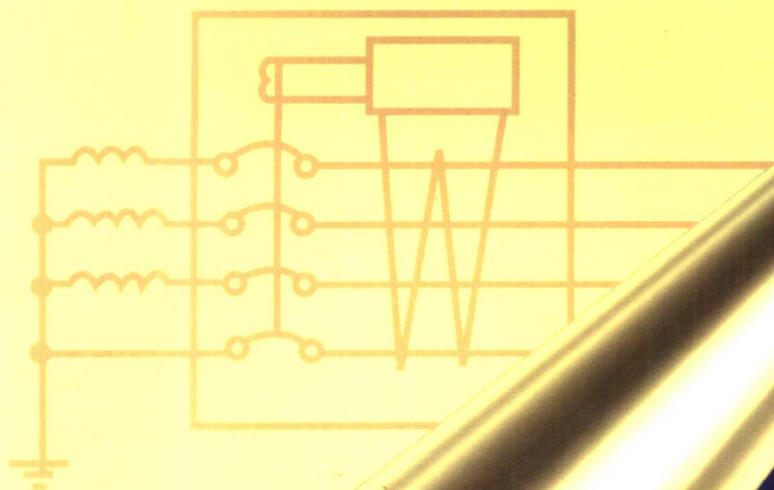


电气装置和电气设备的 电击防护技术

主编 李世林 副主编 郭汀



中国标准出版社



电气装置和电气设备的 电 击 防 护 技 术

主 编 李世林

副主编 郭 汀

中国标准出版社

内容简介

电气安全是电气装置和电气设备的重要性能之一,电击防护由于其直接涉及人身安全,而成为电气安全最重要的内容。

本书以现有电击防护方面的国家标准和相应的国际标准为依据,系统地介绍了电击防护的基本知识、技术内容和标准体系,其中大部分技术内容实现了与国际安全技术的接轨。

本书是关于电击防护及其标准的比较全面、系统的技术总论,适用于电气装置和设备的设计、生产、安装、使用、维护人员,安全管理人员及有关标准化工作者。

图书在版编目(CIP)数据

电气装置和电气设备的电击防护技术/李世林主编. --
北京:中国标准出版社,1998
ISBN 7-5066-1667-X

I. 电… II. 李… III. 电气设备-过电压保护-技术 IV
. TM86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 12181 号

中国标准出版社出版
北京复兴门外三里河北街 16 号

邮政编码:100045

电 话:68522112

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

版权专有 不得翻印

*

开本 787×1092 1/16 印张 13½ 字数 316 千字

1999 年 3 月第一版 1999 年 3 月第一次印刷

*

印数 1—2 500 定价 33.00 元

*

标 目 350—13

序 言

电击又称触电,是指电流通过人体使其产生病理、生理效应。电击可能导致人员感觉极端不适,灼伤,甚至死亡。有些效应尽管不会造成人员器质性损伤,甚至仅被人所感知,但在某些特定工作条件下,这类效应却会造成严重的二次伤亡事故。

一个国家对电气安全防护技术的研究,特别是对直接涉及人身安全的电击防护措施的法规、规范和标准的制定,是反映这个国家文明程度的标志之一。

随着电能应用的不断拓展,以电能为动力的各种电气设备、电气装置广泛进入了工作场所、社会和家庭生活中;与此同时,由于电气装置和电气设备的设计、生产、安装、使用、维修等方面的不安全因素所造成的触电事故也不断发生。因此学习和掌握电气装置和电气设备的电击防护技术基础,并在装置和设备的设计、生产、安装、使用等各个环节应用这些技术措施,以减少甚至避免触电事故的发生,已成为电气工程技术人員、操作人员以及安全管理人员迫切的任务和责任。

以法规的形式规范人类的生产和生活,在电能的开发和应用中规范电气安全,是国际和国外技术先进国家的总趋势。国际和国外权威机构与组织发布的电气安全标准和出版物,就是保证人类生产和生活中实现电气安全的法规。

国际电工委员会(IEC)是国际两大标准化组织之一,主要从事电工电子领域内的国际标准化工作,目前有85个技术委员会(TC)。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,这些成员国拥有世界人口的80%,生产和消耗的电能见占全世界的95%,制造和使用的电气产品占世界总产量的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(CEN-ELEC)等200多个与电气工业领域有关的国际和区域性组织保持着密切

联系,使 IEC 的标准制定工作及其标准内容与这些组织有着良好的协调和配合。我国于 1957 年参加 IEC,1980 年被选入执行委员会,是 IEC 主要成员国(P 成员)。

IEC 下设一个安全顾问委员会(英文缩写 ACOS),组织和协调不同层次的 IEC 安全标准的制修订工作和技术内容是 ACOS 的主要任务之一。为了指导安全标准的起草工作,ACOS 负责组织起草了 IEC 导则 104,该导则为制定电气设备的安全标准及专业产品标准中的安全条款开列了一个电气安全基础标准清单。这些清单所开列的标准被大多数技术先进国家和发展中国家所赞同和采用。

近十几年来,国际和技术先进国家对电击防护技术和措施的研究给予了特别的重视,国际电工委员会在 90 年代相继制修订了一批与电击防护有关的和相关的标准、技术报告等出版物。这些出版物大都被列入 IEC 导则 104。

在我国,由于《中华人民共和国标准化法》、《采用国际标准和国外先进标准管理办法》及一系列采标法规的发布和实施,加快了我国采用国际标准和国外先进标准的速度,对有关和相关的电击防护标准和出版物已基本达到了同步采用的程度。这种局面对提高我国电气装置和电气设备的安全水平,加强我国电气产品和工程设计的国际竞争力,实现电气安全技术与国际接轨,无疑是十分有利的。

然而,上述与电击防护有关的和相关的出版物都是独立发布出版的,而这些出版物在实际上是相互关联、相互依存的,这些标准共同构成了电气装置和电气设备电击防护基础标准体系。本书就是依据这些标准和出版物编著的,其目的在于将各个独立发布出版的标准中的内容有机地联系组合起来,使读者对基本电击防护技术有一个较系统、较全面的了解;同时试图对某些标准的内容加以分析。

为系统地理解本书内容,首先应了解下述术语的含义:

电气设备 系指用于发电、变电、输电、配电或用电的任何产品,例如电机、变压器、仪表、测量仪器、保护电器、布线系统设备和用电器具等。

电气装置 系指为实现一个或若干特定目的且具有互相协调特性的电气设备组合。

“电气设备”实际包揽了从发电到用电的整个电力系统的全部电气产品。“电气装置”则是一些电气设备为实现一个或若干特定目的和功能的组合,组合后的实体或系统,其内部电气设备的特性需按电气装置的技术要求相互加以协调。以一个建筑物电气装置为例,从电力供电网在这个建筑物电气装置的入口处开始,该电气装置包含了各类变压器、开关、保护和控制电

器、仪器仪表、电力驱动设备、输配电线路、照明系统、电梯、空调系统、计算机应用和管理系统等等。这些设备对电压电流类型、频率、量值大小及稳定性,供电系统接地型式,设备安装条件和防护要求,各设备之间的相互关系等都有一定的要求。设备的这些要求和特性都应在电气装置的总体设计中加以协调。从另一角度看,这些特性已经协调的电气设备组合,构成了一个建筑物的电气装置。

一台完整的电气设备应具有一定的电击防护等级(按电击防护分为0、I、II、III类);同时,一些电气设备的电击防护特性只有通过与其所并入的电气装置的电击防护措施相配合才能实现。就以上意义而言,给出电气装置和电气设备的概念,并制订各自的和相互配合的电击防护措施是有益的。

按事故原因触电可划分为两类:一类是在设备正常运行条件下,人体直接接触及了带电部分,称为直接接触;另一类是在故障条件下(例如绝缘失效,系统接地断开等),人体可触及的正常状态下不带电的设备外露可导电部分或设备以外的可导电部分,变成了带电部分,称为间接接触。对这两种触电(接触)的防护,分别称为直接接触防护和间接接触防护。

直接接触防护又称正常工作条件下的电击防护或基本防护。

间接接触防护又称故障条件下的电击防护或附加防护。

在正常或故障条件下,带电部分对人并不一定构成危险,因而不一定对人都要进行防护。然而对人或牲畜可能造成危害的接触必须加以防护。不管对人或牲畜是否构成危险,故障都应尽快排除。

所有电气装置都必须具备防止电击危害的直接接触防护和间接接触防护措施。电气设备本身如不具备间接接触防护功能,则应在设备安装时,由所并入的电气装置配置必要的间接接触防护措施。这是电气设备和电气装置安全设计的基本原则之一。

IEC有关电气装置和电气设备电击防护的现行基础标准和技术报告有如下4项,截止到1996年底,我国已采用完毕。

IEC 364-4-41(1992) 建筑物电气装置 电击防护[等效采用为
GB 14821.1—93]

IEC 536(1976) 电工电子设备按电击防护分类[参照采用为
GB/T 12501—90]

IEC 536-2(1992) 电工电子设备按电击防护分类 第2部分 对电
击防护要求的导则[等同采用为 GB/T 12501.2—
1997]

IEC 1140(1992) 电击防护 装置和电气设备的通用部分[等同采用
为 GB/T 17045—1997]

上述4项出版物构成了电气装置和电气设备电击防护技术的基础,介绍、分析、解释这些出版物规定的防护措施,是本书的主要宗旨,由本书第二篇和第三篇完成。

IEC 479《电流通过人体的效应》、IEC 1201《特低电压(ELV)限值》、IEC 449《建筑物电气装置的电压区段》、IEC 664-1《低压系统的绝缘配合基本原理和要求》、IEC 529《外壳防护等级(IP代码)》等出版物,是制定电击防护措施的理论和技术基础。例如作为技术报告出版的IEC 479,通过大量的试验研究,指出了电流流过人体产生的病理生理反应,回答了电击致伤、致死的原因,成为制订电击防护措施的理论基础。这部分内容被汇集在本书的第一篇中。

本书第四篇介绍了电击防护措施中所采用的主要防护器具,同时介绍了电击防护在部分设备中的应用,以及与电击危害有关的电气设备中某些危险参数的测量方法。

本书附录按标准在书中出现的顺序,列出了本书所涉及的标准的明细,以方便查阅。

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

本书的第1、2、3、4、8、9、10、11、13、14章和附录由李世林高级工程师编著,第5、6、7、12、15和19章由郭汀高级工程师编著,第16章由赵晓英工程师编著,第17章由滕松林教授编著,第18章由朱德基高级工程师编著。

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。

李世林

1998年8月

目 录

序

第一篇 电击防护相关基础标准概述	1
第1章 电流通过人体的效应.....	2
第1节 人体电阻抗.....	2
第2节 15~100 Hz 范围内正弦交流效应	8
第3节 直流电流效应.....	12
第4节 100 Hz 以上的交流电流效应	13
第2章 电压限值.....	15
第1节 概述.....	15
第2节 各种电压限值的确定.....	16
第3章 电气装置的电压区段.....	21
第4章 配电系统的型式.....	22
第1节 带电导体系统的型式.....	22
第2节 配电系统的接地型式.....	22
第5章 低电压系统内设备绝缘配合的原理、要求和试验	26
第1节 绝缘配合的概念和基本原理.....	26
第2节 电气间隙.....	28
第3节 爬电距离.....	32
第4节 固体绝缘.....	36
第5节 试验和测量.....	36
第6章 外壳防护等级.....	43
第1节 IP 代码	43
第2节 第一位特征数字.....	45
第3节 附加字母.....	46
第4节 防止接近危险部件的 IP 代码示例	47
第5节 防止人触及危险部件的试验.....	51
第7章 标志和标识.....	54
第1节 公共信息的安全标志及应用场所.....	54
第2节 电气简图和电气设备用标志和符号.....	57
第3节 导体的颜色或数字标识.....	59

第二篇 电气装置的电击防护	61
----------------------------	----

第 8 章 直接接触防护	62
第 1 节 利用绝缘的完全防护	62
第 2 节 利用遮栏或外护物(外壳)的防护	64
第 3 节 设置阻挡物的部分防护	79
第 4 节 将带电部分置于伸臂范围之外的防护	79
第 5 节 采用剩余电流动作保护器的附加保护	80
第 6 节 安全距离	80
第 9 章 间接接触防护	86
第 1 节 自动切断供电的防护	86
第 2 节 主等电位联结和附加等电位联结	102
第 3 节 其他间接接触防护措施	106
第 10 章 ELV 和 FELV 系统的防护	112
第 1 节 ELV 防护	112
第 2 节 FELV 系统的防护	114
第 11 章 接地配置和保护导体	116
第 1 节 建筑物电气装置的接地配置和保护导体	117
第 2 节 综合通信大楼的接地系统	127
第三篇 电气设备的电击防护	133
第 12 章 电气设备按电击防护分类	134
第 1 节 电击防护分类(防触电保护分类)	134
第 2 节 使用说明	134
第 13 章 电气设备电击防护要求的导则	136
第 1 节 保护措施	136
第 2 节 各类设备电击防护导则	138
第 14 章 电气设备和装置的间接接触防护措施的配合	142
第四篇 其他相关技术	143
第 15 章 电气设备用双重绝缘的安全要求	144
第 1 节 术语	144
第 2 节 双重绝缘的结构要求	145
第 3 节 加强绝缘代替双重绝缘的条件	145
第 4 节 对双重绝缘的设备要求	147
第 5 节 对双重绝缘的设备检测	149
第 6 节 标志	154
第 16 章 接触电流和接地导体电流的测量	155
第 17 章 剩余电流动作保护器	164
第 1 节 概述	164
第 2 节 分类	165

第 3 节	工作原理及技术标准·····	166
第 4 节	漏电保护器的应用·····	174
第 18 章	隔离变压器和安全隔离变压器·····	179
第 1 节	对隔离变压器和安全隔离变压器都适用的要求·····	179
第 2 节	对隔离变压器的补充要求·····	191
第 3 节	对一般用途的安全隔离变压器的补充要求·····	192
第 19 章	检验外壳防护用的试具·····	196
附录	本书涉及的标准暨参考文献·····	203

第一篇 电击防护相关基础标准概述

IEC 479《电流通过人体的效应》、IEC 1201《特低电压(ELV)限值》、IEC 449《建筑物电气装置的电压区段》、IEC 664-1《低压系统内设备的绝缘配合 第一部分 原理、要求和试验》、IEC 529《外壳防护等级(IP 代码)》及其他相关 IEC 出版物,是制定电击防护措施的理论和技术基础。这些出版物大都被列入 IEC 导则 104 的电气安全基础标准清单。

上述出版物均被等同采用为我国国家标准,从而实现了基础安全标准与国际标准的接轨。这些标准的重要作用在于:

IEC 479(等同采用为 GB/T 13870.1 和 GB/T 13870.2)通过世界多国大量的试验研究和统计分析计算,给出了电流流过人体出现的不同病理生理效应的定性和定量描述,回答了电击致伤致死的原因,成为制定电击防护措施的理论 and 实用技术的基础。

IEC 664-1(等同采用为 GB 16935.1)规定的低压系统内设备绝缘配合设计导则,电气间隙、爬电距离和其测量方法,以及其他电气绝缘的试验方法,作为低压电气设备安全标准的重要条款被直接引用。

IEC 1201(等同采用为 GB/T 3805)规定的特低电压的各类限值,用于指导各类电气设备、电气装置或装置的一部分,去正确地选择两个可同时触及的可导电部分之间可能出现的最高电压值,而不会发生电击。

IEC 529(等同采用为 GB 4208)则适用于在各类电气设备和电气装置的外壳设计中,根据包括直接接触防护要求在内的具体要求,确定其防护等级,并规定了详细的试验验证要求。

如此等等。

本篇第 7 章根据 GB 2893—82《安全色》、GB 2894—1996《安全标志》、GB 16179—1996《安全标志使用导则》、GB/T 4728《电气简图用图形符号》、GB 7947—1997《导体的颜色或数字标识》等标准编写,介绍了与电气安全有关的标志、标识。

第 1 章 电流通过人体的效应

电流通过人体的效应是研究制定电击防护措施和安全标准的基本依据之一,国内外科研人员对此进行了长期的大量的实验研究工作,IEC 479《电流通过人体的效应》是众多研究成果中最具权威性的成果,得到了世界技术先进国家的广泛赞同。

IEC 479 现行出版物分为两部分:IEC 479-1 和 IEC 479-2,其中 IEC 479-1 分别于 1974 年、1984 年和 1994 年发布了 3 个版本;IEC 479-2 于 1987 年首次发布,目前被采用为 GB/T 13870.2—1996。国家标准 GB/T 13870.1—92 参照采用了 IEC 479-1:1984,目前正在对该标准进行修订,拟等同采用 IEC 479-1:1994 第 3 版。本章的依据是 IEC 479-1:1994、IEC 479-2:1987 和 GB/T 13870.1—92、GB/T 13870.2—1997。

应当指出,人们对电流通过人体的效应的认识,直到目前还是很不完全的。研究工作仍在继续和深化,修订草案将相继提出。人们的认识将在不断的实验、研究和对实践的总结中接近实际。但是还应指出,本章提供的数据是保守的,以至于对包括儿童(不论年龄和体重)在内的所有生理条件正常的人都是适用的。

第 1 节 人体电阻抗

电流通过人体的路径确定之后,触电的危险主要取决于电流的量值和持续时间。本章以后各节给出了表征电流通过人体效应的通电时间/人体电流分区图,然而这些分区图并不能直接用于电击防护的设计中。用以确定保护器切断时间的依据往往是预期接触电压值(即通过人体的电流与人体电阻抗的乘积)。因此了解掌握人体电阻抗值成为电气安全专业技术人员的急需。

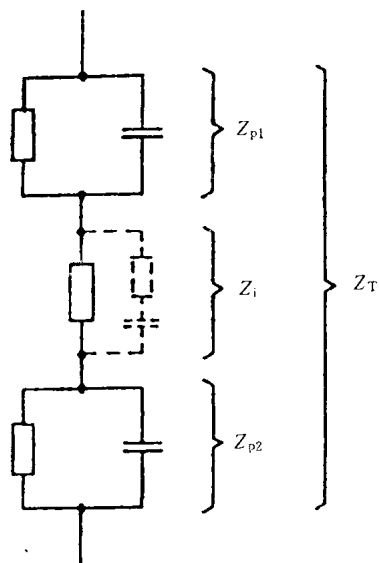
研究表明,人体阻抗即人体电流和接触电压之间呈非线性关系,且取决于实际电流通路、接触电压、通电时间、频率、皮肤潮湿度、接触表面积、压力和温度等诸多因素。有关人体阻抗的略图示于图 1-1,人体总阻抗由内阻抗和皮肤阻抗构成。

1. 人体内阻抗(Z_i)

人体内阻抗是与两个电极相接触的人体两个部分之间除去皮肤阻抗的阻抗。

测量表明人体内阻抗存在较小的容性分量(见图 1-1 的虚线),大部分可认为是阻性的,它与接触表面积关系较小。人体不同部位的内阻抗以与手到脚为通路的阻抗百分数表示,见图 1-2。

当电流通路为手到手,或一手到双脚时,阻抗主要位于四肢上,略去人体躯干的阻抗可

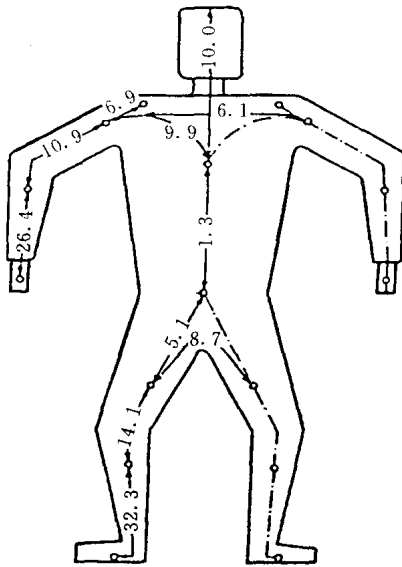


Z_i —内阻抗; Z_{p1} 、 Z_{p2} —皮肤阻抗;

Z_T —总阻抗

图 1-1 人体阻抗略图

得出图 1-3 所示的简化电路图。



注

- 1 图中的数字为人体各有关部位的人体内阻抗，以百分数表示，通路为由手至脚。
- 2 计算某一通路人体的总阻抗时，该电流通路中身体所有部分的内阻抗以及接触面积下的皮肤阻抗需一齐相加。

图 1-2 以百分数表示的人体内阻抗

2. 皮肤阻抗(Z_p)

皮肤阻抗是皮肤上的电极与皮下导电组织之间的阻抗。

皮肤阻抗可视为由半绝缘层和许多小的导体(毛孔)构成的阻容网络，见图 1-1。接触电压和电流频率是影响皮肤阻抗的重要因素。当交流接触电压在 50 V 以下时，随着电压值的增加，皮肤的局部击穿逐渐扩展，因此皮肤阻抗值变化较大，当接触电压超过 50 V 时，皮肤阻抗值将大大降低，以至于在皮肤完全被击穿后阻抗可忽略不计。

由于皮肤容性分量的存在，使皮肤阻抗值随着频率的增加而降低。

3. 人体总阻抗(Z_T)

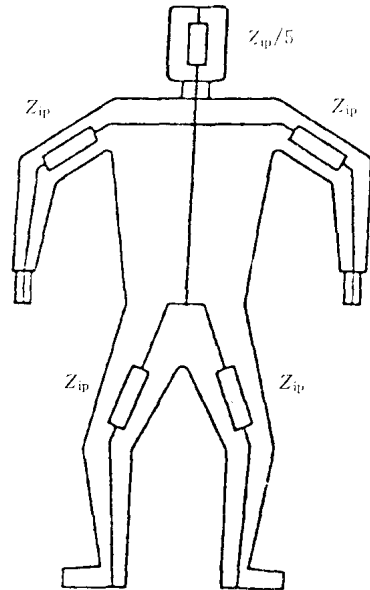
(1) 50/60 Hz 正弦交流时的 Z_T

人体总阻抗是人体内部阻抗与皮肤阻抗的向量和(见图 1-1)，由阻性和容性分量组成。

在接触电压为 50 V 及以下时，由于皮肤阻抗 Z_p 的变化很大，使人体总阻抗具有很大变化。随着接触电压的进一步增高，人体阻抗值将趋近于内阻抗 Z_i 。

表 1-1 给出的用统计法确定的三组活人人体总阻抗，适用于手到手大接触表面(500~1 000 mm²)，且适用于干燥状况。在接触电压为 50 V 及以下时，淡水润湿情况下比干燥状况下 Z_T 值降低 10%~25%；导电溶液情况下是干燥状况下的 50%。电压高于 150 V 时，人体总阻抗与湿度和接触表面积的关系愈来愈小。

图 1-4 和图 1-5(虚线)分别示出了接触电压为 5 000 V 及以下和 220 V 及以下的人体总电阻 Z_T 曲线。图 1-4 和图 1-5 适用于电流通路为手到手或一手到一脚。



注

- 1 Z_{ip} 为一个肢体部分的内阻抗(手臂或腿)。
- 2 一手至双脚的内阻抗相当于手至手或一手至一脚阻抗的 75%；双手至双脚的阻抗相应为 50%；双手至躯干则相应为 25%。

图 1-3 人体内阻简化电路图

表 1-1 交流 50/60 Hz 人体总阻抗 Z_T 值

接触电压 V	人体总阻抗在以下百分数(百分位级)时不超过的值(Ω)		
	总人数的 5%	总人数的 50%	总人数的 95%
25	1 750	3 250	6 100
50	1 450	3 635	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

注：有些测量表明，当电流通路为一手至一脚时的人体总阻抗比电流通路为手至手时稍低(10%~30%)。

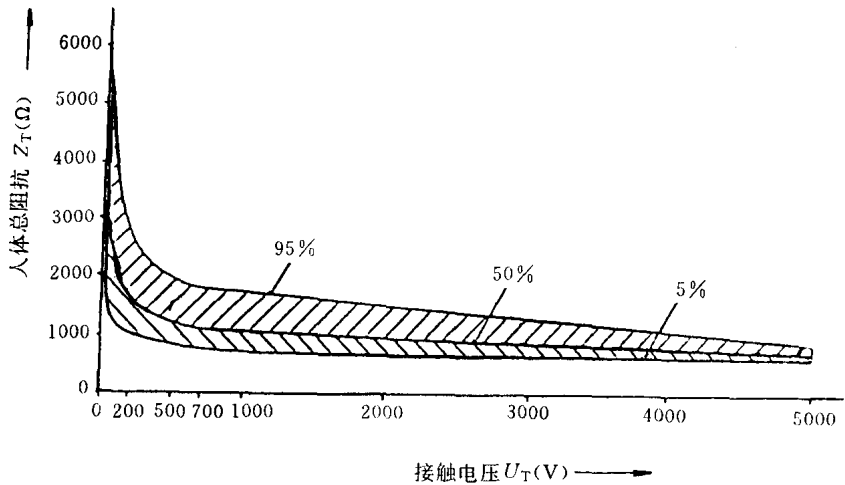


图 1-4 交流 50/60 Hz 5 000 V 及以下人体总阻抗 Z_T 统计值

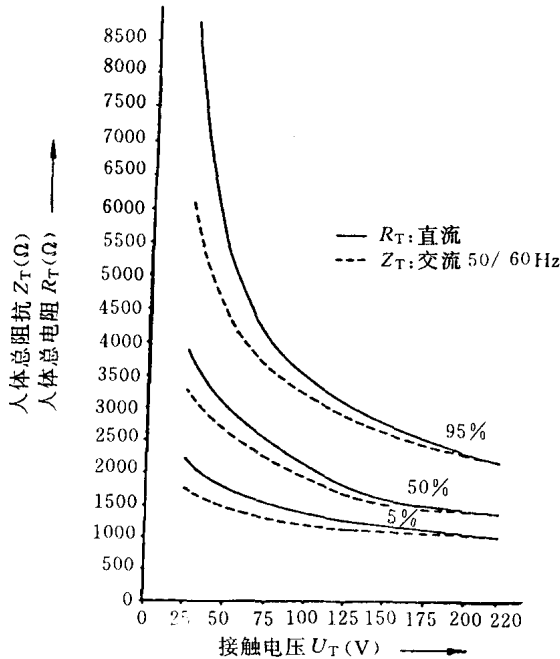


图 1-5 交流 50/60 Hz、直流 220 V 及以下人体总阻抗 Z_T 统计值

(2) 20 kHz 及以下正弦交流时的 Z_T

由于皮肤电容的影响,人体总阻抗随频率上升而下降,当频率高于 5 kHz 时将接近人体内电阻 Z_i 。

图 1-6 示出了电流通路为手到手,大接触面积(8 000 mm²),接触电压 10 V,频率范围为 25 Hz~20 kHz 条件下,人体总阻抗与频率的关系。

图 1-7 示出了电流通路为手到手,大接触面积,接触电压 25 V,频率范围为 25 Hz~2 kHz 条件下,人体总阻抗与频率的关系。

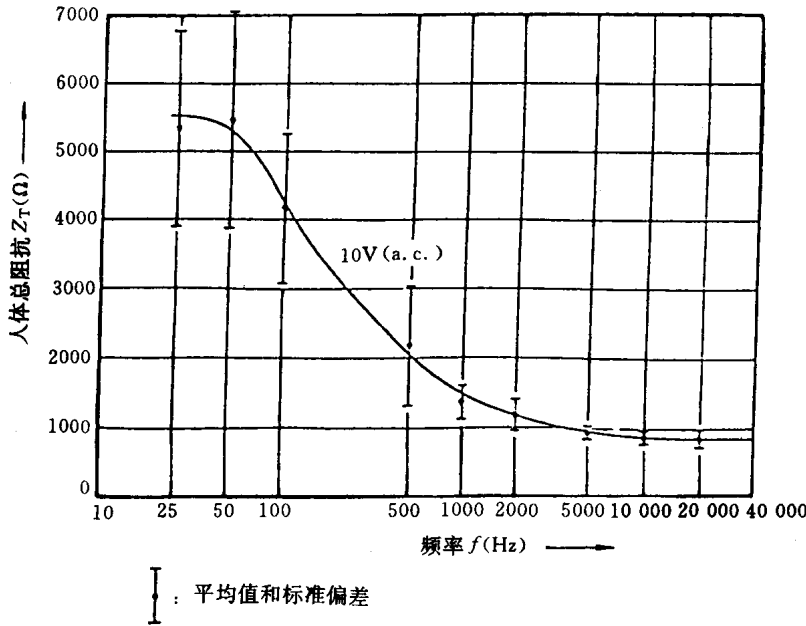


图 1-6 人体总阻抗与频率关系 1

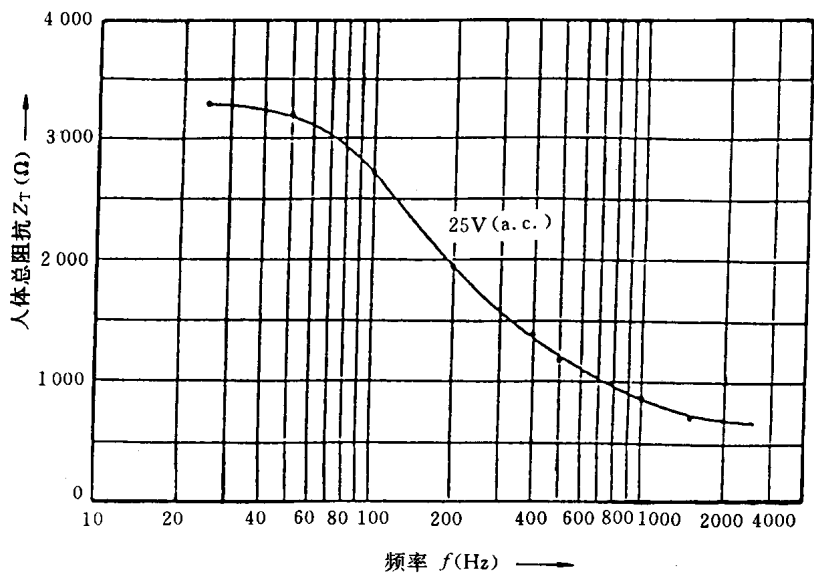


图 1-7 人体总阻抗与频率关系 2

图 1-8 示出了电流通路为手到手或一手到一脚,大接触面积,接触电压为 10 V~1 000 V,频率范围为 50 Hz~2 kHz 的人体总阻抗与频率的关系。

图 1-6 至图 1-8 的关系曲线是按 50%数据组绘制的。

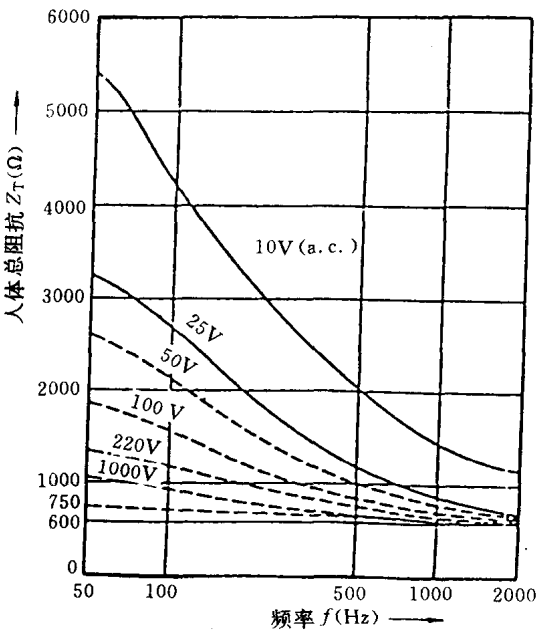


图 1-8 人体总阻抗与频率关系 3

(3) 直流电流时的 R_T

当接触电压为 150 V 及以下时,由于皮肤的阻塞作用,人体直流总电阻 R_T 比交流人体总阻抗要高。

用统计法确定的三组人体直流总电阻 R_T 列于表 1-2。表 1-2 数据适用于大接触面积(约 8 000 mm²),电流通路为手到手。

表 1-2 直流人体总电阻 R_T 值

接触电压 V	人体总阻抗在以下百分数(百分位级)时不超过的值(Ω)		
	总人数的 5%	总人数的 50%	总人数的 95%
25	2 200	3 875	8 800
50	1 750	2 990	5 300
75	1 510	2 470	4 000
100	1 340	2 070	3 400
125	1 230	1 750	3 000
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

注:有些测量表明,当电流通路为一手至一脚时的人体总阻抗比电流通路为手至手时稍低(10%~30%)。

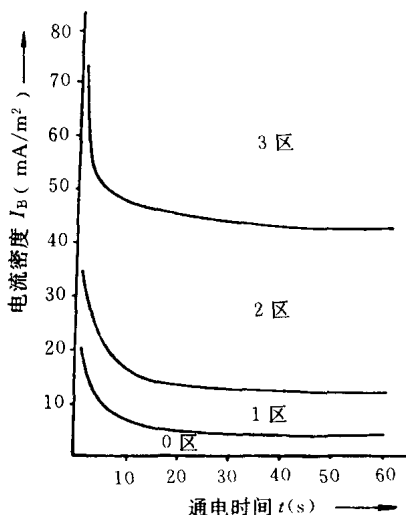
4. 人体初始电阻值 R_0

人体初始电阻值 R_0 是接触电压出现的瞬间,限制电流峰值的电阻。

当电流通路为手到手或一手到一脚时,在大接触面积条件下,无论是交流 50/60 Hz,还是直流时的 5% 百分位级的人体初始电阻值均为 $500\ \Omega$ 。

5. 电流对皮肤的效应

皮肤流过电流的变化取决于电流密度和通电时间。可以用以下各值将电流对皮肤的效应划分为 4 个区:0 区,1 区,2 区,3 区(见图 1-9)。



3 区—皮肤碳化; 2 区—电流痕迹; 1 区—皮肤变红; 0 区—无变化

图 1-9 人的皮肤变化与电流密度和通电时间的关系

0 区: 电流密度低于 $10\ \text{mA}/\text{mm}^2$, 通常在皮肤上看不出变化。当通电时间较长(几秒)时, 在电极下的皮肤可能变为灰白色且表面粗糙。

1 区: 电流密度在 $10\ \text{mA}/\text{mm}^2$ 和 $20\ \text{mA}/\text{mm}^2$ 之间, 皮肤渐呈红色。沿电极边缘的皮肤呈白色起伏的隆起。

2 区: 电流密度在 $20\ \text{mA}/\text{mm}^2$ 和 $50\ \text{mA}/\text{mm}^2$ 之间, 电极下的皮肤呈棕色并深入皮下。当通电时间达几十秒时, 围绕电极周围的皮肤可见充满电流痕迹(水泡)。

3 区: 电流密度超过 $50\ \text{mA}/\text{mm}^2$, 会出现皮肤碳化。

6. 人体总阻抗与接触面积和接触电压的关系

人体内阻抗 Z_i 和人体内电阻 R_0 的值与接触面积的关系较小。当接触表面积很小(几平方毫米数量级)时, 其值就会增加。

在皮肤尚未击穿(接触电压约 $50\ \text{V}$ 及以下时)或仅局部击穿(接触电压大于 $50\ \text{V}$)时, 交流 50/60 Hz 或直流时人体总阻抗与接触面积才有明显关系。图 1-10 示出了电流通路为手到手, 交流 50 Hz, 接触电压为 $25\sim 200\ \text{V}$ 时的人体总阻抗 Z_T 与接触表面积($1\ \text{mm}^2$, $10\ \text{mm}^2$, $100\ \text{mm}^2$, $1\ 000\ \text{mm}^2$ 和 $8\ 000\ \text{mm}^2$)的关系曲线。图 1-11 的曲线 2 和 3 分别示出了电流通路为右食指指尖到左食指指尖(接触面积约 $250\ \text{mm}^2$), 通电时间为 $0.02\ \text{s}$ 时的交流 50 Hz 和直流的人体总阻抗与接触电压($25\sim 200\ \text{V}$)的关系, 图中曲线 1 为电流通路手到手, 交流 50 Hz, 大接触面积($8\ 000\ \text{mm}^2$)时的 50% 百分位级的人体总阻抗与接触电压的关系。