

# 储罐底板阴极保护电位分布规律探讨

马伟平<sup>1</sup>, 张国忠<sup>1</sup>, 梁昌华<sup>2</sup>, 张大鹏<sup>2</sup>, 李柏丹<sup>3</sup>, 安振山<sup>4</sup>

- (1. 石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061;
- 2. 中石化管道储运公司东营输油首站, 山东 东营 257067;
- 3. 大庆油田通信公司研究设计所, 黑龙江 大庆 163453;
- 4. 秦京输油气分公司, 河北 秦皇岛 066600)

**摘要:** 建立了储罐底板阴极保护体系数学模型, 使用一种典型电流密度分布假设求解保护电位, 模拟了两种深井阳极对储罐底板阴极保护体系, 将数值计算结果与解析公式、实测数据进行对比, 得出结论: 大部分数据点吻合较好, 远阳极端误差较大, 主要是由于选择的阴极保护电位准则范围不同和辅助阳极极化电位动态变化造成的; 深井阳极布置是影响保护电位分布的主要原因; 使用双阳极可以有效地改善储罐底板保护电位分布; 储罐底板保护电位差最大值在水平轴线上取得, 对于单罐和单支深井阳极, 保护电位最小值并不在罐中心处, 而是位于中心轴线上某点。使用储罐底板阴极保护电位分布规律可以研究多罐和多支深井阳极的情形, 为准确计算罐底板电位差提供依据。

**关键词:** 数学模型; 阴极保护; 辅助阳极; 保护电位; 准则; 极化  
**中图分类号:** O242.1; TE357.3      **文献标识码:** A

## 0 前言

储罐底板阴极保护电位分布规律研究是区域性阴极保护技术的核心问题, 对于已建大型储罐, 底板保护电位存在较大差异; 由于缺乏有效测量手段, 罐中心电位常通过罐边缘电位估算; 罐边缘和中心电位差尚无理论公式计算; 国内外学术界对已建大型储罐底板中心保护效果的判定也没有统一的标准, 因此准确计算储罐底板阴极保护电位并正确评价储罐阴极保护效果成为研究的焦点。

使用数值方法研究阴极保护体系的电位和电流分布是阴极保护技术的发展方向, 本文根据一种典型电流密度分布假设求解保护电位, 与解析公式计算结果进行了对比; 模拟了一个实际深井阳极储罐底板阴极保护体系, 将计算结果和实测数据进行了对比, 最后探讨了深井阳极储罐底板阴极保护电位的分布规律。

## 1 数学模型

稳态分布型阴极保护体系电位分布满足 Laplace 方程<sup>[1,2]</sup>

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (1)$$

$$S_1: \Phi = \Phi_0 \text{ (第一类边界)}$$

$$S_2: \frac{\partial \Phi}{\partial n} = -\frac{1}{\sigma} f(\Phi) \text{ (第二类边界)}$$

式中  $S_1$ ——辅助阳极;

$S_2$ ——被保护金属表面;

$\sigma$ ——区域内介质电导率;

$f(\Phi)$ ——被保护金属表面极化电流密度。

## 2 边界条件

### 2.1 辅助阳极

本文根据文献<sup>[3]</sup>提供的方法近似计算辅助阳

收稿日期: 2003-09-09; 修回日期: 2003-10-29

作者简介: 马伟平(1979-), 男, 山东省邹城市人, 在读硕士生, 研究方向: 油气长距离管道输送。电话: 13722619639。

极极化电位: a) 根据选择的平均电流密度和储罐面积试算所需的保护电流  $I_0$ ; b) 计算储罐底板接地电阻; c) 计算阳极电缆电阻  $R_w$ ; d) 计算阳极接地电阻  $R$ ; e) 计算回路总电阻; f) 计算理论恒电位仪输出电压  $U'$ ; g) 根据恒电位仪的型号和  $U'$  的大小选择实际恒电位仪输出电压  $U$ , 利用欧姆定律得到阳极电位近似值。

$$\Phi_{\text{阳极}} = U - I_0(R + R_w) - \xi \quad (2)$$

式中  $\xi$ ——焦炭回填料的反电动势 2V。

### 2.2 计算区域边缘

距离阳极较远时, 电位变化很小(等于金属在土壤中的自然电位, 受阳极影响很小), 计算区域边缘电位梯度等于零。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

### 2.3 储罐

文献<sup>[4]</sup>根据静电学原理推导圆盘电流密度公式:

$$i = \frac{I}{2\pi r \sqrt{r^2 - a^2}} \quad (4)$$

式中  $i$ ——圆盘导体距圆心  $a$  点的电流密度, mA/m<sup>2</sup>;  
 $a$ ——该点距圆中心的距离, m;  
 $r$ ——圆盘半径, m;  
 $I$ ——圆盘总电流, A。

## 3 阴极保护电位解析计算公式

文献<sup>[5]</sup>根据静电场叠加原理推导出储罐底板保护电位表达式:

$$\Phi = U_m - (U_a + U_c) \quad (5)$$

式中  $U_m$ ——设备电位;  
 $U_a$ ——阳极电位;  
 $U_c$ ——阴极电位。

其中  $U_m$  数量级为微伏, 忽略不计。

根据镜像法得到埋地立式阳极电场中任意点  $P$  的电位表达式:

$$U_a(x) = \ln \left[ \frac{h + L + \sqrt{x^2 + (h + L)^2}}{h + \sqrt{x^2 + h^2}} \right] \times \frac{I\rho}{2\pi L} \quad (6)$$

式中  $L$ ——阳极长度, m;  
 $h$ ——阳极顶部距地面深度, m;  
 $I$ ——阳极输出电流, A;  
 $x$ —— $P$  点到阳极中心的水平距离, m;  
 $\rho$ ——土壤电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ 。

储罐底板阴极电场电位简化公式:

$$U_c(y) = U_c(O) + \frac{i_s \rho r}{6(2+k)} (6y + ky^3) \quad (7)$$

式中  $U_c(O)$ ——罐底中心阴极电位;  
 $i_s$ ——罐底平均电流密度, mA/m<sup>2</sup>;  
 $k$ ——反映罐底电流密度不均匀性经验常数。

## 4 实例计算

### 4.1 假设条件

假设: a) 计算区域分成土壤介质和沥青砂基础两部分, 在单独的区域中是均匀各向同性的; b) 金属结构表面状态不发生变化, 保护电位不随时间发生变化; c) 不考虑杂散电流影响; d) 辅助阳极表面是等电位面, 不考虑阳极表面电位随电流密度的非线性变化造成的阳极极化。

### 4.2 计算参数

土壤电阻率: 5  $\Omega \cdot \text{m}$ ; 储罐沥青砂基础电阻率: 200  $\Omega \cdot \text{m}$ 。土壤和金属材料参数见表 1 和表 2。

表 1 土壤参数

物质	密度 / kg·m <sup>-3</sup>
土壤	1 500
储罐基础(沥青砂石)	2 200

表 2 金属材料参数

物质	材料	密度 / kg·m <sup>-3</sup>	电导率 / ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) <sup>-1</sup>
储罐	碳钢	7 830	2.25 × 10 <sup>6</sup>
阳极	高硅铸铁	7 270	1.15 × 10 <sup>7</sup>

### 4.3 阴极保护参数

金属自然腐蚀电位: -0.55 V; 最低阴极保护电位: -0.85 V; 最高阴极保护电位: -1.2 V; 储罐底板平均电流密度: 6 mA/m<sup>2</sup>。

### 4.4 几何模型

储罐(MN)和单支深井阳极(B), 计算区域长

100 m, 宽 100 m, 高 100 m, 储罐直径 40 m, 底板厚度 12 mm, 深井阳极 YJB<sub>3</sub>SiCr DN75×1 000 (15 组), 阳极距储罐 30 m, 埋深 40 m, 见图 1, 在储罐底板选取特殊点, 小圆直径为大圆直径一半, 相邻直线夹角 45°, 见图 2。

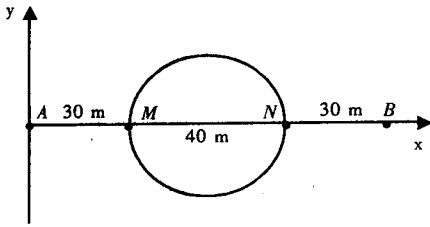


图 1 单罐和单支深井阳极示意图

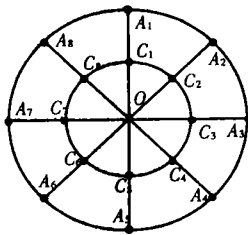


图 2 储罐底板特殊点分布图

### 5 与解析公式的结果对比

由于式(7)中  $U_c(O)$  是隐式的, 为了验证数值计算结果的可靠性, 考察特殊点与罐中心  $O$  的电位差, 见表 3, 用解析计算公式可以表示为:

$$\Delta\Phi = U_a(x) - U_a(O) + U_c(y) - U_c(O) \tag{8}$$

表 3 数值方法和解析公式计算结果对比

特殊点	数值方法 /V	解析公式 /V	相对误差 / (%)	特殊点	数值方法 /V	解析公式 /V	相对误差 / (%)
A <sub>1</sub>	0.122	0.113	8.44	C <sub>1</sub>	0.053	0.056	5.78
A <sub>2</sub>	0.139	0.141	1.66	C <sub>2</sub>	0.066	0.070	6.03
A <sub>3</sub>	0.160	0.154	3.94	C <sub>3</sub>	0.071	0.076	6.96
A <sub>4</sub>	0.139	0.141	1.66	C <sub>4</sub>	0.066	0.070	6.03
A <sub>5</sub>	0.128	0.113	13.78	C <sub>5</sub>	0.053	0.056	5.78
A <sub>6</sub>	0.106	0.088	20.49	C <sub>6</sub>	0.041	0.043	5.51
A <sub>7</sub>	0.097	0.079	22.50	C <sub>7</sub>	0.036	0.038	6.28
A <sub>8</sub>	0.106	0.088	20.49	C <sub>8</sub>	0.041	0.043	5.51

大部分特殊点电位与解析计算公式结果相差不大, 相对误差不超过 10%, 其中远阳极端特殊点 (A<sub>5</sub>, A<sub>6</sub>, A<sub>7</sub>, A<sub>8</sub>) 电位结果相差较大。

### 6 现场数据验证

为了进一步验证数值计算的可靠性, 对一个具体的阴极保护体系进行数值模拟<sup>[6]</sup>, 储罐直径 40 m, 两侧安装 9 支 DN75×1 500 mm 的高硅铸铁阳极, 5 号阳极井深 28 m, 7 号阳极井深 32 m, 见图 3。

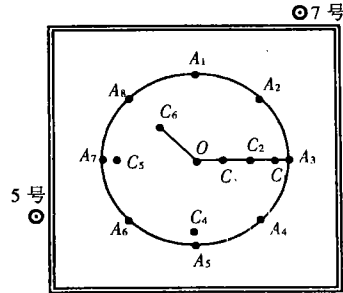


图 3 储罐示意图

⊙深井阳极 ⊙测试点

由于储罐和深井阳极的位置是固定的, 数值计算过程中, 调整恒电位仪的输出电压 (即改变辅助阳极的极化电位), 使储罐底板各处的保护电位处于规定范围内 (-0.85 ~ -1.2 V), 并使罐边缘和中心电位差尽可能小, 与实测数据对比结果见表 4。

表 4 数值方法和实测数据结果对比

特殊点	数值方法 /-V	实测数据 /-V	相对误差 / (%)	特殊点	数值方法 /-V	实测数据 /-V	相对误差 / (%)
A <sub>1</sub>	1.110	1.02	8.82	C <sub>1</sub>	1.045	1.11	5.86
A <sub>2</sub>	1.112	1.06	4.91	C <sub>2</sub>	1.032	1.07	3.55
A <sub>3</sub>	1.101	1.15	4.26	C <sub>3</sub>	1.029	0.97	6.08
A <sub>4</sub>	1.097	1.03	6.51	C <sub>4</sub>	1.080	1.1	1.82
A <sub>5</sub>	1.108	1.27	12.76	C <sub>5</sub>	1.053	1.13	6.81
A <sub>6</sub>	1.112	1.31	15.12	C <sub>6</sub>	1.034	1.12	7.68
A <sub>7</sub>	1.107	1.33	16.77	O	1.04	1.032	0.77
A <sub>8</sub>	1.103	1.15	4.09				

大部分特殊点电位与实测数据相差不大, 相对误差不超过 10%, 其中远阳极端特殊点 (A<sub>5</sub>, A<sub>6</sub>, A<sub>7</sub>) 电位结果相差较大, 主要是两方面原因造成的:

a) 本文和工程实际阴极保护电位准则范围不同, 一些情况下工程实际最大阴极保护电位允许达到 -1.5 V, 而本文阴极保护电位范围是 -0.85 ~ -1.2 V。

b) 工程实践中根据土壤参数变化 (主要是降雨

和地下水造成土壤电阻率减小)和给定电压调整恒电位仪输出电压使阴极保护体系处于规定电位范围之内, 辅助阳极极化电位是动态变化的, 而本文是根据阴极保护系统参数近似计算辅助阳极极化电位(常数)。

综上所述, 对比结果验证了数值方法的可靠性。

## 7 电位分布规律探讨

根据文中的两种阴极保护模型(储罐和单支深井阳极、储罐和对称放置两支深井阳极), 研究储罐底板水平轴线  $A_3A_7$ 、垂直轴线  $A_1A_5$  和斜对角线  $A_2A_6(A_4A_8)$  的保护电位分布对比结果, 见图 4 ~ 6, 得出结论:

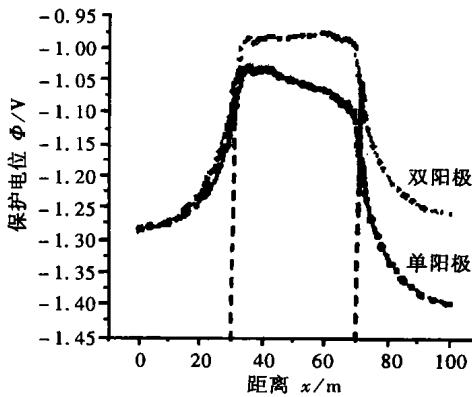


图 4 水平轴线  $A_3A_7$  保护电位分布

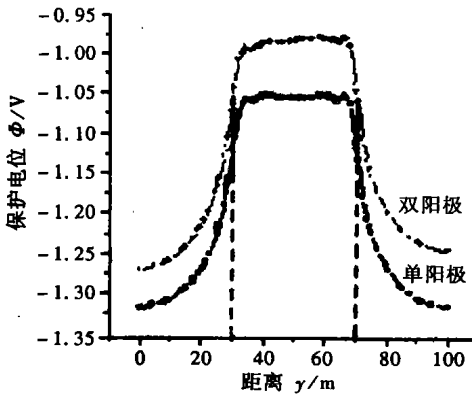


图 5 垂直轴线  $A_1A_5$  保护电位分布

a) 深井阳极布置是影响保护电位分布的主要原因, 距离阳极越近, 电位越低, 反之电位越高; 单阳极斜对角线  $A_2A_6, A_4A_8$  电位分布相同, 双阳极斜对角线  $A_2A_6, A_4A_8$  电位分布不同, 但电位相差不大。

b) 使用双阳极可以有效地改善储罐底板保护电位分布, 电位不均匀性较小, 说明合理的阳极位置和埋深, 可以使大直径储罐处于较好的保护状态。

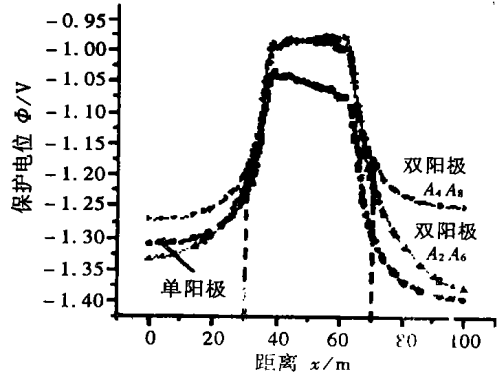


图 6 斜对角线  $A_2A_6(A_4A_8)$  保护电位分布

c) 罐底板保护电位差最大值在水平轴线上取得, 对于单罐和单支深井阳极, 保护电位最小值并不在罐中心处, 而是位于中心轴线的某点。

使用该方法可以研究多罐和多支深井阳极构成的区域性阴极保护体系的电位分布规律, 限于篇幅, 不再赘述。

### 参考文献:

- [1] 邱枫, 徐乃欣. 钢质储罐底板外侧阴极保护时的电位分布[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1996, 16(2): 29-35.
- [2] 翁永基. 阴极保护设计中的模型研究及其应用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1999, 11(2): 99-111.
- [3] 胡士信. 阴极保护工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999. 122-127.
- [4] 俞蓉蓉, 蔡志章. 地下金属管道的腐蚀与防护[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998. 223.
- [5] 李相怡, 翁永基. 金属储罐底板外侧阴极保护电位分布的解析算法[J]. 石油学报, 1998, 19(7): 98-103.
- [6] 孙建斌. 20 000 m<sup>3</sup> 金属储罐阴极保护试验及效果分析[J]. 油气储运, 2001, 20(1): 23-24.

## OIL & GAS TRANSPORTATION AND STORAGE

### Summary on Application of Sensitivity Analysis to Transportation and Storage Optimization Design

Zhou Hao, Wang Yuchun (Southwest Oil College, Chengdu, Sichuan, 610500, China) **NGO**, 2004, 22(4): 1-3

**ABSTRACT:** In sensitivity analysis of optimization design, mainly the effect of small changes from parameters and variables in optimization models is analyzed on the optimal solutions, which plays an important role in application of this technology to engineering practices. Described is the feasibility of application of this technology to optimization design of oil and gas transportation and storage. Introduced are development of the sensitivity analysis technology in optimization design, its basic theory and methods. Analyzed are the importance, wide prospects, direction and existing problems of application of this technology to optimization design of oil and gas transportation and storage engineering.

**KEY WORDS:** Sensitivity analysis; Optimization design; Design variable; Oil and gas pipeline

### Summary on Overall Evaluation Method of Multiple Options for Oil & Gas Pipeline Design

Wen Tao, Wang Yuchun (Southwest Oil College, Chengdu, Sichuan, 610500, China) **NGO**, 2004, 22(4): 4-7

**ABSTRACT:** The long distance oil & gas pipeline projects have such characteristics as high tech, large investments and high risk, so it is very important to make decision scientifically for the schemes. Since the 90's in 20th century, due to application of the fuzzy set theory, gray system and element analysis, a set of relatively complete overall evaluation methods of multiple options has formed gradually, which applies to oil & gas pipeline design. Summarized and expounded are all these existing methods.

**KEY WORDS:** Oil & gas pipeline design; Option; Fuzzy mathematics; Gray system; Evaluation

### Summary on Application of Neural Network Technology to Transportation and Storage Engineering

Duan Shanning, Wang Yuchun (Southwest Oil College, Chengdu, Sichuan, 610500, China) **NGO**, 2004, 22(4): 8-11

**ABSTRACT:** Artificial Neural Network is a rapidly developing algorithm in recent years and has been used in many domains. Described are application of multi-layer perceptron network, radial basis functional network and wavelet basis functional network to data analysis and identification in intelligent inspection of pipelines, application of feed forward neural network to decision and evaluation of integrated pipeline fiduciary level, application of natural gas consumption forecast based on adaptive feed forward forecast mode and adaptive functional link forecast mode, and application of Hopfield neural network to pipeline optimization design. It can be seen that Neural Network will certainly become an important technique for solving engineering problems in transportation and storage.

**KEY WORDS:** Neural Network; Oil & natural gas pipeline; Analysis and identification; Decision and evaluation; Forecast; Optimization design

### Study on Filtering Media of New Filter

Li Xi, Huang Dong, Guo Yi (China Petroleum Engineering Co., Ltd. Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610017, China) **NGO**, 2004, 22(4): 12-15

**ABSTRACT:** Described is the aim of study on filtering media of new filter. Compared are the advantages and disadvantages of these media through experiments at site. In these experiments 5 of media are chosen and performance test has been carried out. The dust concentration and classing efficiency of the media are obtained after passing filter tube. Analysis and comparison are made on the performance of these media.

**KEY WORDS:** Filter; Filtering; Filtering media; Filtering element

## CORROSION AND CORROSION PROTECTION

### Discussion on Potential Distribution Law of Cathodic Protection on Tank Bottom Plate

Ma Weiping, Zhang Guozhong (Huadong Oil University S&T and Construction Engineering College, Dongying, Shandong, 257061, China)

Liang Changhua, Zhang Dapeng (China Petrochemical Pipeline S&T Co. Dongying Initial Oil Transportation Station, Dongying, Shandong, 257067, China)

Li Baidan (Daqing Oil Field Com. Co. Institute, Daqing, Heilongjiang, 163453, China)

An Zhenshan (Qin-Jing Oil and Gas Transportation Branch Co., Qinhuangdao, Hebei, 066600, China) **NGO**, 2004, 22(4): 18-21

**ABSTRACT:** The mathematics model of tank bottom cathodic protection is established. Used is a representative hypothesis of current density distribution, simulated is the protective potential of 2 kind of deep well anode cathodic protection systems and the calculated results are compared with analytical formula and spot data. By this method, multiple tanks and multiple deep well anodes can be studied to accurately calculate the differences of the tank bottom protective potentials.

**KEY WORDS:** Mathematics model; Cathodic protection; Assistant anode; Protective potential; Rule; Polarization

### Application Comparison of External Protective Coating on Buried Steel Pipeline

Du Miao (Sichuan Tianchi Oil and Gas Engineering Construction Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610017, China)

Liang Bo, Wen Shihao, Li Jing (PetroChina Southwest Oil and Gas Field Branch, Chengdu, Sichuan, 610051, China) **NGO**, 2004, 22(4): 22-24

**ABSTRACT:** Application of external protective coating can prevent long-distance steel pipelines from corroding in their expected service life. Asphalt, coal tar enamel, fusion-bonded epoxy, polyethylene tape, 2-layer PE and 3-layer PE coatings may be used for corrosion control of underground pipelines. Material and structure of each coating are being improved to meet the requirements of application and compound coatings are popularly selected. Reasonable selection of coatings shall depend on reliability, construction techniques and costs.

**KEY WORDS:** Pipeline; Corrosion control; Asphalt; Epoxy; Polyethylene