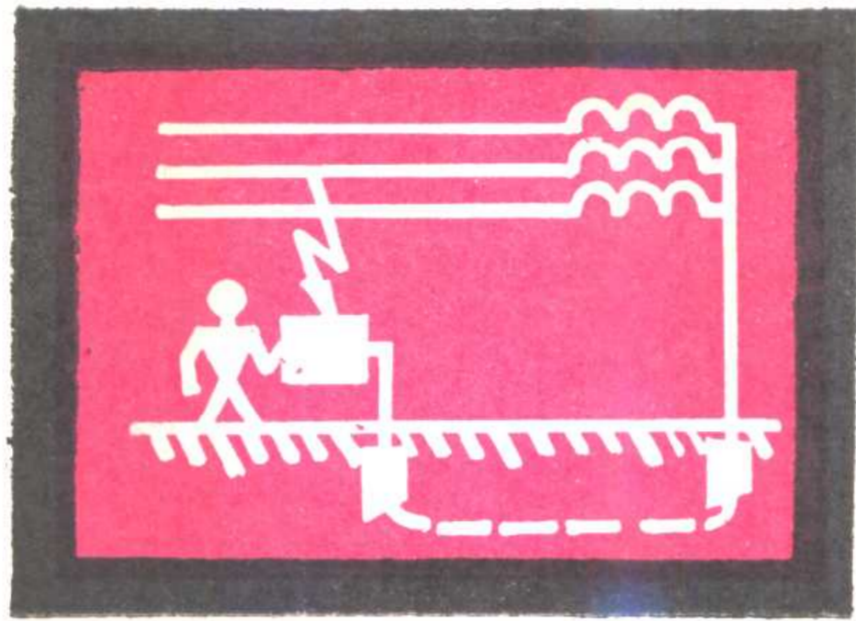


35476

TM92  
4743



# 电气安全工程

杨有启 编著



安全与卫生工程系列教材

劳动保护管理学

安全分析与事故预测

工业防毒技术

工业通风与防尘工程学

噪声控制工程

作业环境空气检测技术

电气安全工程

起重与机械安全工程学

锅炉压力容器安全工程学

防火与防爆

# 电气安全工程

杨有启 编著

北京经济学院出版社

1991·北京

(京)新登字211号

**电气安全工程**  
Dianqi Anquan Gongcheng

杨有启 编著

北京经济学院出版社出版  
(北京市朝阳区红庙)

北京通县永乐印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 32.75印张 133千字  
1991年12月第1版 1991年12月第1版第1次印刷

印数: 00 001—10100

ISBN7-5033-0138-3/TM·1

定价: 4.70元

## 《安全与卫生工程系列教材》出版说明

安全与卫生工程是受到国内外普遍重视的一门新兴学科。它着重研究工业生产过程中危害劳动者安全和健康的各种因素，并以相应的工程技术措施及现代管理措施保障劳动者的安全和健康。在我国，安全与卫生工程学科的发展与技术措施的广泛应用，对贯彻“安全第一，预防为主”的劳动保护方针，消除事故根源，保障广大职工的安全和健康，促进社会主义建设事业的顺利进行起着重要作用。

我社出版的《安全与卫生工程系列教材》，是北京经济学院安全工程系以富有教学经验的教师组成编写组，在多年教学科研实践的基础上，吸收国内外先进技术和方法编写而成的。本套教材系统地、详尽地介绍了安全与卫生工程技术的原理和方法。力求概念准确，条理清楚，论述深入浅出，做到科学性、先进性和实用性相结合。本套教材注意理论联系实际，附有必要的工程数据和工程图表、资料以利实用。本套教材可作为高等院校、大专院校相应专业的教材或教学参考书，也可作为各产业部门、厂矿企业劳动保护干部、管理干部的培训教材。

《安全与卫生工程系列教材》共计10本：

《劳动保护管理学》

《锅炉压力容器安全工程学》

《防火与防爆》

《电气安全工程》

《起重与机械安全工程学》

《安全分析与事故预测》

《工业通风与防尘工程学》

《噪声控制工程》

《工业防毒技术》

《作业环境空气检测技术》

此外，还有一本《作业环境空气监测方法》可与《作业环境空气检测技术》配合使用。

1990年7月

CA609/07

# 目 录

<b>第一章 电流对人体的效应</b> .....	( 1 )
<b>第一节 电流对人体作用的机理</b> .....	( 1 )
作用机理·电击死亡机理	
<b>第二节 电流伤害种类</b> .....	( 4 )
电击·电伤	
<b>第三节 电流对人体作用分析</b> .....	( 6 )
15~100赫交流电流的作用·直流电流的作用·100赫以上交流电流的作用·特殊波形电流的作用·冲击电流的作用	
<b>第四节 人体阻抗及测定</b> .....	( 20 )
人体阻抗·人体阻抗测定	
<b>第二章 电网安全性评价</b> .....	( 25 )
<b>第一节 电力系统</b> .....	( 25 )
电力系统组成·额定电压和电压等级·电力系统运行的可靠性	
<b>第二节 工业企业供电</b> .....	( 28 )
工业企业供电系统组成·供电电压选择·企业高压供电和配电·企业低压配电	
<b>第三节 正常运行时的安全性</b> .....	( 33 )
接地电网·不接地电网	
<b>第四节 一相接地时的安全性</b> .....	( 40 )
接地电网·不接地电网	
<b>第三章 绝缘</b> .....	( 43 )
<b>第一节 绝缘材料的电气性能</b> .....	( 43 )
电阻率·电介质极化和介电常数·介质损耗	
<b>第二节 绝缘破坏</b> .....	( 48 )
绝缘击穿·绝缘老化·绝缘损坏	
<b>第三节 绝缘电阻试验</b> .....	( 53 )
绝缘电阻测定·吸收比测定·绝缘电阻指标	
<b>第四节 耐压试验</b> .....	( 56 )
高电压试验设备·耐压试验应用技术·高电压试验安全技术	
<b>第五节 泄漏电流试验和介质损耗试验</b> .....	( 63 )
泄漏电流试验·介质损耗试验	

<b>第四章 屏护和间距</b> .....	( 67 )
第一节 屏护.....	( 67 )
屏护的性质和应用·屏护安全条件	
第二节 间距.....	( 68 )
线路间距·设备间距·检修间距	
<b>第五章 接地</b> .....	( 77 )
第一节 接地的基本概念.....	( 77 )
接地的分类·接地电流和接地短路电流·流散电阻和接地电阻·对地电压和对地电压曲线·接触电势和接触电压·跨步电势和跨步电压	
第二节 保护接地.....	( 80 )
保护接地——IT系统的原理·保护接地应用范围·接地电阻的确定·绝缘监测·过电压防护	
第三节 接地装置.....	( 87 )
自然接地体和人工接地体·接地线·接地装置安装·接地装置连接·接地装置设计条件·降低接地电阻施工法	
第四节 流散电阻计算.....	( 96 )
土壤电阻率·人工接地体的流散电阻·自然接地体的流散电阻·接触电势和跨步电势计算	
第五节 接地测量.....	( 122 )
接地电阻测量·土壤电阻率测量·对地电压和接触电压测量	
<b>第六章 保护接零</b> .....	( 127 )
第一节 保护接零原理.....	( 127 )
TT系统及其评价·保护接零——TN系统安全原理	
第二节 工作接地和重复接地.....	( 132 )
工作接地·重复接地·保护方式选择	
第三节 保护接零装置.....	( 138 )
保护零线·速断保护装置	
第四节 保护接零检测.....	( 143 )
停电测量法·不停电测量法·零线连续性测试	
第五节 保护接零计算.....	( 146 )
短路电流特征·单相短路电流计算·计算实例·接零线路允许长度	
<b>第七章 加强绝缘和安全电压</b> .....	( 165 )
第一节 加强绝缘.....	( 165 )
加强绝缘结构·双重绝缘的基本条件·不导电环境	
第二节 安全电压.....	( 167 )
安全电压值及应用·电源及回路配置·功能特低电压·电气隔离	
第三节 隔离变压器.....	( 169 )
主要技术参数·安全机构	
<b>第八章 漏电保护</b> .....	( 172 )

第一节	漏电保护装置的分类和主要参数	( 172 )
	漏电保护装置分类·漏电保护装置的主要参数	
第二节	漏电保护装置的构成和特点	( 174 )
	电压型漏电保护装置·零序电流型漏电保护装置·中性点型漏电保护装置·泄 漏电流型漏电保护装置	
第三节	漏电保护装置设计	( 182 )
	零序电流互感器设计·电子线路设计特点·执行元件电磁计算	
第四节	漏电保护装置运行	( 188 )
	漏电保护装置的选用·漏电保护装置误动作和拒动作·漏电保护装置的检查和 常见故障	
<b>第九章</b>	<b>变配电安全</b>	( 200 )
第一节	变配电所	( 200 )
	变配电所接线图和主要电气设备·变配电所位置和容量·变配电所一般安全要求	
第二节	变压器	( 202 )
	变压器结构·变压器的保护装置·变压器电磁分析方法·变压器的主要技术参 数·变压器安全运行条件·变压器故障分析和事故处理	
第三节	互感器	( 210 )
	电压互感器·电流互感器	
第四节	高压开关	( 212 )
	断路器·隔离开关·负荷开关·高压熔断器·跌落式保险器·高压开关操作	
第五节	电力电容器	( 217 )
	补偿原理和应用·电容器安全运行条件	
<b>第十章</b>	<b>电气线路安全</b>	( 219 )
第一节	线路种类及特点	( 219 )
	架空线路·电缆线路·室内配线	
第二节	负荷计算	( 222 )
	设备功率的确定·负荷计算的 ABC 法	
第三节	线路安全条件	( 224 )
	导电能力·线路绝缘·导线机械强度·线路间距·线路防护·导线连接·线路 管理	
第四节	电气线路常见故障	( 237 )
	架空线路故障·电缆线路故障	
<b>第十一章</b>	<b>用电设备安全</b>	( 239 )
第一节	用电设备的环境条件	( 239 )
	环境条件·电气设备外壳防护等级	
第二节	电动机	( 242 )
	电动机选用·异步电动机的基本特性·异步电动机的运行状态·异步电动机不 对称运行·电动机安全运行条件·电动机故障处理	
第三节	低压开关电器	( 251 )

低压开关电器一般安全要求·刀开关·自动空气开关·减压起动器·控制器· 磁力起动器	
第四节 保护电器	( 264 )
常用保护方式·熔断器·热继电器·电磁式继电器	
第五节 单相电气设备	( 268 )
通用安全要求·电气照明·携带式和移动式电气设备·电热器具	
第六节 起重机电气设备	( 275 )
主要电气设备及其安全要求·保护电器及保护方式·起重机电气线路及安全要 求·电气故障分析和处理	
第七节 电热设备	( 287 )
电焊设备·电炉	
<b>第十二章 电气防火防爆</b>	<b>( 291 )</b>
第一节 电气引燃源	( 291 )
危险温度引燃源·电热器具和照明灯具引燃源·电火花和电弧	
第二节 危险物品分级分组	( 296 )
性能参数和分级分组·爆炸性物质分级分组举例	
第三节 危险场所划分	( 318 )
旧标准对危险场所的划分·新标准对危险场所的划分	
第四节 爆炸危险场所的电气设备	( 325 )
防爆电气设备的类型·防爆型电气设备的标志·爆炸危险环境中电气设备选择	
第五节 爆炸危险场所的电气线路	( 334 )
气体、蒸气爆炸危险场所的电气线路·粉尘爆炸危险场所的电气线路·火灾危 险场所的电气线路	
第六节 电气防爆措施	( 338 )
消除或减少爆炸性混合物·隔离和间距·消除引燃源·危险场所接地和接零· 消防供电	
第七节 消防自动装置	( 343 )
自动报警装置·消防控制室和消防控制设备	
第八节 电气灭火	( 347 )
触电危险和断电·带电灭火安全要求·充油电气设备灭火	
<b>第十三章 雷电和内部过电压特征</b>	<b>( 350 )</b>
第一节 雷电种类和参数	( 350 )
雷电种类·雷电参数·雷电参数测量	
第二节 雷电危害和防雷分类	( 357 )
雷电危害·防雷分类	
第三节 内部过电压	( 359 )
切换过电压·电弧接地过电压·铁磁谐振过电压·电容传递过电压·不对称短 路过电压和参数谐振过电压·工频电压升高	
<b>第十四章 防雷装置和防雷技术</b>	<b>( 373 )</b>



第一节	接闪器.....	( 373 )
	避雷针保护范围·避雷线保护范围·避雷针、避雷线联合保护范围·避雷网和避雷带保护范围·接闪器材料	
第二节	避雷器.....	( 377 )
	保护间隙·管型避雷器·阀型避雷器	
第三节	引下线和接地装置.....	( 383 )
	引下线·接地装置	
第四节	消雷技术.....	( 385 )
第五节	防雷装置检查.....	( 386 )
第六节	直击雷防护.....	( 386 )
	应用范围和基本措施·反击的防止	
第七节	感应雷防护.....	( 390 )
	静电感应防护·电磁感应防护	
第八节	雷电侵入波防护.....	( 390 )
	变配电装置的防护·建筑物和构筑物的防护	
第九节	人身防雷.....	( 395 )
<b>第十五章</b>	<b>静电产生和危害</b> .....	( 397 )
第一节	静电起电.....	( 397 )
	物质的电性质·导体和绝缘体·静电起电方式·固体静电·粉体静电·液体静电·蒸气和气体静电	
第二节	静电消失.....	( 415 )
	静电中和·静电泄漏	
第三节	静电影响因素.....	( 418 )
	材质和杂质的影响·工艺设备和工艺参数的影响·环境条件和时间的影响	
第四节	静电危害.....	( 421 )
	爆炸和火灾·静电电击·妨碍生产	
<b>第十六章</b>	<b>静电防护技术</b> .....	( 426 )
第一节	场所危险程度控制.....	( 426 )
	取代易燃介质·降低爆炸性混合物的浓度·减少氧化剂含量	
第二节	工艺控制.....	( 427 )
	材料的选用·限制摩擦速度或流速·增强静电消散过程·消除附加静电	
第三节	接地和屏蔽.....	( 432 )
	导体接地·导电覆盖层·导电性地面·绝缘体接地·屏蔽	
第四节	增湿和添加剂.....	( 436 )
	增湿·抗静电剂	
第五节	静电中和器.....	( 439 )
	感应式中和器·高压中和器·放射线中和器·静电中和器选用	
第六节	静电安全管理.....	( 450 )
	概述·静电管理指标·静电常规检测	

<b>第十七章 静电测量</b> .....	( 453 )
<b>第一节 静电特性参数测量</b> .....	( 453 )
静电电压测量·静电电量测量·静电电荷密度的测量·静电电流测量·静电放电 电量测量	
<b>第二节 静电物理参数测量</b> .....	( 467 )
时间常数测量·电阻测量·电阻率和导电率测量·电容测量·介电常数测量	
<b>第十八章 电磁场伤害及防护</b> .....	( 477 )
<b>第一节 高频电磁场基本性质</b> .....	( 477 )
高频电磁场的基本性质·高频电磁场分类	
<b>第二节 高频技术的应用</b> .....	( 479 )
高频加热·医疗·无线电技术	
<b>第三节 高频电磁场伤害</b> .....	( 481 )
人体对高频电磁场的生理反应·电磁场伤害的影响因素	
<b>第四节 电磁场安全卫生标准</b> .....	( 483 )
计量单位·电磁场安全卫生标准限值·高频电磁场测定	
<b>第五节 电磁屏蔽</b> .....	( 485 )
电磁屏蔽概论·屏蔽设计要求·高频接地	
<b>第十九章 电气安全管理</b> .....	( 488 )
<b>第一节 电气事故分类</b> .....	( 488 )
触电事故·静电事故·雷电灾害·射频危害·电路故障	
<b>第二节 触电事故调查</b> .....	( 490 )
事故统计和调查·事故规律	
<b>第三节 电气安全组织管理</b> .....	( 492 )
管理机构 and 人员·规章制度·安全检查·安全教育·安全资料	
<b>第四节 检修安全措施</b> .....	( 493 )
工作票制度·停电安全措施·不停电检修	
<b>第五节 电工安全用具</b> .....	( 496 )
绝缘安全用具·携带式电压和电流指示器·登高安全用具·临时接地线、遮栏 和标示牌·安全用具的使用和试验	
<b>第六节 电气安全分析和评价</b> .....	( 502 )
事故树分析·事件树分析·故障模型及分析·安全检查表·运行性研究·安全 评价	
<b>第七节 触电急救</b> .....	( 508 )
脱离电源·现场急救方法·急救用药要求	
后记.....	( 512 )

# 第一章 电流对人体的效应

电能可能对人体构成多种伤害。例如，电流通过人体、人体直接接受电流能量将遭到电击；电能转换为热能作用于人体，致使人受到烧伤或灼伤；人体在电磁场照射下，吸收电磁场的能量也会受到伤害等。诸多伤害中，电击是最基本的形式。本章主要介绍电流通过人体的效应和伤害。

有关电流对人体效应的数据和理论，对于制订防触电技术的标准、鉴定安全型电气设备、设计电气安全措施、分析电气事故、评价电气安全水平都是必不可少的依据。因此，本章是电气安全工程必备的基础。

## 第一节 电流对人体作用的机理

与其他一些伤害不同，电流对人体的作用事先没有任何预兆。伤害往往发生在瞬息之间。而且，人体一旦遭受电击后，防卫能力迅速降低。这两个特点都增加了电流伤害的危险性。

### 一、作用机理

电流通过人体，会引起麻感、针刺感、压迫感、打击感、痉挛、疼痛乃至呼吸困难、血压升高、昏迷、心律不齐、心室颤动等症状。人体工频电流试验的典型资料见表1—1和表1—2。

表1—1 左手—右手电流途径的实验资料

感 觉 情 况	被 试 者 百 分 数		
	5%	50%	95%
手表面有感觉	0.7	1.2	1.7
手表面有麻痹似的连续针刺感	1.0	2.0	3.0
手关节有连续针刺感	1.5	2.5	3.5
手有轻微颤动，关节有受压迫感	2.0	3.2	4.4
上肢有强力压迫的轻度痉挛	2.5	4.0	5.5
上肢有轻度痉挛	3.2	5.2	7.2
手硬直有痉挛，但能伸开，已感到有轻度疼痛	4.2	6.2	8.2
上肢部、手有剧烈痉挛，失去知觉，手的前表面有连续针刺感	4.3	6.6	8.9
手的肌肉直到肩部全面痉挛，还可能摆脱带电体	7.0	11.0	15.0

电流对人体的作用主要表现为生物学效应，包括复杂的理化过程。

电流的生物学效应表现为使人体产生刺激和兴奋行为，使人体活的组织发生变异，从一种状态变为另外一种状态。电流通过肌肉组织，引起肌肉收缩。应当指出，电流对机体除直接起作用外，还可能通过中枢神经系统起作用。由于电流引起细胞激动，产生脉冲形式的神经兴奋波，当这兴奋波迅速地传到中枢神经系统后，后者即发生不同的指令，使人体各部作相应的反应。因此，当人体触及带电体时，有些没有电流通过的部分也可能受到刺激，发生强烈的反应。而且，当中枢神经得到的兴奋波很强烈时，人体可能出现不适当的反应，重要器官的工作可能受到破坏。

表1-2 单手—双脚电流途径的实验资料

感 觉 情 况	被 试 者 百 分 数		
	5%	50%	95%
手表面有感觉	0.9	2.2	3.5
手表面有麻痹似的针刺感	1.8	3.4	5.0
手关节有轻度压迫感，有强度的连续针刺感	2.9	4.8	6.7
前肢有压迫感	4.0	6.0	8.0
前肢有压迫感，足掌开始有连续针刺感	5.3	7.6	10.0
手关节有轻度痉挛，手动作困难	5.5	8.5	11.5
上肢有连续针刺感，腕部、特别是手关节有强度痉挛	6.5	9.5	12.5
肩部以下有强度连续针刺感，肘部以下僵直，还可以摆脱带电体	7.5	11.0	14.5
手指关节、踝骨、足跟有压迫感，手的大拇指（全部）痉挛	8.8	12.3	15.8
只有尽最大努力才可能摆脱带电体	10.0	14.0	18.0

在活的机体上，特别是肌肉和神经系统，有微弱的生物电存在。生物电是非常微弱的，如果引入局外电源，生物电的正常工作规律将被破坏，人体也将受到不同程度的伤害。

电流通过人体还有热作用。电流所经过的血管、神经、心脏、大脑等器官可使其热量增加而导致功能障碍。

电流通过人体，还会引起机体内液体物质发生离解、分解而导致破坏。

电流通过人体，还会使机体各种组织产生蒸气，乃至发生剥离、断裂等严重破坏。

## 二、电击死亡机理

死亡可分为诊断死亡和生物性死亡。当人处于诊断死亡状态时，生命特征已经消失，即呼吸中止、心脏停止跳动、瞳孔明显放大而且丧失对光线的调节作用，对强烈刺激没有反应。但是，这一状态并不意味着失去了恢复生命的可能，因为机体组织尚未瓦解。

因为各器官的功能是逐渐消失的。在刚刚进入死亡状态的时候，几乎所有机体组织和细胞都维持着新陈代谢过程，只不过是维持在很低的水平上。如及时采取正确的措施，可能使之复活。

诊断死亡能延续的时间，取决于从心脏、肺部停止工作到大脑皮层缺氧而开始死亡的时间。多数情况这段时间只有4~6分钟。因意外原因造成诊断死亡者，这段延续时间可达7~8分钟。而因由心脏、肺部等重要器官疾病引起的诊断死亡，这段时间可能只有几秒钟。

对处在**诊断死亡**状态的病人，如能及时进行抢救，帮助其呼吸和血液循环，恢复和保持大脑皮层和全身氧的供应，则有可能挽救生命。如延误时间，大脑皮层和全身缺氧状态进一步发展，即导致生物性死亡。应当指出，大脑皮层对缺氧的反应是最灵敏的。一旦大脑皮层细胞发生分裂，遭到不可逆破坏，复活的可能性也随之丧失；即使设法恢复其心脏跳动和呼吸，也可能于数小时后死亡或导致严重的后遗症。

生物性死亡是呼吸、心脏完全停止、对外界刺激没有任何反应的不可逆死亡。

小电流电击（通过人体的电流数十至数百毫安）使人致命的最危险、最主要的原因是引起心室颤动（心室纤维性颤动）。麻痹和中止呼吸、电休克虽然也可能导致死亡，但其危险性比引起心室颤动要小得多。

心脏工作原理可用图1—1说明。心脏正常工作时，收缩与舒张有节奏地交替进行。舒张时，来自头部和躯干、四肢的血液经右心房，进入右心室，而来自肺部的血液经左心房进入左心室；收缩时，右心室的血液经动脉管送入肺部，左心室的血液则经动脉管送往全身。心脏这样不停地工作，于是维持血液循环，维持人的生命。

当人体遭受电击时，如果有电流通过心脏，可能直接作用于心肌，引起心室颤动；如果没有电流通过心脏，亦可能经中枢神经系统反射作用于心肌，引起心室颤动。

发生心室颤动时，每分钟颤动1000次以上，但幅度很小，而且没有规则，血液实际上中止循环。发生心室颤动时心电图和血压图的变化见图1—2。图中左半部是正常时心电图和血压图；右半部是发生心室颤动后的情况。如图所示，心室颤动是在T波前半部发生的。

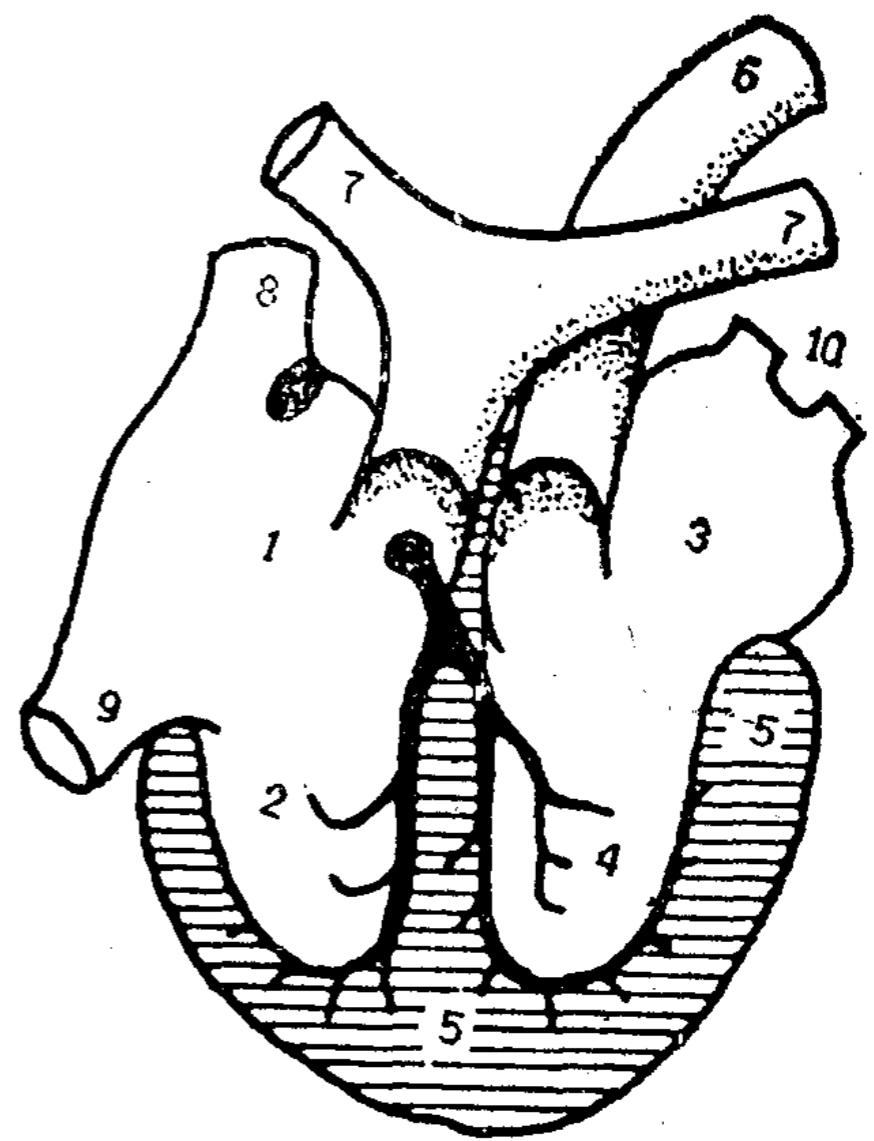


图1—1 心脏简图

- 1—右心房；2—右心室；3—左心房；
- 4—左心室；5—心肌；6—主动脉；
- 7—肺动脉；8—上腔静脉；9—下腔静脉；10—肺静脉

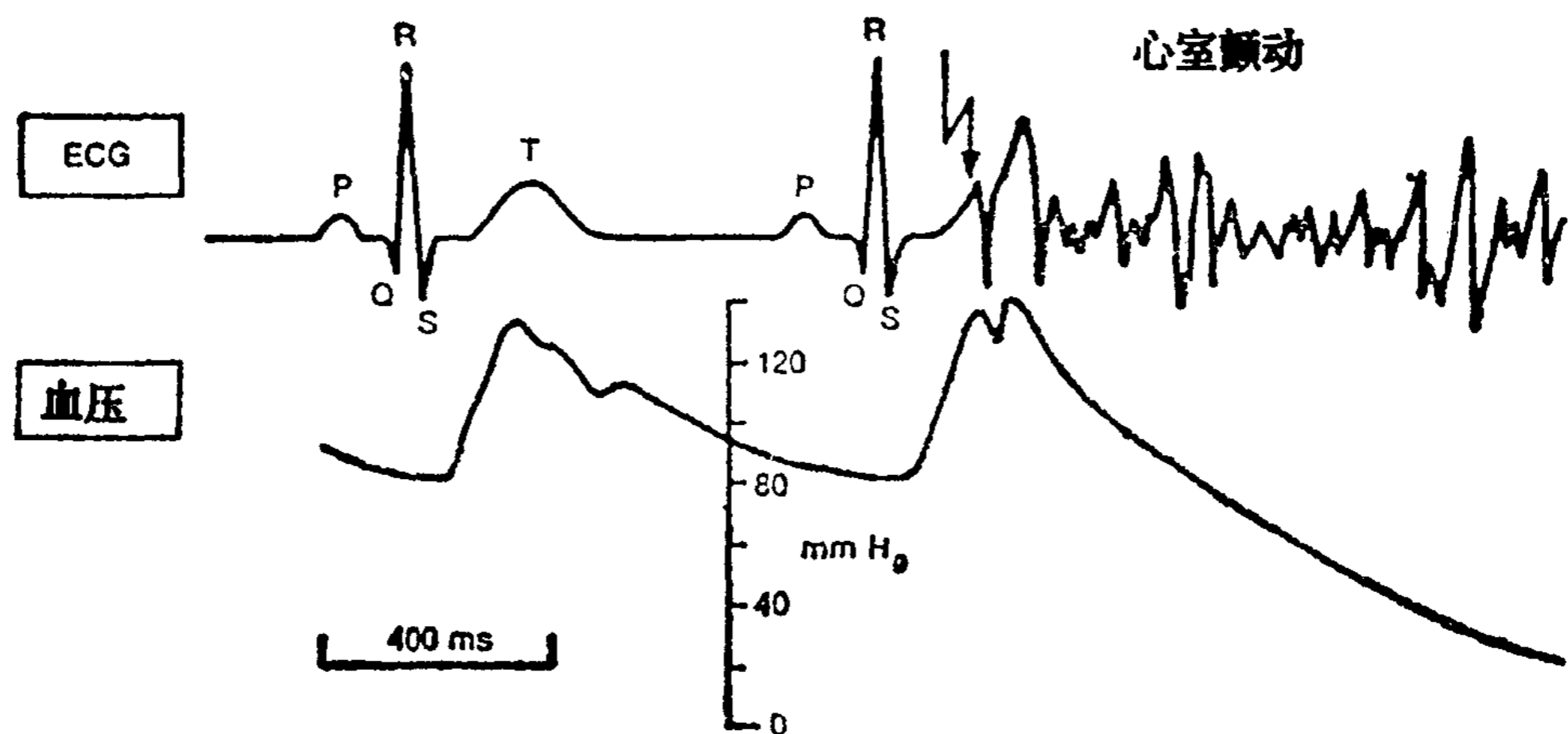


图1—2 心电图

由于电流的瞬时作用而发生心室颤动时，呼吸可能持续2~3分钟。在其丧失知觉之前，有时还能叫喊几句、有时还能走几步。但是，由于其心脏已进入心室颤动状态，血液中止循环，大脑和全身迅速缺氧，伤情将急剧变化。如不能及时抢救，很快就导致诊断死亡。

心脏发生心室颤动持续时间是可能长的，如不及时抢救，很快就完全停止跳动。

人体遭受电击时，如有电流作用于胸肌，将使胸肌发生痉挛，使人感到呼吸困难。电流越大，感觉越明显。如作用时间较长，将发生憋气、窒息等呼吸障碍。窒息后，意识、感觉、生理反射相继消失，继而呼吸中止。稍后，即发生心室颤动或心脏停止跳动，导致诊断死亡。在这种情况下，心室颤动或心脏停止跳动不是由电流通过心脏引起的，而是由机体缺氧和中枢神经系统反射引起的。

通过人体数十毫安（一般认为是50毫安，有效值）以上的工频交流电流，既可能引起心室颤动或心脏停止跳动，也可能导致呼吸中止。但是，前者的出现比后者早得多，即前者是主要的。如果通过人体的电流只有20~25毫安，一般不能直接引起心室颤动或心脏停止跳动。但如时间较长，仍可导致心脏停止跳动。这时，心室颤动或心脏停止跳动主要是由呼吸中止导致机体缺氧引起的。但当通过人体的电流超过数安时，由于刺激强烈，也可能先使呼吸中止。数安的电流流过人体，还可能导致严重烧伤甚至死亡。

电休克是机体受到电流的强烈刺激，发生强烈的神经系统反射，使血液循环、呼吸及其他新陈代谢都发生障碍，以致神经系统受到抑制，出现血压急剧下降、脉搏减弱、呼吸衰竭、神志昏迷的现象。电休克状态可以延续数十分钟到数天。其后果可能是得到有效的治疗而痊愈，也可能由于重要生命机能完全消失而死亡。

## 第二节 电流伤害种类

电流对人体的伤害就是通常说的触电，是电流的能量直接作用于人体或转换成其他形式的能量作用于人体造成的伤害。

### 一、电击

电击是电流通过人体，机体组织受到刺激，肌肉不由自主地发生痉挛性收缩造成的伤害。严重的电击是指人的心脏、肺部、神经系统的正常工作受到破坏，乃至危及生命的伤害。

数十毫安的工频电流即可使人遭到致命的电击。电击致伤的部位主要在人体内部，而在人体外部不留下明显的痕迹。

按照发生电击时电气设备的状态，可分为直接接触电击与间接接触电击。前者是在电气设备正常运行时发生的电击；后者是在设备出现故障（如漏电故障）时发生的电击。因为二者发生条件不同，所以防护技术也不相同。

大部分触电死亡事故都是电击造成的。通常说的触电事故基本上是指电击而言的。

按照人体触及带电体的方式和电流通过人体的途径，触电可分为以下三种情况：

1. 单相触电。单相触电是指人体在地面或其他接地导体上，人体某一部分触及一相带电体的触电事故。大部分触电事故都是单相触电事故。单相触电的危险程度与电网运行方式有关。一般情况下，接地电网里的单相触电比不接地电网里的危险性大。

2. 两相触电。两相触电是指人体两处同时触及两相带电体的触电事故。其危险性一般

是比较大的。

3. 跨步电压触电。当带电体接地有电流流入地下时，电流在接地点周围土壤中产生电压降。人在接地点周围，两脚之间出现的电压即跨步电压。由此引起的触电事故叫跨步电压触电。高压故障接地处，或有大电流流过的接地装置附近都可能出现较高的跨步电压。

## 二、电伤

电伤是由电流的热效应、化学效应、机械效应等对人体造成的伤害。造成电伤的电流都比较大。电伤会在机体表面留下明显的伤痕，但其伤害作用可能深入体内。

与电击相比，电伤属局部性伤害。电伤的危险程度决定于受伤面积、受伤深度、受伤部位等因素。

电伤包括电烧伤、电烙印、皮肤金属化、机械损伤、电光眼等多种伤害。在触电事故伤亡事故中<sup>①</sup>，纯电伤性质和带有电伤性质的占75%。其中，电烧伤占总数的40%，电烙印占7%，皮肤金属化占3%，机械损伤占0.5%，电光眼占1.5%，综合性的占23%。

电烧伤是最常见的电伤。大部分触电事故都含有电烧伤成分。电烧伤可分为电流灼伤和电弧烧伤。电流灼伤是人体与带电体接触，电流通过人体由电能转换成热能造成的伤害。电流越大、通电时间越长、电流途径上的电阻越大，则电流灼伤越严重。由于人体与带电体接触的面积一般都不大，加之皮肤电阻又比较高，使得皮肤与带电体的接触部位产生较多的热量，受到比体内严重得多的灼伤。但当电流较大时，可能灼伤皮下组织。

因为接近高压带电体时会发生击穿放电，所以，电流灼伤一般发生在低压电气设备上。因系低压设备，电流灼伤的电流不会太大。但是，数百毫安的电流即可导致灼伤；数安的电流将造成严重的灼伤。对于高频电流，由于皮肤电容的旁路作用，有可能内部组织严重灼伤而皮肤只有轻度灼伤。

电弧烧伤是由弧光放电引起的烧伤。电弧烧伤分直接电弧烧伤和间接电弧烧伤。前者是带电体与人体之间发生电弧，有电流通过人体的烧伤；后者是电弧发生在人体附近对人体的烧伤，而且包含被熔化金属溅落的烫伤。弧光放电时电流很大，能量也很大，电弧温度高达数千度，可造成大面积、大深度的烧伤，甚至烧焦、烧毁四肢及其他部位。大电流通过人体时，会在人体上产生大量热量，可能将机体组织烘干、烧焦，并以电流入口、出口处最为严重。

高压系统和低压系统都可能发生电弧烧伤。在低压系统，带负荷（特别是感性负荷）拉开裸露的闸刀开关时，电弧可能烧伤人的手部和面部；线路短路，开启式熔断器熔断时，炽热的金属微粒飞溅出来也可能造成灼伤；错误操作引起短路也可能导致电弧烧伤等。在高压系统，由于错误操作，会产生强热的电弧，导致严重的烧伤；人体过分接近带电体，其间距小于放电距离时，直接产生强烈的电弧，若人当时被打开，虽不一定因电击致死，却可能因电弧烧伤而死亡。

所有电烧伤事故中，大部分发生在电气维修人员身上。

电烙印是电流通过人体后，在接触部位留下的斑痕。斑痕处皮肤硬变，失去原有弹性和色泽，表层坏死，失去知觉。

皮肤金属化是金属微粒渗入皮肤造成的。受伤部位变得粗糙而张紧。皮肤金属化多在弧

<sup>①</sup> 苏联资料，包括死亡、致残及丧失劳动能力三天以上的事故。

光放电时发生，而且一般都伤在人体的裸露部位。当然，在发生弧光放电时，与电弧烧伤相比，皮肤金属化不是主要伤害。

当人体长时间与带电体接触时，经过接触部位的理化作用，也可能导致电烙印和皮肤金属化。

机械损伤多数是电流作用于人体，肌肉不由自主的剧烈收缩造成的，包括肌腱、皮肤、血管、神经组织断裂以及关节脱位乃至骨折等伤害。应当注意这里所说的机械伤害与由电流作用引起的坠落、碰撞等伤害是不一样的，后者属于二次伤害。

电光眼表现为角膜和结膜发炎。在弧光放电时，红外线、可见光、紫外线都可能损伤眼睛。对于短暂的照射，紫外线是引起电光眼的主要原因。

在电流伤害引起的死亡事故中，虽然由电击致死的占85~87%，但其中大部分——占死亡总数的60~62%带有综合性，即存在电击和电伤两种类型的伤害<sup>①</sup>。

### 第三节 电流对人体作用分析

电流通过人体内部，对人体伤害的严重程度与通过人体电流的大小、电流通过人体的持续时间、电流通过人体的途径、电流的种类以及人体的状况等多种因素有关，而且各因素之间，特别是电流大小与通电时间之间有着十分密切的关系。就电流种类而言，虽然工频电流、直流电流、高频电流、特种波形电流、冲击电流都能构成伤害，但伤害程度有较大差别。因此，下面分别予以介绍。

#### 一、15~100赫交流电流的作用

我国工业频率为50赫。这是电气装置应用最多，也是人们接触最多的频率。由于50赫对电击来说属于最危险的频率，而有关研究工作又是在这一频率下进行的，因此，下面介绍的一些按工频试验取得的数据对于偏离50赫（包括60赫）的频率应当是偏保守的。

##### （一）电流大小的影响

通过人体的电流越大，人体的生理反应越明显、感觉越强烈，引起心室颤动所需的时间越短，致命的危险就越大。

对于工频交流电，按照通过人体的电流大小不同，人体呈现不同的状态，可将电流划分为以下三个界限：

##### 1. 感知电流和感知阈值

在一定概率下，通过人体引起人的任何感觉的最小电流<sup>②</sup>称为感知电流。感知电流的最小值称为感知阈值。人对电流最初的感觉是轻微麻感和微弱针刺感。大量试验资料表明，对于不同的人，感知电流和感知阈值都不相同。感知电流和感知阈值与个体生理特征、人体与电极的接触面积等因素有关。

感知电流的概率曲线见图1—3。对应于概率50%的感知电流成年男子约为1.1毫安，成年女子约为0.7毫安。感知阈值定为0.5毫安，并与时间因素无关。

感知电流一般不会对人体造成伤害，但当电流增大时，感觉增强，反应变大，可能导致

① 苏联统计资料。

② 有效值，下同。



坠落等二次事故。

由于感知电流为1毫安左右，可以建议小型携带式电气设备的最大泄漏电流为0.5毫安；重型移动式电气设备的最大泄漏电流为0.75毫安。

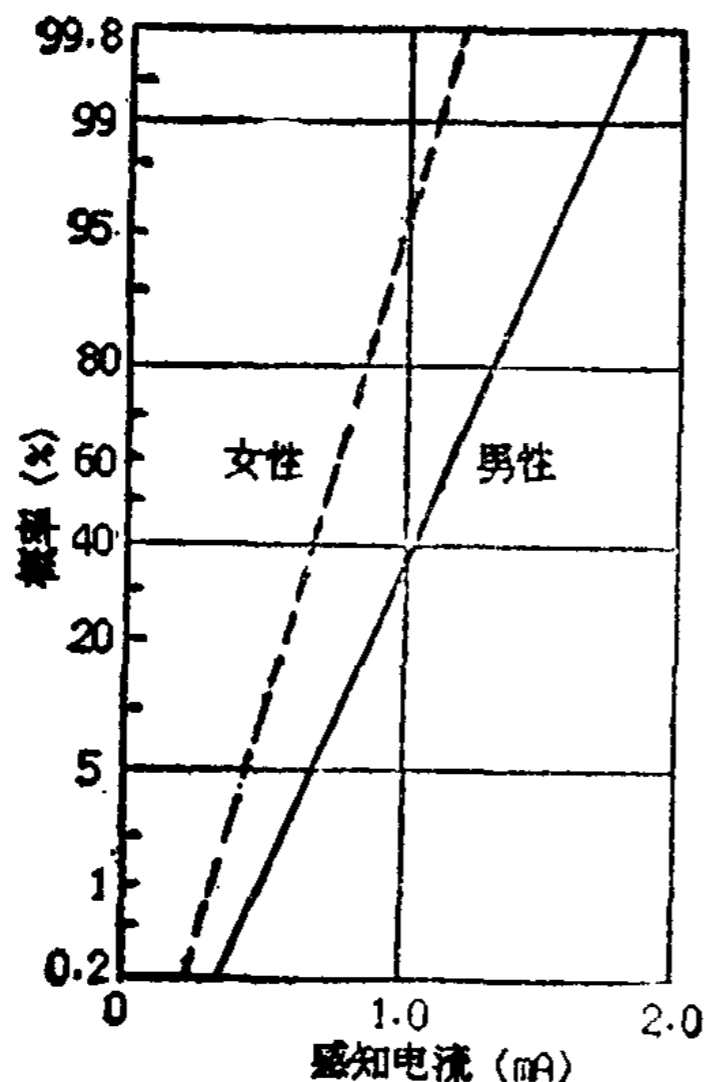


图1-3 感知电流概率曲线

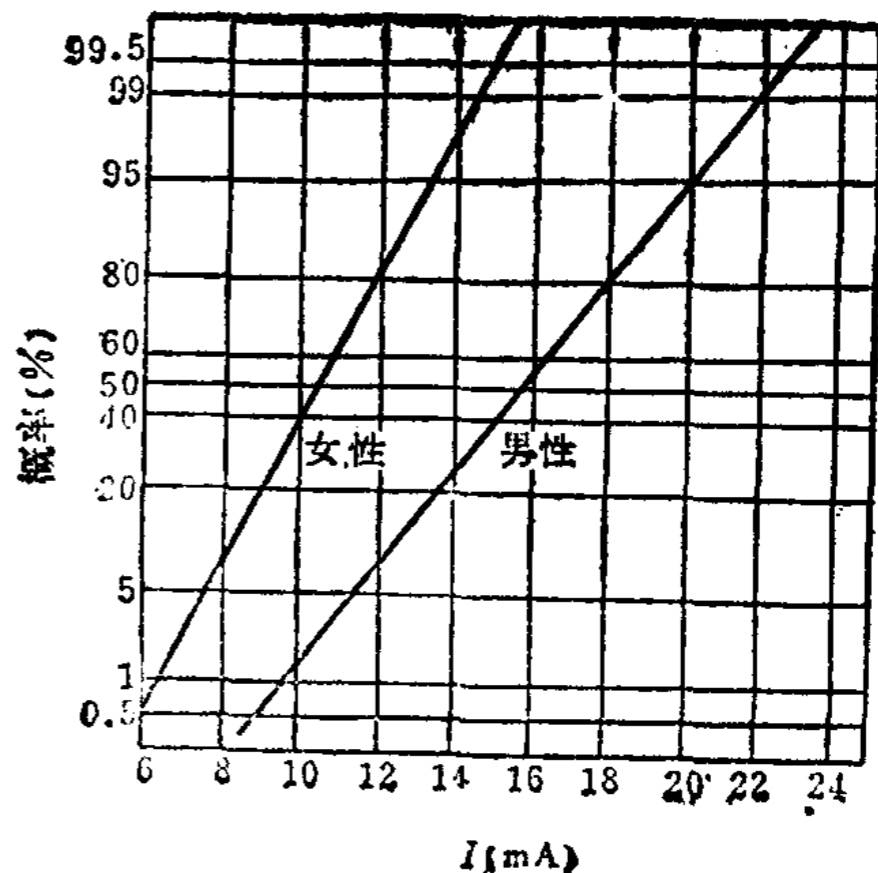


图1-4 摆脱电流概率曲线

## 2. 摆脱电流和摆脱阈值

通过人体的电流超过感知电流时，肌肉收缩增加，刺痛感觉增强，感觉部位扩展，至电流增大到一定程度，触电者将因肌肉收缩、发生痉挛而紧抓带电体，不能自行摆脱电极。人触电后能自行摆脱电极的最大电流称为摆脱电流。摆脱电流的最小值称为摆脱阈值。对于不同的人，摆脱电流和摆脱阈值也不相同。摆脱电流和摆脱阈值与个体生理特征、电极形状、电极尺寸等因素有关。

摆脱电流的概率曲线如图1-4。对应于概率50%的摆脱电流成年男子约为16毫安，成年女子约为10.5毫安；对应于摆脱概率99.5%的则分别为9毫安和6毫安。由此可见，摆脱阈值约为10毫安。儿童的摆脱阈值较小。

摆脱电流是人体可以忍受而一般不致造成不良后果的电流。电流超过摆脱电流以后，会感到异常痛苦、恐慌和难以忍受；如时间过长，则可能昏迷、窒息，甚至死亡。也有的事例表明，当电流略大于摆脱电流，触电者中枢神经麻痹、呼吸停止时，立即切断电源，即可恢复呼吸并无不良影响。

应当指出，摆脱电源的能力是随着触电时间的延长而减弱的。这就是说，一旦触电后不能摆脱电源时，后果将是严重的。

## 3. 室颤电流和室颤阈值

室颤电流指通过人体引起心室发生纤维性颤动的电流，其最小值即室颤阈值。

在较短时间内危及生命的电流称为致命电流。电击致死的原因是比较复杂的。例如，高压触电事故中，可能因电弧或很大的电流通过人体烧伤而致命；低压触电事故中，前面说过，可能因心室颤动，也可能因窒息时间过长而致命。在电流不超过数百毫安的情况下，电击致命的主要原因，是电流引起心室颤动造成的。因此，可以认为室颤电流是最小致命电