

ICS 29.240

F 24

备案号: 53997-2016

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL / T 1554 — 2016

接地网土壤腐蚀性评价导则

Guide for evaluation of soil corrosivity on grounding grid

2016-02-05 发布

2016-07-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总则 2

5 土壤腐蚀性指标评价 2

 5.1 单指标评价 2

 5.2 多指标评价 3

6 土壤腐蚀试验评价方法 5

 6.1 检查片法测试腐蚀速率 5

 6.2 电阻法测试腐蚀速率 5

附录 A（资料性附录） 点蚀的测量与评定 7

附录 B（资料性附录） 土壤电阻率的测试 9

附录 C（资料性附录） 土壤指标分析方法 11

附录 D（资料性附录） 土壤腐蚀性评价指标筛选案例 12

附录 E（资料性附录） 检查片的制备、埋设和清洗 16

附录 F（资料性附录） 土样的采集 19

附录 G（规范性附录） 土壤水溶液的配制 20

参考文献 21

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准负责起草单位：国网江西省电力科学研究院、广东电网有限责任公司电力科学研究院。

本标准参加起草单位：国网智能电网研究院、国网陕西省电力公司电力科学研究院、成都桑莱特科技股份有限公司、国网冀北电力有限公司电力科学研究院、长沙理工大学、国网赣州供电公司、广东电网有限责任公司佛山供电局、中国大唐集团科学技术研究院有限公司西北分公司、中国大唐集团科学技术研究院有限公司华东分公司。

本标准主要起草人：裴锋、李谦、田旭、刘欣、李志忠、马光、李志成、何华林、朱志平、杜鹏、黄松波、闫爱军、李建华、张宇、贾璐路、尹桂来、邓静伟、陈田。

请注意本标准的某些内容可能涉及专利。本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国电力企业联合会提出并归口。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

接地网土壤腐蚀性评价导则

1 范围

本标准规定了接地网土壤腐蚀性单指标评价、多指标评价及土壤腐蚀试验评价方法等。

本标准适用于电力系统中发电厂、变电站的交流钢质接地网土壤腐蚀性评价。其他埋地金属的土壤腐蚀性评价可参照执行。

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，仅所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。

LY/T 1239—1999 森林土壤 pH 值的测定

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

接地网 **grounding grid**

由垂直和水平接地极组成的具有泄流和均压作用的网状接地装置。

3.2

腐蚀 **corrosion**

由于金属与环境间的相互作用使金属性能发生变化，导致金属、环境或由它们作为组成部分的技术体系的功能受到损伤的现象。

3.3

腐蚀环境 **corrosion environment**

含有一种或多种腐蚀介质的环境。

3.4

土壤腐蚀 **soil corrosion**

以天然物质，以及用于覆盖构件的石渣、回填土等其他物质组成的土壤作为腐蚀环境的腐蚀。

3.5

腐蚀速率 **corrosion rate**

单位时间内金属遭受腐蚀的质量损耗量，单位通常为 $\text{g}/(\text{dm}^2 \cdot \text{a})$ 。

3.6

腐蚀电流密度 **corrosion current density**

单位面积电极上的电流，单位通常为 mA/cm^2 或 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

3.7

均匀腐蚀 **uniform corrosion**

在金属表面几乎以相同速率进行的全面腐蚀。

3.8

局部腐蚀 **localized corrosion**

暴露于腐蚀环境中，金属表面某些区域的优先集中腐蚀，可产生点坑、裂纹、沟槽等。

3.9

点蚀 pitting corrosion

集中于金属表面的局部区域内，并深入到金属内部的穴状腐蚀形态。

3.10

腐蚀深度 corrosion depth

受腐蚀的金属表面某一点与其原始表面间的垂直距离，单位通常为 mm。

3.11

土壤电阻率 soil resistivity

含有液、气、固三相物质的土壤导电性能指标，单位通常为 $\Omega \cdot m$ 或 $\Omega \cdot cm$ 。

3.12

土壤氧化还原电位 soil redox potential

土壤中氧化还原反应的电位。常用铂电极相对参比电极测定，参比电极通常采用饱和甘汞电极或银/氯化银电极，单位通常为 mV。

3.13

腐蚀试验 corrosion test

评定金属腐蚀行为、环境受腐蚀产物的污染程度、防腐蚀措施有效性或环境腐蚀性所进行的试验。

3.14

检查片法 test pieces method

采用与被检测金属材质相同或类似的金属试片进行腐蚀试验的方法。

3.15

电阻法 electrical resistance (ER) monitoring

通过测量安装在腐蚀环境中的金属测量元件的电阻值变化及测量时间间隔，计算金属平均腐蚀速率的腐蚀监测方法。

4 总则

对接地网周围土壤环境腐蚀性进行评价，能为接地网的设计选型提供参考并合理评估在运接地网的检修开挖周期。

发电厂换流站、变电站设计运维人员应分别在接地网设计、投运阶段对土壤腐蚀性进行评价。

接地网土壤腐蚀性评价宜优先选用检查片法进行碳钢平均腐蚀速率评价。当不具备埋片条件时，宜采用多指标评价，单指标评价作为辅助。

5 土壤腐蚀性指标评价

5.1 单指标评价

5.1.1 碳钢平均腐蚀速率评价

土壤腐蚀性可采用碳钢在土壤中的平均腐蚀速率进行判定，碳钢平均腐蚀速率与土壤腐蚀性的关系见表 1。平均腐蚀速率测试见第 6 章。

表 1 碳钢平均腐蚀速率与土壤腐蚀性的关系

土壤腐蚀性	微	弱	中	强
平均腐蚀速率（失重法） $g/(dm^2 \cdot a)$	<1	1~5	5~7	>7

5.1.2 碳钢点蚀速率评价

土壤腐蚀性可采用土壤中金属材料的最大点蚀速率进行判定，最大点蚀速率与土壤腐蚀性的关系见表 2。点蚀测量与评定参见附录 A。

表 2 最大点蚀速率与土壤腐蚀性的关系

土壤腐蚀性	微	弱	中	强
最大点蚀速率 mm/a	<0.305	0.305~0.611	0.611~2.438	>2.438

5.1.3 土壤电阻率评价

对于一般地区的土壤，土壤腐蚀性可采用土壤电阻率进行判定，土壤电阻率与土壤腐蚀性的关系见表 3。土壤电阻率的测试参见附录 B。

表 3 土壤电阻率与土壤腐蚀性的关系

土壤腐蚀性	微	弱	中	强
土壤电阻率 $\Omega \cdot m$	>100	50~100	20~50	<20

5.1.4 土壤氧化还原电位评价

当存在微生物腐蚀，土壤腐蚀性可采用土壤氧化还原电位进行判定，氧化还原电位与土壤腐蚀性的关系见表 4。土壤氧化还原电位的测试参照附录 C。

表 4 氧化还原电位与土壤腐蚀性的关系

土壤腐蚀性	微	弱	中	强
氧化还原电位 mV	>400	200~400	100~200	<100

5.2 多指标评价

土壤腐蚀性影响因素及评价指数应符合表 5 的规定。土壤腐蚀性评价应符合表 6 的规定。土壤评价指标分析方法参照附录 C。土壤指标筛选方法参照附录 D。

表 5 土壤腐蚀性影响因素及评价指数

项目名称	内 容 及 指 标		评价指数
土壤类型	石灰质土、石灰质泥灰土、砂质泥灰土（黄土）、砂土		+2
	壤土、壤质泥灰土、含砂量不大于 75%的壤质砂土和黏质砂土		0
	黏土、黏质泥灰土、腐殖土		-2
	泥灰土、淤泥土、沼泽土		-4
土壤状况	埋设物深处地下水	无	0
		有或时有时无	-1

表 5 (续)

项目名称	内容及指标	评价指数
土壤状况	自然土壤	0
	含有垃圾碎砖的土壤	-2
	埋设物部位土壤均匀	0
	埋设物部位土壤不均匀	-3
土壤电阻率 $\Omega \cdot m$	>100	0
	>50 且 ≤ 100	-1
	>23 且 ≤ 50	-2
	>10 且 ≤ 23	-3
	≤ 10	-4
含水量 %	<20	0
	≥ 20	-1
pH 值	>6	0
	≤ 6	-1
总酸度 KB7.0 mmol/kg	<2.5	0
	≥ 2.5 且 <5	-1
	≥ 5	-2
氧化还原电位 mV	>400 强透气性	+2
	>200 且 ≤ 400 中度透气性	0
	>0 且 ≤ 200 弱透气性	-2
	≤ 0 不透气性	-4
总碱度 Ks4.3 mmol/kg	>1000	+2
	≤ 1000 且 >200	+1
	≤ 200	0
硫化氢和硫化物(S^{2-}) mg/kg	无	0
	<0.5	-2
	≥ 0.5	-4
煤粉或焦炭粉	无	0
	有	-4
氯离子 mg/kg	<100	0
	≥ 100	-1
硫酸盐总量 mg/kg	<200	0
	≥ 200 且 <500	-1
	≥ 500 且 <1000	-2
	≥ 1000	-3

表6 土壤腐蚀性评价

评价指数总和	土壤腐蚀性
>0	微
0~-4	弱
-5~-10	中
<-10	强

6 土壤腐蚀试验评价方法

6.1 检查片法测试腐蚀速率

- 6.1.1 同一批材料试样，其规格、化学成分、制造和热处理工艺以及表面状态应相同，并有完整记录。宜选用同一生产批号的材料。材料试样的形状、尺寸和表面状态应根据试验材料种类、环境类型和试验目的确定。埋设试验的检查片制备方法参照附录 E。
- 6.1.2 同一试验目的材料平行试样数量不应少于 3 个。试验材料应预留适当数量的空白试样，放在清洁的干燥器中储存，用于结果评定时比较。材料试样原始记录除原始质量和尺寸外，应拍照保存试样的原始形貌，每一试验周期的每种材料试样宜至少保留一张原始形貌照片。
- 6.1.3 检查片埋设点应根据土壤条件和地下构筑物情况确定。埋设点附近 1m 内应无管道、接地网等地下构筑物，地表周围地势平坦、无坑洼。检查片应埋设在同一土层中，其深度相当于接地网实际布置深度，检查片不应在同一垂直面上埋设；当考察埋设深度与腐蚀速率关系时，检查片可在不同深度下埋设。检查片间水平距离不宜小于 0.3m。开挖时应保持土层顺序不混乱，检查片放置完毕后，应按原有土层顺序分层回填。检查片埋设方法参照附录 E。
- 6.1.4 采集检查片埋设处的土壤样品，送实验室分析。
- 6.1.5 检查片在埋设期间进行电化学测试时，应使用有绝缘层的导线与检查片相连，并引出至地表。
- 6.1.6 检查片埋设时间周期不低于 10 个月，每次取样不少于 3 个平行样。
- 6.1.7 埋设的检查片从土壤中取出后，应对试样外观进行拍照。
- 6.1.8 检查片腐蚀产物清除方法参照附录 E。清除检查片上的腐蚀产物后，应记录腐蚀形状、位置，根据表 7 判定腐蚀类型；若均匀腐蚀与点蚀混杂，可按主要倾向评估。
- 6.1.9 土壤腐蚀性评价可采用失重法，评价指标应符合表 1 的规定。土壤腐蚀性评价可采用点蚀速率法，评价指标应符合表 2 的规定。

表7 材料试样腐蚀面类型特征

腐蚀类型	特 征
均匀腐蚀	腐蚀深度较均匀一致，创面较大
点蚀	腐蚀呈坑穴状，散点分布，呈麻面，深度大于孔径

6.2 电阻法测试腐蚀速率

- 6.2.1 腐蚀探针上的金属腐蚀测量元件宜采用金属丝状、圆筒状，应根据具体形状，选择对应的腐蚀速率计算公式。
- 6.2.2 金属腐蚀测量元件尺寸宜根据出厂参数设置，也可直接采用千分尺测量。
- 6.2.3 测试前应选择合适的金属腐蚀测量元件，将元件表面锈迹、污物打磨干净，用蒸馏水冲洗，吹干

后在无水酒精中浸泡，取出并干燥处理。

6.2.4 安装好腐蚀测量元件后，测量仪器上应设置腐蚀测量元件材质、密度、电阻率等参数。

6.2.5 设置仪器数据采集时间间隔，将腐蚀探针埋设到待测土壤中。腐蚀在线监测软件可直接显示测得的腐蚀元件腐蚀损耗情况，根据测定的时间长短计算出腐蚀速率。应在测量数据稳定后进行计时，计时时间段不宜低于 4h。

6.2.6 土壤腐蚀性评价应符合表 1 的规定。

附录 A
(资料性附录)
点蚀的测量与评定

A.1 点蚀坑深度测量

点蚀坑深度测量应符合下列要求:

- a) 测量要求。对于成片的腐蚀坑, 测量最深部位的深度, 如图 A.1 所示。
- b) 计算方法。腐蚀坑相对深度按式 (A.1) 计算:

$$A = \frac{d}{t} \times 100\% \tag{A.1}$$

式中:

- A —— 腐蚀坑相对深度;
- d —— 实测的腐蚀区域最大腐蚀坑深度, mm;
- t —— 试片公称厚度, mm。

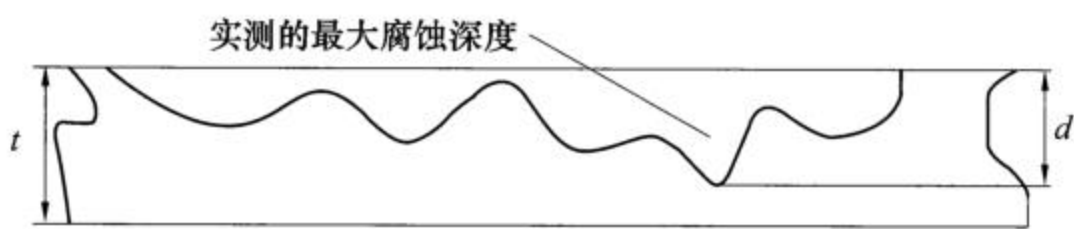


图 A.1 腐蚀坑深度实测的参数示意图

A.2 点蚀程度的评定

A.2.1 金属穿透法

A.2.1.1 根据腐蚀坑的最大深度或十个最大腐蚀坑的平均深度, 或两者兼用, 来测量最深腐蚀坑以描述金属的穿透。

A.2.1.2 金属穿透也可用点蚀因子来表示。它是最深金属穿透与平均金属穿透的比值, 如下式所示:

$$\text{点蚀因子} = \frac{\text{最深金属穿透深度}}{\text{平均金属穿透深度}}$$

点蚀因子为 1 表示均匀腐蚀。该值越大, 穿透深度越大。点蚀因子不能适用于点蚀或均匀腐蚀很小的情况, 因为当分子或分母中任意一个趋近于零时, 可能会得到零值或不确定值。

A.2.2 标准图法

根据标准图表按照密度、大小和深度来对腐蚀坑评级, 如图 A.2 所示。A 列和 B 列与金属表面的点蚀范围有关 (即 A 列是用每单位面积点数来评级的方法, 而 B 列是显示这些点的平均大小来分类的方法), C 列按破坏程度或平均深度来评级。例如: 评级为 A-3、B-2、C-3 可以认为是代表腐蚀坑的密度为 5×10^4 个/ m^2 的一种典型评级, 平均腐蚀坑开口为 2.0 mm^2 , 平均腐蚀坑深度为 1.6 mm 。以上点蚀的测量与评定方法可按 GB/T 18590—2001《金属和合金的腐蚀 点蚀评定方法》的有关规定执行。

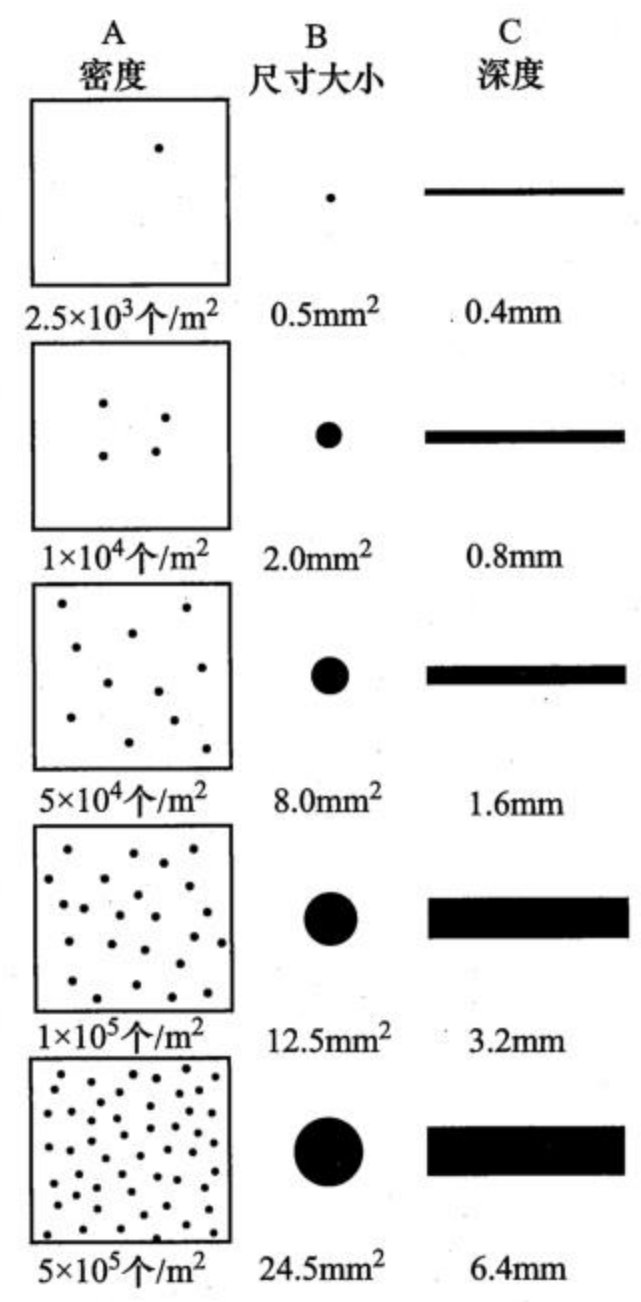


图 A.2 腐蚀坑的标准评级图

附录 B
(资料性附录)
土壤电阻率的测试

B.1 测试方法

本标准中土壤电阻率的测试采用四极等距法（Wenner 四极等距法）。该方法适用于平均土壤电阻率的测试，且测试结果比较准确。土壤电阻率的测试可按 DL/T 475—2006《接地装置特性参数测量导则》的有关规定执行。试验电极应尽可能远离地下金属物。

B.2 测试步骤

- B.2.1 在测试场地将四个电极呈直线等间距插入土壤中，电极间距记为 a 。电极入土深度应小于 $a/20$ 。
- B.2.2 接线时，首先保证仪表各个接线端子间相互断开。然后按顺序连接极棒与仪表上接线端子，其接线图如图 B.1 所示。

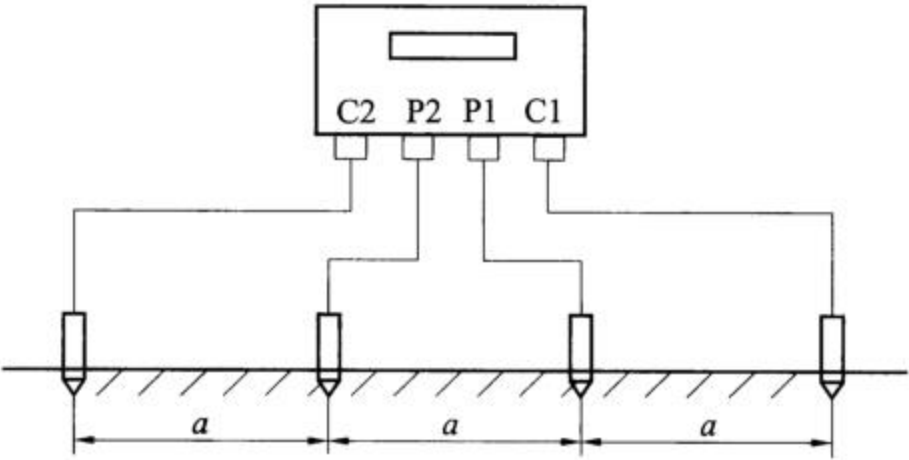


图 B.1 土壤电阻率测试接线图

- B.2.3 布置好电极后，即可开始测试，仪表测试值即为土壤电阻值 R 。

B.3 数据处理

从地表至深度为 a 的平均土壤电阻率按式（B.1）计算。

$$\rho = 2\pi aR \tag{B.1}$$

- 式中：
- ρ ——地表至深度 a 土层的平均土壤电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；
- a ——相邻两电极之间的距离， m ；
- R ——接地电阻仪示值， Ω 。

B.4 土壤电阻率参考值

在缺少土壤电阻率数据时可参考表 B.1，但一般应以实测值作为设计依据。

表 B.1 土壤电阻率参考值

类别	名 称	电阻率近似值 $\Omega \cdot \text{m}$	不同情况下电阻率的变化范围 $\Omega \cdot \text{m}$		
			较湿时 (一般地区、多雨区)	较干时 (少雨区、沙漠区)	地下水含 盐碱时
土	陶黏土	10	520	10~100	3~10

表 B.1 (续)

类别	名 称	电阻率近似值 $\Omega \cdot m$	不同情况下电阻率的变化范围 $\Omega \cdot m$		
			较湿时 (一般地区、多雨区)	较干时 (少雨区、沙漠区)	地下水含 盐碱时
土	泥炭、泥灰岩、沼泽地	20	10~30	50~300	3~30
	捣碎的木炭	40	—	—	—
	黑土、园田土、陶土	50	30~100	50~300	10~30
	白垩土、黏土	60	30~100	50~300	10~30
	砂质黏土	100	30~300	80~1000	10~80
	黄土	200	100~200	250	30
	含沙黏土、砂土	300	100~1000	1000 以上	30~100
	河滩中的砂	—	300	—	—
	煤	—	350	—	—
	多石土壤	400	—	—	—
	上层红色风化黏土、下层 红色页岩	500 (30%湿度)	—	—	—
	表层土夹石、下层砾石	600 (15%湿度)	—	—	—
砂	砂、沙砾	1000	250~1000	1000~2500	—
	砾层深度大于 10m、地下 水较深的草原 地面黏土深度不大于 1.5m、底层多岩石	1000	—	—	—
岩石	砾石、碎石	5000	—	—	—
	多岩山石	5000	—	—	—
	花岗岩	200 000	—	—	—
混凝土	在水中	40~55	—	—	—
	在湿土中	100~200	—	—	—
	在干土中	500~1300	—	—	—
	在干燥的大气中	12 000~18 000	—	—	—
矿	金属矿石	0.01~1	—	—	—

附 录 C
(资料性附录)
土 壤 指 标 分 析 方 法

土壤的现场测试及实验室分析相应方法可参照表 C.1 执行。

表 C.1 常用土壤指标分析方法

分析项目	分 析 方 法
土壤电阻率	利用四极接地电阻测量仪测定 (Wenner 四极等距法)
土壤质地	依据标准现场鉴别
土壤含水量	利用土壤含水率测定仪或采用实验室烘干称重法
土壤容重	用一定容积的钢制环刀, 切割自然状态下的土壤, 使土壤恰好充满环刀容积, 然后称量并根据土壤自然含水率计算每单位体积的烘干土重
接地网电位	采用参比电极用万用表测定
氧化还原电位	利用土壤氧化还原测定仪或土壤氧化还原电位的铂电极直接测定法
pH 值	采用水浸提, 以水土比 2.5:1 混合, 后用 pH 计测定
总酸度	1mol/L KCl 交换-中和滴定法
土壤水溶性盐总量	电导法
F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-}	水提取-离子色谱法
Ca^{2+} 、 Mg^{2+}	EDTA 容量法或醋酸铵提取-吸收分光光度法

附录 D
(资料性附录)

土壤腐蚀性评价指标筛选案例

利用多指标评价某一地区的土壤环境时,常会出现部分指标对土壤腐蚀性评价结果影响显著,而其余指标则影响甚微。鉴于此,对土壤的众多理化指标进行筛选,剔除影响甚微的指标,可以在保证评价结果准确率的前提下,减少评价指标的数目。在此给出两项指标筛选案例以供参考。

D.1 三指标法和八指标法

广东地区使用变电站钢质接地网土壤腐蚀性评价三指标法和八指标法,根据广东佛山供电局变电站的现场实践,三指标法总体准确率可达 80%,八指标法总体准确率可达 89%。三指标法和八指标法的评价框图见图 D.1 和图 D.2。

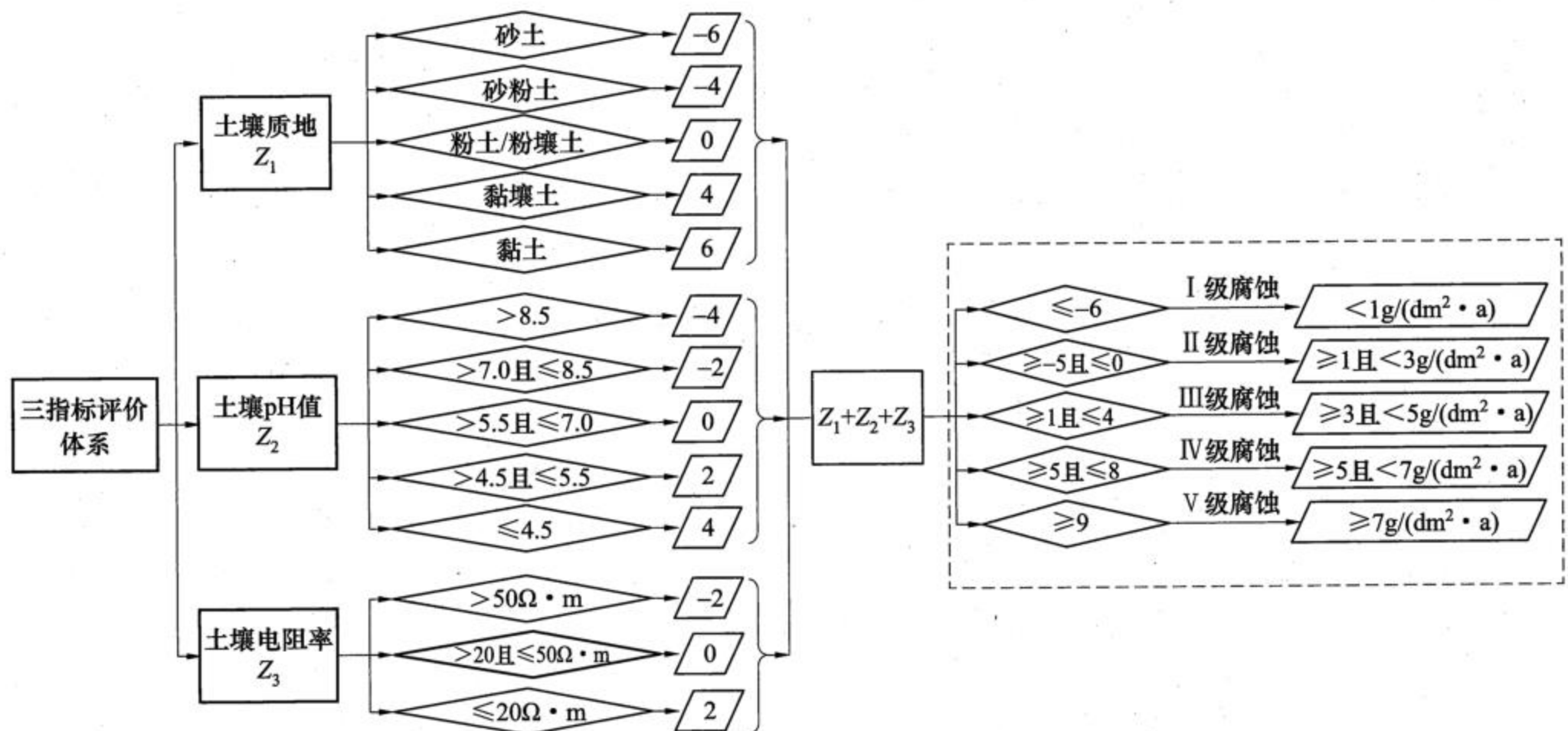


图 D.1 三指标法评价框图

D.2 利用因子分析进行指标筛选

D.2.1 因子分析模型的原理

因子分析法是将全部原始变量中的有关信息集中起来,通过探讨相关矩阵的内部结构,将多变量综合成少数因子,以再现原始变量之间的关系,可以运用因子分析法筛选出影响该地区变电站接地网材料腐蚀的关键土壤理化指标,从而构建仅包含关键土壤理化指标的评价法,因子分析法是基于式 (D.1) 进行的。

$$\begin{aligned} X_1 &= b_{11}F_1 + b_{12}F_2 + \cdots + b_{1p}F_p + \varepsilon_1 \\ X_2 &= b_{21}F_1 + b_{22}F_2 + \cdots + b_{2p}F_p + \varepsilon_2 \\ &\dots\dots\dots \\ X_m &= b_{m1}F_1 + b_{m2}F_2 + \cdots + b_{mp}F_p + \varepsilon_m \end{aligned} \quad (D.1)$$

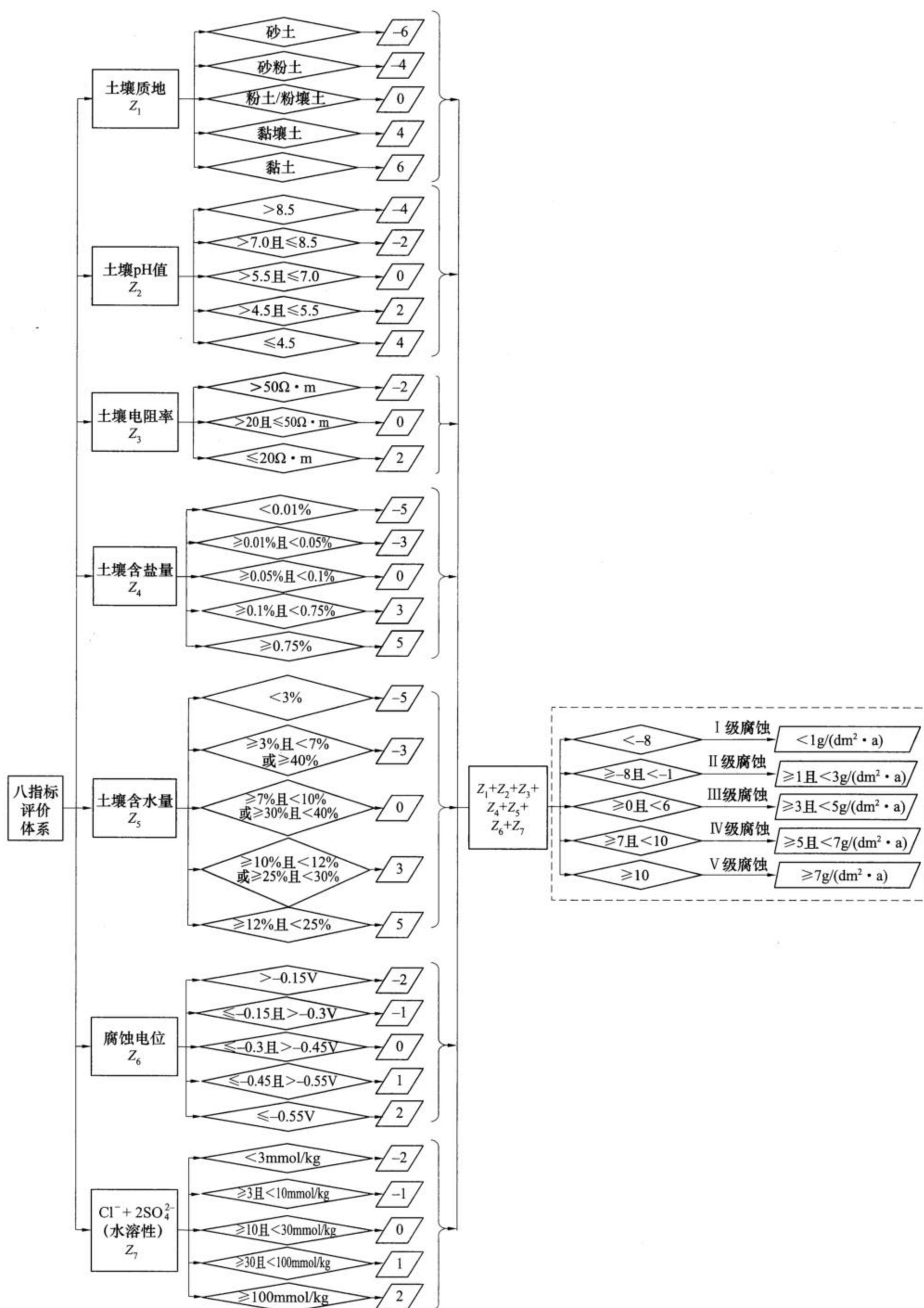


图 D.2 八指标法评价框图

式中： $X=(X_1, X_2, \dots, X_m)$ 是实际测试得到的 m 个土壤理化指标构成的 m 维随机向量； F 是 X 的公共因子； b_{mp} 为因子负载，是第 m 个变量在第 p 个公共因子上的载荷，由 b_{mp} 构成的矩阵 B 称为因子负载矩阵； ε 为 X 的特殊因子，特殊因子包含了随机误差。

D.2.2 原始数据的标准化处理

分析测定得到的数据构成一个 $m \times n$ 的矩阵， m 为土壤样品数目， n 为土壤理化指标数目，如式 (D.2) 所示。

$$X_{m \times n} = \begin{Bmatrix} x_{1,1} \cdots x_{1,j} \cdots x_{1,n} \\ \vdots \\ x_{i,1} \cdots x_{i,j} \cdots x_{i,n} \\ \vdots \\ x_{m,1} \cdots x_{m,j} \cdots x_{m,n} \end{Bmatrix} \quad (D.2)$$

由于各个变量的量纲不尽相同，为了消除因变量间量纲差异造成的影响，对原始数据进行标准化处理，也称为自身规范化，标准化处理按式 (D.3) 进行：

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_{.j}}{S_j} \quad (D.3)$$

其中， X_{ij} 为原始数据， Z_{ij} 为标准化数据， $\bar{X}_{.j}$ 和 S_j 分别按式 (D.4) 和式 (D.5) 计算。

$$\bar{X}_{.j} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{ij} \quad (D.4)$$

$$S_j = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{(X_{ij} - \bar{X}_{.j})^2}{m-1}} \quad (D.5)$$

D.2.3 数据分析前的检验

进行因子分析需要分析变量间具有较好的相关性。数据的相关性由 KMO 和 Bartlett 值来评判，其中 Bartlett 检验用于确认原始变量是否取自于多元正态分布的整体，若数据符合 Bartlett 检验，则进行 KMO 检验，KMO 检验用于分析原始变量间的偏相关性和简单相关性的相对大小，若 KMO 过小，则不适合做因子分析，KMO 值的评判标准见表 D.1。

表 D.1 KMO 与因子分析效果

KMO 值	效果
>0.9	非常好
0.8~0.9	好
0.7~0.8	一般
0.6~0.7	较差
0.5~0.6	很差
<0.5	不能接受

D.2.4 对标准化数据求相关矩阵 R

得到标准化数据后再进行相应的变换求出相关矩阵，变换按式 (D.6) 进行：

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (Z_{jk} - \bar{Z}_j)(Z_{ik} - \bar{Z}_i)}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (Z_{ik} - \bar{Z}_i)^2 \cdot \sum_{k=1}^m (Z_{jk} - \bar{Z}_j)^2}} \quad (\text{D.6})$$

其中 $i=j$ 时, $r_{ij}=1$; $i \neq j$ 时, $r_{ij}=r_{ji}$ 。

D.2.5 相关矩阵的特征值和特征向量的求解

用雅克比算法求得特征值和对应的特征向量, 如式 (D.7) 所示:

$$(R - \lambda E)X = 0 \quad (\text{D.7})$$

设 R 的特征根为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 并假定 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0$, 称 λ_i 为所对应的指标为第 i 主成分, 记 $\text{tr}R = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$, 则 $\lambda_i / \text{tr}R$ 是第 i 主成分的贡献。记 $T_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i$, 称 $T_i / \text{tr}R$ 是前 i 个主成分的累积贡献。若确定主成分分析的因子累积贡献率大于预设值 (如 80%), 则可以对前 i 个主成分进行提取。

D.2.6 公共因子初始负载及旋转负载的计算

公共因子初始负载的计算方法如式 (D.8) 所示:

$$B = \begin{bmatrix} e_{11}\sqrt{\lambda_1} & e_{21}\sqrt{\lambda_2} & \cdots & e_{p1}\sqrt{\lambda_p} \\ e_{21}\sqrt{\lambda_1} & e_{22}\sqrt{\lambda_2} & \cdots & e_{p2}\sqrt{\lambda_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{m1}\sqrt{\lambda_1} & e_{m2}\sqrt{\lambda_2} & \cdots & e_{pm}\sqrt{\lambda_p} \end{bmatrix} \quad (\text{D.8})$$

其中 e_i 为特征根 λ_i 所对应的特征向量。提取前 i 个主成分计算得到因子负载, 可用最大方差正交旋转法对因子负载进行旋转, 得到的旋转负载有利于对公共因子进行解释。

D.2.7 公共因子的合理解释

对公共因子给出符合实际意义的合理解释, 旋转负载各列元素的绝对值差距较大, 并且绝对值大的元素较少时, 该公共因子易于解释。绝对值大的元素通常代表土壤的一种特性, 如土壤的化学性质、电学性质、物理性质。此特性与土壤的某项理化指标密切相关。从而在众多的土壤腐蚀性评价指标中筛选出影响显著的关键指标。

D.2.8 土壤腐蚀性评价法的构建并验证

通过因子分析得到影响该地区土壤腐蚀性的关键理化指标, 制定“土壤腐蚀性的影响因素及评价指标表”, 形成适用于该地区变电站土壤腐蚀性评价方法。利用变电站接地网实际腐蚀情况或土壤腐蚀性试验结果, 考察新评价法的准确率。在验证的样本数量和评价结果准确率均达到要求的情况下, 才可在该地区使用新评价方法。

附录 E
(资料性附录)
检查片的制备、埋设和清洗

E.1 检查片的制备

E.1.1 每组检查片应由材质、尺寸、加工条件、表面状况和裸露面积相同的多个检查片组成。

E.1.2 检查片裸露面形状宜为圆形或方形。

E.1.3 检查片裸露面积宜根据土壤腐蚀性和埋设时间确定，一般宜为 $6.5\text{cm}^2 \sim 50\text{cm}^2$ ，相同裸露面积尺寸误差不应超过 10%。

E.1.4 检查片厚度宜为 3mm~5mm，其余尺寸宜根据裸露面积分别选用 I 型或 II 型检查片。检查片尺寸应符合图 E.1 和图 E.2 的要求。

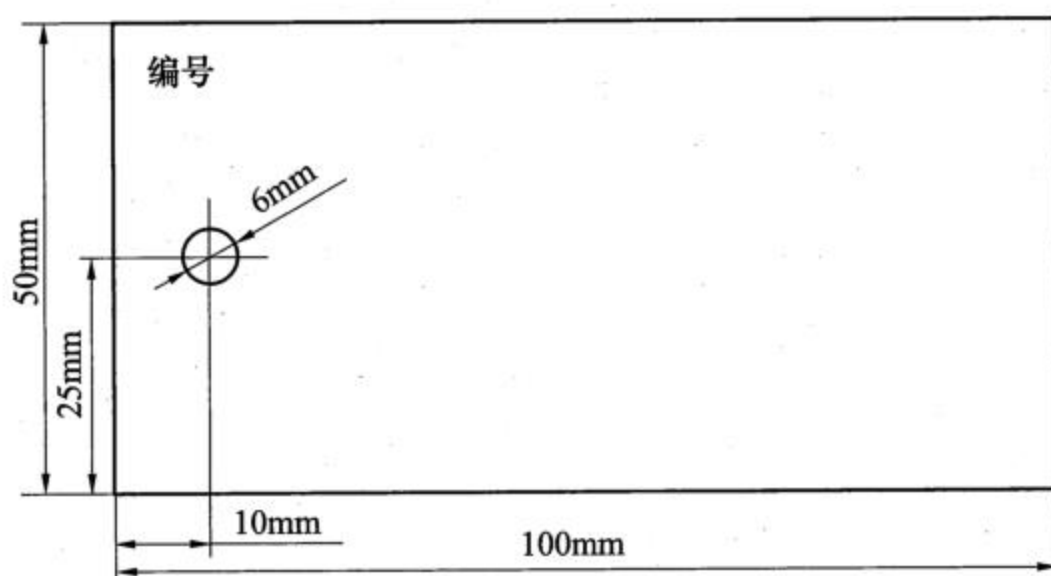


图 E.1 I 型检查片尺寸

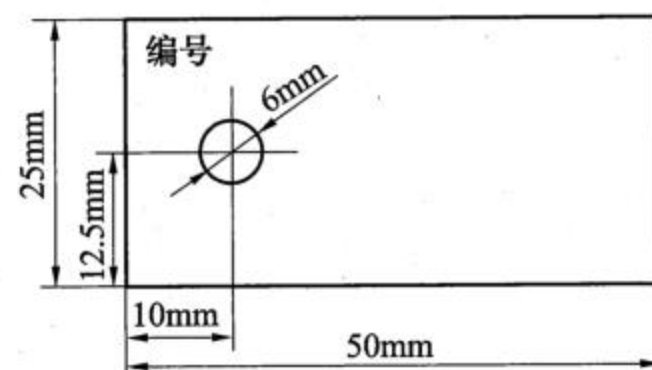


图 E.2 II 型检查片尺寸

E.1.5 检查片应采用机械加工制备，如果采用气割需去掉热影响区。加工后检查片表面可根据需要保持原始表面状态或保持与其结构相同的表面状态。

E.1.6 检查片材质表面不应有明显的缺陷，如麻点、裂纹、划伤、分层等，边缘不应有毛刺。

E.1.7 检查片应进行编号，宜采用中号钢字模将其打印在图 E.1 和图 E.2 中所示的位置。

E.2 检查片埋设的步骤

E.2.1 检查片埋设前要先对埋设地的地形、地质以及土壤的理化性能进行调查记录。

E.2.2 根据调查结果确定埋设点的位置和数量，埋设点应不少于 3 个，并做好记录。人为条件影响的区域不宜选点。

E.2.3 确定需要检查片的数量，然后按要求制作规定尺寸和形状的检查片，并对检查片进行标号，检查片制备相关过程参见 E.1。平行试样应不少于 3 个。

E.2.4 试验前检查片表面应清洗，宜采用有机溶剂脱脂，再用自来水冲洗或刷洗，除去不溶污物，吹（擦）干后再放入无水酒精中浸泡脱水约 5min，取出吹干，用干净白纸包好，放入干燥器内干燥 24h 后称重，精确到 0.2mg。

E.2.5 用易于被有机溶剂清洗的涂料或易去除的耐水密封材料覆盖编号和多余的裸露面。测量、记录裸露面边长或直径，精确到 0.1mm。

E.2.6 埋设前应做好记录，记录内容包括：检查片编号、材质、制备方法、表面状态、原始尺寸、原始重量、裸露面边长或直径、制备人、制备时间等。

E.2.7 开挖埋设坑。埋设坑宜为长方形，其大小随检查片的大小、数量和排列情况而定。挖出的土样

分层放置。

E.2.8 埋设检查片。一般管状检查片宜水平放置，方形检查片宜垂直放置，短边着地。检查片宜阔面平行于地网，片间距不宜低于 0.3m，片中心距地网 0.1m~0.3m，如图 E.3 所示。为保持腐蚀条件一致性，检查片应埋设在同一土层中，其埋设深度应与实用状态相当。

E.2.9 填土。挖出的土样按顺序回填，力求使全部检查片上的回填土的厚度和松紧度相同。

E.2.10 埋设完成后应在埋设点四角设置标识牌，牌上宜注明埋设日期、埋设点编号、检查片数量及编号、埋设位置及方位、埋设深度、排列顺序、相互间距等。

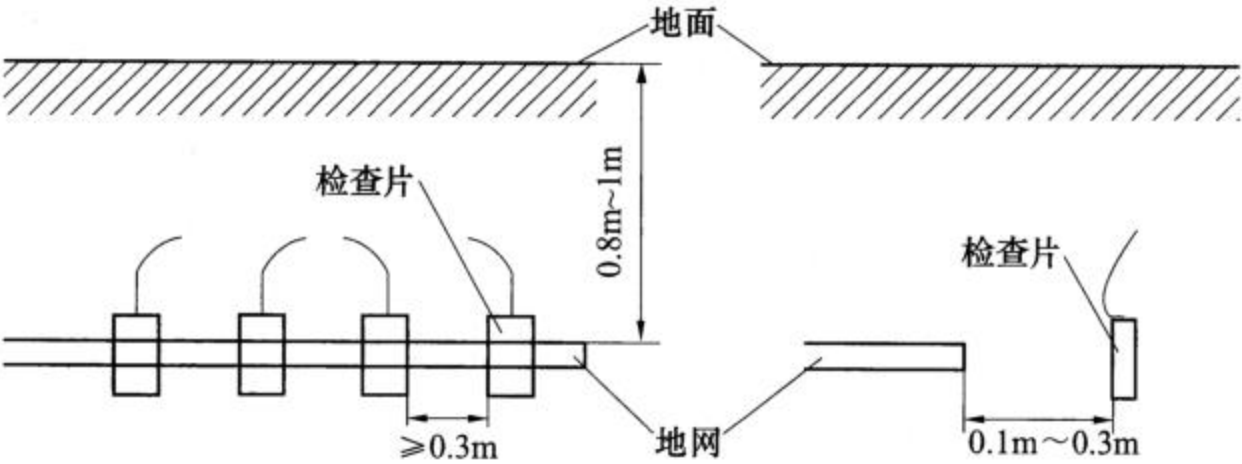


图 E.3 检查片埋设示意图

E.3 检查片的清洗

检查片开挖取出后，需对表面腐蚀产物进行清洗。对某一给定材料，要根据许多因素（包括过去的经验）来选择特定的方法。本标准汇总了去除腐蚀产物所用的常见化学方法。

对表 E.1 中所列的所有清洗方法，要求去除腐蚀产物的表面与液面保持垂直，这样可使清洗过程中在水平面上释放的任何气体极少保留下来，从而使清洗过程变得均匀一致。

表 E.1 清除腐蚀产物所用的化学清洗方法

序号	材料	化学药品	时间	温度 ℃	备注
1.1	铁 及 钢	1000mL 盐酸 (HCl, ρ=1.19g/mL) 20g 三氧化锑 (Sb ₂ O ₃) 50g 氯化锡 (SnCl ₂)	1min~25min	20~25	强烈搅拌溶液或刷洗试样。某些情况下，需要延长长时间
1.2		50g 氢氧化钠 (NaOH) 200g 锌粒或锌屑 加蒸馏水配制成 1000mL 溶液	30min~40min	80~90	锌粉暴露于空气中能自燃，使用时应特别小心
1.3		200g 氢氧化钠 (NaOH) 20g 锌粒或锌屑 加蒸馏水配制成 1000mL 溶液	30min~40min	80~90	锌粉暴露于空气中能自燃，使用时应特别小心
1.4		200g 柠檬酸铵 [(CN ₄) ₂ HC ₆ H ₅ O ₇] 加蒸馏水配制成 1000mL 溶液	20min	75~90	—
1.5		500mL 盐酸 (HCl, ρ=1.19g/mL) 3.5g 六次甲基四胺 加蒸馏水配制成 1000mL 溶液	10min	20~25	某些情况下，需要延长时间

表 E.1 (续)

序号	材料	化学药品	时间	温度 ℃	备注
2.1	锌 及 锌 合 金	第一步: 150mL 氢氧化铵 (NH_4OH , $\rho=0.90\text{g/mL}$) 加蒸馏水配制成 1000mL 溶液 第二步: 50g 三氧化铬 (CrO_3) 10g 硝酸银 (AgNO_3) 加蒸馏水配制成 1000mL 溶液	5min 15s~20s	20~25 沸点	应把硝酸银溶解在 水中, 添加到沸腾的 铬酸里, 以防止铬酸 银的过度晶化。铬酸 必须不含硫酸盐, 以 避免侵蚀锌基金属
2.2		100g 氯化铵 (NH_4Cl) 加蒸馏水配制成 1000mL 溶液	2min~5min	70	—
2.3		200g 三氧化铬 (CrO_3) 加蒸馏水配制成 1000mL 溶液	1min	80	应避免在含盐的环 境中形成的腐蚀产 物带来铬酸的氯化 物污染, 以防止侵蚀 锌基金属
2.4		85mL 氢碘酸 (HI , $\rho=1.5\text{g/mL}$) 加蒸馏水配制成 1000mL 溶液	15s	20~25	有可能去除一些锌 基金属。应使用对比 试样
2.5		100g 过硫酸铵 [$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_6$] 加蒸馏水配制成 1000mL 溶液	5min	20~25	特别推荐用于镀锌 钢
2.6		100g 乙酸铵 ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) 加蒸馏水配制成 1000mL 溶液	2min~5min	70	—
3.1	铜 及 铜 合 金	500mL 盐酸 (HCl , $\rho=1.19\text{g/mL}$) 加蒸馏水配制成 1000mL 溶液	1min~3min	20~25	用纯氮对溶液脱氧, 以减少对金属基体 的损害
3.2		4.9g 氰化钠 (NaCN) 加蒸馏水配制成 1000mL 溶液	1min~3min	20~25	用于去除上述盐酸 法不能去除的硫化 铜腐蚀产物
3.3		100mL 硫酸 (H_2SO_4 , $\rho=1.84\text{g/mL}$) 加蒸馏水配制成 1000mL 溶液	1min~3min	20~25	处理前, 先去除松散 的腐蚀产物, 以减少 铜再沉积到试样表 面上
3.4		120mL 硫酸 (H_2SO_4 , $\rho=1.84\text{g/mL}$) 30g 重铬酸钠 ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 加蒸馏水配制成 1000mL 溶液	5s~10s	20~25	去除硫酸处理后的 再沉积铜
3.5		54mL 硫酸 (H_2SO_4 , $\rho=1.84\text{g/mL}$) 加蒸馏水配制成 1000mL 溶液	30min~60min	40~50	用纯氮对溶液脱氧。 建议刷去试样表面 的腐蚀产物, 然后重 新浸泡 3s~4s

注: 用危险物质 (例如氰化物、三氧化铬、锌粉) 操作时, 必须采取必要的安全措施

附录 F
(资料性附录)
土 样 的 采 集

F.1 采集时间

F.1.1 采样分析项目用的土壤样品应在现场测试的同时进行采集。

F.1.2 采样应避免在雨后或雪后立即进行，宜在连续天晴 3 天后或在干燥季节进行。

F.2 采集地点

F.2.1 采样分析项目用的土壤样品应在现场测试项目的同一地点、同一土坑、同一土层中采集。

F.2.2 为尽量减小土壤结构不均匀性的影响，采样点不应设在有明显的岩石、裂缝和边坡等土壤不均匀处。

F.3 采集容器

F.3.1 测定土壤含水量的土样应分别装入已称重的铝盒，盖好并密封。

F.3.2 用于其他实验室分析的土样可装入广口磨口瓶。磨口瓶应经过饱和重铬酸钾硫酸洗液、清水、去离子水（或蒸馏水）逐一清洗并干燥后方可使用。无广口磨口瓶时，也可用清洁、结实的塑料袋代替。

F.4 采集方法

F.4.1 使用清洁的锹、镐或铲子在选定的采样点开挖采集样品，采样深度应与地网深度相当。

F.4.2 采样过程中应避免土壤样品受到污染，注意不能使垃圾、沥青等混入试样。

F.4.3 为防止接地体的腐蚀产物进入土样中，采样点应与接地体保持一定的距离，至少在 0.3m 以上。

F.4.4 采集土壤样品 1kg~2kg，装入准备好的容器内并密封好。

F.5 记录与保存

F.5.1 采集完成后，在采样容器上贴上标签，并注明样品编号、采样地点、采样时间、天气情况、气温和土壤温度、采土深度、地下水情况以及采样者。

F.5.2 土壤样品带回实验室后应立即对含水量进行测定，以避免土壤水分流失。其余土样应及时进行风干处理，然后保存，以免发霉引起性质变化。

附 录 G
(规范性附录)
土 壤 水 溶 液 的 配 制

G.1 土壤的准备

首先将采样取得的土壤放在木盘中或塑料布上，摊成薄薄的一层，置于室内通风风干。在土样半干时，须将大块土捏碎，以免完全干后结成硬块，难以磨细。

样品风干后，应去除动植物残体如根、茎、叶、虫体等和石块、结核（石灰、铁、锰）。如果石子过多，应当将拣出的石子称重，记下所占的百分比。

风干后的土样，倒入木盘上，用木棍研细，用 2mm 孔径的筛子过筛，通过的土壤充分混匀后用四分法分成两份。一份做物理分析，另一份做化学分析。化学分析用的土样还必须进一步研细，并通过 1mm 孔径的筛子过筛。

G.2 水土比例

在测定土壤 pH 值以及含盐量时，都需要配制土壤的水溶液。测定土壤 pH 值所配水溶液的水土比例为 2.5:1，测定土壤水溶性盐总量所配水溶液的水土比例为 5:1，应在测试结果中注明水土比例。

G.3 配制过程

土壤水溶液的配制过程可按 LY/T 1239—1999《森林土壤 pH 值的测定》的有关规定执行。

- a) 称取一定量过筛后的风干土样（精确到 0.01g），放入到适当容积的大口塑料瓶中。再根据上述规定的水土比例加入无二氧化碳蒸馏水。
- b) 将大口塑料瓶用橡皮塞塞紧，并通过搅拌或振荡等方式使溶液混合均匀。
- c) 溶液混合均匀后静置 20min~30min，然后取上层清液并进行真空抽滤，获得清亮的滤液，加塞备用。

参 考 文 献

- GB/T 2900.73 电工术语 接地与电击防护
- GB/T 10123 金属和合金的腐蚀 基本术语和定义
- GB/T 18590—2001 金属和合金的腐蚀 点蚀评定方法
- GB/T 21447 钢质管道外腐蚀控制规范
- GB 50021 岩土工程勘察规范
- GB 50568 油气田及管道岩土工程勘察规范
- DL/T 248 输电线路杆塔不锈钢复合材料耐腐蚀接地装置
- DL/T 475—2006 接地装置特性参数测量导则
- DL/T 5394—2007 电力工程地下金属构筑物防腐技术导则
- EJ 484 三十万千瓦压水堆核电厂厂区土壤腐蚀性勘测与评定
- NY/T 1121.2 土壤检测 第2部分：土壤 pH 的测定
- NY/T 1121.16 土壤检测 第16部分：土壤水溶性盐总量的测定
- SY/T 0030 油气田及管道腐蚀与防护工程基本词汇
- SY/T 0087.1 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
- SY/T 0087.3 钢制管道及储罐腐蚀评价标准 钢质储罐腐蚀直接评价
-

中 华 人 民 共 和 国
电 力 行 业 标 准
接地网土壤腐蚀性评价导则
DL/T 1554—2016

*

中国电力出版社出版、发行
(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)
北京博图彩色印刷有限公司印刷

*

2016年7月第一版 2016年7月北京第一次印刷
880毫米×1230毫米 16开本 1.5印张 43千字
印数 0001—1000册

*

统一书号 155123·3075 定价 13.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

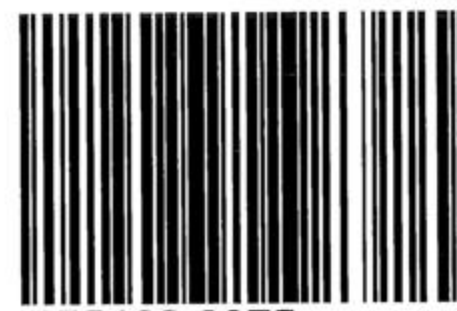
版权专有 翻印必究



中国电力出版社官方微信



掌上电力书屋



155123.3075