

# Ansoft Maxwell 在电磁扫雷具磁场分析中的应用

易谷丰

(中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

**摘要** 电磁扫雷具是主要的非接触扫雷具之一, 用于扫除带有磁引信的非触发水雷。为了诱动水雷磁引信, 电磁扫雷具产生的磁场必须与水雷磁引信的动作要求相适应。基于实际的工程模型, 应用 Ansoft Maxwell 对电极阵电磁扫雷具的磁场分布进行分析, 绘制磁感应强度分布图和通过特性曲线, 以便对产品进行设计验证和优化设计。同样的方法还可拓展用于其它电磁扫雷具的设计, 以提升设计效率和水平。

**关键词** 电极阵电磁扫雷具; Ansoft Maxwell; 通过特性; 优化设计

中图分类号 TJ67 文献标识码 A

## Application of Ansoft Maxwell in Magnetic Field Analysis of Electromagnetic Minesweeper

YI Gufeng

(No. 710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

**Abstract** Electromagnetic minesweeper is one of the main non-contact minesweepers, which is used to clear the non-triggered mine with magnetic fuze. In order to induce the magnetic fuze of mine, the magnetic field produced by electromagnetic minesweeper must adapt to the action requirement of the mine's magnetic fuze. Based on an actual engineering model, Ansoft Maxwell is used to analyze magnetic field distribution of electrodes array electromagnetic minesweeper, and to plot distribution diagram of magnetic induction intensity and the passing characteristics curves, so that the verification and design optimization of products are obtained. The same methods can also be used to design other electromagnetic minesweeper, so as to improve efficiency and level of design.

**Key words** electrodes array electromagnetic minesweeper; Ansoft Maxwell; passing characteristics; optimization design

## 0 引言

电极式电磁扫雷具是对抗水中兵器的重要手段之一<sup>[1]</sup>。传统的二电极电磁扫雷具的设计需要设计工程师具有丰富的电磁理论基础和工程经验, 通常理论上获取电流磁场的方法是依据比奥-萨法尔定律和安培环路定理<sup>[2-5]</sup>, 通过理论分析和数学推

导, 得到其磁场分布的特点及其解析解。由于电极式电磁扫雷具在海水中的分流电流分布复杂, 而电流分布对磁场特性有直接影响, 因此利用比奥-萨法尔定律进行积分计算, 不仅过程繁琐, 而且非规则形状电流分布的磁场难以得到解析解, 计算中存在假设和简化, 结果也不准确。而电极阵电磁扫雷具中存在几个独立的回路, 并且独立的回路之间存

在耦合关系, 因此更加难以得到准确的解析解。

随着计算机仿真技术的发展, 基于有限元分析的 Ansoft Maxwell 电磁仿真软件在进行电磁设计时的优越性凸显, 使得磁场分布图和通过特性曲线的分析过程变的相对简单, 便于对结构参数、性能指标进行优化设计, 缩短了产品的研制周期, 减少研制、开发成本, 大大提高了设计的效率和水平。

## 1 Ansoft Maxwell 磁场计算原理

Ansoft Maxwell 有限元软件基于麦克斯韦微分方程, 采用有限元离散形式, 将工程中的电磁场计算转变为庞大的矩阵求解<sup>[6]</sup>。三维静磁场采用棱边法进行计算, 即以剖分单元边上待求场量为自由度求算<sup>[7-8]</sup>。

三维静磁场的基本麦克斯韦方程组如式(1)所示<sup>[9]</sup>。

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H}(x, y, z) = \mathbf{J}(x, y, z) \\ \nabla \cdot \mathbf{B}(x, y, z) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{B}(x, y, z)$  为磁感应强度;  $\mathbf{H}(x, y, z)$  为磁场强度;  $\mathbf{J}(x, y, z)$  为电流密度。这3个矢量都是各个方向矢量的函数关系, 如式(2)所示。

$$\mathbf{B}(x, y, z) = B_x \cdot \vec{x} + B_y \cdot \vec{y} + B_z \cdot \vec{z} \quad (2)$$

式中,  $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$  为3个方向上的标量磁感应强度。

对永磁体而言, 可以按照公式(3)描述。

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H} + \mu_0 \cdot \mathbf{M}_p \quad (3)$$

式中:  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m 为真空中的绝对磁导率;  $\mu_r$  为相对磁导率;  $\mathbf{M}_p$  为永磁材料的极化强度。

对于各向异性的导磁材料, 三维静磁场处理成相对磁导率张量形式, 即:

$$\mu_r = \begin{bmatrix} \mu_{rx} & & \\ & \mu_{ry} & \\ & & \mu_{rz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过描述3个方向上不同的相对磁导率来实现各向异性的计算。

磁场强度  $\mathbf{H}$  可以由式(5)描述。

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_p + \nabla \varphi + \mathbf{H}_C \quad (5)$$

式中:  $\varphi$  为标量磁位;  $\mathbf{H}_p$  为四面体剖分6条边上

的磁场强度, 该场量也为待求场量;  $\mathbf{H}_C$  是描述永磁体上的磁场强度。这样一个四面体上的带求解的自由度就达到10个, 其中4个是四面体4个顶点上的标量磁位, 另外6个是四面体6条边上的磁感应强度, 采用二次差值来逼近单个剖分单元内的场量。

## 2 电极阵磁场仿真与分析

### 2.1 电极阵电磁扫雷具结构

电极阵电磁扫雷具设计的主要内容是得到合理的磁场分布和通过特性曲线。本文通过有限元分析软件 Ansoft Maxwell 进行电磁仿真。该方法不需要计算海水中分流电流分布特征和复杂的积分运算来推导出磁场分布, 而是以电缆电极尺寸外形、电极材料和海水的电导率、电极空间布置等作为设计参数, 通过建立电极模型, 利用有限元方法, 获得任意姿态下电极式电磁扫雷具磁场分布。

本文以2组独立回路组成的电极阵电磁扫雷具为例分析其磁场分布, 电极阵电磁扫雷具扫雷部分由直线分布、长度不等的4根电缆及连接在电缆1端的4个电极组成, 电流通过电缆、电极和海水形成回路并产生扫雷磁场, 电缆中的电流方向如图1所示。



图1 电极阵电磁扫雷具示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electrodes array electromagnetic minesweeper

电极阵电磁扫雷具与传统的电极式电磁扫雷具相比, 由于增加了电流回路, 使得在一定范围内磁场分量的相关性有所减弱, 具有一定的扫除利用相关系数法、极值法识别扫雷具的现代智能水雷的

能力。

### 2.2 仿真分析

使用 Ansoft Maxwell 进行静态磁仿真计算,在数据后处理过程中需要得到多个不同面上的磁场三分量的磁场分布和通过特性曲线。

#### 1) 三维模型建立。

分析电极式电磁扫雷具的结构原理,构建简化三维全尺寸电极阵模型,建立电极坐标系,  $x$  轴与电极电缆平行,  $y$  轴为电极径向,  $z$  轴与  $xoy$  平面正交,向下为正,如图 2 所示。

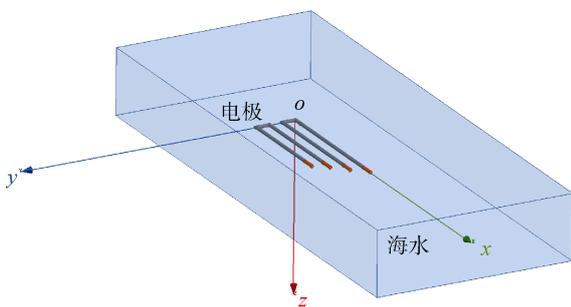


图 2 仿真模型图

Fig. 2 Simulation model diagram

#### 2) 定义及分配材料。

指定的材料可在材料库中选取,可根据实际参数进行编辑修改。指定“Copper”给电缆、电极,指定海水的电导率参数。

#### 3) 定义及加载激励源及边界条件。

该仿真的电极阵电磁扫雷具由 2 个电流回路组成,因此在进行激励源加载时需要指定源的方向,这需要建立“Section”面进行方向的设置,并将选择的“Section”分成 2 部分,删除其中任意 1 个部分(因为在激励源设置中只需要 1 个“Section”即可),选择“Section”加载电流源激励,将电流值输入即可。另外 1 个回路同样的方法设置,但要注意电流的方向。电极间通过海水介质形成闭合电流,以激发磁场。

对电缆的外表面施加“Insulating”边界。

#### 4) 求解设定。

网格剖分设置,采用基于模型内部单元边长的剖分设置进行模型剖分,长度设置小于模型中最小

尺度值。

求解残差设定,主要包括一般设置(最大迭代次数和能量误差百分比)、收敛设置及求解设置。启动求解过程。经过多次迭代计算后,软件自动计算到满足误差要求后停止迭代。磁场求解过程如图 3 所示。

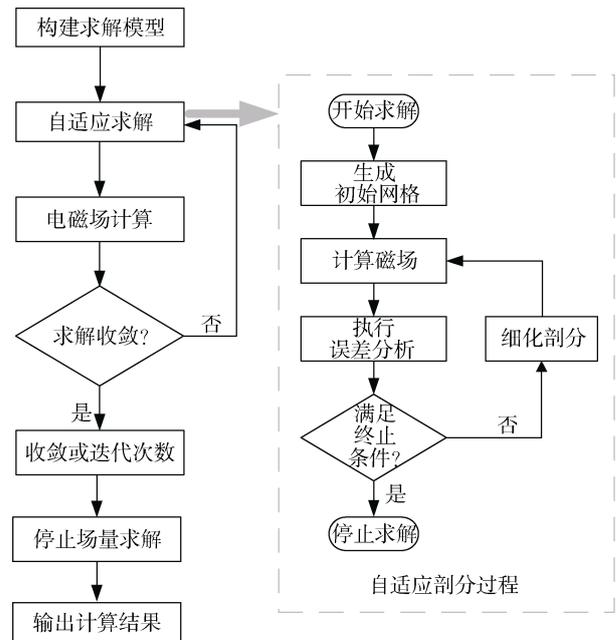


图 3 磁场求解过程

Fig. 3 Solving process of magnetic field

### 2.3 结果分析

当电极阵电磁扫雷具的电缆有效段长度为 60 m (即电极 1 和电极 2 间距为 60 m, 电极 3 和电极 4 间距为 60 m), 2 组电极之间的距离为 60 m (即电极 2 和电极 3 间距为 60 m), 电极长度为 20 m, 海水深度为 40 m, 通电电流为 800 A 时, 利用 Ansoft Maxwell 计算海底平面上磁感应强度分量  $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$  的等强线和通过特性曲线, 如图 4-7 所示。

从图 4-7 可以直观地看出磁场三分量的分布范围、磁感应强度以及通过特性曲线, 对于电极阵电磁扫雷具的设计具有十分重要的指导意义。

### 3 实场测量与验证

为了验证 2.1 节中电极阵电磁扫雷具的有限元模型, 在水池进行了实场测量。实验中以盐水模

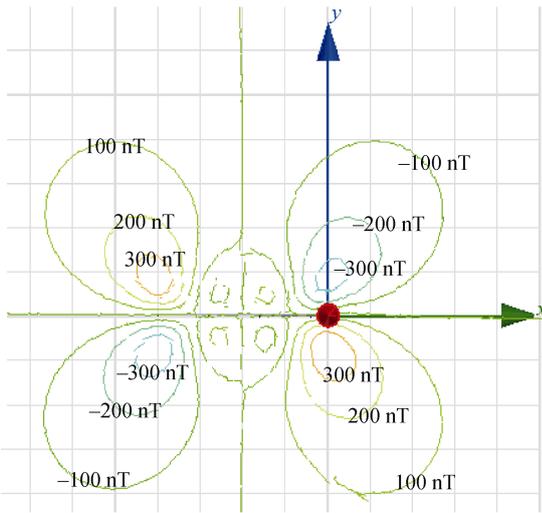


图 4  $B_x$ 分量等强线 (每 1 小格 50 m)  
Fig. 4 Isodynamic lines of  $B_x$  component (every cell is 50 m)

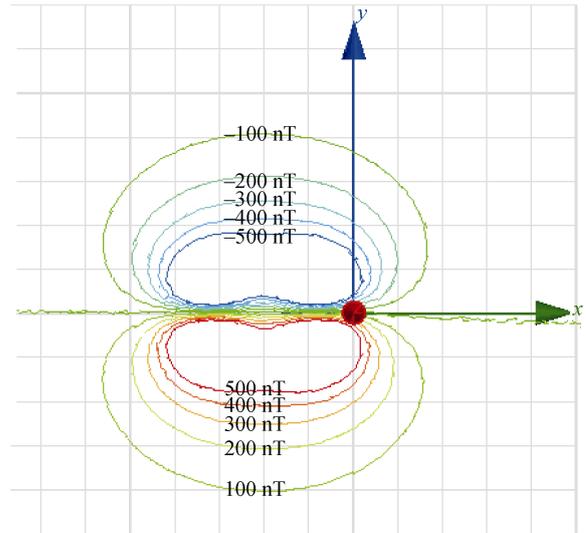


图 6  $B_z$ 分量等强线 (每 1 小格 50 m)  
Fig. 6 Isodynamic lines of  $B_z$  component (every cell is 50 m)

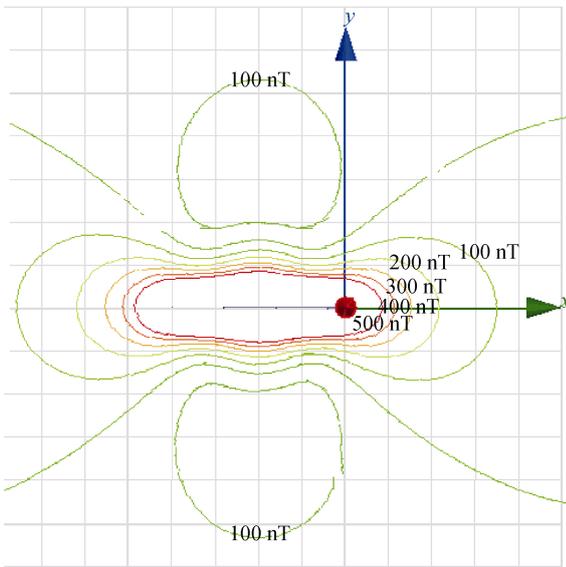


图 5  $B_y$ 分量等强线 (每 1 小格 50 m)  
Fig. 5 Isodynamic lines of  $B_y$  component (every cell is 50 m)

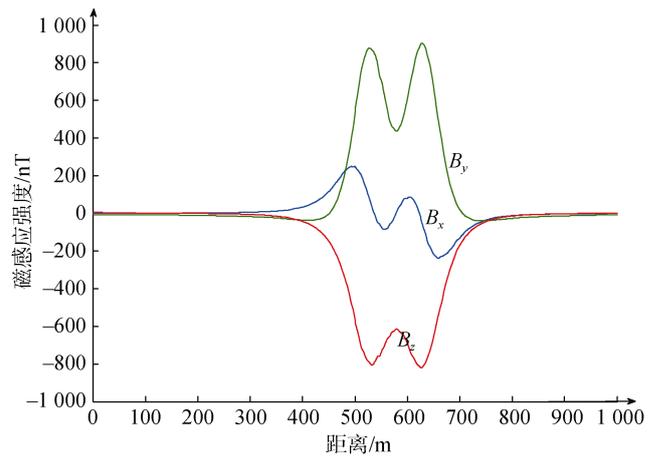


图 7 正横距离为 20 m 的通过特性曲线  
Fig. 7 Passing characteristic curves with abeam distance of 20 m

拟海水, 测量了电极阵缩比样机的磁感应强度  $B_z$  分量, 磁场测量设备为 CCY-2 型数字测磁仪。

磁场测量采用固定探头式测量方法, 磁探头固定不动, 拖曳电极阵电磁扫雷具缩比样机测出通过特性曲线。实验使用 5 个垂直分量探头, 测量不同正横距离的磁感应强度的通过特性曲线。无磁拖曳车和探头吊放架示意图如图 8 所示, 磁探头吊放示意图如图 9 所示。

如图 9 所示, 水池宽 3 m, 磁探头之间间距为 0.5 m, 离水面距离为 1 m。

按图 1 所示电极阵缩比样机, 电缆 4 根, 规格  $1 \times 150 \text{ mm}^2$ , 单根电缆和电极 (裸露的铜导线) 长度分别:  $25.6 \text{ m} + 0.4 \text{ m}$ 、 $24.4 \text{ m} + 0.4 \text{ m}$ 、 $23.2 \text{ m} + 0.4 \text{ m}$ 、 $22 \text{ m} + 0.4 \text{ m}$ , 通电电流为 14.6 A。将电极阵电磁扫雷具缩比样机固定在无磁拖车上, 使电极靠近水面但完全浸没在水中。测量时, 使用无磁拖曳车拖动电极阵缩比样机, 每隔 0.2 m 记录 1 次磁场测量值。

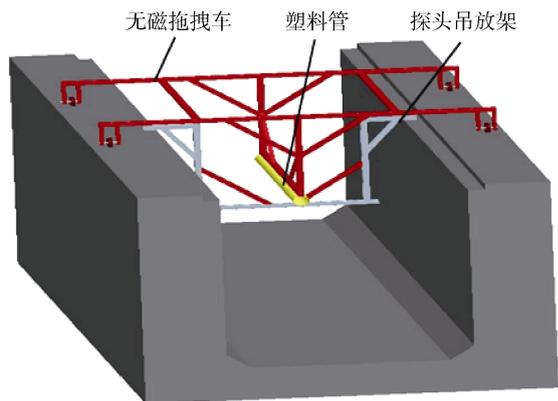


图 8 无磁拖拽车和探头吊放架示意图

Fig. 8 Schematic diagram of non-magnetic tractor and probe hanger

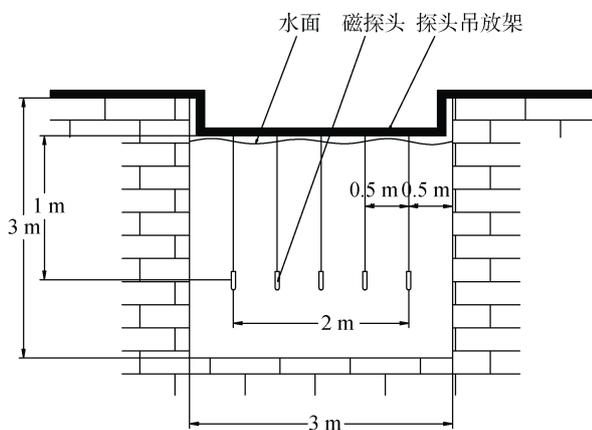


图 9 磁探头吊放示意图

Fig. 9 Schematic diagram of magnetic probe hoisting

基于 Ansoft Maxwell 的有限元仿真按照现场测量时的情况 1 : 1 建模, 并按照现场测量磁场的坐标取点, 实际测量时 5 个磁探头中 1 个有故障, 故实际测量每次只有 4 条有效数据。把有限元仿真数据与现场测量数据进行对比, 对比图如图 10-11 所示。

计算仿真数据与测试数据之间的相对误差:

$$\text{相对误差} = \frac{\text{仿真数据} - \text{测量数据}}{\text{测量数据}} \times 100\% \quad (6)$$

由式(6)计算出图 10 所得相对误差小于 20%, 图 11 相对误差小于 25%。由此可见有限元仿真计算值与实测值变化规律相一致, 仿真数据与实测数据较好的吻合。

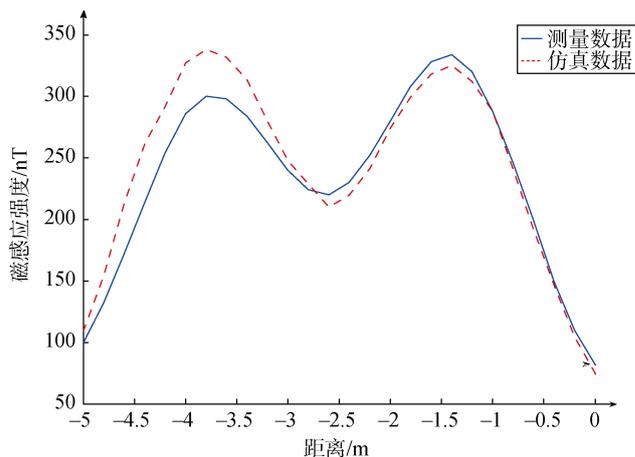


图 10 仿真数据与测试数据对比 (正横距离 0.5 m)

Fig. 10 Comparison between simulation data and test data (abeam distance is 0.5 m)

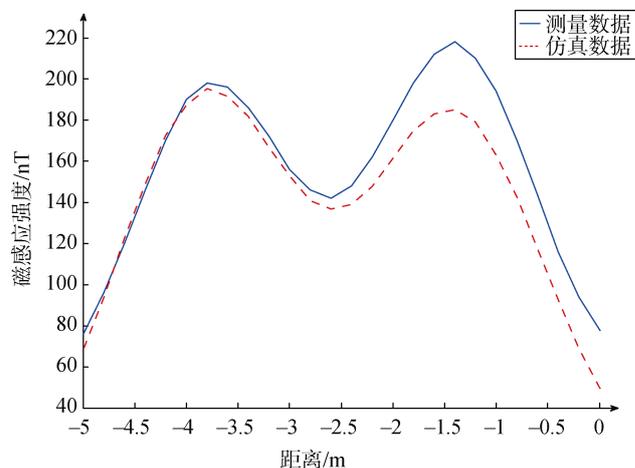


图 11 仿真数据与测试数据对比 (正横距离 1 m)

Fig. 11 Comparison between simulation data and test data (abeam distance is 1 m)

由于在测量过程中存在许多非理想因素, 以及有限元计算模型与实际结构的差异, 使得仿真计算值与实测值存在一定程度的偏差, 这些情况是客观存在的。但是由以上实测与仿真数据对比图可以看出仿真计算值与实测值在整体上波动趋势基本一致, 试验结果与仿真结果的吻合度较高, 这表明本文所建立的有限元模型是合理可靠的, 基于有限元模型的磁场分析, 可以作为电极阵电磁扫雷具设计时的依据。

### 4 结束语

本文建立了电极阵电磁扫雷具的有限元模型,

并以此为基础进行了有限元仿真分析。进行了电极阵磁扫雷具缩比样机磁场的水池测量,将有限元仿真计算值与实场测量值进行对比可知,有限元仿真计算值与实场测量值变化规律一致,仿真数据与实测数据较好地吻合。这表明本文所建立的有限元模型是合理可靠的,基于有限元模型的磁场分析,可以作为电极阵电磁扫雷具设计时的依据,具有重要的实际意义。

### 参考文献

- [1] 叶平贤, 龚沈光. 舰船物理场[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- [2] 温正雄, 刘忠乐. 非接触扫雷具设计原理[M]. 北京: 海潮出版社, 2001.
- [3] 张翼超, 刘忠乐. 海水中电极对产生磁场的研究[J]. 水雷战与舰船防护, 2010, 18(3): 25-30.
- [4] 文无敌, 刘忠乐, 李华. 由空中磁场推算线电极参数及海水中电磁场分布[J]. 兵工学报, 2013, 34(11): 1412-1417.
- [5] 石剑, 文无敌, 刘忠乐. 海水中带电极电缆空中磁场的实场测量研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(7): 1295-1301.
- [6] 赵博, 张洪亮. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京: 中国水利出版社, 2010.
- [7] 周国华, 肖昌汉, 刘胜道, 等. 基于六面体单元表明磁场积分法求解三维静磁场[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 1-7.
- [8] 虞伟乔, 朱武兵, 周国华. 基于四面体表面积分求解三维静磁场[J]. 海军工程大学学报, 2016, 28(5): 15-19.
- [9] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- (责任编辑: 曹晓霖)
- 
- (上接第 63 页)
- [2] 中国钢铁工业协会. GB/T 8918—2006 重要用途钢丝绳[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2006:1-7.
- [3] 刘彬波. 灭雷具用水下靶雷打捞装置[J]. 舰船科学技术, 1992, 125(5): 60-64.
- [4] CHIU C S, LIU C P. Cost of salvage-a comparative form approach[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2017, 25(6): 742-751.
- [5] GERIGK M. Method of risk and safety assessment during the ship salvage using the hazard, release and consequence analysis[J]. The Journal of Air Force Institute of Technology, 2008, 13(1): 233-239.
- [6] 周到. 半埋雷打捞装置关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [7] 周到, 孟庆鑫, 孙志娟. 半埋雷打捞装置夹紧爪结构优化[J]. 工程设计学报, 2006, 13(6): 435-439.
- [8] 李广君, 王立权, 孟庆鑫. 水下半埋雷打捞装置[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1999, 20(5): 18-22.
- (责任编辑: 肖楚楚)