

(第二版)

低压电气装置的 设计安装和检验

中国航空工业规划设计研究院 王厚余 编著

- ▣ 著名电气专家力作
- ▣ 深入浅出阐述建筑电气国际标准内涵及其应用要点
- ▣ 简洁实用介绍低压电气安全理论及事故防范措施
- ▣ 低压电气工作者必备安全用书



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

(第二版)

低压电气装置的 设计安装和检验

中国航空工业规划设计研究院 王厚余 编著



中国电力出版社
www.cespp.com.cn

■ 内 容 提 要 ■

为推动我国建筑电气技术的进步,本书第一版曾依据国际电工标准和发达国家电气标准对低压电气装置的安全和功能要求进行了介绍。对诸如接地、等电位联结、电气隔离和分隔、特低电压、剩余电流电器等新技术概念以及对电击、电气火灾、谐波、暂时和瞬态过电压、电磁干扰等电气灾害的防范都作了深入浅出的阐述。由于现时出现的一些建筑电气的新要求,也为了弥补第一版中的某些不足,本书在第一版的基础上进行了一些必要的充实和修正。例如纠正了第一版中某些概念上的偏差,补充了建筑电气的新信息、新要求,如杂散电流的消除、接地与等电位联结的关系和异同、SPD的安全失效、用电电能质量和供电电能质量的不同及提高措施、四极开关在电气安全和电气功能上的正确应用等。

本书可供低压电气装置设计、安装、检验和管理人员及供电部门用电管理人员使用,还可供专业院校师生参考以及设计人员参加资质考试用。

图书在版编目(CIP)数据

低压电气装置的设计安装和检验/王厚余编著. —2
版. —北京:中国电力出版社,2007
ISBN 978-7-5083-5019-6

I. 低… II. 王… III. 低压电器-电气设备-基本知识
IV. TM52

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第159959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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2003年6月第一版

2007年4月第二版 2007年4月北京第4次印刷

710毫米×980毫米 16开本 16.5印张 267千字

印数15001—18000册 定价26.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

第二版前言

《低压电气装置的设计安装和检验》一书，自 2003 年出版后深受读者的欢迎，一再重印。不少单位的电气技术人员人手一册，视它为了解建筑电气 IEC/TC 64 国际标准的简明读物。不少同行通过电函与笔者就书中所论述的问题进行了深层次的讨论。也有不少同行对书中的不足提出了中肯的意见，建议予以改进和充实。

读者对这本书的这些反映，说明了我国建筑电气同行希望了解 IEC/TC 64 标准，提高我国建筑电气水平的迫切心情，也说明了在我国宣传和推广 IEC/TC 64 标准的工作做得还不尽如人意。笔者参与宣传推广该标准的归口工作已有二十多年，在感谢同行热心支持的同时也为此深感歉疚。

限于笔者水平，本书第一版确存在一些有欠准确和严谨处，有待修正。另外，随着建筑电气技术的不断发展，IEC/TC 64 标准也在不断修改和补充，本书也需随之跟踪。为此，笔者应中国电力出版社之约，在第一版的基础上进行了修改和补充，推出了本书的第二版，以飨读者。

本书第二版在第一版的基础上主要作如下修改和补充：

——修正了一些概念上的偏差。例如在带电导体分类中，第一版错误地依据美国标准将两相三线系统归为单相三线系统；又如对无等电位联结作用的环境内局部 TT 系统的理解过于简单化，未说清其应用的前提等。

——补充说明了一些电气安全的基本要求，例如说明在一建筑物电气装置中，为消除杂散电流危害，中性线只能在一点接地的必要性。

——IEC 标准对电气装置的系统接地、保护接地以及信息接地的接地方式和接地电阻值要求不同于我国一些接地电阻值的规定，论证 IEC 规定的科学性和纠正我国建筑电气一些不妥概念的必要性。

——阐述有关“接地”的广义的内涵，分析接大地和等电位联结的相互关系，说明其共同点和不同点。

——跟踪 IEC/TC 64 标准对防雷电冲击过电压范围的扩大，增加了防建筑物直接落雷和近处落雷时 SPD 的选用和安装要求，并对保证 SPD 安全失效措施等内容进行了补充。

——区分了供电电能质量和用电电能质量，在信息技术设备的抗干扰措施内补充了在建筑电气设计中避免引发电能质量问题的措施，例如“地”电位的均等、过大共模电压和过大 PE 线电流的抑制和消除等。

——阐述了电源转换开关极数确定的复杂性，举例分析了 IEC 不简单规定其极数的原由，阐述了确定电源转换开关极数的一些基本要求。

——增加了特殊装置和其他电气安全要求。

与我国其他电气行业相比，也与建筑电气国际水平相比，我国建筑电气行业技术基础薄弱，差距较大。由于历史上的原因，在很长一段时期内我国闭关自守，对外缺少沟通交流，建筑电气一些基本概念陈旧过时，难以适应用电技术发展的需要，以致电气事故频频发生，有些电气设备不能正常发挥功能。我国建筑电气规范政出多门，互相矛盾，又不与国际标准接轨，以致技术水平相对落后。一个明显的标志是我国建筑电气规范在国外以至在回归祖国多年的香港至今仍未得到认可和采用，我国在国际建筑市场的剧烈竞争中也往往为此屈居下风，这与我国的大国地位很不相称。上世纪 70 年代 IEC/TC 64《建筑物电气装置》国际标准开始发布，一些发达国家纷纷按该标准的规定修改本国建筑电气规范以消除技术上的壁垒，争取在国际建筑市场竞争中的有利地位，我国也应循此途径提高我国建筑电气规范水平，使它具有应有的权威性。但仅做到这点还是不够的，还需建立有效的机制来保证规范的正确执行，减少电气事故的发生。在发达国家如果建筑物电气装置不符合安全要求，供电公司不予接电，保险公司也不予保险，起到了有效的把关和制约作用。但在我国由于用电安全技术落后，实现与这些部门和单位间的合作是很困难的，我国的电气减灾工作无疑是项任重道远长期艰巨的任务。

提高我国建筑电气安全水平有赖我广大建筑电气同行的共同努力。千里之行始于足下，当务之急是在我国认真宣传推广 IEC/TC 64 标准。笔者作为该标准归口委员会的一员，不揣浅陋撰写又修订再版本书，只冀抛砖引玉，与我建筑电气同行切磋探讨 IEC/TC 64 标准的制订原理，为推动我国建筑电气技术进步，减少我国电气灾害尽绵薄之力。限于水平谬误难免，希我同行一如既往，不吝批评指正。

中国航空工业规划设计研究院

王厚余

2006 年 11 月

目 录

第二版前言

第一章 电流通过人体时的效应	1
第一节 几个有关电气安全的交流电流效应阈值	1
第二节 不同环境条件下的不同交流接触电压限值.....	3
第三节 交流电流通过人体的效应与防护电器选用的关系	4
第四节 直流电流通过人体的效应	4
第二章 供电系统的接地	5
第一节 供电系统的两个接地	5
第二节 系统接地的作用	6
第三节 系统接地的实施	7
第四节 保护接地的作用	8
第五节 10/0.4kV 配电变电所内的两个接地	8
第三章 带电导体系统和接地系统的分类	10
第一节 带电导体系统分类.....	10
第二节 接地系统分类	12
第三节 现时我国有关接地系统需纠正和斟酌的一些问题	15
第四节 对各类接地系统的评述	17
第四章 直接接触电击的防护	21
第一节 带电部分的绝缘覆盖.....	21
第二节 遮栏或外护物	21
第三节 阻挡物	22
第四节 带电部分置于伸臂范围以外的布置	22

第五节	装用 30mA RCD 的后备措施	23
第五章	间接接触电击防护与电气设备按防间接接触电击措施的分类	24
第一节	0 类设备	25
第二节	I 类设备	25
第三节	II 类设备	26
第四节	III 类设备	26
第五节	电气装置和电气设备在防电击措施上的配合	27
第六章	用自动切断电源和连接 PE 线接地的防间接接触电击措施	28
第一节	自动切断电源措施的几个基本要求	28
第二节	总等电位联结	29
第三节	辅助等电位联结和局部等电位联结	32
第四节	TN 系统内自动切断电源的防电击措施	33
第五节	TT 系统内自动切断电源的防电击措施	45
第六节	IT 系统内自动切断电源的防电击措施	48
第七章	不用自动切断电源和连接 PE 线接地的防间接接触电击措施	56
第一节	采用 II 类设备	56
第二节	设置绝缘场所	56
第三节	采用保护分隔	57
第四节	设置不接地的局部等电位联结和采用特低电压供电	58
第八章	过电流及过电流防护电器	59
第一节	两种不同后果的过电流	59
第二节	断路器和熔断器的合理应用	60
第三节	中性线的过电流防护	61
第九章	过载防护	62
第一节	过载防护应满足的条件	62

第二节	并联导体的过载防护	65
第三节	谐波电流引起的回路过载及其防护	65
第四节	过载防护电器的安装位置	72
第五节	过载防护电器的免装	72
第十章	短路防护	74
第一节	短路防护应满足的条件	74
第二节	干线短路防护电器能保护的分支回路的长度范围	76
第三节	短路防护越级跳闸的防范	76
第四节	短路防护电器的免装	78
第十一章	电气火灾的防范	79
第一节	短路起火	79
第二节	连接不良起火	89
第三节	电气装置布置不当起火	92
第四节	防电气火灾蔓延的封堵措施	93
第十二章	暂时工频过电压的防护	95
第一节	10kV 不接地系统接地故障引起的过电压	95
第二节	10kV 经小电阻接地系统内接地故障引起的过电压	96
第三节	TN 系统内的人身电击危险	98
第四节	防范 TN 系统内人身电击事故的措施	99
第五节	TT 系统内的绝缘击穿危险	100
第六节	防范 TT 系统内绝缘击穿事故的措施	101
第七节	变电所与低压电气装置处于同一建筑物内时不存在暂时过电压 引起的电气事故危险	103
第八节	10kV 变电所高压侧接地故障过电压危害防范的简要概括	104
第十三章	瞬态冲击过电压的防护	105
第一节	电气设备的额定耐冲击电压值及其分级	106

第二节	防范瞬态冲击过电压的多种措施	108
第三节	SPD 的选用和安装	110
第四节	SPD 与 RCD 间安装位置的协调	118
第五节	瞬态操作过电压的防范及暂时短路过电压值的确定	119
第十四章	用电电能质量和信息技术设备 (ITE) 的抗干扰	121
第一节	一般电气设备的用电电能质量问题	121
第二节	ITE 的用电电能质量问题	122
第三节	电压扰动	123
第四节	减少电压扰动的措施	124
第五节	ITE 的接地和等电位联结	126
第六节	IEC 标准推荐的 ITE 接地方式的三种范例	132
第七节	电能净化设备的应用	134
第十五章	“断零” 烧坏设备事故的防范	136
第一节	“断零” 的危害	136
第二节	“断零” 烧坏设备事故的防范	138
第十六章	电气隔离和四极开关的应用	141
第一节	三根相线断电后中性线带电压的原因	141
第二节	中性线上增加开关触头易招致“断零”烧设备的危险	142
第三节	单电源不同类型接地系统对开关极数的不同要求	143
第四节	配电变电所内总开关和母联开关不需装用四极开关	145
第五节	末端双电源转换开关对开关极数的要求	146
第六节	对四极开关作用的一些误解	148
第七节	对隔离电器的性能要求	149
第十七章	IT 系统在应急电源 (EPS) 中的应用	151
第一节	备用电源和应急电源	151
第二节	应急电源中 IT 系统的应用	152

第十八章	隔离变压器和特低电压的应用 ·····	155
第一节	隔离变压器在防间接接触电击中的应用·····	155
第二节	特低电压在防间接接触电击和直接接触电击中的应用·····	157
第十九章	剩余电流动作保护器 (RCD) 的应用 ·····	159
第一节	RCD 作用的有限性·····	160
第二节	电压扰动对 RCD 动作可靠性的影响·····	162
第三节	RCD 应与接地或等电位联结结合应用·····	163
第四节	固定式设备的电源回路上不必要装用 RCD·····	164
第五节	$I_{\Delta n}$ 值的确定·····	165
第六节	I_n 值的确定·····	166
第七节	RCD 的选择性动作·····	166
第八节	RCD 的接线·····	167
第九节	RCD 极数的确定·····	168
第十节	电源端大额定电流 RCD 的设置·····	169
第二十章	接地装置的设置 ·····	173
第一节	接地装置的组成·····	174
第二节	对接地装置的设置要求·····	174
第二十一章	PE 线、PEN 线和等电位联结线的选用和敷设要求 ·····	177
第一节	PE 线和 PEN 线的最小允许截面·····	177
第二节	通过大正常泄漏电流的 PE 线的提高机械强度措施·····	179
第三节	PE 线的代用体·····	180
第四节	PE 线和 PEN 线的敷设要求·····	180
第五节	联结线截面的确定·····	181
第六节	低压电气装置工频等电位联结实施中一些具体问题的探讨·····	183
第七节	地面等电位对地下金属部分密度的要求·····	184
第八节	中性线、PE 线、PEN 线和联结线的区别·····	185

第二十二章 低压电气装置的检验	187
第一节 目察	187
第二节 检测	188
第三节 周期性的目察和检测	196
第二十三章 特殊场所和特殊电气装置的电气安全要求	198
第一节 浴室	199
第二节 游泳池	204
第三节 喷水池	206
第四节 桑拿浴室	208
第五节 施工场地	210
第六节 农畜房屋	214
第七节 狭窄的导电场所	215
第八节 有大量信息技术设备的电气装置	216
第九节 医院	219
第十节 临时性的展览会、陈列厅和展摊	228
第十一节 家具	230
第十二节 户外照明装置	231
第十三节 特低电压照明装置	233
附录 A 名词说明	236
附录 B IP 防护等级的编码分级	244
附录 C IEC 对某些外界环境影响条件的分类	246
附录 D IEC/TC 64 标准和转化为我国国家标准的目录	249

电流通过人体时的效应

当人体同时触及不同电位的导电部分时电位差使电流流经人体，称为电接触。视接触电流的大小和持续时间的长短，它对人体有不同的效应。电流小时于人体无害，用于诊断和治病的某些医疗电气设备，接触人体时通过微量电流还能治病救人，对人体有益，这种电接触被称作微电接触。如通过人体的电流较大，持续时间过长，则可使人受到伤害甚至死亡，这种电接触被称作电击。电击危及人身，因此电气专业人员应了解电流通过人体的效应，才能采取正确有效的防范措施，避免发生电击事故。

第一节 几个有关电气安全的交流电流效应阈值

IEC 60479《电流通过人体时的效应》标准根据测试结果，规定电压不大于1000V、频率不大于100Hz的交流电流通过人体时有以下几个主要的效应阈值：

感觉阈值——人体能感觉出的最小电流值，一般为0.5mA，此值与电流通过的持续时间长短无关。

摆脱阈值——当人用手紧握带电导体时，如流过手掌的电流超过此值，手掌肌肉的反应将是不依人意地紧握带电导体而不是摆脱带电导体，从而使电流得以持续通过人体。导致此效应的最小电流称作摆脱阈值，此值因人而异，IEC取其平均值为10mA。如不能摆脱带电导体，在较大电流长时间作用下人体将遭受伤害甚至死亡。人体其他部位接触带电导体时可瞬即摆脱带电导体，不存在电击致死的危险，但可能引起二次伤害，例如因电击自高处坠地而导致伤亡。

心室纤维性颤动阈值——电流通过人体时引起的心室纤维性颤动是电击致死

的主要原因，引起心室纤维性颤动的最小电流称作心室纤维性颤动（以下简称心室纤颤）阈值。此阈值与通电时间长短有关，也与人体条件、心脏功能状况、电流在人体内通过的路径等有关，但与人的性别、肤色、种族无关。IEC 60479 标准按测试得出的导致心室纤颤的通过人体的 15~100Hz 交流电流 I_b 与通电时间 t 的关系曲线如图 1-1 曲线 c 所示。

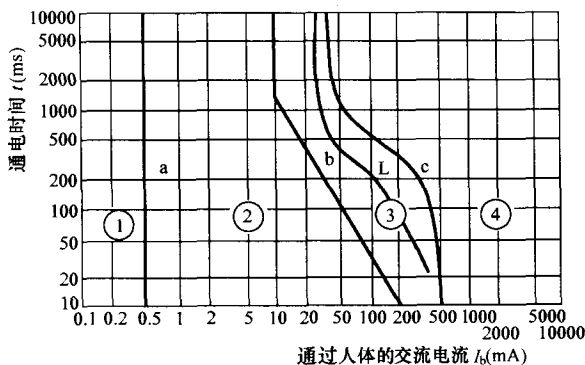


图 1-1 交流电流通过人体时的效应

图中各区域的含义：

- ①区——直线 a 左侧的区域，通常无感觉；
- ②区——直线 a 与折线 b 之间的区域，有电的感觉，但无病理反应；
- ③区——折线 b 至曲线 c 之间的区域，通常无器官损伤，可能出现肌肉收缩、呼吸困难、心房纤颤、无心室纤颤的短暂心脏停跳，此等病理反应随电流和时间的增大而加剧；
- ④区——曲线 c 右侧的区域，除出现③区的病理反应外，还出现导致死亡的心室纤颤以及心脏停跳、呼吸停止、严重烧伤等反应，它随电流和时间的增大而加剧。

从图 1-1 可知，如电击电流和其持续时间在④区内，人体就有死亡危险。但在制定防电击措施时，尚需为不同于实验室条件的现场其他一些不利条件留出一些裕量，通常以③区内离曲线 c 一段距离的曲线 L 作为人体是否安全的界限，如图 1-1 所示。从曲线 L 可知，只要 I_b 小于 30mA，人体就不致因发生心室纤颤而电击致死。据此国际上将防电击的高灵敏度剩余电流动作保护器 (residual current operated protective device, 以下简称 RCD) 的额定动作电流值取为 30mA。

第二节 不同环境条件下的不同交流接触电压限值

电流 I_b 因施加于人体阻抗 Z_i 上的接触电压而产生。接触电压越大， I_b 也越大。在设计电气装置时计算 I_b 很困难，而计算接触电压比较方便。为此 IEC 又提出在干燥和潮湿环境条件下相应的预期接触电压和通电时间的关系曲线 ($U_i \sim t$ 曲线) L1 和 L2，如图 1-2 所示。应该说明，图 1-2 曲线中的 L1 和 L2 曲线非自图 1-1 曲线 L 按欧姆定理推算求得，因人体阻抗是随接触电压的增大而减小的，故此曲线也系测试求得。还需说明，在防电击的计算中求出的是预期接触电压 U_i ，对于从手到足的电击电流通路而言，它是施加于人体、鞋袜、地面等阻抗之和上的电压，故人体实际接触电压常小于预期接触电压 U_i 。但在诸如赤足和金属导电地面之类的环境下，鞋袜和地面电阻可不计，这时实际接触电压即为预期接触电压，故预期接触电压为最大的接触电压。为确保电气安全和简化计算，在实际应用中接触电压都采用预期接触电压 U_i 。

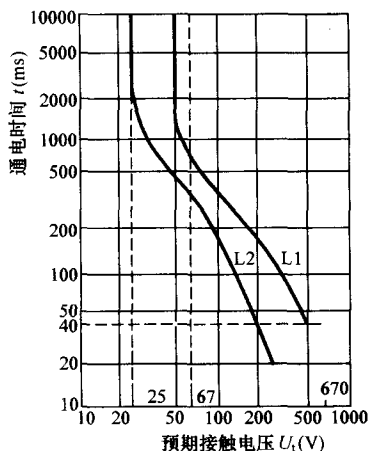


图 1-2 干燥和潮湿条件下预期接触电压 U_i 和允许最大持续时间 t 的关系曲线

由图 1-2 可知，在干燥条件下当 U_i 不大于 50V 时，人体接触此电压不致发生心室纤颤致死，所以在干燥环境条件下将预期接触电压限值 U_L 取为 50V。据此，IEC 将干燥环境条件下用以防电击的特低电压设备的额定电压定为 48V（我国现仍沿用过去的 36V，其技术经济性能较差）。在潮湿环境条件下，例如在施工现场、农场等处，由于人体皮肤阻抗降低，大于 25V 的 U_i 即可导致引起心室纤颤的 30mA 以上的接触电流 I_b ，据此 IEC 将潮湿环境条件下的 U_L 值规定为 25V，而特低电压设备的额定电压则规定为 24V。在水下或特别潮湿环境条件下，例如在浴室或游泳池等场所内，由于皮肤湿透，其阻抗大幅下降，特低电压设备的额定电压 IEC 规定仅为 12V 或 6V。

需要注意，尽管干燥和潮湿环境条件下的人体阻抗和接触电压限值并不相

同,但导致人体心室纤颤的电流阈值都仍为 30mA。这正是在干燥和潮湿不同环境条件下,IEC 都规定装用同一额定动作电流不大于 30mA 的瞬动 RCD 而不要求装用 10mA 或 6mA 的 RCD 的原因。这一问题在第二十三章第一节中还将作进一步的叙述。

第三节 交流电流通过人体的效应与防护电器选用的关系

从图 1-1 可知,人体遭受电击时发生心室纤颤致死的危险程度是与通过人体电流的大小及其持续时间的长短有关的。由此可知,手持式设备(例如手电钻)和移动式设备(例如落地灯)比固定式设备具有更大的电击致死的危险性。因在持握这类绝缘损坏的设备时,如通过人体的电流大于 30mA,由于已超过摆脱电流阈值 10mA,人体已不能脱离与电的接触,若切断电源的时间较长超过图 1-1 的发生心室纤颤阈值,即有可能电击致死。因此对于手持式和移动式设备,必须在不大于图 1-1 曲线 L 左侧的相应时间内切断电源,这正是要求在接用手持式、移动式设备的插座回路上装用瞬动 RCD 的原由。对于固定式设备和配电线路,因不存在手掌紧握故障设备不能摆脱的问题,可在 5s 内切断电源,其原由将在第六章予以说明。

第四节 直流电流通过人体的效应

直流电流通过人体时同样也会产生各种效应。直流电流的感觉阈值约为 2mA。它没有明确的摆脱阈值,只是在人体通电和断电的瞬间能引起类似痉挛的有疼痛感的肌肉收缩。其心室纤颤阈值,当电击持续时间超过一个心搏周期时(约 13ms),比交流的心室纤颤阈值大几倍;当电击持续时间少于 200ms 时,则几乎与交流的心室纤颤阈值相同。

引起心室纤颤的直流预期接触电压限值 IEC 标准取为 120V。

建筑物内鲜少采用直流电气装置,本书所叙皆为交流电气装置,为此本章只对直流电流通过人体的效应作简略介绍。

供电系统的接地

接地是个十分复杂的问题，它关系到人身和财产的安全以及电气装置和设备功能的正常发挥。

所谓接地有两个含义：一是指电气回路导体或电气设备外壳与大地的连接；另一是指该等需接地部分与代替大地的某一导体相连接，这时以该导体的电位为参考电位而不是以大地的电位为参考电位。例如用飞机的机舱、汽车的车身以及建筑物的一些金属部分作等电位联结系统来代替大地。前者往往对接地电阻有要求，后者因不取大地电位为参考电位，通常不提对接地电阻的要求，而只要求等电位联结系统的低阻抗。

另外，还需说明的是，接地有低频和高频之分。本章中的供电系统属低频范畴，它只对接地回路中的电阻成分规定要求；而电气装置的防雷和抗干扰属高频范畴，除电阻成分外它还对接地系统中的电抗成分规定要求，在电气装置的设计安装和检验中对此应注意加以区分。

关于等电位联结的作用和其设置将在第六、七、十四、二十一等章中进行介绍。

第一节 供电系统的两个接地

任一电压等级的供电系统都需处理两个接地问题：一个是系统内电源端带电导体的接地；另一个是负荷端电气装置外露导电部分的接地。就低压供电系统而言，前者通常是指变压器、发电机等中性点的接地，称作系统接地；后者通常是指电气装置内电气设备金属外壳、布线金属管槽等外露导电部分的接地，称作保护接地，如图 2-1 所示的 R_B 和 R_A 。

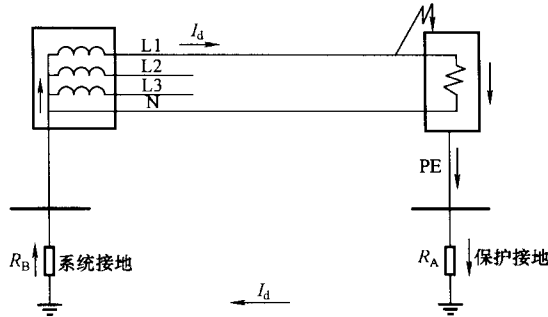


图 2-1 系统接地和保护接地

第二节 系统接地的作用

系统接地的作用是使系统取得大地电位为参考电位，降低系统对地绝缘水平的要求，保证系统的正常和安全运行，例如当雷击时，地面强大的瞬变电磁场使架空线路感应幅值很大的瞬态过电压，它持续时间极短，以微秒计，但过电压幅值和变化陡度很大，使设备和线路承受危险电涌电压的冲击。作系统接地后线路感应的雷电荷获得对地泄放的通路，大大降低了这一对地瞬态过电压，减轻了设备和线路绝缘被击穿的危险。又如高、低压共杆的架空线路，如果发生高压线路坠落在低压线路上的故障，系统接地既可降低低压线路上的对地电压，也可使高压侧故障电流通过低压系统的系统接地返回电源，使高压侧继电保护动作，从而避免或减轻高压侧故障对低压系统的危害。

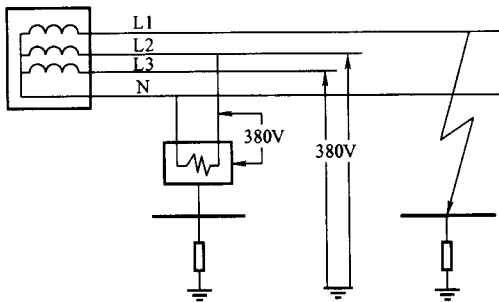


图 2-2 无系统接地时一相故障接地另两相对地电压高达 380V

如果不做系统接地，则当系统中一相发生接地故障时，另两相对地电压将由原来的相电压 (220V) 升高为线电压 (380V)，如图 2-2 所示。由于没有返回电源的导体通路，故障电流仅为极小的线地间的电容电流，保护电器不动作，此过电压将持续存在，人体如接触无故障的相线，接触