大型复杂电极 - 海水负载陆上构建方法

李博文

(海军工程大学 兵器工程学院,湖北 武汉 430033)

摘 要 为满足大型复杂扫雷电极 - 海水负载陆上模拟需要,分析了陆上重建方式,提出了多个小型 电极对插入电解液并联模拟的方法,建立了电极对接触电阻计算模型,以及模拟负载优化的多目标决策模型。为求解决策模型,将其简化为单目标决策模型,并利用库恩 - 塔克条件法得到单目标模型解,利用理性 点法求出了多目标决策模型解。最后,对模拟优化方法进行了仿真验证,计算结果表明,在保证两者负载相 同的情况下,陆上模拟负载总尺寸及模拟电极尺寸显著缩小,证明了模拟方法高效,优化方法正确。

关键词 大型扫雷电极;负载;模拟优化

中图分类号 TJ61.1 文献标志码 A

On-land Construction Method of Large Complex Electrode – Water Load

LI Bowen

(Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract In accordance with the demand on simulating large complex minesweeping electrode – water load on land, the mode of reconstruction on land is analyzed, and the method of simulating parallel multiple small electrode pairs in electrolyte is put forward. The mathematics model of the contact resistance of electrode pairs and multi-objective decision model of simulating load optimization are established. In order to solve decision-making model, this paper simplifies it to single target decision model by using the solution of the single target decision model by using the Kuhn-Tucker conditions method and the solution of multiple target decision model by using the rational point method. The simulation optimization method is verified, and the calculation result show that the overall size of simulation load on land and the size of simulation electrode are significantly reduced under the condition with the same load, which confirms that the simulation method is efficient and optimization method is correct.

Key words large minesweeping electrode; load; simulation optimization

0 引言

大型复杂电极 - 海水负载是电极式扫雷具的 工作载体。电极式扫雷具通常利用大型多股电极 与电极间海水的良好导电性,加载大电流产生磁 场。由于电极尺寸及间距大、载流能力强,能产生 大磁场范围^[1],工作效率高,是许多国家重要的反 水雷装备。但受这种工作原理的限制,当扫雷具需 要进行全系统通电性能测试时,只能在海上进行, 不能直接在陆上进行,因为直接将电极连接会造成 短路,直接将电极放入某一电解液容器,则容器体 积过大也无法实现。为此,需要一个等效对接装 置,其阻值与电极式扫雷具的超大型多股电极 – 海水负载阻值相同,且尺寸小巧、便于使用,可以方 便地实现陆上检测。

收稿日期:2018-01-09

作者简介:李博文(1994-),男,本科,主要从事武器系统及运用研究。

1 大型复杂电极 - 海水负载的接触电阻模型

首先计算电极式扫雷具多股电极 - 海水负载 工作电阻。将其视为水平位于海面的多股非等位 电极,当电极长度比截面尺寸大许多时,其接触电 阻计算模型为

$$\begin{cases} R_{es} = \frac{2 \cdot \operatorname{cth}(\sqrt{r_0 g_0} L_0)}{n} \cdot \sqrt{\frac{r_0}{g_0}} \\ r_0 = \frac{1}{\pi R_0^2 \gamma_0} \\ g_0 = 2\pi \gamma_1 \times \frac{1}{\ln \left[\frac{L^{2n}}{R_0 (2R)^{2n-1} \prod_{k=2}^{2n} \sin \frac{\pi}{2n} (k-1)}\right]} \end{cases}$$
(1)

式中: L_0 为电极长度,m; γ_0 为电极电导率, γ_1 为海 水电导率, $1/(\Omega \cdot m)$;n为电极股数; R_0 为单股电 极半径,m;R为电极围绕的圆周半径,m。

对位于海面并在半圆周上均匀分布的多股正、 负电极,利用镜像法处理介质表面对电流场影响, 则正、负电极与海水的总接触电阻计算模型

$$\begin{cases} R_{es} = \frac{2 \cdot \operatorname{cth}(\sqrt{r_0 g_0} L_0)}{n} \cdot \sqrt{\frac{r_0}{g_0}} \\ r_0 = \frac{1}{\pi R_0^2 \gamma_0} \\ g_0 = 2\pi \gamma_1 \times \\ 1 \\ \hline \end{array}$$
(2)

$$\ln \left[\frac{L^{2n}}{R_0 (2R)^{2n-1} \prod_{k=2}^{2n} \sin \frac{\pi}{2n} (k-1)} \sqrt{\frac{4a_0 - L_0}{4a_0 + L_0}} \right]$$

式中 a_0 为电极对中点间距的一半,m。^[2-3]

2 陆上构建方法

2.1 陆上构建方法分析

一般容易考虑到设计-等效电阻进行对接。但 根据等效电阻需要大电流、小电阻的要求,对电热 工程材料进行计算筛选可以看出,选择常见的铜、 铁等金属以及电热材料如镍-铬合金(Cr20Ni80) 时,由于其电导率极大^[4],将导致等效电阻尺寸过 大,实际难以实施。 为此,从便于实现的角度,我们采用等效电极 法,通过设计优选小电极尺寸,插入盐水箱,调整电 极插入深度以及电极间距离,改变模拟负载极间电 阻^[5-6],使其阻值与扫雷具电极在海水中工作时的 总阻值相同,如图1所示。



图1 模拟负载示意图

Fig. 1 Schematic diagram of simulated load

依据这一思路,并根据模拟负载等效及小型化的要求,下面通过设计分析、建模及仿真计算,探讨等效模拟电极式扫雷具大型多股电极-海水负载的优化方法。

采用等效电极方法,首先是要保证两者负载相 等,在此基础上以尽可能小的电极代替扫雷具大电 极,以有限容积的电解液代替无限海水,并以单股 电极代替多股电极。这一方法还可通过调整电极 插入深度以及电极间距离,改变模拟负载电阻,以 模拟扫雷具在不同盐度海区工作时,由于含盐度不 同,导致的实际工作负载改变。

2.2 模拟回路的接触电阻

模拟电极的放置方式与扫雷具电极不同,采用 垂直插入电解液方式。由于尺寸较小,不同点电位 变化很小,为简化计算,可视为等位电极。对于插 入电解液一定深度的单电极,接触电阻为

$$R_{e0} = \frac{1}{2\gamma\pi \cdot L} \ln(\frac{4L}{d}) \tag{3}$$

式中: γ 为电解液的电导率; d 为电极直径; L 为电极浸入电解液部分长度。

对于电极对,设 2*a* 为两电极间距,在满足 *a* ≥ *d* 条件下,电极对极间电阻为

$$R_{ec} = \frac{1}{\gamma \pi \cdot L} \ln\left(\frac{2L\sqrt{4a-L}}{d\sqrt{4a+L}}\right)$$
(4)

由式(2)-(4)可知,为满足模拟电极极间电阻

与电极式扫雷具电极-海水负载电阻相等,电极对的尺寸较大,为显著降低模拟电极对尺寸,采用多个相同电极对并联方式,设 n 为电极对数量, d_j 为相邻电极间距,当相邻电极有一定间隙时(d_j≥5d),各电极对视为并联关系,此时多电极对极间接触电阻为

$$R_{em} = \frac{R_{ec}}{n} = \frac{1}{n\gamma\pi \cdot L} \ln\left(\frac{2L\sqrt{4a-L}}{d\sqrt{4a+L}}\right)$$
(5)

为满足负载等效模拟要求,就需要

$$R_{es} = R_{em}$$

3 陆上构建方案优化

由上述计算模型可知,满足负载等效条件的模 拟电极对可以有多种实现方式。为使用方便、经 济,还需要在满足接触电阻相等的条件下,使模拟 电极对及模拟装置尺寸达到最小。

先计算模拟电极对的总体积

$$V_e = 2 \times \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times L \times n = \frac{\pi}{2} d^2 L n \tag{6}$$

为避免电解液箱壁对接触电阻影响,电极距模 拟电解液箱边沿应有一定距离,设该距离为 C,则 模拟电解液箱体积为

 $V_c = (L+C) \times (2a+d+2C) \times$

 $[(n-1)\times(d+d_{j})+d+2C] = (L+C)(2a+d+2C)(nd+2C+nd_{j}-d_{j})$ (7)

优选式(6)、(7)中的不同参数,可使模拟电极 及模拟装置尺寸达到最小。同时,电极长度应大于 其直径,采用铜制作电极时,允许的载电流较大,电 极的最小直径应满足载电流要求,大于发生熔断时 的铜棒直径,避免发生熔断,即 nd>C₂(熔断直径), L>d。

因此,上述问题转化为多目标决策方程组

$$\begin{cases} \min(\frac{\pi}{2}d^{2}Ln) \\ \min[(L+C_{1})(2a+d+2C_{1})(nd+2C_{1}+nd_{j}-d_{j})] \\ s.t.R_{es} = \frac{1}{n\gamma\pi \cdot L} \ln(\frac{2L\sqrt{4a-L}}{d\sqrt{4a+L}}) \\ s.t.a \ge d, d_{j} \ge 5d, nd > C_{2}, L > d, \gamma > 0 \\ \rightrightarrows \Psi n \ \Im fl \ \mbox{\pounds}_{\odot} \end{cases}$$
(8)

但该方程组限定条件复杂,为非线性非连续变量多目标决策问题,直接求出最优解十分困难^[7-8]。为求解,需进行必要处理。方法如下:首先,将上述多目标决策问题分别转化为2个单目标决策;其次,放宽n的取值范围,n取不小于1的正数;最后,为简化求解,电极间距取 d_j=5d,同时,电解液取标准含盐度海水,电导率可视为常量;先求出单目标决策最优解,再利用理想点法得到多目标决策模型结果。

1)将多目标决策转化为单目标决策并简化约 束。

$$\begin{cases} \min\left(\frac{\pi}{2}d^{2}Ln\right)\\ s.t.R_{es} = \frac{1}{n\gamma\pi \cdot L}\ln\left(\frac{2L\sqrt{4a-L}}{d\sqrt{4a+L}}\right)\\ s.t.a \ge d, L > d, nd > C_{2}, n \ge 1 \end{cases}$$
(9)

 $[\min[(L+C_1)(2a+d+2C_1)(6nd+2C_1-6d)]$

$$\begin{cases} s.t.R_{es} = \frac{1}{n\gamma\pi \cdot L} \ln(\frac{2L\sqrt{4a-L}}{d\sqrt{4a+L}}) \tag{10} \end{cases}$$

 $s.t.a \ge d, L > d, nd > C_2, n \ge 1$

2)利用库恩-塔克条件法解方程。

由于方程组(9)、(10)中既含有等式约束条件,又有非等式约束条件,不能直接利用拉格朗日乘数法求解,采用库恩-塔克条件法求解。

将式(9)、(10)分别改为库恩-塔克条件法的 标准形式,如下

$$\begin{split} &\min\left(\frac{\pi}{2}d^{2}Ln\right) \\ s.t.R_{es} = \frac{1}{n\gamma\pi\cdot L} \ln\left(\frac{2L\sqrt{4a-L}}{d\sqrt{4a+L}}\right) \ge 0 \\ s.t.-R_{es} + \frac{1}{n\gamma\pi\cdot L} \ln\left(\frac{2L\sqrt{4a-L}}{d\sqrt{4a+L}}\right) \ge 0 \quad (11) \\ s.t.a-d \ge 0 \\ s.t.L-d \ge 0 \\ s.t.nd-C_{2} > 0 \\ s.t.n-1 \ge 0 \end{split}$$

$$\begin{cases} \min\left[\left(L+C_{1}\right)\left(2a+d+2C_{1}\right)\left(6nd+2C_{1}-6d\right)\right]\\ s.t.R_{es}-\frac{1}{n\gamma\pi\cdot L}\ln\left(\frac{2L\sqrt{4a-L}}{d\sqrt{4a+L}}\right) \ge 0\\ s.t.-R_{es}+\frac{1}{n\gamma\pi\cdot L}\ln\left(\frac{2L\sqrt{4a-L}}{d\sqrt{4a+L}}\right) \ge 0\\ s.t.a-d\ge 0\\ s.t.L-d\ge 0\\ s.t.nd-C_{2}>0 \end{cases}$$
(12)

$$s.t.n-1 \ge 0$$

根据约束条件,对式(11)、(12)分别引入广义 拉格朗日乘子 λ 和 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$,设 $X = (a, d, L, n)^T$,式(11)、(12)中的不等式约束用 $g_i(X)$ 表示,则有

$$\begin{cases} \nabla V_{e}(X) - \lambda \nabla R_{es}(X) - \sum_{i=1}^{4} \gamma_{i} \nabla g_{i}(X) = 0 \\ \gamma_{i} \nabla g_{i}(X) = 0, i = 1, 2, \cdots, 4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \nabla V_{c}(X) - \lambda \nabla R_{es}(X) - \sum_{i=1}^{4} \gamma_{i} \nabla g_{i}(X) = 0 \\ \gamma_{i} \nabla g_{i}(X) = 0, i = 1, 2, \cdots, 4 \end{cases}$$

$$(13)$$

分别从方程组(13)、(14)中求出电极体积的 最优解 $X_1^* = (a_1^*, d_1^*, L_1^*, n_1^*)^T$ 、对应的目标值 V_e^* ,模拟装置体积的最优解 $X_2^* = (a_2^*, d_2^*, L_2^*, n_2^*)^T$ 、对应的目标值 V_e^* 。

3)利用理想点法得到多目标决策结果。

定义目标函数

$$V_{p}(x) = \| V(x) - V^{*} \| = [(V_{e} - V_{e}^{*})^{p} + (V_{c} - V_{c}^{*})^{p}]^{1/p}$$
(15)

$$\mathbb{R} p = 2, \text{ } \# \mathbb{R} \mathbb{R} V_{p}(x) \mathbb{R} \mathbb{H} \wedge \mathbb{G}, \mathbb{P}$$

 $\min V_2(x) = \left[\left(V_e - V_e^* \right)^2 + \left(V_c - V_c^* \right)^2 \right]^{1/2} =$

$$\left\{\frac{\pi}{2}d^{2}Ln - V_{e}^{*}\right\} + \left[(L+10d)\right]$$

$$(2a + d + 2C_{1}) \times (6nd + 2C_{1} - 6d) - V_{e}^{*}\right]^{1/2}$$
(16)

约束条件不变,求得此时的最优解 $X'^* = (a^*, d^*, L^*, n^*)^T, n^*$ 取相邻整数代入重新计算,对应的模拟电极及模拟装置目标值分别为 $V'_e^*, V'_e^*,$ 即为原问题中模拟电极和模拟装置体积的最优结果。

4 仿真实验

为验证方法的可行性,进行仿真验证。首先,

计算电极式扫雷具多股电极-海水负载,各参数取 值如下:海水电导率 γ_1 =3.8/($\Omega \cdot m$),扫雷具铜 电极股数 *n*=5,单股半径 R_0 =0.005 m,总半径 R= 0.04 m,电极总长度 *L* = 75m,电极间距 $2a_0$ = 200 m,铜电极电导率 γ_0 =5.92×10⁷,利用式(2)计 算,可得电极接触电阻值为 R_{as} =0.02 Ω_o

根据负载电阻相同的要求,利用式(8)-(14), 分别计算得到单目标决策下模拟电极和模拟装置 最优解,其中 C_1 =0.15 m, C_2 =0.01 m。

模拟电极最优解为

- $$\begin{split} X_1^* = (a_1^*, d_1^*, L_1^*, n_1^*)^T = (0.3, 0.005, 0.7, 16.5)^T \\ 对应目标值 V'_e^* = 0.004_o \\ 模拟装置最优解为 \end{split}$$
- $X_2^* = (a_2^*, d_2^*, L_2^*, n_2^*)^T = (0.1, 0.005, 0.4, 22.9)^T$ 对应的目标值 $V_c^* = 0.48_{\circ}$

然后,利用式(15)-(16)计算得到多目标决策 最优解

$$X'^* = (a^*, d^*, L^*, n^*)^T = (0.28, 0.05, 0.6, 15.2)^T$$

由于电极数量需取整数,故取整值15,重新代 入计算得最终解

 $X'^* = (a^*, d^*, L^*, n^*)^T = (0.3, 0.05, 0.6, 15)^T$

此时,对应的模拟电极和模拟装置体积分别为 0.04 m³、1.1 m³,即为最优目标值。

由上述仿真计算结果可知,利用本方法可以用 体积约1.1 m³ 的模拟装置及15个直径0.05 m、长 度0.6 m、间距0.3 m 的电极对,等效模拟长度 75 m、间距200 m 的电极式扫雷具负载,在陆上检 测时插入水深1 m 的水池,建立对接通路,以便进 行性能检测。由仿真实验数据可知,尺寸缩减非常 显著:其中电极长度仅为原来的1.2%,间距仅为原 来的0.15%,电极总体积仅为原来的4%,便于使用 且非常经济。

由于电极式扫雷具多股电极对的总接触电阻 随海区含盐度变化,由上述模拟方法可知,对于总 接触电阻的变化,调整改变模拟电极插入电解液深 度即可,比较方便实现。

5 结束语

通过上述分析及仿真实验可以看出,采用单电

极对插入电解液模拟,难以达到最优,采用多个小型电极对并联,并利用多目标规划方法优化电极和模拟装置尺寸,可以高效模拟电极扫雷具大型多股电极-海水负载。

模拟负载在通电过程中会产生大量热量,需要 考虑散热问题,受篇幅所限,文中对这一问题未进 行探讨,需要后续进一步研究。

参考文献

- [1] 罗杰.电极式扫雷具编队扫雷初探[J].水雷战与舰船 防护,2012,23(1):30-33.
- [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] 陈国华,吴葆仁.海水电导[M].北京:海洋出版社, 1981.
- [4] 张颖异,李运刚,张快.高温电热材料的研究发展[J].材料热处理技术,2011,40(18):40-43.
- [5] 李开鹏.金属板状电极的接地电阻[J].矿产勘查, 2015,6(4):455-460.
- [6] 陈筑,刘伟,徐林.等间距平行电极接触电阻测试法 [J].太阳能学报,2014,35(11):2087-2091.
- [7] 刘文奇,余高锋,胥楚贵.多目标决策的激励策略可行 解[J].控制与决策,2013,28(6):957-960.
- [8] 朱峥.一种受端电网限制短路电流的多目标决策方法 [J].电气技术,2015,46(12):87-90.

(上接第80页)

高效的深海 AUV。此外,在军用领域能适应深海 环境的同时也要适应水下网络战的要求,具备通信 中继、侦察和反水雷、反潜等功能。对潜在敌目标 识别,并实时与其他装备进行通信。必要时可以接 收水面或者岸上指挥员的指令。

参考文献

- [1] 孙现有,马琪.美海军 UUV 使命任务必要性与技术 可行性分析[J].鱼雷技术,2010,18(3):231-235.
- [2] 蔡年生.UUV 动力电池现状及发展趋势[J].鱼雷技术,2010,18(2):81-87.
- [3] 孙碧娇,何静.美海军无人潜航器关键技术综述[J]. 鱼雷技术,2006,14(41):7-10.

- [4] 郭勇,陈强.UUV 电池的发展现状及趋势[J].中外船 舶科技,2011(4):29-32.
- [5] 郭忠文,罗汉江,洪锋,等.水下无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展,2010,47(3):377-389.
- [6] 张宇飞,陆权聪,翁海娜.基于 IMU 旋转的船用激
 光导航系统分析与设计[J].海洋技术,2009,28
 (2):88-91.
- [7] 陆志东,王晓斌.系统级双轴旋转调制捷联惯导误差分析及标校[J].中国惯性技术学报,2010,18
 (2):135-141.
- [8] 钟宏伟.国外无人水下航行器装备与技术现状及展望[J].水下无人系统学报,2017,25(3):215-225.