

# 定向钻穿越管道阴极保护数值模拟评价方法

徐华天<sup>1</sup>, 杨威<sup>2</sup>, 温玉芬<sup>3</sup>, 毕武喜<sup>1</sup>

(1. 中国石油管道科技研究中心, 河北 廊坊 065000; 2. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 065000; 3. 中国石油管道分公司, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** **目的** 通过数值模拟的方法探索定向钻穿越管道的阴极保护评价。**方法** 根据一条 5130 m 长度的定向钻穿越管道的实际参数, 基于 CDEGS 软件计算方法, 应用涂层耐受电压与电流密度的关系, 计算定向钻管道浅埋层和岩石层中的管道的电位分布。**结果** 通过调整土壤分层电阻率参数及土壤分层厚度进行计算, 得到了定向钻穿越管道在分层土壤电阻率条件下的阴极保护电位分布规律。**结论** 明确了土壤电阻率是影响定向钻管道电位分布的主要因素, 形成了基于定向钻管道两端阴极保护电位和土壤分层电阻率, 推导了整条定向钻穿越管道的阴极保护电位分布情况的评价方法。

**关键词:** 定向钻管道; 阴极保护; 数值模拟; CDEGS; 土壤电阻率; 评价方法

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.11.005

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)11-0031-06

## Numerical Simulation Method for Cathodic Protection Evaluation of HDD Pipeline

XU Hua-tian<sup>1</sup>, YANG Wei<sup>2</sup>, WEN Yu-fen<sup>3</sup>, BI Wu-xi<sup>1</sup>

(1. PetroChina Pipeline R&D Center, Langfang 065000, China; 2. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000, China; 3. PetroChina Pipeline Company, Langfang 065000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore the cathodic protection evaluation of HDD pipeline through numerical simulation. According to the real parameters of a 5130 m HDD pipeline, the cathodic protection potential distribution of the HDD pipeline in the shallow buried layer and rock layer was calculated by the CDEGS software based on the relationship between coating withstand voltage and current density. By adjusting the soil layer resistivity parameters and soil layer thickness, the cathodic protection potential distribution law of HDD pipeline under layer soil resistivity condition was obtained. It is clear that the soil resistivity is the main factor affecting the potential distribution of the HDD pipeline, and an evaluation method for deriving the cathodic protection potential distribution of the entire HDD pipeline based on the cathodic protection potential at both ends of the HDD pipeline and the soil layer resistivity is formed.

**KEY WORDS:** HDD; cathodic protection; numerical simulation; CDEGS; soil resistance; evaluation method

定向钻穿越是公路、铁路和河流等不适合浅埋区域管道的普遍铺设方式, 目前在长输埋地管道中大量

存在。定向钻管道在施工过程中, 受地下岩石层的影响, 管道的外防腐层容易被划伤和磨损, 甚至会露出

收稿日期: 2020-08-21; 修订日期: 2020-09-15

Received: 2020-08-21; Revised: 2020-09-15

基金项目: 中石油管道有限责任公司科技攻关项目 (2017B-3415-0507)

Fund: The Key Project of Scientific Problem Tackling Petro China Pipeline Co., Ltd (2017B-3415-0507)

作者简介: 徐华天 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为管道及储罐腐蚀控制及安全评价。

Biography: XU Hua-tian (1986—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: pipeline and storage tank corrosion and protection and safety evaluation.

金属基体<sup>[1-3]</sup>，目前尚无有效的外检测手段获得其防腐层破损情况<sup>[4-10]</sup>。即使检测出防腐层破损，也由于无法开挖修复，只能依靠阴极保护进行防护，但国内外尚无有效的定向钻穿越管道的阴极保护评价方法。目前管道阴极保护评价的检测方法主要有瞬间断电法、试片法和极化探头法<sup>[11-12]</sup>。由于定向钻穿越管道具有埋深大、穿越地层复杂、管道上方无法接近的特点<sup>[13-14]</sup>，常规的测试方法无法使用或者测试误差很大，因此目前定向钻管道的阴极保护电位分布规律尚不可知。

CDEGS 软件具备电流分布、电磁场、接地和土壤结构分析的功能，能够为计算管道阴极保护电位分布提供参考<sup>[15]</sup>。在管道阴极保护计算中，管道涂层耐受电压表示电流在管道本体和土壤中产生的电压升的差值。涂层耐受电压数值越大，说明流经涂层的电流密度越大<sup>[16]</sup>。因此，在计算中涂层耐受电压可以近似看作管道的阴极保护极化电位，通过分析定向钻穿越管道涂层耐受电压曲线，可判断定向钻管道阴极保护电流和极化电位分布情况。

通过一个真实案例计算定向钻穿越管道阴极保护的电位分布规律。某地新建一条长度为 5130 m 的航空燃油管道，管道采用水平定向钻的方式铺设，管材为 API 5L X52 直缝埋弧焊钢管，尺寸为 508 mm×15.9 mm，穿越管道最大埋深为 140 m。防腐层类型为三层聚丙烯结构，厚度为 3.2 mm。防腐层相对于土壤（电阻率为 10 Ω·m）的面电阻率为 10 000 Ω·m<sup>2</sup>。

定向钻管道铺设完成后，大部分管段埋在距离地面 120 m 深的海底岩石层中，土壤平均电阻率为 2000 Ω·m，而管道出、入土位置的土壤电阻率为 150 Ω·m。由于土壤电阻率的巨大差异，管道在进行阴极保护时，大部分电流会流入到土壤电阻率低的出、入土端的管段，造成土壤电阻率高的管段得不到足够的阴极保护，因此文中探讨了该定向钻管道是否能够得到足够的阴极保护，以及定向钻管道运行时的电位数值。定向钻管道穿越如图 1 所示。

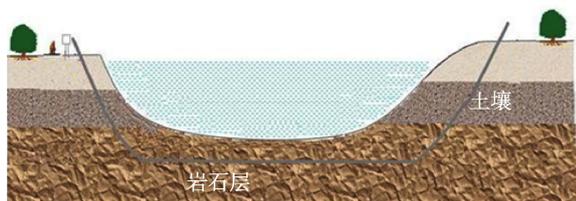


图 1 定向钻管道穿越位置土壤分层示意  
Fig.1 Soil stratification at the crossing position of HDD pipeline

## 1 理论基础

### 1.1 土壤电阻率对阴极保护电流分布的影响

管道的极化量以及阴极保护水平取决于施加到

管道表面的电流密度，为确保处于稳态条件下管道的各部分达到有效的阴极保护，则要求到达管道所有表面的电流密度均符合标准要求。因此在管道经过土壤电阻率不均匀的土壤环境时，就存在土壤电阻率高的位置刚好满足 -0.85 V，而土壤电阻率低的位置的管道电位负向偏移较大。

长输埋地管道沿线的土壤电阻率是不均匀的，且当管道沿线土壤电阻率差异剧烈时，管道阴极保护电流分布会受到严重的影响。如图 2 所示，沼泽区域的土壤电阻率比常规土壤的电阻率低很多，因此，大量的阴极保护电流将会流到穿越沼泽的管道上，使暴露于沼泽中管道的电位更负，而管道其他位置的电位偏正<sup>[17]</sup>。

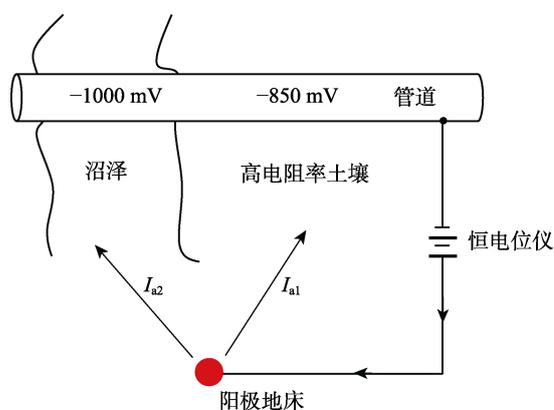


图 2 不同土壤中的电流分布  
Fig.2 Current distribution in different soils

土壤水平分层也会导致土壤电阻率的巨大差异。定向钻管道穿越不同土壤电阻率的地层，特别是地底岩石层，会引起阴极保护电流的不均匀分布。在同一个阴极保护系统中，土壤电阻率越大，管道接收的阴极保护电流越小，欠保护的可能性越大。因此，在同一个阴极保护系统内，要保证土壤电阻率大的管段得到足够的阴极保护，即极化电位负于 -0.85 V (vs. CSE)，并且土壤电阻率小的管段的阴极保护电位不低于 -1.2V，则认为此阴极保护系统内所有管道的阴极保护满足要求<sup>[18]</sup>。

### 1.2 土壤电阻率取值分析

本案例中，在定向钻穿越管道现场使用温纳四电极法测试的分层土壤电阻率，结果见表 1。仅测试了

表 1 定向钻穿越管道不同深度的土壤电阻率数值  
Tab.1 Soil resistivity values of HDD pipeline in different depth

测试位置	测试深度/m	土壤电阻率/(Ω·m)
1	10	330
2	20	143
3	30	151
4	40	421

深度为 40 m 的地层的土壤电阻率，更深的地层为岩石层。

由表 1 可知，定向钻管道出入土位置 30 m 深度的土壤平均电阻率为 151 Ω·m。为方便计算及保守评价，取定向钻管道出入土位置的土壤平均电阻率为 150 Ω·m。对于深海岩石层的土壤电阻率，现场不具备测试条件，根据文献推导<sup>[19]</sup>，大陆某花岗岩地区实测岩石区域平均电阻率见表 2。

表 2 某花岗岩地区深层土壤电阻率实测值  
Tab.2 Measured values of deep soil resistivity in a granite area

测试位置	测试深度/m	土壤电阻率/(Ω·m)
1	>30	1260
2	>30	2900
3	>30	4000
4	>20	880
5	>35	2016

由表 2 可知，岩石层的土壤电阻率加权平均值为 2211 Ω·m。由于岩石的电阻率与岩石所在环境的矿物成分、矿物结构、孔隙度、含水量及含盐度等因素有关，本案例中岩石层位于海水底部，含水率和含盐度高于丘陵地区，为方便计算及保守评价，选取定向钻管道 120 m 深度的土壤平均电阻率为 2000 Ω·m 用于计算。

## 2 模型参数设置

管道总长为 5130 m，材料为钢（相对电阻率为 12，相对磁导率为 250），管道外径为 508 mm，壁厚为 15.9 mm。管道由三部分组成，分别为入土端（埋深 0~120 m）、水平部分（埋深 120 m）及出土端（埋深 120~0 m）。

阳极地床由 8 根铸铁棒组成，铸铁棒呈水平两列布置，阳极间距 10 m，每根阳极直径 0.3 m，长度 10 m，埋深 25 m。阳极地床仅设置在管道的一端，距离管道垂直距离 250 m。

在计算过程中，定义土壤结构为水平多层，然后将土壤电阻率特性数据输入到软件中。计算了两种土壤模型下管道的阴极保护电位分布规律。由于正确选择和良好涂装的防腐层对管道的电流分布非常有益，并能减少总的阴极保护电流需求量，本次计算为了减小变量，定义定向钻管道防腐层面电阻率一致。

1) 土壤模型 1。在土壤模型 1 中，分别测试了分层厚度为 10 m 的各层土壤电阻率。模型 1 没有考虑海水的影响，因为管道铺设完成后不与海水接触。在软件中定义的定向钻管道所在位置的土壤电阻率数值见表 3。根据定向钻管道的走向及土壤分层情况，定向钻管道在软件中的计算模型如图 3 所示。图 3 中

从上到下的土壤分层电阻率依次是 330、300、151、421、2000 Ω·m。

表 3 模型 1 中分层土壤电阻率数值  
Tab.3 Resistivity values of soil layer in model 1

土壤电阻率/(Ω·m)	地层厚度/m
330	10
300	10
151	10
421	10
2000	无穷大

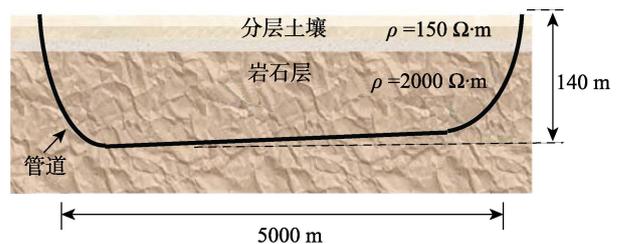


图 3 模型 1 中定向钻管道穿越示意  
Fig.3 HDD pipeline in model 1

2) 土壤模型 2。在土壤模型 2 中，进一步根据现场实测的定向钻管道穿越地层情况进行建模优化，现场实际的定向钻穿越管道与地层相对位置如图 4 所示。从图 4 可以看出，定向钻管道只有左端位于低土壤电阻率的地层中，其他管段均位于高电阻率的岩石层中。考虑到海水对电流分布的影响，在模型 2 中加入了海水分层，海水分层的深度为 10 m，但管道未置于海水分层中，如图 5 所示。土壤模型 2 中加入了海水分层，海水的电阻率为 0.3 Ω·m，土壤电阻率分层数据见表 4。

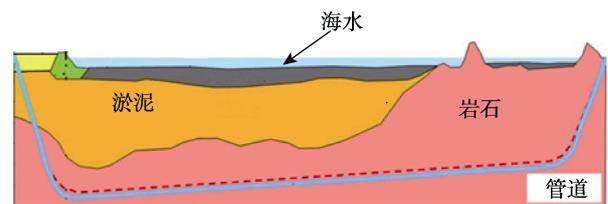


图 4 定向钻管道实际通过的地层分布情况  
Fig.4 Stratum distribution of HDD pipeline

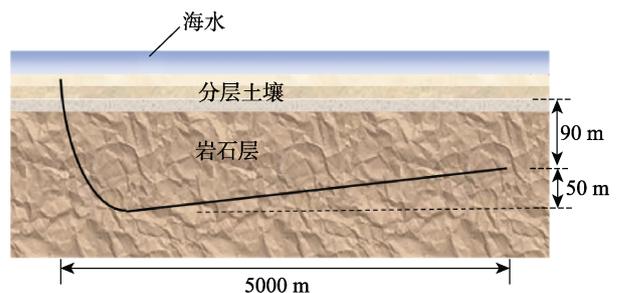


图 5 模型 2 中定向钻管道建模  
Fig.5 Modeling of HDD pipeline in model 2

表 4 模型 2 中土壤电阻率数值  
Tab.4 Soil resistivity values in model 2

土壤电阻率/(Ω·m)	地层厚度/m
0.3	10
330	10
300	10
151	10
421	10
2000	无限大

在计算过程中,为了获得管道沿线的电位数值分布曲线,在软件建模中沿管道表面创建一系列的独立观测点,观测点间距为 20 m。最后提取各观测点的管道涂层耐受电压数值。由于涂层耐受电压与电流密度正相关,因此可根据涂层耐受电压分析定向钻穿越管道的阴极保护电位与电流密度分布规律。

### 3 计算结果

#### 3.1 土壤模型 1

涂层耐受电压可以近似看作管道的阴极保护极化电位,因此在后续表述中,采用管道电位来代替管道涂层耐受电压。在软件计算过程中,采用试错法调节阳极地床输出电流,直到使位于岩石层中的定向钻管道的阴极保护电位为-0.85 V,然后记录阳极地床输出电流和整条管道的电位分布。在模型 1 中,当阳极地床输出电流为 1 A 时,能够使岩石层中的管道电位为-0.85 V 的定向钻管道各区域电位分布分别是:管道入土端电位为-0.95 V,管道中间位置电位为-0.85 V,管道出土端电位为-1.14 V。穿越管道全线的电位分布如图 6 所示。

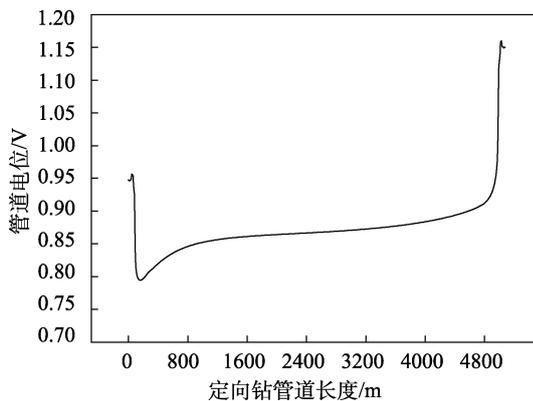


图 6 模型 1 中定向钻管道电位分布曲线  
Fig.6 Potential distribution curve of HDD pipeline in model 1

由图 6 可得以下结论:

1) 定向钻管道电位呈 U 型分布,其中土壤电阻率较低的出、入土端管道电位比岩石层中的管道电位值更大,说明流入出、入土端管道的阴极保护电流更

多。在保证岩石层中的管道平均电位为-0.85 V 时,得到定向钻管道出、入土端的电位分别为-0.95 V 和 -1.15 V。

2) 计算结果对于定向钻管道的阴极保护运行调试具有指导作用。当定向钻管道出、入土端极化电位达到-1.15 V 时,海底岩石层中的管道能够达到-0.85 V 的有效阴极保护。

3) 出土和入土端管道的极化电位存在差异,这与阳极地床相对于管道的位置有关。因为阳极地床的安装位置靠近入土端的管道,导致入土端管道接收的阴极保护电流要多于出土端管道,因此入土端管道的电位大于出土端管道的电位,这种差异可以通过调整阳极地床与管道的垂直距离得到解决。

#### 3.2 土壤模型 2

在模型 2 中,定向钻管道只有一端置于低电阻率的土壤中。当阳极地床输出电流为 0.77 A 时,岩石层中的管道的电位达到-0.85 V,定向钻穿越管道全线电位分布曲线如图 7 所示。

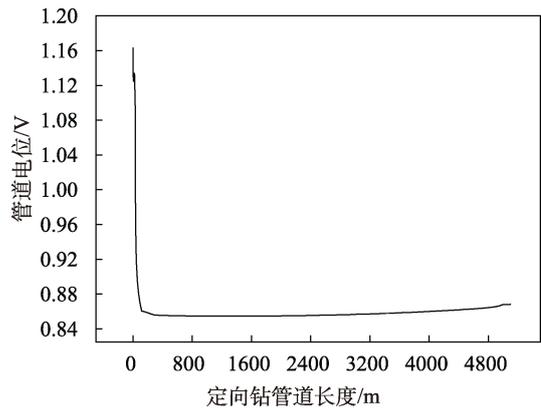


图 7 模型 2 定向钻管道电位分布曲线  
Fig.7 Potential distribution curve of HDD pipeline in model 2

由图 7 可得以下结论:

1) 定向钻管道电位呈 L 型分布,位于低电阻率土壤中的管道电位比岩石层中的管道电位值大,说明流入处于低电阻率土壤的管道的阴极保护电流多。在保证岩石层中的管道平均电位为-0.85 V 时,位于低电阻率土壤的管道的电位为-1.15 V,全线管道都在-0.85~1.2 V 之间,符合阴极保护有效性准则。

2) 计算结果表明,在定向钻管道阴极保护系统运行时,当处于低电阻率土壤的管道的极化电位达到-1.15 V 时,海底岩石层中的管道电位能够达到-0.85 V。

3) 比较模型 1 和模型 2,管道阴极保护电位分布主要与管道所在区域的土壤电阻率有关,与管道建模形态、海水等因素无关。

4) 由于金属腐蚀与氧含量有密切关系,本案例

中, 管道建成后埋设在 140 m 深度的海底岩石层中, 氧含量很低, 管道腐蚀速率降低, 需要更少的阴极保护电流就能完成极化过程, 因此, 本次评价属于保守评价。

## 4 结论

本案例中, 管道建成后, 由于位于岩石层中的管段的阴极保护电位无法测量, 因此可以将出、入土位置的管道电位调整到 $-1.15$  V。根据以上计算结果, 推测岩石层中的管道的极化电位能够达到 $-0.85$  V。计算结果对整条定向钻管道的阴极保护运行维护评价具有指导作用。

通过两种土壤模型下的定向钻管道阴极保护数值模拟计算, 得到定向钻管道全线的阴极保护电位分布规律与土壤电阻率密切相关, 土壤电阻率高的管段吸收的阴极保护电流少, 不容易达到有效阴极保护。因此同一套阴极保护系统中, 如果土壤电阻率高的位置的管道达到阴极保护要求, 那么土壤电阻率低的位置的管道也能达到有效阴极保护, 但需要确保土壤电阻率低的管道电位不低于 $-1.2$  V。

该数值模拟方法也可用于长输管道中的定向钻管道的阴极保护有效性评价, 在明确定向钻管道两端电位及土壤分层电阻率等参数后, 可以使用该方法计算整条定向钻管道的电位分布规律。

### 参考文献:

- [1] LEN J K, CHRISTOPHE B, JERRY D. CP Effectiveness at Horizontal Directionally Drilled Crossings[C]// Corrosion 2016. Houston, TX: NACE, 2016.
- [2] 霍峰, 王玮, 张文瑞, 等. 定向钻穿越管道外涂层应用现状与发展趋势[J]. 油气储运, 2013, 32(9): 943-947.  
HUO Feng, WANG Wei, ZHANG Wen-rui, et al. Application Status of External Coating of Pipeline and Its Development Trend in HDD Project[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(9): 943-947.
- [3] 任红英, 欧向波. 定向钻穿越防腐层保护方式的选择[J]. 煤气与热力, 2016, 36(5): 30-33.  
REN Hong-ying, OU Xiang-bo. Selection of Anticorrosive Layer Protection Mode for Directional Drilling Crossing[J]. Gas & Heat, 2016, 36(5): 30-33.
- [4] 郝宏娜. 埋地金属管道阴极保护电位分布规律研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012.  
HAO Hong-na. Study on Cathodic Protection Potential Distribution of Underground Pipelines[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2012.
- [5] 滕延平, 刘玲莉, 陈洪源, 等. 管道水平定向钻穿越段涂层测试与评价[J]. 管道技术与设备, 2010(1): 43-45.  
TENG Yan-ping, LIU Ling-li, CHEN Hong-yuan, et al. Directional Drilling Pipeline Sections[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2010(1): 43-45.
- [6] NACE Standard TM0102, Measurement of Protective Coating Electrical Conductance on Underground Pipelines[S].
- [7] WALTON J ACVG or DCVG—Does It Matter? Absolutely It Does[C]// Corrosion 2017. Houston, TX: NACE, 2017.
- [8] ANES-ARTECHE F, YU K, BHARADWAJ U. Challenges in the Application of DCVG-survey to Predict Coating Defect Size on Pipelines[J]. Materials and Corrosion, 2017, 68(3): 329-337.
- [9] NICHOLSON E. New visions for CIPS and DCVG[J]. Materials Performance, 2018, 57(6): 28-32.
- [10] 李明, 王晓霖. 埋地油气管道防腐层检测与评价[J]. 当代化工, 2013, 42(7): 980-983.  
LI Ming, WANG Xiao-lin. Detecting Technology and assessment of Underground Oil-Gas Pipeline Coating Deficiency[J]. Contemporary Chemical Industry, 2013, 42(7): 980-983.
- [11] 胡士信, 熊信勇, 石薇, 等. 埋地钢质管道阴极保护真实电位的测量技术[J]. 腐蚀与防护, 2005(7): 297-301.  
HU Shi-xin, XIONG Xin-yong, SHI Wei, et al. Measurement Technique Related to the Actual Potential for Cathodic Protection on Underground Steel Pipelines[J]. Corrosion & Protection, 2005(7): 297-301.
- [12] GUMMOW R A. Using Coupons and Probes to Determine Cathodic Protection Levels[J]. Materials Performance, 1998, 37(8): 24-30.
- [13] 李德选, 王雪强, 王军卫, 等. 地质条件对定向钻穿越的影响与应对措施[J]. 油气储运, 2012, 31(3): 175-177+24.  
LI De-xuan, WANG Xue-qiang, WANG Jun-wei, et al. The Terrain and Geological Condition to Horizontal Directional Drilling and Its Countermeasures[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(3): 175-177+24.
- [14] 张宝强, 焦如义, 袁会赞, 等. 大口径长输油气管道非开挖穿越的适应性[J]. 油气储运, 2012, 31(11): 871-873+88.  
ZHANG Bao-qiang, JIAO Ru-yi, YUAN Hui-zan, et al. Adaptability of Trenchless Crossing for Large-diameter Long-distance Oil and Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(11): 871-873.
- [15] 孟晓波, 廖永力, 李锐海, 等. 金属管道受入地电流影响的抑制措施研究[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 62-67.  
MENG Xiao-bo, LIAO Yong-li, LI Rui-hai, etc. Research on Repressive Measures of the Influence of the Ground Return Current on the Metallic Pipeline[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 62-67.
- [16] 王爱玲. 750 kV 高压交流输电线路对埋地管道的干扰规律研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013.  
WANG Ai-ling. 750 kV High-voltage AC Transmission Lines on Buried Pipelines Disturbance Study[D]. Qing-

- dao: China University of Petroleum(East China), 2013.
- [17] 曹方圆, 孟晓波, 廖永力, 等. 直流接地极对埋地金属管道影响的电路模型及应用[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3258-3264.  
CAO Fang-yuan, MENG Xiao-bo, LIAO Yong-li, et al. Circuit Model and Application for Influence of DC Ground Electrode on Buried Metal Pipelines[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3258-3264.
- [18] NACE International. CP 3-Cathodic Protection Technologist Course Manual[M]. America: NACE International, 2005.
- [19] 邱文千, 沈扬. 高土壤电阻率条件下变电所接地设计与实施[J]. 电力设计, 2006, 8(4): 73-77.  
QIU Wen-qian, SHEN Yang. Grounding Design and Applying of Transformer Substation High Soil Resistivity[J]. Power Design, 2006, 8(4): 73-77.