

长输油气埋地管道阴极保护检测系统研制与应用

诸海博^{1,2}, 李洪伟, 付明东, 李中宇, 洪戈

(沈阳仪表科学研究院有限公司, 沈阳 110043)

摘要: 埋地管道阴极保护有效性检测是管道防腐蚀的重要手段。针对我国复杂的电磁干扰环境设计了一套管道阴极保护检测系统, 包括主机、同步卫星中断器、探杖、绕线器及卫星导航手簿。通过对检测系统进行实验室与试验场的测试, 验证了系统的直流电压检测、交流电压检测与抗电磁干扰能力。并在役管道中上进行应用, 开展检测数据结果比对分析。检测结果表明, 该检测系统具备较强的检测能力, 与进口设备检测结果保持一致, 具有很强的实用性, 为未来系统国产化推广起到一定作用。

关键词: 埋地管道; 阴极保护; 防腐蚀; 检测系统; 国产化;

中图分类号: TE8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 53510

1 传感器设计背景和应用价值

设计背景: 长输油气埋地管道是作为运输工具的一种运输方式, 是一种专门由生产地向市场输送石油、煤和化学产品的运输方式, 是统一运输网中干线运输的特殊组成部分。近些年, 管道健康运行越来越得到国家的重视, 如何进行管道防护将对国家能源安全有着重大意义。

目前, 管体的腐蚀防护通常采用外防腐层与外加阴极保护系统相结合的方式, 这是管道安全运行的重要保证措施。

国内市场均使用国外进口设备对管道阴极保护进行检测, 但一般来说, 国外设备均参考其本国的地理环境进行设计, 并未考虑到我国地理环境的复杂性, 所以对一些地理环境差异较大的地方, 设备往往会出现失效的情况, 不利于管道的安全运营与管理。

结合以上需求, 开发一种用于长输油气埋地管道阴极保护有效性的检测系统, 该系统经过相关的环境试验与现场检测, 均取得了良好的检测效果, 可满足现场的实际使用需求。

应用价值: 根据 GB/T 30582-2014《基于风险的埋地钢质管道外损伤检验与评价》、SY/T

¹第一作者信息: 诸海博, 男, 高级工程师, 管道结构健康, 494016059@qq.com

²通讯作者信息: 诸海博, 男, 高级工程师, 管道结构健康, 494016059@qq.com

0087.1 《钢质管道及储罐腐蚀评价标准 第1部分：埋地钢质管道外腐蚀直接评价等法律、法规、国标、行标要求》，需要定期对长输油气管道开展检验检测工作，管道防腐层完整性检测和阴极保护有效性检测是管道外防腐系统检验检测的重要内容。利用此系统可完成对管道外防腐系统的检验，有力保障管道安全运营。

2 创新点与优势

2.1 基于反相去噪原理的电磁抗干扰技术

抗电磁干扰技术将采用硬件低通滤波器+反相消噪的形式来完成。硬件低通滤波器采用的是高阶低通滤波器，主要抑制检测环境中的工频干扰；反相消噪控制是将探头采集信号的交流部分进行数据处理并生成反向信号叠加到输入信号中，实现动态抑制电磁干扰，其工作原理如图 3：

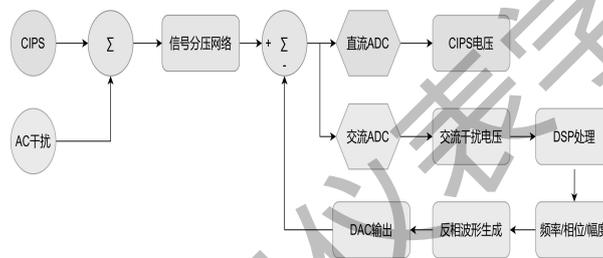


图1 反相去噪原理图

阴极保护原始信号传输到多功能数据采集器中，首先通过交流 ADC 对其进行采集，交流 ADC 将信号传输至 DSP，DSP 分析当前数据的频率、相位、赋值后，生成一个反相交流信号并通过 DAC 将其输出并与原始信号进行叠加，此时叠加后的信号再由直流 ADC 进行转换并得到最后的阴极保护电压。

2.2 基于自动补偿模式的高阻抗智能匹配

通常情况下，密间隔设备根据实际检测环境，为设备设定高低二个输入阻抗。低阻抗用于土壤电阻率较大，电阻较小的环境。而高阻抗用于沙漠，干旱等复杂环境。本项目依据现有设备使用经验，同样设定高低二个输入阻抗，低阻抗为 $20M\Omega$ ，通用与较好环境的土壤。但在高阻抗方面，引入智能阻抗优化设计模型，可有效消除高阻抗引起的噪声电压，更直接获取管地真实电位。设计模型通常 $\geq 500M\Omega$ ，最大可达 $1000M\Omega$ 。

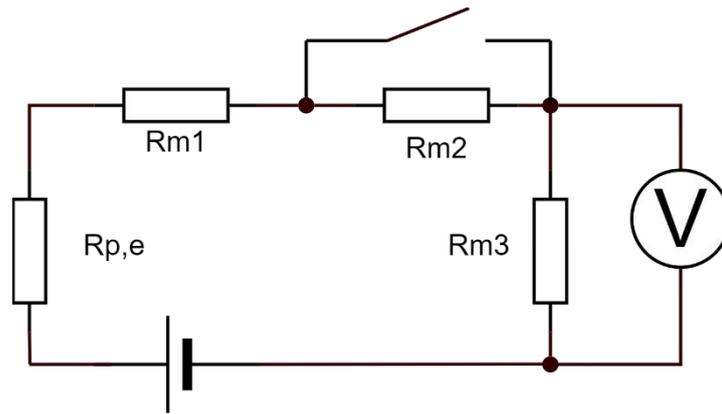


图2 输入阻抗智能补偿优化原理

$$E_{\text{true}} = \frac{V_h (1-K)}{1-K \frac{V_h}{V_1}}$$

E_{true} =真实电压;

K =输入阻抗之比 R_1 / R_h ;

R_1 =系统最小的输入阻抗;

R_h =系统最大的输入阻抗;

V_1 =最小输入阻抗下的检测电位;

V_h =最大输入阻抗下的检测电位;

此模型先后采集 K 开关前后的两次测量值，通过公式计算消除内阻带来的误差

$$R_h = R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + R_{p,e}$$

$$R_1 = R_{m1} + R_{m3} + R_{p,e}$$

优势:

免除数百 $M\Omega$ 电阻的使用: 噪声大, 体积大; 等效输入阻抗可达 $1000M\Omega$; 避免高输入阻抗带来的副作用 (数据质量降低, 天线效应, 更易受干扰)

3 实现方案简介

3.1 设计原理

埋地管道的腐蚀实际上是管道本体金属的成分铁在腐蚀环境中失去电子的过程, 通常情况下, 长输油气埋地管道均采用外加电流的方式进行阴极保护, 即通过向管道表面提供阴极

电流，使管/地电位发生阴极极化，从而控制管道外壁发生腐蚀，其原理如图 3。

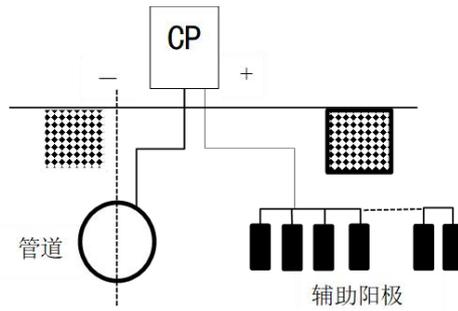


图 3 埋地管道阴极保护原理图

最初管道阴极保护电位的测量采用饱和硫酸铜溶液电极作为参比电极，测量仪器通常高精度数字万用表即可，测量示意图如图 4：

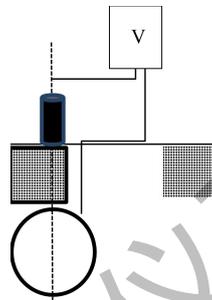


图 4 管道电位测试原理

在阴极保护条件下，按照图 4 中的方法测试的电位为通电电位。在电位测量回路中因为有电流流动，所测量的电位中总是存在一个电阻电压降，即为 IR 降。通电电位与 IR 降的差值即为断电电位，被近似看作管道真实的极化电位。

因此在工程测量中，通常采用断电法进行测量以消除 IR 降电位，测量时在对测量区间有影响的阴极保护电源上安装电流同步中断器，并设置合理的通/断周期，一般的通断时间比为 4:1，使用电压表测量通电电位和断电电位，断电电位即是管道的真实阴极保护电位。

3.2 设计方法

管道阴极保护检测系统包括主机、绕线器、检测探杖（饱和硫酸铜溶液参比电极）、卫星导航手簿、同步卫星中断器组成。其系统框图如图 5，检测原理图如图 6：

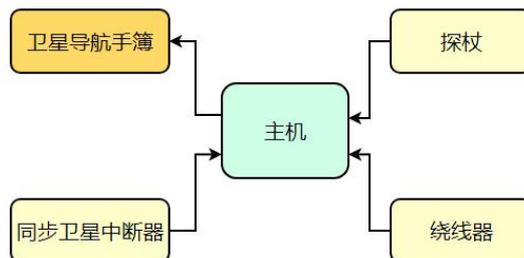


图 5 管道阴极保护检测系统框图

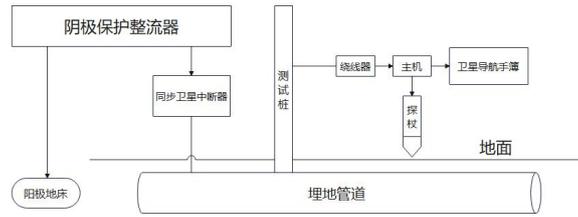


图 6 管道阴极保护检测原理

管道阴极保护检测系统工作原理如下：

阴极保护整流器一端接入阳极地床，一端接入管道，使其成为闭合回路，不断地给管道施加负电流，使管道不断的得到电子，发生还原反应，保护管道不被周围环境腐蚀。

当被测管道需要进行阴极保护检测时，由于采用的是断电法进行消除 IR 降电位，用以测量真实电位。所以，需要在阴极保护整流器与管道之间加入同步卫星中断器，并设置同步卫星中断器合理的通/断时间比。同时，在目标管道的测试桩上连接检测系统，通过绕线器将管道的电信号引入到主机中，主机与探杖相连，插入管道上方地面。使管道、测试桩、绕线器、主机、探杖组成闭合电信号检测回路。由于主机中携带有卫星通讯模块，可以调整主机采集信号的时间与中断器通/断时间同步，保证检测信号的准确性。

主机可将检测信息经过蓝牙通讯协议传输至卫星导航手簿中，此时，检测人员可通过卫星导航手簿实时观察埋地管道的阴极保护有效性，并给予相应的评价。

3.3 实验验证过程

试验平台由管道阴极保护检测系统、标准电压源、多功能电压表、数字万用表构成。测试平台如图 7 所示，



图 7 实验室测试平台

将检测系统、标准电压源及多功能电压表进行连接，利用饱和硫酸铜溶液参比电极进行测试，正常的管道阴极保护电位基在 $-0.85\text{V}\sim-1.4\text{V}$ 之间，考虑到在实际检测中，管道阴极保护电位有可能受杂散电流的干扰，此次实验的电位测试范围为 $-0.1\text{V}\sim-4\text{V}$ ，系统测试结果

如表 1 所示：

表 1 检测系统直流信号测试结果

标准电压源 (V)	检测系统 (V)	数字万用表 (V)
-0.10000	-0.1005	-0.0997
-0.20000	-0.2005	-0.1996
-0.25000	-0.2505	-0.2497
-0.50000	-0.5005	-0.4998
-0.80000	-0.8004	-0.7999
-0.90000	-0.9004	-0.8999
-1.00000	-1.0004	-0.9999
-2.00000	-1.9992	-1.9993
-3.00000	-2.9993	-2.9997
-4.00000	-3.9993	-4.0001

通过表 1 结果可知，管道阴极保护检测系统具有良好的直流电信号检测结果，其最大误差为 5.00%。

将检测系统、交流源及数字电压表进行连接，考虑到在实际检测中，管道阴极保护电位有可能受杂散电流的干扰，该系统具备检测交流电压分量的功能，此次实验的电位测试范围为 1V/Hz~100V/Hz，系统测试结果如表 2 所示：

表 2 检测系统交流信号测试结果

交流电压源 (V/50Hz)	检测系统 (V)	数字万用表 (V)
1	0.9983	0.9992
10	9.9722	9.9831
50	49.8688	49.8712
100	99.8351	99.8389

通过表 2 结果可知，管道阴极保护检测系统具有良好的交流电信号检测结果，其最大误差为 2.78%。

将检测系统、标准电压源、交流源及数字电压表进行连接，考虑到在实际检测中，管道阴极保护电位有可能受杂散电流的干扰，用以测试检测系统在杂散电流干扰下对有用电信信

号的检测能力,此次实验的电位测试范围为 1V/50Hz~100V/50Hz,系统测试结果如表 3 所示:

表 3 检测系统在交流信号干扰下的直流信号测试

交流电压源 (V/50Hz)	标准电压 源 (V)	检测系统 (V)	数字万用 表 (V)
5	-0.75000	-0.74~-0.75	-0.747
10		-0.74~-0.75	-0.749
20		-0.74~-0.75	-0.749
30		-0.72~-0.75	-0.750
5	-0.85000	-0.844~-0.852	-0.847
10		-0.834~-0.860	-0.847
20		-0.827~-0.857	-0.847
30		-0.816~-0.879	-0.846
5	-1.15000	-1.142~-1.156	-1.148
10		-1.136~-1.160	-1.149
20		-1.132~-1.163	-1.150
30		-1.111~-1.189	-1.148
5	-1.25000	-1.240~-1.250	-1.248
10		-1.240~-1.255	-1.248
20		-1.229~-1.269	-1.249
30		-1.221~-1.238	-1.247

通过表 3 结果可知,管道阴极保护检测系统具有良好的扛交流干扰检测能力,但随着交流干扰的强度增大,抗干扰能力也随之渐弱。

本次测试主要通过搭建真实的管道阴极保护有效性检测现场验证检测系统在同步卫星中断器接入的情况下检测的一致性。检测系统实物图如图 8:



图 8 检测系统实物图

将检测系统搭建完毕，并在测试桩接入电压源与同步卫星中断器，其连接方式满足图 6。此时，中断器设定通/断时间为通 800ms，断 200ms；电压源输出电压为-1.5V。为了更好地验证检测系统的结果，将用示波器对中断器输出端进行测试并与系统检测结果进行比对。示波器显示结果如图 9，检测系统结果如图 10：

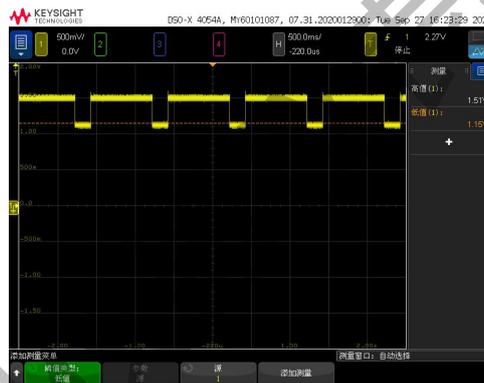


图 9 示波器检测结果

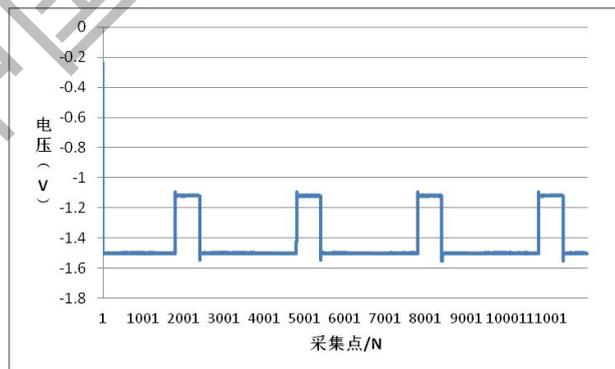


图 10 检测系统检测结果

通过图 9 与图 10 对比可知，示波器与检测系统检测的电信号具有一定的周期性，且二者波形一致，但示波器的信号为正，检测系统的信号为负，检测到的通断信号的电位绝对值均为：通电电位 1.51V，断电电位 0.9V。试验验证了检测系统在同步卫星中断器接入时具有

良好的检测效果，为后续设备的现场应用起到夯实的基础。

为了进一步验证检测系统的工程化应用，本次现场应用在辽宁境内辽鞍线某段进行工程对比测试，操作人员采用美国米勒设备与管道阴极保护检测系统在同一环境下进行检测，现场工作情况如图 11：



图 11 现场测试

美国米勒设备是管道阴极保护有效性检测的专用设备，检测结果具有一定的代表性，其结果如图 12：

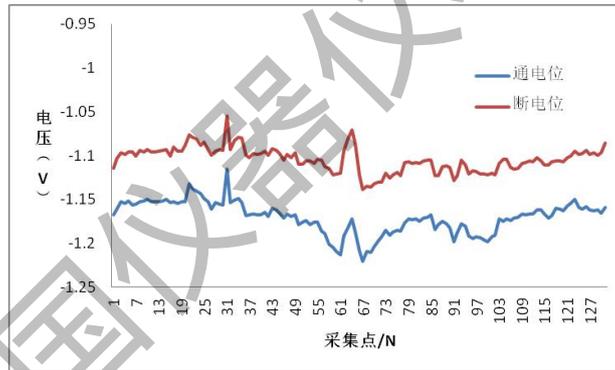


图 12 美国米勒设备检测结果

通过图 12 可以看出该段埋地管道的阴极保护断电位在 $-1.15\text{V} \sim -1.05\text{V}$ 之间，符合标准规定的 $-1.4\text{V} \sim -0.85\text{V}$ 。

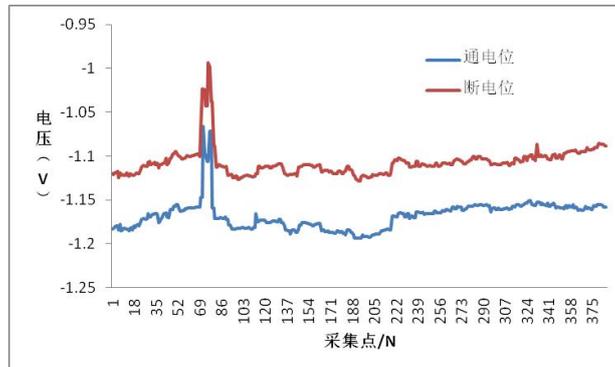


图 13 检测系统检测结果

通过图 13 可以看出该段埋地管道的阴极保护断电位在 $-1.15\text{V}\sim-1.00\text{V}$ 之间,符合标准规定的 $-1.4\text{V}\sim-0.85\text{V}$ 。

对比二个设备的检测结果可以看出,管道阴极保护检测系统采集点较多,而美国米勒设备检测采集点较少,且波形显示略有区别,原因是检测系统的采集模式为固定时间采集,而美国米勒设备是按键采集,所以造成二者在检测过程中绘制的信号不一致的情况,但检测结果保持一致。

针对现有长输油气埋地管道的铺设条件,自主开发一套埋地管道阴极保护检测系统,其包括主机、探杖、同步卫星手簿、同步卫星中断器、绕线器等。根据使用条件对系统进行实验室测试与试验场测试,同时对系统做出了现场应用与比对得出如下结论:

- (1) 管道阴极保护检测系统具有良好直流电压检测精度与交流电压检测精度;
- (2) 管道阴极保护检测系统具备较强的扛交流干扰能力;
- (3) 针对现场应用情况,管道阴极保护检测系统检测结果与美国米勒设备保持一致,但其采集方式应进行优化。

参考文献:

- [1] 温宁华, 吴广春, 张瑶等. 埋地钢质管道阴极保护的研究进展[J]. 材料保护, 2022, 55(12):177-184.
- [2] 董绍华, 袁士义, 张来斌等. 长输油气管道安全与完整性管理技术发展战略研究[J]. 石油科学通报, 2022, 7(03):435-446.
- [3] 包黄莉, 汤彬坤, 冯阳等. 管道杂散电流干扰及防腐层破损分析[J]. 无损检测, 2023, 45(05):1-5+15.
- [4] 王飞. 油气储运管道防腐技术的应用[J]. 全面腐蚀控制, 2022, 36(10):121-122.
- [5] GB/T 30582-2014, 基于风险的埋地钢质管道外损伤检验与评价[S].
- [6] SY/T 0087.1-2006, 钢制管道及储罐腐蚀评价标准 埋地钢质管道外腐蚀直接评价[S].
- [7] 于淑珍, 刘明, 韩鹏刚. 某气田集输管线阴极保护检测与优化设计[J]. 材料保护, 2021, 54(7):146-149 154.
- [8] 李伟, 郭艳伟, 刘礼良等. 杂散电流干扰下埋地管道阴极保护有效性检测与评价[J]. 石油化工设备, 2021, 50(03):23-28.
- [9] 王磊磊, 舒亮, 叶建豹等. 站内外管道联合阴极保护方法的原理及应用效果[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(08):53-56+85.

- [10] 潘宗江, 杨威, 韩毅等. 阴极保护在埋地钢质管道的应用[J]. 全面腐蚀控制, 2022, 36(09):47-49+55.
- [11] 刘国. 阴极保护机理的介绍与浅议[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(08):76-80.
- [12] 周勇, 王楠, 郭自新等. 绝缘防腐层缺陷对油气管线阴极保护中 IR 降的影响[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(09):753-755+763.
- [13] 杨超, 韩庆, 王艺璇等. 多因素影响下管道阴保 IR 降的计算方法[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(01):58-62.
- [14] 陈金忠, 王俊杰, 马义来等. 基于电流测量的管道阴极保护状态内检测技术[J]. 无损检测, 2018, 40(06):9-11+31.
- [15] 吴斌. 交流排流设施对埋地管道阴极保护断电电位测试结果的影响[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(09):88-92.

中国仪器仪表表学