

T/CEEMA

中国电力设备管理协会标准

T/CEEMA 02001—2026

柔性接地体技术规范

Technical code for flexible grounding electrode

2026-03-01 发布

2026-04-15 实施

中国电力设备管理协会 发布

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 产品分类	2
4.1 型号及含义	2
4.2 类别说明	3
5 要求	3
5.1 基本要求	3
5.2 环境影响要求	3
5.3 室温电阻率	3
5.4 缓解特性	3
5.5 冲击电流耐受性	3
5.6 工频电流耐受性	3
5.7 耐腐蚀性能	4
5.8 降阻效果系数	4
6 试验方法	4
6.1 试验环境条件	4
6.2 室温电阻率	4
6.3 冲击电流耐受试验	5
6.4 工频电流耐受试验	6
6.5 耐腐蚀性能试验（国际标准）	7
6.6 耐腐蚀性能试验（国家标准）	8
6.7 缓解特性试验	8
6.8 降阻效果系数测量	9
6.9 环境影响检测	9
7 检验规则	10
7.1 检验分类	10
7.2 性能试验	10
7.3 出厂检验	10
7.4 验收检查	10
8 标志、包装、运输与贮存	11
8.1 标志	11
8.2 包装	11
8.3 运输和贮存	11
附录 A（资料性） 人工接地极的接地电阻计算	12
附录 B（资料性） 输电线路杆塔柔性接地体用量参考	16

附录 C (资料性) 土壤电阻率的测试	18
附录 D (资料性) 典型场景下的柔性接地体使用方法	21
参 考 文 献	23

前 言

本规范按照 GB/T 1.1—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。

本规范由中国电力设备管理协会提出并归口。

本规范的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规范起草单位：国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司、湖南欧麦安科技集团有限公司、黑龙江恒电防雷工程有限公司、华中科技大学、北京工业大学、中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司、四川电力设计咨询有限责任公司、上海电力设计院有限公司、中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司、金风低碳能源设计研究院（成都）有限公司、国网四川省电力公司超高压分公司、国网湖南省电力有限公司超高压变电公司、国网江苏省电力有限公司扬州供电分公司、华能新能源股份有限公司、协合新能源集团有限公司、江西大唐国际新能源有限公司、四川盐源华电新能源有限公司。

本规范主要起草人：汤亮亮、徐健、徐博尘、张伯丰、闫君、迟迅、吴炜、张丹丹、王铁流、钟顺洪、吴昊、李艳、张新奇、钟谦、肖飞、董昭旻、罗晓波、杨暘、李宏、李长琪、邹得彬、包紫晨、单光华、张廷发、韩威、张林渠、李垒、蒙小飞、刘春文。

本规范为首次发布。

本规范在执行过程中的意见和建议反馈至中国电力设备管理协会标准化管理中心（北京市西城区广安门外大街 8 号楼 A-1103 室）

柔性接地体技术规范

1 范围

本文件规定了柔性接地体的产品分类、要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输及贮存，并提供了柔性接地体在典型场景下的使用方法、要求等。

本文件适用于电力、新能源、交通、广播电视、邮电通讯、石油、化工、建筑、国防工程、气象和地震等用于做接地保护的柔性接地体。

本文件不适用于降阻剂、离子接地极、石墨基柔性接地体（石墨线）、接地模块。

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/T 21698-2022 复合接地体

GB/T 21698-2008 复合接地体技术条件

GB 6566 建筑材料放射性核素限量

GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）

IEC 62561-7 — 2018 Lightning protection system components (LPSC) — Part 7: Requirements for earthing enhancing compounds

ASTM G59-97 Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements

GB/T 16545-2025 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除

GB/T 16927.1 高电压试验技术 第1部分：一般定义及试验要求

GB/T 16927.2 高电压试验技术 第2部分：测量系统

GB 50057 建筑物防雷设计规范

GB/T 50065 交流电气装置的接地设计规范

GB 50169-2016 电气装置安装工程 接地装置施工及验收规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

接地体 earthing electrode

埋入土壤或特定的导电介质（如柔性接地体）中作散流用的导体。

3.2

土壤电阻率 earth resistivity

表征土壤导电性能的参数，是单位体积土壤的电阻值。

注：它的值等于单位立方体土壤相对两面间测得的电阻，单位为欧姆米（ $\Omega \cdot m$ ）。

3.3

复合接地体 composite grounding conductor

由两种及以上物理或化学性质不同的主要物质组合而成的接地体。

3.4

柔性接地技术 flexible grounding technology

采用液体导电材料浸入金属接地体与岩石等介质的间隙，包裹金属接地体扩大其有效接触面积，包裹石头表面降低环境电阻率，增大接地网耐冲击能力，隔离空气、氧气与酸碱侵蚀消除电化学腐蚀的降阻技术，其衍生产品为液态柔性接地体，是一种严格区分降阻剂和石墨基柔性接地体的复合接地体降阻材料。

3.5

柔性接地体 flexible grounding body

一种液态高分子复合导电材料，是一种以液态导电介质为核心的柔性接地降阻材料。具有高降阻效果、强防腐能力和耐冲击的能力。初始状态为液态，最终成型为稳定的胶体状态。

3.6

柔性接地极 flexible grounding electrode

一种由带有钻头的镀铜钢棒植入地下，以柔性接地体灌注钻头所形成的孔洞而成型的复合垂直接地极。

3.7

降阻剂 resistance decreasing reagent

用以包覆接地体并改善接地体周围一定范围内介质接地功能的低电阻混合材料，主要由导电石墨、硅酸盐矿物原料为主要原料加工而成。

3.8

石墨基柔性接地体 graphite-based flexible grounding conductor

由石墨线或石墨线与石墨覆金属线或石墨线与耐腐蚀不锈钢经布线或编织加工制成的可埋入土壤或特定的导电介质（例如混凝土或焦炭）中作为接地装置使用的导体。

3.9

接地模块 grounding module

由电极芯和模块体组成，用导电性良好的降阻材料，内置金属骨架（电极芯），通过专用设备压制或灌注成型的接地极产品。

3.10

离子接地极 ion grounded electrode

一种由金属管体、外填料、内填料及连接线组成，能缓慢释放离子降低接地电阻的接地装置，是一种接地极产品。

3.11

降阻效果系数 coefficient of resistance reducing effect

在相同的土壤电阻率和相同的埋设方式下，加入降阻材料（柔性接地体）后的标准金属接地体的工频接地电阻与相同尺寸的标准金属导体的工频接地电阻的比值。

3.12

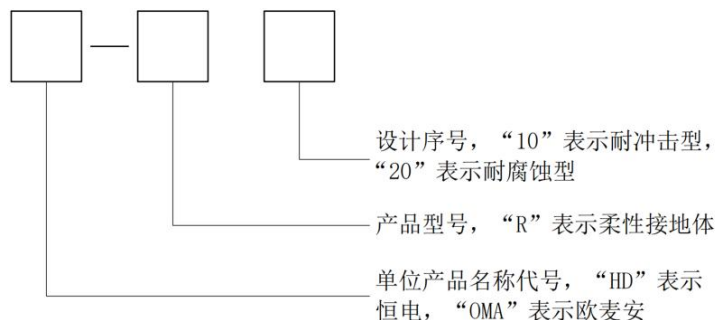
极化电阻 polarization resistance

在电极电位附近，电极电位的微小变化与所引起的电流密度变化的比值。它表征了电极表面发生电化学反应的难易程度，用于量化金属腐蚀的速率。

4 产品分类

4.1 型号及含义

柔性接地体的型号编排方式及含义如下：



4.2 类别说明

4.2.1 柔性接地体一般分为耐腐蚀型柔性接地体和耐冲击型柔性接地体。

4.2.2 柔性接地体采用导电材料、防腐材料、新结构成型材料制作而成。

5 要求

5.1 基本要求

柔性接地体应能在 $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下正常使用，所含有对自然环境产生污染以及对人体有害的物质成分应符合相关标准。

5.2 环境影响要求

5.2.1 放射性物质应满足 GB 6566 的要求，其内照射指数 I_{Ra} 不大于 1.0，外照射指数 I_{r} 不大于 1.0。

5.2.2 重金属含量应满足 GB 15618 中土壤污染风险筛选值的最低要求。其中，铅含量不大于 170mg/kg，汞含量不大于 1.0mg/kg，铬含量不大于 250mg/kg，镍含量不大于 190mg/kg。

5.3 室温电阻率

室温下（ $25^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）电阻率应不大于 $3\Omega\cdot\text{m}$ 。

5.4 缓解特性

柔性接地体材料按要求埋入规定的土壤中后，在 72h 时测量的接地电阻与在 1h 内测量的接地电阻之比，应在 0.8~0.9 之间。

5.5 冲击电流耐受性

经过冲击电流耐受试验后，工频接地电阻变化率绝对值应不大于 10%，试验后接地体表面不应出现鼓泡、熔化、裂纹、碎片、孔洞。

5.6 工频电流耐受性

经过工频电流耐受试验后，工频接地电阻变化率绝对值应不大于 10%，试验后接地体表面不应出现鼓泡、熔化、裂纹、碎片、孔洞。

5.7 耐腐蚀性能

对于镀锌钢材，极化电阻应大于 $7.6\Omega\cdot\text{m}^2$ ，或者平均腐蚀率应不大于 0.01mm/年；
对于铜材，极化电阻应大于 $8\Omega\cdot\text{m}^2$ ，或者平均腐蚀率应不大于 0.01mm/年。

5.8 降阻效果系数

柔性接地体的降阻效果系数应小于 0.5（168h 后测量）。

6 试验方法

6.1 试验环境条件

柔性接地体宜在以下条件下进行试验：

- a) 温度：10°C~35°C；
- b) 相对湿度：50%~80%；
- c) 气压：86kPa~106kPa。

6.2 室温电阻率

测量仪器由低频交流电源、电流表、四电极箱和高输入阻抗的电压表组成，连接示意图见图 1。四电极箱由绝缘材料制成，尺寸为 200mm×100mm×100mm（长×宽×高）。在 100mm×100mm 的两个面内侧分别安装与该面等尺寸的铜板电极，构成一对电流输出端；在中部安装一对铜制针电极（间距应大于 100mm）构成电压输出端。将液态柔性接地体试品倒入四电极箱内并装满，确保其与电极有良好的电气接触。

在外侧电极施加 100mA 电流，用电压表测量内侧电极间的电压降，然后计算出电阻值。每个试品的电阻值按式（1）转换为电阻率。每个试品测试 3 次，取平均值。用 3 个试品的电阻率平均值作为室温电阻率。

$$\rho = \frac{RA}{a} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- ρ ——试品电阻率，单位为欧姆米（ $\Omega\cdot\text{m}$ ）；
- R——电阻，单位为欧姆（ Ω ）；
- A——电流垂直通过的导体横截面面积，单位为平方米（ m^2 ）；
- a——内侧电极间距，从电极内部边缘开始测量，单位为米（m）。

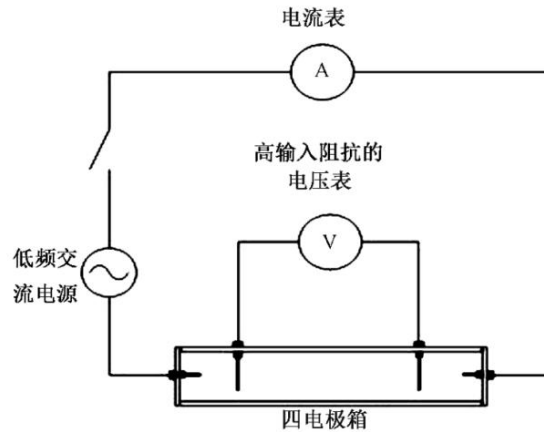
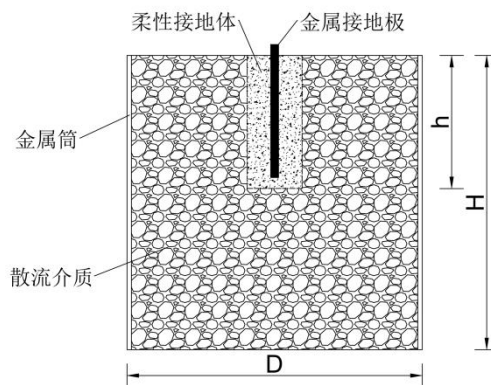


图1 接地体电阻率测试图

6.3 冲击电流耐受试验

取3个试品，布置方式如图2所示。将接地体埋入直径不小于500mm、高度不小于1000mm的金属桶内的散流介质（宜采用水或土壤）中，测量工频电阻接线图如图3所示，在室温下测量工频电流1A时的电阻值 R_1 ，即为 U/I 。



标引序号说明：

D——金属桶的直径，单位为毫米（mm）；

H——金属桶的高度，单位为毫米（mm）；

h——接地体的长度，单位为毫米（mm）。

图2 柔性接地体布置示意图

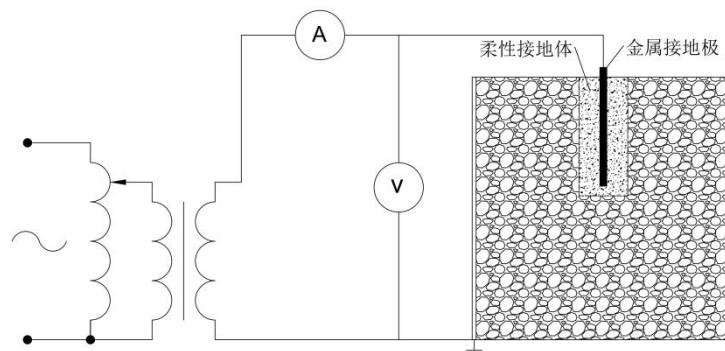


图3 测量工频电阻接线图

按图 3 所示的接线图进行试验，试验波形应满足 GB/T 16927.1 的要求，测量系统应满足 GB/T 16927.2 的要求。对 3 个试品分别用波形为 $8/20\mu\text{s}$ 、幅值不小于 6kA 的冲击电流冲击 10 次，5 次为 1 组，每次间隔不少于 60s，每组间隔时间不少于 30min，记录第 3 次和第 10 次放电电流及试品的电压峰值。10 次放电完成且试品冷却至室温后，测量试品的试验后工频电阻 R_2 。按式 (2) 计算出各试品电阻的变化率 ΔR 并记录，所有试品的变化率均应满足本规范第 5.5 条的要求。

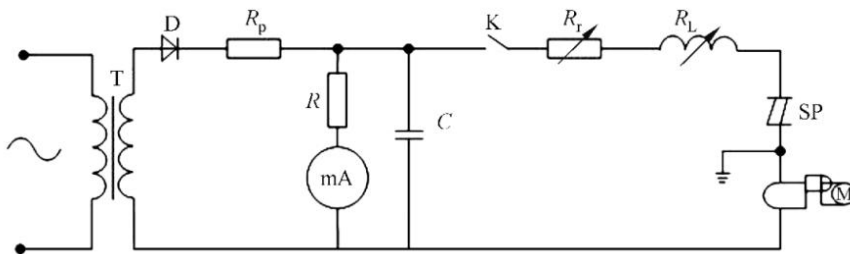
$$\Delta R = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

ΔR ——试验后试品工频电阻变化率；

R_1 ——试验前试品工频电阻，单位为欧姆 (Ω)；

R_2 ——试验后试品工频电阻，单位为欧姆 (Ω)。



标引序号说明：

SP——如图 2 所示试品；

M——电流测试系统；

T——变压器；

D——整流元件；

K——放电开关；

R_p ——波头电阻；

R ——波尾电阻；

C——充放电电容；

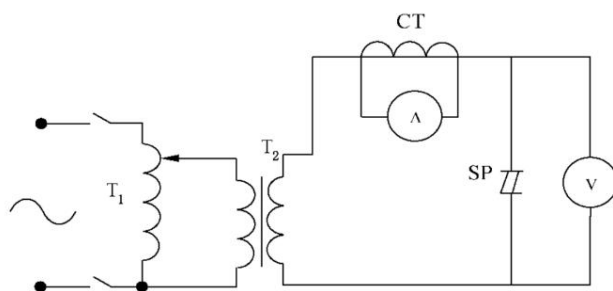
R_r ——调波可调电阻；

R_L ——调波电感。

图 4 冲击电流耐受试验接线图

6.4 工频电流耐受试验

本试验在完成 6.3 试验的 3 个试品上进行。按图 5 所示的接线图进行试验，对 3 个试品分别施加不小于 30A 的工频电流 5 次，每次持续 10s ，每两次间隔不小于 30min 。第 5 次试验后冷却至室温测试其工频电阻 R_2 。试验前和试验后分别测量试品的工频电阻，按式 (2) 计算出耐受试验后试品工频电阻的变化率并记录，所有试品的变化率均应满足本规范第 5.6 条的要求。



标引序号说明：

SP——如图 2 所示试品；

CT——电流互感器；

T₁——调压器；

T₂——升压器。

图 5 工频电流耐受试验接线图

6.5 耐腐蚀性能试验（国际标准）

6.5.1 一般要求

按照 ASTM G59-97 中的极化电阻测量方法确定柔性接地体的极化电阻。

6.5.2 测试装置

测试装置为一个三端恒电位仪，可用于施加正、负电位，并且能够记录所施加电位对应的电流大小：

- a) 蒸馏水；
- b) 玻璃器皿；
- c) 混合搅拌容器；
- d) 精度为 $\pm 0.001\text{g}$ 的天平。

6.5.3 试验准备

- a) 按照制造商的说明，配制柔性接地体试验试品；
- b) 根据极化电阻法将三个电极（工作电极、参考电极和活性电极）放入液态柔性接地体试验试品中；
- c) 连接至恒电位仪。工作电极应采用常用的金属接地极（如镀锌扁钢）；
- d) 活性电极应采用石墨电极；
- e) 参考电极宜为铜/硫酸铜；

6.5.4 试验流程

- a) 记录连接至试验试品的工作电极的开路电位；
- b) 获得试验试品的塔菲尔（Tafel）曲线；
- c) 测定塔菲尔（Tafel）常数和极化电阻值，直到参数不再变化为止。

6.6 耐腐蚀性能试验（国家标准）

6.6.1 一般要求

试品为热镀锌扁钢，共 10 件。

每件试品的长度应为 50mm，其中扁钢宽度应为 25mm，厚度≥2.5mm。试品表面应平整、无锈蚀、无毛刺和飞边，试验前用酒精清洗干净，然后在 100℃下烘干 1h，冷却至室温并立即用分析天平（精度为 0.1mg）称重待用。

6.6.2 试验方法

本试验在如图 6 的试验箱中进行，试验箱的高度为 D。将调制好的液态柔性接地体浇筑在试品周围，并且完全包裹试品，试品间距应大于 600mm。用双层 PVC 厚膜将试验箱封住，以防止水分蒸发。

将试验箱置于无阳光直射、四周无热源的室内至少 120d，然后取出并按照 GB/T 16545 的规定清洗表面附着物，同时进行外观检查，用酒精清洗、烘干后称重，按式（3）计算出腐蚀率。

$$V = \frac{3650\Delta W}{Stc} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

V——试品表面平均腐蚀率，单位为毫米每年（mm/a）；

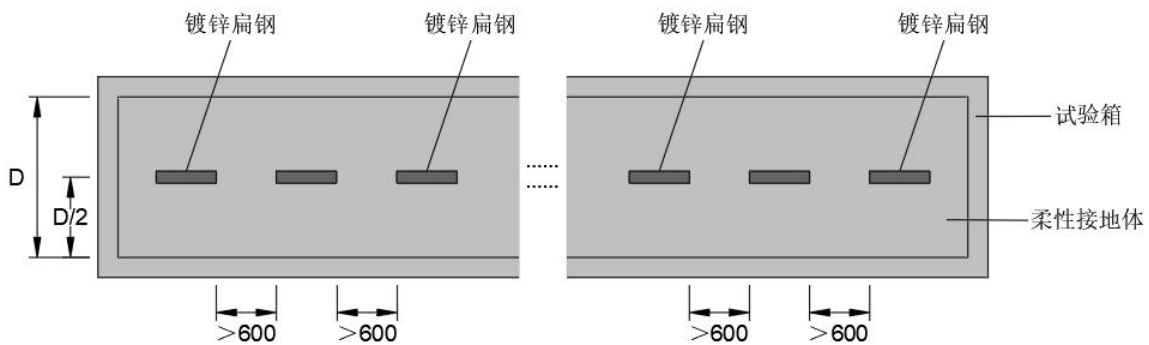
ΔW——试品失重，单位为克（g）；

S——试品表面积，单位为平方厘米（cm²）；

t——试品埋入土壤的时间，单位为天（d）；

c——试品的密度，单位为克每立方厘米（g/cm³）。

单位为毫米



标引序号说明：

D——试验箱的高度。

图 6 试验箱中腐蚀试品埋设示意图

6.7 缓解特性试验

6.7.1 试验准备

按图 7 所示布置试品。图 7 中的内电极为金属管，其外直径为 60mm，管上均匀钻有小孔，便于柔性接地体材料释放到土壤中，外电极为内直径为 1200mm 的金属圆桶。将金属桶内填满土，然后将液

态柔性接地体加入内电极的金属管内，管的上端不封盖，待其凝固成型后开始测试。

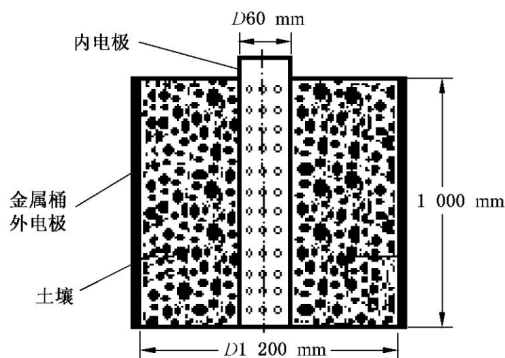


图7 缓解特性试验试品布置图

6.7.2 试验方法

试品布置好后，内电极加工频电压，金属桶外电极接地，在1h内测量电压和电流（ U_1 、 I_1 ），然后在72h时再测量电压和电流（ U_2 、 I_2 ），计算 $R_1=U_1/I_1$ 和 $R_2=U_2/I_2$ ， R_2/R_1 比值应在0.8~0.9之间，否则不满足缓解特性试验要求。

试验时，允许采取利于柔性接地体材料有效缓解释放的措施。

6.8 降阻效果系数测量

选择土壤电阻率小于 $500\Omega\cdot\text{m}$ 且土壤地质分布均匀的空地，准备2个相同尺寸的金属接地体，其中一块直接埋入土壤中，另外一块采用柔性接地体浇筑包裹，按同样的方式埋入土壤中，如图8所示，采用三极法分别测量柔性接地体包裹的金属接地体和未被包裹的金属接地体的工频接地电阻，降阻效果系数即为柔性接地体包裹的金属接地体与未被包裹的金属接地体的工频接地电阻的比值，该比值应满足本规范第5.8条的要求。比值越小，柔性接地体的降阻效果越好。

注：接地体埋入土壤中需一段时间后方能达到降阻效果，因此，应按生产厂家提供的时间测量。生产厂家未提供时间的，或时间大于168h的接地体，按埋于土壤中168h后进行测量。

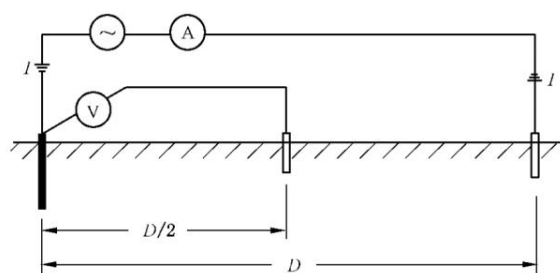


图8 三极法测量接地体的工频接地电阻示意图

6.9 环境影响检测

6.9.1 放射性核素限量检测

按照 GB 6566 执行。

6.9.2 重金属元素限量检测

按照 GB 15618 执行。

7 检验规则

7.1 检验分类

柔性接地体的检验分为性能试验和出厂检验。检验项目见表 1。

从每批次中随机抽取 3 个试品组成一组，按表 1 规定的检验项目进行检验。

表 1 柔性接地体检验项目

序号	检验项目	要求		试验方法
		性能试验	出厂检验	
1	室温电阻率	5.3	5.3	6.2
2	冲击电流耐受试验	5.5	-	6.3
3	工频电流耐受试验	5.6	-	6.4
4	耐腐蚀性能试验	5.7	-	6.5/6.6
5	缓解特性试验	5.4	-	6.7
6	降阻效果系数试验	5.8	-	6.8

7.2 性能试验

在出厂检验合格的产品中随机抽取 3 组，按表 1 中的性能试验项目进行检验。性能试验需由具有国家相关资质认证能力的第三方检测机构（或者国际知名检测机构具备相关实验能力认证）进行，并出具检测报告，检测报告应能在网上查询验证。

在下列情况之一时应进行性能试验：

- a) 新产品投产；
- b) 材料或工艺发生重大改变；
- c) 停产半年以上恢复生产。

7.3 出厂检验

产品应逐套进行出厂检验，经检验合格并附有产品合格证后方可出厂。

出厂检验项目按表 1 要求进行，若检测结果不合格则判定该产品出厂检验不合格。

7.4 验收检查

柔性接地体材料进场前应提供符合本标准第 5 条全部要求的能够网上查询验证的检测报告。

检查柔性接地体产品包装是否有厂家防伪标识（如防伪标签、防伪喷码、二维码等），可通过扫描溯源码进行产品全生命周期溯源查询；按照厂家提供的验证方式（扫码查询、电话查询等）进行真伪及溯源信息验证，确保产品为原厂合格产品，杜绝假冒伪劣产品投入使用。

有一项不合格者，从该批产品中抽取双倍数量的试品进行重复检查；若重复检查结果全部合格，则判定该批次产品合格；若重复检查结果仍有试品不合格，则判定该批次产品不合格。

8 标志、包装、运输与贮存

8.1 标志

8.1.1 在包装桶上应注明：

- a) 公司名称；
- b) 商标；
- c) 产品名称；
- d) 型号；
- e) 生产日期；
- f) 防伪溯源标识。

8.1.2 在合格证上应注明：

- a) 产品标准编号；
- b) 产品型号；
- c) 检验号；
- d) 生产日期。

8.2 包装

应保证在运输中包装不被损坏。包装内应按照发货批次附该批次产品合格证、产品使用说明书等技术文件。

8.3 运输和贮存

运输和贮存时应直立轻放、防潮，不得倒置，不应与腐蚀性物质混放，单垛堆高层数不宜超过 8 层，单垛堆高层数超过 4 层时应增加垫板。

产品贮存应置于阴凉处，避免暴晒，隔离放置以避免牲畜接触。

附录 A
(资料性)
人工接地极的接地电阻计算

A.1 均匀土壤中垂直接地极的接地电阻，可按下式计算：

A.1.1 当 $l \gg d$ 时（图 A.1.1-1）：

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (\text{A.1})$$

式中： R_v ——垂直接地极的接地电阻（ Ω ）；

ρ ——土壤电阻率（ $\Omega \cdot \text{m}$ ）；

l ——垂直接地极的长度（ m ）；

d ——接地极用圆导体时，圆导体的直径（ m ）。

A.1.2 当接地极用其他型式导体时，其等效直径为（图 A.1.1-2）：

管状导体， $d = d_1$ ；

扁导体， $d = \frac{b}{2}$ ；

等边角钢， $d = 0.84b$ ；

不等边角钢， $d = 0.71 [b_1 b_2 (b_1^2 + b_2^2)]^{0.25}$ 。

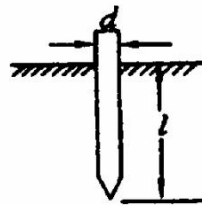


图 A. 1. 1-1 垂直接地极的示意

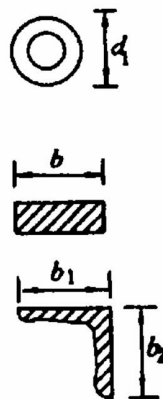


图 A. 1. 1-2 几种型式导体的计算用尺寸

A.2 均匀土壤中不同形状水平接地极的接地电阻，可按下列公式计算：

$$R_h = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L^2}{hd} + A \right) \quad (\text{A.2})$$

式中： R_h ——水平接地极的接地电阻（ Ω ）；






L ——水平接地极的总长度（m）；

h ——水平接地极的埋设深度（m）；

d ——水平接地极的直径或等效直径（m）；

A ——水平接地极的形状系数，可按表 A.2 的规定采用。

表 A.2 水平接地极的形状系数

水平接地极形状	—	L		○	+	□				
形状系数 A	-0.6	-0.18	0	0.48	0.89	1	2.19	3.03	4.71	5.65

A.3 均匀土壤中水平接地极为主边缘闭合的复合接地极（接地网）的接地电阻，可按下列公式计算：

$$R_n = \alpha_1 R_e \quad (\text{A.3-1})$$

$$\alpha_1 = \left(3 \ln \frac{L_0}{\sqrt{S}} - 0.2 \right) \frac{\sqrt{S}}{L_0} \quad (\text{A.3-2})$$

$$R_e = 0.213 \frac{\rho}{\sqrt{S}} (1+B) + \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{S}{9hd} - 5B \right) \quad (\text{A.3-3})$$

$$B = \frac{1}{1 + 4.6 \frac{h}{\sqrt{S}}} \quad (\text{A.3-4})$$

式中： R_n ——任意形状边缘闭合接地网的接地电阻（ Ω ）；

R_e ——等值（即等面积、等水平接地极总长度）方形接地网的接地电阻（ Ω ）；

S ——接地网的总面积（ m^2 ）；

d ——水平接地极的直径或等效直径（m）；

h ——水平接地极的埋设深度（m）；

L_0 ——接地网的外缘边线总长度（m）；

L ——水平接地极的总长度（m）。

A.4 均匀土壤中人工接地极工频接地电阻的简易计算，可相应采用下列各式：

单根水平式：

$$R \approx 2 \frac{\rho}{L} \quad (\text{A.4-1})$$

复合式（接地网）：

$$R \approx 0.5 \frac{\rho}{\sqrt{S}} = 0.28 \frac{\rho}{r} \quad (\text{A.4-2})$$

$$\text{或 } R \approx \frac{\sqrt{\pi}}{4} \times \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L} = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \quad (\text{A.4-3})$$

式中：S——大于 100m² 的闭合接地网的面积；

R——与接地网面积 S 等值的圆的半径，即等效半径（m）。

A.5 典型双层土壤中几种接地装置的接地参数计算，应符合下列要求：

A.5.1 深埋垂直接地极的接地电阻（图 A.5-1），可按下列各式计算：

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{d} + C \right) \quad (\text{A.5-1})$$

$$l < H \text{ 时： } \rho_a = \rho_1 \quad (\text{A.5-2})$$

$$l > H \text{ 时： } \rho_a = \frac{\rho_1 \rho_2}{\frac{H}{l} (\rho_2 - \rho_1) + \rho_1} \quad (\text{A.5-3})$$

$$C = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \right)^n \ln \frac{2nH + l}{2(n-1)H + l} \quad (\text{A.5-4})$$

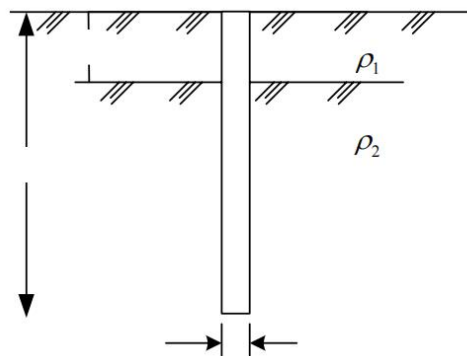


图 A.5-1 深埋接地体示意

A.5.2 土壤具有图 A.5-2 所示的两个剖面结构时，水平接地网的接地电阻 R 可按下列各式计算：

$$R = \frac{0.5 \rho_1 \rho_2 \sqrt{S}}{\rho_1 S_2 + \rho_2 S_1} \quad (\text{A.5-5})$$

式中：S₁、S₂——分别覆盖在 ρ₁、ρ₂ 土壤电阻率上的接地网面积（m²）；

S——接地网总面积（m²）。

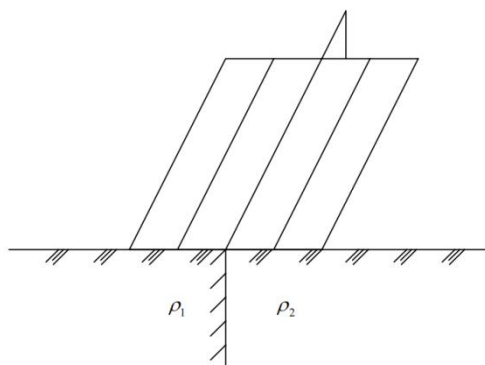


图 A.5-2 两种土壤电阻率的接地网

A.6 采用柔性接地体降阻后的接地电阻的计算，可参照下列计算方法：

采用柔性接地体降阻的本质是增加接地体有效范围内的自由电荷数量，直接作用表现是改善接地体周围的土壤电阻率，因此按下式计算得到的等效电阻率参与本附录中人工接地极的接地电阻计算：

$$\rho_r = k \times \rho_0 \quad (\text{A.6})$$

式中： ρ_r ——采用柔性接地体降阻后的等效电阻率（ $\Omega \cdot \text{m}$ ）；

ρ_0 ——原始土壤电阻率（ $\Omega \cdot \text{m}$ ）；

k ——柔性接地体实测的降阻效果系数。

以黑龙江恒电防雷工程有限公司生产制造的 HD-R10 柔性接地体（在实验室标准状态下测得的降阻效果系数为 0.16）为例，说明不同土壤电阻率环境下的降阻效果系数作为参考。

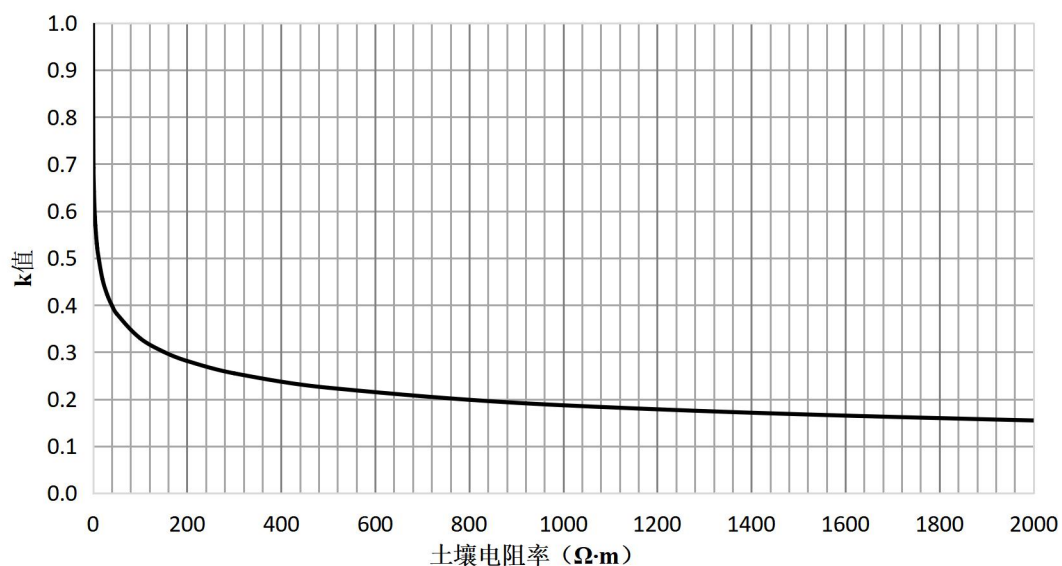


图 A.6 柔性接地体降阻效果系数

附录 B
(资料性)
输电线路杆塔柔性接地体用量参考

B.1 有地线的线路杆塔的工频接地电阻，不宜超过表 B.1 的规定。

表 B.1 有地线的线路杆塔的工频接地电阻

土壤电阻率 ρ ($\Omega\cdot\text{m}$)	$\rho\leq 100$	$100<\rho\leq 500$	$500<\rho\leq 1000$	$1000<\rho\leq 2000$	$\rho>2000$
接地电阻 (Ω)	10	15	20	25	30

B.2 高压架空线路杆塔的接地装置应符合下列要求：

B.2.1 高压架空线路杆塔的接地装置型式应符合 GB/T 50065-2011《交流电气装置的接地设计规范》中 5.1.5 相关要求；

B.2.2 高压架空线路杆塔的人工接地装置采用柔性接地体时，可采用下列型式：

1 在土壤电阻率 $\rho\leq 500\Omega\cdot\text{m}$ 的地区，在杆塔塔脚且紧贴基础侧面设置小型闭合均压环，并采用柔性接地体浇筑包裹均压环。

2 在土壤电阻率 $500\Omega\cdot\text{m}<\rho\leq 2000\Omega\cdot\text{m}$ 的地区，在杆塔塔脚且紧贴基础侧面设置小型闭合均压环，并采用柔性接地体浇筑包裹小均压环，在杆塔基础外围约 0.5m 处设置大型均压环，视现场情况和接地要求，可采用柔性接地体浇筑大均压环，并从大均压环向外引出 1~4 条单根长度不超过 18m 的放射性接地极，外引射线视情况浇筑柔性接地体。

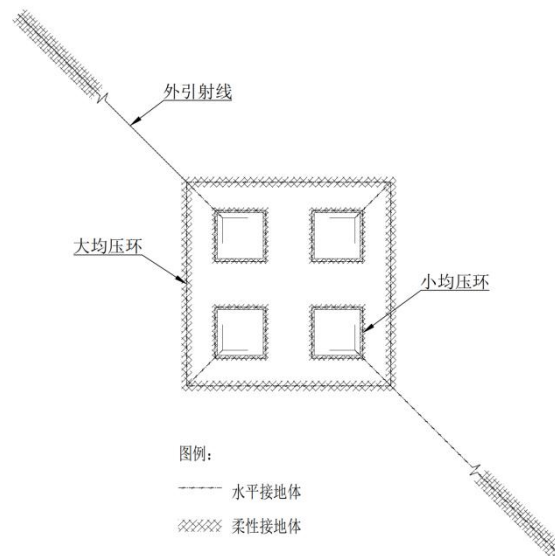


图 B.2 典型杆塔接地装置平面布置示意图

B.3 柔性接地体推荐用量参考表

表 B.3 杆塔接地柔性接地体参考用量

电压等级	土壤电阻率 ρ ($\Omega\cdot\text{m}$)			
	$\rho\leq 500$	$500<\rho\leq 1000$	$1000<\rho\leq 2000$	$\rho>2000$

35kV 及以下	60kg~120kg	150kg~240kg	240kg~300kg	另行设计
110kV、220kV	90kg~150kg	180kg~270kg	270kg~330kg	另行设计
500kV 及以上	120kg~150kg	210kg~300kg	300kg~360kg	另行设计

注：1 本表是以黑龙江恒电防雷工程有限公司生产制造的 HD-R10 型柔性接地体（在实验室标准状态下降阻效果系数为 0.16）为例，其他不同参数的柔性接地体应以实测的降阻效果系数参考此表计算用量。

2 表中用量是基于典型接地装置布置方式和一般土壤结构计算得出，供设计参考使用，其他类型电压等级及基础根开的杆塔接地装置参考邻近电压等级的用量并适当调整。

3 典型杆塔模型：

35kV 及以下线路以基础根开为 4~6 米的输电铁塔为例；

110kV/220kV 线路以基础根开为 8~10 米的典型铁塔为例；

500kV 及以上线路以基础根开为 15~20 米的铁塔为例。

4 表中参考用量为一般地质条件下的经验范围，实际工程中应根据现场土壤分层结构、土壤电阻率、接地装置型式及布置方式进行详细设计计算并适当调整。

5 施工时应按设计要求敷设、回填并做好连接与防腐处理，完工后须进行接地电阻实测，验证是否符合目标要求。

6 在腐蚀性较强、冻土、岩石或极干燥地区，应结合具体腐蚀防护措施及施工工艺综合考虑，并宜通过现场试验验证。

7 本表中土壤电阻率 ρ 为工频接地电阻测量时反映的视在土壤电阻率，推荐在勘测时参考本规范附录 C 进行多点测量并取季节修正后的较大值。

附录 C
(资料性)
土壤电阻率的测试

C.1 一般要求

土壤电阻率测试的一般要求如下：

a) 土壤电阻率测试应避免在雨后或雪后立即进行，一般宜在连续天晴 3d 后或在干燥季节进行。在冻土区，测试电极须打入冰冻线以下。

b) 应尽量减小地下金属管道的影响。在靠近居民区或工矿区，地下可能有水管等具有一定金属部件的管道，应把电极布置在与管道垂直的方向上，并且要求最近的测试电极与地下管道之间的距离不小于极间距离。

c) 为尽量减小土壤结构不均匀性的影响，测试电极不应在有明显的岩石、裂缝和边坡等不均匀土壤上布置。为了得到较可信的结果，可以把被测场地分片，进行多处测试。

d) 可选用输出电流为交流或直流电流的仪器测试土壤电阻率。对于大间距的土壤电阻率测试，宜采用交变直流法进行测试，即仪器输出的波形为正负交替变化的直流方波，方波宽度为 0.1s~8s，可有效避免交流法引起的互感误差和避免直流法土壤极化引起的误差。

C.2 四极法测试

C.2.1 测试方法

C.2.1.1 四极等距法或称温纳(Wenner)法

图 C.2.a)所示是四极等距法的原理接线图，两电极之间的距离 a 应不小于电极埋设深度 h 的 20 倍，即 $a \geq 20h$ 。试验电流流入外侧两个电极，接地阻抗测试仪通过测得试验电流和内侧两个电极间的电位差得到 R ，通过式(C.2.1.1)得到被测场地的视在土壤电阻率 ρ ：

$$\rho = 2\pi a R \quad (\text{C.2.1.1})$$

C.2.1.2 四极非等距法或称施伦贝格-巴莫(Schlumberger-Palmer)法

当电极间距相当大（大于 20m）时，四极等距法内侧两个电极的电位差迅速下降，通常仪器测不出或测不准如此低的电位差，此时可用图 C.2.b)所示的四极非等距法的电位极布置方式，电位极布置在相应的电流极附近，可升高所测的电位差值。如果电极的埋设深度 h 与其距离 a 和 b 相比较很小时，由式(C.2.1.2)得土壤电阻率 ρ ：

$$\rho = \pi a(a+b)R/b \quad (\text{C.2.1.2})$$

式中： a ——电流极与电位极间距；

b ——电位极间距。

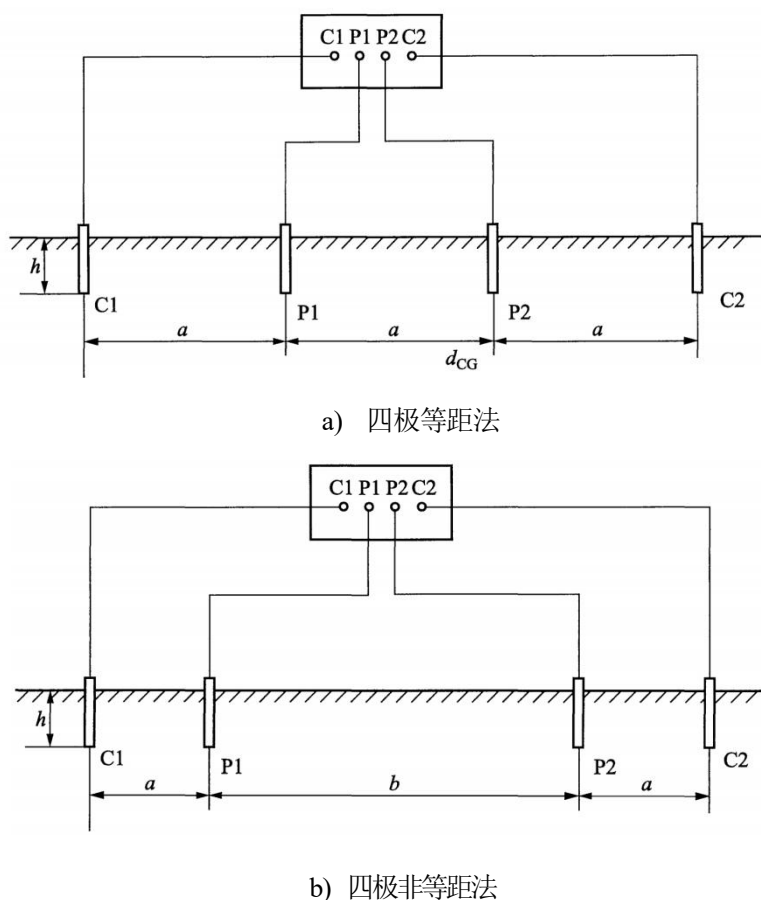


图 C.2 四极法测试土壤电阻率示意图

C.2.2 测试要求及结果处理

测试电极宜用直径不小于 1.5cm 的圆钢或 $\angle 25\text{mm} \times 25\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的角钢，其长度均不小于 40cm。

被测场地土壤中的电流场的深度，即被测土壤的深度，与极间距离 a 有密切关系。当被测场地的面积较大时，极间距离 a 也相应地增大。

在各种电极间距时得出的一组数据即为各视在土壤电阻率，以该数据与间距的关系绘成曲线，即可判断该地区是否存在多种土壤层或是否有岩石层，还可判断其各自的电阻率和深度。

为了得到较合理的土壤电阻率的数据，宜改变极间距离 a ，求得视在土壤电阻率 ρ 与极间距离 a 之间的关系曲线 $\rho=f(a)$ ，极间距离的取值可为 5m、10m、15m、20m、30m、40m 等，最大的极间距离 a_{\max} 一般不宜小于拟建接地装置最大对角线。当布线空间路径有限时，可酌情减少，但至少应达到最大对角线的 $2/3$ 。

C.3 土壤和水的电阻率参考值

表 C.3 土壤和水的电阻率参考值

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		
			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	陶粘土	10	5~20	10~100	3~10
	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、粘土	60			
	砂质粘土	100	30~100	50~300	10~30
	黄土	200	100~200	250	30
	含砂粘土、砂土	300	100~1000	1000 以上	30~100
	河滩中的砂	—	300	—	—
	煤	—	350	—	—
	多石土壤	400	—	—	—
	上层红色风化粘土、 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、砂砾	1000	25~1000	1000~2500
砂层深度大于 10m		1000	—	—	—
地下水较深的草原			—	—	—
地面粘土深度不大于 1.5m、底层多岩石			—	—	—
			—	—	—
岩石	砾石、碎石	5000	—	—	—
	多岩山地	5000	—	—	—
	花岗岩	200000	—	—	—
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	12000~18000	—	—	—
矿	金属矿石	0.01~1	—	—	—

附录 D
(资料性)
典型场景下的柔性接地体使用方法

D.1 使用前准备

D.1.1 检查柔性接地体产品包装是否有厂家防伪标识(如防伪标签、防伪喷码、二维码等), 可通过扫描溯源码进行产品全生命周期溯源查询; 按照厂家提供的验证方式(扫码查询、电话查询等)进行真伪及溯源信息验证, 确保产品为原厂合格产品, 杜绝假冒伪劣产品投入使用。

D.1.2 根据设计要求、施工图纸, 结合现场情况, 确定柔性接地体布置位置。

D.1.3 按照设计方案及图纸预先开挖接地沟槽, 并在接地沟槽底部开设符合表 D.3 “柔性接地体浇筑截面形状”要求的沟槽或深井, 用于放置金属接地体和浇筑柔性接地体。

D.2 使用方法

D.2.1 材料准备: 按产品说明书加热液态柔性接地体。

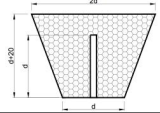
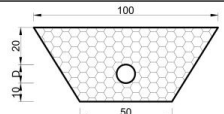
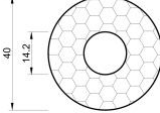
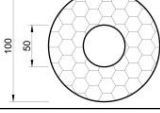
D.2.2 浇筑与成型: 不断搅拌并观察溶液的变化状态, 当开始变得粘稠时, 迅速延沟槽方向倒入沟槽, 浇筑过程应连续、均匀。垂直接地极(含深井)浇筑可在液体状态下沿孔洞直接灌注。

D.2.3 凝固与回填: 必须待材料完全形成不溶于水的弹性胶体后方可回填。回填土应为细土(粒径不应大于 5mm), 细土厚度为 5cm-10cm, 二次浇筑液态柔性接地体并向下渗透与下方成型的柔性接地体形成良好连接。待材料完全形成不溶于水的弹性胶体后可回填土并分层夯实。

D.3 单位柔性接地体浇筑长度参考

表 D.3 单位柔性接地体浇筑长度参考

单位: 毫米

接地体布置方式	接地极规格		柔性接地体浇筑截面形状	敷设长度/深度
水平	扁钢	-60*6		≤2000
		-40*4		≤2500
	圆钢	Φ10		≤4000
垂直	镀铜钢棒	Φ14.2		≤3000
深井	孔径	100		≤1000

注: 本表以黑龙江恒电防雷工程有限公司生产制造的桶装 HD-R10 柔性接地体(单桶体积约 15 升)举例说

明其在典型场景下的使用方法，此处是一桶浇注长度，其他类型接地装置布置方式可参考表中近似布置方式并适当调整。

参 考 文 献

- [1] GB/T 21698-2022 复合接地体
 - [2] GB/T 21698-2008 复合接地体技术条件
 - [3] GB/T 191 包装储运图示标志
 - [4] GB/T 2900.73 电工术语 接地与电击防护
 - [5] GB/T 33588.7 雷电防护系统部件 (LPSC) 第 7 部分: 接地降阻材料的要求
 - [6] DL/T 380 接地降阻材料技术条件
 - [7] DL/T 2095-2020 输电线路杆塔石墨基柔性接地体技术条件
 - [8] DL/T 1677-2016 电力工程用降阻接地模块技术条件
 - [9] DL/T 1314-2013 电力工程用缓释型离子接地装置技术条件
 - [10] GB/T 16545-2025 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除
 - [11] IEC 62561-7—2018 Lightning protection system components (LPSC) — Part 7: Requirements for earthing enhancing compounds
 - [12] IEEE Std-80 IEEE guide for safety in AC substation grounding
-