

牺牲阳极的电阻公式

张 经 磊

(中国科学院海洋研究所)

近十几年来,牺牲阳极的研究成果在我国诸如海上石油平台、码头钢桩、船舶和浮标等方面已被逐渐采用。在海洋工程牺牲阳极保护系统的设计中,一般是根据欧姆定律: $I = \Delta E / R$ 来估算阳极的电流输出值,确定所需要的阳极数量。分母 $R = R_a + R_c + R_m$ 。式中, R_a 为牺牲阳极的接水电阻, R_c 为阴极(被保护体)的接水电阻, R_m 为阴阳极之间的金属导线电阻。后两项一般很小,可忽略不计。因此,准确地计算牺牲阳极的接水电阻(以下简称阳极电阻,用 R 表示),对于正确估算阳极输出电流和正确设计保护系统是非常重要的。

迄今,国内对于阳极电阻计算方面的有关公式还未见系统的研究报道,只是在某些工作中进行了一些引用和验证。本文的目的是较系统地概述有关阳极电阻公式以及应用条件,以利于有关海洋工程的设计人员根据情况正确选用。

一、通用阳极电阻公式

近海阴极保护中常用的电阻公式列于表1⁽⁴⁻⁷⁾。公式中字母代表的物理意义为: R 为阳极电阻(Ω); ρ 海水电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$); L 为阳极长度(cm); r 为阳极平均有效半径(截面

积/ π)^{1/2}(cm); A 为阳极的暴露面积(cm^2); S 为阳极长度和宽度的数学平均值(cm)。

表1中公式的使用条件如下。

Dwight修正式是由Dwight公式经过修正得来的。Dwight公式为:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(L_n \frac{2L}{r} - 1 \right) \quad (1)$$

该公式要求 $L \gg r$;修正式和原式不同之处是在对数自变量中多了一个因子2,表示式为:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(L_n \frac{4L}{r} - 1 \right) \quad (2)$$

该公式被推荐用于自由悬挂的和有支座的细棒状阳极^(5,6)(图1)。特别是对垂直于被保护体且有绝缘支座的细棒状阳极(图1b),该公式是一个非常精确的表示式。该式也适用于垂

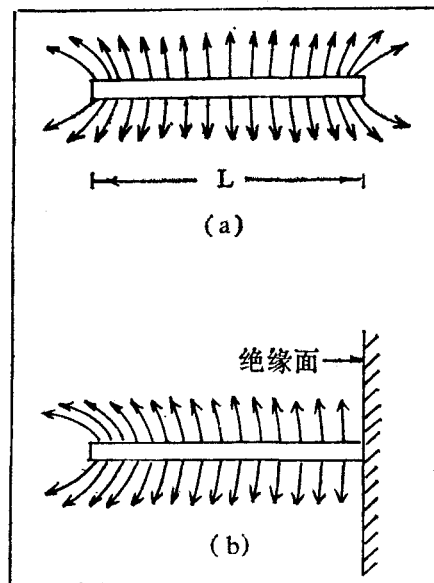


图1 自由悬挂的(a)和有绝缘支座的(b)细棒阳极

表1 近海阴极保护通用电阻公式

公式名称	公式形式
Dwight修正式	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(L_n \frac{4L}{r} - 1 \right)$
Mccoy式	$R = 0.315\rho / \sqrt{A}$
Waldron-Peterson式	$R = \rho / 0.58 A^{0.727}$
Lloyd式	$R = \rho / 2S$

直插入水中和土壤中的阳极。有人也将该公式应用到了平装阳极上 (flush mounted anode)^[4-6]。

McCoy公式是根据圆盘状阳极或球状阳极推导出来的。它适用于下列情况: (1)在无限介质中的圆盘状阳极; (2)嵌在一个无限的绝缘板中的圆盘状阳极 (一个面暴露); (3)悬挂在无限介质中的圆球状阳极; (4)嵌在一个无限的绝缘板上的半球状阳极。其电阻表示式如下:

$$R = K\rho/\sqrt{A} \quad (3)$$

式中, K 为常数。不同几何形状的阳极, 其 K 值不同, 如表 2 所示。

表 2 McCoy公式中不同几何形状阳极的K值

阳极几何形状	K 值
无限介质中的圆盘状阳极	0.313
嵌在绝缘板上的圆盘状阳极 (一面暴露)	0.443
无限介质中的圆球状阳极	0.282
嵌在绝缘板上的半球状阳极	0.399

McCoy本人只推荐了一种K值 (见表1), 与表2中无限介质中圆盘状阳极 (两个面暴露) 的K值非常接近。

McCoy 方程中的K值随阳极的几何形状不同而变化。选择适当的常数K后, 可以将该方程推广应用于近圆盘、圆球和细棒阳极中。K 值与阳极几何形状的关系如图2所示。也有人推荐该方程用于镯式阳极^[6]和平装阳极^[4, 6]。

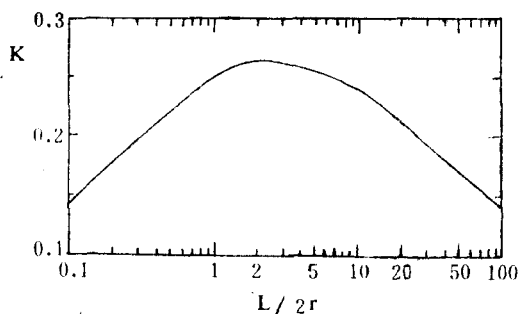


图 2 McCoy 方程中K值随阳极L/2r的变化

Waldron-Peterson 公式是将矩形阳极端对端地放在平的本质基座上组成不同规格的阳极组, 测其电流输出值, 然后用曲线拟合法推导出来。其表示式为:

$$R = \rho/0.58A^{0.727} \quad (4)$$

该公式一般用于截式阳极 (Sectioned anode)。阳极可以组成平面分布和镯式分布^[1]。该公式完全是经验性的。对于镯式阳极的计算结果一般与实际比较一致, 但不适于细棒阳极。从公式(4)可以看出, 阳极电阻只与阳极面积有关而与形状无关。Knuckey和Smith将不同型号的阳极按 Waldron-Peterson 的方式进行排列, 在恒定的阴阳极电位差下测定阳极的电流输出, 然后按公式(4)计算阳极电阻。结果表明, 只有某一形状的阳极的实测结果与用公式(4)的计算结果一致。而对于其他形状的阳极, 其计算结果与实测结果偏差很大。这说明公式(4)只适用于原来 Waldron-Peterson 建立该公式时所用的阳极几何形状, 而不适用于其它形状的阳极。

Lloyd 公式是根据薄板阳极的实验数据得出的, 是一经验公式。其表示式为

$$R = \rho/2S \quad (5)$$

该公式被建议用于一面暴露的薄板阳极^[2], 也有人应用于镯式阳极^[1], 还有报告说用于平装阳极也很好^[4]。

二、其它的阳极电阻公式

下面为不同形状和不同安装方式的阳极电阻公式。

1. 圆柱形阳极

最早用于圆柱形阳极的电阻公式是方程(1), 它只适用于L/2r比值大的细棒阳极。当这个比值变小后, 该公式便产生较大的误差。Hallen曾提出下面短圆柱形阳极的电阻公式:

$$R = \frac{\rho L_n(32r/L)}{4\pi^2 r} \quad (6)$$

当 $r/L \rightarrow \infty$ 时, 该方程非常精确。当 $2r/L = 1$ 时, 所产生的误差只有1.5%。

以后又有人提出如下公式^[3]

$$R = \frac{\rho/r}{8 + 6.95(L/2r)^{0.76}} \quad (7)$$

当 $0 \leq L/2r \leq 8$ 时, 该公式的误差在 0.2% 以内。

Kemal Nisancioglu^[7]将方程(7)与方程(1)~(6)进行了详细比较后, 得出结论说, 对圆柱形阳极, 方程(7)是一个应用范围较广的阳极电阻公式, 可以应用于粗短阳极, 也可以应用于细而长的棒状阳极。方程(1)适用于 $L/2r > 4$ 的细棒阳极。方程(6)适用于 $L/2r < 4$ 的粗短形阳极。方程(2)和(4)适用于 $L/2r \approx 0.5$ 时的阳极。方程(3)和(5)得的电阻值偏高。

2. 远阳极

远阳极安装形式如图3(1)所示。阳极离开被保护体一定距离 S , 其纵轴与被保护结构平行, 分为单阳极和双阳极两种情况。远阳极的电阻公式必须考虑阳极与结构之间的距离, 几何形状及结构物表面是否绝缘(有油漆或锈皮)等因素。

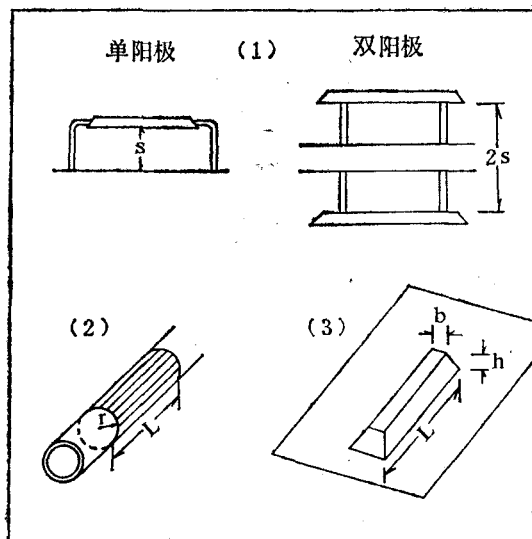


图3 牺牲阳极的不同安装形式

(1) 远阳极; (2) 锡式阳极; (3) 平装阳极
平行的装于有绝缘层的柱形结构上的棒状阳极电阻方程还未见有文献报道。Dwight 曾

推导了一平行地装于一个无限绝缘板上的棒状阳极电阻方程^[8], 形式如下:

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left(L_n \sqrt{\frac{2}{rS}} L - 1 + \frac{S}{L} - \frac{S^2}{2L^2} + \frac{S^4}{4L^4} \dots \right) \quad (8)$$

式中, S 为阳极与表面之间的距离, L 为阳极长度 ($S < L$)。可以根据 S/L 的比例及所需要的精确度略去级数的高次项。该公式可以近似地应用于平行地安装在小直径构件两边的双阳极体系。参数 S 为两阳极距离的一半 (如图3(1)所示)。当结构直径大大地大于阳极直径及 S 时, 该方程可用于平行地装于圆柱结构的单阳极体系。

当被保护结构无绝缘层时(无油漆), 阳极为短路放电, 此时的电阻方程较复杂, 请参看文献[3]等, 在此不做介绍。

3. 锡式阳极

锡式阳极的电阻方程式还未见有专门的报道, 一般是用上面所提出的方程式进行计算。阳极安装如图3(2)所示。有人在挪威进行了现场试验^[1], 将现场测得的锡式阳极的电阻与用不同的方程计算的阳极电阻进行了对比, 结果列于表3^[7]。由该表可以看出, Hallen 方程的计算结果与现场实测结果比较一致。

表3 不同方程式计算的阳极电阻与现场实测值的比较 (对于锡式阳极)

方 法	电阻值 (Ω)
现场测量值	0.058
Hallen 方程计算	0.053
Dwight 修正式计算	0.037
McCoy 方程计算	0.076
Waldron-Peterson 方程计算	0.046
Lloyd 方程计算	0.082

4. 平装阳极

平装阳极的安装方法如图3(3)所示, 阳极紧贴被保护体表面装配。阳极横截面的形状大致可分为三类, 如图4中(a)、(b)、(c)所示。阳极长度 L 都比宽度 b 大。这些梯形阳极都可

以近似地用矩形或半圆形来代替 (见图4)。

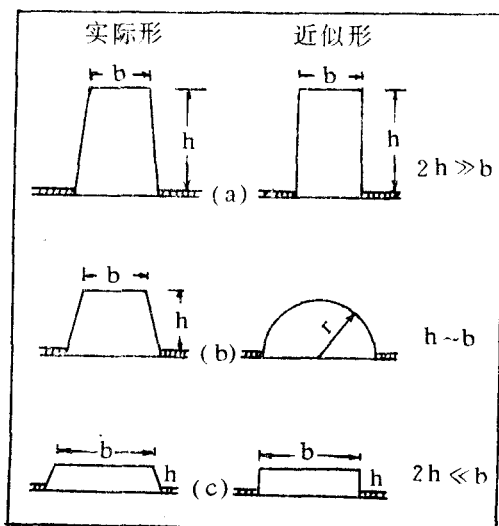


图4 平装阳极的截面类型及近似形

此三种类型的平装阳极的电阻方程表示如下 (阳极装在有油漆的绝缘平板上)^[7]。

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left[L_n \frac{L}{h} + \frac{2h^2 - \pi hb}{(2h + b)^2} \right] \quad (2h \gg b \text{ 型}) \quad (11)$$

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left(L_n \frac{2L}{r} - 1 \right) \quad (h \sim b \text{ 型}) \quad (12)$$

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left[L_n \frac{2L}{b} + \frac{b^2 - 2\pi bh}{2(2h + b)^2} \right] \quad (2h \ll b \text{ 型}) \quad (13)$$

有人将方程 (12) 与表 1 中所列的方程 (将它们都用于平装阳极) 进行了比较^[4, 6], 其结果是 Dwight 修正式得的电阻最低; 方程 (12) 与 Waldron-Peterson 方程在 $r = 5\text{cm}$ 时有一个交点, 在其它 L/r 值内一致性较差。与 Lloyd 方程的一致性也不好 (有一个相交点)。与 McCoy 方程相比, 在整个 L/r 值的范围内保持接近。

上述三个平装阳极的电阻公式都是假定阳极长度 L 很大, 公式的区分主要考虑高度 h 和宽度 b , 即分为 $2h \gg b$, $h \sim b$, $2h \ll b$ 三种类型。除此之外, 还有一种薄板阳极, 这种类型阳极的电阻公式, 只考虑长度 L 和宽度 b , 厚

度 (即高 h) 被认为是一常数而不予考虑。这种平装阳极的电阻公式有:

$$R = \frac{\rho}{\pi L} L_n \left\{ 2 \left[\left(1 + \frac{L^2}{b^2} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{L}{b} \right] \right\} \quad (14)$$

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left\{ L_n \left(\frac{L}{b} + \sqrt{1 + \frac{L^2}{b^2}} + 1 \right) + \frac{L}{b} L_n \left(\frac{b}{L} + \sqrt{1 + \frac{b^2}{L^2}} \right) + \frac{1 + b^3/L^3 - (1 + b^2/L^2)^{\frac{3}{2}}}{3b^2/L^2} \right\} \quad (15)$$

当 L/b 很大时, 方程 (15) 化简成为:

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left(L_n \frac{2L}{b} + \frac{1}{2} \right) \quad (16)$$

将现场测得数据与方程 (16) 的计算结果相比较, 验证分析表明, 括号中常数项改为单位 1 更符合实际。对于圆盘状薄板阳极的电阻用方程 (3), 即 McCoy 方程计算。

在图 5 中, 对计算薄板阳极的电阻方程式 (包括方程 (14), 方程 (15), McCoy 和 Lloyd 方程) 进行了比较, 可以看出, 当 $L/b < 3$ 时, 4 个方程的结果都非常一致, 当 $L/b > 2$ 时, 方程 (14) 和 Lloyd 方程的结果几乎相等。所以, 虽然 Lloyd 方程很简单, 但当 $L/b < 3$ 时,

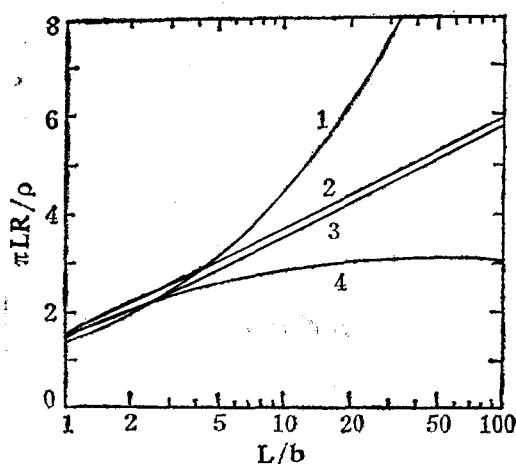


图5 薄板阳极电阻方程比较

1. McCoy 方程; 2. 方程 (14);
3. 方程 (15); 4. Lloyd 方程

其结果是很精确的。

三、讨 论

1. 阳极的接水电阻在阴极保护系统的设计中是一个很重要的设计参数。上面所提到的方程式在其推导过程中各自都有自己的限定条件,而在实际的阴极保护中,这些条件和实际状况并不完全相符,都有一定程度的变化。因此需要验证有关公式在不同条件下的符合程度,要找出适合各特定条件下最好的阳极电阻公式。

2. 阳极接水电阻公式,由于阳极形状和安装方式不同,致使种类繁多,应用起来很不方便。Jerrycochran (1985) 提出了一个方程,试图将方程(1)和(2)结合起来。作者认为,这是一个方向,如果有人能将阳极接水电阻公式统一为一个方程式,无疑将受到海洋工程防腐工作者的极大欢迎。

主要参考文献

- [1] A. H. Hanson 1979. Corrosion Control of Offshore Pipelines 1. Final Report NTNF-Project, 1830.5585, NSFL, Sandefjord.
- [2] Lloyd's Register of Shipping, Lon-

- don, 1966. Guidance Notes on Application of Cathodic protection Where Reduced Scantlings Are to Be Applied.
- [3] Smythe, W. R. and C. Yeh, 1972. Static Field Formulas. American Institute of Physics Handbook, 3rd ed., D. E. Gray, Ed., Section 5b, McGraw-Hill, New York.
- [4] Svein Eliassen and Odd Steensland. 1977. Cathodic Protection Criteria for the North Sea. Offshore Technology Conference, Paper No. OTC 3022, Presented at the 9th annual OTC, Houston, May 2-5.
- [5] Eliassen, S. and G. Valland. 1978. Design Rules for Offshore Cathodic Protection Systems. Paper Presented at the Three-Day Conference on North Sea Corrosion, European Federation of Corrosion Event No. 97.
- [6] Jensen, F. and. Thome, O. et al., 1978. Corrosion and Protection of Offshore Steel Structure. Final Report, NTNF-Project B.0930.5116.
- [7] Kemal Nisancioglu, 1984. An Analysis of Resistance Formulas for Sacrificial Anodes, *Materials Performance* 23(12):36-44.
- [8] John H. Morgan, 1959. Cathodic Protection, Leonard Hill Ltd., London.