）对于习惯被动接收光线、触觉等信号的人类也是难以想象的。但是蝙蝠通过自身生物声纳探测识别目标的能力，使我们看到了通过一个类似的仿生平台获得目标距离、种类等信息的可能性^[13]。

1.2 仿蝙蝠超声探测的应用

虽然例如蝙蝠捕食这类现象背后的机理仍未得到完整诠释,模仿蝙蝠生物声纳机理的生物声纳目标回声定位和目标识别已经得到了一些应用。当前,超声波目标探测技术已经广泛的应用于移动机器人的测距、避障和建立导航地图方面,然而回波信号通常被局限于利用渡越时间检测法(Time of Flight)来测算直线上甚至是最近的物体到传感器的距离^[14]。这些理论已经被用于比如栅格法这类建立导航地图的技术中。从上世纪 80 年代开始,科学界开始渐渐把回声定位技术应用于目标识别。部分研究者们通过设计人工规则几何目标来使得声纳系统获得更多目标特征信息。Billur Barshan 通过一个多传感器声纳系统推算出了圆柱体(或球体)目标的半径和位置信息^[15]。Gex 和 Campbell 使用智能传感技术手段来调整他们的声纳系统去获得期待的目标信息^[16]。Akbarally 和 Politis 各自进行了对回波信号特征分析,可以区别平面、边、拐角三种简单几何形状^{[17][18]}。中国电子科技大学的亚洲机器人竞赛队伍成功的利用多个换能器的超声波换能器阵列实现了在有复杂干扰的比赛环境中避障与目标识别^[19]。Leonard 和 Durrant-Whyte 使用基于 RCD(Region of Constant Depth)的特征分析来进行机器人运动导航^[20]。Walker 和 Peremans 利用模拟蝙蝠头部模型的声纳装置成功地实现了单目标的跟踪^[21]。

1.3 超声探测理论基础

超声波是频率超过 20KHz 的声波,实际在超声波探测领域应用的超声波频率范围为 2×10^4 到 2×10^6 ,其中低频部分的超声波主要用于空气和液体介质的探测,中间频域和高频部分的超声波主要用于固体介质的探测^[22]。因为传输介质对声波的吸收随着频率的增加而升高,频率越高,超声波衰减越快,而介质对声波的吸收作用按固体、液体、空气的顺序递增。

1.3.1 超声波在空气中的传播速度

超声波在空气中的传播速度 v 等于声音在空气中的传播速度,在不同的空气条件下 v 的大小有所不同。最主要的影响因素是温度,湿度对 v 的影响较小,而气压基本没有任何影响。在通常情况下, v (m/s) 可以近似通过公式 (1.3.1) 求出,其中 θ 是摄氏温度 ($^{\circ}\text{C}$)。随着温度的上升超声波的传播速度也随之上升,在室温 (20°C),传播速度 v 的大小是 343.5m/s。

$$v = 331.5 + 0.6\theta \quad (1.3.1)$$

更为精确声速计算公式:

$$v = \sqrt{k \cdot \mathfrak{R} \cdot T} \quad (1.3.2)$$

式中： \mathfrak{R} 是空气的普适气体常数等于 $287.05 J/(kg \cdot K)$ ；

k 是绝热指数对于空气而言等于 1.402；

T 是开氏绝对温度。

利用式 (1.3.3) 和 (1.3.4) 可以计算出超声波的传播距离和波长。

$$d = v \cdot t \quad (1.3.3)$$

$$\lambda = v / f \quad (1.3.4)$$

1.3.2 超声波在空气中的衰减

在超声探测的应用中，另一个重要参数是超声波有效探测距离。影响超声波探测距离的因素有衰减、透射、反射、衍射等。其中超声波在空气中传播时，伴随着距离的增加，超声波的能量逐渐减弱，这种现象为超声波在空气中的衰减。由于超声波在传播过程中存在衰减，在一定距离时回波信号能量将会微弱到超声换能器无法检测到它的存在。理论上超声波的衰减包括扩散、散射和粘滞吸收。通常空气中的超声波衰减系数可由式 (1.3.5) 表示^[23]：

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_R \quad (1.3.5)$$

式中 α_c 是经典衰减系数可由式 (1.3.6) 得出；

α_R 是弛豫吸收系数。

$$\alpha_c = \frac{\omega^2}{2\rho v^3} \left(\frac{4}{3}\eta + (\gamma - 1)\frac{K}{c_p} \right) \quad (1.3.6)$$

式中 ω 是超声波的角频率；

ρ 是空气密度；

η 是空气的粘滞系数；

γ 是空气的比热比；

K 是空气的热传导率；

c_p 是空气的定压比热。

对于频率在 1MHz 以下的超声波，其衰减系数近似值可由式(1.3.7)得出：

$$\alpha = 15.895 \times 10^{11} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} f^2 \left(\frac{P}{P_0} \right) (dB/m) \quad (1.3.7)$$

1.3.3 超声波的入射与反射

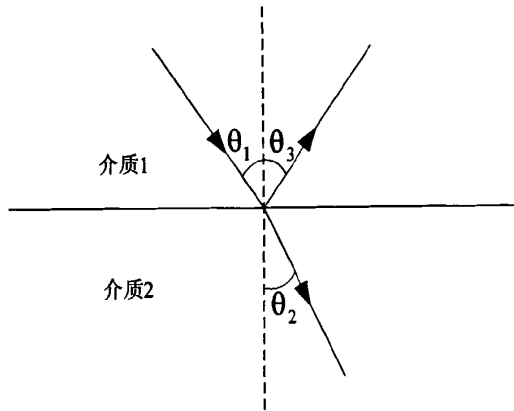


图 1.3.1 超声波在空气与反射物体界面的入射与透射

如图 1.3.1，当超声波由介质 1 斜入射到介质 2 时，在两种介质的交界面符合以下规律：

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta_3 \\ \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \\ R_a = \frac{(\cos \theta_2 / \cos \theta_1) - r_{21}}{(\cos \theta_2 / \cos \theta_1) + r_{21}} \\ T_a = \frac{2r_{21} \cos \theta_1}{\cos \theta_2 + r_{21}} \end{cases} \quad (1.3.7)$$

式中 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 分别是超声波入射角、折射角和反射角；

v_1 和 v_2 分别是超声波在介质 1 和介质 2 中的传播速度；

R_a 是反射系数；

T_a 是透射系数；

$r_{21} = \rho_2 v_2 / \rho_1 v_1$ ，其中 ρ_1 、 ρ_2 分别是介质 1 和介质 2 的密度， ρv 称为介质的声阻抗。

1.3.4 超声波换能器的方向特性

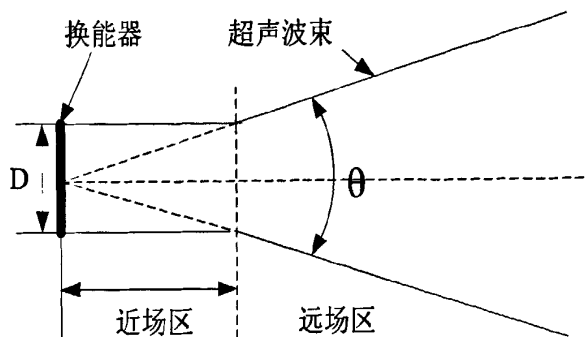


图 1.3.2 超声波换能器的方向特性

可用于空气中的超声波换能器按工作原理可分为静电式、电动式、压电式、磁致伸缩式、气流式等。其中用于超声波探测的主要是静电式和压电式两种。如图 1.3.2 所示是这两种换能器的方向特性，在离换能器较近的区域称为近场区，超声波波束基本是平行的，在离超声换能器较远的区域，波束以波束角 θ 沿换能器中心轴线扩散出去，其中

$$\sin(\theta / 2) = 1.22 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (1.3.7)$$

式中 λ 是波长；

D是超声换能器的直径。

1.4 回声定位

回声定位是指利用声波来发现和定位环境中的目标。这个概念首先由 Donald Griffin 提出，用来描述蝙蝠通过发射超声波声纳脉冲，利用从物体反射回来的回波来进行空间物体定位或者捕食的这一生物特性。

回声定位包括四个过程：产生超声波声纳脉冲、脉冲传播、反射和接收回波。为了接收到一个回波需要至少一个发射换能器、一个反射面和一个接收换能器。对应一个发射的脉冲和一个反射物体，接收端可能接收到多个从不同方向和位置反射回来的不同回波。目前，大多数基于回声定位技术的目标探测都是通过分析一些包含很少的简单反射面的物体反射回来的回波（包含简单的波形和频率组成）来实现^[24-26]。然而这样的分析显然无法描述蝙蝠对自然环境产生的复杂回波的处理。澳大利亚卧龙岗大学的 B.D.Stanley 提出可将来源于某个特定反射物体的回波信号表示为超声波源发射的超声波脉冲、脉冲由声源到目标的传播过程、目标的反射特性、回波由目标到接收端的传播过程、接收系统这些变量的函数，其中每一个变量都作为一个滤波器，并描述为如式 (1.4.1) 冲激响应方程^[27]：

$$\begin{aligned} h(t) = & h_{trans}(\theta_i, t) * h_{rad}(r, t) * h_{air}(t) * h_{target}(\theta_i, t) \\ & * h_{rad}(r, t) * h_{air}(t) * h_{rec}(\theta_R, t) * h_{proc}(t) \end{aligned} \quad (1.4.1)$$

式中 $h(t)$ 是整个回声定位模型的冲激响应，*表示卷积；

$h_{trans}(\theta_i, t)$ 是发射端换能器的冲激响应；

$h_{rad}(r, t)$ 是空间扩散衰减和传播延时的冲激响应；

$h_{air}(t)$ 是空气的冲激响应；

$h_{target}(\theta_i, t)$ 是目标反射特性的冲激响应；

$h_{rec}(\theta_R, t)$ 是接收端换能器的冲激响应；

$h_{proc}(t)$ 是接收系统回波处理的冲激响应。

可见回波信号的特征依赖于发射端、反射物和接收端的特性及其相互间的空间关系，

除此以外作为传播介质的空气其温度、气压和湿度等都对回波的波形和频率组成产生影响^[28]。

1.4.1 声纳脉冲波

声纳脉冲的波形和频率组成将决定它在反射物表面产生的回波如何带回目标的特征信息。所以选择合适的声纳脉冲波形对于回声定位来说是至关重要的。目前，生物声纳技术研究中采用的声纳波形主要为模拟蝙蝠的自然声纳脉冲波形。根据活动状态的不同例如捕食、在密林中飞行和在空旷地带飞行，蝙蝠往往使用不同种类的超声波脉冲^[29]。有些蝙蝠使用简单的宽频域的扫频波（FM）脉冲，有些却使用恒频波（CF）脉冲，还有一些蝙蝠在回声探测过程中使用的脉冲同时包含扫频和恒频成分^[30]。

1. CF（Constant Frequency）脉冲

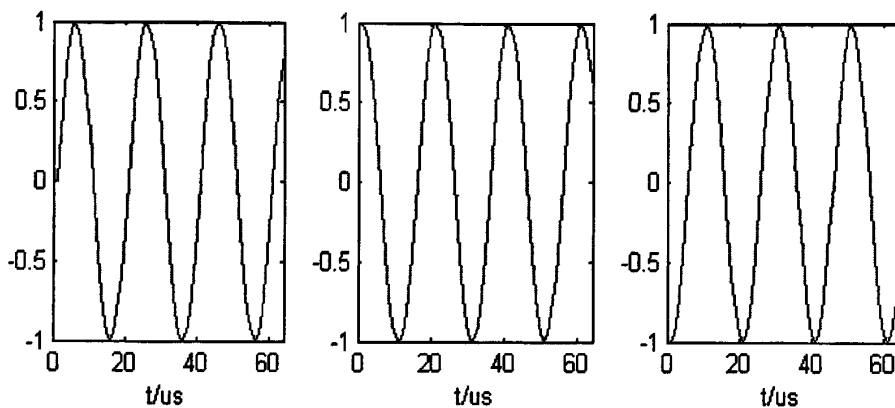


图 1.4.1 相位不同的 50KHz 持续时间 64us 的 CF 脉冲波

CF 脉冲是一种频率基本没有变化的超声波脉冲。这种脉冲能够传播更远的距离，常被使用于多普勒探测领域。当前，在移动机器人超声波避障、测距中采用的脉冲波形也常是这种脉冲波。然而，这种波形由于其单调的频率特征难以获得丰富的目标细节特征，更适合于目标远距离探测而不适于获取目标的细节信息。

2. FM（Frequency Modulated）脉冲

FM 脉冲在整个波形中频率是变化的。在自然界中，已知蝙蝠发射的 FM 脉冲波的频率是从高到低呈逐渐降低趋势的。这种脉冲信号类似于雷达脉冲，往往包含多种调频成分（如图 1.4.2 所示）。FM 脉冲不仅能够得到更高的测距精度，而且能够提供频谱信息。在临时环境中，发射 FM 脉冲的蝙蝠能够通过对其回波进行分析从而实现对环境产生清晰的三维感知^[31]，同样这有利于仿生生物声纳系统的目标探测识别的实现。

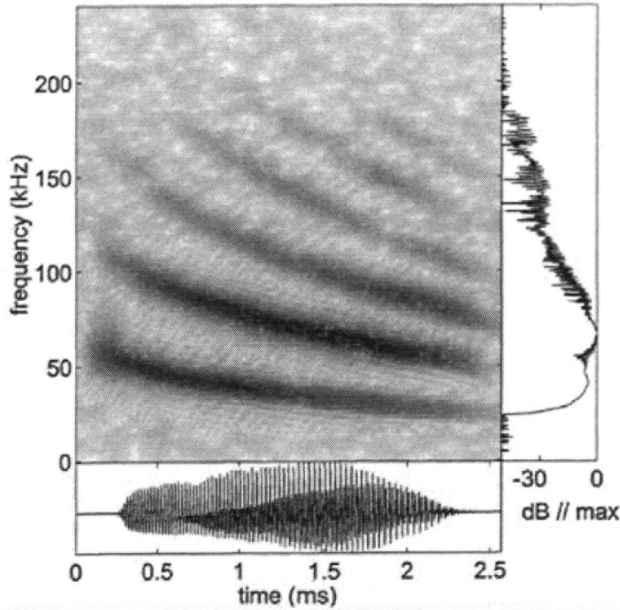


图 1.4.2 Eptesicus fuscus 蝠的 FM 脉冲波的时域与频域组成^[32]

3. CF-FM (Constant Frequency and Frequency Modulated) 脉冲

这种脉冲信号由 CF 和 FM 两种超声波成分组成，通常前一部分是 CF 波后一部分是 FM 波（如图 1.4.3 所示），能够将 CF 脉冲和 FM 脉冲的特点结合起来。

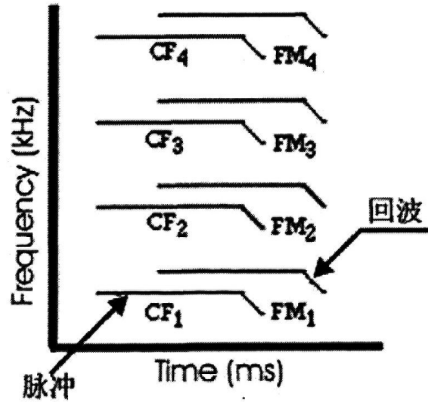


图 1.4.3 CF-FM 脉冲^[29]

1.4.2 反射

声纳脉冲在反射物表面的反射遵循 1.3.3 部分的超声波入射与反射规律。考虑到相位的变化，脉冲在两种介质表面的反射情况分成四种^[33]：

- (1) $\rho_2 v_2 \gg \rho_1 v_1$ 时，反射系数 $R_o \Rightarrow 1$ ，没有相位变化，大多数能量被反射；
- (2) $\rho_2 v_2 \ll \rho_1 v_1$ 时，反射系数 $R_o \Rightarrow -1$ ，相位改变 180° ，大多数能量被发射；
- (3) $\rho_2 v_2 = \rho_1 v_1$ 时，反射系数 $R_o = 0$ ，没有相位变化和能量反射；
- (4) $\rho_2 v_2 \neq \rho_1 v_1$ 但相差不大时，反射系数 $-1 < R_o < 1$ ，发生部分相位变化和能量反

射。

空气中声纳脉冲的反射大多数属于第一种情况,因为反射物体的密度远大于空气的密度,同时超声波在固体和液体中的传播速度也远高于在空气的传播速度。其中当反射物体的密度较大时,声纳脉冲大多数被反射,而当反射物体的密度比较小材质较柔软时,反射物体为对脉冲波能量的透射和吸收将较高。这和海洋声纳不同,因为在海洋中声纳脉冲的两种传播介质——水和固体,它们的声阻抗相差不大,海洋声纳脉冲在反射物表面的反射情况属于第四种。

1.4.3 回波

和任何声音一样,回声定位的超声波回波可以从三个要素来描述:音调、音色、响度,这三个要素分别对应于三个物理特性:频率、谐波组成。对于超声回波而言,这三个特性是由物体的反射面决定的,从而就可以通过分析回波的这些特性的不同来提取出反射面的信息。比如说,反射面的远近、高低、左右、大小、的不同以及材质的软硬不同、反射面是平面还是曲面、粗糙还是光滑等都影响到回波的三个物理特性,并且能通过这些特性得到反映^[34]。

对于一个回声定位的系统而言,其基本的性能应是采集到回波信号,然后其他诸如距离、位置、尺寸和反射面组成之类的信息才能通过分析回波得到。由于在整个回声定位过程中存在的折射、衍射、衰减等,常常只有一小部分能量被反射回接收端。回波除了声音的三要素外,在回声定位中还包括传播时间(TOF),即从脉冲的产生到反射物然后反射回来被接收端接收到这段时间,其反应了反射物的距离。当超声波脉冲入射到一个有着复杂反射面的物体(比如一个枝叶繁茂的树木)时,接收端采集到的回波将是多个反射面反射回来的回波的在空间中叠加后的波形,这样的回波信号显然难以从理论上预测出其特征。

1.5 本文的主要工作及结构安排

本文的研究目标是通过模仿蝙蝠生物声纳功能,设计完成了一套可以实现声纳脉冲信号的产生、声纳脉冲信号发射、回波信号接收、回波信号分析处理以及可以完成目标探测实验所需运动的基于移动平台的生物声纳系统,然后利用该系统展开仿生生物声纳目标探测的探索性研究,以探索并实现蝙蝠生物声纳的诸如目标识别、定位、追踪等功能。生物声纳探测技术在目前可能尚无法媲美图像系统,但是它有着不依赖光源、使用方便、成本低等优点,在近距离探测等方面上将会有广阔的应用前景。

本文结构安排如下:

第一章为绪论,介绍了蝙蝠生物声纳、仿蝙蝠超声探测的应用、超声波理论和回声

定位。

第二章为系统硬件的设计与实现。

第三章为系统软件的设计与实现。

第四章为利用本文设计研制完成的基于移动平台的生物声纳系统进行目标探测实验研究。

最后是对本文工作的总结与展望。

2 系统硬件设计

2.1 基于移动平台的生物声纳系统组成

如图 2.1.1 所示，根据对蝙蝠的生物声纳系统器官功能的模仿，基于移动平台的生物声纳系统硬件包括上位机、移动平台、数据采集卡、声纳头（如图 2.1.2 采用仿蝙蝠的“一嘴双耳”构型，包含一个“嘴巴”——发射端超声波换能器及信号调理电路、两个“耳朵”——接收端超声波换能器及信号调理电路，此外还有用于控制“嘴巴”两个自由度转动的两个驱动电机）、电机控制器、电源模块。

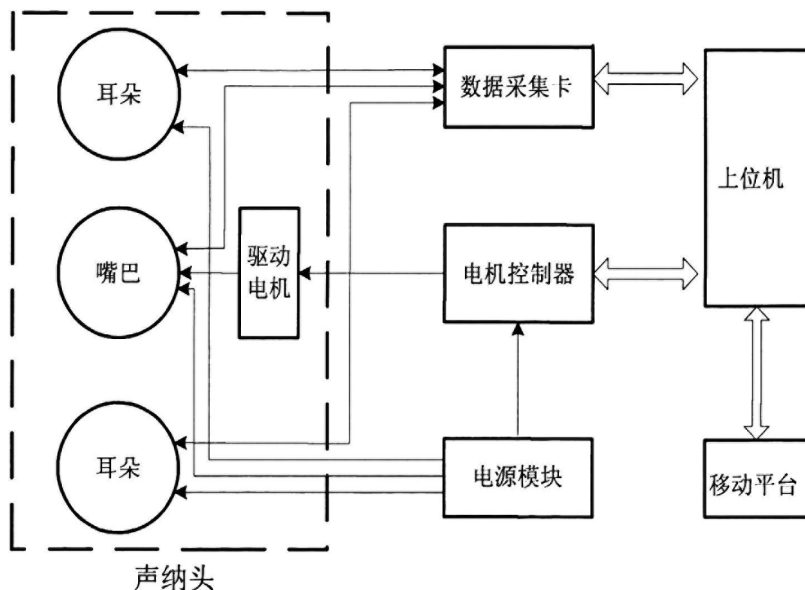


图 2.1.1 基于移动平台的生物声纳系统组成框图

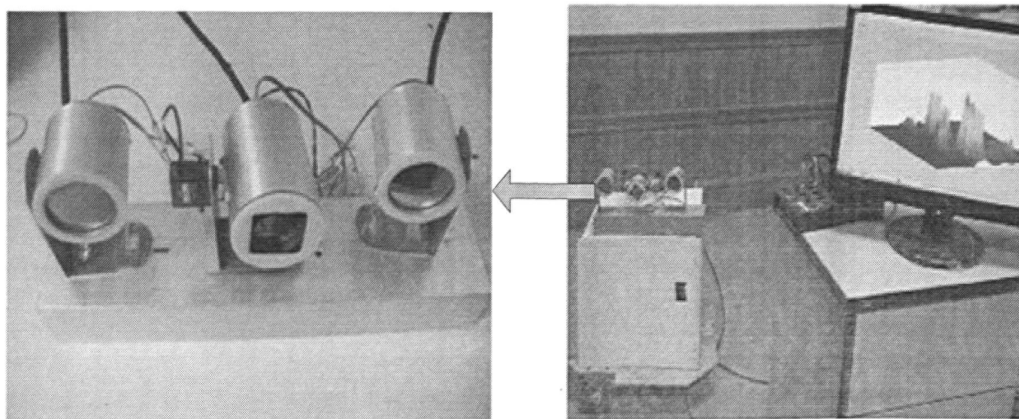


图 2.1.2 “一嘴双耳”构型的声纳头及上位机、移动平台

其中，根据仿生生物声纳目标探测任务的需要，上位机进行声纳脉冲的收发控制、与电机控制器进行通信以控制“嘴巴”的驱动电机和移动平台的运动控制。移动平台搭载声纳头（图 2.1.2）在上位机的控制下根据探测任务的运动规划，实现目标环境探测扫描策略所需要的运动；电机控制器控制两个驱动电机实现“嘴巴”在上下和左右两个自由度的转动（声纳头“耳朵”固定）以及为系统提供垂直和横向环境目标“嘴巴”转动扇形扫描的能力。

2.2 数据采集卡和移动平台

数据采集卡选用 NI 公司推出的一款高性能的数据采集卡 PCI-6115（见图 2.2.1）。该数据采集卡拥有模拟 I/O、数字 I/O、定时 I/O 等多种类型的输入输出端口，其主要性能如下：

- 8 个同步采样模拟输入通道，每个通道拥有 12 位的 ADC；
- 2 个带有 12 位的 DAC 的电压输出通道；
- 8 个 TTL 电平的数字 I/O，2 个 24 位的定时 I/O；
- 最高达 10MHz 的采样频率；
- 从±200mV 到±42V 输入范围；

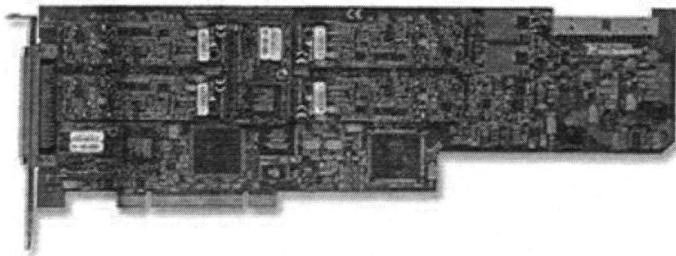


图 2.2.1 PCI-6115 数据采集卡

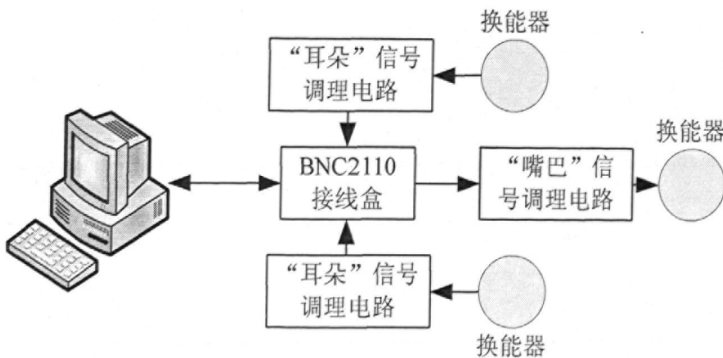


图 2.2.2 回波信号采集部分的硬件连接图

PCI-6115 数据采集卡插在上位机的 PCI 插槽内，然后通过连接电缆与接线盒连接，

安装在上位机 PCI 插槽中的数据采集卡与三个信号调理电路的硬件连接如图 2.2.2 所示。图中的 BNC2110 是配合 PCI-6115 使用的接线盒，接线盒上布置着模拟 I/O、数字 I/O、定时 I/O 等接线端口。

移动平台采用实验室现有室内移动平台，它利用两个大扭矩步进电机作为动力源，上位机采用南京顺康科技有限公司的 PCI 型控制卡 MC6212P 来实现对两个步进电机的转动控制。

2.3 超声波换能器选型

超声波换能器是整个生物声纳系统中的关键部件，位于声纳脉冲信号收发部分的最前端，起到了声电转换的作用。常用于空气中超声探测的超声波换能器有压电式和静电式两种类型的换能器，下面将简要介绍这两种超声波换能器并做出比较。

2.3.1 压电式超声波换能器

压电式超声波换能器是利用晶体的压电效应实现电信号和超声波声信号之间的转换的。当超声波作用在晶体时，内部就会产生电极化现象，同时产生电荷；当没有外力作用时，晶体又恢复到不带电的状态；当力的方向改变时，电荷的极性也随之改变；电荷量与超声波的幅值大小成正比。反之当电场作用于晶体就会产生机械伸缩变形，从而挤压空气产生超声波。

压电晶体存在一个共振频率，在这个频率上电信号和机械振动之间的转换效率最高。压电式超声换能器在这个共振频率区间以外的频率上不能有效的工作，波束角大约为 60° 。

2.3.2 静电式超声波换能器

静电式超声波换能器是在电容传声器的基础上发展起来的。其简化模型如图 2.3.1 所示，一般由一层金属薄膜或者是镀有金属层的介电薄膜（振膜）和背极板组成，工作时需要在振膜和背极板之间加上 200V 左右的直流偏置电压。

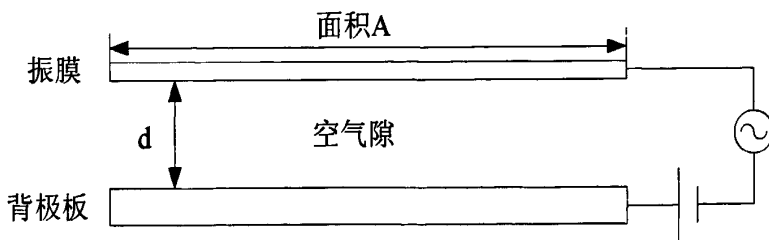


图 2.3.1 静电式超声波换能器简化模型

若静电式换能器作接收型换能器使用，在两极之间需要保持恒定的电量 Q 。当超声

波作用在振膜上的时候，振膜和背极板之间的空气隙会发生变化，从而根据式 (2.3.1)，电容 C 也发生变化。

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d} \tag{2.3.1}$$

式中， ϵ 是介电常量；
 d 是空气隙的宽度；
 A 是振膜和背极板的面积。

再由式 (2.3.2)：

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{Q \cdot d}{\epsilon \cdot A} \tag{2.3.2}$$

可知因为 Q 和 A 都是恒定的，所以 V 将随着空气隙的变化而变化。

若作为发射型换能器，需要高达 150V 到 200V 的峰-峰值电压信号加载在振膜和背极板之间以驱动振膜振动从而向空气中辐射超声波。

静电式换能器尺寸通常大于压电式换能器而且需要较大的工作电压，所以在使用上没有压电式换能器方便，但是它的工作频域较宽 (20-150KHz)。

2.3.3 两种换能器之间的比较及选择

表 2.3.1 两种超声波换能器优缺点比较

| 超声波换能器种类 | 优点 | 缺点 |
|----------|--|--|
| 压电式 | <ul style="list-style-type: none"> ● 尺寸小 (<20mm) ● 工作电压低 ● 价格便宜 | <ul style="list-style-type: none"> ● 波束角大 (大约 60°) ● 工作频域窄 |
| 静电式 | <ul style="list-style-type: none"> ● 波束角较小 (大约 30°) ● 工作频域 (20-150KHz) ● 响应灵敏，动态范围大 | <ul style="list-style-type: none"> ● 尺寸大 (>30mm) |

根据表 2.3.1 所示两种超声波换能器的优缺点所示，压电式超声波换能器价格较低而且便于使用，目前已大量应用于避障、探伤等领域，但它较窄的工作频域以及太大的波束角导致它并不适用于本文的基于移动平台的生物声纳系统。所以本文选用了 Senscomp 公司生产的 Senscomp7000 和 Senscomp600 系列静电式超声换能器(图 2.3.2)，其中 Senscomp7000 作为发射型换能器，其超声波主瓣波束角为 31.4° (如图 2.3.3)，因为发射出去的超声波主瓣并不是严格对称的，所以本文取为 30°。Senscomp600 作为接收型换能器，它们的转换中心频率在 50KHz 附近，二者的频率响应曲线如图 2.3.4 所示，可见它们有着良好的宽频域响应性能。

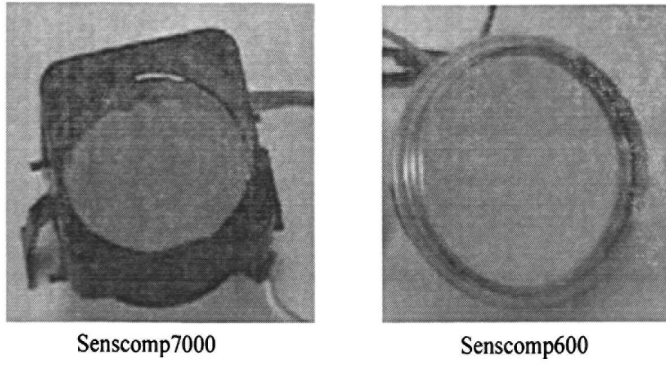


图 2.3.2 静电式超声波换能器 Senscomp7000 和 Senscomp600

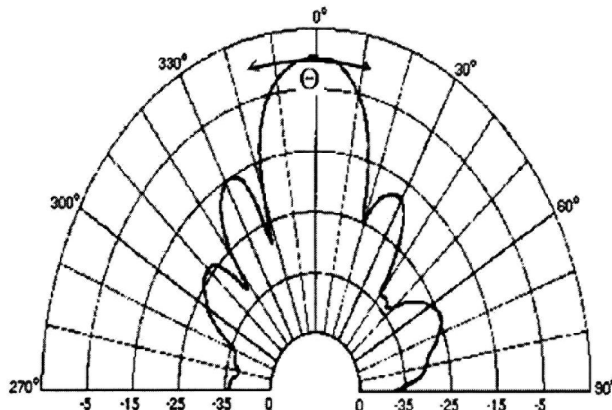


图 2.2.3 在 50kHz 的工作频率下的 senscomp7000 波束

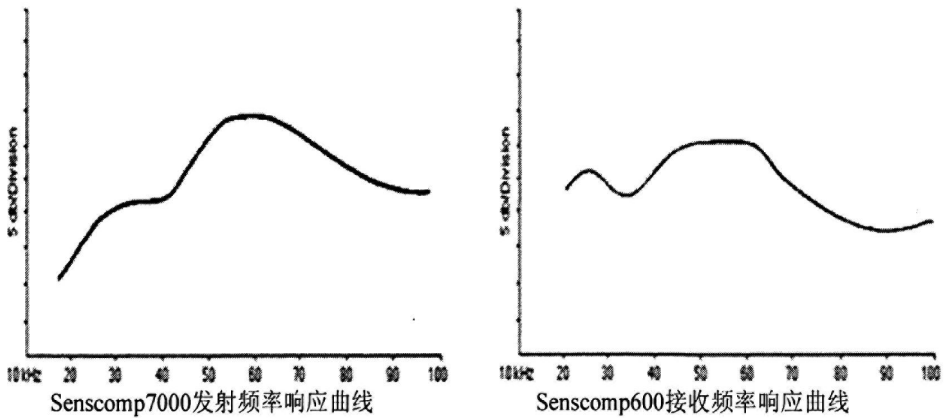


图 2.3.6 Senscomp7000 与 Senscomp600 的频率响应曲线

2.4 声纳头信号调理电路设计

2.4.1 “嘴巴”发射端信号调理电路设计

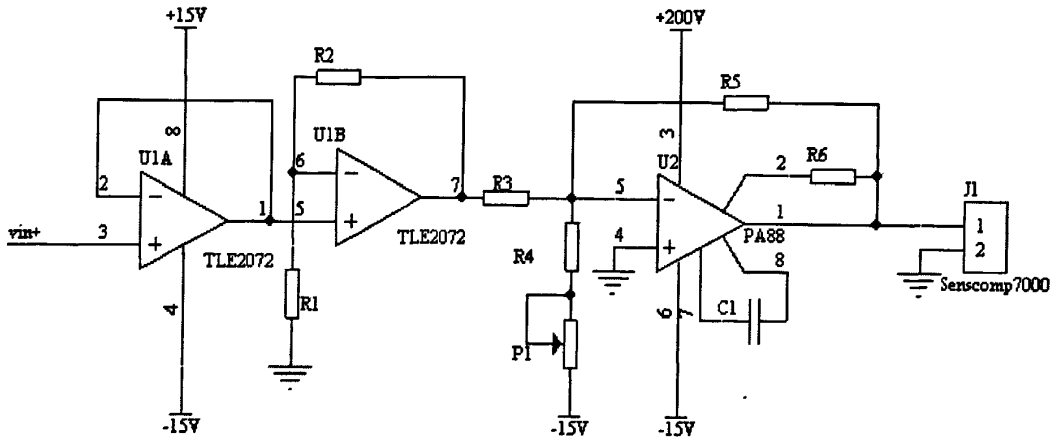


图 2.4.1 “嘴巴”发射端信号调理电路

“嘴巴”发射端信号调理电路如图 2.4.1 所示。静电式换能器 Senscomp7000 需要高达 150V 到 200V 的峰-峰值电压信号来实现驱动换能器振膜向空气中发射超声波脉冲，所以就需要对数据采集卡 PCI-6115 的输出的初始模拟脉冲信号进行放大。图示 U1A 的作用为电压跟随器利用集成运算放大器的高输入阻抗和低输出阻抗的性能实现阻抗转换和提高信号的带载能力，U1B 为第一级同相放大，U1A 和 U1B 分别是本电路选用的高速、低噪音 JFET 型运算放大器 TLE2072 中集成的两个运放，TLE2072 是 TI 生产的精密放大器，其主要特性如下：

转换速率 (SR): 35V/us

增益带宽积 (GBW): 9.4MHz

开环差模电压增益 (Avd): 100dB

共模抑制比 (CMRR): 70dB

底噪声 (Noise Floor): $17 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

第二级反相放大的集成运放 U2 采用 APEX 公司的高压、低静态电流 MOSFET 运算放大器 PA88，其相关特性为：

工作电压: 450V ($\pm 225\text{V}$)

静态电流: 2mA

输出电流: 200mA

开环差模电压增益: 111dB

转换速率: 30V/us

-15V 电源、电位器 P1 和电阻 R4 支路及 R5 和 U2 构成直流放大电路，可为

Senscomp7000 提供 76.5~157.5V 直流偏置。原始电压脉冲信号经二级放大（其放大倍数可由式 (2.4.1) 求出）后，驱动 senscomp7000 传感器向空中发送超声波脉冲。

$$A_v = (1 + \frac{R2}{R1}) (-\frac{R5}{R3}) \tag{2.4.1}$$

2.4.2 “耳朵”接收端信号调理电路设计

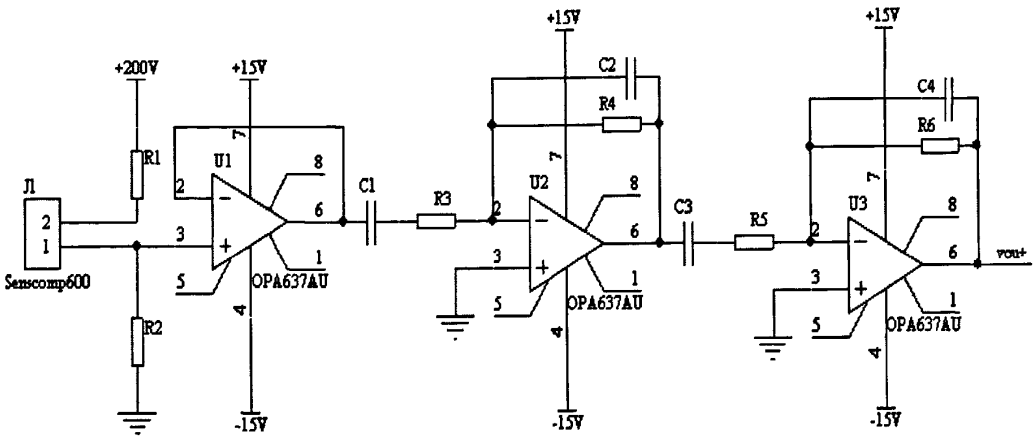


图 2.4.2 “耳朵”接收端信号调理电路

“耳朵”接收端信号调理电路如图 2.4.2 所示。其中 R1、J1（即 Senscomp600）、R2 构成 senscomp600 的直流偏置回路，可由式 $T1 = (R1 + R2) * Cp$ 得出该回路的时间常数，其中 Cp 为 senscomp600 工作时的电容值，值为 400-500pf 这里本文取 450pf，R1 取 5MΩ，R2 取 11MΩ 代入计算结果 $T1 = 7.65ms$ 。超声波信号的中心频率在 50KHz，即其信号周期为 $T2 = 1/50 KHz = 0.02ms$ 。T1 远大于 T2 时，保证了 senscomp600 声电转换的线性度。

本文选用 BB 公司生产的新型高速、低噪声、低漂移运算放大器 OPA637 作为该电路的电压跟随器（U1，起到阻抗变换和提高带载能力）、二阶选频电路（U2、U3）的运放，该运放常被用于高保真的音响系统中，效果非常出色。其相关特性如下：

底噪声： $4.5 nV \sqrt{Hz}$

输入失调电压： $\leq 100uV$

温度漂移： $\leq 0.8 \mu V / ^\circ C$

开环差模电压增益：120dB

电路中两片 OPA637（U2、U3）及外围电路组成了“耳朵”接收端信号调理电路中极其重要的二阶选频电路。根据运放的“虚短”和“虚断”原理，可以得出一阶选频电路的传递函数为：

$$G(j\omega) = -\frac{R_4 C_1 j\omega}{R_4 R_3 C_2 C_1 \omega^2 + (R_3 C_1 + R_4 C_2) j\omega + 1} \tag{2.4.2}$$

取式 (2.4.2) 的幅值特性:

$$|G(j\omega)| = \frac{R_4 C_1}{\sqrt{\frac{1}{\omega^2} + R_4^2 R_3^2 C_2^2 C_1^2 \omega^2 - 2R_4 R_3 C_2 C_1 + (R_3 C_1 + R_4 C_2)^2}} \quad (2.4.5)$$

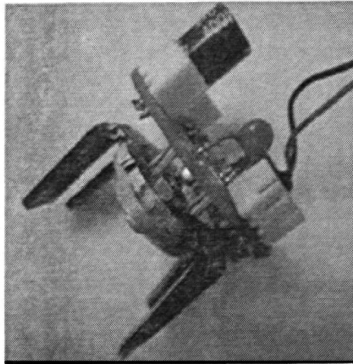
$$\leq \frac{R_4 C_1}{R_3 C_1 + R_4 C_2}$$

当且仅当 $\omega = \frac{1}{\sqrt{R_4 R_3 C_2 C_1}}$ 时, $|G(j\omega)|$ 取最大值 $\frac{R_4 C_1}{R_3 C_1 + R_4 C_2}$ 。即一阶选频电路通过信

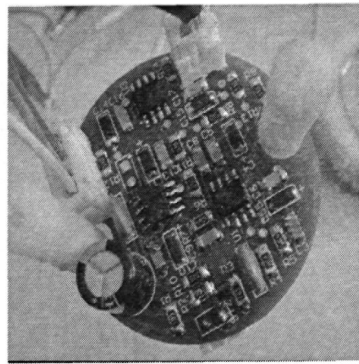
号的中心频率 $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_4 R_3 C_2 C_1}}$, 最大放大倍数 $A_{\max} = \frac{R_4 C_1}{R_3 C_1 + R_4 C_2}$ 。

该电路的放大倍数不能太小, 太小数据采集卡采集不到有效信号; 同时实验中发现放大倍数太大则信号的信噪比降低。实验证明, 一阶选频电路放大倍数 $A_{\max} = 40$ 较为合适。再令中心频率 $f_c = 50\text{KHz}$, 即可以计算得出各参数标称值。

最终本文设计的“耳朵”接收端信号调理电路的放大倍数约为 1600, 放大信号的中心频率约为 50KHz。



“嘴巴”电路板



“耳朵”电路板

图 2.4.3 制作完成的声纳头电路板

图 2.4.3 为利用 Protel99se 软件进行原理图、PCB 绘制后, 并进行焊接制作完成的“嘴巴”发射端信号调理电路板和“耳朵”接收端信号调理电路实物, 其中左图“嘴巴”电路板中的爪型物是散热片。

2.5 电源模块设计

对于系统选用的 senscomp600 和 senscomp7000 系列静电式超声换能器而言, 需要为其提供 200V 的直流偏置电压电源, 同时该偏置电压也作为 PA88 的工作电压。此外换能器信号调理电路中的运放 OPA637、TLE2072 需要 $\pm 15\text{V}$ 的工作电压。本文采用以

12V 蓄电池作为电源，分别利用两种 DC-DC 模块来产生 200V 直流偏置电压和 ±15V 工作电压提供给换能器和信号调理电路。

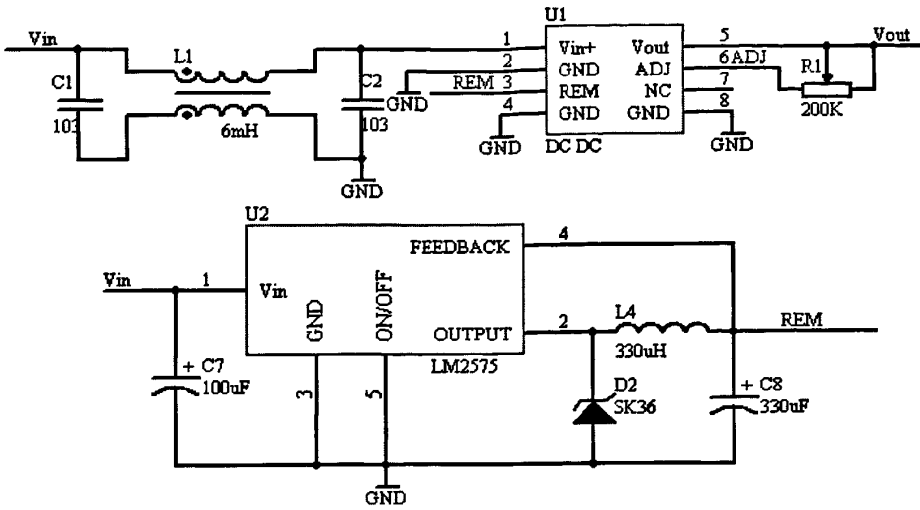


图 2.5.1 GRB12250D 型 DC-DC 应用电路

直流偏置电压部分的 DC-DC 模块选用深圳顺源公司的输出电压可调型 GRB12250D 模块，其主要参数为：输入电压 9V 到 18V，输出电压 125V 到 250V 可调，功率 10W，效率 85%。该 DC-DC 模块使用电路如图 2.5.1。

其中，DC-DC 模块 U1 的管脚 3 REM 为模块控制脚，接+5V 高电平时模块正常工作，接低电平模块不工作；三端变阻器 R1 为模块输出电压调节变阻器，通过改变 R1 阻值实现调节模块从 125V 到 250V 的输出电压；低压稳压芯片 LM2575 为 DC-DC 模块提供+5V 控制电平以及微型伺服电机控制模块单片机电路 5V 工作电源；L1 为扼流圈起到抑制输入端共模噪声的作用。

±15V 工作电压部分的 DC-DC 模块选用北京汇众公司的 HZD05B 模块，其主要性能为：输入电压 9V 到 18V，输出电压 ±15V，5W 输出功率，输出过流过压保护。其使用电路如图 2.5.2 所示：

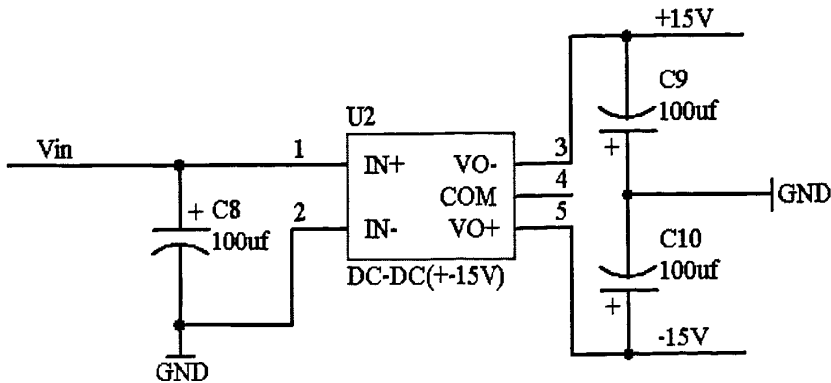


图 2.5.2 HZD05B 应用电路

图 2.5.3 为制作完成的系统电源模块实物图。

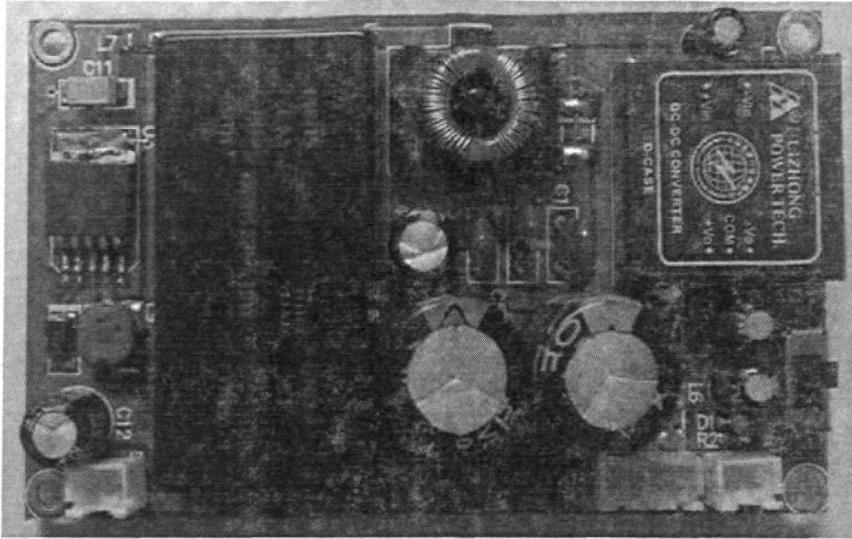


图 2.5.3 系统电源模块

2.6 系统超声波脉冲信号收发前端的信噪比改善

系统超声脉冲信号收发前端包括声纳头的“嘴巴”和“耳朵”、声纳头电源模块和 BNC2110 接线盒。当探测距离较远或者超声波脉冲在目标物体表面不是垂直反射时，回波信号的能量将可能十分微弱。同时考虑到超声波在空气中的衰减，为采集到有效的回波信号避免其淹没在噪声的“海洋”里，就有必要对系统前端硬件做信噪比改善处理。

2.6.1 模拟电路噪声来源

模拟电路的噪声来源很复杂，大致归结为三种：第一种是元器件产生的固有噪声；第二种是传导噪声；第三种是辐射噪声。

(1) 来自于电子元器件的内部固有噪声。在模拟电路中所有的电子元器件都存在固有噪声，其中最重要的有散粒噪声、热噪声和接触噪声等^[35]。

(2) 传导噪声。传导噪声往往来自于信号传输路径上的电源器件和其他的器件，在电路设计中，开关电源是最常用的电源器件，有些电路甚至只采用简单稳压的电源适配器。这些器件都会产生噪声并传导至对噪声很敏感的各种模拟器件中。

(3) 辐射噪声。辐射噪声的产生的原因是干扰能量通过电磁场作用在电路上造成干扰，例如在信号传输线上有工频信号、高频信号或者射频信号等的电流剧烈变化，就会在信号传输线周围产生变化的电磁场，成为对附近电路干扰的噪声源。辐射噪声也存在于 PCB 板上的两条平行而且相距较近的走线之间^[35]。

电路中噪声的影响由信号和噪声之间幅值的相对大小来衡量，具体表示为电路的信噪比。改善信噪比应该从两方面入手：一方面是信号强度的提高，另一方面是降低系

统的噪声水平。

2.6.2 系统噪声源分析和降噪处理

除了元器件的固有噪声外,来源于电源的输出噪声、装置对地的分布电容引起的共模干扰和电路本身的热噪声干扰等传导噪声和周围环境的 50Hz 工频电场带来的辐射噪声成为系统的主要噪声源。

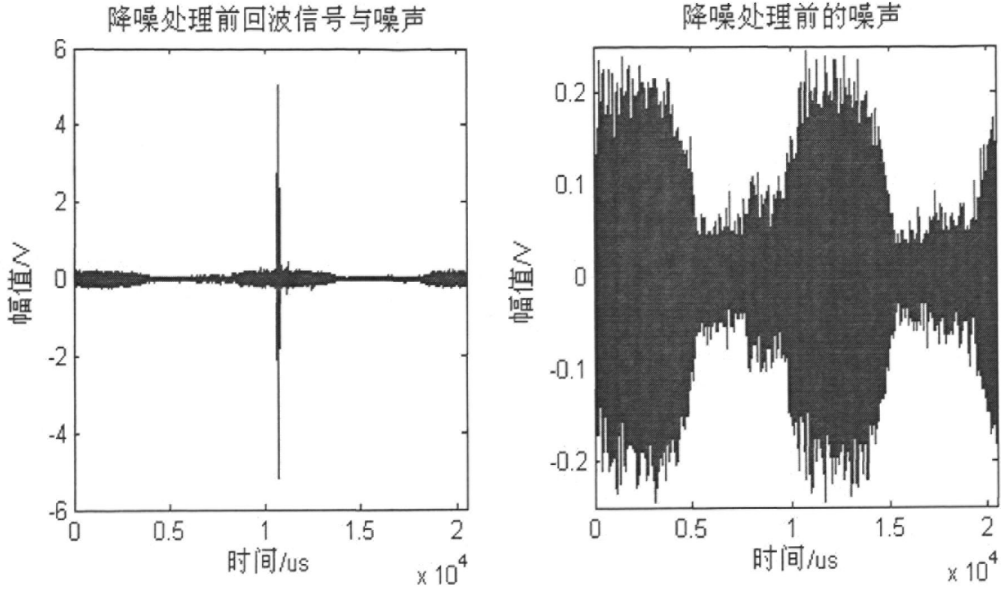


图 2.6.1 降噪处理前的噪声水平

图 2.6.1 为系统超声波脉冲收发前端未做信噪比改善措施时的采集到的回波信号和噪声,其中左图为平面反射情况下的回波信号。可见噪声幅值达到 $\pm 240\text{mv}$ 呈腰鼓状,其由 50KHz 的工频干扰噪声信号与电路中的高频噪声信号调制而来。其信噪比可由式(2.6.1)求出为 41.6dB:

$$SNR = 20 \lg \frac{\text{回波信号电压幅值}}{\text{噪声电压幅值}} \quad (2.6.1)$$

这样的噪声水平显然无法满足本文的生物声纳目标探测研究工作。在实际系统超声波脉冲信号收发前端的信噪比改善工作中,本文进行了通过提高声纳脉冲发射强度和提提高“耳朵”信号调理电路的放大倍数来提高回波信号强度和降低系统噪声两方面工作。其中本文采取的降噪措施有:

1. 使用高质量 DC-DC 模块并确保其开关频率在生物声纳系统所使用的超声波脉冲频率区间 (20-120) KHz 之外。声纳头电源模块中选用的 DC-DC 模块 GRB12250D 的开关频率为 300KHz, HZD05B 的开关频率为 300Hz, 两者都远离系统超声波脉冲频率区间。此外在电源模块的输出端使用如图 2.6.2 的 π 型 LC 滤波电路对输出电源进行滤波。

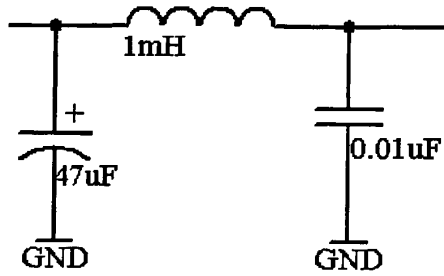


图 2.6.2 电源模块输出端 π 型 LC 滤波电路

2. 采用高精、低噪声的运算放大器，如 OPA637，并注意在绘制 PCB 板时运放的接地端一点接地；
3. 采用图 2.4.2 所示的二阶选频电路，其中心频率在 50KHz；
4. 针对实验室环境中 50Hz 的工频辐射噪声，本文主要采取的抑制方法是采用屏蔽外壳和屏蔽电缆，并注意屏蔽层的有效合理接地。图 2.6.3 是生物声纳系统脉冲信号收发前端的屏蔽和接地线路图。

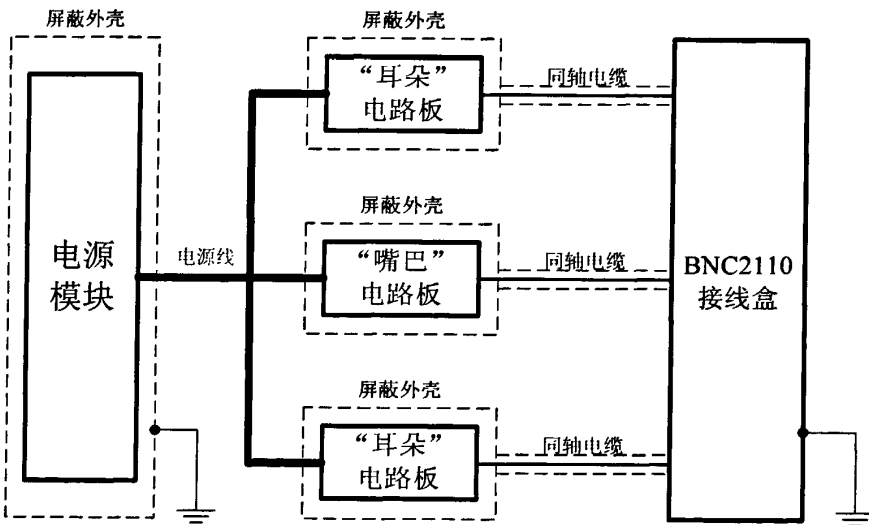


图 2.6.3 脉冲信号收发前端的屏蔽和接地线路图

在采用上述降噪措施后，系统噪声下降到如图 2.6.4 水平，可以看出噪声幅值已经下降为 $\pm 25\text{mv}$ 的水平，其中回波信号为提高声纳脉冲强度后对和图 2.6.1 相同的平面进行探测采集到。信噪比由式 (2.6.1) 求出，提高到 80dB，已能够满足本文的仿生生物声纳系统的目标探测实验研究工作需求。

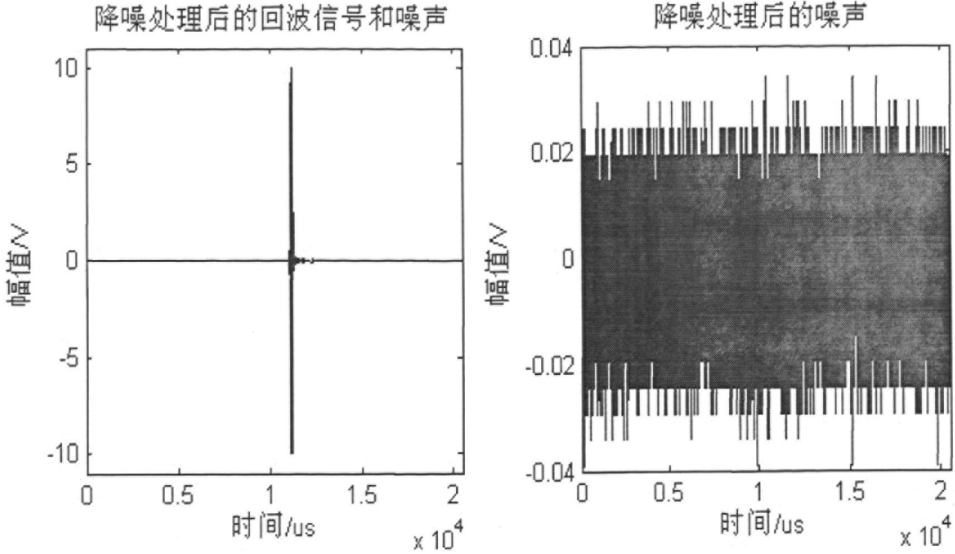


图 2.6.4 降噪处理后的噪声水平

2.7 “嘴巴”转动控制硬件设计

为模拟蝙蝠头部的局部运动——上下转动和左右转动，以及为基于移动平台的生物声纳系统的提供垂直和横向环境目标扫描的能力，声纳头的“嘴巴”下部安装了轴线相互垂直的两个微型驱动电机。在本文设计的结构中，“嘴巴”能够实现上下 0° 至 120° 和左右 0° 至 120° 的平稳转动。控制器接收上位机的控制指令来控制电机的旋转动作。类似的旋转控制广泛存在于小型机器人的肩、肘、手腕等关节的旋转控制和航模的舵面摆动控制等。

2.7.1 “嘴巴”转动控制硬件组成

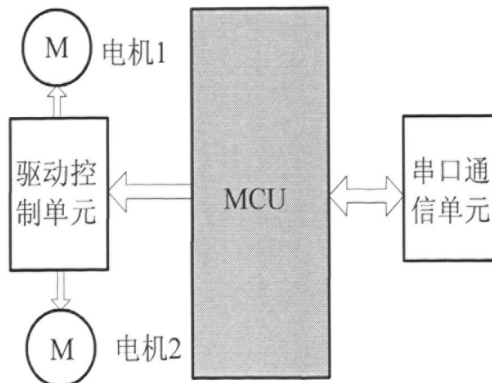


图 2.7.1 “嘴巴”摆动控制硬件组成框图

根据接收上位机指令控制驱动电机旋转来实现“嘴巴”转动动作这一功能要求，“嘴巴”转动控制的硬件组成包括如图 2.7.1 的几个部分。其中，MCU、串口通信单元、驱动控制单元组成电机控制器；其中 MCU 作为整个控制器的核心；串口通信单元负责与上

位机之间进行通信，接收上位机关于“嘴巴”转动角度和当前角度查询等指令，向上位机发送当前“嘴巴”的角度信息；驱动控制单元负责驱动和控制电机的启动、转向、转速。

2.7.2 MCU

MCU 是整个电机控制器的核心，负责上位机下发的转动角度指令分析、当前角度上传和电机控制。“嘴巴”的电机控制器选用了一款 Atmel 公司出品的采用 COMOS 技术的低功耗单片机 ATmega16，其具有增强型 RISC 结构即 Reduced Instruction Set CPU（精简指令集 CPU），是区别于常见 8051 系列单片机采用的 CISC 结构(Complex Instruction Set Computer, 复杂指令系统)的一种为提高 CPU 运行速度而设计的芯片体系^[36]。

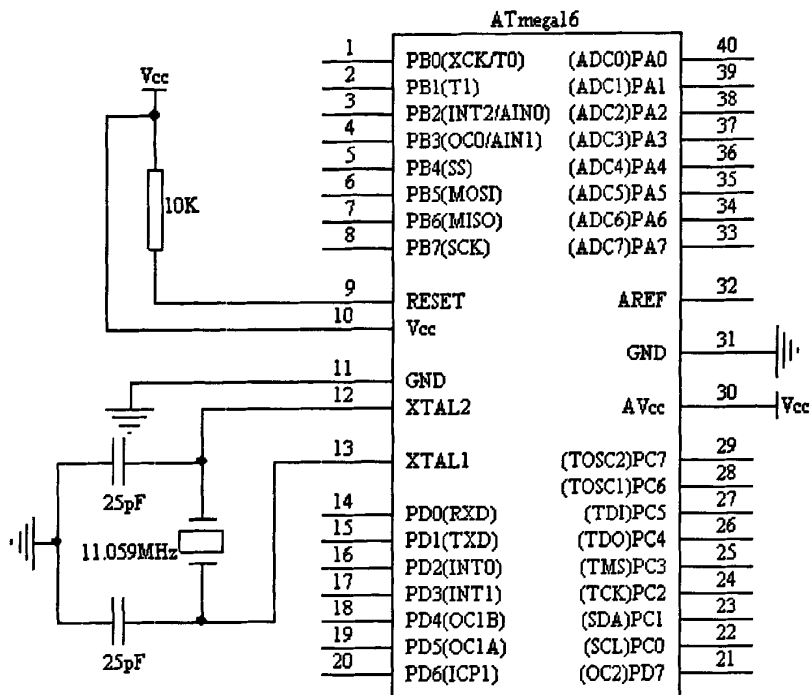


图 2.7.2 直插型 ATmega16 最小系统

ATmega16 的相关工作性能为：

1. 较高的指令执行效率，AVR 系列单片机的大多数指令都可以在一个时钟周期完成，而且当工作在芯片支持的最高频率 16MHz 情况下即可达到 16 MIPS 的运算性能，同时该单片机还拥有着只需两个时钟周期即可完成乘法计算的乘法器。

2. 片内程序和数据存储器容量大，ATmega16 含有 16KB 的 Flash、1KB 的 SRAM，另外还有 512 字节的可用于掉电数据存储的 EEPROM。

3. 可进行 JTAG 在线仿真调试以及利用 JTAG 接口对加密位、熔丝位、程序存储器 Flash 和掉电存储 EEPROM 进行编程下载。

4. 拥有丰富外设资源，具有两个可独立分频的 8 位定时器和一个具有信号比较、

捕捉功能的 16 位定时器, 可提供 4 路 PWM 输出; 针对模拟信号采集的需要, ATmega16 还集成了 8 路 10 位的 ADC; 用于芯片间通信, 符合 I²C 总线标准的 TWI; 串行通信接口是现在单片机必不可少的外设功能, ATmega16 集成了一个增强型的全双工串行接口 USART, 其支持同步或者异步通信; 集成了一个支持 ISP 程序下载模式的 SPI 串行接口, 为方便用户硬件设计, 该 SPI 串行接口可通过寄存器设置主机或者从机模式; 片内集成了防止程序跑飞, 可有效提高单片机运行可靠性的 WDT 看门狗定时器, 为用户省去了在外部增加 WDT 芯片的麻烦; 有着 32 个可编程通用 I/O 口, 用户通过配置寄存器实现通用 I/O 和复用功能的选择。

此外, ATmega16 片内还集成了上电复位电路, 以及和为防止因低压情况下出现程序跑飞等单片机错误状况的 BOD 掉电检测复位电路, 这和 WDT 一样为用户省去了外部 BOD 器件; 片内集成了可为系统提供时钟源的 1/2/4/8MHz 的 RC 振荡器; 21 个中断源以及为产品低功耗设计考虑的 6 种单片机休眠模式。

ATmega16 丰富的片内资源使得在进行电机控制器设计时节约了很多片外资源, 而且便于在不做过多硬件改动的情况下修改控制器的方案。

2.7.3 驱动电机的选型

1. 舵机

舵机的主要结构包括由无核心马达、电位器、电路板、齿轮以及外壳。舵机工作时需要由控制器发出的角度控制信号到其控制端口, 这时舵机电路板将判断控制器下达的转动方向, 然后驱动舵机马达转动, 马达的动力经由减速齿轮和轴输出, 电位器的作用是检测当前的角度, 判断舵机轴是否已经转到控制器的角度控制信号所指定的角度^[36]。以在本方案中选用的辉盛 MG995 舵机为例, 该型号舵机的主要参数为: 转动角度范围 0-120°, 无负载转速 0.17 秒每 60 度(4.8V)/0.13 秒每 60 度, 扭矩 13kg·cm。其控制信号为固定周期的脉冲调制信号 (PWM), 具体为在 20ms 的周期内脉冲宽度为 0.5ms 到 2.5ms 的调制信号, 脉冲宽度和转角大小成线性关系。

在该方案中, 单片机可直接作为控制器通过产生 PWM 波控制舵机旋转。在调试实验中, 舵机控制稳定, 但因其控制信号中只包含转角位置信号, 转速不可调, 即便通过控制脉冲宽度微量递增或者递减的方式实现调速也存在舵机抖动问题 (尤其在负载状态下)。而舵机正常转速 0.13 秒每 60 度即 461.5°/s 的转速对于“嘴巴”平稳转动来说过快, 故本文提出下一种实施方案。

2. 微型步进电机

步进电机具有快速启动、停止和反转, 转速不受负载的影响 (在不失步的情况下), 无累积误差, 速度、位置控制简单等特点。因而在本方案中, 选用微型永

磁式步进电机 24BYJ48 作为“嘴巴”两个自由度摆动动力源。其主要参数如表 2.7.1:

表 2.7.1 永磁式步进电机 24BYJ48 主要参数

| | | | |
|--------|---------|--------|-------------------------------------|
| 相数 | 4 | 电压 | 5V |
| 电流 | 40mA | 减速比 | 1:64 |
| 步距角 | 5.625 | 牵入转矩 | $\geq 29.4\text{mN} \cdot \text{m}$ |
| 空载牵出频率 | 1000pps | 空载牵入频率 | 500pps |

单片机通过按顺序给步进电机的绕组施加一定次序的脉冲电流就可以控制步进电机转动, 实现由数字到角度的转换。转动的角度和施加的脉冲数成正比, 转动的速度和脉冲频率成正比, 转动方向跟脉冲的顺序相关。此外该型步进电机还具有体积小、价格便宜的优点, 故而在最终的声纳头“嘴巴”上我们使用了该种微型步进电机, 并实现了“嘴巴”以 $2^\circ/\text{s}$ 的转速平稳转动。

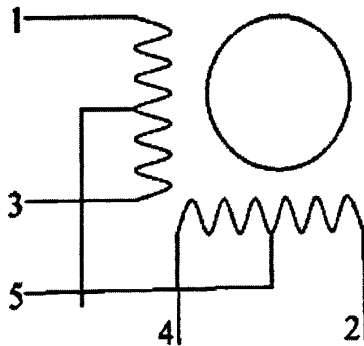


图 2.7.3 24BYJ48 励磁线圈绕组示意图

2.7.4 电机控制器电路

1. 步进电机驱动控制单元

本文选用高压大电流达林顿晶体管阵列 ULN2003A 作为步进电机 24BYJ48 的驱动器, 其具有电流增益高 (大于 1000)、带负载能力强 (输出电流大于 500mA)、温度范围宽 ($-40\sim 85^\circ\text{C}$)、工作电压高 (大于 50V) 的特点, 能够同时驱动 7 组负载, 广泛应用于伺服电机、电磁阀、可控照明灯等领域。

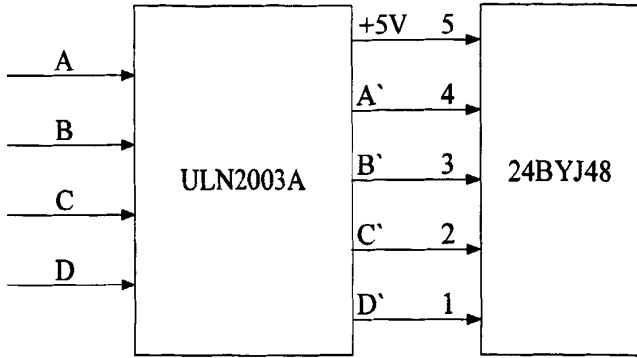


图 2.7.4 ULN2003A 与步进电机的连接图

在图 2.7.4 所示 ULN2003A 与 24BYJ48 的连接图中使用了 ULN2003A 的 7 组达林顿管阵列中的 4 组，其输入端 A、B、C、D 接单片机的 IO 口，单片机的控制电流经 ULN2003 驱动放大后输出到 24BYJ48 的 1~4 号 4 个励磁线圈引脚上，公共引脚 5 号脚连+5V 电源。当 24BYJ48 的引脚按照 1→12→2→23→3→34→4→41 的顺序依次为低电平时，步进电机 24BYJ48 即实现四相八拍的一个周期的转动。因为单片机通过 ULN2003A 控制 24BYJ48 的四个励磁线圈引脚，所以将单片机 4 个 IO 口按照同样的顺序置低就完成 24BYJ48 的转动控制，同样按相反的顺序将单片机 IO 口置低则控制 24BYJ48 反转。

2. 步进电机电源电路

在本控制器中，将电机的电源与单片机和串口通信单元的工作电源分别单独供电以避免电机启动、运转时的大电流对单片机和串口通信单元造成干扰，从而提高控制器工作可靠性。本文选用三端线性稳压芯片 LM7805 为步进电机提供+5V 工作电源，其应用电路如图 2.7.5，其中 D1 IN4007 为整流二极管。

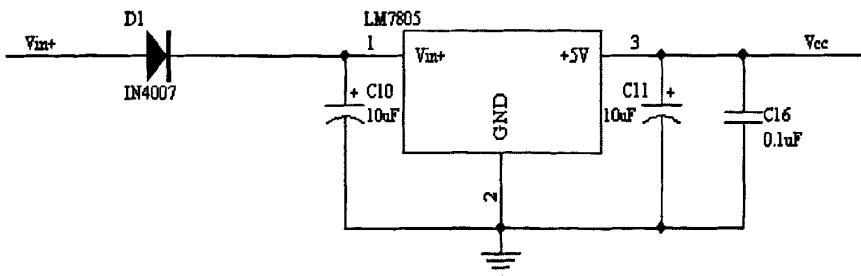


图 2.7.5 LM7805 应用电路

3. 串口通信单元电路

串口通信单元承担着控制器与上位机之间的通信任务，因而是实现“嘴巴”摆动控制中的一个重要环节。本文采用 ATmega16 单片机上的增强型异步串行传输接口 USART 与上位机基于 RS-232C 总线标准进行通信。

由于 AVR 的 USART 本身只有 RXD、TXD 两根收发信号线而且输出的是 TTL/CMOS 兼容

的电平，采用的时正逻辑，而 RS-232C 的逻辑“0”电平规定为+5~+15V，逻辑“1”电平规定为-15~-5V，因此单片机与上位机之间的通信必须经过电平转换。在本电路中采用现在广泛使用的 RS-232C 电平转换芯片 MAX232 来实现电平转换。MAX232 是 MAXIM 公司出产的包含两路接收器和驱动发送器的 RS-232C 电平转换芯片，能够做到将输入的 +5V 电压(TTL/CMOS 电平)转换为 ±15V 的 RS-232C 电平，同时也能够把 ±15V 的 RS-232C 电平转换成为 5V 的 TTL/COMS 输出，只需采用单一的 5V 电源即可。图 2.7.6 是 ATmeag16 单片机与 MAX232 的接口电路。

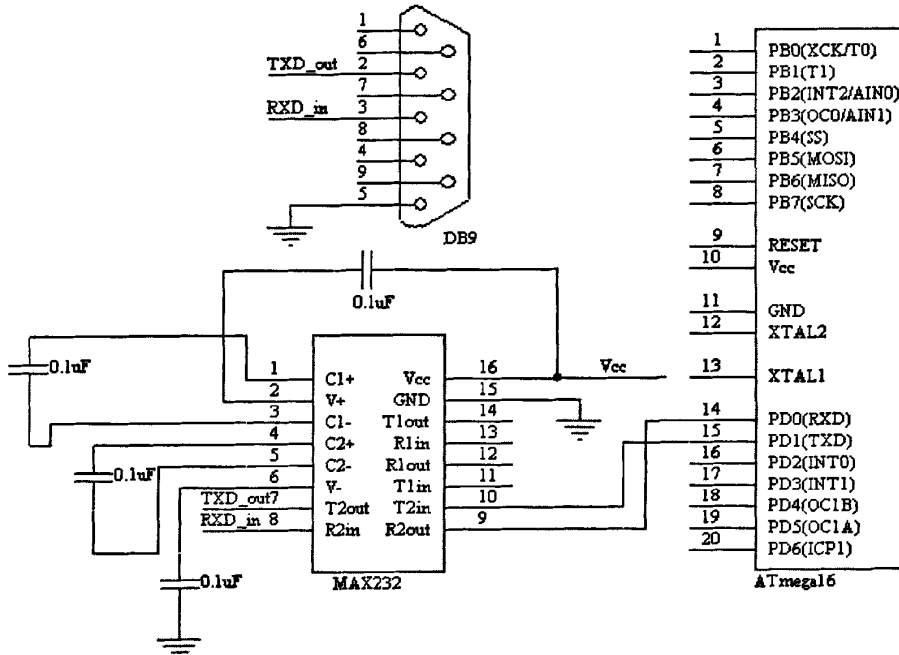


图 2.7.6 ATmeag16 与 MAX232 的接口电路

将控制器的串行接口与上位机上的 DB9 型针型接口相连还需要一根 RS-232 连接电缆，通过该连接电缆将图 2.7.6 中控制器的孔型 DB9 接口的 2 号脚 TXD 与上位机上的 DB9 接口的 2 号脚 RXD 口连接，将控制器的 DB9 接口的 3 号脚 RXD 与上位机的 DB9 接口的 3 号脚 TXD 连接，同时将二者的地相连后即完成上位机与电机控制器之间的串行通信硬件连接。

4. 单片机系统时钟选择

在异步串行通信中，常常因为通信波特率的不一致（允许误差为 $\pm 5\%$）而导致通信失败，因为 ATmega16 的 USART 时钟源来自于分频后的系统时钟，所以单片机系统时钟也许加以谨慎选择。

由于 ATmega16 内部的 RC 振荡源的频率为 1/2/4/8MHz，而这些频率的系统时钟在用于异步串行通信时波特率存在一定误差，而且 RC 振荡源本身有着不十分标准、容易受到温度的影响而产生频移的缺点，所以在本控制器电路中选用图 2.7.2 中的

11. 059MHz 外部晶体作为单片机系统时钟源。

5. 单片机程序下载仿真电路

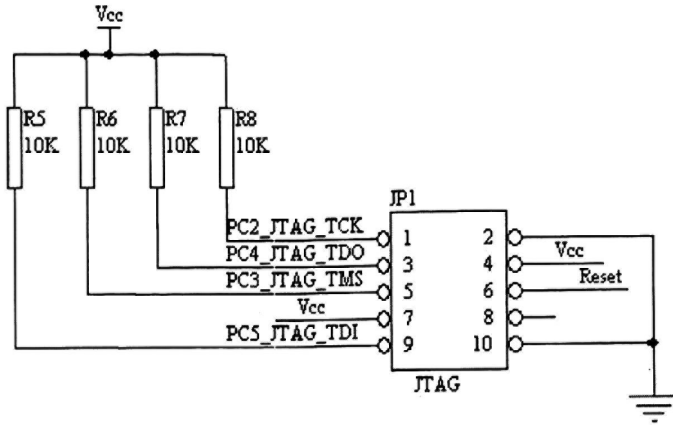


图 2.7.7 JTAG 程序下载电路

为了利用 ATmega16 的在线实时仿真功能来帮助我们调试单片机软件程序，提高程序编写调试效率，在控制器电路中使用了 JTAG 口作为单片机的程序下载接口。该下载电路如图 2.7.7 所示，在控制器电路的设计中应注意 PC2、PC3、PC4、PC5 这四个口不可以作为通用 IO 与其他器件直接连接，保留他们作为专用调试接口。

制作完成的电机控制器实物如图 2.7.8 所示，其中考虑到在将来的探测实验中可能会用到两个“耳朵”的摆动动作，所以除“嘴巴”电机需要的 2 路外拓展了另外 4 路的步进电机控制接口。

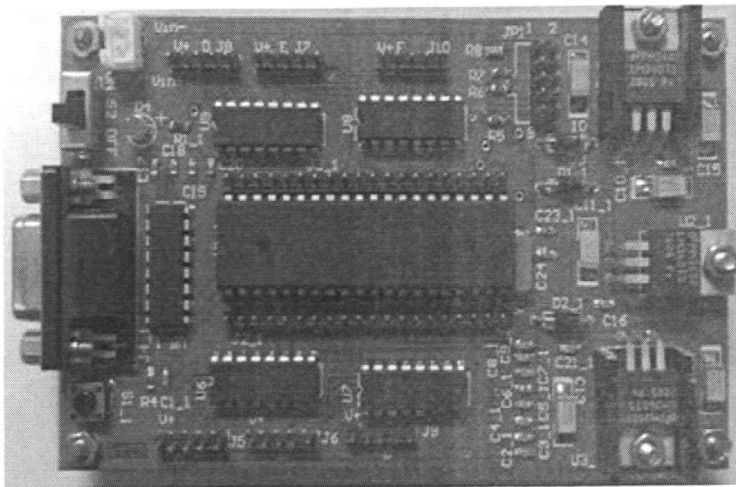


图 2.7.8 “嘴巴”步进电机控制器

2.8 本章小结

本章进行了基于移动平台生物声纳系统的硬件设计与制作,首先根据模拟蝙蝠自然声纳系统器官功能确定了系统硬件的基本组成,然后详细介绍了超声波换能器选型、换能器信号调理电路设计、电源模块设计、系统信号收发前端的信噪比改善和“嘴巴”转动控制的电机选用与控制器设计这几个方面的内容,为仿生生物声纳系统的目标探测研究提供了基本的硬件平台。

3 系统软件设计

3.1 基于移动平台的生物声纳系统软件组成

本文基于移动平台的生物声纳系统的一般工作流程如图 3.1.1 所示，上位机根据探测任务和探测扫描策略确定模仿蝙蝠生物声纳脉冲的脉冲波形和移动平台及“嘴巴”的运动规划后启动探测任务；数据采集卡在上位机启动探测任务后，模拟输出模仿蝙蝠叫声的脉冲电压信号，经由声纳头的“嘴巴”向空气发射超声波脉冲，经物体反射后，回波信号由两个“耳朵”接收，再由数据采集卡采集并由上位机存储用于数据分析、探索仿生生物声纳系统对目标的定位、跟踪、识别等；移动平台及“嘴巴”也在任务启动后按照扫描策略的要求做出与声纳脉冲发射相协调的动作。

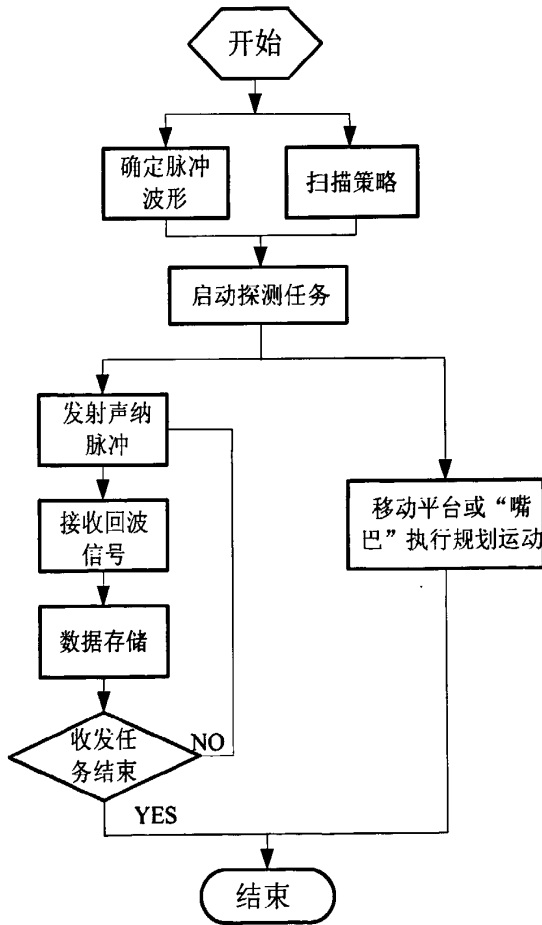


图 3.1.1 基于移动平台的生物声纳系统工作流程图

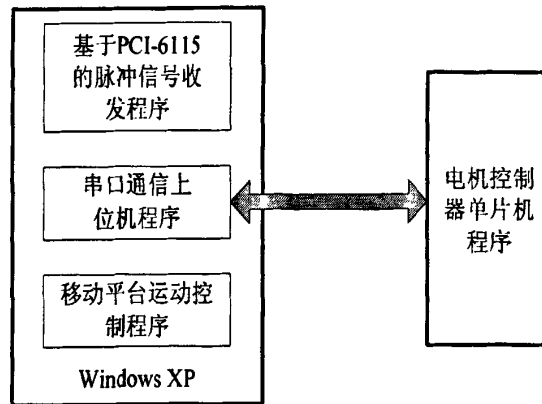


图 3.1.2 系统软件基本组成

根据图 3.1.1 所示的系统工作流程图，生物声纳系统的基本软件模块可以确定如图 3.1.2 所示，包括在上位机 Windows XP 运行环境下的基于 PCI-6115 的声纳脉冲信号收发程序、串口通信上位机程序、移动平台运动控制程序，以及电机控制器中单片机 ATmega16 的下位机程序。其中移动平台的运动控制是通过调用运动控制卡 MC6212P 的动态链接库函数实现。

3.2 声纳脉冲信号收发程序

声纳脉冲信号收发程序具体表现为对 PCI-NI6115 数据采集卡进行编程操作，控制其进行声纳脉冲信号的发送与接收。一种对 PCI-NI6115 数据采集卡进行编程的方法是使用应用软件编程，常用的此类软件包括 Measurement Studio、LabVIEW 等，它们集成了显示和控制等多种功能可以方便地对 PCI-NI6115 进行编程，但这些应用软件价格昂贵，灵活性不高，不适合于面向工作任务的模块集成，这对于本文的仿生生物声纳探测实验是很不便的。另一种编程方式是利用利用 C 或 VB 语言调用软件层中 PCI-6115 在 Windows XP 环境下的底层驱动来实现对该数据采集卡的编程操作，该编程方法灵活、程序响应速度快，符合需要多个软件模块集成的生物声纳目标环境探测实验的要求。

在本文的生物声纳系统中采用 C 语言调用 NI-DAQmx 驱动完成数据采集和发送的功能。

3.2.1 声纳脉冲信号的软件实现

在最近的生物声纳研究中，一些研究者指出使用较高频率的调频超声波脉冲可以得到更加清晰的环境声纳回波图像^[38]。对于声纳脉冲的研究发现，高频率调频脉冲信号在某些探测任务上表现并不那么有效，比如说目标较大的特征识别和远距离探测，但是在诸如细节特征感知或者是小目标探测上，高频脉冲的效果很理想。考虑到本文的基于移动平台的生物声纳系统的探测环境或者任务为近距离复杂环境下的目标探测，本文将主

要采用调频调幅 FMAA (FM with Amplitude Adaptation) 波 (见图 3.2.1 系统采用的部分不同持续时间的 FAMM 脉冲波) 作为探测脉冲信号波形, 而且这种卵形波的信号逐渐增强和逐渐减弱的趋势更加符合蝙蝠发射的脉冲波由开始到结束的幅值变化趋势, 同时也更符合换能器产生脉冲信号的工作过程。因为本文设计制作的基于移动平台的生物声纳系统也可进行远距离探测这类的实验, 所以恒频 CF 波将作为系统的备用探测脉冲信号波形。

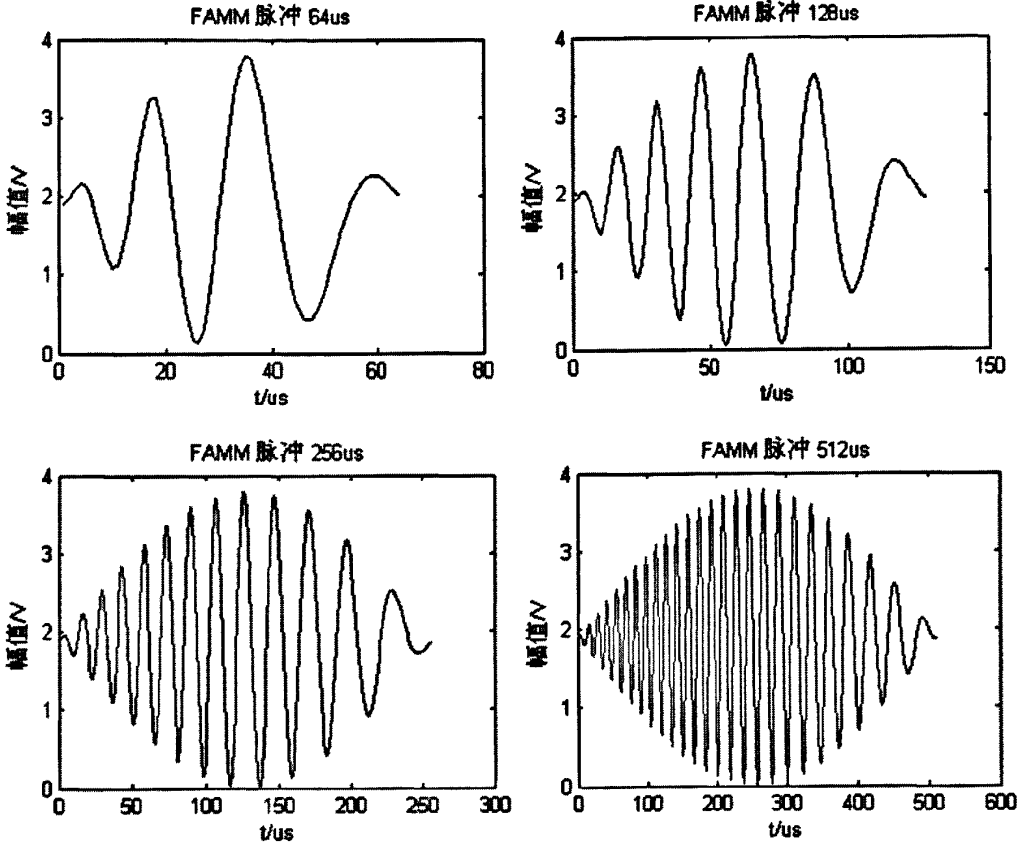


图 3.2.1 不同持续时间的 FAMM 波

1. 声纳脉冲信号的数学模型

对于恒幅扫频 FM 波而言, 时域上的连续频率变化 $f(t)$ 可以用式 (3.2.1) 来表示:

$$f(t) = f_0 + kt \tag{3.2.1}$$

其中, f_0 为起始频率;

k 为频率变化率。

在本文的生物声纳系统中使用的超声波脉冲的频率范围为 20~80KHz, 中心频率为 50KHz, 其相应的扫频波的数学函数为:

$$x(t) = \sin\left(2\pi \int_0^t f(\tau) \tau d\tau\right) = \sin\left(2\pi\left(f_0 + \frac{k}{2}t\right)t\right) \tag{3.2.2}$$

因为调频调幅 FMAA 波是在扫频 FM 波的基础上调制调幅成分而来，所以其数学函数如式 (3.2.4)：

$$\begin{cases} A(t) = A_0 + A_0 \sin(\pi t / T) \\ x(t) = A(t) \sin\left(2\pi\left(f_0 + \frac{k}{2}t\right)t\right) \end{cases} \quad (3.2.4)$$

其中 $A(t)$ 表示调幅波；

T 表示脉冲持续时间；

A_0 为调幅波的幅值。

恒频 CF 波 (图 1.4.1) 的波形频率及幅值成分单一，具体为：

$$x(t) = A_0 \sin(2\pi ft) \quad (3.2.5)$$

2. 系统调频调幅波和恒频波脉冲的 C 语言实现

本文的生物声纳系统是利用 PCI-6115 数据采集卡将数字量脉冲信号转换成模拟量信号再由信号调理电路放大后发送到空气中，脉冲信号的软件实现首先要做的是产生脉冲信号的数字量数据。因为存在离散数字量和模拟量的转换过程，这里要提出一个关键问题——系统的采样频率大小。

考虑到系统使用的调频调幅波的最大频率是 80KHz，根据内奎斯特采样定理，那么系统的采样频率至少应为 160KHz。因为在我们的生物声纳系统中，数据采集卡 PCI-6115 可以做到 10MHz 的采样频率，这里我们选用 1MHz 作为我们的系统采样频率。

我们在 VC6.0 编译环境下设计这两种脉冲波产生函数 `ao_wave()`，首先在内存中开辟一段空间用于存储脉冲信号波形数据 (具体表现为一个波长长度的数组)，然后在在一个循环程序中利用式 (3.2.4) 和式 (3.2.5) 计算出该脉冲信号的波形数据并存储于波形数组中。函数中相关的程序代码如下：

变量定义及分配存储空间：

```
double *y, A;
```

```
double phi=0.0,m_pi=3.1415926535,omega;
```

```
y = (double*) malloc (AO_LEN*sizeof(double));
```

调频调幅波脉冲：

```
for (i=0; i<AO_LEN; i++) //AO_LEN 为脉冲信号的数据点数即持续时间
```

```
{
```

```
    A = A0_A+A0_A*sin(m_pi*i/AO_LEN); //计算调幅幅值, A0_A 为发送信号幅值
```

```
    omega =0.16*m_pi-( 0.12*m_pi/AO_LEN)*i; //实现 80-20khz 的扫频
```

```
    phi = phi+omega;
```

```
    y[i] = A*sin(phi); //生成调频调幅波形数据
```

```
}
```

恒频波脉冲:

```
for(i=0;i<AO_LEN;i++)
{
    omega=0.1*m_pi;        //50khz 恒频波
    phi  = phi+omega;
    y[i] = A0_A*sin(phi);
}
```

3.2.2 声纳脉冲信号收发的软件实现方法

本文的生物声纳系统的声纳脉冲信号收发在软件上表现为上位机程序需要对 PCI-6115 进行编程实现一个 DA 通道发送脉冲信号，两个 AD 通道编程实现对回波信号的采集。双耳分别采集到的回波信号之间类似自然声纳的差分特征是仿生生物声纳系统的重要特征，所以要求系统必须实现两个“耳朵”同步开始采集任务以保证两耳采集到的信号在时域上的起始点一致，数据采集卡 PCI-6115 提供的多通道同步采集功能正满足了这一要求。

将函数 `ao_wave` 产生的脉冲信号输出的方法是调用 NI-DAQmx 驱动中相关函数来实现 DA 转换输出，相关函数具体如下：

任务控制函数：

1. 创建任务函数 `DAQmxCreateTask()`

```
Int32 DAQmxCreateTask ( const char taskName[], TaskHandle *taskHandle);
```

功能：创建 DA 或者 AD 工作任务，返回错误代码。参数：`taskName[]`是任务名称，`*taskHandle` 是任务对象句柄。

2. 任务启动函数 `DAQmxStartTask()`

```
Int32 DAQmxStartTask( TaskHandle taskHandle);
```

功能：启动 DA 或者 AD 工作任务，返回错误代码。参数：`taskHandle` 是任务句柄。

3. 任务停止函数 `DAQmxStopTask()`

```
Int32 DAQmxStopTask(TaskHandle taskHandle);
```

功能：停止 DA 或者 AD 工作任务，返回错误代码。参数：`taskHandle` 是任务句柄。

4. 任务清除函数 `DAQmxClearTask()`

功能：清除 DA 或者 AD 工作任务，返回错误代码。参数：`taskHandle` 是任务句柄。

DA 任务操作函数：

1. 配置 DA 通道函数 `DAQmxCreateAOVoltageChan()`

```
Int32 DAQmxCreateAOVoltageChan ( TaskHandle taskHandle, const char
```

physicalChannel[], const char nameToAssignTochannel[], float64 minVal, float64 maxVal, int32 units, const char customScaleName[]);

功能: 创建、配置与已建立的 DA 任务对象相关的 DA 通道, 返回错误代码。参数: taskHandle 是 DA 任务句柄, physicalChannel[]是用来创建虚拟通道的物理通道名称, nameToAssignTochannel[]是虚拟通道名称, minVal 是输出模拟信号最小幅值, maxVal 是输出模拟信号最大幅值, units 是幅值单位, customScaleName[]是自定义单位名称。

2. 定义采样模式函数 DAQmxCfgSampClkTiming()

Int32 DAQmxCfgSampClkTiming(TaskHandle taskHandle, const char source[], float64 rate, int32 activeEdge, int32 sampleMode, uInt64 sampsPerChanToAcquire);

功能: 定义时钟源、采样频率、用于 DA 的点数, 返回错误代码。参数: taskHandle 是 DA 任务句柄, source[]是时钟源名称缺省使用数据采集卡自身时钟源, rate 是采样频率, activeEdge 是边沿触发模式选择包括上升沿触发和下降沿触发两种, sampleMode 是采样模式包括有限点数采样和联系采样等, sampsPerChanToAcquire 是每通道采样点数。

3. DA 数据写函数 DAQmxWriteAnalogF64()

Int32 DAQmxWriteAnalogF64(TaskHandle taskHandle, int32 numSampsPerChan, bool32 autoStart, float64 timeout, bool32 dataLayout, float64 writeArray[], int32 *sampsPerChanWritten, bool32 *reserved)

功能: 将 DA 数据写给相应的工作任务, 返回错误代码。参数: taskHandle 是 DA 任务句柄, numSampsPerChan 是每通道写入数据点数, autoStart 是确定是否自动启动写操作, timeout 是写操作时间上限, dataLayout 是数据排列模式包括按通道排列和交错排列, writeArray[]是待写入数据地址, *sampsPerChanWritten 是每个通道实际写入数据点数, *reserved 是保留数据位。

与脉冲信号的发送方法相同, 系统也是通过调用 NI_DAQmx 驱动中的相关函数完成回波信号 AD 采集, 除如下的 AD 通道配置函数和 AD 数据读函数外, 其余驱动函数与 DA 部分相同。

1. AD 配置通道函数 DAQmxCreateAIVoltageChan():

Int32 DAQmxCreateAIVoltageChan(TaskHandle taskHandle, const char physicalChannel[], const char nameToAssignTochannel[], int32 terminalConfig, float64 minVal, float64 maxVal, int32 units, const char customScaleName[]);

功能: 创建、配置与已建立的 AD 任务对象相关的 DA 通道, 返回错误代码。参数: taskHandle 是 DA 任务句柄, physicalChannel[]是用来创建虚拟通道的物理通道名称, nameToAssignTochannel[]是虚拟通道名称, terminalConfig 是通道的信号输入终端配置

通常取默认值，minVal 是输出模拟信号最小幅值，maxVal 是输出模拟信号最大幅值，units 是幅值单位，customScaleName[]是自定义单位名称。

2. AD 数据读函数 DAQmxReadAnalogF64()

```
Int32 DAQmxReadAnalogF64(TaskHandle taskHandle, int32 numSampsPerChan, float64 timeout, bool32 fillMode, float64 readArray[], ulnt32 arraySizeInSamps, int32 *sampsPerChanWritten, bool32 *reserved);
```

功能：将通道采集到的数据读出，返回错误代码。参数：taskHandle 是 AD 任务句柄，numSampsPerChan 是每通道写入数据点数，timeout 是读操作时间上限，fillMode 是数据排列模式包括按通道排列和交错排列，readArray[] 是数据保存地址，arraySizeInSamps 是 readArray[]的大小，*sampsPerChanWritten 是每个通道实际写入数据点数，*reserved 是保留数据位。

3.2.3 声纳脉冲信号收发程序工作流程

在本文的采用仿蝙蝠的“一嘴双耳”仿生构型生物声纳目标、环境探测实验中，声纳脉冲信号的收发同样模仿蝙蝠的自然声纳功能，采取和它们一样的一发一收的脉冲信号发送，即“嘴巴”发出脉冲信号后两个“耳朵”即刻开始信号采集。上位机通过数据采集卡 PCI-6115 发送声纳脉冲信号的一般步骤是根据任务需要的脉冲波形调用脉冲信号产生函数 ao_wave()产生任务要求的一定持续时间的调频调幅波脉冲或者恒频波脉冲数据，然后调用 NI-DAQmx 中的驱动函数启动 DA 发送任务将离散数字量脉冲数据转换成连续模拟量脉冲电压信号输出给信号调理电路，经由发射端换能器向空气发射出去，随即启动双通道同步 AD 采集任务采集回波信号，最终将采集到的回波信号数据存储以进行数据的分析处理并返回实际发送数据点数、各通道接收到数据点数等提示信息。声纳信号的收发程序流程图如图 3.2.2。

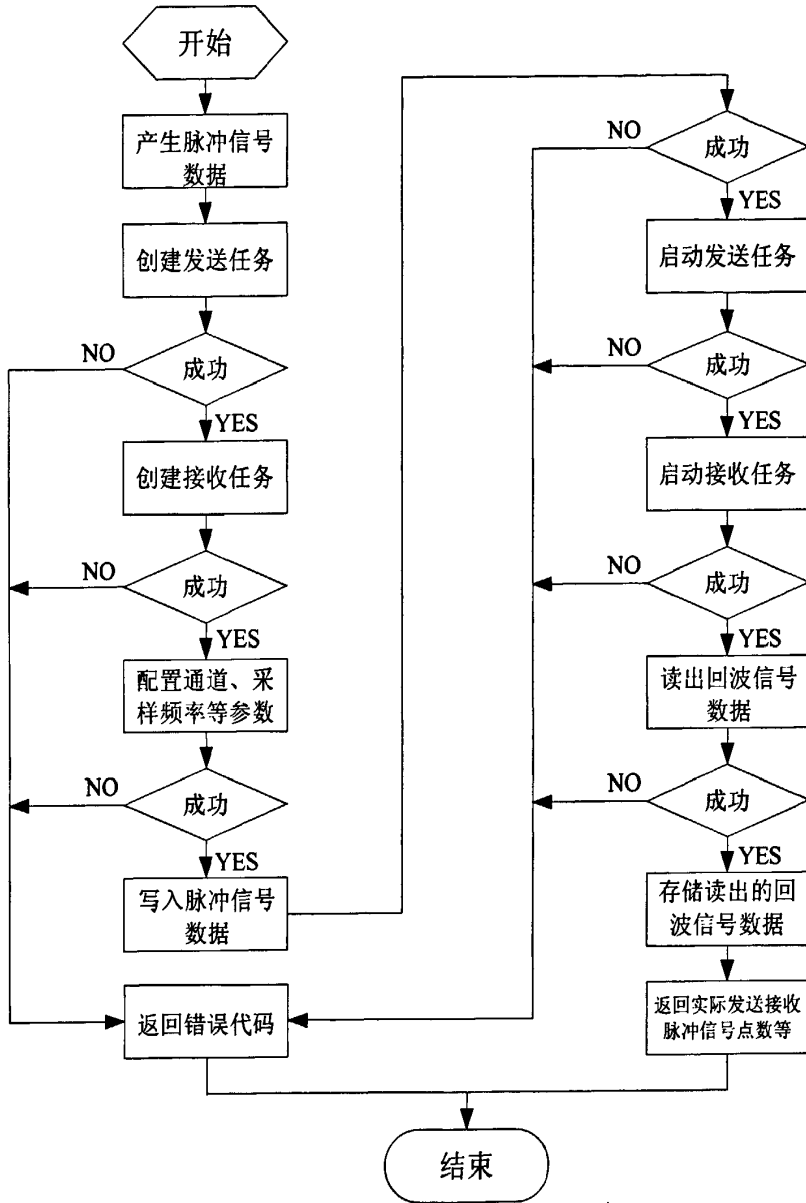


图 3.2.2 脉冲信号发送程序流程图

3.3 “嘴巴”转动控制的上位机和下位机软件实现

3.3.1 “嘴巴”转动控制通信数据包格式

根据声纳头“嘴巴”转动控制的功能和组成分析，控制量有水平方向目标角度（转动角度区间 $0^{\circ} \sim 120^{\circ}$ ）、垂直方向目标角度（转动角度区间 $0^{\circ} \sim 120^{\circ}$ ），状态量有“嘴巴”垂直方向当前角度和水平方向当前角度。因此，上位机需要下达的指令信息是两个自由度上的目标角度信息，下位机需要上传的状态信息为两个自由度上的当前角度信息。

上位机和下位机之间的通信采用半双工模式，即对于通信的任何一方来说，数据的发送和接收是分开的。可以拟定用于“嘴巴”转动控制的上位机下发下行数据包格式和内容如表 3.3.1，其中每帧数据大小为 1 个字节。

表 3.3.1 下行数据包

| 起始字 | 命令字 | 转动模式 | 目标角度 | CRC 校验码 | 结束字 |
|------|------------|------------------------|-------|---------|------|
| 0xBB | 0x0A, 0x0B | 0x01, 0x10, 0x02, 0x20 | 0~120 | | 0xEE |

说明：命令字 0x0A 为当前角度查询命令表示数据包为当前角度查询命令包，命令字 0x0B 为角度控制命令，转动模式 0x01 为水平方向角度控制，转动模式 0x10 为垂直方向角度控制，转动模式 0x02 为水平方向电机停止，转动模式 0x20 为垂直方向电机停止，CRC 校验码为命令字、转动模式和转动角度按位逻辑“异或”值。

下位机应答查询命令包上传的上行数据包格式和内容如表 3.3.2，其中 CRC 校验码为垂直方向角度和水平方向角度按位逻辑“异或”值。

表 3.3.2 上行数据包

| 起始字 | 垂直方向角度 | 水平方向角度 | CRC 校验码 | 结束字 |
|------|--------|--------|---------|------|
| 0xBB | 0~120 | 0~120 | | 0xEE |

3.3.2 上位机软件实现

在上位机的 Windows XP 环境下利用 C 语言实现上位机与“嘴巴”转动控制器进行通信有以下三种方法^[39]：采用 Microsoft Win32 应用程序 API 提供的串行通信函数来实现；采用 ActiveX 通信控件 MSComm 来进行串行通信程序开发；采用 MFC 思路，将 API 函数封装在一个类中来实现。

其中，第三种方法虽然控制灵活，但是实现起来较为麻烦，要同时了解相应的 API 函数和掌握多线程编程技术。而对于另外的两种方法而言，使用 MSComm 控件的方法比调用 API 动态链接库更加方便，而且编程效率较高，更加适合我们在较短时间内实现上位机控制程序。利用串口控件 MSComm 进行串口通信的一般流程如图 3.3.1：

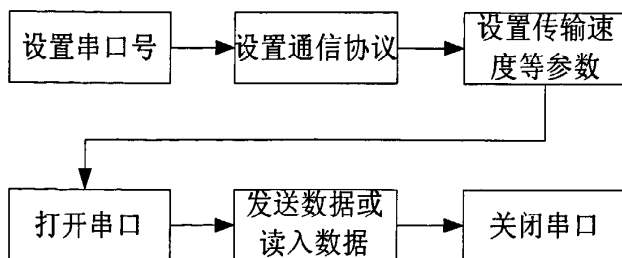


图 3.3.1 MSComm 串口通信一般流程

图 3.3.2 为本文利用面向对象编程工具基于 MSComm 控件编写完成的“嘴巴”电机控制&脉冲收发耦合程序 MFC 程序界面，该程序可实现声纳头以固定角度间隔进行

声纳脉冲信号收发、电机单独转动控制、脉冲单独收发控制、声纳脉冲信号发送结果反馈等功能。

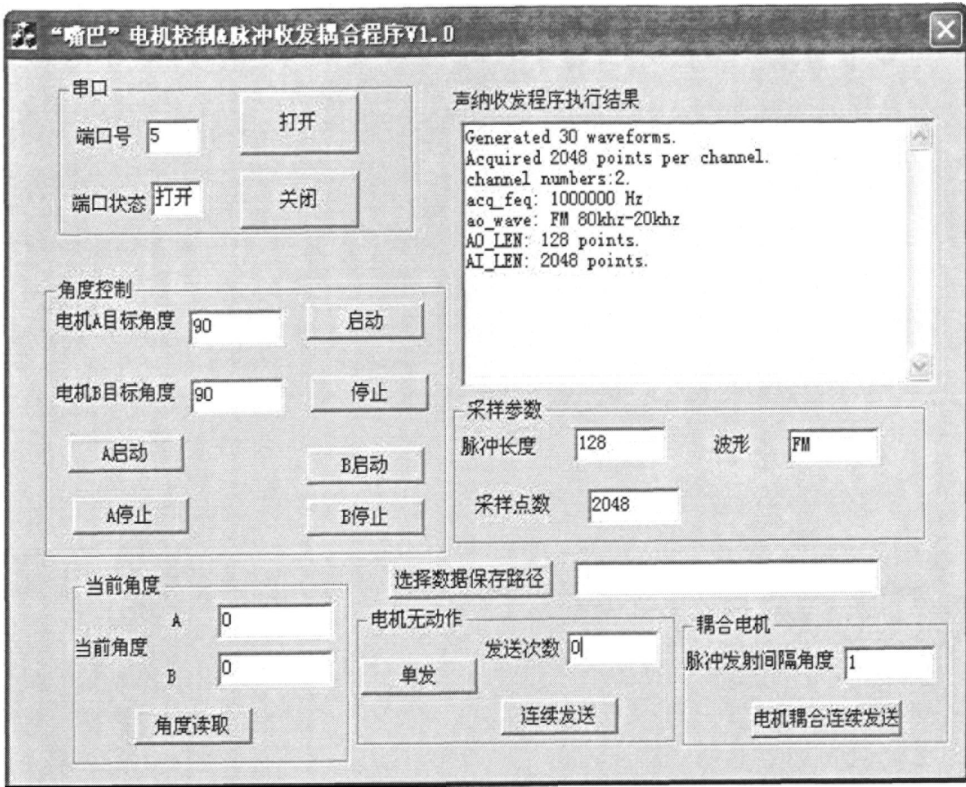


图 3.3.2 本文设计的“嘴巴”转动电机控制&脉冲收发控制程序界面

3.3.3 下位机软件实现

下位机 ATmega16 的程序设计采用模块化单元设计，这样可以使得程序拥有更好的可读性和移植性，程序更加简洁，占用的 Flash 存储空间更小。本文利用符合 ANSI 标准的 C 语言开发 AVR 单片机程序的工具来开发下位机程序。下位机程序主要包括串口通信单元和步进电机控制单元，二者之间传递的全局变量有两个转动电机的目标角度、当前角度、电机控制标志位。

1. 串口通信单元

ATmega16 通过内部集成的 USART 接口接收上位机发送的下行数据包，在下位机程序的初始化程序段中需要完成对 USART 接口模块的初始化工作，包括设置波特率为 9600、数据帧格式为 8 位数据位、无校验位、1 位停止位等初始化工作。为实时响应上位机指令，提高单片机程序执行效率，采用中断方式接收数据，当 USART 接口模块完成接收到一个完整的数据帧并将其存入接收缓存器后将产生数据接收完成中断申请，在接收完成中断服务程序中读取接收缓冲器中的数据。数据包接收完成后，判断是当前角度查询命令还是电机转动控制命令，若是查询命令则上传“嘴巴”当前角度数据包，若是电机转动控制命令则置 1 电机控制标志位启动“嘴巴”转动控制。

2. 步进电机控制单元

步进电机 24BYJ48 的步距角是 5.625，减速比是 1:64，0~120° 的角转动区间则对应 0~1365 个脉冲。在步进电机控制单元，需要由式 $n = \frac{\theta \cdot 64}{5.625}$ 分别求出目标角度和当前角度对应的脉冲数从而确定单片机需要输出的脉冲个数。

“嘴巴”转速由步进电机控制脉冲的频率决定，本文利用 ATmega16 的相互独立的两个 8 位定时器 Timer0 和 Timer2 的 CTC 模式控制步进电机控制脉冲的频率，具体为当计数器 TCNT0 和 TCNT2 值与寄存器 OCR0 和 OCR2 匹配时产生定时器比较匹配中断申请，在中断服务程序里输出电机驱动脉冲，从而可以通过设置寄存器 OCR0 和 OCR2 值达到脉冲周期控制。同样，通过程序中分别停止定时器，即可实现停止电机驱动脉冲输出，停止电机转动。下位机软件流程如图 3.3.3 所示。

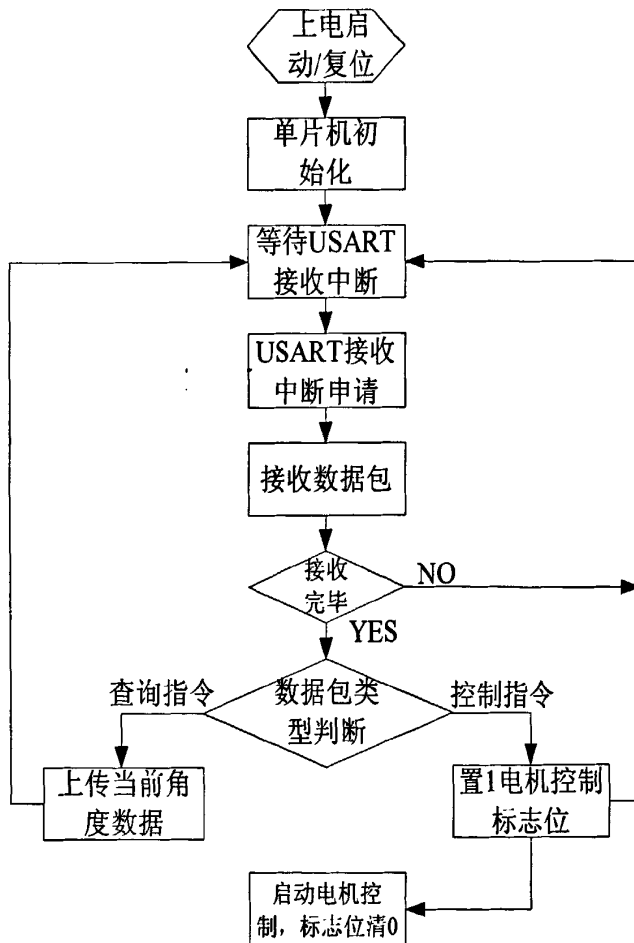


图 3.3.3 下位机软件流程图

3.4 本章小结

本章在上一章节的系统硬件设计的基础上进行了系统各模块的软件设计，包括确定

了系统使用的声纳脉冲信号的波形以及声纳脉冲信号的软件实现、基于 NI-DAQmx 的声纳脉冲信号收发程序设计、“嘴巴”转动控制的上位机和下位机软件设计，完成了基于移动平台的生物声纳系统的设计，在此基础上本文将展开仿生物声纳目标探测的探索性研究。在实际实验运用中，本文通过将不同软件模块根据任务需要进行集成来实现声纳脉冲收发和包括移动平台运动以及“嘴巴”转动相协调，来完成仿蝙蝠的生物声纳目标探测。

4 仿生生物声纳目标探测研究

4.1 仿生生物声纳目标探测策略

蝙蝠可以通过收发声纳脉冲定位环境目标来指引自己在黑暗的自然三维空间中飞翔,但是跟鸟类不同蝙蝠的飞行似乎显得“杂乱无章”。其实它们是在通过非常复杂的策略来控制自己的飞行,往往是提前 0.8~1.0 秒就规划自己的动作^[40]。在遇到可能的猎物或者感兴趣的自然环境目标时,蝙蝠通常在做出下一步动作前会绕着潜在目标盘旋并多次发射脉冲对目标展开探测^[41],因为一个随机的单一回波只能部分的或者说不能完全的反应被测目标的特征,为获得复杂目标的足够特征来做出定位和目标识别判断就需要结合自身的运动连续发射一系列的脉冲来获得多个回波,并且它们往往根据探测活动的不同选择不同长度、强度、波形的声纳脉冲波,且声纳脉冲发射频率也是随着探测意图变化着。

作为重要的感知手段之一,生物声纳系统的基本工作任务是探测与识别目标环境。为获得目标的足够特征信息实现目标的探测与识别,本节内容旨在通过模仿蝙蝠的这一习性,采用连续脉冲探测,设计可用于仿生生物声纳目标环境探测实验探测策略包括:扫描策略、脉冲波形、脉冲波持续时间和脉冲信号收发频率。

4.1.1 生物声纳目标探测扫描策略

像在超声波非接触探伤仪使用的扫描方式那样,超声波探测通常有以下三种扫描方式:

1. A-扫描: A-扫描是从空间上某一固定点发射一个超声波脉冲去探测物体,回波信号的幅值是传输时间的函数。在本文的仿生生物声纳目标探测中,每一次声纳脉冲收发即是一次 A-扫描。

2. B-扫描: B-扫描是换能器沿一条线运动的同时发射超声波脉冲去探测物体,它提供两个空间维度的信息——声纳脉冲的传播时间和换能器的空间位置,即通过 B-扫描能够获得反射面到换能器的距离和反射面在换能器运动方向上的坐标位置。大多数具有超声波回声定位探测能力的动物使用这种扫描方式,并且作为发射脉冲的“换能器”的它们本身往往不仅是沿直线运动的。

3. C-扫描: C-扫描是换能器以一定的方式在一个二维平面内运动的同时发射超声波脉冲探测物体,它能够提供探测对象的空间形状特征。

类似于 A-扫描、B-扫描、C-扫描,可应用于生物声纳目标环境扫描策略可以分成

以下几种模式：

1. 在一个固定点使用一个发射换能器进行回声探测，如 A-扫描或者自转扫描；
2. 在空间一条线上的一系列位置进行回声探测，如 B-扫描、圆周环绕扫描；
3. 在一个平面或者一个曲面上的系列位置进行回声探测，如 C-扫描、二维换能器阵列扫描；
4. 从分散在三维空间中的一系列位置进行回声探测，如蝙蝠的生物声纳探测行为。

除了第一种模式，其余的生物声纳探测策略可以用于空间静态分布的多换能器探测或者应用于移动平台的动态声纳探测。

4.1.2 应用于本文移动平台的探测策略

从仿生学角度考虑，一个可以在三维空间中自由飞行的飞行平台无疑是模仿蝙蝠进行连续脉冲探测及其探测策略的最佳选择，同样一个水下移动平台可以用来研究海豚的生物声纳探测机理。但是本文采用的室内地面移动平台只能像大多数轮式移动平台一样在二维平面上运动。它不能实现像蝙蝠那样从空间中的一系列位置对目标环境进行探测，它的控制手段和结构仅能做到沿地面的不同轨迹运动。除了移动平台的地面二维运动外，本文的声纳头“嘴巴”可以部分模仿蝙蝠头部运动实现上下左右两个自由度的转动从而能够做到对目标进行扇形扫描。因此本文需要设计若干适合于本文的移动平台运动和声纳头“嘴巴”运动的生物声纳目标探测策略以实现部分模拟蝙蝠的自然生物声纳探测策略来探索它们的目标环境探测机理。表 4.1.1 给出了本文在实验中设计的目标扫描策略，其中 S1、S2、S4、S5 实现示意图见图 4.1.1。

表 4.1.1 移动平台生物声纳目标扫描策略

| 序号 | 扫描策略名称 | 运动形式 |
|----|-----------|---|
| S1 | 平移扫描/B-扫描 | 移动平台沿探测对象旁边的一条直线运动，声纳头“嘴巴”固定，垂直扫描探测对象的一个侧面。 |
| S2 | 接近扫描 | 移动平台沿指向探测对象的直线运动，“嘴巴”固定，声纳头指向目标。 |
| S3 | 自转扫描 | 移动平台原地转动，“嘴巴”固定。 |
| S4 | “嘴巴”转动扫描 | “嘴巴”以两个自由度左右转动或者上下转动扫描探测对象。 |
| S5 | 圆周环绕扫描 | 移动平台环绕探测对象做圆周运动，“嘴巴”固定，声纳头指向目标。 |

这些扫描策略可以单独使用或者组合使用，具体采用哪种形式决定于探测任务目标和回波信号数据处理算法。同蝙蝠需要对目标多方位探测的缘由一样，在探测任务中，单个回波只能提供目标的比如相对于自身距离这样的部分特征信息，甚至在探测动态目标的位置时这种某个时刻的距离信息是远远不够的，所以为获得更多目标信息，连续的

收发脉冲对于本文的仿生生物声纳目标探测来说是必不可少的。在实验中脉冲信号收发和平台或声纳头“嘴巴”运动应该由上位机根据任务需要有机地结合在一起来获得更多的目标信息，以提高实验成功率。蝙蝠在捕食或者环境目标探测时，它们能够做到每秒钟发射 200 个脉冲，同时在不同的探测任务中比如捕食、避障等使用不同的脉冲发射频率。在飞行导航模式中，它们每秒发射 5 到 20 个脉冲用于距离在 8.5 米到 34 米之间的环境探测，如果出现猎物、障碍物这类目标，它们的脉冲发射频率会迅速提高到 50Hz 左右以获得潜在目标的更多信息。在本文的仿生目标探测策略中，生物声纳系统脉冲信号收发的频率可以达到 80Hz，这是目前本文设计的生物声纳系统在 Windows XP 环境下能做到的最高收发频率。在仿生目标探测实验中，本文往往采用恒定脉冲收发频率来简化回波信号处理过程。

在本节设计的各扫描策略中，平台和“嘴巴”运动的作用是为声纳头提供不同的探测位置以增加信号的维度，且均为低速运动，不考虑多普勒效应对扫描结果的影响。

如图 4.1.2 所示为图 4.1.1a S1 平移扫描策略中基于移动平台的生物声纳系统“右耳”采集到的示例室内目标环境的声纳回波信号序列，其中发射的声纳脉冲信号为持续时间为 256us 的 FMM 调频调幅波，脉冲信号的收规律是约每厘米收发一次共 100 次，对应的回波序号为 1~100，移动平台有效运动行程 1m（从开始发射脉冲到发射结束的行程），TOF 为声纳脉冲信号从发射到接收在空气中的传播时间。

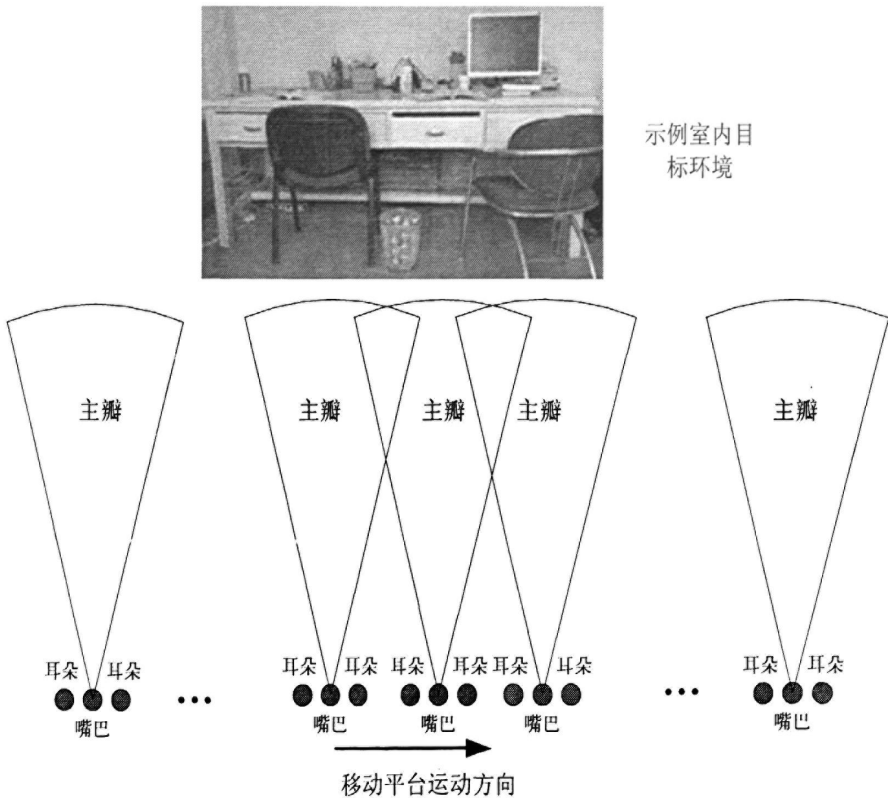


图 4.1.1a S1 平移扫描

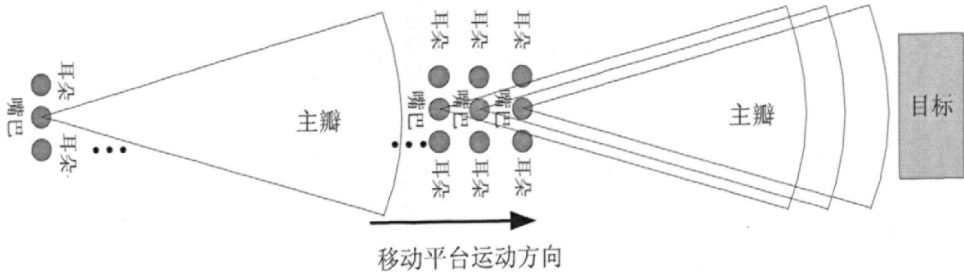


图 4.1.1b 接近扫描

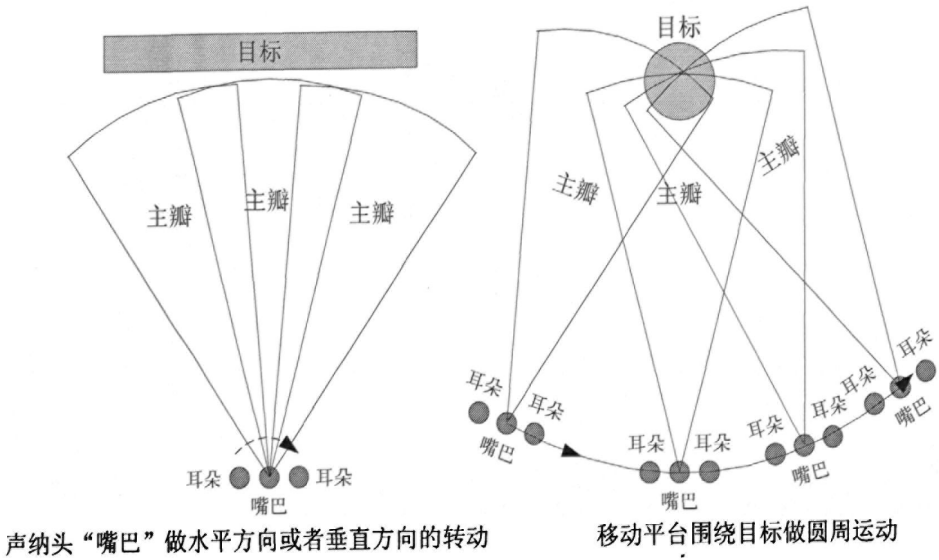


图 4.1.1c “嘴巴”转动扫描（左）和圆周环绕扫描（右）

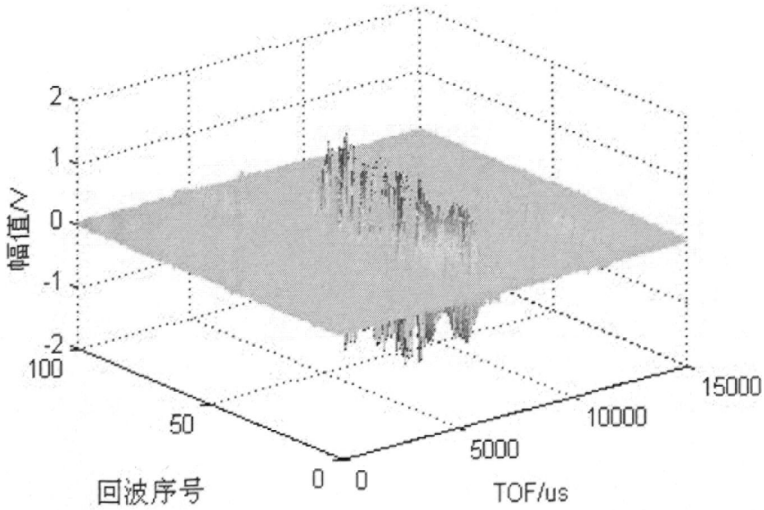


图 4.1.2 声纳头“右耳”采集到的室内日标环境声纳回波信号序列

4.2 仿听觉模型的回波信号预处理

生物学研究提出了一种动物听觉系统的计算模型,包括基底膜振动模型、毛细胞模型、神经纤维模型^[42],其中基底膜的振动模型的功能为带通滤波器,毛细胞模型用一个半波整流器和一个低通滤波器以模拟毛细胞的检测功能。为模拟蝙蝠听觉系统对回波信号的处理,本文根据该听觉模型使用如图 4.2.1 所示流程对“耳朵”采集到的回波信号作预处理。

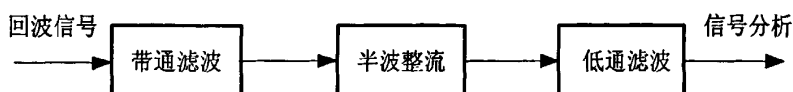


图 4.2.1 回波信号预处理

本文采用中心频率为 50KHz 的 Gammatone 滤波器来对系统“耳朵”采集到的声纳回波信号做带通滤波预处理。Gammatone 滤波器用一个因果的冲激响应函数来描述其滤波特性,该函数首先由 Johannesma^[43]提出并由 De Boer^[44]加以发展,最早用来描述猫的听觉神经的生理学冲激响应数据的特性,后来用以模拟人耳的听觉感知特性。Gammatone 滤波器这个名称来源于它的冲激响应包络线比较像统计学的 Gamma 分布。其时域冲激响应为^[45-49]:

$$g_i(t) = at^{n-1} \exp(-2\pi bt) \cos(2\pi f_c t + \varphi) u(t) \quad (4.2.1)$$

式中, $t > 0$, $n \geq 1$;

a 是滤波器增益;

n 是滤波器阶数;

f_c 是中心频率;

φ 是相位,在简化模型中取 0;

b 是衰减因子决定相应的滤波器带宽。

研究表明 4 阶的 Gammatone 滤波器已能够很好地模拟人耳基底膜的滤波特性,所以本文同样采用了 4 阶滤波器。 $b = 1.019 \text{ERB}(f_c)$, $\text{ERB}(f_i)$ 是等效矩形带宽 (Equivalent Rectangular Bandwidth), 可以由式 (4.2.2) 得出^[50]。

$$\text{ERB}(f_c) = 24.7 + 0.108 f_c \quad (4.2.2)$$

本文基于脉冲响应不变法编写程序对连续 Gammatone 冲激响应做离散化实现数字带通滤波器,其实现流程如图 4.2.2:

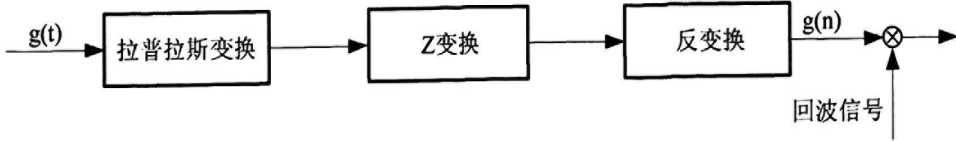


图 4.2.2 Gammatone 带通滤波的数字实现

回波信号经过 Gammatone 滤波器滤波后的信号，将做进一步的半波整流 $A_n = \max(A(t), 0)$ 和低通滤波处理得到回波信号幅值包络线，其反映了被探测目标表面结构中各个反射面反射强度的空间叠加效果。如图 4.2.3 是对图 4.1.2 中的室内目标环境声纳回波信号序列作预处理后的声纳回波图像。

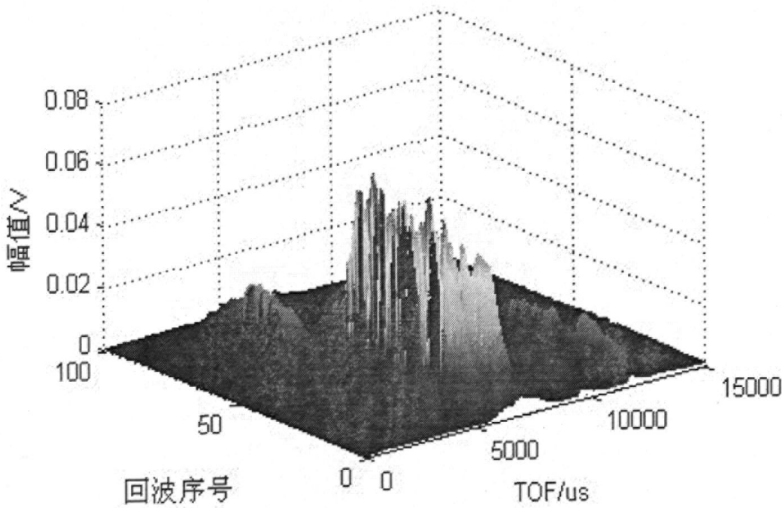


图 4.2.3 预处理后的室内目标环境声纳回波信号

4.3 水下移动目标仿生间接探测研究

生物学研究结果揭示在北京房山地区有一种叫做大足鼠耳蝠的蝙蝠能够利用它们的生物声纳系统探测到并捕食水中的鱼类^[51]。本部分内容将利用本文设计的基于移动平台的生物声纳系统来探索蝙蝠捕鱼的机理。

为成功抓到水下的鱼，大足鼠耳蝠需要确定鱼的位置，这类似于蝙蝠夜间飞行时对环境中各种物体的定位。由于超声波的反射特性，由空气入射到水面的声纳脉冲绝大多数将在水面被反射回来，所以生物声纳系统也无法采集到来自于水面下鱼本身的直接声纳回波信号，同时不同于其他的目标探测定位手段，生物声纳回声定位所能提供的目标信息严重依赖于探测方向和探测距离，在本文的实验中很难利用单独的一个回波信号去发现和定位鱼在水下的位置。所以一个能够实现发现在水下游动的鱼的间接声纳探测方法和一个合适可用的仿生探测策略及其定位算法，是影响本文生物声纳系统水下移动目标探测定位实验能否成功的关键因素。

4.3.1 间接探测方法和声纳探测策略

本文利用鱼在游动过程中在水面产生的扰动（图 4.3.1）来探测它们的位置，鱼什么时候会在水面制造扰动以及鱼在水面什么位置制造扰动均属于不可控因素，这无疑增加了生物声纳系统对鱼的探测实验成功的难度，所以在实验中本文需要采取多次重复实验来获得有效回波信号。

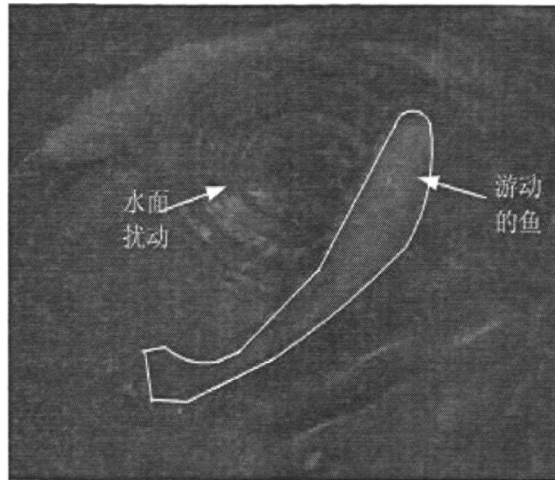


图 4.3.1 鱼游动时在水面产生的扰动

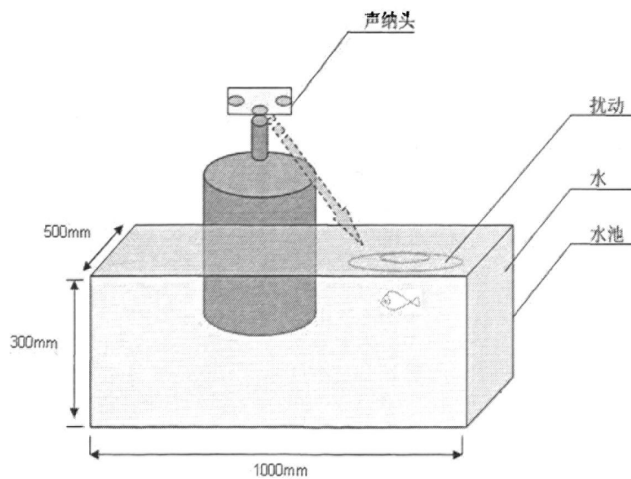


图 4.3.2 实验设置示意图

实验设置示意图如图 4.3.2，尺寸为 $1000 \times 500 \times 300 \text{mm}$ 的人工水池中有一条大约 50mm 的金鱼，声纳头指向水面。在本实验里使用简单的单边平移扫描，这对于本文的移动平台来说是方便可行的。当移动平台沿池边低速运动时，声纳头在水面以上 15mm 的高度以固定的时间间隔向水面发射持续时间为 256us 的 FMAA 调频调幅波脉冲信号，约每 10mm 对应一个回波信号，两个“耳朵”以 1MHz 的采样频率分别采集 10000 个数据点（对应探测距离为 1.7m）。采集到的回波信号被存储用于后续信号数据分析以定位

鱼制造的扰动，从而间接地确定鱼的位置。

4.3.2 双耳生物声纳回声定位模型

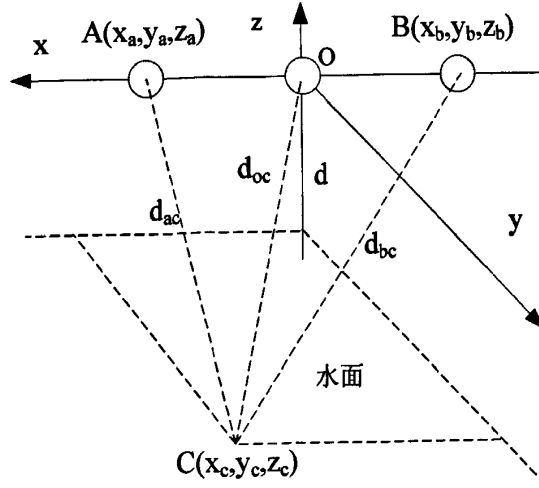


图 4.3.3 双耳回声定位计算模型

通过超声波在空气中的传播时间（TOF）来计算目标距换能器的距离是超声探测的常用手段，本文的双耳构型的生物声纳系统不仅能够获得目标的距离信息和它们相对于声纳头的角度信息，两只“耳朵”采集到的来自同一目标不同方向的回波信号可以用来做进一步信号特征差辨研究。本文用来定位水面扰动位置的双耳回声定位模型如图 4.3.3，其中 $Oxyz$ 是原点在声纳头上的移动坐标系， A 是右耳位置， B 是左耳位置， O 表示声纳头“嘴巴”， C 表示水面的扰动， d 是是声纳头到水面的距离在我们的实验中是个固定值。各点相互之间的位置关系可以表示为式 (4.3.1)：

$$\begin{cases} \sqrt{(x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2 + (z_c - z_a)^2} + \sqrt{x_c^2 + y_c^2 + z_c^2} = d_{oc} + d_{ac} \\ \sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2 + (z_c - z_b)^2} + \sqrt{x_c^2 + y_c^2 + z_c^2} = d_{oc} + d_{bc} \end{cases} \quad (4.3.1)$$

式中，脉冲信号传播距离 $d_{oc} + d_{ac}$ 和 $d_{oc} + d_{bc}$ 可以根据 $d_{oc} + d_{ac} = vt_{oca}$ 和 $d_{oc} + d_{bc} = vt_{ocb}$ 得到；

v 是超声波在空气中的传播速度（室温条件下为 340.4m/s）；

t_{oca} 和 t_{ocb} 分别为脉冲信号从发射后到两耳的传播时间。

再由 $y_a = y_b = z_a = z_b = 0, |z_c| = d$ ，我们可以得到

$$\begin{cases} x_c = \frac{v^2 t_{ocb}^2}{l} - \frac{t_{ocb}(v^2 t_{oca}^2 + v^2 t_{ocb}^2 - \frac{l^2}{2})}{l(t_{oca} + t_{ocb})} - \frac{l}{4} \\ y_c = \sqrt{\left(\frac{v^2 t_{oca}^2 + v^2 t_{ocb}^2 - \frac{l^2}{2}}{2v(t_{oca} + t_{ocb})} \right)^2 - \left(\frac{v t_{ocb}^2}{l} - \frac{t_{ocb}(v^2 t_{oca}^2 + v^2 t_{ocb}^2 - \frac{l^2}{2})}{l(t_{oca} + t_{ocb})} - \frac{l}{4} \right)^2} - d^2 \end{cases} \quad (4.3.2)$$

其中 l 是两耳之间的距离。

4.3.3 实验结果

一组生物声纳探鱼实验中左右耳采集到回波信号经信号预处理后得到声纳回波图像如图 4.3.4 所示，在平移扫描过程中本基于移动平台的生物声纳系统成功的捕捉到了金鱼在水中的游动轨迹。根据图 4.3.3 和式 (4.3.2)，可根据式(4.3.3)的误差传递函数得出在本文的实验中生物声纳系统对鱼的定位误差。

$$\begin{aligned} e(f) &= f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) - f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i^*} (x_i^* - x_i) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i^*} e(x_i^*) \end{aligned} \quad (4.3.3)$$

式中， $e(f)$ 表示绝对误差；

x_n^* 为各测量值， $n=1,2,3,\dots$ ；

x_n 为各测量值的平均值， $n=1,2,3,\dots$ ；

$e(x_i^*)$ 为各测量值的误差。

从而生物声纳系统对鱼的定位误差为：

$$e(x_c) = \frac{\partial x_c(t_{oca}, t_{ocb})}{\partial t_{oca}} e(t_{oca}) + \frac{\partial x_c(t_{oca}, t_{ocb})}{\partial t_{ocb}} e(t_{ocb}) \quad (4.3.4)$$

和

$$e(y_c) = \frac{\partial y_c(t_{oca}, t_{ocb})}{\partial t_{oca}} e(t_{oca}) + \frac{\partial y_c(t_{oca}, t_{ocb})}{\partial t_{ocb}} e(t_{ocb}) \quad (4.3.5)$$

根据声纳回波图像图 4.3.4，声纳脉冲从“嘴巴”发射出去经 P 点水面扰动反射回到两只“耳朵”的传播时间分别为 $1715 \pm 63 \mu s$ (左耳) 和 $1922 \pm 49 \mu s$ (右耳)。那么根据式 (4.3.4) 和式 (4.3.5) 可以得到在 P 点系统对鱼的定位误差为 $e(x_p) = \pm 7.3 \text{ cm}$ 以及 $e(y_p) = \pm 4.5 \text{ cm}$ 。

对于目前的实验结果而言，这样的误差水平使本文的仿生物声纳系统无法达到大足鼠耳蝠对鱼定位能力。根据对该类型蝙蝠在整个捕鱼过程的运动的研究，本文推测采取接近扫描，在发现目标后声纳头迅速从空中接近目标区域，会有有效的提高生物声纳系

统的定位精度，然而受限于现有实验条件，未能进行该扫描策略的实验。

为与鱼游动产生的水面扰动作比较，本文通过水下的一个防水电机转动在固定位置产生一个较大的水面扰动如图 4.3.5，多个回波信号中出现水面扰动信息，生物声纳系统无法确定电机位置，定位误差较大。当电机的转速降低以减小扰动，系统能够得到一个接近与鱼的探测实验中的定位效果。该现象说明在现有定位计算模型和实验设置下，当出现较大的水面扰动时生物声纳系统对水下目标的定位能力会明显降低。

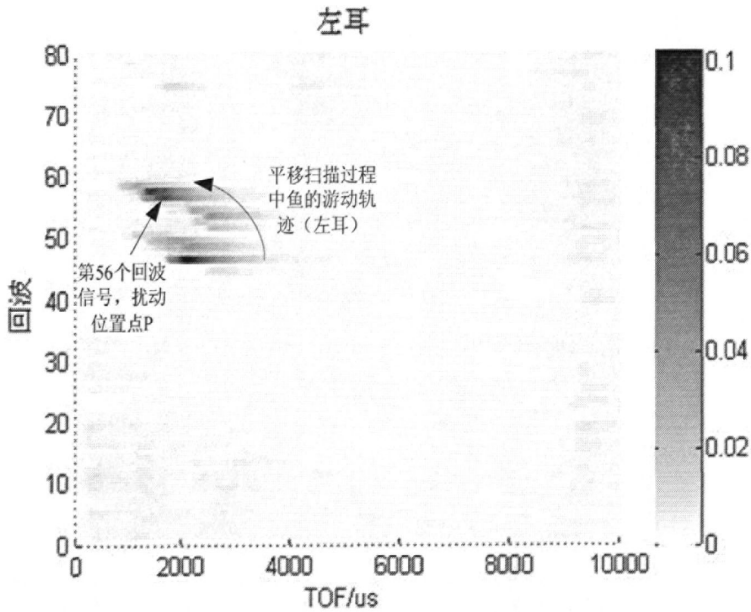


图 4.3.4a 经过回波信号预处理后的探鱼实验声纳回波图像（左耳）

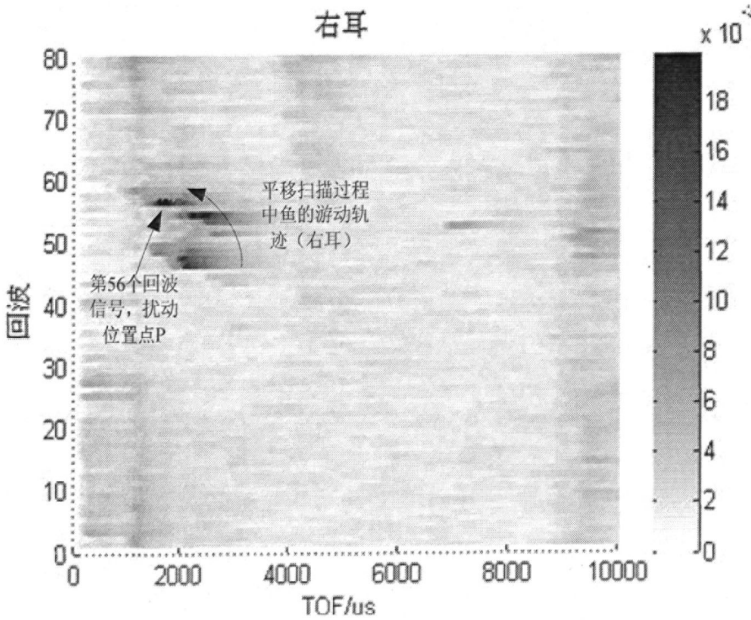


图 4.3.4b 经过回波信号预处理后的探鱼实验声纳回波图像（右耳）

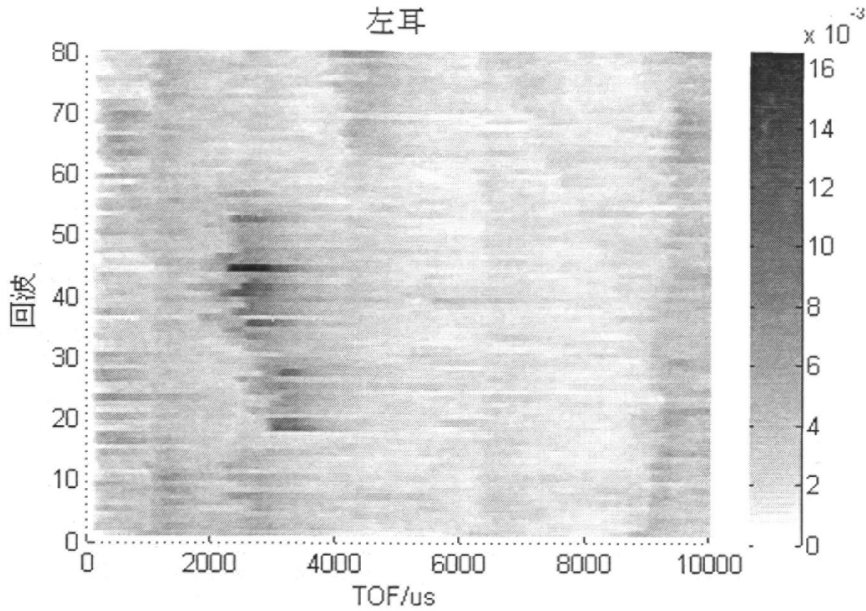


图 4.3.5a 经过回波信号预处理后电机制造的水面扰动探测声纳回波图像（左耳）

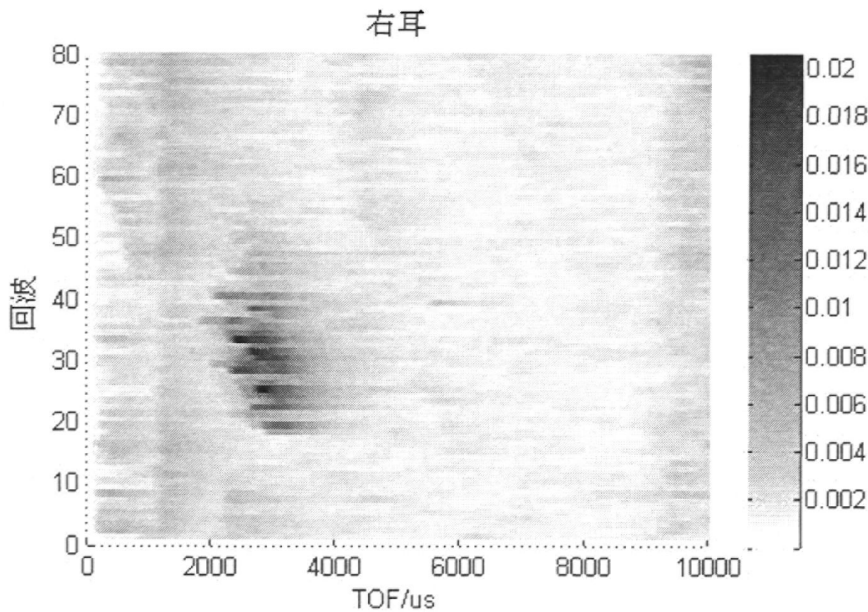


图 4.3.5b 经过回波信号预处理后电机制造的水面扰动探测声纳回波图像（右耳）

4.3.4 结论

该实验利用探测水面扰动来确定鱼的位置，并通过特定的扫描策略和定位模型探索了大足鼠耳蝠对水下游动的鱼的回声定位机理。实验结果表明在该间接定位方法下，利用现有的扫描策略和相应的算法可以实现对水下移动目标的定位，但是这些策略和算法均需要进一步改进，采用接近扫描和提高脉冲收发频率会产生更高的定位精度，因为这样更加接近蝙蝠捕鱼的过程。

4.4 仿生生物声纳系统目标识别研究

和图像、激光、红外、雷达等这些传感识别的手段一样，超声波也能够提供目标识别信息。其中 TOF 测距原理的一些超声波声纳系统已经能够做到识别平面、拐角、边界、圆柱等简单几何体。然而在实际环境中，目标（比如植物、复杂的室内场景）往往有着复杂的反射面和结构，这对受限于离散信息采集的生物声纳来说是个特殊的挑战^[52]。视觉能够提供空间可视区域中的所有反射面信息，但是作为感知机理完全不同的生物声纳系统因为自身物理特性的制约难以做到这点^[53]。其中一个制约因素是回波信号的低维度，生物声纳系统“耳朵”接收到的一维回波信号是空间中三维反射面反射回来的若干原始回波信号叠加在一起而来。其次是回波信息的不完整性，单一回波信号难以反映整个反射物体的反射面结构、材质等信息。当声纳脉冲入射到一个入射区域内的多反射面物体表面时，每个反射面都会产生回波信号，然而只用那些垂直反射产生的回波信号才拥有能够被“耳朵”接收到的强度。所以用单一回波来识别目标信息缺乏足够的鲁棒性。另外空间中回波信号因为之间的叠加会导致回波信号的失真。这些问题的存在都使得无法得到一个精确的模型用于生物声纳的目标环境匹配识别。

在该部分，本文模仿蝙蝠生物声纳机理，采用连续脉冲探测及特定的扫描策略来对若干具有复杂反射面的植物进行超声波声纳探测，移动平台的运动或者“嘴巴”的转动为声纳探测提供了另一个维度，“耳朵”接收到的顺序回波信号被保存用于后续数据处理，并且采用不同于 TOF 测距原理的在基于二维声纳回波图像目标匹配识别方法。

4.4.1 实验设置

如图 4.4.1 本文选取 (a) 广玉兰枝叶、(b) 桂花枝叶、(c) 紫叶小檗枝叶、(d) 松树枝叶这 4 种植物作为本文基于移动平台的生物声纳系统的 4 个探测对象，其中这四种植物枝叶有着大量的交错的反射面且反射面大小按照广玉兰、桂花、紫叶小檗、松树的次序递减，所有的探测对象均为静置状态，生物声纳系统采集不同的回波信号序列以作扫描对象匹配研究。

实验中生物声纳系统采用如图 4.1.1 中 S4 “嘴巴”转动扫描对这 4 种声纳扫描对象进行声纳脉冲探测，声纳头“嘴巴”在水平方向转动对扫描对象进行范围为 60 度的扇形扫描，距探测对象的距离为 0.4m，平均每 1.2 度进行一次声纳脉冲收发探测，整个扫描过程中使用 50 个回波。实验中生物声纳系统采用 FMAA 调频调幅脉冲波作为声纳脉冲探测信号。

图 4.4.2 所示为经回波信号预处理后的 4 种植物在这种扫描策略下左右耳分别采集到的回波信号，该数据为生物声纳系统采用持续时间为 128us 的 FMAA 声纳脉冲信号进行探测所得，图中 0-50 个回波为左耳采集到的回波信号，51-100 个回波为右耳采集

到回波信号。

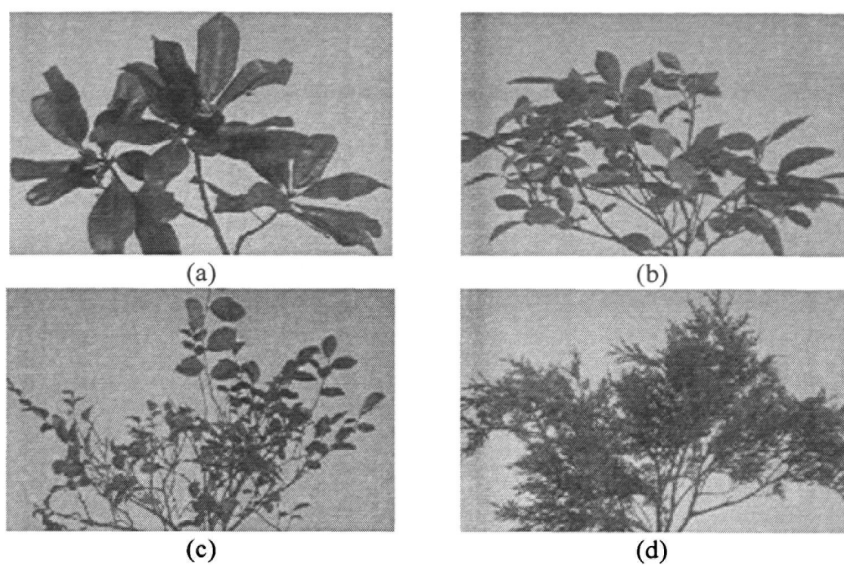


图 4.4.1 用于生物声纳系统探测目标匹配的四种植物枝叶

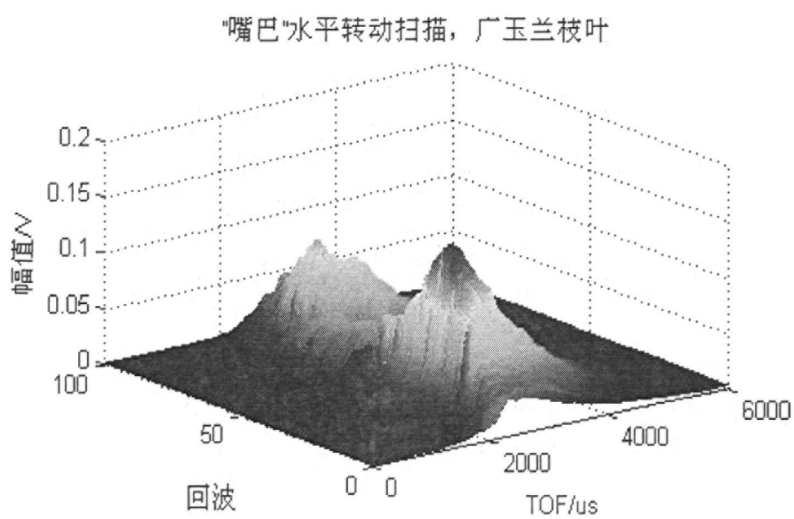


图 4.4.2a 广玉兰枝叶经信号预处理后的声纳回波图像

“嘴巴”水平转动扫描，桂花枝叶

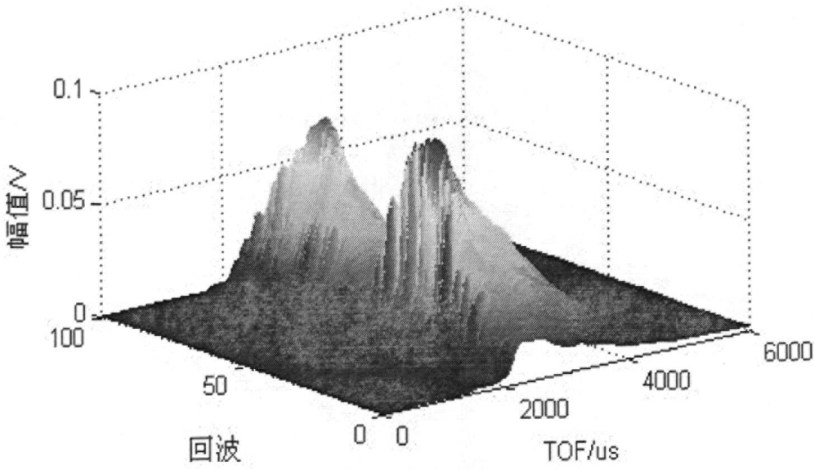


图 4.4.2b 桂花枝叶经信号预处理后的声纳回波图像

“嘴巴”水平转动扫描，紫叶小槲枝叶

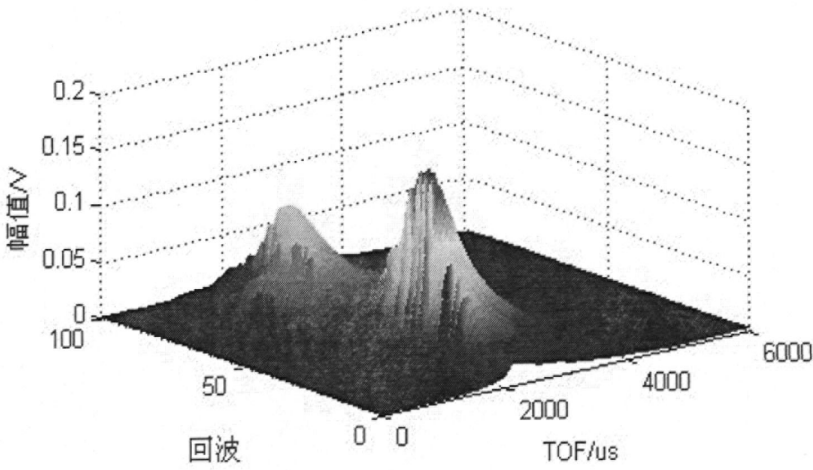


图 4.4.2c 紫叶小槲枝叶经信号预处理后的声纳回波图像

“嘴巴”水平转动扫描，松树枝叶

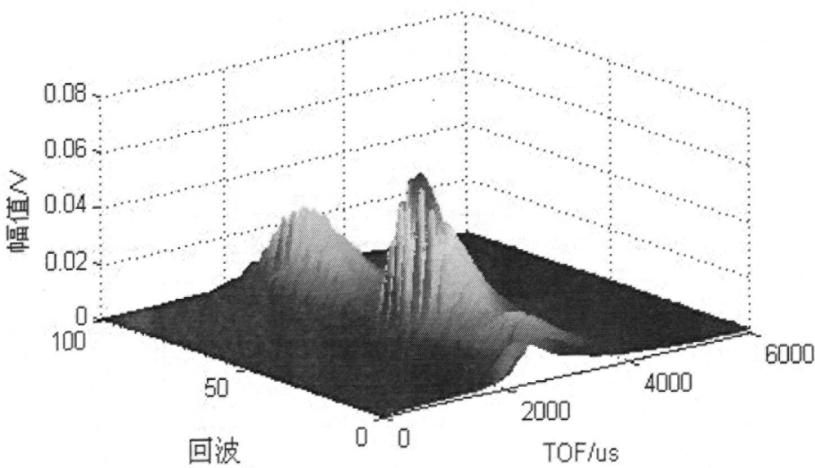


图 4.4.2d 松树枝叶经信号预处理后的声纳回波图像

4.4.2 基于二维声纳回波图像的生物声纳目标识别方法

本文利用目标的二维声纳回波图像来实现在特定的生物声纳探测策略下的目标匹配识别。在本文的4种植物目标的匹配识别实验中,具体表现为生物声纳系统把在不同探测策略下每种植物所对应的目标信号的回波声纳图像(例如图4.4.2中所示的128us声纳脉冲所对应的4种植物声纳回波图像)作为样本建立起系统在该探测策略下对这4种植物的认识(模仿蝙蝠的大脑记忆),生物声纳系统将在同一探测策略下扫描某个植物得到的待匹配声纳回波图像与模板库中的样本图像进行匹配并判断能否识别该目标。该部分的声纳回波图像均为利用4.2部分的仿听觉模型回波信号预处理手段对原始回波信号序列进行信号预处理得来。

在生物声纳基于二维声纳回波图像的目标匹配识别中,本文采用归一化互相关匹配算法(NC, Normalized Correlation)对待检测目标的声纳回波图像与模板库中的模板样本回波图像进行匹配。基于互相关的匹配算法被广泛应用于诸如目标识别、人脸识别、运动分析和工业检查等领域^[54-57]。在本文的生物声纳探测目标匹配识别中,通过计算模板声纳回波图像与待匹配目标的声纳回波图像之间的互相关系数值来判断模板样本和待匹配目标之间的相似程度,并且最大互相关系数值所对应的搜索窗口位置即为模板样本图像与待匹配目标声纳回波图像之间的最佳匹配位置。归一化互相关系数的定义如式(4.4.1)所示^[58]。

$$\begin{cases} r = \frac{\sum_{x,y} (f(x,y) - \bar{f}_{u,v})(t(x-u,y-v) - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{x,y} (f(x,y) - \bar{f}_{u,v})^2 \sum_{x,y} (t(x,y) - \bar{t})^2}} \\ \bar{f}_{u,v} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=u}^{u+N_x-1} \sum_{y=v}^{v+N_y-1} f(x,y) \end{cases} \quad (4.4.1)$$

式中, $r \in [-1, 1]$;

$t(x, y)$ 表示模板样本矩阵在 (x, y) 处的幅值;

$f(x, y)$ 表示待匹配矩阵在 (x, y) 处的幅值;

\bar{t} 表示模板样本矩阵的平均幅值;

$\bar{f}_{u,v}$ 表示 f 在 (u, v) 位置与模板样本矩阵相同大小区域的平均幅值。

4.4.3 实验结果

本文分别采集了持续时间为64us、128us、256us、512us、1024us的声纳脉冲所对应的4种植物的5组声纳回波图像作为样本,然后利用这五种声纳脉冲对桂花枝叶分别进行了10次扫描采集到5组共50个桂花的待匹配声纳回波图像。5种脉冲所对应的桂花待匹配声纳回波样本与相应的模板样本之间的相似程度(最大互相关系数)值如表4.4.1所示:

表 4.4.1a 脉冲持续时间 64us

| 序号 | 桂花 | 广玉兰 | 紫叶小檗 | 松枝 |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 0.9742 | 0.8630 | 0.8020 | 0.8408 |
| 2 | 0.9484 | 0.8405 | 0.7819 | 0.8213 |
| 3 | 0.9833 | 0.8638 | 0.7965 | 0.8285 |
| 4 | 0.9655 | 0.8370 | 0.8089 | 0.8459 |
| 5 | 0.9300 | 0.8234 | 0.7891 | 0.8233 |
| 6 | 0.9240 | 0.8353 | 0.7690 | 0.8019 |
| 7 | 0.9484 | 0.8641 | 0.8141 | 0.8450 |
| 8 | 0.9516 | 0.8655 | 0.7893 | 0.8255 |
| 9 | 0.9460 | 0.8253 | 0.7812 | 0.8251 |
| 10 | 0.9606 | 0.8662 | 0.7866 | 0.8247 |

表 4.4.1b 脉冲持续时间 128us

| 序号 | 桂花 | 广玉兰 | 紫叶小檗 | 松枝 |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 0.9533 | 0.8554 | 0.7928 | 0.8451 |
| 2 | 0.9491 | 0.8608 | 0.8078 | 0.8521 |
| 3 | 0.9368 | 0.8521 | 0.7977 | 0.8543 |
| 4 | 0.9598 | 0.8655 | 0.8041 | 0.8367 |
| 5 | 0.9314 | 0.8544 | 0.7883 | 0.8339 |
| 6 | 0.9493 | 0.8579 | 0.7944 | 0.8428 |
| 7 | 0.9600 | 0.8623 | 0.8003 | 0.8404 |
| 8 | 0.9261 | 0.8709 | 0.8167 | 0.8681 |
| 9 | 0.9385 | 0.8565 | 0.7814 | 0.8186 |
| 10 | 0.9346 | 0.8578 | 0.7963 | 0.8584 |

表 4.4.1c 脉冲持续时间 256us

| 序号 | 桂花 | 广玉兰 | 紫叶小檗 | 松枝 |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 0.9191 | 0.8564 | 0.8584 | 0.8380 |
| 2 | 0.8753 | 0.8332 | 0.8363 | 0.7977 |
| 3 | 0.9104 | 0.8497 | 0.8416 | 0.8474 |
| 4 | 0.9457 | 0.8737 | 0.8329 | 0.7735 |
| 5 | 0.8963 | 0.8039 | 0.8495 | 0.8111 |
| 6 | 0.8545 | 0.7952 | 0.8430 | 0.7782 |
| 7 | 0.8522 | 0.7814 | 0.8260 | 0.7814 |
| 8 | 0.9160 | 0.8052 | 0.8500 | 0.8112 |
| 9 | 0.8960 | 0.8075 | 0.8344 | 0.8141 |
| 10 | 0.9536 | 0.8238 | 0.8533 | 0.8563 |

表 4.4.1d 脉冲持续时间 512 us

| 序号 | 桂花 | 广玉兰 | 紫叶小檗 | 松枝 |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 0.8983 | 0.8535 | 0.8531 | 0.8406 |
| 2 | 0.9062 | 0.8393 | 0.8224 | 0.8171 |
| 3 | 0.9134 | 0.8375 | 0.8410 | 0.8180 |
| 4 | 0.9167 | 0.8424 | 0.8519 | 0.8382 |
| 5 | 0.9254 | 0.8435 | 0.8494 | 0.8404 |
| 6 | 0.9096 | 0.8322 | 0.8305 | 0.8052 |
| 7 | 0.9194 | 0.8556 | 0.8617 | 0.8578 |
| 8 | 0.9198 | 0.8515 | 0.8629 | 0.8583 |
| 9 | 0.8990 | 0.8613 | 0.8592 | 0.8587 |
| 10 | 0.9393 | 0.8436 | 0.8469 | 0.8490 |

表 4.4.1e 脉冲持续时间 1024us

| 序号 | 桂花 | 广玉兰 | 紫叶小檗 | 松枝 |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 0.8637 | 0.8486 | 0.8316 | 0.7695 |
| 2 | 0.8625 | 0.8492 | 0.8529 | 0.8268 |
| 3 | 0.8452 | 0.8296 | 0.8366 | 0.7955 |
| 4 | 0.8541 | 0.8431 | 0.8316 | 0.7863 |
| 5 | 0.8348 | 0.8333 | 0.8319 | 0.8029 |
| 6 | 0.8418 | 0.8474 | 0.8486 | 0.8349 |
| 7 | 0.8689 | 0.8379 | 0.8297 | 0.7923 |
| 8 | 0.8788 | 0.8337 | 0.8445 | 0.7971 |
| 9 | 0.8331 | 0.8243 | 0.8219 | 0.7884 |
| 10 | 0.8331 | 0.8406 | 0.8310 | 0.8112 |

从表 4.4.1 所示数据中可以看出本实验中, 在“嘴巴”水平转动扫描下采用 64us、64us、128us、256us、512us 的声纳脉冲波可以 100% 的成功实现桂花待匹配样本的匹配识别。而当使用 1024us 的声纳脉冲波时待匹配样本与 4 种模板样本之间的相似度区分程度不明显, 在第 6 组和第 10 组中出现识别失败。该实验结果在一定程度上解释了的蝙蝠捕食过程中不同声纳脉冲波的使用规律, 即在搜索期使用较长的声纳脉冲用于探索可能的目标, 在接近期和终止期发射频率越来越高, 发射出去的脉冲波也越来越短。在实验中, 本文也发现当对待匹配样本进行采样时, 如果声纳头与桂花之间的相对位置发生改变会识别成功率会迅速下降, 当相对位置变化较大时系统已不能完成目标识别。

4.4.5 结论

在“嘴巴”水平转动扫描策略下, 本文采用的基于二维声纳回波图像的生物声纳目标识别方法能够成功实现对桂花的识别, 验证了该方法在识别具有复杂反射面物体的有

效性。然而该扫描策略下，系统只实现对目标的一个侧面的识别，而蝙蝠是在它们的生物声纳目标识别中会在目标上空盘旋，从空间中多个方向对目标进行声纳探测来达到对目标的完整认识。如何解决声纳头探测位置对目标识别的影响，和使用更为复杂的探测策略及与该策略相对应的识别算法来识别物体是今后需要进一步展开的研究工作。

4.5 本章小结

本章利用在之前章节所设计制作完成的基于移动平台的生物声纳系统进行了仿生生物声纳目标探测实验研究。在 4.1 部分，结合对蝙蝠目标探测策略的模仿和现有硬件条件，设计了可用于本文基于移动平台的生物声纳系统的 5 种扫描策略包括：S1 平移扫描、S2 接近扫描、S3 自转扫描、S4 “嘴巴”转动扫描、S5 圆周环绕扫描。4.2 部分根据生物学动物听觉的计算模型采用了目的在模仿蝙蝠听觉系统的仿生回波信号预处理算法包括：Gammatone 带通滤波、半波整流、低通滤波三个部分。4.3 部分结合移动平台的平移运动（S1 平移扫描），利用间接水下目标定位方法和双耳目标定位模型对大足鼠耳蝠捕鱼机理展开了探索性研究，成功的捕捉到鱼游动的轨迹，并且根据声纳回波图像和误差传递函数得出了系统探鱼定位误差。4.4 部分采用归一化互相关算法对模板和待匹配样本的二维声纳回波图像进行相似度判断，并在采用 S4 “嘴巴”转动扇形扫描策略的实验中成功识别出了桂花枝叶。

5 总结和展望

5.1 总结

尽管其中的机理仍未被完全揭示,但在几千年的历史中诸如蝙蝠、海豚等拥有生物声纳系统的动物们能够利用它们特有的回声定位能力实现对目标环境“无视力介入”感知。为开展对空气中蝙蝠生物声纳目标探测功能研究以将仿生生物声纳技术应用于诸如机器人这类人工智能系统的目标探测识别领域,本文首先进行了仿蝙蝠的基于移动平台的生物声纳系统的软硬件设计,这部分的主要工作包括:

1. 根据实现模仿蝙蝠回声定位功能的要求,确定了生物声纳系统的组成。

2. 根据一路脉冲信号输出、两路回波信号采集的功能要求选择了 NI 公司的 PCI-6115 作为系统的数据采集卡以实现数字声纳脉冲信号及回波信号的模数转换,上位机模仿蝙蝠的大脑对采集到数字回波信号进行处理分析。

3. 进行了生物声纳系统的超声波换能器选型,选取了 Senscomp 公司的两款宽频响应性能优秀的超声波换能器 Senscomp7000 和 Senscomp600 作为系统的超声波换能器,设计了“嘴巴”和“耳朵”的信号调理电路,完成两个信号调理电路的原理图、PCB 图绘制和 PCB 电路板的元器件焊接制作。

4. 进行了系统电源模块的设计,设计了其原理图和 PCB 图并完成电路板的制作。

5. 确定了生物声纳采用的声纳脉冲波形,完成了声纳脉冲信号收发的程序设计,进行了脉冲信号收发测试。

6. 为提高系统的信噪比以采集到那些较为微弱的回波信号且减弱噪声对有效信号的干扰,进行了系统超声脉冲收发前端的信噪比改善工作,。

7. 完成了“嘴巴”两个自由度转动控制的设计,设计制作了用于控制“嘴巴”转动执行电机控制的控制器电路,并编写了单片机程序和上位机控制程序,实现了上位机根据生物声纳目标探测需要的“嘴巴”转动动作。

在完成整个基于移动平台的生物声纳系统的设计制作后,本文进行了仿生生物声纳系统的目标探测实验,开展了对仿生生物声纳目标探测的探索性研究,该部分主要工作包括:

1. 根据对蝙蝠回声定位中蝙蝠的生物声纳结合自身运动进行对目标多次探测这种探测策略的模仿并结合现有硬件条件,本文设计了 5 种可用于本文基于移动平台的生物声纳系统的目标声纳探测扫描策略。

2. 采用了基于模仿动物听觉模型的仿生回波信号预处理算法对系统采集到的回波信号做预处理, 包括 Gammatone 带通滤波、半波整流、低通滤波。

3. 开展了基于移动平台的生物声纳系统对水下移动的鱼目标的间接探测实验, 以探索大足鼠耳蝠的捕鱼机理, 实验中成功的捕捉到了鱼的部分游动轨迹, 并根据误差传递函数得出在现有的探测策略和算法下的定位误差。

4. 进行了仿生物声纳系统目标识别实验, 采用归一化互相关算法对模板和待匹配样本的二维声纳回波图像进行相似度判断, 成功的实现了对具有复杂反射面的植物的识别。

5.2 展望和改进

本文完成了基于移动平台的生物声纳系统的设计制作, 同时开展了仿生物声纳目标探测的探索性研究, 然而由于时间不足、设备条件的限制和水平有限, 本论文的还需要从以下几个方面继续展开研究:

1. 在目标识别研究中, 仅采用 S4 “嘴巴” 转动扫描一种扫描策略对目标的一个侧面进行探测, 获取的信息只是在该扫描探测策略下目标的部分结构特征信息, 在后续的工作中应采用多种扫描策略对目标的不同部分进行探测扫描以获取对目标更为完整的认知以建立一个完整的样本数据库。其次, 本文所采用的算法仅在时域上对声纳回波图像做互相关匹配判断, 而声纳回波信号中包含了时域和频域两个部分的特征, 对频域上回波信号的研究将是下一步的一个重要研究方向。

2. 本文的探测研究工作全部围绕实验展开, 受限于实验条件和时间限制, 一些关于生物声纳研究方面的想法难以实现, 需要选用适用于超声波探测的相关仿真软件以加快研究进度。

3. 选用更加适于生物声纳目标探测实验的运动平台, 以实现更加接近蝙蝠目标探测所采取的探测策略, 比如可做多自由度运动的机械手, 并且对生物声纳系统做便携化改进。

致 谢

至此论文完成之际，心中感触颇多，研究生这两年半的学习，不仅是知识的积累，更有思想与综合素质的提高，相比本科毕业时的懵懂，现在的自己对人生与未来有了清晰的规划，这里我衷心感谢在论文完成中以及学习、生活中对我关怀帮助的人们。

首先，要感谢我的导师王茂森副教授，他丰富的经验和渊博的学识极大地拓展了我的思维，和他的每一次交流都受益匪浅。他严谨的工作态度不断的感染着我，使我受到莫大的教诲和启迪、终身受益。此外，在生活上王老师也给予了我细致的关怀和帮助，同时他还教育我为人处事的道理和方法。对老师的感激非简单言语能够表达，唯有铭记他的教导，在将来的工作和生活中以王老师为榜样不断努力进取。

同时我要感谢戴劲松老师、杨军荣老师，他们在学习生活中给我提供了大量的帮助，相信没有他们的帮助，我会多走很多弯路。

感谢师兄苏晓鹏和孙宾，他们像兄长一样关怀帮助我，对我的论文完成、学习给予了很多宝贵的指导。

感谢课题组的同学王猛、宋永亮、涂淑荣、徐大健、张永涛、洪林、满晓飞、刘振，正是因为我们有这么一个和谐、温馨的集体，大家才会始终保持旺盛的学习热情。

特别感谢王猛同学，如果导师是照亮我远行的灯塔，那么他就是我身边的引路人，正是他的耐心帮助使得我能够高效地完成了论文以及平常的科研工作。

感谢我的舍友温都苏、屠国俊、罗卫祥，感谢他们对我在生活学习方方面面的支持们。

感谢我的父母、弟弟和吴珊，他们是最温暖的港湾，也是我不懈努力的动力来源，是他们的支持让我顺利完成学业，是他们的鼓励让我克服每一道难关。

最后感谢所有关心和帮助过我的老师、同学和朋友们，他们在我的生活、学习和研究中给予了我很多无私的关心和帮助！

参考文献

- [1] D. R. Griffin. Listening in the dark. Technical Report, Yale Univ., 1995
- [2] C. Moss, H.-U. Schnitzler. Behavioral studies of auditory information processing., New York, 1995, Working paper 87-143.
- [3] D. R. Griffin. Listening in the dark: Acoustic orientation of bats and men. Technical Report, 1986.
- [4] A. N. Popper, R. R. Fay. Hearing by bats. Technical Report, Springer New York, 1995
- [5] J. A. Simmons. Effect of acoustic clutter on prey detection by bats. Journal of Acoustics, 1989, 155-199.
- [6] J. A. Simmons, N. Neretti, N. Intrator, R. A. Altes, M. J. Ferragamo. Delay accuracy in bat sonar is related to the reciprocal of normalized echo bandwidth, or q . PNAS, March 2004, 101:3638-3643.
- [7] D. N. Lee, F. van der Weel, T. Hitchcock, E. Matejowsky, J. D. Pettigrew. Common principles of guidance by echolocation and vision. Journal of Comparative Physiology, 1992, 171:563-571.
- [8] J.-E. Grunwald, S. Schoernich, L. Wiegred. Classification of natural textures in echolocation. Proc Natl Acad Sci USA., 2004, 101-115.
- [9] S. Schmidt, S. Hanke, J. Pillat. The role of echolocation in the hunting of terrestrial prey- new evidence for an underestimated strategy in the gleaning bat. J Comp Physiol, 2000, 186:975-988.
- [10] M. B. Fenton. Eavesdropping on the echolocation and social calls of bats. Mammal Rev., 2003, 33(3): 193-204.
- [11] S. Gaioni, H. Riquimaroux, N. Suga. Biosonar behavior of mustached bats swung on a pendulum prior to cortical ablation. J Neurophysiol, 1990, 64(6):1801-1817.
- [12] G. Jones. Scaling of echolocation call parameters in bats. J Exp Biol, 1999, 202: 3359-3367.
- [13] M. Aytakin, E. Grassi, M. Sahota, C. F. Moss. The bat head-related transfer function reveals binaural cues for sound localization in azimuth and elevation. Acoustical Society of America, 2004, 43:3594-3605.
- [14] Z. Politis, P. J. P. Smith. Classification of textured surfaces for robot navigation using continuous transmission frequency-modulated sonar signatures. The International Journal of Robotics Research, 2001, 20: 107-128.

- [15] B. Barshan, A. S. Sekmen. Radius of curvature estimation and localization of targets using multiple sonar sensors. *Journal of Acoustical Society of America*, 1999, 105:2318-2331.
- [16] W. Gex, N. Campbell. Local free space mapping and path guidance. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1987, 424.
- [17] H. Akbarally, L. Kleeman. A sonar sensor for accurate 3d target localization and classification. *Proceedings ICTA, Nagoya*, 1995, 3003-3008.
- [18] Z. Politis, P. Probert. Target localization and identification using ctfm sonar imaging: the aurbit method. *Computational intelligence in robotics and automation*, 1999, 256-261.
- [19] 曾一民. 基于超声波的机器人避障和目标跟踪方法的研究. 电子科技大学硕士学位论文, 2005
- [20] J. L. Leonard, H. F. Durrant-Whyte. Mobile robot localization by tracking geometric beacons. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1991, 376-382.
- [21] V. Walker, H. Permans, Hallam. One tone, two ears, three dimensions: A robotic investigation of pinnae movements used by rhinolophid and hipposiderid bats. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1998, 104(1): 569-579.
- [22] 汤锋. 超声波近程探测理论及技术研究. 南京理工大学硕士学位论文, 2004.
- [23] 袁易全, 陈思忠. 近代超声原理. 南京: 南京大学出版社, 1996.
- [24] P. Weissenbacher, L. Wiegrebe. Classification of virtual objects in the echolocation bat, *Behav. Neurosci.*, 2003, 117: 833-839.
- [25] J. A. Simmons, C.F. Moss, M. Ferragamo. Convergence of temporal and spectral information into acoustic images of complex sonar targets perceived by the echolocating bat, *ptesicus fuscus*. *J. Comp. Physiol.*, 1990, 166: 449-470.
- [26] S. Schmidt. Evidence for a spectral basis of texture perception in bat sonar. *Nature*, 1988, 331: 617-619.
- [27] B. D. Stanley. A comparison of binaural ultrasonic sensing systems. Phd dissertation, University of Wollongong, 2003.
- [28] J. Wilson. Psychoacoustics of obstacle detection using ambient or self-generating noise. *Biology and Bionics*, 1967, 1:89-114.
- [29] N. Suga. Biosonar and neural computation in bats. *Scientific American*, 1990, 202:60-68.
- [30] H. U. Schnitzler, C. Moss, Denzinger. From spatial orientation to food acquisition in echolocating bats. *Trends Ecol Evol*, 2003, 18: 389-394.
- [31] 唐佳, 付子英, JEN PHILIP H.-S, 陈其才. 恒频-调频蝙蝠下丘神经元的恢复周期决

- 定声脉冲跟随率. 生物化学与生物物理进展, 2010, 37(7): 801-808.
- [32] K. Beedholm. Aspects of signals and signal processing in echolocating by fm-bats for target range. Phd dissertation, Naturwissenschaften der Fakultät für Biologie der Eberhard Karls Universität Tübingen, 2004.
- [33] J. Huopaniemi, L. Savioja, M. Karjalainen. Modeling of reflections and air absorption in acoustical spaces: a digital filter design approach. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 1997, 19-22.
- [34] D. Kish. Echolocation how humans can see without sight. Technical report, 1993.
- [35] 岳明道, 朱光. 电子电路中的噪声干扰及其抑制. 宿州学院学报, 2006, 21(1): 103-104.
- [36] 马潮. AVR 单片机嵌入式系统原理与应用实践. 北京: 北京理工大学出版社, 2011.
- [37] 赵杰, 郭亮, 臧希喆, 姜健, 蔡鹤皋. 应用于六足机器人平台的舵机控制器设计. 机械与电子, 2005, 9: 48-51.
- [38] C. Rice. Hearing by bats. Science, 1967, 156: 656-664.
- [39] 曹卫彬. C/C++串口通信典型应用实例编程实践. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [40] H. R. Erwin, W. Willard, F. Cynthia. A computational sensorimotor model of bat echolocation. Journal of Acoustical Society of America, 2001, 110(2): 1176-1187.
- [41] D. Helversen. Object recognition by echolocation: a nectar-feeding bat exploiting the flowers of a rain forest vine. J Comp Physiol, 2003, 189: 327-336.
- [42] Lyon. R. F. A computational model of filtering, detecting and comparison in the cochlea. Proc. ICASSP'82, 1982, 1285.
- [43] P. Johannesma. The pre-resonance stimulus ensemble of neurons in the cochlear nucleus. Symposium on Hearing Theory, 1972, 58-69.
- [44] E. De Boer. Synthetic whole-nerve action potentials for the cat. Acoust. Soc. Am, 1975, 58: 1030-1045.
- [45] Irino T, Patterson R. D. A time-domain, level-dependent auditory filter: The gammachirp. J. Acoust. Soc. Am, 1997, 101: 412-419.
- [46] 李世超, 王永琦, 吉立新, 马桂航. 基于听觉系统半波整流逆变化的语音恢复. 计算机工程与设计, 2007, 28(3): 3148-3150.
- [47] 王永琦. 基于听觉模型反演方法的语音信号的分析及其应用. 苏州大学硕士学位论文, 2003.
- [48] 谢秀琴. 基于时-频分析的歌声分离. 山东大学硕士学位论文, 2009.
- [49] 潘欣裕, 赵鹤鸣. Gammatone 与 Wiener 滤波联合语音增强研究. 计算机工程与应用, 2010, 46(26): 14-16, 52.

- [50] Glasberg B. R., Moore B. C. J. Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data. *Ar. Res.*, 1990, 47: 103-138.
- [51] 马杰, 张礼标, 梁冰, 沈钧贤, 张树义, JONES Gareth. 北京房山大足鼠耳蝠食鱼性及回声定位信号. *动物学研究*, 2003, 24(4): 256-268.
- [52] R. Muller. A computational theory for the classification of natural biosonar targets based on a spike code. *Comput Neural Syst*, 2003, 14: 595-612.
- [53] Maosen Wang. Natural Landmark Classification with a Biosonar based Mobile Robot. Phd dissertation, Naturwissenschaften der Fakultät für Biologie der Eberhard Karls Universität Tübingen, 2006.
- [54] 卜凡艳. 数字图像匹配技术研究. 合肥工业大学硕士学位论文, 2010.
- [55] 段怡安. 图像处理在人脸识别系统中的应用. 南京理工大学硕士学位论文, 2002.
- [56] 王红梅, 张科, 李言俊. 图像匹配研究进展. *计算机工程与应用*, 2004, 19: 42-44, 77.
- [57] 王宏力, 贾万波. 图像匹配算法研究综述. *计算机技术与应用进展*, 2008, 418-423.
- [58] K. Briechele, U. Hanebeck. Template matching using fast normalized cross correlation. *Proceedings of SPIE*, V. 4387, Optical Pattern Recognition XII, 2001, 95-102.