

涉海工程水下冲击打桩噪声测量方法研究

牛富强¹,李智²,薛睿超¹,马丽¹,杨燕明¹

(1. 自然资源部第三海洋研究所 厦门 361005;2. 长江三峡集团福建能源投资有限责任公司 福州 350001)

摘要:随着海洋、湖泊、河流和港口等人类活动逐渐增加,涉海工程产生的水下噪声污染及对海洋生物影响已引起广泛关注。工程建设期环境影响评价中,水下噪声测量逐渐成为海洋监管的要素。水下冲击打桩是工程建设中常见的低频水下脉冲声源,能够传播较远距离。如何规范地开展水下冲击打桩噪声测量至关重要。文章给出了水下冲击打桩噪声的通用测量方法,包括声学指标、测量系统、测量布放、声学测量配置、测量不确定性等,可为海洋工程建设影响评价、海洋生物生态保护等提供技术支撑。

关键词:涉海工程;水下冲击打桩噪声;噪声测量方法;影响评价

中图分类号:P752;P733

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2021)07-0055-07

Study on Measurement Method of Percussive Pile Driving Underwater Noise from Marine Engineering

NIU Fuqiang¹, LI Zhi², XUE Ruichao¹, MA Li¹, YANG Yanming¹

(1. Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China;

2. Fujian Energy Investment Co., Ltd, Fuzhou 350001, China)

Abstract: The increasing number of sound producing human activities in oceans, seas, lakes, rivers, and harbors has led to concern over underwater noise pollution from unwanted sound and its potential effect on aquatic life. In the environmental impact assessment during the construction period of marine engineering, the measurement of underwater noise gradually becomes an element of marine management and supervision. Percussive pile driving is a significant source of low frequency impulsive underwater sound, which can propagate over large distances. It is very important to establish a standardized measurement method of underwater percussive piling noise. The paper provided a general measurement method for underwater percussive piling noise, including acoustic metrics, measurement equipment, deployment for measurement, acoustic measurement configuration, and measurement uncertainty, etc.. The results can provide technical support for the

收稿日期:2020-08-18;修订日期:2021-06-17

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41976175);中国长江三峡集团公司资助项目(CTGFB/0002-2018)。

作者简介:牛富强,副研究员,博士,研究方向为海洋生物声学和水下噪声

通信作者:杨燕明,研究员,博士,研究方向为海洋声学

impact assessment of marine engineering construction and the marine ecological protection.

Keywords: Marine engineering, Underwater percussive pile driving noise, Measurement method of noise, Impact assessment

0 引言

随着海洋经济开发利用的升温,我国海洋工程数量不断增加。据统计,我国围填海、海上堤坝、跨海桥梁、海底管道、海洋矿产资源勘探开发等海洋工程数量以每年400多个快速递增,这些涉海工程建设及民用船运增加等带来的水下噪声污染,给赖以回声定位系统生存的海洋哺乳动物和部分鱼类带来影响甚至伤亡^[1-2],影响了海洋生物多样性。人为水下噪声对海洋生物影响研究,已成为国际社会的关注热点^[3-5]。《国际保护野生动物迁移公约》敦促各成员国应进行水下噪声的环境评价并采取缓解措施,形成水下噪声影响海洋生物的评估指南。2018年6月18—22日,联合国UN(United Nations)召开的第十九届海洋与海洋法非正式磋商会议(ICP-19)主题即为“人为水下噪声”,会前号召各国提交有关水下噪声对海洋生物影响的科研素材,然而我国因相关研究匮乏而没有提交资料,限制了话语权。认识和了解水下噪声对海洋哺乳动物、鱼类以及其他生物的影响,对海洋生物多样性和海洋生态环境保护具有重要意义。目前,水下噪声对海洋生物的影响程度、评价标准、管控机制仍不健全,亟须不断完善。为评价水下噪声对海洋生物影响,水下噪声的规范测量是关键技术。

水下冲击打桩是一种典型的人为水下噪声源,广泛存在涉海工程建设中,如近海海上风电场建设,近海油气工业平台施工和锚系,跨海、河口、港口、码头等基础和桥梁支撑建设,水上可再生能源设备的锚系和安装等。打桩作业过程,声源从水表面延伸至海底或河底,将产生水中声波、空气中声波、海底声波和海底表面振动等;而浅水环境引起大量的混响、水体和海底或河底的相互作用,强烈地影响声音传播。水下冲击打桩产生声音的机理复杂,虽然理论建模已经成为评估打桩水下噪声的有效手段之一,但这种手段预测水下噪声需要大量的参数,如桩基、水文、底质等,并且准确度难以验

证,不适合实际涉海工程应用。因此,打桩作业期间的水下噪声测量非常必要。

国外开展了较多水下打桩噪声的测量,但由于采用不同的声学指标,造成方法之间对比困难,并且往往只能为个别国家的需求提供指导^[6-10]。德国规定水下冲击打桩噪声测量通常在750 m的距离点进行;美国的测量距打桩点通常为10 m;而英国和荷兰通常在多个距离点测量^[10-11]。为规范水下冲击打桩噪声测量,2017年,国际标准组织(International Organization for Standardization, ISO)颁布了通用的测量标准^[12]。国内开展相关研究较晚,苏冠龙等^[13]测量了厦门五缘湾码头扩建工程水下打桩噪声,监测点距打桩点约50 m;吉新磊等^[14]对海上风机打桩水下噪声进行了监测,监测点同样为50 m;时文静等^[15]洪湖新港施工中的打桩作业进行了水下噪声监测,监测点距打桩点分别为59 m、102 m、186 m和362 m;汪启铭^[16]采用走航式测量法在距打桩点200 m、500 m和1 000 m处对水下打桩噪声进行了监测。总体看,目前国内开展水下冲击打桩噪声测量较少,监测距离、监测设备、监测方式以及分析指标存在差异,缺乏统一的水下冲击打桩噪声测量标准,实际涉海工程中,测量结果的准确性难以保证,给后续影响评价造成困难。因此,本研究从声学指标、测量系统、测量布放、声学测量配置、测量不确定性等方面,详细阐述了水下冲击打桩噪声的测量系统、方法和步骤,能够应用于不同法规需求,形成水下冲击打桩噪声测量标准,为监管机构要求的环境影响评、海洋生物生态保护等提供技术支撑。

1 测量系统

1.1 系统组成

水下冲击打桩噪声测量系统应包括测量水听器(阵)、信号调理、数据采集、数据存储等(图1)。测量系统可由上述单个部件由电缆连接而成,也可作为一个集成系统,提供自容式记录系统。

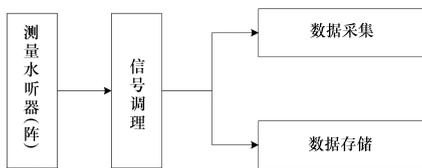


图1 测量系统

测量水听器应具有全方向性响应,其灵敏度应根据待测量声压幅度来选择一个恰当值。对于低幅度值的信号,为避免低信噪比,应选择高灵敏度水听器;对于高幅度值的信号,为避免非线性、剪切和系统饱和,应选择低灵敏度水听器。由于水下冲击打桩属于高幅度声压,并且测量信号的畸变会使得失去测量值,因此灵敏度的选择对于水下冲击打桩的测量是非常重要的。为了增加适应性,在信号放大阶段或模数转换过程中,最好具有一些可选择的增益。一旦一些初始测量值确定声级之后,就可以将这些值设置为合适的值。注意对于自主式和水听器含有集成前放增益的测量系统,布放之后增益通常是不能修改的。如果实际工程中,需要测量海洋背景噪声,应选择低噪声、高灵敏度的水听器。信号调理部件可以作为系统独立单元用于调整增益,或者作为固定增益集成在水听器中。为满足实现测量位置的最高预期声压,能够如实记录外界信号而不会引起由水听器和模数转换器带来的失真或过载,需要选择合适的调整增益。

数据采集的频率响应具有足够高的频率,至少应为最高分析频率的2.56倍~4倍,使得待测量信号的所有感兴趣频段的记录都是可信的。对于水下冲击打桩测量,理想的最小采集频率范围要求小于或等于20 Hz,且大于或等于20 kHz。但在非常浅的水域,由于低频声波不能传播,不足20 Hz的声频率测量是非常困难的^[17]。此外,低频率的声信号,普遍会受到诸如流噪声和电缆抖动的影响。因此实际工程测量中,一般不对20 Hz以下频段进行分析。如实记录水下冲击打桩声压信号的幅度,需要足够的测量动态范围,一般要求超过60 dB。数据存储容量应满足一个测试周期、采样率和通道数同时连续工作的需要。如果为了增加存储容量,通常使用数据压缩格式,但使用的数据压缩技术应是

无损的,或者对数据的影响应加以阐明。为便于后续数据分析,应该存储任何关键辅助数据或元数据,例如时间、增益、采样率等。

1.2 系统校准

整个测量系统应该在感兴趣的频带内进行校准,包括水听器、放大器、采集系统等。水听器校准应采用国内或国际标准,在专门的计量部门进行。水听器校准数据通常以一系列离散频率表示,或以校准曲线的形式表示。如果在对水听器灵敏度进行校正之前,记录的数据已被处理为1/3倍频程,所需的校准值是每个频带的平均灵敏度。如果水听器灵敏度曲线不是平的,就不能假定频带内是一个常数值。放大器和采集系统,目前国内还未有专门的计量部门,一般采用自校或比对的方式。校准后,水听器和采集系统的不确定度能够优于1 dB(以95%置信区间表示)。校准的时间周期一般不超过两年,并且长期布放和海上试验前后,还应进行现场校准检查。现场校准检查,通常使用一个商用的水听器校准器(如B&K4229),它能为水听器提供在某个频率(通常250 Hz)已知幅度的信号。校准器通常由一个空气活塞话筒组成,当水听器插入一个小型耦合器时,会产生一个已知声压级的信号。当插入水听器时,声压取决于耦合器内的自由体积,可为每种类型的水听器校准。虽然该校准器只提供一个频率的检查,但它能够满足实际工程测量需求。

2 测量布放

2.1 测量方式

水下冲击打桩噪声测量方式一般包括船基测量、锚系测量和漂流测量3种。船基测量系统放置在船上,可实时记录显示;锚系测量和漂流测量一般采用自容式测量。

船基测量时,从一艘抛锚或漂泊的船上布放水听器(单独地或组阵),分析和记录设备仍旧留船上。这种方法优点是布放快速、可移动,并且可以相当经济有效地覆盖一个相对较大的区域;设备丢失的风险低,能够实时监测获取的数据,及时调整设备参数设置以获取最佳质量数据(如避免失真和饱和)。这种方法适合测量水下冲击打桩噪声,特

别是需要去测量作为声源距离函数的声场,但易受到某些类型的平台相关噪声的影响。

锚系测量系统是一个相对船基测量更好地替代系统,能够提供打桩过程中多个固定距离的测量。当声源输出随距离变化时(通常出现在冲击打桩),这种方式是非常重要的。相对于船基测量,底部锚系测量能够更好地减少表面波影响产生的寄生信号、水听器远离压力释放的水空气界面以及减少布放船的干扰。对于锚系测量系统,经济可行的是采用自容式记录仪。该系统布放回收需要一个声学释放器或一个与海底锚系相连的表面浮标,能够保证记录仪被拖出水面。目前,实际工程应用中多采用这种测量系统。

漂流测量系统通常由一个水听器和记录仪组成,与浮标或垂锚连接,随海流自由漂流。该系统流噪声影响较小,适用于高潮流区,但对漂流方向的控制存在局限性,测点距打桩点的距离变化较大。如果漂流系统带有一个GPS接收机用于提供位置数据,就能计算与打桩点的距离,从而减轻这种局限性。

水下声压的空间分布是与深度相关的,尤其是在水体中声波波长的 $1/4$ 处,存在强烈的深度相关。因此无论何种布放方式,水听器均不能靠近水面位置布放。水听器的布放深度应放置在 $1/2$ 水深的下方,在距海底 2 m 和整体水深的 $1/2$ 之间^[18]。如果上述深度不切实际或者有需求去研究噪声对海底生物的影响,可以把水听器放置在海底测量。实际工程测量中,通常采用多个水听器,一是当一个水听器或测量通道发生故障时,可以实现备份;二是相比单个水听器或单通道,选择两个具有不同灵敏度的水听器,能够获得更大的动态范围;三是使用多个水听器能够对测量数据进行平均。如果使用两个水听器,建议布放深度为 $1/2$ 水深以下的两个深度,理想的是在 $1/2$ 水深和 $3/4$ 水深之间,并且尽可能使两个水听器相距最大化。

2.2 布放噪声减缓建议

除了测量系统本身的自噪声,测量数据也会被来自平台或布放方式的噪声污染,称为“平台噪声”或“布放噪声”。这些噪声信号是由于水听器和测

量系统的布放方式及其与周围环境的相互作用引起的,如海流、波浪等,通常是很难预测或检测。布放平台相关噪声一般会增加系统自噪声和背景噪声,因此设计测量系统及布放方式时,应尽量避免来自这些信号的污染。下面阐述一些常见的产生布放系统自噪声的信号源,并给出减缓的建议。

(1)流噪声:介质相对于水听器或电缆的任何流动,都会在低频段引起湍流压力波动,这些波动将引起一个压敏水听器的感应,称为流噪声。这种噪声在水听器周围的湍流层中产生,并产生与水听器直径和流速相关的低频信号(小于 100 Hz)。在高流速环境下,这是主要噪声源。对于自容式记录仪,水听器从记录仪主体突出出来,加大了记录仪外壳末端的湍流,会激发强烈的流噪声。强烈的流体流动也可能引起锚系的振动,并在记录仪体内激发共振。布放时,宜采用导流罩或透声防护物,使湍流层远离水听器。然而,这类噪声很难消除,减缓效果微小。因此,实际工程中,水听器应尽量靠近海底布放,或在潮流最小的平潮时测量。也可以采用随海流自由漂流的漂流系统,使水听器和介质的相对运动大大减小来减缓流噪声。

(2)电缆振动:当电缆被海流拉紧时,就会产生电缆振动噪声。由于电缆周围的海流作用引起电缆振动,从而产生低频干扰信号。这种信号可通过底部锚系布放和使用围绕电缆、记录仪主体的螺旋形机械整流罩减缓^[19]。如果使用表面布放,可以用弹性绳或易弯曲的圆圈实现水听器与电缆之间的去耦合。

(3)表面起伏:任何表面布放的系统,如附属在表面浮标或船上,都会存在被波浪影响的危险。虽然浮标或船只随水表面移动,但悬浮在水中的水听器不太可能精确地跟随移动,这会带来水听器深度的改变,生成非常低频的流体静压力起伏。这些流体静压力起伏会被水听器感应,虽然它们是低频的,但具有一个相对高的幅度,因此要求一个高动态范围的系统以避免记录仪模数转换器的失真和饱和。使用一个底部锚系框架或水下浮标固定水听器/记录仪在海底而非海表面,将会减少表面起伏带来的影响。如果使用表面布放,可以用弹性绳

或运动阻尼器实现水听器与电缆之间的去耦合。由于这类信号频率是非常低的(<10 Hz),因此可使用一个高通电子滤波器来消除信号。为了避免饱和,这应该在模数转换之前进行。许多商业水听器含有前置放大器,内置的高通滤波器的截止频率在 5 Hz~ 10 Hz,以减轻该类信号。

(4)船噪声:船基测量时,在船操作限制和安全工作范围内,应尽量在安静的条件下进行。理想条件下,应该关闭船的发动机,测量仪器从干电池供电,并且机器和船员在船上发出的噪声越少越好(测量期间发动机工作状态应在结果中阐述)。如果船载测深仪产生的频率在待测量信号的频率内,测量期间应关闭测深仪。船基测量时,波浪作用到船体的声音(有时称“波浪拍击”),也会影响测量结果。一般通过调整船只顺着波浪的方向,使用浮球和浮标连接水听器长电缆以增加水听器距船体的距离来减少影响。

(5)机械噪声:机械噪声主要包括悬浮物撞击水听器的噪声、水听器与电缆相互摩擦声、锚系系统的摩擦、生物摩擦噪声等。锚系系统有可能相互碰撞的任何部分,都会产生机械噪声,尤其是锚系中包含金属零件时(如链条)。减缓这类机械噪声,应采取如下措施:①尽可能避免在支架和锚系中使用金属锚链;②避免金属与金属连接;③通过电缆与隔振器(兼容的耦合器)连接,避免水听器接触支撑电缆。

2.3 测量站位和频次

2.3.1 测量站位

测量站位的选择应至少满足下面的要求之一:①固定某一个站位测量,以监视声源输出,与其他水下冲击打桩事件比对;②测量站位设置以评估环境影响评价、环境影响报告或环境报告中预测的精度;③在允许与标准阈值比较的范围内进行测量,例如,预期在哪些会超过特定的影响标准;④在特定站位测量,如存在特定种类的海洋生物的区域。

(1)离岸测量:主要指海区,包括沿海地区、区域海洋和大陆架,但不包括港口、沿海入口、内河航道、河口及河流。对于离岸水下打桩辐射噪声测量,应至少设置一个测量站位。仅设置一个测量站

位时,应尽可能地设置在距打桩源 750 m处,并且测量覆盖整个打桩周期。根据测量需求,需要多个站位测量时,这些站位应尽可能分布在距打桩点不同的方位角。为了监测海洋动物影响区域的临界值,距声源较远距离的测量是需要的,在这些距离由于传播损失,声信号已经有明显的衰减。为获得声学指标随距离衰减的经验估计,测量也可以作为距离的函数,沿着某一个固定的方位角远离声源的横断面设置至少 3 个站位。为了避免水深折射效应,这个方位角不能平行于倾斜的海岸线^[20],水深不存在显著变化。

(2)近岸测量:主要指海区或水区,包括港口、沿海入口、内河航道、河口及河流,但不包括沿海地区、区域海洋和大陆架。对于近岸水域,例如,河口、港口等,测量要求与离岸海域是不同的,尤其 750 m测量站位是不恰当甚至不可能的。在这些环境下,靠近桩基测量是必要的,并且应遵循上述的测量站位标准和水听器深度布放标准。仅设置一个测量站位时,应是距打桩点 3 倍于打桩点水深的距离。多个站位测量时,站位应尽可能分布在距打桩点不同的方位角。一般不需要进行横断面测量。

无论何种测量,均需要进行工程海域的背景噪声测量。背景噪声测量可以在打桩前后进行,也可以在打桩期间任何重大间隔时间内进行,测量站位一般选择任何一个打桩点或者具有代表性的站位。测量频段应覆盖 $20\sim 20\,000$ Hz,通常用 $1/3$ 倍频程表示。

2.3.2 测量频次

水下打桩噪声与桩基的类型、尺寸、打桩机的功率等有关。对于同种类型和尺寸的桩基,应至少进行一次测量。实际工程中,需要进行多个桩基打桩作业,一般应在打桩初期和高峰期各进行一次测量。为了将水下噪声值表征为时间的函数,需要在一段时间内进行测量,并且应覆盖打桩机的任何输出功率变化。

3 测量数据处理

3.1 术语与定义

水下冲击打桩噪声一般采用如下参数描述:脉冲持续时间、脉冲间隔时间、峰值声压级、声暴露

级、信噪比、声压谱级、频带总声级等。

(1) 脉冲持续时间: 一次击打过程, 百分比能量的持续时间, 一般指信号能量从 5% 增加到 95% 所经历的时间, 单位 s。

(2) 脉冲间隔时间: 两次相邻单脉冲的时间间隔, 单位 s。

(3) 峰值声压级: 单个脉冲持续时间内声压绝对值的最大值与基准声压相比取对数, 单位 dB, 基准值 $1 \mu\text{Pa}$, 计算公式如下:

$$\text{SPL}_{\text{pk}} = 20 \lg \left(\frac{\max(|p(t)|)}{p_{\text{ref}}} \right) \quad (1)$$

式中: $p(t)$ 为单次脉冲时间序列, 单位为 Pa; p_{ref} 为参考值, 单位为 μPa 。

(4) 声暴露级: 单个脉冲持续时间内声压平方的积分与基准声压的平方相比取对数, 单位为 dB, 基准值为 $1 \mu\text{Pa}^2 \cdot \text{s}$; 单根桩作业需要多次击打, 从而产生累积效应, 也即累积声暴露级, 计算公式如下:

$$\text{SEL}_{\text{ss}} = 10 \lg \left(\int_T \frac{p(t)^2 dt}{p_{\text{ref}}^2} \right) \quad (2)$$

$$\text{SEL}_{\text{cum}} = \text{SEL}_{\text{ss}} + 10 \lg(N) \quad (3)$$

式中: $p(t)$ 为单次脉冲时间序列, 单位为 Pa; T 为信号持续时间, 单位为 s; p_{ref} 为参考值, 单位为 μPa 。 N 为脉冲个数; SEL_{ss} 为声暴露级; SEL_{cum} 为累积声暴露级。

(5) 信噪比: 处理后的均方根带宽打桩信号电压与均方根带宽背景噪声电压之比, 单位 dB。作为一个带宽量值, 信噪比通过一个指定的频带来评估, 一般是整个感兴趣的频带, 对于本研究规定 $20 \sim 20\,000 \text{ Hz}$, 或者指定的 $1/3$ 倍频程频带。

(6) 声压谱级: 在某一频率的声压谱密度与基准声压谱密度, 用于描述信号功率随频率的分布。可以用 1 Hz 带宽表示, 也可以用 $1/3$ 倍频程带宽表示, 单位 dB, 计算公式如下:

$$L_{\text{ps}}(f_i) = 20 \lg \left(\frac{p_f}{p_{\text{ref}}} \right) - 10 \lg(\Delta f) \quad (4)$$

式中: $L_{\text{ps}}(f_i)$ 为 $1/3$ 倍频程声压级; f_i 为 $1/3$ 倍频程中心频率, 单位 Hz; Δf 为频率分辨率, 单位 Hz; p_f 为实测声压数据的傅立叶变换; p_{ref} 为参考值, 单位为 μPa 。

(7) 频带总声级: 从低频截止频率到高频截止频率

的宽频带内的声压级求和, 单位 dB, 计算公式如下:

$$L_p = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{0.1 \times L_{\text{ps}}(f_i)} \right) \quad (5)$$

3.2 处理步骤

对于测量记录得到的数据, 首先需要手动或自动提取打桩期间单次击打所产生的各个脉冲信号, 然后选择一部分或者全部信号进行后续分析。水下打桩脉冲信号信噪比较高, 一般采取信号能量与背景噪声能量之比进行自动检测, 设定一个检测门限, 取能量比最高值作为信号出现的位置, 如果该值大于检测门限值, 即可判断为真实信号, 再通过加窗根据能量累积时间自动提取信号的起始和结束时间。完成信号提取之后, 应用时域分析、频域分析以及时频分析等技术进行计算, 得到上节所叙述的特征参数。

3.3 测量不确定性

有两类不确定性, 分别为随机不确定性和系统不确定性。随机不确定性, 可以通过一定数量的重复测量和检查结果中的统计分布来评估。但对于水下打桩, 如果测量的事件是唯一的, 因此可能无法进行重复测量。该类别不确定性是测量精度的度量, 如果测量结果可重复且结果偏差较小, 则可以实现高精度测量。系统不确定性, 代表测量中可能出现系统性偏差的可能性, 如由不恰当的仪器校准引起的。该类别不确定性无法通过重复测量进行评估, 而应考虑影响测量精度的潜在因素。对于水下打桩噪声, 测量不确定性主要来自测量设备的校准、布放以及声源和接收位置测量等。在实验室条件下一般以 0.5 dB 的不确定度校准水听器, 整个测量系统的不确定度可以在 1 dB 以上。海洋中实现高精度位置测量是困难的, 水下打桩噪声源和接收站位的位置, 通常采用 GPS 或激光测距设备, 虽然设备精度能满足测量需求, 但仍不可避免地存在不确定性。如果声源和接收距离短, 则相对不确定性更大。近距离测量, 适合采用激光测距设备; 而远距离(几百米), 适合采用 GPS。尽管 2.2 节已阐述了布放噪声的减缓措施, 但完全消除是不太现实的, 不确定性分析中应该考虑布放噪声的影响。

4 结语

为研究影响评价, 估算噪声源的源级以及声源

和接收点之间传播路径的声能量损失是非常必要的。由于水下冲击打桩噪声产生机制复杂,近距离不能当作点源分析,声级也存在一定的起伏,因此使用声场模型描述传播衰减过程存在的一定局限性,并且声场模型计算时需要同步的水文、底质等环境参数,增加了测量成本,实际工程应用中可行性较小。基于本文方法,可获取不同接收点的声场值,进而拟合估算出声传播衰减规律和声源级,也可用于声场模型输出值的检验。水下辐射噪声对海洋生物的影响评价不属于本文研究范围,因此不进一步展开论述。

本方法可用于近海(水深大于4 m 小于100 m)水下冲击打桩作业期间辐射水下噪声声压测量,其适用范围不包括由声波传播引起的水体中质点振动速度测量或声波在海底传播引起的海底振动测量,当然振动测量对于评估海洋生物的影响也是非常重要,只是目前水下振动测量方法还不成熟,无法形成标准测量方法。这会在一定程度上影响涉水下冲击打桩对海洋生物影响评价结果的科学性,因此今后的研究中需增加或完善水下振动测量。

参考文献

- [1] Committee on Potential Impacts of Ambient Noise in the Ocean on Marine Mammals. Ocean Noise and Marine Mammals [M]. Washington, D.C: The National Academies Press, 2003.
- [2] POPPER A N. The effects of noise on aquatic life II [M]. New York: Springer-Verlag, 2016.
- [3] WILLIAMS R, WRIGHT A J, ASHE E, et al. Impacts of anthropogenic noise on marine life: Publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management [J]. Ocean & Coastal Management, 2015, 115: 17–24.
- [4] ERBE C, REICHMUTH C, CUNNINGHAM, et al. Communication masking in marine mammals: A review and research strategy [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 103: 15–38.
- [5] FAULKNER R C, FARCAS A, Merchant N D. Guiding principles for assessing the impact of underwater noise [J]. Journal of Applied Ecology, 2018, 55: 2531–2536.
- [6] BAILEY H, SENIOR B, SIMMONS D, et al. Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals [J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 60: 888–898.
- [7] REINHALL P G, AHL P H. Underwater Mach wave radiation from impact pile driving: Theory and observation [J]. Journal of the Acoustical Society America, 2010, 130: 1209–1216.
- [8] BRANSTETTER B K, BOWMAN V F, HOUSER D S, et al. Effects of vibratory pile driver noise on echolocation and vigilance in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) [J]. Journal of the Acoustical Society America, 2018, 143: 429–439.
- [9] KASTELEIN R A, HELDER-HOEK L, KOMMEREN A, et al. Effect of pile-driving sound on harbor seal (*Phoca vitulina*) hearing [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 143: 3583–3594.
- [10] ROBINSON S P, LEPPER P A, HAZELWOOD R A. Good Practice Guide for Underwater Noise Measurement [R]. NPL Good Practice Guide No. 133, National Measurement Office, Marine Scotland, The Crown Estate, ISSN: 1368–6550, 2014.
- [11] REYFF J A. Underwater Sounds from Marine Pile-driving [C]// 38th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Inter-Noise 2009, Red Hook, NY, 2009.
- [12] ROBINSON S, THEOBALD P. A Standard for the Measurement of Underwater Sound Radiated from Marine Pile Driving [C]// 24th International Congress on Sound and Vibration, London, UK, 2017.
- [13] 苏冠龙, 许肖梅. 水下打桩和船舶噪声对斑海豹听觉影响的初步分析 [J]. 应用海洋学学报, 2013, 32: 178–183.
- [14] 吉新磊, 杨红, 丁骏. 近海风电场水下打桩辐射噪声特性测量分析 [J]. 海洋科学, 2018(3): 11–16.
- [15] 时文静, 王志陶, 方亮, 等. 打桩水下噪声对长江江豚影响初探 [J]. 水生生物学报, 2015, 39: 399–407.
- [16] 汪启铭. 海上风电场建设水下噪声对中华白海豚影响研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
- [17] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [18] MÜLLER A, ZERBS C. Offshore wind parks: Measurement instruction for waterborne sound measurements [R]. Müller BBM Report No. M88/607, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2011.
- [19] DUDZINSKI K M, BROWN S J, LAMMERS M, et al. Trouble-shooting deployment and recovery options for various stationary passive acoustic monitoring devices in both shallow and deep water applications [J]. Journal of the Acoustical Society America, 2011, 129: 436–448.
- [20] DAHL P H, DALL'OSTO D R, FARRELL D M. The underwater sound field from vibratory pile driving [J]. Journal of the Acoustical Society America, 2015, 137: 3544–3554.