

ICS 77.060

CCS H 25



中国腐蚀与防护学会团体标准

T/CSCP 0069-2026 (T/CSCP 0069.4-2026)

城市燃气管道外腐蚀多因素高通量监测与 寿命智能管理平台技术规范

Urban gas pipeline — Technical specification for multi-factor high-throughput monitoring of external corrosion and intelligent life management platform

2026-04-01 发布

2026-07-01 实施

中国腐蚀与防护学会 发布

目 次

前 言	II
引 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4.基本原则	2
4.1 系统性原则	3
4.2 动态性原则	3
4.3 数据驱动原则	3
4.4 可扩展性原则	3
4.5 安全性与可靠性原则	3
4.6 经济性原则	3
5 智能管理平台系统架构	3
5.1 系统总体架构	3
5.2 系统组成单元	4
5.3 系统性能要求	4
6 智能感知与传感器技术要求	4
6.1 极化探头	4
6.2 杂散电流传感器	5
6.3 土壤环境参数传感器	5
6.4 腐蚀速率传感器	6
6.5 腐蚀控制参数传感器	6
6.6 智能恒电位仪	7
6.7 长效参比电极	7
6.8 土壤微生物传感器	7
6.9 土壤气体传感器	8
6.10 应变传感器	8
6.11 位移传感器	8
6.12 振动传感器	9
6.13 传感器选型与配置原则	9

7 数据采集与传输	9
7.1 数据采集要求	9
7.2 数据传输要求	10
7.3 数据质量控制	10
7.4 数据安全性与隐私	10
7.5 数据存储与管理	11
8 数据分析与智能决策	11
8.1 数据分析方法	11
8.2 阴极保护数字孪生	13
8.3 阴极保护效果评价与预警	13
8.4 智能决策与控制	14
9 系统安装与调试	15
9.1 安装前准备	15
9.2 传感器安装	15
9.3 数据采集与传输设备安装	16
9.4 接地与防雷	16
9.5 安装验收	16
10 系统运行与维护	17
10.1 日常运行管理	17
10.2 设备维护与校准	17
10.3 设备更新与报废	18
10.4 数据安全与保密	18
10.5 持续改进	18
附录 A	19
附录 B	21
D.1 数据收集与处理	21
D.2 模型构建	21
D.3 模型校准	21
D.4 仿真应用	21
D.5 模型更新	21

前 言

本文件按照 GB/T1.1—2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国腐蚀与防护学会提出并归口。

本文件起草的单位：北京科技大学，国家材料腐蚀与防护科学数据中心，广州天韵达新材料科技有限公司，广州市南沙区贝科耐蚀新材料研究院。

本文件主要起草人：杨小佳、杜翠薇、杜艳霞、李晓刚、程学群、李众、孙雷、张帆、杨吉可、刘智勇、王伦滔、王炳钦、李清、朱仁政、王昕煜、杨国威、杨体绍。

引言

T/CSCP 0026-2026《城市燃气管道》涵盖了油气管网埋地金属管道腐蚀调查、评价、维护方法。目前，T/CSCP 0026-2026 由以下部分构成：

- 第1部分：城市燃气管道 腐蚀调查方法通用导则
- 第2部分：城市燃气管道 金属材料腐蚀程度评价方法
- 第3部分：城市燃气管道 金属材料环境腐蚀联网观测方法
- 第4部分：城市燃气管道 外腐蚀多因素高通量监测与寿命智能管理平台技术规范
- 第5部分：城市燃气管道 外腐蚀多因素高通量监测与寿命智能管理平台现场安装规范
- 第6部分：城市燃气管道 土壤环境腐蚀性分级方法
- 第7部分：城市燃气管道 土壤腐蚀性区域地图绘制指南

城市燃气管网 管道外腐蚀多因素高通量监测与寿命智能管理平台技术规范

1 范围

本文件规定了城市燃气管道外腐蚀多因素高通量监测与寿命智能管理平台的基本原则、技术要求和实施方法，包括监测内容、监测点位选择、监测设备选型与安装、数据采集与传输、数据分析与应用、设备维护与管理等内容。

本文件适用于陆上燃气输送管道、集输管道、站场埋地管线及其相关设施（如阀门、三通、弯头、补偿器、接地极等）用金属材料腐蚀情况的联网监测与智能管理。海上燃气管道可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T10123 金属和合金的腐蚀术语

GB/T21246 埋地钢质管道阴极保护参数测量方法

GB/T21447 钢质管道外腐蚀控制规范

GB/T21448 埋地钢质管道阴极保护技术规范

GB/T30582 基于风险的埋地钢质管道外腐蚀评价方法

GB32167 油气输送管道完整性管理规范

T/CSCP0037.2-2022 腐蚀大数据第2部分：大气腐蚀在线监测系统技术规范

T/CSCP0037.3-2022 腐蚀大数据第3部分：在线监测设备安装规范

T/CSCP0037.4-2022 腐蚀大数据第4部分：累积腐蚀积分电量法评价技术

T/CSCP0037.6-2022 腐蚀大数据第6部分：F指数法评价技术

T/CECS10380-2024 阴极保护参数自动采集与处理系统

T/CITS415-2025 埋地钢质管道阴极保护智能监测系统技术规范

SY/T0087.1 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

SY/T6976 管道运行监测系统技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 外腐蚀多因素高通量监测与寿命智能管理平台 multi-factor high-throughput monitoring of external corrosion and intelligent life management platform

基于实时监测数据与大数据分析技术，对城市燃气管道外腐蚀相关的多因素（土壤环境、杂散电流、阴极保护参数等）进行高通量监测，并实现管道剩余寿命预测与维护决策智能化的综合管理平台。

3.2 腐蚀大数据 corrosion big data

通过联网观测系统采集的海量、多源、时空关联的腐蚀与环境数据，经分析处理后用于腐蚀规律研究、风险预测与智能决策的数据集合。

3.3 数字孪生 digital twin

基于物理模型与实时监测数据构建的虚拟系统，用于模拟、预测和优化腐蚀控制效果与管道寿命。

3.4 动态自适应调控 dynamic adaptive control

根据实时环境变化与管道状态，自动调整阴极保护输出参数（如电位、电流）以实现最优保护的智能控制方式。

3.5 极化探头 polarized probe

内置与管道同材质试片和长效参比电极的测量装置，用于获取消除 IR 降的断电电位和自腐蚀电位。

3.6 杂散电流 stray current

在非设计回路中流动的电流，来源于电气化铁路、阴极保护系统、高压输电线路等，可加速埋地管线的电化学腐蚀。

3.7 断电电位 off-potential

中断阴极保护电流后，在 0.5s~1s 内测得的管道对参比电极电位，用于评价真实的阴极保护极化水平，消除了 IR 降影响。

3.8 通电电位 on-potential

阴极保护系统正常运行时测得的管道对参比电极电位，包含 IR 降分量。

3.9F 指数 F-index

综合多个腐蚀影响因素，通过腐蚀大数据算法计算得到的腐蚀风险指数，用于腐蚀风险分级和预警。

4.基本原则

4.1 系统性原则

智慧化阴极保护应将管道本体、土壤环境、杂散电流、阴极保护系统作为一个整体进行监测与控制。系统应覆盖环境腐蚀性因素、管道状态因素和阴极保护运行因素，形成“管线-环境”一体化监测网络。

4.2 动态性原则

阴极保护策略应基于实时监测数据动态调整，适应环境变化（如季节干湿交替、地下水位变化）与外部干扰（如杂散电流波动）。系统应具备对瞬态异常（如电气化铁路启停、施工干扰）的快速响应能力。

4.3 数据驱动原则

阴极保护系统的运行、评价与优化应基于腐蚀大数据分析结果，实现从经验判断向数据驱动的转变。数据分析应采用多元统计、机器学习、深度学习等方法，挖掘多因素耦合规律。

4.4 可扩展性原则

系统应支持监测点位的灵活扩展、传感器的动态配置以及与第三方系统的数据对接。通信协议应采用标准格式，支持异构系统的互联互通。

4.5 安全性与可靠性原则

数据传输、存储与控制指令下发应具备加密与容错机制，确保系统运行安全可靠。现场设备应具备长期稳定运行能力，适应野外恶劣环境，防护等级不低于 IP65。

4.6 经济性原则

在满足监测与控制需求的前提下，应综合考虑设备成本、安装维护成本、数据传输成本、数据分析成本，选择经济合理的系统方案。

5 智能管理平台系统架构

5.1 系统总体架构

城市燃气管道外腐蚀多因素高通量监测与寿命智能管理平台应由智能感知层、数据传输层、平台分析层和智能控制层四层架构组成：

a) 智能感知层：包括极化探头、杂散电流传感器、土壤环境传感器、腐蚀速率传感器、阴极保护参数传感器等，实现多参数实时感知；

b) 数据传输层：支持 4G/5G/NB-IoT/LoRa/光纤等多种通信方式，具备数据加密、断点续传、远程配置能力；

c) 平台分析层：部署于云平台或数据中心，包括数据清洗、特征提取、腐蚀模型计算、风险评估、数字孪生仿真等模块；

d) 智能控制层：基于分析结果，通过智能恒电位仪、排流装置等执行设备，实现阴极保护参数的动态调控。

5.2 系统组成单元

智能管理平台应包括以下功能单元：

- a) 传感器感知单元：包括极化探头、杂散电流传感器、土壤温湿度传感器、土壤电导率传感器、土壤 pH 传感器、腐蚀速率传感器等；
- b) 数据采集传输单元：包括数据采集器（RTU/DTU）、通信模块、现场总线、网关设备等，负责数据的现场汇聚、编码、加密和远程传输；
- c) 现场控制单元：包括智能恒电位仪、自动排流装置、智能测试桩等，具备远程调控和本地自动控制功能；
- d) 供电单元：包括太阳能光伏板、蓄电池、市电接入模块、电源管理系统等，确保系统长期稳定供电；
- e) 平台分析单元：部署于数据中心或云平台，包括数据清洗模块、特征提取模块、模型计算模块、风险评估模块、可视化展示模块；
- f) 智能决策单元：包括预警模型、控制策略生成模块、数字孪生仿真模块；
- g) 数据存储单元：包括实时数据库、历史数据库、模型库、案例库。

5.3 系统性能要求

智能管理平台应满足以下性能指标：

- a) 数据采集频率：阴极保护电位、杂散电流、腐蚀速率等关键参数宜采用分钟级采集（ $\leq 15\text{min}/\text{次}$ ），瞬态异常监测可采用秒级采集；土壤环境参数可采用小时级或天级采集；
- b) 数据采集精度：电位测量精度 $\leq \pm 1\text{mV}$ ，电流测量精度 $\leq \pm 1\%$ ，土壤温度精度 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$ ，土壤含水率精度 $\leq \pm 3\%$ ；
- c) 本地存储容量：现场采集器应具备至少 30 天的本地数据存储能力，数据丢失率 $\leq 0.1\%$ ；
- d) 通信可靠性：数据传输成功率应不低于 95%，通信中断后应具备自动补传机制；
- e) 系统可用性：系统年可用时间应不低于 95%，平均故障修复时间（MTTR） ≤ 48 小时；
- f) 控制响应时间：从平台决策到现场执行机构的指令下达时间 ≤ 5 分钟；
- g) 防护等级：现场设备防护等级应不低于 IP65，适用于野外长期无人值守环境；
- h) 防雷与接地：系统应具备完善的防雷与接地保护，符合国家相关标准要求。

6 智能感知与传感器技术要求

6.1 极化探头

极化探头是获取管道真实极化状态的核心传感器，技术要求如下：

a) 结构要求：

内置至少两片与管道材质相同的极化试片，分别用于测量通电电位与断电电位；

内置长效参比电极（如 Cu/CuSO_4 ），参比电极与试片距离 $\leq 50\text{mm}$ ，以减少 IR 降；

探头外壳应采用耐腐蚀高分子材料，防护等级不低于 IP68；

试片面积宜为 $10\text{cm}^2 \sim 30\text{cm}^2$ ，厚度 $\geq 3\text{mm}$ ，确保长期使用；

探头内部宜分为上下两个仓室，避免参比电极漏液污染环境，仓室间采用微孔陶瓷半透膜盐桥进行离子交换；

b) 电气性能：

电位测量范围： $-3\text{V} \sim +3\text{V}$ ；

测量精度： $\leq \pm 1\text{mV}$ ；

参比电极稳定性：电位漂移 $\leq 20\text{mV}/\text{年}$ ；

断电电位测量：具备同步中断功能，断电后 $0.5\text{s} \sim 1\text{s}$ 内完成测量；

c) 安装要求：

埋设于管道侧方 $0.3\text{m} \sim 0.5\text{m}$ 处，深度与管道埋深一致；

试片应与管道通过电缆可靠连接，连接电阻 $\leq 0.01\ \Omega$ ；

探头周围应回填原土，确保与土壤紧密接触。

6.2 杂散电流传感器

用于监测埋地管线周围杂散电流干扰情况，技术要求如下：

a) 测量能力：

同时测量交流杂散电流（频率范围 $0\text{Hz} \sim 1000\text{Hz}$ ）和直流杂散电流；

具备同步测量功能，可识别杂散电流来源方向；

支持动态杂散电流的连续追踪记录；

可区分直流干扰、交流干扰和动态干扰类型；

b) 量程与精度：

电流测量范围： $-100\text{A} \sim +100\text{A}$ （或根据现场情况定制），精度 $\leq \pm 1\%$ ；

电压测量范围： $-10\text{V} \sim +10\text{V}$ ，精度 $\leq \pm 1\%$ ；

交流频率响应： $\pm 0.5\text{dB}@0\text{Hz} \sim 1000\text{Hz}$ ；

c) 抗干扰能力：

具备电磁屏蔽设计，抗工频干扰能力 $\geq 60\text{dB}$ ；

工作温度范围： $-40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$ 。

6.3 土壤环境参数传感器

用于监测影响埋地管线腐蚀的关键土壤理化参数：

a) 土壤温湿度传感器：

采用热敏电阻法或 FDR 频域法，温度测量范围： $-40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$ ，精度 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$ ；

水分测量范围： $0 \sim 100\%$ 饱和度或 $0 \sim 0.5\text{m}^3/\text{m}^3$ 体积含水量，精度 $\leq \pm 3\%$ ；

具备温度补偿功能，传感器应具备长期稳定性，耐腐蚀、防水、防堵塞；

b) 土壤电导率传感器：

测量范围：0~20mS/cm，精度 $\leq\pm 2\%$ ；

采用四电极结构，消除接触电阻影响；

具备自动温度补偿功能；

c) 土壤 pH 传感器：

测量范围：2~12，精度 $\leq\pm 0.1\text{pH}$ ；

采用玻璃电极与 Ag/AgCl 参比电极组合结构；

具备自动清洗装置和定期校准功能；

d) 土壤总盐度传感器：

通过电导率换算或离子选择电极法测量；

测量范围：0~10000ppm，精度 $\leq\pm 5\%$ 。

6.4 腐蚀速率传感器

用于在线监测指定金属材料在埋地环境中的腐蚀速率，技术要求如下：

a) 电阻探针：

测量原理：通过测量敏感元件电阻变化计算腐蚀减薄量；

灵敏度： $\leq 0.1\ \mu\text{m}$ ；

适用环境：均匀腐蚀为主的土壤环境；

b) 电化学探针：

包含线性极化电阻 (LPR) 探针、电化学阻抗谱 (EIS) 探针等；

可实时监测瞬时腐蚀速率，响应时间 ≤ 1 小时；

适用于腐蚀速率快速变化的场景；

c) 电感探针：

灵敏度： $\leq 0.01\ \mu\text{m}$ ；

适用于长期稳定监测，不受介质导电性影响；

d) 电偶探针：

利用液膜环境下异种金属材料的电偶效应，通过腐蚀电流大小判断土壤腐蚀性强弱；

适用于土壤含水率较高或存在凝结水膜的场景；

e) 通用要求：

传感器材料应与管道主体材料一致（如 X65、X70、X80 等）；

具备温度补偿功能，消除温度波动对测量结果的影响；

设计寿命不低于 3 年。

6.5 腐蚀控制参数传感器

用于监测腐蚀控制系统（如阴极保护）运行状态，技术要求如下：

a) 管地电位传感器：

直接连接管道测试点，通过长效参比电极测量；

电位测量范围：-3V~+3V，精度 $\leq \pm 1\text{mV}$ ；

输入阻抗 $\geq 10\text{M}\Omega$ ，减少测量回路电流对电位的影响；

b) 保护电流传感器：

采用霍尔效应或磁调制原理，非接触测量；

电流测量范围：0~100A（或根据现场定制），精度 $\leq \pm 1\%$ ；

响应时间 $\leq 100\text{ms}$ ，支持瞬态电流捕捉；

c) 断电电位测量功能：

与恒电位仪同步通断，中断周期可设（如4秒通/1秒断）；

在断电后0.5s~1s内完成电位采集；

自动识别和剔除干扰数据。

6.6 智能恒电位仪

作为腐蚀控制系统的执行机构，技术要求如下：

a) 输出能力：

输出电压：0~50V（可调），输出电流：0~50A（可调）；

输出精度： $\leq \pm 1\%$ ，纹波系数 $\leq 5\%$ ；

b) 控制模式：

支持恒电位、恒电流、恒电压三种工作模式；

具备远程设定与调整输出参数功能；

支持基于实时监测数据的自动调控（如电位恒定控制、IR降补偿）；

c) 监测与通信：

实时上传输出电压、输出电流、运行状态等参数；

具备运行状态自诊断功能，异常自动报警；

支持Modbus、IEC60870-5-101/104等标准通信协议；

d) 保护功能：

具备过压、过流、短路、防雷保护；

具备手动/自动切换功能，切换过程无扰动。

6.7 长效参比电极

a) 宜选用铜/饱和硫酸铜参比电极，主体为饱和硫酸铜溶液、电极体以及多孔塞；

b) 在土壤含水量丰富或离子污染区域，应采取浸泡等预处理确保电位稳定；

c) 参比电极电位漂移 $\leq 20\text{mV}/\text{年}$ ，使用期间应定期检查电解液状态。

6.8 土壤微生物传感器

用于监测埋地管线周围土壤中微生物种群数量及活性，特别是与腐蚀相关的微生物（如硫酸盐还原菌SRB、铁氧化菌、产酸菌等）。技术要求如下：

a) 测量参数：硫酸盐还原菌（SRB）数量、铁氧化菌数量、产酸菌数量，或综合微生

物活性指标;

- b) 测量范围: $10^2 \sim 10^8$ CFU/g (或个/g), 精度不低于 $\pm 10\%$;
- c) 检测原理: 可采用培养计数法、酶活性法、阻抗法、荧光原位杂交 (FISH) 或分子生物学方法 (qPCR), 传感器应具备长期土壤埋设稳定性;
- d) 数据输出: 支持数字信号输出 (如 RS485), 输出微生物数量等级或活性指数;
- e) 安装要求: 埋设于管道侧方 0.5m~1.0m 处, 深度与管道埋深一致, 传感器探头应保持活性, 定期更换培养基或校准 (周期 ≤ 6 个月);
- f) 防护等级: 不低于 IP68。

6.9 土壤气体传感器

用于监测埋地管线周围土壤中的关键腐蚀性气体浓度。技术要求如下:

- a) 监测气体种类: 二氧化碳 (CO_2)、硫化氢 (H_2S)、氧气 (O_2), 可根据现场需要选配;
- b) 测量范围与精度:
 - CO_2 : 0~5000 ppm, 精度 $\leq \pm 5\%$ FS;
 - H_2S : 0~100 ppm, 精度 $\leq \pm 2\%$ FS;
 - O_2 : 0~25% Vol, 精度 $\leq \pm 2\%$ FS;
- c) 传感器原理: 电化学式、红外式 (NDIR) 或半导体式, 具备温度补偿和防凝露功能;
- d) 响应时间: ≤ 60 秒;
- e) 安装要求: 埋设于管道侧方 0.5m~1.0m 处, 深度与管道埋深一致, 传感器透气膜应保持畅通, 防止堵塞;
- f) 防护等级: 不低于 IP68。

6.10 应变传感器

- a) 测量参数: 管线表面环向应变、轴向应变或主应变;
- b) 测量范围: $\pm 5000 \mu \epsilon$, 精度不低于 $\pm 1 \mu \epsilon$;
- c) 传感器类型: 电阻应变片、光纤光栅应变传感器 (FBG) 或振弦式应变计;
- d) 安装要求: 粘贴或焊接于管线表面 (需局部打磨防腐层后安装, 并进行密封防水处理), 传感器引线应采取穿管保护;
- e) 防护等级: 不低于 IP68, 适用于长期埋地环境;
- f) 温度补偿: 应具备温度自补偿功能或配置温度补偿片。

6.11 位移传感器

- a) 测量参数: 管线沉降、侧向位移、接头位移或管道与土壤相对位移;
- b) 测量范围: 0~200 mm (可根据现场定制), 精度不低于 ± 1 mm;
- c) 传感器类型: 拉线式位移计、激光位移传感器、LVDT 位移传感器或基于 MEMS 的倾角仪;
- d) 安装要求: 传感器本体固定于稳定基准点 (如独立桩基或地面参考架), 测头与管

道连接；或通过固定支架安装于管道侧方；

- e) 防护等级：不低于 IP67。

6.12 振动传感器

- a) 测量参数：管线振动加速度、速度或位移幅值，以及振动频率；
- b) 测量范围：频率响应 0.1 Hz~500 Hz，加速度量程 $\pm 2\text{ g}\sim\pm 10\text{ g}$ （可选）；
- c) 精度：振幅精度 $\leq\pm 2\%$ ，频率精度 $\leq\pm 0.1\text{ Hz}$ ；
- d) 传感器类型：压电式加速度计、MEMS 加速度计或光纤振动传感器；
- e) 安装要求：刚性固定于管线表面（可焊接底座或卡箍固定），传感器敏感轴方向与测量方向一致；
- f) 防护等级：不低于 IP67；
- g) 采样频率：建议不低于 1000 Hz（用于捕捉瞬态振动）。

6.11.4 力学传感器通用要求

- a) 所有力学传感器应具备长期稳定性，适应土壤潮湿、温度变化及腐蚀环境；
- b) 信号输出：优先选用数字输出（RS485、CAN 总线）或 4-20mA 电流环；
- c) 供电：低功耗设计，支持电池或太阳能供电系统；
- d) 校准周期：应变传感器和位移传感器每 2 年校准一次，振动传感器每 1 年校准一次。

6.13 传感器选型与配置原则

- a) 应根据监测目的、环境条件、管线材质和运行参数，合理选择传感器类型和数量；
- b) 传感器量程应覆盖监测参数的可能变化范围，并留有一定余量（通常为 1.2~1.5 倍）；
- c) 传感器精度应满足数据分析要求，关键参数宜选用高精度传感器；
- d) 传感器应具备长期稳定性，标定周期不少于 1 年；
- e) 优先选用低功耗、支持数字输出、具备自诊断功能的智能传感器；
- f) 同一监测点位，传感器之间应具备空间代表性，埋设深度和位置协调一致。

7 数据采集与传输

7.1 数据采集要求

- a) 采集频率应根据监测参数动态特性和分析需求确定：
阴极保护电位、杂散电流、腐蚀速率等关键参数：宜采用分钟级采集（ $\leq 15\text{min/次}$ ）；
瞬态异常监测：可采用秒级或事件触发采集；
土壤环境参数：可根据需要调整为小时级或天级；
设备状态参数：宜每小时采集一次；
- b) 数据采集器应具备本地数据存储功能，存储容量应满足至少 30 天的数据存储需求；
- c) 数据采集器应支持远程参数配置和固件升级；
- d) 数据采集器应具备时间同步功能（如 NTP、GPS/北斗授时），确保数据时间戳一致

性，同步误差 ≤ 1 秒；

e) 关键数据应采用双通道采集或冗余设计，提高数据可靠性；

f) 采集器应具备数据有效性检查功能，如量程检查、变化率检查、一致性检查等，异常数据应标记并触发报警。

7.2 数据传输要求

a) 数据传输应采用加密方式（如 TLS/SSL、VPN），确保数据安全；

b) 通信方式选择：

优先采用有线通信（光纤、网线）或稳定可靠的无线通信方式（4G/5G/NB-IoT）；

在信号盲区可采用 LoRa、北斗短报文、卫星通信等方式；

同一系统可混合使用多种通信方式，实现冗余备份；

c) 数据传输协议应符合标准格式（如 MQTT、ModbusTCP、IEC60870-5-104），支持数据压缩和断点续传；

d) 传输周期要求：

实时性要求高的数据（如报警信息）应实时传输；

常规监测数据可定时批量传输（如每 15 分钟或每小时一次）；

历史数据补传应在通信恢复后自动执行；

e) 通信状态监测：应建立通信状态监测机制，及时发现和处理通信故障，通信中断报警时间 ≤ 30 分钟；

f) 数据传输成功率应不低于 95%。

7.3 数据质量控制

a) 现场数据质量：

数据采集器应具备数据有效性检查功能，包括量程检查、变化率检查、一致性检查等；

数据传输过程应包含校验机制（如 CRC 校验），确保数据完整性；

异常数据应标记并记录异常原因；

b) 平台数据清洗：

数据中心应建立数据清洗规则，识别和剔除异常数据；

异常数据识别方法包括：阈值法、统计法（如 3σ 原则）、变化率法、模型预测法等；

对缺失数据可采用插值、拟合等方法进行补全，但应注明数据来源和处理方式；

数据清洗过程应记录日志，便于追溯；

c) 数据验证：

定期对传感器进行现场比对和校准，验证数据准确性，校准周期 ≤ 1 年；

建立数据交叉验证机制，如同一管段不同测点数据的一致性检查；

关键参数可设置冗余传感器，通过比对验证数据可靠性。

7.4 数据安全与隐私

a) 数据传输和存储应采取加密措施，防止数据泄露和篡改；

b) 建立用户权限管理机制，不同角色用户只能访问授权数据；

- c) 关键操作（如参数修改、控制指令下发）应记录操作日志，支持审计追踪；
- d) 涉及国家关键基础设施的数据应符合国家信息安全相关规定；
- e) 数据备份应异地存储，防止单点故障导致数据丢失；
- f) 系统应具备入侵检测和防护能力，防止网络攻击。

7.5 数据存储与管理

- a) 建立集中式数据中心或云平台，统一存储和管理所有监测数据；
- b) 数据存储架构：
 - 实时数据库：存储最近 30 天的原始数据，支持高频读写；
 - 历史数据库：存储全部历史数据，支持压缩存储和快速查询；
 - 模型库：存储各类算法模型及其参数版本；
 - 案例库：存储典型异常案例及处理记录；
- c) 原始数据应长期保存（建议不少于 5 年），用于历史追溯和模型训练；
- d) 建立数据备份和容灾机制，备份频率根据数据重要性确定，关键数据应实时备份；
- e) 数据管理应遵循开放性原则，支持标准化接口（如 RESTAPI）供第三方系统调用；
- f) 定期进行数据恢复演练，验证备份数据的可用性。

8 数据分析与智能决策

8.1 数据分析方法

利用腐蚀大数据分析评价技术处理联网监测数据，可采用以下方法：

8.1.1 数据预处理与特征工程

- a) 数据清洗：识别和剔除异常值、填补缺失数据、消除噪声；
- b) 数据标准化：对不同量纲的数据进行归一化或标准化处理；
- c) 特征提取：
 - 统计特征：均值、方差、最大值、最小值、变化率等；
 - 频域特征：通过傅里叶变换提取频谱特征；
 - 时域特征：通过小波变换提取时频特征；
 - 统计特征：相关参数间的相关系数、互信息等。

8.1.2 多元统计分析方法

- a) 相关性分析：计算各监测参数与腐蚀速率、阴极保护效果之间的相关系数，识别关键影响因素；
- b) 主成分分析（PCA）：降维处理，识别影响腐蚀的主要综合因素；
- c) 聚类分析：对监测点位进行分类，识别不同环境类型和风险等级区域；
- d) 回归分析：建立环境参数与阴极保护效果之间的回归模型。

8.1.3 累积腐蚀积分电量法

按照 T/CSCP0037.4-2022 的要求，通过累积腐蚀电流或电量的时间积分，评估金属材

料的累积腐蚀损伤。该方法适用于：

- a) 量化腐蚀损伤总量，评估管道剩余寿命；
- b) 比较不同时间段、不同区域的腐蚀严重程度；
- c) 评估阴极保护效果对腐蚀的抑制程度。

8.1.4F 指数法

按照 T/CSCP0037.6-2022 的要求，综合多个腐蚀影响因素，计算腐蚀风险指数（F 指数），用于腐蚀风险分级和预警。F 指数计算应考虑以下因素：

- a) 土壤腐蚀性因子：土壤电阻率、含水率、pH 值、 Cl^- 含量等；
- b) 杂散电流干扰因子：交流电流密度、直流电流密度、电位波动幅度；
- c) 阴极保护有效性因子：断电电位、保护电流密度、阴极保护覆盖率；
- d) 管道状态因子：服役年限、防腐层状况、历史泄漏记录。

8.1.5 机器学习方法

利用神经网络、决策树、支持向量机等算法，建立腐蚀速率预测模型和阴极保护效果评价模型：

a) 随机森林算法：

适用于非线性、多特征耦合的腐蚀预测问题；
可输出特征重要性排序，识别关键影响因素；
预测精度评价指标： R^2 、RMSE、MAE；

b) 梯度提升树（GBDT/XGBoost）：

对时序波动具有敏锐捕捉能力，适用于动态杂散电流干扰识别；
支持缺失值处理，鲁棒性强；

c) 支持向量机（SVM）：

适用于小样本分类问题，如腐蚀风险等级划分；

d) 深度学习（LSTM/GRU）：

适用于长时序预测，如阴极保护电位趋势预测；
可捕捉环境因素的季节性变化规律。

8.1.6 杂散电流智能识别算法

基于监测数据自动识别杂散电流干扰类型、强度和来源：

a) 干扰类型识别：

直流干扰：电位单向偏移，变化相对缓慢；

交流干扰：电位周期性波动，频率 50Hz 或高频成分；

动态干扰：干扰强度随时间变化，与外部设施运行相关；

b) 干扰强度评价：

采用交流电流密度评价交流干扰风险；

采用电位偏移幅度评价直流干扰风险；

建立杂散电流指数（StrayCurrentIndex）进行综合分级；

c) 干扰源定位:

通过多测点同步测量, 分析干扰传播方向;

结合 GIS 信息, 识别潜在干扰源 (如电气化铁路、高压线、地铁)。

8.1.7 基于物理的腐蚀模型

结合电化学理论、传质理论, 建立腐蚀机理模型, 与监测数据相互验证:

a) 阴极保护电位分布模型: 模拟长距离管道电位分布, 优化阳极地床布置;

b) 杂散电流干扰模型: 模拟杂散电流在管道-土壤界面的分布和腐蚀效应;

c) 腐蚀速率机理模型: 基于电化学动力学理论, 建立环境参数与腐蚀速率的定量关系。

8.2 阴极保护数字孪生

构建阴极保护数字孪生系统, 实现保护效果仿真与策略优化:

a) 数字孪生模型构成:

几何模型: 管道三维空间布局、阳极位置、绝缘接头位置;

物理模型: 土壤电阻率分布、防腐层电阻、极化曲线;

数据模型: 实时监测数据驱动模型更新;

算法模型: 电位分布计算、干扰仿真、效果预测;

b) 仿真分析功能:

阴极保护电位分布仿真, 识别保护不足或过保护区域;

杂散电流干扰仿真, 评估外部干扰影响范围和程度;

不同保护策略效果对比, 优化参数设置;

极端工况模拟 (如涂层破损、阳极失效) 下的保护效果预测;

c) 模型验证与更新:

定期用实测数据验证模型精度;

当管道状态或环境发生重大变化时, 更新模型参数;

模型版本管理, 记录每次更新的依据和内容。

8.3 阴极保护效果评价与预警

8.3.1 阴极保护效果评价指标

a) 断电电位达标率: 断电电位满足 $-850\text{mV} \sim -1200\text{mV}$ (CSE) 的时间占比;

b) 保护电位稳定性: 电位波动幅度和频率;

c) 阴极保护系统有效覆盖率: 满足保护要求的管段长度占比;

d) 杂散电流干扰等级: 基于杂散电流指数的风险等级划分;

e) 腐蚀速率控制效果: 实测腐蚀速率与目标控制值的对比。

8.3.2 预警等级划分

基于 F 指数或综合风险评价结果, 将阴极保护系统状态划分为以下预警等级:

a) 正常 (绿色): 各项参数均在正常范围内, 无异常趋势;

b) 关注 (黄色): 个别参数接近阈值下限, 或有轻微异常趋势, 需加强监测;

c) 预警 (橙色): 关键参数超出正常范围, 存在潜在风险, 需安排现场复核和参数调

整；

d) 报警（红色）：严重异常（如阴极保护失效、严重杂散电流干扰），需立即处置。

8.3.3 预警阈值设定原则

- a) 基于标准规范：参照 GB/T21448、NACESP0169 等标准规定的临界值；
- b) 基于历史数据统计：采用统计方法（如均值 $\pm 3\sigma$ ）确定异常阈值；
- c) 基于风险接受准则：根据管道重要性、环境敏感性确定不同风险等级阈值；
- d) 动态调整：根据管道状态演变和环境变化，定期优化阈值设置。

8.4 智能决策与控制

8.4.1 智能控制策略

基于实时监测数据与分析结果，动态调整阴极保护输出参数：

a) 恒电位控制模式：

以断电电位为目标值，自动调整恒电位仪输出；

当土壤电阻率变化导致 IR 降变化时，自动补偿输出；

b) 杂散电流干扰抑制：

识别直流干扰时，调整保护电位抵消干扰影响；

识别交流干扰时，启动或调整排流装置；

动态干扰场景下，采用快速响应控制策略；

c) 分段差异化控制：

对不同风险等级管段采用不同的保护目标值；

对高腐蚀性土壤区域，适当提高保护电流密度；

对过保护风险区域，降低输出防止涂层剥离。

8.4.2 控制策略优化

a) 基于数字孪生仿真，优化阳极地床输出分布；

b) 基于历史数据挖掘，识别不同环境条件下的最优保护参数；

c) 基于机器学习预测模型，提前调整保护参数适应环境变化；

d) 建立控制效果反馈机制，持续优化控制策略。

8.4.3 控制指令执行要求

a) 控制指令下发应具备校验与回读机制，确保执行准确；

b) 关键控制操作应记录日志，包括操作人员、时间、操作内容、执行结果；

c) 控制策略调整应经过仿真验证或专家审核；

d) 具备手动/自动切换功能，自动控制异常时可快速切换至手动模式。

8.5 腐蚀 Agent 智能辅助

构建基于大语言模型的腐蚀领域智能辅助工具（Agent），支持以下功能：

a) 专业知识检索：

快速查询腐蚀机理、阴极保护原理、标准规范要求；

基于自然语言交互，提供针对性解答；

b) 监测数据辅助分析:

结合实时数据, 解释异常现象的可能原因;
提供类似历史案例和处理建议;

c) 防护策略智能参考:

根据当前监测数据和环境条件, 推荐优化的保护参数;
评估不同策略的预期效果和风险;

d) 报告自动生成:

基于监测数据和评价结果, 自动生成运行报告和风险评估报告;
支持自定义报告模板和内容。

9 系统安装与调试

9.1 安装前准备

a) 现场勘察:

确认监测点位的地理位置、管道埋深、周边环境;
评估通信信号覆盖情况、供电条件;
识别潜在干扰源(高压线、电气化铁路、施工区域);

b) 设备检验:

对所有传感器进行标定和功能测试, 确保性能符合要求;
检查数据采集器、通信模块、供电设备等硬件状态;
记录设备序列号、量程、精度等信息;

c) 安装方案制定:

根据现场条件确定传感器埋设位置和深度;
制定电缆敷设路线和防护措施;
确定设备安装基础和防护机箱位置。

9.2 传感器安装

各类型传感器应按以下要求安装:

a) 极化探头安装:

埋设于管道侧方 0.3m~0.5m 处, 深度与管道埋深一致;
探头与管道通过电缆可靠连接, 连接点采用铝热焊或专用夹具;
连接处进行防腐密封处理, 恢复防腐层;
探头周围回填原土, 分层夯实, 确保与土壤紧密接触;

b) 土壤环境传感器安装:

埋设于管道侧方 0.5m~1.0m 处, 深度与管道埋深一致或略深;
传感器探头应与土壤紧密接触, 避免空洞;
多个传感器分层埋设时, 应保持垂直间距 $\geq 0.3\text{m}$;

c) 杂散电流传感器安装:

参比电极埋设在稳定土壤中, 深度与管道一致;
 电流测量线圈套在管道与阴极保护系统的连接电缆上;
 传感器与管道保持绝缘, 防止测量回路短路;

d) 腐蚀速率传感器安装:

埋设于管道附近相同埋深位置, 传感器敏感元件与土壤充分接触;
 或通过旁路安装方式与管道连通, 模拟真实腐蚀环境;
 传感器引线采取穿管保护, 防止机械损伤。

9.3 数据采集与传输设备安装

a) 数据采集器 (RTU/DTU) 应安装在防水、防尘、防腐蚀的防护机箱内, 防护等级不低于 IP65;

b) 防护机箱可安装于地面支柱、杆塔或专用基础平台上, 高度应不低于 1.5m, 防止淹没;

c) 通信天线应安装在高处, 确保信号接收良好, 天线馈线应避雷保护;

d) 供电设备安装:

太阳能板应安装在阳光充足、无遮挡的位置, 倾角根据当地纬度调整;
 蓄电池安装在防护机箱内或专用地下电池井中, 注意防潮、保温;
 市电接入应安装防雷器和漏电保护器;

e) 电缆敷设:

所有电缆应采取穿管保护、埋地敷设或架空敷设, 避免机械损伤和动物啃咬;
 埋地电缆深度 $\geq 0.8\text{m}$, 穿越道路时加装钢套管;
 电缆标识桩应明显可见。

9.4 接地与防雷

a) 系统应具备完善的接地保护, 接地电阻 $\leq 4\ \Omega$;

b) 防雷措施:

现场设备应安装避雷器 (电源避雷器、信号避雷器);
 高处设备 (天线、太阳能板) 应安装避雷针;
 接地系统应与管道阴极保护系统隔离, 防止干扰。

9.5 安装验收

腐蚀联网观测设备安装前的功能检验、安装过程中的技术规范与安装后的验收应符合 T/CSCP0037.3-2022 的要求, 并满足以下规定:

a) 安装过程应避免对管道防腐层和阴极保护系统造成损伤;

b) 传感器与管线连接处应采取密封防腐措施;

c) 所有电气连接应牢固可靠, 接触电阻符合要求;

d) 接地系统应符合防雷和抗干扰要求;

e) 安装完成后应进行系统联调和试运行, 试运行时间不少于 72 小时;

f) 验收内容应包括:

设备安装位置和方式符合设计要求;
传感器输出正常, 数据采集准确;
通信链路稳定, 数据传输正常;
供电系统工作正常, 续航能力满足要求;
所有连接处密封良好, 防护等级达标;
验收报告归档保存。

10 系统运行与维护

10.1 日常运行管理

a) 系统运行状态监控:

实时监测设备在线状态、数据采集状态、供电状态;
建立运行日志, 记录设备启停、参数变更、故障报警等信息;
定期检查数据完整性, 确保无长时间数据缺失;

b) 数据分析与报告:

每日生成关键参数监测汇总, 标识异常值;
每周/每月生成阴极保护运行报告, 包括电位达标率、腐蚀速率统计、风险评价结果;
每季度/每年生成综合评估报告, 包括腐蚀趋势分析、系统效能评价、维护建议;

c) 预警处置:

建立预警响应流程, 明确不同预警等级的响应时间和处置措施;
预警事件应记录原因、处置过程和结果;
典型预警案例应纳入案例库, 用于模型优化和人员培训。

10.2 设备维护与校准

10.2.1 日常维护

a) 定期检查设备外观, 清理传感器表面污物, 确保传感器正常工作(周期: 每月或每季度);

b) 检查供电系统(太阳能板、蓄电池、电源线等), 确保供电正常(周期: 每月);

c) 检查通信设备状态, 确保数据传输通畅(周期: 每周);

d) 检查防护机箱密封性, 防止进水、进尘(周期: 每季度, 雨季前加强);

e) 记录设备运行状态和维护日志。

10.2.2 定期校准

a) 所有传感器应按照制造厂家的要求定期校准, 一般每1~2年校准一次;

b) 校准应由具备资质的机构进行, 校准证书应归档保存;

c) 发现传感器漂移或故障时, 应及时更换或修复, 并重新校准;

d) 校准前后应进行比对测试, 评估传感器性能变化;

e) 参比电极应定期检查电解液状态，必要时补充或更换。

10.2.3 故障处理

a) 建立设备故障报告和处理流程，明确响应时间和处理措施；

b) 常见故障应配备备品备件，缩短维修时间；

关键备件包括：传感器、数据采集器、通信模块、电源模块；

备件库存应满足至少 3 个月的故障更换需求；

c) 重大故障应进行原因分析，采取纠正措施，防止再次发生；

d) 故障处理情况应记录归档，包括故障现象、原因分析、处理措施、处理结果、处理时间。

10.3 设备更新与报废

a) 设备达到设计寿命（通常 5~8 年）或性能严重下降时，应及时更新；

b) 更新设备应与原有系统兼容，确保数据连续性；

c) 设备更新前应进行数据备份和迁移；

d) 报废设备应按规定处理，防止环境污染和数据泄露。

10.4 数据安全

a) 数据传输与存储应采取加密措施；

b) 建立用户权限管理机制，定期审查用户权限和操作日志；

c) 数据备份应异地存储，备份数据定期验证可用性；

d) 涉及国家关键基础设施的数据应符合国家信息安全相关规定；

e) 系统应具备入侵检测和防护能力，定期进行安全评估。

10.5 持续改进

a) 建立系统运行效能评价指标体系，定期评估系统运行效果；

b) 根据运行经验和科技发展，持续优化监测方案和分析模型；

c) 收集用户反馈，改进系统功能和界面；

d) 参与行业交流，跟踪最新技术标准和方法；

e) 定期组织人员培训，提升运维团队专业能力。

附录 A
(资料性)

智能管理平台传感器选型参考表

设备类型	推荐参数范围	精度要求	输出信号	防护等级	备注
极化探头	-3V~+3V	$\leq \pm 1\text{mV}$	RS485/4-20mA	IP68	内置参比电极, 消除 IR 降
杂散电流传感器	-100A~+100A	$\leq \pm 1\%$	RS485/Modbus	IP68	交直流兼容, 频率 0~1000Hz
土壤温度传感器	-40°C~+85°C	$\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$	RS485/4-20mA	IP68	PT100 或数字式
土壤水分传感器	0~100%	$\leq \pm 3\%$	RS485/4-20mA	IP68	FDR 或 TDR 原理
土壤电导率传感器	0~20mS/cm	$\leq \pm 2\%$	RS485/Modbus	IP68	四电极结构
土壤 pH 传感器	2~12	$\leq \pm 0.1\text{pH}$	RS485/4-20mA	IP68	玻璃电极, 带自清洗
腐蚀速率探针	0~10mm/a	$\leq \pm 0.01\text{mm/a}$	RS485/脉冲	IP68	电阻/电感式
管地电位传感器	-3V~+3V	$\leq \pm 1\text{mV}$	RS485/4-20mA	IP68	长效参比电极
智能恒电位仪	0~50V/0~50A	$\leq \pm 1\%$	RS485/以太网	IP54	支持远程调控
数据采集器 (RTU)	8~16 通道	16 位 ADC	4G/5G/以太网	IP65	支持本地存储 30 天
土壤微生	$10^2 \sim 10^8$	$\leq \pm 10\%$	RS485/数字	IP68	qPCR 或酶活

设备类型	推荐参数范围	精度要求	输出信号	防护等级	备注
物传感器	CFU/g (SRB 等)				性法, 需定期 校准
土壤气体 传感器 (CO ₂)	0~5000 ppm	≤±5% FS	RS485/4- 20mA	IP68	红外式, 带温 补
土壤气体 传感器 (H ₂ S)	0~100 ppm	≤±2% FS	RS485/4- 20mA	IP68	电化学式
应变传感 器	±5000 με	≤±1 με	RS485/光纤	IP68	电阻/光纤光栅 /振弦式, 带温 补
位移传感 器	0~200 mm	≤±1 mm	RS485/4- 20mA	IP67	拉线式 /LVDT/MEMS 倾角仪
振动传感 器	0.1~500 Hz, ±2~ ±10 g	振幅≤±2%, 频率≤±0.1Hz	RS485/IEPE	IP67	压电/MEMS/ 光纤, 采样 ≥1000Hz

附录 B
(资料性)

数字孪生建模流程

D.1 数据收集与处理

- a) 管道基础数据：管径、壁厚、材质、防腐层类型及电阻、埋深、走向；
- b) 阴极保护系统数据：阳极位置、类型、输出参数、接地电阻；
- c) 环境数据：土壤电阻率分布（纵向和横向）、地下水状况、杂散电流源；
- d) 监测数据：各测点电位、电流、腐蚀速率、环境参数。

D.2 模型构建

- a) 几何建模：建立管道三维空间模型，划分网格；
- b) 物理参数赋值：赋予各单元土壤电阻率、防腐层电阻、极化曲线；
- c) 边界条件设置：阳极输出、绝缘接头、接地系统；
- d) 求解器配置：选择电位分布计算算法（如边界元法、有限元法）。

D.3 模型校准

- a) 用实测点位数据校准模型参数；
- b) 调整未知参数（如局部防腐层破损率）使仿真结果逼近实测值；
- c) 验证模型在不同工况下的准确性。

D.4 仿真应用

- a) 全管线电位分布预测，识别保护薄弱区；
- b) 杂散电流干扰场景模拟，评估防护措施效果；
- c) 阳极地床优化布置仿真；
- d) 涂层老化、破损对保护效果影响预测。

D.5 模型更新

- a) 定期用新监测数据验证模型精度；
- b) 当管道状态或环境发生重大变化时更新模型；
- c) 记录模型版本和更新日志。