

海豚水声定位器

〔苏〕A.Γ. 格鲁勃柯夫 著

周 佩 芬 译

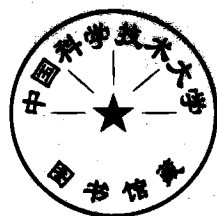
国防工业出版社



海豚水声定位器

〔苏〕 A.Γ.格鲁勃柯夫 著

周佩芬 译



国防工业出版社

内 容 提 要

海豚水声定位器是仿生学中最有意义的研究项目之一。它的分辨力、抗干扰性和适应性都比工程水声定位装置的相应特性更为优越。

本书是根据作者及其指导下的一组研究人员所取得的研究成果而编写的。书中介绍了海豚水声定位器的基本特性及其技术模型；对工程水声定位装置的最佳探测信号与海豚的实际信号进行了比较；并对海豚和其它海生物信号的记录系统的构成特点进行了分析。

本书可供对水声学、地球物理学、水下地质学、生物学和水下仿生学感兴趣的广大专业人员使用，同时对上述相应专业的研究生和大学高年级学生也有参考价值。

ГИДРОЛОКАТОР ДЕЛЬФИНА

А. Г. Голубков

Издательство «Судостроение» 1977

*

海豚水声定位器

〔苏〕 А. Г. 格鲁勃柯夫 著

周佩芬 译

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168¹/₃₂ 印张 3 72千字

1984年3月第一版 1984年3月第一次印刷 印数： 001—950册

统一书号：15034·2615 定价：0.40元

译者的话

近年来，海豚逐渐成为人们熟悉和喜爱的一种动物，关于它有许多有趣的报导：它是海上游泳冠军；它曾在险恶的航道上为船舶导航；它能帮助打捞水下物体，救护落水的妇女和幼儿；在水池中为人们表演精彩的杂技，传递信息等等。人们对海豚产生了浓厚的兴趣。

海豚为什么会有这些本领呢？这是因为，海豚是一种具有高度发达的中枢神经系统的哺乳动物，在自然界长期发展和不断进化的过程中，海豚生物器官的机能已达到相当完善的程度。其中，特别引人注目的是它的探测和定位能力。它对环境的适应性、抗干扰性以及它对目标的探测识别精度等都是现代工程水声定位装置所无法比拟的。科学工作者希望通过对海豚水声定位器的研究，以完善工程水声定位设备。

现代工程技术为仿生学的研究创造了有利的条件。本书就是作者及其助手在仿生学领域多年来研究成果的总结。书中介绍了世界各国的研究动态和成果，特别详细地介绍了海豚声信号的主要特性、海豚水声定位器的技术参数、信号记录系统以及模拟装置。除了对实验方法和仪器仪表进行了讨论以外，还列举了大量的实验数据，并给出明确的结论。

近两年，中国科学院水生生物研究所接收了几条在长江中下游捕获的白暨豚，并且成功地实现了人工喂养，业已开始从仿生学角度对白暨豚进行科学研究，也发表过几篇论文。但类似本书这样系统地介绍有关海生物仿生学的研究文献和书籍尚少见。我们希望，本书的出版对国内从事海生物仿生学研究的科学工作者和水声探测设备研制设计的工程技术人员有较大的参考价值，为促进我国仿生学研究的迅速开展做出一定的贡献。

由于专业水平所限，特别是缺乏仿生学方面的知识，译文定有不当之处，敬请读者批评指正。本书由李崇仁、傅金祝同志校对。

前 言

目前, 已经掌握大量关于海豚定位方面的实验数据和理论数据, 这对工程水声设备的发展有着重要的意义。但是, 与海生物仿生学有关的文献主要只介绍海生物的生物特性和物理特性, 而对在生物研究的基础上来改进工程技术系统的设计有意义的问题——仿生学的基本内容, 却报道得很少。

本书引用最新的海豚定位数据, 并与工程水声定位装置的定位数据进行了比较, 指出了利用海豚的水声定位特性以完善工程系统装置的可能性。

由于在电生理学方面获得的资料还比较少, 所以书中只对海豚水声定位器的主要外部特性进行了研究, 即把海豚看成是一个“黑盒”。

在绪论中, 概述了用海豚进行的仿生水声学研究。并多次提及利用多通道装置记录信号的实验方法。

第一章讨论了海豚探测信号的基本特性及其频率-时间特性。海豚信号与一般的水声定位信号有本质的区别, 这决定了它对记录系统的特殊要求。本章介绍了使均方误差为最小的幅频和相频特性之间相关的最佳解。分析了磁带记录器和示波器两种记录系统的组成方法。

根据解决定位任务的方式——探测参数或测量参数, 分析了定位信号分类的可能性。在一定的条件下, 即根据离散介质、噪声和水听器的性能, 对工作距离较近的工程水声定位装置的最佳信号作了计算。并在工程水声定位装置和海豚这种生物定位器的外部参数相同的条件下, 对最佳频率进行了计算。

第二章介绍海豚水声定位器的主要参数: 作用距离、灵敏度、能量参数、角分辨力和距离分辨力, 指出海豚水声定位器的抗干

扰性与不同的水声定位环境条件、所要解决的各种定位任务以及不同的目标相适应。另外，还指出海豚水声定位器具有高度的声一致性——同时由几条海豚来完成同一个探测任务。

第三章介绍海豚水声定位器的模拟问题。提出了对模拟条件和模拟装置的基本要求，而满足这些要求的关键是产生宽频带探测信号。本章还介绍了模拟电路以及几何形状简单的和复杂的目标之回波信号。从分类可能性的观点分析了最简单物标的模拟结果。

在结束语中给出了所获得的结果，指出进一步研究适应性、分类能力和抗干扰性方面的途径。

本书是根据作者及其助手在仿生学方面所取得的研究成果编写的。在准备和编写本书的过程中，得到主任工程师 А·П·阿波拉莫夫 (Абрамов) 和 В·П·格里戈列耶夫 (Григорьев) 的很大帮助。本文第二章第二节和第三节由 В·В·奥帕林 (Опарин) 编写，第三章第二节由 В·С·托卡列夫 (Токарев) 编写。

目 录

绪论	1
第一章 海豚探测信号的特性和记录系统的特点	10
第一节 海豚信号的基本特性	10
第二节 记录系统的特点	18
第三节 定位信号的分类	33
第四节 信号的适应性	36
第五节 最佳频率	41
第二章 海豚水声定位器的参数	46
第一节 作用距离	46
第二节 识别物标的能力	48
第三节 分辨力	55
第四节 抗干扰性	62
第三章 海豚水声定位器的模拟	69
第一节 模拟试验装置	69
第二节 模拟结果分析	76
结束语	82
附录	84
参考文献	86

绪 论

仿生学的重要任务之一，是研究在小尺寸、低功耗、长寿命等条件下能获得高灵敏度、最佳性、适应性、声一致性和可靠性的生物感觉器官和分析器官，并研究它们的结构原理和作用机理，据此以完善工程水声设备。对生物的回声定位器，尤其是对海豚水声定位器的研究成果是在这方面所取得的显著成绩。目前，已对十多种海豚和几种抹香鲸的回声定位能力进行过测定^[2,4,85]。

根据四十年代末所获得的首批试验结果^[67,72]已经知道，在能见度极低的条件下，海豚也能够发现各种不同的障碍物，在游动过程中可顺利地避开它们，并悄悄地找到水中的鱼类。无疑，这证明了海豚具有定位器官，且该器官是很完善的。业已获得有关海豚定位信号的特性（例如海豚定位信号的宽带特性）以及定位信号的发射方向等方面的基本数据。

在研究海豚水声定位器的初期，生理学家仅对问题的定性特点感兴趣^[87,89,70]。而研究和设计水声设备的工程技术人员，却对海豚水声定位器的定量特性以及定位信号的类别和定量参数感兴趣。在大多数情况下，研究人员对那些因测试仪器的频带限制、试验条件和方法的不完善所引起的生物信号的记录误差没有进行分析。曾经用声频记录仪器对信号做过多次记录^[89,70]，而根据目前所获得的数据来看，海豚信号频谱中包含有250~350千赫的频率部分^[8]，所以许多研究人员得出了一些不大可靠的定量数据和相互矛盾的结果。例如，有的研究人员测量所得的海豚发射波瓣图的宽度在 $12^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 范围内波动，而根据现在获得的数据，该宽度值约为 4° 。

使用窄频带装置有时不仅会引起定量误差，而且还会产生定性误差。在参考文献中曾报导过，利用上限频率（20~30千赫）

不同的记录设备记录下来的海豚信号波形具有不变性。由于海豚的回声定位信号是一些短脉冲，其频谱宽度可达250~300千赫，因此在试验过程中，记录装置的输出所提供的并不是海豚的信号，而是与试验条件的变化无关的记录系统的脉冲响应。

目前，对海豚水声定位器的研究工作基本上朝着两个方面发展：一个方面是对可保证定位装置各部件（例如，发射器、接收器等）有效工作的海豚水声定位器的组织结构和生理机理进行研究；另一个方面是对海豚进行整体研究。下面先对第一个方面所进行的研究工作举例说明之。

关于这方面的研究工作虽然发表了为数不少的文献（例如见〔2、18、37、43、60〕），但是关于海豚发声机理方面的报导却很少。按伊万斯（Evans）的话：“关于海豚的发声理论几乎还没有研究者。”海豚发声装置的研究方法，除了形态功能研究外，还包括借助固定在海豚头部的水听器对海豚的声场（特别是近场，菲涅耳区）进行分析^{〔43, 68〕}。这时要对在时域和频域内的信号的细微结构进行分析^{〔18, 34〕}。

关于确保海豚声发射方向性的物理过程方面的问题，虽然还未完全弄清，然而却做了大量的工作。为了获得定量特性，曾利用死海豚空心颅骨和颅骨标本作为反射器，对放置在活海豚鼻咽系统或颅骨部分的小型全向声发射器进行了直接测量^{〔42, 57〕}。这些试验结果正如以后在阿法林海豚（афалин）[●]和白海豚（бело-бочка）[●]的颅骨上所做的光学模型试验一样^{〔18〕}，说明了海豚头部无疑具有会聚能力，这与它的颅骨和气囊的声反射能力有关。用死海豚作实验所获得的波瓣图要比活海豚的宽一些。在这些实验中，由于实验方法存在不足之处，所以并未弄清软组织的作用以及活组织与死组织的不同声学特性。

最引人注目的部位是海豚软组织中的前额突出部，它是由特殊的脂肪组织、特定的中枢神经和肌肉组成的类似甜瓜状的突起。

● 一种普通的海豚，最长可达2.5米。

● 一种腹部和两侧呈白色的海豚，多见于黑海，最长可达3.9米。——译注

曾经提出这样的假设^[37]：前额突出部是一种特殊的声透镜，它可以会聚海豚发射的定位信号。在必要的情况下，海豚可以借助特殊的肌肉组织来改变该声透镜的曲率。从而改变波瓣图的宽度和信号的类型。解剖海豚头部得到的研究成果以及封闭相应肌肉的神经调节作用的生理实验结果^[54]对证实上述假设是有利的。

菲齐热拉德
(Фитцджеральд)

对前额突出部的特

性做过更详尽的分析。通过对海豚的解剖研究，发现前额突出部剖面的纵向长度的一大段（见图1的AB线段）呈对数螺旋线状。

通过对海水和构成前额突出部脂肪组织声学特性的分析，曾对海水与前额突出部边界上的声折射率做了计算。此外，曾发现来自对数螺旋线焦点（这里应是海豚声源的原点）的声音，它在对应于对数螺旋线形状的前额突出部的整个延伸区段上都会受到全内反射。而在前额突出部的端部（其形状不同于螺旋线，如图1中的虚线所示），声音可无阻碍地传到水中，形成方向向前的窄波束。

菲齐热拉德根据仿生学原理提出了新型声发射器和无线电定位天线，它们的形状与海豚的前额突出部完全一样。根据他的设想，这些天线应具有窄的指向特性，这样即可显示出波长小于前额突出部的那些频率的指向性。频率更低时，海水和前额突出部的分界面将不起明显的障碍作用，因而在此种情况下，前额突出部将不再具备会聚能力。根据菲齐热拉德的计算和实验数据，由定向工作制过渡到全向工作制的临界频率约等于30千赫。

在参考文献中所给出的有关不同频率条件下测量海豚波瓣图宽度的实验数据^[41]证实了菲齐热拉德的结论，但此问题尚未彻底解决。

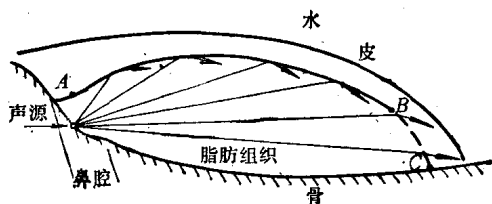


图1 海豚前额突出部剖面图

要想对海豚水声定位器获得深入的了解，要求人们对海豚分析器官的物理和生理机理的特性进行研究。

按照查普曼 (Chapman) 的意见，海豚采用基频法，可以根据反射信号的角度特性和频率特性构成对定位目标的完整概念。实验表明，采用基频法时海豚水声定位器在垂直面上的分辨力要比水平面上的分辨力差。然而，从很多试验中可以看到，海豚还是按垂直面上的角度分辨目标，然后侧转身，并对目标主动定位，以解决应完成的定位任务^[4]。观察到的这些现象证明了基频假设是成立的。

A·E·列茨尼克 (Резник) 提出了如下假设：海豚具有声学“眼睛”，使它可对周围情况进行“声观察”^[41]。前额突出部的脂肪块可看作是与水晶体类似的东西，它可将目标的声图象会聚在气囊壁上，然后再借助触觉器官(也可能借助其他感觉器官)读出。列茨尼克所进行的计算表明，此种触觉器官与海豚水声定位器的确定和非确定探测区域的实验数据是一致的。这一假设说明了海豚水声定位器具有很高的抗干扰能力，因为在声观察时，目标信号和干扰源信号会在象区的不同部位会聚。该假设还证实，大小不同的各种海豚都能快速而准确地发现海底的鱼类(海豚的声学眼睛的分辨力随着脂肪块的增大而提高)。但是，由于海豚的脂肪组织的声学参数是未知的，因此所做的计算精确度不高。

德雷埃尔 (Dreher) 通过研究提出关于海豚处理声信息的全息摄影特性的假设^[62]。这一假设的依据是：在海豚前额突出部的外表面有管状真皮乳突组成的格栅，它们的大小和间距约为 10^{-3} 厘米。

总结形态功能的研究工作可以指出：现阶段在这方面的研究积累了相当多的实验数据，对海豚水声定位器的部分机理作了某些假设，并建立了模型。然而，其中有许多内容尚无充分的论据。

下面介绍对海豚水声定位器进行整体研究方面的概况。在长期的进化发展过程中，海豚水声定位器的性能已达到最佳状态，

可用它作为模型，对工程技术系统进行模拟，因此测定某种或各种海豚水声定位器的参数是很有意义的。

研究海豚水声定位器时，广泛地采用“黑盒”控制论方法，只研究水声定位器的那些与其内部结构毫无关系的外部特征。这种方法不必对所有的定位生理问题进行研究就能获得各种海生物定位器的工作信息。

目前，研究海生物的水声定位装置的途径是对海生物进行有针对性的试验，记录它们的定位信号，通过对信号的处理来确定水声定位器的客观特性。

实验方法不仅应从生物学观点出发，而且也应从工程-物理学方面来考虑。从生物学观点出发，必须记住，海豚是具有高度发达的中枢神经系统的生物，这使它可以迅速地适应不同实验人员的不同工作方法、他们的手势、调换物标的方法以及将物标放入水中的某些特征等等。这是为避免试验结果失真所必须考虑的。此外，还必须记住，在自然条件下向海豚提出的问题与它实际解决的问题不尽相同的可能性、海豚的身体条件和心理状态以及训练海豚时所采用的方法之特点等^[50]。

从工程-物理学方面来看，首先考虑的应是进行试验的水池的类型。最初的研究是在室内水池（一般是混凝土结构的）进行的。但是，这种混凝土水池的混响级很高。大量的反射信号会使它们与待研究的信号之间发生干扰，并且使记录下来的信号波形发生畸变。此外，在这种条件下，海豚会改变自己的探测信号和行动——即产生所谓镜反射的现象。由于海豚信号是宽带的，并且由于水池尺寸的限制，要防止信号从水池的底部和池壁反射是很困难的，那要付出相当大的代价。常用的木桩-网状围栏试验水池的混响级最小。木桩-网状围栏是用木桩在水面上架起桥形支架，木桩之间拉着卡普隆网。围栏的深度足够大时，或在吸声效果良好的淤泥-沙质海底条件下，混响级可以忽略不计。

关于混响对海豚试验结果的影响，可根据研究海豚的双脉冲

的参考文献[62,67]来判断。在这两篇文献中,提出了产生回声定位信号的假设,同时也指出,海豚探测信号中的第二个脉冲,是海豚确定距目标距离的信息脉冲^[67]。对记录信号进行处理表明,所有的海豚不仅有单个信号,而且还有双信号。双脉冲信号的出现、脉冲间隔的变化以及双脉冲信号中每个脉冲的振幅和相位关系之间都是没有规律的,因此可以推测,双信号的产生是由于单个脉冲沿两条不同的声道抵达的结果,而不是记录水听器的配置位置所致。计算和实验结果证明了双脉冲的产生可能是由于水面影响的假设。

进行海豚实验时,正确地选用物标是很重要的。在研究海豚水声定位器的初期,这个问题没有得到应有的重视。物标的选用是任意的:鱼(活鱼和死鱼)、由不同材料制成的鱼模型、金属丝、箔片等等。这时,除了透明度以外,一般对物标的声特性不进行研究。这样,在比较由不同的研究人员所获得的结果时,产生了很大的困难,有时甚至会产生错误。而只根据物标的声特性有目的地探索海豚在识别物标时所用的回波信号的信息特性是可能的。目前,用来作为物标使用得最多的是球和圆柱体,因为它们的声学特性可得到精确的计算,且其对称轴是无限的,因此,反射信号与物标相对海豚的旋转角之间并无任何关系。

下面将讨论参考文献[12]中所介绍的一种利用海豚进行试验的方法。

试验的目的是研究

海豚识别由不同材料制成的大小不一的物标的能力。

为了尽可能精确地获得探测信号的特性,在近岸水域设置的水深为5~8米的木桩-网状围栏内,用海豚进行了试验。围栏水域的底部是吸声效果良好的淤泥和沙土。图2为试验实施图。

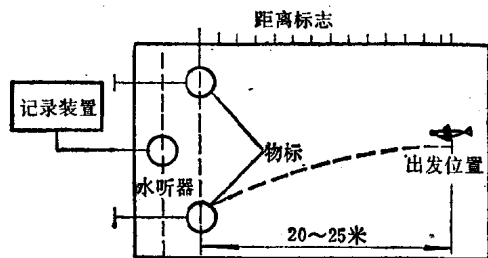


图2 识别各种物标的试验示意图

物标从围栏的一端随机地放入水中，海豚的出发位置在围栏的另一端，距物标 20 米。水听器悬置在物标的一侧，距物标 1 米。

试验采用投给食物以形成运动条件反射的方法。条件刺激是用特制的发生器（呼叫信号发生器）向水中发射频率为 5 ~ 6 千赫、持续时间为 1 ~ 3 秒的信号。根据此信号，海豚开始向物标游动。在训练过程中，将一个物标作为肯定物标，让海豚学习推动此物标或控制杆，完成任务就喂它鱼。过 2 ~ 3 秒后，海豚海回出发位置。

若海豚未能正确地完成任务回到出发位置，就不喂鱼。训练结束后，再向海豚出示否定物标，通常，这时海豚在出发位置甚至连一动也不动。

海豚从出发点开始游动时，就不断地发射超声波脉冲，水听器接收该脉冲后，传输给记录装置。距离标志沿围栏固定，实验人员可借助标志发生器，在海豚通过某个设定标志（例如，5 米、3 米和 1 米）的瞬间，将距离标志信号发送给记录装置。

试验还采用了其它的形式。用网将围栏分开，第一个物标在网的一边，而第二个物标在网的另一边，即分成两条通道。网的长度可由实验人员调节。海豚从出发点开始游动时就应该紧张地对物标定位，以正确地选择区分网的通道。水听器设置在区分网端。

应特别指出的是电子记录装置。在参考文献[43]中，详细地介绍了为揭示海豚水声定位器的生理机理所采用的各种设备的特点，还介绍了在海豚发射近场研究海豚水声定位器外部特性所用的记录装置。因此，本书将从仿生学研究的角度的，只讨论在远场记录海豚发射的脉冲信号所用的装置。根据海豚信号的不同类型，记录系统的仪器应有特殊的（例如，与工程定位设备记录系统的频率特性不同的）频率特性。

与现有的工程系统相比，海豚水声定位器具有许多与其生物特性相关的特点：

1. 由于海豚从出发位置向物标游动的轨迹是不同的，所以海

豚及其头部相对物标和接收水听器的位置在发射不同的探测脉冲信号的瞬间也是各不相同的，并且是随机变化的。记录装置中必须采用全向水听器的原因就在于此。另外，海豚水声定位器具有明显的指向性，在水中传播的信号波长与发射器的尺寸是可以相比拟的。为了获得无失真信号，就必须有多路记录系统，并且还必须在与海豚游动方向互相垂直的平面上设置单独通道的水听器^[12]。在寻求物标反射信号的信息参数时，也需要多路记录。

2. 海豚的定位信号是随机发射的，不受实验人员的控制。由于海豚水声定位器的孔隙度大，因此在利用慢动作装置记录和分析单个脉冲时会造成极大的困难，因为这些装置（例如照相机、示波器和频谱分析仪等）一般都是在等待状态下进行工作的。要启动这些装置需要同步脉冲（该同步脉冲在时间上要比待分析的信号超前）和专用的同步装置（其输出端的信号应出现在信号进入分析装置的输入端之前^[42]）。

3. 海豚发射的信号是宽频带的。根据目前所掌握的数据，海豚信号的瞬时频率可达 100 千赫，因而记录装置的通频带应不低于 250~300 千赫^[21, 48]。

记录装置应能确保对接收信号的记录以及事后重放。目前，大都采用模拟式记录装置，而不用数字式记录装置。对宽频带信号进行数字记录时，要求频率指示（到 500 千赫）和模数转换高速工作，而对信号的宽动态范围则要求多级模数转换。这就使记录装置变得复杂而昂贵。

在模拟记录时，主要的问题是选用终端装置。磁带记录可不间断地记录所有的信号，并且在重放时，可通过改变磁带的拖动速度，对记录的信号实现频率-时间转换。然而，目前的超声磁带记录器的通频带（约为 100~200 千赫）尚不能保证记录的信号失真不大。

用示波器、照相机或电影摄影机记录信号时，原则上对记录系统的通频带是没有限制的，因为记录频带可达 300 千赫。然而，使用示波器和电影摄影机记录信号时，由于摄影机不停地工作将

会消耗大量的超高灵敏度的电影胶卷，同时还不能排除示波器光点回扫过程中信号的丢失。此外，在等待状态可进行单张拍摄的照相机快门动作较慢(几赫或更低)，因此，大部分信号将不能被记录下来。在等待状态记录信号时，也会丢失与重复频率和信号变化有关的信息。以光学形式记录的信号进行二次处理时还会有某些限制，这对于用电子仪器(频谱分析仪等)进行分析的工作会带来困难，但却便于将信息传输给数字计算机。

可以根据各种具体情况来选择记录用的终端装置，有时甚至可同时采用两种记录方法。