

学校编码：10384
学号：31120111151343

分类号_____密级_____
UDC_____

廈門大學

硕士学位论文

海上风电场建设水下噪声对中华白海豚影
响研究

Research on the impact of underwater noise radiated from
offshore wind farm on Chinese white dolphin(*Sousa
chinensis*)

汪启铭

指导教师姓名：许肖梅 教授
专业名称：海洋物理
论文提交日期：2014 年 5 月
论文答辩时间：2014 年 5 月
学位授予日期：2014 年 月

答辩委员会主席：

评阅人：

2014 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

近年来,随着“低碳经济”理念被人们逐步接受并倡导,加大清洁能源开发力度成为未来能源的发展方向。在清洁能源的开发和利用中,风能利用技术相对成熟,而海上风能利用是其重要组成部分。但在海上风电场的建设期和运营期,尤其是在风机桩基固定过程中进行的冲击式打桩作业,会向水中辐射高强度、瞬发性、宽频带的脉冲信号。研究表明,冲击式水下打桩噪声会影响海洋哺乳动物的行为,掩蔽其声学信号,甚至造成其听觉损伤。

中华白海豚(*Chinese white dolphin, Sousa chinensis*)是我国国家一级保护动物,在我国主要分布在东南沿海。中华白海豚利用回声定位信号进行水下目标的探测与识别,通过声学信号进行个体间的交流,声学信号是中华白海豚赖以生存的重要工具。海上风电场水下打桩噪声和运营期噪声可能会造成中华白海豚的听觉损伤,并掩蔽其水下发声信号,最终影响其正常的生命活动。

为了保护中华白海豚,降低海上风电场水下打桩噪声和运营期噪声对中华白海豚的影响,需要对水下打桩噪声和海上风机运营期水下噪声进行现场监测,通过时频域分析了解水下噪声的声学特性,并结合中华白海豚的听觉和声学信号特性,研究水下打桩噪声和海上风机运营期噪声对中华白海豚听觉和发声信号的影响,评估其对中华白海豚的影响范围和程度,从而为中华白海豚的声学保护提供参考依据。

本论文的主要内容为:

1、详细介绍了中华白海豚声学特性、海上风电场水下打桩噪声和运营期噪声声学特性及其对海洋哺乳动物影响的国内外研究进展,介绍了水下噪声监测设备以及信号处理方法;

2、对中华白海豚 click 信号进行实际测量,分析 click 信号的时频域特性并估计其声源级,比较厦门海域和雷州湾海域中华白海豚的 click 信号特性;

3、对水下打桩噪声进行实际测量,分析其时频域特性,并对水下打桩噪声的声学参数进行统计,研究水下打桩噪声的传播特性;基于 $dB_{ht}(\text{species})$ 参数评估水下打桩噪声对中华白海豚听力和行为的影响,并探究其对中华白海豚声信号

的掩蔽效应；

4、对海上风机运营期水下噪声进行实际测量，分析其时频域特性；基于海洋哺乳动物物种噪声剂量 $dB_{hl}(\text{species})$ 参数来评估海上风机运营期水下噪声对中华白海豚听力和行为的影响，并分析其对中华白海豚声学信号的掩蔽效应。

关键词：中华白海豚；海上风机；水下打桩；水下噪声

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

With the concept of “low carbon economy” is gradually accepted and advocated by human in recent years, It’s the new development tendency to minimize the burning of fossil fuels and intensify our efforts to develop the clean energy. In the development and utilization of clean energy, the technology of wind energy development is more mature, and offshore wind energy is an important component of the whole wind energy. However, offshore wind farms will radiate lots of noise to the sea during the construction period and operation period, especially the process of percussive piling operations to fixing the foundation piles, which will radiate high-intensitive, instantaneous and wideband pulse signals underwater. Some researches show the noise caused by percussive piling underwater can affect the behaviors of marine mammals, such as masking its acoustic signal, and even damaging its hearing organ.

Chinese white dolphin(*Sousa chinensis*), which mainly distributes in the southeast coast in our country, is the first-class national protected animals. They use echolocation signal for underwater target detection and recognition and use acoustic signal to communicate between individuals, which is an important tool for them to survive in their living environment. The noise radiated from underwater pile-driving and offshore wind turbine may cause hearing damage to Chinese white dolphins and mask their underwater sound, which may finally affect their normal life activities.

In order to protect the Chinese white dolphin, and mitigate the impact from underwater noise radiated from underwater pile-driving and operational offshore wind turbine,we need to monitor underwater noise radiated from underwater pile-driving and operational offshore wind turbine. through combining time and frequency domain analysis of noise radiated from underwater pile-driving and operational offshore wind turbine with acoustic signal characteristics of Chinese white dolphin, we can understand whether underwater noise radiated from underwater pile-driving and operational offshore wind turbine will affect the hearing and acoustic signal of Chinese white dolphin, and assess their impact on the scope and extent of Chinese white dolphins,thus we can provide reference basis for Chinese white dolphin acoustic protection.

The main contributions of this paper are as follows:

1. Introduce the acoustic characteristics of Chinese white dolphins, the acoustic characteristics of noise radiated from underwater pile-driving and operational offshore wind turbines and the impact on marine mammals in detail, and introducing the research equipment about monitoring of underwater noise and method of signal process.

2. Record the clicks of wild Chinese white dolphin, analyse the time and frequency domain characteristics of their clicks and estimate its source level, compare characteristics of clicks from Chinese white dolphin between Xiamen sea and Leizhou Bay.

3. Record underwater pile-driving noise, analyze its time-frequency domain characteristics, calculate the acoustic parameters of underwater pile-driving noise, study the propagation characteristics of underwater pile-driving noise; Assess the impact of underwater pile-driving noise on hearing and behaviors of Chinese white dolphin based on the dB_{ht} (species) parameters, and discuss the masking effect of underwater pile-driving noise on them.

4. Record underwater noise of operational offshore wind turbine, then analyze its time-frequency domain characteristics; Assess the impact of noise radiated from operational wind turbine on hearing and behaviors of Chinese white dolphin based on the dB_{ht} (species), discuss the masking effect of noise of operational wind turbine.

Keyword: Chinese white dolphin; offshore wind turbine; underwater pile-driving; underwater noise

目 录

摘 要	I
Abstract	III
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 海上风电发展概况.....	2
1.1.2 海上风机结构及打桩.....	3
1.1.3 中华白海豚及其保护.....	5
1.2 国内外研究进展.....	7
1.2.1 海豚声学研究进展.....	7
1.2.2 海上风机打桩噪声研究进展.....	11
1.2.3 海上风电场水下打桩噪声对海洋哺乳动物的影响研究进展.....	14
1.2.4 海上风机运营期水下噪声研究进展.....	16
1.2.5 海上风机运营期水下噪声对海洋哺乳动物的影响.....	19
1.2.6 海上风机打桩和运营期水下噪声对海洋鱼类的影响.....	20
第二章 水下噪声和信号的采集与分析.....	23
2.1 数据采集系统.....	23
2.1.1 基于 NI 数据采集卡的采集系统.....	23
2.1.2 DSG 数据采集系统.....	28
2.2 数据分析软件及方法.....	30
2.2.1 数据分析软件.....	30
2.2.2 数据分析方法.....	31
第三章 中华白海豚 click 信号特性分析.....	33
3.1 中华白海豚 click 信号采集.....	33
3.2 中华白海豚 click 信号特性分析.....	34
3.2.1 信号处理方法.....	34
3.2.2 信号分析变量及方法.....	34
3.2.3 中华白海豚 click 信号分类及时长.....	35
3.2.4 中华白海豚 click 信号峰峰声源级.....	38
3.2.5 中华白海豚 click 信号频域特性.....	42

第四章 水下打桩噪声特性分析及其对中华白海豚的影响	45
4.1 水下打桩噪声记录与特性分析	45
4.1.1 水下打桩施工及水下打桩噪声记录	45
4.1.2 水下打桩噪声特性分析	47
4.2 水下打桩噪声对中华白海豚的影响	53
4.2.1 评价水下噪声对鲸豚影响的参数及比较	54
4.2.2 水下打桩噪声中华白海豚的噪声剂量分贝值 $dB_{ht}(Sousa chinensis)$ 评估	58
4.2.3 水下打桩噪声对中华白海豚声信号掩蔽的探究	61
4.3 总结与讨论	63
第五章 海上风电场运营期水下噪声对中华白海豚的影响	65
5.1 海上风机运营期水下噪声的记录与分析	65
5.1.1 海上风机运营期水下噪声监测	65
5.1.2 海上风机运营期水下噪声特性分析	66
5.2 海上风机运营期水下噪声对中华白海豚的影响	69
5.2.1 海上风机运营期水下噪声对中华白海豚声信号掩蔽的探究	69
5.2.2 海上风机运营期水下噪声中华白海豚噪声剂量分贝值 $dB_{ht}(Sousa chinensis)$	70
5.3 总结与讨论	71
第六章 总结与展望	72
参考文献	73
致 谢	80
攻读硕士学位期间获得的成果	81

Contents

Abstract(in Chinese)	I
Abstract	III
Contents(in Chinese)	V
Contents	VI
Chapter 1 Preface	1
1.1 Background and Significance	1
1.1.1 Overview of offshore wind power development.....	2
1.1.2 Offshore wind turbine structures and pile-driving.....	3
1.1.3 Chinese white dolphin(<i>Sousa chinensis</i>) and their protection.....	5
1.2 Developing status	7
1.2.1 Developing status of signals of dolphin.....	7
1.2.2 Developing status of underwater pile-driving noise during construction of offshore wind farm.....	11
1.2.3 Developing status of impact of underwater pile-driving on marine mammals.....	14
1.2.4 Developing status of underwater noise from operational offshore wind turbine.....	16
1.2.5 Developing status of impact of underwater noise from operational offshore wind turbine on marine mammals.....	19
1.2.6 The impact of underwater noise radiated from pile-driving and operational wind turbine on marine fish.....	20
Chapter 2 The acquisition and analysis of underwater noise and signal	23
2.1 Data acquisition system	23
2.1.1 Data acquisition system based on NI data acquisition card.....	23
2.1.2 DSG data acquisition system.....	28
2.2 Software and method of data process	30
2.2.1 Software of data process.....	30
2.2.2 Method of data process.....	31
Chapter 3 Analysis of characteristics of clicks from chinese white Dolphin	33

3.1 Aquisition of click	33
3.2 Analysis of click	34
3.2.1 Method of data process.....	34
3.2.2 The variable and method of data anlyze.....	34
3.2.3 Classification and duration of click.....	35
3.2.4 The peak-peak source level of click.....	38
3.2.5 Frequency domain characteristics of click.....	42
Chapter 4 Characteristics of underwater pile-driving noise and its effect on Chinese white dolphin	45
4.1 Record and analysis of underwater pile-driving noise	45
4.1.1 underwater pile-driving project and record of underwater noise of Pile driving.....	45
4.1.2 The characteristic analysis of underwater pile-driving noise.....	47
4.2 Impact from underwater pile-driving noise on Chinese white dolphin	53
4.2.1 Comparision of parameters used to access impact of underwater noise on cetaceans.....	54
4.2.2 The estimated $dB_{ht}(Sousa chinensis)$ when exposed to underwater piledriving noise.....	58
4.2.3 Study about mask effect of underwater pile-driving noise on dolphin's acoustic signal.....	61
4.2.4 Conclusion and discussion.....	63
Chapter 5 Impact of underwater noise of operational offshore wind turbine on Chinese white dolphin	65
5.1 Record and analysis of underwater noise of operational wind turbine	65
5.1.1 Record of underwater noise of operational offshore wind turbine.....	65
5.1.2 Analysis of underwater noise of operational offshore wind turbine....	66
5.2 Impact of underwater noise of operational offshore wind turbine on Chinese white dolphin	69
5.2.1 Study about the mask effect of underwater pile-driving noise on dolphin's acoustic signals.....	69
5.2.2 $dB_{ht}(Sousa chinensis)$ when Chinese white dolphin is exposed to noise of operational wind turbine.....	70
5.3 Conclusion and discussion	71

Chapter 6 Review and future prospect	72
References	73
Acknowledgements	80
Achievements during postgraduate	81

厦门大学博硕士论文摘要库

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

中华白海豚(Chinese white dophin, *Sousa chinensis*)是我国国家一级保护动物, 它被国际自然保护联盟 IUCN 列为“近危”物种, 也是濒危野生动植物物种国际贸易公约(CITES) 附录 I 物种。和其它鲸豚一样, 中华白海豚具有发达的生物声呐系统, 利用回声定位信号进行水下目标的探测识别。此外, 中华白海豚通过发射特定的调频信号进行种群内部个体之间的交流, 这对于群居动物尤为重要。因此, 中华白海豚的声发射、接收系统是其生命活动中的一个重要工具。

随着人类社会经济的快速发展以及陆上能源的逐渐短缺, 涉海工程数量不断增加, 如跨海大桥、海底隧道、船舶港口码头、海上油气平台、海上风电场的建设等, 这些涉海工程中要进行水下爆破、水下打桩、水下钻孔、海底清淤等工程作业, 而这些工程作业会造成严重的噪声污染, 尤其是水下爆破和水下打桩, 它们所产生的高强度冲击脉冲会掩盖海豚的声学信号, 造成海豚的听觉损伤, 甚至损伤其内部器官而造成直接死亡。近年来在厦门和珠江口发生的多例中华白海豚死亡事件, 可能就与这些涉海工程有关。

能源是人类活动的物质基础, 人类最常用的能源是化石燃料, 在其燃烧过程中会产生大量对环境有害物质。因此, 为了经济的可持续发展, 人类正在大力发展可替代化石燃料且环境污染小的清洁能源。在清洁能源的开发与利用中, 风能利用技术相对较为成熟, 全球已有多个国家开始开发利用风能, 其中海上风能开发占风能总开发的比重越来越大, 多个国家已经建成海上风电场。但是, 海上风电场建设期风机桩基固定中进行的冲击式打桩作业, 其带来的高强度水下脉冲会对海洋环境造成严重的噪声污染。此外, 在风电场营运期, 由风机自身的结构振动产生的水下噪声可能会对中华白海豚造成影响, 且风电场营运期是一个漫长的过程, 其对中华白海豚造成的长期效应也值得研究。

欧洲一些发展海上风电场国家, 已经就海上风电场建设和营运对海洋生物的影响进行过大量的研究, 但因为中华白海豚自身地域分布的局限性, 关于海上风电场建设和营运对中华白海豚影响的研究相对较少。本文将对水下打桩噪声、风

电场营运水下噪声以及中华白海豚声学特性进行监测和分析,研究水下打桩噪声的传播衰减规律,评价海上风电场水下打桩噪声和营运期水下噪声对中华白海豚的影响,希望能对中华白海豚的声学保护提供科学的参考依据。

1.1.1 海上风电发展概况

表 1.1 2012 年世界海上风电装机总容量排名前 13 的国家^[1]

Table 1.1 The top 13 countries of offshore wind farm capacity in 2012^[1]

排名	国家	2012 年海上风机总装机容量 (MW)	2012 年新增添海上风机装 机容量 (MW)
1	英国	2947.9	1423.3
2	丹麦	921.0	63.4
3	中国	389.6	167.3
4	比利时	379.5	184.5
5	德国	280.3	65.0
6	荷兰	249.0	0
7	瑞典	164.0	0
8	芬兰	30.0	0
9	日本	25.3	0
10	爱尔兰	25.2	0
11	西班牙	10.0	0
12	挪威	2.3	0
13	葡萄牙	2.0	0
	总计	5426.1	1903.8

根据世界风能协会最新一期的调查报告,截至 2013 年 6 月,世界风电装机总容量达到 296 GW^[2]。由于海上风力资源丰富,且海上风电场远离人群,不会造成噪声污染,因此世界各国加紧海上风电发展步伐。自 1991 年瑞典建成世界上第一座海上风电场以来,目前已有 13 个国家涉足海上风电领域,表 1.1 为 2012 年这 13 个国家海上风电场装机容量,英国是世界上海上风电装机总容量最大的国家,中国排名第三,截至 2012 年年底,世界海上风电装机总容量达到了 5416 MW^[1]。

我国处于热带和温带季风气候区域范围,风力资源相对丰富,并且我国东南

沿岸海岸线蜿蜒绵长，因此具备发展海上风电的客观条件，海上风电发展潜力巨大。根据中国气象局在 21 世纪初做的一项中国风能评价报告，中国在沿岸（水深低于 20 m）风能潜力达到 750 GW，这是陆地上风能潜力总量（250 GW）的 3 倍。中国第一个海上风电试点工程部署在渤海湾的 36-1 油田，该工程仅包含 1 座装机容量为 1.5 MW 的风机，并于 2007 年 11 月并网发电。我国第一座商业性质的海上风电场是上海东海大桥海上风电场，它共包含 34 台容量为 3 MW 风机，并于 2010 年 6 月并网发电。我国第一座潮间带风电场于 2010 年 9 月底并网发电，它位于江苏如东，由 16 座风机组成且装机总容量为 32 MW。在 2010 年 5 月，第一轮的海上风电特许经营项目开始启动，共有 4 个项目装机总容量达到了 1 GW，它们均位于江苏省，分别是滨海和射阳海上风电场项目，大丰和如东潮间带风电场项目^[3]。

1.1.2 海上风机结构及打桩

典型的海上风机主要由叶片、机舱、塔架和桩基构成，机组安装一般流程是先安装桩基，再安装塔架、机舱、叶片等上部结构^[4]。海上风机的桩基用来支撑上部的风机塔架、机舱和叶片，因此选择一种合适的桩基结构对于风机的正常运转非常重要。海上风机桩基结构一般采用固定型，而漂浮型桩基结构还在测试当中，这是未来海上风机桩基结构的发展方向。在桩基实际选择中，应该从环境影响、经济效益等多方面进行综合考量。如图 1.1，海上风机桩基结构主要有单桩基型、三脚架型和钢管架型，以下为这三种桩基结构特点的简要介绍^[5]：

(1)单桩基型(Monopile)：它的结构简单，它的基础是一根打入海床的焊接钢管，直径为 3~6 m，适用于 25 m 以下水深。

(2)三脚架型(Tripod)：它由三根圆柱形钢管组成一个三角支撑结构，每根钢管直径为 1~2 m，适用于 25 m 到 50 m 水深。

(3)钢管架型(Jacket)：它由四根圆柱形钢管组成一个四脚支撑结构，主要用于大型海上发电结构，适用于 25 m 到 50 m 水深。

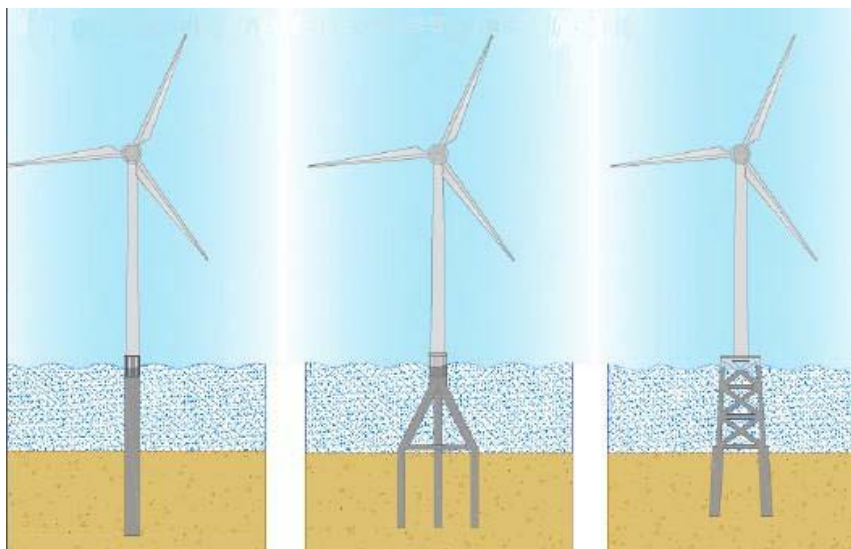


图 1.1 单桩基型、三脚架型和钢管架型桩基结构海上风机示意图

Fig. 1.1 The schematic of monopile, tripod and jacket of offshore wind turbine

世界上大部分海上风电场建设在水深低于 25 m 的浅海^[6]，根据不同桩基适用水深条件，可以推测海上风电场风机桩基以单桩基型为主。单桩基固定作业中选择冲击式打桩和振动式打桩，图 1.2 为这两种打桩形式的示意图。



图 1.2 冲击式打桩示意图（左）夹紧钢桩的 PVE 300M 振动打桩锤（右）

Fig. 1.2 The schematic of impact pile driving(left) and PVE 300M vibratory pile driving(right)

冲击式打桩一般采用液压打桩锤，按其结构和工作原理可分成单作用式和双作用式两种。单作用式指冲击锤芯通过液压装置被提升到计划高度后快速释放，接着以自由落体式打击桩体；而双作用式指冲击锤芯通过液压装置提升到计划高

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

廈門大學博碩士論文摘要庫