

文章编号: 1000-8241(2014)03-0287-05

# 交叉并行管道阴极保护干扰数值模拟

李丹丹<sup>1,2</sup> 毕武喜<sup>2</sup> 祁惠爽<sup>2</sup> 穆承广<sup>2</sup> 薛致远<sup>2</sup> 陈洪源<sup>2</sup> 陈洪民<sup>3</sup>

1. 西南石油大学, 四川成都 610500; 2. 中国石油管道科技研究中心, 河北廊坊 065000; 3. 北京输油气分公司, 北京 102488

**摘要:** 针对国内某油气管道存在的阴极保护干扰问题现状, 开展检测分析并确定其阴极保护干扰特点。依据埋地管道参数和阴极保护系统工作参数, 完成了对应的干扰现场数值模拟分析, 结果表明: 现场检测数据不能全面反映干扰电位的分布规律, 现场检测阴极保护干扰时, 必须采用密间隔电位测量技术(Close Interval Potential Survey, CIPS), 必要时借助数值模拟技术辅助分析。为了预先了解对应治理方案的治理效果, 利用数值模拟技术对治理方案进行预评估, 结果显示治理方案可以消除该处管道的阴极保护干扰影响, 同时对治理方案的合理性进行了讨论。借助数值模拟技术对管道阴极保护干扰进行分析的做法, 可以为解决类似工程问题提供借鉴。(图 7, 参 12)

**关键词:** 交叉并行管道; 阴极保护; 干扰; 数值模拟; 治理方案

中图分类号: TE988

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2014.03.014

## Numerical simulation of cathodic protection interference in cross/parallel pipeline

LI Dandan<sup>1,2</sup>, BI Wuxi<sup>2</sup>, QI Huishuang<sup>2</sup>, MU Chengguang<sup>2</sup>, XUE Zhiyuan<sup>2</sup>, CHEN Hongyuan<sup>2</sup>, CHEN Hongmin<sup>3</sup>

1. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500; 2. PetroChina Pipeline R &amp; D Center, Langfang, Hebei, 065000; 3. PetroChina Beijing Oil &amp; Gas Sub-company, PetroChina Pipeline Company, Beijing, 102488

**Abstract:** According to the problem of cathodic protection interference in a pipeline inland, detection analysis is carried out to understand the characteristics of the cathodic protection interference. Based on the parameters of the buried pipeline and the running parameters of the cathodic protection system, numerical simulation analysis on the interference field is finished, and the result shows that the spot data cannot fully reflect the distribution of interference potential. Close Interval Potential Survey (CIPS) is needed during the detection of cathodic protection interference in the field, and numerical simulation technology can be used in assistant analysis if necessary. In order to predict the effect of the relevant improvement scheme, pre-evaluation of the scheme is carried out by means of the numerical simulation. The results show that this scheme can eliminate the influence of cathodic protection interference here in the pipeline and its reasonability is discussed in this paper. The way of using numerical simulation to analyze cathodic protection interference on pipeline can provide a reference to the troubleshooting similar construction problems. (7 Figures, 12 References)

**Key words:** cross/parallel pipeline, cathodic protection, interference, numerical simulation, improvement scheme

油气管道阴极保护技术在国内已经应用近 40 年, 在很长一段时期内, 国内管道总里程不长, 且分布相对分散, 阴极保护干扰问题并不严重, 没有引起足够重视。随着 20 世纪 90 年代以来管道建设的迅速发展, 国内管道总里程已达  $9.3 \times 10^4$  km, 在局部地区形成了多条管道交叉并行的局面, 如在河西走廊内西一线、西二线、双兰线管道多处近距离交叉并行, 因而形成了所谓的“公共走廊”。由于管道的密集交叉和并行, 难免

出现阴极保护系统之间的干扰。

阴极保护系统干扰属于直流干扰范畴, 其干扰机理: 当被干扰管道穿过大地中高电位区域时, 被迫从大地中吸收电流, 导致管/地电位向负向偏移, 容易引起管道过保护, 甚至引起防腐层阴极剥离; 当被干扰管道穿越地电场低电位区域时, 被迫释放电流或者管道阴极保护电流减小, 导致管/地电位向正向偏移, 容易引起欠保护, 甚至管体腐蚀<sup>[1-5]</sup>。阴极保护干扰电流流入

和流出对阴极保护系统有效运行都是不利的,在管道阴极保护设计和运行管理中,应予充分重视。

相对于传统的阴极保护设计方法,阴极保护数值模拟技术能够更加直观、全面地模拟阴极保护运行过程,还可以进一步优化阴极保护运行方案,分析阴极保护异常情况。目前国内已有不少研究人员开始了这方面的工作:杜艳霞等<sup>[6-7]</sup>采用有限元数值模拟技术研究了储罐外底板阴极保护问题;毕武喜等<sup>[8-10]</sup>利用数值模拟技术研究了管道阴极保护站附近断电电位异常、阳极地床优化设计等问题;张丰等<sup>[11]</sup>利用边界元技术研究了区域阴极保护优化的问题。总之,数值模拟技术已经成为评价阴极保护水平、优化阴极保护设计的有力手段之一。

基于上述,依托一个真实的交叉并行油气管道阴极保护干扰案例,分析现场干扰检测数据和干扰管/地电位特点,并利用数值模拟技术对现场干扰强度进行重新评估,最后对干扰治理方案进行数值模拟预评估,结果表明治理方案可以完全消除该处干扰影响。

## 1 现场检测与分析

### 1.1 干扰现场基本情况

该阴极保护干扰现场位于西北某输油站附近,有3条埋地管道,分别为管道1、管道2和管道3(图1)。3条管道有各自独立的强制电流阴极保护系统,防腐层均为3 PE,3条管道的投运时间分别为2005年、2010年和2003年,在该区域的埋深分别为1.8 m、2.0 m和1.7 m。管道1的上下游阴极保护站分别距离该干扰点约40 km和50 km,管道2和管道3的上下游阴极保护站距离该干扰点在20 km以上。

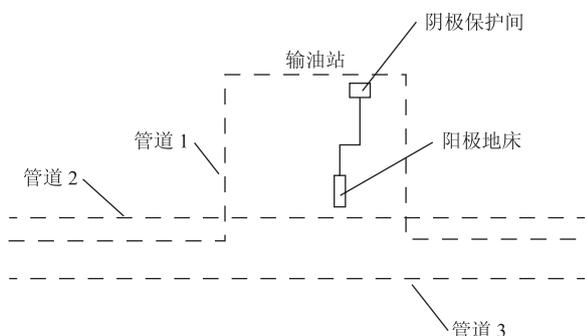


图1 埋地管道阴极保护干扰管段示意图

管道1的阴极保护间与输油站共建,恒电位仪工作模式为恒电位模式,控制电位为-1.20 V(相对于饱

和硫酸铜参比电极CSE,下同),输出电压为6.50 V,输出电流为1.61 A。管道1的阳极地床由20支高硅铸铁水平铺设而成,总长度约80 m。管道2横穿管道1,在平行段管道1和管道2相距约50 m,管道2近距离穿过管道1的阳极地床(图1),最近处直线距离为25 m。管道3距离管道1约60 m。该地区为沙漠戈壁地貌,实测土壤电阻率偏高,范围为300~800 Ω·m。

### 1.2 被干扰管道阴极保护电位测量

经过现场勘查和电位测量,发现管道3管/地电位变化不大,管道2受干扰最严重。

#### 1.2.1 管道2干扰段电位分布

根据管道2在输油站前后9个测试桩上的管/地电位分布(图2),测试桩5距离管道1的阳极地床距离最近,测试桩4和6为后来临时安装的加密电位测试桩,距离测试桩5约500 m。随着管道2向管道1的阳极地床不断靠近,管道2的管/地电位明显向负向偏移,在距离阳极地床最近处(测试桩5)达到管/地电位最负值-1.76 V。随着管道2远离管道1的阳极地床,管/地电位逐渐向正向偏移,在测试桩8和测试桩9处,管/地电位基本稳定在-0.95 V左右。可见,管道2管/地电位分布特点符合阴极保护干扰电流流入管段的特征,应该注意被干扰管道的过保护。

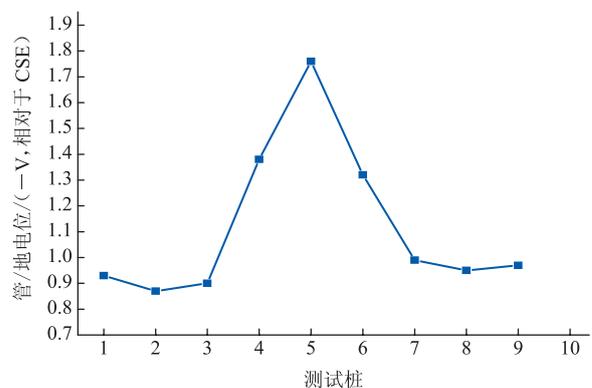


图2 管道2干扰段测试桩上对应的管地/电位分布

#### 1.2.2 管道1管/地电位分布

图3显示的是管道1在输油站前后的管/地电位分布图,测试桩4和5分别为管道1进出站的测试桩,对应的管/地电位分别为-1.35 V和-1.31 V,测试桩3和6,对应的电位分别为-0.97 V和-1.03 V,远离阳极地床的测试桩2和7的电位分别为-0.89 V和-0.93 V。可见,在管道1进出站前后约2~3 km范围内,管/地电位就正向偏移了约400 mV,推测可能是受到了本身地床电位场的影响。

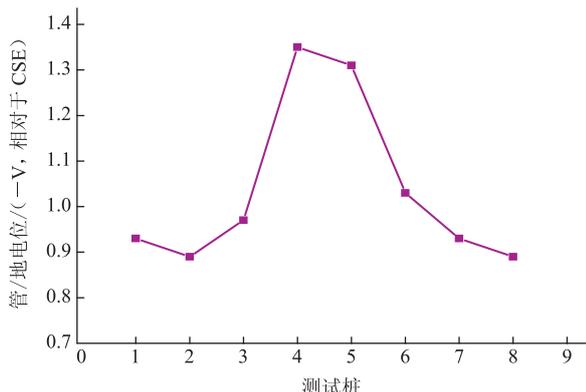


图3 管道1干扰段测试桩上对应的管地/电位分布

### 1.2.3 关闭干扰源后被干扰管道的电位变化

为进一步了解管道1阳极地床对管道2的干扰,在保持管道2阴极保护系统正常工作的情况下,关停管道1恒电位仪24 h后,重新测试管道1和管道2的管/地电位。管道1各个测试桩的管/地电位稳定在 $-0.468\sim-0.425\text{ V}$ 之间,接近自然电位;管道2各个测试桩的管/地电位稳定在 $-0.865\sim-0.843\text{ V}$ 之间,相比管道1,阳极地床开启时正向偏移了约900 mV。

依据石油行业标准SY/T 0017—2006<sup>[12]</sup>规定的判断直流干扰程度指标:一般以管/地电位较自然电位的偏移量或者被干扰结构附件土壤电位梯度作为衡量指标,当管/地电位较自然电位正向偏移100 mV,或被干扰管道附近土壤电位梯度大于 $2.5\text{ mV/m}$ 时,需采取治理措施。而对于由于直流干扰导致的管/地电位负向偏移的问题,标准中没有给出明确的指标,但是指出不应超过防腐层阴极剥离电位。管道2在电位测试桩上的实测最负管/地电位达到 $-1.76\text{ V}$ ,可能导致管道2防腐层阴极剥离。由于管道2和管道1的管/地电位数据都是在电位测量桩上获得的,数据量有限,可能无法反映出管道管/地电位分布全貌。为此,利用有限元数值模拟技术对上述干扰现场进行重新模拟评估。

## 2 阴极保护干扰强度评估

### 2.1 有限元算法控制方程

阴极保护干扰涉及的物理过程均为稳态过程,可以采用经典无源静电场方程描述电位在土壤、管道中的分布规律:

$$\frac{1}{\rho}\nabla^2\phi=0$$

式中: $\rho$ 为管道所在介质的电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$ ;  $\phi$ 为电位, $\text{V}$ 。

### 2.2 阴极保护干扰几何模型

在干扰现场,管道3距离干扰源较远,受到干扰较小,数值模拟时不考虑其影响。以下将完全按照现场管道实际走向、管道参数和地床位置建立对应的几何模型。管道1由两条管道同沟敷设而成,管径分别为559 mm和813 mm,埋深为1.8 m,采用联合阴极保护方式。为便于数值模拟,将两条同沟敷设管道等价为一根虚拟管道,管径为两根管道之和,即1372 mm,并相应调整其管材等价电阻率,保证虚拟管道与采用联合阴极保护的管道具有相等的单位长度纵向电阻。管道2管径为1219 mm,埋深为2.0 m。

依据实际的管道1阳极地床参数,建立阳极地床几何模型。地床具体参数:埋深2.1 m,高硅铸铁阳极20支,每支阳极间距为2.5 m,单支阳极长1.5 m,直径7.5 cm,阳极埋设方式为平铺浅埋式,焦炭层厚度为0.3 m,阳极地床输出总电流1.61 A,计算区域土壤电阻率取 $500\ \Omega\cdot\text{m}$ 。为了充分减小土壤边界效应对计算结果的影响,土壤计算范围取5 km。

### 2.3 几何模型网格划分与求解

几何模型网格划分采用专业网格划分软件ICEM CFD完成,共划分网格数 $33.9\times 10^4$ 个,为了更好地捕捉电场变化剧烈的区域,在网格模型的局部进行加密处理。模型的求解采用ANSYS CFX电场模块完成,计算模型除地床边界采用电流源边界外,其他采用电位边界。管道1与土壤之间电阻效应采用等价面电阻来表示,设为 $1\times 10^4\ \Omega\cdot\text{m}^2$ (包括涂层面电阻和阴极极化等价面电阻),管道2对应的等价面电阻为 $2\times 10^4\ \Omega\cdot\text{m}^2$ ,为了提高计算精度,采用双精度求解器求解,计算收敛精度设定为 $10^{-5}$ ,一般求解器进行30次迭代即可达到收敛准则。

### 2.4 干扰强度有限元模拟结果

根据管道2在地床附近干扰电位分布有限元的计算结果(图4),管道2的干扰电位分布以地床所在位置(2000 m处)为对称线,呈左右对称分布,干扰峰值电位为 $-2.55\text{ V}$ 。将有限元计算结果与管道2的现场测量干扰电位进行对比(图2),可以发现检测电位的最负值为 $-1.76\text{ V}$ ,而有限元计算结果给出的最负干扰电位为 $-2.55\text{ V}$ ,二者相差0.79 V。原因在于图2所示检测干扰电位数据均是在电位测试桩上测量的,并没有测量到管道2所受到的最大干扰强度(应该位于最靠近管道1的地床位置)。依据现场实际电位测

试桩的位置,在有限元模型对应位置提取有限元计算的电位结果,二者偏差在 0.15 V 之内,这反映了数值模拟技术在分析阴极保护干扰问题上良好的可靠性。因此,在检测评价类似阴极保护干扰时,除了测量电位测试桩处的电位之外,还应该采用密间隔电位测量方法(CIPS)全面评价干扰区段被干扰管道的电位分布,必要时采用数值模拟技术辅助分析。

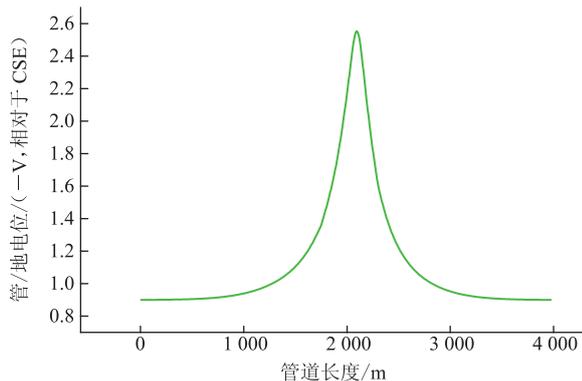


图4 管道2在地床附近干扰电位分布有限元计算结果

根据管道1在干扰管段数值模拟的管/地电位分布(图5),相对于管道2左右对称的分布特点,管道1的电位分布呈现出3个明显波峰,最负值为-1.83 V,这是由于管道1走向呈“几”字形以及距离地床远近不一所导致的。

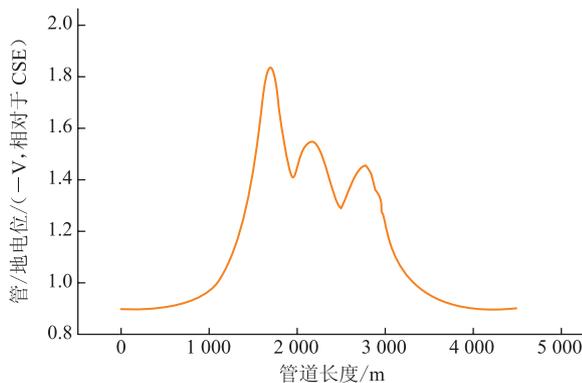


图5 管道1在自身地床附近干扰电位分布有限元计算结果

### 3 治理方案预评估与合理性探讨

#### 3.1 基于有限元的预评估

现场勘查可知,输油站北侧和东北侧为隆起的小山包,西侧为平坦的开阔地,管道1新阳极地床位置倾向于在站场西北方向,距离站场西围墙延长线 350 m,距离管道2 350 m。新阳极地床采用平铺浅埋式,包含 25 支高硅铸铁阳极,其他采用阳极地床通用设计。

针对该干扰治理设计方案,采用以上介绍的基于有限元的数值模拟技术对治理方案进行预评估。治理方案数值模型中的参数与 2.2 节中的设置完全一致,不同在于管道1的阳极地床位置和高硅铸铁阳极数量不同。几何模型网格划分、求解器的设置见 2.3 节。

进一步分析干扰电位结果可知,被干扰管道2在该区域最负管/地电位为-1.07 V(图6),较治理前数值模拟结果给出的最负管/地电位-2.55 V(图4)正向偏移了 1.48 V,接近关闭管道1阴极保护系统时管道2的管/地电位范围:-0.865~-0.843 V;被干扰管道1在该区域最负管/地电位仅为-1.04 V(图7),较治理前数值模拟结果给出的最负管/地电位-1.83 V 正向偏移了 0.79 V(图5),管道阴极保护干扰问题得到了缓解。此外,考虑到该段管道整体保护电位不高,建议采用断电电位评价方法适当提高保护电位。

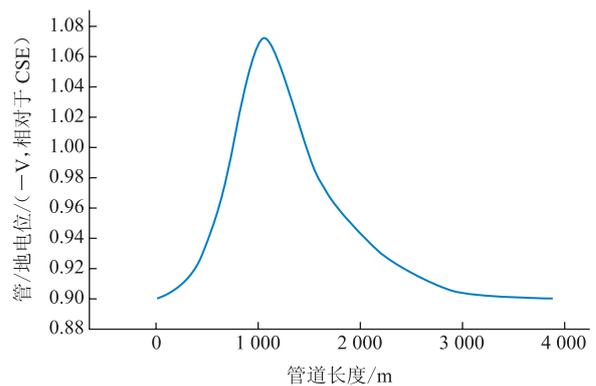


图6 调整地床位置后管道2管/地电位有限元计算结果

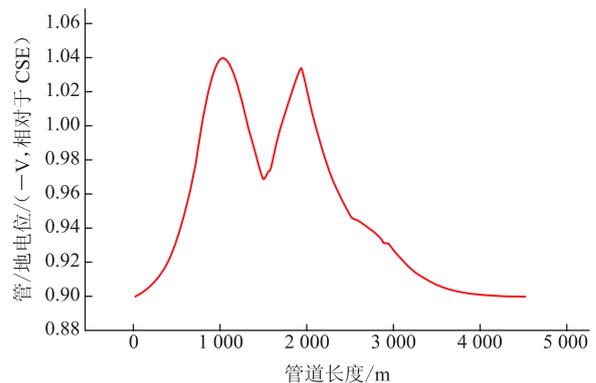


图7 新地床位置对应的管道1管/地电位有限元计算结果

#### 3.2 合理性讨论

分析图1可知,不管是目前干扰现场的阳极布置方式,还是设计的治理方案布置方式,管道1的阳极地床和管道1之间都存在管道2,这违反了管道阴极保护设计的一项原则:在阳极地床和管道之间不宜出现其他金属构筑物。而提出这条原则的原因是:①从保

护第三方金属构筑物角度来说,如果在地床和被保护管道之间出现其他金属构筑物,该构筑物会受到阳极地床的干扰,在靠近地床部分吸收电流,在远离地床部分释放电流,引起金属腐蚀;②从有效保护目标管道角度来说,如果在管道和地床之间出现了大尺度或近距离靠近的其他金属构筑物,确实有可能对目标管道阴极保护电流的分布产生影响,导致阴极保护效果下降。

针对以上干扰现场,管道1北侧是管道2,南侧是管道3,管道间距又不允许将地床置于两个管道之间,管道1的地床置于任何一侧都会遇到在地床和被保护管道之间存在其他金属构筑物的问题。采用3条管道联合保护的方式也许是一种合理的选择,但是,文中涉及的3条管道路径并非从始至终近距离平行,这就可能造成联合保护和独立保护“混杂”在一起的局面,给阴极保护日常管理和有效性评价带来一定困难。因此,维持目前独立保护方式是一种比较现实的选择。

治理方案中阳极地床距离管道2有350 m,通过增大地床与中间构筑物间距,可以缓解管道1地床地电位场对管道2的干扰效应,这可以通过图6给出的管道2上的模拟管/地电位分布得到验证;依图7中管道1的管/地电位分布可知,设计的治理方案也没有对管道1的电位分布产生明显影响。

## 4 结论

(1)在对阴极保护干扰问题进行现场检测时,应该采用密间隔电位测量技术测量被干扰管道的管/地电位,仅在电位测试桩上测量电位有可能得不到最大干扰强度。

(2)在分析复杂阴极保护干扰问题时,有必要借助数值模拟技术进行辅助分析。

(3)针对多条并行管道采用联合阴极保护还是独立阴极保护的问题,应根据现场实际情况具体分析。

### 参考文献:

- [1] BRIAN W H. Cathodic protection survey procedures[M]. Houston: NACE International, 1999.
- [2] PIERRE R R. Handbook of corrosion engineering[M]. New

York: McGraw-hill, 1999.

- [3] 冯洪臣. 阴极保护安装与维护[M]. 北京: 经济日报出版社, 2010.
- [4] 胡士信. 阴极保护工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- [5] 贝克曼. 阴极保护手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [6] 杜艳霞, 张国忠. 储罐底板外侧阴极保护电位分布的数值模拟[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(6): 346-350.
- [7] 杜艳霞, 张国忠, 刘刚. 罐底外侧深井阳极阴极保护电位分布规律研究[J]. 电化学, 2006, 12(1): 55-58.
- [8] BI Wuxi, XUE Zhiyuan, ZHANG Feng. The underlying reasons for relatively positive off potential and large IR drop around current drainage point areas[C]. Perth, Australian: The 18th international corrosion conference, 2011.
- [9] BI Wuxi, WANG Weibin, ZHAO Choumin. Modeling the magnetic field distribution for pipe corrosion pit with ANSYS software[C]. Beijing, China: ICPTT, 2011.
- [10] BI Wuxi, KONG Wei, WANG Weibin. Design cathodic protection ground-bed arrangement with finite element analysis method[C]. Wuhan, China: ICPTT, 2012.
- [11] 张丰, 陈洪源, 李国栋, 等. 数值模拟在管道和站场阴极保护中的应用[J]. 油气储运, 2011, 30(3): 208-212.
- [12] 李绍忠, 阎久红, 何悟忠, 等. SY/T 0017-2006 埋地钢质管道直流排流保护技术标准[S]. 北京: 石油工业出版社, 2006.

(收稿日期:2013-03-22;修回日期:2013-10-10;编辑:杜娟)



**基金项目:** 中国石油天然气股份有限公司科研项目“管道阴极保护数值模拟评价技术研究”, 012B-3302-0503。

**作者简介:** 李丹丹, 在读硕士生, 1986年生, 2009年毕业于西南石油大学应用化学专业, 现主要从事管道阴极保护技术研究。

LI Dandan, reading master, born in 1986, graduated from Southwest Petroleum University, applied chemistry, in 2009, engaged in the research of pipeline cathodic protection technology.

Tel: 0316-2078482; Email: biwuxi@petrochina.com.cn