

# 海上风电电磁辐射对海洋生物影响的研究综述

蔡灵,姜尚,马丽,郭洲华

(自然资源部第三海洋研究所 厦门 361005)

**摘要:**海上风电工程是我国解决能源危机的新举措。为更好地推动我国海上风电建设与海洋生态环境保护的和谐发展,文章综述海上风电的电磁辐射对海洋生物的影响。已有的研究表明:海上风电对海洋生物的电磁辐射影响的主要来源是海底电缆,电磁辐射产生影响主要是因为某些海洋生物具有磁敏感性;磁场可能影响鱼类迁徙等海洋生物运动,且足够强度的磁场还会影响海洋生物的生殖和发育等生理过程;随着海上风电的快速发展,深远海海上风电的电磁辐射影响亟待更多的研究。

**关键词:**海上风电;电磁辐射;海底电缆;海洋生物;海洋工程

**中图分类号:** TM614;P75;P735

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005—9857(2019)12—0071—05

## Review of the Research on the Effects of Electromagnetic Radiation from Offshore Wind Power on Marine Organisms

CAI Ling, JIANG Shang, MA Li, GUO Zhouhua

(Third Institution of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Offshore wind power project is a new measure to solve the energy crisis in China. In order to better promote the harmonious development of offshore wind power construction and marine ecological environment protection, the impact of electromagnetic radiation of offshore wind power on marine organisms was summarized in this paper. It was reported that the submarine cable was the main source of the electromagnetic radiation worked on the marine organisms. The influence of electromagnetic radiation from the submarine cable was summarized mainly due to the magnetic sensitivity of some marine organisms: the magnetic field may affect the movement of marine organisms, such as the migration of fish, etc., and the magnetic field of sufficient strength may also affect the physiological processes of reproduction and development of marine organisms. With the rapid development of offshore wind power, more research should be made on the influence of electromagnetic radiation of deep sea offshore wind power.

收稿日期:2019-04-18;修订日期:2019-11-01

基金项目:海洋公益性行业科研专项项目“海洋风电项目生态环境监测指标体系与生态效应评估方法研究”(201505027-5)。

作者简介:蔡灵,高级工程师,博士,研究方向为海洋环境科学

通信作者:郭洲华,工程师,硕士,研究方向为环境规划与评价

**Key words:** Offshore wind power, Electromagnetic radiation, Submarine cable, Marine organism, Marine engineering

## 0 引言

风力发电是可再生能源技术领域最成熟的发电方式之一,对解决能源危机和调整能源结构具有非常积极的意义。海上风电是近年来我国兴起的海洋工程类型。我国海上风能资源丰富,根据《中国风电发展路线图 2050 年》,我国水深 5~50 m 海域、100 m 高度的海上风能资源开放量为 5 亿 kW,总面积为 39.4 万 km<sup>2</sup>。

与此同时,海上风电的施工和运营可能对海洋环境造成的影响也是公众关心的热点,其中包括海上风电场对海洋的水文动力环境、地形地貌环境、冲淤环境、鸟类生态环境、生物生态环境、声环境和电磁环境等的影响。目前我国对于海上风电电磁辐射影响的研究较少,本研究收集并整理多年来国内外海上风电电磁辐射对海洋生物影响的研究成果,以期为我国海上风电的发展提供技术支持,并为相关研究奠定基础。

## 1 电磁辐射影响来源

海上风电机组、升压站和海底电缆是海上风电主要的电磁辐射影响来源(图 1)。

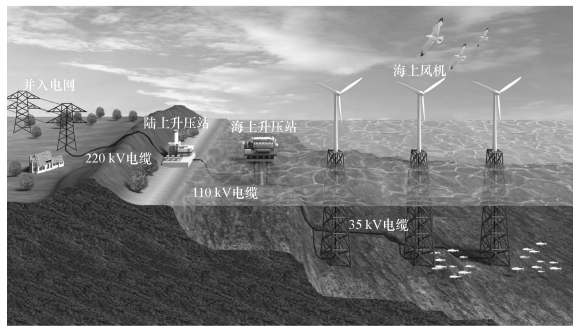


图 1 典型海上风电场布局

风电机组和升压站均位于海面上,且不同介质电磁辐射的衰减很快,对海洋生物的影响较小。因此,有可能对海洋生物产生电磁辐射影响的主要是海上风电的输电电缆。同时,由于电缆绝缘屏蔽外壳接地,屏蔽了电场,电缆外部主要是磁场辐射,且海底电缆产生的磁场主要来源于保护层中的铁磁

性材料和自身的加载电流。

## 2 海底电缆的电磁辐射

### 2.1 海底电缆的基本结构

根据导体结构,海底电缆可分为单芯电缆和三芯电缆<sup>[1-2]</sup>,我国海上风电的电缆大多数采用三芯电缆。三芯电缆的优点包括:电缆本身可加钢带铠装,防外力破坏的能力强,占地面积小,可敷设在各种管材中,虽然施工较困难,但总体施工时间较短;缺点包括:受电缆盘和自身重量的限制,电缆一般不能太长,运输不方便,太粗的电缆敷设时较困难,不易弯曲,载流量比相同截面的单芯电缆小。

### 2.2 海底电缆内部的电磁场模拟

海底电缆的传输方式(交流或直流)、材料、电力传输特性和海水电导率等因素都将对其电磁环境产生一定的影响。电缆输电线路是静止的磁耦合回路,其负序阻抗和正序阻抗是相等的,即对称运行状态和不对称运行状态的阻抗相同。对正(负)序电流来说,其产生的磁场主要集中在导线附近的空间内,在远离导线处的空间将急剧衰减。交变磁场在金属屏蔽层产生感应电势,在屏蔽层及其接地点之间产生感应电压,其中线芯三相电流的向量和为 0,感应电压也为 0。

上海交通大学杨镜非团队利用 Ansys 软件<sup>[3]</sup>,研究 220 kV 交流聚乙烯海底电缆并建立模型,得到三芯电缆在正常运行时内部的电场分布,结果表明电缆外部屏蔽层的电场强度已下降到 10~17 V/m 的量级,由于电缆内部是时变的电压和电流,由时变电场产生的磁场在电缆外部已经很小。

### 2.3 海底电缆外部的电磁场模拟

英国利物浦大学智能监控中心<sup>[4]</sup>提供了工业标准的 13 kV 海底电缆外部的磁场分布,其中电缆埋深为 1 m,且随着距离的增加,电磁场由电缆中心的最大值迅速降低,在电缆外 1 m 的范围内,由电缆产生的磁场强度已降低至  $10^{-6}$  T。根据科学家的探测和研究,地球磁场强度约为  $(0.3 \sim 0.6) \times 10^{-4}$  T,因此电缆外部的磁场在很短距离

以外的影响已较小。

一些科学家<sup>[5-7]</sup>研究三芯海底电缆的电磁辐射。假设:平均水深为 20 m,海砂层厚 11 m,电缆埋在海床以下 1 m 处(图 2);电缆的相间电压为 135 kV 有效交流电压,每一相的交流电流为 700 A。

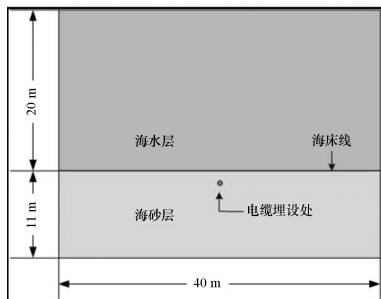


图 2 三芯海底电缆的布置

营运中的海上风电场电缆使用的三相电缆,每一相导体中均存在  $120^\circ$  的相位差,使得周围导体产生变化的磁场。模拟结果显示:尽管电缆的护套提供了良好的电场屏蔽,但无法屏蔽磁场,因此电缆外部存在一定的磁场;由于海水和海砂具有不同的电导率,仿真得到的电流密度在海水和海砂之间的界面呈现不连续状态,在观测半径相等的情况下,海水中的电流密度约为海砂中的 5 倍,因此电缆外部的感应强度为  $10^{-10} \sim 10^{-5}$  T。

袁健美等<sup>[8]</sup>根据我国江苏如东龙源海上风电示范区的情况,在风机运行过程中对海底电缆开展实际测量,其中电缆系统额定电压为 35 kV,短路电流为 1 200 A,系统频率为 50 Hz,海上测量水深为 5~10 m,海底电缆埋深为 2 m,据此计算距离电缆 0.1~6.0 m 处的磁场强度约为 0.04~2.40 mT。

### 3 电磁场对海洋生物的影响

海洋大型风电场长距离铺设的海底电缆所产生的高电压和大电流将对海洋生态环境产生影响,如当电流产生磁场时,洄游鱼类等海洋生物将受到影响。研究表明:某些海洋生物具有磁敏感性,磁场可能会影响其运动方向;海底电缆可能破坏或影响迁徙鱼类的地磁模式,且足够强度的磁场还会影响海洋生物的生殖和发育等生理过程。

#### 3.1 电磁辐射对海洋鱼类的影响

电磁场会对海洋鱼类的行为产生影响。早在

20 世纪 70 年代俄罗斯学者<sup>[9]</sup>就已证明河流中的鱼类从电线下方通过时会有反应,并猜测这是磁力的影响。Nishi 等<sup>[10]</sup>在黑暗的水族箱中用不同强度的人工电磁场刺激日本鳗鲡(*Anguilla japonica*),并通过心电图监测日本鳗鲡的磁敏感性,结果表明日本鳗鲡对 12.663  $\mu$ T 的 EW 向水平地磁场产生反应,相当于鹿儿岛 SN 向水平地磁场强度的 0.38 倍,因此日本鳗鲡无论是在海中还是河中都是磁敏感的。Karlsson<sup>[11]</sup>在八角形槽中测试欧洲银鳗(*Anguilla anguilla*)的磁性取向,结果表明单只鳗鱼的方向在 2 个磁场之间显著不同,即鳗鱼对磁场有反应。Souza 等<sup>[12]</sup>在八角形行为箱中施加不同的磁场,在 8 d 内记录黄鳗(*Anguilla rostrata*)的位置,结果表明磁场的变化会引起黄鳗行动方向的改变。丹麦能源公司在 Nysted 海上风电场进行调查,发现有些穿越电缆线路的鱼类迁移受到影响,但并非完全受阻。Gill 等<sup>[13]</sup>采用围隔实验的方法,证明底栖板鳃鱼类会对海底电缆释放的相关类型和强度的电磁场做出反应。袁健美等<sup>[8]</sup>研究海上风电电磁场对 12 种海洋生物的存活率和行为的影响,结果表明:1.00 mT(电缆处)强度磁场对黑鲷(*Sparus macrocephalus*)的存活率和行为有一定的影响,并初步判断距离电缆 1.2 m 外(磁场强度约为 0.20 mT)的位置为海洋鱼类对海上风电磁场的耐受范围;文蛤(*Mercenaria mercenaria Linnaeus*)等贝类对磁场的耐受性较好,海上风电电磁场对其存活率没有影响;在风电正常运营的情况下,底栖生物的存活率也未出现明显差异。

同时,电磁场会对海洋鱼类的生理造成一定的影响。Lerchl<sup>[14]</sup>研究溪红点鲑(*Salvelinus fontinalis*)在磁场中暴露的影响:该磁场由亥姆霍兹线圈产生,最大磁通密度为 40  $\mu$ T,频率为 1 Hz,200 ms 开,800 ms 关;通过特定的放射免疫测定法估算褪黑激素浓度,结果表明与对照组相比,MF 暴露显著增加夜间松果体( $P < 0.001$ )和血清( $P < 0.01$ )褪黑激素水平。Formicki 等<sup>[15]</sup>的研究结果表明,低值的恒定磁场暴露能减缓鳟(*Salmo trutta*)和虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的胚胎发育。Krzemieniewski 等<sup>[16]</sup>在实验室实验中发现,当欧洲鲑(*Silur-*

*us glanis*)暴露于强度持续为 0.4~0.6 T 的磁场中时,其生物量下降率和死亡率升高。然而 Bochert 等<sup>[17]</sup>的研究结果表明,幼体鳢(*Plathichthys flesus*)在受强度为 3.7 mT 的静电磁场影响数周时,并未受到影响。

### 3.2 电磁辐射对其他海洋生物的影响

唐超等<sup>[18]</sup>研究射频电磁辐射(RF-EMF)、极低频电磁场(ELF-EMF)和交变电场(AEF)3 种典型电磁环境胁迫对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)细胞氧化应激的影响作用。袁健美等<sup>[8]</sup>的研究结果表明:纵肋织纹螺(*Nassarius variciferus*)的回避行为受磁场影响明显,即在 24 h 之内,4.05 mT 和 0.90 mT 磁场暴露条件下的纵肋织纹螺分别有 8.30%和 3.30%逃离实验缸,其余均分布于实验缸边缘;磁场暴露下黑褐新糠虾(*Neomysis awatschensis*)的存活率有所降低,且在 4.05 mT 时表现尤为明显,存活率与对照组相比显著降低(10.53%)。Lohmann<sup>[19]</sup>的研究结果表明,肯普的雷德利海龟(*Lepidochelys kempi*)、绿海龟(*Chelonia mydas*)和海龟(*Caretta caretta*)都利用地球磁场进行定位并迁移。Boles 等<sup>[20]</sup>的实验结果证明,在排除其他因素干扰的情况下,多刺龙虾(*Panulirus argus*)也利用磁场进行定位。

## 4 结语

截至 2017 年年底,全球海上风电装机规模累计达到 18.81 GW,我国海上风电新增吊装容量逐年上升,海上风电累计装机容量达到 2.79 GW,约占全球海上风电装机总量的 14.8%。根据风电发展“十三五”规划,我国海上风电并网装机容量在 2020 年将超过 5 GW,开工容量将超过 10 GW。

海上风电项目用海会造成海洋空间的破碎化,制约海域未来开发利用活动。海上风电场占用生境对鸟类迁徙、海水水质和底栖生物的影响,施工噪声对海洋哺乳动物的影响,海底电缆的电磁辐射影响以及对海域水文动力的影响等都是海上风电场工程建设亟须重点关注的环境问题,目前这些问题尚未有科学有力的结论。

海上风电场在发展初期多布局在潮间带和近海海域,随着潮间带浅海海域资源的紧缺以及海上

风电深远海安装技术和能力的提升,越来越多的风电场开始走向深远海,深远海的海上风电发展潜力巨大。然而由于缺乏深远海的相关基础数据,世界各国仍不能有效开展深远海海上风电项目的生态环境影响评价。为此,我国仍须开展大量的基础研究和监测工作。

## 参考文献

- [1] 彭婵.500 kV 海南联网海底电缆试验技术研究[D].武汉:华中科技大学,2009.
- [2] 苑光辉.高压海底电缆金属护套和铠装层损耗的研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.
- [3] 刘硕.海底高压电缆故障监测和电磁暂态分析研究[D].上海:上海交通大学,2012.
- [4] BOEHLERT G, GILL A. Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: a current synthesis [J]. *Oceanography*, 2010, 23(2): 68—81.
- [5] GILL A B, HUANG Y, SPENCER J, et al. Electromagnetic fields emitted by high voltage alternating current offshore wind power cables and interactions with marine organisms[R]. London: COWRIE Ltd., 2012.
- [6] GILL A B, BARTLETT M, THOMSEN F. Potential interactions between diadromous fishes of U.K. conservation importance and the electromagnetic fields and subsea noise from marine renewable energy developments[J]. *Journal of Fish Biology*, 2012, 81(2): 664—695.
- [7] Centre for Marine & Coastal Studies, University of Liverpool. A baseline assessment of electromagnetic fields generated by offshore windfarm cables[R]. London: COWRIE Ltd., 2003.
- [8] 袁健美, 贲成恺, 高继先. 海上风电电磁场对 12 种海洋生物存活率与行为的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(11): 3051—3056.
- [9] PODDUBNY A G, MALININ L K, SPECTOR I. Biotelemetry in fisheries research and practice[R]. Rome: Food and Agriculture Organization and the United Nations, 1979.
- [10] NISHI T, KAWAMURA G, MATSUMOTO K. Magnetic sense in the Japanese eel, *Anguilla japonica*, as determined by conditioning and electrocardiography[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2004, 207(17): 2965—2970.
- [11] KARLSSON L. Behavioural responses of European silver eels (*Anguilla anguilla*) to the geomagnetic field[J]. *Helgolander Marine Research*, 1985, 39(1): 71—81.
- [12] SOUZA J J, POLUHOWICH J J, GUERRA R J. Orientation responses of American eels, *Anguilla rostrata*, to varying magnetic fields[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 1988, 90(1): 57—61.

[13] GILL A B, HUANG Y, PHILIPS I G, et al. EMF-sensitive fish response to EM emissions from sub-sea electricity cables of the type used by the offshore renewable energy industry [R]. London: COWRIE Ltd., 2009.

[14] LERCHL A. The effects of pulsing magnetic fields on pineal melatonin synthesis in a teleost fish (*Brook trout, Salvelinus fontinalis*) [J]. Neuroscience Letters, 1998, 256(3): 171.

[15] FORMICKI K, WINNICKI A. Reactions of fish embryos and larvae to constant magnetic fields [J]. Italian Journal of Zoology, 1998, 65: 479—482.

[16] KRZEMIENIEWSKI M, TEODOROWICZ M, DEBOWSKI M, et al. Effect of a constant magnetic field on water quality and rearing of european sheatfish *Silurus glanis* L. larvae [J]. Aquaculture Research, 2015, 35(6): 568—573.

[17] BOCHERT R, ZETTLER M L. Long-term exposure of several marine benthic animals to static magnetic fields [J]. Bioelectromagnetics, 2004, 25(7): 498—502.

[18] 唐超, 喻慧, 杨传俊, 等. 电磁环境胁迫对铜绿微囊藻氧化应激和光合固碳酶的影响作用研究 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 3194—3200.

[19] LOHMANN K J. Detection of magnetic field intensity by sea turtles [J]. Nature, 1996, 380(6569): 59—61.

[20] BOLES L C, LOHMANN K J. True navigation and magnetic maps in spiny lobsters [J]. Nature, 2003, 421(6918): 60—63.