

小抹香鲸回声定位信号高指向性发声机理*

徐诚湘¹, 夏飞¹, 许延峰¹, 胡青^{1,2}, 桂端²

1. 中山大学海洋工程与技术学院, 广东 珠海 519082
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082

摘要: 齿鲸回声定位信号具有高频高指向性特性, 使其能够精确感知水中目标, 是现代声纳模仿的对象。本文通过分析小抹香鲸 *Kogia breviceps* 头部的几何结构与组织特性, 采用双曲正割折射率材料模拟声速连续变化的额隆, 并利用双曲正割折射率材料的最外侧声线轨迹对额隆的轮廓进行建模。在频域与时域两种模式下, 应用有限元方法对仿真模型的远场指向性展开了分析, 结果表明, 点源经过具有双曲正割梯度折射率的额隆后在开口处形成了平面波, 即额隆起到了准直的作用。通过对远场声压值分区域相关性分析表明, 额隆的准直作用是形成较窄主瓣的主要原因, 气囊和头骨则主要起到抑制旁瓣的作用。

关键词: 小抹香鲸 *Kogia breviceps*; 高指向性; 梯度折射率; 准直作用

中图分类号: P733.2; Q62 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2022)03-0162-09

The high-directivity vocalization mechanism of echolocation signal of the pygmy sperm whale (*Kogia breviceps*)

XU Chengxiang¹, XIA Fei¹, XU Yanfeng¹, HU Qing^{1,2}, GUI Duan²

1. School of Marine Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

Abstract: The echolocation signal of odontocetes has the characteristics of high-frequency and high-directivity, which enables it to accurately sense underwater targets and is the object imitated by modern sonar. In this paper, by analyzing the geometric structure and tissue characteristics of the head of the pygmy sperm whale (*Kogia breviceps*), the hyperbolic secant refractive index material is used to simulate the melon with continuous changing sound velocity, and the contour of the melon is modeled by the outermost sound track of the hyperbolic secant refractive index material. In frequency domain and time domain, the far-field directivity of the simulation model is analyzed by finite element method. The results show that the plane wave is formed at the opening after the point source passes through the melon with hyperbolic secant gradient refractive index, that is, the melon has the function of collimation. By analyzing the correlation of far-field sound pressure values in different regions, it is shown that the collimation of the melon is the main reason for the formation of the narrower main lobe while the air sacs and the skull mainly play the role of suppressing the side lobe.

Key words: pygmy sperm whale (*Kogia breviceps*); high-directivity; gradient index; collimation

* 收稿日期: 2021-03-16

录用日期: 2021-05-21

网络首发日期: 2021-07-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (31500433); 声纳技术国防科技重点实验室基金 (6142109180101)

作者简介: 徐诚湘 (1994年生), 男; 研究方向: 物理海洋学; E-mail: xuchx8@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 胡青 (1974年生), 男; 研究方向: 声纳总体技术; E-mail: huqing3@mail.sysu.edu.cn

研究表明, 齿鲸具有定位百米外厘米级的目标并识别目标材质的能力^[1], 这种优异的性能源于齿鲸回声定位信号的时空特性。时间上, 齿鲸的部分种类能发出持续时间极短的回声定位信号, 其中心频率可以达到100 kHz以上, 具有很高的时间分辨率。空间上, 齿鲸的回声定位信号具有较窄的空间指向性, 其主瓣波束宽度分布在 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ^[2], 具有较高的空间分辨率。

人们最早于1960年对齿鲸回声定位信号的时空特性开展研究^[2]。空间特性上, 文献[3]归纳了几种齿鲸的主瓣宽度, 其中白鲸垂直和水平主瓣宽度均为 6.5° , 伪虎鲸的垂直和水平主瓣宽度分别为 9.7° 和 6.2° 。时频特性上, 文献[4]测量了中华白海豚回声定位信号的峰值频率为109 kHz, 脉冲持续时间约为22 μs 。目前研究表明大部分齿鲸的回声定位信号都具有类似的高频高指向性特性。1980年以后人们开始关注其发声机理, 主要是采用解剖形态学、断层扫描、仿真建模等方法, 对齿鲸头部生理结构及其对声传播的作用进行研究。文献[5]通过测量伪虎鲸不同距离处的声压值并与球面波扩散的解析结果对比, 认为齿鲸的额隆具有聚焦的效果。文献[6]对宽吻海豚与鼠海豚进行了仿真模拟, 在声波由近场到远场的传播过程中未发现聚焦区域, 反驳了额隆聚焦的假说。文献[7]将白暨豚的头部结构简化, 并分别对无额隆、无头骨、无气囊和全结构进行了仿真模拟, 通过相关性分析认为头骨与气囊是形成高指向性主瓣的主要因素, 而额隆几乎不起作用。在不同种类的齿鲸的仿真研究中, 如小抹香鲸 *Kogia breviceps*^[8]、江豚^[9]等也得到了相似的结论。目前研究普遍认为, 齿鲸前额的气质结构、骨质结构及软组织在声传播过程均起到了不同的作用^[10], 但仍未有明确的结论, 尤其是额隆组织。

近年来, 人们多采用时域方法研究声波在头部生理组织中的传播过程, 但由于时域计算量大, 通常只能得到近场的结果, 这与实际测量时多为远场不相符; 其次额隆为软组织, 其密度与声速呈现渐进的连续分布^[11], 而现有研究通常将其建模为几个具有不同参数的区域的组合, 这种建模过于简化不能完全反映声波传播的精细结构; 最后以往的研究没有关注生物组织的几何结构外形, 而外形或边界对声传播往往具有较大的影响。

本文受小抹香鲸头部断层扫描结果的启发, 采用连续变化的双曲折射率材料模拟额隆的声速

分布, 采用空气与铝的材料属性分别模拟气囊与头骨组织, 之后应用有限元方法对小抹香鲸头部结构进行了仿真建模, 分析了频域与时域下, 声波传播规律及各生物组织对声传播所起的作用, 最后给出了小抹香鲸回声定位信号形成空间高指向性的新的理论解释。

1 点源声场传播模型

声源指向性的形成与声场传播特性息息相关。在均匀声场及高频条件下, 声线沿直线传播, 并在远场相干叠加, 从而形成幅度上的空间分布特性, 即指向性。通常声源的尺度越大并且在远场能实现同相相加, 则声波能量更聚集, 指向性越强。在非均匀声场条件下, 如果也能在远场实现同相相加, 则也能够获得较高的指向性。

文献[6]中鼠海豚、文献[9]中江豚与文献[10]中小抹香鲸有限元模型的声源均直接采用点声源进行简化模拟。这是因为齿鲸通过右声唇发出回声定位信号^[12], 声唇尺寸明显小于信号波长, 所以可以将齿鲸发声的声源简化为点声源^[13]。点源的波阵面为球面, 所以不具有指向性, 然而可以通过点源与传播介质的组合, 使得声波在传播介质的出射面上形成波阵面为平面的平面波, 从而在远场形成较高的指向性, 这是因为出射的平面波在远场主轴方向一定是相干叠加的。声学上通常采用声透镜实现声波聚焦, 反过来当声源位于声透镜焦点时就可以得到出射的平面波, 如图1所示, 其基本原理是通过声透镜的折射使入射的发散声线变换成出射的平行声线, 从而得到等相位的平面波。

另外也可以通过梯度折射率材料连续改变声线轨迹, 使得在出射面上仍然形成平面波。常用的有双曲正割折射率梯度材料, 其沿 y 轴折射率梯度变化满足双曲正割函数如式(1)^[14], 其中 n_0 为 z 轴上的折射率, α 为梯度系数。人们解析的求解出了双曲正割函数形式的梯度折射率材料中声线轨

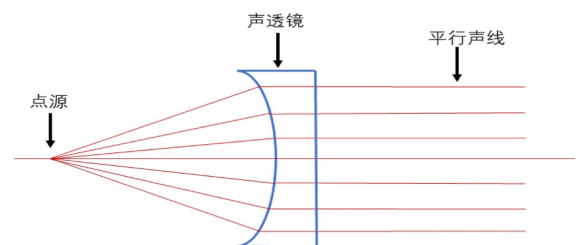


图1 声透镜示意图

Fig. 1 Schematic diagram of acoustic lens

迹公式如式(2),发现声线具有汇聚与形成平行线的特性^[15],其中 u_0 为 $z=0$ 时的双曲空间, \dot{u}_0 为 u_0 对 z 的求导, H_a 和 H_r 分别为轴向射线与场射线的位置, y 、 z 为梯度材料的二维坐标值。当参数设置为 $\alpha=6.5$,可得到图2(a)中的声速分布与图2(b)中的声线轨迹,即当一束声线于焦点处发射,声线会向着折射率高(z 轴上折射率最高)的方向弯曲,在距离一个焦距 $f=2\pi/\alpha$ 时,发散声线会变为平行于 z 轴的平行声线,即得到了平面波。

$$n(y) = n_0 \operatorname{sech}(\alpha y), \quad (1)$$

$$y = \frac{1}{\alpha} \sinh^{-1} [u_0 H_r(z) + \dot{u}_0 H_a(z)], \quad (2)$$

$$u_0 = \sinh(\alpha y_0), \quad \dot{u}_0 = \frac{du_0}{dz}, \quad (3)$$

$$H_r(z) = \cos(\alpha z), \quad H_a(z) = \sin(\alpha z)/\alpha. \quad (4)$$

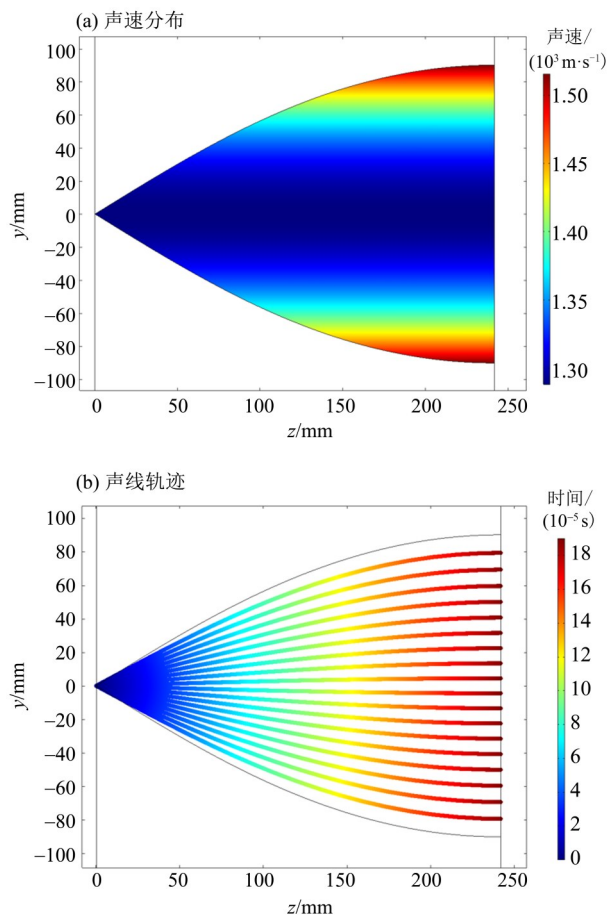


图2 梯度折射率材料

Fig. 2 Gradient-index material

由上可知,声透镜与梯度折射率材料均能在点源条件下,通过传播介质的作用使得在出射面处得到平面波,但两者之间仍存在着差异。一是声透镜的材料属性(折射率)是固定的,其内部

声线为直线,通过透镜曲率与入射角的适配实现声线的偏转,其在声线传播过程中属于介质突变,会形成较大的反射,不利于声波的透射;而梯度折射率材料的折射率是连续变化的,声线轨迹为曲线,通过介质折射率的累积与入射角的适配实现声线的偏转,这种材料属性连续变化的特性更符合生物软组织的构成,同时也更有利于声波的透射。二是声透镜在与声传播相垂直的方向上具有狭长的结构形式,而梯度折射率材料总体上与声传播方向保持一致,且边界轮廓为双曲线形式,更符合一般生物软组织的外形轮廓。

2 小抹香鲸头部仿真建模

齿鲸类动物头部通常具有类似的气质结构、骨质结构及具有声速与密度梯度变化的额隆。小抹香鲸、中华白海豚是典型的齿鲸类动物。目前通过对小抹香鲸头部的断层扫描,可以获得较为详细的声速、密度分布,本文受断层扫描结果的启发,对小抹香鲸前额系统的结构及组织特性进行仿真建模研究^[11]。众所周知,影响声传播的主要因素是声阻抗,而声阻抗是声速与密度的乘积,通常声速决定了相位分布,而密度决定了幅度分布,因此研究生物组织的声阻抗分布是分析声场传播特性的关键。小抹香鲸软组织额隆的声速分布与密度分布具有一致性,额隆声速越大的地方,其密度也越大。

小抹香鲸的回声定位信号属于高频信号,峰值频率在60~160 kHz^[8],满足几何声学近似条件。对非均匀介质中的波动方程作高频近似,可得到式(5)程函方程与式(6)输运方程^[16]

$$(\nabla S)^2 = n^2(\mathbf{r}), \quad (5)$$

$$2\nabla S \cdot \nabla A = A\nabla S \cdot \nabla \ln \rho(\mathbf{r}) - A\nabla^2 S, \quad (6)$$

其中 S 为声程函数, A 为振幅函数。程函方程描述的是声线轨迹与传播时间(相位)的关系,只与声折射率 $n(\mathbf{r})$ 相关,而输运方程描述的是能量沿声线的传递方式,与密度的非均匀性 $\nabla \ln \rho(\mathbf{r})$ 有关。声波从非均匀介质入射到水中,其在界面上的振幅及相位分布决定了远场的指向性。小抹香鲸额隆密度变化范围为900~1 000 kg/m³,对声波幅度均匀性的影响很小,对指向性几乎不起作用^[17],因此本文在分析额隆对声场指向性的影响时,忽略其密度分布的渐进变化特性,采用常值替代。

小抹香鲸额隆的声速梯度分布如图3(a)所

示^[11], 呈现出明显的二维渐变特性。提取额隆的外部轮廓特征, 如图3(b)所示, 可以看出大致呈现双曲线的形式。基于额隆内部声学属性及外部轮廓结构特征, 这里采用双曲正割梯度折射率材料属性对额隆进行建模, 如图3所示(c)。双曲正割折射率材料的密度为 $\rho=1\ 000\ \text{kg/m}^3$, 同时将式(1)中参数设置为 $n_0=1$, $\alpha=6.5\ \text{m}^{-1}$, $u_0=0$, $\dot{u}_0=0.62$ 。比较图2(a)与图3(a), 可以看出图2(a)中的声速分布只沿 y 轴有梯度变化, 沿 z 轴没有梯度变化, 与真实的小抹香鲸额隆声速分布不完全一致, 为此在图2(a)的基础上, 沿 z 轴方向施加平方律加权, 得到声速的两维分布, 如图3(c)所示, 其与图3(a)中额隆声速分布更为接近。

通常额隆周围紧贴有气囊与头骨组织, 其几何外形与额隆的外部轮廓一致, 因此气囊与头骨

建模为具有一定厚度与额隆外部轮廓一致的薄层结构。气囊采用空气模拟, 其密度 $\rho_a=1.29\ \text{kg/m}^3$, 声速 $v_a=330\ \text{m/s}$ 。头骨与铝的材料属性接近, 因此采用铝模拟头骨, 其密度 $\rho_m=2\ 700\ \text{kg/m}^3$, 弹性模量 $E_m=70\ \text{GPa}$, 泊松比 $\mu_m=0.33$ 。

3 频域分析

齿鲸回声定位信号频率高, 时域计算量大, 通常计算半径略大于齿鲸头部^[9], 此时仍属于近场。为了得到更符合实际的远场指向性, 可以先通过频域计算得到近场的声压分布, 再通过基尔霍夫积分公式得到远场指向性。假设点源辐射 $100\ \text{kHz}$ 的单频信号, 其近场声压如图4(a)所示, 可以看出点源的声波经过双曲正割梯度折射率材料的作用后, 由初始的球面波传播逐渐在开口处形成近似平面波。开口处的声压相位如图4(b)所示, 可以看到在开口处 y 坐标为 $-90\sim 50\ \text{mm}$ 的范围内, 声压相位波动幅度较小, 近似为常数。在靠近气囊边界处的区域相位起伏较大, 这是由于气囊声阻抗远远小于额隆的声阻抗, 导致反相反射, 使得边界处的总声场很小, 因此相位起伏变大。总体上额隆把点源球面波转换成出射的平面波, 起到了准直的作用。

为了证实额隆所起的作用, 计算了在无额隆情况下(采用水的材料属性替代额隆)的声场分布, 如图5所示。图5(a)中点源以球面波传播的形式通过无声速梯度变化的水体, 在开口处并未形成平面波。开口处的声压相位如图5(b)所示, 声压相位波动剧烈, 说明只靠气囊及骨质结构无法起到准直作用。

为了进一步研究各结构的作用以及准直作用对远场指向性的影响, 对小抹香鲸的简化结构在无气囊、无额隆、无头骨及全结构4种情况下进行了仿真, 去除的各结构均由水代替其材料属性。4种情况的远场指向性如图6示, 其中全结构的主瓣宽度为 4.88° , 与真实鲸类的主瓣宽度较为一致^[3]。在无气囊的情况下, 主瓣形状与全结构的主瓣形状基本一致, 主要差异在无气囊的上半部分的旁瓣显著大于全结构的旁瓣, 说明气囊在小抹香鲸的指向性形成中主要起到抑制上半部分旁瓣的作用。在无额隆的情况下, 主瓣不明显, 旁瓣明显, 说明额隆对主瓣的形成及旁瓣的抑制均起到了重要作用。在无头骨的情况下, 下半部分旁瓣明显但上半部分旁瓣极小, 说明头骨起了遏制了下半部分旁瓣的作用, 但却使得上半部分旁瓣增大。

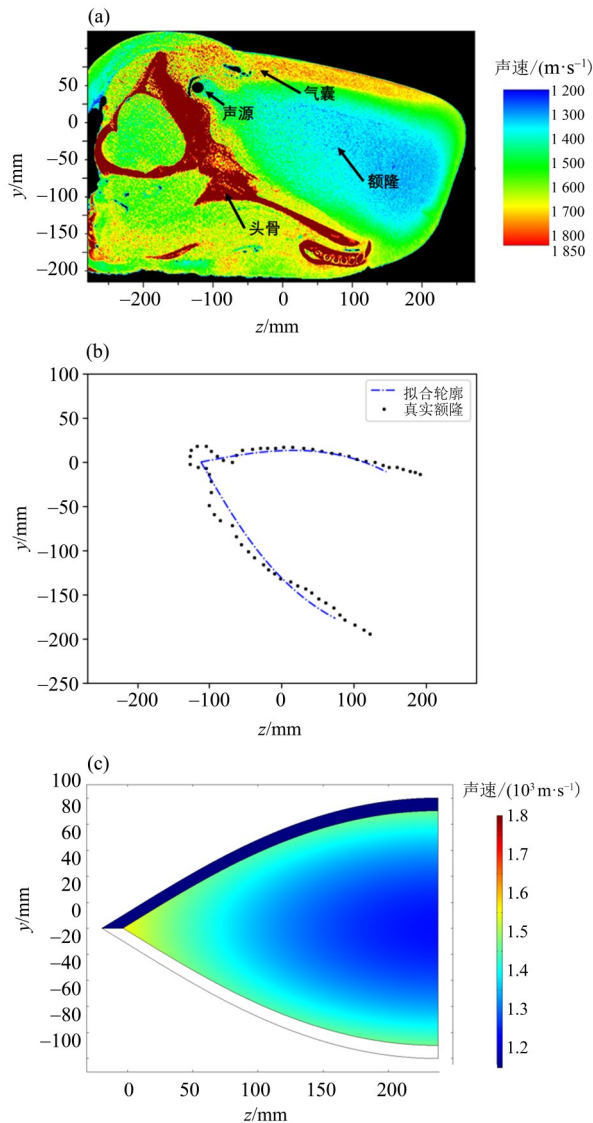


图3 二维声速分布图

Fig. 3 Two-dimensional sound velocity distribution

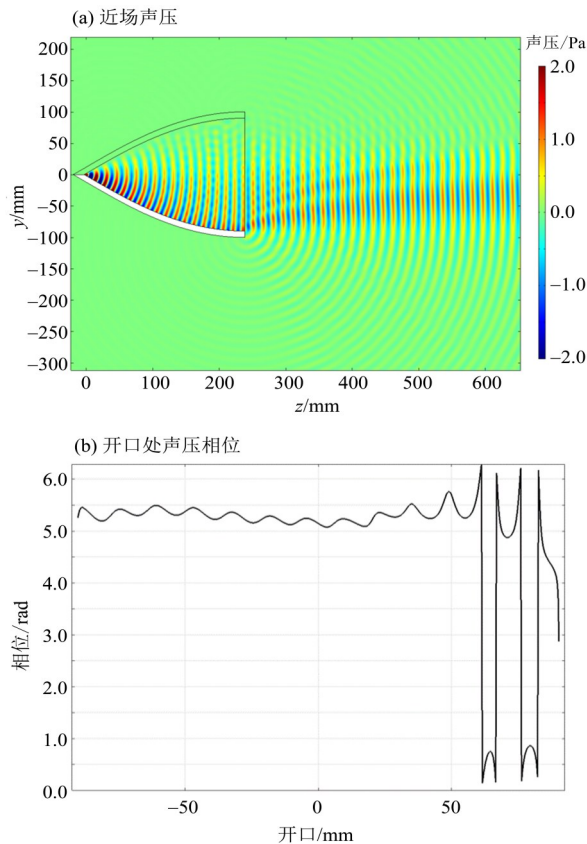


图4 完整结构的近场声压

Fig. 4 Near-field sound pressure of complete structure

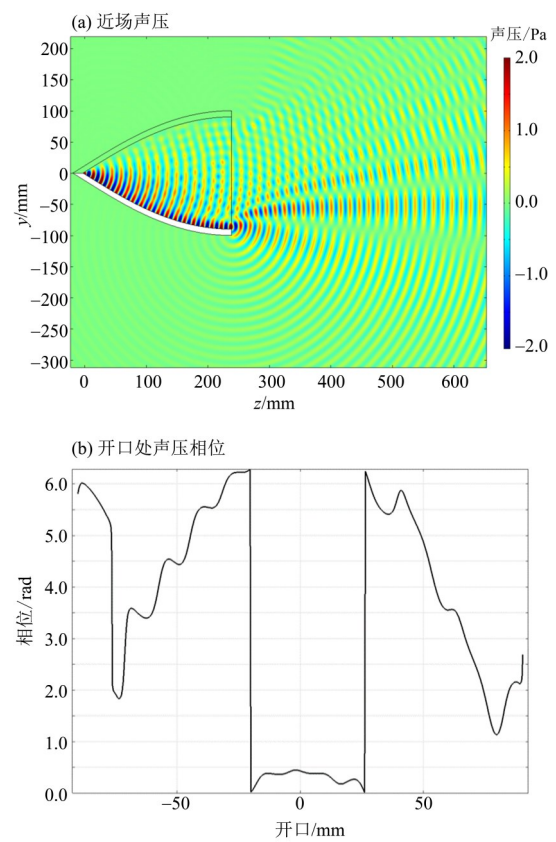


图5 无额隆时的近场声压

Fig. 5 Near-field sound pressure in the case of no melon

4 相关性分析

目前研究对额隆在指向性形成中所起到的作用还存在着较大分歧^[10]。文献[7]比较了白鬻豚3个不完整模型与全结构模型的远场声压相关系数,以此来说明额隆在远场指向性形成的过程所起作用不如气囊与头骨。为了进一步说明额隆、气囊、头骨在指向性形成中所起作用的不同程度,通过相关性分析对各结构所起的作用进行辨识。相关系数是衡量两个变量间相似或关联程度的量,声压相关系数 r 计算公式^[9]

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}}, \quad (7)$$

其中 p_i 是缺少某部分结构模型的远场声压值, P_i 是全结构模型的远场声压值, \bar{p} , \bar{P} 分别是缺少某部分结构和完整结构的远场声压均值。由前面的研究结果可知,小抹香鲸头部各个结构所起作用存在明显差异,气囊在指向性形成中主要起到抑制上半部分旁瓣的作用,头骨起到抑制下半部分旁瓣的作用,额隆起到了准直作用。尽管在图6(d)

全结构指向性图中主瓣空间分布占比很小,但其却决定了声波能量传播的主要方向,因此必须把远场的声压划分为上半部分旁瓣、下半部分旁瓣及主瓣3个区域分别进行相关性研究,而不能不加区分地对待。

表1给出了不同区域下缺少某部分结构与全结构远场声压值的相关系数。在下半部分旁瓣($-90^\circ \sim -5^\circ$)列中,无额隆情况与全结构的相关系数最高,说明了额隆对下部分旁瓣几乎不起作用,而无头骨情况与全结构的相关系数为负数,呈负相关,说明头骨对抑制下部分旁瓣起主要作用。在上半部分旁瓣($20^\circ \sim 90^\circ$)列中,无额隆情况与全结构的相关系数最高,说明额隆在抑制上半部分旁瓣的贡献较小,而无气囊与全结构的相关系数最小,说明气囊对抑制上半部分旁瓣起重要作用,无头骨与全结构相关系数较小,说明头骨形成的二次声源对上半部分旁瓣也具有重要影响。在主瓣($-5^\circ \sim 20^\circ$)列中,无额隆情况与全结构的相关系数最小,说明了额隆对主瓣的形成起主导作用。在表1全范围($-90^\circ \sim 90^\circ$)列中,与文献[7]结果相似,无额隆情况与全结构的相关系数最高,这并不说明额隆对全结构的远场指向性影响

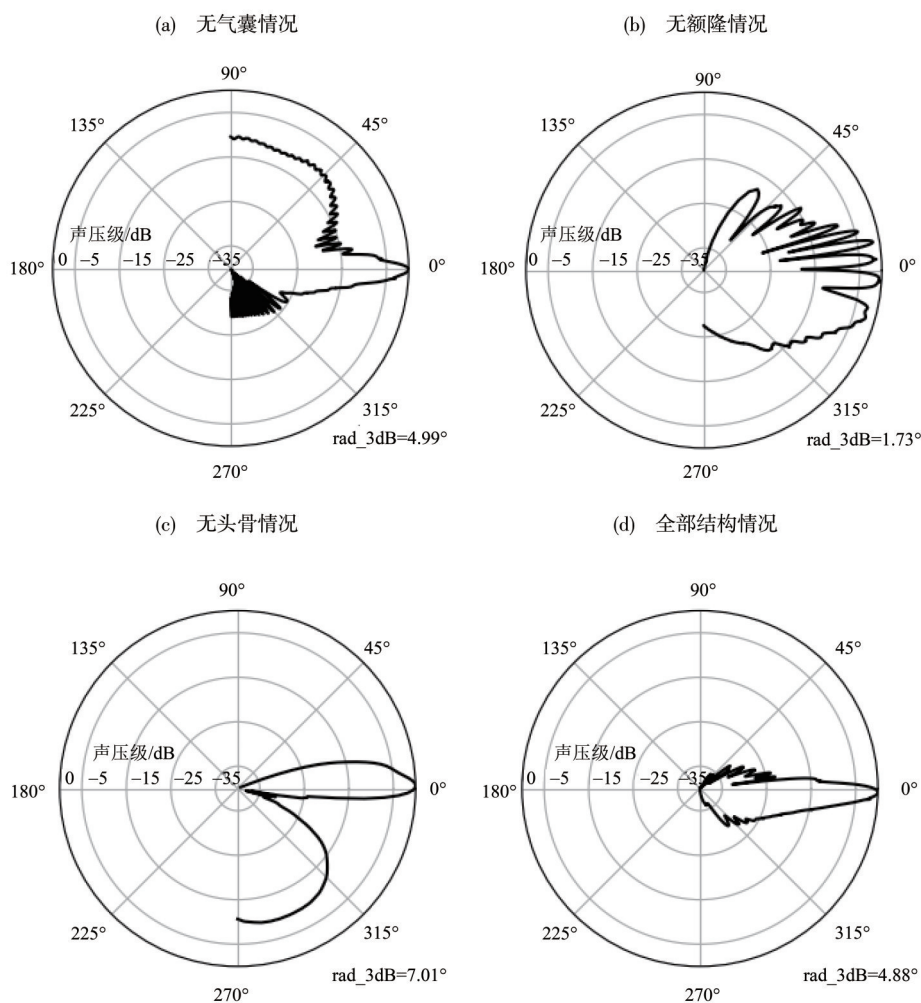


图6 不同情况的远场指向性图

Fig. 6 Far-field directivity in different situations

小, 而是因为主瓣角度很小使其在全部指向性图中角度占比很小, 从而导致其权重很小所致, 这

也是文献[7]中不分区域进行缺少部分结构与全结构的相关性分析不合理之处。

表1 不同范围内的相关系数

Table 1 Correlation coefficients in different ranges

头部情况	下半部分旁瓣 (-90° ~ -5°)	主瓣 (-5° ~ 20°)	上半部分旁瓣 (20° ~ 90°)	全范围 (-90° ~ 90°)
无额隆	0.91	0.38	0.89	0.89
无气囊	0.77	0.97	-0.48	0.01
无头骨	-0.82	0.66	-0.05	0.51

通过对远场声压值分区域进行相关性分析, 可以发现气囊、头骨及额隆对远场指向性的各个区域有着不同程度的影响, 额隆对远场指向性的影响是形成较窄的主瓣, 而气囊以及头骨主要是抑制上下半部分的旁瓣。

5 时域分析

通过以上频域分析得到了各结构对远场指向

性的影响, 还可采用时域方法得到声波在小抹香鲸头部及水中的传播过程, 进一步分析额隆内部组织属性及外部轮廓结构对声场传播效应及远场指向性的影响。小抹香鲸声唇发出的短脉冲 $Q(t)$ 可用公式 (8) 模拟^[8]

$$Q(t) = \begin{cases} A_0 e^{\alpha_0 t} \sin 2\pi f_0 t, & 0 \leq t \leq t_0, \\ A_1 e^{(\alpha_1 t + \alpha_2 t_1)} \sin 2\pi f_0 t, & t_0 \leq t \leq t_2, \end{cases} \quad (8)$$

其中参数设置为: 脉冲幅值 $A_0=A_1=1$, 衰变参数 $\alpha_0=3\ 600$, $\alpha_1=-3\ 200$, $\alpha_2=3\ 200$, 峰值频率 $f_0=100$ kHz, 脉冲发出到峰值时间 $t_0=4/f_0$, 衰减阶段时延 $t_1=9/f_0$, 脉冲发出到结束时间 $t_2=16/f_0$ 时, 可得如图 7 所示的短脉冲波形及频谱。

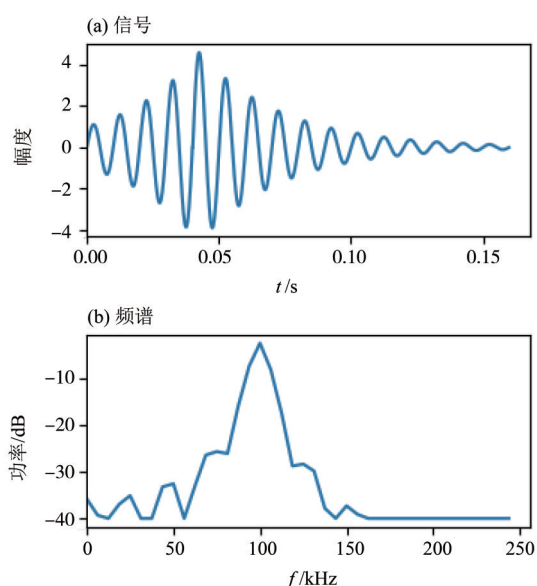


图 7 短脉冲时域信号及频谱

Fig. 7 Time-domain signal and spectrum of short pulse

通过时域仿真得到了短脉冲信号由小抹香鲸头部额隆到水中的传播过程, 如图 8 所示。图 8(a) 中短脉冲信号最初以球面波的形式扩散。图 8(b) 中波阵面的曲率在传播过程中由大变小, 这是由于额隆两侧的声速高于中心的声速, 声线向中心低声速区域弯曲所致。图 8(c) 中声波到达开口处, 波阵面已近似为平面, 即在开口处形成了等相位的平面波。开口处还产生了以头骨右端点为圆心的二次声源球面波, 这是由于声学边界突变所致。图 8(d) 中声波进入水中后, 在声波主体的上下半部分均发生了干涉现象(对应旁瓣区域), 这是由于在头骨右端点产生了二次声源并与出射的平面波相干叠加所致, 同时也验证了相关性分析中, 头骨不仅抑制了下半部分旁瓣, 也会对上半部分旁瓣产生影响。图 8 的传播过程与文献[8]不同的是, 图 8(c) 开口处形成的是一束平面波, 而文献[8]在开口处及水中形成了分散的几束声波, 造成这种不同的主要原因是, 文献[8]中采用了 3 块具有不同声阻抗值的区域来模拟声阻抗连续渐进分布的额隆区域, 使得额隆折射率不满足连续变化的双曲正割分布, 破坏了声线弯曲的一致性, 等相位面发生畸变, 最后起不到准直的作用。理论

上在气囊的右端点也会产生二次声源, 但由于气囊是声学软边界, 边界处的声压很小, 产生的二次声源也很小, 因此可以忽略不计。

也可以通过时域的方法验证额隆所起的准直作用, 为此模拟了无额隆情况下声波的传播过程, 如图 9 所示。图 9(a) 中点源发出短脉冲后近似以球面波形式扩散, 这是因为头骨前端边界可以近似为圆锥边界, 声波的波阵面与头骨前端边界近似垂直, 没有反射。当声波到达图 9(b) 所示位置时, 额隆下半部分边缘处开始出现声波反射, 这是由于头骨后端边界不再继续保持圆锥形式(而是双曲形式), 使得声波的波阵面与边界不再垂直, 开始形成反射。图 9(c) 在开口处并未形成如图 8(c) 所示的相位近似相等的平面波, 同时由于头骨边界反射, 波阵面的下端也偏离了球面波。当声波继续传播到水中时, 如图 9(d) 所示, 声波分散成几个由于反射叠加所导致的不连续的声束, 且下半部分声波能量较大, 上半部分声波能量较小, 这也与图 6(b) 无额隆情况下的频域远场指向性图相一致。通过时域对比分析表明, 只靠气囊及骨质结构无法起到准直作用, 且当额隆内部存在明显反射时, 很难在开口处形成平面波, 同时由于干涉作用容易导致出射声波分叉, 进而影响高指向性的形成。

通过全结构和无额隆的时域分析, 验证和解释了频域的远场指向性结果, 进一步说明了额隆在远场指向性中起到了准直的作用, 头骨主要起了抑制下部分旁瓣的作用, 而头骨端点处的二次球面声源是影响上下半部分旁瓣形状及不对称的重要原因。

6 结论

本文根据小抹香鲸断层扫描的声速渐进分布的特性, 采用双曲正割折射率材料模拟声速连续变化的额隆, 并利用双曲正割折射率材料的最外侧声线轨迹对额隆的轮廓进行建模, 这种建模方式更符合小抹香鲸的生理特征, 更关注于额隆连续变化的声速特性在形成远场指向性中所起的作用。频域分析表明, 具有双曲正割折射率的额隆使点源在开口处形成了相位一致的平面波, 起到了准直作用。通过 4 种情况的远场指向性图的比较, 说明气囊在远场指向性形成中主要起抑制上半部分旁瓣的作用, 头骨主要起遏制下半部分旁瓣的作用。分区域相关性分析表明, 额隆在声传播过程中主要起到准直作用, 并因此形成较窄的

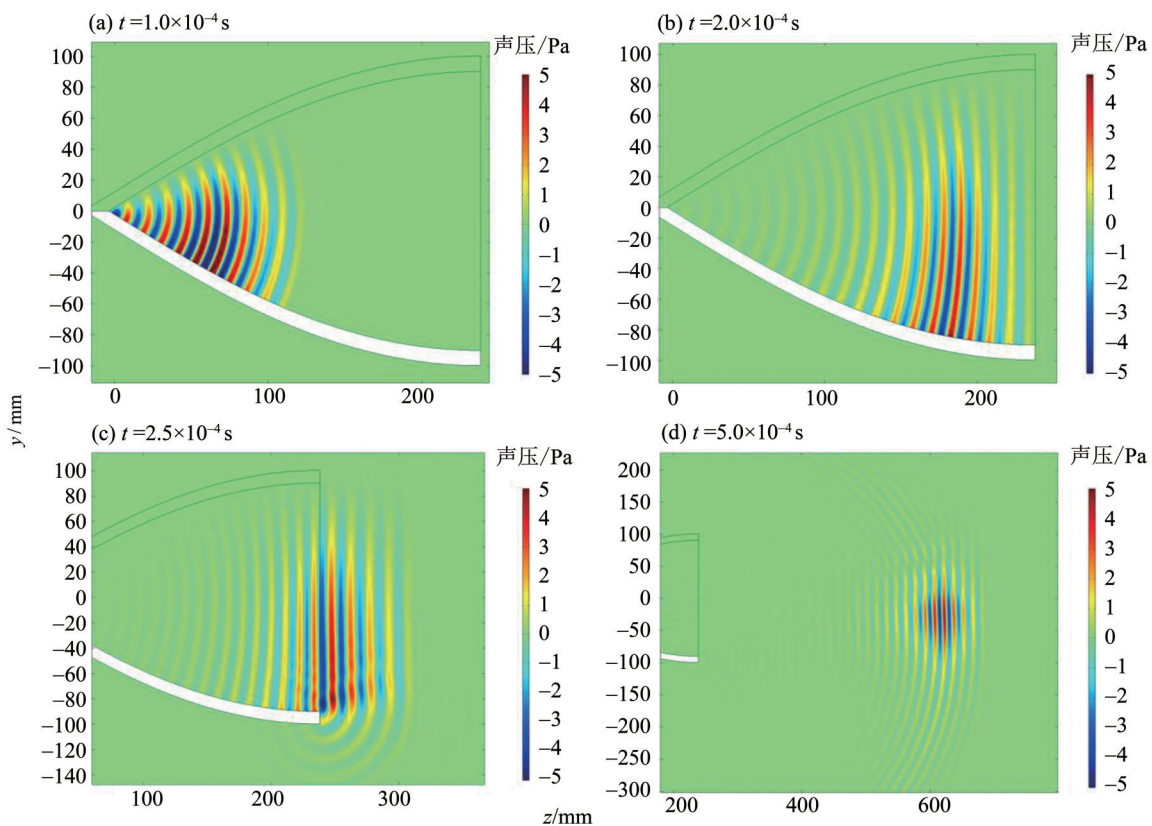


图 8 完整结构的声波传播过程

Fig. 8 Sound wave propagation process of complete structure

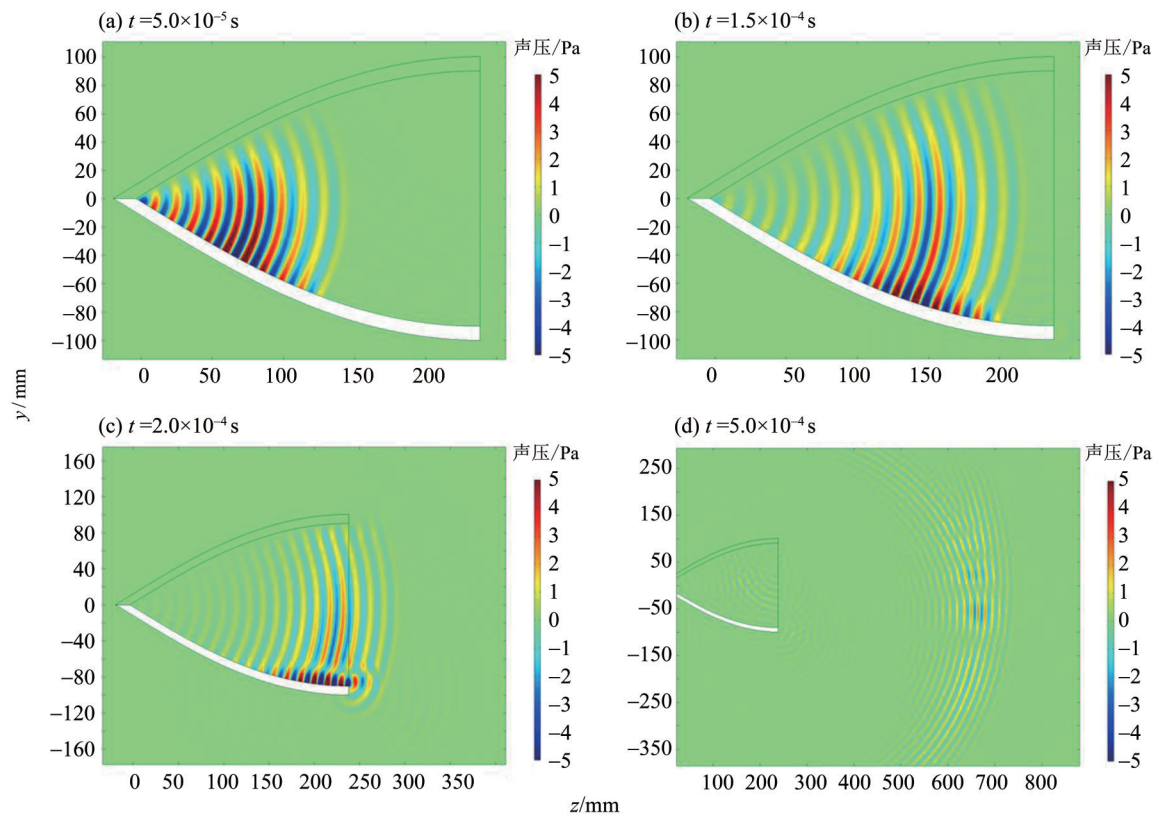


图 9 无额隆情况的声波传播过程

Fig. 9 Sound wave propagation process in the case of no melon

主瓣。最后时域分析验证了频域得到的结论,同时表明额隆内部不应存在较大的反射,且反射并不是小抹香鲸回声定位信号高指向性形成的原因。

本文提出并验证了小抹香鲸额隆所起的准直作用,分析了准直作用是形成较窄主瓣的原因,并指出额隆的准直作用主要源于其声速连续变化的特性。该结论与文献[10]中额隆作用存在不同主要是因为额隆的仿真模拟方式不同。文献[10]中将额隆划分为声速不同的区域仿真模拟,由于

声速划分的区域数较少,声波经过的不同声阻抗分界面少,并且各区域间的声阻抗差异也不大,导致额隆的声学折射功能几乎起不到调控声波的作用,因此认为额隆基本不起作用或只起波导作用。本文通过以上结论最终揭示了小抹香鲸回声定位信号高指向性形成的机理,研究结果可以为高指向性发声装置提供参考,也可为进一步探究小抹香鲸回声定位信号的接收机理开拓思路,进而为仿生声纳研制提供理论支撑。

参考文献:

- [1] AU W W L. The sonar of dolphins [M]. New York: Springer Science & Business Media, 1993.
- [2] 方亮. 中华白海豚和长江江豚回声定位信号特征研究 [D]. 武汉:中国科学院大学,2015.
- [3] AU W W L, KASTELEIN R A, RIPPE T, et al. Transmission beam pattern and echolocation signals of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 106 (6): 3699-3705.
- [4] FANG L, LI S, WANG K, et al. Echolocation signals of free-ranging Indo-Pacific humpback dolphins (*Sousa chinensis*) in Sanniang Bay, China [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 138 (3): 1346-1352.
- [5] KLOEPPER L N, BUCK J R, SMITH A B, et al. Support for the beam focusing hypothesis in the false killer whale [J]. Journal of Experimental Biology, 2015, 218(15): 2455-2462.
- [6] WEI C, AU W W L, KETTEN D R, et al. Sound propagation in the near and far-field of a broadband echolocating dolphin and a narrowband echolocating porpoise [C]//Proceedings of Meetings on Acoustics 5ENAL. Acoustical Society of America, 2019, 37(1): 010003.
- [7] WEI C, AU W W L, SONG Z, et al. The role of various structures in the head on the formation of the biosonar beam of the baiji (*Lipotes vexillifer*) [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2016, 139 (2): 875-880.
- [8] SONG Z, ZHANG Y, THORNTON S W, et al. The influence of air-filled structures on wave propagation and beam formation of a pygmy sperm whale (*Kogia breviceps*) in horizontal and vertical planes [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 142(4): 2443-2453.
- [9] WEI C, SONG Z, AU W W L, et al. A numerical evidence of biosonar beam formation of a neonate Yangtze finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis*) [J]. Journal of Theoretical and Computational Acoustics, 2018, 26(2): 1850009.
- [10] 宋忠长,张宇,魏翀,等. 齿鲸生物声纳发射特性与波束调控研究 [J]. 物理学报, 2020, 69 (15): 154301-1-154301-12.
- [11] SONG Z, XU X, DONG J, et al. Acoustic property reconstruction of a pygmy sperm whale (*Kogia breviceps*) forehead based on computed tomography imaging [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 138(5): 3129-3137.
- [12] MADSEN P T, LAMMERS M, WISNIEWSKA D, et al. Nasal sound production in echolocating delphinids (*Tursiops truncatus* and *Pseudorca crassidens*) is dynamic, but unilateral: Clicking on the right side and whistling on the left side [J]. Journal of Experimental Biology, 2013, 216(21): 4091-4102.
- [13] WEI C, AU W W L, KETTEN D R, et al. Biosonar signal propagation in the harbor porpoise's (*Phocoena phocoena*) head: The role of various structures in the formation of the vertical beam [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(6): 4179-4187.
- [14] LIN S C S, HUANG T J, SUN J H, et al. Gradient-index phononic crystals [J]. Physical Review B, 2009, 79(9): 094302.
- [15] GOMEZ-REINO C, PEREZ M V, BAO C. Gradient-index optics: Fundamentals and applications [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2002.
- [16] 程建春. 声学原理 [M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [17] GAO X, ZHANG Y, CAO W, et al. Acoustic beam control in biomimetic projector via velocity gradient [J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(1): 013505.