

SHUIDIANZHAN
JIEDI SHEJI

水电站 接地设计

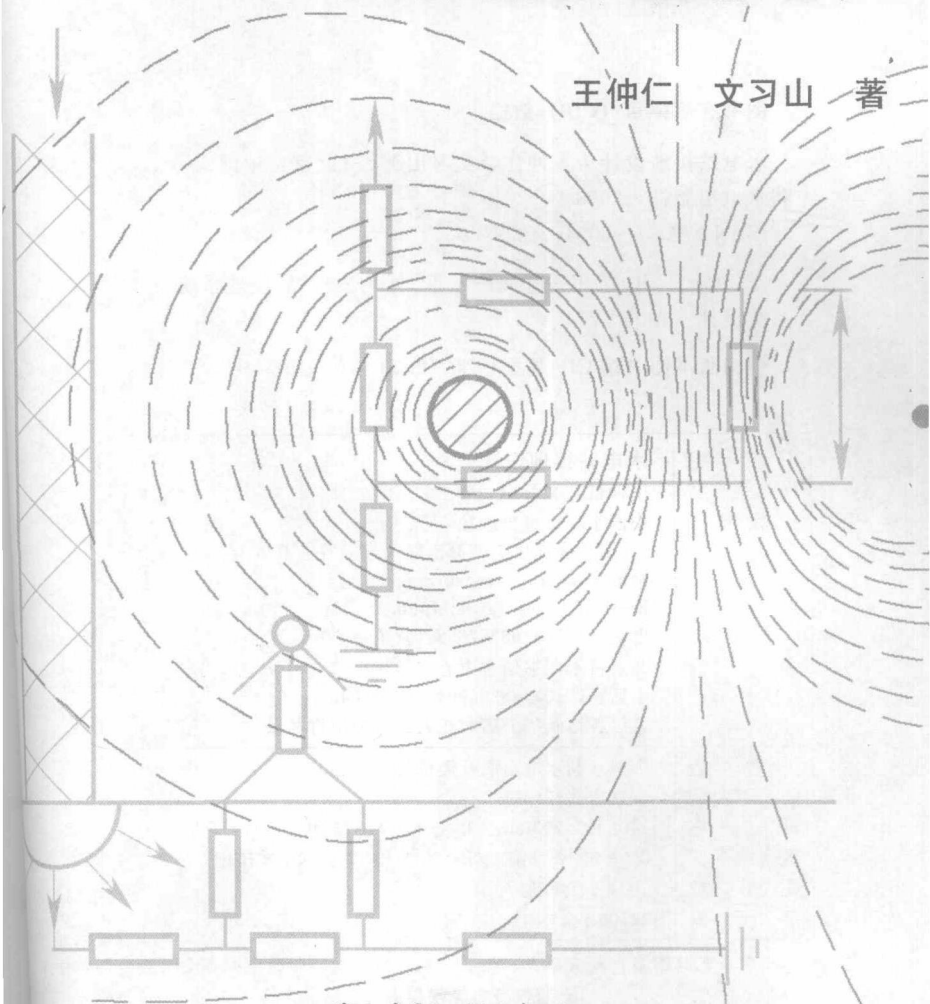
王仲仁 文习山 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水电站 接地设计

王仲仁 文习山 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

作者在水电站接地方面做了大量的理论与工程实践,将这些理论成果和工程经验编写在本书中,希望本书能对水电站接地技术的发展与研究起到一些促进作用。并对从事这方面工作的人员有一定借鉴作用。

本书共分8章,即:概述,水电站接地的要求,水电站接地电阻的计算,水电站接地电阻的测量,降低接地电阻的措施,接地网的均压,工频反击过电压及转移电位隔离,水电站接地电阻数值计算。

本书可供广大从事水电站电气设计的技术人员学习使用,并可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

水电站接地设计 / 王仲仁, 文习山著. —北京: 中国水利水电出版社, 2008

ISBN 978-7-5084-4225-9

I. 水… II. ①王…②文… III. 水力发电站-接地系统-系统设计 IV. TV734

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 007054 号

书 名	水电站接地设计
作 者	王仲仁 文习山 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	140mm×203mm 32开本 6.375印张 171千字
版 次	2008年12月第1版 2008年12月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	24.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

目 录

绪论	1
1 概述	4
1.1 接地的基本概念	4
1.2 导电媒质的电阻率	13
1.3 接地技术的研究及发展	22
2 水电站接地的要求	34
2.1 水电站接地的意义	34
2.2 水电站接地的特点	37
2.3 水电站接地的一般要求	41
3 水电站接地电阻的计算	48
3.1 工频接地电阻的计算	48
3.2 冲击接地电阻的计算	51
3.3 水电站接地网计算的模型	56
3.4 水电站接地网接地电阻的估算	71
4 水电站接地电阻的测量	74
4.1 测量接地电阻的基本原理	74
4.2 测量接地电阻的方法	77
4.3 水电站的接地电阻测量	79
4.4 接地电阻测量中的干扰问题	88
5 降低接地电阻的措施	95
5.1 充分利用自然接地体	96
5.2 扩网及水下接地网	98

5.3	引外接地	99
5.4	深井接地	101
5.5	人工改善土壤电阻率降阻	105
5.6	采用降阻剂降低接地电阻	107
5.7	水电站接地的综合降阻措施	109
6	接地网的均压	111
6.1	跨步电势和接触电势	111
6.2	跨步电势和接触电势的计算	113
6.3	接触电势、跨步电势的要求	126
6.4	均压网的设计	128
7	工频反击过电压及转移电位隔离	137
7.1	反击过电压及保护	137
7.2	转移电位隔离	156
8	水电站接地电阻数值计算	158
8.1	数值计算简介	158
8.2	接地网等电位数值模拟计算方法	160
8.3	接地网不等电位数值模拟计算方法	168
附录	三峡水电站接地计算实例	182
参考文献		194

Contents

Introduction	1
1 Overview	4
1.1 Grounding: Basic Concepts	4
1.2 Ground Resistivity	13
1.3 Grounding Technology	22
2 Grounding Requirements of Hydroelectric Station	34
2.1 Purpose of Hydroelectric Station Grounding	34
2.2 Special Requirements of Hydroelectric Station Grounding	37
2.3 General Requirements of Hydroelectric Station Grounding	41
3 Grounding Resistance Calculation of Hydroelectric Station	48
3.1 Grounding Resistance at Power Frequency	48
3.2 Grounding Resistance at Lightning Impulse	51
3.3 Modeling of Hydroelectric Station Grounding Grid	56
3.4 Estimation of Grounding Resistance of Hydroelectric Station	71
4 Grounding Resistance Measurement for Hydroelectric Station	74
4.1 Principle of Grounding Resistance Measurement	74
4.2 Method of Measuring Grounding Resistance	77

4.3	Measurement of Grounding Resistance of Hydroelectric Station	79
4.4	Interference in Grounding Resistance Measurement	88
5	Methods of Minimizing Grounding Resistance	95
5.1	Utilization of Natural Grounding Conductor	96
5.2	Extension of Grounding Grid and Adoption of Underwater Grounding Grid	98
5.3	Remote Grounding Grid to Reduce Soil Resistivity	99
5.4	Deep Well Grounding	101
5.5	Reducing Grounding Resistance by Artificially Reducing Soil Resistivity	105
5.6	Reducing Grounding Resistance by Using Material of Lower Resistivity	107
5.7	Multi – Methods of Reducing Grounding Resistance for Hydroelectric Station	109
6	Equal Potential of Grounding Grid	111
6.1	Step Potential and Touch Potential	111
6.2	Calculation of Step Potential and Touch Potential ...	113
6.3	Criteria of Step Potential and Touch Potential	126
6.4	Design for Grounding Grid of Equal Potentials	128
7	Reflected Over Voltage and Transfer Voltage at Power Frequency	137
7.1	Reflected Over Voltage and Over Voltage Protection	137
7.2	Isolation from Transfer Voltage	156
8	Numerical Calculation of Grounding Resistance of Hydroelectric Station	158
8.1	Brief Description of Numerical Calculation	158
8.2	Numerical Simulated Calculation Method of Equal	

Potentials of Grounding Grid	160
8. 3 Numerical Simulated Calculation Method of Unequal	
Potentials of Grounding Grid	168
Appendix: Calculation for Grounding System of Three Gorges	
Hydroelectric Station	182
Reference	194

绪 论

在电力系统中为了工作和安全的需要，常需将电力系统及其电气设备的某些部分与大地相连接，这就是接地。接地就其目的来说可分为工作接地、防雷接地和保护接地三种。工作接地是为了降低电力设备的绝缘水平（如变压器等设备的中性点接地）的方式；防雷接地是为了避免雷电的危害而设置的接地，如设置避雷针、避雷线、避雷器等防雷设备的接地电极将雷电流导入大地；保护接地则为保证人身安全而采取的电力设备外壳接地等措施。

接地体的接地电阻是电流 I 经接地电极流入地中时，接地电极的电位 V 与 I 的比值，这主要是大地呈现的电阻。接地电阻的大小除与大地的结构、土壤的电阻率有关外，还与接地体的几何尺寸及形状有关。在雷电冲击电流流过时还和流经接地体的冲击电流的幅值和波形有关。

一般将电力系统接地短路时的接地电阻值称为工频接地电阻值，直流系统的工作电流或不平衡电流经过大地时所呈现的电阻为直流感地电阻，而将雷电冲击的接地电阻值称为冲击接地电阻值。由于工频下的电流场近似静态电磁场，所以跟直流相似，可以采用准静态电磁场理论分析。而通常雷电流过程短暂，入地电流衰减较快，等值频率很高，准静态电磁场理论将不再适用，须采用暂态分析方法，如行波法等。因为雷电冲击时间短暂，对设备的影响时间不长，故雷电冲击电阻可适当放宽，在特殊要求的地方可以采用专门措施。工程上采用在避雷器（针、线等）的接地点附近布置接地极等方法就可得到一个合格的冲击接地电阻值。

当入地电流离开接地体在大地中扩散时，在地表上将呈现一

定的电位梯度分布。当人在电极附近走路或触摸与接地电极相连的金属时，人的两脚或脚手之间将处于大地表面的不同电位点上，这将使人遭跨步电势的作用，严重时将危害人身安全。与跨步电势相比，接触电势对人造成的危害更大，因为接触电势下流过人体的电流将通过心脏。为了达到安全水平，必须对接地级进行优化布置。

综上所述，电站接地系统设计的主要内容包括：工频（冲击）接地电阻，接触电压，跨步电压，另外还包括网孔电压及电站附近的地表电位分布计算等。接地设计过程中所用到的接地计算，除了简单的电极可以用解析方法求解外，当大地不均匀或接地体复杂时，必须采用数值计算方法。另外，由于接地体漏电流在大地中的分布与入地电流的等值频率有关，所以针对不同等值频率的入地电流，须采用接地网的频域分析方法。

由于对土质结构，周围环境等对接地参数影响较大因素的掌握不完全性，一种接地计算模型也不可能适用于所有情况，所以接地参数的计算值与实际值可能有出入，必须通过与接地参数的实际值相比较来验证。接地电阻的实际值需要在地网敷设完毕后实测得到，在进行测量时，电压级与电流电极的布置方式及电压引线及电流引线之间的互感将直接影响到测量的正确性。另外各种干扰如大地回流等对测量结果的影响也不能忽略，必须采用专门措施加以消除。

电力系统接地技术对电力系统的安全运行有着重要的影响。随着电网容量的增大与电压等级的升高，对于电站安全、稳定及经济运行的要求越来越高。变电站的接地系统是保证电站安全可靠运行、保障运行人员和电气设备安全的重要措施。当电力系统发生接地短路故障或其他大电流入地时，如果接地电阻值比较大，就会造成地网电位异常升高；而且如果接地系统设计不合理，还会导致接地系统本身局部电位差超过安全值。这样，除给运行人员安全带来威胁外，还很有可能因反击或电缆皮环流使得二次设备的绝缘遭到破坏，高电压窜入控制室，使监测或控制设

备发生误动或拒动而扩大事故，带来巨大的经济损失和社会影响。杆塔的冲击接地电阻是线路防雷的重要参数之一，很多反击雷害造成的线路跳闸都归于杆塔的冲击电阻不符合要求，如何在高土壤电阻率地区降低杆塔的冲击接地电阻从而降低雷击跳闸率是个很值得探讨的问题。

近年来，随着国家能源结构的调整，清洁经济的水电成为电力能源的发展趋势，水电站梯级开发战略已经形成，除三峡外很多大型水电站都在筹划建设之中。然而大型水电站（包括常规水电站和抽水蓄能电站）一般都建在土壤电阻率较高的山区等地区，为了确保电站的安全稳定运行，提高供电可靠性，必须对其接地参数进行专门的研究，提出相应的解决方案，并配备一套与之相适应的安全保护系统。编者在这方面做了大量的理论工作与工程实践，一些理论成果和工程经验编在本书中，希望本书能对水电站接地技术的发展与研究起到一些促进作用。

1 概 述

1.1 接地的基本概念

伴随着高度信息化社会的到来，工矿企业、楼堂馆所，甚至家庭住宅都正在开始或即将开始进入自动化、智能化的时代。为了保证和提高这些现代化设施与设备工作的可靠性、安全性，接地技术的利用是必不可少的。接地技术早就被广泛应用在电力、微波通讯、建筑、气象以及家居等领域。尤其是随着电力系统的发展，电网规模的不断扩大，接地短路电流越来越大，各种微机监控设备的普遍应用，对接地的要求越来越高。接地装置不仅对工频接地电阻，而且对冲击接地电阻、热稳定、设备接触电位差、跨步电位差、地电流干扰也有一系列的要求。从全国来看，由于接地装置的问题而引起的主设备损坏、变电所发电厂停运等事故已有多次事例，极大地危害了电网的安全稳定运行^[1]。

接地技术含有很多新的概念，具有综合性的学问。但是，还有不少人员甚至专业人员仍然认为：接地只不过是接地体埋入地下而已。的确，孤立地讨论保护用接地，或许可以这样理解。但在当今高科技发展迅速，计算机、无线电使用普及的信息化时代，对接地应该重新进行认识。特别应该充分注意到接地在电力、通信、无线电、气象及情报各个领域的功能性作用，并将接地作为一门学科，系统地进行研究。接地研究的课题多，也较为复杂。接地技术已得到国内外的高度重视，越来越多的研究成果得以发表。可以预见，一个与电气、通信学科一样重要的“接地学科”时代即将到来。

下面是接地技术的一些基本概念。

(1) 接地：将电力系统或建筑物中电气装置、设施的某些导

电部分，经接地线连接至接地极。它既包括强电系统的接地，又包括微电子系统的接地。

(2) 工作接地：也叫系统接地，在电力系统电气装置中，为运行需要所设的接地（如中性点直接接地或经其他装置接地等）。在交流输变电系统中，为了运行可靠性，减低绝缘水平，并有效的发现接地故障类型，输变电系统一般将中性点直接接地。而在电压等级较低的配电系统中，为了抑制单相接地时引起的弧光过电压，一般将系统中的中性点经消弧线圈或电阻接地。在直流输电系统中，为了保证换流设备的可靠工作，必须提供一个稳定的基准电位，并且在直流输电系统中如果双极运行时发生单极故障，可以转换为单极大地运行方式，提高输电的可靠性。但是与交流系统不同，直流接地电极一般安装在距离换流站较远的地方，以防止直流大地回流窜入交流系统。

(3) 保护接地：电气装置的金属外壳、配电装置的构架和线路杆塔等，由于绝缘损坏有可能带电，为防止其危及人身和设备的安全，可以将其与大地相连。保护接地只是在设备绝缘损坏的情况下才会有电流通过，故对其要求不高。为了绝缘损坏的早发现与切除，保护接地应能使保护装置动作于信号或跳闸。

(4) 雷电保护接地：为雷电保护装置（避雷针、避雷线和避雷器等）向大地泄放雷电流而设的接地。因为雷电的发生是暂态过程，等值频率很高，所以雷电保护接地要有较好的动态性能，能将雷电流迅速引入大地而不会引起暂态电位上升过高而引起反击。同时为了防止雷害的发生，其他装置与雷电保护接地装置之间应有个最短距离。

(5) 防静电接地：为防止静电对易燃油、天然气贮罐和管道等的危险作用而设的接地。因为这种接地方式主要为了将摩擦产生的静止电荷转移，以防止静电放电造成的爆炸事故，故对其要求不甚严格，只要与大地接触就行。

(6) 接地极：埋入地中并直接与大地接触的金属导体，称为接地极，为了防止大地的腐蚀一般采用不锈钢、镀锌钢材或铜

材。兼作接地极用的直接与大地接触的各种金属构件、金属井管、闸门门槽、大坝铜止水带、钢筋混凝土建（构）筑物的基础、金属管道和设备等称为自然接地极。

(7) 接地线：又称引下线，电气装置、设施的接地端子与接地极连接用的金属导电部分。为了将入地电流引入到接地极，从而向大地散流，接地线（引下线）必须满足热稳定的校验，可按下式进行^[2]

$$S_g \geq I_g \sqrt{t_e} / c \quad (1-1)$$

式中 S_g ——接地线的最小横截面积， mm^2 ；

I_g ——流过接地线的短路电流稳定值，A；

t_e ——短路电流的等效持续时间，s；

c ——接地材料的热稳定系数。

对接地线热稳定校核是采用最大接地短路电流，不应考虑避雷线的分流系数，而地网干线因有多条回路并联散流，所以可取的地网干线界面比设备接地引下线小，这在实际工程中还有一些争论。

(8) 接地装置：接地线和接地极的总和。接地网是由垂直和水平接地极组成的供发电厂、变电所使用的兼有泄流和均压作用的较大型的水平网状接地装置。因为接地电阻主要跟接地网的面积有关，所以接地网的面积要做得足够大，一般尽量达到变电站或电厂的面积。同时为了降低跨步电势与接触电势，尽量将网格进行优化设计，以降低故障发生时跨步电势或接触电势对人身造成的危害程度。

(9) 集中接地装置：为加强对雷电流的散流作用、降低对地电位而敷设的附加接地装置，一般敷设 3~5 根垂直接地极。在土壤电阻率较高的地区，则敷设 3~5 根放射形水平接地极。在雷电流作用下，电感效应非常显著，接地导体的有效泄露半径较工频下小得多，接地导体过长对雷电流释放的影响不大，所以集中接地装置一般面积不大。

(10) 接地电阻：接地极到无穷远处的土壤的总电阻、接地

体与大地的接触电阻和接地线电阻的总和，称为接地装置的接地电阻，它是主要的接地参数之一。三者中第一部分是主要部分，它的数值与土壤参数结构和接地体的尺寸有关系，等于接地装置对地电压与通过接地极流入地中电流的比值，这也是要着重计算的。接触电阻主要是由接地体与大地的接触状况决定的，施工初期，由于土质的松软，可能接触电阻较大；运行一段时间后随着土质的还原，接触电阻将会降低。按通过接地极流入地中工频交流电流求得的电阻，称为工频接地电阻，由于工频电流下的电流场为准静态电流场，所以可以用准静态电磁场的方法解决；当接地网的面积很大时，接地导体之间的自阻抗与互阻抗将不能忽略，感性部分影响很大，这时呈现的将是接地阻抗。按通过接地极流入地中冲击电流求得的接地电阻，称为冲击接地电阻。冲击电流或雷电流经过接地体时，接地体呈现的接地电阻与工频电阻是不同的。其主要原因是冲击电流的幅值可能很大，就会引起土壤放电，而且冲击电流的等值频率又比工频高得多，当冲击电流进入接地体时，就会引起一系列的过渡过程，每一瞬间接地体呈现的有效电阻值都不同，而且接地体上电压出现的时刻不一定是电流出现的最大时刻。为了冲击电阻有一个明确的意义，通常令冲击电阻为接地体上最大电压与最大电流的比值。这在工程上适用且很方便，因为我们感兴趣的是在一定的冲击电流下最大的冲击电压是多少。冲击接地电阻 R_{ch} 与工频接地电阻 R_g 的比值叫做冲击系数 α 。对集中接地体来说， α 一般小于 1，但对长度很大的伸长接地体或接地网来说，由于其电感效应， α 可能不小于 1。 α 值一般由实验方法求得。

(11) 接触电位差：接地短路（故障）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；接地网孔中心对接地网接地极的最大电位差，称为最大接触电位差。

(12) 跨步电位差：接地短路（故障）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极的电位差，称为最大跨步电位差。

接地装置的地面跨步电位差 U_k 和设备接触电位 U_j 也是接地装置的主要参数，直接关系到人身和设备的安全，特别是采用外延接地时必须保证外延部分的跨步电位差 U_k 在安全值以下，以避免接地装置流过大的接地短路电流时造成的人身安全事故。接地设计时应认真校核这两个参数，工程完工后也要进行实验验证。如不满足要求则应采取相应的补救措施。

(13) 接地装置的发热：在工作或故障的情况下，工作电流或短路电流将经过接地线流向接地电极，再由接地电极向四周的土壤流散，当电流流经接地线和接地电极时就会引起这些金属导体的发热，如果这些金属导体的界面选择不当，导体就可能因过热而烧断。当电流由接地电极向周围土壤流散时会引起土壤发热，使土壤中的水分蒸发甚至汽化，引起土壤电阻率上升。土壤电阻率的上升将进一步加剧土壤的发热，如此恶性循环下去，严重时会造成土壤烧结，使接地电极不能正常工作。为此必须对土壤和导体的发热进行分析，进行热稳定性校验。在直流输电系统中，单极运行的工作电流或双极运行的不平衡电流将长时间经过接地电极向大地流散。这时土壤各点的温升将达到某一稳定值。依半球性电极为例，其允许通过的最大电流可以由式 (1-2) 来求得

$$I = 2\pi a \sqrt{\frac{2\lambda\pi_m}{\rho}} \quad (1-2)$$

式中 a ——半球性电极的半径；

λ ——土壤的导热系数；

π_m ——土壤的最大允许温升；

ρ ——土壤电阻率。

当接地电极为双环或直线形结构时，必须先求取漏电流沿接地电极的分布情况，然后进行热稳定性校验。在交流系统中，中

性点的运行方式有三种：

- 1) 不接地。
- 2) 直接接地。
- 3) 经消弧线圈或高阻接地。

在中性点不接地系统中，无论是正常工作还是系统发生单相接地故障时都不会有接地电流流经地网入地。在中性点经消弧线圈和直接接地的系统中，在正常情况下，经地网入地的只是数值不大的不平衡电流。在系统发生单相接地故障时，经由消弧线圈入地的电流也只是数十安培的电容补偿电流，只有在中性点直接接地的系统中才会有高达数十千安的短路电流入地，但是继电保护将迅速动作于跳闸，其持续时间不长，一般为 $0.5 \sim 2\text{s}$ 。因此，交流接地网不存在长期发热的问题，只需要对其短时发热的稳定性进行校验。仍以半球性为例，可按式 (1-3) 进行校验

$$J = \sqrt{\frac{\gamma \pi_m}{\rho t}} \quad (1-3)$$

式中 γ ——土壤的比热；

π_m ——土壤的最大允许温升；

ρ ——土壤电阻率；

t ——电流持续时间。

比较式 (1-2) 和式 (1-3) 可知，短时发热时电极表面的最大允许电流密度比长期发热时大得多。

(14) 接地电极的腐蚀及环境保护：接地电极埋于土壤中会出现腐蚀现象。金属在土壤中的腐蚀属于电化学腐蚀，是由接地体金属和电解液（例如土壤中的水分）间的电化学反应引起的。当没有外加直流流经接地极时，接地电极的腐蚀称为自然腐蚀（交流接地电极的腐蚀主要是自然腐蚀）；当有外加直流电流流经接地电极时，接地电极的腐蚀称为电解腐蚀。直流接地电极由于要求长期通过千安级的大电流，其电解腐蚀的问题极为突出，必须采取专门的防腐措施。

直流接地电极可设置在陆地上，也可设置在海岸边（包括海