

中华人民共和国电力行业标准

水力发电厂接地设计技术导则

DL/T 5091—1999

Grounding design guide for hydro-power station

主编部门：长江水利委员会长江勘测规划设计研究院 筹

批准部门：中华人民共和国国家经济贸易委员会 筹

批准文号：国经贸电力〔1999〕740号

1999-08-02 发布

1999-10-01 实施

中华人民共和国国家经济贸易委员会 发布

前 言

本标准是根据原能源部、水利部批复的《水利水电勘测设计技术标准体系》编写的，属于水利水电工程建设标准。

为了适应水利水电工程的特点和实际需要，使水力发电厂的接地设计有章可循，做好设计工作，原电力工业部、水利部水利水电规划设计总院组织长江水利委员会长江勘测规划设计研究院编写了本标准，并与电力行业有关标准协调一致。实施本标准，有利于推广应用科学技术新成果，提高工程设计质量，提高工程建设效益。

本标准由国家电力公司水电水利规划设计总院提出。

本标准由国家电力公司水电水利规划设计总院归口。

本标准起草单位：长江水利委员会长江勘测规划设计研究院。

参加单位：成都水利水电勘测设计院。

本标准主要起草人：舒廉甫、覃利明、李定中。

本标准由国家电力公司水电水利规划设计总院负责解释。

1 范 围

1.0.1 本导则规定了水力发电厂接地设计的一般原则、步骤、方法，以及接地装置工频参数的测量。

1.0.2 本导则适用于新建水力发电厂交流电气设备的接地和交流电网中用于安全自动装置的220V及以下直流电气设备的接地。改建、扩建的水力发电厂亦可参照使用。

2 引用标准

下列标准所包含的条文，通过在本标准中引用而构成为本标准的条文。本标准出版时，所示版本均为有效。所有标准都会被修订，使用本导则的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

DL548—94 电力系统通信站防雷运行管理规程

DL/T578—95 水电厂计算机监控系统基本技术条件

3 定 义

本导则采用下列定义：

3.0.1 接地体、自然接地体：埋入地中并直接与大地接触的金属导体，称为接地体。兼作接地体用的直接与大地接触的各种金属构件、金属井管、钢筋混凝土建筑物的基础、金属管道和设备等，称为自然接地体。

3.0.2 接地线：电力设备或杆塔的接地螺栓与接地体或中性线连接用的金属导体，称为接地线。

3.0.3 接地装置(接地网)：接地体和接地线的总和，称为接地装置(接地网)。

3.0.4 接地系统：多个接地装置构成的总接地装置，称为接地系统。

3.0.5 接地：电力设备、杆塔或过电压保护装置用接地线与接地体连接，称为接地。

3.0.6 工作接地：在电力系统中，运行需要的接地(如中性点接地等)，称为工作接地。

3.0.7 保护接地：电力设备的金属外壳、钢筋混凝土杆和金属杆塔，由于绝缘损坏有可能带电，为防止这种电压危及人身安全而设的接地，称为保护接地。

3.0.8 防雷接地：防雷保护装置为了泄放雷电荷而设的接地，称为防雷接地。

3.0.9 集中接地装置：为加强对雷电流的散流作用，降低对地电压而敷设的附加接地体。

3.0.10 接地电阻：接地体或自然接地体的对地电阻和接地线电阻的总和，称为接地装置的接地电阻。接地电阻的数值等于接地装置对地电压与通过接地体流入地中电流的比值。按通过接地体流入地中冲击电流求得的接地电阻，称为冲击接地电阻；按通过接地体流入地中工频电流求得的电阻，称为工频接地电阻。

凡本导则未标明为冲击接地电阻的，都是指工频接地电阻。

3.0.11 接地装置对地电位：电力设备发生接地故障时，其接地部分与大地零电位点之间的电位差，称为接地装置对地电位。

3.0.12 接触电位差：当接地短路电流流过接地装置时，大地表面形成分布电位，在地面上离设备水平距离为 0.8m 处与沿设备外壳、架构或墙壁离地面的垂直距离 1.8m 处两点间的电位差，称为接触电位差；接地网网孔中心对接地网接地体的最大电位差，称为最大接触电位差。

3.0.13 跨步电位差：当接地短路电流流过接地装置时，地面上水平距离为 0.8m 的两点间的电位差，称为跨步电位差。接地网外的地面上水平距离 0.8m 处对接地网边缘接地体的电位差，称为最大跨步电位差。

3.0.14 转移电位：当接地短路电流流过接地装置时，由一端与接地装置连接的金属导体传递的接地装置对地电位称为转移电位。

3.0.15 低压、高压：标称电压低于 1kV 的称为低压。标称电压为 1kV 及以上的称为高压。

3.0.16 大接地短路电流系统、小接地短路电流系统：高压系统中，单相接地电流或同点两相接地时入地电流大于 500A 的，称为大接地短路电流系统，500A 及以下的称为小接地短路电流系统。

3.0.17 有效接地的中性点：变压器和发电机的中性点直接或经过小阻抗与接地装置连接的，称为有效接地的中性点。

3.0.18 不接地的中性点：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，称为不接地的中性点。

3.0.19 中性线：与低压系统电源中性点连接用来传输电能的导线。

3.0.20 保护线：低压系统中为防触电用来与设备金属外壳作电气连接的导线。

3.0.21 接中性线保护、接保护线保护、接地保护：中性点直接接地的低压电力网中，电力设备外壳与中性线连接，称为接中性线保护；电力设备外壳与保护线连接，称为接保护线保护；电力设备外壳不与中性线、保护线连接，而与独立的接地装置连接，称为接地保护。

4 接地设计一般程序和规定

4.1 接地设计一般程序

- 4.1.1 调查电厂所在地的土壤特性及地质构造,实测接地装置区域的土壤电阻率和河水电阻率。也可由电测部门提供地层土壤电阻率分布资料。
- 4.1.2 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。
- 4.1.3 按设计水平年确定电网在非对称故障情况下最大入地电流值。对分期开发的电厂,确定初、终期地网的最大入地电流值。
- 4.1.4 确定接地装置的接地电阻值以及允许的接触电位差和跨步电位差值。
- 4.1.5 进行接地装置设计并绘制接地系统布置图(包括利用的自然接地体)。
- 4.1.6 计算接地电阻。当接地装置不能符合规定电阻值时,应采用扩大接地网面积或引外接地、深埋接地等措施以降低接地电阻。如仍不能满足要求时,应研究转移电位的隔离措施和校验反击电压。
- 4.1.7 设计配电装置均压网并计算接触电位差和跨步电位差。当不满足允许值,增加均压带又有困难时,可采用加强分流或限制人身电流等措施。
- 4.1.8 选择接地装置导体截面。
- 4.1.9 绘制施工图纸。
- 4.1.10 检查接地装置是否按设计要求施工。接地线不得遗漏,连接应完好。
- 4.1.11 拟订接地装置接地电阻、接触电位差和跨步电位差测量方案,参加接地电阻、接触电位差和跨步电位差的测量。
- 4.1.12 根据实测结果校验设计。当不满足时,应补充和完善接地装置或增加有关防护措施。

4.2 接地设计一般规定

- 4.2.1 为保证交流电网正常运行和故障时的人身及设备安全,电气设备及设施直接地或接中性线,并做到因地制宜,安全可靠,经济合理。
- 4.2.2 不同用途和不同电压的电气设备,除另有规定者外,应使用一个总的接地系统,接地电阻应符合其中最小值的要求。
- 4.2.3 接地装置应充分利用直接埋入水下和土壤中的各种自然接地体接地,并校验其热稳定。
- 4.2.4 电站接地电阻当难以满足运行要求时,可根据技术经济比较,因地制宜地采用水下接地、引外接地、深埋接地等接地方式,并加以分流、均压和隔离等措施。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。
- 4.2.5 接地设计应考虑土壤干燥或冻结等季节变化的影响,接地电阻在四季中均应符合本导则的要求。

防雷装置的接地电阻,可只考虑在雷季中土壤干燥状态的影响。

- 4.2.6 初期发电时,应根据电网实际的短路电流和所形成的接地系统,校核初期发电时的接触电位差、跨步电位差和转移电位。当上述参数不满足安全要求时,应采取临时措施,保证初期发电时期电站安全运行。

4.2.7 工作接地及要求:

- 1 有效接地系统中,自耦变压器和需要接地的电力变压器中性点、线路并联电抗器中性点、电压互感器、接地开关等设备应按照系统需要进行接地。

- 2 不接地系统中,消弧线圈接地端、接地变压器接地端和绝缘监视电压互感器一次侧中性点需直接接地。

- 3 中性点有效接地的系统,应装设能迅速自动切除接地短路故障的保护装置。

中性点不接地的系统,应装设能迅速反应接地故障的信号装置,也可装设延时自动切除故障的装置。

4.2.8 保护接地及要求:

1 电力设备下列金属部件,除另有规定者外,均应接地或接中性线(保护线)。

1)电机、变压器、电抗器、电器、携带式及移动式用电器具等底座和外壳。

2)SF₆全封闭组合电器(GIS)与大电流封闭母线外壳以及电气设备箱、柜的金属外壳。

3)电力设备传动装置。

4)互感器的二次绕组。

5)配电、控制保护屏(柜、箱)及操作台等的金属框架。

6)屋内外配电装置的金属架构和钢筋混凝土架构,以及靠近带电部分的金属围栏和金属门、窗。

7)交、直流电力电缆桥架、接线盒、终端盒的外壳、电缆的屏蔽铠装外皮、穿线的钢管等。

8)装有避雷线的电力线路杆塔。

9)在非沥青地面的居民区内,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。

10)铠装控制电缆的外皮、非铠装或非金属护套电缆的1~2根屏蔽芯线。

2 电力设备的下列金属部分,除另有规定者外,可不接地或不接中性线(保护线)。

1)在木质、沥青等不良导电地面的干燥房间内,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、继电器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的设备(应保证电气接触良好),如套管等。

5)标称电压220V及以下的蓄电池室内的支架。

6)已与接地的底座之间有可靠电气接触的电动机和电器的外壳。

3 在中性点直接接地的低压电力系统中,电力设备的外壳和机座宜采用接地或接中性线(或保护线)保护。

对于用电设备较少、分散,且又无接地线的地方,宜采用接中性线保护。而接中性线保护确有困难,而土壤电阻率较低时,可采用直接埋设接地体进行接地保护。

当低压电力设备的机座或金属外壳与接地网可靠连接后,允许不按接中性线保护的要求作短路验算。

由同一台发电机、变压器或同一段母线供电的低压线路,不宜采用接中性线、接地两种保护方式。

在低压电力系统中,全部采用接地保护时,应装设能自动切除接地故障的继电保护装置。

4.2.9 防雷接地及要求:

1 所有设有避雷针、避雷线的构架,微波塔均应设置集中接地装置。

2 避雷器宜设置集中接地,其接地线应以最短的距离与地网相连。

3 独立避雷针(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,当要求作到规定的10Ω确有困难时,允许采用较高的数值,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(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(线)对被保护设备反击的要求。

4 独立避雷针(线)不应设在人经常通行的地方。避雷针(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, 铺设砾石或沥青地面。

5 接 地 电 阻

5.1 大接地短路电流系统的接地电阻

5.1.1 大接地短路电流系统的水电厂接地装置的接地电阻应符合(5.1.1)式要求:

$$R \leq \frac{2000}{I} \quad (5.1.1)$$

式中: R ——考虑到季节变化的最大接地电阻(Ω);

I ——计算用的流经接地装置的入地短路电流(A)。

5.1.2 (5.1.1)式中计算用流经接地装置的入地短路电流, 采用在接地装置内、外短路时, 经接地装置流入地中的最大周期分量起始值。该电流应按电厂全部投产后 5~10 年发展后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, 以及接地避雷线中分走的接地短路电流。

5.1.3 在高土壤电阻率地区, 当接地装置要求作到规定的接地电阻值在技术、经济上极不合理时, 接地电阻值可以放宽($R \leq 5 \Omega$), 但应符合以下规定:

1 验算接地网的接触电位差和跨步电位差。施工完毕, 一般应进行现场实测并绘制电位分布曲线。

2 考虑短路电流非周期分量的影响, 当接地装置内电位升高时, 发电厂内的 6kV~10kV 阀型避雷器不应动作。

3 对可能将接地装置的高电位引向厂外, 或将低电位引向厂内的设施, 应采取隔离措施。

5.2 小接地短路电流系统的接地电阻

5.2.1 中性点非直接接地系统的水电厂接地装置的接地电阻应符合以下要求。

1 高压与低压电力设备共用的接地装置:

$$R \leq \frac{120}{I} \quad (5.2.1-1)$$

式中: R ——考虑到季节变化的最大接地电阻(Ω);

I ——计算用的接地故障电流(A)。

接地电阻 R 不宜超过 4 Ω 。

2 仅用于高压电力设备的接地装置:

$$R \leq \frac{250}{I} \quad (5.2.1-2)$$

接地电阻 R 不宜超过 10 Ω 。

5.2.2 在高土壤电阻率地区, 允许放宽接地电阻的限制, 但不宜超过 15 Ω 。对于地网外的高压电力设备接地电阻不宜超过 30 Ω 。并应校验接触电位差和跨步电位差, 以满足安全要求。

5.2.3 在中性点经消弧线圈接地的电力网中, 接地装置的接地电阻按(5.2.1-1)式、(5.2.1-2)式计算时, 计算用的接地故障电流应采用下列数值。

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。

5.2.4 计算用的接地故障电流，应按电厂全部投产后 5~10 年发展后的系统最大运行方式确定。

5.2.5 在小接地短路电流系统中，为保证迅速切除接地故障，应根据发电厂接地装置的接地电阻，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的动作电流的 1.5 倍，或熔断器熔体额定电流的 4 倍。当不符合要求时，可降低接地电阻或采取其他措施。

5.3 低压系统的接地电阻

5.3.1 低压电力设备接地装置的接地电阻不宜超过 4Ω。

5.3.2 在中性点直接接地的低压电力网中，中性线应在电源处接地，以免负荷切除时，造成不接地运行而危及人身和设备安全。

5.3.3 架空线路的干线和分支线的终端及沿线每公里处，中性线应重复接地。电缆和架空线在引入建筑物处，中性线应重复接地，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。

5.3.4 配电线路中性线每处重复接地装置的接地电阻不应超过 10Ω。

在电力设备接地装置的接地电阻允许达到 10Ω 的电力网中，每一重复接地装置的接地电阻不应超过 30Ω，但重复接地不应少于 3 处。

5.3.5 为了防止触电危险，在低压电力网中，严禁利用大地作相线或中性线。

5.4 杆塔的接地电阻

5.4.1 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电阻，不宜超过表 5.4.1 所列的数值。

表 5.4.1 架空线路段杆塔的工频接地电阻

土壤电阻率 ρ Ω m	100 及以下	100 以上~ 500	500 以上~ 1000	1000 以上~ 2000	2000 以上
工频接地电阻 Ω	10	15	20	25	30 ¹⁾ 岩

1)当土壤电阻率很高，接地电阻很难降低到 30Ω 时，可采用两根水平接地体与最近的电站地网相连。

5.4.2 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，应根据土壤电阻率确定如下：

土壤电阻率(Ω m)	≤500	≤2000	≤5000
最大长度(m)	40	80	100

5.4.3 小接地短路电流系统中，无避雷线的高压电力线路在居民区的钢筋混凝土杆宜接地，金属杆塔应接地，其接地电阻不宜超过 30Ω。

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，其接地电阻不宜超过 50Ω。钢筋混凝土杆中的钢筋不宜作接地引线使用。

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。

5.4.4 为防止雷电波从低压架空线路侵入建筑物，接户线的绝缘子铁脚宜接地，接地电阻不宜超过 30Ω。土壤电阻率在 200Ω m 及以下地区的铁横担钢筋混凝土杆线路，由于连续多杆自然接地作用，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 30 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。

6 降低接地电阻的措施

6.1 水下接地

6.1.1 水力发电厂可在水下敷设人工接地体来降低接地电阻，通常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源中，应注意布置在水库蓄水及引水系统最低水位以下区域。

6.1.2 水下接地网不宜设在水流湍急处，以及含有腐蚀性物质的水域。当必须在水流湍急处敷设水下接地网时，可采用打插筋锚固焊接或浇入混凝土表层内约 50mm~100mm 的方法固定。静水中的水下接地网可用大石压住。

6.1.3 水下接地网应与原接地网保持足够的距离，以减少相互间的屏蔽影响，充分地利用其各自的散流作用。水下接地网与原接地网之间宜采用多根接地线连接。

6.1.4 水下接地网可采用截面不小于 40mm×4mm 的扁钢或 $\phi 14$ 的圆钢，焊接成外缘闭合的矩形网，网孔数目不宜多于 16 个。

6.2 引外接地

6.2.1 在高土壤电阻率地区，当接地装置接地电阻难以满足要求，且附近有可设置人工接地装置的低土壤电阻率地区或水源，可采取引外接地措施降低接地电阻。

6.2.2 为了减小接地引线的阻抗压降，提高引外接地体的利用效果，通过技术经济比较，可采用增大引外导体截面，增加导体根数，或采用铜导体引线和电缆引线等措施。

6.3 深井接地

6.3.1 当水电厂及其附近地区，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，采用深井接地对减少接地装置接地电阻的效果较为显著，可采用深井接地。

6.3.2 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，同时，其水平间距宜大于埋设深度，以减少相互屏蔽影响，提高各接地体的利用率。

6.3.3 对冻土地区，深埋接地体可选择在融冰区。

6.3.4 深埋接地体宜设置在地网以外地区或地网的边缘，不宜设置在边坡上。

6.4 人工降阻

6.4.1 在不可能采用深井接地和引外接地的地方，当地网面积不太大时，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电阻。

人工降阻措施包括使用降阻剂和低电阻率材料置换。

6.4.2 在接地体周围加入降阻剂，以扩大接地体尺寸和降低接地体与土壤的接触电阻，改善其传导性能。降阻剂一般有化学降阻剂和膨润土。

人工降阻对于减小单个或集中接地体的工频接地电阻具有显著效果，对小面积地网也有一定效果。但对减小接地体冲击接地电阻的效果不如工频电阻显著。冲击电流越大，效果越差。故电极布置时，宜为辐射形的垂直接地体。

6.4.3 对集中接地体宜采用置换材料的方法降低接地电阻。要因地制宜，就近取材。所用置换材料应是电阻率低、不易流失、性能稳定、易于吸收和保持水分，且无明显腐蚀作用的，并应施工简单，经济合理。

置换材料通常采用低电阻率的粘土。置换材料填入人工接地坑(沟)时，应分层捣紧。接地坑、沟的尺寸如图 6.4.3-1 和图 6.4.3-2 所示。

6.4.4 人工降阻材料不宜呈酸性反应，最好是中性或弱碱性反应。氢离子浓度 pH 值应在 7~12 的范围内，接地体的腐蚀速度不大于 0.03mm/a。

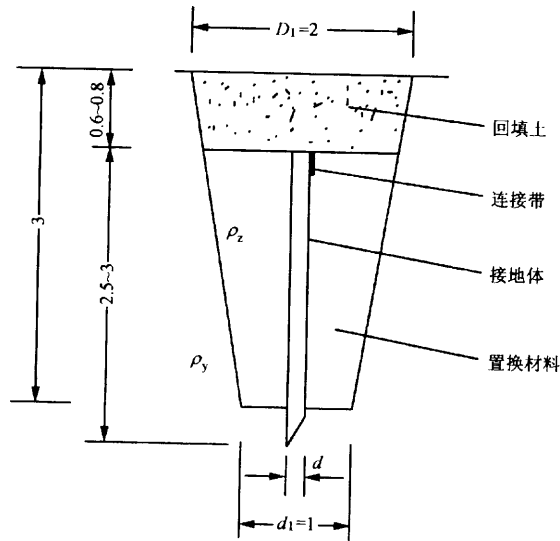


图 6.4.3-1 人工接地坑(单位: m)

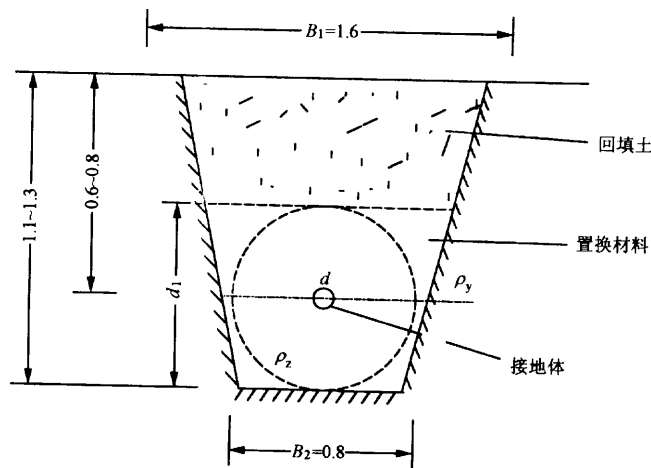


图 6.4.3-2 人工接地沟(单位: m)

6.4.5 为了降低接地电阻,接地装置应尽量与线路的避雷线相连,但应有便于分开的连接点,以便测量接地电阻。如不允许避雷线直接和发电厂配电装置架构相连,接地网应在地下与避雷线的接地装置相连接,连接线埋在地中的长度不应小于 15m。

7 接地电阻计算

7.1 工频接地电阻计算

7.1.1 均匀土壤电阻率的人工接地体的接地电阻按下列方法计算。

1 图 7.1.1 所示垂直接地体的接地电阻 R 可按(7.1.1-1)式计算:

当 $l \gg d$ 时,

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{d} - 0.31 \right) \quad (7.1.1-1)$$

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

l ——垂直接地体的长度(m);

d ——垂直接地体的等效直径(m)。

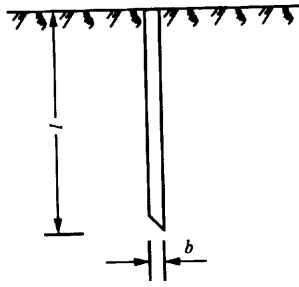


图 7.1.1 垂直接地体

对于扁钢 $d=b/2$, b 为扁钢宽度; 对于角钢 $d = 0.714\sqrt{b_1b(b_1^2 + b_2^2)}$, b_1 、 b_2 为角钢边长; 对于等边角钢 $d=0.84b$ 。

2 不同形状水平接地体的接地电阻 R 可用(7.1.1-2)式计算:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L^2}{hd} + A \right) \quad (7.1.1-2)$$

式中: 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。

水平接地体的形状系数可采用表 7.1.1-1 所列数值。

表 7.1.1-1 水平接地体的形状系数

形状								
A	5.65	3.03	1	0.89	0.48	0	-0.18	-0.6

3 以水平接地体为主, 且边缘闭合的复合接地体, 其接地电阻可按(7.1.1-3)式计算: 榔榔

$$R = \left(0.22 - 0.007 \frac{L_1}{L_2} \right) \frac{\rho}{\sqrt{L_1 L_2}} (1 + B) + \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L_1 L_2}{9hd} - 5B \right) \quad (7.1.1-3)$$

$$B = \frac{1}{1 + 4.6h / \sqrt{L_1 L_2}}$$

式中: l_1 、 l_2 ——分别为地网水平投影长度、宽度(m), $L_1/L_2 \leq 8$;

l ——接地体的总长度, 包括垂直接地体在内(m);

d ——水平接地体的直径或等效直径(m);

h ——水平接地体的埋设深度(m)。

4 人工接地体工频接地电阻还可按表 7.1.1-2 所列公式估算。

表 7.1.1-2 接地电阻估算式

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	$R \approx 0.5 \times \frac{\rho}{\sqrt{S}} = 0.28 \times \frac{\rho}{r}$	S 为大于 100m^2 闭合接地网的面积 r 为与接地网面积 S 等值的圆的半径,

	$\text{或} R \approx \frac{\sqrt{\pi}}{4} \times \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{r}$ $= \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$	即等值圆半径(m) L 为接地体的总长度(m)
--	--	------------------------------

7.1.2 非均匀土壤电阻率的人工接地体接地电阻按附录 A 方法计算。

7.1.3 人工改善土壤电阻率后的接地电阻可按下列方法计算：

1 图 6.4.3-1 所示人工接地坑的接地电阻可按(7.1.3-1)式计算：

$$R = \frac{\rho_y}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d_1} + \frac{\rho_z}{2\pi l} \ln \frac{d_1}{d} \quad (7.1.3-1)$$

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

ρ_y —— 原地层的电阻率($\Omega \text{ m}$)；

l —— 垂直接地体长度(m)；

d —— 垂直接地体直径(m)；

d_1 —— 计算直径(人工接地坑底部直径)(m)。

2 图 6.4.3-2 所示人工接地沟的接地电阻可用(7.1.3-2)式进行计算：

$$R = \frac{\rho_y}{2\pi l} \ln \frac{2l}{d_1} + \frac{\rho_z}{2\pi l} \ln \frac{l}{d} \quad (7.1.3-2)$$

式中： l —— 水平接地体长度(m)；

d_1 —— 计算直径(人工接地沟梯形断面的内切圆直径)(m)。

7.1.4 大型水电厂接地系统多为多重互联的接地网构成。各接地极间的距离愈大时，愈能充分地发挥各地网的接地效果；反之则应考虑各地网间的相互屏蔽影响。其接地电阻可按下列方法计算。

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，按简化公式 $R = 0.5\rho / \sqrt{S}$ 进行计算。

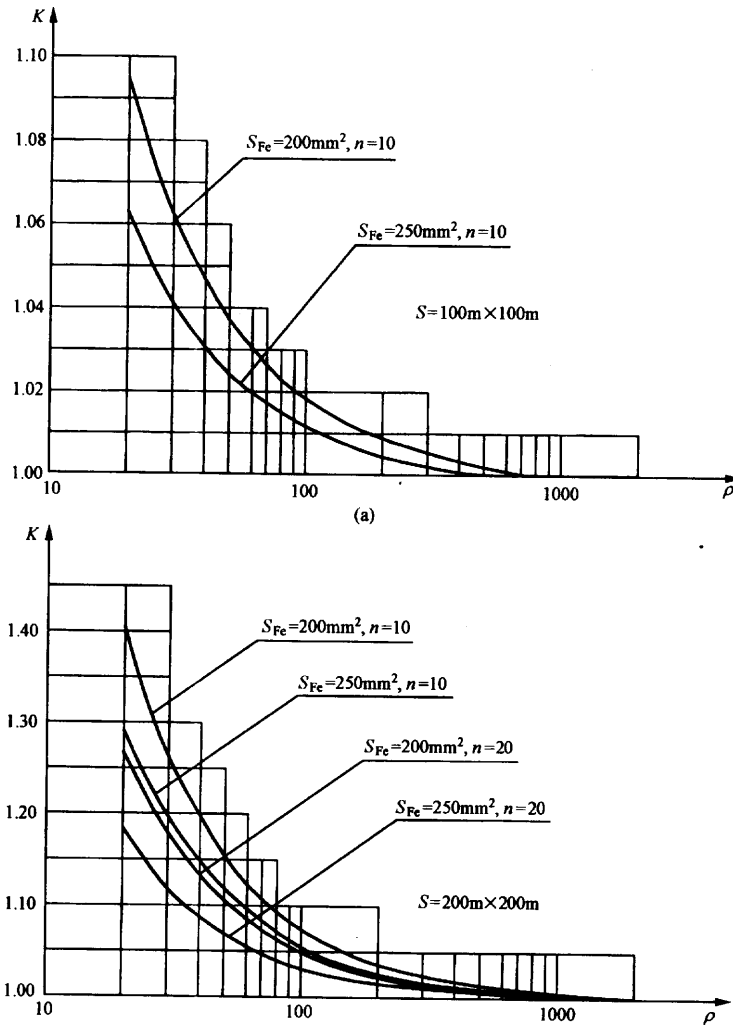


图 7.1.4 大型地网工频有效利用系数曲线(一)

3 当接地网面积很大时，地网将不是等电位。计算接地网电阻时应考虑地网的有效利用率。计算公式如(7.1.4)式：

$$R_{\text{地}} = K \frac{0.5\rho}{\sqrt{S}} \quad (7.1.4)$$

式中：K——大型地网工频有效利用系数，详查图 7.1.4 中曲线可得其值。

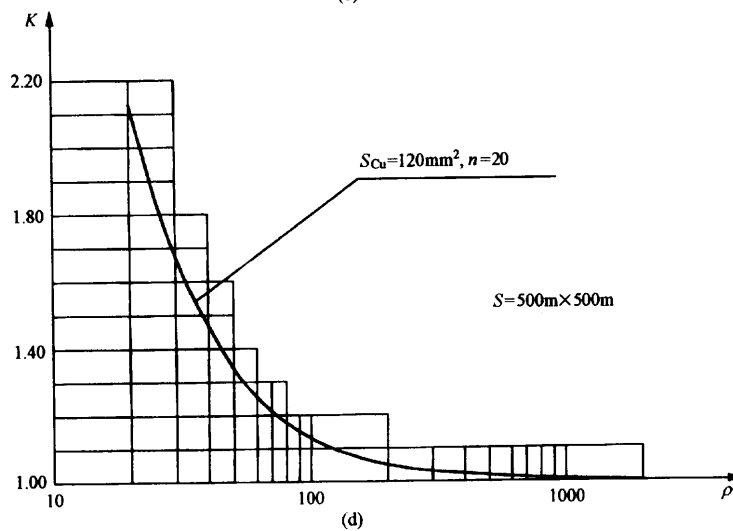
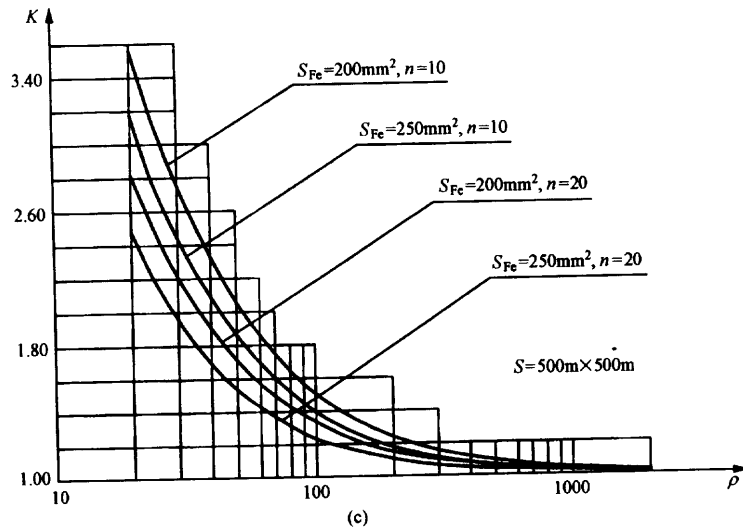


图 7.1.4 大型地网工频有效利用系数曲线(二)
 S_{Fe} —钢质导体截面积; S_{Cu} —铜质导体截面积

7.2 冲击接地电阻计算

7.2.1 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, 一般按(7.2.1)式计算:

$$\rho = \rho_0 \Psi \quad (7.2.1)$$

式中: ρ ——土壤电阻率($\Omega \cdot m$);

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。

系数 Ψ 应查表 7.2.1 中数值。

表 7.2.1 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。

7.2.2 单独接地体的冲击接地电阻可用(7.2.2)式进行计算：

$$R_{ch} = \alpha R \quad (7.2.2)$$

式中：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参照附录 B 计算。

7.2.3 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两倍；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(7.2.3)式计算：

$$R_{ch} = \frac{R'_{ch}}{n} \times \frac{1}{\eta_{ch}} \quad (7.2.3)$$

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。

η_{ch} 系数详见表 7.2.3。

表 7.2.3 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	较小值用于较短的射线
	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	$\frac{D(\text{垂直接地体间距})}{l(\text{垂直接地体长度})} = 2 \sim 3$ 较小值用于 $D/l=2$ 时
	3	0.70~0.80	
	4	0.70~0.75	
	6	0.65~0.70	

7.2.4 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(7.2.4)式计算：

$$R_{cch} = \frac{\frac{R'_{cch}}{n} R_{pch}}{\left(\frac{R'_{cch}}{n} + R_{pch} \right) \eta_{ch}} \quad (7.2.4)$$

式中： R'_{cch} ——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)。

7.2.5 大型水平接地网的冲击接地电阻，可按(7.2.5-1)式或(7.2.5-2)式计算。

对长条形网孔的地网：

$$R_{ch} = 0.65\sqrt{\rho} \quad (7.2.5-1)$$

对方形网孔的地网：

$$R_{ch} = 0.2\sqrt{\rho} \quad (7.2.5-2)$$

8 均 压

8.1 均压网设计

8.1.1 高压配电装置应设置均压网。均压网的外缘应闭合，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，接地网内应敷设水平均压带。埋设深度宜采用0.6m~0.8m。

8.1.2 均压网的设计应以网内的接触电位差作为设计的安全标准。宜采用等网孔电位的不等间距布置，以节省钢材。

8.1.3 对局部特别危险的区域，如接触电位差或跨步电位差超过了规定值，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。路面结构层的最小厚度和电阻率见表8.1.3-1和表8.1.3-2。

表 8.1.3-1 高电阻率路面结构层的最小厚度

结构材料名称	结构层最小厚度 cm	建议的高电阻率路面结构层最 小厚度 cm
黑色(沥青或渣油)碎石和沥青(渣油)灌入碎石	4	8
沥青(渣油)表面处理	1~2.5	2~5
碎石(砾石)及其他粒料	6~8	15~20

表 8.1.3-2 高电阻率路面结构层的电气参数

高电阻率路面结构层试验状况	潮湿状态电阻率(Ω m)
砾石	11670
碎石	5830
卵石	5000
沥青路面	>46600
块石混凝土地面	1000

8.1.4 接地网边缘经常有人出入的通道处，应根据情况铺设砾石、沥青路面或在地下装设两条不同埋深与接地网相连的“帽檐式”均压带。

8.1.5 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，宜采用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、跨步电位差降低。

8.2 接触、跨步电位差允许值规定

8.2.1 在大接地短路电流系统中，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下列数值：

$$E_j = \frac{174 + 0.17\rho_b}{\sqrt{t}} \quad (8.2.1-1)$$

$$E_k = \frac{174 + 0.7\rho_b}{\sqrt{t}} \quad (8.2.1-2)$$

式中： E_j ——接触电位差允许值(V)；

E_k ——跨步电位差允许值(V)；

ρ_h ——人脚站立处地表面的土壤电阻率(Ω m)；

t ——接地短路故障的持续时间(s)。

8.2.2 在小接地短路电流系统中,当发生单相接地故障时,由于系统通常不立即迅速切除故障,此时发电厂电力设备接地装置的跨步电位差、接触电位差允许值较低,不应超过下列数值:

$$E_j = 50 + 0.05\rho_b \quad (8.2.2-1)$$

$$E_k = 50 + 0.2\rho_b \quad (8.2.2-2)$$

8.3 接触、跨步电位差计算

8.3.1 均压网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 8.3.1 进行排列。

表 8.3.1 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		
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 由于布置对称,上表中只列出一半数值。

8.3.2 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_{jm} 可按(8.3.2)式计算:

$$E_{jm} = K_j E_w \quad (8.3.2)$$

式中: E_{jm} ——最大接触电位差;

K_j ——接触系数;

E_w ——接地装置的电位。

8.3.3 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 8.3.3), 对接地体的埋设深度为 $h=0.6\text{m}\sim 0.8\text{m}$, K_j 可按(8.3.3-1)式计算:

$$K_j = K_{jn} K_{jd} K_{js} K_{jL} \quad (8.3.3-1)$$

式中: K_{jn} ——均压带根数影响系数;
 K_{jd} ——均压带直径影响系数;
 K_{js} ——接地网面积影响系数;
 K_{jL} ——接地网形状影响系数。

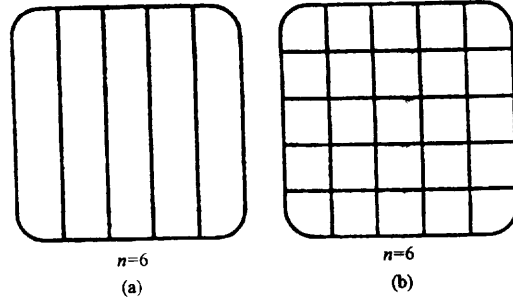


图 8.3.3 均压接地网 n 的取法
 (a)长孔接地网; (b)方孔接地网

当地网面积 $30\text{m}\times 30\text{m}\leq S\leq 500\text{m}\times 500\text{m}$ 时,

K_{jn} 、 K_{jd} 、 K_{js} 、 K_{jL} 系数可采用下列方法计算:

$$K_{jn} = 0.076 + 0.776/n$$

$$K_{jd} = 0.841 - 0.225 \lg d$$

$$K_{js} = 0.234 + 0.414 \lg \sqrt{S}$$

$$K_{jL} = \begin{cases} 1.0 & \text{(用于方孔排列)} \\ 1.14\sqrt{L_2 L_1} & \text{(用于长孔排列)} \end{cases} \quad \text{(用于方孔排列)}$$

式中: n ——地网均压带根数;
 d ——地网均压带导体等效直径(m);
 S ——接地网面积(m^2);
 l_1 ——地网长度(m);
 l_2 ——地网宽度(m)。

2 当均压带为不等间距布置时, K_j 可按(8.3.3-2)式计算:

$$K_j = K_{jh} K_{jn} K_{jd} K_{js} K_{jm} K_{jL} \quad (8.3.3-2)$$

式中: K_{jh} ——均压带埋深影响系数;
 K_{jm} ——接地网网孔数影响系数。

K_{jh} 、 K_{jn} 、 K_{jd} 、 K_{js} 、 K_{jm} 、 K_{jL} 可按下列方法计算:

$$K_{jh} = 0.257 - 0.095\sqrt[3]{h}$$

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

$$K_{jd} = 0.401 + 0.658/\sqrt[6]{d}$$

$$K_{js} = 0.054 + 0.410\sqrt[8]{S}$$

$$K_{jm} = 2.837 + 240.021/\sqrt[3]{m^2}$$

$$K_{jL} = 0.168 + 0.002 L_2 / L_1 \quad (L_2 \leq L_1) \text{ 榔榔}$$

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，其中榔 $m = (n_1 - 1)(n_2 - 1)$ ；榔
 h ——接地网水平均压带埋设深度(m)。

8.3.4 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_{km} 可按(8.3.4)式计算：

$$E_{km} = K_k E_w \quad (8.3.4)$$

式中： E_{km} ——最大跨步电位差；
 K_k ——跨步系数。

8.3.5 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，跨步系数可按图 8.3.5 确定。

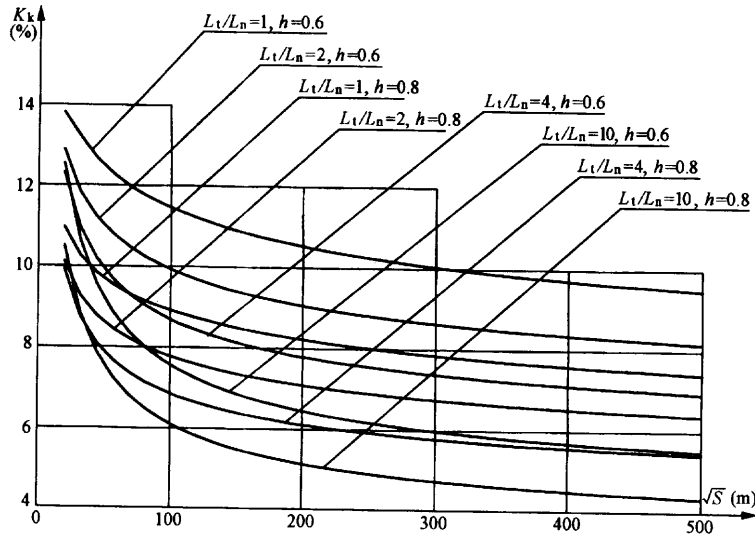


图 8.3.5 最大跨步电位差所用跨步系数 K_k 与接地网面积 S 的关系

L_t ——接地网中接地体总长度(m)；

L_a ——接地网的外缘边线总长(m)； h ——接地网埋深(m)

2 当均压带为不等间距布置时，跨步系数可按(8.3.5)式计算：

$$K_k = K_{kh} K_{kn} K_{kd} K_{ks} K_{km} K_{kL} \quad (8.3.5)$$

式中： K_{kh} ——均压带埋深影响系数；

K_{kn} ——均压带根数影响系数；

K_{kd} ——均压带半径影响系数；

K_{ks} ——接地网面积影响系数；

K_{km} ——接地网网孔数影响系数；

K_{kL} ——接地网形状影响系数。

K_{kh} 、 K_{kn} 、 K_{kd} 、 K_{ks} 、 K_{km} 、 K_{kL} 可按下列方法计算：

$$K_{kh} = 383.964e^{-2.709\sqrt[3]{h}}$$

$$K_{kn} = 0.894 - 0.234\sqrt[2]{(n_2 / n_1)} \quad (n_2 \leq n_1)$$

$$K_{kd} = 0.574 + 0.64\sqrt[3]{d}$$

$$K_{ks} = 0.07 + 1.08/\sqrt{S}$$

$$K_{km} = 0.056 + 1.072/m$$

$$K_{kL} = 0.741 - 0.011(L_2/L_1) \quad (L_2 \leq L_1)$$

式中参数定义同 8.3.3 条。

8.4 接地装置电位计算

8.4.1 在发生接地故障时，接地装置的电位可按(8.4.1)式计算：

$$E_w = IR \quad (8.4.1)$$

式中： E_w ——接地装置的电位(V)；

I ——计算用入地短路电流(A)；

R ——接地装置(包括人工接地网及与其连接的所有其他自然接地体)的接地电阻(Ω)。

8.4.2 流经接地装置的入地短路电流计算：

1 当在厂、所内发生单相接地短路时，流经接地装置的电流可按(8.4.2-1)式计算：

$$I = (I_{\max} - I_z)(1 - K_{f1}) \quad (8.4.2-1)$$

式中： I_{\max} ——接地短路时最大接地短路电流(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} ——当厂内短路时，避雷线的工频分流系数。

2 当在厂、所外发生单相接地短路时，流经接地装置的电流可按(8.4.2-2)式计算：

$$I = I_z(1 - K_{f2}) \quad (8.4.2-2)$$

式中： K_{f2} ——厂外短路时，避雷线的工频分流系数。

计算用入地短路电流取(8.4.2-1)式和(8.4.2-2)式中较大的电流值。

8.4.3 当电厂有多回架空输电线路与系统连接时，计算用的工频分流系数 K_f 应取其中分流系数最小者，分流系数的计算分网内短路和网外短路两种情况。

1 在接地网内短路时，工频分流系数 K_{f1} 可按(8.4.3-1)式计算：

$$K_{f1} = \frac{Z_{mo}}{Z_{bo}} + \left(1 - \frac{Z_{mo}}{Z_{bo}}\right) e^{-\beta} \quad (8.4.3-1)$$

$$e^{-\beta} = \frac{\left[1 - \sqrt{\frac{b}{4+b}}\right]}{\left[1 + \sqrt{\frac{b}{4+b}}\right]}$$

$$b = \frac{Z_{bo}}{3R_w}$$

式中： R_w ——水电站接地网的接地电阻(Ω)；

Z_{mo} ——架空输电线路导线与地线间平均档距的零序互感阻抗(Ω)。

$$Z_{mo} = \left(0.15 + j0.189 \ln \frac{D_g}{D_{1-2}}\right) \frac{l_{pj}}{1000}$$

式中： l_{pj} ——线路平均档距(m)；

D_g ——避雷线对地的等价镜像距离(m)。

$$D_g = \frac{1.94 \times 10^{-3}}{\sqrt{f / \rho_{pj} \times 10^{-11}}}$$

式中: f ——频率, 取 $f = 50(\text{Hz})$;

ρ_{pj} ——线路所经地段的土壤电阻率平均值($\Omega \cdot \text{m}$);

D_{1-2} ——避雷线对导线的几何平均距离(m);

对于双避雷线,

$$D_{1-2} = \sqrt[6]{D_{1-A} D_{1-B} D_{1-C} D_{2-A} D_{2-B} D_{2-C}}$$

对于单避雷线,

$$D_{1-2} = \sqrt[3]{D_{1-A} D_{1-B} D_{1-C}}$$

$D_{1-A}, D_{1-B}, D_{1-C}$ ——1号避雷线对导线 A、B、C 相的距离(m);

$D_{2-A}, D_{2-B}, D_{2-C}$ ——2号避雷线对导线 A、B、C 相的距离(m);

Z_{h0} ——避雷线平均档距的零序阻抗(Ω);

$$Z_{bo} = \left(\frac{3r}{P} + 0.15 + j0.189 \ln \frac{D_g}{R_g} \right) \frac{l_{\text{pj}}}{1000}$$

P ——避雷线根数;

R ——避雷线电阻(Ω / km);

R_g ——避雷线的等价几何平均半径(m)。

对于双避雷线:

$$R_g = \sqrt{r_m D_m}$$

对于单避雷线:

$$R_g = r_m$$

D_m ——避雷线之间距离(m);

$r_m = 0.95r_0$ (用于钢芯铝线)

$r_m = 0.75r_0$ (用于铝合金线)

r_0 ——避雷线半径(m), 参数见表 8.4.3;

$$r_m = r_0 e^{-6.9X_{\text{en}}} \text{ (用于钢绞线);}$$

X_{en} ——单位长度钢绞线的内感抗(Ω / km), 参见表 8.4.3。

表 8.4.3 钢绞线和钢芯铝线的电阻和内感抗

钢绞线 GJ			
截面 / 半径 mm^2 / mm	35 / 3.9	50 / 4.6	70 / 5.75
电阻 Ω / km	4.6	3.5	2.2
内感抗 Ω / km	2.4	1.5	1.2
钢 芯 铝 线 LGJ			
标称截面/外径(铝/钢) mm^2 / mm	120/20	150/25	185/30
电阻 Ω / km	0.22	0.19	0.16
铝 合 金 线 LHBGJ			

截面 / 外径 mm ² / mm	70/13.6	95/16	120/18
电阻 Ω / km	0.48	0.35	0.27

2 在接地网外短路时，工频分流系数 K_{f2} 可用(8.4.3-2)式计算：

$$K_{f2} = \frac{Z_{mo}}{Z_{bo}} \quad (8.4.3-2)$$

9 工频暂态电压反击及转移电位隔离

9.1 工频暂态电压反击

9.1.1 在高土壤电阻率地区，当接地电阻不满足(3.1.1)式要求时，应验算接触电位差和跨步电位差。并考虑短路时电流非周期分量的影响，要求 3kV~10kV 阀型避雷器不应动作。

9.1.2 电厂中所有 3kV~10kV 系统阀型避雷器在暂态电压作用下不应动作，因而要求全厂地网工频接地电阻值为：

$$R_w \leq \frac{U_{gf} - U_{xge}}{1.8I} \quad (9.1.2)$$

式中： U_{gf} ——3kV~10kV 阀型避雷器工频放电电压下限值(kV)；

U_{xge} ——电力网标称相电压(kV)；

I ——计算用的入地短路电流值(kA)。

3kV~10kV 系列阀型避雷器工频放电电压下限和允许的全厂接地网电阻值列于表 9.1.2。

**表 9.1.2 3kV~10kV 阀型避雷器工频放电电压
下限和允许的全厂接地网电阻**

系统标称电压 kV	阀型避雷器工频放 电电压下限值 kV	不同 I 值(kA)时的允许接地 电阻值 Ω					
		1	2	4	6	8	10
3	9	4	2.0	1.00	0.67	0.50	0.4
6	16	7	3.5	1.75	1.17	0.88	0.7
10	26	11	5.5	2.75	1.83	1.38	1.1

注 当选用无间隙金属氧化物避雷器时，对 3kV、6kV、10kV 系统标称电压可分别按表中接地电阻允许值的 80%、85%、90%确定。

9.2 转移电位隔离

9.2.1 在接地短路故障时，由于与地网相连的低压中性线、通信线路和金属管道、铁轨等导体将地网的高电位传递到厂外或将厂外零电位引进厂内，在设备绝缘体上产生高电位，以致危及人身和设备的安全，因而应采取相应隔离措施。

9.2.2 低压供电线路隔离措施

1 向厂外供电的低压电力线路宜采用架空出线，电源中性线不在厂区内接地，改在用户处接地，以免将地网可能产生的高电位引到厂外用户处。供电线路中部在厂外应有重复接地，以免厂内变压器中性点失地。此外，还应注意低压故障的切除时间不宜太长，用户处接地装置的接地电阻应满足要求，并且厂内供电变压器中性点绝缘水平应能耐受发电厂地网最

大电压值，避免供电变压器中性点绝缘击穿。

2 当采用电力电缆向接地网外供电时，除电源中性点在用户处接地外，最好使用全塑电缆。如采用铠装电缆宜将电缆外皮屏蔽层剥去 50cm~100cm，并穿入绝缘护套内。电缆的绝缘应能耐受地网的最大电压值。

3 对由电厂供电的便携式设备和用具，在厂外作业时，通常将供电回路与电厂地网绝缘，中性点与设备外壳在工作现场接地，并尽量将该处最大接地短路电流限制在较低的数值，不致在地面产生危险的电位梯度。

9.2.3 金属管道和铁轨

1 金属管道与电厂接地系统最好是多点连接，以避免在厂区内发生危险。对引出接地网区域外的管道，宜直接埋入地中引出。对埋在高土壤电阻率地区的金属管道和采用外露引出的金属管道，应在管道中接入一段绝缘管(绝缘长度视地网最大电位而定)或在法兰连接处(通常不少于 3 处)采取绝缘隔离措施。

2 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或采用沥青混凝土固定。两处间距离，视进厂列车长度确定。

9.2.4 通信线路引外、引内时，接入隔离变压器是限制地网电位转移的有效方法。

10 特殊设备接地

10.1 GIS 接地

10.1.1 三相共筒式 GIS 三相导体被封闭在同一个金属外壳内，正常运行时外壳感应电流大约为零，对构架和基础不会产生发热问题。为了保证外壳可靠接地，该结构形式 GIS 应采取多点接地方式。

10.1.2 离相式 GIS 宜采取多点接地方式。接地线布置在三相短接板处，使接地线在正常运行时，只流过不平衡电流。

离相式 GIS 外壳感应电流约为 80% 导体电流，其外漏磁很少，通常不会引起钢构发热。

10.1.3 外壳与支架之间的连接可采用绝缘体或直接相连，其连接方式的选择宜结合工程和制造厂的习惯。

1 为了防止外壳感应电流经设备支架、结构钢筋构成回路，可将设备支架与外壳绝缘，以保证支承结构和接地装置不受短路时感应电流的影响。该绝缘通常所承受的电压较小，不需特殊要求。

2 当外壳与设备支架直接连接时，流过金属支撑架的电流通常小于单相短路电流的 30%。应保证支架钢结构的机械特性。

10.1.4 离相式 GIS 采用单点接地时，接地点宜设在 GIS 各连续段的中部，设备支撑构架与外壳间绝缘(除利用设备支撑架接地外)。为了减小壳外漏磁，降低构架发热，在外壳连续段的端部和接地点处均应设置三相短接跨条。

10.1.5 单点接地的 GIS 连续段不宜过长，正常运行时外壳上感应电压最大值不得超过 50V 的安全电压值。支撑架与外壳之间绝缘的耐受电压不得小于 2kV。连续段之间应设有绝缘法兰，绝缘法兰耐受电压不得小于 2kV。

10.1.6 所有母线伸缩节间和有绝缘的法兰处(除外壳单点接地所设绝缘法兰)，应设有金属跨接线，离相式 GIS 的端部外壳间应设有三相短接跨条，中间应根据运行需要由制造厂适当设置一定的三相短接跨条。

10.1.7 为了避免 GIS 外壳电流通过电缆金属单屏蔽外皮构成回路，所有单屏蔽电缆外皮应采用单点接地，并尽可能不在 GIS 端接地。

10.1.8 GIS 应设置有专用的接地母线，所有外壳接地引线应直接接在接地母线上，不允许将数个接地点串联引到接地母线上，当间隔较多时，可设置两条接地母线。接地母线两端与接地网相连，当接地母线较长时，宜增设接地线与地网相连。

10.1.9 对单点接地方式，外壳接地引下线截面应按流过的最大单相短路电流选择；对多点接地方式，外壳接地引下线截面可按单相短路电流的 70% 选择。

接地母线及与地网连接线截面选择应按最大单相短路电流的 70% 进行选择，上述接地引下线热稳定时间按 2s 考虑。

10.1.10 混凝土基础中的结构钢筋可利用作为辅助接地网，凡作为辅助接地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，均不得引起混凝土破坏。

10.2 微波通信站接地

10.2.1 微波塔不宜设置在电厂控制室和开关站控制室附近。微波塔宜设置单独的接地装置。

10.2.2 微波站的接地电阻不应超过 $5\ \Omega$ ，在土壤电阻率较低的有条件的地区不应超过 $1\ \Omega$ ，高土壤电阻率地区不超过 $10\ \Omega$ 。接地体应围绕塔基作成闭合环形，尽量减小接触电位差和跨步电位差。

10.2.3 微波站接地网与电厂接地网采用弱连接，可用两根接地带与电厂主接地网相连，但应远离中控室和有控制电缆的电缆沟，以防冲击电压危害控制设备。机房接地网与微波塔的接地网间，至少应有 2 根接地带连接。

10.2.4 机房内应具有环形接地母线。该环形接地母线应与地网相连接。

10.2.5 同一机房内互相靠近的各种通信设备及设备外壳的接地线应就近与室内环形接地母线一点连接。

10.2.6 环形接地母线与室外闭合接地网，房顶均压带之间，至少应用 4 个对称布置的连接线相互连接，相邻连接线间的距离不宜超过 18m。

10.2.7 波导管(同轴电缆)的金属外皮，至少应在微波天线塔的上下两端与天线塔身金属结构连接。当波导管经由馈线桥引进机房时，应在进口处将波导管与接地体连接，并加设集中接地体。进入机房的波导管在机房内应直接就近与接地母线连接。室外馈线桥始端应与铁塔金属结构连接。

10.2.8 微波塔上的航空灯电源线，应采用金属外皮电缆或将导线穿入金属管道中，金属外皮或金属管道至少应在上、下两端与塔身金属结构连接。该电缆进入机房前必须水平埋入地下，且埋地长度不应小于 10m。

10.2.9 室外电缆进入机房前要埋地或穿入金属管道中埋地进入，且长度不应小于 10m。

10.2.10 机房内通信电缆终端配线架应接地，其上的信号线应装有保安设施，如放电管、保安器等。电缆中凡未使用的线对，均应两端接地。

10.2.11 外来 380V 交流电源中性线在电源室内应与接地母线连接。

10.2.12 直流电源“+”极在电源侧和通信设备侧均应直接接地。“-”极对地之间，在电源侧和通信设备侧均应接压敏电阻。

10.3 计算机接地

10.3.1 电厂计算机接地应与电厂使用同一个接地装置，不宜设置独立接地装置(厂家有特殊要求时除外)，以避免雷击或电力系统单相接地短路时，电厂接地网与计算机独立接地网间产生危险电压给计算机及其元件带来危害。

10.3.2 计算机房内应沿墙一周设置接地母线。

10.3.3 计算机工作(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。

10.3.4 信号电缆屏蔽层的接地位置应考虑相应传感器和其他连接设备的接地点，避免出现两点接地，应尽可能在接收设备端接地。

10.3.5 为避免接地系统的电位干扰，未隔离的直流回路(包括直流电源、逻辑回路、信号回路)中宜只设一个接地点，如有两点或多点接地时，其任意两接地点的电位差，在任何时候均不能大于设备允许的干扰电压，否则应在相邻接地点间增加专用的短接线。

10.3.6 任一机柜内全部对外接口设备，当有隔离时，机柜外壳、交流电源、直流回路和电缆屏蔽层的接地，应在该机柜内共一点接地。

10.3.7 远端(附属设备)元件的接地，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。

11 移动式 and 携带式电力设备接地

11.1 移动式电力设备接地

11.1.1 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，以代替上述金属连接线。如附近有自然接地体应充分利用，其接地电阻应符合本导则 5.2 节的要求。

如根据移动式机械的特殊情况，按本导则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。

11.1.2 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。

11.1.3 移动式电力设备和机械的接地线截面，应符合本导则 13 章的规定。

11.2 携带式电力设备接地

11.2.1 携带式用电设备应用专用芯线接地，此芯线严禁同时用来通过工作电流。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。

携带式用电设备的接地芯线，应采用多股软铜线，其截面不应小于 1.5mm^2 。

11.2.2 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，而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。

11.2.3 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。

12 接地装置

12.1 接地系统

12.1.1 水电厂接地装置通常包括枢纽内的水工建筑物、通航建筑物、电厂厂房和开关站等处的自然接地网和人工接地网。

12.1.2 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，以构成全厂的接地系统。

接地干线间宜相距较远，干线截面应不小于 $50\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的扁钢或直径 18mm 的圆钢。

12.1.3 高压配电装置应具有以水平接地体为主的人工均压网。

12.2 接地体

12.2.1 水电厂中可利用接地的自然接地体有：

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，如厂房机组蜗壳、尾水管、护担、水下挡水墙、进水口、引水隧洞、导流洞和船闸闸室底板、输水管道等处迎水面层钢筋网和潮湿的廊道的钢筋网。

2 压力钢管、尾水锥管和尾水管金属里衬。

3 各种闸门、拦污栅的金属结构。

- 4 施工建筑物用的金属板桩、钢筋笼。
- 5 埋设地中的供水用钢管。

12.2.2 用作接地线的混凝土内的钢筋的连接应采用焊接。对分断处应焊为一体，过分缝线时，应作过缝处理。利用自然接地体的地网网孔以 16 个为宜，并应尽量利用水下自然接地网的占地面积。

12.2.3 预应力钢筋混凝土构件中的钢筋不宜用作自然接地。

12.2.4 当利用自然接地体接地，接地电阻不满足要求时在在高压配电装置的场地应设置人工接地装置。

12.2.5 水平敷设的接地体可采用圆钢、扁钢；垂直敷设的可采用角钢、圆钢和钢管。

12.2.6 垂直接地体对大面积接地网工频电流散流作用不大，只有在小面积接地网的外缘加装垂直接地体才有一定作用。垂直接地体的长度宜为 2.5m~3.0m，埋设深度宜采用 0.6m。

12.2.7 垂直接地体多用在防雷接地装置中。对泄放雷电流的设备和构筑物，如进出线构架，避雷针(线)和避雷器均应设置人工集中接地。

12.2.8 电厂中变压器至开关站的高压架空进线段的杆塔应设置人工接地装置，人工接地体埋深不宜小于 0.6m~0.8m。

12.2.9 高土壤电阻率地区，宜采用水平放射形接地体，接地体埋深不宜小于 0.5m。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 5.4.2 条所限定数值。

12.3 接 地 线

12.3.1 交流电力设备接地所利用的金属构件、普通钢筋混凝土构件的钢筋、穿线的钢管和电缆的铅、铝外皮等接地线，应符合下列要求：

- 1 应保证其全长为完好的电气通路。
- 2 利用串联的金属构件作为接地线时，金属构件之间应以截面不小于 160mm^2 的钢材焊接。

如上述要求得到满足时，可不另设接地线。但易燃易爆危险场所应按专用规定执行。

12.3.2 不得使用蛇皮管、保温管的金属网或外皮以及低压照明网络的导线铅皮作接地线。在电力设备需要接地的房间内，这些金属外皮应接地，并应保证其全厂为完好的电气通路；接地线应与金属外皮用螺栓连接或低温焊接。

12.3.3 接地线应采用钢质。

12.3.4 接地线所经途径中，所有金属物体必须与接地线连接，避免当短路电流流过接地线时，在接地线与金属物体上产生电位差，引起电弧烧断地线，以至扩大事故。

12.3.5 所有电缆廊道(沟)中应设有接地线，电缆廊道(沟)中的电缆支架应与该接地线连接。

12.3.6 接地线应便于检查、但电缆的零芯和金属外皮，暗敷的穿线钢管以及地下的金属构件除外。

潮湿的或有腐蚀性蒸气的房间内，接地线离墙不得小于 10mm。

12.3.7 接地线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，对接地线应采取保护措施。

12.3.8 接地线不宜兼作其他用途。

12.3.9 在同时符合下列各条件时，照明线路的中性线可兼作由另一线路供电的电力设备接地线：

- 1 线路均由在同一接地网接地的变压器供电。
- 2 中性线的电导符合要求。
- 3 线路供电时，中性线不可能断开。

12.3.10 中性线上不应装设开关和熔断器，单相开关应装在相线上。

12.4 接地线连接

12.4.1 接地线连接处应焊接。如采用搭接焊，其搭接长度必须为其中较大扁钢宽度的 2 倍或其中较大圆钢直径的 6 倍。

架空线中性线的连接，可采用与相线相同的方法。

潮湿的和有腐蚀性蒸气或气体的房间内，接地装置的所有连接处应焊接；如确不易焊接，可采用螺栓连接，但应采取可靠的防锈蚀处理。

不同材料的接地线的连接应采用焊接，焊接处应作防腐处理。

12.4.2 低压配电系统中如利用钢管作接地线，钢管连接处应保证有可靠的电气连接，如跨接线、板等连接。

利用穿线的钢管作接地线时，引向电力设备的钢管与电力设备之间，应有可靠的电气连接。

12.4.3 接地线与管道等伸长接地体的连接处应焊接。

连接点应选在近处，并应在管道因检修而可能断开时，接地装置的接地电阻仍能符合导则的要求。

管道上的表计和阀门等处，均应装设跨接线。

12.4.4 接地线与接地体的连接宜采用焊接；接地线与电力设备的连接，可用螺栓连接或焊接。用螺栓连接时，应用防松动螺帽或防松动垫片。

12.4.5 直接接地或经消弧线圈接地的主变压器、发电机的中性点与接地体或接地干线连接，应采用单独的接地线。

12.4.6 电力设备每个接地部分应以单独的接地线与接地干线相连接，严禁在一个接地线中串接几个需要接地的部分。

12.4.7 跨结构分缝的接地线，在分缝处应作过缝伸缩处理，以免温度应力或不均匀沉降将接地线拉断。通常的过缝处理为将接地线在过缝处弯曲，并在接地线弯曲部分表面包上一层油纸、第二层包麻和第三层涂沥青。

12.5 接地标志

12.5.1 明敷接地线的表面均应涂绿、黄相间漆，如因建筑要求，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，如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紫带。

12.5.2 凡接地线引进建筑物的入口处，应设有标志。

12.5.3 水电厂中，如设有接地测量井，接地测量井处应设有标志。

13 截面选择及防腐

13.1 截面选择及计算

13.1.1 钢接地线的截面，应符合载流量、短路时自动切除故障段时间以及热稳定与均压的要求，且不应小于表 13.1.1 所列规格。

表 13.1.1 钢接地体和接地线的最小规格

种类	规格及单位	地上		地下
		屋内	屋外	
圆钢	直径 mm	8	10	12
扁钢	截面 mm ²	75	100	120
	厚度 mm	3	4	4
角钢	厚度	2.5	3	4

	mm			
钢 管	管壁厚度 mm	2.5	3	4

13.1.2 低压电力设备的铜或铝接地线截面不应小于表 13.1.2 所列数值。

表 13.1.2 低压电力设备的铜或铝接地线的最小截面 mm²

种 类	铜	铝
明敷裸导体	4	6
绝缘导线	1.5	2.5
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	1.5

13.1.3 大接地短路电流系统中，接地线截面应按电厂全部投产后系统发展 5~10 年，最大运行方式下接地短路电流进行热稳定校验：短路电流持续时间按保护故障持续时间考虑，即对于 110kV 和 220kV 发、变电所，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 发电厂，短路电流持续时间为断路器失灵保护持续时间 0.4s。此时钢接地线的短时温度不应超过 400℃；铜接地线的短时温度不应超过 450℃。

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

利用混凝土中的钢筋作接地引下线时，为避免高温破坏混凝土与钢筋间的结合力，钢筋的最大允许温升不得超过 100℃。

地中接地体的截面不得小于设备接地线截面的 70%。

13.1.4 小接地短路电流系统中，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系统发展 5~10 年，接地线流过单相接地故障电流时，长时间温度不应超过下列数值：

敷设在地上的接地线温度 ≤ 150℃

敷设在地下的接地线温度 ≤ 100℃

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

在一般情况下，还应校验(除发电机电压系统)发生两相异点短路时接地线的热稳定。

13.1.5 中性点直接接地的低压电力设备，为保证自动切除线路故障段，其接地线和中性线应保证在导电部分与被接地部分或中性线之间发生短路时，电力网任一点的短路电流不应小于最近处熔断器熔体额定电流的 4 倍，或不应小于自动开关瞬时或短延时动作电流的 1.5 倍，接地线和中性线在短路电流作用下不应熔断。爆炸危险场所按专用规定设计。

为使线路自动切除故障段，接地线及用作接地线的设施的电导，不小于本线路中最大相线电导的 1/2；但如能符合本条对短路电流值和热稳定条件的要求，电导亦可小于相线电导的 1/2。

13.1.6 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、铝、铜接地线的等效截面见表 13.1.6。

中性点直接接地的低压电力设备，接地线截面不大于下列数值。

钢	800mm ²
铝	70mm ²
铜	50mm ²

表 13.1.6 钢、铝、铜接地线的等效截面 mm²

钢	铝	铜
15×2	—	1.3~2
15×3	6	3
20×4	8	5
30×4 或 40×3	16	8
40×4	25	12.5
60×5	35	17.5~25
80×8	50	35
100×8	70	47.5~50

13.1.7 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可按(13.1.7)式确定。

$$I = \frac{U_{xge}}{Z_d + Z_b} \quad (13.1.7)$$

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)。

对架空线路,铜、铝导线回路的电抗可按 $0.6 \Omega/\text{km}$ 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 $0.6 \Omega/\text{km}$ 计算。

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。

当按(13.1.7)式计算的短路电流值不符合 13.1.5 条的要求时,应装设能自动切除接地故障的保护装置。

13.1.8 携带式接地线应采用裸铜软绞线,其截面应符合短路时热稳定的要求,短时温度不应超过 730°C ,且截面不宜小于 25mm^2 。

13.1.9 根据热稳定条件,接地线材料为钢、铜或铝材的最小截面应按(13.1.9)式进行计算。

$$S_{jd} \geq \frac{I_{jd}}{C} \sqrt{t_d} \quad (13.1.9)$$

式中: S_{jd} ——接地线的最小截面(mm^2);

I_{jd} ——流过接地线的短路电流稳定值(A);根据系统 5~10 年发展规划,按系统最大运行方式确定;

t_d ——短路的等效持续时间(s);

C ——接地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短路前接地线的初始温度确定,接地线初始温度宜取 40°C 时,可按表 13.1.9 所列数值计算。

表 13.1.9 校验接地线热稳定用的 I_{jd} , t_d 及 C 值

参 数	大接地短路电流系统中的接地线	中性点直接接地的低压电力网的接地线和中性线	各种电力网中用的携带式接地线
I_{jd}	单相接地、两相接地短路时,流过接地线的短路电流	导电部分与被接地部分或中性线间发生短路时,流过接地线的短路电	发生各种类型短路时,流过接地线的短路电流

		流		
t_d		相当于继电保护发生一重故障后,保护动作的等效持续时间	相当于继电保护主保护动作的等效持续时间	相当于继电保护主保护动作的等效持续时间。宜按电力网中,各设备继电保护主保护的的最大整定时间确定
C	钢	70	90 (61)	—
	铝	120	155 (100)	—
	铜	210	270 (180)	(250)

注 括号中的数值用于架空接地线和中性线。

13.1.10 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规定使用年限内腐蚀的增加截面。

13.2 接地体防腐

13.2.1 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。设计应根据当地实际情况确定,如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。

13.2.2 当接地体腐蚀速度较大时,宜采取防腐措施,如热镀锌或镀锡。如无防腐措施需增加接地体截面。

13.2.3 在有腐蚀蒸气或气体的房间内,接地体应有防腐措施。混凝土中的接地体,可不考虑腐蚀。接地体的设计工作寿命,不宜低于30年。

13.2.4 在腐蚀严重的地区,接地体可因地制宜地选择抗腐蚀性能较好的材料,如热镀锌钢、铜包钢,或采取防腐导电材料。

14 接地装置工频参数测量

14.1 接地电阻测量

14.1.1 接地电阻测量要求:

1 发电厂地网和线路杆塔接地装置的工频特性与土壤的潮湿程度有密切关系,应避免雨天和雨后立即测量,应在连续天晴3天后测量。

2 接地测量前要事先了解清楚地下金属管道情况,在布置电流极和电压极时,应与埋在地下的金属管道走向垂直。

3 测量时,接地装置应与线路避雷线断开。

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 大型接地网的接地电阻测量,宜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10A。

小型接地网的接地电阻可采用电流—瓦特表法和接地摇表测量。

输电线路杆塔接地装置的接地电阻,可采用接地摇表测量。

6 接地装置的接地电阻宜采用两种方法或两种电极布置方式测量,以便互相验证,提高测量结果的可信度。

14.1.2 电流—电压表三极法。

按图 14.1.2-1 电流极与地网边缘之间的距离 d_{13} ，宜取接地网最大对角线长度 D 的 4~5 倍。当 d_{13} 达到 4~5 倍地网最大对角线长度确有困难时，在土壤电阻率均匀的地区，可取 $2D$ 。在土壤电阻率不均匀地区可取 $3D$ 。

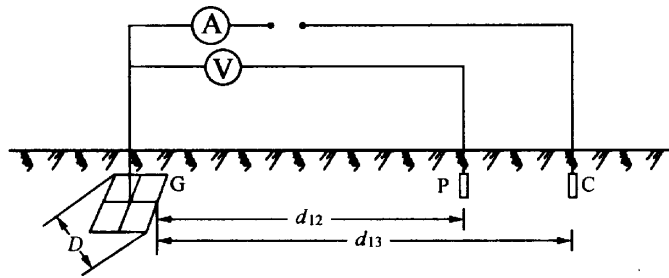


图 14.1.2-1 电流—电压表三极法接线示意图

在电流、电压极的布置上，应尽量避免电流线与电压线之间的互感。

1 采用图 14.1.2-2 所示的任意夹角三极法测量时，接地电阻可用(14.1.2) 式进行电阻修正：

$$R_0 = \frac{R}{1 - \frac{D}{2} \left[\frac{1}{d_{12}} + \frac{1}{d_{13}} - \frac{1}{\sqrt{d_{12}^2 + d_{13}^2 - 2d_{12}d_{13} \cos\theta}} \right]} \quad (14.1.2)$$

式中： d ——被测接地网的最大对角线长度(m)；

d_{12} ——接地网边缘和电压极之间的距离(m)；

d_{13} ——接地网边缘和电流极之间的距离(m)；

θ ——电压极与电流极之间的夹角；

R ——接地电阻测量值(Ω)；

R_0 ——接地网的接地电阻(Ω)。

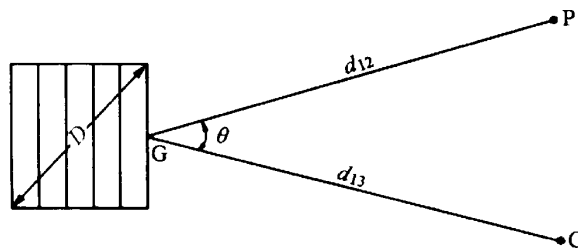


图 14.1.2-2 三极任意夹角布极法

2 采用图 14.1.2-3 所示的直线布极时，电压极一般到接地网的距离约为电流极到接地网的距离的 50%~60%。测量时应沿接地网和电流极的连线移动三次，每次移动距离为 d_{13} 的 5% 左右，如三次测量得的电阻值接近即可。

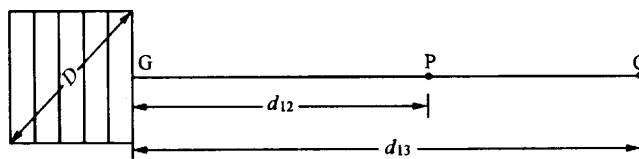


图 14.1.2-3 三极直线布极法

3 采用图 14.1.2-4 所示的等腰三角形布极时, 宜使夹角 $\theta \approx 30^\circ$, $d_{12} = d_{13} \geq 2D$ 。

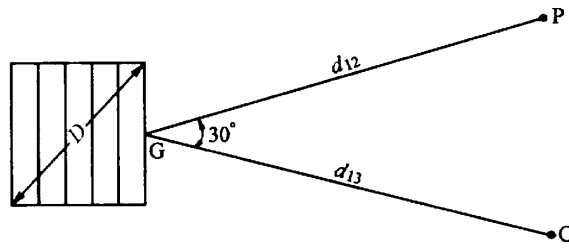


图 14.1.2-4 三极等腰三角布极法

14.1.3 电流—电压表四极法接地电阻测量如图 14.1.3 所示:

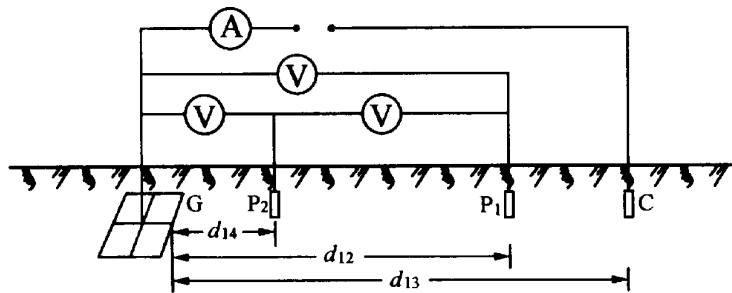


图 14.1.3 电流—电压表四极法接线图

1 采用四极法测量的接地电阻可用(14.1.3)式进行计算

$$R = \frac{U_{12}^2 + U_{14}^2 + U_{42}^2}{2IU_{14}} \quad (14.1.3)$$

2 电压极布置与 14.1.2 条的要求一样, 辅助极 4 离地网的距离不能过近, 否则 U_{14} 将过小, 这将使 R 的计算误差大大增加。一般为 $0.1D \sim 0.2D$ 处, 辅助极引线 与 电流线间不应有互感, 辅助极与电流极间最好成夹角布置。

14.1.4 电流—瓦特表三极法接地电阻测量如图 14.1.4 所示。

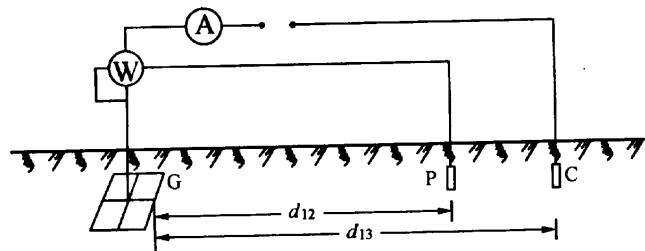


图 14.1.4 电流—瓦特表三极法接线图

1 采用电流—瓦特表法测量, 所测接地电阻可按(14.1.4)式估算:

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (14.1.4)$$

式中: P ——瓦特表所测读数(W);

I ——电流表所测得的读数(A)。

2 在测量布板上应遵循 14.1.2 条。当测量线间互感较大时应采用低功率因数瓦特表。

14.1.5 对线路杆塔接地网或小面积地网可采用接地摇表进行接地电阻测量, 接地摇表测量

的接线方式如图 14.1.5-1 所示。

当被测接地电阻小于 1Ω 时，宜采用四端子接线仪测量。

电极的布置见图 14.1.5-2， d_{13} 宜取接地装置最长射线长度 l 的 4 倍， d_{12} 取 L 的 2.5 倍。

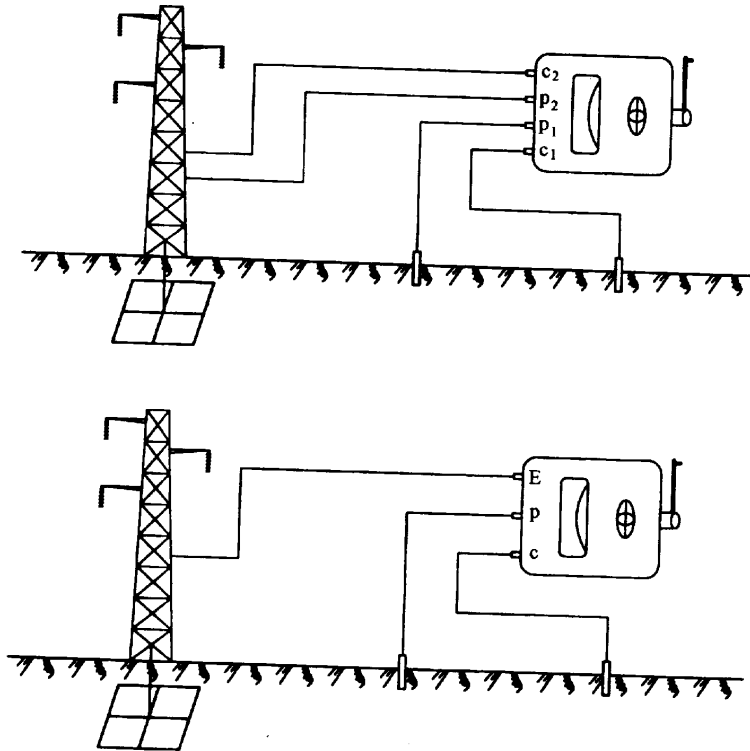


图 14.1.5-1 接地电阻测量仪的测量接线图

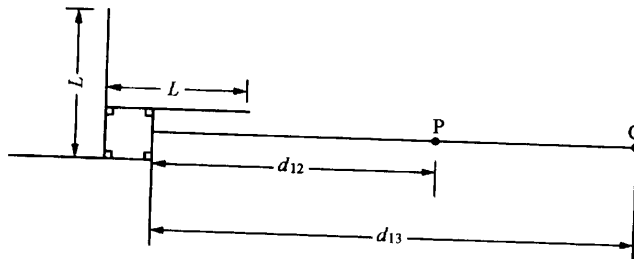


图 14.1.5-2 杆塔接地电阻测量布极法

14.1.6 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，可采用倒相法和三相电源法进行测量。

1 采用倒相法消除工频干扰，其接地电阻可用(14.1.6-1)式和(14.1.6-2)式计算：

对电流—电压表法：

$$R = \sqrt{\frac{1}{2}(U_1^2 + U_2^2) - U_0^2} / \sqrt{\frac{1}{2}(I_1^2 + I_2^2) - I_0^2} \quad (14.1.6-1)$$

式中： U_0, I_0 ——断开电源，接通电流线后测量的干扰电压(V)和干扰电流(A)；

U_1, I_1 ——接通电源后测量接地网的压降(V)和电流(A)；

U_2, I_2 ——倒相后测量的接地网压降(V)和电流(A)。

对电流——瓦特表法：

$$R = \frac{P_1 + P_2}{2I^2} \quad (14.1.6-2)$$

式中: P_1, P_2 ——倒相前、后测量的功率。

2 采用三相电源法消除干扰,用三相电源分别加压测量,所测结果代入(14.1.6-3)式计算:

$$R = \sqrt{\frac{1}{3}(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2) - U_0^2} / \sqrt{\frac{1}{3}(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) - 3I_0^2} \quad (14.1.6-3)$$

式中: U_A, U_B, U_C ——依次接通三相电源后测量的地网压降(V);

I_A, I_B, I_C ——依次接通三相电源后测量的入地电流(A)。

14.2 接触、跨步电位差测量

14.2.1 测量地网内的接触电位差和跨步电位差可与测量接地网电阻同时进行。

14.2.2 测量接触电位差和跨步电位差的原理接线如图 14.2.2 所示。

接触电位差和跨步电位差测量用电压表应采用高内阻(30kΩ以上)表计。

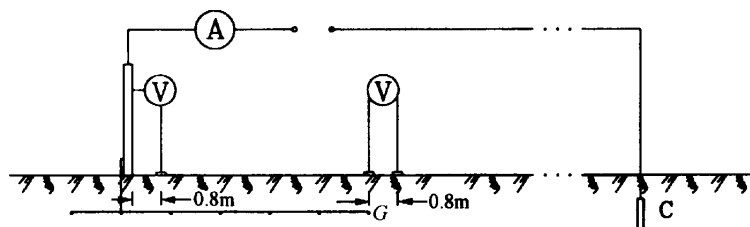


图 14.2.2 接触电位差和跨步电位差测量原理接线图

14.2.3 接触电位差应在电厂工作人员经常出现的电力设备或构架附近测量;跨步电位差应在接地装置的边缘处测量。

14.2.4 测量接触电位差和跨步电位差时,模拟人脚的金属板采用 0.1m 半径的圆板或 0.125m × 0.25m 的长方形板,为了使金属板与地面接触良好,可在金属板与地面的接触面间撒一点水,并在每块板上站人或放置 15kg 的重物。

14.2.5 在测量接触电位差时,电流应从构架(离地面垂直距离 1.8m 处)注入接地装置。

14.3 土壤电阻率测量

14.3.1 土壤电阻率测量应避免雨后立即进行,一般宜在连续天晴 3 天后或在冬天干燥季节进行测量。在冻土区,测量电极必须打入冰冻线以下。

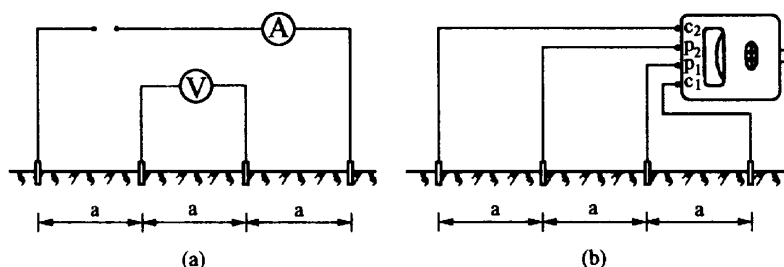


图 14.3.3 对称四极法接线图

(a)电流电压表法; (b)接地摇表法

14.3.2 三极法测量土壤电阻率应采用垂直或水平接地电极进行测量。先测出电极接地电阻,

然后按(7.1.1-1)式或(7.1.1-2)式推算土壤电阻率 ρ 。

用三极法测土壤电阻率时，其准确性与棒对土壤接触的紧密程度有很大关系，往往由此而产生较大的测量误差。

14.3.3 对称四极法(或称 Wenner 四极法)如图 14.3.3 所示：四个测量电极位于同一深度的一条直线上，测得的土壤视电阻率为：

$$\rho_s = 2 \pi a U / I = 2 \pi a R \quad (14.3.3)$$

式中： U ——电流电压表法所测的电压值(V)；

I ——电流电压表法所测的电流值(A)；

R ——接地摇表法所测得的电阻值(Ω)。

14.4 水电阻率测量

14.4.1 现场测量水电阻率宜采用四极法，电极入水深度 h 不应大于极间距离 a 的 $1/20$ ，极距可从水深 $1/10 \sim 1/20$ 开始测量，测得的视电阻率曲线水平段为水电阻率。

14.4.2 取水样测量水电阻率宜采用电导测量仪，每种水样分 3 瓶盛装，每瓶约 1000ml，瓶口应用蜡封密，水样保存期不宜过长，测量电阻率时应记录水温。

14.5 四极法测量电极布置及典型视电阻率曲线

14.5.1 在被测场地中心设置图 14.5.1 所示两条互相垂直的基线，将 C1、P1、P2 和 C2 四个测量电极沿着基线布置，改变极距 a 可测得视电阻率 ρ_s 与极距 a 的关系曲线 $\rho_s = f(a)$ 。

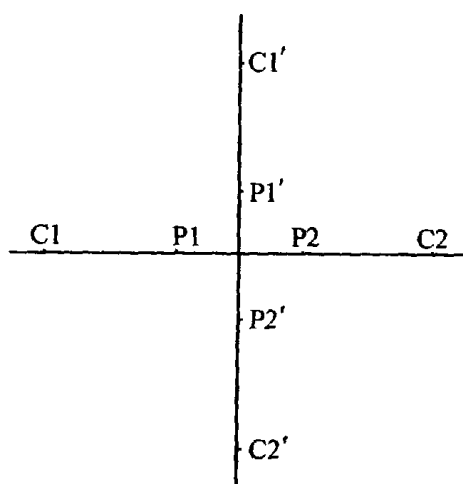


图 14.5.1 基线测量布极图

14.5.2 当被测场地较大时，应在被测场地上按图 14.5.2 所示网格设置测点，同样按上述方法测出各点的视电阻率曲线。

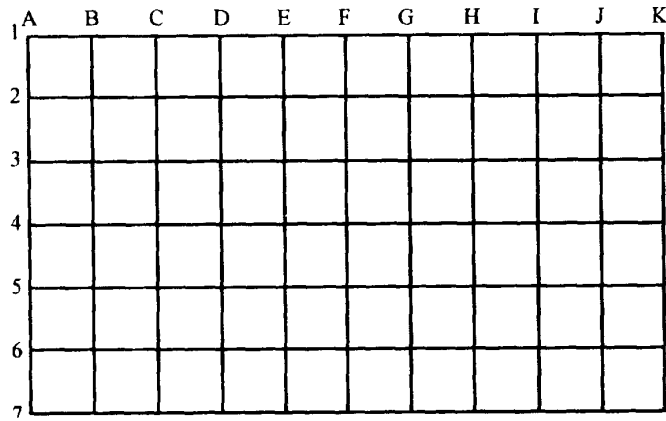


图 14.5.2 场地电阻率测量的网形系统

14.5.3 为了较准确反映接地装置的工频特性，测量电极间的最小距离(即最小测量深度)不宜小于(14.5.3-1)式或(14.5.3-2)式：

对地网面积 $S < 1600\text{m}^2$ 时：

$$a_{\min} \geq \sqrt{S} \quad (14.5.3-1)$$

对地网面积 $S \geq 1600\text{m}^2$ 时：

$$a_{\min} \geq \frac{1.6\sqrt{S}}{\lg \sqrt{S}} \quad (14.5.3-2)$$

式中： S ——地网所占区域的面积(m^2)。

14.5.4 对土壤不均匀地区，宜测出各测点视电阻率 ρ_s 与测量电极极距 a 的关系曲线 $\rho_s = f(a)$ ，并对照图 14.5.4-1 和图 14.5.4-2 中各典型曲线，确定地中各层电阻率及其变化，决定接地装置的设计方案和措施。

对二层地质结构土壤，当所测曲线与 D 型典型曲线相似表示 $\rho_1 > \rho_2$ ，与 G 型曲线相似表示 $\rho_1 < \rho_2$ ；对三层地质结构土壤，H 型曲线表示 $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ ，A 型曲线表示 $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ ，K 型为 $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ ，而 Q 型则表示 $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ 。对更多层的地质结构，应尽可能化为三层。

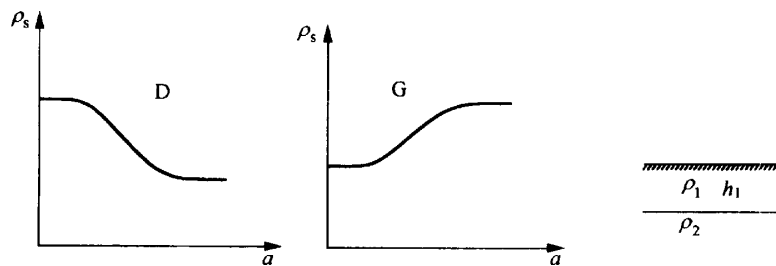


图 14.5.4-1 二层土壤典型曲线图

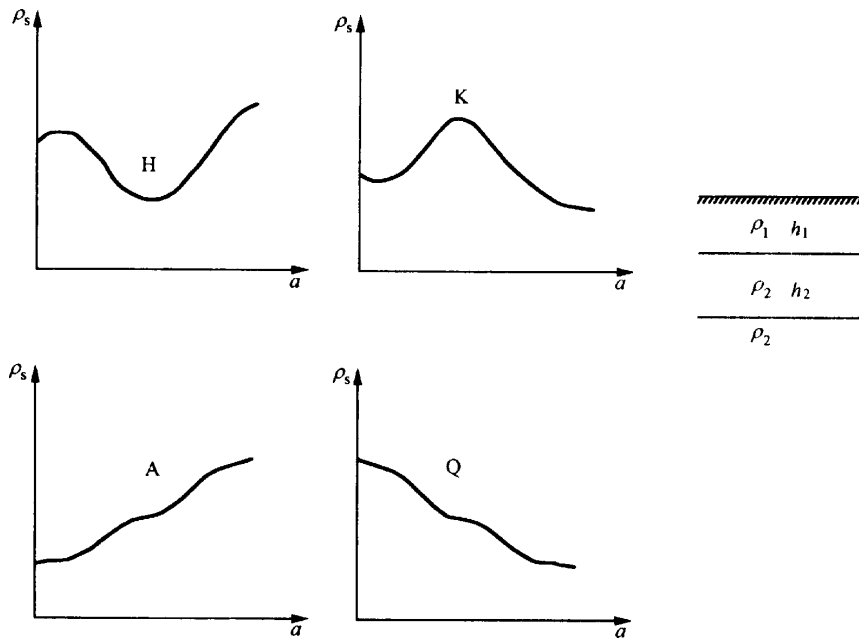


图 14.5.4-2 三层土壤典型曲线图

14.5.5 利用网形测量结果，作出各深度的土壤电阻率等值曲线图，以便合理的设置集中接地体。或作出各剖面的土壤电阻率等值曲线，采用加权平均法求出整个地网区域的平均土壤电阻率，以便设计采用。

14.5.6 在缺少电阻率实测数据时，可根据地质构造，按附录 C 中所列典型土壤和水的电阻率参考值选取。

附录 A(标准的附录)

非均匀土壤中接地网接地电阻的计算

A1 土壤具有图 A1 所示的两个剖面结构，水平接地网的接地电阻 R 可用(A1) 式计算： 邛

$$R = \frac{0.5\rho_1\rho_2\sqrt{S}}{\rho_1S_2 + \rho_2S_1} \quad (\text{A1})$$

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)。

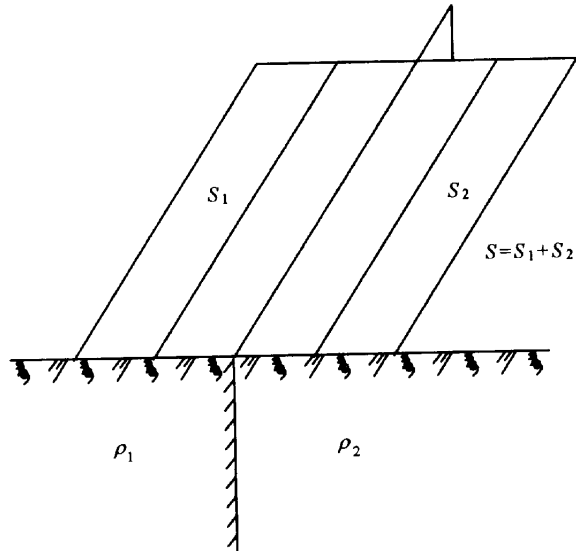


图 A1 两种土壤电阻率的接地网

A2 土壤具有两层结构(图 A2-1), 水平接地网的接地电阻 R 可用(A2)式计算

$$R = 0.5 \times \frac{K(\rho_2 - \rho_1) + \rho_1}{\sqrt{S}} \quad (\text{A2})$$

式中: ρ_1 、 ρ_2 ——分别为上、下层土壤电阻率(Ωm);
 K ——系数

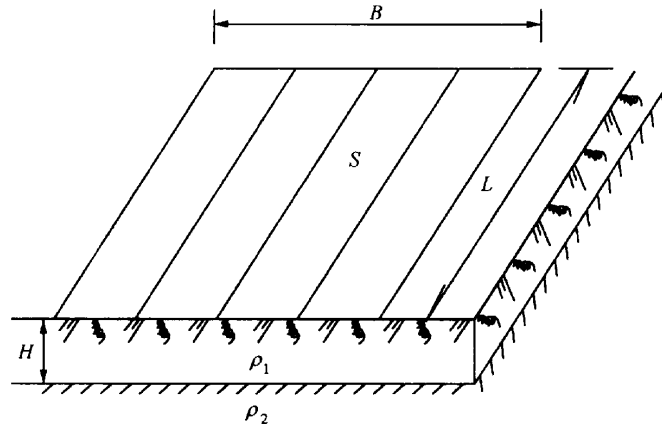


图 A2-1 两层土壤电阻率的接地网

系数 K 由图 A2-2 查出。其方法如下。

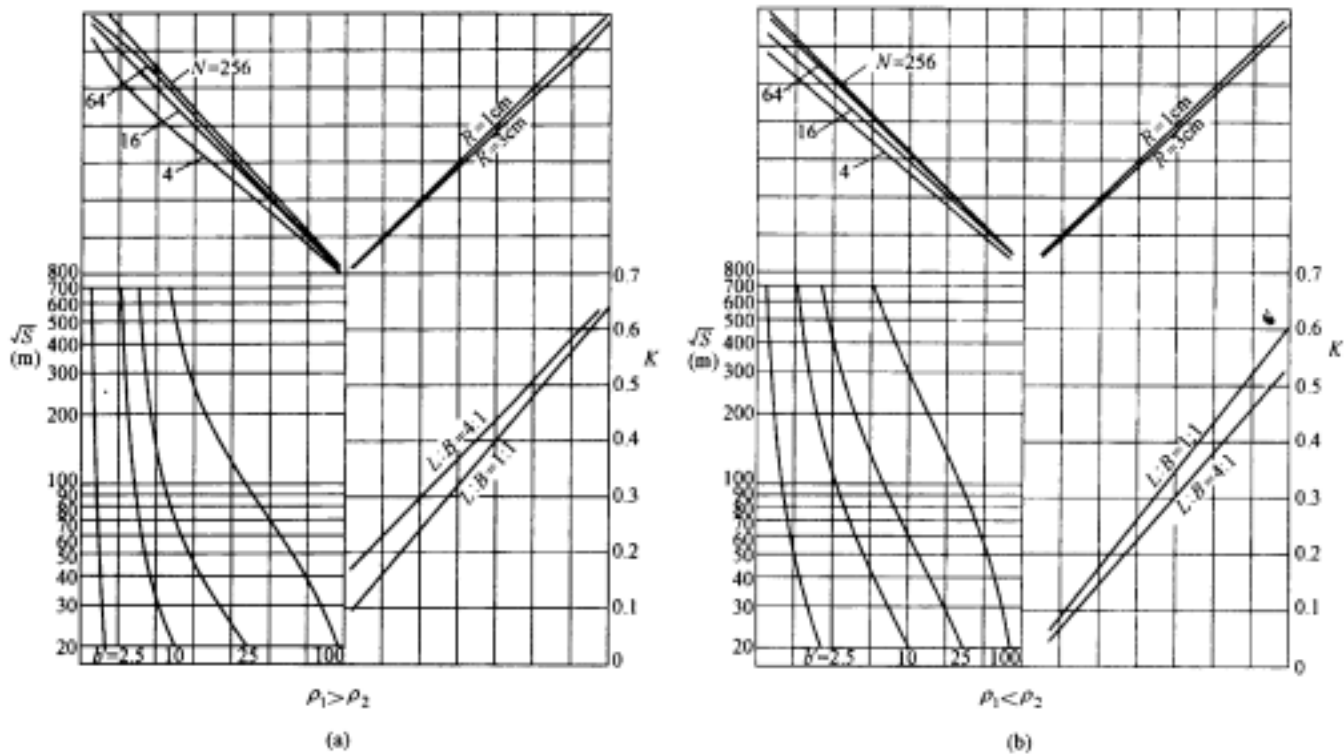


图 A2-2 系数 K 的曲线

先从图 A2-2 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)。

A3 水下接地网接地电阻可按(A3)式计算：

$$R = K_s \frac{\rho_s}{40} \quad (\text{A3})$$

式中： ρ_s ——水电阻率；

K_s ——接地电阻系数。

系数 K_s 可由图 A3 (a)(b)(c)(d)(e) 曲线查得，图中 H 为水深。

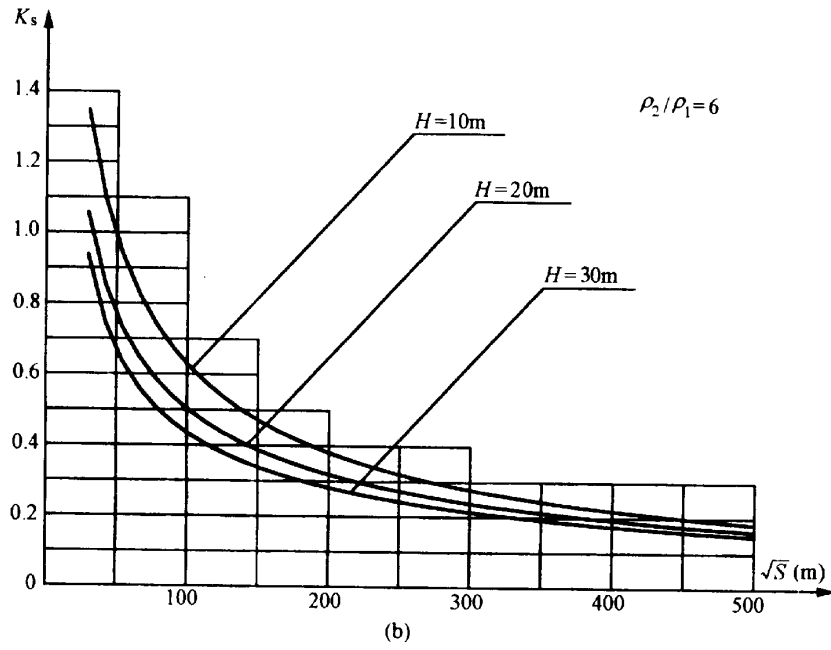
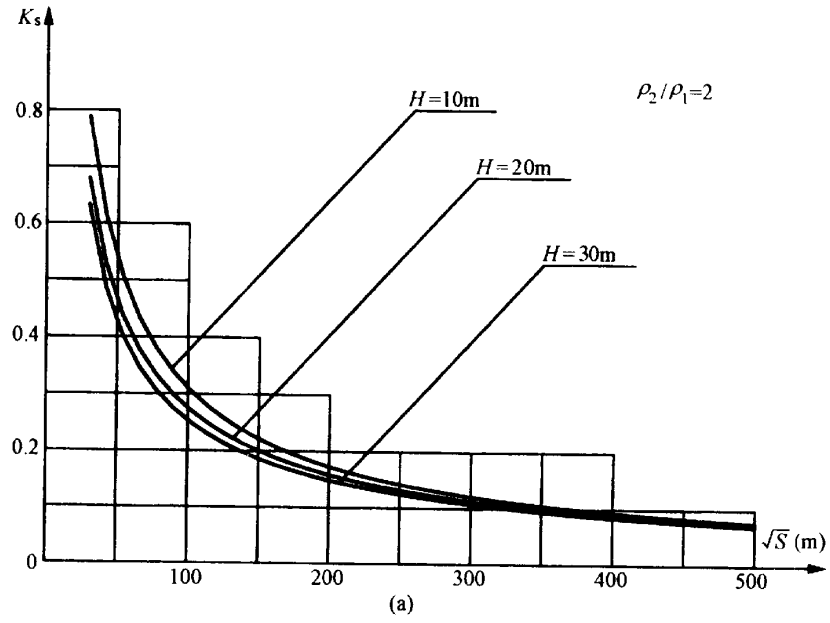


图 A3 水下接地网接地电阻计算系数(一)

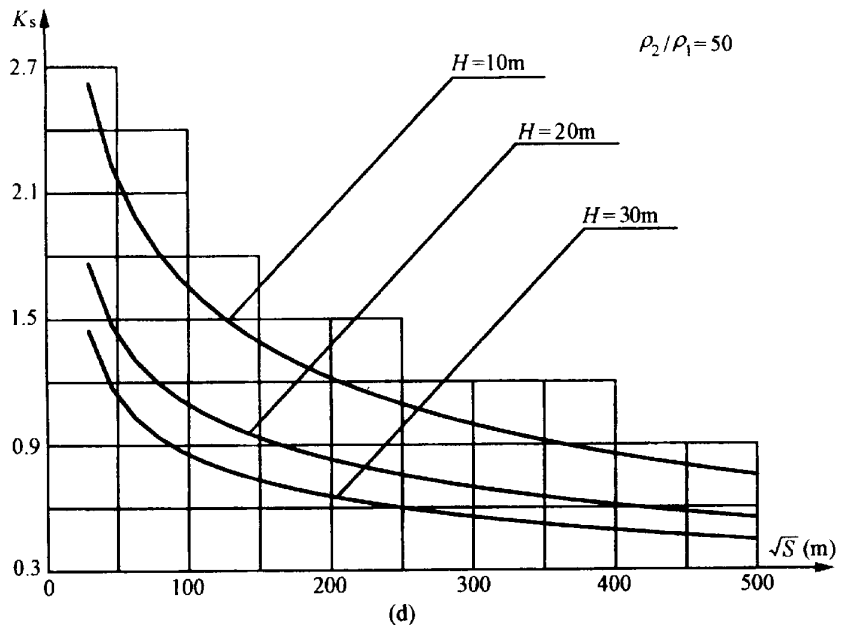
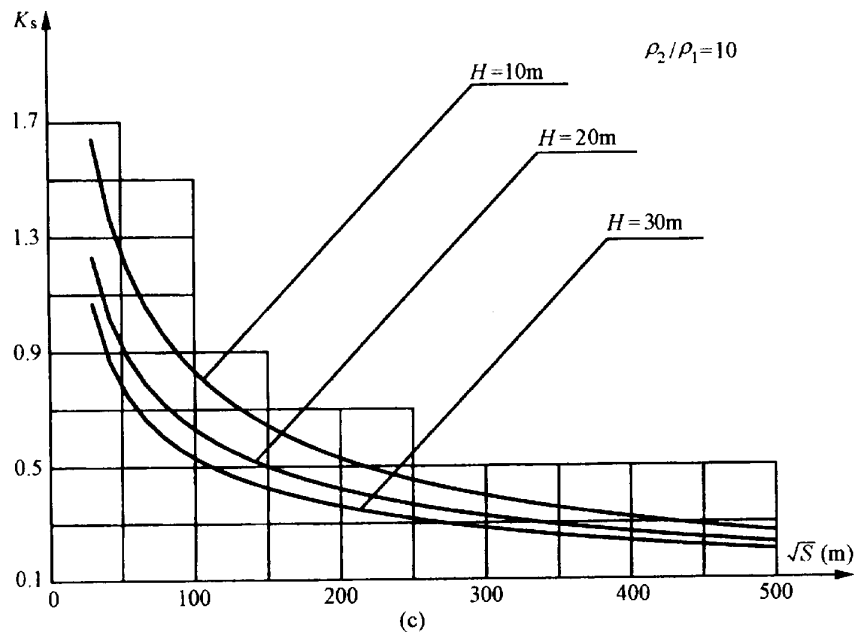


图 A3 水下接地网接地电阻计算系数(二)

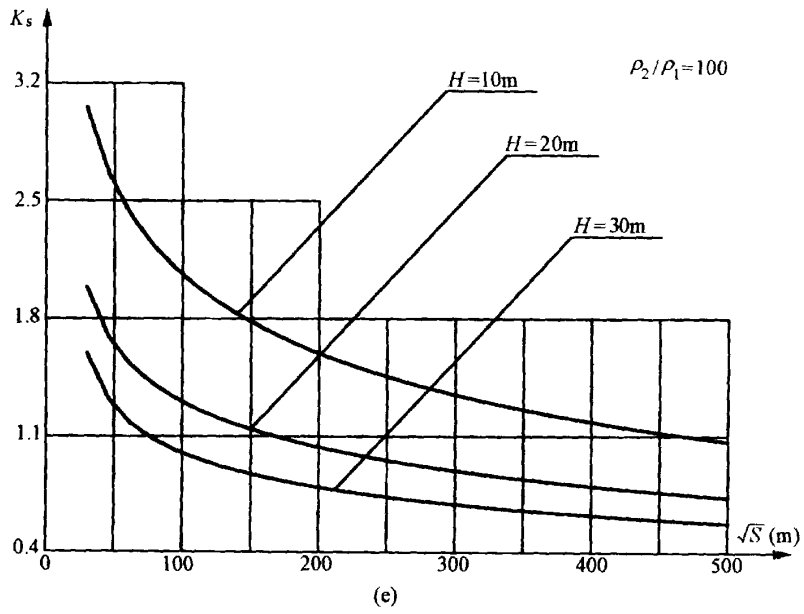


图 A3 水下接地网接地电阻计算系数(三)

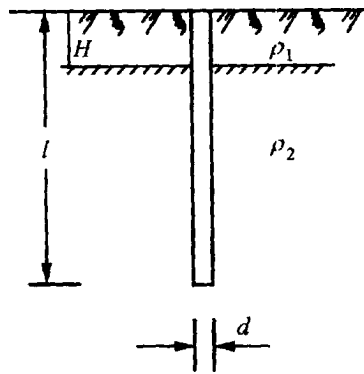


图 A4 深埋接地体示意图

A4 两层电阻率土壤深埋接地体(图 A4)接地电阻可按(A4)式计算:

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{d} + C \right) \quad (A4)$$

$$L < H \quad \rho_a = \rho_1$$

$$L > H \cdots \rho_a = \frac{\rho_1 \rho_2}{\frac{H}{l} (\rho_2 - \rho_1) + \rho_1}$$

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

式中各参数含义如图 A4 所示。

附录 B(标准的附录)

架空线路杆塔接地体的冲击系数

接地体的冲击系数与单独接地体的形状、尺寸、冲击电流值,以及土壤电阻率有关,各种型式人工接地体和线路自然接地体在 $\rho \leq 2000 \Omega \text{m}$ 下,其冲击系数可按(B1)式计算: 垆

$$\alpha = \frac{1}{a_i + b_i(I_i \rho)^{m_i} / L^p} \quad (B1)$$

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(k Ωm);

L ——垂直接地布置的长度、水平带形接地体的长度、水平环形接地布置的直径,以及各种杆塔自然接地体的长度(m);

a_i 、 b_i 、 m_i 、 p ——系数,列于表 B1 中。

杆塔自然接地体的效果,仅在 $\rho \leq 300 \Omega \text{m}$ 才加以考虑,其冲击系数可按(B2)简化公式计算:

$$\alpha = \frac{1}{a_i + b_i I_i^{m_i}} \quad (B2)$$

式中各常数如表 B1 所列。

表 B1 用于冲击系数计算的常数

接地体型式		a_i	b_i	m_i	p
人工 接地 体	垂直接地体	1.35	1.35	0.8	1.2
	水平带形接地体	1.35	3.3	0.8	1.2
	水平环形接地体	1.35	3.3	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

附录 C(提示的附录)

典型土壤(水)电阻率

表 C1 和表 C2 仅供缺少土壤和水的电阻率数据时参考,原应以实测值作为设计依据。

表 C1 土壤和水的电阻率 Ωm

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	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	80~1000	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	500	—	—	—
	红色页岩(30%湿度)				
	表层土夹石、下层砾石	600	—	—	—
	(15%湿度)				
砂	砂、砂砾	1000	250~1000	1000~2500	—
	砂层深度大于10m、地下水较深的草原	1000	—	—	—
	地面粘土深度不大于1.5m、底层多岩石	1000	—	—	—
岩石	砾石、碎石	5000	—	—	—
	多岩石山地	5000	—	—	—
混凝土	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	—	—	—
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 C2 岩石电阻率

Ωm

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
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	$10^8\sim 10^9$
12	砂岩	10^3	$10^3\sim 10^8$

附录 D(标准的附录)

本导则用词说明

D1 为便于在执行本导则时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

D1.1 表示很严格,非这样作不可的用词:

正面词采用“必须”;

反面词采用“严禁”。

D1.2 表示严格,在正常情况下均应这样作的用词:

正面词采用“应”;

反面词采用“不应”或“不得”。

D1.3 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样作的用词:

正面词采用“宜”或“可”;

反面词采用“不宜”。

D2 条文中必须按指定的标准、规范或其他有关规定执行的写法为“应按……执行”或“应符合……规定”。非必须按所指的标准、规范或其他规定执行的写法为“参照……”。

中华人民共和国电力行业标准

DL/T5091—1999

水力发电厂接地设计技术导则

Grounding design guide for hydro-power station

条文说明

主编部门:长江水利委员会长江勘测规划设计研究院

批准部门:中华人民共和国经济贸易委员会

3 定 义

3.0.20 保护线名词定义仅适用于低压三相五线制中。

4 接地设计一般程序和规定

4.2 接地设计一般规定

4.2.6 对接地装置未全部施工完毕而发电的工程,应对电厂已形成的接地装置进行校核、测

量接触电位差、跨步电位差和转移电位，以保证安全运行。校核时的短路电流应为初期发电时电网可能出现的最大实际短路电流。

4.2.8 保护接地及要求：

3 水力发电厂电气设备接地使用一个总的接地装置，一般电气设备安装处都有接地母线，低压电气设备外壳或机座皆采用接地，只有少数远离接地母线的电气设备采用接中性线或保护线的保护方式。

4.2.9 防雷接地及要求：

1 集中接地对雷电泄流、降低冲击电阻有显著的效果。

5 接地电阻

5.2 小接地短路电流系统的接地电阻

5.2.1 不同电压等级的电气设备共用一个接地装置时，接地电阻值应符合其中最小值的要求，因低压系统要求接地装置不大于 4Ω ，故高低压电力设备共用的接地装置接地电阻也不应超过 4Ω 。

6 降低接地电阻的措施

6.4 人工降阻

6.4.2 人工降阻成本高，且仅对单个或集中接地体的工频接地电阻具有显著效果，对小地网也有一定效果，对大、中型地网没有任何作用，可针对工程具体情况适当采用。

7 接地电阻计算

7.1 工频接地电阻计算

7.1.1 (7.1.1-2)式的水平接地体形状系数 A 按解广润编写的《电力系统接地技术》(水利电力出版社，1991)一书制订。(7.1.1-3)式引自王洪泽编写的“计算水平地网接地电阻的新公式”《高电压技术》1987年第1期，其误差为 $\pm 2\%$ 。

7.1.4 大型水力发电厂接地通常由几个接地网组成一个总接地装置，如何准确计算这样复杂的大面积接地装置的接地电阻，是比较困难的，只能采用本条规定的宏观计算来加以判断。

目前计算接地电阻的公式，皆为等电位下推导的，而大面积接地装置并非是一个等电位体，故对大面积的接地装置的接地电阻计算，需加上一个修正系数。为此，委托武汉水利电力大学进行研究，对不同接地材料和地网面积，绘制了不同土壤电阻率下接地电阻的修正系数曲线。

8 均 压

8.1 均压网设计

8.1.2 在进行均压网设计时，推荐采用等网孔电位的不等间距布置，这样可节省钢材。

8.2 接触、跨步电位差允许值规定

8.2.1 美国达尔基尔早年提出人体安全电流 $I = \frac{0.165}{\sqrt{t}}$ (A)，我国规程中的接触电位差和跨

步电位差公式也是采用了该公式导出的，后因人体安全电流修改为 $I = \frac{0.116}{\sqrt{t}}$ (A)，故对原

公式进行相应的修改。

8.3 接触、跨步电位差计算

8.3.1~8.3.5 均压网不等间距布置的排列和接触系数、跨步系数的计算，按陈先禄等编写的“用不等间距布置发、变电所水平接地网均压导体的设计方法及其参数经验公式研究报告”制定。

等间距布置的接触系数计算，按解广润编写的《电力系统接地技术》制定。等间距的跨

步系数曲线根据武汉水利电力大学的研究成果制定。

9 工频暂态电压反击及转移电位隔离

9.1 工频暂态电压反击

9.1.2 地网工频暂态电压下，以避雷器不动作而要求接地网的接地电阻值。

10 特殊设备接地

10.1 GIS 接地

10.1.7 参照 IEEE70-1 第 4.3.9 条第一款条文，以防止金属外皮电缆与 GIS 外壳构成回路。

10.1.9 GIS 外壳接地线截面的选择要求，考虑电流分流不均匀，一般不会大于三、七分配。

10.2 微波通信站接地

10.2.1 对微波塔设置位置的要求，为防止雷击微波塔不致对控制设备造成反击或控制回路误动。

10.2.2 高土壤电阻率地区做到 5Ω 非常困难，允许高土壤电阻率地区提高到 10Ω 。

10.2.3 微波站接地网与电厂主接地网连接应远离中控室，以防止对弱电设备的影响。

10.2.5 为防止地网冲击电位差引入同一机房内靠近的通信设备及外壳，造成设备的损坏和干扰，故采用一点接入接地母线。

10.2.11 为防止外来电源中性线引入零电位到机房内，与地网形成电位差，故要求中性线与机房地网连接。

10.3 计算机接地

10.3.2 机房内需设置接地母线。

10.3.7 由于计算机附属设备远离主设备，计算机回路的接地接到两个独立的地网上，防止地电位差引起对计算机干扰，必须加以隔离。

12 接地装置

12.1 接地系统

12.1.1 针对水力发电厂接地装置所包含的内容。

12.2 接地体

12.2.1 水力发电厂可利用的自然接地体可能场所。

12.2.2 对自然接地网孔数的规定。随着接地网孔的增加，接地电阻减小趋于饱和，32 个网孔与 16 个网孔相比，接地电阻仅减小 10% 左右，而增加了大量的施工工程量，故定为 16 个网孔为宜。

12.2.3 对预应力钢筋不宜作自然接地体的规定。

12.2.4~12.2.9 对人工接地体设置和要求，垂直接地体作用以及用于防雷接地设备部位的要求。

13 截面选择及防腐

13.1 截面选择及计算

13.1.1 国内发生的接地事故说明，过去规定的接地体和接地线的最小规格偏小，这次适当增大。

13.1.3 接地线的允许温度，钢 $\leq 400^{\circ}\text{C}$ ；铜 $\leq 450^{\circ}\text{C}$ 是在以下短路电流持续时间的情况下： $110\text{kV}\sim 220\text{kV}$ 系统多为一套主保护，按一级后备保护动作时间为 $t=t_{\text{主}}+t_{\text{后}}+t_{\text{固}}=0.03+0.5+0.07=0.6\text{s}$ ； $330\text{kV}\sim 500\text{kV}$ 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。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 。

13.2 接地体防腐

13.2.1 接地材料腐蚀速度很难给出具体数据，各地情况不一致，只能根据本地区的运行经

验确定。

13.2.3 接地体使用寿命有提 20 年也有提 50 年的，这里取 30 年。

14 接地装置工频参数测量

14.1 接地电阻测量

14.1.5 对线路杆塔接地网和小面积接地网可采用接地摇表进行测量。

14.5 四极法测量电极布置及典型视电阻率曲线

14.5.3 参照前苏联四极法测量电极最小距离归纳的公式。

14.5.4 按视电阻率曲线判断土壤分层，参照傅良魁著《电法勘探教程》P93。

14.5.5 根据测得的视电阻率曲线，得出等电阻率曲线图，再计算出土壤等效电阻率的方法。

附录 A(标准的附录)

非均匀土壤人工接地体接地电阻的计算

A2 对美国曲线进行了校核，原曲线使用地网面积为 15000m^2 ，对大型地网不适用，为此重新绘制曲线，适用到 500000m^2 的地网面积。

A3 水电站中经常在水中设置接地网，为便于计算水中地网的接地电阻，采用了接地电阻系数的计算公式，同时根据岩石与水的电阻率比值的不同，绘制了多组不同水深和接地网面积的接地电阻系数曲线，以便计算中直接查用。