

# 鱼雷电磁引信作用距离模糊分析及抑制方法\*

唐波,谭思炜,张静远

(海军工程大学兵器工程学院,湖北武汉 430033)

**摘要:**从鱼雷电磁引信收发线圈垂直配置方法基本原理出发,分别分析了位于鱼雷轴线和偏离鱼雷轴线的双接收线圈产生作用距离模糊的原理。对于第一种情况,提出了对双路线圈输出信号进行取模处理的方法,消除了作用距离模糊;对于第二种情况,提出了通过增加对称位置的接收线圈,并对对称位置线圈输出信号求平均后,再进行取模处理,消除了作用距离模糊。仿真结果表明,该方法可有效消除作用距离模糊,提高电磁引信作用距离。

**关键词:**电磁引信;作用距离;接收线圈;垂直配置;接收指向性

**中图分类号:**TJ630 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2020)05-081-04

## Analysis and suppressing method for the operating range ambiguity of torpedo electromagnetic fuze

TANG Bo, TAN Siwei, ZHANG Jingyuan

(College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Starting from the basic principle of the vertical configuration of the receiving and transmitting coils of torpedo electromagnetic fuze, the ambiguity of operating range caused by the double receiving coils located on the torpedo axis and deviating from the torpedo axis were analyzed respectively. For the first case, the modulo operation of the double receiving coils was proposed to eliminate the ambiguity of the operating distance; for the second case, a pair of coils was appended to the symmetrical position and the output signal of the symmetrical position coil was averaged, then the modulo operation was taken to eliminate the ambiguity of the operating range. Simulation results show that the method can effectively eliminate the ambiguity of the operating range and improve the operating range of the electromagnetic fuze.

**Keywords:** electromagnetic fuze; operating range; receiving coil; vertical configuration; receiving directivity

随着科学技术的不断发展,电磁引信作为一种有效、可靠的目标探测手段,被广泛应用于鱼雷非触发引信。目前,全球绝大多数的鱼雷都装配有电磁引信。对于鱼雷电磁引信来说,为了尽可能减小直接耦合干扰的影响,通常采用接收器和辐射器垂直配置,即接收器和辐射器轴线相互垂直<sup>[1]</sup>,垂直配置方式的基本原理如图1所示,接收器和辐射器通常都是带有磁芯或者铁芯的多匝线圈<sup>[2]</sup>。其中,辐射器用于在鱼雷周围产生均匀的辐射电磁场,而接收器则用于接收来自目标散射的电磁场<sup>[3]</sup>。

### 1 目标回波信号分析

假设目标为理想导体平面并且表面法线与线圈1轴线重合,如图2所示。则鱼雷电磁引信的目标回波信号如式(1)所示。

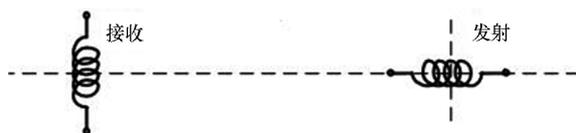


图1 垂直配置方式  
Fig.1 Vertical configuration

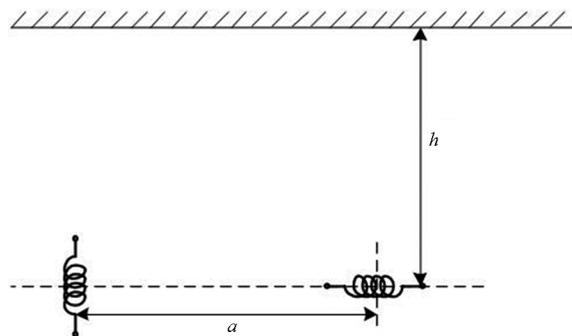


图2 目标位置示意图  
Fig.2 Object location

\* 收稿日期:2019-03-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11602300)

作者简介:唐波(1980—),男,陕西户县人,讲师,博士,E-mail:39023784@qq.com;

谭思炜(通信作者),男,讲师,博士,E-mail:tsw\_0\_0\_0@163.com

$$S_0(t) = Af(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_r) \quad (1)$$

其中,  $A$  为回波信号的幅值,  $f(t)$  为信号包络,  $\varphi_r$  为回波信号相位。

对于图 2 所示的情况, 由镜像法可知

$$A = \frac{6Mha}{4\pi\mu_0(\sqrt{4h^2 + a^2})^5} \quad (2)$$

其中,  $M$  为辐射磁矩,  $\mu_0$  为海水磁导率,  $a$  为收发天线间距,  $h$  为辐射天线与目标的距离<sup>[4]</sup>。

对于垂直配置方式来说, 为了在雷体四周(垂直于鱼雷纵轴平面上)形成 360° 均匀接收指向性, 通常采用轴线相互垂直的两个接收线圈, 其轴线构成的平面垂直于鱼雷轴线<sup>[5]</sup>, 如图 3 所示。

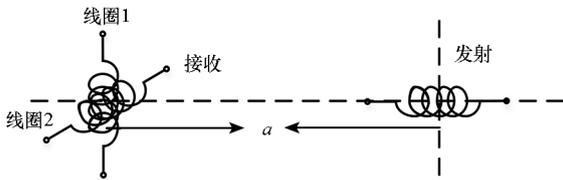


图 3 双接收线圈垂直配置方式

Fig. 3 Vertical configuration of double receiving coils

当鱼雷发生横滚或者目标不在鱼雷正上方时, 即线圈 1 轴线与目标的法线有一个夹角  $\theta$ , 则线圈 1 的输出信号幅值为

$$A_1 = \frac{6Mha}{4\pi\mu_0(\sqrt{4h^2 + a^2})^5} \cos\theta \quad (3)$$

线圈 2 的接收信号幅值为

$$A_2 = \frac{6Mha}{4\pi\mu_0(\sqrt{4h^2 + a^2})^5} \sin\theta \quad (4)$$

传统的引信信号处理思想为线圈 1 和线圈 2 对应的两个接收通道独立实现信号的接收处理, 任何一个通道处理结果过门限均可输出起爆信号。在这种思想下, 当目标表面法线与线圈 1 轴线的夹角为 45° 时, 线圈接收信号幅度会降至最小, 并且线圈 1 和线圈 2 输出信号幅值相等, 即

$$A_1 = A_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} A, \text{ 折合到距离约为 } h = 1.12h_1 =$$

$1.12h_2$ , 其接收指向性如图 4 所示。其中, 虚线内圆为引信在任意方向均能可靠动作所对应的作用距离, 虚线外圆为引信可动作的最大作用距离, 并且最大作用距离约为可靠动作所对应作用距离的 1.12 倍。这也说明, 在垂直配置方式下鱼雷的电磁引信会产生一个距离模糊区, 即当目标位于这个距离范围内时, 电磁引信有可能动作也有可能不动作, 这取决于目标与接收线圈轴线的夹角。假设电磁引信可靠动作距离为 6 m 时, 其作用距

离模糊为 6 ~ 6.7 m。

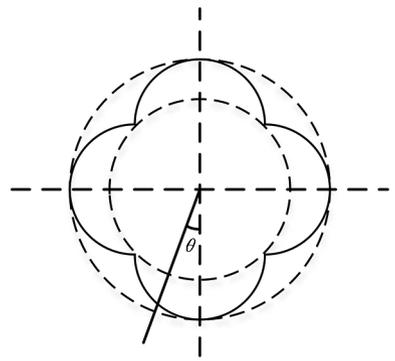


图 4 接收指向性

Fig. 4 Receiving directivity

## 2 信号处理算法改进

由式(1) ~ (4)可知, 从信号幅度来说, 线圈 1 和线圈 2 所接收到的信号是相互正交的。对于该信号, 可以采用平方、求和、再开方的方式获得接收线圈处信号强度的模值<sup>[6]</sup>, 即

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \quad (5)$$

由式(5)可知,  $A$  是与夹角  $\theta$  无关的量, 且恒等于线圈接收信号幅度的最大值。因此, 如果以该特征量作为检测对象, 显然可以得到如图 4 所示的虚线外圆的接收指向性。

因此, 采用接收线圈处信号强度模值为检测对象的电磁引信系统, 显然具有两个明显优势:

- 1) 具有 360° 均匀接收指向性;
- 2) 消除了传统电磁引信系统的作用距离模糊, 提高了作用距离, 增幅约 1.12 倍。

基于式(5), 对于电磁引信系统来说, 在传统接收系统信号检波模块后, 应当增加求平方、加法以及开方模块, 将双路信号处理转换成单路信号处理<sup>[7-8]</sup>, 如图 5 所示。

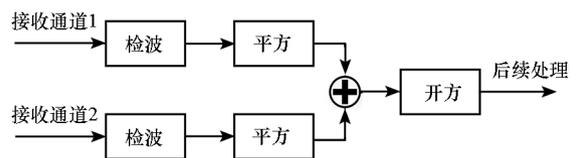


图 5 幅值取模处理

Fig. 5 Modulo operation of signal amplitude

双通道的电磁引信接收信号经过图 5 所示过程处理后, 可得到接收信号强度的模值, 并将双路的接收通道转换成单路, 节省了空间和成本。

只要目标等效散射面积和相对距离不发生变化, 该模值就不会发生变化, 因此可以获得 360° 均匀的接收指向性, 同时消除传统电磁引信系统

的作用距离模糊,提高了作用距离。

### 3 误差分析及改进措施

以上分析均基于图3所示的接收线圈位置关系,然而实际情况是接收线圈无法安装在鱼雷轴线上,只能安装在偏离轴线的壳体上,因此无法实现图3中所示的配置。通常接收线圈配置如图6所示<sup>[9-10]</sup>。

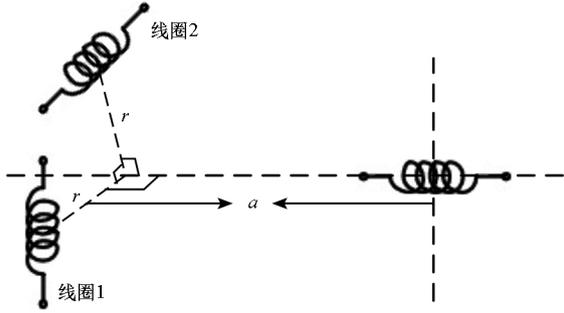


图6 接收线圈配置形式

Fig. 6 Configuration of receiving coils

当目标仍然位于距离  $h$  处时,由式(3)和式(4)可得此时接收线圈1和接收线圈2的输出信号幅值分别为

$$A_1 = \frac{3M \sqrt{4h^2 + r^2 - 4hrcos(\theta + 90^\circ)} \sqrt{a^2 + r^2}}{4\pi\mu_0 (\sqrt{4h^2 + a^2 + r^2} - 4hrcos(\theta + 90^\circ))^5} cos\theta \quad (6)$$

$$A_2 = \frac{3M \sqrt{4h^2 + r^2 - 4hrcos\theta} \sqrt{a^2 + r^2}}{4\pi\mu_0 (\sqrt{4h^2 + a^2 + r^2} - 4hrcos\theta)^5} sin\theta \quad (7)$$

假设  $a = 6 \text{ m}$ ,  $h = 6 \text{ m}$ ,  $r = 0.267 \text{ m}$ ,则可得到图5所示处理后的电磁引信系统接收指向性,如图7所示。

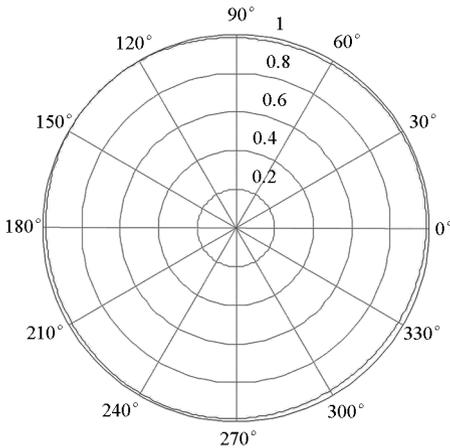


图7 接收指向性

Fig. 7 Receiving directivity

由图7可以看出,由于接收线圈的安装偏离鱼雷轴线,导致接收指向性在空间不均匀。其中

最大作用距离和最小作用距离相差约 1.031 8 倍,假设最大作用距离为 6 m,则最小作用距离约为 5.8 m。显然,当目标出现在这个距离范围内时,引信有可能动作也有可能不动作,同样产生了作用距离模糊。

由以上分析可知,产生作用距离模糊的主要原因是接收线圈偏离轴线,从而导致接收空间指向性不均匀。因此,可通过改善接收空间指向性来消除作用距离模糊。具体方法为,在鱼雷雷体对称的位置增加两组线圈,如图8所示。

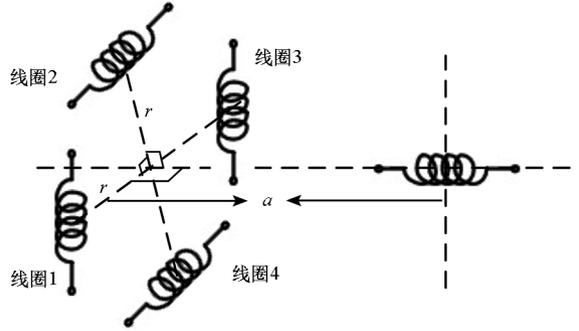


图8 改进的接收线圈配置

Fig. 8 Improved configuration of receiving coils

图8中线圈3和线圈1关于雷轴对称,线圈4和线圈2关于雷轴对称。由式(6)和式(7)可知线圈3和线圈4的输出信号幅值分别为

$$A_3 = \frac{3M \sqrt{4h^2 + r^2 - 4hrcos(90^\circ - \theta)} \sqrt{a^2 + r^2}}{4\pi\mu_0 (\sqrt{4h^2 + a^2 + r^2} - 4hrcos(90^\circ - \theta))^5} cos\theta \quad (8)$$

$$A_4 = \frac{3M \sqrt{4h^2 + r^2 - 4hrcos(180^\circ - \theta)} \sqrt{a^2 + r^2}}{4\pi\mu_0 (\sqrt{4h^2 + a^2 + r^2} - 4hrcos(180^\circ - \theta))^5} sin\theta \quad (9)$$

分别取线圈1和线圈3、线圈2和线圈4输出信号的均值作为两路接收信号,再经过式(5)所示的取模处理,便可得到 360° 均匀的接收指向性。改进后的接收指向性如图9所示。

由图9可知,该方法消除了由于接收线圈偏离鱼雷轴线而产生的引信作用距离模糊,提高了引信可靠动作的作用距离。

### 4 结论

由以上分析可知,对于位于鱼雷轴线上双接收线圈的电磁引信系统来说,通过取模处理可以实现 360° 均匀的接收指向性,消除作用距离模糊,将引信可靠动作的作用距离提高了约 1.12 倍 ( $a = 6 \text{ m}$ ,  $h = 6 \text{ m}$ )。

对于接收线圈偏离鱼雷轴线的电磁引信系统

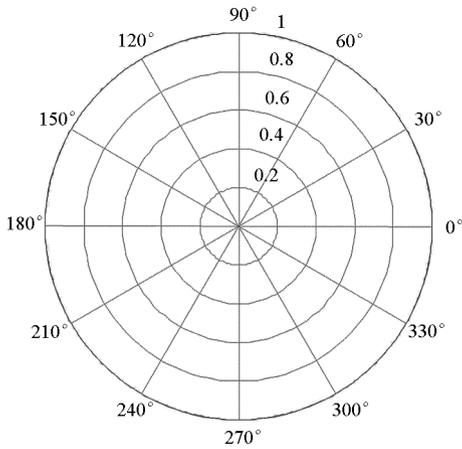


图 9 改进后的接收指向性

Fig. 9 Improved receiving directivity

来说,通过增加两对对称的线圈,并以两组对称位置线圈的均值作为接收信号,可得到  $360^\circ$  均匀接收指向性,消除了由于接收线圈偏离鱼雷轴线而产生的引信作用距离模糊区,提高了引信可靠动作的作用距离。

该方法可有效解决鱼雷电磁引信系统作用距离模糊问题,同时可以提高引信作用距离,对鱼雷电磁引信的研究以及装备发展具有重要的参考价值。

## 参考文献 (References)

- [1] 王绍卿, 刘建民. 鱼雷近炸引信原理与设计[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1992: 32-36.  
WANG Shaoqing, LIU Jianmin. Principle and design of torpedo near fusing fuze [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1992: 32-36. (in Chinese)
- [2] 司怀吉, 崔占忠, 张彦梅. 电磁感应引信探测原理研究[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(1): 75-78.  
SI Huaiji, CUI Zhanzhong, ZHANG Yanmei. Study of electromagnetic fuze detection principle [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(1): 75-78. (in Chinese)
- [3] 王玮, 朱健. 一种电磁引信收发天线组合配置方式[J]. 鱼雷技术, 2013, 21(6): 422-424.  
WANG Wei, ZHU Jian. Combined disposition mode of receiver-transceiver antenna for electromagnetic fuze [J]. Torpedo Technology, 2013, 21(6): 422-424. (in Chinese)
- [4] 孙常存. 鱼雷电磁引信辐射装置合成场的建模与仿真[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(5): 96-98.  
SUN Changcun. Compound field modeling and simulation of torpedo electromagnetic fuze radiation device [J]. Ship Electronic Engineering, 2013, 33(5): 96-98. (in Chinese)
- [5] 任志良. 鱼雷非触发引信构造原理[M]. 武汉: 海军工程大学出版社, 2009: 68-76.  
REN Zhiliang. Theory of torpedo non-contact fuze [M]. Wuhan: Naval University of Engineering Press, 2009: 68-76. (in Chinese)
- [6] 张静远. 水声探测与声自导技术[M]. 武汉: 海军工程大学出版社, 2015: 89-96.  
ZHANG Jingyuan. Underwater detection and acoustic homing technology [M]. Wuhan: Naval University of Engineering Press, 2015: 89-96. (in Chinese)
- [7] 吴顺君, 杜兰, 刘宏伟. 雷达中的微多普勒效应[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 8-11.  
WU Shunjun, DU Lan, LIU Hongwei. The micro-Doppler effect in radar [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 8-11. (in Chinese)
- [8] 位寅生. 雷达信号理论与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2011: 81-88.  
WEI Yinsheng. Radar signals: theory and application [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2011: 81-88. (in Chinese)
- [9] 陈光, 黄小艺, 潘兰强. 基于电磁引信原理的鱼雷过靶距离测量方法[J]. 鱼雷技术, 2012, 20(1): 28-32.  
CHEN Guang, HUANG Xiaoyi, PAN Lanqiang. Active measurement of torpedo missdistance based on electromagnetic fuze [J]. Torpedo Technology, 2012, 20(1): 28-32. (in Chinese)
- [10] 陈春玉, 肖素娟. 鱼雷主动电磁引信防误动技术[J]. 鱼雷技术, 2008, 16(1): 29-32.  
CHEN Chunyu, XIAO Sujuan. Anti-false action technology for active electromagnetic fuze in torpedo [J]. Torpedo Technology, 2008, 16(1): 29-32. (in Chinese)