

doi: 10.7690/bgzdh.2022.09.020

一种环形电磁辐射器辐射场的建模与仿真

孙常存¹, 田恒斗¹, 谭思炜², 闫雪¹

(1. 中国人民解放军 91439 部队, 辽宁 大连 116041; 2. 海军工程大学, 武汉 430033)

摘要: 针对一种环形结构的鱼雷电磁引信辐射器辐射场的计算问题, 将该环形辐射器等效成正交磁偶极子, 给出磁矩分量的表达式, 通过对各磁矩分量产生的辐射场进行分解与叠加, 推导出环形辐射器辐射场的数学模型。仿真结果表明: 该结构的环形辐射器辐射场具有较好的对称性与均匀性, 可满足反舰和反潜电磁引信对鱼雷过靶通过特性的检测需求。

关键词: 鱼雷; 电磁引信; 环形辐射器; 辐射场; 建模与仿真

中图分类号: TJ43⁺1.7 **文献标志码:** A

Radiation Field Modeling and Simulation of an Annular Radiator

Sun Changcun¹, Tian Hengdou¹, Tan Siwei², Yan Xue¹

(1. No. 91439 Unit of PLA, Dalian 116041, China; 2. Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to calculate the radiation field of a annular torpedo electromagnetic fuze radiator, the annular radiator is equivalent to an orthogonal magnetic dipole, and the expression of the magnetic moment components is given. Through the decomposition and superposition of the radiation field produced by each magnetic moment component, the mathematical model of the annular radiator radiation field is derived. The simulation results show that the radiation field of the annular radiator has good symmetry and uniformity, which can meet the detection requirements of anti-ship and anti-submarine electromagnetic fuze for torpedo passing through the target.

Keywords: torpedo; electromagnetic fuze; annular radiator; radiation field; modeling and simulation

0 引言

潜射重型鱼雷普遍利用电磁引信产生的电磁场对目标通过特性进行检测, 以判断是否发出起爆信号^[1-3]。鱼雷电磁引信通常采用磁偶极子收发天线^[4-5], 环形结构是电磁引信发射天线的形式之一, 其基本原理是在两段弧形铁芯上绕有多组、多匝线圈, 通过环形钢带连接成环形体, 相比于棒形辐射器凸出在雷体外的设计, 环形辐射器可隐藏布置于雷体的任意位置, 对鱼雷航行速度影响较小且不易损坏。笔者以一种环形结构的电磁辐射器为研究对象, 分析其结构参数, 利用辐射场分量的分解与叠加, 对环形辐射器的辐射场进行建模与仿真。该研究为鱼雷电磁引信环形辐射器辐射场的计算, 以及其他结构形式的辐射装置辐射场的建模与仿真提供了理论依据。

1 环形辐射器辐射磁矩的分解

环形辐射器的辐射场由 2 个性能参数相同、结构对称的弧形载流线圈实现, 根据磁偶极子辐射磁矩的定义^[1], 其辐射磁矩由弧形载流线圈确定, 与

传统的棒型辐射器辐射磁矩同向叠加不同; 辐射场则为 2 个弧形辐射器共同作用的结果, 是磁矩矢量的分解与合成。

设弧形辐射器 A 的辐射磁矩为 M_A , 弧形辐射器 B 的辐射磁矩为 M_B , 且 M_A 与 M_B 等值、对称, 磁矩方向为弧形载流线圈端口的法向方向。以环形辐射器圆心亦即鱼雷零轴为坐标原点, 直角坐标系表示的环型辐射器的辐射磁矩如图 1 所示。图中, x 轴表示鱼雷纵轴方向, y 轴和 z 轴分别表示鱼雷的水平径向和垂直径向, β 为弧形载流线圈端面与 z 轴的夹角。

令 $M_A=M_B=M_0$, 根据图 1, 其辐射磁矩分量表达式为:

$$\left. \begin{aligned} M_A^z &= M_B^z = M_0 \sin \beta \\ M_A^y &= M_B^y = M_0 \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

设环形辐射器在水平方向的辐射磁矩为 M^H , 垂直方向的辐射磁矩为 M^V , 则

$$\left. \begin{aligned} M^H &= M_A^y = M_B^y = M_0 \cos \beta \\ M^V &= M_A^z + M_B^z = 2M_0 \sin \beta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

收稿日期: 2022-05-07; 修回日期: 2022-06-11

作者简介: 孙常存(1982—), 男, 黑龙江人, 博士, 工程师, 从事水中兵器试验训练总体技术、水中兵器作战效能仿真评估技术研究。
E-mail: 18041192556@163.com。

上式表明：环型辐射器在水平方向和垂直方向的辐射磁矩不仅与弧形辐射器的辐射磁矩有关，还与弧形载流线圈端面与 z 轴的夹角 β 有关，需按工程的实际要求进行设计。

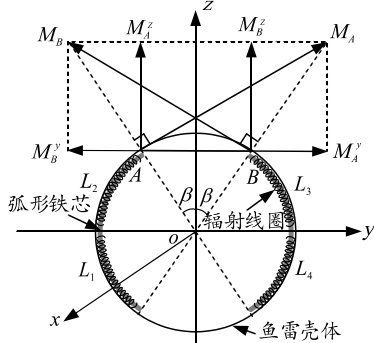


图 1 环形辐射器辐射磁矩分解

若水平方向辐射磁矩与垂直方向辐射磁矩相等，即 $M^H=M^V$ ，以保证引信在水平与垂直方向的辐射强度相同，有利于目标反射信号检测与识别，满足反舰和反潜的作战使用需求，则根据式(2)，有

$$M_0 \cos \beta = 2M_0 \sin \beta \quad (3)$$

即得 $\beta=26.6^\circ$ 。

由此可见，对环形辐射器结构，只要选取弧形载流线圈端面与 z 轴的夹角为 26.6° ，即可满足环形辐射器水平方向辐射磁矩与垂直方向辐射磁矩相等的要求，从而实现鱼雷电磁引信控制物理场的对称性与均匀性。

2 环形辐射器的辐射场分析

由上一节的分析可知，环形辐射器在水平方向和垂直方向上的辐射磁矩相等，可以等效成磁矩为 M^H 的水平磁偶极子和磁矩为 M^V 的垂直磁偶极子构成的正交磁偶极子模型，且 $M^H=M^V$ ，整个环形辐射器的辐射场是水平磁偶极子与垂直磁偶极子辐射场的合成场。

利用环形辐射器的等效磁偶极子模型，对其辐射场进行建模与仿真分析。

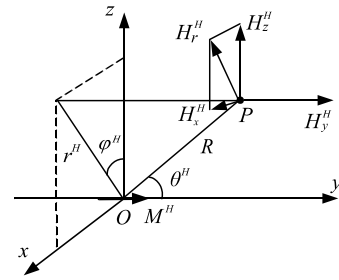
2.1 环形辐射器辐射场数学模型

假设在直角坐标系的坐标原点处有一对相互正交的磁偶极子，磁矩 M^H 沿 y 轴正方向，定义为水

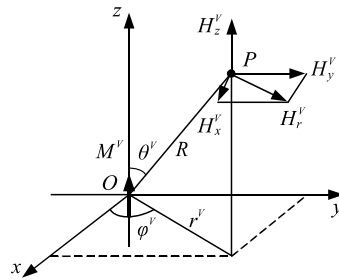
$$\left. \begin{aligned} H_r^H &= (3M^H r^H z^H / 4\pi\mu_0 R^5) (1 + jKR - K^2 R^2 / 3) e^{-jKR} \\ H_y^H &= M^H / (4\pi\mu_0 R^3) \left[(2(z^H)^2 - (r^H)^2) / R^2 (1 + jKR - K^2 R^2 / 3) + 2K^2 R^2 / 3 \right] e^{-jKR} \end{aligned} \right\}; \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} H_r^V &= 3M^V r^V z^V / 4\pi\mu_0 R^5 (1 + jKR - K^2 R^2 / 3) e^{-jKR} \\ H_z^V &= M^V / 4\pi\mu_0 R^3 \left[((2(z^V)^2 - (r^V)^2) / R^2) (1 + jKR - K^2 R^2 / 3) + 2K^2 R^2 / 3 \right] e^{-jKR} \end{aligned} \right\}^\circ \quad (7)$$

平磁偶极子；磁矩 M^V 沿 z 轴正方向，定义为垂直磁偶极子。以水平磁偶极子和垂直磁偶极子各自的磁矩方向为轴向，分别建立柱坐标系，如图 2 所示。图中：点 P 为辐射场中的任意一点， H_x^H 、 H_y^H 和 H_z^H 为直角坐标系下水平磁偶极子的场分量， H_y^H 和 H_r^H 为对应柱坐标系下的场分量； H_x^V 、 H_y^V 和 H_z^V 为直角坐标系下垂直磁偶极子的场分量， H_z^V 和 H_r^V 为对应柱坐标系下的场分量。



(a) 水平磁偶极子



(b) 垂直磁偶极子

图 2 磁偶极子辐射场的分解

在上图所示的圆柱坐标系中，点 P 的坐标分别为：

$$\left. \begin{aligned} r^H &= \sqrt{x^2 + z^2} & r^V &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ z^H &= y & z^V &= z \\ \varphi^H &= \arctan \frac{x}{z} & \varphi^V &= \arctan \frac{y}{x} \end{aligned} \right\}; \quad (4)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (5)$$

根据海水中交变磁偶极子电磁场的分布特性^[6-9]，在图 2 所示的柱坐标系下，水平磁偶极子和垂直磁偶极子辐射场在点 P 处的径向分量和轴向分量分别为：

对应的直角坐标系下，水平磁偶极子和垂直磁偶极子辐射场在点 P 处的分量表达式分别为：

$$\left. \begin{aligned} H_x^H &= H_r^H \sin \varphi^H \\ H_y^H &= H_y^H \\ H_z^H &= H_r^H \cos \varphi^H \end{aligned} \right\}; \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} H_x^V &= H_r^V \cos \varphi^V \\ H_y^V &= H_r^V \sin \varphi^V \\ H_z^V &= H_z^V \end{aligned} \right\}。 \quad (9)$$

将式(6)和(7)代入式(8)和(9)，并利用式(4)的关系式，得到直角坐标系下，水平磁偶极子和垂直磁偶极子的分量表达式分别为：

$$\left. \begin{aligned} H_x^H &= \frac{3M^H xy}{4\pi\mu_0 R^5} \left(1 + jKR - \frac{K^2 R^2}{3}\right) e^{-jKR} \\ H_y^H &= \frac{M^H}{4\pi\mu_0 R^3} \left[\frac{3y^2 - R^2}{R^2} \left(1 + jKR - \frac{K^2 R^2}{3}\right) + \frac{2K^2 R^2}{3} \right] e^{-jKR} \\ H_z^H &= \frac{3M^H yz}{4\pi\mu_0 R^5} \left(1 + jKR - \frac{K^2 R^2}{3}\right) e^{-jKR} \end{aligned} \right\}; \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} H_x^V &= \frac{3M^V xz}{4\pi\mu_0 R^5} \left(1 + jKR - \frac{K^2 R^2}{3}\right) e^{-jKR} \\ H_y^V &= \frac{3M^V yz}{4\pi\mu_0 R^5} \left(1 + jKR - \frac{K^2 R^2}{3}\right) e^{-jKR} \\ H_z^V &= \frac{M^V}{4\pi\mu_0 R^3} \left[\frac{3z^2 - R^2}{R^2} \left(1 + jKR - \frac{K^2 R^2}{3}\right) + \frac{2K^2 R^2}{3} \right] e^{-jKR} \end{aligned} \right\}。 \quad (11)$$

由于环形辐射器产生的辐射场是其等效水平磁偶极子与垂直磁偶极子共同作用下形成的，将水平磁偶极子辐射场与垂直磁偶极子辐射场进行合成，所得的合成场即为环形辐射器产生的辐射场，则环形辐射器辐射场的场强分量表达式为：

$$\left. \begin{aligned} H_x &= \left| H_x^H \right| + \left| H_x^V \right| \\ H_y &= \left| H_y^H \right| + \left| H_y^V \right| \\ H_z &= \left| H_z^H \right| + \left| H_z^V \right| \end{aligned} \right\}。 \quad (12)$$

在环形辐射器辐射场场量中， H_y 分量与水平磁偶极子辐射磁矩同向， H_z 分量与垂直磁偶极子辐射磁矩同向， H_x 分量沿鱼雷纵轴方向与两磁偶极子正交。因此，当目标为水面舰船时，引信主要利用辐射场的 H_z 分量进行探测；而对于潜艇目标，引信则需要利用辐射场的 H_y 和 H_z 2 个分量进行探测。

2.2 环形辐射器辐射场分布特性仿真研究

为更直观地了解环形辐射器的目标探测范围，对环形辐射器辐射场 H_y 分量和 H_z 分量的分布特性

进行仿真研究。首先建立如图3所示的坐标系，按照坐标系中的坐标转换关系，将直角坐标系中任意点 $p(x, y, z)$ 转换成球坐标系的形式，即

$$\left. \begin{aligned} x &= R \sin \theta \cos \varphi \\ y &= R \sin \theta \sin \varphi \\ z &= R \cos \theta \end{aligned} \right\}。 \quad (13)$$

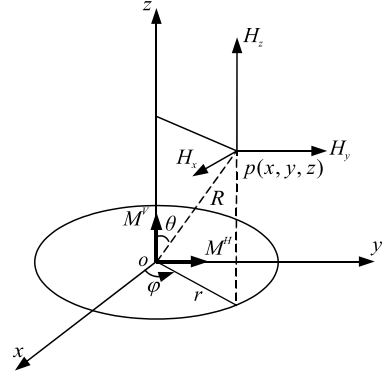


图3 坐标系转换

这里仅需对环形辐射器辐射场的分布进行仿真分析，暂且不考虑传播衰减的影响因素，故取 $K=0$ ，同时令 $M^H=M^V=M$ ，将式(10)、(11)和(13)代入式(12)，得到球坐标系下环形辐射器辐射场分量强度表达式为：

$$\left. \begin{aligned} H_x &= \frac{3M \sin \theta \cos \varphi}{4\pi\mu_0 R^3} (|\sin \varphi| + |\cos \varphi|) \\ H_y &= \frac{M}{4\pi\mu_0 R^3} (|3\sin^2 \theta \sin^2 \varphi - 1| + 3|\sin \theta \cos \theta \sin \varphi|) \\ H_z &= \frac{M}{4\pi\mu_0 R^3} (|3\cos^2 \theta - 1| + 3|\sin \theta \cos \theta \sin \varphi|) \end{aligned} \right\}。 \quad (14)$$

特别需要指出的是：在 YOZ 平面内，已知 $\varphi=90^\circ$ ，由式(14)得出， YOZ 平面内辐射场分量表达式为：

$$\left. \begin{aligned} H_y &= \frac{M}{4\pi\mu_0 R^3} (|3\sin^2 \theta - 1| + 3|\sin \theta \cos \theta|) \\ H_z &= \frac{M}{4\pi\mu_0 R^3} (|3\cos^2 \theta - 1| + 3|\sin \theta \cos \theta|) \end{aligned} \right\}。 \quad (15)$$

观察式(15)不难发现，若将 θ 逆时针或顺时针旋转 90° ，则会发生以下转换： $H_y \rightarrow H_z$ ， $H_z \rightarrow H_y$ ；因此，在 YOZ 平面内，当 2 个观测点的观测方位角相差 90° 时，对应的 H_y 与 H_z 的场量表达式相同。

现取辐射磁矩 M 为某一恒定数值，自由空间的导磁率 $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ H/m，取观测点至磁偶极子源点的距离 $R=10$ m，分别绘制 $XOY(\theta=\pi/2, \varphi=0 \sim 2\pi)$ 、 $XOZ(\varphi=0, \theta=0 \sim 2\pi)$ 和 $YOZ(\varphi=\pi/2, \theta=0 \sim 2\pi)$ 平面内归一化环形辐射器辐射场场强分布如图 4、5

所示。

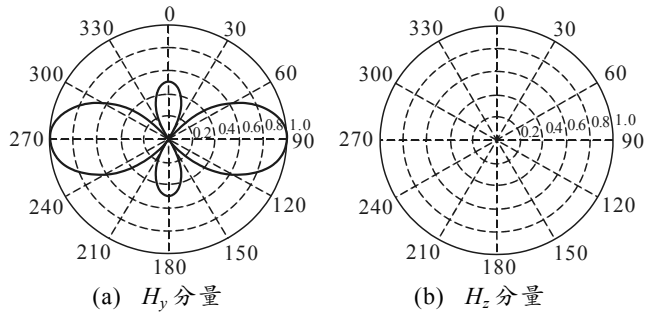


图 4 XOY 平面内归一化辐射场场强分布

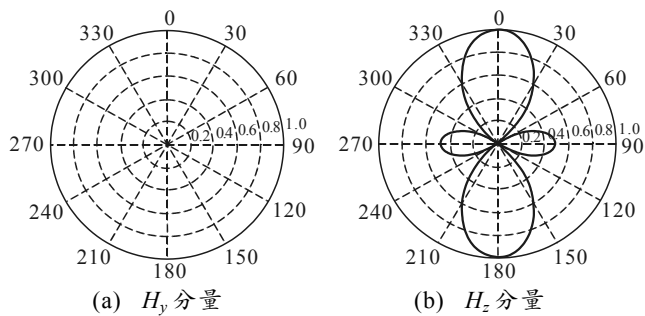


图 5 XOZ 平面内归一化辐射场场强分布

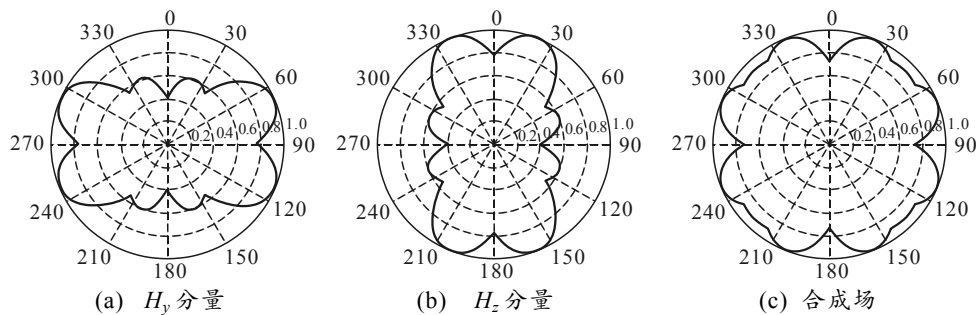


图 6 YOZ 平面内归一化辐射场场强分布

由图 4 和图 5 可以看出；在 XOY 平面内， H_y 分量在 $\varphi=90^\circ(M^H$ 方向)方向上的场强值最大， H_z 分量呈等值均匀分布；在 XOZ 平面内， H_y 分量呈等值均匀分布， H_z 分量在 $\theta=0^\circ(M^V$ 方向)方向上的场强值最大。 H_y 分量和 H_z 分量在 XOY 平面和 XOZ 平面内的场强分布特点表明：环形辐射器在其正侧方、正上方和正下方的目标探测场强值均达到了最大，从而保证引信对水面舰船和潜艇均能保持最佳的探测能力。

如图 6 所示，在 YOZ 平面内，将 H_y 分量的分布图逆时针或顺时针旋转 90° 后，与 H_z 分量的分布图基本重合，反之亦然，并且 H_y 分量和 H_z 分量合成场关于 y 轴和 z 轴呈对称分布。结合式(19)的分析结果，则 H_y 分量、 H_z 分量及其合成场在 YOZ 平面内的场强分布特点表明：环形辐射器辐射场的 H_y 分量和 H_z 分量的场强相等，合成场的分布具有较好的全向性，以满足反舰和反潜电磁引信对鱼雷过靶通过特性的检测需求。

3 结束语

笔者以水平方向辐射磁矩与垂直方向辐射磁矩相等的环形辐射器作为研究对象，将环形辐射器等效成正交磁偶极子模型，给出磁矩分量的表达式。通过对各磁矩分量产生的辐射场进行分解与叠加，推导出环形辐射器辐射场的数学模型，并进行仿真分析。仿真结果表明：该结构的环形辐射器辐射场具有较好的对称性与均匀性，可满足反舰和反潜电磁引信对鱼雷过靶通过特性的检测需求。

参考文献：

[1] 任志良. 鱼雷非触发引信原理与设计[M]. 武汉: 海军工程大学, 1998: 61-63.
 [2] 石秀华, 王晓娟. 水中兵器概论(鱼雷分册)[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004: 71-74.

[3] 赵军, 孔德永. 鱼雷总体技术[M]. 武汉: 海军工程大学, 2007: 38-39.
 [4] 沈哲. 鱼雷战斗部与引信技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 81-83.
 [5] 骆丹, 陈航, 陈永森. 水下电磁引信物理场特性的矩量法分析[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(4): 88-92.
 [6] STRATTON J A. Electromagnetic theory[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1941: 15-17.
 [7] 孙常存, 袁鹏, 任志良, 等. 水下电磁波频率变化特性实验研究[J]. 鱼雷技术, 2014, 22(1): 72-77.
 [8] WONG K T, ZOLTOWSKIM D. Closed-form direction-finding with arbitrarily spaced electromagnetic vector-sensors at unknown location[J]. ICCASP, 1998(4): 1949-1952.
 [9] 任志良, 陈光, 孙海柱, 等. 基于三维场的辐射磁矩测试方法研究[J]. 微计算机信息, 2006(22): 267-269.