

罐底外侧深井阳极阴极保护电位分布规律研究

杜艳霞*, 张国忠, 刘刚

(中国石油大学储建学院, 山东 东营 257061)

摘要: 依据电磁场基本定律和罐底阴极保护系统的几何特征推导深井阳极电场在罐底外侧的电位分布. 根据电场叠加原理, 综合考虑阳极电场和阴极电场的作用, 研究了单侧深井阳极保护下罐底外侧的阴极保护电位分布, 并将计算结果与实测数据作对比, 吻合较好.

关键词: 阴极保护; 罐底; 深井阳极; 阳极电场; 电位分布

中图分类号: TG 174

文献标识码: A

深井阳极具有占地少, 接地电阻小而稳定, 使用寿命长, 有利于克服屏蔽等优点而成为大型储罐广泛采用的阴极保护方式. 在以深井阳极对金属储罐外侧作阴极保护时, 保护电位的分布是衡量罐底保护效果的重要指标. 由于罐中心电位测量困难, 因此发展罐底阴极保护电位分布理论, 特别是根据罐底保护参数及罐外电位的测量数据来估算罐底特别是罐中心的保护电位具有重要的实际意义. 由于阳极电场对电位分布影响的复杂性, 现有的解析方法多停留在只考虑在阴极电场影响下的罐底电位分布^[1-4]. 然而罐底外侧的阴极保护电位分布实际上取决于阳极电场和阴极电场的共同作用^[1], 忽略阳极电场的影响势必影响计算的准确性. 本文应用电磁场的基本原理和罐底阴极保护系统的几何特征推导了深井阳极电场电位分布的简化公式, 并与由镜像法得到的方程作出对比, 进而研究在阳极电场影响下的罐底阴极保护电位分布.

1 深井阳极电场在罐底产生的电位分布

1.1 单侧深井阳极在罐底的电位分布

当以深井阳极对储罐作阴极保护时, 阳极井内通常竖直放入多组立式阳极, 并于各组阳极间隙填充焦炭或降阻剂, 以形成连续的阳极地床. 为简化计算, 将该阳极地床看作是一支连续的立式阳极.

图 1 是深井阳极阴极保护系统的简化示意. 如

图, 阳极顶端距地面的距离为 h , 阳极长度为 $2l$, 大罐半径为 r . 阳极中心以 O 表示, 电流流入阳极后, 沿辐射线流向无限远处, 阳极的输出电流以 I 表示. 流向无穷远处的电流在土壤介质中产生了阳极电场, 可以近似看作该阳极电场是以阳极为中心的对称分布. 基本假设如下: () 阴极保护体系处于稳定状态; () 罐底环境介质均匀, 土壤电阻率各处相同; () 罐底各处表面状况相同.

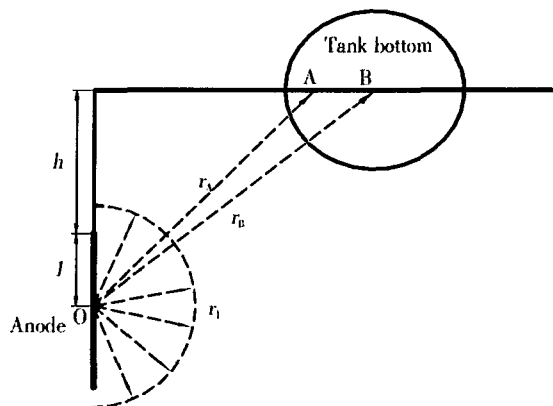


图 1 单侧深井阳极阴极保护系统简化示意

Fig 1 Reduced sketch map of the one-side deep well anode with cathodic protection system

图 1 中,与 O 点相距为 r_1 的半球面上,电流密度 j 为:

$$j = \frac{I}{2 r_1^2} \quad (1)$$

再设定处于稳定状态的阴极保护系统电场是恒定电流场,满足微分欧姆定律:

$$E = j = \frac{I}{2 r_1^2} \quad (2)$$

式中: E 为导体中某点的电场强度; ρ 为导体的电阻率。

按图 1, A, B 两点之间的电位差为:

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_A - U_B = \int_A^B E dr = \int_A^B \frac{I}{2 r^2} dr \\ &= \frac{I}{2} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

罐底上任一点 P 与罐底中心 C 之间的阳极电位差有:

$$U_{PC} = \frac{I}{2} \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_c} \right) \quad (4)$$

式中 r_p, r_c 分别表示 P 点、C 点与阳极中心 O 的距离,如图 2 所示。

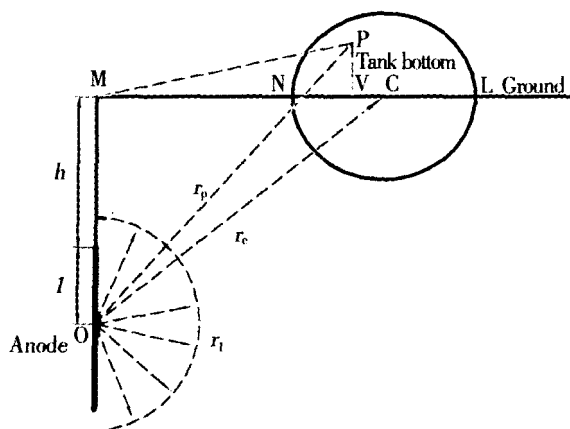


图 2 单侧深井阳极阴极保护系统几何示意

Fig 2 Geometric sketch map of the one-side deep well anode with cathodic protection system

图 2 中, N 表示罐底近阳极点, L 为罐底远阳极点, MN 表示罐底近阳极点距阳极的水平距离, PV 表示 P 点距罐底直径 NL 的垂直距离, MV 表示 P 点距阳极的水平距离。若取 P 点 (待求点) 距连接近阳极点和远阳极点直径的距离 |PV| 为 y , 距阳极的水平距离 |MV| 为 x , 罐底近阳极点距阳极的水平距离 |MN| 为 a , 罐的半径 |NC| 或 |LC| 为 r , 则

据图 2 所示几何特征分别有:

$$\begin{aligned} r_p &= |OP| = \sqrt{|OM|^2 + |PM|^2} \\ &= \sqrt{|OM|^2 + |PV|^2 + |MV|^2} \\ &= \sqrt{(h+l)^2 + y^2 + x^2} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} r_c &= |OC| = \sqrt{|OM|^2 + |MC|^2} \\ &= \sqrt{(h+l)^2 + (a+r)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, h 为阳极顶端距地面的距离, l 是阳极长度的一半。

将式 (5)、式 (6) 代入式 (4), 即可得到罐底上任一点与罐底中心之间的阳极电位差:

$$U_a = \frac{I}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{(h+l)^2 + y^2 + x^2}} - \frac{1}{\sqrt{(h+l)^2 + (a+r)^2}} \right) \quad (7)$$

此处, U_a 为罐底上任一点与罐底中心之间的阳极电位差; ρ 为导体, 即相当于土壤的电阻率。

1.2 与镜像法理论比较

目前, 研究者大多应用由镜像法推导而得出的埋地立式棒阳极在地表的电位表达式^[1-2]:

$$U_{a(x)} = \frac{I}{4 l} \ln \frac{(h+2l) + \sqrt{x^2 + (h+2l)^2}}{h + \sqrt{h^2 + x^2}} \quad (8)$$

据式 (8), 则罐底上任一点与罐底中心之间的阳极电位差为:

$$\begin{aligned} U_a &= \frac{I}{4 l} \left(\ln \frac{(h+2l) + \sqrt{x^2 + (h+2l)^2}}{h + \sqrt{h^2 + x^2}} \right. \\ &\quad \left. - \ln \frac{(h+2l) + \sqrt{(a+r)^2 + (h+2l)^2}}{h + \sqrt{h^2 + (a+r)^2}} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

以上各参数意义同前。

显然, 形式上式 (9) 比式 (7) 复杂。下面分别应用这两个公式对同一个实例作对比计算。取一个 50 000 m³ 立式储罐, 半径 $r = 30$ m, 距罐 40 m 处设一深井阳极, 其长 26 m, 埋深 50 m, 阳极输出电流为 12 A, 土壤电阻率取 1 200 $\Omega \cdot \text{cm}$, 大意如图 3 所示。图中 i 表示阳极延线与地面的交点, AB 表示水平轴线, CD 表示垂直轴线, O 为罐底中心, A、A1、A2、B1、B2、B 为水平轴线 AB 上均匀分布的点, C、C1、C2、D1、D2、D 为垂直轴线 CD 上均匀分布的点。

表 1 列出由式 (9) 和式 (7) 计算的水平轴线 AB 和垂直轴线 CD 上各点与罐底中心之间的阳极

表 1 由式 (9)和式 (7)计算的水平轴线 AB 和垂直轴线 CD 上的点与罐底中心之间的阳极电位差
Tab 1 Anodic potential differences between the points on horizontal axis AB and vertical axis CD and the center of tank bottom calculated from formula (9) and (7)

Axis	Points	U_{a1}/V	U_{a2}/V	Calculating divergence between two formulas
		from formula (9)	from formula (7)	
AB	A	0.06526	0.06375	0.0015
	A1	0.04236	0.04159	0.0008
	A2	0.02037	0.02007	0.0003
	B1	-0.01846	-0.01829	-0.0002
	B2	-0.03501	-0.03474	-0.0003
	B	-0.04976	-0.04945	-0.0003
CD	C	0	-0.01148	0.0115
	C1	0	-0.00531	0.0053
	C2	0	-0.00136	0.0014
	D2	0	-0.00136	0.0014
	D1	0	-0.00531	0.0053
	D	0	-0.01148	0.0115

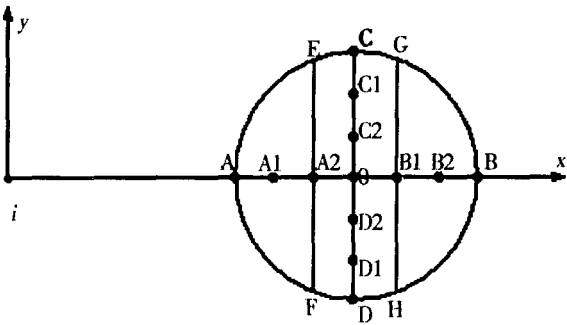


图 3 深井阳极阴极保护的罐底平面示意
Fig 3 Plan graph of the tank bottom under protection of deep well anode

电位差。

如表,对同一水平轴线 (AB) 其上各点与罐中心之间的阳极电位差,由以上两公式计算的结果都是很相近的,但对处在垂直轴线 (CD) 上的各点,则从式 (9) 计算的阳极电位差一概为 0,这是因为式 (9) 仅适用于二维情形,只要阳极的埋深、长度、输出电流、土壤电阻率、与罐距离、罐半径等参数一定时,罐底上任一点与罐底中心之间的阳极电位差就仅取决于该点距阳极的水平距离 x ,故在同一垂直轴线上 (如图 3 中的 EF、CD、GH) 上,各处的阳极电位差都是相等的。而对实际的阴极保护系统,其阳极距垂直轴线上各点的距离都是不同的,即如图 3 中的 CD,其上 O 点与阳极的距离最近,越靠近罐边缘与阳极的距离越远,因此从罐中心沿半径方向移至罐边缘,其阳极电位差应该是逐渐增大的。

从以上比较可以看到,式 (7) 形式简单,其于水平轴线上各点的计算结果皆与式 (9) 基本相等,并且还考虑了垂直轴线上阳极电位的变化,与实际情况更加符合,选取不同的算例都可以得到与表 1 相似的结论。因此可认为这是目前计算深井阳极于罐底产生的阳极电位分布之最佳选择。

2 罐底的阴极保护电位分布

2.1 阳极电场的影响

地面金属储罐底板阴极保护技术的关键之一是判断罐底,特别是罐底中心的保护电位效果。由于在罐底中心安装参比电极比较困难,多数情况都是把它放置在罐周围,并根据罐周边的电位来估算罐中心的电位,因此研究罐底的电位分布 (罐底上某点与罐中心之间的电位差) 对正确评价罐底的保护效果具有重要的意义。本文进一步结合前面的结果将式 (7) 进一步应用于罐底阴极保护电位的分布。

文献 [1] 利用稳流电场理论研究了罐底外侧的阴极保护电位分布,发现罐底外侧的阴极保护电位分布主要取决于地电场 (可分解为阳极电场和阴极电场),其表达式为:

$$= - (U_a + U_c) \tag{10}$$

式中: U_c , 罐底外侧的阴极保护电位分布; U_a , 罐底的阳极电场电位分布; U_c , 罐底的阴极电场电位分布。

若只考虑阴极电场的影响,则罐底的电位分布可表示如下:

表 2 由式 (12)计算的阴极保护电位差与测量值对照表

Tab 2 Comparison of the cathodic protection potential differences calculated from formula (12) and measured data

Compared item	Measured value/V	Calculated value/mV	Relative error/%
C-Z	- 0.55	- 550.03	0.00
D-Z	- 0.47	- 465.04	1.05
B-Z	- 0.51	- 465.04	8.82
E-Z	- 0.45	- 367.97	18.23
A-Z	- 0.40	- 367.97	8.01
F-Z	- 0.43	- 320.35	25.50
H-Z	- 0.31	- 320.35	3.34
G-Z	- 0.29	- 306.92	5.84

$$= - U_c = - \frac{i_s r}{6(2+k)} (6 + k^3) \quad (11)$$

此处, i_s 罐底的平均电流密度; r 罐底介质的电阻率; r 罐底半径; k 反映罐底电流密度不均匀性的常数, 一般取 30; l 距罐底中心的比例距离 (待求点距罐底中心的距离与罐底半径的比值)。

将式 (7)、式 (10) 和式 (11) 三式联立即得单支立式棒阳极阴极保护罐底的电位分布公式:

$$= - \left[\frac{I}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{(h+l)^2 + y^2 + x^2}} - \frac{1}{\sqrt{(h+l)^2 + (a+r)^2}} \right) + \frac{i_s r}{6(2+k)} (6 + k^3) \right] \quad (12)$$

式中各参数意义同前。

2.2 理论计算与实测结果比较

参照文献 [5] 提供的一组测量数据, 碳钢制地面储罐, 直径为 33.5 m, 靠罐边设一个深井阳极, 保护电流为 2.00 A。沿罐底圆周等距安排 8 个电位测量点, 依次为: A、B、C、D、E、F、G、H, 对应电位分别为: -1.04、-1.15、-1.19、-1.11、-1.09、-1.07、-0.93、-0.95 V, 在罐中心安排一个测量点 Z, 对应电位为 -0.64 V。可以判断, 罐底的近阳极点位于 C 点, 远阳极点位于 G 点, 今按式 (12) 计算, 结果如表 2 所列。

由表 2 可见, 除 F、E 点的计算误差较大外, 其余点计算值和实测值误差均在 10% 以内。原因即式 (12) 推导时并未考虑罐底介质及罐底表面状况的不均匀性等因素, 但只要误差在允许的范围内, 该式仍然可以对实际的设计和生 产发挥重要的指导作用。

3 结 论

1) 根据电磁场基本定律和罐底阴极保护系统的几何特征推导出单侧深井阳极在罐底的阳极电位分布公式 (式 7), 形式简单, 与二维情况下的计算结果相近, 而且还可用于三维情况, 因此具有更高的使用价值。

2) 综合考虑阴极电场和阳极电场对罐底电位分布的影响, 进一步得出: 在考虑阳极电场影响情况下罐底外侧的阴极保护电位分布公式 (式 12), 其计算结果和实测数据吻合较好, 可用于指导实际的设计和生 产。

参考文献 (References):

- [1] Li Xiangyi (李相怡), Weng Yongji (翁永基). Calculating potential distribution on exterior of tank bottoms by analytical algorithm [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19 (3): 98 ~ 114.
- [2] Li Xiangyi (李相怡), Weng Yongji (翁永基). Research and application of potential distribution modeling in cathodic protection [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1998, 10 (2): 63 ~ 69.
- [3] Weng Yongji (翁永基), Li Xiangyi (李相怡). Judgment of cathodic protection effectiveness on tank bottom by potential distribution modeling [J]. OGST, 1998, 17 (1): 35 ~ 40.
- [4] Weng Yongji (翁永基). The research and application of mathematical modeling in cathodic protection design techniques [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1999, 11 (2): 99 ~ 111.
- [5] Garrity K C, Urbas M. Cathodic protection of external tank bottoms [J]. Materials Performance, 1988, 27 (4): 32 ~ 35.

Potential Distributions on External Tank Bottom under Cathodic Protection of Deep Well Anode

DU Yan-xia^{*}, ZHANG Guo-zhong, LIU Gang

(Transport-Storage and Civil Engineering College, China University of Petroleum,
Dongying 257061, Shandong, China)

Abstract: Potential distributions of deep well anodic electric field on external tank bottom were derived according to the basic law of electromagnetic field and the geometry characteristics of cathodic protection system. Making use of electric field superposition principle, considering the action of anodic and cathodic electric fields, the potential distributions on external tank bottom under the protection of deep well anode were studied. The calculated results were compared and agreed well with the measured data.

Key words: Cathodic protection, Tank bottom, Deep well anode, Anodic electric field, Potential distribution