

ICS 27.140
P 59

NB

中华人民共和国能源行业标准

NB/T 35050—2023
代替 NB/T 35050—2015

P

水力发电厂接地设计技术规范

Code for Earthing Design of Hydropower Plant

2023—12—28 发布

2024—06—28 实施

国家能源局 发布

中华人民共和国能源行业标准

水力发电厂接地设计技术规范

Code for Earthing Design of Hydropower Plant

NB/T 35050—2023

代替 NB/T 35050—2015

主编部门：水电水利规划设计总院

批准部门：国家能源局

施行日期：2024年6月28日

中国水利水电出版社
2024 北京

国家能源局

公 告

2023 年 第 8 号

根据《中华人民共和国标准化法》《能源标准化管理办法》，国家能源局批准《新能源场站智能化建设基本技术规范》等 281 项能源行业标准（附件 1）、《Specification for Preparation of Special Geological Report on Impoundment-Affected Area for Hydropower Projects》等 33 项能源行业标准外文版（附件 2）、《水电工程放射性探测技术规程》等 3 项能源行业标准修改通知单（附件 3），现予以发布。

- 附件：
- 1. 行业标准目录
 - 2. 行业标准外文版目录
 - 3. 行业标准修改通知单

国家能源局

2023 年 12 月 28 日

行业标准信息服务平台

附件 1:

行业标准目录

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	批准日期	实施日期
...						
163	NB/T 35050-2023	水力发电厂接地设计技术规范	NB/T 35050-2015		2023-12-28	2024-06-28
...						

行业标准信息服务平台

前 言

根据《国家能源局综合司关于下达 2020 年能源领域行业标准制修订计划及外文版翻译计划的通知》(国能综通科技〔2020〕106 号)的要求,规范编制组经广泛调查研究,认真总结实践经验,参考有关国内外标准,结合当前电力系统的发展对水力发电厂接地技术提出的新要求,并在广泛征求意见的基础上,修订本规范。

本规范的主要技术内容是:总则、术语、基本规定、接地阻抗、降低接地阻抗的措施、接地电阻计算、均压网设计及计算、转移电位隔离、设备接地特殊要求、接地装置、接地导体选择及防腐、土壤电阻率和接地装置参数测量。

本规范修订的主要技术内容是:

——增加了术语“人工接地体”、“网内电位差”、“高土壤电阻率”和“低土壤电阻率”,并修改了有效接地系统的定义。

——增加了GIL接地相关内容。

——增加了接地网的接触电位差和跨步电位差的软件计算规定。

——增加了土壤电阻率测试时间、测试部位及测点、极距布置的要求。

——增加了异频法测量工频接地阻抗相关要求。

——增加了对地网分期建成的工程,接地装置接触电位差和跨步电位差分期校核的要求。

——增加了计及故障电流直流分量的接地网最大入地电流 I_G 的计算步骤。

——增加了工频接地阻抗测量方法中电流-电压表三极法远离夹角法和反向法。

——修订了计算接地阻抗的电流定义。

——修订了在高土壤电阻率地区或其他严重情况下,原导则第4.1.3条接地装置电位不超过5000V的规定。

——修订了在均压网四周设置围墙或护栏的要求。

——删除了原导则第10.3.2条利用钢管作为低压配电系统接地导体的相关规定。

——删除了原导则第11章铝接地导体相关规定。

——删除了工频接地阻抗测量方法中电流-瓦特表三极法。

——删除了四极法测量电极布置及典型视电阻率曲线等与土壤电阻率测试方法相关内容。

——删除了原导则附录B中工频分流系数计算公式。

本规范由国家能源局负责管理,由水电水利规划设计总院提出并负责日常管理,由能源行业水电电气设计标准化技术委员会(NEA/TC17)负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议,请寄送水电水利规划设计总院(地址:北京市西城区六铺炕北小街2号,邮编:100120)。

本规范主编单位:中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司

本规范参编单位:中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

清华大学

武汉大学

四川桑莱特智能电气设备股份有限公司

本规范主要起草人员:李强 王心琦 王耀辉 庞元勤 罗晓雪 秦莹

李勇 杨建军 鲁海亮 张波 师晓岩 陈范娇

薛凯丹 鞠琳

本规范主要审查人员:于庆贵 李仕胜 康本贤 杨梅 吴胜 孙帆

孙国强 苑睿 张光成 谢小辉 任洪涛 刘澜文

沈志刚 刘亚青 周会高 张烈 鄢宜军

目 次

1 总则.....	1
2 术语.....	2
3 基本规定.....	3
3.1 设计原则.....	3
3.2 系统接地.....	3
3.3 保护接地.....	4
3.4 防雷接地.....	5
3.5 防静电接地.....	6
4 接地阻抗.....	7
4.1 有效接地系统的接地阻抗.....	7
4.2 非直接接地系统的接地阻抗.....	8
4.3 低压系统的接地阻抗.....	8
4.4 杆塔的接地阻抗.....	9
5 降低接地阻抗的措施.....	11
5.1 水下接地网.....	11
5.2 引外接地网.....	11
5.3 深井接地.....	11
5.4 其他.....	11
6 接地电阻计算.....	13
6.1 工频接地电阻计算.....	13
6.2 冲击接地电阻计算.....	16
7 均压网设计及计算.....	18
7.1 均压网设计.....	18
7.2 接触电位差和跨步电位差允许值.....	19
7.3 接触电位差和跨步电位差计算.....	20
8 转移电位隔离.....	25
9 设备接地特殊要求.....	27
9.1 GIS 接地和 GIL 接地.....	27
9.2 离相式封闭母线接地.....	28
9.3 高压电缆线路接地.....	28
9.4 主变压器接地.....	30
9.5 控制、保护、通信及监测系统接地.....	30
9.6 保护线.....	33
9.7 等电位联结导体.....	34
9.8 移动式电力设备接地.....	35
9.9 携带式电力设备接地.....	35
9.10 其他.....	36
10 接地装置.....	37
10.1 自然接地体.....	37
10.2 人工接地体.....	37
10.3 接地导体连接.....	38

10.4 接地标志.....	38
11 接地导体选择及防腐.....	40
11.1 截面选择及计算.....	40
11.2 接地体防腐.....	43
12 土壤电阻率和接地装置参数测量.....	45
12.1 土壤电阻率测量要求.....	45
12.2 工频接地阻抗测量.....	45
12.3 接触电位差和跨步电位差测量.....	49
附录 A 接地设计程序.....	52
附录 B 接地装置电位计算.....	54
附录 C 非均匀土壤中接地网接地电阻的计算.....	62
附录 D 单独接地体的冲击系数.....	67
附录 E 典型土壤电阻率值.....	68
附录 F 土壤表层衰减系数.....	71
附录 G 系数 k 的求取方法.....	73
附录 H 接地导体放热焊接接头对电动力的耐受能力.....	76
附录 J 校验接地导体热稳定用的 I_{jd} 及 td 计算.....	78
附录 K 接地材料在不同土壤腐蚀等级环境中的耐腐蚀特性.....	80
本规范用词说明.....	84
引用标准名录.....	85
附：条文说明.....	86

Contents

1	General Provisions.....	1
2	Terms.....	2
3	General Requirements.....	3
3.1	Principles of Design.....	3
3.2	System Earthing.....	3
3.3	Protective Earthing.....	4
3.4	Earthing Against Lightning Induction.....	5
3.5	Earthing Against Static Electricity.....	6
4	Earthing Impedance.....	7
4.1	Earthing Impedance of Effectively Earthing System.....	7
4.2	Earthing Impedance of Non-direct Earthing System.....	8
4.3	Earthing Impedance of Low Voltage System.....	8
4.4	Earthing Impedance of Poles and Towers.....	9
5	Measures to Reduce Earthing Impedance.....	11
5.1	Underwater Earthing Net.....	11
5.2	Lead-Out Earthing Net.....	11
5.3	Deep Well Earthing.....	11
5.4	Other.....	11
6	Earthing Resistance Calculation.....	13
6.1	Power Frequency Earthing Resistance Calculation.....	13
6.2	Impulse Earthing Resistance Calculation.....	16
7	Equalizing Potential Design and Calculation.....	18
7.1	Equalizing Potential Net Design.....	18
7.2	Allowable Value of Touch Potential Difference and Step Potential Difference.....	19
7.3	Touch Potential Difference and Step Potential Difference Calculation.....	20
8	Transferred Potential Isolation.....	25
9	Special Requirements for Equipment Earthing.....	27
9.1	GIS and GIL Earthing.....	27
9.2	IPB Earthing.....	28
9.3	High Voltage Cable Lines Earthing.....	28
9.4	Transformer Earthing.....	30
9.5	Control System, Protection System, Communication System and Monitoring System Earthing.....	30
9.6	Protective Conductor.....	33
9.7	Equipotential Bonding Conductor.....	34
9.8	Mobile Power Equipment Earthing.....	35
9.9	Portable Power Equipment Earthing.....	35
9.10	Others.....	36
10	Earthing Device.....	37
10.1	Natural Earthing Conductors.....	37
10.2	Artificial Earthing Conductors.....	37
10.3	Earthing Conductor Connection.....	38
10.4	Earthing Sign.....	39
11	Section Selection and Anticorrosion of Earthing Conductor.....	40
11.1	Section Selection and Section Calculation.....	40
11.2	Earthing Conductor Anticorrosion.....	43

12	Measurement of Soil Resistivity and Earthing Device Parameters.....	45
12.1	Soil Resistivity Measurement Requirment.....	45
12.2	Measurement of Power Frequency Earthing Impedence.....	45
12.3	Measurement of Touch Potential Difference and Step Potential Difference.....	49
Appendix A	Procedures of Earthing Design.....	52
Appendix B	Eearthing Device Potential Calculation.....	54
Appendix C	Earthing Resistance Calculation in Non-uniform Soil.....	62
Appendix D	Impulse Coefficient of Independent Earthing Conductor.....	67
Appendix E	Typical Resistivity Value.....	68
Appendix F	Determination of Attenuation Coefficient of Surface Soil Layer.....	71
Appendix G	Calculation method of coefficient k	73
Appendix H	Withstand Capability to Electrodynamics of Earthing Conductor Thermic Welding Joint.....	76
Appendix J	I_{jd} and t_d for Thermal Withstand of Earthing Conductor Section.....	78
Appendix K	Anticorrosion Characteristics of Earthing Conductors Under Different Class of Soil Corrision Environment.....	80
	Explanation of Wording in This Code.....	84
	List of Quoted Standards.....	85
	Addition: Explanation of Provisions.....	86

1 总 则

- 1.0.1** 为使水力发电厂接地设计在电力系统运行和故障时能确保人身及设备的安全，做到技术先进、经济合理，制定本规范。
- 1.0.2** 本规范适用于水力发电厂所有电气装置和设施的接地设计。
- 1.0.3** 水力发电厂的接地设计应根据实际情况，积极采用新技术、新工艺、新材料和新方法，因地制宜确定接地设计总体方案。
- 1.0.4** 水力发电厂接地设计，除应符合本规范外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

行业标准信息服务平台

2 术 语

2.0.1 自然接地体 natural earthing conductor

兼作接地体用的直接埋入地下或水中的各种金属构件、金属井管、钢筋混凝土建筑物的基础和设备等。

2.0.2 人工接地体 artificial earthing conductor

除自然接地体外, 为水力发电厂系统接地、保护接地、防雷接地和防静电接地专门设置的接地导体。

2.0.3 均压网 equalizing potential network

为了改善接地装置的地面电位分布, 减小网孔的电位差和使接地网外电位分布减缓而在接地网内设置的多根水平接地体。

2.0.4 有效接地系统 effectively grounded system

在各种条件下系统的工频零序电抗与工频正序电抗的比为不大于3的正值, 且零序电阻和工频正序电抗的比为不大于1的系统。

2.0.5 非直接接地系统 un-grounded system

中性点不与接地装置连接, 即中性点不接地, 或经过消弧线圈、电压互感器以及高电阻与接地装置连接的系统。

2.0.6 深井接地 deep well earthing

置于深度大于20m或深度大于接地网等效半径1.5倍的深井钻孔内的垂直接地。

2.0.7 等电位接地 equipotential earthing

为实现等电位联结而设置的专用接地。

2.0.8 网内电位差 grid potential difference

接地短路电流流过接地装置时, 在接地装置形成分布电位, 接地装置不同点之间的电位差。

2.0.9 高土壤电阻率 high soil resistivity

大于等于 $1000\Omega\cdot m$ 的土壤电阻率。

2.0.10 低土壤电阻率 low soil resistivity

不大于 $100\Omega\cdot m$ 的土壤电阻率。

3 基本规定

3.1 设计原则

3.1.1 水力发电厂电气装置及设施的接地设计应满足初期发电和本电厂设计水平年接地要求。

3.1.2 接地可分为系统接地、保护接地、防雷接地和防静电接地。

3.1.3 不同用途和不同额定电压的电气设备，除另有规定外，应使用一个总的接地系统，接地阻抗应符合各系统接地阻抗最小值的要求。

3.1.4 接地设计应考虑土壤干燥或冻结等季节变化的影响，接地阻抗、接触电位差和跨步电位差在四季中均应符合本规范的要求。雷电保护装置的接地阻抗可只考虑在雷季中土壤干燥状态的影响。

3.1.5 接地体应充分利用直接埋入水下和土壤中的各种自然接地体，并校验其热稳定。水力发电厂接地网的接地体材质选择应考虑水力发电厂的接地网所处地区的土壤腐蚀特性，可采用钢、铜覆钢或铜导体。在土壤腐蚀等级为“中”及以上地区接地网的接地体应选择铜材质导体。

3.1.6 接地网设计应符合以下规定：

1 水下接地网宜采用截面不小于 $50\text{mm}\times 6\text{mm}$ 的扁钢或直径不小于20mm的圆钢焊接成外缘闭合的接地网，也可采用铜导体和铜覆钢。

2 各个自然接地网和人工接地网，应至少用两根接地干线连接。

3 位于低土壤电阻率区域的接地网与水轮发电机组、主变压器、开关站设备等电厂主设备所在区域接地网不在同一区域时的连接干线宜采用铜导体。其余部分的接地干线宜采用不小于 $50\text{mm}\times 6\text{mm}$ 的扁钢、直径不小于20mm的圆钢，也可采用截面不小于 120mm^2 的铜导体或直径不小于14mm的铜覆钢圆线。

3.1.7 钢质人工接地导体均应经热浸镀锌处理。

3.1.8 接地设计程序宜按本规范附录A进行。

3.2 系统接地

3.2.1 有效接地系统中，需要接地的变压器中性点、变压器中性点小电抗接地端、并联电抗器中性点、并联电抗器中性点小电抗接地端、接地变压器中性点等应按照系统要求进行接地。

3.2.2 非直接接地系统中,消弧线圈接地端、中性点电阻接地端和绝缘监视电压互感器一次侧中性点等应直接接地。

3.2.3 低压系统的系统接地要求应符合现行国家标准《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065的有关规定。

3.3 保护接地

3.3.1 水力发电厂下列所有电气装置及设施金属部件,除另有规定者外,均应接地或接保护线:

1 发电机、变压器/电抗器、静止变频启动装置、配电装置等电气设备的金属外壳。

2 电力电缆接线盒、终端盒的外壳、电缆的屏蔽铠装外皮、穿线的钢管等;非铠装或非金属护套电缆的1~2根屏蔽芯线;电缆沟和电缆隧道内,以及地上各种电缆金属支架等。

3 励磁系统、调速系统及电动机等设备的外壳及金属支架。

4 装有避雷线的电力线路杆塔。

5 在非沥青地面的人员居住区域内,无避雷线非直接接地系统架空电力线路的金属杆塔和钢筋混凝土的杆塔。

6 控制和保护用的控制柜、端子箱、保护屏、仪表屏、仪表柜、仪表箱及操作台等的金属框架。

7 计算机监控、直流、通信、火灾报警、工业电视、监测等系统设备的金属外壳。

8 携带式及移动式用电器具金属底座和外壳。

9 船闸、升船机等过坝设施的金属部件。

10 屋内外配电装置的金属架构和钢筋混凝土架构,以及接地网以内的金属操作平台、巡视平台、围栏和金属门、窗。

11 通风空调系统的设备外壳。

12 桥机、门机、启闭机、电梯、电动葫芦等设备的轨道或金属外壳。

13 明装的油、气、水系统设备的金属部分。

3.3.2 电力设备的下列金属部分,除另有规定者外,可不接地或不接保护线:

1 在木质、沥青等不良导电地面上的干燥房间内,交流额定电压380V及以下、

直流额定电压220V及以下的电力设备外壳，但当维护人员可能同时触及设备外壳和接地物体时除外。

2 在干燥场所，交流额定电压127V及以下、直流额定电压110V及以下的电力设备外壳，但爆炸危险场所除外。

3 安装在配电屏、控制屏和配电装置上的电气测量仪表、继电保护装置和其他低压电器等的外壳，以及当发生绝缘损坏时，在支持物上不会引起危险电压的绝缘子金属底座等。

4 安装在已接地的金属架构上且与构架电气接触良好的设备。

5 已与接地的底座之间有可靠电气接触电动机和电器的外壳。

3.3.3 低压电力系统设备保护接地应满足以下要求：

1 低压电力系统应采用中性点有效接地方式。

2 接地网内电力设备的外壳和机座宜采用直接接地或接保护线接地。

3 对于用电设备较少、分散，且又无接地网的地方，宜采用PE线接地。当接PE线保护确有困难，土壤电阻率较低时，可采用直接埋设接地体进行接地保护。但由同一台发电机、变压器或同一段母线供电的低压线路，不宜同时采用接PE线保护、直接接地保护两种保护方式。

4 在低压电力系统中，采用接地保护时，应装设能自动切除接地故障的保护装置。

3.4 防雷接地

3.4.1 避雷针、避雷线引下线均应设置集中接地装置。

3.4.2 避雷器的接地导体应以最短的距离与电厂接地网连接，且应在连接处或其他可设置集中接地的位置设置集中接地装置。

3.4.3 独立避雷针或避雷线应设独立的集中接地装置，接地电阻不宜超过 10Ω 。在高土壤电阻率地区，当要求做到规定的 10Ω 确有困难时，允许采用较高值，并应将该装置与主接地网连接，但从避雷针与主接地网的地下连接点到35kV及以下电气设备与主接地网的地下连接点，沿接地体的长度不得小于15m。避雷针或避雷线到被保护设施的空气中距离和地中距离还应符合防止避雷针或避雷线对被保护设备反击的要求。

3.4.4 独立避雷针或避雷线引下接地点不应设在人经常通行的地方。避雷针或避

雷线及其接地装置与道路或入口等的距离不宜小于3m，否则应采取均压措施，或者铺设砾石或沥青地面。

3.4.5 当水力发电厂为地面厂房且采用金属屋顶时，宜采用金属屋面作为接闪器，并应符合下列规定：

1 板间的连接应电气贯通，可采用铜锌合金焊、熔焊、卷边压接、螺钉或螺栓连接。

2 金属板下面应无易燃物品，铅板的厚度不应小于2mm，不锈钢、热镀锌钢、钛和铜板的厚度不应小于0.5mm，铝板厚度不应小于0.65mm，锌板厚度不应小于0.7mm。

3 金属板应无绝缘被覆层。

3.5 防静电接地

所有易燃油、可燃油、易燃易爆物管道及容器的金属外壳应进行接地。接地导体布置方式应符合下列规定：

1 易燃油、可燃油、易燃易爆物管道、轨道应在其始端、末端、分支处，以及每隔不大于50m处设防静电接地。

2 净距小于100mm的平行或交叉管道，应每隔不大于20m用金属线跨接；

3 不能保持良好电气接触的表计、阀门、法兰、弯头等管道连接处采用跨接线连接。跨接线可采用截面不小于50mm²的钢或不小于4mm²的铜绞线。

4 易燃油、可燃油和易燃易爆物的贮罐顶，应用可挠的跨接线与罐体相连，且不应少于2处。跨接线可用截面不小于25mm²的钢绞线、扁铜、铜绞线；罐体应设置不少于2处的防静电接地。

5 金属罐罐体钢板的接缝、罐顶与罐体之间，以及所有管、阀与罐体之间，应保证可靠的电气连接。

4 接地阻抗

4.1 有效接地系统的接地阻抗

4.1.1 有效接地系统的水力发电厂接地装置接地阻抗幅值宜符合下式规定：

$$|Z_G| \leq \frac{E_w}{I_G} \quad (4.1.1)$$

式中： Z_G ——包括人工接地网及与其连接的所有其他自然接地体的接地装置考虑到季节变化的最大接地阻抗（ Ω ）；

E_w ——有效接地系统接地网的接地装置工频地电位升限值（V）；

I_G ——最大运行方式下，经接地网入地的最大接地故障电流有效值（A）。

4.1.2 接地装置电位计算应符合本规范附录B的规定。有效接地系统接地网的接地装置工频地电位升可按本规范附录B公式（B.0.1）计算。接地装置工频地电位升限值 E_w 可按第B.0.2条的规定取值。

4.1.3 本规范公式（4.1.1）中计算用流经接地装置的最大入地流 I_G ，应采用在接地装置内、外短路时，经接地装置流入地中并计及直流分量的最大接地故障电流有效值。该电流应按电厂全部投产后本电厂设计水平年的系统最大运行方式确定，并应考虑电网中各接地中性点间的短路电流分配，以及接地避雷线和电缆护层中分走的接地短路电流。

4.1.4 有效接地系统的水力发电厂接地装置应符合以下规定：

1 设计接地网时，应验算接触电位差和跨步电位差。施工完毕，应进行现场实测并绘制电位分布曲线。

2 应采用等电位网防止接地装置的工频暂态电压升高对控制、保护和通信设备和控制电缆的反击或误动。

3 接地网内有控制保护设备电气连接的部分网内电位差不应超过2000V。接于不同等电位网的控制保护设备若有电气连接，不同等电位网之间电位差不应超过2000V，否则控制保护信号线应采用光电隔离。

4 当电厂采用10kV厂用电系统时，水力发电厂接地装置电位升限值超过8kV的情况下，或当电厂采用6kV厂用电系统时，水力发电厂接地装置电位升限值超过5kV的情况下，应评估计入短路电流非周期分量的接地装置工频地电位升

高条件下，厂内与厂外连接的中压系统金属氧化物避雷器的安全性。

5 可能将接地网的高电位引向接地网外或将接地网外低电位引向接地网内的设备，应采取防止转移电位引起危害的措施。

4.2 非直接接地系统的接地阻抗

4.2.1 非直接接地系统的水力发电厂接地装置的接地阻抗应符合以下规定：

1 高压与低压电力设备共用的接地装置接地阻抗应按下式计算，接地阻抗Z幅值不宜超过 4Ω ：

$$|Z| \leq \frac{120}{I_g} \quad (4.2.1-1)$$

式中： I_g ——计算用的接地网入地对称电流（A）。

2 仅用于高压电力设备的接地装置阻抗应按下式计算，接地阻抗Z幅值不宜超过 10Ω ：

$$|Z| \leq \frac{250}{I_g} \quad (4.2.1-2)$$

4.2.2 在高土壤电阻率地区，接地阻抗幅值的限制可放宽，但不宜超过 15Ω 。对于地网外的高压电力设备接地阻抗不宜超过 30Ω ，并应校验接触电位差和跨步电位差，满足安全要求。

4.2.3 在中性点经消弧线圈接地的电力网中，接地装置的接地阻抗按本规范公式（4.2.1-1）、（4.2.1-2）计算时，计算用的接地故障电流应符合下列规定：

1 对装有消弧线圈的发电厂或电力设备的接地装置，计算电流等于接在同一接地装置中同一电力网各消弧线圈额定电流总和的1.25倍。

2 对不装消弧线圈的发电厂或电力设备的接地装置，计算电流等于电力网中断开最大一台消弧线圈时的最大残余电流值，但不得小于30A。

4.2.4 计算用的接地故障电流，应按设计水平年的系统最大运行方式确定。

4.2.5 在非直接接地系统中，应根据发电厂接地装置的接地阻抗，验算继电保护装置的两相异点接地短路动作电流或熔断器熔体的熔断电流。接地短路电流不应小于继电保护装置换算到一次侧动作电流的1.5倍或熔断器熔体额定电流的4倍。当不符合要求时可降低接地阻抗或采取其他措施。

4.3 低压系统的接地阻抗

4.3.1 低压电力设备接地装置的接地阻抗不宜超过 4Ω 。

4.3.2 在中性点直接接地的单电源低压电力网中, 中性线宜在电源处接地; 在中性点直接接地的多电源低压电力网中, 中性线或PEN线宜在进线柜内一点接地。

4.3.3 电缆和架空线在引入建筑物处, PE或PEN线应重复接地或在屋内将中性线与配电屏、控制屏的接地装置相连。中性线的重复接地应充分利用自然接地体。

4.3.4 在低压电力网中严禁利用大地作相线或中性线。

4.4 杆塔的接地阻抗

4.4.1 厂内架空线路段每基杆塔的接地装置在雷季干燥时不连避雷线的工频接地阻抗不宜超过表4.4.1所列的数值。

表 4.4.1 架空线路段杆塔的工频接地阻抗

土壤电阻率 ($\Omega \cdot m$)	≤ 100	100~500 (含)	500~1000 (含)	1000~2000 (含)	> 2000
工频接地阻抗 (Ω)	10	15	20	25	30*

注: *表示如土壤电阻率超过 $2000\Omega \cdot m$, 接地阻抗很难降到 30Ω 时, 可采用6根~8根总长不超过500m的放射形接地体或连续伸长接地体, 其接地阻抗不受限制。

4.4.2 高压架空电力线路的接地装置宜采用放射形接地, 放射形接地体每根的最大长度应按表4.4.2确定。

表 4.4.2 放射形接地体每根的最大长度

土壤电阻率 ($\Omega \cdot m$)	≤ 500	500~1000 (含)	1000~2000 (含)	2000~5000 (含)
最大长度 (m)	40	60	80	100

4.4.3 杆塔的接地应符合以下规定:

1 非直接接地系统中, 无避雷线的高压电力线路在人员居住区的钢筋混凝土杆宜接地, 金属杆塔应接地, 其接地阻抗不宜超过 30Ω 。

2 中性点直接接地低压电力系统中以及高低压共杆的电力系统中, 钢筋混凝土杆的铁横担和金属杆, 以及中性线应接地, 其接地阻抗不宜超过 50Ω 。钢筋混凝土杆中的钢筋不宜作接地引线使用。

3 除多雷区外, 沥青路面上的高、低压线路的钢筋混凝土杆和金属杆塔以及已有运行经验的地区, 可不另设人工接地装置, 钢筋混凝土杆的铁横担和金属杆塔, 也可不与中性线连接。

4.4.4 接户线的绝缘子铁脚宜接地。阻抗不宜超过 30Ω 。土壤电阻率在 $200\Omega \cdot m$ 及以下地区的铁横担钢筋混凝土杆线路, 可不另设人工接地装置。屋内有电力设

备接地装置的建筑物，在入户处宜将绝缘子铁脚与该接地装置相连，而不另设接地装置。年平均雷暴日数不超过30d的地区，低压线被建筑物等屏蔽的地区，以及接户线距低压线路接地点不超过50m的地方，绝缘子的铁脚可不接地。

行业标准信息服务平台

5 降低接地阻抗的措施

5.1 水下接地网

5.1.1 水力发电厂应在水下敷设人工接地体来降低接地阻抗,水下接地网可敷设在水库、上游围堰、施工导流隧洞、尾水渠、下游河道或附近的低电阻率的水中,应注意布置在水库蓄水及引水系统最低水位以下区域。

5.1.2 水下接地网不宜设在水流湍急处及含有腐蚀性物质的水域。在水下敷设接地网时,若水下结构为混凝土结构,接地网应布置在混凝土内,距表面不应少于50mm;若水下结构为自然地表或喷锚结构,宜采用打插筋锚固焊接固定,静水区域的接地网也可采用加挂混凝土块固定方式。

5.1.3 抽水蓄能电厂若为沥青混凝土防渗库盆宜在沥青混凝土防渗结构底部设置接地网,在地下经压力管道与电厂地网连接。

5.1.4 水下接地网与其他接地网之间应采用多根接地线连接。

5.2 引外接地网

5.2.1 当水力发电厂附近有可利用的低土壤电阻率区域时,可采取引外接地措施降低接地阻抗。

5.2.2 与引外接地网连接的接地导体,可采用增大截面积、增加导体根数、采用铜质导体等措施,减小与引外接地网之间连接线的阻抗。

5.3 深井接地

5.3.1 采用深井接地措施应与其他降阻方式进行技术经济比较后确定。

5.3.2 当水力发电厂及其附近地区地下深处土壤电阻率较低或有地下水,而地表层土壤电阻率很高时,可采用深井接地。

5.3.3 深井接地体宜延伸至地下水位以下和地层中电阻率较低处,深井间距不宜小于深井深度的2倍。

5.3.4 深井接地体宜设置在接地网引外区域或接地网的边缘地带,并便于施工。

5.3.5 深井接地体可利用接地网敷设区域桩基废孔或地勘探洞布置。

5.3.6 接地深井宜采用深孔爆破方式增加井底裂隙,深井接地体宜采用钢管。

5.4 其他

5.4.1 在不能采用深井接地和引外接地的地方,可根据现场情况和技术经济比较,因地制宜地采用人工降阻措施来降低接地阻抗。人工降阻措施包括使用降阻剂、

缓释型离子接地装置和置换低电阻率材料等。

5.4.2 对集中接地体宜采用置换材料的方法降低接地阻抗。所用置换材料应具有低电阻率、不易流失、性能稳定、易于吸收、保持水分和弱腐蚀特点，且应施工简单，经济合理。置换材料可采用低电阻率的黏土或物理降阻剂，置换材料填入人工接地坑或接地沟时，应分层压实。

5.4.3 人工降阻材料和降阻剂不宜大面积使用。采用人工降阻的垂直接地体布置为辐射形。

6 接地电阻计算

6.1 工频接地电阻计算

6.1.1 均匀土壤电阻率的人工接地体的接地电阻可按下列方法计算：

1 当 l 远大于 d 时，垂直接地体（图6.1.1）的接地电阻可按下式计算：

$$R = \frac{\rho}{2\pi d} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (6.1.1-1)$$

1) 垂直接地体为不等边角钢时其等效直径可按下式计算：

$$d = 0.71 \sqrt{b_1 b_2 (b_1^2 + b_2^2)} \quad (6.1.1-2)$$

2) 垂直接地体为扁钢时其等效直径可按下式计算：

$$d = \frac{b_3}{2} \quad (6.1.1-3)$$

3) 垂直接地体为等边角钢时其等效直径可按下式计算：

$$d = 0.84 b_4 \quad (6.1.1-4)$$

式中： R ——垂直接地体的接地电阻（ Ω ）；

ρ ——土壤电阻率（ $\Omega \cdot m$ ）；

l ——垂直接地体的长度（m）；

d ——垂直接地体的直径或等效直径（m）；

b_1 、 b_2 ——角钢边长（m）。

b_3 ——扁钢宽度（m）；

b_4 ——等边角钢宽度（m）。

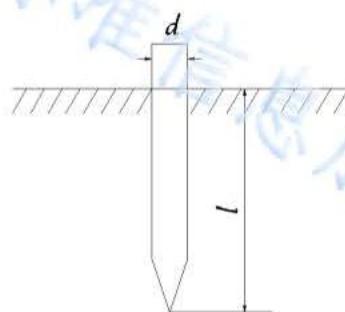


图 6.1.1 垂直接地体

2 不同形状水平接地体的接地电阻可按下式计算：

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L^2}{hd} + A \right) \quad (6.1.1-5)$$

式中: R —水平接地体的接地电阻 (Ω) ;

L —水平接地体的总长度 (m) ;

h —水平接地体的埋设深度 (m) ;

d' —水平接地体的直径或等效直径 (m) ;

A —水平接地体的形状系数, 可采用表6.1.1-1 所列数值。

表6.1.1-1 水平接地体的形状系数

形状	*	*	*	*	□	+	○	人	L	-
A	5.65	4.71	3.03	2.19	1.00	0.89	0.48	0	-0.18	-0.60

3 均匀土壤中水平接地极为主的边缘闭合复合接地网的接地电阻, 可按下
列公式计算:

$$R = \alpha_1 R_e \quad (6.1.1-6)$$

$$\alpha_1 = \left(3 \ln \frac{L_0}{\sqrt{S}} - 0.2 \right) \frac{\sqrt{S}}{L_0} \quad (6.1.1-7)$$

$$R_e = 0.213 \frac{\rho}{\sqrt{S}} (1+B) + \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{S}{9hd} - 5B \right) \quad (6.1.1-8)$$

$$B = \frac{1}{1 + 4.6 \frac{h}{\sqrt{S}}} \quad (6.1.1-9)$$

式中: R —任意形状边缘闭合接地网的接地电阻 (Ω) ;

α_1 —任意形状边缘闭合接地网接地电阻计算系数;

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

L_0 —接地网的外缘边线总长度 (m) ;

S —接地网总面积 (m^2) ;

B —等值方形接地网的影响系数。

4 人工接地体工频接地电阻还可按表6.1.1-2 所列公式估算。

表6.1.1-2 人工接地体工频接地电阻

接地体型式	估算式	备注
垂直式	$R \approx 0.3\rho$	长度3m左右的接地体
单根水平式	$R \approx 0.03\rho$	长度60m左右的接地体
复合式接地网	$R \approx 0.5 \times \frac{\rho}{\sqrt{S}} = 0.28 \times \frac{\rho}{r}$ 或 $R \approx \frac{\sqrt{\pi}}{4} \times \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L} = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$	S 为大于100m ² 闭合接地网的面积 (m ²) ; r 为与接地网面积 S 等值的圆的半径, 即等值圆半径 (m) ; L 为接地体的总长度 (m)

6.1.2 非均匀土壤中接地网接地电阻可按本规范附录C的方法计算。

6.1.3 人工改善土壤电阻率后的接地电阻可按下列方法计算:

1 人工接地坑 (图6.1.3-1) 的接地电阻可按下式计算:

$$R = \frac{\rho_y}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d_1} + \frac{\rho_z}{2\pi l} \ln \frac{d_1}{d} \quad (6.1.3-1)$$

式中: ρ_y —原地层的电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$) ;

ρ_z —置换材料的电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$) ;

d_1 —计算直径即人工接地坑底部直径 (m)。

2 人工接地沟 (图6.1.3-2) 的接地电阻可按下式计算:

$$R = \frac{\rho_y}{2\pi L} \ln \frac{2L}{d_2} + \frac{\rho_z}{2\pi L} \ln \frac{L}{d'} \quad (6.1.3-2)$$

式中: d_2 —计算直径即人工接地沟梯形断面的内切圆直径 (m)。

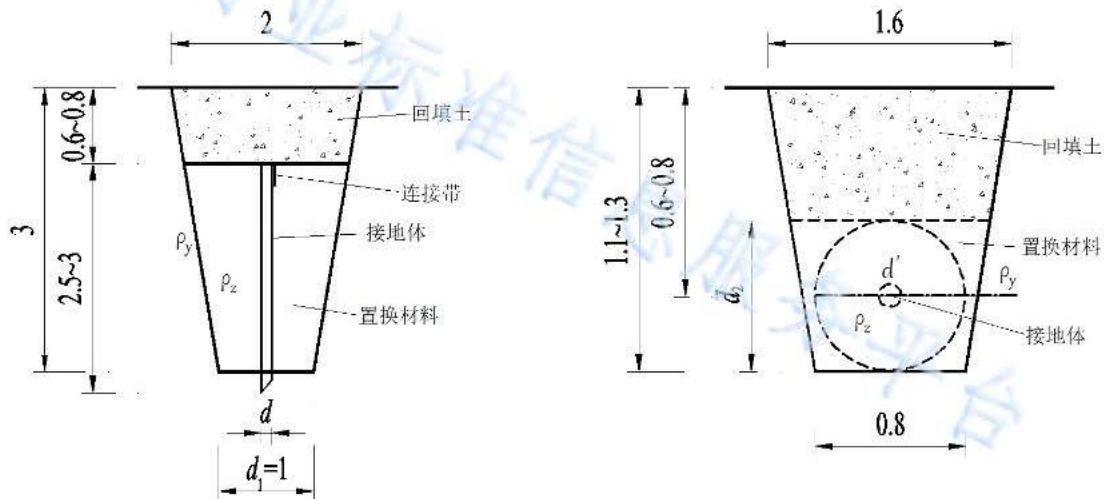


图6.1.3-1 人工接地坑 (单位: m)

图6.1.3-2 人工接地沟 (单位: m)

6.1.4 当各接地网的土壤电阻率差别较大时, 接地网接地电阻应按本规范附录C

的方法计算，当各接地网的土壤电阻率差别不大时，其接地电阻应按下列方法计算：

1 接地电极间距较大的多重互连接地系统。各接地电极间的相互影响甚微，接地系统的接地电阻计算可不计及电极间的互相影响，将各接地电极电阻按并联计算。

2 对于地网相距很近，且联系十分紧密的接地系统，可将互联地网作为一个整体地网，按下式计算：

$$R = \frac{0.5\rho}{\sqrt{S}} \quad (6.1.4)$$

6.1.5 大(1)型及以上水力发电厂接地网阻抗宜采用程序仿真计算方法计算，并考虑上下游不同的水位对接地阻抗的影响。

6.2 冲击接地电阻计算

6.2.1 计算防雷接地装置所采用的土壤电阻率，应取雷季中最大可能的数值，宜按下式计算：

$$\rho = \rho_0 \psi \quad (6.2.1)$$

式中： ρ_0 ——雷季中无雨水时所测得的土壤电阻率（ $\Omega \cdot m$ ）；

ψ ——考虑土壤干燥所取的季节系数。防雷接地装置的季节系数 ψ 应按表6.2.1的规定确定。

表 6.2.1 防雷接地装置的季节系数 ψ

接地体埋深 m	水平接地体	2m~3m 的垂直接地体
0.5	1.4~1.8	1.2~1.4
0.8~1.0	1.25~1.45	1.15~1.3
2.5~3.0	1.0~1.1	1.0~1.1

注：测定土壤电阻率时，如土壤比较干燥，则应采用表中的较小值；如比较潮湿，则应采用较大值。

6.2.2 单独接地体的冲击接地电阻可按下式计算：

$$R_{ch} = \alpha R \quad (6.2.2)$$

式中： R_{ch} ——单独接地体的冲击接地电阻（ Ω ）；

R ——单独接地体的工频接地电阻（ Ω ）；

α ——单独接地体的冲击系数，可按本规范附录D计算。

6.2.3 当接地装置由很多水平接地体或垂直接地体组成，为减少相邻接地体的屏

蔽作用, 垂直接地体的间距不应小于其长度的2倍; 水平接地体的间距可根据具体情况确定, 但不宜小于5m。由 n 根等长水平放射形接地体组成的接地装置, 其冲击接地电阻可按下式计算:

$$R_{ch} = \frac{R'_{ch}}{n} \times \frac{1}{\eta_{ch}} \quad (6.2.3)$$

式中: R'_{ch} ——每根水平放射形接地体的冲击接地电阻 (Ω) ;
 η_{ch} ——考虑各接地体间相互影响的冲击利用系数。接地体的冲击利用系数 η_{ch} 按表6.2.3的规定确定。

表 6.2.3 接地体的冲击利用系数 η_{ch}

接地体型式	接地导体的根数	冲击利用系数	备注
n 根水平射线, 每根长10m~80m	2	0.83~1.00	较短的射线取较小值。
	3	0.75~0.90	
	4~6	0.65~0.80	
以水平接地体连接的垂直接地体	2	0.80~0.85	$2 \leq D/l \leq 3$
	3	0.70~0.80	D/l 为 2 时取小值
	4	0.70~0.75	D/l 为 3 时取大值
	6	0.65~0.70	D 为垂直接地体间距, l 为垂直接地体长度。

6.2.4 由水平接地体连接的 n 根垂直接地体的冲击接地电阻可按下式计算:

$$R_{ch} = \frac{\frac{R'_{ch}}{n} R_{pch}}{\left(\frac{R'_{ch}}{n} + R_{pch}\right) \eta_{ch}} \quad (6.2.4)$$

式中: R'_{ch} ——每根垂直接地体的冲击接地电阻 (Ω) ;

R_{pch} ——水平接地体的冲击接地电阻 (Ω) 。

6.2.5 大型水平接地网的冲击接地电阻可按下列规定计算:

1 对长条形网孔的接地网, 冲击接地电阻可按下式计算:

$$R_{ch} = 0.65\sqrt{\rho} \quad (6.2.5-1)$$

2 对方形网孔的接地网, 冲击接地电阻可按下式计算:

$$R_{ch} = 0.2\sqrt{\rho} \quad (6.2.5-2)$$

7 均压网设计及计算

7.1 均压网设计

- 7.1.1** 均压网的设计应以接触电位差和跨步电位差允许值作为设计的安全标准。
- 7.1.2** 均压网宜采用等间距布置，也可采用等网孔电位的不等间距布置。均压网采用长形网孔时，均压带宜沿接地网长度方向敷设。均压网的外缘应闭合，户外地面均压网外缘各角应做成圆弧形，圆弧的半径不宜小于均压带间距的一半。
- 7.1.3** 均压网埋设深度宜为0.6m~0.8m。
- 7.1.4** 对局部特别危险的区域，接触电位差或跨步电位差超过规定值时，可采用局部增设水平均压带或铺设砾石、沥青等高电阻率的地面层。高电阻率路面结构层的厚度应符合表7.1.4-1的规定，高电阻率路面结构层的电阻率应符合表7.1.4-2的规定。此外还可采用局部地方放置绝缘垫等做法。

表7.1.4-1 高电阻率路面结构层的厚度 (cm)

结构材料名称	结构层最小厚度	推荐结构层厚度
黑色沥青碎石和沥青灌入碎石	4	8
沥青表面处理	2	2~5
碎石、砾石及其他粒料	8	15~20

表7.1.4-2 高电阻率路面结构层的电阻率 ($\Omega\cdot m$)

路面材料名称	潮湿状态电阻率
砾石	11670
碎石	5830
卵石	5000
沥青路面	46600
块石混凝土地面	1000

- 7.1.5** 110kV及以上高压配电装置附近户外路面宜采用高电阻率的材料。
- 7.1.6** 均压网边缘经常有人出入的通道处，应根据情况铺设砾石、沥青路面或在出入口的均压网外地下装设两条不同埋深和长度，并与均压网相连的“帽檐式”均压带，“帽檐式”均压带（图7.1.6）的制作应符合下列规定：

- 1 “帽檐式”均压带与均压网边缘连接的长度l应与出入口或出入门的宽度相同。
- 2 “帽檐式”均压带导体埋深及导体间距宜符合下列规定：

1) 沿水平接地网引出的第1根“帽檐式”均压带长度为 $l/2$ ，埋深比水平接
地网深0.4m。

2) 沿水平接地网引出的第2根“帽檐式”均压带长度为 $(l-1)$ m，埋深比
水平接地网深1m。

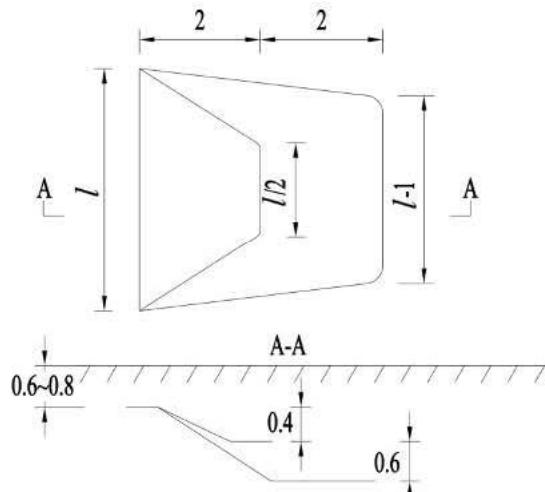


图 7.1.6 “帽檐式”均压带
 l —“帽檐式”均压带与均压网边缘连接的长度

7.1.7 当采用等间距布置的方格网孔均压网时，边角网孔宜增设辅助均压带。

7.1.8 当配电装置及出线设备布置在整体浇筑的钢筋混凝土楼板上时，可利用楼
板钢筋作为均压网。凡作为均压网的钢筋的连接应采用焊接，并且在正常运行和
短路故障下，均不应引起混凝土破坏。钢筋均压网应与接地网连接，连接点不应
少于4点，间距不应大于20m。

7.1.9 当均压网四周设置围墙或护栏时，宜采用实体围墙结构或绝缘护栏，并设
置在均压网外距网边缘0.5m及以上。

7.2 接触电位差和跨步电位差允许值

7.2.1 在有效接地系统中，当电网发生单相接地或同点两相接地故障时，产生的
接触电位差和跨步电位差不应超过按下列公式计算的数值：

$$E_t = \frac{174 + 0.17\rho_s C_s}{\sqrt{t_s}} \quad (7.2.1-1)$$

$$E_s = \frac{174 + 0.7\rho_s C_s}{\sqrt{t_s}} \quad (7.2.1-2)$$

式中： E_t ——接触电位差允许值 (V)；

E_s ——跨步电位差允许值 (V)；

ρ_s ——地表层的电阻率 ($\Omega \cdot m$)，典型土壤电阻率可按本规范附录E的规定取值；

C_s ——表层衰减系数，按本规范附录F的规定确定；当无表层土壤时， C_s 取为1；

t_s ——接地故障电流持续时间 (s)，与接地装置热稳定校验的接地故障等效持续时间 t_d 取相同值。

7.2.2 在非直接接地系统中，当发生单相接地故障时，发电厂电力设备接地装置的接触电位差和跨步电位差允许值不应超过按照下列公式计算的数值：

$$E_t = 50 + 0.05\rho_s C_s \quad (7.2.2-1)$$

$$E_s = 50 + 0.2\rho_s C_s \quad (7.2.2-2)$$

7.3 接触电位差和跨步电位差计算

7.3.1 均压网接触电位差和跨步电位差的计算可采用数值计算或解析计算。均匀土壤中不规则、复杂结构的等间距布置和不等间距布置的接地网，以及分层土壤中的接地网其接触电位差和跨步电位差的计算，宜采用专门的仿真软件进行计算。

7.3.2 均压网的布置有均压带等间距布置和不等间距布置两种，不等间距布置目的是使各网孔接触电位差相等。其均压带布置为地网边孔至中间孔逐渐增大，可按表7.3.2 进行排列。

表7.3.2 均压网不等间距布置网孔边长为地网边长百分数

网孔序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
网孔数	网孔边长百分数 (%)									
3	27.50	45.00								
4	17.50	32.50								
5	12.50	23.33	28.33							
6	8.75	17.50	23.75							
7	7.14	13.57	18.57	21.43						
8	5.50	10.83	15.67	18.00						
9	4.50	8.94	12.83	15.33	16.78					
10	3.75	7.50	11.08	13.08	14.58					
11	3.18	6.36	9.54	11.36	12.73	13.46				
12	2.75	5.42	8.17	10.00	11.33	12.33				
13	2.38	4.69	6.77	8.92	10.23	11.15	11.69			
14	2.00	3.86	6.00	7.86	9.28	10.24	10.76			
15	1.56	3.62	5.35	6.82	8.07	9.12	10.01	10.77		

续表 7.3.2

网孔序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
网孔数	网孔边长百分数 (%)									
16	1.46	3.27	4.82	6.14	7.28	8.24	9.07	9.77		
17	1.38	2.97	4.35	5.54	6.57	7.47	8.24	8.90	9.47	
18	1.14	2.58	3.86	4.95	5.91	6.76	7.50	8.15	8.71	
19	1.05	2.32	3.47	4.53	5.47	6.26	6.95	7.53	8.11	8.63

20	0.95	2.15	3.20	4.15	5.00	5.75	6.40	7.00	7.50	7.90
----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

注: 1 由于布置对称, 上表中只列出一半数值。

2 上表适用于均压网长和宽两个方向的网孔设计。

7.3.3 在发生接地短路时接地网地表面的最大接触电位差即网孔中心对接地网接地体的最大接触电位差 E_{tm} 可按下式计算:

$$E_{tm} = K_t E_w \quad (7.3.3)$$

式中: E_{tm} ——最大接触电位差 (V);

K_t ——接触系数;

E_w ——接地装置的电位 (V)。

7.3.4 根据均压带布置的方式, 接触系数可按下列方法确定:

1 当均压带为等间距布置时(图7.3.4), 对接地体的埋设深度 h 为 $0.6m \sim 0.8m$, K_t 可按下式计算:

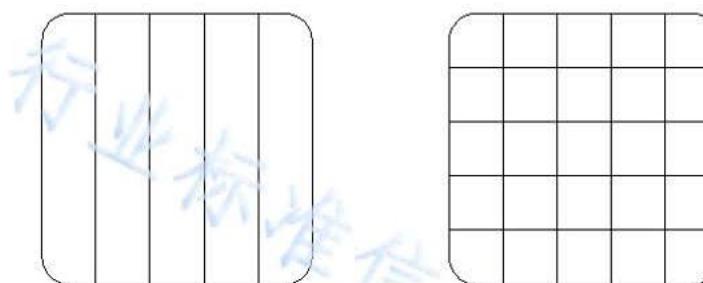
$$K_t = K_{tn} K_{td} K_{ts} K_{tl} \quad (7.3.4-1)$$

式中: K_{tn} ——均压带根数对接触电位的影响系数;

K_{td} ——均压带导体直径对接触电位的影响系数;

K_{ts} ——接地网面积对接触电位的影响系数;

K_{tl} ——接地网形状对接触电位的影响系数。



(a) 长孔接地网 ($n=6$)

(b) 方孔接地网 ($n=6$)

图 7.3.4 均压带为等间距布置

2 当接地网面积 $(30m \times 30m) \leq S \leq (500m \times 500m)$ 时, K_{tn} 、 K_{td} 、 K_{ts} 、 K_{tl} 系数可采用下列公式计算:

$$K_{tn} = 0.076 + 0.776/n \quad (7.3.4-2)$$

$$K_{td} = 0.841 - 0.225 \lg d \quad (7.3.4-3)$$

$$K_{ts} = 0.234 + 0.414 \lg \sqrt{S} \quad (7.3.4-4)$$

$$K_{tL} = \begin{cases} 1.0 & \text{用于方孔排列} \\ 1.1 \sqrt[4]{L_2/L_1} & \text{用于长孔排列} \end{cases} \quad (7.3.4-5)$$

式中: n ——接地网均压带根数;

d ——接地网均压带导体等效直径 (m);

S ——接地网面积 (m^2);

L_1 ——接地网长度 (m);

L_2 ——接地网宽度 (m)。

3 当均压带为不等间距布置时, K_t 可按下式计算:

$$K_t = K_{th} K_{tn} K_{td} K_{ts} K_{tm} K_{tL} \quad (7.3.4-6)$$

式中: K_{th} ——均压带埋深影响系数;

K_{tm} ——接地网网孔数影响系数。

4 K_{th} 、 K_{tn} 、 K_{td} 、 K_{ts} 、 K_{tm} 、 K_{tL} 可按下列公式计算:

$$K_{th} = 0.257 - 0.095 \sqrt[5]{h} \quad (7.3.4-7)$$

$$K_{tn} = 0.021 + 0.217 \sqrt{n_2 / n_1} - 0.132 n_2 / n_1 \quad (n_2 \leq n_1) \quad (7.3.4-8)$$

$$K_{td} = 0.401 + 0.658 / \sqrt[4]{d} \quad (7.3.4-9)$$

$$K_{ts} = 0.054 + 0.410 \sqrt[8]{S} \quad (7.3.4-10)$$

$$K_{tm} = 2.837 + 240.021 / \sqrt[3]{m^2} \quad (7.3.4-11)$$

$$K_{tL} = 0.168 + 0.002 L_2 / L_1 \quad (L_2 \leq L_1) \quad (7.3.4-12)$$

$$m = (n_1 - 1)(n_2 - 1) \quad (7.3.4-13)$$

式中: n_1 ——沿长方向布置的导体根数;

n_2 ——沿宽方向布置的导体根数;

m ——接地网网孔数;

h ——接地网水平均压带埋设深度 (m)。

7.3.5 在发生接地短路时, 接地网外的地表面的最大跨步电位差 E_{sm} 可按下式计算:

$$E_{sm} = K_s E_w \quad (7.3.5)$$

式中: E_{sm} ——最大跨步电位差 (V) ;

K_s ——跨步系数。

7.3.6 根据均压带布置的方式, 跨步系数可按下列方法确定:

1 当均压带为等间距布置时, 最大跨步电位差所用跨步系数 K_s 与均压网面积 S 的关系 (图7.3.6) 可根据曲线确定。

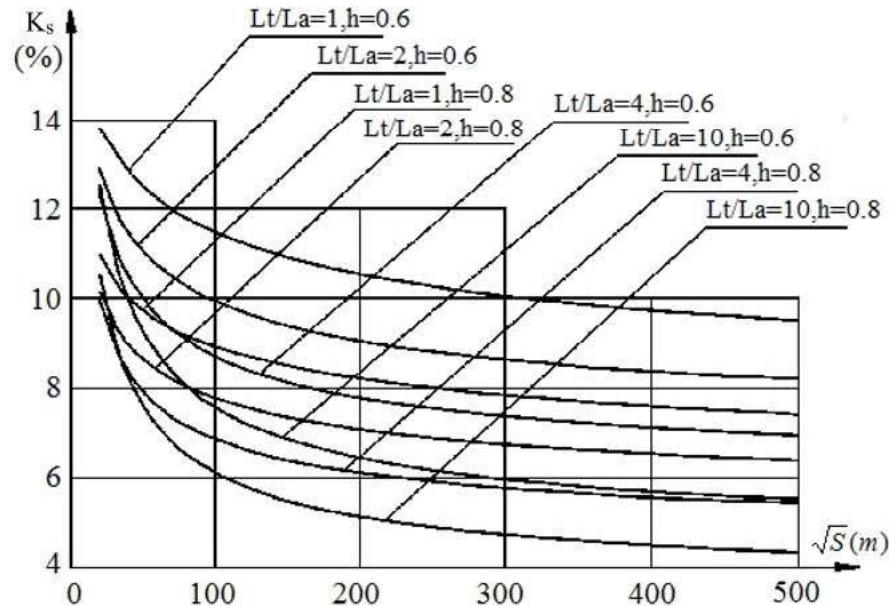


图 7.3.6 最大跨步电位差所用跨步系数 K_s 与均压网面积 S 的关系

L_t ——均压网中接地体总长度; L_a ——均压网的外缘边线总长;

h ——均压网埋深

2 当均压带为不等间距布置时跨步系数可按下式计算:

$$K_s = K_{sh} K_{sn} K_{sd} K_{ss} K_{sm} K_{sL} \quad (7.3.6-1)$$

式中: K_{sh} ——均压带埋深影响系数;

K_{sn} ——均压带根数影响系数;

K_{sd} ——均压带直径影响系数;

K_{ss} ——接地网面积影响系数;

K_{sm} ——接地网网孔数影响系数;

K_{sL} ——接地网形状影响系数。

3 K_{sh} 、 K_{sn} 、 K_{sd} 、 K_{ss} 、 K_{sm} 、 K_{sL} 可按下列公式计算:

$$K_{sh} = 383.964 e^{-2.709 \sqrt[3]{h}} \quad (7.3.6-2)$$

$$K_{sn} = 0.849 - 0.234 \sqrt[12]{(n_2/n_1)} \quad (n_2 \leq n_1) \quad (7.3.6-3)$$

$$K_{\text{sd}} = 0.574 + 0.64\sqrt[3]{d} \quad (7.3.6-4)$$

$$K_{\text{ss}} = 0.07 + 1.08 / \sqrt{S} \quad (7.3.6-5)$$

$$K_{\text{sm}} = 0.056 + 1.072 / m \quad (7.3.6-6)$$

$$K_{\text{sl}} = 0.741 - 0.011(L_2 / L_1) \quad (L_2 \leq L_1) \quad (7.3.6-7)$$

行业标准信息服务平台

8 转移电位隔离

8.0.1 对与水电厂接地网相连的低压中性线、通信线路和金属管道、铁轨等导体，应按工程的实际情况采取相应的转移电位隔离措施。

8.0.2 中、低压供电线路隔离应符合下列规定：

- 1** 向接地网外供电的中压电力线路宜采用架空出线。
- 2** 低压电力线路采用架空出线向接地网外供电时，不应在接地网内的电源变压器中性点接地，应在接地网外的用户中性线处接地。
- 3** 当采用电力电缆向接地网外供电时，不宜采用带金属铠装的电缆。低压线路电缆应采用全塑电缆，全塑电缆在厂区内外与电气设备连接时，应将端部50mm~100mm的全塑电缆暴露在空气中。中压电缆的金属屏蔽层宜采用在接地网外单端接地的方式。

4 对厂内厂用变压器供电的低压便携式设备和用具，在接地网外作业时，应将供电回路的中性线与厂内接地网绝缘，用电设备外壳和中性点应在工作现场接地。在接地网地电位升超过2kV情况下，不宜采用厂内低压供电厂外便携式设备的方式。

8.0.3 水力发电厂当有金属水管引外连接时应符合下列规定：

1 采用架空金属水管时，支架应与水管绝缘，并应在接地网边沿采用绝缘段对金属水管进行隔离，绝缘段长度应采用下式计算：

$$L_{\min} = \frac{\pi D^2}{4 \rho_w} \left(\frac{E_w \sqrt{t_d}}{0.116} - R_H \right) \quad (8.0.3)$$

式中： L_{\min} ——隔离所需的最短绝缘管长度 (m)；

E_w ——水力发电厂地电位升 (V)；

D ——水管内径 (m)；

ρ_w ——水体电阻率 ($\Omega \cdot m$)；

R_H ——人体电阻 (Ω)，通常取为 1500 Ω ；

t_d ——故障持续时间 (s)。

2 采用埋地金属水管时，应在接地网边沿采用绝缘段对金属水管进行隔离，接地网地电位升不超过8000V时，绝缘水管长度不应小于20m，并使人员在绝缘管段远离接地网侧30m范围内无法接触金属水管。

8.0.4 进厂铁路铁轨的隔离可在地网边缘外至少两处设置可拆接头和绝缘鱼尾板，也可采用沥青混凝土固定，两处间距离应大于进厂列车长度。

8.0.5 对外通信、控制、保护通道的进厂线路宜采用无金属光纤。若采用金属通信电缆引外时，应接入隔离变压器限制接地网电位转移，隔离变压器两线圈间的工频耐压应高于接地网地电位升。

行业标准信息服务平台

9 设备接地特殊要求

9.1 GIS 接地和GIL接地

9.1.1 分相式GIS配电装置和GIL应采用全连式外壳并多点接地；分相式GIS配电装置和GIL接地线应布置在三相短接板或短接线处。三相式GIS 配电装置和GIL宜采用多点接地。

9.1.2 GIS及GIL外壳宜经绝缘体与支撑构架相连，也可直接相连。连接方式的选择应符合现行行业标准《气体绝缘金属封闭开关设备配电装置设计规范》NB/T 35108的有关规定。分相式GIS及GIL外壳与支撑构架直接相连时，支撑构架附近应设置三相短接线。

9.1.3 GIS及GIL正常运行情况下，外壳、构架及易接触部位感应电压最大值不应超过24 V的安全电压值。GIS及GIL在发生短路情况下，外壳、构架及易接触部位感应电压最大值不应超过100 V。

9.1.4 GIS和GIL所有母线伸缩节和有绝缘的法兰处应设有金属跨接线，铝合金外壳GIS和GIL的跨接线宜用铝；钢外壳GIS和GIL的跨接线宜用铜。制造厂采用带有金属接地连接的盆式绝缘子与法兰结合面可保证电气导通时，法兰片间可不另做跨接连接。

9.1.5 分相式GIS与其他设备连接的端部外壳间应设有三相短接板或短接线，三相短接板或短接线材质应与外壳材质一致。

9.1.6 GIL外壳两端及与其他设备连接的端部外壳间应设有三相短接板或短接线，三相短接板或短接线材质应与外壳材质一致。若GIL外壳一端与地绝缘，则应在没有接地的一端安装非线性电阻作为保护装置。

9.1.7 GIS设备配套低压动力电缆和控制电缆的所有单屏蔽电缆外皮应采用单点接地，且接地点不宜与GIS外壳接地点相同。

9.1.8 GIS及GIL应设置有专用的明敷接地母线。所有外壳接地引线应直接接在接地母线上，不得将数个接地点串联后引到接地母线上。GIS和GIL专用的接地母线与水力发电厂总接地网的连接线不应少于4根，接地母线及连接线截面应进行热稳定校验。接地母线及外壳接地引线宜采用铜，当接地引线与外壳或接地母线材质不同时，其连接处应采取防止电腐蚀措施。

9.1.9 气体绝缘金属封闭开关设备的接地导体或导线及其连接，应满足下列要求：

1 三相共箱式或分相式设备的金属外壳与其底座上接地母线的连接方式，应按制造厂要求执行。其采用的连接方式，应确保无故障时所有金属外壳运行在地电位水平。当在指定点接地时，应确保母线各段外壳之间电压差在允许范围内。

2 设备底座上的接地母线应按制造厂要求与该区域专用接地网连接。

3 本条第1款和第2款连接线的截面，应满足设备短路接地故障时热稳定的要求。

9.1.10 GIS的接地设计应考虑到隔离开关操作时伴随的外壳暂态电压升高的影响。

9.1.11 地埋的GIL外壳接地设计应和防腐措施协调。

9.2 离相式封闭母线接地

9.2.1 离相式封闭母线的外壳及支持结构的金属部分应可靠接地。

9.2.2 离相式封闭母线的外壳宜采用多点接地方式。

9.2.3 当离相式封闭母线采用单点接地时，接地点宜设在母线连接段的中部，设备支撑钢构应与母线外壳间绝缘。封闭母线短路情况下，外壳上感应电压最大值不应超过24V。单点接地的离相封闭母线支撑架与外壳之间绝缘的耐受电压不应小于2kV。与电气设备连接应设有绝缘法兰，绝缘法兰耐受电压不应小于2kV。

9.2.4 母线外壳多点接地或单点接地，在外壳连续段的端部和接地点处均应设置三相短接板。

9.3 高压电缆线路接地

9.3.1 交流系统中三芯电缆的金属套应在电缆线路两终端和中间接头等部位直接接地。

9.3.2 交流系统中单芯电缆的金属套，应在电缆线路上至少一点直接接地。在电缆线路金属套上任一点非接地处的正常感应电压，应符合下列规定：

1 在正常满负载情况下，未采取防止人员任意接触金属套或屏蔽层的安全措施时，感应电压不得大于50V。

2 在正常满负载情况下，采取有效防止人员任意接触金属套或屏蔽层的安全措施时，感应电压不宜大于300V。

9.3.3 当电缆线路能满足本规范第9.3.2条要求时，应采取在线路一端或中央部位单点直接接地方式，并应满足下列要求：

1 在电缆线路一端单点直接接地方式（图9.3.3-1），另一终端应经护层保

护器接地。

2 在电缆线路中央部位接头单点直接接地方式（图9.3.3-2），两终端应经护层保护器接地。

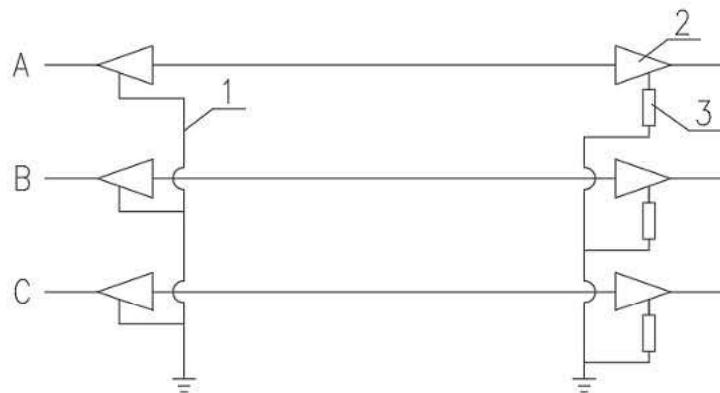


图9.3.3-1 电缆线路一端单点直接接地

1—直接接地；2—电缆终端；3—金属套保护器

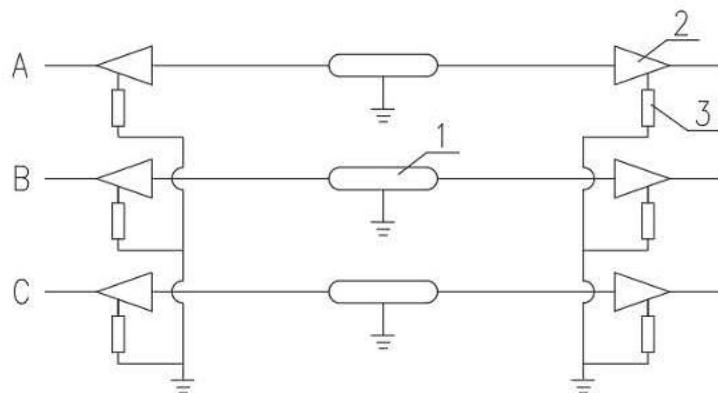


图9.3.3-2 电缆线路中央部位接头单点直接接地

1—接头；2—电缆终端；3—金属套保护器

9.3.4 电缆线路一点接地无法满足本规范第9.3.2条要求时水下电缆、35kV及以下电缆可采取在电缆线路两端直接接地（图9.3.4）。

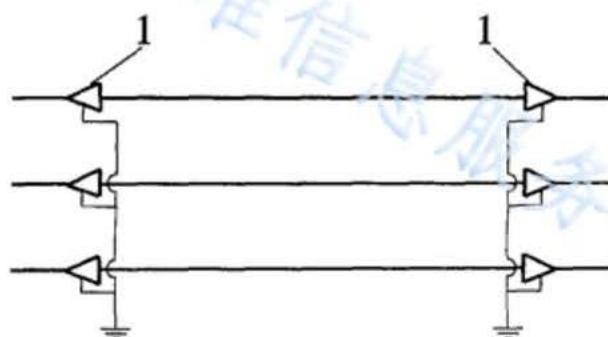


图9.3.4 电缆两端直接接地

1-电缆终端

9.3.5 电缆线路采用一点直接接地方式不能满足本规范第9.3.2条要求时，应采用

交叉互联接地方式（图9.3.5）。电缆线路全长宜等分成3的倍数段；相邻两段的金属套应进行交叉互联，在电缆两端金属套三相互联接地，电缆金属套分隔应采用绝缘接头。分段长度应使金属套上任一点的感应电势不超过本规范第9.3.2条的要求。

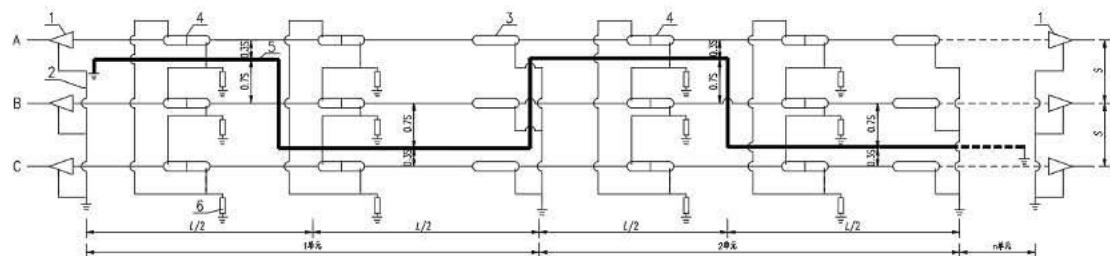


图 9.3.5 交叉互联接地

1—电缆终端；2—直接接地；3—直接接头；4—绝缘接头；5—回流线；6—金属套保护器

注：图中护层保护器示例接 Y_0 接线。

9.4 主变压器接地

9.4.1 主变压器中性点应有两根引下线与接地网主网格不同边相连，并且每根接地引下线均应符合热稳定校核的要求。连接引线应便于定期进行检查测试。

9.4.2 主变压器铁心和夹件应分别引出一根引下线，接地引线能够引至便于测量的适当位置后与主接地网相连。

9.4.3 主变压器中性点、铁心和夹件的接地引下线应与主变压器油箱绝缘。

9.4.4 主变压器油箱接地端子应与水力发电厂接地网连接。

9.5 控制、保护、通信及监测系统接地

9.5.1 水力发电厂接地网内的控制、保护和通信等系统接地应与水力发电厂使用同一个接地网。

9.5.2 水力发电厂应采取有效措施防止空间磁场对控制保护电缆的干扰，宜根据电气设备安装的实际情况，敷设与电厂主接地网可靠连接的等电位接地网。等电位接地网应符合下列规定：

1 应在发电机层、中控室、保护室等主副厂房电气二次屏柜集中布置区域，使用截面不小于 100 mm^2 的铜排或铜缆敷设与主接地网可靠连接的等电位接地网。

2 在中控室、保护室屏柜下层的静电地板电缆室或电缆沟内，按屏柜布置的方向敷设 100 mm^2 的专用铜排或铜缆，将该专用铜排或铜缆首末端连接，形成保护室内的等电位接地网。保护室内的等电位接地网与电厂主接地网只能存在唯

一连接点，连接点位置宜选择在电缆竖井处。连接线应用4根及以上、截面不小于50 mm² 的铜缆或铜排构成共点接地。

3 分散布置的保护就地站、通信室与集控室之间，应使用截面不少于100 mm²的铜缆或铜排可靠连接，连接点应设在室内等电位接地网与电厂主接地网连接处。

4 静态保护和控制装置的屏柜下部应设有截面不小于100 mm² 的接地铜排。屏柜上装置内所有装置、电缆屏蔽层、屏柜门体的接地端应用截面不小于4 mm²的多股铜线和接地铜排相连。接地铜排应选用截面不小于50 mm² 的铜缆与保护室内的等电位接地网相连。

5 沿控制保护电缆的沟道敷设截面不少于100 mm² 的铜排或铜缆，专用铜排（缆）的一端在开关站的每个就地端子箱处与主地网相连，另一端在保护室的电缆沟道入口处与主地网相连。

6 开关站的就地端子箱内应设置截面不少于100 mm² 的裸铜排，并使用截面不少于100 mm² 的铜缆与电缆沟道内的等电位接地网连接。

7 保护装置之间、保护装置至开关站就地端子箱之间联系电缆以及高频收发信机的电缆屏蔽层应双端接地，使用截面不小于4 mm² 多股铜质软导线可靠连接到等电位接地网的铜排上。

8 由开关站的变压器、断路器、隔离刀闸、电流互感器和电压互感器等设备至开关站就地端子箱之间的控制保护电缆应经金属管从一次设备的接线盒或接线箱引至电缆沟，并将金属管的上端与上述设备的底座和金属外壳良好焊接，下端就近与主接地网良好焊接。上述控制保护电缆的屏蔽层在就地端子箱处单端使用截面不小于4 mm² 多股铜质软导线可靠连接至等电位接地网的铜排上，在一次设备的接线盒或接线箱处不接地。

9 在干扰水平较高的场所，或是为取得必要的抗干扰效果，宜在敷设等电位接地网的基础上使用金属电缆托盘或托架，将各段电缆托盘或托架与等电位接地网紧密连接，并将不同用途的电缆分类、分层敷设在金属电缆托盘或托架中。

9.5.3 继电保护二次回路接地，应符合下列规定：

1 保护柜屏和继电保护装置本体应设有专用的接地端子，微机型保护装置和收发信机机箱应构成良好的电磁屏蔽体，并使用截面不小于4 mm²多股铜质软导线可靠连接至等电位接地网的铜排上。

2 公用电压互感器的二次回路只允许在控制室内有一点接地，各电压互感器的中性线不得接有可能断开的开关或熔断器等。已在控制室一点接地的电压互感器二次线圈，宜在开关站将二次线圈中性点经放电间隙或氧化锌阀片接地，其击穿电压峰值应大于 $(30 \cdot I_G)$ V。应定期检查放电间隙或氧化锌阀片，不得造成电压二次回路多点接地的现象。采用不同电压等级电压互感器N线小母线连接方式的水力发电厂，只能在控制室一处使用两根 4mm^2 及以上铜芯线可靠接地。采用在不同小室设置电压互感器N线独立接地方式的升压站，其独立接地系统之间N线不得连接，并在一处使用两根 4mm^2 及以上铜芯线可靠接地。

3 公用电流互感器二次绕组二次回路应在相关保护柜屏内一点接地。独立的、与其他电压互感器和电流互感器的二次回路没有电气联系的二次回路应在开关站一点接地。

4 微机型继电保护装置柜屏内的交流供电电源，如照明、打印机和调制解调器等的中性线不应接入等电位接地网。

9.5.4 安装在通信室的保护专用光电转换设备与通信设备间应使用屏蔽电缆，并按敷设等电位接地网的要求，沿这些电缆敷设截面不小于 100mm^2 铜排或铜缆可靠与通信设备的接地网紧密连接。

9.5.5 结合滤波器引入通信室的高频电缆，以及通信室至保护室的电缆宜按上述要求敷设等电位接地网，并将电缆的屏蔽层两端分别接至等电位接地网的铜排。

9.5.6 计算机系统内电气相连的各种性质的接地应用绝缘导体引至总接地板，再由总接地经电缆或绝缘导体与接地装置连接。

9.5.7 计算机工作或逻辑接地应避免产生接地环流，消除噪声干扰和过电压干扰，保证设备的安全防护，计算机监控系统设备的外壳、交流电源、逻辑回路、信号回路和电缆屏蔽层应按以下原则接地：

1 任一机柜或一套装置内全部对外接口设备有隔离或光纤时，机柜外壳、交流电源、计算机直流电路和电缆屏蔽层的接地，应在该机柜内共一点接地。计算机逻辑回路在机柜内应只有一点同机柜的公共接地点连接。

2 未隔离开的所有计算机直流回路，包括直流电源、逻辑回路、信号回路中只应有一个接地点；如有两点或多点接地时，其任意两接地点的地电位差在任何时候均不能大于设备所允许的干扰电压，否则应在相邻接地点间增加专用的短接线。

3 当控制电缆电磁感应的干扰较大时, 宜采用两点接地, 双重屏蔽电缆内屏蔽层采用一点接地, 外屏蔽层采用两点接地。

9.5.8 远端元件或附属设备的接地, 如果是在远离主建筑物接地点处接到独立的接地网上时, 在设备的连接上应使用调制解调器加以隔离。

9.5.9 控制保护设备各种用途铜接地线的截面选择应符合表9.5.9的规定。

表 9.5.9 控制保护设备各种用途接地线的截面选择 (mm²)

序号	连接对象	接地线截面
1	总接地板—接地点	≥35.0
2	系统地—总接地板	≥16.0
3	机柜间链式接地连接线	2.5

9.6 保护线

9.6.1 PE 保护线的最小截面积应符合下列规定:

1 每根 PE 的截面积均应符合现行国家标准《低压电气装置 第4-43部分: 安全防护 过电流保护》GB/T 16895.5的有关规定, 并应能承受预期的故障电流。PE 的最小截面积可按表 9.6.1 确定。

表 9.6.1 PE 的最小截面积 (mm²)

相线截面积 S_a (mm ²)	相应 PE 的最小截面积	
	PE 与相线使用相同材料	PE 与相线使用不同材料
$S_a \leq 16$	S_a	$\frac{k_1}{k_2} \times S_a$
$16 < S_a \leq 35$	16	$\frac{k_1}{k_2} \times 16$
$S_a > 35$	$\frac{S_a}{2}$	$\frac{k_1}{k_2} \times \frac{S_a}{2}$

注: 1 k_1 为相线的 k 值, 按线和绝缘的材料由本规范附录G表 G.0.1或现行国家标准《低压电气装置 第4-43部分: 安全防护 过电流保护》GB/T 16895.5的有关规定选取。

2 k_2 为 PE 的 k 值, 按本规范附录G表G.0.2-1~G.0.2-5的规定选取。

2 切断时间不超过 5s 时, PE 的最小截面积可按下式计算:

$$S = \frac{\sqrt{I^2 t}}{k} \quad (9.6.1)$$

式中: S ——截面积 (mm²) ;

I ——通过保护电器的阻抗可忽略的故障产生的预期故障电流有效值 (A);

t ——保护电器自动切断时的动作时间 (s) ;

k ——由 PE、绝缘和其他部分的材料以及初始和最终温度决定的系数，按本规范附录G的规定取值。

9.6.2 PE 类型应满足下列要求：

1 PE 应由下列一种或多种导体组成：

- 1) 多芯电缆中的芯线。
- 2) 与带电线共用的外护物的绝缘的或裸露的线。
- 3) 固定安装的裸露的或绝缘的导体。
- 4) 符合本规范第9.6.2条第2款第1)项和第2)项规定条件的金属电缆护套、电缆屏蔽层、电缆铠装、金属编织物、同心线、金属导管。

2 装置中包括带金属外护物的设备，其金属外护物或框架同时满足下列要求时，可用作保护导体：

- 1) 能利用结构或适当的连接，使对机械、化学或电化学损伤的防护性能得到保护，并保持电气连续性。
- 2) 符合本规范第 9.6.1 条的规定。
- 3) 在每个预留的分接点上，允许与其他保护导体连接。

3 下列金属部分不应作为 PE 或保护联结导体：

- 1) 金属水管。
- 2) 含有可燃性气体、液体、粉末等物质的金属管道。
- 3) 正常使用中承受机械应力的结构部分。
- 4) 柔性或可弯曲金属导管，但用于保护接地或保护联结目的而特别设计的除外。
- 5) 柔性金属部件。
- 6) 支撑线、电缆托盘、电缆梯架。

9.7 等电位联结导体

9.7.1 总接地端子应满足下列要求：

1 在采用保护联结的每个装置中都应配置总接地端子，并应将下列导线与其连接：

- 1) 保护联结导体或导线。
- 2) 接地导体或导线。
- 3) PE 线。

4) 功能接地导体或导线。

2 接到总接地端子上的每根导体, 连接应牢固可靠, 应能被单独地拆开。

9.7.2 作为总等电位联结的保护联结导体和按本规范第9.7.1条的规定接到总接地端子的保护联结导体, 其截面积应符合下列规定:

- 1 铜不应小于 6mm^2 。
- 2 镀铜钢不应小于 25 mm^2 。
- 3 钢不应小于 50mm^2 。

9.7.3 作辅助联结用的保护联结导体应符合下列规定:

1 联结两个外露可导电部分的保护联结导体, 其电导不应小于接到外露可导电部分的较小的PE的电导。

2 联结外露可导电部分和外界可导电部分的保护联结导体的电阻, 不应大于相应PE1/2截面积导体所具有的电阻。

9.8 移动式电力设备接地

9.8.1 由固定式电源或由移动式发电设备供电的移动式机械的金属外壳或底座, 应与电源的接地装置有可靠的金属连接。在中性点不接地的电力网中, 可在移动式机械附近装设接地装置。若附近有自然接地体应充分利用, 其接地阻抗应符合本规范第4.2节的要求。若根据移动式机械的特殊情况, 按本规范的要求进行实施不可能或不合理时, 可利用自动切断电源装置代替接地。

9.8.2 移动式电力设备和机械的接地应符合固定式电力设备接地的要求, 但下列情况可不接地或接中性线:

1 移动式机械自用的发电设备直接放在机械的同一金属支架上, 且不供给其他设备用电时。

2 不超过两台机械由专用的移动式发电设备供电, 机械距移动式发电设备不超过 50m , 且发电设备和机械的外壳之间有可靠的金属连接时。

9.9 携带式电力设备接地

9.9.1 携带式用电设备应用专用芯线接地, 此芯线严禁用来通过工作电流。严禁利用其他用电设备的中性线接地, 中性线和接地线应分别与接地网相连接。中性线上不得设分断电器及熔断器。携带式用电设备的接地芯线, 应采用专用的绿/黄双色绝缘多股软铜线, 其截面不应小于 1.5mm^2 。

9.9.2 携带式用电设备的插座上应备有专用的接地触头。该触头应同时与接地线和中性线相连接,且所用插销的结构应能避免将导电触头误作接地触头使用。插座和插销的接地触头应在导电的触头接触之前连通,并应在导电的触头脱离之后才断开。金属外壳的插座,其接地触头和金属外壳应有可靠的电气连接。

9.9.3 携带式设备接地线的夹具应保证其与电力设备及接地体的连接处电气接触良好,并应符合短路电流作用下的热稳定和动稳定的要求。

9.10 其他

9.10.1 经接地变压器接地或经消弧线圈接地的发电机的中性点应有两根接地线与接地网主网格不同边相连。

9.10.2 金属制桥架应保证桥架间可靠的电气连接。玻璃钢等非金属桥架应沿桥架全长敷设专用接地线。

9.10.3 高压配电装置的避雷器和电压互感器应有两根接地引下线与接地网主网格不同边相连,且每根接地引下线均应符合热稳定校核的要求。

9.10.4 干式空心电抗器采用金属基础及金属围栏时,不应通过接地线构成闭合回路。

9.10.5 电力设备每个接地部分应以单独的接地导体与主接地网相连接,不应在一个接地导体中串接两个及以上需要接地的部分。

10 接地装置

10.1 自然接地体

10.1.1 水力发电厂中可利用接地的自然接地体有下列结构：

- 1 与水或潮湿土壤相接触的钢筋混凝土水工建筑物的表层钢筋，蜗壳、尾水管、护坦、水下挡水墙、进水口、引水隧洞、导流洞和船闸闸室底板、输水管道、大坝等处迎水面层钢筋网和潮湿廊道的钢筋网。
- 2 压力钢管、尾水锥管、尾水肘管和尾水管金属里衬。
- 3 各种闸门、拦污栅的金属结构。
- 4 建筑物用的金属板桩、钢筋笼、锚索、锚杆。
- 5 埋设地中的供水用钢管。
- 6 金属井管。

10.1.2 预应力钢筋混凝土构件中的钢筋不宜作为自然接地体。

10.1.3 当利用自然接地体接地，接地阻抗不满足要求时应设置人工接地体。

10.1.4 除易燃易爆危险场所外，交流电力设备接地所利用的自然接地体，若不另设人工接地体，应符合下列规定：

- 1 自然接地体全长应具备完好的电气连接。
- 2 利用串联的金属构件作为接地导体时，金属构件之间应以截面不小于 160mm^2 的钢材焊接。

10.1.5 蛇皮管、保温管的金属网或外皮以及低压照明网络的导线外皮不应作为自然接地体。

10.2 人工接地体

10.2.1 水力发电厂除应利用自然接地体外，主副厂房、主变室、高压引出线、开关站、出线场、配电室应设置人工接地体，人工接地体敷设应以水平接地体为主。人工接地体材料的选择应满足机械强度、热稳定校验、防腐蚀性等的要求。

10.2.2 水平敷设和在混凝土内垂直敷设的人工接地体可采用圆钢、扁钢、铜排、铜绞线、铜覆钢等；垂直敷设的人工接地体可采用角钢、圆钢、钢管、铜覆钢棒等。

10.2.3 高土壤电阻率地区宜采用水平放射形接地体，接地体在土壤中埋深不宜小于0.6 m。高压架空电力线路的放射形接地体每根的最大长度应根据土壤电阻

率确定，但不得超过本规范第4.4.2条规定数值。

10.2.4 泄放雷电流的设备和进出线构架等构筑物，避雷针、避雷线和避雷器均应设置人工集中垂直接地装置。垂直接地体的长度宜为 2.5m~3.0m，接地体顶端埋设深度宜为 0.6m~0.8m。

10.2.5 人工接地体应防止发生机械损伤和化学腐蚀，与公路、铁道或化学管道等交叉的地方，以及有可能发生机械损伤的地方，对人工接地体应采取保护措施。

10.2.6 人工接地体不应兼作其他用途。

10.3 接地导体连接

10.3.1 接地导体连接应符合下列规定：

1 接地导体连接宜采用焊接，焊接应牢固无虚焊。若采用搭接焊，其搭接长度应为其中较大扁钢宽度的 2 倍或其中较大圆钢直径的 6 倍。圆钢与扁钢连接时，其长度应为圆钢直径的 6 倍。放热焊接技术应满足现行行业标准《电力工程接地装置用放热焊剂技术条件》DL/T 1315 的有关规定。当流经连接点的单相短路故障电流高于 15kA 时，放热焊接接头应具备能承受不低于 0.3s 电动力的能力。接地导体放热焊接接头对电动力的耐受能力应符合本规范附录 H 的规定。

2 接至电气设备上的接地导体应用具有防腐能力的螺栓连接；螺栓连接应设防松螺帽或防松垫片。

3 埋设的接地线之间连接应采用焊接，有色金属接地线宜采用放热焊接；明敷接地线不宜采用焊接工艺的可采取机械连接。

4 潮湿的和有腐蚀性蒸气或气体的房间内，接地装置的连接处应焊接；若不能焊接，可采用螺栓连接，但应采取可靠的防锈蚀处理措施。

5 不同材料的接地导体连接应采用放热焊接，放热焊接处应做防腐处理。

10.3.2 接地导体与作为人工接地体的管道连接宜焊接，管道宜预留连接点。

10.3.3 跨土建结构分缝的接地线，在分缝处应做过缝伸缩处理。过缝处理应满足下列要求：

1 接地线应在过缝处弯曲。

2 接地线弯曲部分表面应包上一层油纸。

3 接地线弯曲部分表面第二层应包麻，第三层应涂沥青。

10.3.4 用作接地导体的混凝土内钢筋的连接应采用焊接，在分断处应焊为一体。

10.4 接地标志

10.4.1 明敷接地导体的表面应涂15mm~100mm宽度相等的绿、黄相间的条纹。若因建筑要求需涂其他颜色，则应在连接处及分支处涂两条间距为150mm 的紫带。在三相四线制的电力网中，若接有单相分支线并用其中性线作接地线时，中性线在分支点应涂淡蓝色。

10.4.2 接地线引进建筑物的入口处应设有标志。

10.4.3 接地测量井处应设有标志。

11 接地导体选择及防腐

11.1 截面选择及计算

11.1.1 接地导体的截面，应考虑设计使用年限内土壤对接地导体的腐蚀，并应满足载流量、短路时自动切除故障段时间以及热稳定与均压的要求。接地网采用钢材时，按机械强度要求的钢接地体和接地线的最小规格应符合表11.1.1-1的规定。接地网采用铜或铜覆钢材料时，按机械强度要求的铜或铜覆钢接地材料的最小规格应符合表11.1.1-2的规定。

表 11.1.1-1 按机械强度要求的钢接地体和接地线的最小规格

种类	规格及单位	地上	地下
圆钢	直径 (mm)	8.0	8.0/10.0
扁钢	截面积 (mm ²)	75.0	120.0
	厚度 (mm)	4.0	4.0
角钢	厚度 (mm)	2.5	4.0
钢管	管壁厚 (mm)	2.5	3.5/2.5

注：1 地下部分圆钢的直径，其分子、分母数据分别对应于架空线路和发电厂的接地网。

2 地下部分钢管的壁厚，其分子、分母数据分别对应于埋于土壤和埋于室内混凝土地坪中。

3 架空线路杆塔的接地极引出线，其截面不应小于50mm²，并应热浸镀锌。

表 11.1.1-2 按机械强度要求的铜或铜覆钢接地材料的最小规格

种类	规格及单位	地上	地下
铜棒	直径 (mm)	8	水平接地极为 8
			垂直接地极为 15
扁铜	截面积 (mm ²)	50	75
	厚度 (mm)	2	2
铜绞线	截面积 (mm ²)	50	50
铜覆圆钢	直径 (mm)	8	10
铜覆钢绞线	直径 (mm)	8	10
铜覆扁钢	截面积 (mm ²)	48	48
	厚度 (mm)	4	4

注：1 铜绞线单股直径不应小于 1.7mm。

2 各类铜覆钢材的尺寸为钢材的尺寸，铜层厚度不应小于0.25mm。

11.1.2 低压电力设备的铜接地线截面不应小于表11.1.2所列数值。

表11.1.2 低压电力设备的铜接地线的最小截面 (mm²)

种类	铜
明敷裸导体	4.0
绝缘导线	1.5
电缆的接地芯线或与相线包在同一保护外壳内的多芯导线的接地芯线	1.0

11.1.3 有效接地系统中，接地导体截面应按电厂设计水平年、最大运行方式下接地短路电流进行热稳定校验；短路电流持续时间可按保护故障持续时间考虑，即对于110kV和220kV电压等级，短路电流持续时间为第一级后备保护动作持续时间0.6s；330kV和500kV电压等级，短路电流持续时间为断路器失灵保护持续时间0.4s。接地导体在短路电流持续情况下的温度应符合下列规定：

1 钢接地导体的短时温度不应超过400°C；铜和铜覆钢材接地线采用放热焊方式时的最大允许温度应根据土壤腐蚀的严重程度验算，可取900°C、800°C、700°C。

2 若短路电流持续时间按更长时间考虑，则所用的钢接地线短时温度应允许达到600°C或更高，但其短时温度不得高于材料熔断温度。

3 利用混凝土中的钢筋作接地引下线时，钢筋的长时间最大允许温度不得超过100°C。

11.1.4 地下接地体导体的截面不得小于设备接地导体截面的75%。

11.1.5 非直接接地系统中，与设备和接地体连接的钢、铜接地线的截面，应保证在电厂全部投产后设计水平年，接地线流过单相接地故障电流时，接地导体截面应符合下列规定：

1 敷设在地上的接地导体截面应校验接地线流过单相接地故障电流时长时间温度小于等于150°C，敷设在地下的接地导体截面应校验接地线流过单相接地故障电流时长时间温度小于等于100°C。

2 若按70°C的允许载流量曲线选定接地导体的截面，则所用电流，对敷设在地上的接地导体，应采用流过接地导体的计算用单相接地故障电流的60%；对敷设在地下的接地导体，应采用流过接地导体的计算用单相故障电流的75%。

3 除发电机电压系统外，其余系统的接地导体截面应校验发生两相异点短路时的热稳定。

11.1.6 中性点接地的低压电力设备，专用接地线或中性线宜与相线一起敷设。

钢接地导体与铜接地导体的等效截面应按表11.1.6取值。采用钢接地线时，其接地线截面不应大于800mm²；采用铜接地线时，其接地线截面不应大于50mm²。

表11.1.6 钢接地导体与铜接地导体的等效截面

钢的规格尺寸 (mm)	钢的有效截面 (mm ²)	铜 (mm ²)
15×2	30	1.3~2.0
15×3	45	3.0
20×4	80	5.0
30×4 或40×3	120	8.0
40×4	160	12.5
60×5	300	17.5~25
80×8	640	35.0
100×8	800	47.5~50.0

11.1.7 在中性点直接接地的低压电力网中，相线与中性线之间的短路电流应符合下列规定：

1 相线与中性线之间的短路电流可按下式确定：

$$I = \frac{U_{xge}}{Z_b + Z_d} \quad (11.1.7)$$

式中： I ——短路电流 (A)；

U_{xge} ——电力网的标称相电压 (V)；

Z_b ——变压器正序负序和零序阻抗的算术平均值 (Ω)；

Z_d ——相线与中性线回路的总阻抗 (Ω)。

2 对架空线路，铜、铝导线回路的电抗可按0.6 Ω /km 计算；钢导线的电阻及内电抗应根据电流的数值确定，此电流应采用线路始端熔断器熔体额定电流的4倍或线路始端自动开关瞬时或短延时动作电流的1.5倍，外电抗可按0.6 Ω /km计算。

3 在较长的钢导线架空线路上，容量大于500kVA 的变压器， Z_b 可忽略不计。

11.1.8 携带式接地线应采用裸铜软绞线。

11.1.9 根据热稳定条件，接地线材料为钢或铜的最小截面应符合下式要求，其中校验接地导体热稳定用的 I_{jd} 及 t_d 均应按本规范附录J的规定计算：

$$S_{jd} \geq \frac{I_{jd}}{C} \sqrt{t_d} \quad (11.1.9)$$

式中: S_{jd} ——接地导体或导线的最小截面 (mm²) ;
 I_{jd} ——流过接地导体或导线的最大接地故障不对称电流有效值短路电流稳定值 (A) , 按工程设计水平年系统最大运行方式确定;
 t_d ——接地故障的等效持续时间 (s) ;
 C ——接地导体或导线材料的热稳定系数, 根据材料的种类、性能及最高允许温度和接地故障前接地导体或导线的初始温度确定, 应根据本规范附录J第J.0.2条取值。

11.1.10 在选择接地线截面时, 应考虑接地体在土壤中易受到腐蚀。接地体腐蚀应根据各地区接地线的腐蚀速度, 确定接地体的腐蚀量。接地体的最小截面应包括接地线在工程设计使用年限内腐蚀的增加截面积。

11.1.11 电动机的接地导体选择应符合下列规定:

1 当电机相线截面积小于25mm²时, 接地导体应等同相线的截面积; 当电机相线截面积为25mm²~50mm²时, 接地导体截面积应为25mm²; 当电机相线截面积大于50mm²时, 接地导体截面积应为相线截面的50%。

2 保护接地端子除作保护接地外, 不应兼作他用。

11.2 接地体防腐

11.2.1 接地体的腐蚀速度与该接地体所处地区土质、气候和周围环境等诸多因素有关。接地体的防腐设计应根据当地腐蚀数据确定, 若没有当地土壤中接地体腐蚀速度的数据, 可根据同类土壤腐蚀性地区的运行经验确定。

11.2.2 除临时接地装置的接地体外, 钢接地体宜采用热浸镀锌, 热浸镀锌层厚度应满足现行国家标准《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法》GB/T 13912的有关规定。接地导体、导线与接地极或接地极之间的焊接点外侧100mm范围内, 应做防腐处理。在做防腐处理前, 导体表面应除锈并去掉焊接处残留的焊药。

11.2.3 当接地体腐蚀速度较大时, 宜采取防腐措施或采用不易腐蚀的接地材料。若无防腐措施应增加接地体截面或采用阴极保护措施。

11.2.4 有腐蚀蒸气或气体的房间内的接地体应有防腐措施。混凝土中的接地体, 可不考虑腐蚀。接地体的设计使用年限不应低于30年。

11.2.5 采用铜材、铜覆钢材或阴极保护等防腐措施后, 可不再考虑土壤对接地导体截面腐蚀的影响。

11.2.6 接地网土壤中有两种不同的金属相互连接时，在不同材料连接部位的2m范围内的电极电位较高的金属导体涂装绝缘材料，电极电位较低的金属导体连接加强阴极保护。接地材料在不同土壤腐蚀等级环境中的耐腐蚀特性可根据本规范附录K的规定确定。不同金属标准电极电位可按本规范附录K的规定确定。

行业标准信息服务平台

12 土壤电阻率和接地装置参数测量

12.1 土壤电阻率测量要求

- 12.1.1** 土壤电阻率测试应在接地设计前开展。
- 12.1.2** 土壤电阻率测试部位应包含主厂房、主变室、开关站、出线场、大坝等区域。应分区域测试，各区域应全范围覆盖。
- 12.1.3** 土壤电阻率测量应避免雨后或雪后立即进行，宜在连续天晴3d后或在干燥季节进行测量。在冻土区，测量电极应打入冻土层线以下。
- 12.1.4** 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，且要求最近的测试电极与地下管道之间的距离不得小于极间距离。
- 12.1.5** 测试电极不应在有明显的岩石、裂缝和边坡等不均匀的土壤上布置；可把被测试场地分片，进行多处测量。
- 12.1.6** 土壤电阻率测试方法应满足现行行业标准《接地装置特性参数测量导则》DL/T 475的有关规定。
- 12.1.7** 接地设计前应进行水电阻率测试，水电阻率测试宜与土壤电阻率测量工作同步开展。
- 12.1.8** 可选用输出电流为交流或者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。

12.2 工频接地阻抗测量

- 12.2.1** 接地阻抗测量应符合下列规定：
- 1 水力发电厂接地网和线路杆塔接地装置的工频接地阻抗测量宜在干燥季节和土壤未冻结季节时进行；不应在雷、雨、雪中或雨、雪后立即测量，应在连续天晴3d后测量。
 - 2 接地测量前应事先了解清楚地下金属物情况，在布置电流极和电压极时，试验电极应远离地下金属物，并应与埋在地下的金属管道走向垂直。
 - 3 测量时，接地装置宜与线路避雷线断开，否则应采用分流系数对测量结果进行修正。
 - 4 接地测量的入流测量点宜分别设在主变压器接地处和高压配电装置接地处。

5 大型接地网的接地阻抗测量，宜采用工频电流测试，采用独立电源或经隔离变压器供电的电流电压表法测量，并尽可能加大测量电流，测量电流不宜小于50A。小型接地网的接地阻抗可采用电流-瓦特表三极法和接地摇表测量。输电线路杆塔接地装置的接地阻抗，可采用接地摇表测量。

6 工频接地阻抗若采用异频法测量，试验电流频率宜在40Hz~60Hz范围，标准正弦波波形，电流幅值通常不宜小于3A。试验现场干扰大时可加大测试电流，同时应注意试验安全。

7 水力发电厂接地阻抗测量应考虑蓄水位对接地阻抗的影响，可分次进行测量。水力发电厂受电前应完成接地阻抗测量。

8 水力发电厂接地装置工频接地阻抗测量方法可按现行行业标准《接地装置特性参数测量导则》DL/T 475的有关规定执行。

12.2.2 采用电流-电压表三极法进行工频接地阻抗测量应符合下列规定：

1 电流-电压表三极法接线（图12.2.2-1），电流极与被试接地装置中心的距离 d_{13} 宜取被试接地装置最大对角线长度 D 的4倍~5倍。当 d_{13} 达到4倍~5倍 D 确有困难时，在土壤电阻率均匀的地区，可取2 D 。在土壤电阻率不均匀地区可取3 D 。

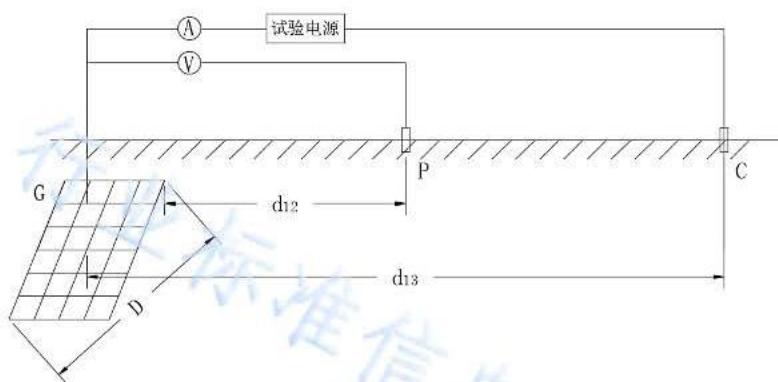


图 12.2.2-1 电流-电压表三极法示意图

G—被试接地装置；P—电位极；C—电流极；D—被试接地装置最大对角线长度；
 d_{13} —电流极与被试接地装置中心的距离； d_{12} —电位极与被试接地装置边缘的距离

2 在电流、电位极的布置上，应避免电流线与电位线之间的互感，不宜利用同杆架设或相互平行且靠近的两根导线进行测量。

3 采用三极直线布极法（图12.2.2-2）测量时，电位极与被试接地装置边缘的距离 d_{12} 可为电流极与被试接地装置中心的距离 d_{13} 的50%~60%。测量时电位极P应在被试

接地装置G与电流极C连线方向移动三次，每次移动距离为 d_{13} 的5%左右，三次测量得的结果误差在5%以内即可。

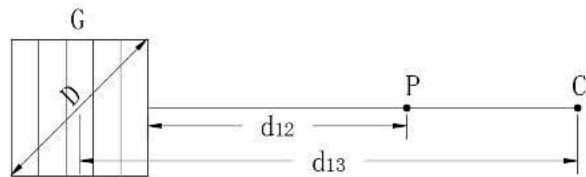


图 12.2.2-2 三极直线布极法

G—被试接地装置；P—电位极；C—电流极

4 采用三极等腰三角形布极法（图12.2.2-3）测量时，宜使夹角 θ 为30°， d_{12} 等于 d_{13} 且大于等于 $2D$ 。

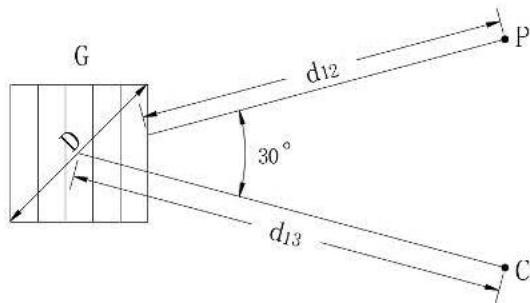


图 12.2.2-3 三极等腰三角形布极法

G—被试接地装置；P—电位极；C—电流极

5 采用远离夹角法（图12.2.2-4）时，宜使夹角 θ 为45°以上，且不宜小于30°， d_{12} 和 d_{13} 长度相近。接地阻抗可用下式修正：

$$Z = \frac{Z'}{1 - \frac{D}{2} \left(\frac{1}{d_{12}} + \frac{1}{d_{13}} - \frac{1}{\sqrt{d_{12}^2 + d_{13}^2 - 2d_{12}d_{13} \cos \theta}} \right)} \quad (12.2.2)$$

式中： Z' ——被试接地装置的接地阻抗（ Ω ）；

Z ——接地阻抗测量值（ Ω ）；

D ——被试接地装置最大对角线长度（m）；

d_{12} ——电位极与被试接地装置边缘的距离（m）；

d_{13} ——电流极与被试接地装置中心的距离（m）；

θ ——电位线与电流线之间的夹角。

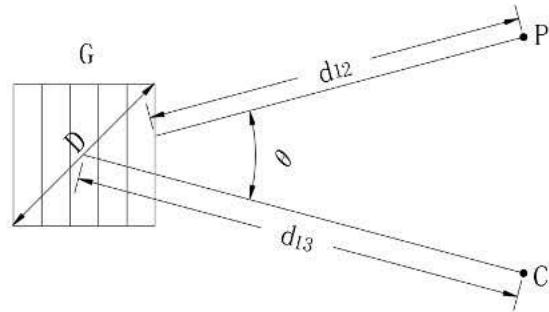


图 12.2.2-4 远离夹角法
G—被试接地装置；P—电位极；C—电流极

6 反向法布线要求和修正公式应与远离夹角法相同。

12.2.3 对线路杆塔接地装置或小面积接地网可采用接地摇表进行接地电阻测量，接地摇表测量接线（图12.2.3-1），杆塔接地装置或小面积接地网的最大对角线长度为 D ，当被试杆塔接地装置有射线时， D 取射线长度 L 。当被测接地电阻小于 1Ω 时，宜采用四端子接线仪测量，四端子接线仪布极法（图12.2.3-2） d_{13} 宜取接地装置最长射线长度 L 的3倍~4倍，若接地装置周围土壤电阻率较均匀，可取2倍。 d_{12} 取 $0.6d_{13}$ 。

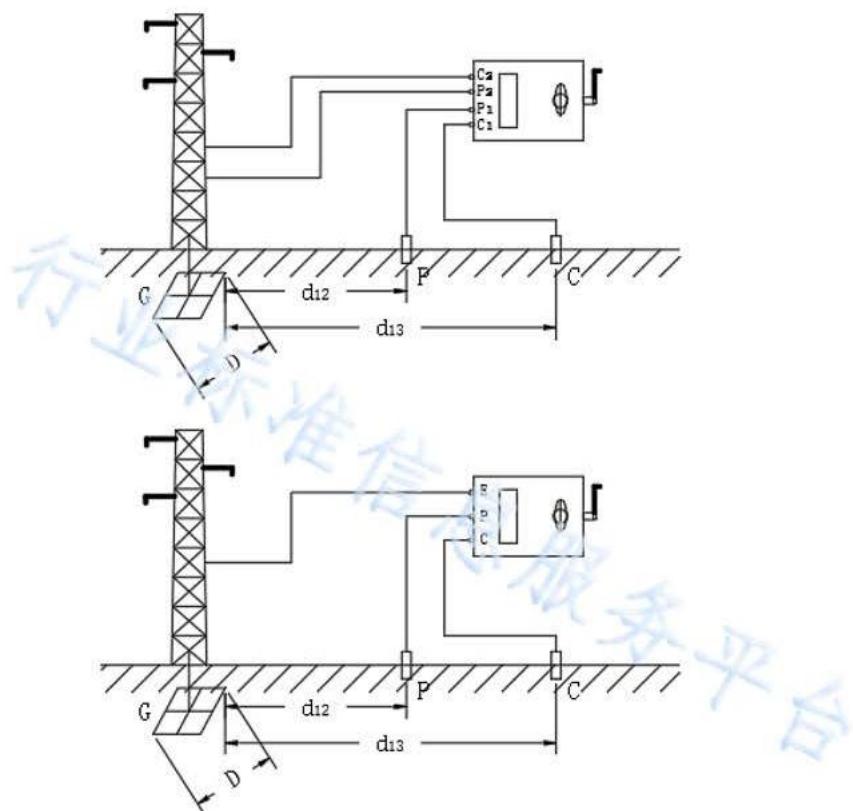


图 12.2.3-1 接地摇表测量接线图

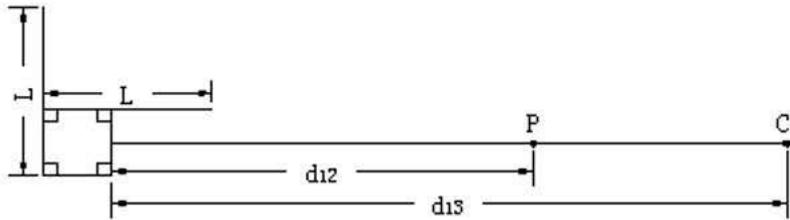


图12.2.3-2 四端子接线仪布极法

12.2.4 工频接地阻抗可采用倒相法和三相电源法进行测量，并应符合下列规定：

- 1 采用倒相法测量，其接地阻抗可符合下列规定：
 - 1) 当采用电流-电压表法时，工频接地阻抗可按下式计算：

$$Z = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 - 2U_0^2}{2I^2}} \quad (12.2.4-1)$$

式中： I ——注入接地装置中的试验电流，试验电流在倒相前后保持不变（A）；

U_0 ——不加试验电压时接地装置的对地电压，即零序电流在接地装置上产生的电压降（V）；

U_1 、 U_2 ——倒相前后接地装置上的试验电压（V）。

- 2) 当采用电流-瓦特表法时，工频接地阻抗可按下式计算：

$$Z = \frac{P_1 + P_2}{2I^2} \quad (12.2.4-2)$$

式中： P_1 、 P_2 ——倒相前后测量的功率（W）。

- 2 采用三相电源法测量工频接地阻抗，应用三相电源分别加压测量，工频接地阻抗可按下式计算：

$$Z = \sqrt{\frac{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2 - 3U_0^2}{3I^2}} \quad (12.2.4-3)$$

式中： U_A 、 U_B 、 U_C ——将A、B、C三相分别加到接地装置上时的试验电压（V）。

12.3 接触电位差和跨步电位差测量

12.3.1 测量接地网内的接触电位差和跨步电位差可与测量接地网接地阻抗同时进行。

12.3.2 接地网分期建成的工程，应分期校核投产接地装置的接触电位差和跨步电位差，其数值应满足人身安全的要求。

12.3.3 接触电位差和跨步电位差测量原理接线（图12.3.3），接触电位差和跨步电位差测量用电压表应采用内阻不小于30kΩ的表计。

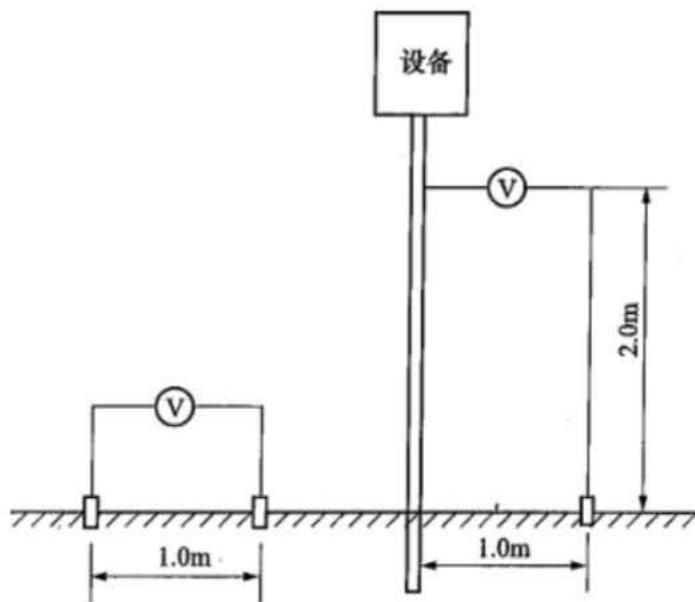


图 12.3.3 接触电位差和跨步电位差测量原理接线图

12.3.4 接触电位差应在场区边缘和电厂工作人员经常接触的电力设备操作箱或构架附近测量。电流应从构架离地面垂直距离2m以上处注入接地装置，在构架离地面垂直距离2m处和距构架水平距离1m处地面上两点进行测量。测量接触电位差时，可以待测设备为圆心，在半径1.0m 的圆弧上，选取3个~4个不同方向测试点，找出接触电位差最大测试值。

12.3.5 跨步电位差应在接地装置的边缘处和重要通道处进行测量。电流注入点应在测量处附近。测量跨步电位差时，可选择一个测量点，并以该点为圆心，在半径1.0m 的圆弧上，选取3个~4个不同方向测试点，找出跨步电位差最大测试值。

12.3.6 测量接触电位差和跨步电位差时，测试电极可用铁钎紧密插入土壤中。若场区是水泥路面，可采用包裹湿抹布的直径20cm 的金属圆盘，并在每块盘上放置15kg 的重物。

12.3.7 发生单相接地故障时的接触电位差 E_t 和跨步电位差 E_s ，应根据测量得到的接触

电位差和跨步电位差按下列公式进行换算：

$$E_t = \frac{I}{I_c} U_{tc} \quad (12.3.7-1)$$

$$E_s = \frac{I}{I_c} U_{sc} \quad (12.3.7-2)$$

式中： I ——发生接地故障时，流经接地装置的入地短路电流（A）；

I_c ——测量接触电位差和跨步电位差时，注入接地装置的电流（A）；

U_{tc} 、 U_{sc} ——接触电位差和跨步电位差测量值（V）。

附录A 接地设计程序

A.1 土壤电阻率测试

A.1.1 土壤电阻率测试前应收集主厂房、主变室、开关站、出线场、大坝等的布置方案，根据枢纽布置初拟接地设计规划方案，提出土壤电阻率测试方案。

A.1.2 接地设计应调查水力发电厂所在地的土壤特性及地质构造，并应实测接地装置区域的土壤电阻率和河水电阻率。

A.2 确定地电位升高限制值

A.2.1 应根据本规范第4.1节确定地电位升高限制值。

A.2.2 应按设计水平年确定系统最大运行方式下在接地网内、外发生接地故障时，经接地网入地并计及直流分量的最大入地电流有效值。对分期开发的电厂，应分别确定初、终期地网的最大接地故障电流有效值，并应分别确定接地装置初、终期地网的接地允许阻抗。

A.2.3 计算工频接地阻抗实际值应了解水工建筑物的布置、结构、钢筋配置情况，确定可利用作为接地装置的各种自然接地体。在确定全厂接地总体设计方案后应估算出水力发电厂初步的工频接地阻抗，并根据本规范第A.2.2条确定的最大入地电流有效值计算短路故障情况下地电位升高值是否超过本规范第A.2.1条中确定的电位升高限制值。

A.2.4 当电位升高值超过电位升高限制值时应降低工频接地阻抗，可根据技术经济比较，因地制宜地采用扩大接地网面积、水下接地、引外接地、深井接地等措施以降低接地阻抗。采用降阻措施后应按本规范第A.2.3条规定的步骤进行接地设计，若仍达不到较好的效果，应研究转移电位的隔离措施和校验反击电压。对小面积接地网和集中接地装置可采用人工降阻的方式降低接地电阻。

A.2.5 可行性研究设计阶段应确定全厂接地总体设计方案，提出包含本节规定的计算成果；对高土壤电阻率水力发电厂的接地设计方案，应有分析论证，并应提出主要解决措施。

A.3 网内电位差校验

计算全厂有电气连接的控制保护设备之间的网内电位差，当网内电位差超过2000V时应加强电位差超过2000V的各处接地网连接。

A.4 接触电位差和跨步电位差校验

A.4.1 应确定水力发电厂初、终期地网的接触电位差和跨步电位差允许值。

A.4.2 设计配电装置均压网后应计算最严重短路故障情况下高压配电装置均压网的接触电位差和跨步电位差。接触电位差和跨步电位差超过允许值时，应采取加强分流、限制人身电流、均压和隔离等措施，使最终设计计算值满足要求。

A.5 接地网施工设计

A.5.1 选择接地装置材质和导体截面，选择时应考虑使用年限内土壤对其的腐蚀程度，并应考虑流过的入地短路电流进行热稳定校验。

A.5.2 接地装置技施设计图纸可根据本规范第A.1~A.4节各步骤确定的成果绘制。

A.6 接地设计校验

接地装置施工完成后应根据实测结果校验接地设计。当不满足时应补充和完善接地装置或增加相关防护措施，并应从第A.2.3条开始重新开展接地设计复核工作。

附录B 接地装置电位计算

B.0.1 在发生接地故障时，接地装置的电位可按下式计算：

$$E_w = I_G |Z_G| \quad (B.0.1)$$

式中： E_w ——接地装置工频地电位升限值（V）；

I_G ——最大运行方式下，经接地网入地的最大接地故障电流有效值（A）；

Z_G ——包括人工接地网及与其连接的所有其他自然接地体的接地装置考虑到季节变化的最大的接地阻抗（ Ω ）。

B.0.2 接地装置工频地电位升限值 E_w 可取值应符合下列规定：

1 厂用电采用中性点不接地、中性点低电阻接地方式的水力发电厂，接地装置工频地电位升限值 E_w 可按表B.0.2取值。

表 B.0.2 接地装置工频地电位升限值 E_w 值

厂用电额定电压	接地装置工频地电位升限值
10kV	8kV
6kV	5kV

2 厂用电采用中性点谐振接地的方式，避雷器的选型和技术参数的选择应进行专题研究，并根据研究的结果选择避雷器。

B.0.3 流经接地装置的入地短路电流计算应符合下列规定：

1 当在接地装置内发生单相接地短路时，流经接地装置的电流可按下式计算：

$$I_g = (I_{max} - I_Z)(1 - K_{f1}) \quad (B.0.3-1)$$

式中： I_{max} ——系统最大运行方式下，最大单相短路电流（A）；

I_Z ——发生最大接地短路时，流经发电厂、变电所接地中性点的最大短路电流（A）；

K_{f1} ——当接地网内短路时，避雷线工频分流系数。

2 当在接地装置外发生单相接地短路时，流经接地装置的电流可按下式计算：

$$I_g = I_Z(1 - K_{f2}) \quad (B.0.3-2)$$

式中： K_{f2} ——接地网外短路时，避雷线的工频分流系数。

3 计算用入地短路电流应取式（B.0.3-1）和式（B.0.3-2）中较大的电流值。

B.0.4 可建立电厂—线路—系统模型，采用软件准确计算分流系数和入地短路电流。

B.0.5 经水力发电厂接地网的入地接地故障电流，应计及故障电流直流分量的影响，设计接地网时应按接地网最大入地电流 I_G 进行设计。 I_G 可按下列步骤确定：

- 1 确定接地故障对称电流 I_{max} 。
- 2 根据本规范第B.0.1~B.0.3条规定的方法确定故障电流分流系数 K_{f1} 或 K_{f2} 。
- 3 计算衰减系数 D_f ，将其乘以入地对称电流 I_g ，得到计及直流分量的经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值 I_G 。

B.0.6 典型的衰减系数 D_f 值可按表B.0.6中故障持续时间 t_f 和 X/R 的关系确定。

表B.0.6 典型的衰减系数 D_f 值

故障持续时间 t_f (s)	衰减系数 D_f			
	$X/R=10$	$X/R=20$	$X/R=30$	$X/R=40$
0.05	1.2685	1.4172	1.4965	1.5445
0.10	1.1479	1.2685	1.3555	1.4172
0.20	1.0766	1.1479	1.2125	1.2685
0.30	1.0517	1.1010	1.1479	1.1919
0.40	1.0390	1.0766	1.1130	1.1479
0.50	1.0313	1.0618	1.0913	1.1201
0.75	1.0210	1.0416	1.0618	1.0816
1.00	1.0158	1.0313	1.0467	1.0618

注： X 为接地故障电流计算时各支路归算至短路点的电抗， R 为接地故障电流计算时各支路归算至短路点的电阻。

B.0.7 当进行分流系数粗略估算时，不同情况下的分流系数 K_{f1} 可按表B.0.7-1~B.0.7-9取值。

表B.0.7-1 110kV输电线路1回出线的分流系数 K_{f1}

水力发电厂接地电阻 (Ω)	1回普通地线，1回OPGW	2回OPGW
0.1	0.5088	0.5524
0.2	0.5335	0.5766
0.3	0.5572	0.5994
0.4	0.5795	0.6206
0.5	0.6002	0.6403
0.6	0.6194	0.6583
0.7	0.6369	0.6749
0.8	0.6535	0.6902
0.9	0.6687	0.7041

续表 B.0.7-1

水力发电厂接地电阻 (Ω)	1 回普通地线, 1 回 OPGW	2 回 OPGW
1.0	0.6827	0.7170

表B.0.7-2 110kV输电线路2回出线的分流系数 K_{fl}

水力发电厂接地电阻 (Ω)	每回均为 1 回普通地线, 1 回 OPGW	每回均为 2 回 OPGW
0.1	0.5360	0.5812
0.2	0.5830	0.6265
0.3	0.6237	0.6647
0.4	0.6582	0.6967
0.5	0.6874	0.7233
0.6	0.7121	0.7462
0.7	0.7334	0.7651
0.8	0.7521	0.7820
0.9	0.7682	0.7966
1.0	0.7825	0.8090

表B.0.7-3 110kV输电线路3回出线的分流系数 K_{fl}

水力发电厂接地电阻 (Ω)	每回均为 1 回普通地线, 1 回 OPGW	每回均为 2 回 OPGW
0.1	0.5651	0.6106
0.2	0.6290	0.6708
0.3	0.6786	0.7161
0.4	0.7169	0.7512
0.5	0.7475	0.7787
0.6	0.7723	0.8011
0.7	0.7927	0.8193
0.8	0.8098	0.8347
0.9	0.8244	0.8476
1.0	0.8368	0.8583

表B.0.7-4 220kV输电线路1回出线的分流系数 K_{fl}

水力发电厂接地电阻 (Ω)	1 回普通地线, 1 回 OPGW	2 回 OPGW
0.1	0.5430	0.5501
0.2	0.5760	0.5825
0.3	0.6064	0.6112
0.4	0.6330	0.6371
0.5	0.6564	0.6610

续表 B.0.7-4

水力发电厂接地电阻 (Ω)	1 回普通地线, 1 回 OPGW	2 回 OPGW
0.6	0.6776	0.6810
0.7	0.6968	0.7005
0.8	0.7135	0.7174
0.9	0.7292	0.7325
1.0	0.7421	0.7452

表B.0.7-5 220kV输电线路2回出线的分流系数 K_{fl}

水力发电厂接地电阻 (Ω)	每回均为 1 回普通地线, 1 回 OPGW	每回均为 2 回 OPGW
0.1	0.5720	0.5770
0.2	0.6290	0.6341
0.3	0.6751	0.6790
0.4	0.7112	0.7142
0.5	0.7405	0.7435
0.6	0.7645	0.7670
0.7	0.7841	0.7870
0.8	0.8010	0.8035
0.9	0.8150	0.8185
1.0	0.8285	0.8308

表B.0.7-6 220kV输电线路3回出线的分流系数 K_{fl}

水力发电厂接地电阻 (Ω)	每回均为 1 回普通地线, 1 回 OPGW	每回均为 2 回 OPGW
0.1	0.6031	0.6082
0.2	0.6752	0.6792
0.3	0.7275	0.7308
0.4	0.7640	0.7675
0.5	0.7930	0.8008
0.6	0.8164	0.8170
0.7	0.8340	0.8368
0.8	0.8495	0.8515
0.9	0.8621	0.8632
1.0	0.8731	0.8741

表B.0.7-7 330kV输电线路1回出线的分流系数 K_{fl}

水力发电厂接地电阻 (Ω)	1回普通地线, 1回OPGW	2回OPGW
0.1	0.4153	0.4853
0.2	0.4764	0.5372
0.3	0.5264	0.5789
0.4	0.5699	0.6149
0.5	0.6018	0.6453
0.6	0.6304	0.6708
0.7	0.6563	0.6929
0.8	0.6779	0.7127
0.9	0.697	0.7299
1.0	0.7149	0.7429

表B.0.7-8 330kV输电线路2回出线的分流系数 K_{fl}

水力发电厂接地电阻 (Ω)	每回均为1回普通地线, 1回OPGW	每回均为2回OPGW
0.1	0.4880	0.5180
0.2	0.5690	0.6000
0.3	0.6334	0.6590
0.4	0.6790	0.7036
0.5	0.7156	0.7385
0.6	0.7448	0.7662
0.7	0.7665	0.7888
0.8	0.7882	0.8060
0.9	0.8038	0.8216
1.0	0.8183	0.8349

表B.0.7-9 330kV输电线路3回出线的分流系数 K_{fl}

水力发电厂接地电阻 (Ω)	每回均为1回普通地线, 1回OPGW	每回均为2回OPGW
0.1	0.5329	0.5616
0.2	0.6305	0.6570
0.3	0.6953	0.7218
0.4	0.7446	0.7654
0.5	0.7801	0.7956
0.6	0.8071	0.8212
0.7	0.8280	0.8405
0.8	0.8402	0.8559
0.9	0.8579	0.8686

续表 B.0.7-9

水力发电厂接地电阻 (Ω)	每回均为 1 回普通地线, 1 回 OPGW	每回均为 2 回 OPGW
1.0	0.8698	0.8792

表B.0.7-10 500kV输电线路1回出线的分流系数 K_{fl}

水力发电厂接地电阻 (Ω)	1 回普通地线, 1 回 OPGW	2 回 OPGW
0.1	0.523	0.523
0.2	0.546	0.544
0.3	0.567	0.566
0.4	0.586	0.585
0.5	0.605	0.604
0.6	0.622	0.621
0.7	0.637	0.637
0.8	0.650	0.651
0.9	0.666	0.665
1.0	0.679	0.678

表B.0.7-11 500kV输电线路2回出线的分流系数 K_{fl}

水力发电厂接地电阻 (Ω)	每回均为 1 回普通地线, 1 回 OPGW	每回均为 2 回 OPGW
0.1	0.542	0.541
0.2	0.584	0.583
0.3	0.620	0.619
0.4	0.652	0.651
0.5	0.678	0.677
0.6	0.701	0.701
0.7	0.722	0.721
0.8	0.740	0.739
0.9	0.755	0.755
1.0	0.769	0.769

表B.0.7-12 500kV输电线路3回出线的分流系数 K_{fl}

水力发电厂接地电阻 (Ω)	每回均为 1 回普通地线, 1 回 OPGW	每回均为 2 回 OPGW
0.1	0.564	0.563
0.2	0.621	0.620
0.3	0.666	0.665
0.4	0.702	0.702
0.5	0.732	0.731

续表 B.0.7-12

水力发电厂接地电阻 (Ω)	每回均为 1 回普通地线, 1 回 OPGW	每回均为 2 回 OPGW
0.6	0.756	0.755
0.7	0.777	0.776
0.8	0.794	0.793
0.9	0.809	0.808
1.0	0.822	0.821

表B.0.7-13 750kV输电线路1回出线的分流系数 K_{fl}

水力发电厂接地电阻 (Ω)	1 回普通地线, 1 回 OPGW	2 回 OPGW
0.1	0.4672	0.4204
0.2	0.5108	0.4639
0.3	0.5494	0.5050
0.4	0.5840	0.5384
0.5	0.6136	0.5726
0.6	0.6399	0.6010
0.7	0.6629	0.6259
0.8	0.6835	0.6482
0.9	0.7019	0.6683
1.0	0.7179	0.6858

表B.0.7-14 750kV输电线路2回出线的分流系数 K_{fl}

水力发电厂接地电阻 (Ω)	每回均为 1 回普通地线, 1 回 OPGW	每回均为 2 回 OPGW
0.1	0.5072	0.4612
0.2	0.5803	0.5386
0.3	0.6383	0.5992
0.4	0.6821	0.6472
0.5	0.7169	0.6852
0.6	0.7449	0.7158
0.7	0.7681	0.7412
0.8	0.7874	0.7625
0.9	0.8037	0.7800
1.0	0.8177	0.7962

表B.0.7-15 750kV输电线路3回出线的分流系数 K_{f}

水力发电厂接地电阻 (Ω)	每回均为 1 回普通地线, 1 回 OPGW	每回均为 2 回 OPGW
0.1	0.5454	0.5012
0.2	0.6372	0.5987
0.3	0.6997	0.6666
0.4	0.7444	0.7154
0.5	0.7777	0.7519
0.6	0.8034	0.7803
0.7	0.8237	0.8029
0.8	0.8403	0.8212
0.9	0.8541	0.8365
1.0	0.8657	0.8494

B.0.8 分流系数 $K_{\text{f}2}$ 可采用仿真计算方法计算。

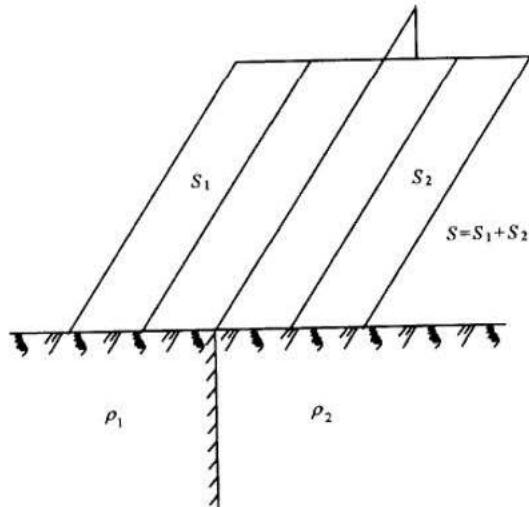
附录C 非均匀土壤中接地网接地电阻的计算

C.0.1 接地网内土壤具有垂直分层的两个剖面结构（图C.0.1），水平接地网的接地电阻 R_{C1} 可用下式计算：

$$R_{C1} = \frac{0.5\rho_1\rho_2\sqrt{S}}{\rho_1S_2 + \rho_2S_1} \quad (\text{C.0.1})$$

式中： S_1 、 S_2 ——分别覆盖在 ρ_1 、 ρ_2 电阻率上的接地网面积（ m^2 ）；

S ——接地网总面积（ m^2 ）。



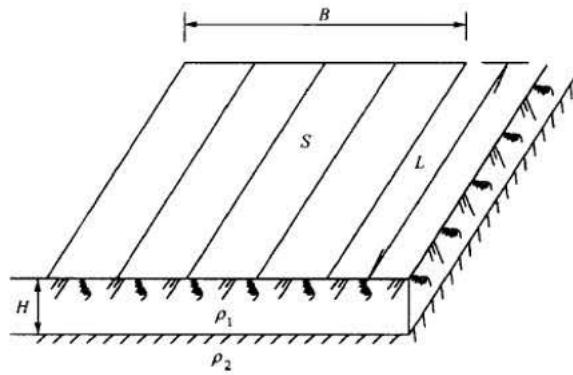
图C.0.1 接地网内土壤具有垂直分层的两个剖面结构

C.0.2 接地网内土壤具有水平分层的两层结构（图C.0.2-1），水平接地网的接地电阻 R_{C2} 可用下式计算：

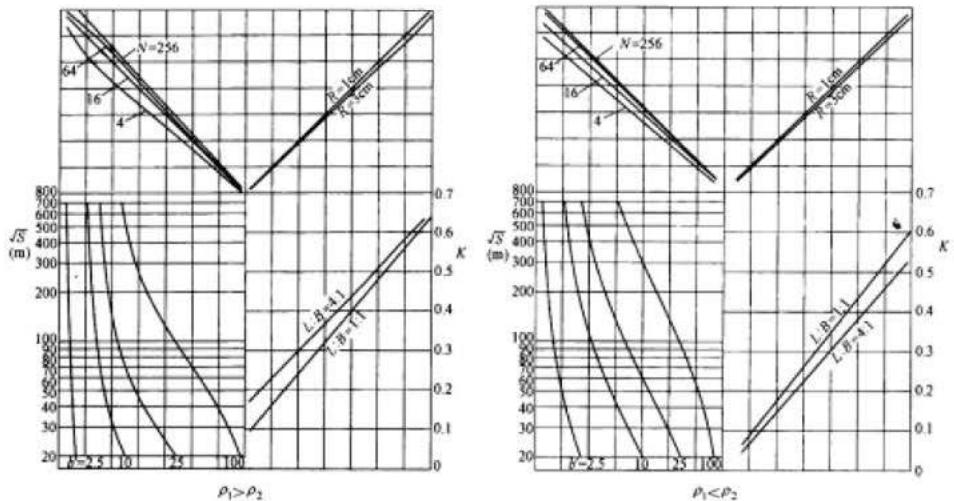
$$R_{C2} = 0.5 \times \frac{K(\rho_2 - \rho_1) + \rho_1}{\sqrt{S}} \quad (\text{C.0.2})$$

式中： ρ_1 、 ρ_2 ——分别为上、下层土壤电阻率（ $\Omega \cdot \text{m}$ ）；

K ——系数，按图C.0.2-2查取。



图C.0.2-1 接地网内土壤具有水平分层的两层结构



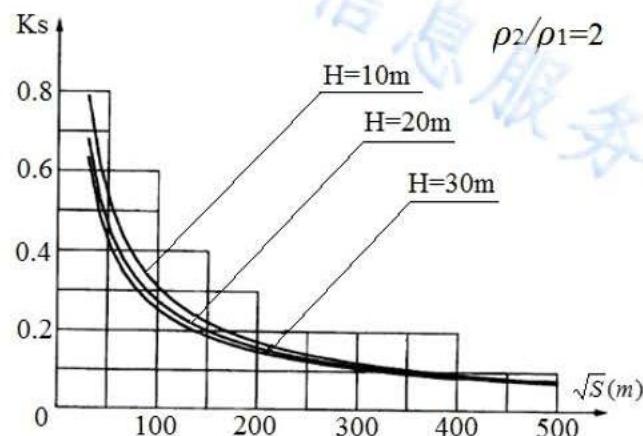
图C.0.2-2 系数K的曲线

C.0.3 水下接地网接地电阻 R_{c3} 可按下式计算：

$$R_{c3} = K_s \frac{\rho_s}{40} \quad (C.0.3)$$

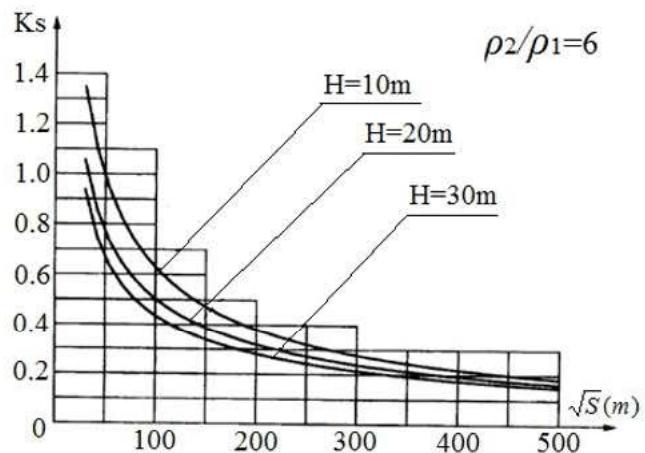
式中： ρ_s ——水电阻率；

K_s ——接地电阻系数，由图C.0.3-1~图C.0.3-5曲线查得。



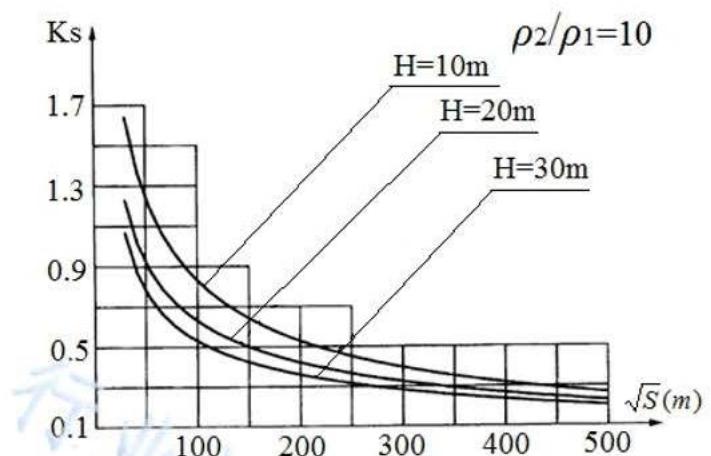
图C.0.3-1 水下接地网接地电阻计算系数

H—水深



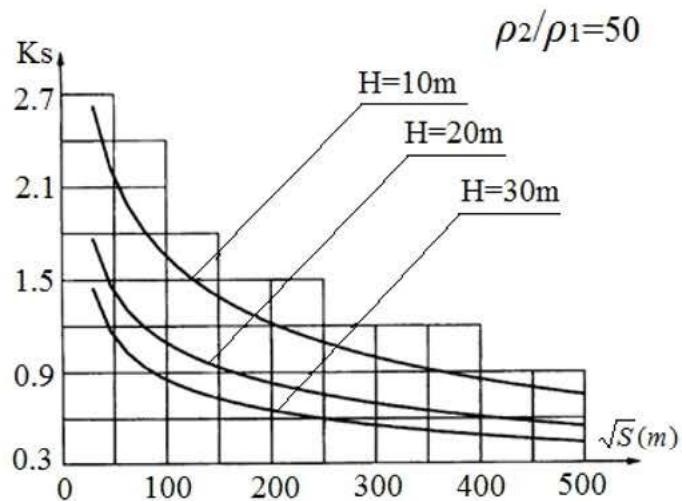
图C.0.3-2 水下接地网接地电阻计算系数

H—水深



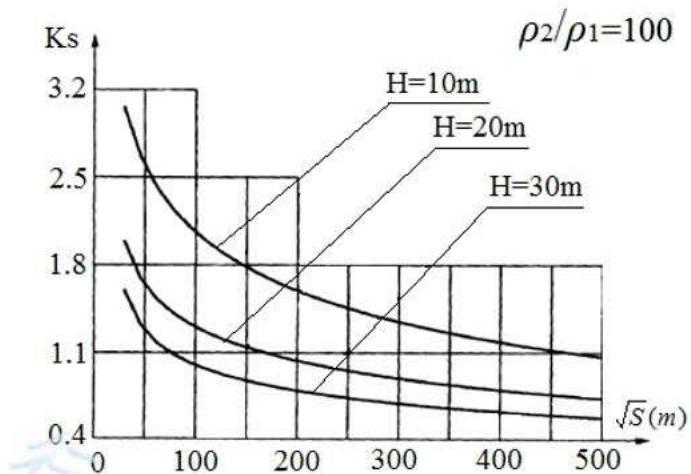
图C.0.3-3 水下接地网接地电阻计算系数

H—水深



图C.0.3-4 水下接地网接地电阻计算系数

H—水深



图C.0.3-5 水下接地网接地电阻计算系数

H—水深

C.0.4 深埋接地体所经过土壤具有两层水平分层（图C.0.4）的接地电阻 R_{C4} 可按下列公式计算：

$$R_{C4} = \frac{\rho_a}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{d} + C \right) \quad (C.0.4-1)$$

$$l < H \text{ 时: } \rho_a = \rho_1 \quad (C.0.4-2)$$

$$l > H \text{ 时: } \rho_a = \frac{\rho_1 \rho_2}{\frac{H}{l}(\rho_2 - \rho_1) + \rho_1} \quad (C.0.4-3)$$

$$C = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \right)^n \ln \frac{2nH + l}{2(n-1)H + l} \quad (\text{C.0.4-4})$$

式中: l ——接地体的长度 (m) ;

d ——接地体的直径 (m) ;

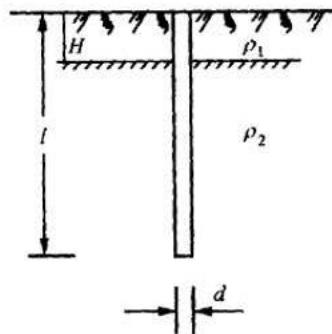
ρ_1 ——上层土壤电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$) ;

ρ_2 ——下层土壤电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$) ;

H ——电阻率为 ρ_1 的土壤深度 (m) ;

ρ_s ——两层水平分层等效土壤电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$) ;

C ——两层土壤深埋接地体的影响系数。



图C.0.4 深埋接地体所经过土壤具有两层水平分层

附录D 单独接地体的冲击系数

D.0.1 垂直布置的接地体、水平带形接地体、水平环形布置的接地体，以及各种杆塔自然接地体，在 ρ 小于等于 $2000\Omega\cdot\text{m}$ 下，其冲击系数可按下式计算：

$$\alpha = \frac{1}{a_i + b_i(I_i\rho)^{m_i} / L^p} \quad (\text{D.0.1})$$

式中： α ——冲击系数；

I_i ——通过接地体的雷电冲击电流值（kA）；

ρ ——土壤电阻率（ $\text{k}\Omega\cdot\text{m}$ ）；

L ——垂直布置接地体的长度、水平带形接地体的长度、水平环形布置的接地体直径，以及各种杆塔自然接地体的长度（m）；

a_i 、 b_i 、 m_i 、 p ——系数，按表D.0.1取值。

表D.0.1 系数 a_i 、 b_i 、 m_i 、 p

接地体型式		a_i	b_i	m_i	p
人工 接 地 体	垂直接地体	1.35	1.350	0.8	1.2
	水平带形接地体	1.35	3.300	0.8	1.2
	水平环形接地体	1.35	3.300	0.8	1.2
杆塔 自 然 接 地	体钢筋混凝土杆	1.35	0.053	1.5	0
	钢筋混凝土桩	1.35	0.053	1.5	0
	装配式钢筋混凝土基础，一个塔脚	1.35	0.038	1.5	0
	拉线盘，带拉线棒	1.35	0.038	1.5	0
	铁塔的基础，一个塔脚	1.35	0.053	1.5	0

D.0.2 在 ρ 小于等于 $300\Omega\cdot\text{m}$ 时，可计入杆塔自然接地体的作用，其冲击系数可按下式计算：

$$\alpha = \frac{1}{a_i + b_i I_i^{m_i}} \quad (\text{D.0.2})$$

附录E 典型土壤电阻率值

E.0.1 在进行接地阻抗计算时, 不同材质的土壤和水的电阻率可按表E.0.1-1取值, 岩石电阻率可按表E.0.1-2取值。

表E.0.1-1 土壤和水的电阻率 ($\Omega \cdot m$)

类别	名称	电阻率近似值	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、 白垩土	50	30~100	50~300	10~30
	粘土	60			
	砂质粘土	100	30~300	80~100	10~30
	黄土	200	100~200	250	30
	含砂粘土、砂土	300	100~200	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 红色页岩当30% 湿度时	500	—	—	—
砂	表层土夹石、下层 砾石当15%湿度时	600	—	—	—
	砂、砂砾	1 000	250~1 000	1 000~2 500	—
	砂层深度大于10m 地下水 较深的草原	1 000	—	—	—
	地面粘土深度不大于 1.5m、底层多岩石	1 000	—	—	—

续表E.0.1-1

类别	名称	电阻率近似值	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
岩石	砾石、碎石	5 000	—	—	—
	多岩石山地	5 000	—	—	—
混凝土	在水中	40~55	—	—	—
	在湿土中	100~200	—	—	—
	在干土中	500~1 300	—	—	—
	在干燥的大气中	12 000~18 000	—	—	—
矿	金属矿石	0.01~1.00	—	—	—
水	海水	1~5	—	—	—
	湖水、池水	30	—	—	—
	泥水、泥炭中的水	15~20	—	—	—
	泉水	40~50	—	—	—
	地下水	20~70	—	—	—
	溪水	50~100	—	—	—
	河水	30~280	—	—	—
	污秽的冰	300	—	—	—

表E.0.1-2 岩石电阻率($\Omega \cdot m$)

序号	名称	电阻率 ρ	
		潮湿状态	干燥状态
1	花岗岩	10^3	10^6
2	正长岩	10^3	10^6
3	闪长岩	—	10^6
4	辉长岩	10^4	10^6
5	玄武岩	—	10^6

续表 E.0.1-2

序号	名称	电阻率 ρ	
		潮湿状态	干燥状态
6	辉绿岩	10^4	10^7
7	安山岩	10^3	—
8	片麻岩	10^4	10^8
9	页岩	10^3	—
10	大理岩	10^4	10^8
11	石灰岩	10^3	$10^8\sim10^9$
12	砂岩	10^3	$10^3\sim10^8$

行业标准信息服务平台

附录F 土壤表层衰减系数

F.0.1 表层衰减系数可按下列公式计算：

$$C_s = 1 + \frac{16b}{\rho_s} \sum_{n=1}^{\infty} [K^n \cdot R_{m(2nh_s)}] \quad (\text{F.0.1-1})$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (\text{F.0.1-2})$$

$$R_{m(2nh_s)} = \frac{1}{\pi b^2} \int_0^b (2\pi x \cdot R_{r,z}) dx \quad (\text{F.0.1-3})$$

$$R_{r,z} = \frac{\rho_s}{4\pi b} \sin^{-1} \left[\frac{2b}{\sqrt{(r-b)^2 + z^2} + \sqrt{(r+b)^2 + z^2}} \right] \quad (\text{F.0.1-4})$$

$$z = 2nh_s \quad (\text{F.0.1-5})$$

式中： C_s ——表层衰减系数，通过镜像法进行计算，也可通过 C_s 受 h_s 和 K 变化的曲线（图 F.0.1）查取，其中 b 取 0.08m。

b ——代表人脚的金属圆盘半径 (m)；

K ——不同电阻率土壤的反射系数，可按式 (F.0.1-2) 计算；

$R_{m(2nh_s)}$ ——两个相似、平行、相距 $2nh_s$ 且置于土壤电阻率为 ρ 的无限大土壤中的两个圆盘之间的互阻 (Ω)；

ρ_s ——表层土壤电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$)；

h_s ——表层土壤厚度 (m)；

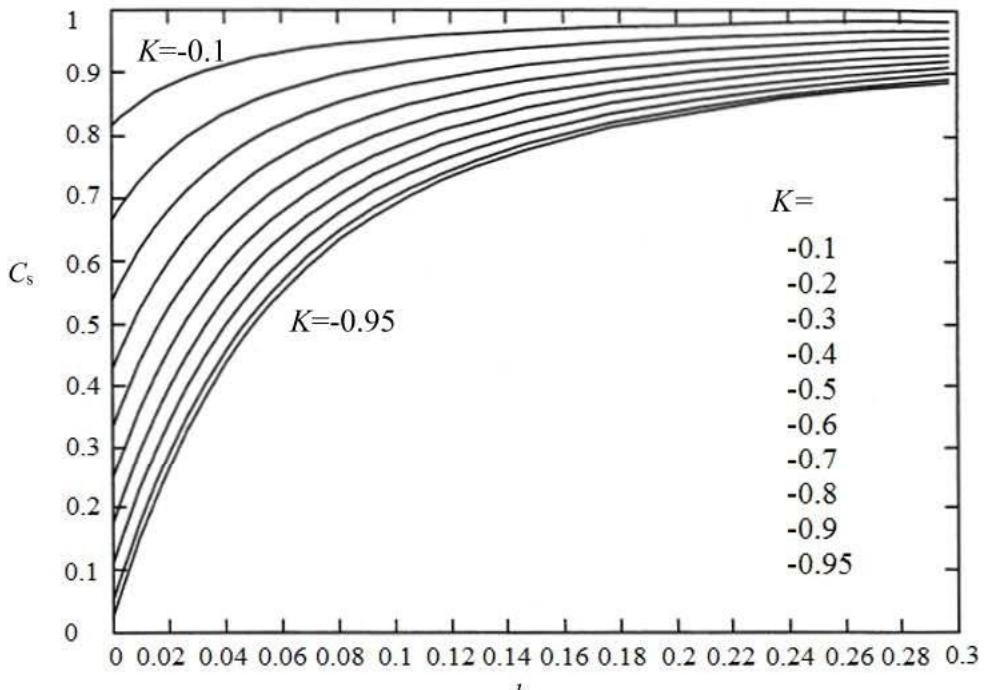
z ——两个圆盘之间的距离 (m)；

ρ ——下层土壤电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$)；

x ——积分变量；

r, z ——代表以圆盘1的中心为坐标原点时，圆盘2上某点的圆柱坐标；

$R_{r,z}$ ——任意点 (r, z) 的电阻 (Ω)。



图F.0.1 C_s 受 h_s 和 K 变化的曲线

F.0.2 工程中对地网上方跨步电位差和接触电位差允许值的计算误差要求在5%以内时，也可采用下式计算：

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \times (1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0.09} \quad (\text{F.0.2})$$

附录G 系数k的求取方法

G.0.1 本规范第9.6.1条第2款式 (9.6.1) 中k值可由下式计算:

$$k = \sqrt{\frac{Q_c (\beta + 20)}{\rho_{20}}} \ln \left(1 + \frac{\theta_f - \theta_i}{\beta + \theta_i} \right) \quad (G.0.1)$$

式中: Q_c ——导体材料在 20°C的体积热容量 [J/(°C·mm³)];

β ——导体在 0°C时的电阻率温度系数的倒数 (°C), 按表G.0.1取值;

ρ_{20} ——导体材料在 20°C时的电阻率 (Ω·mm), 按表G.0.1取值;

θ_i ——导体的初始温度 (°C);

θ_f ——导体的最终温度 (°C)。

表 G.0.1 系数k计算需使用的参数

材料	β (°C)	Q_c (J/(°C·mm ³))	ρ_{20} (Ω·mm)	$\sqrt{\frac{Q_c (\beta + 20)}{\rho_{20}}}$ (A \sqrt{S} /mm ²)
铜	234.5	3.45×10^{-3}	17.241×10^{-6}	226
铝	228	2.5×10^{-3}	28.264×10^{-6}	148
铅	230	1.45×10^{-3}	214×10^{-6}	41
钢	202	3.8×10^{-3}	138×10^{-6}	78

G.0.2 用法不同或运行情况不同的保护导体的 k 值, 可按表 G.0.2-1~表 G.0.2-5取值。

表G.0.2-1 非电缆芯线且不与其他电缆成束敷设的绝缘保护导体的 k

导体绝缘	温度 (°C)		k		
			导体材料		
	初始	最终	铜	铝	钢
70°C PVC	30	160/140	143/133	9588	5249
90°C PVC	30	160/140	143/133	9588	5249
90°C 热固性材料	30	250	176	116	64
60°C 橡胶	30	200	159	105	58
85°C 橡胶	30	220	166	110	60
硅橡胶	30	350	201	133	73

注: 温度中的较小数值适用于截面积大于 300mm^2 的 PVC 绝缘导体。

表G.0.2-2 与电缆护层接触但不与其他电缆成束敷设的裸保护导体的 k

导体绝缘	温度 (°C)		k		
			导体材料		
	初始	最终	铜	铝	钢
PVC	30	200	159	105	58
聚乙烯	30	150	138	91	50
氯磺化聚乙烯	30	220	166	110	60

表G.0.2-3 电缆芯线或与其他电缆或绝缘导体成束敷设的保护导体的 k

导体绝缘	温度 (°C)		k		
			导体材料		
	初始	最终	铜	铝	钢
70°C PVC	70	160/140	115/103	7668	4237
90°C PVC	90	160/140	100/86	6657	3631
90°C 热固性材料	90	250	143	94	52
60°C 橡胶	60	200	141	93	51
85°C 橡胶	85	220	134	89	48
硅橡胶	180	350	132	87	47

注: 温度中较小数值适用于截面积大于 300mm^2 的 PVC 绝缘导体。

表G.0.2-4 用电缆的金属护层,如铠装、金属护套、同心导体等,作保护导体的 k

导体绝缘	温度 (°C)		k			
			导体材料			
	初始	最终	铜	铝	铅	钢
70°C PVC	60	200	141	93	26	51
90°C PVC	80	200	128	85	23	46
90°C 热固性材料	80	200	128	85	23	46
60°C橡胶	55	200	144	95	26	52
85°C橡胶	75	220	140	93	26	51
硅橡胶	70	200	135	—	—	—
裸露的矿物护套	105	250	135	—	—	—

注: 温度的数值也应适用于外露可触及的或与可燃性材料接触的裸导体。

表G.0.2-5 所示温度不损伤相邻材料时的裸导体的 k

条件	初始温度 (°C)	导体材料					
		铜		铝		钢	
		k	最高温度 (°C)	k	最高温度 (°C)	k	最高温度 (°C)
可见的和狭窄的区域内	30	228	500	125	300	82	500
正常条件	30	159	200	105	200	58	200
有火灾危险	30	138	159	91	150	50	150

附录H 接地导体放热焊接接头对电动力的耐受能力

接地导体放热焊接接头应具有承载短路电流所产生的电动力耐受能力，不同截面积接地导体放热焊接接头承受的产生电动力的短路电流值应符合表 H.0.1 的规定。

表H.0.1 不同截面积接地导体放热焊接接头承受的产生电动力的短路电流值

截面积 (mm ²)	铜导体 熔化电流值 (kA)	不对称 电流系数	测试电流 有效值 (kA)	测试电流 周期次数	正周期波峰值 (kA)														
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
35	15	0.90	13	15	35.0	31.9	29.3	27.2	25.5	24.2	23.0	22.2	21.5	20.8	20.4	20.0	19.8	19.5	19.2
50	22	0.90	19	15	51.1	46.6	42.8	39.7	37.2	35.3	33.6	32.5	31.4	30.4	29.8	29.3	28.9	28.5	28.1
70	31	0.90	27	15	72.6	66.2	60.8	56.4	52.9	50.2	47.8	46.2	44.6	43.2	42.4	41.6	41.0	40.5	40.0
95	42	0.90	37	15	99.5	90.7	83.3	77.3	72.5	68.8	65.5	63.3	61.1	59.2	58.1	57.0	56.2	55.5	54.8
120	53	0.85	45	15	121.1	110.3	101.3	94.1	88.2	83.7	79.7	77.0	74.3	72.0	70.7	69.3	68.4	67.5	66.6
150	66	0.80	52	15	139.9	127.4	117.0	108.7	101.9	96.7	92.0	88.9	85.8	83.2	81.6	80.1	79.0	78.0	77.0
185	82	0.70	57	15	153.3	139.7	128.3	119.1	111.7	106.0	100.9	97.5	94.1	91.2	89.5	87.8	86.6	85.5	84.4
240	106	0.65	68	15	182.9	166.6	153.0	142.1	133.3	126.5	120.4	116.3	112.2	108.8	106.8	104.7	103.4	102.0	100.6
300	133	0.61	81	15	217.9	198.5	182.3	169.3	158.8	150.7	143.4	138.5	133.7	129.6	127.2	124.7	123.1	121.5	119.9
400	177	0.61	107	15	287.8	262.2	240.8	223.6	209.7	199.0	189.4	183.0	176.6	171.2	168.0	164.8	162.6	160.5	158.4
500	222	0.61	135	15	363.2	330.8	303.8	282.2	264.6	251.1	239.0	230.9	222.8	216.0	212.0	207.9	205.2	202.5	199.8

注：1 测试电流通流时间 0.3 s，电流频率 50 Hz，电流波形不对称性取值 X/R 为 30。

2 短路试验应包括 2 次浪涌测试。每次测试电流应包含 15 次正周期波峰，第 1 次测试完成后，待导体在室温自然冷却低于 100°C 后，重复第 2 次

浪涌测试，放热焊接接头应无损伤、无断裂。

3 铜导体导电率大于等于97% IACS，导体熔化温度1083°C，测试环境温度取值40°C。

附录J 校验接地导体热稳定用的 I_{jd} 及 t_d 计算

J.0.1 校验接地导体或导线热稳定用的 I_{jd} 和 t_d 值应采用表J.0.1所列数值。接地导体或导线的初始温度可取40°C。

表J.0.1 校验接地导体或导线热稳定用的 I_{jd} 和 t_d 值

系统接地方式	I_{jd}	t_d
有效接地	三相同体设备：单相接地故障电流 三相分体设备：单相接地或三相接地流过接地线的最大接地故障电流	公式 (J.0.3-1) 或 (J.0.3-2)
低电阻接地	单相接地故障电流	公式 (J.0.3-1) 或 (J.0.3-2)

J.0.2 钢的最大允许温度可取400°C，钢的热稳定系数C值为70。铜材采用放热焊接方式时的最大允许温度，应根据土壤腐蚀的严重程度按表J.0.2的规定分别取900°C、800°C或700°C。爆炸危险场所，应按专用规定选取。校验铜和铜覆钢材接地导体或导线热稳定用的C值可采用表J.0.2给出的数值。

表J.0.2 校验铜和铜覆钢材接地导体或导线热稳定用的C值

最大允许温度°C	土壤腐蚀等级	铜	导电率 40% 铜镀钢绞线	导电率 30% 铜镀钢绞线	导电率 20% 铜镀钢棒
700	强	249	167	144	119
800	中	259	173	150	124
900	弱	268	179	155	128

J.0.3 热稳定校验用的时间可按下列规定计算：

1 发电厂和升压站的继电保护装置配置有2套速动主保护、近接地后备保护、断路器失灵保护和自动重合闸时， t_d 可按下式取值：

$$t_d \geq t_m + t_f + t_o \quad (J.0.3-1)$$

式中： t_m ——主保护动作时间 (s)；

t_f ——断路器失灵保护动作时间 (s)；

t_o ——断路器开断时间 (s)。

2 配有1套速动主保护、近或远，或远近结合的后备保护和自动重合闸，有或无断

路器失灵保护时, t_d 可按下式取值:

$$t_d \geq t_o + t_r \quad (J.0.3-2)$$

式中: t_r ——第一级后备保护的动作时间 (s) 。

附录K 接地材料在不同土壤腐蚀等级环境中的耐腐蚀特性

K.0.1 接地装置应避免发生因电化学反应导致的湿腐蚀。

K.0.2 金属的自然电位序列可根据表K.0.2-1确定，在土层或混凝土内常见金属电极电位可根据表K.0.2-2确定。

表K.0.2-1 金属的自然电位序列表 (25°C)

金属名称	化学符号	电极电位	金属名称	化学符号	电极电位 (V)
钾	K	-2.92	镉	Cd	-0.40
钙	Ca	-2.87	镍	Ni	-0.25
钠	Na	-2.71	锡	Sn	-0.14
镁	Mg	-2.34	铅	Pb	-0.13
铝	Al	-1.67	氢	H	+0.00
锰	Mn	-1.05	铜	Cu	+0.35
锌	Zn	-0.76	银	Ag	+0.81
铬	Cr	-0.71	金	Au	+1.42
铁	Fe	-0.44	—	—	—

表K.0.2-2 在土层或混凝土内常见金属电极电位表

金属名称	电解液	对铜/硫酸铜参比电极的电位 (V)
铅	土层湿度	-0.5~-0.7
铁, 钢	土层湿度	-0.5~-0.8
生锈的铁	土层湿度	-0.4~-0.6
生锈的铸铁	土层湿度	-0.2~-0.4
锌, 包括热浸镀锌铁	土层湿度	-0.7~-1.0
铜	土层湿度	±0.0~0.2
混凝土内铁	水泥湿度	-0.1~0.3

K.0.3 土壤腐蚀性影响因素及评价指数应符合表K.0.3-1的规定。土壤腐蚀性评价应符合表K.0.3-2的规定。土壤评价指标分析方法应符合现行行业标准《接地网土壤腐蚀性评价导则》DL/T 1554的有关规定。

表K.0.3-1 土壤腐蚀性影响因数及评价指数

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

续表 K.0.3-1

土壤类型	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
	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 (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 (mmol/kg)	>1000	+2
	>200 且 ≤ 1000	+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

续表 K.0.3-1

硫酸盐总量 (mg/kg)	<200	0
	≥200 且<500	-1
	≥500 且<1000	-2
	≥1000	-3

表K.0.3-2 土壤腐蚀性评价

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

K.0.4 应采取以下措施防止接地体被电化学腐蚀:

- 1 在土壤中敷设的接地体宜用混凝土包围。
- 2 使用铜金属作为接地体, 不应再与其他金属接地体相连。
- 3 可采用阴极保护的方式保护接地装置发生电化学腐蚀。

K.0.5 根据多因子土壤腐蚀分级方法, 接地材料在不同土壤腐蚀等级环境中的最大腐蚀速率可按表K.0.5-1取值。接地材料在不同土壤腐蚀等级中的使用寿命可按表K.0.5-2取值。

表 K.0.5-1 接地材料在不同土壤腐蚀等级环境中的最大腐蚀速率参考值 (mm/a)

接地材料	1 (微)	2 (弱)	3 (中)	4 (强)
钢	0.01000	0.02500	0.06500	0.0900
热浸镀锌钢	0.00500	0.01000	0.01800	0.0450
304 不锈钢	0.00002	0.00004	0.00006	0.0001
铜覆钢	0.00100	0.00300	0.00700	0.0120
铜	0.00100	0.00300	0.00700	0.0120

表 K.0.5-2 接地材料在不同腐蚀等级中的使用寿命 (a)

接地材料	1 (微)	2 (弱)	3 (中)	4 (强)

碳钢	>100	≈40	≈15	≈10
热浸镀锌钢	>100	≈50	≈20	≈12
锌包钢	>100	≈100	≈55	≈20
铜层厚度 0.25mm 的铜覆钢	>50	≈83	≈35	≈20
铜层厚度 0.50mm 的铜覆钢	>100	>100	≈70	≈40
铜层厚度 0.80mm 铜覆钢	>100	>100	>100	≈66
304 不锈钢	>100	>100	>100	>100

注：1 碳钢以预留腐蚀裕度1mm计算。

2 热浸镀锌的锌层厚度以85μm计算。

3 锌包钢的锌层厚度以1mm计算。

本规范用词说明

- 1** 为便于在执行本条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：
 - 1)** 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。
 - 2)** 表示严格，在正常情况下均应这样做的：
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。
 - 3)** 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。
 - 4)** 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。
- 2** 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《交流电气装置的接地设计规范》 GB/T 50065
- 《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》 GB 50169
- 《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法》 GB/T 13912
- 《低压电气装置 第4-43部分：安全防护 过电流保护》 GB/T 16895.5
- 《气体绝缘金属封闭开关设备配电装置设计规范》 NB/T 35108
- 《接地装置特性参数测量导则》 DL/T 475
- 《电力工程接地装置用放热焊剂技术条件》 DL/T 1315
- 《接地网土壤腐蚀性评价导则》 DL/T 1554

行业标准信息服务平台

中华人民共和国能源行业标准

水力发电厂接地设计技术规范

NB/T 35050—2023

代替 NB/T 35050-2015

条文说明

行业标准信息服务平台

修订说明

《水力发电厂接地设计技术规范》NB/T 35050-2023，经国家能源局2023年12月28日以第8号公告批准发布。

本规范是在《水力发电厂接地设计技术导则》NB/T 35050 -2015的基础上修订而成，上一版的主编单位是中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，主要起草人员是王耀辉、吴建生、李强、余丹、罗晓雪、庞芝碧、李勇、侯彦硕。

本规范修订过程中，编制组进行了广泛的调查研究，总结了我国水力发电厂接地设计技术的实践经验，参考了国内外相关标准，向国内大中型水力发电厂业主和各相关设计院征求意见，并对人身和设备安全以及分流系数进行了专题研究。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规范时能正确理解和执行条文规定，《水力发电厂接地设计技术规范》编制组按章、节、条顺序编制了本规范的条文说明，对条文规定的目的一、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与规范正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规范规定的参考。

行业标准信息服务平台

目 次

2 术语.....	90
3 基本规定.....	91
3.1 设计原则.....	91
3.3 保护接地.....	92
3.4 防雷接地.....	92
3.5 防静电接地.....	93
4 接地阻抗.....	94
4.1 有效接地系统的接地阻抗.....	94
4.3 低压系统的接地阻抗.....	95
4.4 杆塔的接地阻抗.....	95
5 降低接地阻抗的措施.....	96
5.1 水下接地网.....	96
5.2 引外接地网.....	96
5.3 深井接地.....	96
5.4 其他.....	97
6 接地电阻计算.....	98
6.1 工频接地电阻计算.....	98
6.2 冲击接地电阻计算.....	98
7 均压网设计及计算.....	99
7.1 均压网设计.....	99
7.2 接触电位差和跨步电位差允许值.....	101
7.3 接触电位差和跨步电位差计算.....	102
8 转移电位隔离.....	103
9 设备接地特殊要求.....	105
9.1 GIS 接地和 GIL 接地.....	104
9.2 离相式封闭母线接地.....	106
9.3 高压电缆线路接地.....	106
9.4 主变压器接地.....	106
9.5 控制、保护、通信及监测系统接地.....	106
9.9 便携式电力设备接地.....	107
9.10 其他.....	107
10 接地装置.....	108
10.1 自然接地体.....	108
10.2 人工接地体.....	108
10.3 接地导体连接.....	108

10.4 接地标志.....	109
11 接地导体选择及防腐.....	110
11.1 截面选择及计算.....	110
11.2 接地体防腐.....	113
12 土壤电阻率和接地装置工频参数测量.....	115
12.1 土壤电阻率测量要求.....	115
12.2 工频接地阻抗测量.....	115
12.3 接触电位差和跨步电位差测量.....	116
附录 B 非均匀土壤中接地网接地电阻的计算.....	117
附录 C 非均匀土壤中接地网接地电阻的计算.....	118
附录 K 接地材料在不同土壤腐蚀等级环境中的耐腐蚀特性.....	119

行业标准信息服务平台

2 术 语

本规范的术语仅保留水电行业专用术语，接地、系统接地、保护接地、雷电保护接地、防静电接地、接地极、接地导体、接地系统、接地装置、接地网、集中接地装置、接地阻抗、工频接地电阻、冲击接地电阻、地电位升高、接触电位差、最大接触电位差、跨步电位差、最大跨步电位差、转移电位、外露可导电部分、外界可导电部分、中性导体、保护导体、保护中性导体、等电位联结、保护总等电位联结系统、直流偏移、接地故障对称电流有效值、接地故障不对称电流有效值、衰减系数、接地网最大入地电流、接地网入地对称电流、故障电流分流系数、接地故障电流持续时间、放热焊接的定义见《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065-2011中第2章中术语有关内容。

3 基本规定

3.1 设计原则

3.1.5 鉴于混凝土内的接地导体不易腐蚀，但引出混凝土部分的接地导体需要考虑腐蚀的情况，因此设计时可根据工程实际情况自行考虑在混凝土内的接地体是否采用普通扁钢。选择接地装置材料的出发点是接地网在水力发电厂的设计使用年限内要做到免维护。其尺寸要综合考虑接地故障电流热稳定的要求，也要考虑水力发电厂在设计使用年限内导体的腐蚀总量。材料的选择需由综合的技术经济分析确定。接地导体或导线材料一般采用热浸镀锌钢。热浸镀锌钢的镀锌层必须采用热浸镀锌的方法，且镀层要有足够的厚度，以满足接地装置设计使用年限的要求。已有的研究表明，土壤电阻率、类别、含盐量、酸碱度和含水量等因素会导致钢材质接地装置的腐蚀。确定水力发电厂厂址土壤的腐蚀率是确定接地装置截面尺寸的基础。接地设计需要按厂址当地土壤腐蚀条件选择适当的材料和防腐蚀措施。接地网采用铜材一般认为较贵。然而铜材比钢材耐腐蚀性能要好，在腐蚀等级较高地区不用钢而代之以铜是合理的。去掉原导则中中性或酸性土壤环境推荐采用热浸镀锌钢的说法。仅就铜而言，铜在酸性土壤环境腐蚀速率略大于同腐蚀等级的中性和碱性土壤环境。但从国家自然腐蚀平台腐蚀数据和国家电网公司项目研究得到， $pH \leq 4.5$ 的土壤环境，铜依然具备非常优异的耐腐蚀性能，其耐腐蚀性是热浸镀锌钢的5-10倍。因此铜与钢对比在各种类型的腐蚀环境下其耐腐蚀性均优于钢。本次修订去掉原导则中高土壤电阻率地区采用铜质导体的说法，在低土壤电阻率地区往往土壤腐蚀也较为严重，因此采用铜材质的作用主要是防腐。

3.1.6 本条文为原导则第3.1.9条的修改条文。

接地干线为分布在不同区域的接地网之间起连接作用的重要导体。各个自然接地网和人工接地网，需要至少用两根接地干线连接，以构成全厂的接地网。

水力发电厂水下接地网一般是主接地网中接地阻抗较低的部分，若有其余接地阻抗较低的外引接地网，也可以与水轮发电机组、主变压器、开关站设备等电厂主设备所处在区域接地网采用铜导体连接。其余接地干线建议采用不小于 $50mm \times 6mm$ 的热浸镀锌扁钢、直径20mm的圆钢或截面 $120mm^2$ 的铜等。目前抽蓄项目使用铜覆钢情况较多，因此增加铜覆钢相关规定。

3.3 保护接地

3.3.1 原导则第3.1.6条第1款的修改条文。保护接地线简称PE线。

10 可以将接地导体如扁钢延伸引至金属门窗附近后采用黄绿铜绞线与门窗连接。

13 油、气、水系统设备的金属部分与接地网保持电气连通，管道之间法兰可以采用跨接线连接。油、气、水系统设备的金属管道建议不大于30m设置一处保护接地。

3.3.2 本条文为原导则第3.1.6条第2款的修改条文。

安装在金属架构上的设备要保证与构架保持良好的电气接触，如套管、支柱绝缘子等。

3.3.3 本条文为原导则第3.1.6条第3款的修改条文。

3.4 防雷接地

3.4.1 集中接地装置可以是垂直接地极，也可以是水平接地极，两种方式均能起到降低冲击接地阻抗的作用。

3.4.2 原导则第3.1.7条第2款修改条文。避雷器安装在不同位置情况下可采取的不同的降低冲击接地阻抗的措施。在能够设置集中接地装置的情况下需要设置集中接地装置；但在无法设置集中接地装置时，需要采取相应的措施，比如布置在GIS室内或屋顶出线场户外的避雷器，在GIS室或屋顶出线场位于楼板上时由于无法设置垂直集中接地装置，可就近与楼板上的接地网相连，连接处增设水平集中接地装置，并尽可能以最近距离与地下洞室的锚杆或者地面集中接地装置连接。

3.4.5 新增条文，水力发电厂地面主厂房采用金属屋顶较多，水力发电厂常用的避雷针、避雷带对于金属屋顶均不适用，主要原因在于金属屋面较薄的金属板无法承载高大沉重的避雷针，设置避雷带又容易破坏金属屋面的防水特性，针对这种情况，并且鉴于金属屋面自身的导电属性，可以采用金属屋面自身作为接闪器实现防雷功能。本条根据国家标准《建筑物防雷设计规范》GB 50057-2010修改而来。

近年来，经常采用一种夹有非易燃物保温层的双金属板做成的屋面板，俗称彩钢板。在这种情况下，只要上层金属板的厚度满足本条第2款的要求即可，因为雷击只会使上层金属板融化物穿孔，要强调的是，夹层的物质是非易燃物且选用高级别的阻燃类别。

薄的油漆保护层不属于绝缘被覆层。

3.5 防静电接地

原导则第 3.1.8 条的修改条文。由于水力发电厂有桥机轨道、主变轨道等轨道，本节增加轨道的规定。

行业标准信息服务平台

4 接地阻抗

4.1 有效接地系统的接地阻抗

4.1.4 由于我国电网的发展,系统短路容量迅速扩大,在一般情况下系统接地故障后流经水力发电厂接地网的电流 I_G 已达 10kA 甚至更高。因此原导则 $R \leq 2000/I$ 的要求很难满足。本次修编,参考有关科研成果和国内外标准以及工程经验等将水力发电厂接地网地电位升高允许值适当地加以提高,但要以符合本规范第 4.1.4 条的要求为前提。根据规范修订时编制的《水力发电厂接地网安全设计要求专题报告》研究成果,当低压和控制保护设备全部位于站内并且与站外没有电气连接,或者引出到站外但采取了足够的隔离措施后,需要按照站外引入的备用电源的避雷器的额定电压确定地电位升限值。当电厂采用 10kV 厂用电系统时,水力发电厂接地装置电位升限值超过 8kV 的情况下,或当电厂采用 6kV 厂用电系统时,水力发电厂接地装置电位升限值超过 5kV 的情况下,避雷器建议选择通流容量大,复合外套,并设置压力释放口。

施工完毕,进行现场实测并绘制电位分布曲线时,重点绘制 GIS 楼和主变室等高压配电装置分布的区域。

一般的控制保护电缆 2s 工频耐受电压不小于 5kV。控制保护设备,如综合自动化设备,其工频绝缘耐受电压为 2kV、1min。从安全出发,二次系统的绝缘耐受电压取 2kV。为了保证设备安全,要计算整个均压网内电位差,网内电位差不超过 2kV 时控制保护设备是安全的。其余高压设备耐压水平一般高于控制保护设备耐压水平,因此其他设备也是安全的。

依据国家标准《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065-2011,水力发电厂接地网地电位升高直接与二次系统的安全性相关。系统发生接地故障时接地网中流动的电流,将在控制保护电缆的芯线—屏蔽层之间、或控制保护设备的信号线或电源线与地之间产生电位差。当此电位差超过控制保护电缆或控制保护设备绝缘的工频耐受电压时,控制保护电缆或设备将会发生绝缘破坏。因此,要将二次电缆两端的网内电位差控制在二次系统安全值之内。

4.3 低压系统的接地阻抗

4.3.2 在中性点直接接地的单电源低压电力网中，中性线在电源处接地，负荷切除时若采用 4 极开关 N 线会断开，造成不接地运行而危及人身和设备安全。

4.3.4 利用大地作相线或中性线可能产生触电危险。

4.4 杆塔的接地阻抗

4.4.4 接户线的绝缘子铁脚接地目的为防止雷电波从低压架空线路侵入建筑物。由于连续多杆自然接地作用，土壤电阻率在 $200\Omega\cdot m$ 及以下地区的铁横担钢筋混凝土杆线路，不另设人工接地装置。

5 降低接地阻抗的措施

5.1 水下接地网

5.1.2 原导则修改条文，将动水区域和静水区域分开规定，对于动水区域要求采用打插筋锚固焊接固定水下接地网的方式，增加静水区域接地网可以选用的固定方式。

5.1.3 新增条文，对于抽水蓄能电厂，利用上库降低接地阻抗是很有必要的，但部分蓄能电厂上水库会采取全库盆沥青混凝土防渗结构，接地网设置在沥青混凝土防渗结构以上无法起到降阻作用，接地网设置在沥青混凝土防渗结构以下有一定的降阻作用。

5.1.4 原导则 5.1.3 条修改条文，水力发电厂水下接地网通常与坝区和厂外接地网结合设置，难以与其余部位接地网保持足够距离，因此去掉水下接地网与其他接地网保持足够的距离的规定。

5.2 引外接地网

5.2.1 原导则的修改条文，低土壤电阻率区域指该区域土壤电阻率比电厂枢纽区接地网所处位置的土壤电阻率更低。

5.2.2 原导则的修改条文，目的是让引外接地网充分起到降低接地阻抗的作用，减小水力发电厂接地网至引外接地网之间的阻抗，提高引外接地网的利用效果。

5.3 深井接地

5.3.1 新增条款，由于深井接地极造价较高，采用深井接地极时要充分考虑其对工程经济性的影响。

5.3.2 原导则第5.3.1条的修改条文，地下深处土壤电阻率较低或有地下水，而地表层土壤电阻率很高时，采用深井接地对减少接地装置接地电阻的效果较为明显。

5.3.3 原导则第5.3.1条的修改条文，深井接地体水平间距大于埋设深度2倍，以减少相互屏蔽影响，提高各接地体的利用率。

5.3.4 原导则第 5.3.3 条的修改条文。

5.3.5 新增条款，利用桩基废孔或地勘探洞可大大降低深井接地极的造价。对桩基废孔或地勘探洞可以在施工时增加保护措施，便于后期利用。深井接地施工时注意施工质量，尽量降低深井接地极与土壤的接触电阻。施工工艺可以参照行业标准《电力工程用缓释

型离子接地装置施工工艺导则》DL/T 2309-2021。

5.3.6 新增条款，采用该方式能增强深井接地的降阻效果。

5.4 其他

5.4.2 原导则第 5.4.2 条的修改条文。经水浸泡实际试验后，膨润土在失水状态时，形成多条贯穿性不规则裂缝，不符合国家标准《雷电防护系统部件（LPSC）第 7 部分：接地降阻材料的要求》GB/T 33588.7-2020 所规定的水浸泡试验后无裂缝发生；不符合行业标准《接地降阻材料技术条件》DL/T 380-2010 所规定的降阻材料敷设到接地体周围后需要与接地体接触良好，不能产生永久的裂纹。本次修订取消膨润土作为置换材料的规定。物理降阻剂一般由焦炭、石墨和导电水泥等组成。

6 接地电阻计算

6.1 工频接地电阻计算

6.1.1~6.1.4 决定接地装置工频地电位升限值的是接地阻抗，但由于目前缺乏接地阻抗的电抗部分的计算方法，因此 6.1.1 至 6.1.4 条仍保留原导则的接地电阻计算方法，在某些情况下可以用接地电阻计算公式来估算接地装置的接地阻抗。

6.1.5 原导则修改条文，考虑到大（1）型及以上规模的水力发电厂通常接地网分布较广且布置较为复杂，采用公式计算接地阻抗与实际接地阻抗相差较大，大（1）型及以上水力发电厂接地网工频接地阻抗推荐采用程序仿真计算方法计算，水力发电厂等级划分见行业标准《水电工程等级划分及洪水标准》NB/T 11012-2022。接地阻抗计算时需要考虑水力发电厂无水、低水位、初期发电等各种情况对电厂接地阻抗的影响。

6.2 冲击接地电阻计算

6.2.2 由于独立避雷针与配电装置带电部分、发电厂电气设备接地部分、构架接地部分之间的空气中距离与冲击接地电阻相关，避雷线的接地装置与发电厂或变电站接地网的地中距离校验与避雷线的冲击接地电阻相关，因此需要计算冲击接地电阻。具体规定见国家标准《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》GB/T 50064—2014 第 5.4.11 条。

7 均压网设计及计算

7.1 均压网设计

7.1.2 均压网一般根据现场土建布置情况设置，根据现场土建情况可以设置为等间距或不等间距。

7.1.3 本条是对一般情况下土壤中均压网埋设深度的要求，需要根据工程实际情况确定均压网的埋设深度。比如敷设在楼板内的均压网，敷设在楼板混凝土面层钢筋以下；敷设在冻土层地区的均压网，根据所处地的实际情况敷设在冻土层以下。

7.1.4 由于实际应用中，主要使用沥青，未使用渣油，因此表 7.1.4-1 中删除原导则中渣油相关规定。表 7.1.4-2 中路面结构层电阻率为人工材料，其电阻率与本规范附录 E 中天然材质的电阻率不同。

7.1.5 新增条文，经过武汉大学实测发现，混凝土干湿状态电阻率差异较大，而且影响混凝土电阻率的因素有水灰比、矿物掺和料用量、氯离子含量、环境温度和环境湿度等诸多因素，因此 110kV 及以上高压配电装置附近户外路面设计使用混凝土易造成跨步和接触电位差允许值较低，建议结合高压配电装置布置提前设计高电阻率的路面材料。

7.1.7 当采用等间距布置的方格网孔均压网时，边角网孔处接触电位差最大，采用如图 7-1 所示的辅助均压带沿地网对角线方向将边角网孔对角相连，使最大接触电位差、跨步电位差降低。

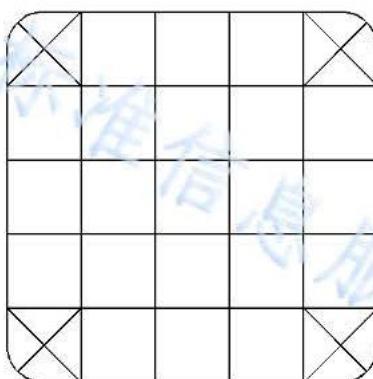
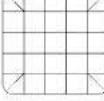
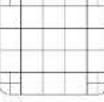
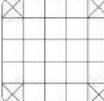


图 7-1 边角网孔辅助均压带示意图

经程序仿真计算，多种辅助均压带降低接触电位差和跨步电位差的效果如表 7-1 所示，由于接触电位差限制值比跨步电位差低，因此主要关注接触电位差的降低效果。

表 7-1 不同方式的辅助均压带相比不增加辅助均压带的电位差变化

辅助均压带方式	辅助均压带示意图	接触电位差	跨步电位差
方式 1		100.0%	100.0%
方式 2		77.8%	119.2%
方式 3		74.5%	130.8%
方式 4		73.0%	117.9%
方式 5		71.9%	120.3%

7.1.9 原导则第 7.1.8 条修改条文, 围墙或护栏设置在均压网外 0.5m 外, 考虑人手接触的距离为 0.5m。不采用金属围栏更便于操作, 若在围墙或护栏与均压网边缘之间设置检修道路建议采用沥青或碎石等高电阻率路面。围墙或护栏与均压网关系示意图见图 7-2。

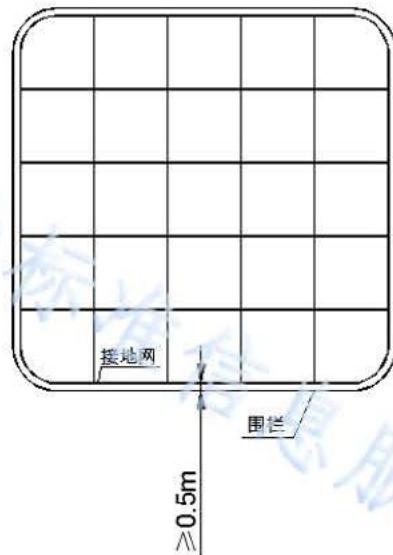


图 7-2 均压网四周设置围墙或护栏示意图

7.2 接触电位差和跨步电位差允许值

7.2.1 根据《交流变电站接地安全导则》IEEE Std80-2013, 人可承受接触电位差和跨步电位差的限值分别为:

$$E_t = (R_B + \frac{R_f}{2})I_B \quad (7-1)$$

$$E_s = (R_B + 2R_f)I_B \quad (7-2)$$

式中: R_B ——人体的电阻 (Ω);

R_f ——人脚站在土壤电阻率为 ρ_s 的地面上时的电阻 (Ω);

I_B ——人体可承受的最大交流电流有效值 (mA)。

人体的电阻 R_B (Ω) 变动范围很大。《交流变电站接地安全导则》IEEE Std80-2013 选用 1000Ω 。我国 1979 年水利电力部颁《电力设备接地设计技术规程》 SDJ8-79 一直采用 1500Ω 。人脚站在土壤电阻率为 ρ_s 的地面上时的电阻 R_f (Ω) 可视为一个直径 16cm 金属板置于地面上的电阻。该电阻经计算为 $3\rho_s$ 。

根据国外学者的研究, 人体可承受的最大交流电流有效值 I_B (mA) 由下列 2 式决定:

对于体重 50kg 的人:

$$I_B = \frac{116}{\sqrt{t_s}} \quad (7-3)$$

对于体重 70kg 的人:

$$I_B = \frac{157}{\sqrt{t_s}} \quad (7-4)$$

式中: t_s ——通过人体电流的时间 (s)。

于是人可承受接触电位差和跨步电位差的限值分别为:

$$E_t = \frac{116}{\sqrt{t_s}} (1500 + 1.5\rho_s) = \frac{174 + 0.17\rho_s C_s}{\sqrt{t_s}} \quad (7-5)$$

$$E_s = \frac{116}{\sqrt{t_s}} (1500 + 6\rho_s) = \frac{174 + 0.7\rho_s C_s}{\sqrt{t_s}} \quad (7-6)$$

在上 2 式中人体电阻取 1500Ω , 人体体重按 50kg 考虑, 人体可承受的最大交流电流有效值 I_B (mA) 依式 (7-3) 取值。

式(7-5)与(7-6)即我国《交流电气装置的接地》DL/T 621-1997中3.4中的式(1)和式(2)。其实此种要求,早在1984年已被列入水利电力部颁发的《500kV电网过电压保护绝缘配合与电气设备接地暂行技术标准》SD119 84中。迄今已执行逾39年,是安全可行的。

接地故障电流持续时间 t_s 可按本规范附录J规定的 t_d 进行计算。

7.3 接触电位差和跨步电位差计算

7.3.3 原导则的修改条文,修改接触电位差符号。不承担散流的接地网,接触电位差比较小,不会达到公式计算的最大接触电位差。

7.3.4 原导则的修改条文,修改接触系数符号。

7.3.5 原导则的修改条文,修改跨步电位差符号。

7.3.6 原导则的修改条文,修改跨步系数符号。

8 转移电位隔离

8.0.1 原导则第 8.1 条的修改条文，在接地短路故障时与水电厂接地网相连的低压中性线、通信线路和金属管道、铁轨等导体将可能随地网产生高电位，为避免将高电位传递到厂外或将厂外零电位引进厂内而产生的危险电位差，危及人身和设备的安全，因此按照工程的实际情况采取相应的转移电位隔离措施。

8.0.2 原导则第 8.2 条的修改条文，中压供电线路采用架空出线无中性线，不会产生转移电位的情况。低压架空出线的中性线只在接地网外的用户中性线处接地，可避免接地网高电位引出。引出的电力电缆金属铠装具有转移电位的风险，一般不推荐采用，如特殊情况采用了带金属铠装的电缆，需敷设固定后进行剥铠处理。低压电力电缆可采用全塑电缆，而中压电力电缆的金属屏蔽层可在接地网外采用单端接地的方式，电缆在接地网内终端视感应电压大小进行绝缘并隔离处理。

依据国家标准《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065-2011，当厂用变压器向厂外低压用户供电时，由于厂用变压站外壳已连接至水力发电厂接地网，为此需要避免水力发电厂接地网过高的地电位升高对厂用变压器低压绕组造成反击。一般条件下，10/0.4kV 厂用变压器的 0.4kV 侧的短时交流耐受电压仅为 3kV，例如国家标准《电力变压器 第 11 部分：干式变压器》GB/T 1094.11-2022 对 0.4kV 侧的短时交流耐受电压就规定为该值。为此当接地网地电位升高超过 2kV 时规定：10/0.4kV 厂用变压器的 0.4kV 侧的短时交流耐受电压比水力发电厂接地网地电位升高超出 40%，以确保水力发电厂接地网地电位升高不会反击至低压系统。由于实际执行中厂用变压器订货阶段厂家通常无法按照本规定执行，且在厂外使用便携式柴油机供电也较为便利，因此删除原导则对于配电变压器低压绕组绝缘水平校验的相关要求。接地网地电位升高超过 2kV 情况下，不推荐采用这种供电方式。

8.0.3 原导则第 8.3 条的修改条文，明确了引出金属水管隔离的具体要求。为保障人员安全，水力发电厂引出接地网外如水厂需要引外金属水管时，在该情况下在接地网边缘对水管采取的措施可以参考本条的规定。

在发生接地短路故障期间，与接地网相连并引出到厂外的金属水管会将电厂地电位升引出到厂外，存在安全风险。若金属水管架空布置，并采用绝缘支架等措施使水管对地绝缘，则最严苛工况为人体在距离电厂较远的位置（人体位于零电位点）接触水管。

由于金属管的电阻远小于绝缘段内的水体电阻，地电位升将由绝缘管段内的水体和人体共同承担。为将流过人体的接触电流控制在安全限值以内，要满足下式：

$$I_b = \frac{E_w}{R_H + 1.5\rho + \rho_w \frac{L}{\pi(D/2)^2}} \leq \frac{0.116}{\sqrt{t_d}} \quad (8-1)$$

式中： I_b ——流过人体的接触电流 (A)；

L ——为绝缘段长度 (m)；

ρ ——为金属管道沿线的最低土壤电阻率 ($\Omega \cdot m$)。

为便于工程应用，保守起见，忽略人脚接地电阻，则所需的最短绝缘段长度为下式计算值：

$$L_{\min} = \frac{\pi D^2}{4\rho_w} \left(\frac{E_w \sqrt{t_d}}{0.116} - R_H \right) \quad (8-2)$$

若金属水管埋地敷设，设置的水管绝缘段会导致绝缘段附近的跨步电位差和接触电位差增大，绝缘段的长度需要保证跨步电位差在安全限值以内，并避免绝缘段外接触电位差超标的水管被人员接触。计算条件取较严苛工况：水管内径 200mm，水体电阻率 $20\Omega \cdot m$ ，土壤电阻率 $500\Omega \cdot m$ ，电能由 500kV 线路送出，电厂最大地电位升 8000V。计算不同接地网面积下需要的绝缘段长度及接触电位差超标的范围，所需的最大绝缘段长度为 16.5m，避免人员接触的水管长度为 30m，考虑一定裕度，建议绝缘段长度不小于 20m。

8.0.4 原导则第 8.4 条的修改条文。

8.0.5 原导则第 8.5 条的修改条文，对于与水力发电厂连接的通信线路，也要考虑地电位升高的高电位引出及其隔离措施。目前水力发电厂的通信线路一般采用光缆通信线路，此时不予考虑隔离措施。如采用通信电缆引外时，接入隔离变压器限制接地网地电位转移，并提出隔离变压器两线圈间的工频耐压应高于接地网地电位升的要求。

9 设备接地特殊要求

9.1 GIS 接地和GIL接地

9.1.1 原导则第 9.1.1 条的修改条文。

9.1.2 新增条文，根据行业标准《气体绝缘金属封闭开关设备配电装置设计规范》NB/T 35108-2018 第 8.1.3 条修改和第 8.2.2 条新增。

9.1.3 原导则第 9.1.3 条的修改条文。

9.1.4 原导则第 9.1.4 条的修改条文，增加 GIL 相关规定，并根据行业标准《气体绝缘金属封闭开关设备配电装置设计规范》NB/T 35108-2018 第 8.1.7 条及根据国家标准《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》GB 50169-2016 第 4.3.10 条增加跨接线描述。

9.1.5 新增条文，根据行业标准《气体绝缘金属封闭开关设备配电装置设计规范》NB/T 35108-2018 第 8.2.3 条新增。

9.1.6 根据国家标准《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065-2011 第 4.4.2 条和第 4.4.5 条进行修订。若 GIL 外壳一端与地绝缘，在没有接地的一端安装非线性电阻作为保护装置，非线性电阻作用为降低瞬态电压的影响。

9.1.7 为了避免 GIS 外壳电流通过电缆金属单屏蔽外皮构成回路，GIS 设备低压动力电缆和控制电缆的所有单屏蔽电缆外皮需要采用单点接地。

9.1.8 原导则第 9.1.6 条的修改条文，新增 GIL 要求。专用接地母线功能为防止故障时人触摸该设备的金属外壳遭到电击、释放分相式设备外壳的感应电流和快速流散开关设备操作引起的快速瞬态电流。

9.1.9 母线各段外壳之间电位差在接触电位差允许值以内。

9.1.10 GIS 设备接地设计需要考虑到的因素，隔离开关操作时伴随的外壳暂态电压升高不能使隔离开关外壳与周围导体接触电位差超过允许值。

9.1.11 地埋式 GIL 有可能采用主动防腐措施，根据国家标准《额定电压 72.5kV 及以上刚性气体绝缘输电线路》GB/T 22383-2017，GIL 接地设计与防腐措施统一考虑。

9.2 离相式封闭母线接地

9.2.3 原导则条文的修改条文。

9.3 高压电缆线路接地

9.3.2 原导则第 9.3.4 条的修改条文，根据国家标准《电力工程电缆设计标准》GB 50217-2018 第 4.1.11 条修改。

9.3.3 原导则第 9.3.3 条的修改条文，根据国家标准《电力工程电缆设计标准》GB 50217-2018 第 4.1.12 条第 1 款修改。

9.3.4 原导则第 9.3.6 条的修改条文，根据国家标准《电力工程电缆设计标准》GB 50217-2018 第 4.1.12 条第 2 款修改。

9.3.5 原导则第 9.3.6 条的修改条文，根据国家标准《电力工程电缆设计标准》GB 50217-2018 第 4.1.12 条第 3 款修改。根据行业标准《水力发电厂交流 110kV-500kV 电力电缆工程设计规范》NB/T 10498-2021，建议互联保护单位段长差不超过 50m。

9.4 主变压器接地

9.4.1 原导则第 9.4 节的修改条文。

9.4.2 新增条款，根据《国家电网有限公司十八项电网重大反事故措施》2018 年修订版新增。

9.4.3 新增条款，~~铁心、夹件分别引出接地的变压器，接地引下线需要与主变压器油箱绝缘以便在运行时监测接地线中是否有环流，当运行中环流异常变化时，需要尽快查明原因，严重时需要采取措施及时处理。~~

9.4.4 新增条款，主变压器油箱通常设置了专用的接地端子，本条规定明确了油箱接地要求。

9.5 控制、保护、通信及监测系统接地

9.5.2 原导则第 9.5.2 条的修改条文。电气二次屏柜集中布置区域为电气二次盘柜紧密排列成排布置的区域。根据《国家电网有限公司十八项电网重大反事故措施》2018 年修订版新增。

9.9 便携式电力设备接地

9.9.1 根据国家标准《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》GB 50169-2016 第 4.13.1 条规定修编。

9.10 其他

9.10.1 原导则第 10.3.4 条修改条文，主要描述发电机中性点接地要求。

9.10.2 原导则第 9.3.7 条的修改条文。

9.10.3 原导则第 9.4 节的修改条文，原导则中主设备是指户外高压配电装置。

9.10.4 新增条款，根据《国家电网有限公司十八项电网重大反事故措施》2018 年修订版新增。为避免干式空心电抗器的强磁场对周围金属构件的影响，周围金属构件不构成闭合回路，以免产生感应电流而引起发热。

9.10.5 原导则第 10.3.5 条修改条文。

10 接地装置

10.1 自然接地体

10.1.1 原导则第 10.1.1 条的修改条文。

10.1.2 原导则第 10.1.3 条的修改条文。

10.1.3 原导则第 10.1.4 条的修改条文。

10.1.4 原导则第 10.2.1 条的修改条文。交流电力设备接地所利用的自然接地体可以是金属构件、普通钢筋混凝土构件的钢筋和穿线的钢管。根据国家标准《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范附》GB 50169-2016 第 4.1.8 条规定去掉原导则规定的电缆的铅、铝外皮作为接地线的规定。

10.1.5 原导则第 10.2.2 条的修改条文。具体执行时可参考国家标准《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范附》GB 50169-2016 第 4.1.8 条规定。

10.2 人工接地体

10.2.1 新增对人工接地体的总体要求。

10.2.2 原导则第 10.1.5 条的修改条文。人工接地体增加了铜覆钢及其使用条件。

10.2.3 原导则第 10.1.7 条的修改条文，一般架空电力线路杆塔接地极为放射形，其长度根据土壤电阻率确定，本条增加仅在架空电力线路杆塔接地极规定放射形接地体每根的最大长度限制。

10.2.4 原导则第 10.1.6 条的修改条文，垂直接地体多用在防雷接地。

10.2.5 原导则第 10.2.4 条的修改条文。

10.2.6 原导则第 10.2.5 条的修改条文。

10.3 接地导体连接

10.3.1 原导则 10.3.1 条的修改条文。

根据行业标准《电力工程接地装置用放热焊剂技术条件》DL/T 1315-2013 修改。扁钢与扁钢搭接其搭接长度为较大扁钢宽度的 2 倍，圆钢与圆钢搭接其搭接长度为较大圆钢直径的 6 倍，圆钢与扁钢搭接其搭接长度为圆钢直径的 6 倍。根据本规范附录 H, 0.3s 为 20 个工频周波持续的时间。

原导则第 10.3.1 条第 2 款的修改条文。

铜绞线的连接方式目前主要采用的有放热焊接和螺接两种，放热焊接施工工艺复杂、施工环境要求高，螺接方式施工条件相对简单，目前主接地网通常采用放热焊接方式，与设备连接通常采用螺接方式，以方便与设备的连接或者断开。

螺栓连接搭接面处理需要符合国家规范《电气装置安装工程 母线装置施工及验收规范》GB 50149-2010 中表 3.2.2 的相关要求。

10.3.2 原导则第 10.3.3 条的修改条文。表计、阀门的跨接在本规范第 3.5 节防静电接地中表述。

10.3.3 原导则第 10.3.6 条的修改条文。

10.3.4 原导则第 10.3.7 条。

10.4 接地标志

10.4.1 原导则第 10.4.1 条的修改条文。

10.4.2 原导则第 10.4.2 条的修改条文。

10.4.3 原导则第 10.4.3 条的修改条文。

11 接地导体选择及防腐

11.1 截面选择及计算

11.1.1 此条为原导则第 11.1.1 条的修改条文, 根据国家标准《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065-2011 的 4.3.4 条而来, 增加了铜覆钢接地材料尺寸的规定。表 11.1.1-1 中参考欧洲标准 EN 50164-2 Lightning Protection System Components (LPSC) – Part 2: Requirements for conductors, earth electrodes and earth electrode accessories《防雷系统组成部分——第二部分: 对导体、接地极和接地极附件的要求》2002, 取消了地上导体分为室内和室外的分法, 只考虑地上和地下两类, 及其对接地极的要求。

近年来铜材和采用电镀、在铜液中连铸等工艺将铜覆于表面的钢材, 在国内也有开放并应用于变电站、水力发电厂接地网工程。表 11.1.1-2 中参考欧洲标准 EN 50164-2 Lightning Protection System Components (LPSC) – Part 2: Requirements for conductors, earth electrodes and earth electrode accessories《防雷系统组成部分——第二部分: 对导体、接地极和接地极附件的要求》和《交流变电站接地安全导则》IEEE Std80-2013 给出了对铜、铜覆钢材料的要求。铜覆圆钢、铜覆钢绞线、铜覆扁钢截面要求根据国家标准《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065-2011 表 4.3.4-2 增加。

11.1.2 原导则第 11.1.2 条的修改条文。根据国家标准《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》GB 50169-2016 第 4.1.4 条第 3 款不推荐采用铝导体作为接地极或接地线, 因此删除铝导体相关内容。

11.1.3 原导则的修改条文。接地线的允许温度, 钢小于等于 400°C 是在以下短路电流持续时间的情况下: 110kV 系统多为一套主保护, 按一级后备保护动作时间为 $t=t_{\text{主}}+t_{\text{后}}+t_{\text{固}}=0.03+0.5+0.07=0.6\text{s}$; 220kV~500kV 多为两套主保护, 按失灵保护动作时间为 $t=t_{\text{主}}+t_{\text{失}}+t_{\text{固}}=0.03+0.3+0.07=0.4\text{s}$; 式中 $t_{\text{主}}$ 为主保护动作时间, $t_{\text{后}}$ 为第一级后备保护时间, $t_{\text{失}}$ 为失灵保护时间, $t_{\text{固}}$ 为断路器固有分闸时间。

接地线短时允许最大温度根据国家标准《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065-2011 附录 E.0.2 修改。

如接地故障持续时间要求更长, 为避免选择更大截面的导体, 允许接地线温度可适当增高至 600°C 。

混凝土钢筋长时间允许温度根据国家标准《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065-2011 的第 4.3.5 条第 2 款, 钢筋等同于敷设在地下的接地导体。

11.1.4 原导则 11.1.3 相关规定, 根据国家标准《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065-2011 的第 4.3.5 条第 3 款修改, 不建议小于连接至改接地装置的接地导体或导线截面的 75%。

11.1.6 原导则第 11.1.6 条的修改条文, 删除铝导体相关规定。

11.1.9 式中 I_{jd} 为流过接地导体或导线计及直流分量的最大接地故障不对称电流有效值 (A)。《交流变电站接地安全导则》 IEEE Std80-2013 中 第 11.3.1 条 的式 (37) 给出了计算热稳定的公式。经推导由其得到热稳定系数 C 值的计算式如下:

$$C = 10 \sqrt{\frac{TCAP}{\alpha_r \times \rho_r} \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)} \quad (11-1)$$

式中: TCAP——单位体积热容常数 (J/cm³°C);

K_0 —— $1/\alpha_0$ 或 $(1/\alpha_0 - T_r)$ (°C);

T_m ——最大允许温度 (°C);

α_r ——温度为参考温度 T_r 时的电阻率温度系数 (1/°C);

ρ_r ——温度为参考温度 T_r 时接地导体的电阻率 ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$);

T_a ——环境温度 (°C)。

按照《交流变电站接地安全导则》 IEEE Std80-2013, 在表 11-1 中给出了用于 C 值计算的有关材料的各种参数。

表 11-1 材料参数

材料	材料导电率 (%IACS)	$T_r = 20^\circ\text{C}$ 时 α_r (1/°C)	0°C 时 K_0 (°C)	熔化温度 (°C)	$T_r = 20^\circ\text{C}$ 时 ρ_r ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	TCAP 热容量 (J/cm ³ °C)
铜, 韧化, 软拉	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.4
铜, 商业, 硬拉	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.4
铜镀钢绞线	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.8
铜镀钢绞线	30.0	0.00378	245	1084	5.86	3.8
铜镀钢棒	17.0	0.00378	245	1084	10.10	3.8
热镀锌钢	10.8	0.00377	245	1510	15.90	3.8
不锈钢棒	9.8	0.00377	245	1400	17.50	4.4

续表 11-1

锌包钢棒	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.9
不锈钢, 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.0

铜材的 C 值与采用的焊接方式密切相关。过去铜材一般采用铜焊焊接, 铜材最大允许温度 T_m 取 450°C 。参照表 11-1 中的材料参数、并取环境温度 $T_a=40^{\circ}\text{C}$ 代入上式(11-1) 可得 $C=215.141$, 它与行业标准《交流电气装置的接地》DL/T 621-1997 中的 210 相当接近。

目前铜材焊接方式已有很大进步, 英国接地标准(BS7430-1998: Code of Practice for Earthing) 规定, 非铜焊焊接的铜材采用焊接方式最大允许温度可采用 500°C 、 600°C 直至 700°C 。为节约铜材, 在本规范中对铜材推荐采用放热焊接方式。考虑土壤对铜腐蚀的因素, 正如《交流变电站接地安全导则》IEEE Std80-2013 的第 11.3.3 条 所指出“应该仔细检查导体暴露在腐蚀性土壤性环境的可能性。因为即使合理的导体尺寸和正确的连接方法已经满足标准要求, 仍然需要选择更大的导体尺寸以补偿土壤腐蚀环境中, 导体截面积在接地装置设计寿命内的逐渐减少。”, 并参考 BS7430-1998, 本规范中规定对铜材采用放热焊接方式时的最大允许温度, 视土壤腐蚀的轻重程度经验算可分别取为 900°C 、 800°C 和 700°C 。其相应的 C 值分别为 268、259 和 249。

本规范中还对国内目前已采用的导电率 40% 和 30% 的铜镀钢绞线和导电率 20% 的铜镀钢棒, 按与铜材相同的最大允许温度和表 11-1 中相应的参数给出了它们的 C 值。

至于其他导电率的铜镀钢绞线、铜镀钢棒和采用连铸以及套管冷拉工艺等制造的铜覆钢材料的 C 值, 按产品技术条件提供的材料参数和采用的 T_m 按式 (11-1) 计算确定。

由于铜或铜覆钢材主要用于土壤腐蚀较严重地区, 因此设计时建议按实际腐蚀情况校核所选择的截面并留有相当的裕度, 以确保在设计使用年限内接地导体、导体和接地极的最大温度不高于其熔化温度。

钢的 C 值仍维持行业标准《交流电气装置的接地》DL/T 621-1997 附录 C 中的相应值, 即 70。其对应的最大允许温度分别为 400°C 。

本规范式 (11.1.9) 就是在上述基础上获得的。

还需要强调的是, 当采用放热焊接方式时, 铜或铜覆钢材的最大允许温度已提升较高, 因此要严格遵循放热焊接工艺、使用质量合格的焊接材料, 以确保焊接头的质量。

本规范附录表 J.0.1，来源于国家标准《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065-2011 的附录 E，修订而得。表 J.0.2 来自于国家标准《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065-2011 的附录 E。

11.1.11 新增条款。根据国家标准《旋转电机 定额和性能》GB/T 755-2019 中第 11.1 节要求增加。

11.2 接地体防腐

11.2.2 原导则第 11.2.2 条的修改条文。热浸镀锌扁钢镀锌层厚度根据国家标准《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法》GB/T 13912-2020 表 3 执行，但水力发电厂接地体截面选择不仅仅只考虑镀锌层厚度，而是根据其设计运行年限综合考虑钢和镀锌层厚度以及本规范附录 K 中不同环境下接地体腐蚀速率后选择。根据国家标准《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》GB 50169-2016 第 4.3.3 条修改。

11.2.3 根据近年我国华北电网、江苏、河南和广东等地企业标准或国家电网反事故措施中已明确推荐采用铜材或铜镀钢材料的规定和参考江苏省电力公司 2005 年 6 月发布的《变电站铜质接地网应用导则》相应条款，经技术经济比较，接地体可因地制宜选择。1988 年 8 月投产的华能大连发电厂接地装置采用的材质是退火铜绞线，未采取特殊防腐措施。接地引下线或水平接地极的截面为 $2 \times 150\text{mm}^2$ 和 250 mm^2 两种。垂直接地极为 1.2m 长的镀铜钢棒。虽然该厂的土壤为碱性土壤，未出现问题。广东江门 500kV GIS 变电站接地网水平接地极采用 $4\text{mm} \times 30\text{mm}$ 的扁铜。设备接地引下线采用 $4\text{mm} \times 60\text{mm}$ 的扁铜。已运行 20 多年情况仍然良好。由于扁铜太软，在进行垂直接地极施工时采用铜镀钢棒。接地网采用铜材和铜覆钢材一般认为较贵。然而铜和铜覆钢材比钢材耐腐蚀性能要好，在腐蚀严重地区不用钢而代之以铜将是合理的。

《工业与民用供配电设计手册》(第四版) 第 14.5.3 条，据观测，一般情况下当土壤电阻率不大于 $300\Omega \cdot \text{m}$ 时，对表面未做处理的钢材，年平均最大腐蚀厚度圆钢为 $0.3\text{ mm} \sim 0.2\text{mm}$ 、扁钢为 $0.2\text{ mm} \sim 0.1\text{mm}$ 、热浸镀锌扁钢为 0.065mm ；当土壤电阻率大于 $300\Omega \cdot \text{m}$ 时分别为： $0.3\text{ mm} \sim 0.2\text{mm}$ 、 $0.1\text{ mm} \sim 0.07\text{mm}$ 、 0.065mm 。可供参考。

《电力工程设计手册 火力发电厂电气一次设计》第十五章第六节第一条第(6)款，“热浸镀锌层不应低于 0.070mm ，以满足防止腐蚀的要求。……接地装置的防腐蚀设计，

一般情况下应吸取当地的运行经验，宜按当地的腐蚀数据进行处理，当无当地数据时，可暂按下列数据：1) 热浸镀锌或镀锡的扁钢、圆钢埋于地下的部分，其总厚度的腐蚀速度取 0.065mm/a ，但对焊接处需涂防腐材料。2) 无防腐措施的接地线，其两侧总厚度的腐蚀速度取值如下： $\rho=50\Omega\cdot\text{m}\sim300\Omega\cdot\text{m}$ 地区，扁钢取 $0.1\text{ mm/a}\sim0.2\text{mm/a}$ ，圆钢取 $0.3\text{ mm/a}\sim0.4\text{mm/a}$ ； $\rho>300\Omega\cdot\text{m}$ 地区，扁钢取 $0.1\text{ mm/a}\sim0.2\text{mm/a}$ ，圆钢取 $0.3\text{ mm/a}\sim0.4\text{mm/a}$ ； $\rho<50\Omega\cdot\text{m}$ 地区，应考虑铜材、铜覆钢材或阴极保护等措施。”

11.2.4 原导则第 11.2.4 条的修改条文。

11.2.5 新增条款。根据《电力工程设计手册 火力发电厂电气一次设计》第十五章第六节第一条第（4）款增加。

11.2.6 新增条款。根据《电力工程设计手册 火力发电厂电气一次设计》第十五章第六节第一条第（5）款增加。当采用两种不同金属互相连接时，如铜材和钢材，在土壤中就构成了腐蚀电池，其中具有较正电位的惰性金属，如铜材，将作为阴极受到保护，而具有较负电位的活泼金属，如钢材，将作为阳极而受到强烈腐蚀；铜材和钢材相连时构成的电池中，电动势大约为 $0.6\text{ V}\sim0.8\text{V}$ ，这样大的电位差即使在土壤电阻率很高的土壤中也会产生很大的腐蚀电流，因此需要采取相应的防腐措施，避免或减轻电偶腐蚀。土壤中的导体建议在铜或铜覆钢与钢材相连接部位的大于 2m 范围内的铜接地导体涂装绝缘材料，与铜连接的钢材端加强阴极保护。

12 土壤电阻率和接地装置工频参数测量

12.1 土壤电阻率测量要求

12.1.1 新增条文。水力发电厂可研阶段一般会开展接地设计，若可研阶段现场条件允许可以在可研阶段进行土壤电阻率测试工作。

12.1.2 新增条文。河床式和坝后式水力发电厂主厂房、主变室、开关站均分布在大坝区域，可以仅测试大坝区域土壤电阻率。未完成开挖的区域有覆盖层，覆盖层极大地影响土壤电阻率测试精度，进行土壤电阻率测试的区域需要已完成开挖工作。未完成开挖工作的区域需要进行接地设计时建议利用地质探洞开展土壤电阻率测试工作。测量采用不同的极距进行测量，每个极距在不同的部位进行多次测量。

12.1.3 原导则第 12.3.1 条修改条文。

12.1.4 原导则第 12.3.2 条修改条文。本条规定目的为减小地下金属管道的影响。

12.1.5 原导则第 12.3.3 条修改条文。测试电极的布置尽量减小土壤结构不均匀性的影响，进行多处测量的目的是为了得到较真实的结果。

12.1.6 新增条文，原导则第 12.3.4、12.3.5、12.3.6 条规定的土壤电阻率测试方法在本规范中删除。由于行业标准《接地装置特性参数测量导则》DL/T 475-2017 规定了测试土壤电阻采用四极等距法或四极非等距法，删除了三极法，因此测试方法根据该标准的规定进行修改。

12.1.7 新增条文，现场测量水电阻率采用四极法。电极入水深度 h 不建议大于极间距离 a 的 $1/20$ ，极距建议从水深 $1/10 \sim 1/20$ 开始测量，测得的视电阻率曲线水平段为水电阻率。取水样测量水电阻率采用电导测量仪。每种水样分 3 瓶盛装，每瓶约 1000ml，瓶口需要用蜡封密，水样保存期不建议过长，测量电阻率时需要记录水温。

12.1.8 新增条文，根据行业标准《接地装置特性参数测量导则》DL/T 475-2017 第 10.1 节新增。

12.2 工频接地阻抗测量

12.2.1 原导则第 12.1.1 条的修改条文。

6 根据行业标准《接地装置特性参数测量导则》DL/T 475-2017 第 6.1.1.1 条新增。

7 蓄水位对大坝接地阻抗影响较大。大坝接地网与厂房接地网直接连接在一起的在蓄水前和蓄水后分别测量接地阻抗。大坝接地网与厂房接地网分别独立的情况下水位对厂房接地阻抗影响不大，可以只测量一次接地阻抗。

12.2.2 原导则第 12.1.2 条的修改条文。根据行业标准《接地装置特性参数测量导则》DL/T 475-2017 第 6.1.2、6.2.1.2 条执行。

5 根据行业标准《接地装置特性参数测量导则》DL/T 475-2017 第 6.2.1.2.3 条新增。实际使用也比较多。

6 根据行业标准《接地装置特性参数测量导则》DL/T 475-2017 第 6.2.1.2.4 条新增。反向法是远离夹角法的特殊形式，即电位线和电流线之间的夹角约为 180°，JP 一级水力发电厂接地阻抗测量时使用。

12.2.3 原导则第 12.1.5 条的修改条文。根据行业标准《接地装置特性参数测量导则》DL/T 475-2017 第 6.2.1.3、7.2.1、7.2.2 条修改。

12.2.4 原导则第 12.1.6 条的修改条文。根据行业标准《接地装置特性参数测量导则》DL/T 475-2017 第 6.2.1.4 条修改。通常地中有不平衡零序电流入地，该电流将在地网上产生零序电压，为了消除地网的零序电流和电压对测量的影响，采用倒相法和三相电源法进行测量。

12.3 接触电位差和跨步电位差测量

12.3.1 原导则第 12.2.1 条修改条文。

12.3.2 新增条文。根据国家标准《水利水电工程劳动安全与工业卫生设计规范》GB 50706-2011 规定增加本条文。

12.3.3 原导则第 12.2.2 条的修改条文，根据行业标准《接地装置特性参数测量导则》DL/T 475-2017 第 6.4 节执行。

12.3.4 原导则第 12.2.3 条的修改条文，根据行业标准《接地装置特性参数测量导则》DL/T 475-2017 第 6.4 节修改。

12.3.5 原导则第 12.2.4 条的修改条文，根据行业标准《接地装置特性参数测量导则》DL/T 475-2017 第 6.4 节修改。

12.3.6 原导则第 12.2.5 条的修改条文，根据行业标准《接地装置特性参数测量导则》DL/T 475-2017 第 6.4 节修改。

附录B 接地装置电位计算

B.0.2 不同中性点接地方式，接地装置工频地电位升限值不同。增加本条对厂用电系统为中性点不接地和中性点低电阻接地方式的接地装置工频地电位升限值进行规定。经武汉大学研究计算，中性点低电阻接地方式的接地装置工频地电位升限值远高于中性点不接地方式，中性点低电阻接地方式按照中性点不接地方式限制地电位升限值其厂用电系统中的避雷器是安全的。目前中性点高电阻接地在水力发电厂厂用电系统中暂未应用，后续项目应用后再对中性点高电阻的接地装置工频地电位升限值进行规定。对于存在避雷器受GPR反击风险问题的电厂，不推荐在厂用电系统中采用中性点谐振接地方式。经武汉大学计算，降低接地装置工频地电位升情况下，中性点谐振接地方式的厂用电系统短路发生时避雷器两端的电压降低不明显，需要专项计算这种接地方式下避雷器的参数。

B.0.7 本条中提供的分流系数计算条件为：110kV输电线路取普通地线截面为95mm²，OPGW截面为95mm²；220kV输电线路取普通地线截面为150mm²，OPGW截面为150mm²；330kV输电线路取普通地线截面为120mm²，OPGW截面为120mm²；500kV输电线路取普通地线截面为150mm²，OPGW截面为150mm²；750kV输电线路取普通地线截面为80mm²，OPGW截面为130mm²。不同电压等级输电杆塔塔型均参考《电力工程设计手册 架空输电线路设计》。不同电压等级输电线路均考虑一塔一回线路的型式，并分别计算1~3回出线下的分流系数情况。

B.0.8 分流系数K_{f2}可以参考K_{f1}进行类似仿真计算，由于厂外短路工频分流系数K_{f2}影响因素较多，如杆塔接地电阻，且在每基杆塔发生短路时K_{f2}均不同，本次修编暂未给出快速查取表格。

附录C 非均匀土壤中接地网接地电阻的计算

C.0.2 图 C.0.2-1 的使用方法为先从图 C.0.2-1 左下角选定的接地网面积 S 作水平线与视电阻率曲线常数 b' 相交, 然后由交点向上作垂线与网孔个数曲线 N 相交; 从此交点向右作水平线与图右上角接地体半径曲线 R 相交; 再由新交点向下作垂线与接地网长宽比 $L: B$ 曲线相交, 最后由交点向右作水平线即得 K 。视电阻率曲线常数 $b' \approx 3H$, 其 H 为第一层土壤的深度 m 。

附录K 接地材料在不同土壤腐蚀等级环境中的耐腐蚀特性

K.0.1 腐蚀分为两大类：伴有水分的、因电化学反应进行的为湿腐蚀；不伴有水分的、由于高湿度的空气或反应性气体所致的化学反应引起的为干腐蚀。湿腐蚀分为自然腐蚀和电腐蚀；自然腐蚀又分为局部电池腐蚀、浓淡电池腐蚀、异种金属接触腐蚀、细菌腐蚀。

K.0.2 不同的金属具有不同的自然电位，将自然电位序列中不同电位两种金属组合在一起时，电位低的成为阳极，电位高的成为阴极，阳极将被腐蚀。

K.0.3 新增条文，按照表 K.0.1 中的评价指标加和计算土壤腐蚀评价指标，将评价指标与表 K.0.3-2 中的评价指标总和对比可以得出土壤腐蚀性的评价结论。

K.0.4 本条为避免电化学腐蚀对接地体的影响的措施。

同种材质金属在不同环境中敷设时，腐蚀程度取决于两部分接地体面积的比例，高电位处接地面积越大，低电位区域的接地体被腐蚀越快。为了减少电化学腐蚀，在土壤中敷设的接地体若用混凝土包围，使接地体完全敷设在相同的场所内，使两部分接地体具有同一电极电位，则不产生电化学腐蚀。

根据原电池正极不被腐蚀的原理，使被保护金属接地体作为正极，以免受电化学腐蚀。采用铁金属接地体系统中，建议加入锌板也作为接地体，锌板发生电化学腐蚀，并建议定期更换锌板以保护铁金属接地体不受腐蚀。