

特邀综述

齿鲸生物声呐发射特性与波束调控研究*

宋忠长¹⁾ 张宇^{1)†} 魏翀²⁾ 杨武夷¹⁾ 徐晓辉¹⁾

1) (厦门大学海洋与地球学院, 水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 厦门 361005)

2) (Centre for Marine Science and Technology, Curtin University, GPO Box U1987, Perth WA 6845, Australia)

(2020年3月17日收到; 2020年5月4日收到修改稿)

齿鲸生物经过长期自然选择, 进化出小巧、灵敏、高效的声呐系统. 齿鲸生物声呐研究涉及海洋物理、声学、生物学、仿生学和信息学等学科, 对于生物仿生、水声声呐、信号处理、水下探测与通信等领域具有参考价值. 本文从声呐系统解剖结构、声呐信号与声呐波束调控三方面出发介绍齿鲸声呐发射系统. 首先, 介绍如何利用计算机断层扫描成像与超声测量技术重建齿鲸声呐发射系统的高精度三维结构, 获取其声速、密度分布, 为声呐系统的功能研究建立基础. 随后, 探究声呐系统发出的声信号的特性, 研究声信号与生物行为之间的联系. 最后, 参考齿鲸生物声呐解剖结构与声呐信号特性建立数值模型研究声发射系统的气质结构、软组织结构和骨质结构组成的声学多相介质对声波传播的控制作用. 齿鲸生物能利用其声呐信号的多样性与声呐发射系统结构的复杂特性动态调整声波传播与波束形成. 探究齿鲸生物声呐工作原理能加深对生物多相介质中的声传播过程的理解, 有望为水下仿生声探测与感知技术的发展提供新思路.

关键词: 齿鲸, 回声定位, 生物声呐, 发声物理机理

PACS: 43.80.Ka

DOI: 10.7498/aps.69.20200406

1 引言

迄今为止, 人类对自然界回声定位系统的研究主要集中在蝙蝠和齿鲸生物^[1,2]. 科学家们发现蝙蝠可以在黑暗的房间内自由飞行、躲避障碍物的现象, 进而提出了回声定位理论^[2]. 无独有偶, 研究人员发现海豚也能在漆黑的条件下自由游动, 轻松躲避渔网的捕捉^[3-5], 同时会发出超声波信号, 并由此提出海豚具有回声定位能力的猜想^[6-8]. 实验证明海豚能依靠其回声定位能力在水下迷宫中寻找与分辨目标, 并能动态调整回声定位声信号完成实验任务^[9]. 海豚在探测中发出的回声定位信号在水平和垂直截面会形成指向性声波波束^[10-13], 帮助海豚探测百米范围外厘米尺度的目标物体, 并对不同材质的目标做出准确辨别^[1,11]. 海豚属于齿鲸亚

目下的海豚科. 与海豚科类似, 齿鲸亚目下的其他科生物也具有回声定位能力, 能够自适应调节其生物声呐系统, 在复杂的水下环境实现目标探测. 齿鲸生物声呐的强大功能在过去半个世纪引发大量研究, 已成为国际生物声学领域的热门课题.

齿鲸均能发出声信号进行回声定位^[1,2,14-21]. 在齿鲸的发声机制研究中, 科学家们曾提出猜想: 喉咙驱动振动产生哨叫声 (whistles)、鼻道系统以及相关气道系统之间协同作用产生脉冲声 (pulses)^[22]. 文献^[23, 24]提出鼻道系统系声源所在处, 鼻道以及相应的气囊结构在发声过程起着重要作用. Cranford等^[25]利用计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 研究齿鲸生物, 发现齿鲸头部前额有四个脂肪组织体嵌入在鼻道通气孔壁上, 并推测这些脂肪组织体以及相连接的唇状物是发声声源. 这些脂肪组织体被称作背滑囊, 与

* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFC1407504) 和国家自然科学基金 (批准号: 41676023, 41276040) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yuzhang@xmu.edu.cn



张宇, 厦门大学特聘教授, 博导. 1996—2000年, 就读于南京大学声学研究所, 获理学博士学位. 2000—2009年, 先后在美国西北大学 (Northwestern University) 和威斯康星大学麦迪逊分校 (University of Wisconsin-Madison) 从事科研. 2017—2019年在麻省理工学院 (MIT) 做高级访问学者. 研究领域聚焦于生物声呐、仿生声学等方向, 已发表SCI论文103篇, 其中在声学领域国际权威期刊 *J. Acoust. Soc. Am.* 上以第一作者或者通信作者发表26篇研究论文, 发表论文的高影响期刊还包括 *Nat. Sci. Rev.*, *Phys. Rev. Appl.*, *Appl. Phys. Lett.* 等. 担任 *Phys. Rev. Lett.*, *J. Acoust. Soc. Am.* 等多本国际学术期刊的专业审稿人. 学术兼职包括中国海洋学会海洋物理分会理事会理事, 中国海洋发展研究会应用海洋学专业委员会副理事长, 《应用海洋学学报》编委委员等. 主持国家自然科学基金、国家重点研发计划等项目, 荣获福建省引进高层次人才、全国高等学校创业教育工作先进个人等称号.

唇状物形成声唇. 声唇的韧带起支撑作用, 并且可以调整声唇形状^[14]. 文献^[25—27]基于对齿鲸回声定位的脉冲频率、强度以及脉冲间隔的分析, 提出齿鲸发声机制应当是气流通过某个发声部位产生声波. Cranford等^[25,26]利用CT扫描和核磁共振 (magnetic resonance imaging, MRI) 技术研究了齿鲸亚目19个种类的40多个样本, 细致描述了发声系统的各个结构. 基于所研究的齿鲸发声系统的结构相似性, Cranford等提出了气动致声模型, 并将该发声机制推广到所有齿鲸生物.

齿鲸声发射过程与前额系统中的气质结构 (鼻道气腔、气囊等)、软组织 (额隆、结缔组织、肌肉组织等) 以及骨质结构 (上颌骨、头骨等) 的作用是密不可分的. 这些声学结构的形态、尺寸以及物理参数 (声速、密度) 的变化均能调控声传播与声波波束^[28—31]. 此外, 齿鲸还能通过变换声信号的频率、调节额隆和气囊的尺寸、形状等方式调控声波波束^[32]. 2015年, Wisniewska等^[33]研究发现鼠海豚在探测目标的过程中能改变前额组织的形状来调控波束. 实验测量虽能有效揭示了齿鲸声波波束在头部外围空间的指向性, 但难以深入头部内部探究声传播规律. 数值模型则能直观地显示声波在齿鲸头部内部的传播过程, 并探究各个声学结构在声波传播过程中以及波束的形成中的调控作用. Aroyan等^[28]在1992年建立的真海豚 (*delphinus delphis*) 模型研究表明上颌骨和鼻道、气囊组成的气质结构对声波的反射作用明显, 使声波能量往前

集中, 而额隆软组织的作用相对较弱. Cranford等^[29]的模型研究表明海豚的头骨、鼻道和相应的气道系统以及结缔组织等软组织在头部声传播中均发挥一定作用. 本文从生物解剖学、回声定位声信号与数值模型角度出发介绍齿鲸生物的三维声学结构、生物组织的梯度材料特性、生物声呐信号特性、声发射特性与调控机理研究, 从多方面探讨齿鲸生物声发射过程. 研究齿鲸声发射物理机理与其生物组织多相介质的声学传输效应, 对研究齿鲸声发射物理机理、设计新型声功能材料等具有积极意义.

2 齿鲸生物声呐声发射系统的三维重建

2.1 生物声呐声发射系统结构组成

齿鲸声发射系统由物理特性各异的声学结构组合形成. 齿鲸生物声呐系统位于头部, 发声系统的各个结构位于前额. 齿鲸生物之间虽大小尺寸各异, 但发射系统结构组成相似^[25]. 东亚江豚 (narrow-ridged finless porpoise, *Neophocaena sunameri*)、小抹香鲸 (pygmy sperm whale, *Kogia breviceps*)、以及中华白海豚 (Indo-Pacific humpback dolphin, *Sousa chinensis*) 的头部三维重建 (图1) 表明不同齿鲸生物的头部形态各异. 东亚江豚与小抹香鲸无明显的喙部吻突, 而中华白海豚的喙部吻突明显. 结构的差异性相应地会影响声波波束.



图1 (a) 东亚江豚头部的三维重建; (b) 小抹香鲸头部的三维重建; (c) 中华白海豚头部的三维重建

Fig. 1. (a) Three-dimensional reconstruction of a finless porpoise head; (b) three-dimensional reconstruction of a pygmy sperm whale head; (c) three-dimensional reconstruction of an Indo-Pacific humpback dolphin.

三种齿鲸声发射系统的结构 (图2) 表明骨质结构的密度高, 能较完整地进行重建, 而软组织与气道系统的重建与样本状态息息相关. 脂肪组织、结缔组织和肌肉组织的声速、密度呈现梯度分布, 形成由内到外的层化结构. 东亚江豚和中华白海豚

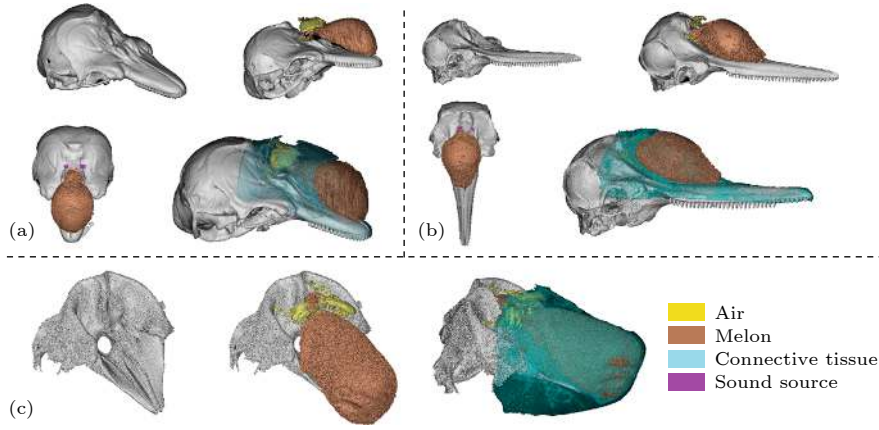


图 2 (a) 东亚江豚头部声学结构的三维重建; (b) 小抹香鲸头部声学结构的三维重建; (c) 中华白海豚头部声学结构的三维重建结果; 青色、棕色、红色、黄色和灰色分别表示结缔组织、额隆、声源、气囊与上颌骨

Fig. 2. (a) Three-dimensional acoustic structure reconstructions of a finless porpoise; (b) three-dimensional acoustic structure reconstructions of a pygmy sperm whale; (c) three-dimensional acoustic structure reconstructions of an Indo-Pacific humpback dolphin. Upper jaw, sound source, air components (including the air sacs and nasal passage) are represented in different colors.

的声源结构尺寸较小, 以中轴线为参考, 位置大致呈现左右对称, 前、后各有一块由脂肪块组成的复合结构. 小抹香鲸的额隆前侧呈现出方形、钝形. 相对于东亚江豚与中华白海豚, 小抹香鲸的鼻道结构呈现左、右不对称^[34–37]. 东亚江豚的左、右声源相对于额隆末端呈对称分布, 声源未与额隆后侧衔接, 而中华白海豚的右侧声源与额隆末端是衔接的. 齿鲸生物虽遵循类似的气动致声原理, 但具体的声源位置、结构与尺寸存在一定的差别.

2.2 声发射系统的声速分布重建

CT 扫描重建的齿鲸头部声发射系统的三维结构能为声场建模提供必要的几何结构信息^[37], 但获取其声学特性如声速仍需进行相应测量. 声速和密度是声传播模型所需的基础物理参数. 通过物理测量方法获得各组织的声速和密度, 与 CT 扫描得到的组织的亨氏单位 (Hounsfield unit, HU) 值进行回归分析, 可以确定软组织的声速与 HU 值、密度与 HU 值之间的函数关系, 从而重建整个声发射系统的声速与密度分布^[34,36,38]. 对东亚江豚、小抹香鲸以及中华白海豚组织的回归分析表明, 这些齿鲸头部组织的声速 c 和 HU 值均呈现显著的线性关系:

$$c = 2.33HU + 1528.25, \quad (1)$$

$$c = 1.67HU + 1528.37, \quad (2)$$

$$c = 1.67HU + 1479.33. \quad (3)$$

回归系数 r^2 分别为 0.85, 0.67 与 0.91. 可以

通过 Matlab 代码对 CT 扫描得到的数据进行后处理来提取所需要研究的任意的截面的 HU 数值分布, 将 HU 数值分布与上述公式结合便能得到所选取截面的声速分布. 图 3 显示了东亚江豚、小抹香鲸与中华白海豚生物声呐系统的声速分布重建结果^[34,36,38]. 三种齿鲸的前额核心部分 (额隆) 的声速相对于外层组织较小. 额隆组织的声速会渐变, 大小为 1300 到 1400 m/s 之间. 结缔组织覆盖于额隆后侧上方, 其声速高于额隆. 为进一步了解前额软组织的声速梯度分布, 选取了小抹香鲸垂直截面的某个截线的声速分布 (图 4)^[36], 揭示了其前额软组织的声速渐变特性.

齿鲸声呐发射系统的声速分布重建结果表明齿鲸前额的组织结构分布相似. 中心核是一层低声速的脂肪性质的额隆组织. 外围为声速和密度较高的肌肉组织和结缔组织. 齿鲸前额软组织与骨质结构、气质结构形成了天然的声学梯度材料.

3 齿鲸生物声信号特性分析

齿鲸发出的声呐脉冲信号也具有多样性. 齿鲸发出的回声定位脉冲时长处微秒量级内, 大多处于超声范围, 偶尔也能发出人耳能及的低频回声定位脉冲. 齿鲸的回声定位脉冲被粗分为两大类: 宽带定位脉冲与窄带高频定位脉冲^[15–21]. 宽带定位脉冲的 -3 dB 带宽能够达 50 kHz 以上. 多数齿鲸使用这类信号进行回声定位, 包括一些颌骨较长的, 具有明显吻部突起的齿鲸, 如中华白海豚、宽吻海

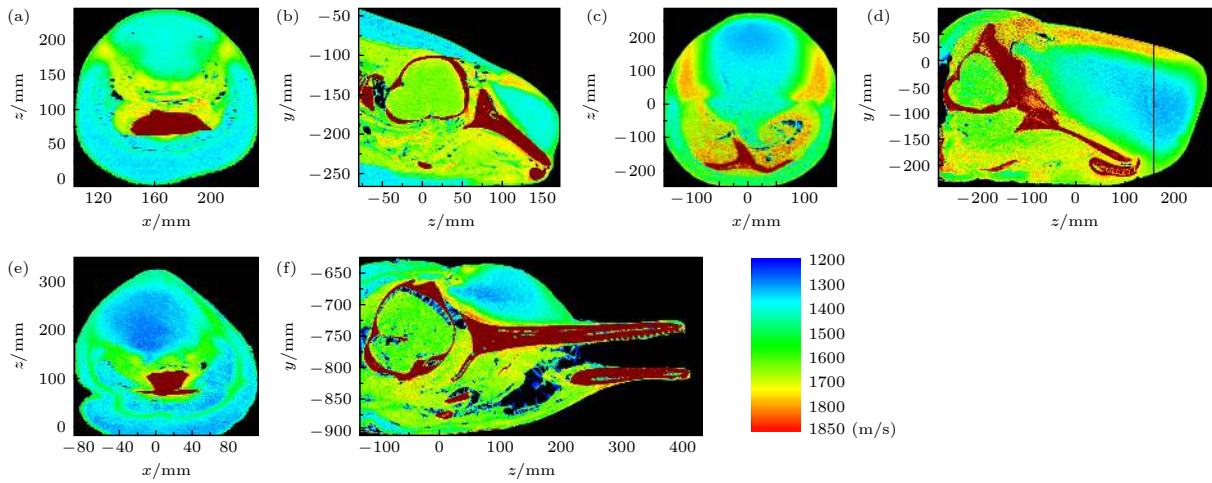


图 3 (a) 东亚江豚头部声发射系统的水平截面声速重建; (b) 东亚江豚头部声发射系统的垂直截面声速重建^[34]; (c) 小抹香鲸头部声发射系统的水平截面声速重建; (d) 小抹香鲸头部声发射系统的垂直截面声速重建^[36]; (e) 中华白海豚头部声发射系统的水平截面声速重建; (f) 中华白海豚头部声发射系统的垂直截面声速重建^[38]

Fig. 3. (a) Sound speed reconstructions of finless porpoise for sound emission system in horizontal section; (b) sound speed reconstructions of finless porpoise for sound emission system in vertical section^[34]; (c) sound speed reconstructions of pygmy sperm whale for sound emission system in horizontal section; (d) sound speed reconstructions of pygmy sperm whale for sound emission system in vertical section^[36]; (e) sound speed reconstructions of the Indo-Pacific humpback dolphin for sound emission system in horizontal section; (f) sound speed reconstructions of the Indo-Pacific humpback dolphin for sound emission system in vertical section^[38].

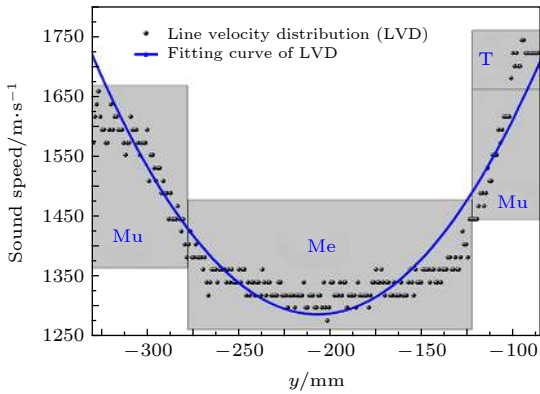


图 4 沿着图 3(d) 垂直截面中的截线的声速分布 (Mu 为肌肉组织的缩写, Me 为额隆组织的缩写而 T 则为结缔组织罩的缩写)^[36]

Fig. 4. Sound velocity distribution along the y axis corresponds to the line in the right part of Fig. 3(d). Mu, muscle; Me, melon; T, theca^[36].

豚等^[19,20]. 这类齿鲸生物发出定位脉冲的峰值频率可以从较低的 40 kHz 到大于 200 kHz^[1,15–21]. 而窄带高频定位脉冲的 -3 dB 带宽大多为 30 kHz 以内, 大多数见于一些头部较为圆钝的齿鲸类, 如江豚、鼠海豚、小抹香鲸等^[15–17,20]. 这些生物没有明显的吻部突起, 且发出的定位脉冲的峰值频率大多处于高于 100 kHz 的高频范围^[1,18–20]. 近年来的一些研究发现窄带高频脉冲型豚类如江豚也可以发出宽带回声定位脉冲信号^[16,17], 且齿鲸的回声定位信号还存在频率调制定位脉冲^[19], 进一步表明齿鲸生

物声呐系统的复杂性.

国内学者对齿鲸生物声学的研究主要集中于声信号, 涉及种类包括分布于长江中下游流域的淡水豚类和海洋性豚类, 包括白鬃豚 (*Lipotes vexillifer*)、江豚 (*Neophocaena phocaenoides*)、中华白海豚 (*Sousa chinensis*) 等^[15,39–47]. 研究加深了对齿鲸回声定位过程中的一些现象的了解, 如江豚回声定位过程中对增益的控制^[47]、声信号脉冲结构的分析^[15]等. 图 5 比较了在厦门海域测量得到的中华白海豚宽带回声定位脉冲与东亚江豚窄带高频脉冲的时频特性. 中华白海豚回声定位脉冲的峰值频率与中心频率小于东亚江豚, 但其回声定位脉冲的 -3 dB 带宽以及 -10 dB 带宽均大于东亚江豚. 东亚江豚回声定位脉冲信号的结果与相关文献中的结果类似, 体现高频且窄带特点. 这两种齿鲸生物发出的不同能量的回声定位脉冲具有相似的频谱特性.

除了回声定位信号, 齿鲸另外一种具有代表性的声信号就是通信信号 (whistles)^[48–51]. 相比于回声定位脉冲, 通信声信号的时长变化范围大, 短的为毫秒量级, 长的可达秒级. 宽吻海豚还能发出用来鉴定个体的特征通信信号 (signature whistles)^[14]. 通信声信号可结合机器学习、卷积神经网络等人工智能算法进行识别与分类^[52–54]. 许多研究以通信

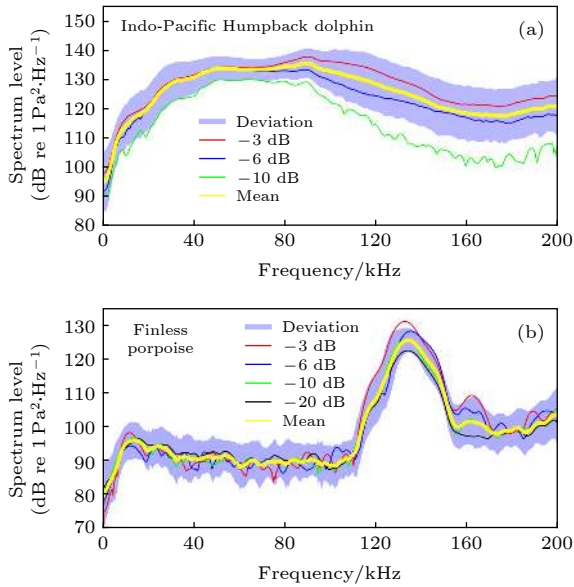


图 5 (a) 中华白海豚不同能量回声定位脉冲的频谱分布; (b) 东亚江豚不同能量回声定位脉冲信号的频谱分布; 图中的 -3 dB, -6 dB, -10 dB 以及 -20 dB 分别表示能量处于最高能量声信号 -3 dB 到 0 dB 范围, -6 dB 到 -3 dB 范围, -10 dB 到 -6 dB 范围以及 -20 dB 到 -10 dB 范围的回声定位信号

Fig. 5. (a) Mean spectrum of the clicks from -3 dB, -6 dB, and -10 dB groups for the Indo-Pacific humpback dolphin; (b) the mean spectrum of the clicks from -3 dB, -6 dB, -10 dB and -20 dB groups for the finless porpoise.

信号频谱曲线形状为参考, 根据频谱曲线随着时间变化的趋势, 将齿鲸通信声信号分为六类^[55-59]: 固定频率类型信号 (constant frequency)、上扫频类

型信号 (upsweep)、下扫频类型信号 (downsweep)、凹型信号 (concave or valley)、凸型信号 (convex or hill)、正弦型信号 (sinusoidal or multiple), 如图 6 所示. 齿鲸发出不同类型的通信信号可能与其行为有关. 分析厦门五缘湾圈养的宽吻海豚的通信声信号发现, 自由游动与训练两种状态下产生的通信声信号类别以及相关比例存在显著差异 (如图 7 所示)^[58,59]. 宽吻海豚在自由游动状态下的通信声信号主要为正弦型, 占总数 66.4%. 其次是占 22.47% 的凸型信号和占 9.03% 的上扫频类型, 而其他类型的占比较小^[59]. 宽吻海豚在训练状态下发出通信声信号绝大多数为上扫频类型, 占总数 98.75%. 这与野外自由游动的齿鲸产生的通信信号与声学行为之间存在的联系是类似的^[60-62].

4 齿鲸声发射系统的指向性声波束形成与调控机制

齿鲸发射的回声定位信号能在头部外形成高指向性波束, 相关的研究可追溯到 20 世纪 70 年代末 Au 等^[63]对宽吻海豚声波束指向性的测量. 已有的指向性测量实验覆盖的齿鲸生物包括不同亚种的宽吻海豚^[1,64-66], 白鲸 (*Delphinapterus leucas*)^[67], 伪虎鲸 (*Pseudorca crassidens*)^[12]、抹香鲸 (*Physeter macrocephalus*)^[68]、柯氏喙鲸 (*Ziphius*

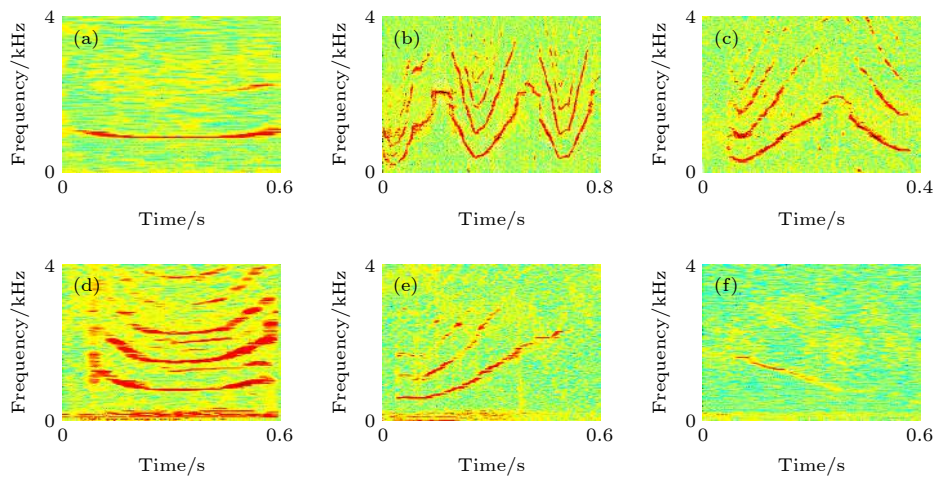


图 6 (a) 宽吻海豚固定频率型通信声信号时频图; (b) 宽吻海豚正弦型通信声信号时频图; (c) 宽吻海豚凸型通信声信号时频图; (d) 宽吻海豚凹型通信声信号时频图; (e) 宽吻海豚上扫频型通信声信号时频图; (f) 宽吻海豚下扫频型通信声信号时频图^[58,59]; 其中颜色深浅表示声信号强度大小

Fig. 6. (a) Spectrogram of constant frequency whistles of the bottlenose dolphins; (b) the spectrogram sinusoidal whistles of the bottlenose dolphins; (c) the spectrogram of convex or hill whistles of the bottlenose dolphins; (d) the spectrogram of concave or valley whistles of the bottlenose dolphins; (e) the spectrogram of upsweep whistles of the bottlenose dolphins; (f) the spectrogram of down sweep frequency whistles of the bottlenose dolphins^[58,59].

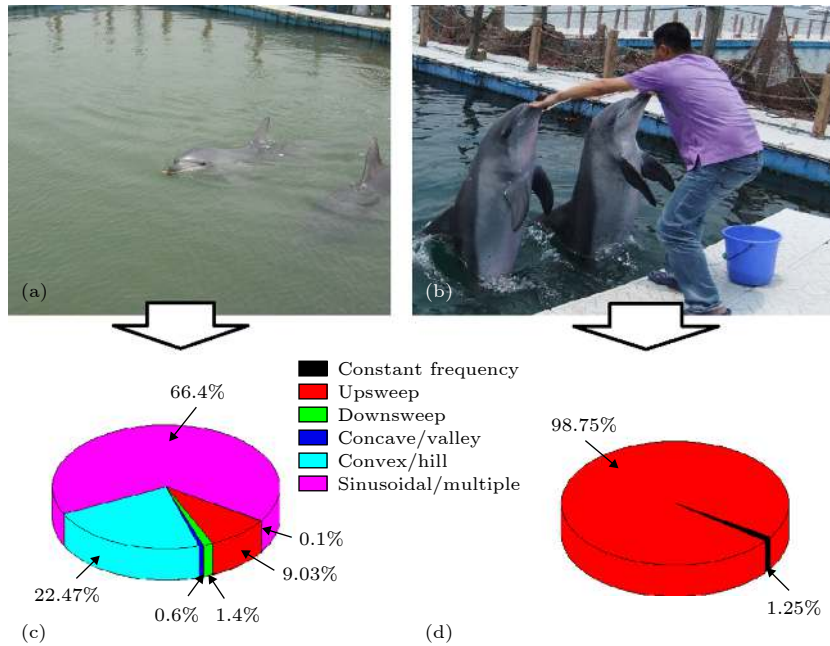


图 7 (a) 厦门五缘湾圈养两只宽吻海豚处在自由游动状态; (b) 宽吻海豚处于训练状态; (c) 宽吻海豚处于自由游动时发出的通信声信号类别及其占比; (d) 宽吻海豚处于训练状态下发出的通信信号的类别及其占比^[58,59]

Fig. 7. (a) Two captive free swimming bottlenose dolphins in Xiamen; (b) bottlenose dolphins under training; (c) pie chart of the classified whistles of two bottlenose dolphins under free swimming; (d) pie chart of the classified whistles of two bottlenose dolphins under training conditions^[58,59].

cavirostris)^[69]、皮氏斑纹海豚 (*Lagenorhynchus australis*)^[70]、花斑喙头海豚 (*Cephalorhynchus commersonii*)^[70]、鼠海豚 (*Phocoena phocoena*)^[13] 等。齿鲸的声波波束依赖其声发射系统的各项声学结构。齿鲸的声学结构包含固体性质的上颌骨和颅骨。流体结构为气质结构的气囊与鼻道。软组织结构是介于固体与流体之间的结构, 主要包括结缔组织、肌肉组织与额隆组织。齿鲸在声源振动发声后, 声波会途经前额传播辐射进入水中, 形成声波波束^[29]。数值模型结果表明上颌骨骨质结构、鼻道和气囊组成的气质系统对声波的反射作用明显, 能够将声源处产生的声波的主要能量往前向调控形成能量集中的声波波束, 而软组织起到的作用则相对较弱^[28]。声波在齿鲸头部的传播是分步骤的, 其中, 头骨、额隆、鼻道和相应的气道系统, 以及结缔组织等在声波传播与聚焦过程中都起着相应作用, 这些结构声速与几何形状的变化均能影响声波传播与波束形成^[29]。这些数值仿真模拟与实验测量相辅相成, 为研究齿鲸生物的波束调控提供了更加全面的材料。本节利用 COMSOL Multiphysics 软件将 CT 扫描得到的几何模型进行网格化, 其中网格尺寸为声波波长的 1/10, 辐射条件设置为平面波辐射减少界面反射。

4.1 骨质结构的声反射和界面波波导作用

齿鲸的骨质结构由颅骨和上颌骨组成, 二者在结构上是相连的。骨质结构的压力波声速、剪切波声速和密度分别为 3380 m/s, 2200 m/s 与 2035 kg/m³^[71-73]。数值模拟研究结果表明, 骨质结构在齿鲸头部声传播过程中起着重要的反射作用^[28-29,31,74-77]。图 8 比较了鼠海豚包含头骨结构的模型 I 和移除头骨的模型 II 的声波波束特性^[31]。头骨骨质结构能有效地限制旁瓣。头骨结构的声特性阻抗大于软组织、空气和水, 将声波往前反射的同时使声波往喙部以上传播, 从而形成向前传播的指向性波束, 体现了骨质结构对声波的反射作用, 这与传统上对上颌骨作用的认识相符合。

此外, 齿鲸的上颌骨还能激发剪切波, 产生固体位移振动^[74]。图 9 描述了白鲸豚声呐系统的声波传播过程, 声波除了沿着软组织往前传播, 还在上颌骨中激发了系列声波向前传播^[74]。图 10 给出的位移分布表明, 上颌骨中的位移往前呈现出上升趋势, 在局部振动会达到最高峰, 接着逐渐减弱, 在到达上颌骨前端时, 又出现了一个局部区域峰值。声传播过程表明软组织与上颌骨的界面会有沿着界面传播的声波, 界面波在离开上颌骨后与来源

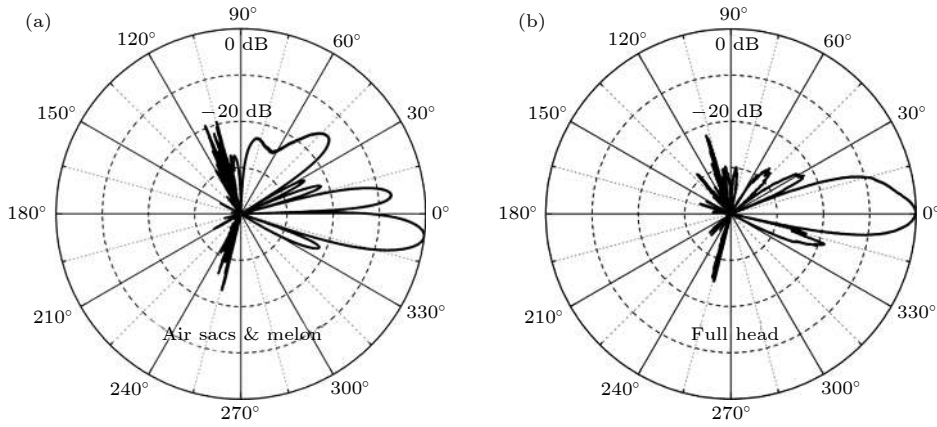


图 8 (a) 中心频率为 130 kHz 的声脉冲经过鼠海豚无头骨模型调控形成的声波波束; (b) 中心频率为 130 kHz 的声脉冲经过鼠海豚完整模型调控形成的声波波束^[31]

Fig. 8. (a) Beam directivity of a sound pulse with a centroid frequency of 130 kHz for No-Skull model of harbor porpoise; (b) the beam directivity of a sound pulse with a centroid frequency of 130 kHz for a complete model of harbor porpoise^[31].

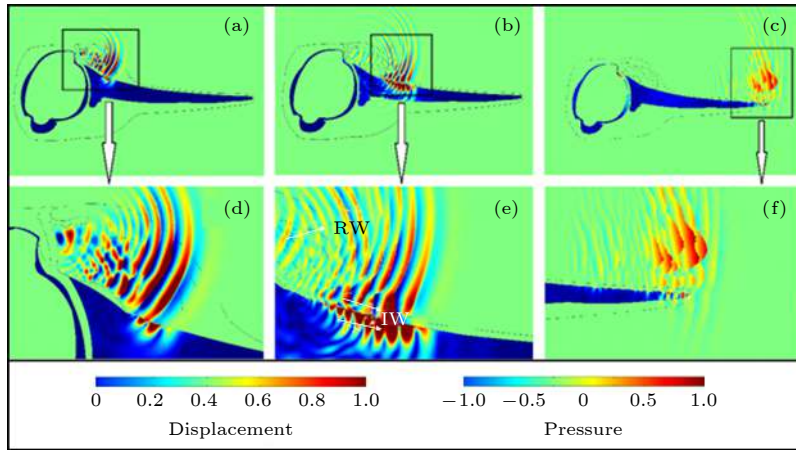


图 9 (a) 声波在白鲸豚垂直截面第一传播时刻的声场分布; (b) 声波在白鲸豚垂直截面第二传播时刻的声场分布, 其中 RW 与 IW 分别表示传播过程中的反射波与表面波; (c) 声波在白鲸豚垂直截面第三传播时刻的声场分布; (d) 第一传播时刻声场分布放大; (e) 第二传播时刻声场分布放大; (f) 第三传播时刻声场分布放大^[74]

Fig. 9. (a) Propagation plot of a short-duration impulse source for Baiji in vertical section at time 1; (b) propagation plot of a short-duration impulse source for Baiji in vertical section at time 2; (c) propagation plot of a short-duration impulse source for Baiji in vertical section at time 3; (d) enlarged details of (a); (e) enlarged details of (b); (f) enlarged details of (c)^[74].

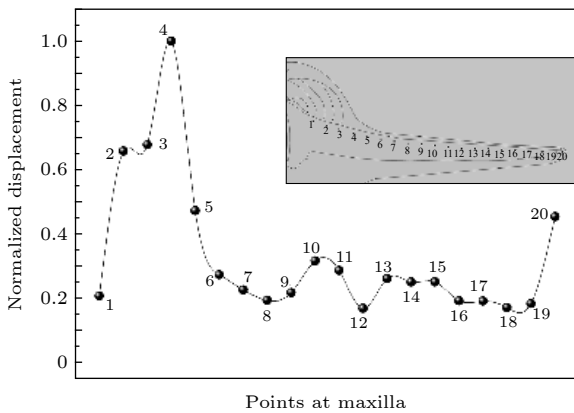


图 10 白鲸豚上颌骨表面 20 个点的固体位移分布情况^[74]

Fig. 10. Solid displacements of the 20 maxilla points of baiji^[74].

于软组织的声波叠加继续往水中传播. 骨质结构不仅能够反射声波, 还会激发沿着上颌骨-软组织界面传播的界面波, 完善对骨质结构声功能的认识.

4.2 气质结构在声传播与波束形成中的作用

齿鲸生物声呐系统的气质结构包含鼻道以及气囊系统. 气囊与鼻道是相连接在一起的气体通道系统. 气质系统内的气体循环与齿鲸的呼吸和发声相关. 以研究最为广泛的宽吻海豚为例, 其气质系统向外开口位于喷孔, 并通过鼻道向下相连至咽喉位置. 大部分齿鲸生物的气囊系统由喷气孔往鼻道方向包含三对气囊. 前庭囊位于额隆后侧的上方,

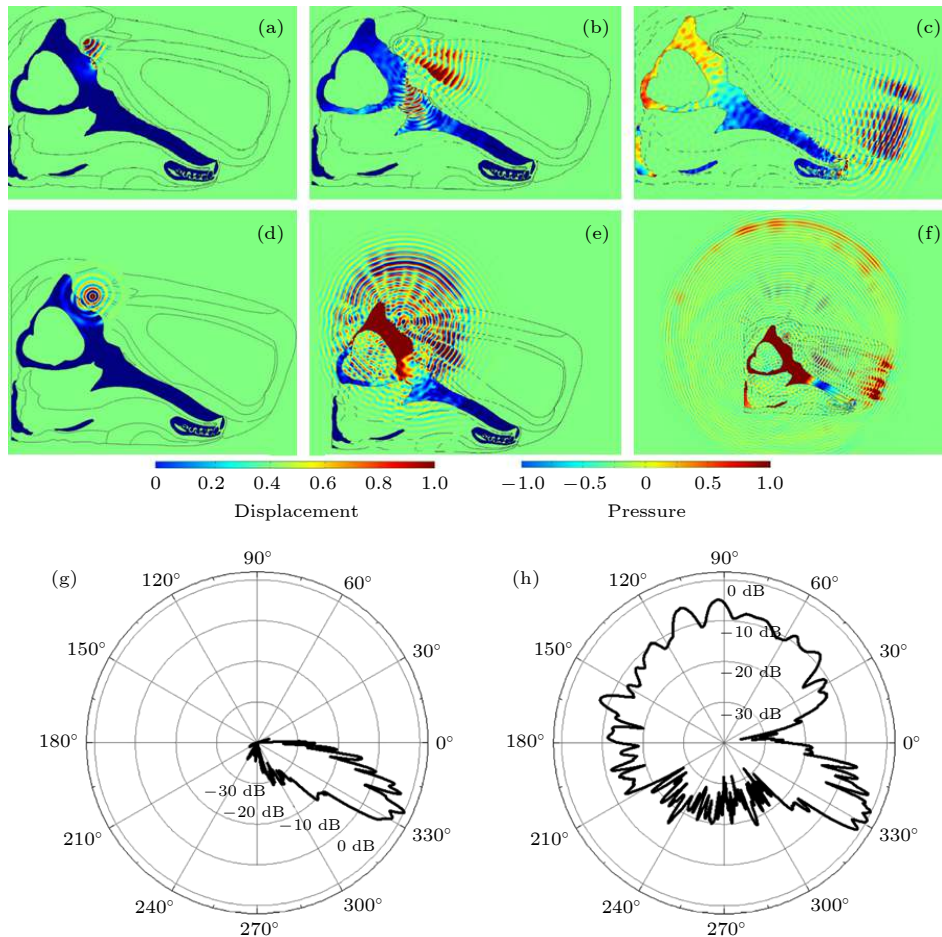


图 11 (a) 声波在小抹香鲸完整头部模型第一传播时刻的声场分布; (b) 声波在小抹香鲸完整头部模型第二传播时刻的声场分布; (c) 声波在小抹香鲸完整头部模型第三传播时刻的声场分布; (d) 声波在小抹香鲸头部无气体结构模型第一传播时刻的声场分布; (e) 声波在小抹香鲸头部无气体结构模型第二传播时刻的声场分布; (f) 声波在小抹香鲸头部无气体结构模型第三传播时刻的声场分布; (g) 峰值频率为 125 kHz 的声脉冲经过小抹香鲸头部完整模型调控形成的声波波束; (h) 峰值频率为 125 kHz 的声脉冲经过小抹香鲸头部无气体结构模型调控形成的声波波束^[35]

Fig. 11. (a) Propagation plot of the transient sound waves at time 1 under a full model case of pygmy sperm whale; (b) propagation plot of the transient sound waves at time 2 under a full model case of pygmy sperm whale; (c) propagation plot of the transient sound waves at time 3 under a full model case of pygmy sperm whale; (d) propagation plot of the transient sound waves at time 1 under a model case without air components; (e) propagation plot of the transient sound waves at time 2 under a model case without air components; (f) propagation plot of the transient sound waves at time 3 under a model case without air components; (g) the beam directivity of a sound pulse with a peak frequency of 125 kHz for the full model case of the pygmy sperm whale; (h) the beam directivity of a sound pulse with a peak frequency of 125 kHz for the model case of pygmy sperm whale without air components^[35].

是最靠近喷气孔的一对气囊。前颌囊紧贴于上颌骨后侧。鼻额囊位于前庭囊和前颌囊之间。齿鲸的气囊系统以体轴为中轴线，在结构上呈左右对称，但尺寸并不完全对称。近年来的研究表明气囊和鼻道对声波传播与波束形成起着重要作用^[28–31,35,75–77]。以小抹香鲸为例(图 11)^[35]，头部模型在失去鼻道与气囊结构时，部分声波向着后方、上方以及下方传播，声波波束的旁瓣增多且能量泄漏变强。鼻道的反射作用主要源于气质结构与前额软组织的声阻抗存在显著的差异，在声学上起着绝对软边界的作用。气质结构还可能通过结构共振对声波传播与

波束控制产生影响。

4.3 软组织在声波传播与波束形成中的作用

齿鲸的软组织位于鼻道前方，上颌骨的上方，占据着前额的大部分空间。齿鲸前额软组织的声速和密度由内而外呈梯度分布，存在一个低声速、低密度的内核^[78]。早期研究推测脂肪性质的额隆起着聚焦声波的功能。然而，近年来数值模型研究通过揭示声波在齿鲸头部内部传播的具体物理过程^[30,31]，发现额隆的聚焦作用相对有限，而更主要的是承担声波导、抑制旁瓣以及对声波辐射到水中

进行阻抗匹配的作用. 图 12 描述了鼠海豚头部内部的声传播, 声波束的指向性在声波传播到额隆以前已经形成^[31]. 当声波在前额软组织内部继续往前传播时, 低声速软组织对声波的传播起一定的波导作用, 改变了主瓣方向. 鼠海豚的额隆虽未对其远场的声波束主瓣产生明显的影响, 但是对于旁瓣还是有一定的抑制作用.

4.4 齿鲸头部声学结构联合作用对指向性声波束的调控效应

图 13 描述了东亚江豚气囊和软组织的联合作用对声波束控制的综合调控效应^[34]. 改变前庭囊方向从 0° 依次变为 5° , 10° , 15° 与 20° , 并与此同时压缩软组织使前额的相对面积逐步从 1 减小 0.96, 0.92, 0.87 与 0.83. 结果表明随着气囊朝向和压缩程度的增加, 声波的传播方向虽未受显著影响, 但声波束呈现出规律展宽现象. 声波束的 -3 dB 宽度随着压缩程度以及前庭囊的弯曲加深呈现上升趋势, 这与 Wisniewska 等^[33] 在实验中观

测到鼠海豚在近距离探测中通过头部变形来展宽声波束, 提高声学视野的现象是一致的. 实验与仿真表明齿鲸也许能通过变形柔性声学结构来调控指向性声波束, 这为指导人工材料的设计提供了参考^[79,80].

骨质结构、气质结构和软组织形成一个多相系统, 联合调控齿鲸生物声呐系统的声传播以及波束形成. 上颌骨的声阻抗较大, 通过能反射声波与形成界面波波导双重作用调控声波. 气质结构的气囊系统与鼻道结构的声阻抗较小, 主要通过形成软边界反射声波影响声波传播. 而软组织的声阻抗虽然接近水, 却形成一个声速、密度呈梯度状的整体指引声波往低声速、低密度区域引导. 声波能在这三种声学结构形成的天然的多相介质调控下形成高指向性的声波束. 声源位于鼻道系统上, 发出的声波首先被位于后侧的鼻道与上侧的气囊反射向前传播. 位于前额下侧的上颌骨则能保障声波始终处在水平面上方而阻止声波往头部下方泄漏. 位于气质系统前侧, 上颌骨上侧的软组织结构将被反射的

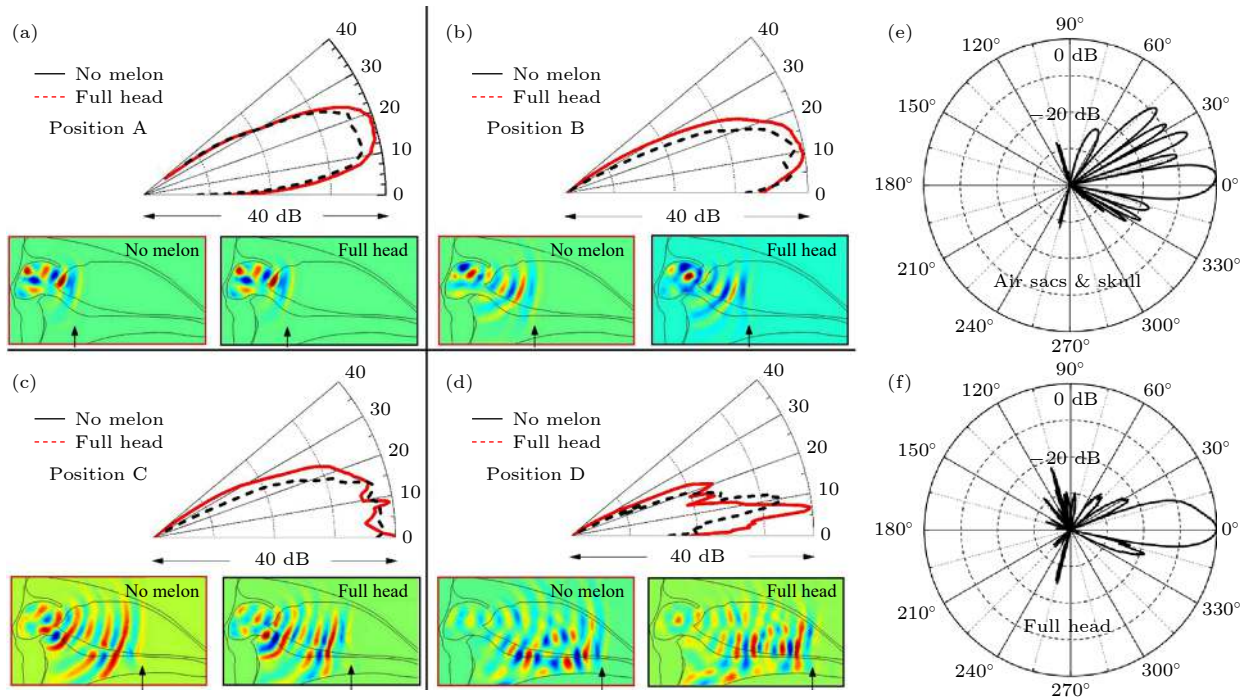


图 12 (a) 鼠海豚无额隆模型和完整模型在第一传播时刻的传播声场分布; (b) 鼠海豚无额隆模型和完整模型在第二传播时刻的声场分布; (c) 鼠海豚无额隆模型和完整模型在第三传播时刻的声场分布; (d) 鼠海豚无额隆模型和完整模型在第四传播时刻的声场分布; (e) 中心频率为 130 kHz 的声脉冲经过鼠海豚无额隆模型调控形成的声波波束; (f) 中心频率为 130 kHz 的声脉冲经过鼠海豚完整模型调控形成的声波波束^[31]

Fig. 12. (a) Acoustic field of no-melon and full head cases at time 1; (b) acoustic field of no-melon and full head cases at time 2; (c) acoustic field of no-melon and full head cases at time 3; (d) acoustic field of no-melon and full head cases at time 4; (e) the beam directivity of a sound pulse with a centroid frequency of 130 kHz for no-melon case of harbor porpoise; (f) the beam directivity of a sound pulse with a centroid frequency of 130 kHz for the full head case^[31].

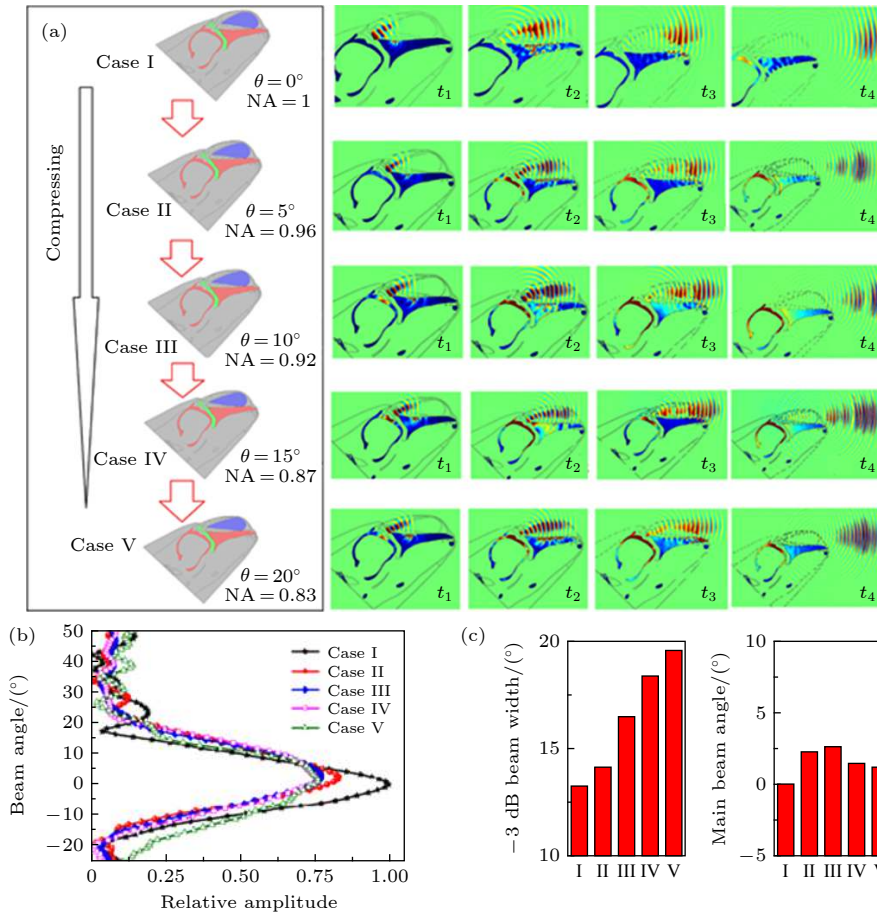


图 13 (a) 头部压缩对峰值频率为 125 kHz 的声脉冲传播形成的声场的影响, 其中 θ 表示的是前庭囊的倾斜角, NA 代表的是相对于原始模型的归一化面积; (b) 五种模型相应的波束分布特性; (c) 五种模型形成的声波波束的 -3 dB 带宽与主瓣角分布^[34]
 Fig. 13. (a) Compressing effect of models I, II, III, IV, and V on acoustic field of the sound pulse with a peak frequency of 125 kHz inside the head, where θ represents the orientation angle of the vestibular sac and NA represents the normalized area of the forehead tissues with respect to those of the original model I; (b) beam directivities of the five cases; (c) sound beams' -3 dB beam widths and main beam angle distribution of the five cases^[34].

声波聚集往前传播至水中. 这种不同声阻抗特性结构按照特定的空间几何分布形成了高效的声调控系统有效调控声波传播与波束形成.

5 结论与展望

齿鲸生物声呐的回声定位发射研究涉及解剖结构、回声定位信号、声传播以及声波束形成与调控. 齿鲸生物利用由多相介质组成的声呐发射系统将回声定位声脉冲调控形成声波波束进行回声定位. 声发射系统的多相介质包括固体性质的上颌骨结构、气体性质的气囊与鼻道系统以及软组织结构. 这些声学结构在齿鲸前额形成天然的声学超材料, 引导声波往水中传播. 齿鲸生物声呐信号具有多样性, 体现在声信号频率、带宽以及时长上, 并关联其声学行为. 齿鲸前额发射系统的声学结构

作用各异: 上颌骨在引导声波在头部内部的传播过程中起着反射声波与引导界面波的作用; 骨质结构起着软边界的作用; 软组织的声速梯度特性形成一个声波导结构. 齿鲸前额的多相复杂介质组成的发射系统能有效调控声波传播、波束形成从而改变声学视野, 实现自适应回声定位. 齿鲸生物声呐系统富含深刻的物理机理. 研究齿鲸生物声呐能为现有人工声呐结构设计、声学材料设计提供新原理和新方法.

感谢中国科学院水生生物研究所王丁研究员、王克雄研究员, 中国科学院深海科学与工程研究所李松海研究员, 自然资源部第三海洋研究所王先艳副研究员与杨燕明研究员, 以及厦门大学环境与生态学院李炎教授的支持与帮助.

参考文献

- [1] Au W W L 1993 *The Sonar of Dolphins* (1st Ed.) (New York: Springer-Verlag) pp1–21
- [2] Au W W L, Simmons J A 2007 *Phys. Today* **60** 40
- [3] Jepsen G L 1970 *Biology of Bats* (1st Ed.) (New York: Academic Press) pp1–64
- [4] Griffin D R 1946 *Nature* **158** 46
- [5] Schevill W E, McBride A F 1956 *Deep-Sea Res.* **3** 153
- [6] Wood F G 1953 *B. Mar. Sci.* **3** 120
- [7] Kellogg W N, Kohler R 1952 *Sci.* **116** 250
- [8] Kellogg W N, Kohler R, Morris H N 1953 *Sci.* **117** 239
- [9] Norris K S 1964 *Marine Bio-acoustics* (1st Ed.) (New York: Pergamon) pp316–336
- [10] Au W W L, Floyd R W, Penner R H, Murchison A E 1974 *J. Acoust. Soc. Am.* **56** 1280
- [11] Au W W L, Penner R H 1981 *J. Acoust. Soc. Am.* **70** 687
- [12] Au W W L, Pawloski J L, Nachtigall, P E, Blonz M, Gisner R C 1995 *J. Acoust. Soc. Am.* **98** 51
- [13] Au W W L, Kastelein R A, Rippe T, Schooneman N M 1999 *J. Acoust. Soc. Am.* **106** 3699
- [14] Sayigh L S, Janik V M 2009 *Encyclopedia of Marine Mammals* (2nd Ed.) (Amsterdam: Elsevier Inc) pp1014–1016
- [15] Li S H, Wang K X, Wang D, Akamatsu T 2005 *J. Acoust. Soc. Am.* **117** 3288
- [16] Goold J C, Jefferson T A 2002 *Raffles. Bull. Zool.* **10** 131
- [17] Song Z C, Zhang Y, Wang X Y, Wei C, Wu F X, Miao X 2017 *J. Biobased Mater. Bioenergy* **11** 45
- [18] Gong Z N, Dong L J, Caruso F, Li M L, Liu M M, Dong J C, Li S H 2019 *J. Acoust. Soc. Am.* **145** 3480
- [19] Zimmer W M, Johnson M P, Madsen P T, Tyack P L 2005 *J. Acoust. Soc. Am.* **117** 3919
- [20] Li S H, Wang D, Wang K, Akamatsu T, Ma Z Q, Han J B 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **121** 3938
- [21] Li S H, Wang K, Wang D, Dong S Y, Akamatsu T 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **124** 716
- [22] Evans W E, Prescott J H 1962 *Zool* **47** 121
- [23] Norris K S, Dormer K J, Pegg J, Liese G T 1971 *Proceedings of Conference on VIIIth Conference on Biology of Sonar Diving Mammals*, Menlo Park, CA, USA, 1971 p113
- [24] Evans W E, Maderson P F A 1973 *Am. Zool* **13** 1205
- [25] Cranford T W, Amundin M, Norris K S 1996 *J. Morphol* **228** 223
- [26] Cranford T W 1988 *Animal Sonar: Processes and Performance* (1st Ed.) (New York: Springer) pp67–77
- [27] Dubrovskiy N A, Urusovskiy I A 2006 *J. Acoust. Soc. Am.* **119** 3276
- [28] Aroyan J L, Cranford T W, Kent J, Norris K S 1992 *J. Acoust. Soc. Am.* **92** 2539
- [29] Cranford T W, Trijoulet V, Smith C R, Krysl P 2014 *Bioacoustics* **23** 161
- [30] Wei C, Au W W L, Ketten D R, Zhang Y 2018 *J. Acoust. Soc. Am.* **143** 2611
- [31] Wei C, Au W W L, Ketten D R, Song Z C, Zhang Y 2017 *J. Acoust. Soc. Am.* **141** 4179
- [32] Moore P W, Mankiewicz L A, Houser D S 2008 *T. J. Acoust. Soc. Am.* **124** 3324
- [33] Wisniewska D M, Ratcliffe J M, Beedholm K, Christensen C B, Johnson M, Koblitz J C, Wahlberg M, Madsen P T 2015 *eLife* **4** e05651
- [34] Zhang Y, Song Z C, Wang X Y, Cao W W, Au W W L 2017 *Phys. Rev. Applied* **8** 064002
- [35] Song Z C, Zhang Y, Thornton S W, Dong J C, Li S H 2017 *J. Acoust. Soc. Am.* **142** 2443
- [36] Song Z C, Xu X, Dong J C, Xing R L, Zhang M, Liu X C, Zhang Y, Li S H, Berggren P 2015 *J. Acoust. Soc. Am.* **138** 3129
- [37] Cranford T W, Krysl P 2015 *PLoS ONE* **10** e0122298
- [38] Song Z C, Zhang Y, Berggren P, Wei C 2017 *J. Acoust. Soc. Am.* **141** 681
- [39] Jing X Y, Xiao Y F, Jing R C 1983 *Acta. Oceanol. Sin.* **1** 11 (in Chinese) [荆显英, 肖友芙, 景荣才 1983 海洋学报 **1** 11]
- [40] Wang D, Liu R J, Chen P X, Wang Z F, Lu W X 1989 *Acta. Hydrobiol. Sin.* **3** 210 (in Chinese) [王丁, 刘仁俊, 陈佩薰, 王至藩, 卢文祥, 杨叔子 1989 水生生物学报 **3** 210]
- [41] Wang K X 2005 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [王克雄 2005 博士学位论文 (武汉: 中国科学院水生生物研究所)]
- [42] Wang D, Wang K X, Liu R J, Chen P X 1989 *Nat. Sci. J. Xiangtan. Univ.* **2** 116 (in Chinese) [王丁, 王克雄, 刘仁俊, 陈佩薰 1989 湘潭大学学报 (自然科学) **2** 116]
- [43] Xiao Y F, Wang D, Wang K X 1993 *Acta. Oceanol. Sin.* **1** 125 (in Chinese) [肖友芙, 王丁, 王克雄 1993 海洋学报 **1** 125]
- [44] Wang D, Wang K X, Liu R J, Chen G, Lu W X 1988 *J. Huazhong. Univ. Sci. Tech.* **3** 55 (in Chinese) [王丁, 王克雄, 刘仁俊, 谌刚, 卢文祥 1988 华中理工大学学报 **3** 55]
- [45] Akamatsu T, Wang D, Wang K, Naito Y 2000 *J. Acoust. Soc. Am.* **108** 1353
- [46] Akamatsu T, Wang D, Wang K, Wei Z 2001 *J. Acoust. Soc. Am.* **109** 1723
- [47] Li S, Wang D, Wang K, Akamatsu T 2006 *J. Acoust. Soc. Am.* **120** 1803
- [48] Soldevilla M S, Henderson E E, Campbell G S, Wiggins S M, Hildebrand J A, Roch M A 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **124** 609
- [49] Janik V M, King S L 2013 *Mar. Mamm. Sci.* **29** 109
- [50] Lilly J C, Miller A M 1961 *Sci.* **133** 1689
- [51] Lilly J C 1966 *Whales, Dolphins and Porpoises* (1st Ed.) (Berkeley: University of California Press) pp503–509
- [52] Yang W Y, Luo W Y, Zhang Y 2017 *Electron. Lett.* **53** 367
- [53] Yang W Y, Sun X Z, Song Z C, Zhang Y, Yang Y M 2017 *Acta. Acust.* **42** 445 (in Chinese) [杨武夷, 孙馨喆, 宋忠长, 张宇, 杨燕明 2017 声学学报 **42** 445]
- [54] Luo W Y, Yang W Y, Zhang Y 2019 *J. Acoust. Soc. Am.* **145** EL7
- [55] Driscoll A D 1995 *M. S. Thesis* (Santa Cruz: University of California Santa Cruz)
- [56] Bazúa-Duran C 1997 *M. S. Thesis* (Mexico: Universidad Nacional Autonoma De Mexico)
- [57] Bazúa-Duran C, Au W W L 2002 *J. Acoust. Soc. Am.* **112** 3064
- [58] Wei C 2016 *Ph. D. Dissertation* (Xiamen: Xiamen University) (in Chinese) [魏翀 2016 博士学位论文 (厦门: 厦门大学)]
- [59] Wei C, Xu X M, Zhang Y, Niu F Q 2014 *Acta. Acust.* **39** 452 (in Chinese) [魏翀, 许肖梅, 张宇, 牛富强 2014 声学学报 **39** 452]
- [60] King S L, Sayigh L S, Wells R S, Feller W, Janik V M 2013 *P. Roy. Soc. B* **280** 20130053
- [61] Wang Z T, Fang L, Shi W J, Wang K X, Wang D 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **133** 2479
- [62] Belikov R A, Belkovich V M 2007 *Acoust. Phys.* **53** 528
- [63] Au W W L, Floyd R W, Haun J E 1978 *J. Acoust. Soc. Am.* **64** 411
- [64] Au W W L, Moore P W, Pawloski D 1986 *J. Acoust. Soc. Am.* **80** 688
- [65] Au W W L, Branstetter B, Moore P W, Finneran J J 2012 *J. Acoust. Soc. Am.* **131** 569

- [66] Wahlberg M, Jensen F H, Soto N A, Beedholm K, Bejder L, Oliveira C, Rasmussen M, Simon M, Villadsgaard A, Madsen P T 2011 *J. Acoust. Soc. Am.* **130** 2263
- [67] Au W W L, Penner R H, Turl C W 1987 *J. Acoust. Soc. Am.* **82** 807
- [68] Zimmer W M, Tyack P L, Johnson M P, Madsen P T 2005 *J. Acoust. Soc. Am.* **117** 1473
- [69] Madsen P T, Johnson M, de Soto N A, Zimmer W M X, Tyack P 2005 *J. Exp. Biol.* **208** 181
- [70] Kyhn L A, Jensen F H, Beedholm K, Tougaard J, Hansen M, Madsen P T 2010 *J. Exp. Biol.* **213** 1940
- [71] Dible S A, Flint J A, Lepper P A 2009 *Bioinspir. Biomim.* **4** 015005
- [72] Dobbins P F 2007 *Bioinspir. Biomim.* **2** 19
- [73] Graf S, Megill W M, Blondel P, Clift S E 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **123** 3360
- [74] Song Z, Zhang Y, Wei C, Wang X Y 2016 *Phys. Rev. E* **93** 012411
- [75] Wei C, Au W W L, Song Z C, Zhang Y 2016 *J. Acoust. Soc. Am.* **139** 875
- [76] Wei C, Song Z C, Au W W L, Zhang Y, Wang D 2018 *J. Comput. Acoust.* **26** 1850009
- [77] Wei C, Zhang Y, Au W W L 2014 *J. Acoust. Soc. Am.* **136** 423
- [78] Norris K S, Harvey G W 1974 *J. Acoust. Soc. Am.* **56** 659
- [79] Zhang Y, Gao X W, Zhang S, Cao WW, Tang L G, Wang D, Li Y 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 123502
- [80] Dong E Q, Zhang Y, Song Z C, Zhang T Y, Cai C, Fang N X 2019 *Natl. Sci. Rev.* **6** 921

INVITED REVIEW

Biosonar emission characteristics and beam control of odontocetes*

Song Zhong-Chang¹⁾ Zhang Yu^{1)†} Wei Chong²⁾

Yang Wu-Yi¹⁾ Xu Xiao-Hui¹⁾

1) (*Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology of the Ministry of Education, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

2) (*Centre for Marine Science and Technology, Curtin University, GPO Box U1987, Perth WA 6845, Australia*)

(Received 17 March 2020; revised manuscript received 4 May 2020)

Abstract

Odontocetes have evolved for millions of years to own a unique echolocation system. The exceptional performance of odontocetes echolocation system can provide reference to artificial sonar systems, acoustic metamaterials and sound control designs. Research on odontocetes biosonar requires interdisciplinary effort, including acoustics, biology, biomimetics, anatomy, physiology and signal analysis. In this paper, we review odontocetes' biosonar emission process from aspects of anatomy, biosonar signal and beam formation. To begin, computed tomography scanning and ultrasound measurements are combined to reconstruct the sound speed and density distributions. To follow, efforts are thrown to probe into the biosonar signal and its corresponding acoustic behavior. Numerical simulations are used to investigate the odontocetes' biosonar beam formation. The secret of exceptional performance of odontocetes' echolocation system lies in their unique anatomy. Odontocete integrates acoustic structures with different acoustic impedances, namely solid bony structures, air space and soft tissues as a whole emission system to efficiently modulate sound propagation and sound beam formation. These acoustic structures are well organized in the forehead, forming a natural acoustic metamaterial to perform a good control of sounds. These results can enlighten artificial sonar designs.

Keywords: odontocetes, echolocation, biosonar, computed tomography scan

PACS: 43.80.Ka

DOI: 10.7498/aps.69.20200406

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2018YFC1407504) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41676023, 41276040).

† Corresponding author. E-mail: yuzhang@xmu.edu.cn