中华人民共和国国家标准

GB/T 19285—××××

代替 GB/T 19285—2003

埋地钢质管道腐蚀防护工程检验

Inspection of corrosion protection for buried steel pipelines

（征求意见稿）

××××-××-××发布　　××××-××-××实施

××××　　发布

目　　次

前言 …… I
1　范围 ……1
2　规范性引用文件 ……1
3　术语和定义 ……1
4　腐蚀环境调查 ……4
4.1 一般规定 …… 4
4.2 土壤腐蚀性调查 …… 4
4.3 杂散电流干扰……5
5　外防腐层检验 ……7
5.1　适用性审查 ……7
5.2　进货检验 ……7
5.3　过程检验 ……8
5.4　回填后的检测 ……8
6　阴极保护 ……8
6.1　一般要求 ……8
6.2　设计审查 ……9
6.3　进货检验 ……9
6.4　过程检验 ……10
6.5　验收检验 ……10
7　运行检查与全面检验 ……11
7.1 一般规定 ……11
7.2 运行检查 ……12
7.3 全面检验 ……12
附录 A (规范性附录)　土壤腐蚀性检测方法 ……16
附录 B (规范性附录)　杂散电流不开挖测试方法 ……24
附录 C (规范性附录)　外防腐层物理性能测试方法 ……33

附录 D（规范性附录） 防腐层破损点不开挖检测方法 ……38
附录 E（规范性附录） 绝缘法兰（接头）绝缘性能测试方法 ……43
附录 F（规范性附录） 管内电流测试 ……48
附录 G（规范性附录）接地电阻测试 ……51
附录 H（规范性附录）牺牲阳极参数测试方法……54
附录 I（规范性附录）外防腐层状况不开挖检测评价方法……56
附录 J（规范性附录）阴极保护效果不开挖检测方法……59
附录 K（规范性附录）埋地钢质管道腐蚀防护系统模糊综合评价……61

前　言

本标准是对 GB/T19285-2003 的全面修订，与 GB/T19285-2003 相比，主要变化如下：

——增加了埋地钢质管道土壤腐蚀性检测与评价方法；

——增加了外防腐层状况和破损点不开挖检测与评价方法；

——增加了阴极保护效果不开挖检测方法；

——增加了腐蚀防护系统综合评价方法。

本标准的附录 A～K 均为规范性附录。

本标准由全国锅炉压力容器标准化技术委员会（SAC/TC 262）提出并归口。

本标准起草单位：

本标准主要起草人：

本标准由全国锅炉压力容器标准化技术委员会（SAC/TC 262）负责解释。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

——GB/T 19285—2003。

埋地钢质管道腐蚀防护工程检验

1 范 围

1.1 本标准规定了埋地钢质管道腐蚀防护工程质量和腐蚀防护效果的检验检测内容，给出了检测评价方法。

1.2 本标准适用于埋地钢质管道腐蚀防护工程的施工及验收过程和腐蚀防护系统投用后的检测与评价。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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/T 21447 钢质管道外腐蚀控制规范

GB/T 21448 埋地钢质管道阴极保护技术规范

TSG D7003 压力管道定期检验规则 长输（油气）管道

TSG D7004 压力管道定期检验规则 公用管道

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

土壤电阻率 soil resistivity

单位长度上土壤的电阻值，是表征土壤导电性能的指标。

3.2

管地电位 potential of pipeline to soil

管道在一定土壤介质中测量的电位值。

注:工程人员一般将“阴极保护条件下的管地电位”习惯地称之为“保护电位”

3.3

氧化还原电位 oxidation-reduction potential

土壤中的氧化态物质和还原态物质在氧化还原电极(常为铂电极)上达到平衡时的电极电位。

3.4

自然电位 natural potential

无外部电流影响的腐蚀电位。

3.5

外防腐层 coating

为使金属构筑物和电解质（土壤）之间有效隔离，以达到抑制腐蚀的目的而覆盖在金属表面的保护层。

3.6

阴极保护　cathodic protection

通过阴极极化控制电化学腐蚀的技术。阴极保护有牺牲阳极法和强制电流法。

3.7

牺牲阳极　sacrificial anode

靠着自身腐蚀速度的增加而提供阴极保护电流的金属或合金。

3.8

强制电流　impressed current

又称外加电流，是通过外部电源施加的阴极保护电流。

3.9

填包料　backfill

为改善埋地阳极工作条件而填塞在阳极四周的导电性材料。

3.10

参比电极　reference electrode

在同样的测量条件下开路电位稳定的，用于测量其它电极相对电位的电极。

3.11

辅助阳极　impressed current anode

与强制电流电源正极连接的，仅限于以导电为目的的电极。

3.12

测试桩　test station

从埋地管道上引出的，用于测试阴极保护参数的装置。

3.13

检查片　test pieces

用于腐蚀试验的金属试片。

3.14

IR 降　IR drop

根据欧姆定律，由于电流的流动在参比电极与金属管道之间电解质内产生的电压降。

3.15

极化电位　polarized potential

由于电流的流动引起电极/电解质界面电位的偏移称为极化，在极化状态下的电位称为极化电位。

3.16

最大保护电位　maximum protective potential

阴极保护条件下，允许的绝对值最大的负电位值。

3.17

最小保护电位　minimum protective potential

金属达到完全保护所需要的、绝对值最小的负电位值。

3.18

电极电位　electrode potential

由参比电极与被测电极系统组成的原电池的电动势。

3.19

腐蚀电位　corrosion potential

腐蚀体系中金属的电极电位。

3.20

开路电位　open potential

无电流流出时，牺牲阳极的电位。

3.21

工作电位(闭路电位）　working potential

有保护电流输出时，牺牲阳极的电位。

3.22

通电电位　on potential

阴极保护系统持续运行时测量的构筑物对电解质电位。

3.23

断电电位　off potential

瞬间断电电位，即断电瞬间测得的构筑物对电解质电位。

3.24

漏点　holiday

防腐层不连续处（孔），使管体表面暴露于环境中。

3.25

破损点　fault

防腐层上所有的异常，包括剥离区、机械损伤露铁点、老化损伤露铁点和漏点等。

3.26

交流电流衰减法　alternating current attenuation survey

一种在现场应用电磁感应原理，采用专用仪器测量管内信号电流产生的电磁辐射，通过测量出的信号电流衰减变化，来评价管道防腐层总体情况的地表测量方法。收集到的数据可能包括管道埋深、位置、异常位置和异常类型。

3.27

密间隔电位法　close interval potential survey （CIPS）

一种沿着管道地面，以密间隔（1~3 米）移动参比电极测量管地电位沿管道分布的方法。

3.28

直流电位梯度法　direct current voltage gradient (DCVG)

一种通过沿管道或环绕管道的、由防腐层漏点漏泄的直流电流所产生的土壤中直流电压梯度的变化，来确定防腐层缺陷位置、严重程度以及表征腐蚀活性的地表测量方法。

3.29

交流电位梯度法　alternating current voltage gradient (ACVG)

一种通过沿管道的、由外防腐层漏点漏泄的交流电流所产生的土壤中交流电压梯度的变化，来确定防腐层缺陷位置、严重程度的地表测量方法。

3.30

杂散电流　stray current

规定或设计回路以外的电流。

3.31

直流干扰　DC influence

在大地中直流杂散电流作用下，引起埋地构筑物腐蚀电位的变化。这种变化发生在阳极场叫阳极干扰，发生在阴极场叫阴极干扰。

3.32

交流干扰　AC interference

交流线路和设备使邻近埋地管道产生的电压和电流的变化。按干扰时间的长短可分为瞬间干扰、持续干扰和间歇干扰三种。

3.33

土壤表面电位梯度　surface potential gradient

单位长度上地表电位的变化值或电位对距离的变化。

3.34

排流保护　drainage protection

将管道中流动的干扰电流，通过人为形成的通路使之直接或间接地流回到干扰源的负回归网络，从而减弱管道的直流干扰影响，达到防止管道电蚀的目的，这种保护管道的方式称为排流保护。

3.35

腐蚀活性区域　corrision　activity

腐蚀正在进行，并以一定速率发展的部位，该发展速率足以导致管道在设计寿命内的承压能力降低。

4　腐蚀环境调查

4.1　一般规定

埋地钢质管道沿线的腐蚀环境调查，应包括土壤腐蚀性调查和杂散电流干扰调查。在进行腐蚀防护系统设计之前、发现腐蚀防护系统失效或开展管道全面检验时，都应进行腐蚀环境调查。

4.2 土壤腐蚀性调查

土壤腐蚀性调查，应至少包括土壤电阻率、氧化还原电位、管地电位、土壤 pH 值、土壤质地、土壤的含水率、土壤含盐量、土壤 Cl^-含量等 8 个参数的测试，测试数据宜视不同季节分别给出，测试方法见附录 A。土壤腐蚀性根据上述 8 个参数的评价分数分为四个评价等级，土壤腐蚀性评价分数对应的测试数据和评价等级见表 1 和表 2。

表 1 土壤腐蚀性单项检测指标评价分数

序号	检测指标	数值范围	评价分数 / Ni(i = 1, 2, 3,…8)
1	土壤电阻率 (Ω · m)	＜20	4.5
		20-50	3
		＞50	0
2	氧化还原电位 (NHE, mV)	＜100	3.5
		100-200	2.5
		200-400	1
		＞ 400	0
3	管地电位 (Cu/CuSO4, mVCSE)	＜ -550	5
		-450 ~ -550	3
		-300 ~ -450	1
		＞ -300	0
3	pH	＜4.5	6.5
		4.5~5.5	4
		5.5~7.0	2
		7.0~8.5	1
		＞8.5	0
4	土壤质地	砂土（强）	2.5
		壤土（轻、中、重壤土）	1.5
		粘土（轻粘土、粘土）	0
5	土壤含水量（%）	12~ 25	5.5
		25-30 或 10~12	3.5
		30-40 或 7~10	1.5
		＞40 或＜7	0
7	土壤含盐量（%）	＞0.75	3

		0.1~0.75	2
		0.05~0.15	1
		＜0.05	0
8	Cl^-（%）	＞0.05	1.5
		0.01-0.05	1
		0.005-0.01	0.5
		＜0.005	0

注：本表中的“%”含量均指质量百分比。

表 2 土壤腐蚀性评价等级

N 值	土壤腐蚀性等级
19 ＜ N ≤30	4（强）
11 ＜ N ≤19	3（中）
5＜ N ≤ 11	2（弱）
0 ≤ N ≤ 5	1（较弱）
注： N 等于表 1 中的（N1、N2 + N3 + N4 + N5 + N6 + N7 + N8）之和。	

4.3 杂散电流干扰

杂散电流干扰分为直流干扰和交流干扰。直流干扰源有直流电气化铁路、电车装置、直流电网、直流电话电缆网络、直流电解装置、电焊机及其它构筑物阴极保护系统等，交流干扰源有高压交流电力线路设施和交流电气化铁路设施等。

4.3.1 杂散电流干扰源调查

a）干扰源侧的调查内容一般包括：交直流铁路供电系统分布与运行情况、交直流铁路轨道电位分布与漏泄电流趋向与地电位梯度、高压输电线路运行情况与线塔接地情况、构筑物阴极保护系统的电位分布、电车运行情况等，以及其他需调查的内容；

b）被干扰管道侧的调查内容一般包括：腐蚀案例、交直流管地电位分布（包括沿管道的管地电位分布以及随时间变化的分布）、流入与流出管道的干扰电流大小以及位置、管道沿线大地的土壤电位梯度、管道沿线的环境腐蚀性、管道防腐层状况、管道阴保设施与排流设施运行参数与状况、管道对铁轨的电压及方向等，以及其他需调查的内容。

4.3.2 直流干扰测试与评价

埋地钢质管道的直流干扰，一般应采用管道任意点上的管地电位较自然电位的偏移量来进行测量和评价，当难以测试时，也可采用管道附近土壤表面电位梯度来进行测量和评价，测试方法分别见附录 B.2.1 和 B.2.2。干扰程度的评价见表 3。当电位偏移≥20mV 或土壤表面电位梯度＞0.5mV/m 时，确认为有直流干扰。

表 3　直流干扰程度评价指标

直流电流干扰程度评价参量	弱	中	强
管地电位正向偏移/mV	＜20	20～200	＞200
土壤表面电位梯度（mV/m）	＜0.5	0.5～5.0	＞5.0

当管道任意点上的管地电位较自然电位正向偏移≥100mV 或管道附近土壤表面电位梯度＞2.5mV/m 时，应采取直流排流保护或其它防护措施。

4.3.3　交流干扰测试与评价

埋地钢质管道的交流干扰，可用管道交流干扰电压和交流电流密度进行测量和评价，测试方法分别见附录 B.2.3 和 B.2.4。干扰程度的评价见表 4。当管道上任意一点上的交流干扰电压都小于 4V 时，可不采取交流干扰防护措施；高于此值时应采用交流密度进行评估，交流电流密度可按下式计算：

$$J_{AC}=\frac{8V}{r\rho d} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

式中：

J_{AC}——评估的交流电流密度（A/㎡）；

V——交流干扰电压有效值的平均值（V）；

ρ——土壤电阻率（Ω .m）；

d——破损点直径（m）。

注：1）ρ 值应取交流干扰电压测量时，测试点处与管道埋深相同的土壤电阻率实测值。

2）d 值按发生交流腐蚀最严重考虑，取 0.0113。

表 4 交流干扰程度的判断指标

交流干扰程度	弱	中	强
交流电流密度（A/m^2）	＜30	30～100	＞100

根据管道所处的土壤类别，当管道交流干扰电压分别大于 10V（碱性土壤）、8V（中性土壤）、6V（酸性土壤）时，或交流电流密度高于 100A/m^2 时，应采取交流排流保护或其它防护措施。

交流架空送电系统和埋地管道的水平距离宜符合下列要求：

a）在开阔地区埋地管道与架空送电线路杆（塔）基脚间控制的最小距离宜为最高杆（塔）高。

b）在路径受限地区，埋地管道与交流电力系统的各种接地装置之间的水平距离一般情况下不宜小于表 5 的规定。

表 5　埋地管道与交流接地体的最小距离（单位：m）

电压等级（kV）	10	35	110	220	330	500
铁塔或电杆接地	3.0	3.0	5.0	5.0	6.0	7.5

c）在埋地管道与架空送电线路的距离不能满足上述要求时或在路径受限地区，在采取绝缘隔离、屏蔽、接地等防护措施后，表 5 规定的距离可适当减小。

4.3.4 特殊情况下的测试与评价

当 4.3.2、4.3.3 节的测试与评价方法难以进行，或发现有杂散电流源，但无法判定是直流或交流时，可采用静态或动态杂散电流测试法，测试管地电位波动值或感应电流波动值，测试方法见附录 B.2.5。干扰程度的评价见表 6。

表 6 特殊情况下干扰程度的判断指标

杂散电流干扰腐蚀危害程度	弱	中	强
管地电位波动值（mV）	<50	50~350	>350
感应电流波动值（A）	<1	1~3	>3

当管地电位波动值大于 200mV 或感应电流波动值大于 2A 时，应采取杂散电流排流保护或其它防护措施。

5 外防腐层检验

5.1 适用性审查

5.1.1 外防腐层应按照《钢质管道外腐蚀控制规范》GB/T 21447 的相关规定，根据埋地钢质管道所处的腐蚀环境、地质状况、施工及运行条件等进行选择。

5.1.2 外防腐层种类和性能指标应满足设计要求，外防腐层绝缘电阻率一般应≥$10^4\Omega\cdot m^2$，对挤压聚乙烯三层结构外防腐层（简称“3 层 PE”）绝缘电阻率一般应≥$10^5\Omega\cdot m^2$。

5.1.3 对防腐保温管道、水下管道、沼泽地区等特殊环境管道，以及采用定向穿越法等特殊施工方法敷设的管道，在外防腐层种类选择和结构设计时应有特殊考虑。

5.1.4 在芦苇地带和细菌腐蚀较强的地区，不应使用易被植物根穿透以及不耐细菌腐蚀的材料作为外防腐层。在多鼠、多蚁地区，不应使用易被鼠类、蚁类伤害的防腐层。

5.2 进货检验

5.2.1 制造商资质检查

预制钢管外防腐层的生产厂应具有政府许可的生产资质。

5.2.2 质量证明文件检查

外防腐层、补口及补伤的材料应有出厂合格证、产品说明书及性能检测报告。预制防腐层应有性能测试报告和出厂合格证，其中性能测试报告内容应满足相应产品技术条件或标准的规定。

5.2.3 外防腐层检查

外观检查：外防腐层表面应无漏涂、气泡、破损、裂纹、剥离和污染等。

厚度检测：按照相应外防腐层标准规定的比例进行外防腐层厚度检测，应不小于相应外防腐层标准

规定的最小厚度。检测方法见附录 C。

5.3 过程检验

5.3.1 组对前的外防腐层检查

组对前应对预制防腐层进行外观检查。当发现预制防腐层有问题时，施工单位应暂停使用，并对所发现的问题进行修补并经检验合格后，才能使用。

5.3.2 补口补伤检验

a）外观检查：每补完一个口或一个伤应自检，外观如有麻面、皱纹、鼓泡等缺陷，应及时处理。

b）厚度检查：每 20 个口至少抽查 1 个口，每个口的上、下、左、右测 4 点，厚度应满足设计要求。测试方法见附录 C。

c）漏点检测：对补伤、补口区应进行 100%漏点检测，且不应有漏点。检测方法见附录 C。

d）粘结力（附着力或剥离强度）检测：按照相应外防腐层标准规定的抽查比例进行检测，并按照相应外防腐层标准规定进行合格评定，不合格的不应投用。检测方法见附录 C。

5.3.3 下沟前检测

在管道下沟前，应对外防腐层与补口补伤区进行 100%漏点检测，发现漏点应修补。检测方法见附录 C。

5.4 回填后的检测

5.4.1 破损点检测

管道回填土自然沉降密实后，应对管道外防腐层进行全线破损点定位检测，并作好破损点标识，检测方法见附录 D，符合设计规定为合格。外防腐层破损点检测应由具有政府许可的检验资质的单位与专业人员进行。

5.4.2 资料验收

管道施工单位应向业主提交完整的外防腐层施工文件及各种检验记录、报告等。

6 阴极保护

6.1 一般要求

6.1.1 阴极保护的设计应符合《埋地钢质管道阴极保护技术规范》GB/T21448 的规定。

6.1.2 在一般情况下，阴极保护效果应满足：

a）在阴极保护状态下，用相对铜/饱和硫酸铜参比电极（简称 CSE）测得的管地电位至少达到-0.85V，但不能负于-1200mV。

b）当土壤中含有硫酸盐还原菌且硫酸根含量大于 0.5%时，测得的管地电位至少达到-0.95V。当土

壤电阻率大于 500Ω㎜时，测得的管地电位至少应达到-0.75V。

c）以上测试值应不包括 IR 降。

6.1.3 在特殊情况下，阴保效果应满足：

a）对于高强度钢（屈服强度大于 500MPa），极限阴极保护电位应不高于实际析氢电位。

b）对于防腐层状况为四级或裸管，在阴极极化或去极化时，被保护管道表面与土壤接触、稳定的参比电极之间的阴极极化电位差应不小于 100mV。

c）对杂散电流干扰的管道，可通过腐蚀危害检测、检查片腐蚀速率测试和均匀腐蚀速率或局部腐蚀速率现场测试等方法，来评判阴极保护的有效性。

6.1.4 下列部位应设置绝缘法兰、绝缘接头、绝缘固定支墩、绝缘衬垫和绝缘支撑块等电绝缘装置：

a） 管道与其他设施的分界处；

b） 有阴极保护和无阴极保护的分界处；

c） 两种不同的阴极保护系统的分界处；

d） 有防腐层的管道与裸管道的连接处；

e） 大型跨越管道有接地时的跨越段的两侧；

f） 有接地的阀门两侧。

6.1.5 被保护管道应有良好的电连续性。

6.2 设计审查

6.2.1 设计单位资质审查

埋地钢质管道阴极保护系统的设计应具有政府许可的设计资质。

6.2.2 设计文件审查

阴极保护系统应根据管道环境调查结果、业主要求和管道外防腐层状况进行设计。设计文件应至少包括：设计说明书、设备表、材料表、安装工艺图、技术规格书等。设计说明书中引用的土壤环境数据应与环境调查结果一致。采用牺牲阳极保护时，牺牲阳极的选择参见表 7；采用外加电流阴极保护时，辅助阳极的选择参见表 8。

表 7 牺牲阳极的选择

可选牺牲阳极种类	土壤电阻率(Ω·㎜)
带状镁阳极	＞100
镁(-1.7V)	60～100
镁	40～60
镁(-1.5V)	＜40
锌	＜15

注 1：在土壤潮湿情况下，锌阳极使用范围可扩大到 30Ω·m；

注 2：表中电位均相对饱和 $Cu/CuSO_4$ 电极；

注 3：对于高电阻率土壤环境及专门用途，可选择带状牺牲阳极。

表 8　辅助阳极的选择

辅助阳极种类	应用环境
含铬高硅铸铁阳极	盐渍土、海滨土、酸性或硫酸根离子含量较高的土壤
柔性（线性）阳极	高电阻土壤和外防腐层质量较差、处于复杂管网或地下构筑物的管道
钢铁阳极	一般土壤、高电阻率土壤
高硅铸铁、金属氧化物阳极	一般土壤

6.3　进货检验

6.3.1 阴极保护产品

阴极保护产品包括：电源设备、辅助阳极、牺牲阳极、参比电极、测试桩、绝缘装置（含绝缘接头保护器）、电连续性装置、接地极、电缆、填包料、智能测试装置、检查片、排流装置等，产品应满足阴极保护系统技术规格书的要求。

6.3.2 质量证明文件检查

阴极保护产品都应有产品合格证和说明书。对于牺牲阳极、参比电极、电源设备、辅助阳极、绝缘装置（含绝缘接头保护器）、排流装置、辅助阳极床填料、智能测试装置等，还应有性能测试报告。

6.3.3 抽样复验

阴极保护产品的抽样复验应执行相应产品标准的规定。一般情况下，牺牲阳极应对化学成分、接触电阻和电化学性能等进行复验；高硅铸铁辅助阳极应对化学成分及电连接性能等进行抽样复验；绝缘装置应进行绝缘性能测试。

6.4　过程检验

6.4.1 牺牲阳极的安装

牺牲阳极表面应保持洁净、无油污等。其组装和埋设应符合设计要求，埋深应在冰冻线以下且不小于 1m，间距为 2～3 m。其与被保护管道之间的连接应牢固。

6.4.2 参比电极的安装

参比电极的埋设位置应满足设计要求。用于控制强制电流保护系统电源的参比电极应尽量靠近管道，且选址合理、连接牢固。参比电极的电缆不能紧靠电源电缆，当使用屏蔽电缆时，屏蔽线（层）一端应接地。安装完毕后应经检验人员认可。

6.4.3 测试桩的安装

测试桩的埋设位置和连线应符合设计要求，测试桩引线应避免焊在管道弯头部位及环焊缝两侧 200mm 范围以内，测试桩应安装牢固、标识醒目。

6.4.4 电源设备的安装

电源设备的安装应按设计和产品说明书的要求进行，其中的正、负极接线必须正确、牢固，安装在防爆区内的电源设备应满足防爆要求，仪器外壳应接地可靠。安装完毕后应由检验人员认可。

6.4.5 辅助阳极的安装

辅助阳极的埋设位置、深度、距被保护管道的垂直距离、回填料、电缆接头的制作、阳极床接地电阻等都应符合设计要求，阳极床接地电阻的检测应由检验人员认可。

6.4.6 电缆的敷设

电缆的敷设应符合设计要求；电缆护套应无破损，绝缘性能应良好。

6.4.7 绝缘法兰（接头）、接地极、绝缘支撑块的安装

绝缘法兰（接头）的安装应满足设计要求，其不应设置在有可燃气体聚积部位和封闭场所、热补偿器附近、长期浸泡在水中的位置和气体系统内可能凝聚湿气的地方等。

在组装焊接前，应检测绝缘法兰（接头）的绝缘电阻，其值应≥2MΩ。检测方法见附录 E。

绝缘法兰（接头）应有可靠的接地极，以便及时排除雷电和故障电流。接地极的安装应满足设计要求，当接地极为锌阳极时，安装前应检验锌阳极和填包料的成分。

当管道设有套管时，管道与套管间应设有可靠的绝缘支撑块。安装的绝缘支撑块不得在管道上滑动。

当管道采用导电的金属支撑架时，管道与导电的金属支撑之间应有可靠的绝缘。

6.4.8 检查片的安装

检查片的尺寸、数量、重量及表面处理、埋设位置等应符合设计要求，材质应与埋地管道的材质相同，埋设深度应与管道相齐，且与管道外壁的距离应在 0.3～0.8m 之间。

6.4.9 智能测试装置的安装

智能测试系统的安装位置与安装要求应满足设计要求。

6.4.10 排流装置的安装

排流装置的安装位置与安装要求应满足设计要求，接地极接地电阻的检测应由检验人员认可。

6.4.11 电连续性装置

电连续性装置的安装应按设计和产品说明书的要求进行，安装完毕后应检测其绝缘电阻值，检测结果应满足设计要求。

6.5 验收检验

6.5.1 性能测试

阴极保护系统正式投用之前，应进行性能测试。性能测试的对象包括：强制电流、牺牲阳极、绝缘

装置（含绝缘接头保护器）、排流装置、电连续性装置、智能测试系统。强制电流、牺牲阳极的性能测试内容分别见表 9、表 10；绝缘装置（含绝缘接头保护器）、电连续装置、排流装置的性能应满足功能要求；智能测试系统现场测试数据与终端接收数据的差值应满足设计要求。

表 9　强制电流性能测试

测试内容	合格判据	测试方法
仪器输出电流、电压	稳定、连续可调	直接读取
阴极通电点电位	小于外防腐层最大保护电位	直接读取
管内电流	/	附录 F
阳极地床接地电阻	符合设计要求	附录 G.1
管地电位保护电位	满足 6.1.2、6.1.3 的规定	附录 A.2

表 10　牺牲阳极性能测试

测试内容	合格判据	测试方法
阳极开路电位	符合设计要求	附录 H.1
阳极闭路（工作）电位	符合设计要求	附录 H.2
管地电位保护电位	满足 6.1.2、6.1.3 的规定	附录 A.2
试片自然电位	/	附录 A.2
阳极输出电流	符合设计要求	附录 H.3
阳极接地电阻	符合设计要求	附录 G.2
注：当阳极与管道之间通过测试桩连接时，可以测量阳极输出电流和阳极接地电阻，直接连接时无法测量。		

6.5.2　交工验收

交工资料应包括：阴极保护系统施工图、隐蔽工程记录（电缆敷设、汇流点、阳极装置、检查片等），阴极保护产品的出厂合格证、性能测试报告和复验报告，阴极保护系统性能性能测试报告、设计（含设计变更）文件、施工记录等。

管道施工单位应向业主提交完整的交工资料。

6.5.3　投用后的管线全线阴保电位的检测

阴极保护系统安装完成后首次投用时应对被保护管线全线进行阴极保护效果采用密间隔电位方法检测，见附录 J，检测结果应满足 6.1.2、6.1.3 的规定。密间隔电位检测应由具有政府许可的检验资质的单位与专业人员进行。

7　运行检查与全面检验

7.1 一般规定

为了保证埋地钢质管道腐蚀防护系统的有效性，应对其运行情况和保护效果进行定期检测和评价。当检测检验结果不满足合格判据时，应查明原因、排除故障、重新检测，同时保存相应的记录和报告。定期检测和评价主要包括：运行检查、全面检验等。

7.2 运行检查

运行检查由埋地钢质管道业主（使用单位）的管道作业人员进行，运行检查记录应妥善保管。运行检查的测试参数、周期及合格判据见表 11。

表 11 运行检查

测试对象	测试参数	推荐周期	合格判据
牺牲阳极保护系统	保护电位 [a]	每半年一次	符合 6.1 的要求
	保护率计算	每半年一次	按公式 7-1 计算应为 100%
	保护度计算 [b]	/	按公式 7-2 计算应大于等于 85%
强制电流保护系统	电源设备电流、电压	自动采集或每天记录	不应有较大波动
	阴极通电点电位 [c]		小于外防腐层最大保护电位
	保护电位 [a]	每月一次	符合 6.1 的要求
	运行率计算	每月一次	按公式 7-3 计算应大于等于 98%
	保护度计算 [b]	/	按公式 7-2 计算应大于等于 85%
	辅助阳极地床接地电阻	每月一次	不应逐月或突然大幅上升
排流装置	排流电流	每月一次	记录 24 小时内的 最大、最小和平均值
	干扰时管地电位	每月一次	符合表 17 和表 18 的要求
	接地极开路电位 [d]	每月一次	符合设计要求
	接地极闭路电位 [d]	每月一次	
	接地极接地电阻 [e]	每月一次	不应逐月或突然大幅上升

备注：a 通过测试桩测试；

b 当有保护试片（检查片）时才测试；

c 此处测试值应不包括 IR 降；

d 采有牺牲阳极组进行接地排流时测试；

e 采用接地排流时测试。

7.3 全面检验

腐蚀防护系统的全面检验由使用单位委托有政府许可资质的检验单位与人员进行。检验单位应在检验前，进行资料（包括：外防腐层和阴极保护工程验收资料、运行记录、维修记录、检验报告和事故或故障处理记录和报告等）审查和分析，并制订检验方案，经双方确认后实施。全面检验包括：外防腐层状况检测、阴极保护有效性检测、腐蚀环境调查、排流保护有效性检测，并在此基础上进行腐蚀防护系统的综合评价。

全面检验周期应符合相关法规与标准的要求。当处于腐蚀活性区域时，全面检验周期不宜超过 6 年，以下情况宜缩短检验周期：

a) 所需阴极保护电流大幅增加；

b) 发生管道外腐蚀穿孔；

c) 受自然灾害与第三方破坏；

d) 管道埋深不满足相关规范标准要求；

e) 检验人员和使用单位认为应该缩短检验周期的。

7.3.1 外防腐层状况检测

外防腐层状况检测包括外防腐层整体状况不开挖检测（检测方法见附录 I）、破损点定位不开挖检测（检测方法见附录 D）和开挖检验等项目。

外防腐层状况不开挖检测评价可采用外防腐层电阻率(Rg 值)、电流衰减率（Y 值）、破损点密度（P 值）等不开挖检测指标进行分析，评价指标见表 12、13、14。

表12 外防腐层电阻率Rg值(kΩ.㎡))分级评价

防腐类型 \ 级别	1	2	3	4
三层 PE	Rg≥100	20≤Rg＜100	5≤Rg＜20	Rg＜5
硬质聚氨酯泡沫防腐保温层和沥青防腐层	Rg≥10	5≤Rg＜10	2≤Rg＜5	Rg＜2
注：此标准中 Rg 值是基于线传输理论计算所得；电阻率是基于标准土壤电阻率 1000Ω•cm。				

表13 外防腐层电流衰减率Y值（db/m）分级评价

外防腐层类型	级别 / 管径	1	2	3	4
三层 PE	323	Y≤0.013	0.013＜Y≤0.06	0.06＜Y≤0.129	＞0.129
	660	Y≤0.02	0.02＜Y≤0.072	0.072＜Y≤0.158	Y＞0.158
	812	Y＜0.021	0.021＜Y≤0.078	0.078＜Y≤0.2	Y＞0.2
硬质聚氨酯泡沫防腐保温层和沥青防腐层	219	Y≤0.08	0.08＜Y≤0.11	0.11＜Y≤0.2	Y＞0.2
	323	Y≤0.093	0.093＜Y≤0.129	0.129＜Y≤0.216	Y＞0.216
	529	Y≤0.11	0.11＜Y≤0.15	0.15＜Y≤0.23	Y＞0.23
	660	Y≤0.112	0.112＜Y≤0.158	0.158＜Y≤0.24	Y＞0.24
	812	Y≤0.114	0.114＜Y≤0.2	0.2＜Y≤0.28	Y＞0.28
	914	Y≤0.15	0.15＜Y≤0.24	0.24＜Y≤0.3	Y＞0.3

注：a Y 值是基于标准土壤电阻率 1000Ω•cm，根据实际情况，在试验分析的基础上，可以适当调整。

b db 值=$20\left|\lg(I_1/I_2)\right|$，$I_1$、$I_2$为相邻 2 个检测点的实测电流值；

c 位于两者之间的管径，采用插值法。

表14 外防腐层破损点密度P值（处／100㎡）分级评价

外防腐层类型	级别			
	1	2	3	4
三层 PE	P≤0.1	0.1＜P＜0.5	0.5≤ P≤1	P＞1

硬质聚氨酯泡沫防腐保温层和沥青防腐层	P≤0.2	0.2<P<1	1≤P≤2	P>2
注：相邻最小距离不超过 2 倍管道中心埋深的两个破损点可当作一处。				

开挖检验应选择最可能出现的腐蚀活性区域，检验人员应首先按严重程度的不同对所有破损点进行分类并确定开挖检验顺序，开挖检验顺序见表15。开挖检验项目：外观检查、漏点检测、厚度检测、粘结力检测。漏点检测、厚度检测、粘结力检测方法见附录C。外观检查、漏点检测分级见表16；当防腐层实测厚度低于50%设计厚度时，外防腐层直接判为4级；当粘结力大于设计值的50%，不影响管道外防腐层分级。

表 15　开挖检验顺序分类

一类	二类	三类
优先开挖	计划开挖	监控
1） 存在多个相邻的 4 级的点。 2） 两种以上不开挖检测评价均为 4 级的点。 3） 初次开展外腐蚀评价时，检测结果不能解释的点或不同的不开挖检测方法测试结果有差异的点。 4） 同时存在 4 级、3 级的点，结合历史和经验判断有可能出现严重腐蚀的点。 5）无法判定腐蚀活性严重程度的点	1）孤立并未被列入一类中的 4 级的点。 2）只存在 3 级点的集中区域，且已有腐蚀事故记录。	1）不开挖检测判断为 2 级的点 2）未被列入一类、二类的点。

表 16　外防腐层开挖检验分级评价（外观检查与漏点检测）

级　　别		1	2	3	4
外观描述	三层 PE	色泽明亮，粘结力强，无脆化，无龟裂，无剥离；无破损	色泽略暗，粘结力较强，轻度脆化，少见龟裂，无剥离；极少见破损	色泽暗，粘结力差，发脆，显见龟裂，轻度剥离或充水；有破损	粘结力极差，明显脆化与龟裂，严重剥离或充水；多处破损
	沥青				
	硬质聚氨酯泡沫防腐保温层	防护层表面应光滑平整，无暗泡、麻点、裂口等缺陷。保温层应充满钢管和防护层的环形空间，无开裂、泡孔条纹及脱层、收缩等缺陷	防护层色泽略暗，表面光滑，无收缩、发酥、泡孔不均、烧芯等缺陷；保温层应充满钢管和防护层的环形空间，无开裂、泡孔条纹及脱层、收缩等缺陷，但有极少数空洞。	防护层色泽暗，有收缩、发酥、泡孔不均、烧芯等缺陷；保温层有开裂、泡孔条纹及脱层、收缩等缺陷，并有大量空洞。	防护层色泽暗，有收缩、发酥、泡孔不均、烧芯等缺陷，并有大量龟裂；保温层有大量空洞，出现严重充水现象。
漏点	三层 PE	V≥25	25>V≥15	15>V≥5	V<5

检测电压V（千伏）	石油沥青	普通（≥4mm）	V≥16	16>V≥8	8>V≥3.2	V<3.2
		加强（≥5.5mm）	V≥18	18>V≥9	9>V≥3.8	V<3.8
		特加强（≥7mm）	V≥20	20>V≥10	10>V≥4.0	V<4.0
	环氧煤沥青	普通（≥0.3mm）	V≥2	2>V≥1	1>V≥0.4	V<0.4
		加强（≥0.4mm）	V≥2.5	2.5>V≥1.25	1.25>V≥0.5	V<0.5
		特加强（≥0.6mm）	V≥3	3>V≥1.5	1.5>V≥0.6	V<0.6

外防腐层状况分级评价应充分考虑不开挖检测与开挖检验结果，并依据开挖检验结果，对不开挖检测评价结果进行修正，然后进行外防腐层状况分级评价。

7.3.2 阴极保护有效性检测评价

阴极保护有效性检测可采用阴保电位分布密间隔检测，检测方法见附录 J。阴保有效性评价指标见 6.1 条的规定。同时根据检测结果按照下列公式计算保护率、保护度、运行率，并按表 11 进行评价。

$$保护率=\frac{管道总长-未达到有效保护管道长}{管道总长}\times 100\% \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

$$保护度=\frac{G1/S1-G2/S2}{G1/S1}\times 100\% \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

式中：

G1——未施加阴极保护检查片的失重量，g；

S1——未施加阴极保护检查片的裸露面积，cm^2；

G2——施加阴极保护检查片的失重量，g；

S2——施加阴极保护检查片的裸露面积，cm^2；

$$运行率=\frac{1年内有效运行时间（h）}{全年小时数(8760)}\times 100\% \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

7.3.3 腐蚀环境调查

腐蚀环境调查应按照本标准第 4 章规定的内容和方法进行检测和评价。

7.3.4 排流保护效果检测评价

排流效果的检测方法见附录 B。直流排流效果评价指标见表 17，交流排流效果的评价指标见表 18。

交流接地体安全距离的测量范围应包括已知交流接地体安全距离的复核和未知交流接地体的调查与测量。安全距离应不小于表 4 的规定。

表 17　直流排流保护效果评价

排流方式	干扰时管地电位（V）	电位平均值比 η_V（%）
直接向干扰源排流	＞10	＞95

（直接、极性、强制排流）	10～5	＞90
	＜5	＞85
间接向干扰源排流 （接地排流）	＞10	＞90
	10～5	＞85
	＜5	＞80

$$\eta_V = \frac{V_1(+) - V_2(+)}{V_1(+)} \times 100\%$$

$V_1(+)$——— 排流前，在规定时间段内的正管地电位算术平均值。

$V_2(+)$——— 排流后，在规定时间段内的正管地电位算术平均值。

$V_1(+)$、$V_2(+)$的计算方法见附录 B.2。

表 18 交流排流保护效果评价

周围土壤电阻率（Ω• m）	保护效果要求
≤25	管道交流干扰电压低于 4V
＞25	交流电流密度小于 30A/m²

7.3.5 腐蚀防护系统综合评价

腐蚀防护系统综合评价，应根据外防腐层状况、阴极保护有效性、腐蚀环境、排流保护效果检测评价结果进行。可采用模糊数学综合评价方法或其他可行方法进行，模糊数学综合评价方法见附录 K。

腐蚀防护系统的综合评价分为以下四个等级：见表 19。

表 19 腐蚀防护系统分级

等级	分级属性及检验周期
1	腐蚀防护系统功能完好，满足设计要求，在 6 年的检验周期内能有效使用。
2	腐蚀防护系统基本完好，但存在一些不影响防护效果的缺陷，能基本满足设计要求，三至六年的检验周期内能使用。
3	腐蚀防护系统整体状况较差，存在缺陷，不能完全满足设计要求，在使用单位采取适当措施后，可在一至三年检验周期内在限定的条件下使用。
4	腐蚀防护系统缺陷严重，不能满足设计要求，不能有效防止金属管体腐蚀，使用单位应立即采取重大维修。

附录 A
（规范性附录）
土壤腐蚀性检测方法

A.1 土壤电阻率测试

A.1.1 等距法

A.1.1.1 适用范围

适用于测试从地表至深度为a的平均土壤电阻率。

A.1.1.2 仪器

宜选用接地电阻测量仪，精度为0.5级。

A.1.1.3 测试接线示竞图

按图A.1所示的四电极法测试。图中四个电极布置在一条直线上，间距a、b代表测试深度且a=b，电极入土深度应小于a/20；常用仪器为接地电阻仪。

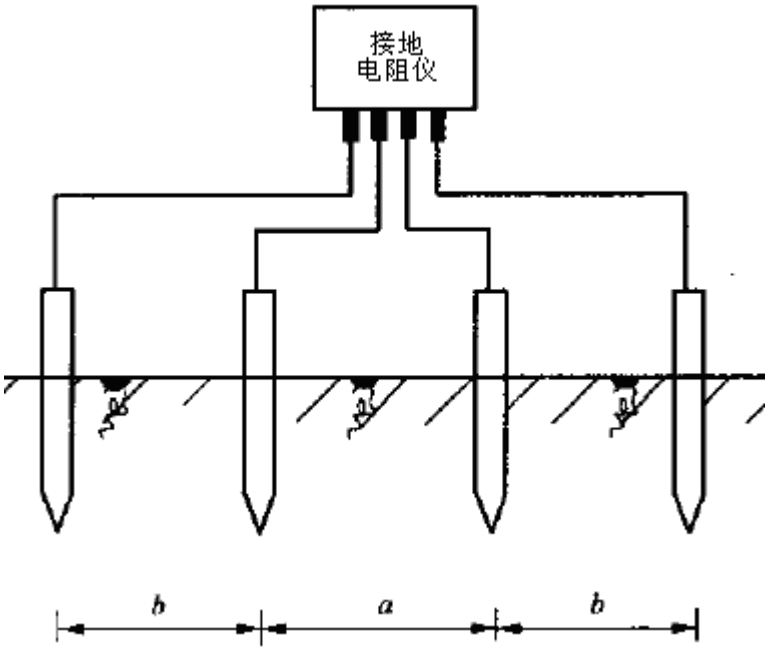


图 A.1　土壤电阻率测试接线示意图

A.1.1.4 测试步骤

布置好电极后，转动接地电阻测量仪的手柄，使手摇发电机达到额定转速，调节平衡旋钮，直至电表指针停在黑线上，此时黑线指示的度盘值乘以倍率即为接地电阻值 R，土壤电阻率按下式计算：

$$\rho = 2\pi aR \quad \text{.....（A.1）}$$

式中：

ρ——测量点从地表到深度为 a 土层的平均土壤电阻率，Ω·m；

R——接地电阻仪示值，Ω；

a——相邻两电极之距离，m。

A.1.2 不等距法

A.1.2.1 适用范围

不等距法主要用于测试深不小于20m情况下的土壤电阻率。

A.1.2.2 仪器

宜选用接地电阻测量仪，精度为0.5级。

A.1.2.3 测试步骤

其测试接线示意图如图 A.1 所示，此时 b>a。测深 0～20m 时，a＝1.6m，b＝20m；测深 0～55m 时，a＝5m, b＝60m。此时测深 h 按下式计算：

$$h=\frac{a+2b}{2} \quad \text{……（A.2）}$$

按 A.1.2.3 中规定布极，按 A.1.1.4 操作接地电阻测量仪测得 R 值，测深 h 的平均土壤电阻率按下式计算：

$$r=\rho R\left(b+\frac{b^2}{a}\right) \quad \text{……（A.3）}$$

A.2 管地电位测试

A.2.1 地表参比法

A.2.1.1 适用范围

地表参比法主要用于管道自然电位、牺牲阳极开路电位、管道保护电位等参数的测试。

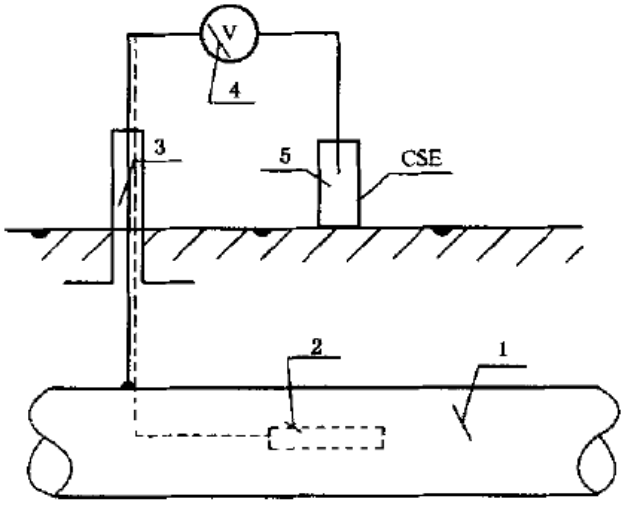
A.2.1.2 仪器

宜选用数字万用表:内阻不小于1MΩ ，准确度不低于2.5级。

参比电极:应采用铜一饱和硫酸铜电极，代号CSE，并应符合下列要求:流过硫酸铜电极的允许电流密度不大于5uA/cm²；电位漂移不能超过30mV。

A.2.1.3 测试接线示意图

测试接线示意图见图 A.2。



1—管道；2—牺牲阳极；3—测试桩；4—数字万用表；5—参比电极。

图 A.2 地表参比法测试接线示意图

A.2.1.4 测试步骤

A.2.1.4.1 将参比电极放在管道顶部上方 1m 范围的地表潮湿土壤上，应保证参比电极与土壤电接触良好

A.2.1.4.2 将电压表调至适宜的量程上，读取数据，作好记录，注明该电位值的名称。

A.2.2 近参比法

A.2.2.1 适用范围

近参比法一般用于防腐层质量差的管道保护电位和牺牲阳极闭路电位的测试。

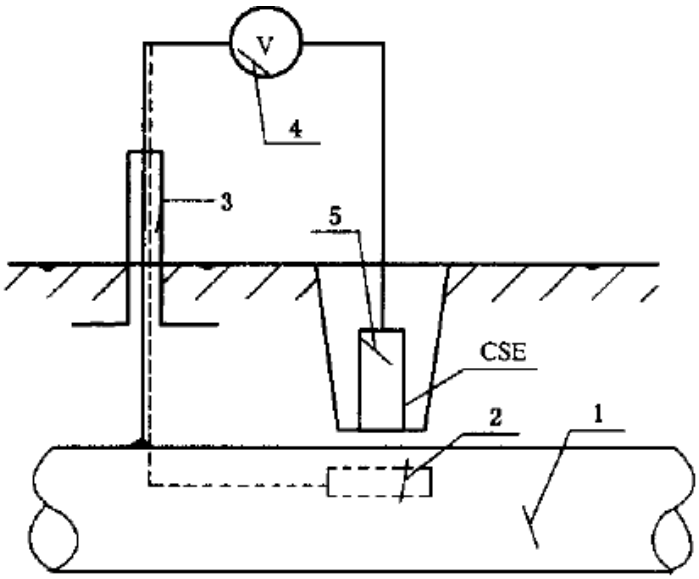
A.2.2.2 仪器

宜选用数字万用表:内阻不小于10MΩ ，准确度不低于2.5级。

参比电极:应采用铜一饱和硫酸铜电极，代号CSE，并应符合下列要求:流过硫酸铜电极的允许电流密度不大于5uA/cm^2；电位漂移不能超过30mV。

A.2.2.3 测试接线示意图

近参比法的测试接线示意图如图 A.3。



1—管道； 2—牺牲阳极；3—测试桩；4—数字万用表；5—参比电极。

A.3 近参比法测试接线示意图

A.2.2.4 测试步骤

A.2.2.4.1 在管道(或牺牲阳极)上方，距测试点 1m 左右挖一安放参比电极的深坑，将参比电极置于距管壁(或牺牲阳极)3-5m 的土壤上。

A.2.2.4.2 将电压表调至适宜的量程上，读取数据，作好记录，注明该电位值的名称。

A.3 氧化还原电位测试—去极化法

A.3.1 适用范围

适用于现场土壤氧化还原电位的测试。

A.3.2 仪器

pH/ORP 测定仪，内阻不小于 10 MΩ，量程范围为-1999 mV~1999 mV，精度为±1 mV，温度范围为 0~50℃；铂电极 5 支。

参比电极：采用饱和甘汞电极，代号 SCE，并符合下列要求：流过饱和甘汞电极的允许电流密度不大于 5 μA/cm^2，电位漂移不能超过 30 mV。

A.3.3 测试步骤

A.3.3.1 先将 5 支铂电极分别插入预测土层中，平衡 1 小时后，铂电极接正极，插在附近土壤中的饱和甘汞电极接负极。

A.3.3.2 打开仪器，在 mV 档进行测定，读取数据，作好记录，注明该电位值的名称。

A.3.4 测试工作注意事项

A.3.4.1 从仪器上读得的电位值，是土壤中铂电极的电位值对饱和甘汞电极的电位差，将其换算成氢标电位。以铂电极为正极，饱和甘汞电极为负极时：

E 实测＝Eh 土壤－E 饱和甘汞电极……（A.4）

移项后

Eh 土壤＝E 饱和甘汞电极+E 实测……（A.5）

饱和甘汞电极的电位，在不同温度时有些差异，见表 A.1。

表 A．1 饱和甘汞电极在不同温度时的电位

温度（℃）	10	15	20	25	30	35	40	50
电位（mV）	254.0	250.8	247.6	244.3	241.0	237.6	234.2	227.1

为了统一比较，土壤 Eh 值一般需要 pH 校正，其公式如下：

Eh7＝Eh 土壤+60（pH 实测-7）……（A.6）

新的铂电极在使用前要不要进行表面处理，最好正确处理一下为好，因为铂电极是在高温下加工而成的，铂电极表面可能会生成一些氧化膜，影响测量结果。

方法是将铂电极浸入洗涤剂中 10 分钟左右，用水洗净，接着将铂电极浸入 0.2mol/L HCl,0.1mol/L NaCl 溶液中，加热至微沸，再加入少量固体 Na2SO3(0.2g/100ml)继续加热 30 分钟。也可以不加热，但浸泡的时间要长。然后洗净放入 ORP 浸泡液中待用。

A.3.4.2 土壤本身是不均匀的，测定 Eh 时要多次重复，可用一支电极多次测量或用多支电极测定，求其平均值。重复次数要视土壤的均匀情况而定，一般 5 次左右。

A.4 土壤 pH 值测试

A.4.1 适用范围

适用于土壤溶液中氢离子浓度的大小的测试。

A.4.2 仪器和试剂

精度酸度计：测量范围（0~14）pH，基本误差 ±0.01pH，被测溶液温度，（5~60）℃。

pH 复合电极： 0-14 pH，被测溶液温度，（0~80）℃。

试剂：pH 标准缓冲液，4.01，6.86，9.18。

A.4.3 测定步骤

A.4.3.1 称取通过 20 筛孔（1mm）的风干土样 20g，放在 50 mL 高型烧杯中，加入 20 mL 去 CO_2 的蒸馏水，在磁力搅拌器上搅动 1 分钟，或用人工断续搅拌 20~30 分钟，使土壤充分散开，放置半小时使平衡，此时应避免空气中有氨或挥发性酸，

A.4.3.2 将 pH 电极插到下部悬液中，并轻轻摇动，随后将甘汞电极插入上部清液中进行 pH 测定，数分钟内即可得稳定读数。

A.4.4 测试注意事项

A.4.4.1 对于缓冲性弱的土壤，常需较长时间才能达到平衡。

A.4.4.2 每测一个样品，要用洗瓶将玻璃电极和甘汞电极或盐桥顶端所粘的土粒洗去，并用滤纸轻轻将吸附的水吸干，再进行第二个样品的测定。测定 5－6 个样品后，应用 pH 标准缓冲液校正一次，并将甘汞电极或盐桥在饱和氯化钾溶液中浸泡一次，再进行使用。

A.5 土壤中可溶性盐含量测试

A.5.1 适用范围

采用干渣称重法，适用于室内土壤中溶解于水的盐类总量测试。

A.5.2 仪器

往复式电动振荡机，真空泵，天平（感量为 0.01g），巴氏滤管或布氏漏斗或离心机（4000r/min），1000ml 广口塑料瓶，电热板，水浴锅，干燥器，磁蒸发皿，15%H_2O_2。

A.5.3 测试步骤

A.5.3.1 待测液的制备（5:1 水土比浸出液）

A.5.3.1.1 称取风干土样（1mm）100g，放入 1000 mL 广口塑料浸提瓶中，加入去 CO_2 的蒸馏水 500 mL，用橡皮塞塞紧瓶口，在振荡机上振荡 3 分钟。

A.5.3.1.2 立即用抽滤管（吸漏斗）过滤，开始抽出的约 10 mL 滤液弃去。如滤液浑浊，则应重新过滤，遭到获得清亮的浸出液。

A.5.3. 2 可溶性盐总量的测试

A.5.3.2.1 取一定量的待测液蒸干后，在 105~110℃烘干，称至恒重，称为“烘干残渣总量”。它包括水溶性盐类及水溶性有机质等的总和。用 H_2O_2 除去蒸干残渣中的有机质后即为“可溶性盐总量”。

A.5.3.2.2 吸取清晰的浸出液 50.0 mL，放入已知重量的烧杯或磁蒸发皿（W_0）中，移放在水浴上蒸发后，放入烘箱，在 105~110℃烘干 4 小时。取出，放在于燥器中冷却约 30 分钟，在分析天平上称重。再重复烘 2 小时，冷却，称至恒重（W1），前后两次重量之差不得大于 1 mg，计算烘干残渣总量。

A.5.3.2.3 在上述烘干残渣中滴加 15%H_2O_2 溶液，使残渣湿润，再放在沸水浴上蒸干，如此反复处理，直至残渣完全变白为止，再按上法烘干后，称至恒量（W_2），按照式（A.7）和（A.8）计算水溶性盐

总量：

$$\text{烘干残渣总量（\%）} = \frac{W_1 - W_0}{W} \times 100 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{（A.7）}$$

$$\text{可溶性盐总量（\%）} = \frac{W_2 - W_0}{W} \times 100 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{（A.8）}$$

式中：

W_0——烧杯或磁蒸发皿的重量（g）；

W_1——重复烘 2 小时后的总重量（g）；

W_2——15%H_2O_2 处理并烘干后样品的总重量（g）；

W——与吸取浸出液相当的土壤样品重（g）。

A.6 土壤质地测试

A.6.1 适用范围

适用于现场土壤质地的测试。

A.6.2 测试步骤

A.6.2.1 取土壤 5~l0 g，加适量水搓揉，使其破坏原结构，根据肉眼和手指的感觉来鉴别土壤质地。

A.6.2.2 根据以下特征进行目测鉴别：

砂　土：无论加多少水和多大压力，也不能搓成土球，而呈分散状态。

轻壤土：可团成表面不平的小土球，搓成条状时易碎成块。

中壤土：可搓成条，弯曲时有裂纹折断。

重壤土：可搓成 1.5~2mm 的细土条，在弯曲成环时，弯曲处发生裂纹。

轻粘土：容易揉成细条，弯曲时没有裂纹，压扁时边缘没有裂纹。

粘　土：可揉搓成任何形状，弯曲处均无裂纹。

A.7 土壤含水量测试—烘干法

A.7.1 适用范围

适用于实验室内土壤中水含量的测试。

A.7.2 仪器

铝盒，天平（感量 0.01g），玻璃干燥器（内有干燥用的变色硅胶），烘箱。

A.7.3 测试步骤

A.7.3.1 从试件埋藏深度采集约为铝盒容积五分之四左右土壤样品，放入已知重量的铝盒中，加盖称重后，盖缝用橡皮胶封好，带回实验室。

A.7.3.2 将铝盒除去橡皮胶，用蘸乙醇的脱脂棉花球擦去橡皮胶残迹，打开盖子，连盖置于烘箱中，在 105－110℃温度下烘 6 小时。

A.7.3.3 取出后加盖，放入干燥器内冷却 20 分钟后称重。再打开盖子烘 3 小时，冷却，称重，前后两次称重相差不超过 0.05 g 即可。

A.7.3.4 以烘干土为基数的水分百分数按式（A.9）计算：

$$W=\frac{g_1-g_2}{g_2-g_0}\times 100\% \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (A.9)$$

式中：

W——含水量（%）；

g_0——铝盒重（g）；

g_1——铝盒加湿土重（g）；

g_2——铝盒加烘干样品重（g）。

A.8 土壤中氯离子含量测试

A.8.1 适用范围

适用于近中性或微碱性土壤中 Cl^-含量的测试。

A.8.2 仪器和试剂

仪器：容量瓶(100 mL)，容量瓶(1000 mL)，天平（感量 0.0001 g）

试剂：K_2CrO_4，$AgNO_3$，去离子水。

A.8.3 测试步骤

A.8.3.1 5%K_2CrO_4指示剂： 5 gK_2CrO_4（三级）溶于少量水中，滴加 l N $AgNO_3$，至有红色沉淀生成，摇匀后过滤，滤波稀释至 100 mL。

A.8.3.2　0.02N $AgNO_3$标准溶液：3.398 g $AgNO_3$（经 105℃烘干半小时）溶于水中，移入 1 L 容量瓶定容，贮于棕色瓶中。

A.8.3.3 吸取土壤浸出液 25.00mL 放入三角瓶中，加 K_2CrO_4指示剂 5 滴，在不断搅动下，用 $AgNO_3$标准溶液滴到出现的砖红色不再褪色为止，记录 $AgNO_3$溶液的用量（V）。

A.8.3.4 按照式（A.4）和（A.5）计算：

$$\text{土壤 } Cl^-\text{（me／100g）}=\frac{N\times V}{W}\times 100 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (A.10)$$

$$C1^-\text{（%）}=C1^-\text{（me／100g）}\times 0.0355 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (A.11)$$

式中：

V——滴定时消耗的 $AgNO_3$标准溶液体积（mL）；

N——$AgNO_3$标准溶液的当量浓度；

W——与吸取待测液毫升数相当的样品重（g）；

0.0355——Cl^-的毫克当量（g）。

附录B
（规范性附录）
杂散电流不开挖测试方法

B.1 一般规定

B.1.1 测试仪器的选用要求

a）测试仪器应具有防电磁功能；

b）测试仪器必须具有满足测试要求的显示速度、准确度和量程，同时具有携带方便、供电方便、适应现场测量环境的特点。对所用的测量仪表，必须按国家现行标准的有关规定进行定期校验。

c）为了提高测量的准确度，宜优先选用具有数据自动记录存储功能的测试仪器。

d）推荐使用的测试仪器性能如表 B.1 所示。

B.1.2 参比电极的使用要求

a）参比电极可采用钢棒电极、硫酸铜电极。采用钢棒电极时，其钢棒直径不宜小于 16mm，插入土壤深度宜为 l00mm。

b）参比电极应竖直布置，与埋地金属管道之间的距离应大于 l0m。每次测试时，参比电极位置宜保持一致。

c）参比电极设置处，地下不应有冰层、混凝土层、金属及其它影响测试的物体。

d）土壤干燥时，应浇水湿润地面。

e）进行土壤电位测试前，参比电极应进行配对，每对参比电极之间的电极电位偏差应不大于 1mV。

f）测试值应换算至硫酸铜参比电极下的数值。

B.1.3 测试工作应注意下列事项

a）测试中应首先接好仪表回路，再进行与被测体的连接，并保证所有测试连接点电接触良好。测试结束时，按相反的顺序操作，并采用单手操作法。

b）干扰管道的自然电位应在干扰源处于非工作状态并保证管道充分去极化的条件下直接测试；当不具备这一条件时，也可采用多功能探头、实验室测试等特殊方法测试。

c）在可能有易燃性气体的环境中测试，应避免接线或拆线过程中产生电火花。

表 B.1　推荐使用的测试仪器

名称	量程要求	精度	内阻	电源要求
自动平衡记录仪	±5mV～±10V, 十档零点可调，走低速可调	0.5%	10MΩ	交直流可用, 可用干电池
数字万用表	—	—	≥10 MΩ	干电池
多功能测试箱	交直转换、电位、电流多参数	—	—	—
SCM 检测仪	同时测电位、感应电流	—	—	—
管地电位测试仪	测量管地电位	—	—	—

感应电流测试仪	测量感应电流			

B.2 杂散电流干扰测试

B.2.1 管地电位波动测试

B.2.1.1 适用范围

适用于直流干扰引起的埋地钢质管道侧的管地电位的测试。

B.2.1.2 仪器

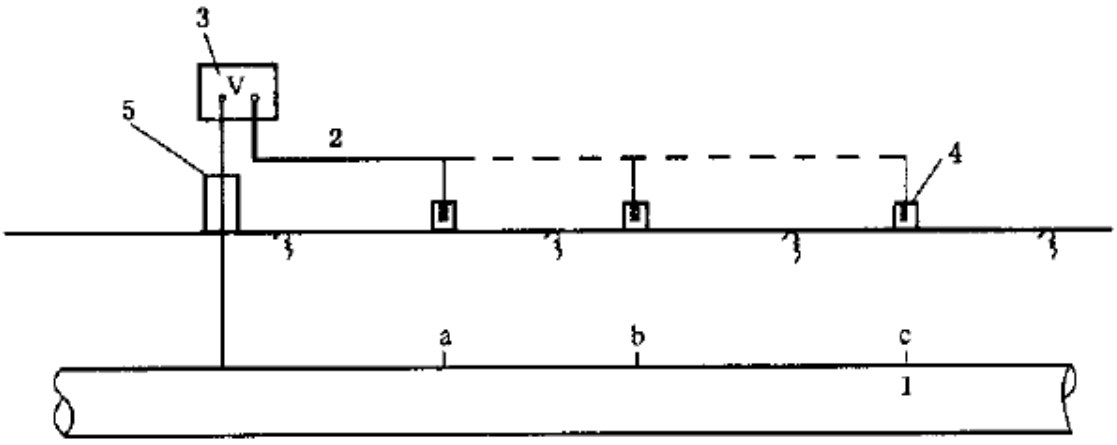
宜选用数字万用表:内阻不小于10MΩ，准确度不低于2.5级；

宜选用便携式自动平衡记录仪:内阻20kΩ-10MΩ，精度0.5级，量程士5mV～+10V ,10档，零点可调，走纸速度可调；

参比电极:应采用铜—饱和硫酸铜电极，代号CSE，并应符合下列要求:流过硫酸铜电极的允许电流密度不大于5uA/cm^2；电位漂移不能超过30mV。

B.2.1.3 测试接线示意图

测试接线如图 B.1 所示，电位测试仪优先选用表 B.1 中的具有数据存储功能测试仪器。



1—管道(被测体);2—测试导线(多股铜芯绝缘软线;在有电磁干扰的地区采用屏蔽导线);3—电压表;4—参比电极;5 一测试桩。

图 B.1 管地电位测试接线示意图

B.2.1.4 测试步骤

B.2.1.4.1 测试点的选择和分布宜符合下列原则:

a）预备性测试:利用现有的测试桩(点)；

b）排流工程测试:宜根据预备性测试结果布设在干扰较严重的管段上，测试点间距以 50~200m 为宜，不应大于 500m；

c）排流工程效果测试:在排流工程各实施点中选定测试点。

B.2.1.4.2 排流工程测试及排流工程效果测试宜符合下列原则:

各测试点的测试工作同时开始和结束；各测试点以相同的读数间隔记录数据；干扰源和干扰管道两方面同步测试。

B.2.1.4.3 按图 B. 1 接好测试线路，记录测试值。

B.2.1.4.4 测试时间段为 40～60min，对运行频繁的直流电气化铁路可取 30min；测试时间段应分别选择在具有代表性的负荷变化时间段上。一般选择在干扰源的高峰、低峰和一般负荷三个时间段上。

B.2.1.4.5 读数时间间隔一般为 10～30s，电位交变激烈时，不应大于 10s,

B.2.1.4.6 对拟定的排流点、实际排流点，排流效果评定点及其他具有代表性的点，进行 24h 连续测试。

B.2.1.4.7 所有测试的次数不宜少于三次，每次的起止时间、测试时间段、读数时间间隔、测定点均应

B.2.1.5 数据分析处理步骤：

a）从已记录的测试值中直接选择最大值 V_{max} 和最小值 V_{min}，单位均为 mV。如果使用存储式电位测试仪，可编制计算机程序从存储的测试值中自动选出最大值和最小值。

b）管地电位的平均值按式（B. 1）计算：

$$\overline{V} = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_i}{n} \cdots\cdots (B.1)$$

式中 $\overline{V}$ ——规定的测试时间段内管地电位的平均值（mV）；

V_i——管地电位各次的读数（mV）；

n ——规定的测试时间段内读数的总次数。

c）管地电位波动值按式（B.2）或（B. 3）计算：

如果 $V_{max} - \overline{V} \geq \overline{V} - V_{min}$，

$$\tilde{V} = 2(\overline{V} - V_{min}) \cdots\cdots (B.2)$$

如果 $V_{max} - \overline{V} < \overline{V} - V_{min}$，

$$\tilde{V} = 2(V_{max} - \overline{V}) \cdots\cdots (B.3)$$

式中：

$\tilde{V}$ ——规定的测试时间段内管地电位的波动值（mV）。

B.2.2 土壤表面电位梯度测试

B.2.2.1 适用范围

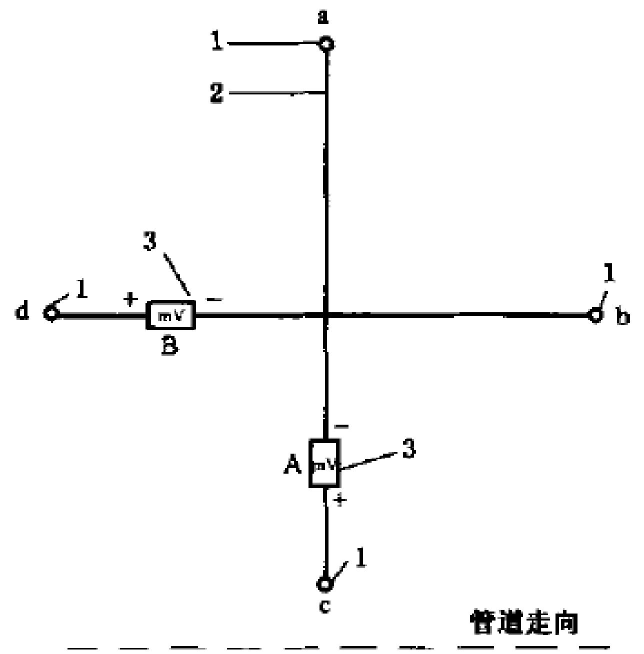
适用于直流干扰引起的埋地钢质管道侧的土壤表面电位梯度的测试。

B.2.2.2 仪器

宜选用数字万用表:内阻不小于1MΩ，准确度不低于2.5级；

参比电极:应采用铜—-饱和硫酸铜电极，代号CSE，并应符合下列要求:流过硫酸铜电极的允许电流密度不大于5uA/cm^2；电位漂移不能超过30mV。

B.2.2.3 土壤表面电位梯度测试接线示意图，如图 B.2 所示。



1—a、b、c、d 四只铜一饱和硫酸铜参比电极;ac 与 bd 的距离相等。且垂直对称布设，其中 ac 或 bd 应与管道平行，电极间距宜为 100m。当受到环境限制时可适当缩短，但应使电压表有明显的指示;

2—测试导线(多股铜芯绝缘软线;在有电磁干扰的地区采用屏蔽导线);3—A、B 两只电压表。

图 B.2　土壤表面电位梯度测试接线示意图

B.2.2.4 测试步骤如下：

a） 先按图 B.2 接好测试线路。

b） 直接读取测试数据。

B.2.2.5 数据处理步骤如下：

a）从已记录的测试值中直接选择最大值和最小值。

b）正负管地电位的平均值的计算如下：

使用指针式或数字式仪表时，

$$V(\pm)=\frac{\sum_{i=1}^{n} V_i(\pm)}{n} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (B.4)$$

式中：

$V(\pm)$ —— 规定的测试时间段内正、负管地电位的平均值，V

$\sum_{i=1}^{n} V_i(\pm)$ —— 分别计算的正、负电位各次数读数的总和，V；

n —— 规定的测试时间段内读数的总次数。

3） 使用记录式仪表时：

首先按记录纸上的适当刻度，将选取的测试时间段的电位曲线分成若干段，确定每个分段的正电位平均值 $V_1(+)$、$V_2(+)$、…$V_n(+)$及负电位的平均值 $V_1(-)$、$V_2(-)$、…$V_n(-)$。则：

$$V(+)=\frac{V_1(+)+V_2(+)+...+V_n(+)}{n} \quad \text{……（B. 5）}$$

$$V(-)=\frac{V_1(-)+V_2(-)+...+V_n(-)}{n} \quad \text{……（B. 6）}$$

式中：

V(+)——规定的测试时间段内正电位平均值，V；

V(－) ——规定的测试时间段内负电位平均值，V；

n ——规定的测试时间段内分成小段的总数。

B.2.2.6 上述测得的数值或经数据处理后的测试值，分别除以各自对应的参比电极间距(以米为单位)，即为电位梯度。

注：单独测试地表电位梯度时，参比电极的间距以 1m 为宜。

B.2.3 交流干扰电位测试

B.2.3.1 适用范围

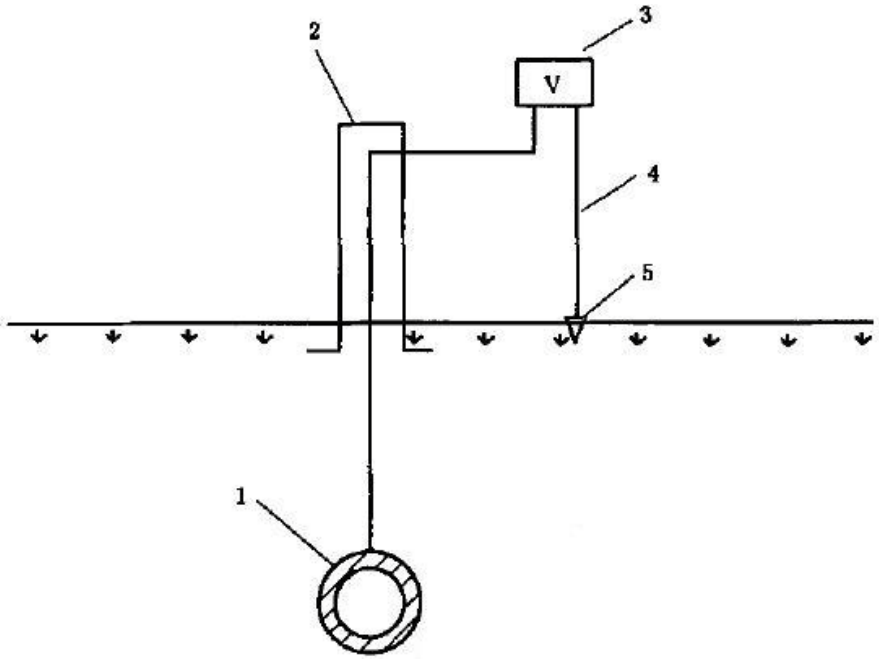
适用于交流干扰引起的管道电位的测试。

B.2.3.2 仪器

宜选用数字万用表:内阻不小于10MΩ，准确度不低于2.5级；

参比电极:应采用铜—饱和硫酸铜电极，代号CSE，并应符合下列要求:流过硫酸铜电极的允许电流密度不大于5uA/㎠；电位漂移不能超过30mV。

B.2.3.3 测试接线如图 B.3 所示。



1—被测管道;2—测试桩;3—交流电压表;4—测试导线(多股铜芯绝缘软线;在有电磁干扰的地区采用屏蔽导线);5—参比电极。

图 B.3 管道交流干扰电压测试接线示意图

B.2.3.4 测试步骤应按下列要求进行：

a）按图 B.3 接好测试线路。

b）测试时间段为 40～60min，对运行频繁的电气化铁路可取 30min；测试时间段应分别选择在干扰源的高峰、低峰和一般负荷三个时间段上。

c）直接记录测试值。读数时间间隔一般为 10～30s，电压幅值变动剧烈时，不应大于 19s。

B.2.3.5 数据处理应符合下列要求：

a）测试点干扰电压的最大值、最小值，从已记取的各次测试数值中直接选择。平均值按下式计算：

$$U_p = \frac{\sum_{i=1}^{n} U_i}{n} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{（B. 7）}$$

式中：

U_p —— 规定测试时间段内测试点交流干扰电压平均值，V；

$\sum_{i=1}^{n} U_i$ —— 规定测试时间段内测试点交流干扰电压各次读数的总和；

n —— 规定测试时间段内读数的总次数。

b） 绘制出测试点的电压－时间曲线；

c） 绘制出干扰管段的最大、最小、平均干扰电压－距离曲线，即干扰电压分布曲线。

B.2.4 交流电流密度测试

B.2.4.1 适用范围

适用于监测及评估管道运行期间交流干扰腐蚀影响的测量。

B.2.4.2 仪器

交流电流表；

参比电极:应采用铜—饱和硫酸铜电极，代号CSE，并应符合下列要求:流过硫酸铜电极的允许电流密度不大于5uA/㎝^{2}；电位漂移不能超过30㎷；

B.2.4.3 检查片安装

a）对于管线详细测试，可使用裸露面积为 100㎜^{2} 的便携式棒状探头。将便携式棒状探头插入靠近管道的土壤内，并通过测量电缆与管道电连通，保持与管道相同的阴极保护和交流干扰状态。

b) 对用于监测及评估管道运行期间交流腐蚀影响的测量，应使用腐蚀检查片组（如：3 片），其中应有一个检查片通过测量电缆与管道电连通，保持与管道相同的阴极保护和交流干扰状态。检查片与管道的净距约 0.5m，检查片除裸露面积为 100㎜^{2} 的金属表面外，其余部位应作好防腐绝缘。

B.2.4.4 测量步骤

a)将交流电流表串入回路与管道及挂片相连接，接线方式见交流电流密度测量接线图（图 B.4）。

b)将交流电流表调至适宜的量程上，记录测量值和测量时间。

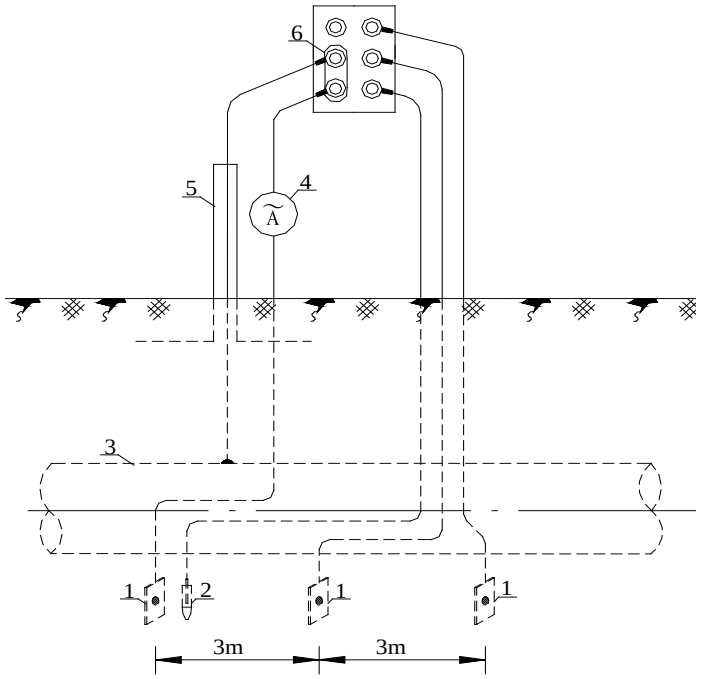


图 B.4 交流电流密度测量接线图

1—腐蚀检查片；2—长效硫酸铜参比电极；3—埋地钢质管道；4—交流电流表；5—测试桩；6—铜质连接片

B.2.4.5 数据处理

将直接测量获得的交流电流值（I_{AC}）除以检查片裸露面积即为交流电流密度值（J_{AC}）。

B.2.5 感应电流测试

B.2.5.1 适用范围

该方法可以用于测试静态干扰与动态干扰的感应电流。在进行测试时，如果具备与管体相连的条件，可以同时测试管中电位。

B.2.5.2 仪器

利用感应电流测试法，需使用的仪器为感应电流测试仪。

- 智能感应器
- 灵敏探杆
- GPS 同步实时通讯的智能信号发送器（GPS 可选）
- 智能感应器控制软件（便携式电脑应用）
- 数据浏览软件（便携式电脑应用）
- 笔记本电脑

B.2.5.3 测试步骤

B.2.5.3.1 静态干扰

将感应电流测试仪横跨在管道正上方，测试示意图如图 B.5 所示，感应电流测试仪优先选用表 B.1-1 中能测试感应电流的测试仪，为了确保测试效果，在条件具备的条件下，应该采用带 GPS 实时同步通讯中断器。如果测试点位于市区环境，或者管道附近有高压电缆，为避免来往的车辆或平行管线（电缆）

的电磁干扰对检测结果的影响，应在管道上方打出一个插入孔，将带有磁力计的探针插入松软地面，并使探针的末端位于管道顶部的中心位置，同时，将探针与感应电流测试仪相连。

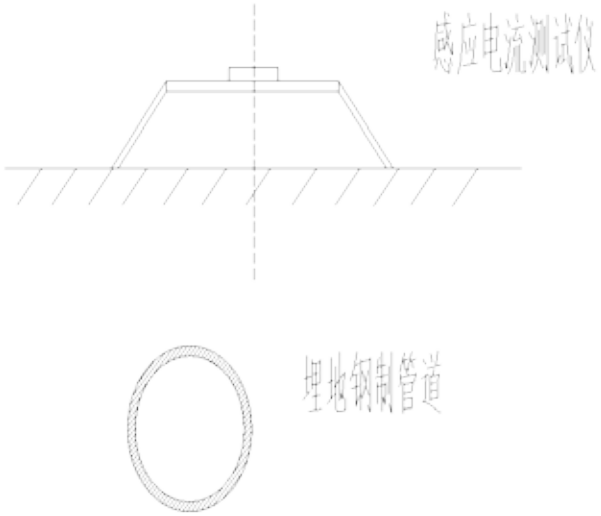


图 B.5 感应电流测试示意图

B.2.5.3.2 动态干扰

为了对来自电气化铁路，或者邻近有阴极保护的管道的杂散电流干扰，可以采用动态杂散电流不开挖测试方法。测试示意图如图 B.6 或图 B.7。一定数量的感应电流测试仪（或探针）以一定的距离间隔和记录时间间隔放置在目标管线的正上方，可以有效测试出管道被监测部分的动态杂散电流的分布情况。

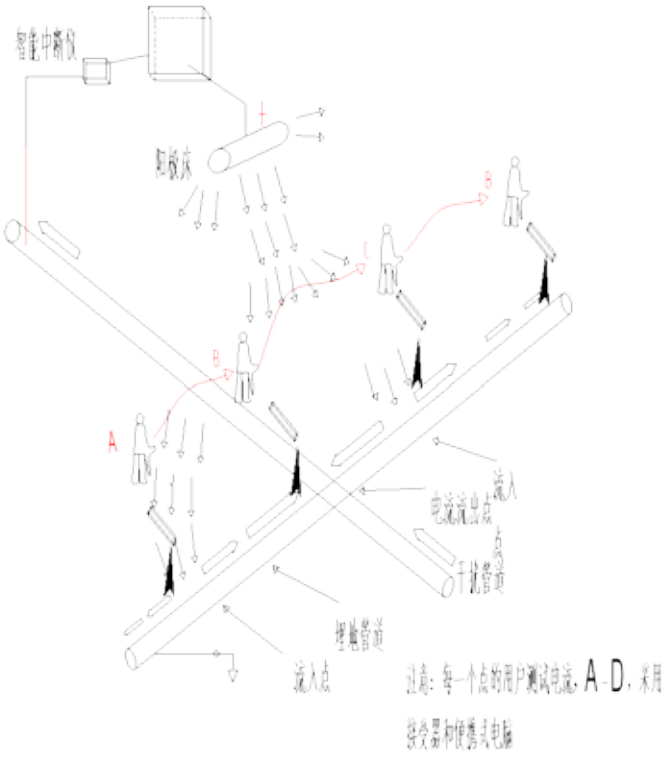
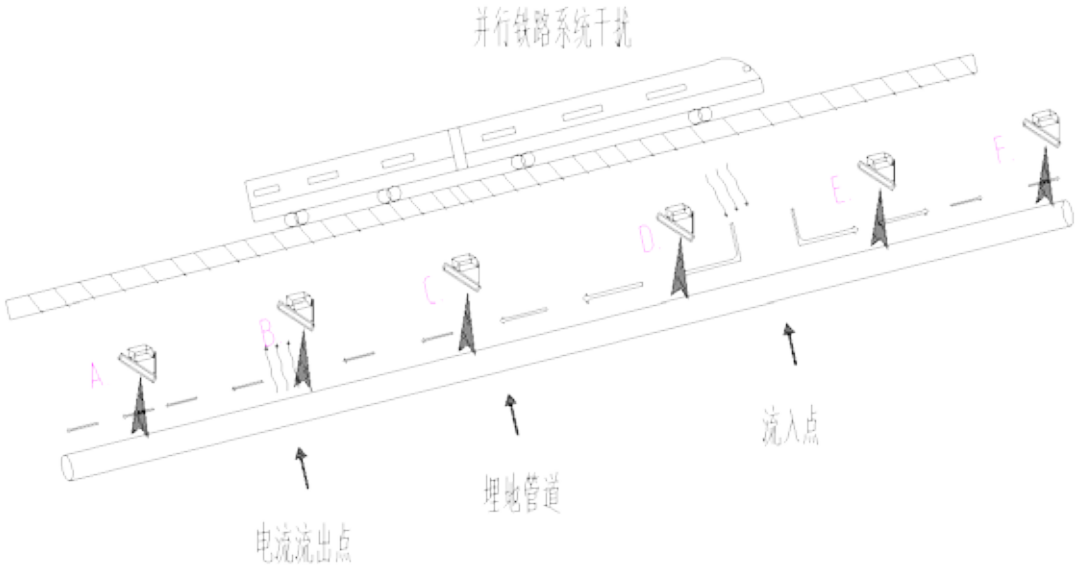


图 B.6 有阴极保护管道杂散电流干扰测试



B.7 轨道交通对管道的杂散电流动态干扰测试图

在某些情况下杂散电流是动态变化的，如：来自电气化铁路系统的杂散电流，通常要将杂散电流测试仪比较长的时间地放置在一个地方。在这种情况下，在检测过程要将数据存储下来。一定数量的感应电流测试仪（或探针）以一定的距离间隔和记录时间间隔放置在目标管线的正上方，同时测试在相同时间段的感应电流值。另外，在条件许可的情况下，也应该同时测试感应电流仪放置处的管地电位。

附录 C
（规范性附录）
外防腐层物理性能测试方法

C.1 外防腐层漏点检测

C.1.1 适用范围

本方法适用钢质管道外防腐层中的漏点，如针孔、缝隙、穿透外防腐层的金属微粒等缺陷。能检测出外防腐层过薄的位置。

C.1.2 仪器

输出直流电压为 900～20000V 的电火花检漏仪，装有由铜丝刷或其他导电材料组成的探测电极,音频信号发生器以及连接管壁的地线，峰值电压表。

C.1.3 测试步骤

C.1.3.1 检漏试验前，应按仪器说明书中给出的检漏电压值，用峰值电压表或示波器校准检漏仪。

C.1.3.2 检漏电压与外防腐层的关系：

外防腐层厚度小于 1mm 时：

$$V = 3294\sqrt{T} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{（C.1）}$$

外防腐层厚度大于或等于 1mm 时：

$$V = 7843\sqrt{T} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{（C.2）}$$

式中：

V——检漏电压峰值，单位为伏特（V）；

T——外防腐层厚度，单位毫米（mm）。

C.1.3.3 检漏电压也可用外防腐层每毫米厚的绝缘击穿电压乘以防腐层最小允许厚度来确定。

注:各种外防腐层每毫米厚的绝缘击穿电压可通过以下试验方法确定：在已知厚度的防腐层上逐渐增加检漏电压并测出检漏仪刚好报警时的电压值, 将此值除以防腐层的已知厚度即得到每毫米厚的绝缘击穿电压值。

C.1.3.4 把地线一端与金属管壁相连接，地线的另一端接检漏仪，再将探测电极和检漏仪相连接，然后开启检漏仪。

注:由于涉及到高压，检漏仪开启后，操作者不能同时接触地线和探测电极的金属部分。

C.1.3.5 将探测电极沿外防腐层表面移动进行检漏，并始终保持探测电极和外防腐层表面紧密接触。当探测电极经过外防腐层漏点或厚度过薄位置时，检漏仪就会报警，此时可移回电极，通过观察电火花的跳出点确定漏点的位置。

C.1.3.5 检漏过程中必须确保外防腐层表面干燥，并注意保持探测电极距金属管端或金属裸露面至少 13mm。

C.2 外防腐层厚度检测

C.2.1 适用范围

本方法适用于测量钢管直径不小于 13mm，厚度 6mm 以下的防腐层。本方法不适用于测量太柔软或受压时易变形的防腐层。

C.2.2 仪器

磁性涂层测厚仪。

C.2.3 注意事项

C.2.3.1 在测量前，应按照生产厂家说明书中的规定，采用适当厚度的标准片进行校准。在仪器使用过程中，每隔一段时间应校准一次。

C.2.3.2 对硬质聚氨酯泡沫防腐保温层，当无法采用磁性涂层测厚仪法时，可利用游标卡尺进行检测试。

C.2.3.3 测量防腐层厚度时，在管道的前、后、左、右四点进行测量，并得出平均值、最大值、最小值。

C.3 外防腐层粘结力（附着力）测定方法

本方法适用于测量在用埋地管道的各种防腐层粘结力（附着力）的测试。

C.3.1 聚乙烯防腐层

C.3.1.1仪器：

a)测力计：最小刻度为10N；

b)钢板尺：最小刻度为1mm；

c)裁刀：可以划透防腐层；

d)表面温度计：精度为 1℃。

C.3.1.2 试验

先将防腐层沿环向划开宽度为 20～30mm、长 10cm 以上的长条，划开时应划透防腐层，并撬起一端。用测力计以 10 mm/min 的速率垂直钢管表面匀速拉起聚乙烯层，记录测力计数值，如图 C. 1。50℃士 5℃时的粘结力可在防腐层涂敷后的冷却过程中测定，也可将防腐层加热后测定。测定时，应采用表面温度计监测防腐层的外表面温度，剥离试验应在 45℃--55℃之间进行并完成。

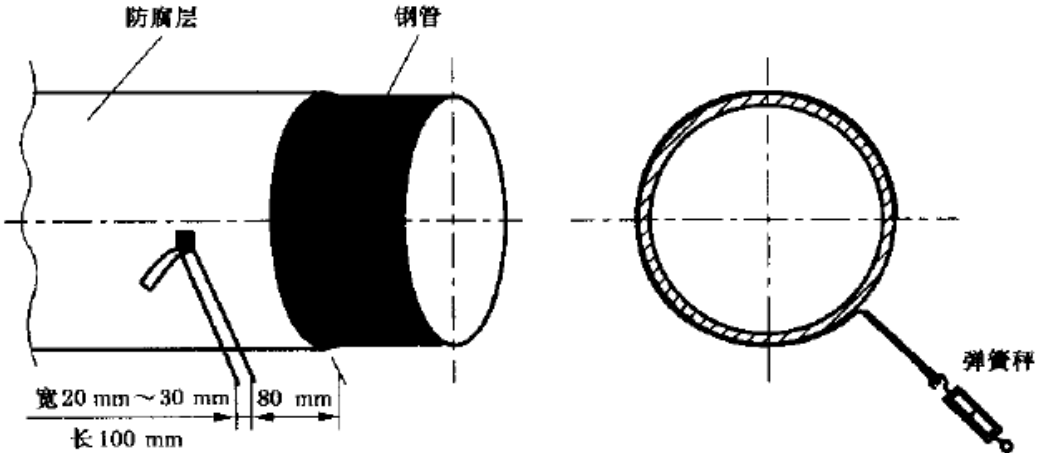


图 C.1 剥离强度测试示意图

C.3.1.3 测定结果

将测定时记录的力值除以防腐层的剥离宽度，即为剥离强度，单位为 N/cm。

C.3.2 熔结环氧粉末外涂层附着力测试

C.3.2.1 测试设备

试验设备应符合如下规定：

a) 可控温慢速烘箱或耐腐蚀的水浴

b) 烧杯

c) 温度计

d）通用小刀

C.3.2.2 试件要求

试验室涂覆试件尺寸约为 100mm×100mm×6mm。管段试件尺寸为 100mm ×100mm×管壁厚度，试件数为 3 件。

C.3.2.3 测试步骤

a）每次试验在浸泡试件之前先把新鲜水预热到 75℃士 30℃。把试件放人烘箱或水浴，用预热的水充分淹没试件，在 75℃士 3℃下浸泡至少 24h，然后取出试件；

b）当试件仍温热时，立即用小刀在涂层上划一个大约 30mm×15mm 的长方形，透过涂层到达基底板，然后在空气中自然冷却到 20℃士 3℃。在取出试件后 1h 内从长方形的任一角将刀尖插人涂层下面，以水平方向的力撬剥涂层，连续推进刀尖直到长方形内的涂层全部撬离或涂层表现出明显的抗撬性能为止。

c）按下列分级标准评定长方形内涂层的附着力等级：

1） 1 级——涂层明显地不能被撬剥下来；

2） 2 级——被撬离的涂层小于或等于 50%；

3） 3 级——被撬离的涂层大于 50%，但涂层表现出明显的抗撬性能；

4） 4 级——涂层很容易被撬剥成条状或大块碎屑；

5） 5 级——涂层成一整片被剥离下来。

C.3.2.4 试验报告

试验报告包括以下内容：

a） 环氧粉末的批号；

b） 附着力的级别；

c） 试验日期。

C.3.3 聚乙烯胶粘带防腐层

C.3.3.1 仪器：

a)测力计：最小刻度为 10N；

b)钢板尺：最小刻度为 1mm；

c)裁刀：可以划透防腐层；

d)表面温度计：精度为 1℃。

C.3.3.2 测试步骤

先将防腐层沿环向划开宽度 10mm、长 100mm 以上的长条，划开时应划透防腐层，并撬起一端。用测力计以不大于 300 mm/min 的速率垂直钢管表面匀速拉起聚乙烯层，记录测力计数值，如图 C.2 。

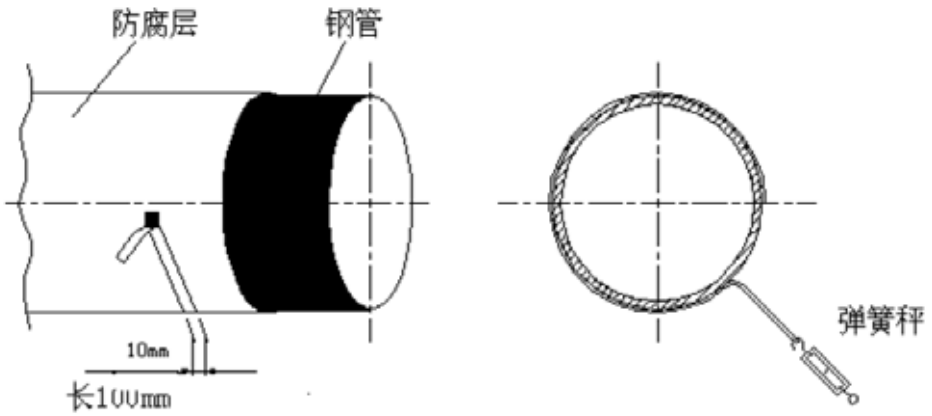


图 C．2 附着力测试

C.3.4 环氧煤沥青防腐层

C.3.4.1 仪器：

a)钢板尺：最小刻度为 1 mm.

b)裁刀：可以划透防腐层

C.3.4.2 测试步骤

a) 普通级防腐层应符合下列规定：

用锋利刀刃垂直划透防腐层，形成边长约 40mm、夹角约 45º 的 V 形切口，用刀尖从切割线交点挑剥切口内的防腐层；

b) 加强级和特加强级防腐层应符合下列规定：

用锋利刀刃垂直划透防腐层，形成边长约 100mm、夹角 45º～60º 的切口，从切口尖端撕开玻璃布；

防腐层粘结力合格评判标准见 SY/T 0447。

C.3.5 石油沥青防腐层

C.3.5.1 仪器：

a)钢板尺：最小刻度为 1 mm.

b)裁刀：可以划透防腐层

C.3.5.2 测试步骤

在管道防腐层上，切一夹角为 45°～60°的切口，切口边长约 40～50mm，从角尖端撕开防腐层，撕开面积宜为 30～50cm^2，防腐层应不易撕开，撕开后粘附在钢管表面上的第一层石油沥青或底漆占撕开面积的 100%为合格。

附录 D
（规范性附录）
防腐层破损点不开挖检测方法

D.1 交流电位梯度检测方法（ACVG）

D.1.1 交流地电位差测量法（A 字架）

D.1.1.1 适用范围

交流地电位梯度法（ACVG）采用埋地管道电流测绘系统（PCM）与交流地电位差测量仪（A字架）配合使用，通过测量土壤中交流地电位梯度的变化，用于埋地管道防腐层破损点的查找和准确定位。对处于套管内破损点未被电解质淹没的管道本方法不适用，另外下列情况会使本方法应用困难或测量结果的准确性受到影响：

a) A字架距离发射机较近；

b) 测量不可到达的区域，如河流穿越；

c) 外防腐层导电性很差的管段，如铺砌路面、冻土、沥青路面、含有大量岩石回填物。

D.1.1.2 设备

交流地电位梯度法测试设备包括发射机、接收机、交流地电位差测量仪（A字架），以及配套的电源设备、连接线、接地电极等。

D.1.1.3 测量步骤

a) 按交流电流衰减法的测量步骤将发射机接线连接好，并用接收机对管道定位；

b) 按仪器的使用说明书将接收机固定在A字架上，并与A字架接线连接好后，再将A字架的两个电极插入地面靠近发射机的接地极附近，这时会以三位数显示“dB”（分贝）读数，交流地电位差测量仪箭头应显示远离接地点方向；

c) 在目标管道正上方检测。沿着怀疑有防腐层破损点的管段的路由和测量仪箭头指示的方向，以一定间隔将A字架触地测量，箭头指示无反转表明无破损点，接近破损点时dB值增大，当走过破损点时，箭头会反向指向破损点，出现这情况要反向移动，用更小的间隔重复测量，直至将A字架向前向后稍加移动至箭头变回反向时为止。当A字架正好位于破损点正上方时，显示的箭头为两个方向，同时显示的dB值读数最小，在A字架中心划一条垂直线，之后将A字架旋转90度，并沿这垂直线再进一步准确定位，使A字架向前向后稍加移动至箭头变回反向为止。这样两条线的交叉点就是管道防腐层破损点位置。

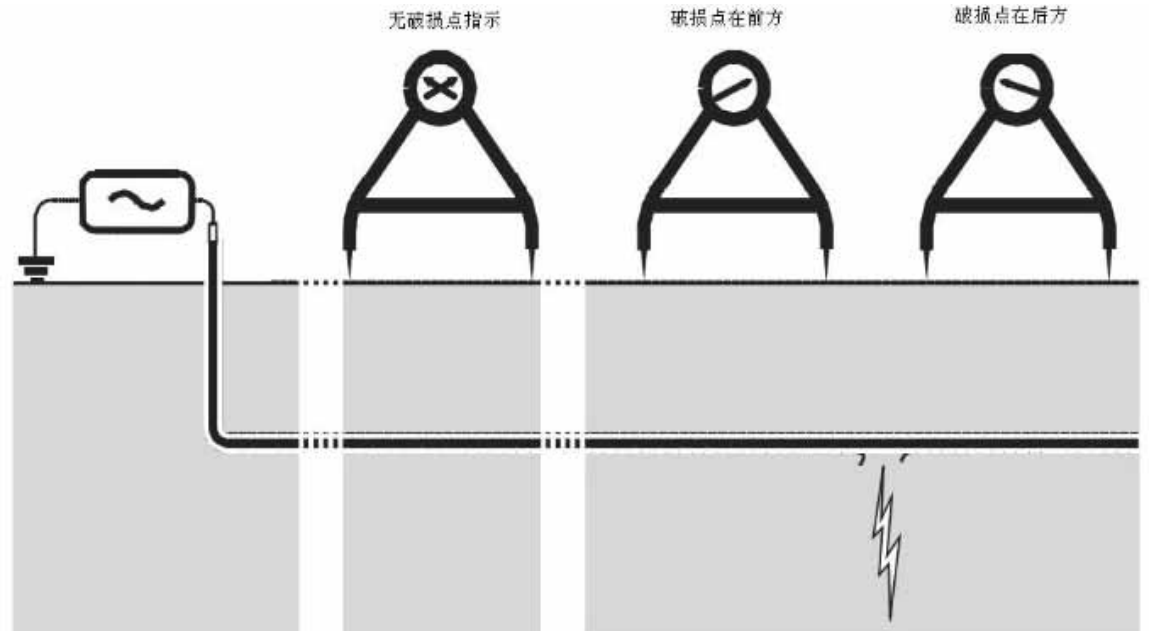


图 D.1 测量原理图

D.1.2　PEARSON（音频法）

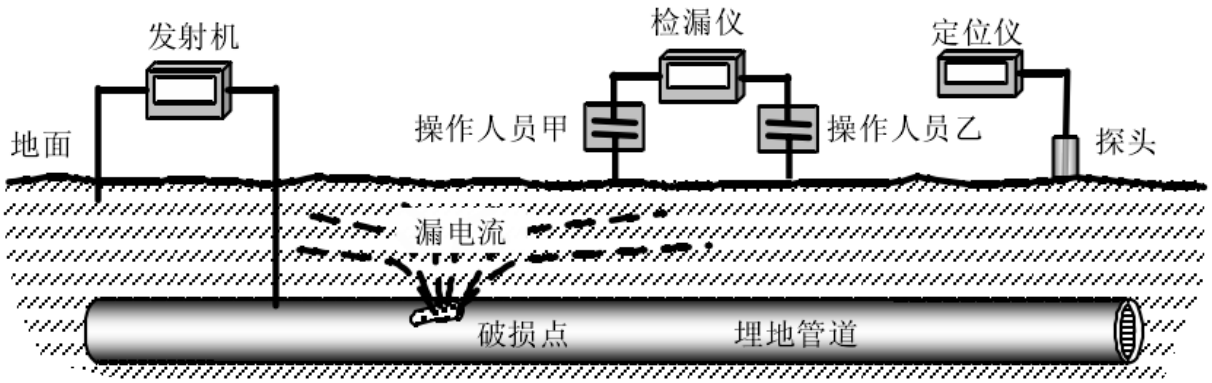
D.1.2.1 适用范围

音频检漏法适用于一般地段的埋地管道防腐层检漏；不适用于露空管道、外防腐层导电性很差的管道、水下管道、套管内的管道的防腐层地面检漏；水田或沼泽地、高压交流电力线附近的埋地管道，使用本方法进行防腐层检漏比较困难。

D.1.2.2 设备

音频检漏仪主要由发射机、寻管仪（探管仪）、接收系统及其配套的电源系统组成。

D.1.2.3 测量原理



图D.2 Pearson法原理图

D.1.2.4 测量步骤

a) 检查发射机、寻管仪、接收机电源电量是否充足，并在合适的地方，将发射机的信号输出端用仪器的短线与管道连接，长线与接地极连接。

b) 按仪器的使用说明书调节发射机的输出电流。

c) 按仪器的使用说明书设定寻管仪的寻管方式和接收机的灵敏度。

d) 两位检测人员按使用说明书戴好腕表，接好电缆，在距发射机接入点30m以后，沿管顶一前一后行走，前面人员携带寻管仪，后面人员携带接收机，保证两名检测人员一直沿着管顶前进。

e) 当接收机的声、电信号越来越强时，预示着前进方向出现破损点，当手持寻管仪者走到破损点正上方时，声、电信号最强；两人继续前进，声、电信号逐步减弱，当破损点位于两人的几何中心点时，信号最弱；两人继续前进，声、电信号又逐步增强，当后面持接收机者位于破损点正上方时，声、电信号第二次达到最强。

f) 测量中两次声、电信号最强，一次声、电信号相比最弱的位置，即为防腐层破损点的正上方。确定破损点准确位置后，作好地面标志和记录坐标位置。

D.2 直流电位梯度法（DCVG）

D.2.1 适用范围

直流地电位梯度法（DCVG）测量技术适用于埋地管道外防腐层破损点的查找和准确定位；对破损点腐蚀状态进行识别；结合密间隔管地电位测量（CIPS）技术可对外防腐层破损点的大小及严重程度进行定性分类。对套管内破损点未被电解质淹没的管道不适用，另外下列情况会使本方法测量结果的准确性受到影响或应用困难：

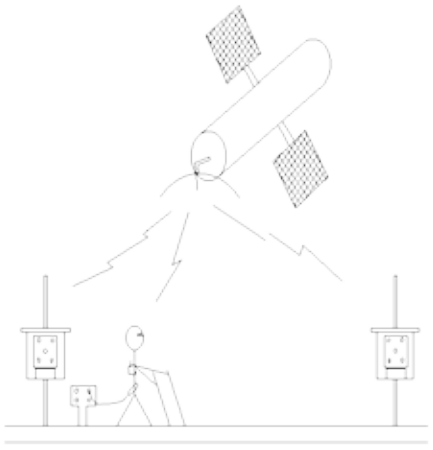
a) 剥离防腐层下或绝缘物造成电屏蔽的位置，如破损点处外包覆或衬垫绝缘物的管道；

b) 测量不可到达的区域，如河流穿越；

c) 外防腐层导电性很差的管段，如铺砌路面、冻土、沥青路面、含有大量岩石回填物。

D.2.2 方法介绍

直流电位梯度法原理图如图D.3。采用周期性同步通/断的阴极保护直流电流施加在管道上后，利用两根硫酸铜参比电极探杖，以密间隔测量管道上方土壤中的直流地电位梯度，在接近破损点附近电位梯度会增大，破损面积越大，电位梯度也越大，根据测量的电位梯度变化，可确定防腐层破损点位置；通过检测破损点处土壤中电流的方向，可识别破损点的腐蚀活性；依据破损点IR%定性判断破损点的大小及严重程度。



图D.3 直流电位梯度法原理

D.2.3 设备

a) CIPS/DCVG（管地电位及直流地电位梯度）测量主机一套；

b) GPS卫星同步电流断续器两台或更多；

c) 探管仪；

d) 两根硫酸铜参比电极探杖；

e) 配套测量线轴及连接导线。

D.2.4 测量步骤

a) 在测量之前，应确认阴极保护正常运行，管道已充分极化。

b) 检查测量主机电池电量，并对两硫酸铜电极进行校正。

c) 将两根探杖与CIPS/DCVG测量主机相连,按密间隔电位测量法对管道定位、设备安装及通/断周期设置完毕后，测量人员沿管道行走，一根探杖（主机上标有PIPE端）一直保持在管道正上方，另一根探杖放在管道正上方或垂直于管道并与其保持固定间距（1m~2m），以1~3m间隔进行测量。当两根探杖都与地面接触良好时读数，记录同步断续器接通和断开时直流地电位梯度读数的变化，以及柱状条显示方向或数字的正负。

d) 当接近破损点时，可以看到电位梯度数值会逐渐增大；当跨过这个破损点后，地电位梯度数值则会随着远离破损点而逐渐减小，变化幅度最大的区域即为破损点近似位置。

e) 在破损点近似位置，返回复测，以精确确定破损点位置。在管道正上方找出电位梯度读数显示为零的位置；再在与管道走向垂直的方向重复测量一次，两条探杖连线的交点位置就是防腐层破损点的正上方。

f) 在确定一个破损点后，继续向前测量时，宜先以每0.5m的间隔测量一次，在离开这个梯度场后，若没有出现地电位梯度读数及极性的改变，可按常规间距继续进行测量；否则，说明附近有新的破损点。

g) 在确定的破损点位置处，通过观察测量主机上电流方向柱状条的显示方向，对管道在通电和断电状态下，土壤中电流流动的方向分别进行测量与辨别，以判断破损点部位管道的腐蚀活跃性。所测结果按表3进行填写记录，原则上对破损点腐蚀状态的评价分为：阴极/阴极（C/C）、阴极/中性（C/N）、阴极/阳极（C/A）和阳极/阳极（A/A）四种类型。

h) 在确定的破损点位置处，测量并记录储存该点的通电电位（Von）、断电电位（Voff）、电位梯度（VG，on和VG，off）、GPS坐标及里程；应对附近的永久性标志、参照物及它们的位置等信息进行记录，并应在破损点位置处作好标识，尤其是通/断状态下电流均从破损点流出到土壤的点。

D.2.5 数据处理

a）将现场测量数据下载到计算机中，进行数据处理分析。

b）以距离为横坐标、直流地电位梯度为纵坐标绘出测量段的DCVG分布曲线图。

c）根据破损点位置处测量的数据，计算表征破损点的大小及严重程度的IR%值，并根据使用经验和对典型破损点的验证开挖结果，分类记录。

d）根据破损点位置处测量的数据，将测量数据和计算结果填写在下表中。

表D．1 破损点DCVG测量数据表

编号	位置	管地电位 mV		直流地电位梯度 mV		电流方向		腐蚀状态类型	IR%	备注
		V_{on}	V_{off}	ΔV_{on}	ΔV_{off}	通电	断电			

e）分级情况见下表

表D．2 破损点严重程度分级

级别	1	2	3	4
IR%值	1～15	16～35	36～60	61～100

.

附录 E

（规范性附录）

绝缘法兰（接头）绝缘性能测试方法

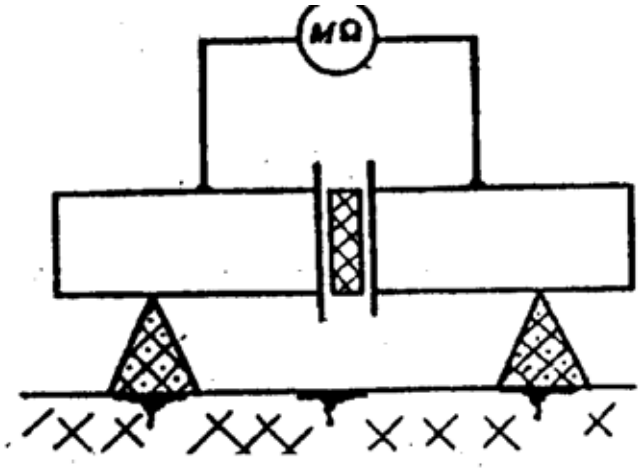
E.1 兆欧表法

E.1.1 适用范围

制成但尚未安装到管道上的绝缘法兰（接头），其绝缘电阻值用兆欧表法测量。

E.1.2 接线示意图

按图 E.1 所示，宜用磁性接头（或夹子）将 500V 兆欧表输入端的测量导线压接（夹接）在绝缘法兰（接头）两侧的裸管上（连接头必须除锈），转动兆欧表手柄达到规定的转速，持续 10s,此时兆欧表稳定指示的电阻值即为绝缘法兰（接头）的绝缘电阻值。



1-绝缘支墩；2-绝缘法兰（接头）

图 E.1 兆欧表法测试接线示意图

E.2 电位法

E.2.1 适用范围

已安装到管道上的绝缘法兰（接头），可用电位法判断其绝缘性能。

E.2.2 接线示意图

如图 E.2 所示，在被保护管道通电之前，用数字万用表 V 测试绝缘法兰（接头）非保护侧 a 的管地电位为 VA.1；调节阴极保护电源，使保护侧 b 点的管地电位 Vb 达到-0.85～-1.50V，再测量 a 点的管地电位 V A.2，若 V A.1 与 VA.2 基本相同，则认为绝缘法兰（接头）绝缘性能良好；若｜V A.2｜>｜VA.1｜，且 V A.2 接近 Vb 值，则认为绝缘法兰（接头）绝缘性能可疑。若辅助阳极距绝缘法兰(接头)足够远，且判明与非保护侧相连的管道没同保护侧的管道接近或交叉，则可判定为绝缘法兰(接头)的绝缘性能很差(严重漏电或短路)；否则应按 E.3 的方法进一步测试。

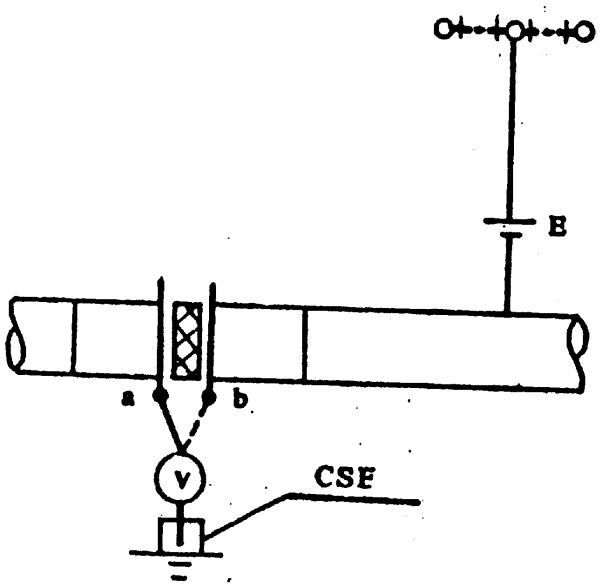


图 E.2　电位法测试接线示意图

E.3 漏电电阻测试法

E.3.1 适用范围

已安装到管道上使用的绝缘法兰(接头),采用电位法测试其绝缘性能可疑时。

E.3.2 接线示意图

应按图 E.3 所示的测试接线示意图进行漏电电阻或漏电百分率测试。

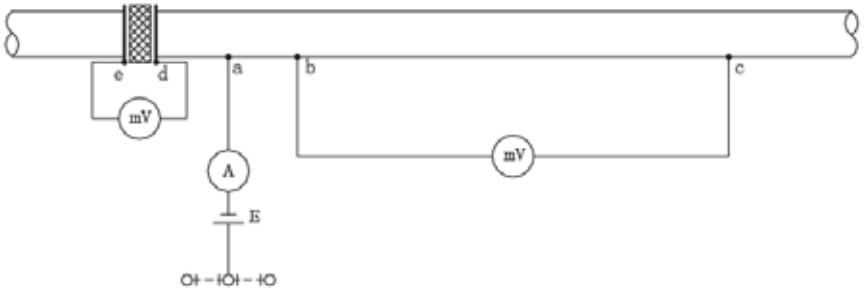


图 E.3　漏电电阻测试接线示意图

E.3.3 测试的步骤：

a)按图 E.3 接好测试线路，其中 a、b 之间的水平距离不得小于πD，b、c 段的长度宜为 30m。

b)调节强制电源 E 的输出电流 I_1，使保护侧的管道达到阴极保护电位值。

c)用数字万用表测定绝缘法兰(接头)两侧 d、e 间的电位差ΔV。

d)测试 bc 段的电流 I_2。

e)读取强制电源向管道提供的阴极保护电流 I_1。

E.3.4 计算

E.3.4.1 绝缘法兰(接头)漏电电阻按下式计算：

$$R_H = \frac{\Delta V}{I_1 - I_2} \quad \text{(E.1)}$$

式中：

RH —— 绝缘法兰(接头)漏电电阻(Ω);

ΔV —— 绝缘法兰两侧的电位差(V);

I1 —— 强制电源 E 的输出电流(A);

I2 —— bc 段的管内电流(A)。

E.3.4.2 绝缘法兰(接头)的漏电百分率按下式计算：

$$\text{漏电百分数} = \frac{I_1 - I_2}{I_1} \times 100 \quad \text{(E.2)}$$

E.3.4.3 若测试结果 $I_2>I_1$，则认为绝缘法兰(接头)的漏电电阻无穷大，漏电百分率为零，绝缘法兰(接头)的绝缘性能良好。

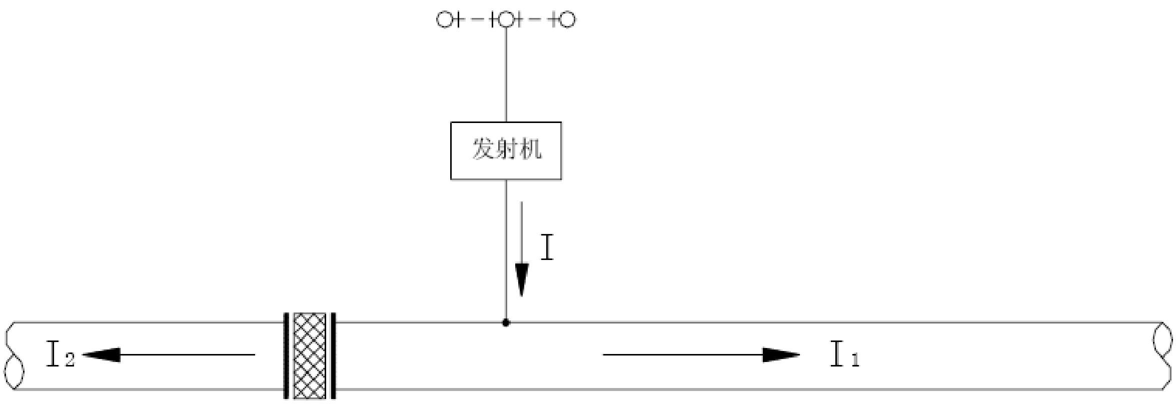
E.4 电流衰减法测试漏电率

E.4.1 适用范围

已建成的管道上的绝缘法兰（接头），测试单位拥有管道电流测绘系统时，可用管道电流测绘系统（PCM）测量漏电率，判断绝缘性能。

E.4.2 测量方法

a) 测量接线如图E.4所示。



图E.4 漏电率测量接线图

b) 断开保护侧阴极保护电源。

c) 按PCM操作步骤，用PCM发射机在保护侧接近绝缘法兰（接头）处向管道输入电流I。

d) 在保护侧电流输入点外侧，用PCM接收机测量并记录该侧管道电流I_1。

e) 在非保护侧用PCM接收机测量并记录该侧管道电流I_2。

E.4.3 数据处理

用下式计算绝缘法兰（接头）漏电百分率。

$$\eta = I_2/(I_1+I_2)\times 100\% \cdots\cdots (E.3)$$

式中：

η——绝缘法兰（接头）漏电百分率，%；

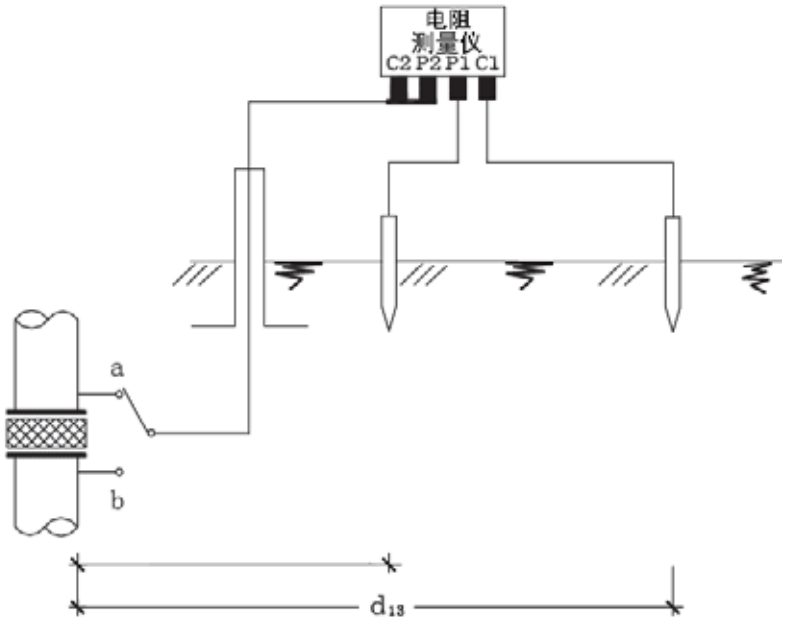
I1——接收机测量的绝缘法兰（接头）保护侧管内电流，A；

I2——接收机测量的绝缘法兰（接头）非保护侧管内电流，A。

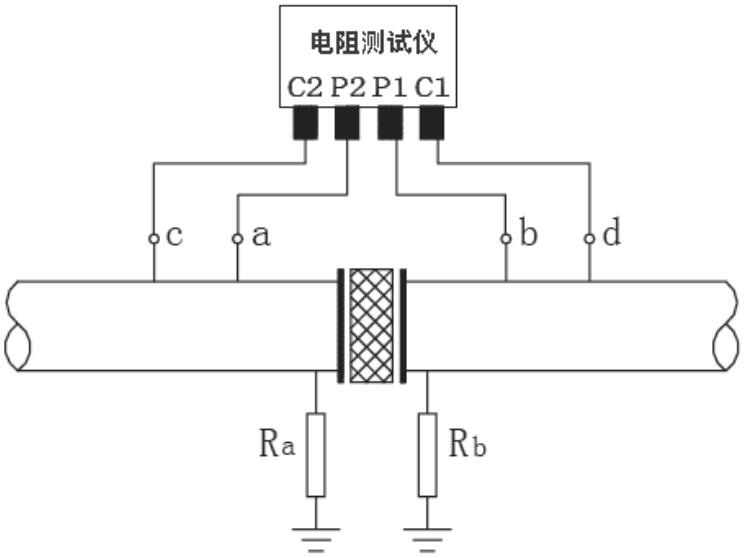
E.5 接地电阻测量仪法

E.5.1 适用范围

已建成的管道上的绝缘法兰（接头），在其两侧具有四个测量连接点时，可使用接地电阻测量仪法，定量测量其电阻。



图E.5 绝缘法兰（接头）两端接地电阻测量接线图



图E.6 接地电阻仪法测量接线图

E.5.2 测量方法

a) 先测量绝缘法兰（接头）两端管道的接地电阻，其测量接线如图E.5所示。分别对a点和b点进行测量，读取并记录仪表读数值Ra和Rb。

b）再测量绝缘法兰（接头）回路的总电阻，其测量接线按图E.6所示。测量并记录仪表读数值Rr。当Rr≤1Ω时，相邻两测量接线点的间隔应不小于πD；当Rr＞1Ω时，相邻两测量接线点（a点与c点，b点与d点）可合二为一，此时C1与P1、C2与P2可短接。

E.5.3 数据处理

实际运行工况下的绝缘法兰（接头）的电阻按下式计算。

$$R=\frac{R_r(R_a+R_b)}{(R_a+R_b)-R_r} \quad \cdots\cdots(E.4)$$

式中：

R ——绝缘法兰（接头）的电阻，Ω；

Rr——绝缘法兰（接头）回路的总电阻，Ω；

Ra——绝缘法兰（接头）保护端接地电阻，Ω。

Rb——绝缘法兰（接头）非保护端接地电阻，Ω。

附录 F
（规范性附录）
管内电流测试

F.1 电压降法

F.1.1 适用范围

具有良好外防腐层的管道。当被测管段无分支管道、无接地极，又已知管径、壁厚、材料的电阻率时，沿管道流动的直流电流按图 F.1 所示的接线方式测试。

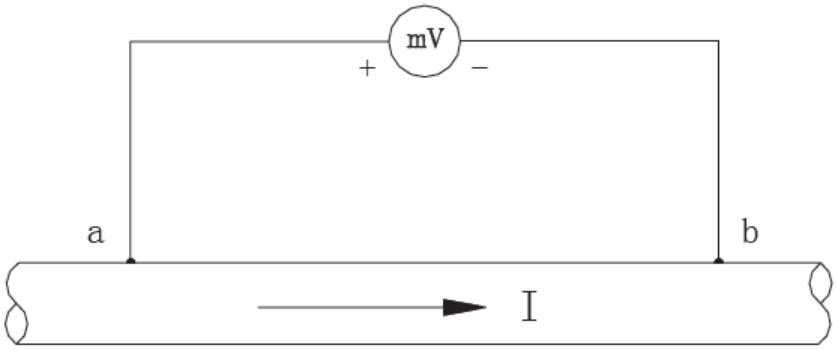


图 F.1　电压降法测试接线示意图

F.1.2 测量步骤

F.1.2.1 测量 a、b 两点之间的管长 Lab，误差不大于 1%。Lab 的最小长度应根据管径大小和管内的电流量决定，最小管长应保证 a、b 两点之间的电位差不小于 50μV，一般取 Lab 为 30m

F.1.2.2 测量 a、b 两点之间电位差。先用数字万用表判定 a、b 两点的正、负极性并粗测 Vab 值。然后将正极端和负极端分别接到 UJ33a 直流电位差计“未知”端的相应接线柱上，细测 Vab 值。

F.1.2.3　ab 段管内的电流按下式计算：

$$I = \frac{V_{ab} \cdot \rho(D - d)d}{rL_{ab}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (F.1)$$

式中：

I——流过 ab 段的管内电流（A）；

Vab——ab 间电位差（V）；

D——管道外径（mm）；

δ——管道壁厚（mm）；

ρ——管材电阻率（Ω·㎜^{2}/m）；

Lab——ab 间的管道长度（m）。

F.2 标定法

F.2.1 适用范围

具有良好外防腐层的管道，当被测管段无分支管道、无接地极，在管径、长度、壁厚、钢材电阻率

四项参数中，有未知数时，可使用标定法测量管内电流。

F.2.2 仪器

宜采用 UJ-33D-1 电位差计或分辨率为 1μV 的数字电压表；

磁盘变阻器；

F.2.3 接线示意图

标定法的接线示意图见图 F.2。

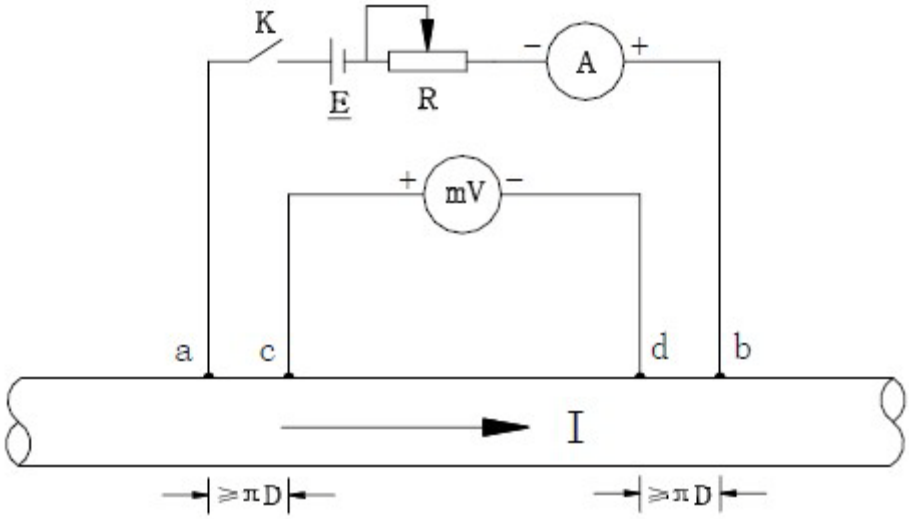


图 F.2.标定法测试接线示意图

F.2.4 测试步骤

a）图 F.2 中，Lac≥πD，Ldb≥πD，Lcd 的长度不宜小于 10m。

b) 断开开关K，测量并记录c、d的电位差V0，单位为mV，并注意极性，以识别被测管内电流流向。

c) 合上开关 K，调节变阻器，使电流表的读数 I1 约为 10A，并同时记录毫伏表测量的 c、d 电位差 V1。再调节变阻器，使电流表读数 I2 约为 5A，并同时记录毫伏表测量的 c、d 电位差 V2，单位为 mV，并注意极性，所施加的标定电流应与被测管内电流的流向相同。

F.2.5 数据处理

a) 按式（F.2）、式（F.3）和式（F. 4）分别计算施加I1和I2时的校正因子β1、β2及平均校正因子β。

$$\beta 1 = I1/(V1-V0) \cdots\cdots (F.2)$$

$$\beta 2 = I2/(V2-V0) \cdots\cdots (F.3)$$

$$\beta = (\beta 1 + \beta 2)/2 \cdots\cdots (F.4)$$

式中:

β1——施加I1电流时的校正因子，A/mV；

β_2——施加I_2电流时的校正因子，A/mV；

β——平均校正因子（c、d管段管道电阻的倒数），A/mV；

I_1——第一次标定施加的电流，A；

I_2——第二次标定施加的电流，A；

V_0——未施加标定电流时c、d电位差，mV；

V_1——施加I_1电流时c、d电位差，mV；

V_2——施加I_2电流时c、d电位差，mV。

b) c、d段管内电流按式（F. 4）计算。

$$I=V_0\times\beta \qquad \text{(F.5)}$$

式中：

I——c、d管段管内电流，A。

附录 G
（规范性附录）
接地电阻测试

G.1 辅助阳极接地电阻测试

G.1.1 适用范围

适用于阳极地床接地电阻测试。

G.1.2 仪器

宜选用接地电阻测量仪，（量程0～1～10～100Ω），精度0.5级。

G.1.3 测试接线示意图

阳极地床接地电阻测试接线示意图如图 G.1。

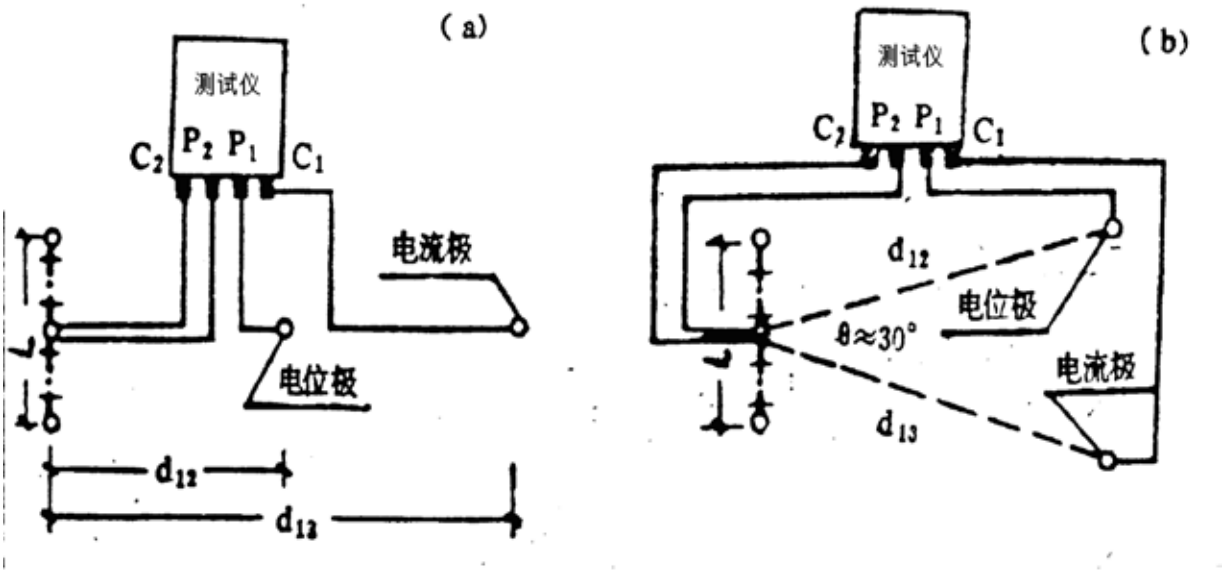


图 G.1　辅助阳极接地电阻测试接线示意图

G.1.4 测试步骤

G.1.4.1 当采用图 G.1（a）测量时，在土壤电阻率较均匀的地区，d_{13} 取 2L、d_{12} 取 L；在土壤电阻率不均匀的地区，d_{13} 取 3L、d_{12} 取 1.7L。测量过程中，电位极沿辅助阳极与电流极的连线移动三次。每次移动距离为 d_{13} 的 5%左右，若三次测试值接近，取其平均值作为辅助阳极接地电阻值；若测试值不接近，将电位值往电流极方向移动，直至测试值接近位置。

G.1.4.2 接地阳极接地电阻也可以采用图 G.1(b)所示的三角形布极法测量，此时 $d_{13}=d_{12}\geq 2L$。

G.1.4.3 按图G.1布好电极后，转动接地电阻测量仪的手柄，使手摇发电机达到额定转速，调节平衡旋钮，直至电表指针停在黑线上，此时黑线指示的度盘值乘以倍率即为接地电阻值。

G.2 牺牲阳极接地电阻测试

G.2.1 适用范围

适用于牺牲阳极接地电阻测试。

G.2.2 仪器

宜选用接地电阻测量仪，（量程0～1～10～100Ω），精度0.5级。

G.2.3 测试接线示意图

牺牲阳极接地电阻测试接线示意图如图 G.2。

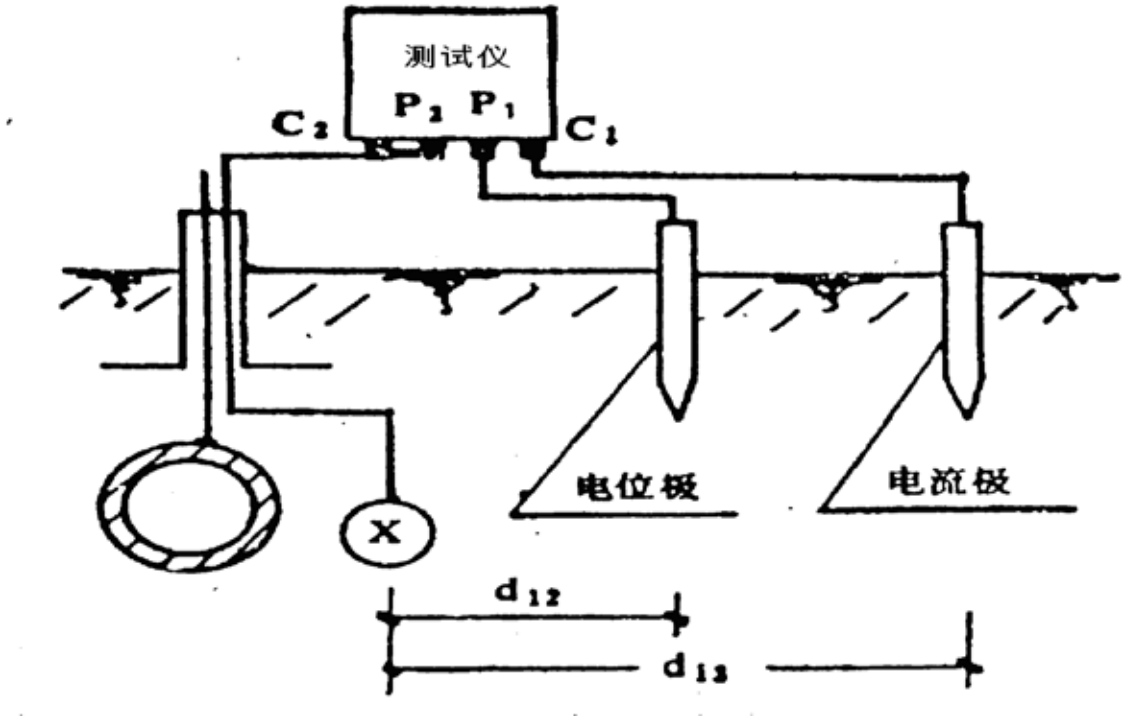


图 G.2 牺牲阳极接地电阻测试接线示意图

G.2.4 测试步骤

G.2.4.1 测量牺牲阳极接地电阻之前，应将牺牲阳极与管道断开，然后采用图 G.2 所示接线示意图沿垂直于管道的一条直线布置电极，d_{13} 约 40m，d_{12} 取 20m 左右，按 G.1.4.3 的操作步骤测量接地电阻值。

G.2.4.2 当牺牲阳极的支数较多或为带状牺牲阳极, 该组阳极的对角线长度(或带状牺牲阳极)大于 8m 时，按 G.1 测试接地电阻。但 d_{13} 不得小于 40m、d_{12} 不得小于 20m。

附录 H
（规范性附录）
牺牲阳极参数测试方法

H.1 开路电位测试

H.1.1 适用范围

本方法适用于牺牲阳极在埋设环境中未与管道相连时开路电位的测量。

H.1.2 仪器

宜选用数字万用表:内阻不小于10MΩ，准确度不低于2.5级；

参比电极:应采用铜一饱和硫酸铜电极，代号CSE，并应符合下列要求:流过硫酸铜电极的允许电流密度不大于5uA/cm^2；电位漂移不能超过30mV。

H.1.3 测量步骤

a)测量前，应断开牺牲阳极与管道的连接。

b)测量中，按图 H.1 的测量接线方式，将数字万用表的正极与牺牲阳极连接，负极与硫酸铜电极连接。

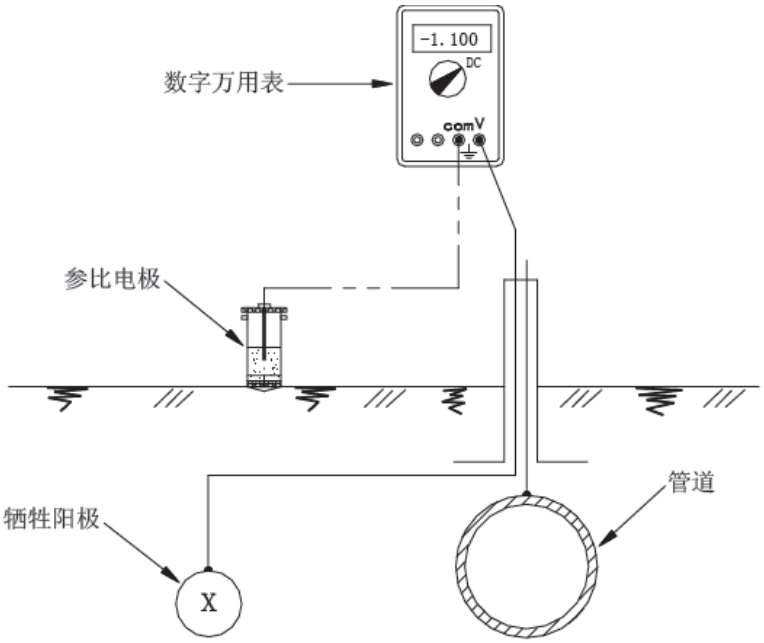


图 H.1 牺牲阳极开路电位测量接线图

c)将硫酸铜电极放置在牺牲阳极埋设位置正上方的潮湿土壤上，应保证硫酸铜电极底部与土壤接触良好。

d)将数字万用表调至适宜的量程上，读取数据，作好电位值及极性记录，注明该电位值的名称。

e)测量完成后将牺牲阳极与管道恢复连通。

H.2 闭路电位测试（牺牲阳极接入点管地电位）

H.2.1 适用范围

牺牲阳极闭路电位测量应采用远参比法。远参比法主要用于在牺牲阳极埋设点附近的管段，测量管

道对远方大地的电位，用于计算该点的负偏移电位值。

H.2.2 测量方法

a)远参比法的测量接线见图 H.2。

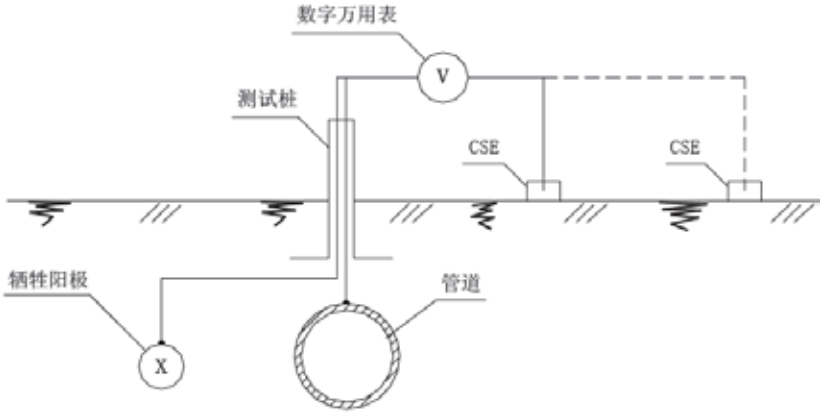


图 H.2 远参比法测量接线

b)将硫酸铜电极朝远离牺牲阳极的方向逐次安放在地表上，第一个安放点距管道测试点不小于 20m，以后逐次移动 5m。将数字万用表调至适宜的量程上，读取数据，作好电位值和极性记录，当相邻两个安放点测试的管地电位相差小于 2.5mV 时，参比电极不再往远方移动，取最远处的管地电位值作为该测试点的管道对远方大地的电位值。

H.3 输出电流测试

H.3.1 标准电阻法

H.3.1.1 适用范围

当测试单位有 0.1Ω或 0.01Ω标准电阻时，牺牲阳极（组）的输出电流应采用标准电阻法。

H.3.1.2 测量方法

H.3.1.2.1 标准电阻法测试接线示意图见图 H.3。

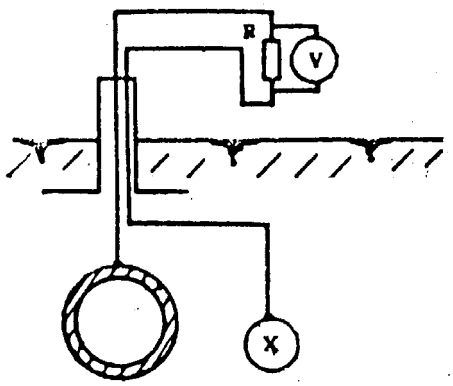


图 H.3 标准电阻法测试接线示意图

R-标准电阻；V-数字万用表；X-牺牲阳极

H.3.1.2.2 标准电阻的两个电流接线柱分别接到管道和牺牲阳极的接线柱上，两个电位接线柱分别接数字万用表，并将数字万用表置于 DC200mV 量程。接入导线的总长度不大于 1m，截面积不宜小于 2.5mm^2。

H.3.1.2.3 标准电阻的阻值应为 0.1Ω，准确度为 0.02 级。

H.3.1.2.4 牺牲阳极的输出电流按下式计算：

$$I = \frac{\Delta V}{R} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(H.1)}$$

式中：

I——牺牲阳极（组）输出电流（mA）；

ΔV——数字万用表读数（mV）；

R——标准电阻阻值（Ω）。

H.3.2 直测法

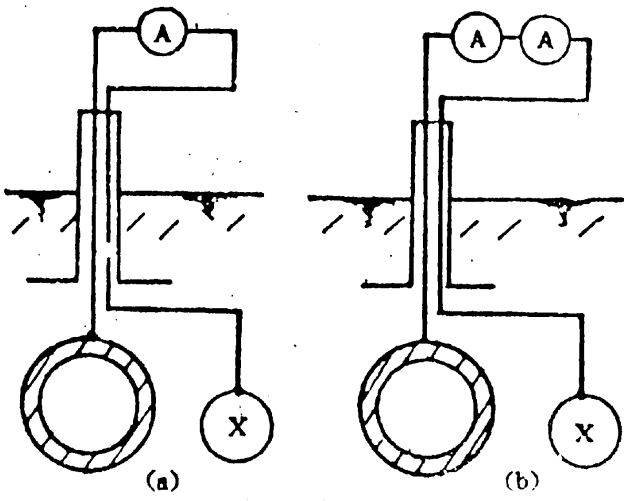
H.3.2.1 适用范围

当测试单位无 0.1Ω或 0.01Ω标准电阻时，牺牲阳极（组）的输出电流也可采用直测法。

H.3.2.2 测量方法

H.3.2.2.1 直测法的接线示意图见图 H.4。

H.3.2.2.2 直测法应选用五位读数（$4\frac{1}{2}$ 位）的数字万用表，用 DC.10A 量程直接读出电流值。



A-$4\frac{1}{2}$ 位数字万用表；X-牺牲阳极

图 H.4 直测法测试接线示意图

附录 I
（规范性附录）
外防腐层状况不开挖检测评价方法

I.1 交流电流衰减法

I.1.l 方法介绍

多频管中电流法的理论依据是“线传输函数”。将信号输人管道，理论上可视为单线—大地回路，电流沿管道纵向逐渐衰减，衰减率与防腐层质量优劣有关。该方法通过测取感应电流(代替管中电流)沿管线纵向传输系统的衰耗和给定参数值(其中包括管道与地的分布电容C、管道分布电感L)计算出防腐层绝缘电阻，来判断管道外防腐层的好坏，同时该系统具备探管功能。

I.1.2 使用仪器

RD—PCM、C-SCAN2010埋地管线外防腐层检测系统。

I.1.3 测量接线

I.1.3 .1发射机接线

将白色引线连接到管道上，可以是管道测试桩、阀门、与恒电位仪相连的阴极接线等任何可以与管道相连的位置；将绿色引线连接到“地”线上.可以是与管道垂直的远地点、与恒电位仪相连的阳极接线等可以作为接地极的地方。

注：(1）接线前应断开牺牲阳极阴极保护接线。

(2)用手接触夹钳及引线前，发射机应处于关闭状态。

I.1.3.2 电源接线

电源采用220V交流电源、20V-50V直流电源供电或14V~35V交流整流电源供电。电源应满足最大5A的需要。黑线接负极，红线接正极。

注：在连接引线前应关闭发射机。

I.1.4 测量步骤

a） 选定检测频率。

b） 设定给定电流强度。根据回路电阻情况调节发射机输出电流，使其尽量大地稳定输出。降低回路电阻，如导线各接触部位经过打磨、接地极尽量在土壤电阻低的位置、增加接地极的个数等，是增加电流输出的有效办法。

c） 检查接收机电池，必要时更换新电池。

d） 设定接收机探测频率，必须与发射机工作在同一频率上。-

e） 避开盲区开始测量电流值，盲区位置可以通过在其他位置通人信号再进行测量。可以用峰值法或零值法对管道定位，在管道正上方测量并记录PCM电流值，数据采集距离根据实际需要确定是加密还是放宽。

I.1.5 数据处理

检测数据由专门的埋地钢管外防腐检测数据处理软件进行处理，绘制出电流衰减曲线，计算出电流衰减率。

I.2 电流-电位法

I.2.1 使用仪表及工具

a)直流电位差计一台:准确度不低于0.05级;

b)万用表一块:输人阻抗>106，准确度不低于2.5级;

c)饱和硫酸铜参比电极一支;

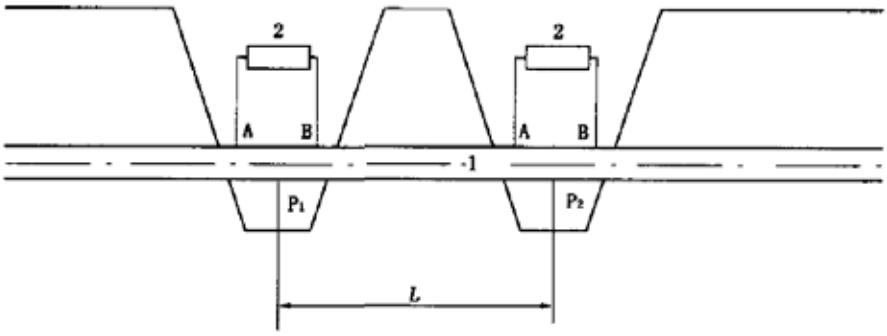
d)铜塑导线若干;

e)能提供1A以上直流电源一组;

f)长度500mm以上，直径20mm-40mm钢电极3-4根。

I.2.2 测量接线

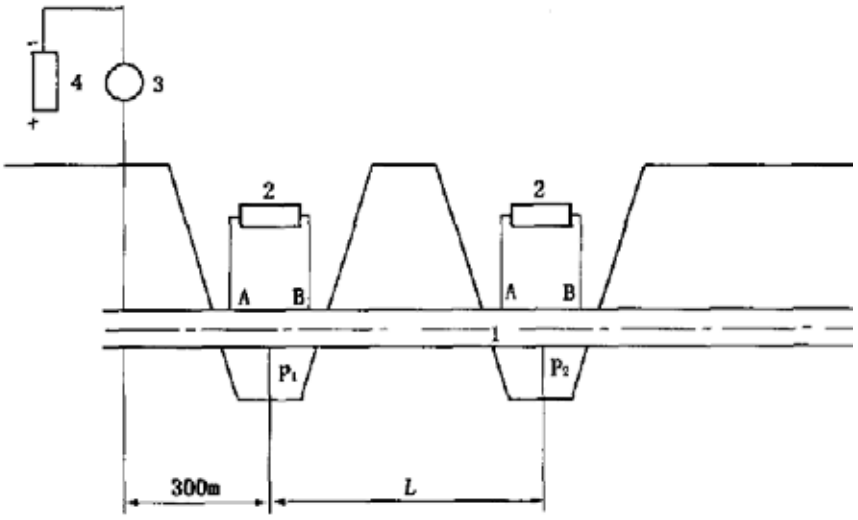
I.2. 2. 1 利用阴极保护电流测试接线见图I.1,



1—管道；2—直流电位差计；A，B—直流电位差计与管体的接线点。

图 I.1 利用阴极保护电流测防腐层绝缘电阻率接线示意图

I.2.2.2 临时外加电流法测试接线图见I.2,



1—管道；2—直流电位差计；3—电流表；4—电源；
A，B—直流电位差计与管体的接线点。

图 I.2 临时外加电流法测试接线图

I.2.3 测量要求

I.2.3.1 测量管段内无分支、无接地，若有牺牲阳极必须断开。

I.2.3.2 所有导线与管道接触点均应除去防腐层，磨出钢管本色。将导线用手按在管道上或用夹子夹住，使其接触良好。

I.2.3.3 分别包含P1, P 2点各取一段管道，使每段测取的电位差以不小于50uV为宜。

I.2.3.4 测量点距汇流点应大于300m,

I.2.3.5 P点与R点测量应连续进行，时间间隔不大于1h,测量时保护站输出电流应保持稳定。

I.2.3.6 对于牺牲阳极保护的管段和两保护站间电流交汇点1km内的管段，采用临时外加电流法进行测量。

a）将钢电极打人与管道垂直距离20m以外的潮湿土壤中，电源正极接钢电极，负极接管道与电流表串联。

b） 其他要求同上步骤。

I.2.4 测量方法

I.2.4.1 测取被测管段P1点到P2点间的长度L (精确到lm),L 应大于lkm,

I.2.4.2 测取A,B 两点间距离(精确到1cm).

I.2.4.3 用电压表及饱和硫酸铜参比电极测出P1, P 2点的通电电位Ep12，E p22 瞬间断电电位Ep11、Ep21。

I.2.4.4 将直流电位差计调零，然后将测量开关打到“ 标准 ”，旋动工作电流调节旋钮，使指针指零，接到电路中，离通电点远端接正，将倍率选择钮、测量刻度盘调到估算值的位置，将测量开关打到“ 未知 ”，细调倍率和测量盘，使表针指零。此时所测值即为A, B两点电压降，记录数值。

I.2.4.5 当不知道管材的电阻率时，在通电点附近选取一段管道，测出电流在这段管道上的压降，换算出实际电阻率，测点应选在离汇流点1.5D(D为管线外径)。

I.2.4.6 重复I.2.4. 4步骤，取重复性好的三组以上数据的平均值为测量值。

I.2.4.7 临时外加电流法进行测量时，应先通电，待电流、电位稳定后方可进行测量，步骤同I.2.4.1～I.2.4.5。

附录J

（规范性附录）

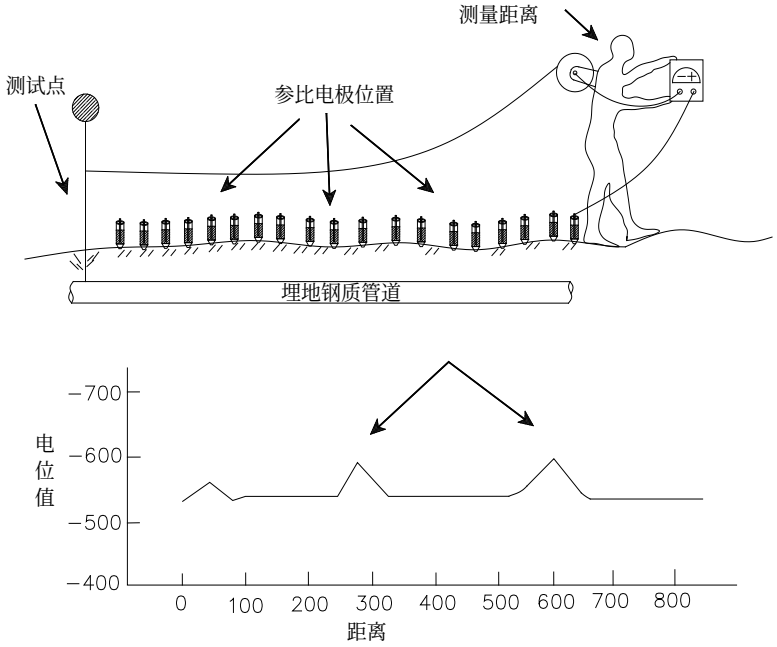
阴极保护效果不开挖检测方法

J.1 适用范围

密间隔电位测量（CIPS）适用于对管道阴极保护系统的有效性进行全面评价的测试。本方法可测得管道沿线的通电电位（Von）和断电电位（Voff），结合直流电位梯度法（DCVG）可以全面评价管线阴极保护系统的状况和查找防腐层破损点及识别腐蚀活跃点。对保护电流不能同步中断（多组牺牲阳极或其与管道直接相接，或存在不能被中断的外部强制电流设备），以及套管内的破损点未被电解质淹没的管道本方法不适用。另外下列情况会使本方法应用困难或测量结果的准确性受到影响：

a) 覆盖层导电性很差的管段，如铺砌路面、冻土、钢筋混凝土、含有大量岩石回填物；

b) 剥离防腐层下或绝缘物造成电屏蔽的位置，如破损点处外包覆或衬垫绝缘物的管道。



图J.1密间隔管地电位测试法原理

J.2 使用仪器

a) CIPS/DCVG管地电位及直流电位梯度检测仪一套;

b) CI-50/GPS卫星同步断流器两台;

c) 探管仪。

J.3 测量接线

J3.1 CI-50/GPS的连接

在所有电流能流入测量区间的阴极保护直流电源处安装电流同步断续器，将 CI-50/GPS(卫星同步断流器)串接在整流器与阳极地床或整流器与管道之间，红色引线接高电位点，黑色引线接低电位点。

J.3.2 CIPS/DCVG管地电位及直流电位梯度检测仪的连接

将线轴一端与CIPS/DCVG管地电位/直流电位梯度检测仪连接，另一端的铜导线与管道电位测试桩连接，将两根探杖与CIPS/DCVG管地电位/直流电位梯度检测仪连接。

J.4 测量步骤

J.4.1 关闭恒电位仪，打开CI-50/GPS，搜索卫星并锁定后，设置合理的通断周期和通断时间比，设置在合理的周期性通/断循环状态下同步运行，同步误差小于0.1s。设置原则是：断电时间应尽可能的短，以避免管道明显的去极化，但又应有足够长的时间保证能在消除冲击电压影响后测量采集数据。根据具体所用的阴极保护电源设备和测量仪器的不同，典型的循环时间设置宜为：通电800ms，断电200ms或通电4s，断电1s或通电12s，断电3s。使其处于工作状态，打开恒电位仪。

J.4.2 利用探管仪对管线定位。

J.4.3 打开CIPS/DCVG管地电位/直流电位梯度检测仪，设置与CI-50/GPS相同的周期和通断时间比，并与CI-50/GPS同步，进行数据采集并存储，一根探杖放在管道正上方，另一根探杖放在与管道垂直约1～2m的位置。数据采集间距可以根据实际需要确定。

J.5 数据处理

将现场测量数据传输到计算机中，进行数据处理分析。

附录 K

（规范性附录）

埋地钢质管道腐蚀防护系统模糊综合评价

K.1 总则

本附录提出了在埋地钢质管道外防腐层、阴极保护系统、腐蚀环境、排流保护开展全面检验检测基础上进行的腐蚀防护系统分级评价方法。在进行模糊综合评价时，需要确定因素集、评判集和单因素评价集，并以模糊数作为指标，将埋地钢质管道腐蚀防护系统分级评价进行量化。在进行模糊综合评价时，其评价指标权重值的确定至关重要，会直接影响到评价结果的准确性，一般采用层次分析法和专家打分法。

K.2 基于层次分析法的模糊综合评价

K.2.1 评价步骤

K.2.1.1 建立模糊集

a)建立因素集 确定影响埋地钢质管道腐蚀防护系统分级的五个主要因素：外防腐层状况、阴极保护有效性、土壤腐蚀性、杂散电流、排流效果，建立因素集 U，即

U={外防腐层状况 u1、阴极保护有效性 u2、土壤腐蚀性 u3，杂散电流 u4,，排流效果 u5}

因素集中，各评价因素的检测与评价指标详见本标准中的相关章节。

b)建立评价集 依据腐蚀防护系统的等级属性，将埋地钢质管道的腐蚀防护系统等级分为四级，即

V1=（v1，v2，v3，v4）=（1，2，3，4）=（好，较好，一般，差）

以此来评价埋地钢质管道腐蚀防护系统的状况，其中所用数字用来表示一些模糊的概念，对评语进行量化处理。这些数据为等级高低的亮度，对应于腐蚀防护系统的等级属性。

K.2.1.2 建立单因素评价矩阵 确定因素集中各评价指标对评价集 V1（j=1，2，3，4）的不同隶属度，建立单因素指标的评价向量。

根据所选定指标的分级情况，对于指标值越大越安全的情况，其隶属度函数为：

$$\mu_{v1}(x)=\begin{cases}0 & x\le x_5\\ \dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{2}\sin\dfrac{\pi}{x_6-x_5}(x-c) & x_5<x\le x_6\\ 1 & x>x_6\end{cases} \qquad \text{……..(K.1)}$$

$$\mu_{v2}(x)=\begin{cases}0 & x\le x_3\\ \dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{2}\sin\dfrac{\pi}{x_4-x_3}(x-b) & x_3<x\le x_4\\ 1 & x_4<x\le x_5\\ \dfrac{1}{2}-\dfrac{1}{2}\sin\dfrac{\pi}{x_6-x_5}(x-c) & x_5<x\le x_6\\ 0 & x>x_6\end{cases} \qquad \text{……..(K.2)}$$

$$\mu_{v3}(x)=\begin{cases}0 & x\le x_1\\ \frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{x_2-x_1}(x-a) & x_1<x\le x_2\\ 1 & x_2<x\le x_3\\ \frac{1}{2}-\frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{x_4-x_3}(x-b) & x_3<x\le x_4\\ 0 & x>x_4\end{cases} \quad \text{……..(K.3)}$$

$$\mu_{v4}(x)=\begin{cases}1 & x\le x_1\\ \frac{1}{2}-\frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{x_2-x_1}(x-a) & x_1<x\le x_2\\ 0 & x>x_2\end{cases} \quad \text{……..(K.4)}$$

对于指标值越小越安全的情况，其隶属度函数为：

$$\mu_{v1}(x)=\begin{cases}1 & x\le x_1\\ \frac{1}{2}-\frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{x_2-x_1}(x-a) & x_1<x\le x_2\\ 0 & x>x_2\end{cases} \quad \text{……..(K.5)}$$

$$\mu_{v2}(x)=\begin{cases}0 & x\le x_1\\ \frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{x_2-x_1}(x-a) & x_1<x\le x_2\\ 1 & x_2<x\le x_3\\ \frac{1}{2}-\frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{x_4-x_3}(x-b) & x_3<x\le x_4\\ 0 & x>x_4\end{cases} \quad \text{……..(K.6)}$$

$$\mu_{v3}(x)=\begin{cases}0 & x\le x_3\\ \frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{x_4-x_3}(x-b) & x_3<x\le x_4\\ 1 & x_4<x\le x_5\\ \frac{1}{2}-\frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{x_6-x_5}(x-c) & x_5<x\le x_6\\ 0 & x>x_6\end{cases} \quad \text{……..(K.7)}$$

$$\mu_{v4}(x)=\begin{cases}0 & x\le x_5\\ \frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{x_6-x_5}(x-c) & x_5<x\le x_6\\ 1 & x>x_6\end{cases} \quad \text{……..(K.8)}$$

其中，x 为实测的指标值；a、b、c 分别代表指标分级的端点值，按照由大到小的顺序；x1、x2、x3、x4、x5、x6 分别代表分级评价指标的端点值左右的选定值，用以将评价标准中的指标值再次细分，分组的上界比指标值右端点要更大一些，下界比指标值左端点要更小一些。数据分组要合理，应包含分级评价的各个指标端点值 a、b、c。再将实测的指标值、指标端点值和分组选定值代入隶属度函数，计

算得到的 4 个数值分别表示单个因素 uj（j=1，2，3，4，5）属于 4 个评价等级的隶属度，从而得出单因素的评价向量 Ri。

外防腐层状况 u1：在非开挖的情况下，防腐层质量的评价依据外防腐层电阻率（Rg 值）、电流衰减率、破损点密度指标中选择一个最具代表性的一个指标（或基于上述几个指标对外防腐层依据附录 K 进行模糊综合评判，确定分级指标）来评价，根据隶属度函数计算得到的向量作为最终的评价向量 B1=$[r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{14}, r_{15}]$。在开挖的情况下，以外观检查、电火花检测和厚度检测评价指标中等级最差的一个作为开挖的评价结果，此时没有具体的评价指标值，可以将评价向量简化为 B1=（1，0，0，0，0）、（0，1，0，0,0）、（0，0，1，0,0）、（0，0，0，1，0）或（0，0，0，0，1）五种情况，根据开挖检测直接选用某一组向量。或者，先进行非开挖检测，并通过模糊综合评价进行分级，然后用开挖检测结果的分级对非开挖检测的评价分级进行修正。

阴极保护有效性 u2：以阴极保护率评价阴极保护的效果，评价结果只分为合格和不合格两种情况。因此，其评价向量只取 B2=（1，0，0，0，0）=（好，-，-，-，-）或（0，0，0，01）=（-，-，-，-，差）两种可能，不需要计算隶属度，只根据检测情况选择评价向量即可。

土壤腐蚀性 u3：根据实际检测的土壤腐蚀性评价指标按照标准中给出的数值打分后，将分值和评价分级指标值代入隶属度函数中，得出管道土壤环境因素的评价向量 B3=$[r_{31}, r_{32}, r_{33}, r_{34}, r_{35}]$，即表示土壤腐蚀性对评价集 V1=（v1，v2，v3，v4）=（1，2，3，4）=（好，较好，一般，差）中各个级别的隶属度。

杂散电流 u4：根据实际检测的管地电位较自然电位正向偏移值、管地电位波动值、感应电流有效值或地电位梯度指标，任选其中一个进行评价。将实测指标值及其相应的分级评价指标端点值及其左右的选定值代入隶属度函数，可以得到评价向量 B4=$[r_{41}, r_{42}, r_{43}, r_{44}, r_{45}]$。

排流效果 u5：根据实际检测的干扰时管地电位，通过计算其电位平均值比进行评价。将实际计算出的电位平均值及其相应的分级评价指标端点值及其左右的选定值代入隶属度函数，可以得到评价向量 B5=$[r_{51}, r_{52}, r_{53}, r_{54}, r_{55}]$。

综合以上单因素评价向量，可以得到埋地钢质管道腐蚀防护系统的单因素评判矩阵：

$$R = [B_1, B_2, B_3, B_4, B_5]^T$$

K.2.1.3　基于层次分析法确定评价指标权重

K.2.1.3.1　构造判断矩阵

应用层次分析法(AHP 法)中的层次单排序方法确定各层中各评价因素的权重系数。对于递阶层次结构中各层上的元素可以依次相对于与之有关的上一层元素，进行两两比较，从而建立一系列的判断矩阵。判断矩阵的结构如下表 K.1 所示。其中，U1、U2、U3、U4 分别对应外防腐层状况、阴极保护有效性、土壤腐蚀性、杂散电流、排流效果五个元素。

表 K.1　构造的判断矩阵

B	U1	U2	U3	U4	U5
U1					
U2					

U3					
U4					
U5					

判断矩阵 $B=(b_{ij})_{n\times n}$ 具有下述性质：

$$b_{ij}>0,\quad b_{ij}=\frac{1}{b_{ji}},\quad b_{ii}=1 \quad (i, j=1, 2, \cdots, n) \qquad \text{..... (K.9)}$$

其中，bij 代表元素 Ui 与 Uj 相互之间重要性的比例标度，其值反映了人们对各元素相对重要性的认识。一般采用 1～9 比例标度对重要性程度赋值,赋值的原则如表 K.2 所示，通常由专家根据检测经验来判断两两因素的重要性，并赋值。

表 K.2　判断矩阵标度及其含义

标度	含义
1	表示两个元素相比，具有同等重要性
3	表示两个元素相比，前者比后者稍微重要
5	表示两个元素相比，前者比后者明显重要
7	表示两个元素相比，前者比后者强烈重要
9	表示两个元素相比，前者比后者极端重要
2，4，6，8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	元素 i，j 的重要性之比为 bij，那么元素 j，i 重要性之比为 bji=1/bij

K.2.1.3.2　计算权值

采用方根法计算判断矩阵的最大特征根 l max 及其对应的特征向量 W，并进行一致性检验。

其计算步骤如下：

a) 计算判断矩阵每一行元素乘积 Mi

$$M_i=\prod_{j=1}^{n} b_{ij} \qquad i=1, 2, \cdots, n \qquad \text{..... (K.10)}$$

b) 所得的乘积分别开 n 次方根 $\overline{W_i}$

$$\overline{W_i}=\sqrt[n]{M_i} \qquad \text{..... (K.11)}$$

c) 对向量 $\overline{W}=(\overline{W}_1, \overline{W}_2, \cdots, \overline{W}_n)^T$ 正规化

$$W=\frac{\overline{W}_i}{\sum_{j=1}^{n}\overline{W}_j},\quad i=1, 2, \cdots, n \qquad \text{..... (K.12)}$$

所得到的 W=(W1,W2,…,Wn)T 即为所求特征向量，亦即所要求的权值。

d) 计算判断矩阵最大特征根 l_{max}

$$l_{max}=\sum_{i=1}^{n}\frac{(BW)_i}{nW_i} \qquad \text{..... (K.13)}$$

式中，(BW)i 表示向量 BW 的第 i 个分量。

K.2.1.3.3 一致性检验

对于层次单排序，检验矩阵的一致性，需要计算它的一致性指标 CI，定义

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{.....(K.14)}$$

同时，需要将 CI 与平均随机一致性指标 RI 进行比较。对于 1～9 阶矩阵，RI 如 K.3 所示。

表 K.3　1～9 阶矩阵的平均随机一致性指标

阶数	1	2	30	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

判断矩阵的随机一致性比例 $CR = CI / RI < 0.10$ 时，判断矩阵具有满意的一致性，否则就需要对判断矩阵进行调整，即调整判断矩阵中两两比较的值。

K.2.1.4　腐蚀防护系统模糊综合评价

腐蚀防护系统的评价结果 B，即

$$B = W \circ R = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5) \circ \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} \quad \text{.....(K.15)}$$

经过以上的模糊计算后，得到的模糊综合评价结果是一模糊向量，即评价对象隶属于各个评价结果等级的隶属度向量 B_j (j=l，2，3，4，5)。采用加权平均法，将所得到的向量 bj 视为权数，对评价集 vj 进行加权平均得到的值作为评价结果，即

$$V = \frac{\sum_{j=1}^{m} b_j v_j}{\sum_{j=1}^{m} b_j} \quad \text{.....(K.16)}$$

所得到的 V 值即为管道腐蚀防护系统评价的等级，用 V=（v1，v2，v3，v4）=（1，2，3，4）=（好，较好，一般，差）来表示管道腐蚀防护系统评价的等级。

K.3　基于专家打分法的模糊综合评价

K.3.1 评价步骤

K.3.1.1　建立模糊集

a)　建立因素集　确定影响埋地钢质管道腐蚀防护系统分级的五个主要因素：外防腐层状况、阴极保护有效性、土壤腐蚀性、杂散电流、排流效果，建立评价主因素集 U，即

U={外防腐层状况 u1、阴极保护有效性 u2、土壤腐蚀性 u3，杂散电流 u4,，排流效果 u5}

其中，评价子因素集为：

u1={外覆盖层电流衰减率 u_{11}，外覆盖层电阻率 u_{12}，破损点密度 u_{13} }或{外观检查 u_{11}，电火花检测

u_{12}，厚度检测u_{13}}

u2={运行率u_{21}，保护率u_{22}}；

u3={土壤电阻率u_{31}，氧化还原电位u_{32}，土壤 PH 值u_{33}，土壤含水量u_{34}，土壤含盐量u_{35}，管地电位u_{36}，土壤质地u_{37}，氯离子含量u_{38}}；

u4={管地电位正向偏移值u_{41}，地电位梯度u_{42}，管地电位波动值u_{43}，感应电流有效值u_{44}}；

u5={干扰时管地电位u_{51}，电位平均值比u_{52}}；

b) 建立评语集 V=（v1，v2，v3，v4）=（1，2，3，4）=（好，较好，一般，差）

K.3.1.2 建立综合关系矩阵

专家针对评价子因素 ui 指标的检测值，根据评价标准，给出主因素的评价分级，分级按照评语集 V 分为（1，2，3，4）=（好，较好，一般，差），再通过统计分析的方法确定外防腐层状况、阴极保护有效性、土壤腐蚀性、杂散电流、排流效果各主因素 Ui 指标相对评价集中各等级的隶属度。专家总数为 M，评级为 vi 的专家数为 N，则主因素指标属于等级的 vi 隶属度

$$m_i(x)=\frac{N}{M},\quad i=1,2,\mathrm{L},4 \qquad \text{.....(K.17)}$$

得到单因素评价向量 Bi=$[r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}, r_{i5}]$。依次确定各主因素指标的单因素评价向量。综合单因素评价向量，可以得到埋地钢质管道腐蚀防护系统的单因素评判矩阵

$$R=[B_1, B_2, B_3, B_4, B_5]^T \qquad \text{.....(K.18)}$$

K.3.1.3 确定评价指标的权重

由专家评分确定主因素指标对埋地钢质管道腐蚀防护系统评价结果重要性的权值 Wi，各层次评价指标的权重分配见表 K.4。Wi 具有归一性和非负行。

表 K.4 各层次评价指标的权重分配及其模糊关系综合矩阵

评价主因素 Ui	权值 Wi	评价子因素 ui		单因素评价向量
外防腐层状况 U1		非开挖	电流衰减率	
			外覆盖层电阻率	
			破损点密度	
		开挖	外观检查	
			电火花检测	
			厚度检测	
阴极保护有效性 U2		保护率		
		运行率		
土壤腐蚀性 U3		土壤电阻率		
		氧化还原电位		
		土壤 PH 值		
		土壤含水量		
		土壤含盐量		

		管地电位	
		土壤质地	
		氯离子含量	
杂散电流 U4		管地电位正向偏移值	
		地电位梯度	
		管地电位波动值	
		感应电流有效值	
排流效果 U5		干扰时管地电位	
		电位平均值比	

K.3.1.4　确定主因素的模糊综合评价矩阵 B

$$B = W \circ R = [b_1, b_2, b_3, b_4] \quad \text{……..(K.19)}$$

K.3.1.5　计算评价总得分 V

$$V = v_1 b_1 + v_2 b_2 + v_3 b_3 + v_4 b_4 \quad \text{…….(K.20)}$$

K.3.1.6　归一化处理

$$V = \frac{\sum_{j=1}^{m} b_j v_j}{\sum_{j=1}^{m} b_j} \quad \text{……. ……..(K.21)}$$

根据总分，再结合评语集 V 中的分数，评价腐蚀防护系统的等级，给出相应的评语。