

JIEDI JISHU YU  
JIEDI ZHUANGZHI

# 接地技术与 接地装置

陈家斌 主编



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 接地技术与 接地装置

陈家斌 主编



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书主要叙述电气接地的概念、作用以及在电力系统、工业电气设备、通信设备、家用电器等建筑设施方面的接地要求，同时也介绍了有关电气接地的设计、安装、检验、运行维护与测量等方面的内容。

本书可供电气专业设计、安装、运行维修方面的电工、技术人员或学生阅读。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

接地技术与接地装置/陈家斌主编. -北京: 中国电力出版社, 2002. 12

ISBN 7-5083-1244-9

I. 接… II. 陈… III. 接地保护装置 IV. TM774

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 076551 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 http://www.cepp.com.cn)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

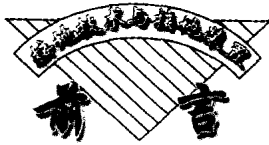
2003 年 2 月第一版 2003 年 2 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 14.75 印张 393 千字

印数 0001—3000 册 定价 28.00 元

**版 权 专 有 翻 印 必 究**

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)



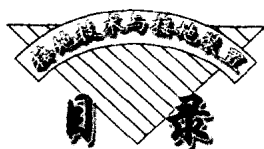
电气接地是电气安全技术工作之一。接地是否合理，不仅影响电力系统的正常运行，而且关系到国家财产和人身的安全。因此，正确地选择接地方式及安装方法，也是电气工作的任务。本书对电力系统、工厂、通信、交通、医疗设备及建筑物等电气接地的设计、施工安装、运行维护等方面，进行了全面、系统的叙述，并列举了一些接地故障排除实例，供读者参考。

随着科学技术的飞速发展，微电子技术普及应用于各个专业，在接地电阻测试仪方面也得到了应用，提高了测量的精度和工作效率，因此本书也介绍了一些先进的接地电阻测量仪供选用。

本书在编写过程中，电业部门的专家和同行给予大力支持与协助，并提供了大量的资料供参考，特此感谢。

由于水平有限，很多工业设施的接地问题没有进一步的调查研究，书中疏漏在所难免，希望专家、同行们给予指正。

编者  
2002年4月



前言

## 第一章 电气设备的漏电保护 及接地概念



第一节	安全电流和安全电压	1
第二节	电气接地的基本概念	10
第三节	电气接地的作用及分类	22
第四节	各种接地的应用	31

## 第二章 电气设备及其他 设施的接地



第一节	电力系统的接地	67
第二节	不同电压等级电气设备的接地	87
第三节	不同固定方式的电气设备接地	90
第四节	发配电设备的接地	98
第五节	输配电线路的接地	104
第六节	用电设备的接地	110
第七节	电气照明设备的接地	121
第八节	工、矿生产场所的接地	126
第九节	特殊场所的设备接地	136
第十节	防静电接地	167
第十一节	家用电器的接地	176
第十二节	建筑物和构筑物及其部分设备的防雷接地	183
第十三节	民用设施的接地	197

第十四节	通信设备及电子设备的接地	210
------	--------------	-----



### 第三章 电气接地的选用与计算

---

第一节	电气接地设计的要求和步骤	234
第二节	电气接地的要求	237
第三节	电气接地电阻的要求	261
第四节	电气接地电阻的计算	274
第五节	电气接地体的计算	291
第六节	电气接地线的选用	304
第七节	防雷接地的计算	308
第八节	电气接地装置的布置	313
第九节	高土壤电阻率地区的接地装置选择	322
第十节	接触电压和跨步电压的限制措施	329

### 第四章 电气接地装置及设备

#### 接地的安装

---



第一节	自然导体的利用	337
第二节	电气接地装置的安装	346
第三节	电气设备接地的安装	367
第四节	防雷接地安装	376
第五节	电气接地系统的安装	383
第六节	降低土壤电阻系数的方法	388



### 第五章 电气接地装置的运行维护

---

第一节	电气接地装置的运行管理	401
第二节	电气接地装置的防腐措施	408
第三节	电气接地电阻的测量	416
第四节	土壤电阻系数的测量	438
第五节	接触电压和跨步电压的测量	442
第六节	电气接地装置的故障排除实例	446



# 电气设备的漏电保护及 接地概念

## 第一节 安全电流和安全电压

19世纪40年代和50年代，随着电学和生理学的相互渗透和结合，有很多著名的生理学家从触电保护的目出发，比较全面深入地进行研究，并取得了很有益的成果。1967年，国际电工委员会（IEC）的建筑电气设备分委员会（TC64）成立了第4工作小组GW4，专门从事电流对人体影响的研究，集中世界各国专家的力量开展大量和深入的试验，取得了很大进展，并且制定出一系列标准，出版了大量图书，对安全电流和安全电压作了相应的规定。

### 一、安全电流

#### （一）电流对人体的影响

##### 1. 电流通过人体时的现象

电流通过人体会造成伤害，一种是破坏性伤害，就是电流流经人体时产生热效应、化学效应和机械效应所引起的伤害。例如电灼伤，使人体组织碳化或者造成不能复原的组织坏死及永久性损伤。这种情况一般是在安培级以上的大电流作用下产生的，只有在雷击和高压触电事故时才会发生。另一种是电流流经人体以后，产生病理和生理方面的影响，从而破坏人体各部分组织的正常功能。例如触电后在触电部位有针刺般的痛觉，使肢体麻木、痉挛，有时引起血压升高、昏迷等。当电流通过肺脏时会导致停

止呼吸，通过心脏时还会引起心房颤动、心室颤动、心跳停止，这些都是因为电流破坏了人体神经系统的正常工作所致。一般在数 10mA 时就可能引起这些病理和生理性反应。在 380V 及 220V 的低压电路中所发生的触电电流，一般都在数十至数百毫安范围之间，因此可引起病理和生理性的反应。

事实上并不是所有的触电都会导致人的死亡，就大多数触电事例来看，触电后自己能主动摆脱电源者居多，若触电后不能摆脱电源，一般就会造成死亡。触电后能否自己脱离电源，由触电时通过人体的电流大小决定。

电流通过人体后，人尚能忍受的最大电流值称为摆脱电流。流过人体的电流小于摆脱电流时，人能够自己甩开带电导体，脱离电源；而大于摆脱电流时，人即失去自主能力，不能摆脱电源。

国内有人用猴子作了摆脱电流的试验后，认为人的摆脱电流为 6mA 左右。

国外有关资料认为，摆脱电流男性为 9mA，女性为 6mA。触电电流为 15mA 时，仍然有 50% 的人能摆脱带电导体，所以 15mA 为平均摆脱电流。考虑在各种条件下不致有电击危险的安全电流，一般认为以 5mA 为宜。

表 1-1 列出在摆脱电流范围内，触电后人的生理反应情况。

**表 1-1 电流强度与生理反应的关系**

电流强度 (mA)	生理现象
0~0.9	无感觉
0.9~3.5	感到麻木但非病态现象
3.5~4.5	有些不适的麻木痛楚，轻微痉挛，反射性的手指肌肉收缩
5.0~7.0	手感到有痛楚，且表面有痉挛
8.0~10	全手病态痉挛、收缩，且麻痹
11~12	肌肉收缩痉挛传至肩部，强烈疼痛（接触带电体时间不超过 30s）
13~14	手全部自己抓紧，须用力才能放开带电体（接触带电体时间不超过 30s）
15	手全部自己抓紧，不能放开带电体

**注** 用 50Hz 交流电通入人体，受试手握带电体，电流经全身由双脚流出。



另外，试验说明，直流电流对人的危险性要比交流电流小得多，有些研究者认为，直流电流对人的危险程度仅为 50Hz 交流电流的 1/4 左右，并且指出危险小的原因是由于直流电流通过生物的有机组织时，只引起电解现象，因极化而削弱了电流的作用。

## 2. 心室颤动电流

造成低压触电死亡的生理原因，是由于触电者在大电流作用下，发生了心室颤动，这是目前一致公认的结论。当有较大的触电电流流过人体时，通过时间超过某一界限值，心脏的正常活动将被破坏，不能进行强力收缩，从而失去循环供血的机能，这种现象就叫做心室颤动。开始发生心室颤动的电流值称为心室颤动电流。有关它的大小，许多研究者所得结论大体相似，都认为：

(1) 人的体重越重，发生心室颤动的电流值越大。

(2) 一般来说，电流作用于人体的时间越长，发生心室颤动的电流越小。

(3) 当通电时间超过心脏脉动周期（人体的心脏脉动周期为 0.75s）时，心室颤动电流值急剧下降，也就是说，触电时间超过心脏脉动周期时，危险性急剧增加。

### (二) 安全电流

研究电流对人体的作用，归根到底是为了明确安全电流的阈值，但是根据摆脱电流和心室颤动电流确定的安全电流有不同的阈值，即使是心室颤动电流阈值，也还与其他多种因素有关。

安全电流及其相关因素如下：

(1) 时间。如上所述，通电时间在 0.2s 以下和 0.2s 以上，电流对人体的危害程度有显著差别，而且通电时间超过 5min 的话，即使较小的电流，也可能导致心室颤动。

(2) 电流的性质。直流、交流、高频电流对人的危害程度并不一样，图 1-1 是对体重为 50kg 的男性所得出的研究结果。从图中可看出在频率  $f$  为 50 ~ 100Hz 的范围内，电流对人体的危害最

严重，而这正是现在所使用的普通工频范围。

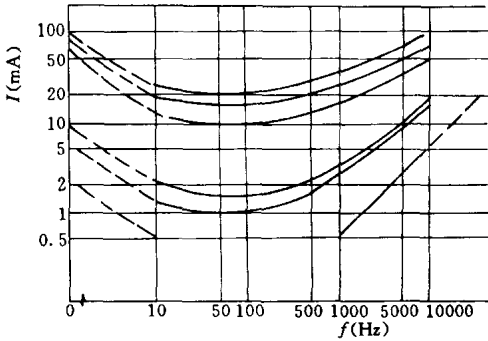


图 1-1 不同频率电流通过人体的效应

(3) 通电的途径。心室颤动是由于电流通过心脏所引起的，但是通电的途径不同时，流过心脏的电流密度也不一样，并且心脏对纵向电流和横向电流的反应也不同，使得引起心室颤动的电流大小也不相同。

## 二、安全电压

在触电时通过人体的电流，是由接触的电压和人体触电电流进出端的阻抗来决定的。在接触电压一定时，由人体阻抗值决定。人体阻抗值越小，触电时流过人体的电流越大，也就越危险。

### (一) 人体阻抗

人体细胞所蓄有的大量组织液基本上是含钾、钠、镁金属离子的有极性的胶体溶液。这些非中性物质在电场的作用下，既会运动也会极化，因此人体犹如众多小电阻和小电容串、并联起来的一个复杂的阻容网络。然而，要逐一测出各种组织细胞的电阻和电容是不现实的，所以需要从整体的角度来研究人体的电气阻抗特性。

研究表明，当通过人体的电流路径确定后，触电危险主要取决于电流的大小和持续时间。为了求取通过人体的预期电流值，必须掌握人体阻抗值。

IEC 479 根据对尸体以及部分人体的测试，经过充分的分析验证得出：人体阻抗主要取决于电流通过人体的路径、接触电压、电流持续时间、频率、皮肤潮湿程度、接触面积、施加压力、温度等因素。

### 1. 人体阻抗特性

人体阻抗的电路图如图 1-2 所示。图中  $Z_r$  为人体内阻抗，它是两个电极所接触的人体两部分之间，在拔除电极后的阻抗。

人体内阻抗基本上可看作电阻，但也还存在少量电容分量，在图 1-2 中用虚线示出。而阻抗值主要取决于电流通过的路径，而表面接触面积大小对其影响较小。但当接触面积过小，例如只有几平方毫米时，则内阻抗将会增大。

图 1-2 中  $Z_{p1}$  和  $Z_{p2}$  为人的皮肤阻抗，它是皮肤上的电极与皮肤下导电组织之间的阻抗。皮肤阻抗可看作电阻电容网路，它由半绝缘层和小的导电元件（毛孔）构成。

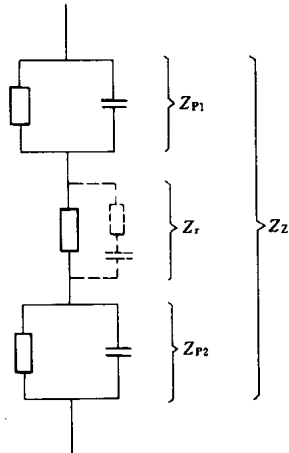


图 1-2 人体阻抗电路

皮肤阻抗的数值取决于接触电压的大小、频率、电流持续时间、接触面积、接触压力、皮肤潮湿程度和温度等因素。

接触电压在 50V 以内时，皮肤阻抗的数值受接触面积大小、温度、呼吸作用等因素影响有显著变化；接触电压在 50 ~ 100V 时，皮肤阻抗大大降低，当皮肤击穿后其阻抗可忽略不计。

当皮肤阻抗随着电流增大而降低时，可以观察到电流伤疤。电流频率的增高也将使皮肤阻抗降低。

### 2. 人体总阻抗 $Z_z$

人体总阻抗是人体内阻抗与皮肤阻抗的矢量和，由电阻和电容分量组成。

接触电压 50V 以下时，由于皮肤阻抗受多种因素影响而显

著变化，因此人体总阻抗同样有很大的变化；当接触电压较高时，总阻抗与皮肤阻抗关系愈来愈小，当皮肤击穿后，总阻抗接近于人体内阻抗值  $Z_r$ 。由于皮肤阻抗特性的影响，总阻抗  $Z_z$  受频率影响，当为直流时人体总阻抗值较高，而频率上升时总阻抗值降低。

在接触电压为 50V 以下、接触面积潮湿、带有正常的水分等条件下测得的人体总阻抗值比上述干燥条件下的测得值低 10% ~ 25%；在接触面带有导电液时测得的人体总阻抗值为干燥状态时的一半。

接触电压高于 150V 时，湿度和接触表面积对人体总阻抗的测量值影响很小。

### 3. 人体初始电阻 $R_i$

$R_i$  是在对人体加上接触电压的瞬间限制人体电流峰值的电阻。由于皮肤阻抗中电容分量的作用，皮肤上的接触电压在加压瞬间，其皮肤阻抗可忽略不计，人体初始电阻值接近于人体内阻抗  $Z_r$ 。人体初始电阻值主要取决于电流路径，接触表面积对其电阻值影响较小。当接触面积较大时，手到手或手到脚路径的 5% 分布的人体初始电阻值可视为 500Ω。

### 4. 与人体阻抗相关的因素

为验证人体的阻抗，奥地利的彼格麦尔教授对活人在短时通电的条件下进行了测定，得出了表 1-2 的结果。

表 1-2 接触电压至 200V、交流 50Hz 时人体阻抗试验结果

接触电压 $U_c$ (V)	测得值 (6 次测定的平均值)					
	75	100	125	150	175	200
人体电流 $I_a$ 均方根值 (mA)	30.7	44.4	57.7	69.8	89	103.7
人体电流峰值 $I_B$ (mA)	148	202	248	297	333	371
常规人体阻抗 $Z_r$ (Ω)	2445.6	2252.8	2167.5	2148.9	1966.6	1930.5

续表

接触电压 $U_c$ (V)	测得值 (6次测定的平均值)					
	75	100	125	150	175	200
常规人体起始电阻 $R_r$ ( $\Omega$ )	716	700	711	713	743	761
相角 $\varphi$	13°45'	12°	11°	10°25'	8°30'	8°
电击时间 (ms)	约 10	约 10	约 10	约 10	约 10	约 10
脉冲频率 (min)	96/88	90/83	88/84	85/78	88/90	90/76
生理作用						
手的反应	强烈 痉挛	强烈 痉挛	强烈 痉挛	强烈 痉挛	强烈 痉挛	强烈 痉挛
手臂肌肉反应	痉挛	痉挛 轻度疼痛	较强 痉挛轻度 疼痛	臂和 肩部的 反射样 痉挛	臂和 肩部的 强烈痉 挛	臂和肩 的强烈痉 挛, 上半 身反射样 挺起
肩部肌肉反应	无反应	无反应	无反应	疼痛	疼痛剧烈	疼痛剧烈
胸部反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应	无反应
心脏颤动规则	无不规则	无不规则	无不规则	无不规则	无不规则	无不规则
电斑	无	无	无	无	无	无

因为在开始触电的瞬间, 人体皮肤电容尚未充电, 所以触电电流立即出现峰值, 电流峰值的大小既决定于人体的起始电阻, 也就是人体的内部电阻, 同时也决定于接触电压的大小。人体的起始电阻在不同接触电压下是稳定不变的, 但人的总阻抗是随着接触电压的大小而变化的, 而且进一步的试验还证明了人的总阻抗与皮肤的干湿程度、接触面积的大小有关。与人体阻抗相关的因素有以下几方面:

(1) 人体阻抗与年龄的关系。成年人的人体阻抗要比儿童的大, 这不仅仅是因为儿童的皮肤肌肉细嫩, 含水量高, 而成年人肌肉纤维粗壮等生理的原因, 也是因为成年人长期运动或劳动, 手足皮肤角质层增厚的缘故。

随着人体的日渐成熟和衰老, 表皮的角质化, 汗腺的衰退,

表皮、真皮、肌肉和组织的老化，以及细胞含水量的下降等，都使人体阻抗逐渐增大。也就是说，人体阻抗随着年龄的增长而增大。

(2) 人体阻抗与性别的关系。人体阻抗与性别有关，男性肌纤维粗壮，皮肤厚实，女性皮肤细嫩、肌纤维柔弱，含水量高，因此，静态时男性人体电阻一般要比女性的大。然而，动态中，即劳动或运动时，由于男性的汗腺比较发达，皮肤阻抗容易为汗水浸透而短路，因此这时男、女性的人体电阻就应酌情而论了。

(3) 人体阻抗与人体健康状况的关系。人体阻抗和人体健康状况的关系是错综复杂的，它随疾病的轻重而变化。然而，人体阻抗与人体的健康状况的关系也是有规律可循的：凡疾病造成皮肤粗糙干厚、人体失水的后果，通常使人体阻抗增大；凡病痛引起水肿、多汗、皮肤黏湿的后果，一般使人体阻抗变小。

(4) 人体电阻与皮肤干湿程度的关系。在各种接触电压下，皮肤干燥的人体阻抗要比皮肤潮湿的人体阻抗大一倍以上。

(5) 人体阻抗与接触电压的关系。人体阻抗将随着接触电压的增高而降低。人体电容属极化类电容。极化电容所承受的电压越高，极化程度就越强，电容量也就越大。这就是人体阻抗随接触电压的升高而下降的原因所在。

(6) 人体阻抗与接触面积的关系。一般来说，非特殊情况触电，电极都和皮肤接触，因此接触处的影响程度首先由皮肤的阻抗决定。人体各部位（包括手掌），就局部范围而言，皮肤厚度大致是相同的，故人体阻抗随接触面积的增大而减小。

(7) 人体阻抗与频率的关系。人体阻抗为容性阻抗，它随人体内的频率的变化而变化。此外，人体的电导率 $\sigma$ 和介电常数 $\epsilon$ 也是一个随频率而变化的量。人体中，不同组织和器官还具有不同的电导率和介电常数。

由于人体组织器官的电导率和介电常数的复杂性，使得人体阻抗随导入体内的电流频率的变化为非线性的：在 $0 \sim 30\text{Hz}$ 的频率范围内，人体阻抗随导入电流频率的升高而下降；导入体内的

频率大于 100Hz 时，由于涡流损耗的增加，故人体阻抗又将会回复上升。

### (二) 安全电压

根据电流对人体作用研究的结论，电流对人体的危害和通电时间有密切的关系，所以安全接触电压的阈值实际上也和接触时间有关，而且因为人体总阻抗随湿度、温度和接触面积的大小而变化，所以想要求出安全电压的阈值就更加复杂。但是从触电保护工作来讲，控制接触电压比较简单明确，容易办到，而要控制人的触电电流就困难得多，所以根据触电保护工作的需要，人们仍然对安全电压感兴趣，而且目前大量的间接接触的保护措施，也都是以安全电压为依据得出的，我国所规定的安全电压如表 1-3 所示。

**表 1-3 我国所规定的安全电压**

安全电压 (交流有效值)		使用环境
额定值 (V)	空载上限值 (V)	
42	50	在有触电危险的场所使用的手持式电动工具等 在矿井、多导电粉尘等场所使用的行灯等 人体可能触及的带电体
36	43	
24	29	
12	15	
6	8	

国际电工技术委员会 IEC 对安全电压的规定：

在正常情况下，国际电工委员会的有关标准中大都规定允许长期接触的电压不能大于 50V，但也有一些出版物规定允许长期接触的电压为不大于 42V。

### 三、漏电保护措施

触电保护技术是针对构成人身触电伤亡事故时所产生的三个电路特征来展开的，这三个特征如下：

(1) 如图 1-3 所示，人体成为闭合电路的一个组成部分，人体的一部分相当于电路中的负载阻抗。

(2) 在人体的某两个部位之间施加了一个足以危及人身安全

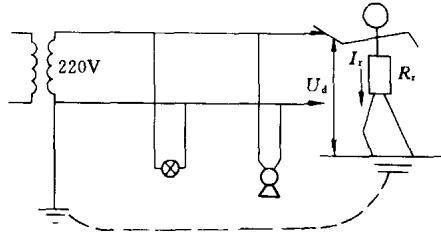


图 1-3 人身触电的三个电路特性

的接触电压。

(3) 在一定的持续时间内，有一个足以危及人身安全的危险电流通过人体。这里强调两点，持续了一个时间间隔和人体通过了危险的电流，这两个因素是不可分割的。

各种触电保护手段，都是基于影响这三个特征，以避免达到危险的程度。例如电气设备的绝缘、操作人员穿绝缘鞋、戴绝缘手套、垫绝缘垫，使用有绝缘的工具以及采用小容量不接地系统，就是为了使人体触及带电体时不会构成闭合回路；对用电设备外壳采用接地、接零，或者用 24V 低电压电源，就是为了降低接触电压，使发生触电事故时不致构成伤害；迅速切断故障电路，就是为了限制触电电流或者触电的持续时间，使之在尚未危及人身安全时使人体与电路脱离。

## 第二节 电气接地的基本概念

接地是最古老的电气安全措施。所谓接地，就是把设备的某一部分通过接地装置同大地紧密连接起来。到目前为止，接地仍然是应用最广泛的电气安全措施之一。不论是强电设备还是弱电设备，不论是交流设备还是直流设备，不论是高压设备还是低压设备，不论是固定式设备还是移动式设备，不论是生产用设备还是生活用设备，也不论是发电厂还是用户，都采用不同方式、不同用途的接地措施。



## 一、接地装置

电气设备的任何部分与土壤间作良好的电气连接，称为接地。与土壤直接接触的金属体或金属体组，称为接地体或接地极。连接于接地体与电气设备之间的金属导线，称为接地线。接地线和接地体合称为接地装置。

接地线可分接地干线和接地支线，如图 1-4 所示。

接地体按其布置方式可分为外引式接地体和环路式接地体。按其形状划分，有管形、带形和环形几种基本形式。按其结构划分，有自然接地体和人工接地体之分。用来作为自然接地体的有：上下水的金属管道；与大地有可靠连接的建筑物和构筑物的金属结构；敷设于地下其数量不少于二根的水泥金属包皮及敷设于地下的各种金属管道。但可燃液体以及可燃或爆炸的气体管道除外。用来作为人工接地体的一

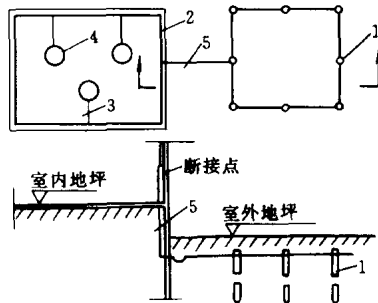


图 1-4 接地装置的示意图

1—接地体；2—接地干线；3—  
接地支线；4—电气设备；5—  
接地引下线

般有钢管、角钢、扁钢和圆钢等钢材。如在有化学腐蚀性的土壤中，则应采用镀锌的上述几种钢材或铜质的接地体。

## 二、接地电流和接地短路电流

凡从带电体流入地下的电流即属于接地电流。

接地电流有正常接地电流和故障接地电流之分。正常接地电流系指正常工作时通过接地装置流入地下，借大地形成工作回路的电流；故障接地电流系指系统发生故障时出现的接地电流。

系统一相接地可能导致系统发生短路，这时的接地电流叫做接地短路电流，如接地的 380/220V 系统的单相接地短路电流。在高压系统中，接地短路电流可能很大，接地短路电流在 200A 及以下的，称小接地短路电流系统；接地短路电流大于 500A 的，