



关于海洋生物声学研究中若干声学问题的讨论

邱永德

(无锡99信箱)

海洋生物声学是一门具有广阔前景的边缘学科,受到国内外有关学者广泛的重视。本文拟对开展海洋生物声学研究中的几个基本声学问题作初浅讨论。

一、海洋中的声场与质声场

深入研究并正确解释一系列海洋生物声学问题需要了解海洋中的声学环境。在海洋空间内,存在着多种的物质运动形式,除了一些不确定的短暂的扰动因素外,大量是属于流体动力学现象,如风、浪、流、潮等物理过程所引起的流体运动和物体在海水中运动时所产生的流体扰动。声振动只是这些运动形式之一,而且往往伴随其他运动形式同时出现。

纳维-斯托克斯方程可描述流体中各种形式的流体运动过程,而波动方程则用于描述声振动规律。后者包含于前者之中,而且可从前者加上简化条件导出后者来。实验也证明声振是流体动力学现象的一部分,而且并非独立地存在。建立这个概念对研究海洋生物的声学行为以及它们的声刺激和非声刺激感觉器官的特性时是十分重要的。

波动方程适用于描述不稳定(或具有定常流)介质中微小的介质质点运动过程。这种运动使介质产生扰动,它以声音的速度将能量传递给邻近质点,并以波的形式将能量传播到周围空间去。这就是声波。但是,并非所有水介质质点运动都属声现象,海洋中还有许多以非声速影响扰动源附近的质点并使之产生运动的其他流体运动形式。这类运动形式没有能量传至远方。在海洋生物声学研究中,我们需要对这两类运动形式加以区别。

海洋中所有不定常流场都会产生压力起

伏,它可以是时间上调和的(如周期性流场),或是完全随机的。这些压力变化通常伴随流动“噪声”。流动“噪声”并不都是实声现象,它包含两个不同的场:即声场和质声场。声场就是属于那类有能量以声音速度用波的方式传递到空间去的运动形式,而质声场则属于能量传递至远方去的一类。在湍流中,这两种场必同时存在。在声场和质声场内,用压力传感器均可测到压力的变化,但这是两种完全不同的压力。声场内的压力使质点运动是以声速进行的,而质声场的压力却以非声音速度使质点位移而运动。在远场区,声场内的压力随离声源中心的距离成反比下降,而质声场内的压力则接近与离扰动源距离的平方成反比变化。这种差异的原因,主要是由于在质声场内的压力变化几乎被流体运动加速度所平衡而引起的。

大量研究结果表明,许多海洋生物具有两种感觉器官系统,一是对压力敏感,二是对介质质点位移变化敏感。例如,大部分鱼类的内耳,半规管属于前者,而其侧线系统则对质点位移变化具有极高的灵敏度。据研究,其位移检测阈可达 $20-25$ 埃(1 埃= 10^{-8} 厘米)。我们有理由推测,鱼类有这两种感官,就有可能区别声场和质声场的刺激,或是依据能量传递速度,或是从压力梯度,或是由压力与位移两个数据经某种信息处理系统所得到的信息。利用压力与位移的相对幅度和相位来确定源的方位和物理特性,这在理论上是完全成立的,特别是鱼类具有灵敏的位移检测器官,更加强其有定位定向能力的推测。

声场的生物学意义主要在远场区,而质声场则主要在近场范围内起作用。自然,在近场区内声场也是同时存在的。除风、浪、流、潮

等引起的流动噪声外，海洋生物在游动时，其头、尾、鳍部的急剧活动也会产生流动噪声，从而使生物相互取得彼此活动信息。实验证明，鱼类在游动中突然改变方向时会使远处另一部分鱼类受到影响。生物发声器官所发出的声音与鳔体积有关，但是这种声音也是伴随流动噪声的。有人曾在声诱鲱鱼群时向水中注放气泡流提高了诱捕效果，这就说明流动噪声对某些生物声学行为是有一定意义的。

在流动噪声中，声场是由那些具有超声相速的波元所构成，而具有亚声速的波元形成静声场。任何有限场均可看作是许多波元的叠加，而波动速度则取决于起主导作用的流速。水流速度必定是极低的（在十分低的亚声速范围内），因而只有少数的超声速分量。由此可见，从辐射声能的角度看，流体运动是一个效率相当低的过程。当流动噪声作为生物群活动过程中伴随产生的现象时，它是一种有用信息，例如某些浮游生物群活动时发出流动噪声，鱼类会跟踪集群。当流动噪声影响生物的信息传递时，则就是一种干扰源，它可以使原来的信号在另一处完全认不出来，即产生所谓“相加性失真”。

二、海洋中生物声的近场与远场

一个大的物体可以看作是点的集合，整个物体在海水中运动时所产生的声音可相应地看成是点声源按其统计分布规律的叠加，因此点源的概念在海洋生物声学研究中是极为重要的。单个生物在海洋中发出的声音可理想化为一个球体在海水中运动时产生的声音，由此定性地导出反映生物声物理特性的主要参数之间的关系，将是很有意义的。如果球体尺寸远小于一个波长，就可以当作点源来处理。要着重说明的是，在生物声学研究中，所谓点源并不一定都是指单极源，它也可以是多极源，而多极源可看作是单极源的集合，对此也可用叠加原理。

用来描述介质声学特性的波阻抗的概念是一个可解释许多生物声学问题的重要参数。在平面声波中，波阻抗是一常数，由于它只依赖

于介质的物理特性，因此也叫特性阻抗。在球面波和柱面波中，波阻抗是一变量，它等于声压对质点速度比，波阻抗的变化可反映出声能外传的变化情况。在球面声波中，接近源心的波阻抗几近于零。波前在波源中心附近的曲率甚大，此时只要有一个很小的压力变化就可产生一个极大的质点速度。在远离声源处，球面波变成平面波，声压和质点速度变成同相位，而在源心附近，两者的相位差接近于 90° 。由于在球面声波中介质的波阻抗及其相位依赖于离源心的距离，因此可以设想，海洋中具有压力敏感和质点位移（速度）敏感器官（或系统）的生物如果兼备对这两个量的相对振幅和相对相位进行比较的处理系统，则它们就应该具备能估计声源距离和方向的能力。

将注意力放在波阻抗上比单独研究声压和质点速度对海洋生物的影响可说明更多问题。设海洋生物声为一在无限介质中运动的其尺寸远小于波长的球体所辐射的声波（这对有鳔的海洋鱼类来说是较为相似的）。对单极子（脉动球体）、偶极子（振动球体）、四极子（形变球体）三种声源的理论研究的结果表明，在声源的近场和远场中的波阻抗具有一系列特征。在近场中，当向源心靠近时，质点速度的增长率要比声压的快，波阻抗变化按 kr/n 的规律进行（ r 为离源心的距离， k 为水中波数 $=2\pi/\lambda$ ， n 为一常数，它在单极、偶极和四极子声源时分别为1、2和3）。由此可见，近场中的波阻抗是与声源频率有关的。在极近源心处，质点速度与 r^2 成反比，这种现象在生物声学中叫做“近场效应”，它在生物活动中具有重要的意义。在远场区，质点速度保持与声压成正比的关系，即平面波的情况，波阻抗等于介质特性阻抗，到处不变。

应该说明，近场与远场之间实际上并不存在一条绝然的分界线，而是有一过渡过程的。

在近场和近、远场过度区的波阻抗是一个复值。在极近源心处，波阻抗表现为“纯抗”式，声压与质点速度有一 90° 的相位差；在远场则为“纯阻”式，两者同相；而在近、远场

的理论交叉处 ($r = \frac{n\lambda}{2\pi}$), 这两个量的相对

相位约为 45° 。在生物声场中, 从相位关系来看, 声压滞后于质点速度意味着后者往往对生物的声学行为具有优先作用, 这就提示了: 在极微弱的压力场下, 仍然会存在位移场, 它对生物活动在产生着影响。

以上讨论的是在主振动轴方向的情况。当偏离主振动轴方向时, 单极源的近、远场的理论交叉点无变化, 而对偶极子和四极子振动源来说, 其交叉点就与确定的偏离角有关了。这样, 不同偏离角就构成各不相同的一幅幅近、远场的波阻抗图案。

过去, 在生物声学研究中往往只注意压力场的测量, 而对许多生物声学行为的解释忽视了质点速度这一重要因素。一些著名的学者近年来已经发现了这个问题, 把同时测量声场中的压力和质点速度的方法和仪器的研究看作是推进海洋生物声学向更高水平发展的一个关键。不少海洋生物声学工作者曾认为, 在近场中只存在位移波(或速度场), 而在远场区则只有压力波, 并且以为近、远场之间有一条确定的界线。这是一种需要消除的误解。

三、海洋中生物声的传播

研究生物声在海洋中的传播是声学理论的一个重要的组成部分, 这是一个在声学理论中对具有各种边界条件的波动方程求解的问题。

在理想的刚性边界条件下(即边界声阻抗远大于海水声阻抗), 入射声波使界面上的质点运动速度接近于零, 而声压几乎为入射值的两倍; 当边界为理想软性时(即界面声阻抗远小于海水声阻抗), 入射声波会使界面质点产生极大的运动速度, 而声压却下降几近为零。实际边界往往处于这两者之间, 声波射至界面时所引起的质点运动完全由边界的声学特性确定, 在一些情况下还产生能量形式的转变。

对具有无规则形状和物理特性的边界条件下的波动方程求解是一个复杂的数学问题。在海洋生物声学研究中, 对边界具有规则形状并

且激发源是一简源的情况下的波动方程求解有实际意义。

声象法对分析矩形水族箱、水槽以至薄的实验管内的声场是另一个有效的波动方程求解方法。所谓声象法就是在计算声场时将边界移去代之以与源位置相对应处的象源, 然后综合声源与象源对声场内某点的贡献以得出该点的声强。从界面一次反射回来的声线可以看作是发自边界彼处的象源。这条声线所经过的时间延迟和球面扩展以及声源经边界反射的情况完全相同。多次反射的声线亦作同样处理。这在一个矩形水族箱内就构成一个三维的有规声象阵。这些声象按其各自行经的距离和方向对箱内某点作出贡献。当声线碰到的是软性边界时, 声源发出的声线与象源声线有 180° 的相位差。此法也可用于分析质点速度, 所不同的是在刚性边界情况下质点速度的垂直分量发生反相现象。

当边界声阻抗与海水相比, 其阻抗差不足以产生全反射时, 构成声场的情况要复杂得多。如边界完全吸声, 自无声象可言; 当海水中声速不是常数时, 声象法就不能使用了。

设生物声是一单极源, 且其感声器官是无方向性的。当一生物在一极薄的(如几米厚)水表层中游动并发出一稳定单频声(如几百赫)时, 处于同一深度离其不远(如小于一个波长)处的另一同类生物则可完全接收不到这个声音。这是由于海面作为软边界的存在使在与声源相对应的边界彼处产生了一个负的声象, 它几乎完全抵消了声源形成的水平声场。当两生物的间距等于源、象间直线距离时, 则源与象的相位差变得很小, 接收处的声强增大。从理论上讲, 相位差极小的源和象构成一个声偶极子, 其辐射的声波具有方向性。

实际上, 海洋生物声更多的是具有周期恒定的“开关式”的脉冲形状, 这类信号的“通”、“断”过程在介质中会有瞬态现象出现。由于声象对接收点声场所作的贡献在时间上必定是有时延的, 脉冲的开始部分就不会被反射回来的信号所抵消; 同样, 反射信号的尾部也不会

与直达信号相合而消失。因此,接收处的信号具有的形状是:首尾是强而短促的脉冲,中间夹着一个极弱的略有时延的原始信号的复本。首尾脉冲是原信号“通”、“断”过程引起的瞬态现象产生的,具有与原信号频率不同的频谱成分。

起伏的海面边界的作用犹如一个滤声器,更确切地说,它是一个具有无数峰点和零点的梳状滤波器。这些峰点和零点出现在较高的频段内,故有高通特性。任何短促的信号均有许多高频分量(如以上所述的生物声),当其碰到海面边界时,由于边界的这种高通效应就会使高频分量相对地增强,而基频部分则受到较大的削弱。

海洋中声速分布状况是影响生物声传播的另一个重要因素,表面和深水声道的存在可对表层和深层的海洋生物间声信息传递提供有利条件。海水介质的不均匀性、海中气泡、浮游生物、悬浮粒子的存在以及内波、涡流等均是不利于生物声传播的消极因子,对它们的综合研究要涉及到更多的复杂问题。

位移波对生物声学行为,尤其对表层生物来说是很重要的。在海表面,声压几为零,而声位移的垂直分量却最大。在海表层可以测不到声压,但实际上可能存在一个很强的声场。位移波传播给生物所提供的信息量甚至比声压更多,因为位移是一矢量,带有方向性这个十分有用的信息内容。

四、实验中声学条件的控制

海洋生物声学研究要有坚实的基础,必须对在实验室条件下作一些基本的生物声学现象深入的实验研究。对水族箱、实验水池或实验管需要作细致的声学处理,目的就在于控制实验容器内的声场,只有这样,才能进行有意义的实验并对结果作出正确的分析。

在水族箱或其他实验容器内作生物声学研究时,要完全模拟自由声场的条件是有困难的。形成自由声场的目的是要获得平面进行波。从声学理论可知,利用 $\ll$ 一个波长的小直径实

验管就可以做到这一点。在管子一端放声源,另一端作适当声学处理,使管内波阻抗与管端阻抗相匹配,即得平面进行波。其实,管壁也会反射声波。理论分析表明,管壁所引起的声象是很密集的,在低频时要做到完全无反射也极不容易。因此,管内还只是平面波,而不是平面进行波。管长在一个波长以上时,沿着管子就可以测到声压波腹与波带的存在。当管子很短时,由于管内波阻抗变化甚微,沿管无声压变化,这时,如管端为刚性,管子实际处于声压最高和质点速度最小部分,即在驻波的高阻抗处。当反射端为软性时,则管子所处的位置为驻波低阻抗部分,即质点速度最大和声压最小处。上述声场条件可用来研究生物感声器官。在分别研究鱼内耳对声压变化的反应及其侧线系统对质点速度反应能力时,就需要有声压或质点速度占优势的声场。但在过去不少生物声学研究中,往往只笼统地描述生物对各类声信号的反应,极少同时测量实验容器内的声压和质点速度(或位移)来研究这两种数据与生物声学行为之间的联系,致使许多研究工作难以进行比较,造成一些实验结果不确定或在分析中解释不一致的现象。

在长实验管内,要消除反射波,除要控制管子终端阻抗使之等于平面波的波阻抗以外,还可控制声源使之产生具有适当惯量的入射波,令入射波的声压与质点速度比与终端的声阻抗相匹配。利用吸声材料来吸收反射波,要想达到良好的效果,材料厚度至少不应小于 $1/12$ 波长,因此要完全吸声(在一定带宽内)是相当困难的。采用一种所谓有源吸声器来控制声源阻抗可与管子的阻抗匹配。在实验管的始端装一声辐射器,在终端安上另一换能器,两者分别受来自同一信号源(单频或宽带),但具有不同振幅和相位的电信号所激励。适当调节其相对振幅和相位,可使始端和终端阻抗得到匹配。这种装置实际上是一反馈控制系统,其控制的阻抗范围可以几乎近于零到一个极大的数值。

海洋生物学家经常使用的小型水族箱的声学处理更是复杂的。当声波碰到既非软性又非

刚性的边界壁时,一方面出现反射波,同时还产生能量形式的转变。在边界上除声波外还会有剪切波,有一部分剪切波会重新返回到水族箱内。正确设计的水族箱的边界壁应是极薄的,此时可忽略重返的剪切波的效应。当水族箱壁厚远小于波长时,这时只须考虑外部边界(空气)的影响即可。如箱底直接放在大桌台或地面上,则底部边界将变得十分复杂并难以处理。为避免这种情况,也可用上述的反馈控制阻抗的方法,使箱底的机械支撑点的机械阻抗远小于底部的边界阻抗,形成另一软性边界条件。要造成刚性箱底边界也是可以的,只要水箱底的尺寸小于一个波长,并且要均匀地地放在一个刚性底基之上。

由于实验容器内的声场受很多因素所影响,而且有许多是不易控制的,因此在进行生物声学实验之前,应该用压敏传感器和速度(或位移)传感器对容器内的声场作实地测量。

对各种生物发声与其行为间关系的研究,是国际间海洋生物声学的一个带普遍性的课题。我国的海洋生物声学近年来也在新的基础上开展起来。从海洋鱼类声学进行系统的基础研究也许是拓展这个工作的可以采取的一个途径。为了使这方面研究工作顺利进行,从一开始就应注意规定实验标准、统一术语、确定参考基准以及研制一些专用仪器等都是十分必要的。

主要参考文献

- [1] Siler, W., 1969. Near and Far-fields in a Marine Environment. JASA. 46:483.
- [2] Harris, G. G., 1962. Evidence that the Lateral-line Organ Responds to Nearfield Displacements of Sound Sources in Water. JASA. 34:1831.
- [3] Olson, H. F., 1953. Electronic Sound Absorber. JASA. 25:1130.
- [4] Parvulescu, A., 1964. Problems of Propagation and Processing Marine Bio-Acoustics, p87.
- [5] Tavalga, W. N., 1967. Underwater Sound in Marine Biology Underwater Acoustics 2:35.
- [6] Poper, A. N., 1973. Sound Detection and



逆渗透法淡化海水 脱硼效果显著

以盐水为原料用各种方法制备淡水,供人类饮用是其重要目的之一。据报道,人体若大量吸收硼,会引起神经中枢中毒等症。世界卫生组织明确规定:饮用水中的硼含量卫生指标为1毫克/升。因此,研究淡化水中的硼含量有一定的实用意义。

作者在参加海水淡化研究工作期间,采用姜黄素比色法,对逆渗透法的淡化水及原料海水的硼含量进行了初步的监测与探讨。以青岛近岸海水(盐浓度为30000ppm)为原料水,用四种不同的脱盐膜,在80—100公斤/厘米²的压力下,进行逆渗透脱盐淡化,初步监测结果列入下表。

各种淡化膜脱硼性能表

膜 类 型	脱盐率 (%)	原水硼 含 量 (毫克 /升)	淡化水 硼含量 (毫克 /升)	脱硼率 (%)
二醋酸纤维素膜	87—92	3	1.2	60
二,三醋酸纤维素膜	67—90	3	1.2	60
醋酸丁酸纤维素膜	99	3	0.8	73
聚糖醇复合膜	71—92	3	0.8	73

如表所示,若以脱硼率为60—73%的常用的逆渗透淡化膜,对青岛沿岸海水进行脱硼,其淡化水中的硼含量大都在0.8—1.2毫克/升范围内。因此,根据实验可以得出初步结论:与电渗析淡化法完全不脱硼相比,逆渗透法淡化海水则具有脱硼效果明显、基本能符合饮用水硼含量卫生指标的突出优点。

(中国科学院海洋研究所刁焕祥)



- Processing by Teleost Fishes. JASA. 53: 1515.
- [7] Lighthill, M. J., 1952. On Sound Generated Aerodynamically. I. General Theory. Proc. Royal Soc, London A211, p564.