

# 近海风电场水下打桩辐射噪声特性测量分析

吉新磊, 杨红, 丁骏, 王春峰

(上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

**摘要:** 对滨海海上风电场一次完整的打桩过程不同水深处环境噪声进行监测和分析。结果表明: 打桩过程水下辐射噪声脉冲信号, 在所研究海域附近环境噪声级由原来打桩前的 130 dB 左右瞬间增加约 20~50 dB, 20~20 000 Hz 频段, 打桩噪声谱级高于工程前该海域背景环境噪声谱级约 30~65 dB, 100~1 000 Hz 频率打桩辐射噪声谱级出现多个峰值, 不同水深谱级最高峰值频率为 200 Hz。根据打桩水下辐射噪声监测结果和浅海 Marsh 和 Schulkin 半经验公式, 计算打桩辐射噪声声源级(距声源中心 1 m 处)为 210.2 dB (参考声压 1  $\mu$ Pa)。为水下打桩辐射噪声的深入研究提供了基础数据, 分析结果可供海洋环境和海洋生物保护研究参考。

**关键词:** 水下打桩噪声; 海洋环境噪声; 声传播; 近海风电场

中图分类号: X834 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)03-0011-06

DOI: 10.11759/hyxx20170221001

为了减少二氧化碳的排放和阻止全球变暖, 自 1997 年工业化国家签署《京都议定书》以来, 可再生能源的利用逐年增加<sup>[1]</sup>。海上风电场作为一种可再生能源成了传统能源的替代品<sup>[2]</sup>。近年来, 开发海上风电已逐渐成为世界各国共识。为促进我国风电产业持续健康发展, 2012 年 7 月国家能源局发布了《风电发展“十二五”规划》, 海上风电场越来越成为我国能源版图中的重要组成部分。2014 年 12 月国家能源局印发《全国海上风电开发建设方案(2014-2016)<sup>[3]</sup>, 对我国近海风电场开发建设进行进一步的规划设计。然而自然科学的发展并不能跟上技术进步的脚步(如近岸风电场建设), 结果就导致我们不能充分了解人类活动对海洋生态系统造成的影响。

我国近海海上风电场的建设数量逐年增加, 海上风电场建设过程中风机打桩成为近海环境的主要噪声污染源。有些人为活动如水下爆破、打桩和油气勘探等产生的高强度噪声(冲击波)会对鱼类的听力系统造成永久性伤害或直接导致死亡<sup>[4-6]</sup>, 而长期存在的低强度船舶噪声可能会使鱼类等海洋生物间交流、繁殖能力降低<sup>[7]</sup>。国外针对海上风电场噪声以及噪声对海洋生物的影响已经开展了相关研究<sup>[3, 8]</sup>, 我国在这方面的相对欠缺、薄弱。因此, 迫切需要对海上风机打桩水下辐射噪声特性进行研究, 这对于海水养殖业和以海洋动物为主的海洋生物保护具有重要意义<sup>[9]</sup>。

## 1 调查海区与测量方法

### 1.1 测量海区概况

国家电投滨海海上风力发电有限公司于 2015 年 6 月启动建设滨海北区 H1# 100 MW 海上风电项目, 项目位于滨海北部中山河口至滨海港之间的近海海域, 海底地质主要由冲淤造成, 是侵蚀性粉砂淤泥质<sup>[10]</sup>。滨海港水域港界西北侧, 离岸距离 7.5 km, 水深 6~13 m, 多年平均风速为 2.49 m/s, 风电场形状呈矩形, 平行于海岸线方向的距离约为 5.6 km, 垂直于海岸线方向的平均距离约为 2.8 km。如图 1。

### 1.2 测量方案

2016 年 4 月 23 日-24 日租用渔船对中电投 15# 号风机打桩水下噪声进行监测, 单根钢管桩(直径为 4.60~6.50 m)。此次监测站点水深 10 m 距离打桩点 50 m 的位置, 对 1 m 和 5 m 水深的环境噪声同时进行监测。调查当天海况 3 级, 风速 1.9~3.1 m/s。

收稿日期: 2017-02-21; 修回日期: 2017-05-05

基金项目: 黄海绿潮业务化预测预警关键技术研究与应用(201205010) [Foundation: Research and Application of the Yellow Sea Green Tide Operational Forecasting and Early Warning Key Technologies, No. 201205010]

作者简介: 吉新磊(1992-), 男, 山东滨州人, 硕士研究生, 研究方向为环境科学与工程, E-mail: 1039255227@qq.com; 杨红(1962-), 通信作者, 女, 教授, 研究方向为环境海洋学, E-mail: hyang@shou.edu.cn

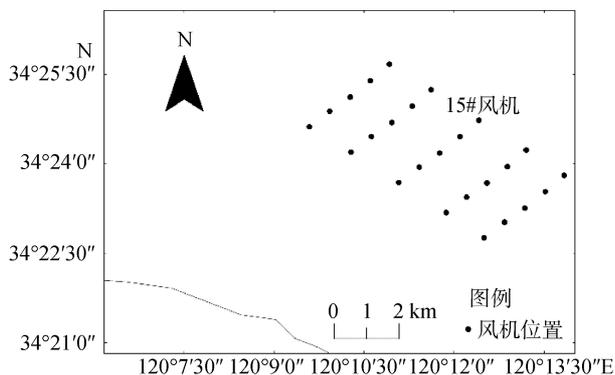


图 1 中电投滨海北区 H1# 100 MW 海上风电地理位置示意图

Fig. 1 Location map of H1 # 100 MW offshore wind farm in North Binhai, Jiangsu

HTI-96-MIN 水听器(灵敏度-165 dB 参考 1V/μPa)监测采集到的打桩辐射噪声, 利用 Song Meter SM2+ 声学记录器存储为 WAV 格式, 采样频率为 44 100 Hz。在监测站位为不同水深对一次完整的打桩过程进行监测, 每次测量时间不少于 2 min。使用 FYF-1 三杯风速风向表、DYM3 空盒气压表和 WHM5 温湿度表记录监测站位风速、气温、气压和湿度。

到达监测站位后, 调查船发动机以及任何可能产生噪声的设备全部关闭, 船上的工作人员禁止大声说话。水听器距离船沿一定距离垂直投放到水中, 达到监测水深时, 利用 Song Meter SM2+ 声学记录器开始对水下噪声进行记录。如图 2

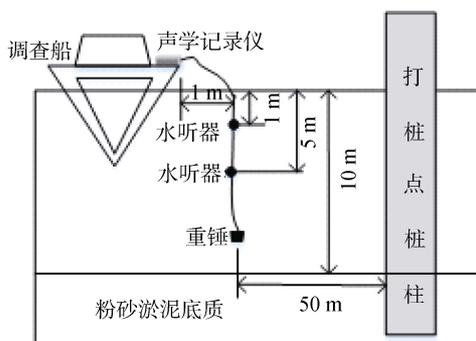


图 2 测量方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the measurement plan

### 1.3 测量数据处理

对测量过程中记录的水下噪声文件, 采用已经编程好的 MATLAB 程序进行数据处理, 以获取水下噪声时域信号图, 功率谱、1/3 倍频程功率谱级图等, 同时分析产生在打桩过程中水下辐射噪声的声压级

随时间的变化等参数。其中水下噪声频带声压级  $L_{pf}$ 、水下噪声谱级  $L_{ps}$  计算公式如公式(1)和公式(2)所示:

$$L_{pf} = 20 \lg \frac{p_f}{p_0} \quad (1)$$

式中,  $L_{pf}$ —噪声频带声压级, 单位为 dB;  $p_f$ —测得的一定带宽噪声声压, 单位为 Pa;  $p_0$ —基准声压, 单位为 Pa, 通常取  $p_0=1V/\mu Pa$ ,

$$L_{ps} = L_{pf} - 10 \lg \Delta f \quad (2)$$

式中,  $L_{ps}$ —噪声谱级, 单位为 dB;  $L_{pf}$ —测得的中心频率为  $f$  的频带声压级, 单位为 dB, 基准值为 1 μPa;  $\Delta f$ —带通滤波器的有效带宽。

## 2 监测结果分析

### 2.1 背景噪声

结合《海上工程环境影响评价技术导则》<sup>[11]</sup>和《声学 水下噪声测量》<sup>[12]</sup>(GB/T5265-2009)的技术要求在距离在距风电场外部界限 3.5 km 处进行背景海洋环境噪声测量, 测量期间风电场区域内没有其它施工。在对 3 m 水深处海洋环境噪声进行监测。监测结果如图 3 所示。

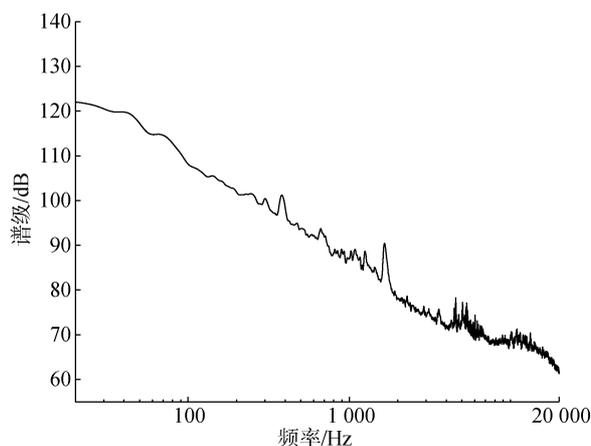


图 3 风电场区背景海洋环境噪声谱级

Fig. 3 Background ocean environmental noise spectrum level in wind farm area

从图 3 中可知, 在距离风电场 3.5 km 处进行背景海洋环境噪声测量的结果可以看出, 海洋环境噪声随频率的增加而减小。在频率为 1 000~2 000 Hz 水下噪声有一较大的波动, 波动范围在 3~5 dB。该站点点监测到的噪声是在此海域没有任何施工工况情况下测得的, 与 Wenz 声压谱密度级曲线图基本吻合<sup>[11]</sup>, 它代表该海域背景海洋环境噪声水平。对打桩前背景噪声的监测, 1 000~1 200 Hz 中有明显水下声

压级升高过程,与 Wenz 声压谱密度级曲线推测产生这种现象的主要原因是在打桩前工程船的准备工作中产生的噪声对水下声环境的影响造成的<sup>[13-14]</sup>。

## 2.2 打桩施工水下噪声特性

打桩过程中对距离打桩点 50 m 处水下辐射噪声进行监测,选取一段具有连续打桩过程的数据采用 matlab 处理采集数据,此次监测获得的环境噪声时域信号如图 4。

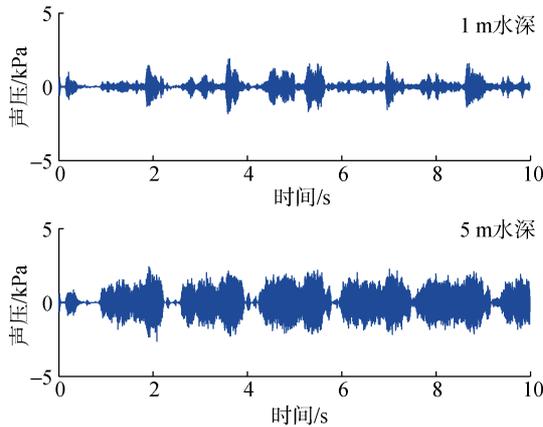


图 4 距离打桩点 50 m 处 1、5 m 水深脉冲信号

Fig. 4 Pulse signals at 1 m and 5 m depths, 50 m away from pile driving point

通过图 4 可知打桩产生的噪声信号为脉冲信号,距离打桩点 50 m 处 1 m 水深产生的脉冲信号持续时间为 0.2 s 左右;同一距离同一时间 5 m 水深,脉冲信号持续时长约为 1 s,后者的持续时间显著较长,

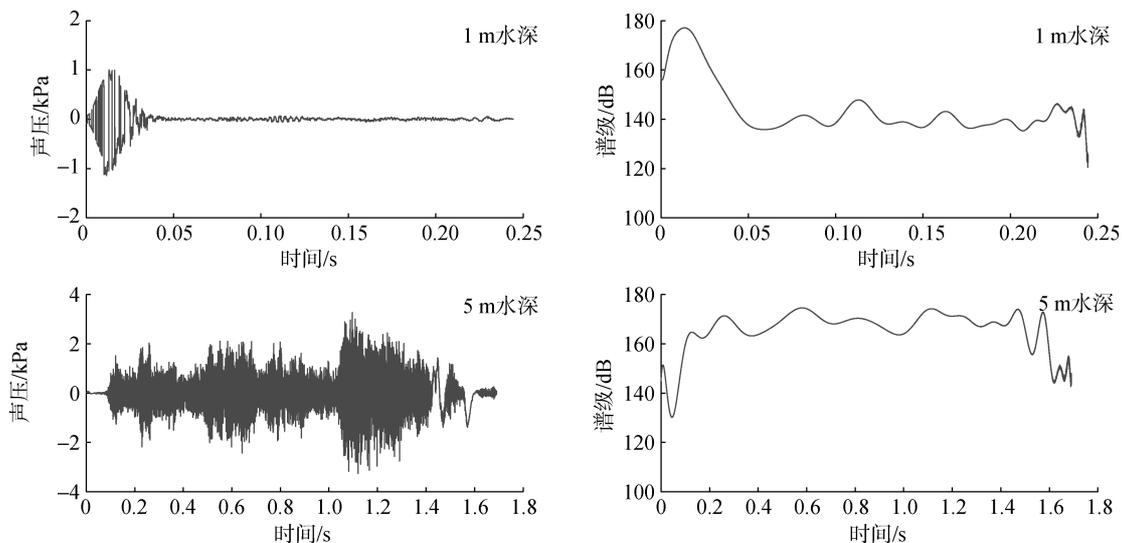


图 5 单个打桩声脉冲 1、5 m 水深声压、声压级

Fig. 5 Sound pressures and sound pressure levels of the single pulse in 1 m and 5 m depths

此乃由打桩声脉冲经海面、海底反射并和直达声脉冲叠加在一起,即近场多途叠加的结果<sup>[15]</sup>。

连续打桩产生了连续的声脉冲,单个打桩声脉冲持续时间短,瞬间能量大,距离打桩点 50 m 处单个打桩声脉冲时域信号和声压级,如图 5。

可见,打桩瞬间附近噪声突然大幅上升,距离打桩点 50 m 处 1 m 水深的水下噪声由原来的 130 dB 左右,瞬间脉冲声压级突增至近 180 dB,波动幅度达到 50 dB 左右。距离打桩点 50 m 处 5 m 水深的单个打桩声脉冲信号持续时间较长达 1 s 左右,其时域信号和声压级见图 5,由于浅海上下边界的反射作用,使得打桩声脉冲持续时间拓展,并出现多个大小不等的峰值,相应的噪声声压级同样出现多个峰值。

图 6 是不同水深处打桩噪声谱级与背景噪声的对比,可见打桩过程中噪声谱级明显高于背景值,在 20~20 000 Hz 频段,打桩噪声级高于工程前该海域背景环境噪声谱级约 30~65 dB,100~1 000 Hz 频段打桩噪声谱级具有整体升高的趋势且出现多个峰值。打桩过程产生的水下噪声使得该海域环境噪声整体升高,对 100~1 000 Hz 的影响尤为明显。对打桩过程中的水下噪声监测数据进行 1/3 倍频程谱级处理,结果如表 1 所示。在打桩过程中 1、5 m 水深处接收到的水下噪声峰值声压级均位于 200 Hz 频率,其 1/3 倍频程带声级分别为 164.17 dB 和 162.84 dB。高于 1 000 Hz 时,随着频率的增加,1/3 倍频程谱级逐渐减小。总之,100~1 000 Hz 频段谱级增加最大,对海洋环境的影响最明显。

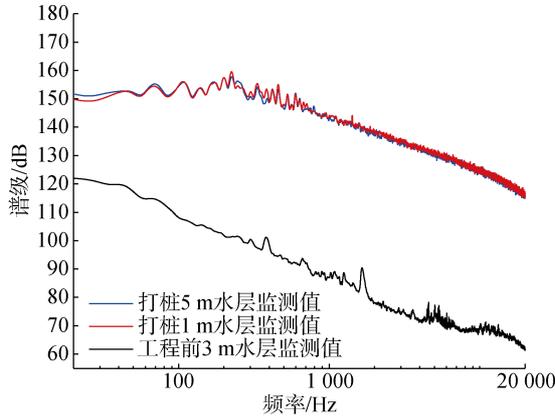


图6 不同水深处打桩噪声谱级与背景噪声对比图

Fig. 6 Comparison of piling noise spectrum levels and background noises at different water depths

表1 水下打桩噪声监测结果

Tab. 1 Underwater piling noise monitoring results

频率 /Hz	1/3 倍频程谱级/dB		频率 /Hz	1/3 倍频程谱级/dB	
	1 m	5 m		1 m	5 m
20	14.85	150.80	800	143.63	143.59
25	149.09	150.70	1000	141.90	141.65
31.5	150.23	151.05	1250	140.76	140.62
40	151.23	151.49	1600	138.08	137.23
50	150.78	151.18	2000	136.48	135.57
63	153.06	153.55	2500	134.67	134.18
80	151.38	151.87	3150	132.28	131.47
100	154.59	153.81	4000	129.72	129.79
125	152.87	151.97	5000	128.52	127.38
160	155.68	156.24	6300	125.33	125.50
200	162.53	161.19	8000	123.80	122.80
250	150.73	149.39	10000	121.29	120.97
315	152.19	149.03	12500	118.79	118.56
400	150.78	149.79	16000	115.35	114.79
500	147.10	147.23	20000	110.22	110.36
630	146.63	145.29			

### 3 打桩噪声对海洋生物的影响

根据本次对对中电投 15#号风机进行打桩水下辐射噪声监测结果和浅海 Marsh 和 Schulkin 半经验公式可以计算出打桩辐射噪声脉冲声源级, 浅海传播 Marsh 和 Schulkin 半经验公式传播损失<sup>[16]</sup>:

$$R = \left[ \frac{1}{3}(H+L) \right]^2 \quad (3)$$

$H$  水深, km;  $L$  混合层深度, km;  $R$  为参考距离, km。

$r > R$  时

$$T_L = 20 \lg r + \alpha r + 60 - k_L \quad (4)$$

$\alpha$  为海水吸收系数 dB/km,  $k_L$  为近场传播异常 dB。

$R < r < 8R$  时

$$T_L = 15 \lg r + \alpha r + 60 + \alpha_T \left( \frac{r}{H} - 1 \right) + 5 \lg H - k_L \quad (5)$$

$\alpha_T$  为浅海衰减系数。

$r > 8R$  时

$$T_L = 10 \lg r + \alpha r + 64.5 + \alpha_T \left( \frac{r}{H} - 1 \right) + 5 \lg H - k_L \quad (6)$$

根据本次打桩水下辐射噪声监测结果和浅海 Marsh 和 Schulkin 半经验公式可以计算出打桩辐射噪声脉冲声源级(距声源中心 1 m 处)为 210.2 dB。高冲击噪声, 打桩辐射噪声脉冲是一种高冲击性高声强脉冲, 可能通过破坏鱼鳔或鱼体其他部位而造成鱼的死亡。暴露在人为强噪声干扰下的鱼类也可能造成永久性或暂时性听力丧失, 或增加皮质醇水平和心率。此外, 人为噪声可能会影响鱼类的行为活动和分布: 已经发现噪声会干扰鱼类种内交流以及改变鱼对声信号的行为反应<sup>[17]</sup>。参考美国国家海洋渔业局现行采用的(过渡性)保护限值<sup>[18]</sup>和刘贞文<sup>[19]</sup>的研究结果可以确定保护阈值为 190 dB(对鳍足目, 如斑海豹, 听力保护范围)、180 dB(对鲸豚目, 如江豚, 听力保护范围)、160 dB(对海洋哺乳动物行为干扰)、150 dB(对石首鱼类, 如大黄鱼), 如叫姑鱼噪声频率范围主要在 1 000~4 000 Hz, 其峰值频率在 2 000 Hz<sup>[20]</sup>, 表明本次打桩施工中对海洋生物在一定距离范围内会对其产生影响。打桩施工是一个短时的施工过程, 随着施工过程的结束噪声随着消失, 但是在施工的过程中应对施工海域的海洋生物进行驱赶以及设置安全距离, 减小海洋生物的损失。

### 4 结论

通过对一次完整的打桩过程进行监测和讨论, 得出如下结果: (1)打桩过程中, 所在海域附近的环境噪声谱级, 100~1 000 Hz 频段连续的峰值; (2)打桩声脉冲信号导致工程所在海域附近环境噪声瞬间明显增加, 不同水深处打桩声脉冲的持续时间和噪声级不同; (3)在 20~20 000 Hz 频段, 打桩噪声级高于工程前该海域背景环境噪声谱级约 30~65 dB; (4)声源级(距声源中心 1 m 处)高达 210.2 dB。

施工过程中水下噪声的瞬时高强度的变化, 对一定距离内的海洋生物有不同程度的影响。有必要对我国海上工程水下噪声进行跟踪监测, 同时对不

同海域重点生物的听阈范围展开研究,推算出海上工程施工以及运营过程中对重点生物的影响范围,并对其行为展开适当的实验研究,为有效保护海洋生物提供基础数据和科学的物理依据。

## 参考文献:

- [1] Ratner M A. Earth: the sequel: the race to reinvent energy and stop global warming[J]. *Physics Today*, 2009, 62: 86-87.
- [2] 周艳芬, 耿玉杰, 吕红转. 风电场对环境的影响及控制[J]. *湖北农业科学*, 2011, 50(13): 2642-2646.  
Zhou Yanfen, Geng Yujie, Lü Hongzhan. The environmental impact of wind power station and its control[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(13): 2642-2646.
- [3] 国家能源局. 全国海上风电开发建设方案(2014-2016)[J]. *机电设备*, 2015, 32(1): 7-8.  
National Energy Administration. National offshore wind power development and construction plan (2014-2016)[J]. *Electrical and Mechanical Equipment*, 2015, 32(1): 7-8.
- [4] 赵英杰, 周斌, 曹媛媛. 港口爆破施工的主要环境影响及评价方法[J]. *海洋技术学报*, 2007, 26(1): 96-100.  
Zhao Yingjie, Zhou Bin, Cao Yuanyuan. Harbor demolition construction main environmental[J]. *Journal of marine Technology*, 2007, 26(1): 96-100.
- [5] 贾晓平, 林钦, 蔡文贵. 大亚湾马鞭洲大型爆破对周围水域环境与海洋生物影响的评估[J]. *水产学报*, 2002, 26(4): 313-320.  
Jia Xiaoping, Lin Qin, Cai Wengui. Evaluation for the impact of large explosin at Mabianzhou Island on the neighboring aquatic environment anf marine organisms in Daya[J]. *Journal of fisheries of China*, 2002, 26(4): 313-320.
- [6] 赵文, 李晓杰, 郭凯, 等. 大连大孤山海区水下爆破对海洋环境及浮游生物的影响[J]. *大连海洋大学学报*, 2011: 26(1): 79-82.  
Zhao Wen, Li Xiaojie, Guo Kai, et al. The impacts of underwater explosion on aquatic environment and plankton in coastal Dagushan in Dalian, Liaoning Province[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2011, 26(1): 79-82.
- [7] Codarin A, Wysocki L E, Ladich F, et al. Effects of ambient and boat noise on hearing and communication in three fish species living in a marine protected area (Miramare, Italy)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58: 1880-1887.
- [8] Nedwell J, Howell D. A Review of Offshore Windfarm Related Underwater Noise Sources[R]. UK: Subacoustech Ltd, 544R038, 2004.
- [9] 张国胜, 顾晓晓, 邢彬彬, 等. 海洋环境噪声的分类及其对海洋动物的影响[J]. *大连海洋大学学报*, 2012, 27(1): 89-94.  
Zhang Guosheng, Gu Xiaoxiao, Xing Binbin, et al. The classification and the impact of marine environment noise on marine animals[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2012, 27(1): 89-94.
- [10] 闫秋双, 刘荣杰, 马毅. 1973 年以来射阳河口附近海岸蚀淤变化遥感分析[J]. *海洋科学*, 2015, 39(9): 94-100.  
Yan Qiushuang, Liu Rongjie, Ma Yi. Remote sensing analysis of shoreline changes along the coast near the Sheyang River Estuary of Jiangsu Province since 1973[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(9): 94-100.
- [11] GB/T 19485-2014, 海洋工程环境影响评价技术导则[S]  
GB/T 19485-2014, Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment of Marine Engineering[S].
- [12] GB/T 5265-2009, 声学 水下噪声测量[S].  
GB/T 5265-2009, Acoustics-Measurement of Underwater Noise[S].
- [13] 杨燕明. 海洋噪声与哺乳动物[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.  
Yang Yanming. *Marine Noise and Mammal*[M]. BeiJing: Ocean Press, 2010.
- [14] Wenz G M. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1962, 34: 1936-1956.
- [15] 吴静. 海洋环境噪声建模研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.  
Wu Jing. Research on ocean ambiellt noise modeling[D]. Haerbin: Harbin Engineering University, 2007.
- [16] 刘伯胜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1993.  
Liu Bosheng. *Principles of Underwater Acoustics*[M]. Haerbin: Harbin Engineering University Press, 1993.
- [17] Bolle L J, Jong C A F D, Bierman S M, et al. Common sole larvae survive high levels of pile-driving sound in controlled exposure experiments[J]. *Plos One*, 2012, 7: e33052.
- [18] National Marine Fisheries Service (NMFS). Proactive conservation program: species of concern- office of protected resources-NOAA fisheries[EB/OL].[2017-01-01]. <http://www.nmfs.noaa.gov/pr/species/concern/>. Accessed 22 March 2009.
- [19] 刘贞文, 许肖梅, 黄二辉, 等. 大黄鱼的声刺激行为研究[J]. *应用海洋学学报*, 2014, 33(1): 105-110.  
Liu Zhenwen, Xu Xiaomei, Huang Erhu, et al. Study on behavior of sound stimulation for large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*)[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2014, 33(1): 105-110.
- [20] 许兰英, 齐孟鸮. 黄、渤海两种鱼噪声谱的水下观测[J]. *海洋科学*, 1999, 23(4): 13-14.  
Xu Lanying, Qi Meng'e. Noise spectra of two fishes as observd in Bohai Sea and Yellow Sea[J]. *Marine Sciences*, 1999, 23(4): 13-14.

# Measurement analysis on the radiation noise characteristics of underwater piling in offshore wind farm

JI Xin-lei, YANG Hong, DING Jun, WANG Chun-feng

(College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Received:** Feb. 21, 2017

**Key words:** underwater pile driving; ambient noise of the sea; noise propagation; offshore wind farm

**Abstract:** A complete piling process of an offshore wind farm have been monitored and analyzed at different water depths. The results show that underwater radiation noise is an impulsive signal, and the ambient noise level near the construction sea waters was increased by 20–50 dB from the original 130 dB during the piling process. The underwater radiation noise spectrum level during piling is 30–65 dB higher than the background value in the study area before the project, and multiple consecutive peaks appeared in the frequency range of 100–1000 Hz. In addition, the highest peak of spectrum level was 200 Hz at different depths. Moreover, based on the results of underwater radiation noise monitoring and the shallow water semi-empirical equation by Marsh and Schulkin, the radiation noise source level caused by the piling process (1 m from the center of the sound source) was calculated to be 210.2 dB re 1  $\mu$ Pa. This paper can provide the basic data for further studies on underwater piling radiation noise, and the analysis results can be used as a reference for marine environment and marine biological protection.

(本文编辑: 刘珊珊)