

基于边界元法的站场区域阴极保护设计

崔 淦¹, 李自力¹, 卫 续², 白 雪¹

(1. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 2. 北京油气调控中心, 北京 100007)

摘要:站场埋地管网众多,干扰和屏蔽现象严重;庞大接地网的存在使阴极保护电流流失严重。针对这些问题,建立埋地管道阴极保护电位分布的数学模型,并采用边界元算法进行离散。设计实验,测试埋地管道阴极极化曲线,并采用分段线性法进行处理。采用基于边界元法的大型数值模拟软件 BEASY 对某一区域站场进行阴极保护设计,考虑了3种阴极保护方式:牺牲阳极阴极保护、外加电流阴极保护、牺牲阳极和外加电流联合阴极保护。研究表明:边界元算法是解决埋地管道阴极保护问题的有效工具。采用牺牲阳极和外加电流联合阴极保护可以有效地解决2个问题;采用牺牲阳极保护所需阳极数量太多,工程上难以实施;采用外加电流阴极保护使得整个埋地管网电位分布不均匀。

关键词:区域阴极保护;边界元;BEASY;牺牲阳极保护;外加电流阴极保护

中图分类号:TE 988 **文献标志码:**A

引用格式:崔淦,李自力,卫续,等. 基于边界元法的站场区域阴极保护设计[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2014,38(6):161-166.

CUI Gan, LI Zili, WEI Xu, et al. Cathodic protection design of station area based on boundary element method[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(6):161-166.

Cathodic protection design of station area based on boundary element method

CUI Gan¹, LI Zili¹, WEI Xu², BAI Xue¹

(1. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Oil and Gas Control Center in Beijing, Beijing 100007, China)

Abstract: In oil or gas stations there can be situations where many underground pipelines are present in reasonably close proximity. This can lead to serious interference and shielding phenomena, and there are many grounding networks that can cause substantial loss of the cathodic protection current. The mathematical model of the buried pipeline cathodic protection potential distribution was established and the boundary element method was used for discretization of the equations. Then experiment was designed, the buried pipeline cathodic polarization curve was tested, and the piecewise linear method was used for processing. The numerical simulation software based on boundary element method BEASY was used for the design of cathodic protection for a station. Three kinds of cathodic protection methods are considered, which are sacrificial anode cathodic protection, impressed current cathodic protection, and combination of sacrificial anode and impressed current joint cathodic protection. The results show that the boundary element method is an effective tool to solve the problems in buried pipeline cathodic protection. The combination of sacrificial anode and impressed current joint cathodic protection can solve two problems effectively. The number of anodes needed for sacrificial anode protection is great and this technology is difficult to implement in engineering practice. For impressed current cathodic protection, the distribution of the whole buried pipeline potential is not uniform.

Key words: regional cathodic protection; boundary element; BEASY; sacrificial anode protection; impressed current cathodic protection

作为防腐层的有效补充,阴极保护能够有效抑制或延缓埋地钢质建筑物的腐蚀,其重要性越来越受到重视^[1]。区域性阴极保护技术作为阴极保护的一个特例,主要对集中在某一区域内的多个埋地金属结构及在埋地管网较为密集的区域进行统一电化学保护^[2]。由于油气田站场内各种被保护体众多,结构复杂,干扰屏蔽现象严重,加之与庞大的接地网相连,阴极保护电流大量流失^[3],因此如何依据保护区域的实际情况,采用合理的设计、施工技术,获得保护电流的均匀分布,同时避免或限制其干扰和屏蔽的影响成为阴极保护设计的难点。目前区域阴极保护技术在国内尚不成熟,通常是设计单位根据现场资料先设计主回路部分,在其施工完成后进行全站调试,然后根据调试结果再进行下一部分的设计和施工^[4]。对国家某重点工程部分站场的防腐状况进行调查发现^[5],仅靠涂层无法满足埋地管道的防腐要求。BEASYCP 是基于边界元开发的主要应用于阴极保护的大型商业化软件,在国内得到一定的应用^[6-8]。笔者针对区域阴极保护设计的难点及边施工边调试的现状,利用 BEASY 对某一区域站场进行阴极保护设计,为现场区域阴极保护的设计和实施提供指导。

1 数学模型

1.1 控制方程

为了简化计算,作如下假设:在控制域中土壤是均一的并且是电均匀的;在土壤介质中无浓度梯度。基于假设,欧姆定律是适用的。电流密度 J 可表述为

$$J = \sigma_e E. \tag{1}$$

式中, σ_e 为土壤电导率, S/m; J 为电流密度, mA/m²; E 为电位, V/m。

于是可以得到静态形式的连续性方程:

$$\nabla J = \nabla (\sigma_e E) = 0. \tag{2}$$

在静态条件下,电位可由等价方程表示为

$$\nabla \phi = E. \tag{3}$$

最终可得埋地管道电位分布的控制方程(拉普拉斯方程):

$$\Delta \phi = 0. \tag{4}$$

1.2 边界条件

1.2.1 阳极边界

考虑阳极输出电流恒定或电位恒定。

$$I = \frac{\partial \phi}{\partial n} = \text{const}. \tag{5}$$

或

$$\phi = \text{const}. \tag{6}$$

式中, I 为阳极输出电流。

1.2.2 绝缘边界

由于空气的电阻率趋于无限大,外加阳极电流不能通过土壤介质流入空气介质,只能沿着地表流动,故可以把地面当作绝缘面处理,通过该表面的法向电流密度为零。

$$i \Big|_{\Gamma} = -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0. \tag{7}$$

在无穷远处认为边界 Γ_∞ 上的电位为零,法向电流密度也为零。

$$\begin{cases} \phi \Big|_{\Gamma_\infty} = 0, \\ i \Big|_{\Gamma_\infty} = -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0. \end{cases} \tag{8}$$

1.2.3 阴极边界

在阴极边界上发生一系列复杂的电化学反应,而极化特性是这些反应的表征。极化数据被用来作为阴极边界条件解决相应数学模型。

为了得到极化特性,进行相应的极化实验。采用金属与土壤构造三电极体系进行极化曲线测试。辅助电极是矩形铂电极,参比电极是饱和甘汞电极。工作电极采用立方体试片,材质为 Q235。工作电极采用环氧树脂涂封,仅露出 1 cm² 的面积与土壤接触。在实验开始前,工作电极经过 600# ~ 1 200# 砂纸逐级打磨,蒸馏水清洗,丙酮除油,无水乙醇除水,最后在冷空气中风干。电化学实验测试采用 Parstat2273 型电化学工作站,扫描范围为 -600 ~ -1 200 mV,扫描速率为 0.3 mV/s。

在后期 BEASY 软件模拟过程中,由于阴极极化曲线是一条非线性的曲线,须将阴极极化曲线分段线性化^[9]。测试的以及经分段线性化后的极化曲线如图 1 所示。需要说明的是,利用 BEASY 模拟得

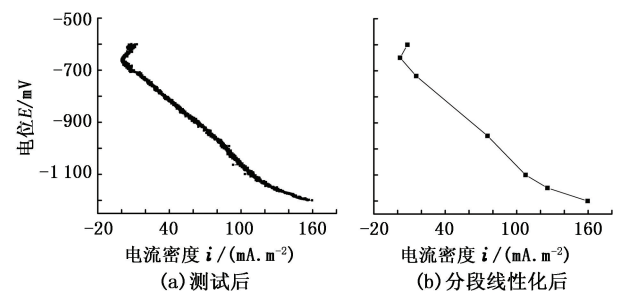


图 1 极化曲线测试结果

Fig. 1 Polarization curve test results

出的电位值是以 CSE 为参比电极,因此,在将分段线性化后的极化曲线导入 BEASY 之前应进行相应

的换算。

2 边界元法求解

2.1 模型离散

采用管单元法对管道进行离散,离散结果如图 2 所示。其优点是节点与单元数大为减少,模型的计算量大幅下降。

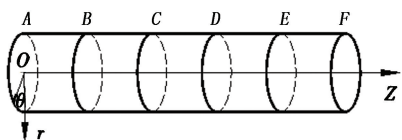


图 2 管表面离散

Fig. 2 Division of pipeline surface

采用管单元法的前提条件^[10]是:(1)被保护体的几何形状适宜进行柱面单元分割;(2)同一柱面单元截面线上的电位可视为基本相同。

2.2 计算方法

已知边界积分方程的基本解^[11]是 $\frac{1}{4\pi r}$, r 为节点到源点的距离。因此,当边界节点与源点重合时,积分会产生奇异性,要单独处理。

2.2.1 非奇异系数计算

用管单元离散边界,应用标准的 BEM 公式通过积分变化得到各单元的系数矩阵^[12]:

$$G_{i,jm}(t) = 4 \frac{RL}{4\pi} |J| \phi_m(t) \frac{4K(k)}{[(R+B)^2 + (Lt-Z_m)^2]^{1/2}}, \quad (9)$$

$$H_{i,jm}(t) = |J| \phi_m(t) \frac{-RL}{[(R+B)^2 + (Lt-Z_m)^2]^{1/2} \pi} \times \frac{(Lt-Z_m)E(k)}{[(R-B)^2 + (Lt-Z_m)^2]^{1/2}}. \quad (10)$$

式中, t 为局部坐标; Z_m 为管的最后节点的第三坐标; L 为管单元长度; R 为管道外径。

以上两式中, $i \neq j$ 。 $K(k)$ 是第一类完全椭圆积分, $E(k)$ 是第二类完全椭圆积分; J 、 B 是坐标变换的结果。

2.2.2 奇异系数计算

对于半无限域的情形^[13]:

$$H_{ii} = - \sum H_{ij}, i \neq j. \quad (11)$$

对 G_{ii} 的求解采用解析法^[14],

$$G_{ii} = \frac{L}{2\pi} \left[1 - \ln \left(\frac{L}{16r} \right) \right]. \quad (12)$$

最后对式(9)、(10)进行数值积分,对上述问题所得的标准的 BEM 系统结果为

$$\{G\} \times \{Q\} = \{H\} \times \{\phi - \eta(Q)\}. \quad (13)$$

式中, $\eta(Q)$ 为系统的非线性边界条件; $\{Q\}$ 为各节点的电流密度向量。

3 区域性阴极保护设计

3.1 BEASY 软件建模

根据某一站场实际埋地管网以及接地网,在 BEASY 中建立的模型如图 3 所示。图中,蓝色代表埋地管网,埋深及长度均不相等,材质相同为 Q235;粉红色代表接地网,材质为镀锌扁钢,由于接地网埋设时间较长,扁钢上的镀锌已经消耗完毕,在建模计算时应按照扁钢对待。

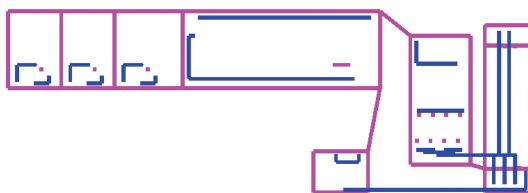


图 3 埋地管网及接地网模型

Fig. 3 Buried pipe network and grounding network model

图 3 中没有阴极保护,须根据不同阴极保护方法进行方案设计。采用 3 种阴极保护设计方式:牺牲阳极阴极保护、外加电流阴极保护、牺牲阳极和外加电流联合防护。

3.2 牺牲阳极阴极保护

采用牺牲阳极进行阴极保护,模拟设计的思路是先整体施加牺牲阳极,然后对于局部未受到保护的管道单独施加牺牲阳极,即对牺牲阳极进行加密。

初步施加牺牲阳极保护后的模型如图 4 所示。图中蓝色代表埋地管网,红色代表接地网,绿色代表牺牲阳极。采用 Al 作为牺牲阳极,直径为 0.1 m,长度为 1.5 m,埋深为 2 m。模拟结果如图 5 所示,模拟得到的电位值都是相对于 CSE 的。

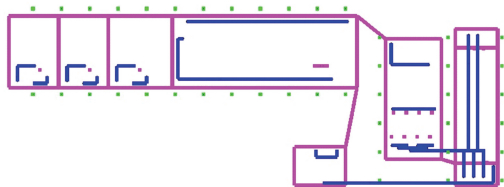


图 4 初步施加牺牲阳极

Fig. 4 Applying sacrificial anode preliminary

由图 5 可知,在牺牲阳极附近管地电位较负,远离牺牲阳极管地电位较正。从整体看,埋地管网管地电位最负值为 -779 mV,大部分管段管地电位约为 -700 mV,远未达到要求的阴保电位,因此须对上述阳极加密。阳极加密和模拟结果如图 6、7 所示。

内,此牺牲阳极设计方案可行。但是由于方案中使用了大量的牺牲阳极,施工不便,经济性也不好,此方案不适宜作为现场的阴极保护设计。

3.3 外加电流阴极保护

采用外加电流阴极保护,模拟设计的基本思路是:在站场内设置辅助阳极进行模拟计算,根据模拟结果改变辅助阳极的位置和输出电流的大小,使站场埋地管网得到较好的阴极保护。

辅助阳极以及通电点布置如图 10 所示。图中蓝色代表埋地管网,粉红色代表接地网,绿色代表辅助阳极,共两组辅助阳极组成。每一组辅助阳极由 5 个高硅铸铁阳极组成,直径 0.1 m,长度 1.5 m,埋深 2 m。辅助阳极的输出电流均为 10 A。模拟电位分布如图 11 所示。



图 5 初步施加牺牲阳极的埋地管网电位分布
Fig. 5 Potential distribution of buried pipeline of applying sacrificial anode preliminary

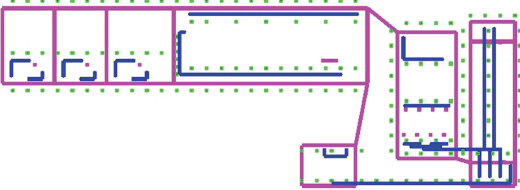


图 6 牺牲阳极加密布置

Fig. 6 Encryption arrangement of sacrificial anodes



图 7 牺牲阳极加密布置的埋地管网电位分布
Fig. 7 Potential distribution of buried pipeline as sacrificial anodes encrypting arrangement

由图 7 可知,阴极保护电位大都处于保护范围之内,但仍有部分管段未受到很好的阴极保护。此时,须单独对未达到阴极保护的管段施加牺牲阳极保护,对阳极进行进一步加密,如图 8 所示。模拟结果如图 9 所示。

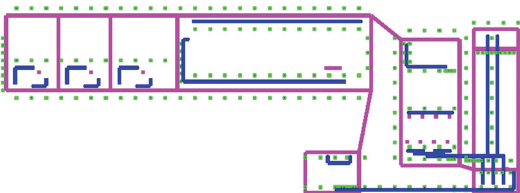


图 8 牺牲阳极进一步加密布置

Fig. 8 Further encryption arrangement of sacrificial anodes



图 9 牺牲阳极进一步加密布置的埋地管网电位分布
Fig. 9 Potential distribution of buried pipeline as sacrificial anodes further encrypting arrangement

由图 9 可知,埋地管网电位都处于保护范围之

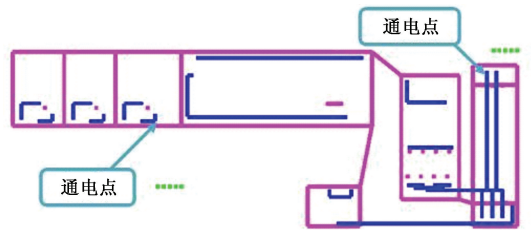


图 10 外加电流阴极保护设计

Fig. 10 Impressed current cathodic protection design



图 11 外加电流阴极保护的埋地管网电位分布

Fig. 11 Potential distribution of buried pipeline as impressed current cathodic protection applied

由图 11 可知,管网基本处于阴极保护范围内,但通电点 2 附近管道的管地电位达到 -1 565 mV,处于过保护状态,因此有必要对通电点 2 处的阳极做调整(位置的外移及输出电流的减小)。调整方案为:通电点 2 处的辅助阳极向远离管网的方向平行移动 20 m,输出电流由 10 A 变为 8 A,通电点 1 处的辅助阳极不变。模拟得到电位分布如图 12 所示。

由图 12 可知,埋地管网管地电位在 -860 ~ -1 154 mV 内,处于阴极保护范围内,因此此设计方案可以使埋地管网得到有效的阴极保护。但是,从整体埋地管网电位分布来看,阴极保护电位值跨度很大,电位分布很不均匀,因此,此方案的阴极保护效果不好,现场不宜采用。



图12 阳极调整后的埋地管网电位分布

Fig.12 Potential distribution of buried pipeline as anodes rearranged

3.4 外加电流和牺牲阳极联合防护

当单独采用外加电流阴极保护时,对应图12的方案,埋地管网的管地电位为 $-860 \sim -1154$ mV,此方案有两个不足之处:①管网管地电位最高值为 -860 mV,非常接近 -850 mV,因此外界的一些变化导致管地电位出现一定波动时,很容易使这些管段得不到充分的阴极保护;②管地电位跨度较大,电位分布不均匀。

针对这些不足,在图12的方案基础上施加牺牲阳极,如图13所示。图中,蓝色代表埋地管网,粉红色代表接地网,灰色代表辅助阳极,通电点位置不变;绿色代表牺牲阳极,材料为Al。模拟结果如图14所示。

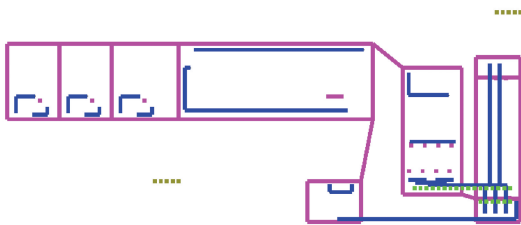


图13 牺牲阳极和外加电流联合保护

Fig.13 Sacrificial anode and impressed current joint protection

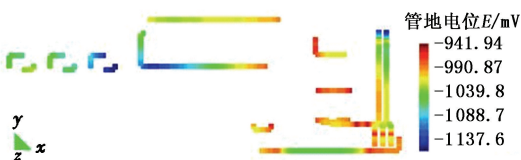


图14 牺牲阳极和外加电流联合保护的埋地管网电位分布

Fig.14 Potential distribution of buried pipeline as sacrificial anode and impressed current joint protection used

由模拟结果可知,埋地管网的管地电位处于 $-941 \sim -1162$ mV之间,埋地管网能够得到很好的阴极保护,而且相比外加电流阴极保护电位分布比较均匀,阴极保护效果更好,因此此方案可以对管网进行有效的阴极保护。

4 结论

(1)边界元方法是解决区域站场埋地管道阴极保护设计问题的有效方法。

(2)采用牺牲阳极和外加电流共同防护可以解决牺牲阳极数量过多及电位分布不均的问题。

(3)采用牺牲阳极和外加电流共同防护的设计原则是:先进行外加电流阴极保护设计,在电位较低的区域(一般是管网密集区)施加牺牲阳极保护。

参考文献:

- [1] 李振军,安龙虎,颜怀永,等. 阳极地床对油气田站场区域阴极保护的影响[J]. 石油工程建设, 2012, 38(4):53-55.
LI Zhenjun, AN Longhu, YAN Huaiyong, et al. Effect of anode ground-beds on local cathodic protection in oil-gas stations [J]. Petroleum Engineering Construction, 2012, 38(4):53-55.
- [2] 陈洪源,范志刚,刘玲莉,等. 区域性阴极保护技术在输气站场中的应用[J]. 油气储运, 2005, 24(5):41-44.
CHEN Hongyuan, FAN Zhigang, LIU Lingli, et al. The application of partial cathodic protection technology in gas transmission station [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2005, 24(5):41-44.
- [3] 刘玲莉,陈洪源,刘明辉,等. 输油气站场区域性阴极保护技术[J]. 油气储运, 2005, 24(7):28-31.
LIU Lingli, CHEN Hongyuan, LIU Minghui, et al. Local cathodic protection for pumping and compressor stations [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2005, 24(7):28-31.
- [4] 李海坤,谢涛,王颖,等. 区域阴极保护实践与分析[J]. 腐蚀与防护, 2013, 31(2):73-75.
LI Haikun, XIE Tao, WANG Ying, et al. Practice and analysis on regional cathodic protection [J]. Corrosion & Protection, 2013, 31(2):73-75.
- [5] 赵常英. 输油站场区域阴极保护[J]. 石油工程建设, 2010, 36(5):48-50.
ZHAO Changying. Cathodic protection applied for oil gathering station zone [J]. Petroleum Engineering Construction, 2010, 36(5):48-50.
- [6] 侯志强,邢少华. 压载水舱阴极保护设计与保护效果评价[J]. 材料保护, 2008, 41(6):67-68.
HOU Zhiqiang, XING Shaohua. Design of cathodic protection and evaluation of protection efficacy for ballast tank [J]. Journal of Materials Protection, 2008, 41(6):67-68.

- [7] 刘福国,武素茹. 导管架平台外加电流阴极保护数值模拟计算研究[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2011, 28(6):9-11.
LIU Fuguo, WU Suru. Study on numerical simulation calculation for applied current cathodic protection of platform [J]. Petrochemical Corrosion and Protection, 2011, 28(6):9-11.
- [8] 宋高伟,黄燕滨,丁华东,等. 车辆阴极保护效果测试与数值模拟[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(8):646-648.
SONG Gaowei, HUANG Yanbin, DING Huadong, et al. Testing and numerical simulation of vehicle cathodic protection system [J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(8):646-648.
- [9] LIU G C, SUN W, WANG L, et al. Modeling cathodic shielding of sacrificial anode cathodic protection systems in seawater[J]. Materials and Corrosion, 2013, 64(6):472-477.
- [10] 孟宪级,吴中元,梁旭巍,等. 区域性阴极保护数学模型算法的改进[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1998, 18(3):221-226.
MENG Xianji, WU Zhongyuan, LIANG Xuwei, et al. Improvement of algorithm for regional cathodic protection model [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1998, 18(3):221-226.
- [11] 陈静. 输气站场区域性阴极保护数值模拟及阳极位置优化研究[D]. 成都:西南石油大学石油天然气工程学院, 2009.
CHEN Jing. Numerical simulation of regional cathodic protection of gas transmission station and research on optimization of anode location [D]. Chengdu: College of Petroleum and Natural Gas Engineering in Southwest Petroleum University, 2009.
- [12] BRICHAU F, DECONINCK J. A numerical model for cathodic protection of buried pipes [J]. Corrosion, 1994, 50(1):39-49.
- [13] 龙学渊. 埋地管线阴极保护站输出参数调整研究[D]. 成都:西南石油大学石油与天然气工程学院, 2007.
LONG Xueyuan. Research on output parameter adjustment of buried pipeline cathodic protection station [D]. Chengdu: College of Petroleum and Natural Gas Engineering in Southwest Petroleum University, 2007.
- [14] 吴洪谭. 边界元法在传热学中的应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2008:60-62.

(编辑 沈玉英)