

目标尾流电磁场海上试验及数据分析

史建伟 龚梅

江苏伏波海洋探测科技有限公司 江苏常熟 215500

摘要: 水面或者水下运动目标航行时会形成一种称为表面波的尾迹向外传播,称为尾流。尾流在地磁场中运动会切割地磁感线产生感应电流,从而产生可被探测到的感应电磁场。为了厘清了运动目标尾流感应电场的产生机理、传播规律和分布特性,并建立目标尾流感应电磁场数学模型,本文专门研制了目标尾流感应电磁场探测系统,并运用该系统开展了一系列海上实测试验。本文根据这些实测数据对运动目标尾流感应电磁场的可探测性与特性进行分析,为水中目标探测提供了新途径。

引言:

当前世界各国开始广泛关注水下非声场源的研究,国内外研究表明,目标电磁场是一种可以用来对目标进行探测和识别的信号源。探测运动船舶的电磁场可以分为两类:一类是直接探测船舶本身产生的电磁场;另一类是探测船舶运动引起尾流而产生的感应电磁场。若假设海水的密度是均匀的(即海水密度不随深度变化而变化),那么船舶或者水下航器航行时会形成一种称为表面波的尾迹向外传播,而航行器的尾流主要由两部分组成:一是目标两侧和螺旋桨射流引起的涡旋迭加而形成的湍流;二是流体绕过目标压力发生变化引起自由表面的再度形变和流中的附加速度迭加而产生的兴波尾流^[1]。尽管目前国内外许多学者提出了湍流的一些速度场函数模型,但是由于湍流波动十分复杂,并且海面还会在一定程度上抑制湍流的传播,因此很难完全在理论上建立准确的湍流流场模型,因此在研究目标尾流时主要考虑兴波尾流。

研究表明,尾流残留时间一般长达15~45min,能用肉眼观察的尾流长度可达6000m。导电的海水(尾流)在地磁场中运动会切割地磁感线产生感应电流,从而产生可被探测到的感应电磁场。尾流感应电磁场不仅标注了目标在水面运动的航迹,而且其残留时间与船型、航速、螺旋桨空泡性能等参数紧密相关^[2],同时目标的尾流是不可消除的,只要目标航行尾流都会存在。相比于声和激光探测尾流的方式,利用目标尾流电磁场进行探测具有如下特点:(1)具有明显的线谱特征和谐波成分,传播距离远,因而可以作为理想的探测信号源;(2)只要目标运动就会有尾流存在,因此尾流感应电磁场不可消除的,是目标的目标暴露源^[3]。

综上,对目标尾流感应电磁场的探测技术研究可对海上电磁探测浮标、水下电磁探测装置提供新的探测技

术途径。本文为了验证尾流感应电磁场的可探测性,开展了一系列海上目标实测试验,并对尾流感应电磁场的特性、探测距离进行了分析,得出目标尾流电磁场的多种特性。

一、试验装置与内容

本次海试搭载1套沉底式尾流感应电磁场探测系统样机,用于在对航道内进行沉底探测,具体的试验项目包括:(1)测试样机能否正常返回数据,样机是否能够有效探测到目标电磁数据。(2)船舶电场、磁场和水压场测量,目的是为验证尾流感应电磁场的可探测性,通过对尾流水压场的测量从侧面验证尾流的存在。

试验装置如图2.1所示,主要包括电场传感器、感应线圈棒磁传感器、水压传感器和玻璃球仪器舱组成。

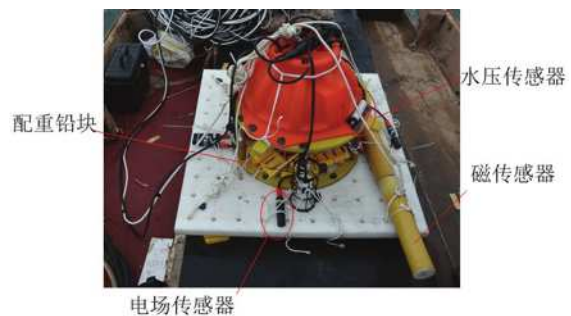
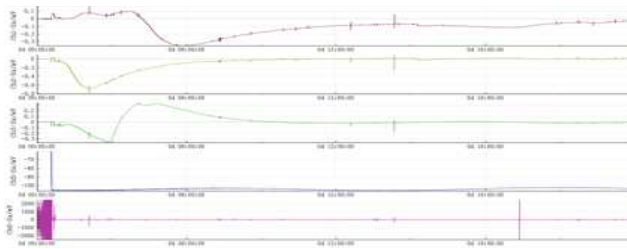
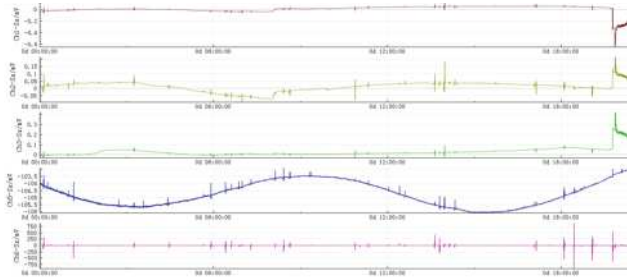


图2.1 电磁探测系统

试验期间一共测得了44小时试验数据,整体情况如图2.2所示,图中CH1通道为电场水平分量 E_x ,CH2通道为电场水平分量 E_y ,CH3通道为电场垂直分量 E_z ,CH5通道为水压场,CH6通道为磁场水平分量。由CH5通道水压场数据可明显看出24小时内潮汐水压场的变化情况,由电场磁场数据可以看到有信号突变的地方即为有目标通过时的信号变化。由于尾流感应电磁场信号集中在0.5Hz以下,因此,在后续数据分析中重点对0.5Hz以下的电场、磁场和水压场进行分析。



(a) 前24小时数据



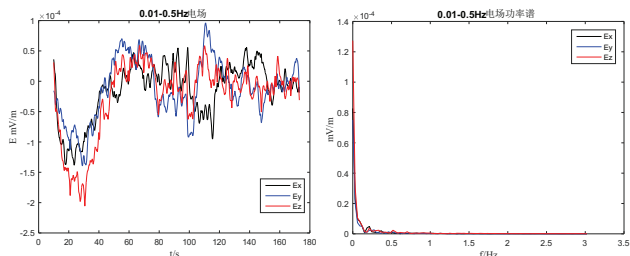
(b) 后20小时数据

图2.2 电磁探测系统实测数据

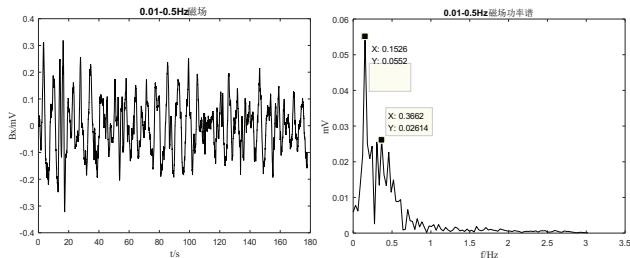
二、试验数据分析

1. 环境数据分析

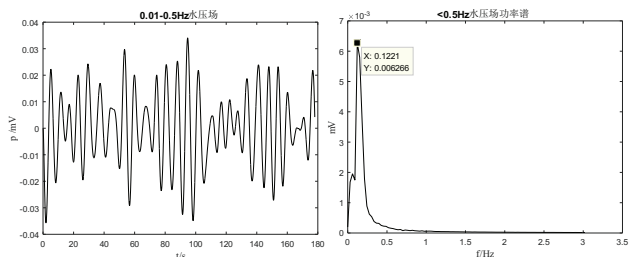
部分环境电场数据如图3.1所示，图中磁场感应线圈棒的灵敏度在0.1Hz~0.5Hz直接约为3~50mV/nT，水压传感器的灵敏度约为0.01mV/MPa。



(a) 环境电场数据及频谱



(b) 环境磁场数据及频谱

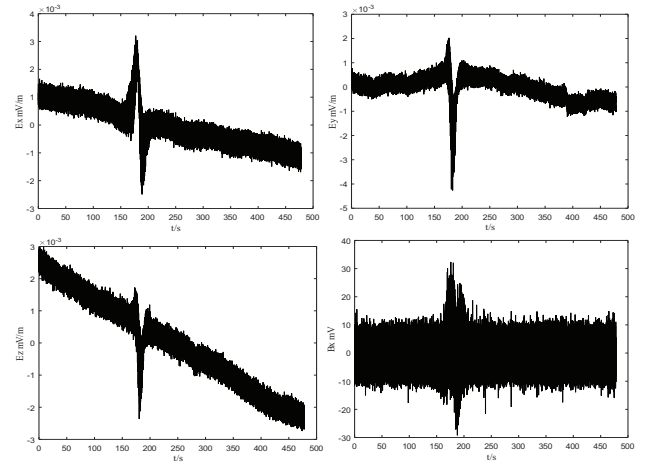


(c) 环境水压场数据及频谱

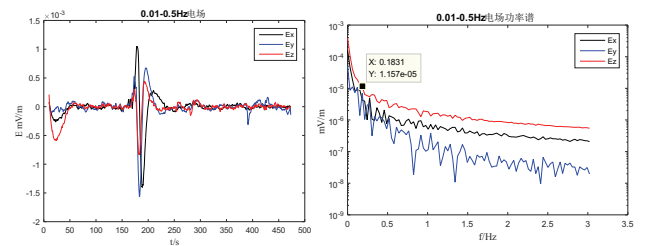
图3.1 海洋环境电磁场数据

由环境电磁场数据分析可知，海洋环境电场干扰在数百nV/m的量级^{[4][5][6][7]}，磁场干扰在0.5Hz以下在0.04nT左右^[8]，海洋环境电磁场和水压场0.01~0.5Hz频段内^[9]，在0.1Hz~0.3Hz附近存在较大的峰值^[10]，这与海浪的频段相当，所以环境干扰主要是由海浪引起的，且这一频段与尾流感应电磁场的频段是重叠的，因此，尾流感应电磁场极易受到环境电磁场的干扰。

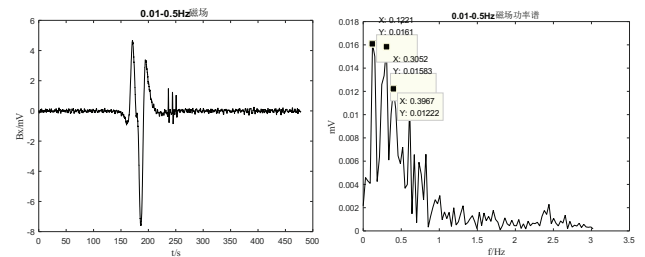
2. 船舶数据分析



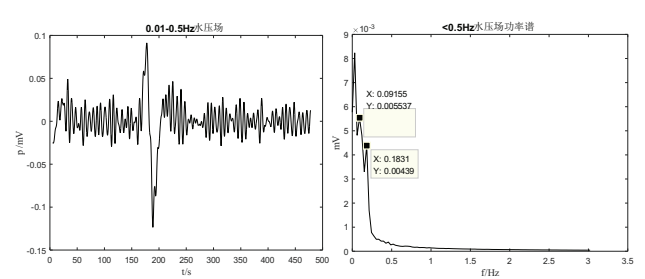
(b) 电磁场实采信号



(c) 电场数据及频谱



(d) 磁场数据及频谱



(e) 水压场数据及频谱

图3.2 DOLARIS STARDOM号船测量结果

对DOLARIS STARDOM号船出港数据进行采集，通过速度约为13.6节，船舶及电磁场、水压场数据如图3.2所示。

由图3.2可知，DOLARIS STARDOM号船约在180s通过，且该船有明显低频电场、磁场和水压场，由0.01Hz~0.5Hz的电场、磁场和水压场可知，目标通过之后频谱发生了明显变化，电场和水压在0.18Hz附近能量有明显增加，磁场信号通过特性曲线也可看出在目标通过后有明显的周期性信号出现，由此可判断在目标通过后疑似出现了尾流感应电磁场信号；由图3.2 (d)可知，目标出现后磁场波动信号持续到约450s处，距离大概为1.8km。

对龙兴岛出港数据进行采集，通过速度约为12~16节，船舶及电磁场、水压场数据如图3.3所示。

由图3.3可知，龙兴岛号船约在200s（10：01）附近接近测量装置，有明显低频电场、磁场和水压场；图3.3 (a) 时域波形可明显看出，船舶通过期间在电磁场波形上明显叠加有低频的波形，通过后的波形（10：02：30-10：04：30）如图3.3 (b) 所示，可知低频波动周期在3s左右；由图3.3 (c)、(d)可知，0.01Hz~0.5Hz滤波后的电场、磁场出现了0.3Hz附近的波形，而水压场的波形变化和峰值出现点也与电磁场一致，由此可确定该0.3Hz附近的电磁场信号为船舶尾流感应电磁场信号；由图3.3 (e) GPS航迹可知，船舶离测量装置最近处的距离约为226m，分析图3.3 (a)可知，在时域上尾流感应电磁场明显持续到了10：04：30（对应距离约为1.6km），由图3.3 (e)中磁场0.01~0.5Hz的波形可看出，感应磁场信号持续到了600s（10：08），对应距离约为3.2km；从信号量级上，在船舶通过后50s左右电场强度约为70mV/m左右，感应线圈棒输出电压幅度约为3mV，以50mV/m灵敏度计算，磁场大小约为0.06nT。

四、测量试验结论

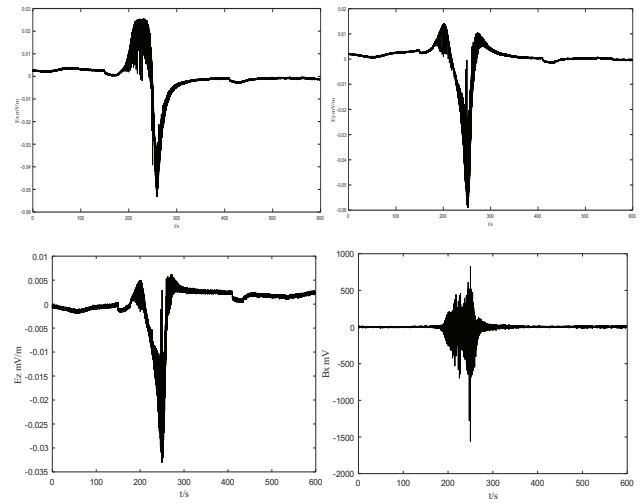
判定所测的电磁场为船舶尾流感应电磁场应从以下几个方面判定：

1. 首先判断该电磁场是由船舶引起的

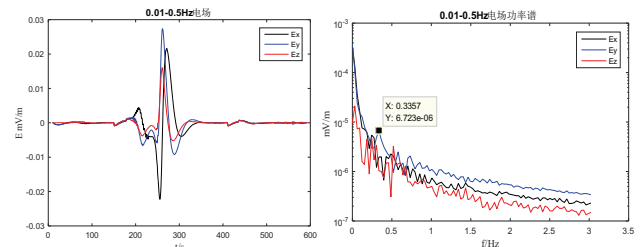
确认电磁场是与船舶相关需满足三个条件：1) 船舶出现之前较长时间，环境电磁场中没有出现类似的电磁场信号；2) 随着船舶的逐渐靠近，相应的电磁场信号出现并开始增强，在船舶通过时信号最强；3) 船舶通过后，信号逐渐减小直至消失。

2. 电场、磁场应相互验证

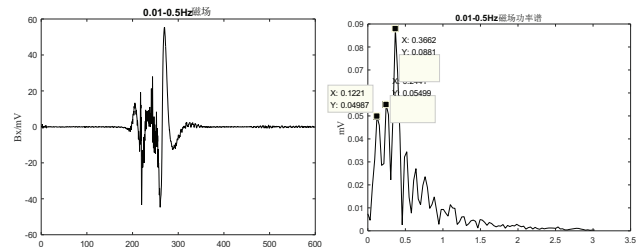
根据前期船舶尾流感应电磁场的理论仿真可知，尾流感应电场和感应磁场是同时出现的，并且具有相同的



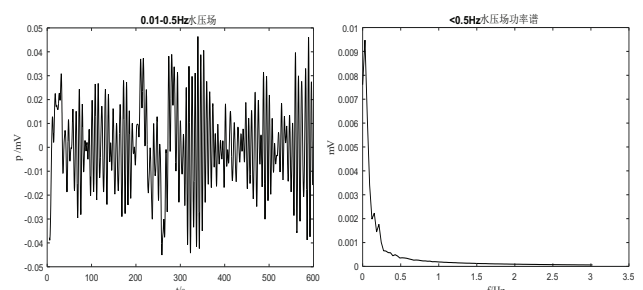
(a) 电磁场实采信号



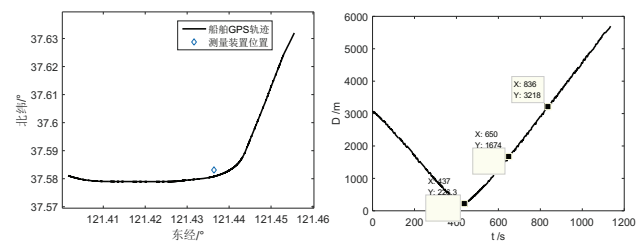
(b) 电场数据及频谱



(c) 磁场数据及频谱



(d) 电压数据及频谱



(e) 船舶航行轨迹及与测量装置的距离变化

图3.3 龙兴岛号船测量结果

频率。

3. 信号频率应为0.5Hz以下的交变信号

通过理论仿真可知,尾流感应电磁场信号基本在0.5Hz以下,具有明显的周期特征,该频率恰好与船舶的轴频电场区别开(通常在0.5~30Hz),而水面船舶的轴频基频基本都在0.5Hz以上。

通过对试验数据的分析可以得到以下几点结论:

1. 通过试验探测到了目标尾流感应电磁场信号,证明了尾流感应电磁场的存在和可探测性;

2. 尾流感应电磁场的信号频率主要集中在0.5Hz以下,与理论分析一致;

3. 尾流感应电磁场是否显著与船舶船型、航速和海况密切相关,试验中部分船舶尾流信号被淹没在环境噪声中难以区分,部分船舶则十分明显,即使相同船舶在不同情况下测量的尾流感应电磁场也可能不同。

4. 试验中测量得到出现了频率在0.01Hz~0.02Hz附近的电场和水压场信号,该信号稳定持续时间长,在四十多小时的测量数据中一共出现了三次,该信号是如何产生的还需进一步验证分析。

参考文献:

[1] 林春生, 龚沈光. 船舶物理场[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2007: 144 - 146.

[2] 武尚慧, 路静. 国外无人潜航器的发展现状与展

望[J]. 电光系统, 2016 (2): 6 - 12.

[3] 刘增宏, 吴晓芬, 许建平等. 中国 Argo 海洋观测十五年[J]. 地球科学进展, 2016, 5: 445-460.

[4] 赵文春, 姜润翔, 喻鹏等. 基于轴频电场线谱特征的目标检测及识别[J]. 兵工学报, 2020, 41 (6): 1165-1171.

[5] 姜楷娜. 水下电场信号源小波时频分析[J]. 通信技术, 2020, 53 (10): 2381-2388.

[6] 庞健, 秦明伟, 王焕等. 基于自适应门限的改进 BigBand 算法[J]. 宇航计测技术, 2021, 41 (1): 53-57.

[7] 李松, 石敏, 栾经德等. 船舶轴频电场信号特征提取与检测方法[J]. 兵工学报, 2015, 36 (2): 220-224.

[8] 程锐, 陈聪, 张伽伟. 基于 EEMD 和改进功率谱熵的船舶轴频电场检测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39 (11): 15-18.

[9] BAO Zhonghua, HU Peng, GONG Shengguang, et al. Detection of harmonics submerged in heavy and coloured noise based on wavelet packet decomposition [C]. IEEE ICCSIT. ChengDu, 2010: 208-210.

[10] Donati R, Le Cadre J P. Detection of oceanic electric fields based on the generalized likelihood ratio test (GLRT) [J]. IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2002, 149 (5): 221-230.