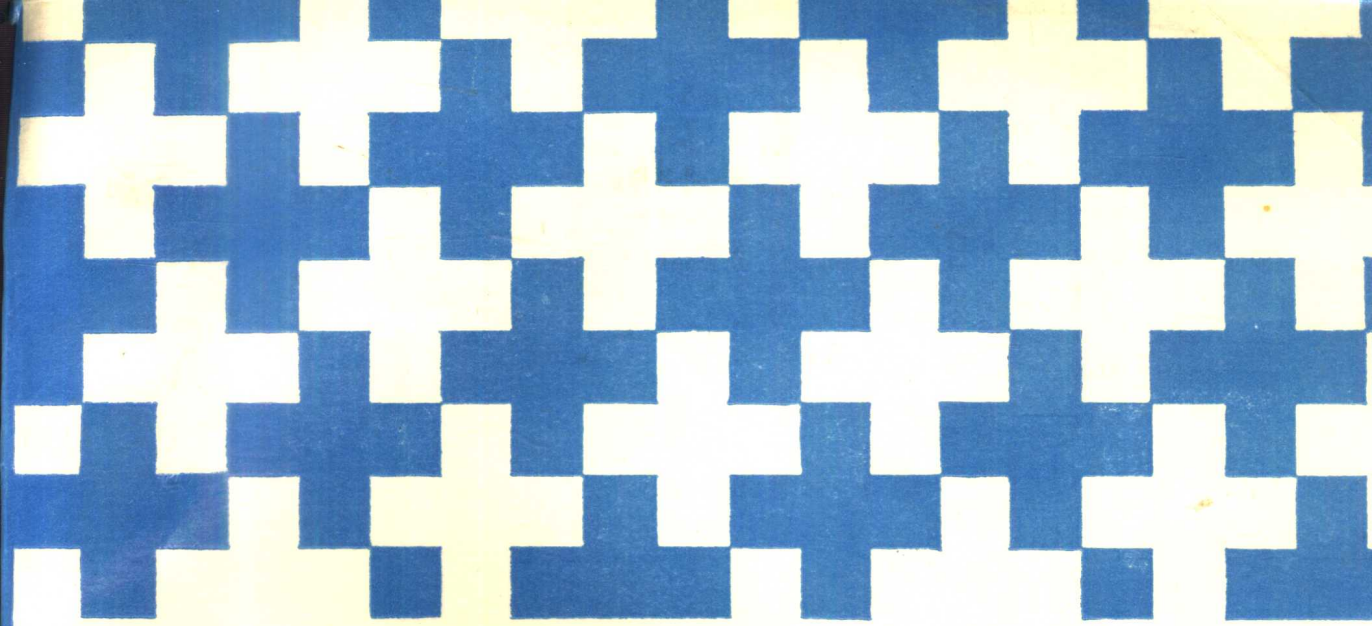




电气安全技术手册

主编 李世林

副主编 郭 汀

中国计量出版社

电气安全技术手册

主编 李世林 副主编 郭 汀

中国计量出版社

前 言

电能的开发和应用引起了人类生产和生活的巨大变革,促进了社会进步和文明。同时,由于对电能的危害认识不足,防护措施不利,也给人类带来了程度不同的危害。因此,研究电能对人可能造成的危害因素及其防护措施,已成为文明社会的重要任务之一。

以法规的形式规范人类的生产和生活,实现电能开发和应用中的安全,即实现电气安全,是国际和国外技术先进国家的总趋势。国际和国内外权威机构和组织发布的电气安全标准,就是保证人类生产和生活中实现电气安全的法规。

电气安全标准是有关电能危害机理、防护措施、安全防护器具的综合技术和管理的法规性文件。人们对电能的开发应用;对电气装置和设备的设计、生产、安装、操作、维护;一切有关电气安全技术书籍、著作均应以这些法规化文件为依据。

国际电工委员会(英文缩写 IEC)是一个在电工电子领域从事标准化工作的国际组织。它的宗旨是促进电气工业标准的国际统一,促进电气工程领域中标准化及有关方面的国际合作及国际间的相互了解。它的成员国包括了世界绝大多数的技术先进国家及部分发展中国家,拥有世界人口的 80%,生产和消耗的电能占世界的 95%,制造和使用的电气产品占世界产量的 90%,在世界电气工业领域,具有绝对的影响力。在各国的电气标准中,有 70%~80%是以 IEC 标准为基础制定的。IEC 与关贸总协定(GATT)、国际电信联盟(ITU)、国际无线电咨询委员会(CCIR)、国际法制计量组织(OILM)、国际大电网会议(CIGRE)、国际照明委员会(CIE)、欧洲电工标准委员会(CENELEC)等 200 多个与电气工业领域有关的国际和区域性组织保持密切联系,使 IEC 的标准制订工作及其标准内容与这些组织有着良好的协调和配合。

安全咨询委员会(英文缩写为 ACOS)是 IEC 下设的机构,组织和协调不同层次的 IEC 安全标准的制订工作和技术内容,是这个委员会的主要任务之一。

我国有计划地系统地开展电气安全标准化工作,始于 1982 年,至今已发布了一批安全标准和设计规范。然而这些标准都是单个的、分散的,而且大多只是回答了应该怎样做,而没有回答为什么要这样做,这对广大的电气安全技术工作者和管理人员不能不说是一个遗憾。本书根据国际和国内外已发布的电气安全标准,系统地介绍了电气安全的基本知识和规定,特别注意介绍了 IEC/ACOS 推荐的所有基础安全标准技术内容,这在国内尚属首次。其内容反映了国际和国内外先进电气安全标准和规范的最新水平。它的出版有利于广大电气安全技术和管理人员系统了解电气安全基本知识和防护技术;有利于我国在电气安全技术方面与国际接轨;有利于我国复关后,参与国际竞争,消除技术壁垒。

按标准的层次,电气安全标准可划分为基础安全、专业安全和产品安全三大类;按标准的内容可分为基础安全标准,电气设备和装置安全标准,包括设备制造、安装、操作和维护在内的过程安全标准和安全防护器具标准四大类。但不管如何分类,基础安全标准均被视为电气安全标准中最重要的部分。因此本书将侧重研究和介绍基础安全标准的技术内容,适当兼顾其他内容。

触电、过电流、过电压和雷电、电磁场（包括射频、工频、静电）、电蚀、电热效应（包括电火灾）等是主要的几种电能危害型式。其中造成人员伤亡的主要因素是触电。鉴于人员防护第一的原则，我们在系统介绍各种危害因素防护的前提下，对触电防护的介绍给予了特别重视。

应当指出，人类对事物的认识，需要经历一个从必然王国向自由王国的过程。电气安全技术的发展同样在经历这样一个过程。因此，人们在了解和掌握本书内容的同时，只有时刻关注电气安全新标准的问世及旧标准的修订版本，才能赶上世界电气安全技术的前进步伐。

本书适用于电气设备和装置的安全设计、制造、安装、使用、维护人员，标准化工作者，安全技术和管理人员，及其他电气化工作者，也可供大专院校师生参考。

本书的第1、2、3、11、12、13、15章及第9、10、16章的部分由李世林高级工程师编著；第4、5、6、8、19、20章及10.5节、16.2节的一部分由郭汀高级工程师编著；第18章由滕松林教授编著；第14和17章由朱德基高级工程师编著；第7章由郭洁讲师编著；第9章助工陈清参加了编著。

鉴于技术水平和编写经验的限制，本书的缺点错误在所难免，欢迎批评指正。

编者

目 录

第 1 章 人体通过电流的效应	(1)
第 1 节 人体阻抗.....	(1)
第 2 节 15~100Hz 交流电流效应.....	(4)
第 3 节 直流电流效应.....	(7)
第 4 节 100Hz 以上交流电流效应.....	(9)
第 5 节 短持续时间单向单脉冲电流效应.....	(10)
第 2 章 配电系统型式	(15)
第 3 章 绝缘配合	(18)
第 1 节 概述.....	(18)
第 2 节 低电压系统的绝缘配合.....	(19)
第 3 节 高压输变电设备的绝缘配合.....	(32)
第 4 章 外壳防护等级 (IP 代码)	(39)
第 1 节 目的及适用范围.....	(39)
第 2 节 IP 代码的组成及含义.....	(40)
第 3 节 标志方法.....	(43)
第 4 节 第一位特征数字.....	(43)
第 5 节 第二位特征数字.....	(45)
第 6 节 附加字母.....	(46)
第 7 节 补充字母.....	(51)
第 8 节 试验一般要求.....	(51)
第 9 节 第一位特征数字所代表的对接触危险部件 防护的试验.....	(53)
第 10 节 第一位特征数字所代表的防止固体异物 进入的试验.....	(55)
第 11 节 第二位特征数字所代表的防止水进入的试验.....	(56)
第 12 节 附加字母所代表的对接触危险部件防护的试验.....	(61)
第 13 节 CEE 系统和 IP 代码的对照.....	(61)
第 5 章 电工电子设备防触电保护分类	(67)
第 1 节 防触电保护的分类.....	(67)
第 2 节 适用范围.....	(68)
第 3 节 “OI 类”设备.....	(68)

第4节 其他说明	(69)
第6章 电气设备用双重绝缘	(71)
第1节 适用范围	(71)
第2节 术语	(71)
第3节 双重绝缘的结构要求	(72)
第4节 加强绝缘代替双重绝缘的条件	(73)
第5节 对双重绝缘的设备要求	(74)
第6节 对双重绝缘的设备检测	(76)
第7节 标志	(81)
第7章 绝缘材料的性能和测试方法	(82)
第1节 概述	(82)
第2节 绝缘电阻率	(82)
第3节 介电常数 ϵ	(86)
第4节 介质损耗角正切 (介质损耗因数) $\tan\delta$	(88)
第5节 介质的击穿和绝缘强度	(92)
第6节 绝缘材料的老化	(95)
第7节 固体绝缘材料在潮湿条件下相比漏电起痕 指数和耐漏电起痕指数的测定方法	(99)
第8节 评定在严酷环境条件下使用的电气绝缘材料耐漏电起 痕性和耐电蚀损的试验方法	(103)
第8章 电工电子产品着火危险试验	(108)
第1节 塑料水平燃烧法	(108)
第2节 塑料垂直燃烧法	(109)
第3节 塑料灼热棒试验方法	(111)
第4节 塑料氧指数试验方法	(112)
第5节 试验方法及严酷等级的选择	(114)
第6节 电子元件着火危险试验和评定规范的制定导则	(115)
第7节 灼热丝试验方法	(117)
第8节 针焰试验方法	(120)
第9节 用发热器的不良接触试验方法	(122)
第10节 本生灯型火焰试验方法	(126)
第9章 电气产品应用环境条件	(129)
第1节 概述	(129)
第2节 贮存条件	(133)
第3节 运输条件	(139)
第4节 有气候防护场所固定使用条件	(142)
第5节 无气候防护场所固定使用条件	(149)
第6节 地面车载条件	(155)
第7节 船用条件	(161)

第 8 节 携带和非固定使用条件	(166)
第 10 章 触电防护	(172)
第 1 节 正常工作条件下的触电防护	(173)
第 2 节 自动切断供电的防护	(186)
第 3 节 故障条件下的其他触电防护	(216)
第 4 节 直接接触及间接接触两者兼有的防护	(221)
第 5 节 触电防护措施的应用	(224)
第 6 节 触电急救	(225)
第 11 章 过电流和故障电流防护	(230)
第 1 节 过电流和故障电流防护的基本要求	(230)
第 2 节 过载自动切断防护	(231)
第 3 节 短路自动切断防护	(233)
第 4 节 过电流防护的其他要求	(235)
第 12 章 电热效应防护	(236)
第 1 节 灼伤防护和过热防护	(236)
第 2 节 电气火灾防护	(237)
第 13 章 雷电防护	(245)
第 1 节 建筑设施的雷电危害型式、防雷分类及年计算 雷击次数的经验公式	(245)
第 2 节 防雷措施及防雷装置	(246)
第 3 节 避雷针和避雷线保护范围的确定	(249)
第 14 章 静电及电磁场的危害与防护	(254)
第 1 节 静电的危害与防护	(254)
第 2 节 电磁场的危害与防护	(264)
第 15 章 电缆载流量的选择	(271)
第 1 节 电缆持续允许交流载流量的计算 (100% 负载率)	(271)
第 2 节 矿用橡套软电缆在空气中敷设时的允许载流量	(272)
第 3 节 断续和短时负载下的绝缘电缆允许载流量	(273)
第 4 节 活动式设备用卷绕电缆载流量	(275)
第 5 节 建筑设施内的电缆持续载流量	(281)
第 16 章 电气设备安全设计	(310)
第 1 节 起草安全标准的导则	(310)
第 2 节 电气设备安全设计导则	(312)
第 3 节 家用和类似用途电器的安全	(334)
第 4 节 手持式电动工具的安全	(361)
第 5 节 爆炸性环境用防爆电气设备 (GB 3836)	(361)
第 17 章 隔离变压器和安全隔离变压器	(373)
第 1 节 基本术语	(373)
第 2 节 对产品的技术要求	(374)

第3节	有关试验的一般规定	(394)
第18章	保护电器	(396)
第1节	低压熔断器	(396)
第2节	低压断路器	(416)
第3节	漏电保护器	(435)
第19章	电气安全符号、颜色标记	(479)
第1节	符号和标记	(479)
第2节	颜色标记	(483)
第3节	控制设备运行的操作件运动方向	(488)
第4节	用颜色和辅助方法标记指示器和操作件	(489)
第20章	电工产品的安全认证	(497)
第1节	IECEE	(497)
第2节	CB体系	(498)
第3节	发达国家电气设备的认证	(501)
第4节	一些国家电气设备的认证标志	(504)
第5节	中国电工产品认证委员会	(505)

第 1 章 人体通过电流的效应

人体通过电流所产生的病理生理效应是研究触电防护技术、制订安全防护标准、设计电极可能触及人体的电气设备、特别是医用电气设备的基本依据之一。国内外科学技术人员对此进行了长期的大量的实验研究工作，取得了成果。IEC 479《人体通过电流的效应》是众多研究成果中具有代表性和权威性的成果，这项成果取得了世界所有技术先进国家的赞同。目前我国已经和正在采用这项标准。

人体触及了带电体能否造成伤害主要取决于通过人体的电流特性（波形、频率、持续时间等）、流过人体的路径及人体对电流呈现的阻抗特性。

应当指出，在制订触电防护等电气安全措施时还必须考虑：

- 产生故障的概率；
- 接触带电部分和故障部分的概率；
- 环境应用条件；
- 人员素质；
- 技术上的可行性及经济技术的协调等。

本章给出的数据是保守的，以致对包括儿童在内的所有正常生理条件下的人（不计年龄和体重）都是适用的。

IEC 479 第一版于 1974 年发布。在新的研究成果基础上，1984 年发布了第二版第一篇，包括以下三章：人体阻抗；15~100Hz 交流电流效应；直流电流效应。新版对生命机体通过电流所产生的效应有了进一步的了解。特别是对电流引起的心室纤维颤动（以下称心室纤颤）界限的确定，使得人们能在对心脏生理与纤颤阈值新的研究成果基础上，更准确的估计主要物理参数，特别是电流持续时间对心室纤颤的影响。电流引起的心室纤颤是导致死亡的主要原因。人们可以利用 IEC 479 的新成果更科学地制订触电防护措施。

IEC 479 第二版第二篇发布于 1987 年。它反映了人体通过特殊电流所产生的效应，包括：100Hz 以上交流的电流效应；特殊波形电流的效应；短持续时间单向单脉冲电流的效应。

还应指出，对人体通过电流的效应的认识，直至目前还很不充分。研究工作仍在继续和深化，修订草案在相继提出。人们的认识将在不断的认识和实践接近实际。

第 1 节 人 体 阻 抗

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。然而本章后面各节给出的人体电流——持续时间分区图在防触电保护设计中，由于已知量往往是预期接触电压而不能直接使用。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—1 所示。图中 Z_i 为人体内阻抗，它是两个电极所接触的人体两部分在拔除电极下的皮肤后其间的阻抗。

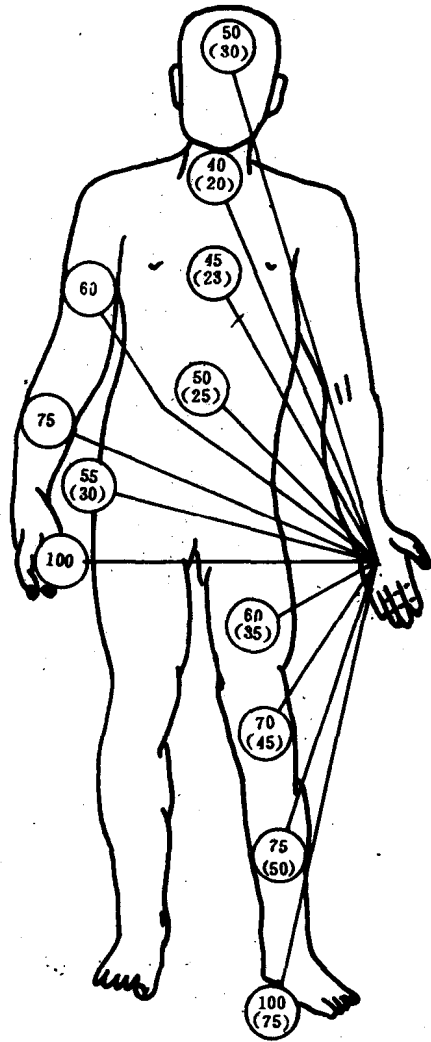


图 1—2 用与手到手内阻抗比值百分数表示的人体内阻抗

人体内阻抗基本上可看作电阻。测定表明，还存在少量电容分量，在图中用虚线示出。阻抗值主要取决于电流通过的路径，

表面接触面积对其影响较小。但当接触面积过小，例如只有几平方毫米，则内阻抗将会增大。

图 1—2 示出了不同路径的人体内阻抗值，它是用与手到手内阻抗比值百分数表示的。图中无括号的数值是按手到所示部分的电流路径测得的；括号内数值是按两只手到图中相应部分的电流路径测得的。应当注意，从一只手到两只脚的内阻抗值与手到手内阻抗值的比值的百分数为 75%；两只手到两只脚为 50%。图 1—2 中的百分数值对人体总阻抗值也是适用的。

当手到手的内阻抗已给定或测得后，利用图 1—2 可计算出手到各部分之间的阻抗值。例如已知手到手内阻抗为 700Ω ，则一只手和两只手到头部的阻抗分别为手到手内阻抗的 50% 和 30%，即分别为 350Ω 和 210Ω 。

图 1—1 中 Z_{P1} 和 Z_{P2} 为人体皮肤阻抗，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。

皮肤阻抗的数值取决于电压、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。

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

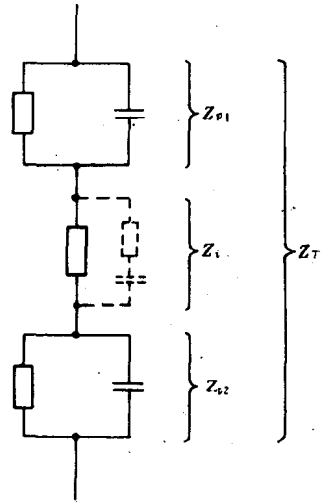


图 1—1 人体阻抗电路

响而有显著变化；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_T

人体总阻抗是人体内阻抗与皮肤阻抗的矢量和（见图 1-1），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_i 。由于皮肤阻抗特性的影响，总阻抗 Z_T 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。

表 1-1 和图 1-3、图 1-4 给出了适用范围较广的、在 50~60Hz 频率下的人体总阻抗数据。这些数据的测量条件为：干燥的环境条件；较大的接触面积（50~100cm²）；手到手和手到脚的电流路径等。

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。

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。

表 1-1 和图 1-3、图 1-4 展示的数据是对成年男女进行测定的统计数值，共分三组：

5%数据组（或曲线）表示在所有统计数值中有 5%的数值小于这个电抗值；

50%数据组（或曲线）表示各有一半数值大于或小于这个电抗值；

95%数据组（或曲线）表示有 5%的数值大于这个电抗值。

表 1-1 人体总阻抗值 Z_T

接触电压 V	人体总阻抗值 Ω (按百分分布的百分数中不超过的阻抗值给出)		
	5%	50%	95%
25	1 750	3 250	6 100
50	1 450	2 625	4 375
75	1 250	2 200	3 500
100	1 200	1 875	3 200
125	1 125	1 625	2 875
220	1 000	1 350	2 125
700	750	1 100	1 550
1 000	700	1 050	1 500
渐近值	650	750	850

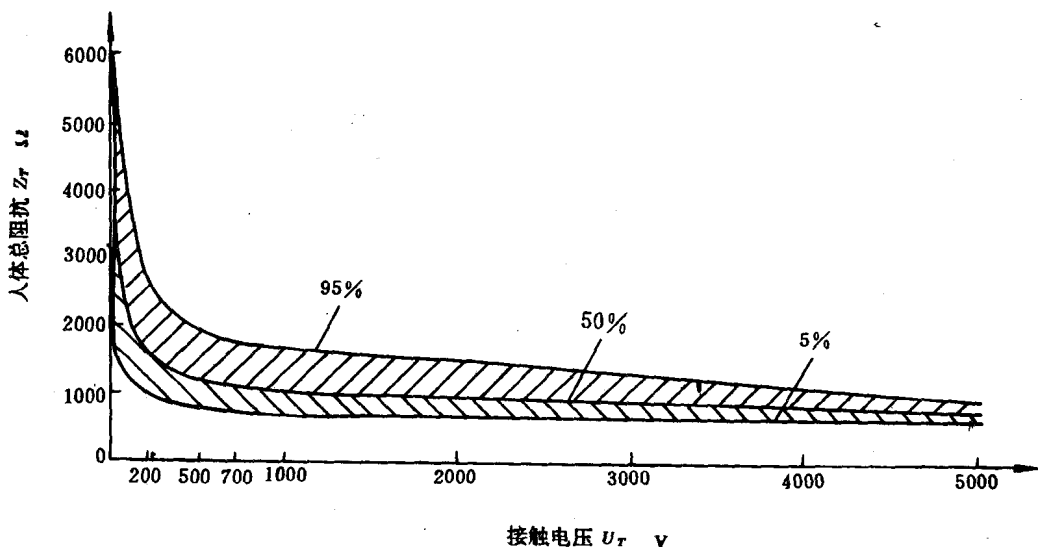


图 1—3 接触电压 5 000V 以内的人体总阻抗统计值

3. 人体初始电阻 R_i

这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_i 。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 。

第 2 节 15~100Hz 交流 电流效应

如前所述，流过人体的电流路径已经确定，则电流流过人体的效应通常主要取决于电流幅值和持续时间。图 1—5 给出了流过人体电流幅值——作用时间的效应分区图。图中关于发生心室纤维颤动的数据是按从人体左手到双脚的电流路径绘制的。当电流为 500mA，时间为 100ms 时，心室纤维颤动的概率为 0.14%。

图中第①效应区是依据人对电流的感觉阈值，即人身所能觉察的流过人体的最小电流值

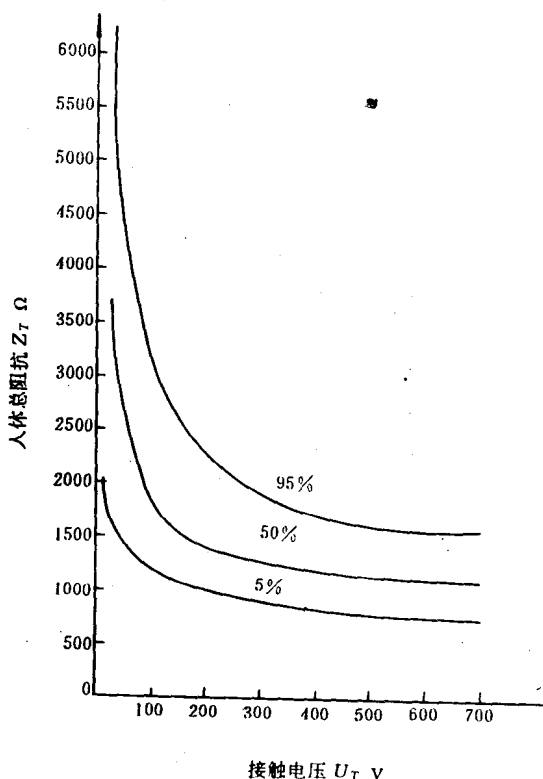


图 1—4 接触电压 700V 以内的人体总阻抗统计值

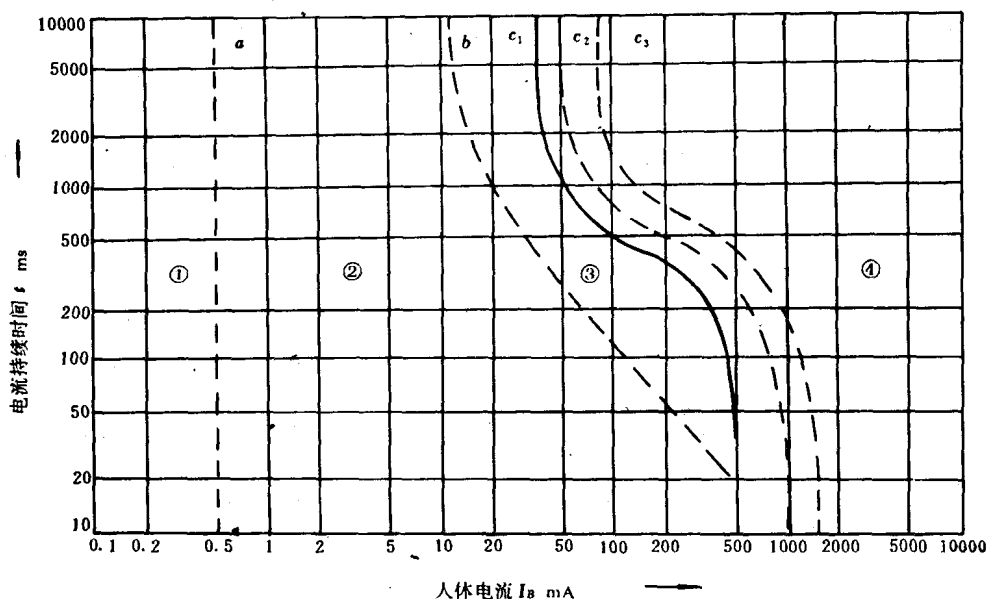


图 1—5 15~100Hz 交流电流流过人体时的电流——时间效应分区

确定的。这个感觉阈值取决于人体与电极的接触面积，接触状态（干燥、潮湿、压力、温度等），人的各自生理特性等。图中 a 线即为人的一般感觉阈值线，等于 0.5mA。该阈值与通电时间无关。a 线左部为第①效应区，该区对人通常没有任何病理生理反应。

第②效应区在 a 线和 b 线之间。曲线 b 可以用式 (1—1) 描述：

$$I = I_1 + \frac{10}{t} \quad (1-1)$$

式中：I——电流的方均根值，mA；

I_1 ——摆脱电流阈值的方均根值，mA；

t——电流持续时间，s。

摆脱电流阈值是人体能够摆脱握在手中的电极的最大电流值，又称安全电流。它取决于接触面积，电极形状和大小，人的各自生理特性等，约等于 10mA。

第②效应区通常无有害的病理生理反应。

第③效应区在 b 线和 c_1 线之间。该区对人体器官一般没有损伤，但可能产生如下病理生理反应：肌肉收缩，呼吸困难，血压升高，心脏冲动形成及传导的可逆性紊乱，包括心室纤维颤动以及随着电流与持续时间的增加引起的非心室纤维颤动，进而引起的短暂心脏停跳。

第④效应区在曲线 c_1 的右部。该区除了有第③效应区的病理生理反应外，可能出现心室纤维颤动。曲线 c_1 是一条不致发生心室纤维颤动的阈值曲线。由 c_1 向右，发生心室纤维颤动的概率逐渐增大，在曲线 c_2 和 c_3 处分别达到 5% 和 50%， c_3 再向右则超过 50%。心室纤维颤动被认为是触电致死的主要原因。随着人体电流和持续时间的增加将会出现心脏停跳，呼吸停止和严重烧伤等后果。有证据说明，人体电流引起的心脏停跳和窒息可以致死；几安培电流引起的严重烧伤也可能导致死亡。

下面简单介绍心室纤维颤动致死原因。

心脏的主要任务是保持排血，维持血液循环，此功能依靠心肌有规律地、周期性地收缩来完成。从此意义上讲，心脏可视作血泵。心脏收缩的自身规律性受神经体液调节。

每一心动周期的心电图见图 1—6，其中 P 波系心房兴奋波，QRS 波群和 T 波系心室激动波及多极波。临床实践表明，机体之外的刺激，例如物理的、化学的、机械的、电能的刺激都可能激起心肌的兴奋。IEC 479 中表明，在一个心动周期内有一个约占心动周期 10% 至 20% 的心室肌易损期，它对应于心电图 T 波顶峰部分（见图 1—6）。在易损期内，心肌纤维的兴奋传导很不均匀，如果受到足够大的电流刺激，就可使各部分的心室肌自行蠕动起来。图 1—7 示出了心室纤颤对心电图和血压的影响。由图看出，电流刺激激发心室肌蠕动的波形及幅值各异，极不均匀，频率可达 250~500 次/min，致使心室肌失去协调一致的收缩能力，心脏泵血功能丧失，血压降至零，血液循环停止，导至死亡。

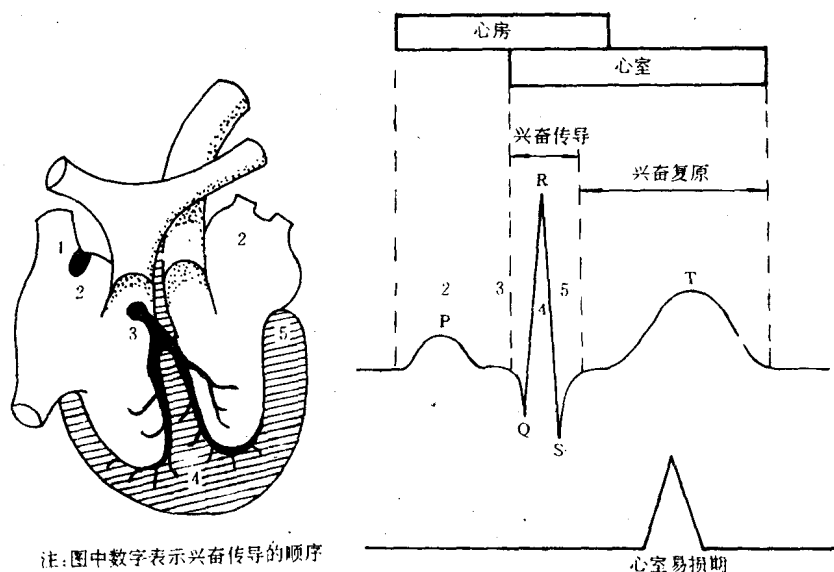


图 1—6 心动周期内心室易损期出现的时刻

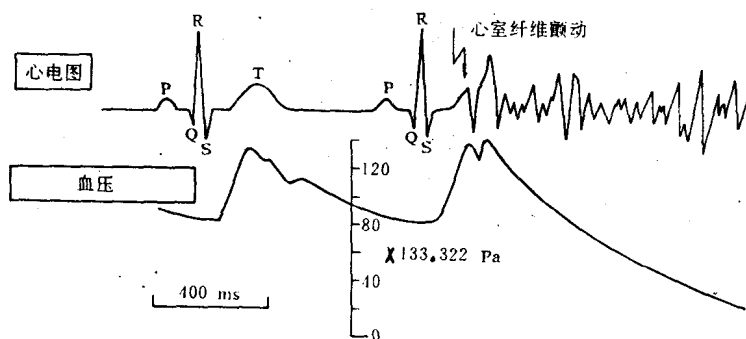


图 1—7 在易损期内心室纤维颤动的激发对心电图和血压的影响

图 1—5 中发生心室纤维颤动的效应区仅适用于电流从左手到双脚流过的情况，其他电流路径引起的心室纤维颤动效应则应采用心电流系数进行换算。

心电流系数系电流流过某一路径的心电场强度与从左手到双脚流过相同电流的心电场强度的比值。

在心脏内，电流密度与电场强度成正比，因此，心电流系数可以用相应的电流密度比值来表示，即：

$$I_n = \frac{I_{ref}}{F} \quad (1-2)$$

式中： I_{ref} ——图 1—5 中所示的从左手到双脚路径流过的人体电流值；

I_n ——通过其他路径流过人体产生与 I_{ref} 等效应的电流值；

F ——心电流系数。

IEC 479 给出了若干人体电流路径的心电流系数见表 1—2。

心电流系数可以用于估计通过其他路径的人体电流所产生的心室纤维颤动的危险程度。例如手到手电流路径的 $F=0.4$ ，按式 (1—2) 计算，200mA 电流产生的心室纤维颤动效应与左手到双脚流过的 80mA 电流所产生的心室纤颤的危险程度是等同的。

表 1—2 若干人体电流路径的心电流系数

电 流 路 径	心电流系数
左手到左脚、右脚或双脚	1
双手到脚	1
左手到右手	0.4
右手到左脚、右脚或双脚	0.8
从背到右手	0.3
从背到左手	0.7
从胸到右手	1.3
从胸到左手	1.5
从臀部到左手、右手或双手	0.7

图 1—5 给出的人体电流——持续时间效应分区图以及表 1—2 给出的心电流系数，为制订触电防护标准，设计和选择触及或插入人体的电气设备的电气参数提供了理论依据。

IEC 479 指出，从一些国家运行经验看，在正常环境条件下尚无确切证据说明，当供电电压不超过交流 50V（有效值）时会发生人体电流导致严重触电伤害的事故。这种运行经验是将第 I 电压区段（超低电压区段）的上限电压值约定在 50V（有效值）的依据之一。后面还将进一步推算将第 I 电压区段上限电压约定在 50V 的安全可行性。

第 3 节 直流电流效应

严格地讲，直流电流是指没有脉动的电流。本节所述的直流电流中含有波峰与波峰间不超过 15% 的脉动成分。

研究表明，直流电流对人体的兴奋作用（刺激神经和肌肉，引起心房和心室纤维颤动），在直流的接通和断开时，即在电流发生变化的时间内是较大的，而当电流幅度不变时产生与交流电流相同的兴奋作用，其电流幅值要比交流有效值大2至4倍。

IEC 479 给出的流过人体的直流电流——持续时间效应分区图见图1—8。

对直流电流而言，以脚为正极向上流经人体的电流的效应，与以脚为负极向下流经人体的电流的效应有时存在很大差异。

图1—8中第①效应区通常无生理反应；

第②效应区无有害的生理病理反应；

第③效应区不会出现器官损害，随着人体电流和持续时间的增加可能出现心脏冲动和传导的可逆性紊乱；

第④效应区可能出现心室纤维颤动，随着人体电流和持续时间的增加除了产生③区的反应外，预计会产生严重烧伤等其他病理生理反应。

感觉阈值 直流感觉阈值取决于以下参数：接触面积，接触状态（干燥、潮湿、压力、温度），电流持续时间，各自的生理特征。与交流电流不同，流过人体的直流感觉阈值只有在接通和断开时才有感觉。图1—4中的 a 线为感觉阈值线，是第①和②效应区的分区线。

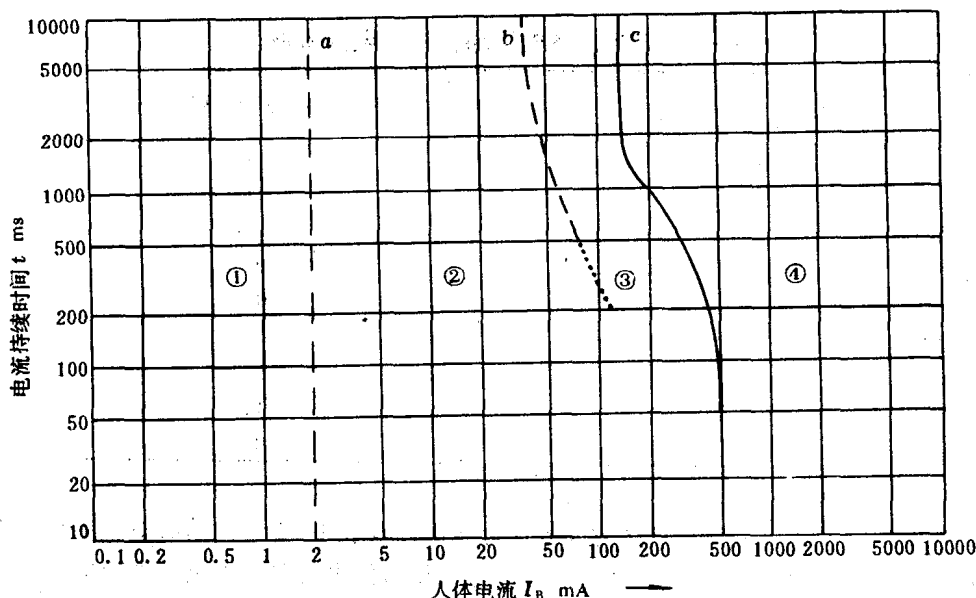


图1—8 流过人体的直流电流——持续时间效应分区图

摆脱阈值 b 线可视为直流摆脱阈值线，是第②和③效应区的分区线。实际上，当持续时间小于500ms时，第②和③效应区的分区线尚不清楚。与交流效应不同，300mA以内的直流电流没有确定的摆脱阈值，只是接通和断电的瞬间引起疼痛感和痉挛似肌肉收缩；大于300mA时可能摆脱不了，或者在触电几秒至几分钟后有可能摆脱。

心室纤维颤动阈值 曲线 c 是一条在直流电流作用下不致发生心室纤维颤动的曲线，是第③和④效应区的分区线。与交流电流一样，直流电流产生的心室纤维颤动阈值也取决于人体的生理和电气参数。图1—8中第④区有关发生心室纤维颤动的数值是按从左手至双脚的

人体电流路径，且为向上的电流效应给出的。动物实验和电气事故资料分析结果表明，向下电流引起的心室纤维颤动阈值是向上电流阈值的 2 倍，因此，当考虑向下电流效应时，从图 1—4 取得的心室纤维颤动阈值电流应乘以系数 2。从手到手流过的横向电流不会引起心室纤维颤动。

人体通过直流电流还会出现如下效应：当 300mA 的直流电流通过人体时，四肢有暖热感觉；300mA 及以下的横向电流通过人体持续几分钟时，随着时间和电流的增长可能产生可逆性心律不齐、电流伤疤、烧伤、眩晕，有时失去知觉；超过 300mA 的横向电流通过人体时，则经常出现失去知觉的反应。

第 4 节 100Hz 以上交流电流效应

某些电气设备和设施的供电频率是高于 50/60Hz 的，例如飞机为 400Hz、电动工具及电焊机大多数达到 450Hz、电疗设备大多数为 4 000~5 000Hz、开关电源则为 20kHz~1MHz。

如前所述，人体皮肤阻抗与频率成反比的降低。在接触电压为几十伏数量级内变化较显著。当频率为 500Hz 时，皮肤阻抗仅为 50Hz 时的十分之一，有时可以忽略不计。频率更高时更是如此。因此，在这些频率下，人体阻抗可认为已降为等于它的内阻抗 Z_i 。

人体通过 100Hz 以上交流电流出现的生理效应可以用频率系数 F_f 来估算。所谓频率系数 F_f 系指频率为 f 时出现的相应生理效应所对应的阈值电流，与 50/60Hz 时的阈值电流的比值。

对于感觉、摆脱及心室纤维颤阈值，其频率系数是不同的。

图 1—9 至图 1—11 分别给出了 100Hz 以

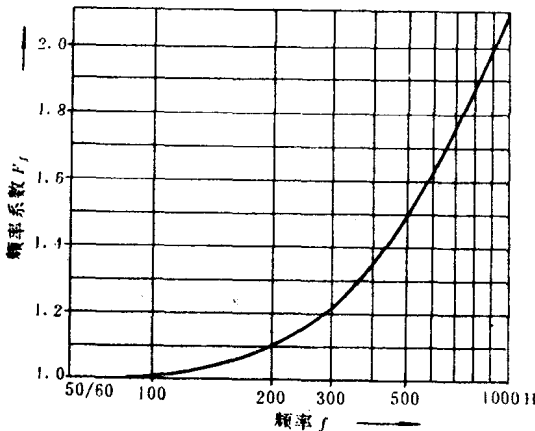


图 1—9 50/60Hz~1 000Hz 频率范围内感觉阈值的变化

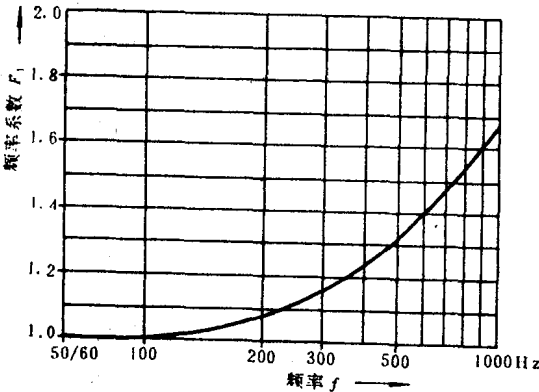


图 1—10 50/60Hz~1 000Hz 频率范围内摆脱阈值的变化

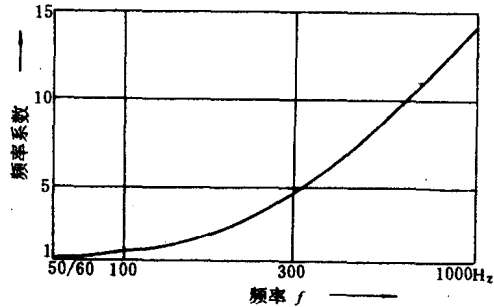


图 1—11 50/60Hz~1 000Hz 频率范围内心室纤维性颤动阈值的变化，电击持续时间长于一个心动周期并以纵向电流路经通过人体躯干