

# 应用模型试验法推算电渔法电流场的研究\*

崔建章

(上海水产学院)

## 提 要

捕鱼电场的测量是电渔法研究中的重要工作之一,其可为改进电极分布及决定电压、电流和功率等参数提供依据。本文介绍了一种模型试验法,经对模型电流场的测量,就可推算出实物电流场的所有参数,而毋需进行实物电流场的测量。本文先从理论上推导出实物场与模型场之间的换算关系,然后以试验结果证实了模型试验法的正确性。

电流场的测量是电渔法研究中的一项重要工作。通过测量可了解电流场内电位的分布,进而为改进电极分布及决定电压、电流和功率等参数提供依据。电流场的测量方法有二:实测法和电模拟法。实测法是在实物电流场中进行直接测量,但这种方法工作量大,准确度差,因此目前较少使用。电模拟法是将实物电极按比例缩小为模型电极,置于导电媒质中测量其电位分布,然后据此推算出实物电流场电位场电位的分布,而毋需进行实物电流场的实测。即电工学中所说的物理模拟。不过目前通常使用的电模拟法没有考虑导电媒质电导率的因素,因此当实物场与模型场的电导率不同时,不能换算出实物场的电流和消耗功率。这里实验了另一种电模拟法,经对模型电流场的电流、电导率和电位分布进行测量后,可推算出任意电流和电导率下实物场的电位分布,并可进一步推算出实物场的电场强度和消耗功率。由于该法考虑了导电媒质电导率的因素,所以在计算消耗功率时更为方便。虽然该法的原理和方法与通常用的电模拟法无根本区别,但可根据已知条件和测量目的的不同与前法交替使用。但为了区别于通常用的电模拟法,现称之为模型试验法。

本文先阐述了模型试验法的理论依据,推导了实物场与模型场之间的换算关系,然后以试验实例证明理论推导的正确性。

文中所述的试验是在上海水产学院游泳池和有机玻璃水槽内进行的。游泳池尺寸 $25 \times 15 \times 4$ 米,水槽尺寸 $0.9 \times 0.7 \times 0.5$ 米,导电媒质采用淡水。

## 模型试验法的原理

当将金属电极浸入导电媒质,并使电极间存在电位差,则在导电媒质中形成电流场。

\* 本文承蒙吴有益同志修改;另外孙学林、王立新、黄硕林和陆赤等同志参加试验工作,在此谨表谢意。

电渔法研究中所采用的电流场,导电媒质连续,可视为无体电荷存在的恒定电流场。因此在这类场中,任意一点的电位应满足拉普拉斯方程。实物场与模型场是物理本质相同的场,因此均应满足于拉氏方程。据电工学原理,对于拉普拉斯场只要模型电极与实物电极几何相似,则两场中所发生的物理现象也相似,即两场物理量之间存在着一定的比例关系。因此只要测量模型电流场的物理量,就可通过比例关系推算出实物电流场对应的物理量。

以下具体推导实物电流场与模型电流场之间的换算关系。

现以两根圆柱电极形成的电流场为例。设  $L_f$ 、 $d_f$ 、 $r_f$ 、 $U_f$  和  $\varphi_f$  分别代表实物电极的长度、距离、半径、两电极之间的电压和电位;  $L_m$ 、 $d_m$ 、 $r_m$ 、 $U_m$  和  $\varphi_m$  分别代表模型电极的长度、距离、半径、两电极之间的电压和电位。并使两组电极几何相似,即

$$\frac{L_f}{L_m} = \frac{r_f}{r_m} = \frac{d_f}{d_m} = \lambda_L \quad (1)$$

在实物电流场中,半径为  $X$  的半个圆柱面上电流密度为:

$$J_f = \frac{I_f}{\pi \cdot X \cdot L_f}$$

见图 1

在半径为  $X$  处的电场强度

$$E_f = \frac{J_f}{\sigma_f} = \frac{I_f}{\pi \cdot r_f \cdot L_f \cdot \sigma_f}$$

$I_f$ ——通过电极的总电流;

$\sigma_f$ ——实物电流场导电媒质的电导率

电极之间的电压为:

$$U_f = \int_{r_f}^{d_f-r_f} E_f dx = \frac{I_f}{\pi \cdot L_f \cdot \sigma_f} \ln \frac{d_f - r_f}{r_f}$$

因为  $d_f \gg r_f$

所以

$$U_f = \frac{I_f}{\pi \cdot L_f \cdot \sigma_f} \ln \frac{d_f}{r_f} \quad (2)$$

同样在模型电流场内有

$$U_m = \frac{I_m}{\pi \cdot L_m \cdot \sigma_m} \ln \frac{d_m}{r_m} \quad (3)$$

$I_m$ ——通过模型电极的总电流;

$\sigma_m$ ——模型电流场导电媒质的电导率

因为(1)式

$$\frac{d_f}{d_m} = \frac{r_f}{r_m}$$

所以有  $\frac{d_f}{r_f} = \frac{d_m}{r_m}$  和  $\ln \frac{d_f}{r_f} = \ln \frac{d_m}{r_m}$

将(2)式与(3)式相比得

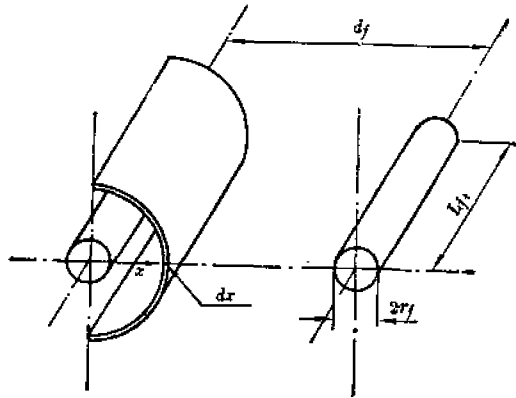


图1 实物电流场示意图

$$U_f = \frac{I_f \cdot L_m \cdot \sigma_m}{I_m \cdot L_f \cdot \sigma_f} U_m$$

或

$$U_f = \frac{I_f \cdot L_m \cdot \rho_f}{I_m \cdot L_f \cdot \rho_m} U_m \quad (4)$$

$\rho_f, \rho_m$ ——两种导电媒质的电阻率

$$\text{令 } \lambda_\varphi = \frac{I_f \cdot L_m \cdot \rho_f}{I_m \cdot L_f \cdot \rho_m} \quad (5)$$

$$\text{则 } U_f = \lambda_\varphi \cdot U_m \quad (6)$$

同样电位  $\varphi_f = \lambda_\varphi \cdot \varphi_m$

$\lambda_\varphi$  为模型电流场与实物电流场电压(或电位)之间的比例常数。

因此,如欲求实物电流场的电位曲线,可不必进行实测,而代之以与之几何相似的模型场内进行测量,得出模型电流场电位曲线  $\varphi_m$ , 将该曲线各点的横座标乘以  $\lambda_L$ , 相应点的纵座标乘以电位比例常数  $\lambda_\varphi$ , 就得出实物电流场的电位曲线  $\varphi_f$ , 并可进一步推算出实物电流场的电场强度曲线和消耗功率。

以上仅以简单的两根圆柱电极为例得出换算结果,对于其他形式的电极,只要模型电极与实物电极几何相似,均可推出(6)式的结果。

## 试验方法和试验结果

为了验证以上模型电流与实物电流场物理量之间的换算正确与否,做了模型电极和实物电极浸入水槽或游泳池中,分别在一定的电流下测量其电位曲线,然后对比其电位曲线,如两曲线吻合,就可证明理论推导正确。次序大致如下:首先测出模型电流场电位曲线,然后用(1)式

$$\lambda_L = \frac{L_f}{L_m} = \frac{r_f}{r_m} = \frac{d_f}{d_m}$$

和(6)式

$$\varphi_f = \lambda_\varphi \varphi_m$$

换算实物电流场的电位曲线  $\varphi_f$ , 最后对实物电流场进行实测,得出实测曲线  $\varphi'_f$ , 比较推算曲线  $\varphi_f$  与实测曲线  $\varphi'_f$  是否一吻合。试验以两根圆柱形电极形成的电流场为例说明方法和结果。

1、在盛有电阻率为  $\rho_m = 1841$  [欧·厘米]的淡水的水槽中浸入圆柱形电极的模型,该模型电极与实物电极几何相似,电极长度  $L_m = 18$  厘米,电极半径  $r_m = 0.18$  厘米,电极距离  $d_m = 10.7$  厘米,接通 50 赫兹的交流电使总电流  $I_m = 0.1$  安培。然后测出 AB 间的电位曲线  $\varphi_m$ 。测量示意图见图 2 具体测量方法可见有关电渔法教材,这里不再赘述。 $\varphi_m$  曲线见图 3。

2、将模型电流场的电位曲线  $\varphi_m$  换算为实物电流场的电位曲线  $\varphi_f$ , 实物电极所给的条件为:长度  $L_f = 150$  厘米,半径  $r_f = 1.5$  厘米,电极距离 88 厘米,通过电极的总电流  $I_f = 2.63$  安培,导电媒质(水)的电阻率  $\rho_f = 2347$  [欧·厘米]

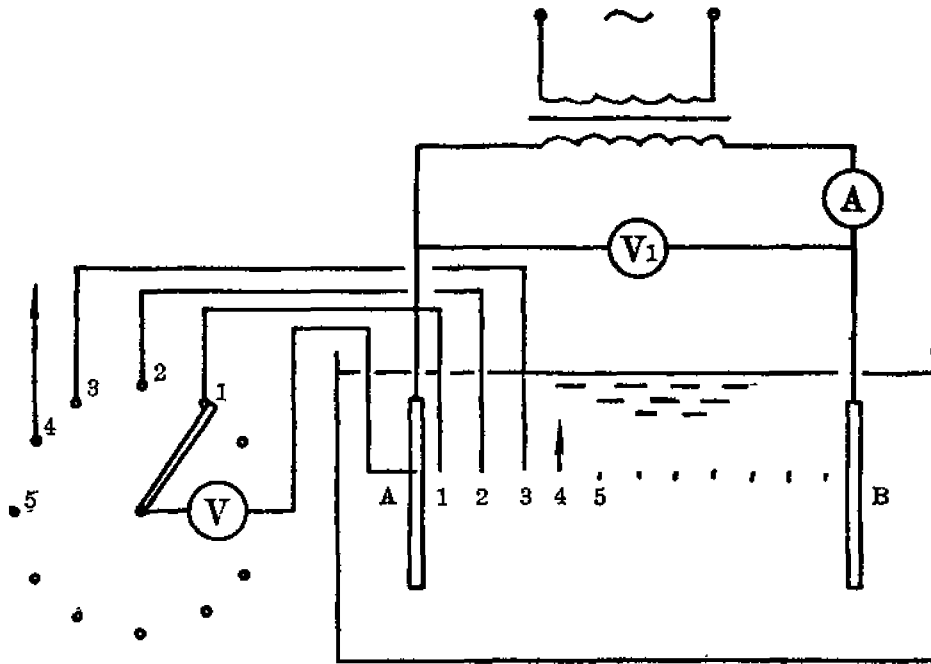


图2 电流场电位测量示意图

V——测各点电位的电压表1,2,……—测量点

据(1)式

$$\lambda_L = \frac{L_f}{L_m} = \frac{d_f}{d_m} = \frac{r_f}{r_m}; \quad \lambda_L = \frac{150}{18} = 8.33$$

又据(5)式

$$\lambda_\varphi = \frac{I_f \cdot L_m \cdot \rho_f}{I_m \cdot L_f \cdot \rho_m} = \frac{2.63[\text{安培}] \times 18[\text{厘米}] \times 2347[\text{欧} \cdot \text{厘米}]}{0.1[\text{安培}] \times 150[\text{厘米}] \times 1841[\text{欧} \cdot \text{厘米}]} \approx 4$$

现将图3曲线  $\varphi_m$  各点横坐标乘以 8.33, 相应的纵坐标乘以 4, 就得出欲求的实物电流场电位曲线  $\varphi_f$ , 见图4曲线  $a$ 。

3、为了验证该推算电位曲线  $\varphi_m$  是否正确, 再按“2”所给条件制作实物电极, 并浸入

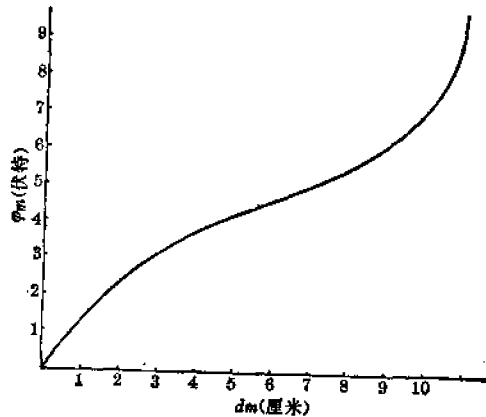


图3 模型电流场电位曲线

游泳池内进行实测。实测的电位曲线  $\varphi'_m$  见图 4 曲线 *b*, 从图 4 可以看出推算曲线  $\varphi_m$  与实测曲线  $\varphi'_m$  接近。说明该模型试验法正确。

4、再用一例验证以上结论。模型电极的参数为:  $L_m = 100$  [厘米],  $r_m = 1$  [厘米],  $d_m = 58.7$  [厘米]、 $\rho_m = 2347$  [欧·厘米], 总电流  $I_m = 1$  [安培]。测出的电位曲线  $\varphi_m$  见图 5。

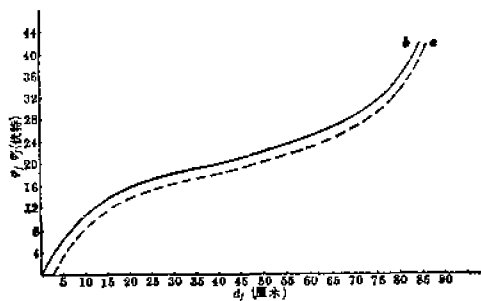


图4 实物电流场的电位曲线

*a*——推算曲线  $\varphi_f$     *b*——实测曲线  $\varphi'_f$

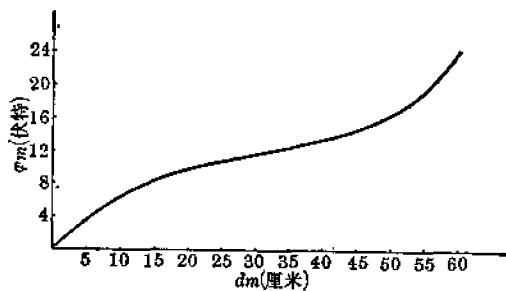


图5 模型电流场的电位曲线 ( $L_m = 100$  厘米)

实物电极的给予条件同前例:  $L_f = 150$  [厘米],  $d_f = 88$  [厘米],  $r_f = 1.5$  [厘米],  $\rho_f = 2347$  [欧·厘米], 总电流  $I_f = 2.63$  [安培]。模型与实物之间几何相似。

$$\lambda_L = \frac{L_f}{L_m} = \frac{150 \text{ [厘米]}}{100 \text{ [厘米]}} = 1.5$$

$$\lambda_\rho = \frac{I_f \cdot I_m \cdot \rho_f}{I_m \cdot L_f \cdot \rho_m} = \frac{2.63 \text{ [安培]} \times 100 \text{ [厘米]} \times 2347 \text{ [欧·厘米]}}{1.00 \text{ [安培]} \times 150 \text{ [厘米]} \times 2347 \text{ [欧·厘米]}} \approx 1.75$$

重复前例的步骤得实物场推算电位曲线  $\varphi_f$ , 见图 6 曲线 *b*。可以看出曲线 *a* 与 *b* 比前例更为接近, 这是因为模型场与实物导电媒质的电导率相同, 减少了测量误差; 另外模型电极的几何尺寸较大, 电极的加工和布置易做到尺寸准确。

5、用模型试验法推算出实物电流场电位曲线后, 还可进一步推算出实物电流场的电场强度曲线  $E_f$  和电流场中所消耗的功率。

将图 4 曲线 *a* 逐段用  $E_f = \frac{\Delta \varphi_f}{\Delta d_f}$  求出各点的电场强度  $E_f$  的近似值, 推算出的电场强度曲线见图 7。

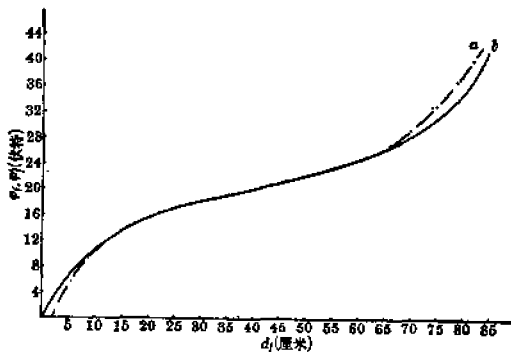


图6 实物电流场的电位曲线 ( $L_f = 150$  厘米)

*a*——推算曲线  $\varphi_f$     *b*——实测曲线  $\varphi'_f$

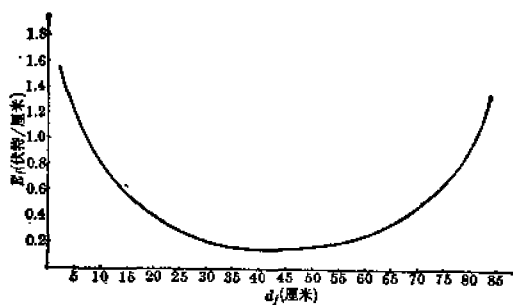


图7 实物电流场的电场强度  $E_f$  曲线

电流场所消耗的功率

$$P_f = I_f \cdot U_f = 2.63[\text{安培}] \times 4.22[\text{伏}] = 1109[\text{瓦}]$$

其中 4.22 伏是图 4 曲线  $\alpha$  中两极间电位差。

由于条件的限制,仅做了简单的圆柱形电极的试验。但也不难证明对复杂电极同样适用,而且这种模型试验法主要用于复杂的和不便于计算的电极电流场的分析。这样就可以实验室内模型场测量代替实物场的现场测量。

## 讨 论

1、在试验中模型场和实物场的导电媒质均采用淡水。可以推断:当模型场采用淡水,实物场为海水时,两电流场仍然相似,两场电位的换算关系

$$\varphi_f = \frac{I_f \cdot L_m \cdot \rho_f}{I_m \cdot L_f \cdot \rho_m} \varphi_m$$

仍然成立。

如电极材料为铜。其电导率  $\sigma_{铜} = 5.8 \times 10^5$  [姆/厘米];模型电流场导电媒质为淡水,一般可取电导率  $\sigma_{淡} = 5 \times 10^{-4}$  [姆/厘米];实物电流场导电媒质为海水,可取电导率  $\sigma_{海} = 5 \times 10^{-2}$  [姆·厘米]淡水与铜相比较。

$$\frac{\sigma_{铜}}{\sigma_{淡}} = \frac{5.8 \times 10^5 [\text{姆/厘米}]}{5.0 \times 10^{-4} [\text{姆/厘米}]} = 1.16 \times 10^9 \gg 1$$

海水与铜相比较

$$\frac{\sigma_{铜}}{\sigma_{海}} = \frac{5.8 \times 10^5 [\text{姆/厘米}]}{5.0 \times 10^{-2} [\text{姆/厘米}]} = 1.16 \times 10^7 \gg 1$$

由此可见,铜的电导率比淡水或海水都大得多,淡水和海水相对于铜来说都可视为绝缘体,所以铜电极必为等位体,无论在淡水还是海水中,电流线必垂直铜电极的表面,因此两电流场相似的性质不会因海水与淡水电导率的差别而改变。

2、模型电极的尺度不宜太小,否则加工和安装的尺寸不易准确,影响测量精度。经数次试验后认为,圆柱电极的长度不应小于 20 厘米,半径不应小于 2 毫米。试验水槽也要有足够的尺度,否则边界将影响电流场电流线的正常扩展。经试验后认为,电极阵与水槽边缘的距离最好大于电极阵尺度的 3 倍,如有条件可在游泳池内进行测量。

3、测量中采用 50 赫兹的交流电,看来尚需改进,因为频率为 50 赫兹的交流电尚不能消除电极表面的极化现象,因此不能保证测量精度,在要求较高的场合建议采用频率为 500—1000 赫兹的交流电。

## 结 语

1、实物电流场的电位曲线可通过对模型电流场的测量间接求得。模型电极必须与实物电极几何相似。

2、从模型电流场转换为实物电流场的基本公式:

$$\text{几何尺度换算} \quad \frac{L_f}{L_m} = \frac{r_f}{r_m} = \frac{d_f}{d_m} = \lambda_L$$

$$\text{电位换算} \quad \varphi_f = \frac{I_f \cdot L_m \cdot \rho_f}{I_m \cdot L_f \cdot \rho_m} \varphi_m$$

3、经圆柱形电极的对比试验,证明该法正确。

### 参 考 文 献

- [1] 冯慈璋,1979。电磁场,第四章,第4—8节,场的实验研究。人民教育出版社。  
 [2] 聂因什尔 A.B.; K.M., 波利瓦诺夫(周孔章等译),1958。电工基础(第三册),1—14。高等教育出版社。  
 [3] 王子香,1958。电工基础(下册),第117节,恒定电流场的边界。水利电力出版社。

## A TESTING STUDY ON SIMULATION METHOD TO CALCULATING ELECTRIC FIELDS IN ELECTRIC FISHING

Cui Jianzhang

(Shanghai Fisheries College)

### Abstract

It is important to measure the distribution of the electric field, which will provide a basic idea for improving the arrangement of electrodes or deciding voltage level, current intensity and power. But the measuring work in the full scale electric field is always complicate. A kind of simulation method is proposed. If the parameters in model scale electric field were measured in laboratory, then the corresponding parameters in the full scale system could be easily calculated out.

In this paper the relation between two systems has been calculated in terms of theory. The formulae are as in the following:

$$1) \text{ the relation of the geometric dimensions, } \lambda_L = \frac{L_f}{L_m} = \frac{r_f}{r_m} = \frac{d_f}{d_m};$$

$$2) \text{ the relation of the electric potential, } \varphi_f = \frac{I_f \cdot L_m \cdot \rho_f}{I_m \cdot L_f \cdot \rho_m} \varphi_m.$$

This simulation method is reliable and it has been proved by the result of the experiments.