

油气管道阴极保护系统的动态电位控制研究

唐海波¹, 张智齐^{2*}

¹凌云科技集团有限责任公司, 湖北 武汉

²长江大学电子信息与电气工程学院, 湖北 荆州

收稿日期: 2025年9月20日; 录用日期: 2025年10月24日; 发布日期: 2025年11月10日

摘要

针对传统恒电位仪对埋地管道周边土壤参数变化适应性差、易因电位调节僵化导致管道欠保护或过保护的问题, 本文提出动态电位调控方案并研发相应的阴极保护装置。该装置通过实时监测土壤温度和电阻率, 动态调整管道保护电位, 确保其在复杂工况下仍具有较好的阴极保护效果。经实验验证, 本文所提方案优于传统方案, 也比现有文献中同类装置更能适应土壤参数的波动。研究成果可为油田、化工领域埋地管道防腐提供技术参考, 对降低腐蚀泄漏风险、延长管道服役寿命具有工程价值。

关键词

阴极保护, 埋地管道, 动态电位, 单片机

Study on Dynamic Potential Control of Cathodic Protection System for Oil and Gas Pipelines

Haibo Tang¹, Zhiqi Zhang^{2*}

¹Lingyun Science & Technology Group Co., Ltd., Wuhan Hubei

²School of Electronic Information and Electrical Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei

Received: September 20, 2025; accepted: October 24, 2025; published: November 10, 2025

Abstract

Aiming at the problems that traditional potentiostats have poor adaptability to changes in soil parameters around buried pipelines and tend to cause under-protection or over-protection of pipelines

*通讯作者。

文章引用: 唐海波, 张智齐. 油气管道阴极保护系统的动态电位控制研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1300-1308.

DOI: 10.12677/me.2025.136145

due to rigid potential adjustment, this paper proposes a dynamic potential regulation scheme and develops a corresponding cathodic protection device. The device dynamically adjusts the pipeline protection potential by real-time monitoring of soil temperature and resistivity, ensuring that it still achieves good cathodic protection effects under complex working conditions. Experimental verification shows that the proposed scheme is superior to the traditional scheme and has better adaptability to soil parameter fluctuations compared with similar devices reported in existing literature. The research results can provide technical reference for the anti-corrosion of buried pipelines in the oilfield and chemical industry fields, and have engineering value in reducing the risk of corrosion leakage and prolonging the service life of pipelines.

Keywords

Cathodic Protection, Buried Pipeline, Dynamic Potential, MCU

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial International License (CC BY-NC 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Open Access

1. 引言

油气管道常用管材为碳钢, 其兼具较高强度与刚性, 且成本低廉、易于加工, 在工程中应用广泛。由于管道多埋设于地下, 金属管壁与周边土壤、地下水等介质接触时, 极易发生化学腐蚀或电化学腐蚀, 进而引发石油或天然气泄漏事故[1] [2]。

实际工程中, 通过阴极保护法抑制管道腐蚀是一种技术成熟、应用广泛的有效方案[3] [4]。阴极保护分为牺牲阳极式阴极保护和外加电流式阴极保护两类, 长期的实践表明外加电流式阴极保护具备全生命周期成本优势, 并且调节灵活、防护稳定性高[5]。

近年来, 诸多学者致力于新型阴极保护装置的研发和阴极保护系统理论研究: 西安石油大学崔震设计了基于 STM32 单片机的长输管道阴极保护装置, 能够采集输出电压、输出电流、长输管道的参比电位等数据, 并以 L245NS 管道试件作为保护对象进行验证性实验, 为实验室阴极保护实验的搭建与实施提供了典范[6]。刘孟哲在其基础上增加了 DTU 数据传输模块, 并设计实验证明相比开环控制, 使用闭环控制算法 PID 可以使阴极保护装置在环境 PH 变化时具备更好的保护力度[7]。

此外, 在理论研究方面, 有研究表明管线钢最大的安全隐患就是有着较大的氢脆敏感性, 当阴极极化达到一定负电位时, 开始发生析氢反应, 氢原子扩散进入管线钢内部, 管线钢在外力作用下形成裂纹, 是导致金属发生氢脆或氢致开裂的主要原因[8]-[10]。中国石油大学王亚楠致力于最佳保护电位的研究, 通过实验给出了季节性冻土地区 X80 钢的最佳保护电位分布图[11]。读图可知在相同含水率下, -5°C 与 25°C 时的最佳保护电位相差约 210 mV, 且低于 0°C 时最佳保护电位已经在 $-810\text{ mV}_{\text{cse}}$ 到 $-740\text{ mV}_{\text{cse}}$ 之间 (V_{cse} 表示相比饱和硫酸铜的电位)。此时传统的保护电位准则 ($-850\text{ mV}_{\text{cse}}$) 已经不再适用, 并且可能导致被保护管道发生氢脆。

综上, 可知阴极保护的最佳电位并非固定值, 而是随着埋地区土壤电气特性的变化而变化, 并且考虑到析氢现象, 保护电位应尽量设置为保护区间中的较小值。现役阴极保护装置并未考虑这一影响, 因此本文提出动态电位的阴极保护方案。

2. 阴极保护装置总体设计

如图 1 所示, 阴极保护装置作为埋地管道腐蚀防护的核心单元, 通过多组件协同与数据交互, 构建

起“感知 - 控制 - 传输”一体化的智能防护体系。装置采用动态电位的阴极保护方案, 通过复合传感器实现对土壤电阻率和温度数据的实时采集, 系统依据相关标准与采集到的土壤参数动态调整保护电位, 从而有效应对不同土壤状况对阴极保护效果的影响。

其中参比电极是测量管道电位的基点, 实际工程中一般采用饱和硫酸铜参比电极; 辅助阳极接入装置的输出正极, 用于向管道提供保护电流, 使管道表面形成阴极以抑制腐蚀; 复合传感器探头埋设于管道附近, 测量土壤温度、电阻率等影响电气特性的参数; 装置通过测试桩与埋地管道接线, 并提供现场测试点。

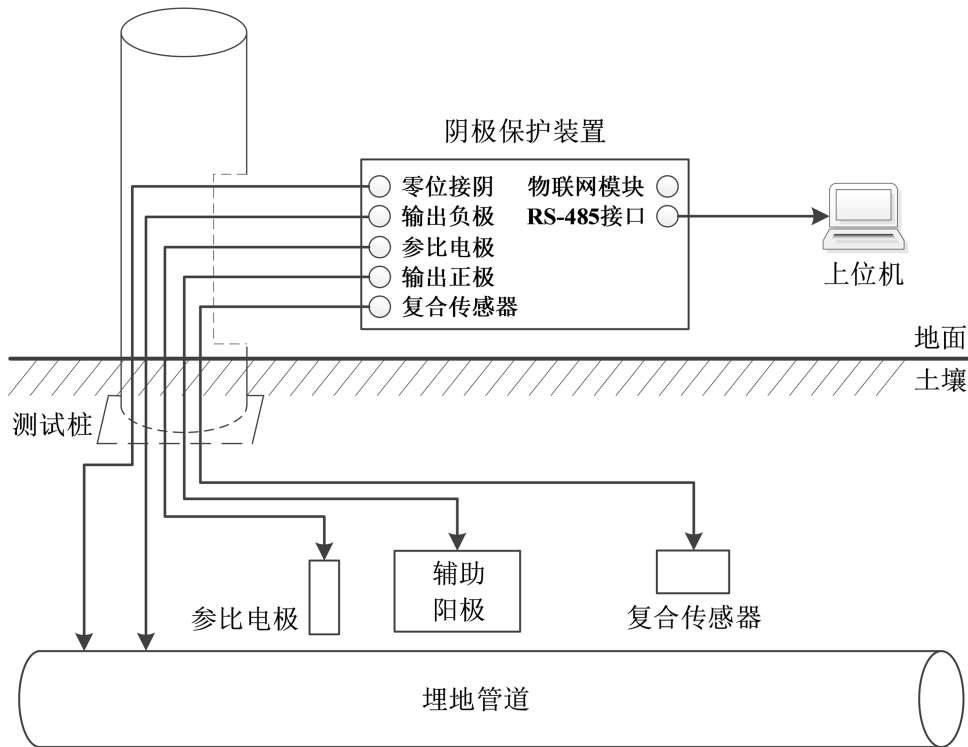


Figure 1. System architecture diagram of cathodic protection device
图 1. 阴极保护装置系统架构图

3. 硬件系统设计

3.1. 主功率输出电路设计

主功率电路负责为管道提供持续、可控的电压电流, 整体采用 AC-DC 降压 + 同步 BUCK 拓扑的两级架构, 具体方案如下。

电路前级采用工业级 AC-DC 模块, 将交流电转换为 36 V 直流电, 具有宽输入电压与高转换效率, 可适应电网波动, 同时通过隔离设计保障后级电路安全, 为同步 BUCK 拓扑提供稳定的直流母线电压。电路后级采用同步 BUCK 拓扑结构, 如图 2 所示: 电路选用低导通电阻的 N 沟道 MOS 管作为开关元件, 其驱动电路采用专用 IC, 通过提高栅极电压(典型值 12 V)的方式增强 MOS 管导通能力, 有效减小 MOS 管开关损耗, 同时搭配阻尼电阻、放电二极管等外围元件优化 MOS 管驱动波形, 抑制电压尖峰与振荡。为保护后级电路安全, 在 BUCK 输出端串联保险丝, 当电路出现短路、过载等异常导致电流超过阈值时保险丝快速熔断切断供电回路。

图 2. 主功率输出电路图

信号调理电路负责主功率电路输入电压、输出电压、输出电流、管道电位的采样,是控制系统进行闭环控制的依据。

图 3. 电压采样电路图

管道电位采样电路如图 5 所示。管道电位作为闭环控制的反馈量,其采样结果的准确性直接影响闭环控制的效果,本方案采用仪表放大器进行差分采样:仪表放大器在差分运放的基础上增加了输入缓冲级,改善差分运放的输入阻抗低这一缺陷,能够最大程度减少信号衰减。仪表放大器的同相输入端接管道,反相输入端接参比电极,增益为 1。由于管道电位有正有负(相对参比电极),因此仪表放大器采用双电源供电。此外,再叠加 2.5 V 电压,把输出信号调理至 ADC 量程内。

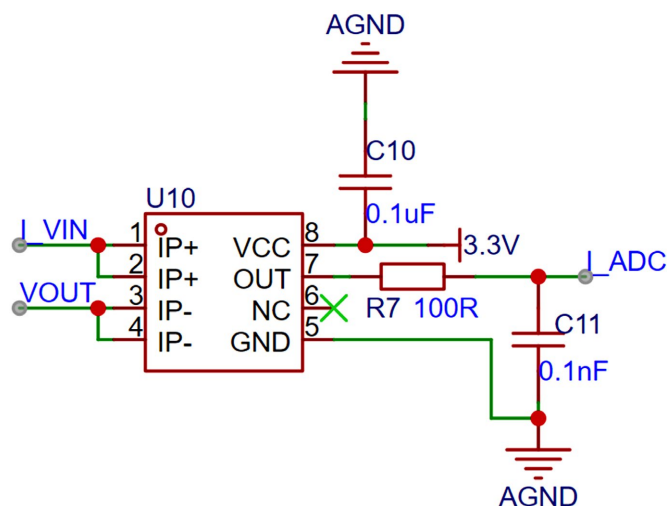


Figure 4. Current sampling circuit diagram
图 4. 电流采样电路图

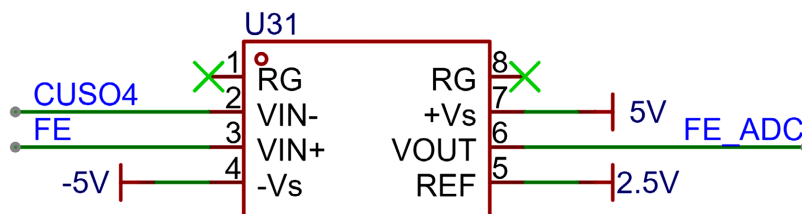


Figure 5. Pipeline potential sampling circuit diagram
图 5. 管道电位采样电路图

4. 软件系统设计

软件设计采用 RTOS 实时操作系统, 将功能模块划分为多个线程并行, 优点是一方面可解耦不同的功能模块, 实现任务的高效调度与管理, 另一方面是系统实时性强。此处着重介绍系统输出程序设计和管道电位动态调整程序设计。

4.1. 系统输出程序设计

系统输出程序是整个阴极保护控制系统实现精准调控的核心执行模块, 其功能是根据 AD 采样结果动态调整保护电位, 控制算法再依据该保护电位计算输出结果, 并对功率电路进行实时调控, 确保管道处于有效阴极保护状态。

系统输出程序流程如图 6 所示。首先创建周期性任务, 该任务的周期是 1 ms。当定时周期到达时, 系统对 ADC 进行滤波, 解析后得到土壤温度和电阻率, 依据此时的测量值调整管道保护电位, 继而进行 PID 计算, PID 算法通过管道电位测量值与设定值的偏差进行比例、积分、微分运算, 得到用于调节 BUCK 电路输出的控制量。

4.2. 管道电位动态调整程序设计

GB/T 21448-2017《埋地钢质管道阴极保护技术规范》中对金属材料在土壤、水中的最小电位的规定如表 1 所示, 并明确指出在管道寿命周期内, 应考虑管道周围介质电阻率变化对阴极保护电位的影响[12]。

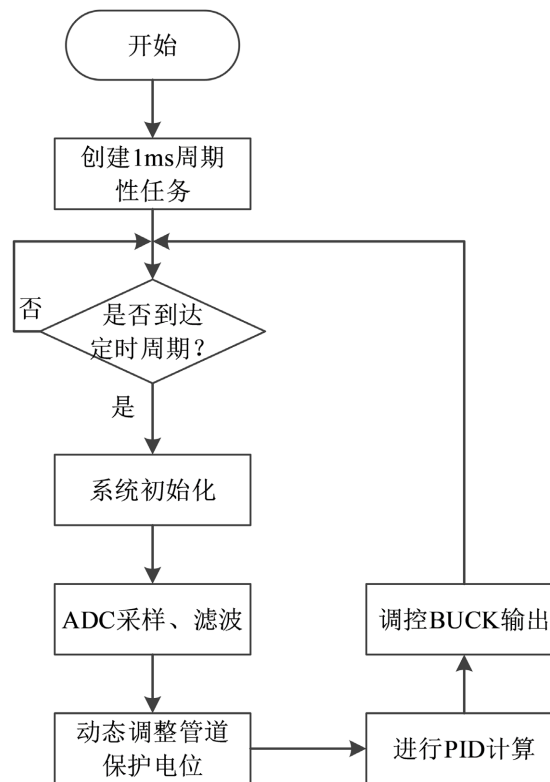


Figure 6. System output program flow chart

图 6. 系统输出程序流程图

Table 1. Reference table for minimum protection potential of carbon steel in soil and water**表 1.** 碳钢在土壤和水中的最小保护电位参考表

金属或合金	环境条件	自然电位参考值 V	最小保护电位 V
碳钢、低合金钢和 铸铁	一般土壤和水环境	-0.65~-0.4	-0.85
	40℃ < T < 60℃ 的土壤和水环境	-	取两端点电位线性插值
	T > 60℃ 的土壤和水环境	-0.8~-0.5	-0.95
	T < 40℃, 100 < ρ < 1000Ω·m	-0.5~-0.3	-0.75
	T < 40℃, ρ > 1000 Ω·m	-0.4~-0.2	-0.65
	含硫酸盐还原菌的缺氧环境	-0.8~-0.65	-0.95

依据该表对管道电位进行动态调整, 程序流程如图 7 所示。其中 T 表示温度, ρ 表示电阻率, E_p 表示保护电位设定值。当 $T > 60^\circ\text{C}$ 时, 设定 E_p 为 -0.95V ; 当 $T < 40^\circ\text{C}$ 并且 $100 < \rho < 1000$ 时, 设定 E_p 为 -0.75V ; 当 $T < 40^\circ\text{C}$ 并且 $\rho > 1000$ 时, 设定 E_p 为 -0.65V ; 当 $40^\circ\text{C} < T < 60^\circ\text{C}$ 时, 以 40°C 时的 E_p 和 60°C 时的 E_p 为两端点进行线性插值。如果均不满足上述条件, 则设定为默认值 -0.85V 。

注意: (1) 上表所有电位值均以饱和硫酸铜参比电极为参考基准。

(2) 由于目前对硫酸盐还原菌和土壤含氧量的检测尚无成熟的在线测量方法, 因此本研究暂不将这两项参数纳入复合传感器的检测范畴。

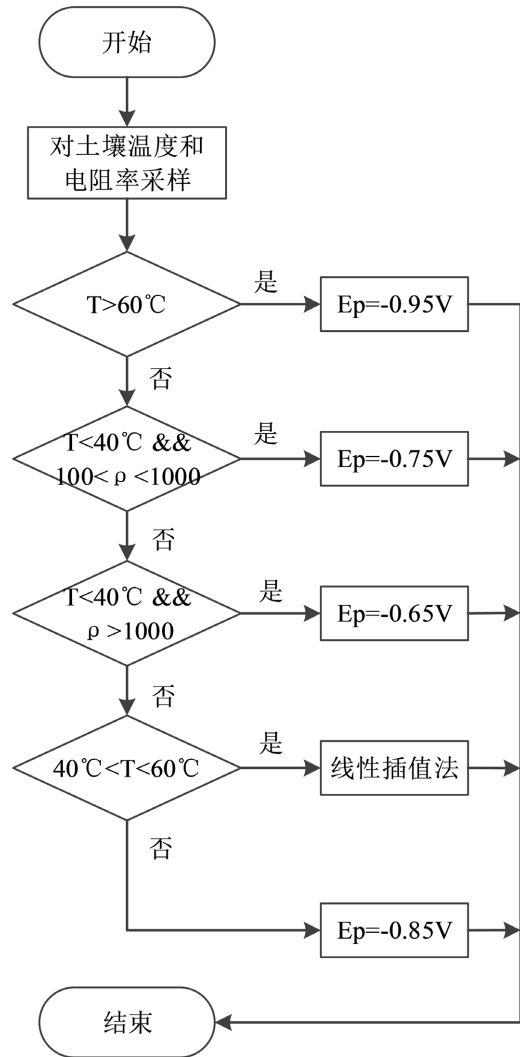


Figure 7. Pipeline potential adjustment program flow chart
图 7. 管道电位调整程序流程图

5. 实验与功能验证

5.1. 实验平台搭建

如图 8 所示, 实验平台由 20#无缝钢管、便携式饱和硫酸铜参比电极、石墨阳极、土壤溶液(NS4)组成。其中实验用钢管选用含碳量为 0.2%的 20#无缝钢管, 初始重量均为 300g, 参比电极选用饱和硫酸铜参比电极(相比标准氢电极电位为 316 mV), 辅助阳极选用电性好且不易腐蚀的石墨, 土壤溶液参照美国国际腐蚀工程师协会的规定进行配置。

5.2. 实验描述

本研究共设置三组对照实验, 具体如下:

- 第 1 组为空白对照组, 不对管道施加任何阴极保护措施;
- 第 2 组采用传统恒电位仪方案, 对管道实施阴极保护;
- 第 3 组采用本文提出的动态电位阴极保护方案, 对管道进行保护。

实验中, 初始土壤溶液的调配比例保持完全一致; 在实验过程中, 持续同步调整土壤溶液的配比, 以此模拟土壤电气特性动态变化的场景。实验总时长为 36 小时, 每间隔 4 小时记录一次管道的实际电位。

实验结束后, 取出三组实验所用的钢管, 去除表面腐蚀物, 经干燥处理后称重, 通过钢管腐蚀前后的重量损失差异判断不同阴极保护方案的防护效果。



Figure 8. Overview diagram of experimental apparatus
图 8. 实验用具概览图

5.3. 实验结果

如表 2 所示, 通过分析管道电位监测数据可知, 使用传统恒电位仪方案时, 无论土壤温度和电阻率发生何种变化, 管道电位始终维持在 $-0.85 V_{cse}$ 附近, 缺乏对环境的适应性调节能力。使用本文所提出的动态电位的阴极保护方案时, 当土壤温度和电阻率变化时, 系统会对管道电位进行动态调节, 既能避免因管道电位过低(过度负偏)引发的氢脆风险, 又能防止因电位过高(偏正)导致阴极保护效果不足的问题。

Table 2. Pipeline potential record table
表 2. 管道电位记录表

实验时间(h)	第 2 组(传统恒电位仪方案) 管道电位(V_{cse})	第 3 组(动态电位方案) 管道电位(V_{cse})
0	-0.85	-0.75
4	-0.85	-0.76
8	-0.86	-0.70
12	-0.84	-0.65
16	-0.86	-0.65
20	-0.88	-0.85
24	-0.85	-0.90
28	-0.87	-0.91
32	-0.85	-0.95
36	-0.85	-0.90

实验结束后对管道进行称重检测, 第 1 组(无保护)管道重量为 295.7 g, 第 2 组(传统恒电位仪方案)管道重量为 298.3 g, 第 3 组(本文所提动态电位方案)管道重量为 299.7 g。结合电位监测与重量数据可得出结论: 本文设计的动态电位阴极保护方案能通过自适应调节管道电位, 有效抑制管道腐蚀, 其对管道的保护效果优于无保护状态和传统恒电位仪方案。

6. 总结

针对传统恒电位仪对管道埋地区环境适应性差、易因电位调节僵化导致管道欠保护或过保护这一问题, 本文以提升阴极保护装置的适应性、安全性、稳定性为目标, 通过硬件设计、软件设计与实验验证, 完成了动态电位阴极保护装置的研发与性能验证, 核心研究成果总结如下。

其一, 构建了适配动态调控需求的软硬件系统。硬件层面, 主功率部分以 BUCK 拓扑为核心, 通过控制功率管的通断实现装置的可调输出。信号调理部分通过运放构建衰减器检测输入输出电压、霍尔效应电流传感器采样输出电流, 仪表放大器采样管道电位, 同时通过信号幅值调理, 将各类检测信号统一调节到 ADC 的有效采样范围, 确保反馈数据的准确性。软件层面, 构建“参数采集-算法计算-输出控制”的闭环调控: 通过对土壤参数的采集动态调整管道保护电位, 并依托 PID 控制算法进行闭环控制, 再通过定时器输出比较单元生成带死区控制的互补 PWM 信号调整开关管的导通占空比控制 BUCK 电路的输出, 最终维持管道电位在有效的阴极保护范围。

其二, 通过对照实验验证本文所提动态电位阴极保护方案对管道的保护效果优于传统方案与无保护状态, 也比现有文献中同类装置更能适应土壤参数的波动, 可为油田、化工等领域埋地管道防腐提供实用技术参考, 对延长管道服役寿命、降低维护成本具有实际意义。

参考文献

- [1] 侯盟, 安雪微. 长输石油管道联合阴极防腐保护技术研究[J]. 山西化工, 2025, 45(8): 175-176, 191.
- [2] 张宪东. 国内外管道腐蚀与防护研究进展[J]. 全面腐蚀控制, 2018, 32(7): 88-89.
- [3] 王琰冬. 天然气用钢管的腐蚀及防护措施[J]. 石化技术, 2025, 32(7): 315-317.
- [4] 王泽森. 油气储运中的管道防腐问题分析[J]. 石油和化工设备, 2025, 28(8): 229-232.
- [5] 谷银龙. 油田埋地管道阴极保护系统应用效果及节能分析[J]. 石油石化节能与计量, 2025, 15(9): 27-32.
- [6] 崔震. 长输管道阴极保护装置的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2019.
- [7] 刘孟哲. 基于 stm32 的油气管道阴极保护装置的开发[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- [8] 李勇峰, 蔡丽安, 阚文彬, 等. 氢在低碳钢中的渗透扩散特性[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2013, 39(2): 222-227.
- [9] 孙冰冰. 阴极保护条件下 X80 钢在新疆农田土壤和模拟溶液中的氢脆敏感性差异研究[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(6): 551-554, 559.
- [10] Javidi, M. and Bahalaou Horeh, S. (2014) Investigating the Mechanism of Stress Corrosion Cracking in Near-Neutral and High pH Environments for API 5L X52 Steel. *Corrosion Science*, **80**, 213-220. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.11.031>
- [11] 王亚楠. X80 钢在季节性冻土中的腐蚀行为及最佳阴保电位研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
- [12] 全国石油天然气标准化技术委员会(SAC/TC355). GB/T21448-2017 埋地钢质管道阴极保护技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.