

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 13870.5—2016/IEC/TR 60479-5:2007

---

## 电流对人和家畜的效应 第 5 部分：生理效应的接触电压阈值

Effects of current on human beings and livestock—  
Part 5: Touch voltage threshold values for physiological effects

(IEC/TR 60479-5:2007, IDT)

2016-04-25 发布

2016-11-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会 发布

## 目 次

|  |    |
|--|----|
| 前言 .....   | I  |
| 引言 .....   | II |
| 1 范围 .....   | 1  |
| 2 规范性引用文件 .....  | 1  |
| 3 术语和定义 .....  | 1  |
| 4 条件和阈值 .....  | 2  |
| 4.1 概述 .....   | 2  |
| 4.2 接触电流的生理效应 .....  | 2  |
| 4.3 人体阻抗 .....   | 5  |
| 4.4 人体的外部阻抗 .....  | 6  |
| 4.5 影响电压阈值的其他因素 .....  | 6  |
| 4.6 接触电压阈值是持续时间的函数 .....   | 7  |
| 4.7 长持续时间接触的接触电压阈值 .....   | 7  |
| 5 接触电压阈值——电压-时间曲线图 .....   | 9  |
| 附录 A (资料性附录) 人体阻抗 .....  | 19 |
| 附录 B (资料性附录) 接触电压——用 GB/T 13870.1—2008 中表列人体阻抗值和人体电流限值<br>来估算惊吓、强烈肌肉反应、心室纤维性颤动接触电压阈值的方法的说明 ..... | 24 |
| 附录 C (资料性附录) 在选定的条件下确定电压阈值 .....   | 37 |
| 附录 D (资料性附录) 适用范围 .....  | 38 |
| 参考文献 .....   | 39 |

## 前 言

GB/T 13870《电流对人和家畜的效应》分为以下 5 个部分：

- 第 1 部分：通用部分；
- 第 2 部分：特殊情况；
- 第 3 部分：电流流过家畜躯体的效应；
- 第 4 部分：雷电流通过人体和家畜躯体的效应；
- 第 5 部分：生理效应的接触电压阈值。

本部分是 GB/T 13870 的第 5 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 和 GB/T 20000.2—2009 给出的规则起草。

本部分使用翻译法等同采用 IEC/TR 60479-5:2007《电流对人和家畜的效应 第 5 部分：生理效应的接触电压阈值》。

与本部分规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

GB/T 2900.73—2008 电工术语 接地与电击防护(IEC 60050-195:1998, IDT)

GB/T 12113—2003 接触电流和保护导体电流的测量方法(IEC 60990:1999, IDT)

本部分与 IEC/TR 60479-5:2007 相比,章条编号完全一致,技术内容完全相同,但作了以下编辑性修改：

- 用小数点符号“.”代替小数点符号“,”；
- 删去了 IEC 标准的“前言”。

本部分由全国建筑物电气装置标准化技术委员会(SAC/TC 205)提出并归口。

本部分负责起草单位：中机中电设计研究院有限公司、中国中建设计集团有限公司(直营总部)、中国电力工程有限公司。

本部分主要起草人：韩占强、冯宗恒。

## 引 言

GB/T 13870 的本部分提供了一套电压阈值的估算方法,用来在选择和应用电击防护电压限值时进行指导。

为了估计由于通电可能引起生理效应的严重性及其类型,需要确定电流流过人体的幅值和路径。然而,从设备设计的观点来看,为了能预测所不希望的生理效应是否可能发生或它的发生概率,较好的处理办法是给出关于在易接近的可导电表面上的电压水平数据。在预期的环境条件下,假如可达到的最高电压很小,不能产生足够的接触电流所导致的不希望的生理效应,那么可减少或取消在正常状态下要求采取的避免发生不希望的生理效应的保护措施。低于不大可能产生危险的临界电压值,通常称为特低电压(ELV)。

本部分的目的是按对应于 GB/T 13870.1—2008 生理效应的时间/电流区域推导出接触电压阈值(见 GB/T 13870.1—2008 的图 20 和图 22)。引入这样的技术,为设计者在比以前所认定的更广泛组合的环境条件下,对种类更繁多的电路提供预期用户保护水平的能力。

和电压阈值对应的生理效应应与 GB/T 13870.1—2008 中接触电流对应的生理效应相同。本部分中所研究的生理效应包括:电流的惊吓反应,和肌肉收缩有关的生理效应如无力摆脱,以及心室纤维性颤动。电流阈值是以仍是基本部分的 GB/T 13870.1—2008 中的曲线 a、b 和 c1 曲线为基础。按照欧姆定律,接触电压阈值与接触电流阈值及相联系的人体阻抗相关。然而,在这种情况下是不能简单的直接应用欧姆定律的。人体阻抗是许多变量的函数,它包括跨接于人体的电压、电流路径、皮肤与可导电表面间的接触面积、接触面的水湿润程度,以及跨接于人体的电压(或流过人体的电流)的持续时间。当电压施加于人体且电流开始流动时,在几十毫秒内皮肤阻抗的电阻性分量减小到一较低值。

本部分讨论的是 50 Hz/60 Hz 正弦波交流电压和无显著交流分量的纯直流电压。更高频率的交流电压不包含在本类的分析中,因为这将需要更复杂的阻抗模型,以及需要对发生不希望的生理效应电流阈值应用的频率系数。

# 电流对人和家畜的效应

## 第5部分：生理效应的接触电压阈值

### 1 范围

GB/T 13870 的本部分通过对 GB/T 13870.1—2008 中的人体阻抗和生理效应的电流阈值资料进行分析,提供了接触电压-持续时间组合阈值曲线。这些组合阈值曲线显示出与特定环境条件和接触条件所决定的特定电流路径人体阻抗的关系。

本部分仅研究下列情况:

- (i) 不含其他频率分量或明显直流分量的 50 Hz/60 Hz 正弦交流电压;
- (ii) 不含明显交流分量的直流电压。

由于 GB/T 13870.1—2008 中的数值存在不确定性,本部分中提供的以其为基础计算得到的电压阈值也存在不确定性。

本部分未考虑身体浸入水中的情况和医疗的应用。

可将接触电压-持续时间组合阈值曲线作为指南使用,用于在各种环境条件下确定接触电压和持续时间的限值。

确定限值需要以风险评估作为基础。风险评估需要考虑的因素包括本部分提供的电压阈值(考虑了接触面积、皮肤湿润条件、电流流过人体路径),以及未涵盖的其他因素。例如:

- 减少接触的可能性(通过障碍物、遮栏、警示标志,置于伸臂范围以外的防护措施,进行人员培训等);或
- 降低相对于故障电压的接触电压(例如通过等电位联结);或
- 和人体串联的附加电阻(例如手套、鞋、地毯等)。

### 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

IEC 60050-195 电工术语 第 195 部分:接地与电击防护(International Electrotechnical Vocabulary—Part 195: Earthing and protection against electric shock)

IEC 60990 接触电流和保护导体电流的测量方法(Methods of measurement of touch current and protective conductor current)

GB/T 13870.1—2008 电流对人和家畜的效应 第 1 部分:通用部分(IEC/TR 60479-1:2005, IDT)

### 3 术语和定义

#### 3.1

**接触电流 touch current**

当人或动物触及电气装置或电气设备的一个或多个可触及部分时,通过其躯体的电流。

[IEC 60050-195]

### 3.2

#### 接触电压 touch voltage

人或动物同时接触到两个可导电部分之间的电压。

[IEC 60050-195]

注：接触电压可能会和这些可导电部分之间的开路电压不等。

### 3.3

#### 阈值 threshold

阈值是某种刺激强度大到能够产生反应的门限值。

注：阈值不同于限值，限值包括风险评估、安全裕量等因素。

#### 3.3.1

##### 惊吓反应电压阈值 voltage threshold for startle reaction

对某个百分序的人口而言，电流流经人体使之能产生不自觉肌肉收缩反应的接触电压的最小值。

#### 3.3.2

##### 强烈肌肉反应的电压阈值 voltage threshold for strong muscular reaction

对某个百分序的人口而言，电流流经人体使之能产生强烈的不自觉肌肉收缩反应的接触电压的最小值。例如，不能摆脱交流电极，但不包括惊吓反应。

#### 3.3.3

##### 心室纤维性颤动电压阈值 voltage threshold for ventricular fibrillation

对某个百分序的人口而言，电流流经人体使之能产生心室纤维性颤动的接触电压的最小值。

### 3.4

#### 长持续时间 long duration

GB/T 13870.1—2008 中曲线 b 和 c1 垂直渐进线对应的电流持续时间(例如 10 s)。

### 3.5

#### 短持续时间 short duration

小于长持续时间的电流持续时间。

## 4 条件和阈值

### 4.1 概述

电的生理效应由流过人体的电流产生。为了估算由于通电可能引起生理效应的严重性及其型式，必须确定电流流过人体的幅值和路径。然而，从设备设计的观点来看，为了能预测所不希望的生理效应是否可能发生或它的发生概率，只给出关于在易接近的可导电表面上的电压水平数据是比较方便的。在预期的环境条件下，假如可达到的最高电压很低，不能产生足够的接触电流所导致的不希望的生理效应，那么可减少或取消通常要求采取的避免发生不希望的生理效应的保护措施。

注：仅估算接触电压，未计入电源阻抗的效应，这将使结果偏于不利。本部分认为预期接触电压与 IEC 60050-195 中定义的有效接触电压相等。

### 4.2 接触电流的生理效应

GB/T 13870.1—2008 中给出了与流过人体电流有关的生理效应阈值。

本部分提到了电流惊吓反应、强烈的不自觉肌肉反应例如不能摆脱交流电极，以及心室纤维性颤动。其他的生理效应，例如对电流的感知，可能在某些应用中会很重要，但本部分未包括此内容。需要注意的是，强烈肌肉反应以及心室纤维性颤动的电流阈值取决于电流的幅值，而惊吓反应的电流阈值更取决于电流密度。然而，GB/T 13870.1—2008 提供的是毫安级的惊吓反应电流阈值，本部分认为惊吓

反应电流阈值仅取决于电流幅值。

对本部分来说,最重要的生理效应阈值是曲线 a、b 和 c1。当电流量级超过曲线 a 时,可能发生惊吓反应。曲线 b 是低电流量级的边界,超过 b 曲线时更严重和不希望的生理效应开始发生。当电流量级超过 c1 时,发生心室纤维性颤动的可能性变大。

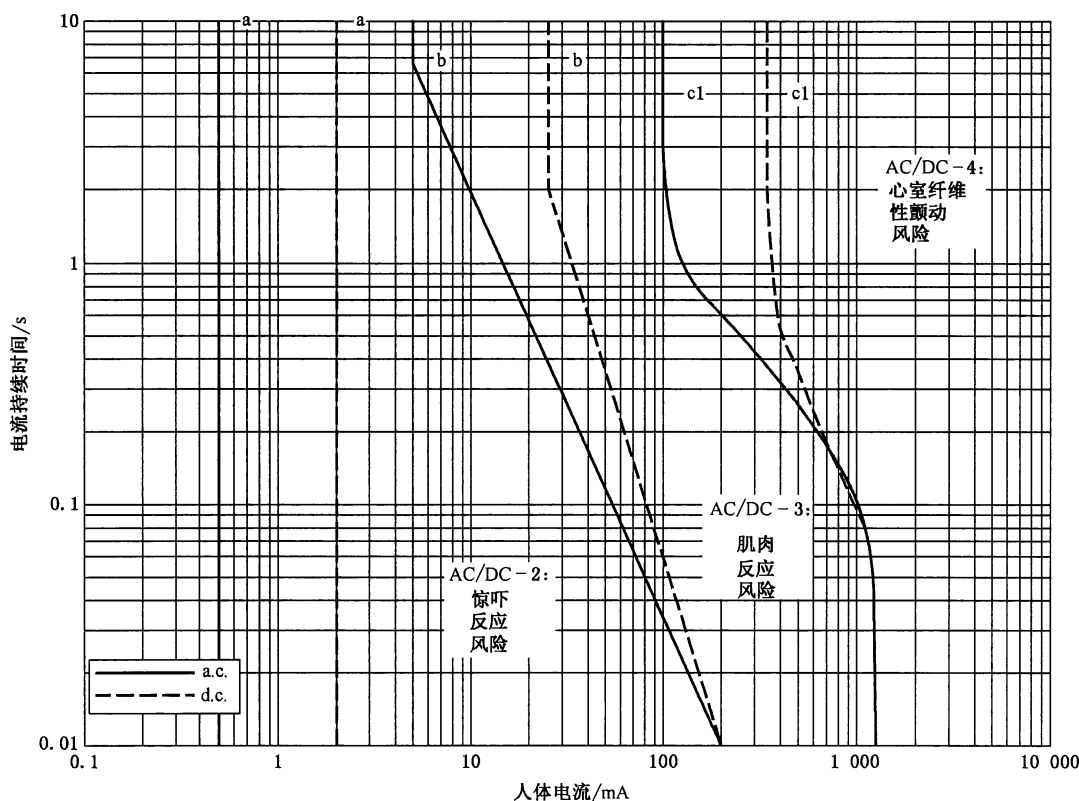
图 1~图 3 分别示出了手到手、双手到双脚和手到臀部(纵向的)路径的接触电流阈值。这些图根据 GB/T 13870.1—2008 中的资料得来。

图 2 直接引用了 GB/T 13870.1—2008 中的图 20 和图 22,其他图是根据 GB/T 13870.1—2008,对手到手路径的电流阈值应用其表 12 中适当的系数计算推导得出。

表 1 中的值为流过人体的长持续时间电流阈值。对交流电,主要关注的是当电流通过手臂时无力摆脱。因此,对双手到双脚路径、长接触时间,表 1 和图 2 中的交流电流阈值是增加一倍得到的(仅为与直流线相交点以上部分)。对直流电流和短持续时间的交流电流没有加倍,因为连续直流电流和短持续时间的交流电流不会引起无力摆脱(其结果使得两条线相重合)(见表 1 的注 1)。

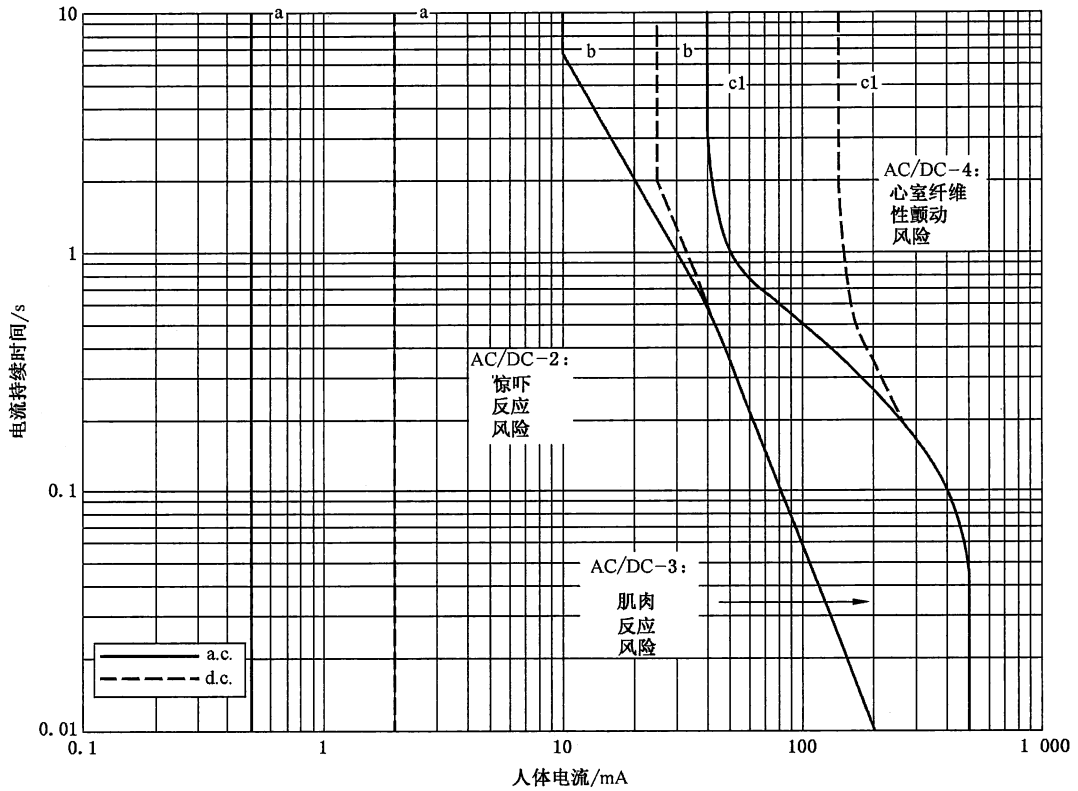
直流电流沿双脚到双手向上流经人体(相对上部身体脚为正极)产生心室纤维性颤动所需要的电流幅值比向下方向产生心室纤维性颤动所需要的电流幅值小。假定在所有情况下直流电流都是向上的。向下方向的直流电流对应的心室纤维性颤动阈值大约是向上方向的心室纤维性颤动电流阈值的两倍。

短持续时间(小于一个心跳周期)的电流总是假定与在心博周期中发生的心室易损期相一致。



注: 曲线 c1 是根据 GB/T 13870.1—2008 的表 12 修改得到,也可参见其 4.1 的最后一段。

图 1 交流(50 Hz/60 Hz)和直流电流沿手到手路径流过人体(横向)的生理效应阈值



注：对 GB/T 13870.1—2008 中的图 20 和图 22 的修改包括：

——将交流电流曲线 b 的阈值增加一倍，参见本部分表 1 的注 1。

——在加倍后的交流曲线和直流曲线相交点的下方，两曲线与更保守的直流曲线相重合。解释参见 GB/T 13870.1—2008 中 4.1 的第 4 段。

图 2 交流(50 Hz/60 Hz)和直流电流沿双手到双脚路径流过人体(纵向)的生理效应阈值

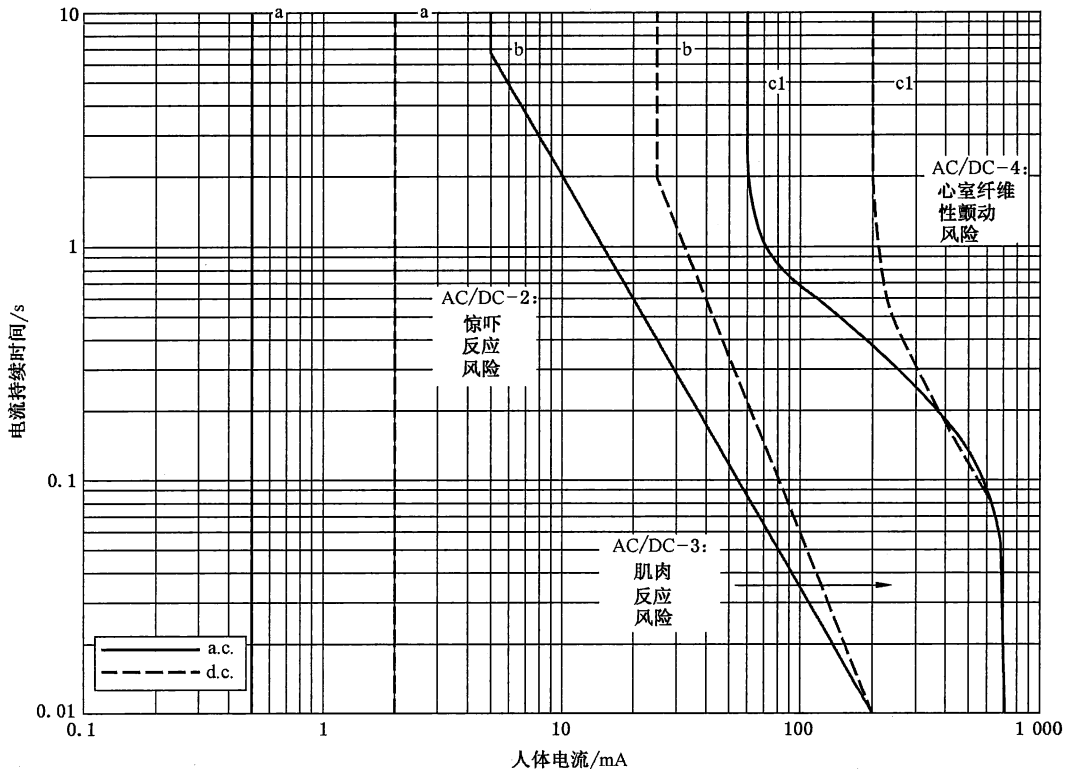


图 3 交流(50 Hz/60 Hz)和直流电流沿一只手到臀部路径流过人体(纵向)的生理效应阈值



为了确定电压阈值,本部分研究了以下各长持续时间电流阈值。它们按 GB/T 13870.1—2008 中的图 20、图 22 和表 12 经计算得到,分别对应于图 1~图 3 中各曲线 b 或 c1 的上端电流值。

表 1 各种情况下的长持续时间电流阈值

| 阈值类型  | 电流类型 | 电流路径                | 电流阈值/mA |
|---|------|---------------------|---------|
| 惊吓反应  | 交流   | 手到手                 | 0.5     |
|   |      | 双手到双脚               | 0.5     |
|   |      | 一只手到臀部              | 0.5     |
|   | 直流   | 手到手                 | 2       |
|   |      | 双手到双脚               | 2       |
|   |      | 一只手到臀部              | 2       |
| 强烈肌肉反应  | 交流   | 手到手                 | 5       |
|   |      | 双手到双脚 <sup>1</sup>  | 10      |
|   |      | 一只手到臀部              | 5       |
|   | 直流   | 手到手                 | 25      |
|   |      | 双手到双脚               | 25      |
|   |      | 一只手到臀部              | 25      |
| 心室纤维性颤动 <sup>3</sup>  | 交流   | 手到手                 | 100     |
|   |      | 双手到双脚               | 40      |
|   |      | 一只手到臀部              | 57      |
|   | 直流   | 手到手                 | 350     |
|   |      | 双脚到双手 <sup>2</sup>  | 140     |
|   |      | 臀部到一只手 <sup>2</sup> | 200     |
| <p><sup>1</sup> 表中数值为流过人体躯干的电流值。对于交流电流主要关心的是无力摆脱,它与通过每只手臂的电流有关。因此,对较长持续时间的电流,本表中的总接触电流是按加一倍的数值计算得到的。</p> <p><sup>2</sup> 沿双脚到双手路径流过的电流为向上方向电流。能引起心室纤维性颤动的向下方向的直流电流阈值大约是向上方向直流电流阈值的两倍。</p> <p><sup>3</sup> 除心室纤维性颤动电流阈值以外的其他电流值可能会产生其他严重的生理效应,例如 GB/T 13870.1—2008 中所述的呼吸停止。</p> |      |                     |         |

#### 4.3 人体阻抗

根据欧姆定律,接触电压阈值通过人体阻抗和接触电流阈值求得。然而,在这种情况下是不能简单地应用欧姆定律的,因为人体阻抗是因许多因素而变化的。选择正确的阻抗值需要考虑以下因素:

- 电源的类型(交流或直流);
- 接触电压的幅值;
- 电流流过人体的路径(手到手、双手到双脚或一只手到臀部);

注 1: 这些不同的路径是根据其不同的特性选择确定,具体原因可以参见附录 A 中描述的人体阻抗模型。一般可认为双手到双脚路径的电压阈值比一只手到双脚路径的电压阈值要偏小。

- 和皮肤的接触表面积;

- 所接触的皮肤表面的状况(盐水湿润、水湿润、干燥);
- 电流的持续时间。

人体阻抗仅包括皮肤阻抗和内部组织阻抗。

皮肤电阻会随着加在其上面的电压的变化而改变。当电压较低时,皮肤电阻的变化是可逆的。电压消失后,皮肤电阻会很快恢复至原来的值。当电压较高时,会对皮肤造成永久的伤害。在这种情况下,电压引起的皮肤电阻的变化是不可逆的。

注2:手指的电阻约为1 000 Ω,用手指接触的人体阻抗要比用手掌接触大得多。因此,用手掌接触的情况要偏于保守。

GB/T 13870.1—2008 中包含了皮肤阻抗的资料,它是通过对志愿者和尸体进行测量得到。附录 A 提供了更详细的人体阻抗值和人体阻抗模型。不同人的阻抗有所不同,附录 A 表中对应不同人口的百分序给出了这种差别。

一般身材高大者由于其身体截面较大,内电阻值较低。而身材瘦小者一般内电阻值较高。但是一些有关人体阻抗的测量[1]<sup>1)</sup>显示,人体阻抗受体重影响不大。因此人体体重(儿童或成人)和对应特定生理效应的电流阈值之间不是充分关联的。GB/T 13870.1—2008 中考虑了3个人口的百分序(第5、第50和第95百分序)。而本部分仅考虑与人口的百分序第5百分序相关的人体阻抗值,覆盖了95%以上的人口。

#### 4.4 人体的外部阻抗

与人体阻抗(在最不利情况下)相比,假定施加于人体的电压源具有较低的输出阻抗。接触电流的大小仅由施加的电压和人体阻抗决定。可能与人体串联的任何有明显作用的电路阻抗,会影响电压源产生的有效接触电流,但不在本研讨范围内。

注:在有些情况下,当有大的感性阻抗与人体串联时,接触电压可能会比电源的开路电压高。对于50 Hz/60 Hz交流电,当电感大于100 mH时,这个效应会变得明显。

未考虑衣服、手套和鞋的外部阻抗。

#### 4.5 影响电压阈值的其他因素

考虑了如下因素:

- 电源:没有直流分量的50 Hz/60 Hz正弦交流电压,或没有交流分量的直流电压。
- 皮肤状况:盐水湿润,水湿润和干燥。

注:干燥的皮肤环境按室内正常环境条件考虑;水湿润环境指在普通水里(平均值 $\rho=35 \Omega \cdot \text{m}$ , $\text{pH}=7.7\sim 9$ )浸泡时间1 min以上考虑;盐水湿润环境按在3%氯化钠溶液(平均值 $\rho=0.25 \Omega \cdot \text{m}$ , $\text{pH}=7.7\sim 8.5$ )中浸泡时间1 min以上考虑。

皮肤出汗的情况可认为介于水湿润环境和盐水湿润环境之间,一些海水的导电率比水湿润环境条件下略高。

- 电流路径:手到手、双手到双脚或一只手到臀部与易接近可导电部分接触。
- 接触面积:大的接触面积、中等接触面积或小的接触面积与易接近可导电部分接触。

为了便于计算,大的接触面积(L)考虑为整只手接触可导电面,面积为82 cm<sup>2</sup>。中等接触面积(M)按12.5 cm<sup>2</sup>考虑,可代表一只手的掌心接触可导电部分情况。小的接触面积(S)按1 cm<sup>2</sup>考虑,可代表用手接触一个小的可导电部分。为了简化分析,假定除了一只手到臀部之外,其他所有的接触都是对称的。假定每只脚与可导电支撑面的接触面积和每只手与可导电支撑面的接触面积相同。

宜注意的是,接触面积的大小会因使用外壳可导电的工具或多个互相连通的设备而受到影响。

- 持续时间:10 ms~10 s。

本部分考虑了下列最不利的情况:交流电流、长持续时间、盐水湿润条件、大的接触面积。

1) 方括号内的数值为查阅参考文献号。

4.6 接触电压阈值是持续时间的函数

根据 GB/T 13870.1—2008 中的人体阻抗和电流-时间曲线,推导出—组曲线图(图 5~图 22),图中对所施加于人体的接触电压,给出了人体最大可承受时间。这些曲线是根据附录 B 中的计算方法和附录 A 中的人体阻抗模型计算出来的。

这些曲线应该作为在应用自动切断电源的防电击措施时,确定保护设备切断电源的时间的指南。实际选用的切断时间的限值会和本部分的电压阈值不同,因为要考虑安全、不确定性、承受能力和风险评估等因素,详情参见图 5~图 22。

可以按需要根据下面的流程图找到相应的接触电压阈值信息的图。

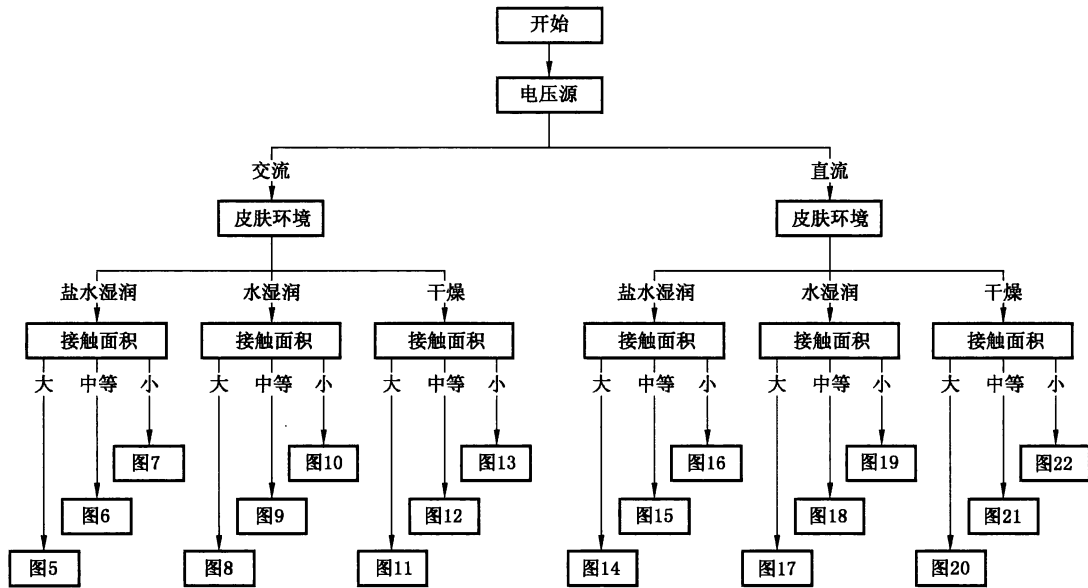


图 4 电压阈值和其最大持续时间曲线图的选择流程图

附录 B 阐述了根据接触电流和人体阻抗计算接触电压的计算方法。

4.7 长持续时间接触的接触电压阈值

表 2a~表 2f 中的数据是从第 5 章中的图中摘录出来,用于特长持续时间电流(比第 5 章中每条曲线的垂直渐进线长几秒钟)。附录 B 描述了根据接触电流和人体阻抗计算接触电压的计算方法。

可以使用这些电压阈值,采用合适的风险系数来确定相关产品标准中的电压限值。

表 2 惊吓反应、强烈肌肉反应和心室纤维性颤动的交流和直流最小接触电压阈值表(见表 1 注释)

表 2a 惊吓反应的交流(50 Hz/60 Hz)接触电压阈值

| 惊吓反应电流阈值<br>mA | 长持续时间的交流接触电压阈值/V |            |           |           |            |           |           |            |           |
|----------------|------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|
|                | 盐水湿润             |            |           | 水湿润       |            |           | 干燥        |            |           |
|                | 大接触<br>面积        | 中等接触<br>面积 | 小接触<br>面积 | 大接触<br>面积 | 中等接触<br>面积 | 小接触<br>面积 | 大接触<br>面积 | 中等接触<br>面积 | 小接触<br>面积 |
| 手到手 0.5        | 1                | 1          | 3         | 1         | 4          | 21        | 2         | 9          | 40        |
| 双手到双脚 0.5      | 0.3              | 1          | 2         | 0.4       | 3          | 13        | 1         | 5          | 23        |
| 一只手到臀部 0.5     | 0.3              | 0.5        | 2         | 0.4       | 2          | 11        | 1         | 4          | 20        |

表 2b 强烈肌肉反应的交流(50 Hz/60 Hz)接触电压阈值

| 强烈肌肉反应<br>电流阈值<br>mA | 长持续时间的交流接触电压阈值/V |            |           |           |            |           |           |            |           |
|----------------------|------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|
|                      | 盐水湿润             |            |           | 水湿润       |            |           | 干燥        |            |           |
|                      | 大接触<br>面积        | 中等接触<br>面积 | 小接触<br>面积 | 大接触<br>面积 | 中等接触<br>面积 | 小接触<br>面积 | 大接触<br>面积 | 中等接触<br>面积 | 小接触<br>面积 |
| 手到手 5                | 5                | 9          | 27        | 7         | 25         | 93        | 11        | 40         | 104       |
| 双手到双脚 10             | 5                | 9          | 27        | 7         | 25         | 93        | 11        | 40         | 104       |
| 一只手到臀部 5             | 3                | 5          | 13        | 3         | 13         | 46        | 6         | 20         | 52        |

表 2c 心室纤维性颤动的交流(50 Hz/60 Hz)接触电压阈值

| 心室纤维性颤动<br>电流阈值<br>mA | 长持续时间的交流接触电压阈值/V |            |           |           |            |           |           |            |           |
|-----------------------|------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|
|                       | 盐水湿润             |            |           | 水湿润       |            |           | 干燥        |            |           |
|                       | 大接触<br>面积        | 中等接触<br>面积 | 小接触<br>面积 | 大接触<br>面积 | 中等接触<br>面积 | 小接触<br>面积 | 大接触<br>面积 | 中等接触<br>面积 | 小接触<br>面积 |
| 手到手 100               | 90               | 160        | 257       | 98        | 165        | 260       | 99        | 99         | 260       |
| 双手到双脚 40              | 20               | 36         | 94        | 24        | 71         | 149       | 33        | 82         | 149       |
| 一只手到臀部 57             | 27               | 49         | 99        | 31        | 65         | 100       | 34        | 65         | 100       |

表 2d 惊吓反应的直流接触电压阈值

| 惊吓反应<br>电流阈值<br>mA | 长持续时间的直流接触电压阈值/V |                            |                       |                       |                            |                       |                       |                            |                       |
|--------------------|------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
|                    | 盐水湿润             |                            |                       | 水湿润                   |                            |                       | 干燥                    |                            |                       |
|                    | 大<br>接触<br>面积    | 中<br>等<br>接<br>触<br>面<br>积 | 小<br>接<br>触<br>面<br>积 | 大<br>接<br>触<br>面<br>积 | 中<br>等<br>接<br>触<br>面<br>积 | 小<br>接<br>触<br>面<br>积 | 大<br>接<br>触<br>面<br>积 | 中<br>等<br>接<br>触<br>面<br>积 | 小<br>接<br>触<br>面<br>积 |
| 手到手 2              | 2                | 4                          | 12                    | 3                     | 12                         | 56                    | 7                     | 23                         | 78                    |
| 双手到双脚 2            | 1                | 2                          | 6                     | 2                     | 7                          | 35                    | 4                     | 15                         | 59                    |
| 一只手到臀部 2           | 1                | 2                          | 6                     | 1                     | 6                          | 28                    | 3                     | 12                         | 39                    |

表 2e 强烈肌肉反应的直流接触电压阈值

| 强烈肌肉反应<br>电流阈值<br>mA | 长持续时间的直流接触电压阈值/V      |                            |                       |                       |                            |                       |                       |                            |                       |
|----------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
|                      | 盐水湿润                  |                            |                       | 水湿润                   |                            |                       | 干燥                    |                            |                       |
|                      | 大<br>接<br>触<br>面<br>积 | 中<br>等<br>接<br>触<br>面<br>积 | 小<br>接<br>触<br>面<br>积 | 大<br>接<br>触<br>面<br>积 | 中<br>等<br>接<br>触<br>面<br>积 | 小<br>接<br>触<br>面<br>积 | 大<br>接<br>触<br>面<br>积 | 中<br>等<br>接<br>触<br>面<br>积 | 小<br>接<br>触<br>面<br>积 |
| 手到手 25               | 24                    | 44                         | 112                   | 29                    | 81                         | 156                   | 43                    | 89                         | 156                   |
| 双手到双脚 25             | 13                    | 23                         | 63                    | 16                    | 51                         | 133                   | 26                    | 67                         | 133                   |
| 一只手到臀部 25            | 12                    | 22                         | 56                    | 15                    | 41                         | 78                    | 21                    | 45                         | 78                    |

表 2f 心室纤维性颤动的直流接触电压阈值

| 心室纤维性颤动<br>电流阈值<br>mA | 长持续时间的直流接触电压阈值/V |                |               |               |                |               |               |                |               |
|-----------------------|------------------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
|                       | 盐水湿润             |                |               | 水湿润           |                |               | 干燥            |                |               |
|                       | 大<br>接触<br>面积    | 中等<br>接触<br>面积 | 小<br>接触<br>面积 | 大<br>接触<br>面积 | 中等<br>接触<br>面积 | 小<br>接触<br>面积 | 大<br>接触<br>面积 | 中等<br>接触<br>面积 | 小<br>接触<br>面积 |
| 手到手 350               | 263              | 351            | 467           | 264           | 353            | 470           | 264           | 264            | 470           |
| 双手到双脚 140             | 68               | 121            | 220           | 75            | 143            | 223           | 87            | 143            | 223           |
| 一只手到臀部 200            | 83               | 126            | 201           | 85            | 127            | 203           | 85            | 127            | 203           |

附录 B 描述了接触电压的计算方法,它是基于接触电流和人体阻抗为基础的。

## 5 接触电压阈值——电压-时间曲线图

根据 GB/T 13870.1—2008 中的人体阻抗和电流-时间曲线,推导出下面的这组曲线图,图中针对每种生理效应,对应给定的施加于人体的接触电压,给出了人体最大可持续承受的时间。这些曲线是根据附录 B 中的计算方法和附录 A 中的人体阻抗模型计算出来的。曲线图的选择流程见图 4。

每种类型电流(交流和直流)相应下列参数有 9 张图。

- 皮肤条件(干燥、水湿润和盐水湿润);
- 接触面积(大、中等和小)。

每张图包含了 9 条曲线,对应下列情况:

- 流过人体电流的三个不同路径(手到手,双手到双脚和一只手到臀部);
- 研究了 3 个不同的生理效应电流阈值(惊吓反应,强烈肌肉反应和心室纤维性颤动)。

可以使用这些曲线在没有不希望的生理效应发生的情况下作为确定人体允许的最大切断时间组合的指南。例如,在选择限值的过程中,需要考虑下列的各种特性,而且可进行适当的调整:

- 对称的电气模型的局限性,使得在某一时刻,模型不能用以处理皮肤的非线性特性一个以上的电气工作点进行计算;
- 数据离散的不同接触面积、接触面潮湿程度和假定的接触电流通路的测得值很少;
- 只考虑了电流引起的 3 个生理效应阈值(惊吓反应、直接的肌肉反应包括无力摆脱和心室纤维性颤动)。

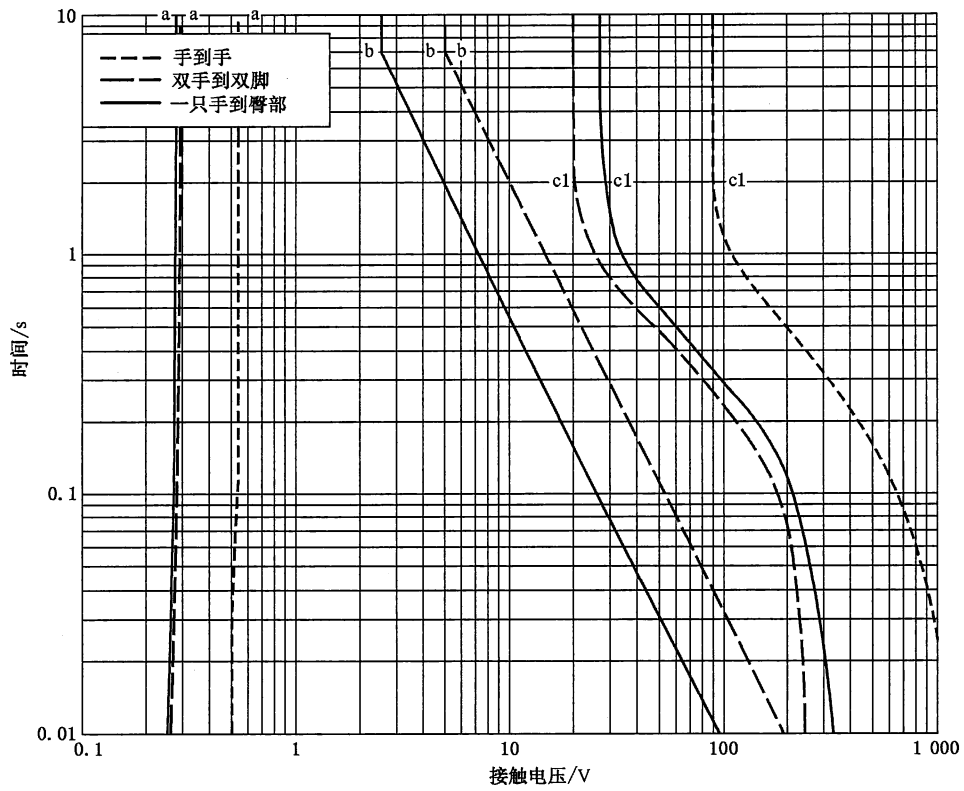


图 5 盐水湿润条件,大的接触表面积,交流电流(50 Hz/60 Hz)对人效应的约定的时间/电压区域

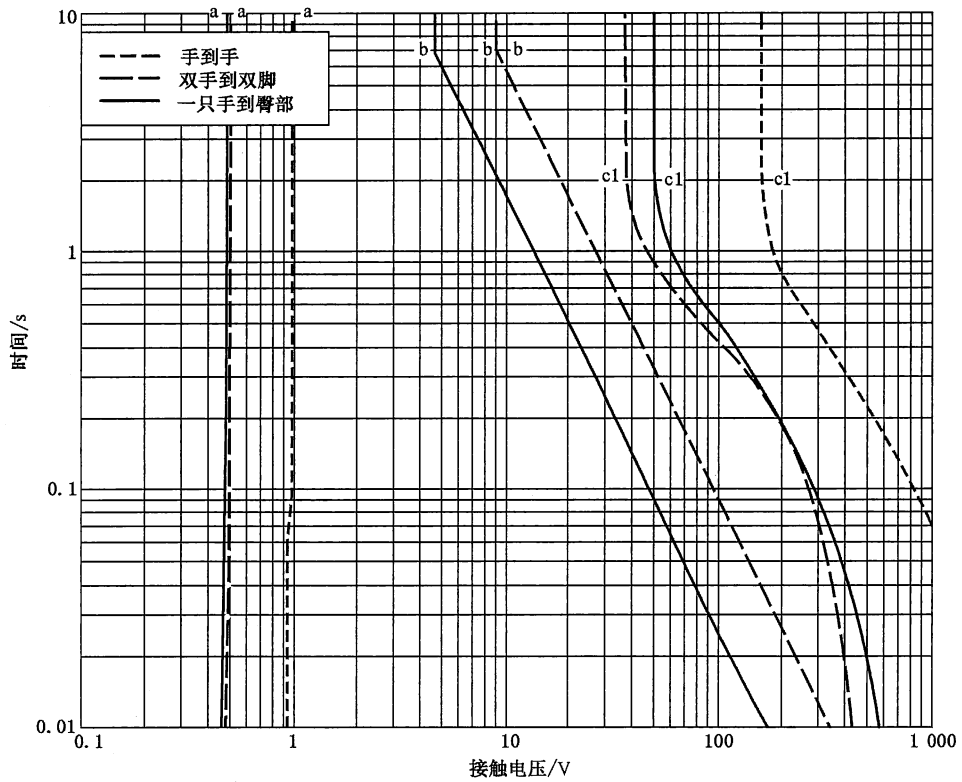


图 6 盐水湿润条件,中等接触表面积,交流电流(50 Hz/60 Hz)对人效应的约定的时间/电压区域

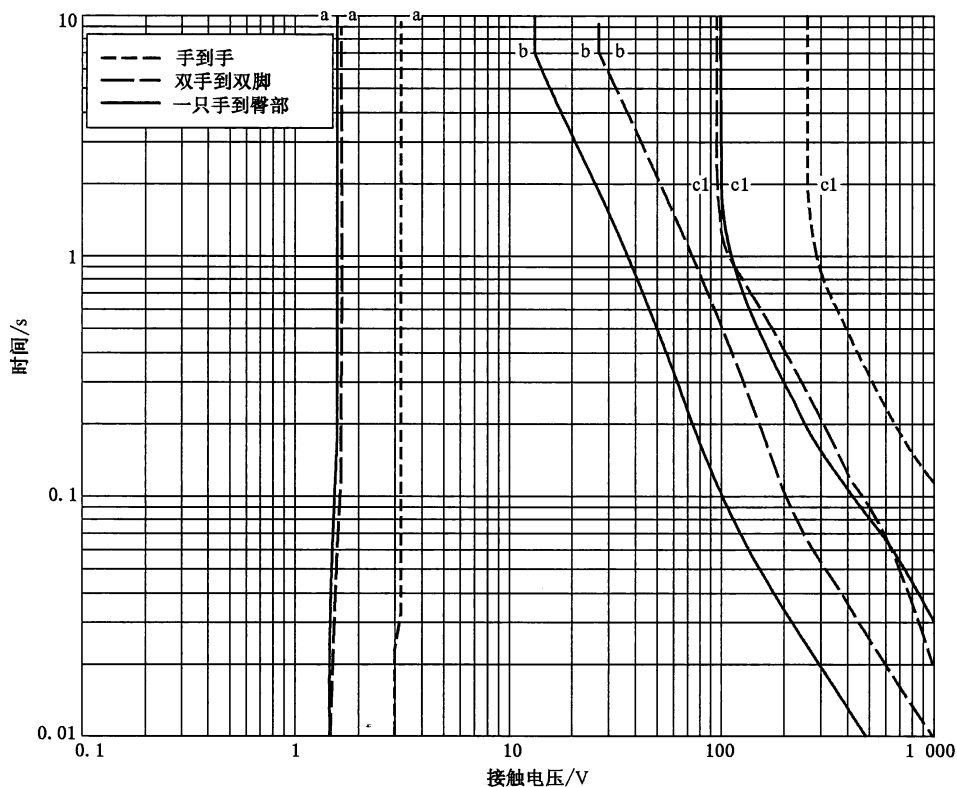


图 7 盐水湿润条件,小的接触表面积,交流电流(50 Hz/60 Hz)对人效应的约定的时间/电压区域

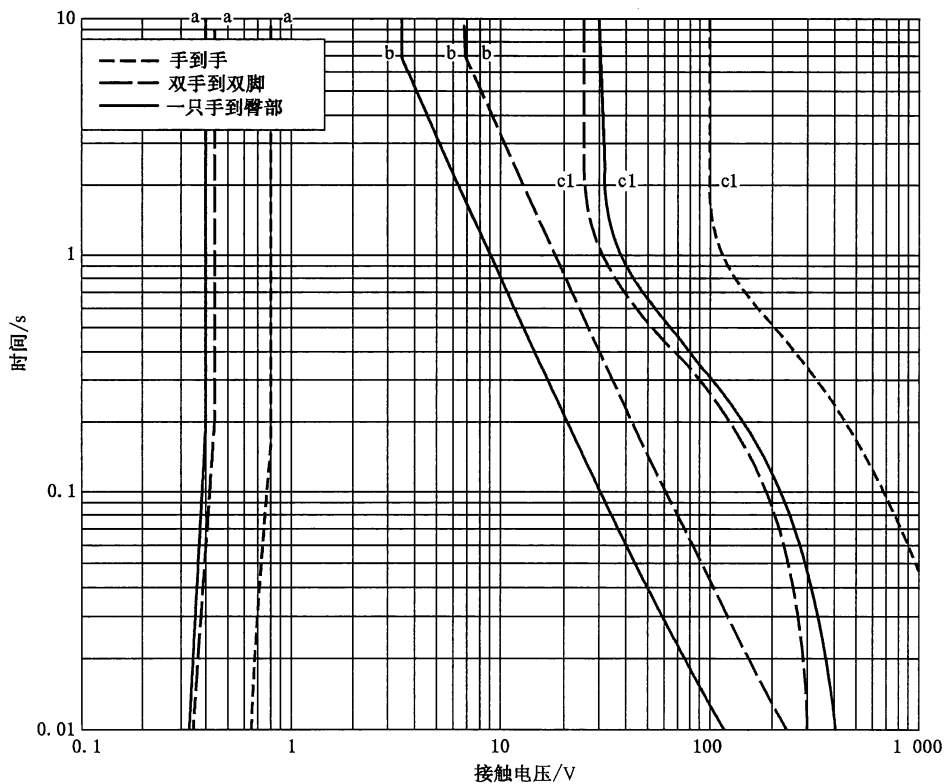


图 8 水湿润条件,大的接触表面积,交流电流(50 Hz/60 Hz)对人效应的约定的时间/电压区域

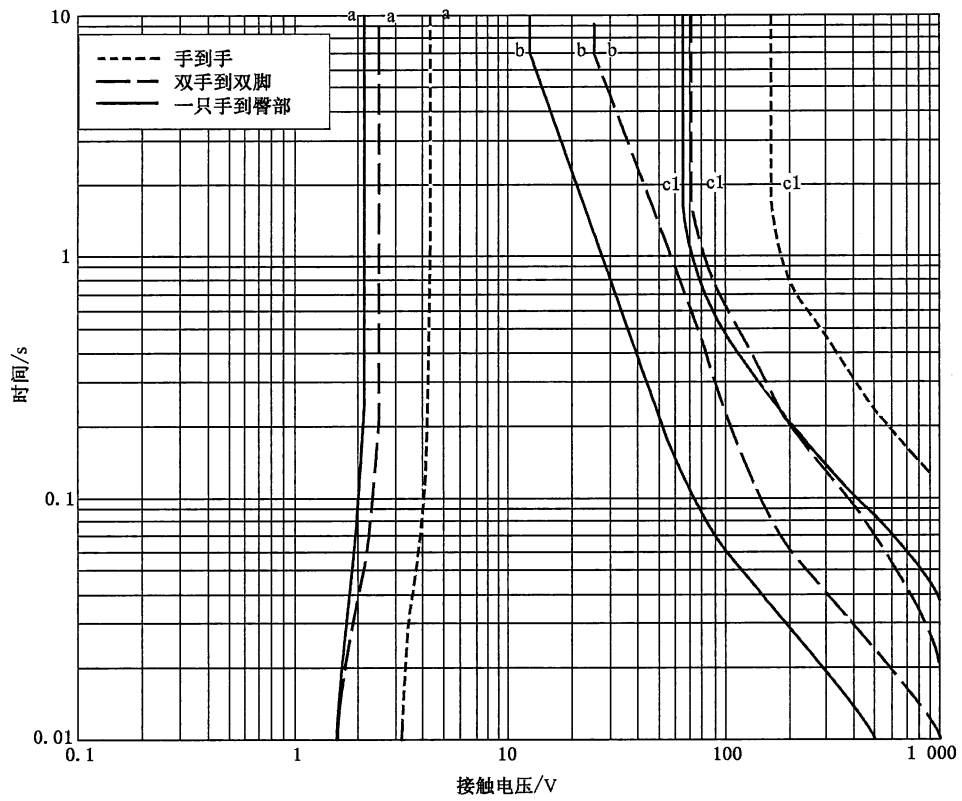


图 9 水湿润条件,中等接触表面积,交流电流(50 Hz/60 Hz)对人效应的约定的时间/电压区域

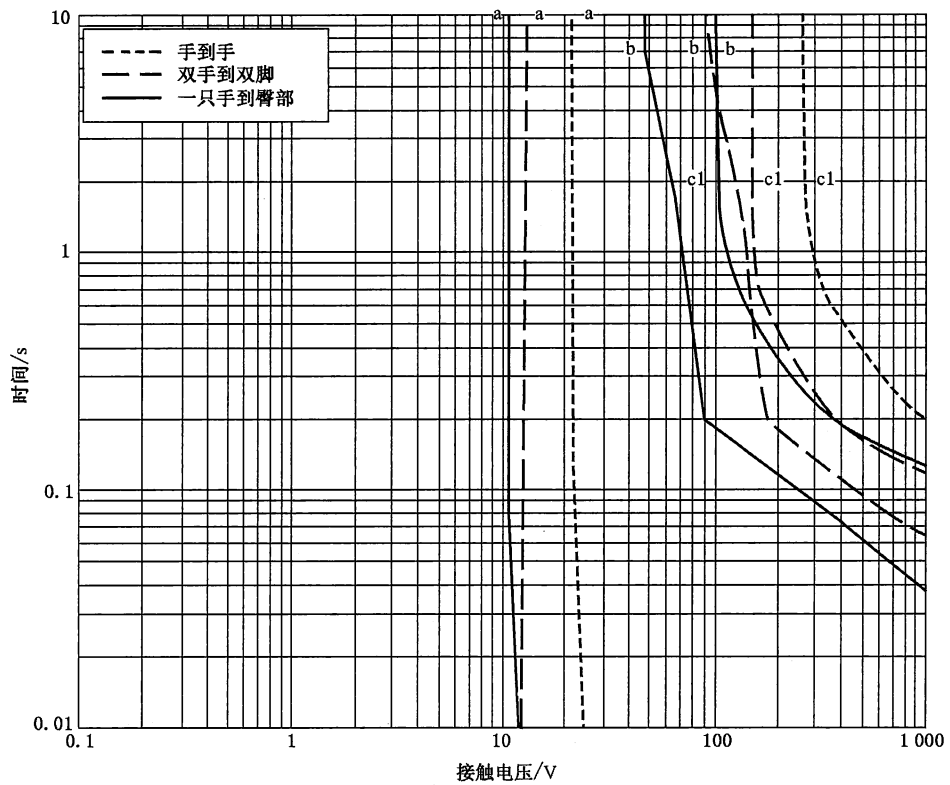


图 10 水湿润条件,小的接触表面积,交流电流(50 Hz/60 Hz)对人效应的约定的时间/电压区域



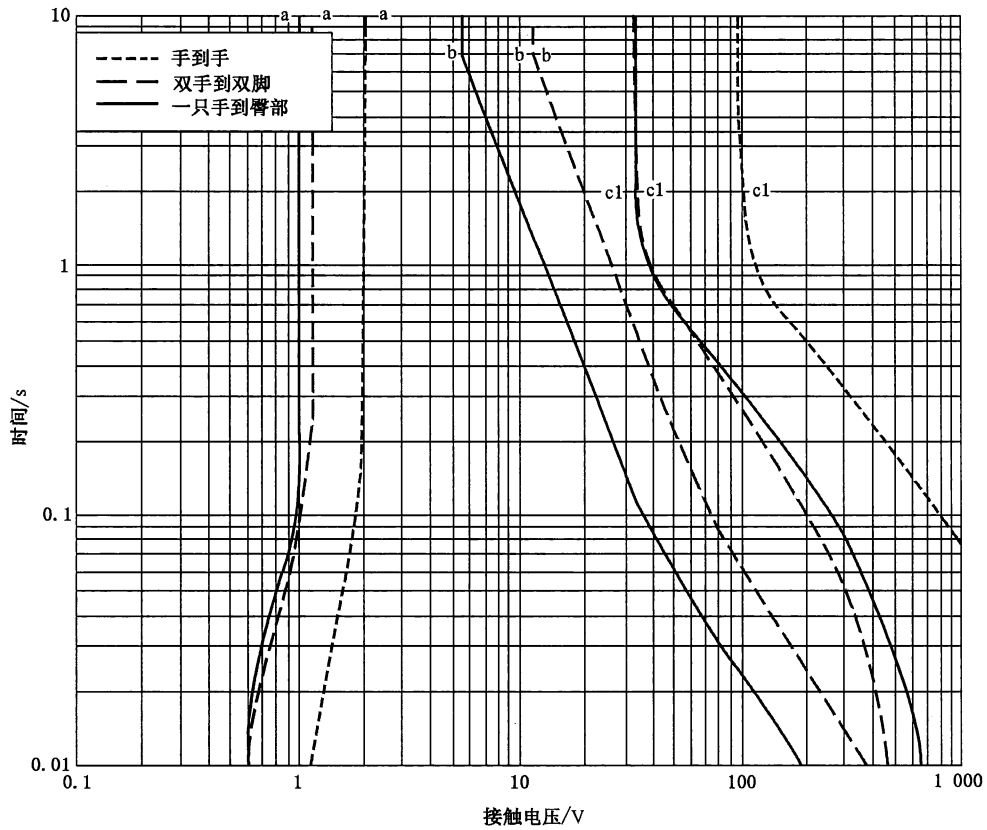


图 11 干燥条件,大的接触表面积,交流电流(50 Hz/60 Hz)对人效应的约定的时间/电压区域

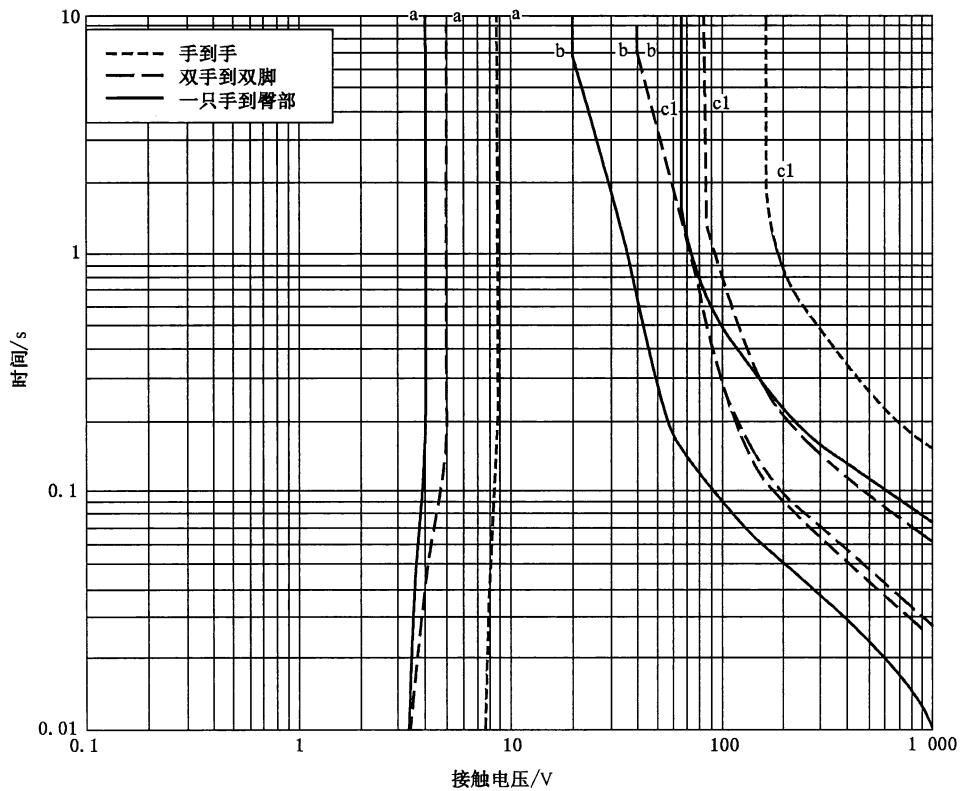


图 12 干燥条件,中等接触表面积,交流电流(50 Hz/60 Hz)对人效应的约定的时间/电压区域

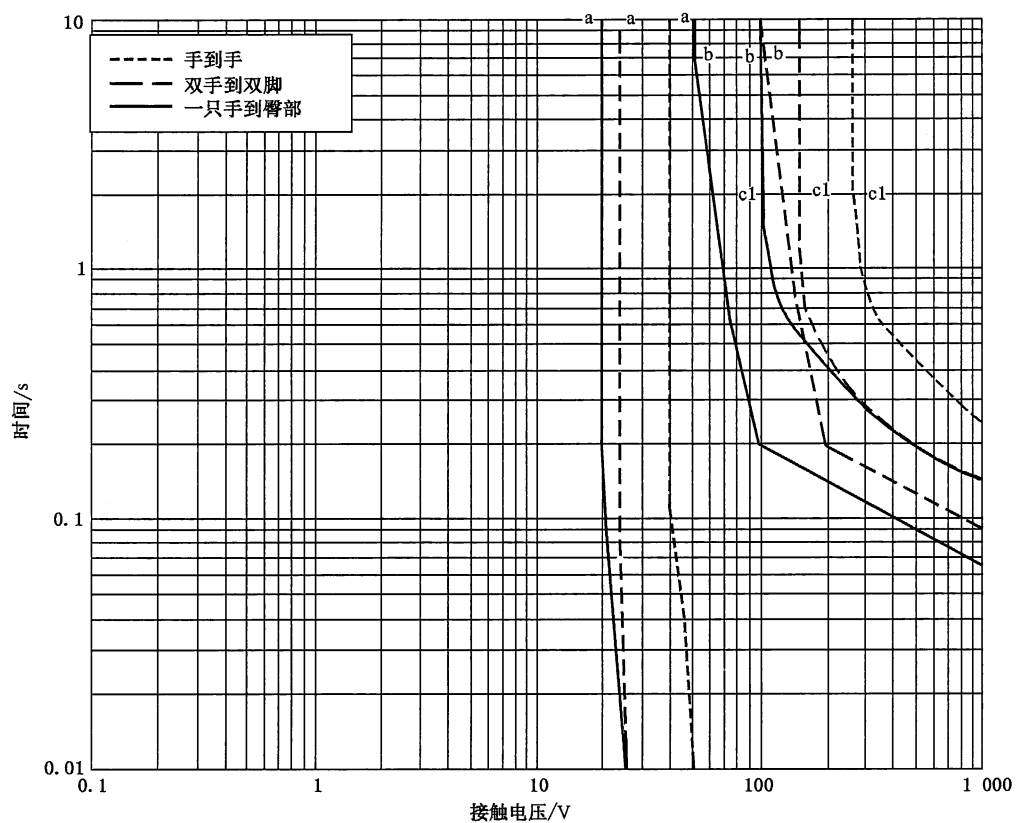


图 13 干燥条件,小的接触表面积,交流电流(50 Hz/60 Hz)对人效应的约定的时间/电压区域

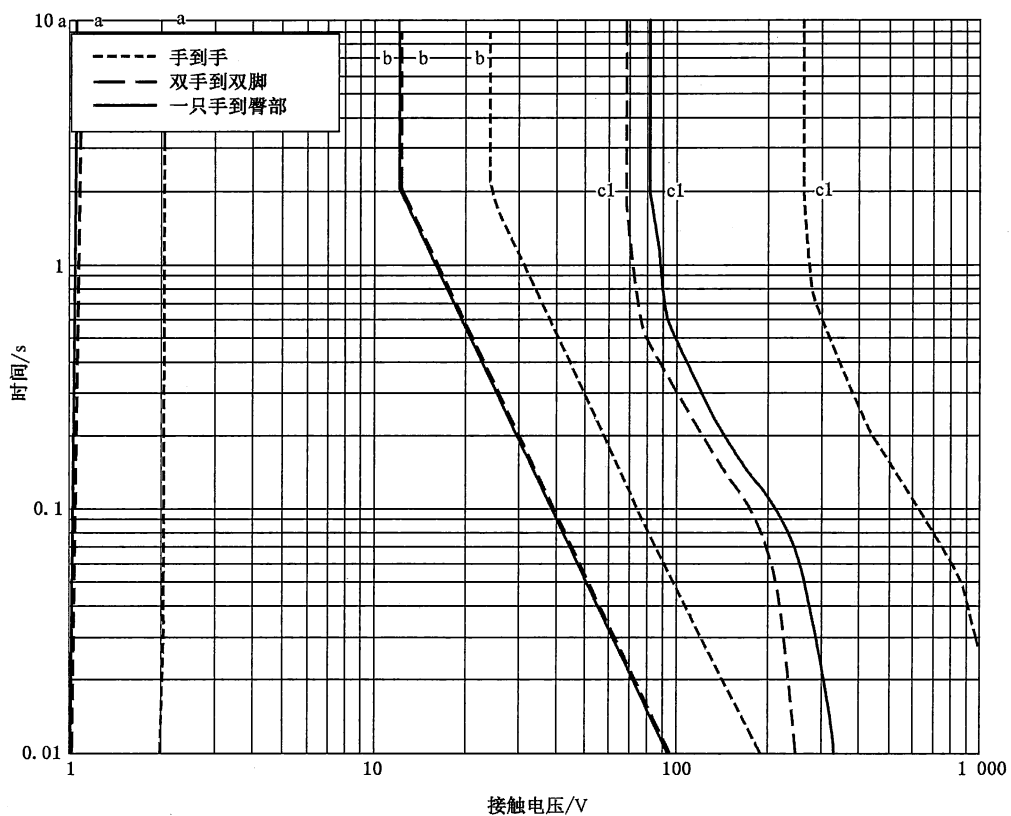


图 14 盐水湿润条件,大的接触表面积,直流电流对人效应的约定的时间/电压区域

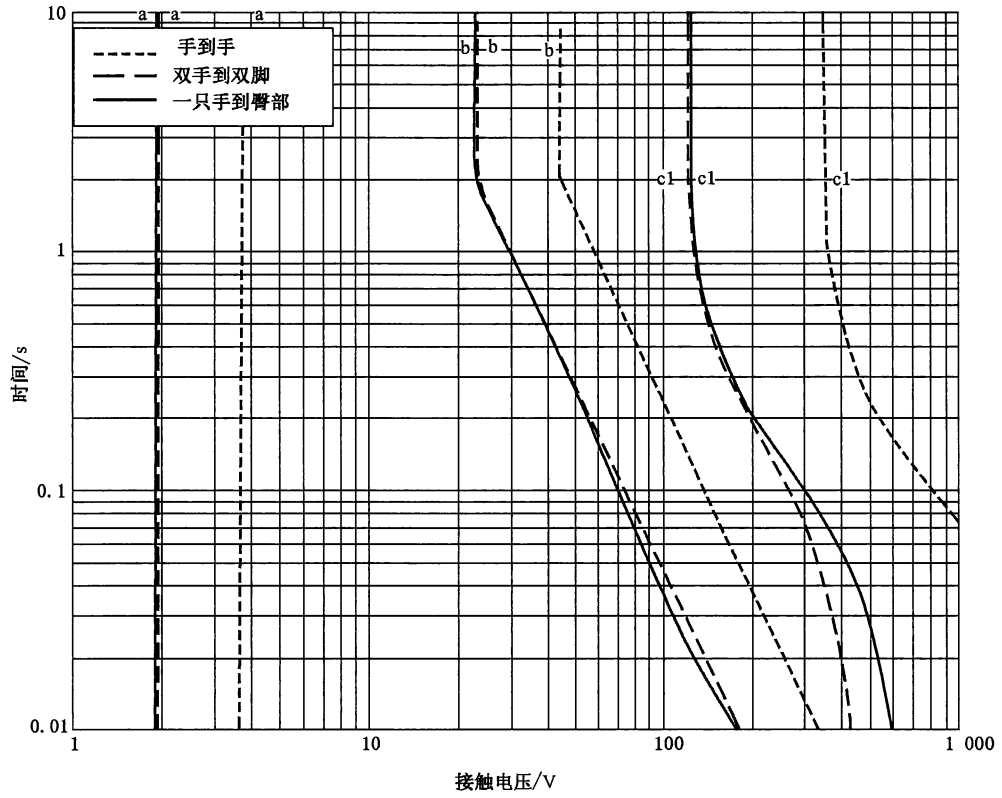


图 15 盐水湿润条件,中等接触表面积,直流电流对人效应的约定的时间/电压区域

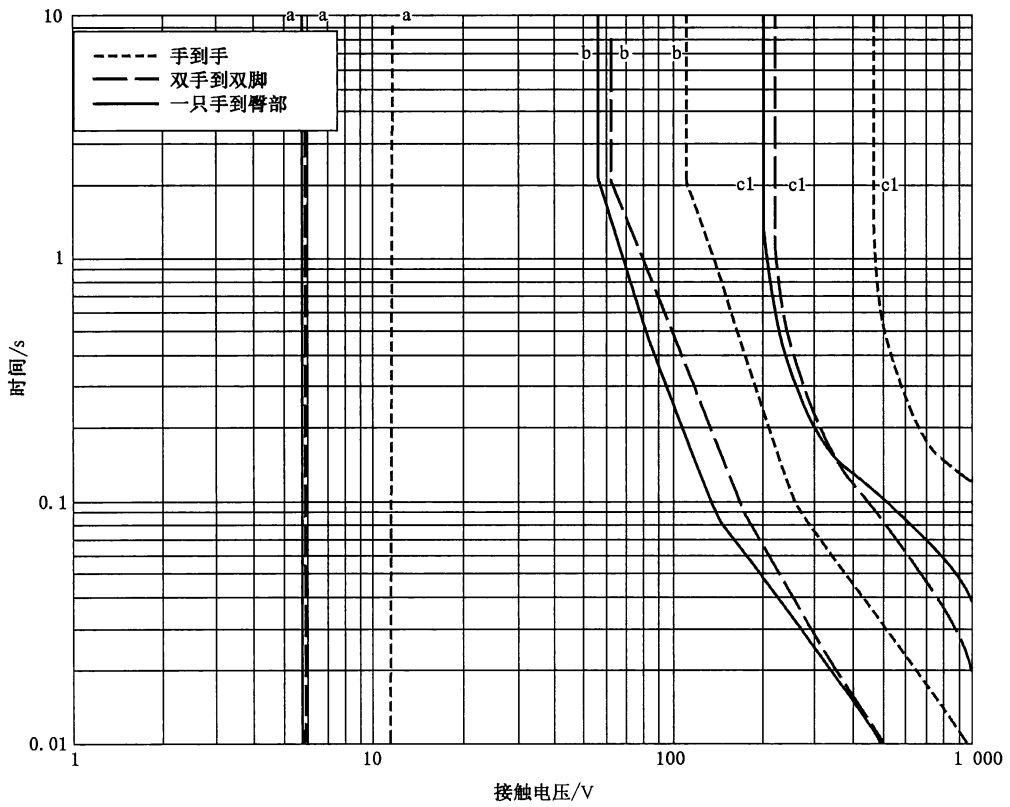


图 16 盐水湿润条件,小的接触表面积,直流电流对人效应的约定的时间/电压区域

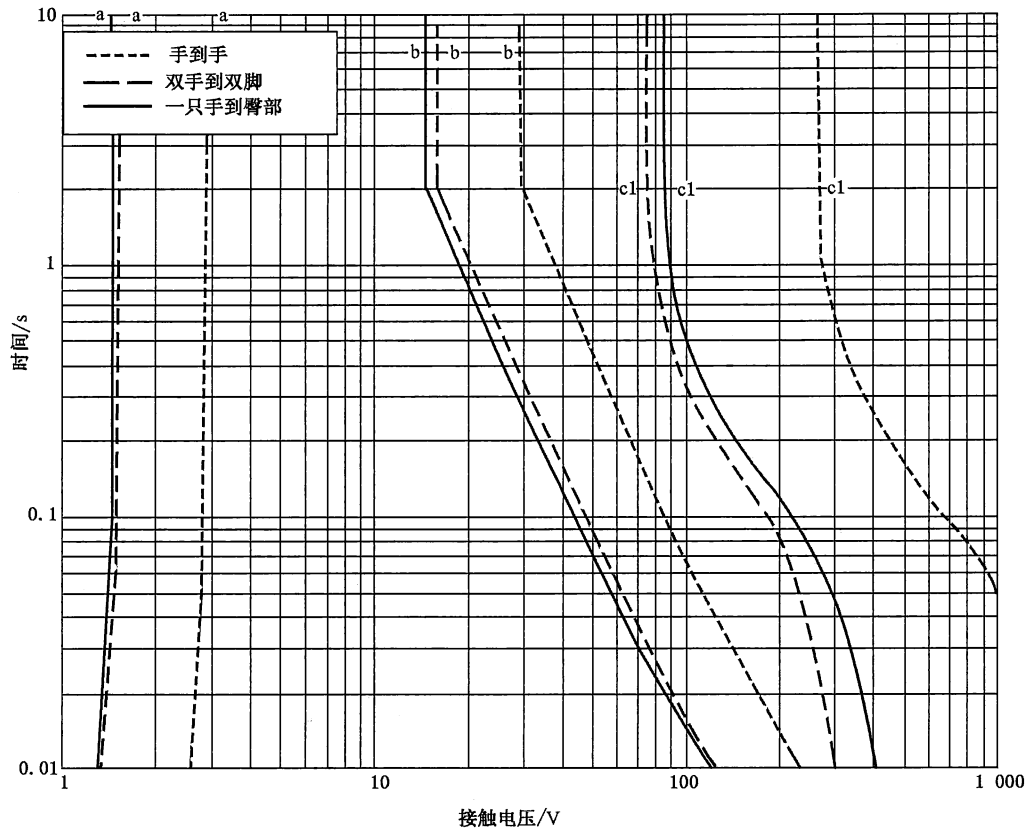


图 17 水湿润条件,大的接触表面积,直流电流对人效应的约定的时间/电压区域

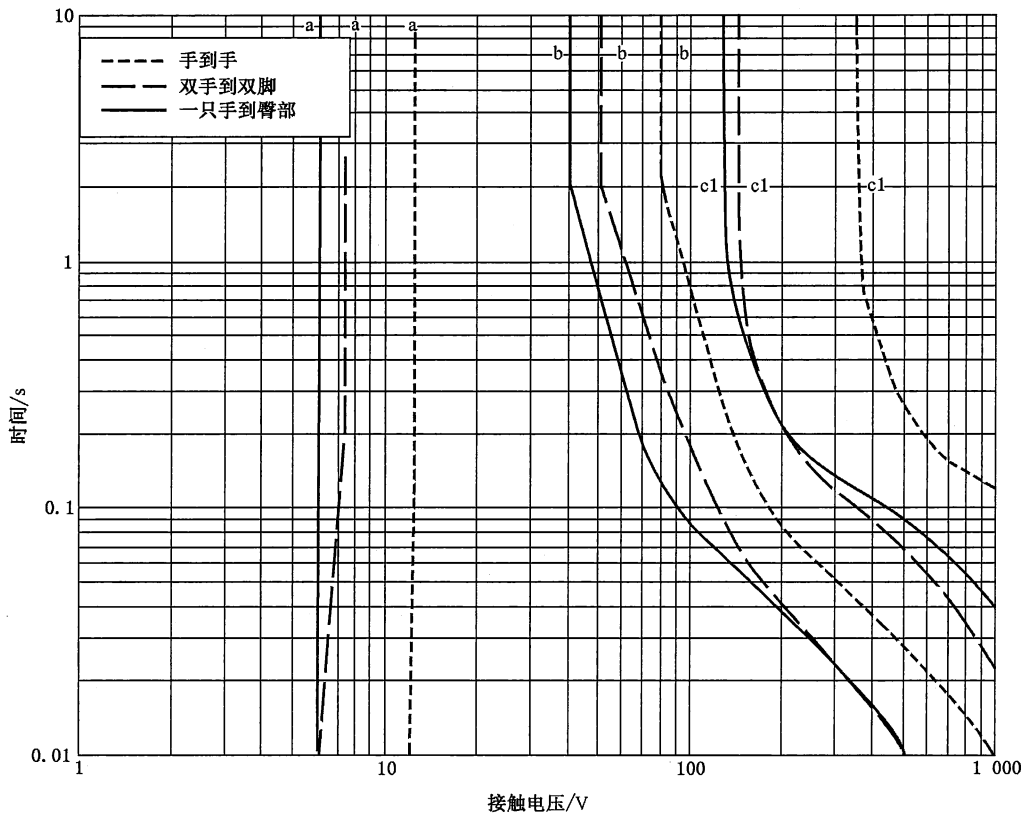


图 18 水湿润条件,中等接触表面积,直流电流对人效应的约定的时间/电压区域

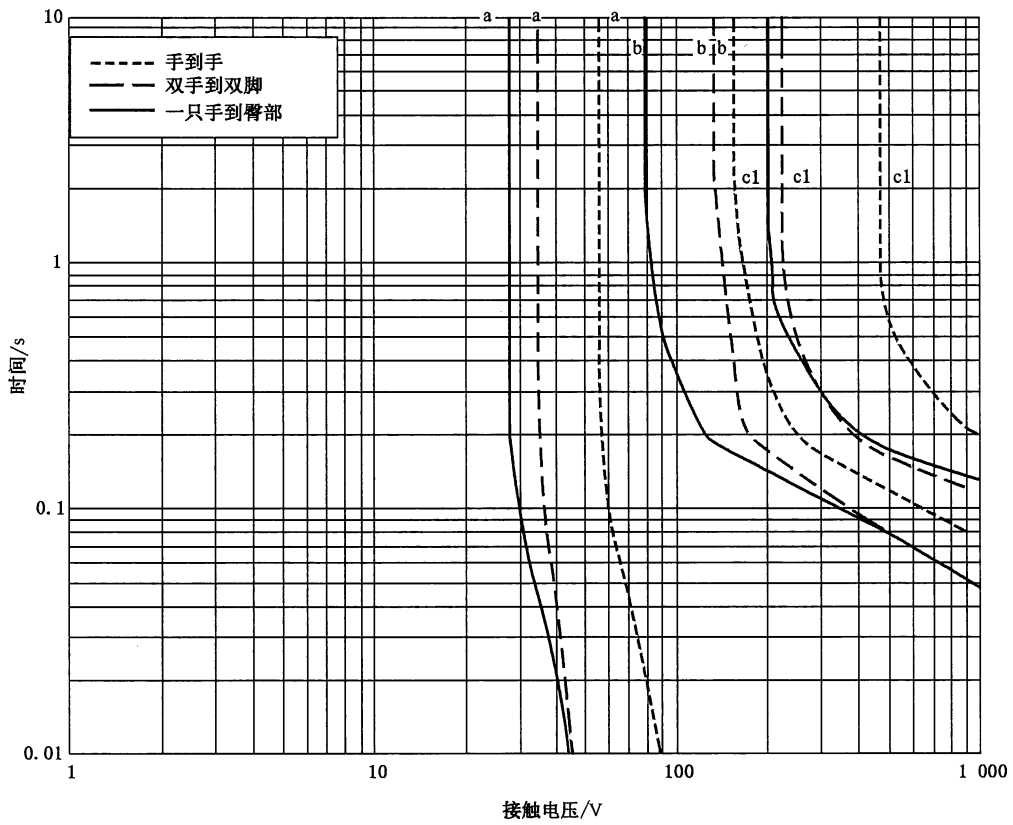


图 19 水湿润条件,小的接触表面积,直流电流对人效应的约定的时间/电压区域

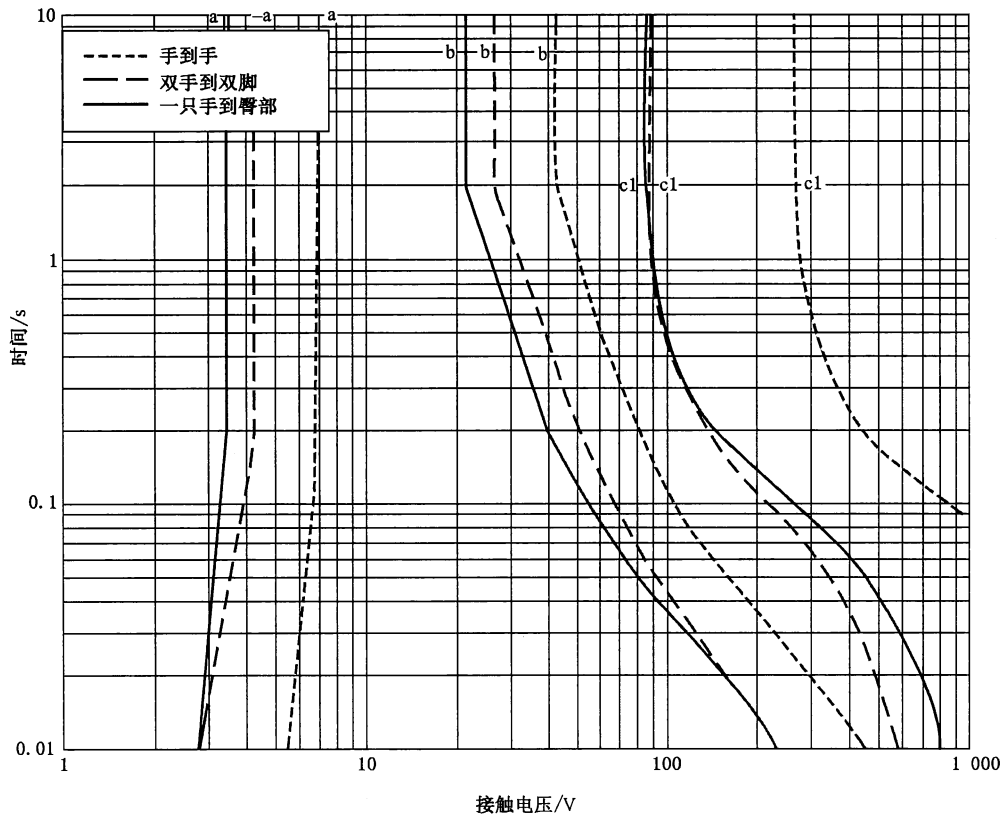


图 20 干燥条件,大的接触表面积,直流电流对人效应的约定的时间/电压区域

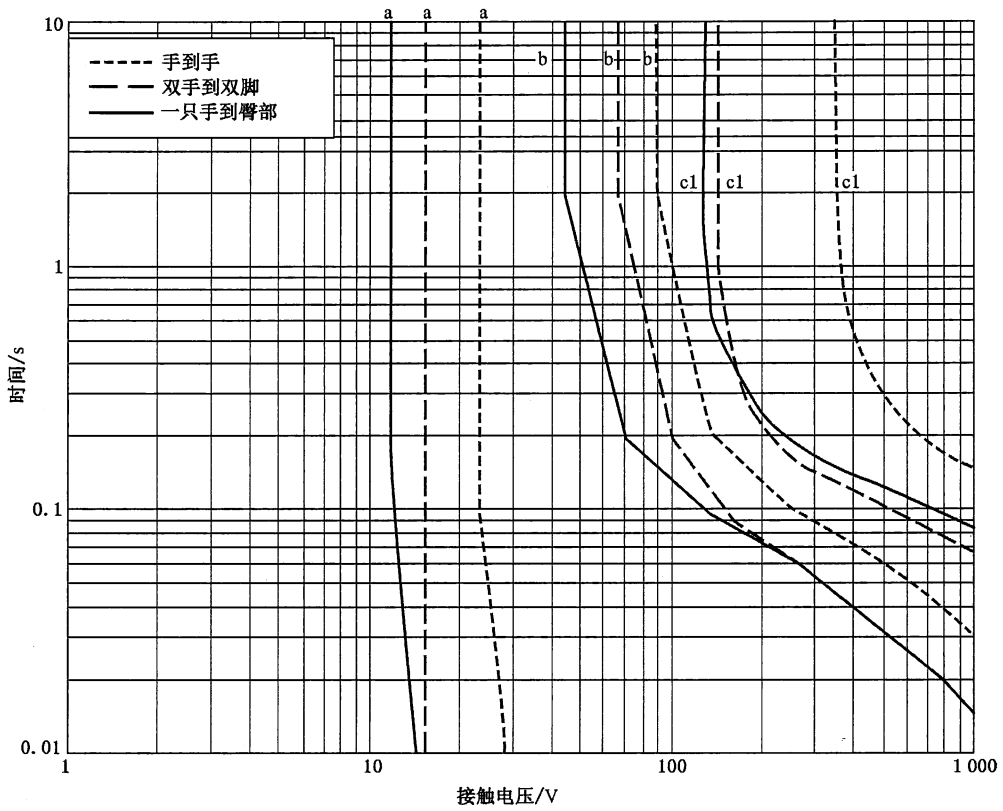


图 21 干燥条件,中等接触表面积,直流电流对人效应的约定的时间/电压区域

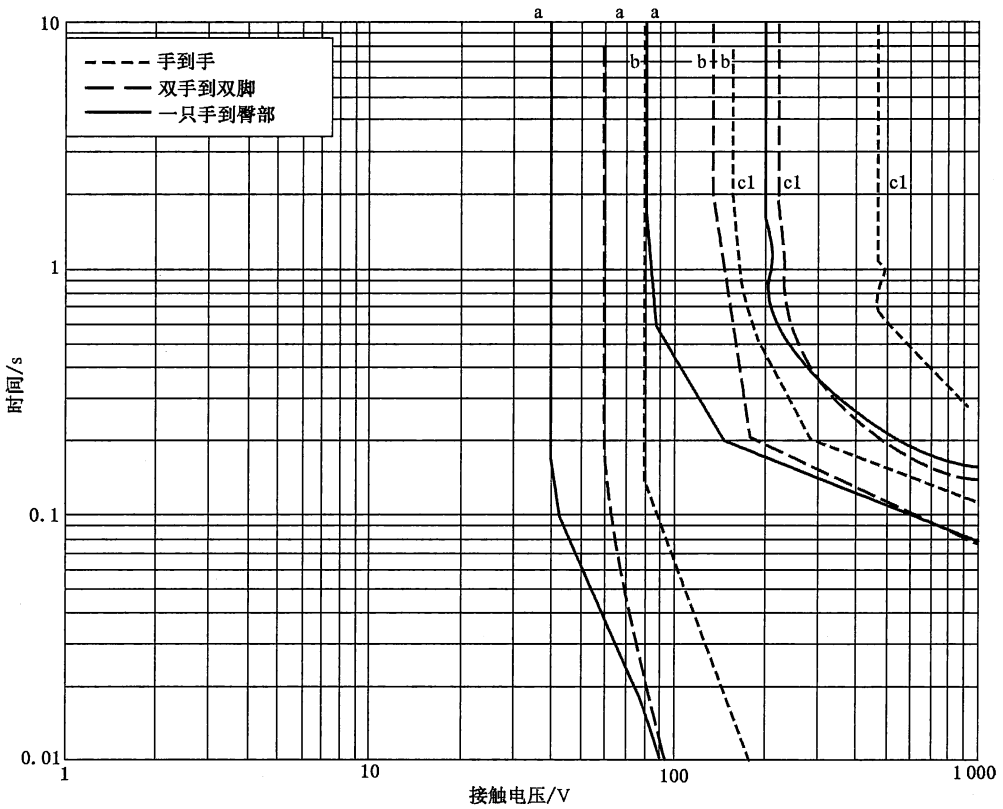


图 22 干燥条件,小的接触表面积,直流电流对人效应的约定的时间/电压区域

附 录 A  
(资料性附录)  
人 体 阻 抗

### A.1 人体阻抗值

GB/T 13870.1—2008 中的各表列出了电流路径为手到手,对于干燥、水湿润、盐水湿润的环境条件,人口的第 5、第 50 和第 95 百分序的人体总阻抗。而且考虑了全手大面积接触电极、中等接触面积和小的接触面积等接触情况。其中有些表中的数值是用于交流 50 Hz/60 Hz 电压,而另一些则用于直流电压。

本部分所研讨的数值仅是对应于人口的第 5 百分序的(表示 95% 以上的人口)人体阻抗值。此人口百分序对应的人体阻抗值小于比它高的人口百分序对应的人体阻抗值。因此,从安全观点来看,人口第 5 百分序的人体阻抗值被认为是保守的,因为它们对应的是有较高的电流流过人体。

当电压施加于人体时,皮肤许多局部的电气绝缘性能遭到击穿。这个过程导致皮肤总电阻降低,而且需经过一定时间,通常在超过几十毫秒后发生。电压改变越大,皮肤电阻的变化就越大。报告中所测得的人体阻抗数据资料适用于施加跨接电压于人体后在规定的时间内对人体阻抗进行的测量。例如,对尸体阻抗的测量是在接触电流流过 3 s 以后进行。当对志愿受试者测量时,进行测量的时间内人体阻抗有时从施加电压后仍处在继续降低的状态中,因此,必须考虑志愿者的不适和安全。它取决于对受试者潜在的危害,对志愿受试者的测量是在接触电流流过后 0.1 s 或 20 ms~25 ms 进行。用这些数值计算接触电压,可能是不准确性的一个来源,因为可能还没有达到稳定状态。而改变了的皮肤电阻可很快地返回到皮肤没有发生永久损伤的较低电压水平的电阻数值。

对于对应第 5、第 50 和第 95 百分序的人口,电流路径为手到手的人体阻抗,在相同的干燥条件、大的接触面积,但通过直流电流的(没有交流分量)电阻数值列于 GB/T 13870.1—2008 的表 10 中。

下列各表是运用 GB/T 13870.1—2008 中数据的示例。

**表 A.1 干燥条件,大的接触表面积,50 Hz/60 Hz 交流电流,路径为手到手的人体总阻抗  
(GB/T 13870.1—2008 中的表 1)**

| 接触电压/V | 不超过按百分序分布的阻抗值/ $\Omega$ |         |         |
|--------|-------------------------|---------|---------|
|        | 人口的 5%                  | 人口的 50% | 人口的 95% |
| 25     | 1 750                   | 3 250   | 6 100   |
| 50     | 1 375                   | 2 500   | 4 600   |
| 75     | 1 125                   | 2 000   | 3 600   |
| 100    | 990                     | 1 725   | 3 125   |
| 125    | 900                     | 1 550   | 2 675   |
| 150    | 850                     | 1 400   | 2 350   |
| 175    | 825                     | 1 325   | 2 175   |
| 200    | 800                     | 1 275   | 2 050   |
| 225    | 775                     | 1 225   | 1 900   |

表 A.1 (续)

| 接触电压/V | 不超过按百分序分布的阻抗值/ $\Omega$ |         |         |
|--------|-------------------------|---------|---------|
|        | 人口的 5%                  | 人口的 50% | 人口的 95% |
| 400    | 700                     | 950     | 1 275   |
| 500    | 625                     | 850     | 1 150   |
| 700    | 575                     | 775     | 1 050   |
| 1 000  | 575                     | 775     | 1 050   |
| 渐近值    | 575                     | 775     | 1 050   |

表 A.2 干燥条件,大的接触表面积,直流电流,路径为手到手的人体总阻抗  
(GB/T 13870.1—2008 中的表 10)

| 接触电压/V | 不超过按百分序分布的阻抗值/ $\Omega$ |         |         |
|--------|-------------------------|---------|---------|
|        | 人口的 5%                  | 人口的 50% | 人口的 95% |
| 25     | 2 100                   | 3 875   | 7 275   |
| 50     | 1 600                   | 2 900   | 5 325   |
| 75     | 1 275                   | 2 275   | 4 100   |
| 100    | 1 100                   | 1 900   | 3 350   |
| 125    | 975                     | 1 675   | 2 875   |
| 150    | 875                     | 1 475   | 2 475   |
| 175    | 825                     | 1 350   | 2 225   |
| 200    | 800                     | 1 275   | 2 050   |
| 225    | 775                     | 1 225   | 1 900   |
| 400    | 700                     | 950     | 1 275   |
| 500    | 625                     | 850     | 1 150   |
| 700    | 575                     | 775     | 1 050   |
| 1 000  | 575                     | 775     | 1 050   |
| 渐近值    | 575                     | 775     | 1 050   |

表 A.1 和表 A.2 显示的渐进线值是最小的人体阻抗值,此时皮肤阻抗完全被消除,例如当加在人体上的电压非常高时,皮肤被破坏,阻抗变为零。那么,此时整个人体阻抗等于人体的内电阻。

## A.2 人体阻抗的模型

用于这项分析中代表人身体的人体阻抗模型是一个三元件模型,由一个电阻与电阻、电容相并联的组件串联组成。人体的内部阻抗用串联电阻代表,并联的电阻与电容组件代表接触电流流进与流出皮肤处组合的皮肤阻抗。如果有两个或更多对电压敏感的电阻在不同的电压下运行,计算可能是很困难的,为了简化这样的计算,这里作如下假定:



- 电流流入皮肤与流出皮肤处在接触面积、潮湿程度等都是相同的,这使其成为对称的阻抗模型;
- 或者,当一端的皮肤接触面的阻抗远大于另一端皮肤接触面的阻抗,因此皮肤接触面积较低的这端阻抗可以被忽略,从而只计算剩下一端对电压敏感的电阻。

独立处理电流流入皮肤与流出皮肤的 5 元件组成的人体阻抗模型能具有更多用途,因此更有益于解决更实际的问题。但涉及解决这种模型的数学复杂性将会提升到较高的水平。

图 A.1 示出用于电流路径为手到手所有测量人体总阻抗的模型。两只手皮肤与电极的接触是相同的,因此,在模型中可将它们组合成为电容与电阻单个并联的组件(当两个皮肤阻抗相同时,在图 A.1 左手下边的电路图上的 a-b 线,由于各分量是平衡的,不会有电流流过;因此,这条等电位的 a-b 线可以取消)。因为两只手的电容是串联的,3 元件模型中的皮肤电容值是每只手实际皮肤接触电容值的一半。模型中的皮肤电阻值是每只手实际皮肤接触电阻值的两倍。模型中跨接于皮肤的电压是每只手实际跨接于皮肤的接触电压的两倍。模型中的串联电阻等于人体实际的从手到手的内电阻(表中列出的人体阻抗的渐近线值)。

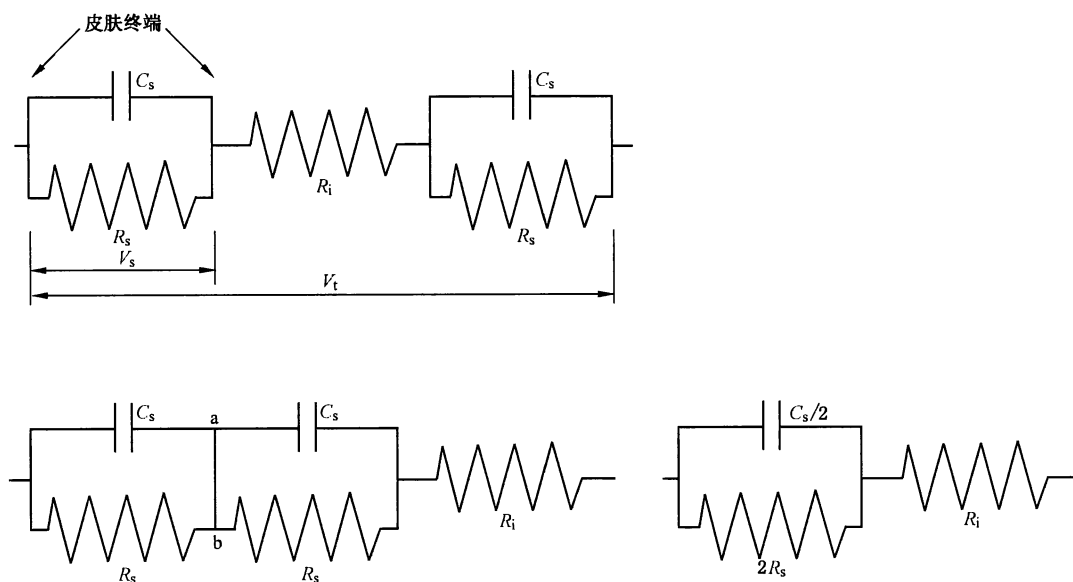


图 A.1 电流路径为手到手的人体阻抗模型

图 A.2 中四处手/脚的皮肤与电极的接触是相同的。因此,它们可被组合成为模型中电阻与电容单个并联的组件。当皮肤的阻抗都相同时,示于左下电路图上的 a-b 线,由于各分量是平衡的,不会有电流流过,因此这条等电位的 a-b 线可以取消。模型中的皮肤电容等于每只手的皮肤接触电容。模型中的皮肤电阻等于每只手皮肤的实际接触电阻。跨接于皮肤的电压等于实际跨接于每只手皮肤的接触电压的二倍。模型中的串联电阻等于从手到手的人体内电阻(人体阻抗的渐近线值)并按 GB/T 13870.1—2008 的图 3 导出一系数修正后的数值,该系数是双手到双脚的电阻被以手到手的电阻除得的比值。

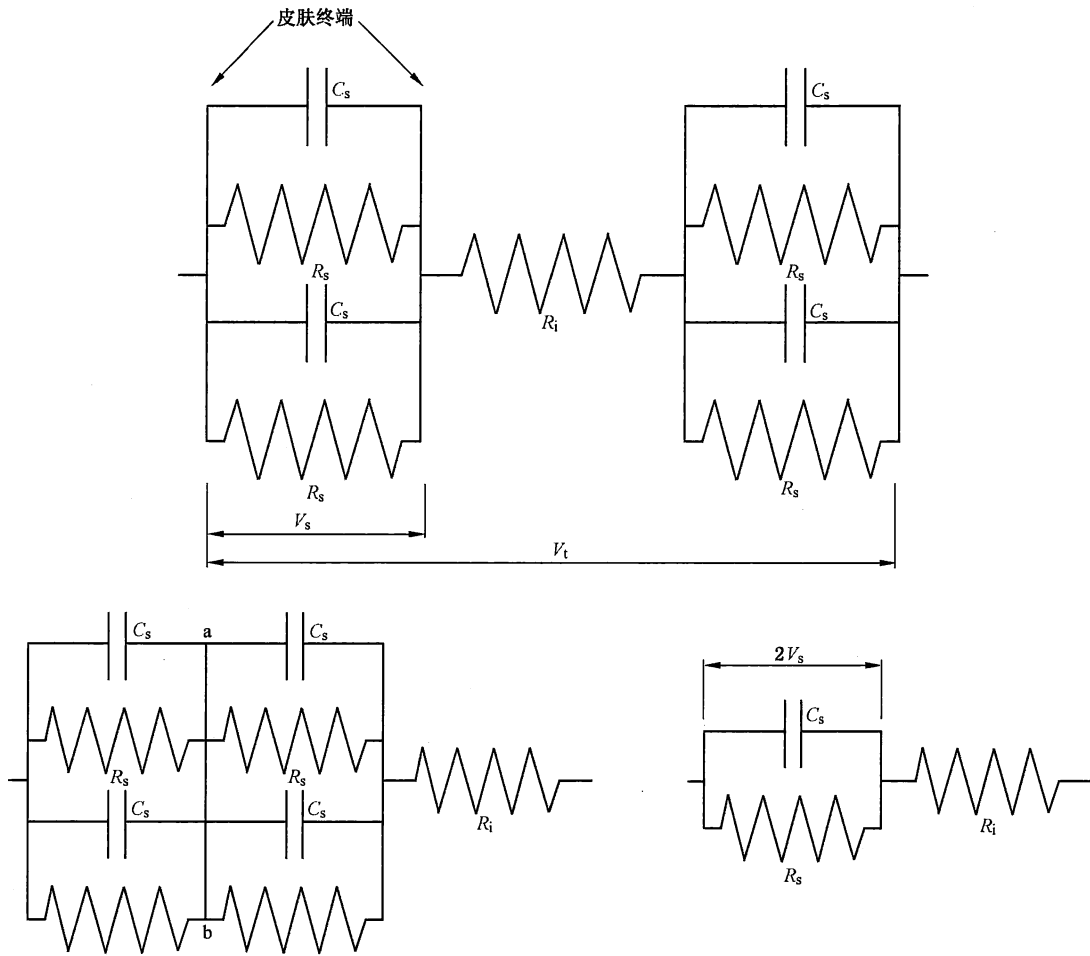


图 A.2 双手到双脚的人体阻抗模型

图 A.3 中,臀部皮肤与电极接触的阻抗相对于手的皮肤接触阻抗来说,可设定为很低的数值。因此臀部的阻抗在模型中是可忽略的。在模型中皮肤电容等于手的实际接触的电容。在模型中皮肤电阻等于手的实际接触的电阻。在模型中跨接于皮肤的电压等于实际跨接于手的皮肤电压。在模型中的串联电阻,等于手到手的人体内部阻抗(人体阻抗的渐近线值)并按 GB/T 13870.1—2008 图 3 导出的系数修正之后得到的数值,该修正系数是手到躯干的电阻除以手到手的电阻的比值。

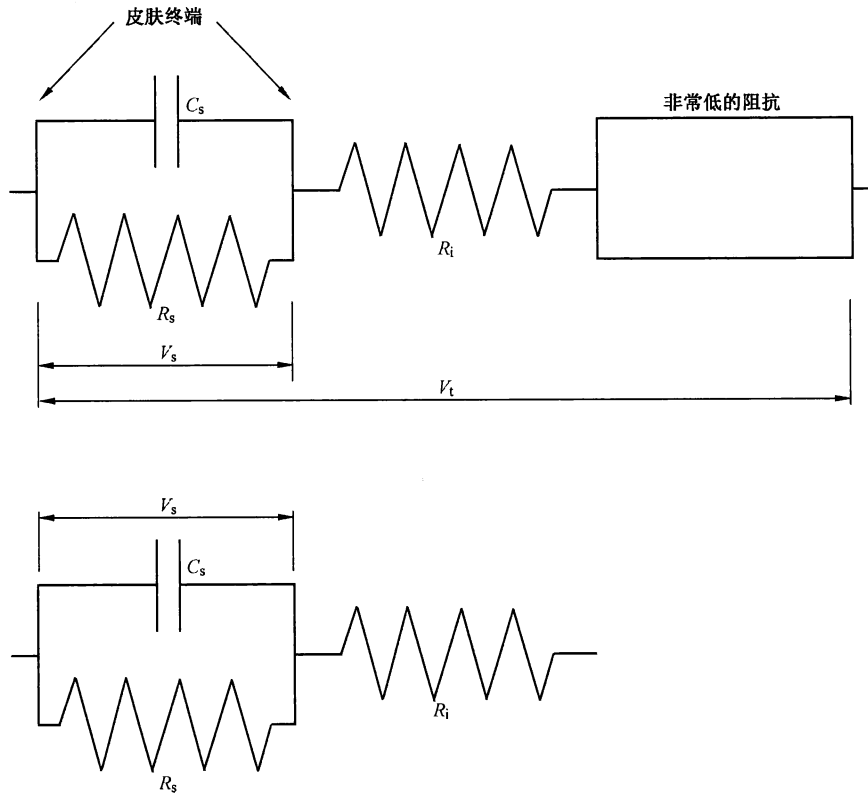


图 A.3 手到臀部的阻抗模型

到手路径的人体内电阻值是设定等于 GB/T 13870.1—2008 各表中人体阻抗的渐近线值。每一表中的渐近线值是在高电压端的最低人体阻抗值,能假定皮肤对人体总阻抗数值没有影响。当接触电流流过的路径改变时,要按 GB/T 13870.1—2008 图 3 中提出的比值进行修正。

随皮肤接触面积和潮湿程度以及与接触有关的混杂物等因素而定的皮肤电阻值的变化范围可跨越一个很广阔的区域。

**附 录 B**  
(资料性附录)

**接触电压——用 GB/T 13870.1—2008 中表列人体阻抗值和人体电流限值来估算惊吓、强烈肌肉反应、心室纤维性颤动接触电压阈值的方法的说明**

**B.1 概述**

GB/T 13870.1—2008 含有关于人体阻抗和接触电流阈值的资料。本附录分析提出了综合人体阻抗和电流阈值推导出接触电压阈值的方法,这是与 GB/T 13870.1—2008 完全一致的。

本资料性附录在于复查和说明基于 GB/T 13870.1—2008 所研究的新的接触电压阈值的计算方法。

按照人体阻抗模型,身材高大者较之矮小者趋向于采用较低的内阻抗值。已进行的研究表明,人体阻抗与人体重量实际上基本无关。这些变量细微相依的关系使得按接触电流估算接触电压阈值的普通统计学方法是不适宜的。本部分所用的方法是设定独立利用 GB/T 13870.1—2008 中的第 5 百分序的数字。这可能是更合理而较不保守的计算方法。

**B.2 计算方法**

**B.2.1 参数的数量**

需要考虑的是对接触电压阈值有影响的变量进行各种组合能得到很大的组合量。

按照 GB/T 13870.1—2008,许多参数影响人体阻抗的数值。本分析中考虑的具体影响参数列示于表 B.1 和表 B.2 中。

**表 B.1 GB/T 13870.1—2008 所考虑的影响人体阻抗的参数特性和数量**

| 影响的参数   | 类型   | 参数的数量 | 累积组合的数量 |
|---------|--|-------|---------|
| 电流类型    | 交流<br>直流   | 2     | 2       |
| 电流路径    | 手到手<br>双手到双脚<br>一只手到臀部   | 3     | 6       |
| 皮肤状况    | 干燥<br>水湿润<br>盐水湿润  | 3     | 18      |
| 皮肤接触表面积 | 大的接触面积<br>中等接触面积<br>小的接触面积   | 3     | 54      |
| 接触电压    | 25 V, 50 V, 75 V, 100 V, 125 V, 150 V, 175 V,<br>200 V, 225 V, 400 V, 500 V, 700 V 和 1 000 V | 13    | 702     |
| 人口的百分序  | 5 <sup>th</sup>  | 1     | 702     |

此外,在接触电压的计算中还要采用其他的参数,例如:

表 B.2 增加的影响人体阻抗的参数

| 影响的参数                          | 类型   | 参数的数量 | 累积组合的数量 |
|--------------------------------|--|-------|---------|
| 生理效应阈值                         | 惊吓反应<br>强烈的肌肉反应<br>心室纤维性颤动   | 3     | 2 106   |
| 皮肤电容                           | 0.01 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$<br>0.03 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$<br>0.05 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ | 3     | 6 318   |
| 电流流过人体时间*                      | 0.01 s, 0.02 s, 0.06 s, 0.1 s, 0.2 s,<br>0.6 s, 1 s, 2 s, 7 s 和 10 s                               | 10    | 63 180  |
| * 为了在对数曲线上取得好的精度,列出的时间值是经过选择的。 |  |       |         |

这意味着需要进行 63 180 次单次计算。从不同离散数值的基础数据进行大量计算,最好的办法是采用计算机电子制表软件。

### B.2.2 一般的方法

GB/T 13870.1—2008 提供的表 B.1 列出的所有情况电流路径仅为手到手的人体阻抗值。

因此,对另外两种电流路径(双手到双脚和手到臀部)的各种皮肤接触情况和各种接触电压,所有的人体阻抗值都必须予以确定。这可以从这些估算值中利用内推法计算各种接触电流阈值的接触电压。其数值对照表是按对应持续时间编制的。

### B.2.3 前提与计算范围

#### B.2.3.1 皮肤电容的确定

一项工作是评定从参考文献[3]~[8]的实验数据所获知的皮肤电容。其电容的实验数值是在  $0.01 \mu\text{F}/\text{cm}^2 \sim 0.05 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  的范围内。

考虑到这个范围,在进行计算中考虑了下面三个电容数值:

——最小值:  $0.01 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ ;

——中间值:  $0.03 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ ;

——最大值:  $0.05 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ 。

由于有了这些数值和皮肤的接触面积,使得有可能获得一系列与各种接触面积对应的皮肤电容数值。接触电压的计算结果表明遍及这一系列的皮肤电容存在着细小的差异,因此,要选一个皮肤电容数值以与 GB/T 13870.1—2008 提供的人体阻抗值相一致。

#### B.2.3.2 皮肤电阻为时间的函数

在电流开始流过皮肤之前,施加于皮肤上的电压为零,但是在最初的瞬间,接触电压一呈现,电流就开始流动。它需经过几分之一秒的时间,以便皮肤电阻适应所跨接于它的电位差。从测试结果得到的估算是,按指数曲线递减变化的皮肤电阻,可以为这种现象提供一个可接受的近似值。本部分使用的时间常数为 50 ms[9],见图 B.1。

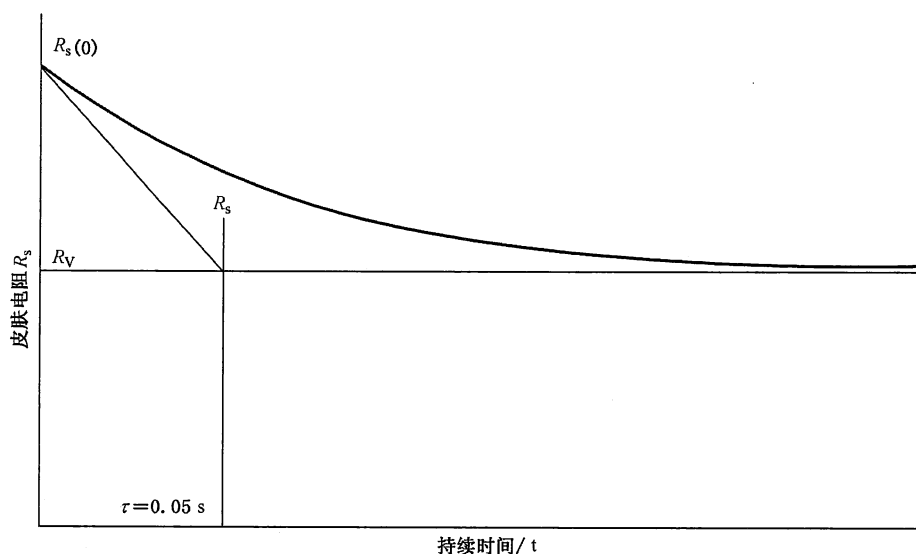


图 B.1 预计皮肤电阻变化为电击持续时间的函数

$$[R_s(t) - R_v] = [R_s(0) - R_v]e^{-t/0.05} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

- $R_s(0)$ ——未施加接触电压的皮肤电阻；
- $R_v$  ——在施加电压后无限长时间的皮肤电阻；
- $\tau$  ——时间常数(图中)。

如此,  $R_s$  数值也是电流流过人体持续时间的函数。  $R_s(t)$  数值由式(B.2)求得：

$$R_s(t) = R_v + [R_s(0) - R_v]e^{-t/0.05} \dots\dots\dots (B.2)$$

起始电流将随着皮肤电阻适应最后皮肤电压的调整而改变。在皮肤电阻完全调整到位以前的短暂时间内此电流停止。此计算式是用于电流流动开始与电流被断开瞬时之间的这段时间。这将主要应用于不大于三倍时间常数短的持续时间内进行校正。

### B.2.3.3 测量人体阻抗的方法

由 GB/T 13870.1—2008 提出的人体阻抗值是以符合长时间持续接触为条件的。皮肤电阻取决于直接施加于皮肤上的电压。但是在严酷条件(例如,水湿润皮肤和大的皮肤接触面积)接触“高”电压的情况下,在志愿者身上进行人体阻抗的测试是非常疼痛的。为了避免这些人员受到太大的疼痛和风险,要减少接触电压的施加时间。在这种情况下所测得的阻抗可能高于实际阻抗,此实际阻抗是假定跨接于皮肤上的电压持续一较长时间所测得的数值。

### B.2.3.4 人体阻抗的限值

GB/T 13870.1—2008 提供了人体阻抗,但不是所有为计算对应于生理效应的接触电压需要的数值都已提供。只能间接地计算这些数据。

- a) 已进行的人体阻抗的测量是从最小电压 25 V 开始的。但是按照 B.2.3.2 起始电阻  $R_0$  数值是必需求得的。本部分为了对 0 V 时人体阻抗数值保守的估算,从 25 V 和 50 V 电压起采用线性外推法；
- b) 对于严酷条件(水湿润皮肤或盐水湿润皮肤),没有在接触电压超过 200 V 的情况下进行过阻抗测量。由于志愿者具有非常强烈的疼痛感,这些测试条件是太严酷了。当接触电压在 1 000 V 数量级时,只剩下了内部阻抗,而不应当再考虑皮肤阻抗。

### B.2.3.5 内推法

流过人体的电流与各种生理效应电流阈值进行对比,绘于对数坐标图上所计算的数值之间可能需

要用内推法。

### B.2.3.6 精度

由于基础数据统计学的特性,由计算导出的接触电压阈值的精度无法进行评估。

## B.3 计算

### B.3.1 交流电流阻抗的计算算法

B.3.1 的所有公式,都是从描述于附录 A 各种电流路径的阻抗模型直接推导得来的。

#### B.3.1.1 手到手的路径

##### a) 手到手的电流路径

计算的出发点是要与 GB/T 13870.1—2008 提供的数值一致,对应于手到手电流路径的人体阻抗  $Z_{h-h}$  和各自的接触电压  $V_{th-h}$  (手到手的路径)。

手到手的电流  $I_{h-h}$  按式(B.3)求得:

$$I_{h-h} = \frac{V_{th-h}}{Z_{h-h}} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

进一步计算其他的电流路径相应的数值,需要计算人体阻抗不同组成部分的数值。

##### b) 人体内电阻

此内电阻  $R_{ih-h}$  对应的是位于两手之间身体组织的电阻。当电流横向流通时,它们流过的是包含手臂和躯干的身体组织。测量这样的电阻是困难的,不过进行间接估算还是可能的。比较高的电压对手到手路径的阻抗进行测量达到渐近线值,就相当于这是所需测定电流路径的内电阻。由于在此较高电压下皮肤被击穿,皮肤电阻与皮肤电容全部被旁路,这一事实可说明测定内电阻的机理。

从实用观点来看,认为内电阻就等于在 1 000 V 数量级时所测得的人体总阻抗。

$$R_{ih-h} = Z_{h-h} \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

##### c) 皮肤电容

估算皮肤阻抗数值是必需的,为此需要估算皮肤电容  $C_s$ 。皮肤电容可从单位面积的皮肤电容变量  $C_s/S_s$  ( $0.01 \mu\text{F}/\text{cm}^2 \sim 0.05 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ ) 和接触表面积  $S_c$  按式(B.5)计算求得:

$$C_s = S_c \times \frac{C_s}{S_s} \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

##### d) 皮肤电阻

皮肤电阻的计算是更为困难的,而且必须用逐步近似法求得。这可用计算机软件计算来解决。皮肤电阻是人体总阻抗的一部分。但是这个电阻随直接施加于皮肤的电压而定,它取决于它本身自人体总阻抗分离出的数值。

需探求皮肤电阻  $R_s$  的正确数值,比如,按式(B.6)求得的  $Z_{h-h}$ ,它就成为等于 GB/T 13870.1—2008 发布的数值:

$$Z_{h-h} = \frac{R_{ih-h} \sqrt{(2\pi f)^2 + [(R_{ih-h} + 2R_s) / (R_{ih-h} \times 2R_s \times C_s/2)]^2}}{\sqrt{(2\pi f)^2 + [1/(2R_s \times C_s/2)]^2}} \quad \dots\dots (B.6)$$

式中:

$f$ ——流过人体电流的频率。

注:对于某些情况,因为要与 GB/T 13870.1—2008 提供的数值相匹配,对  $R_s$  值正确估算已是不可能的。这是因为皮肤容抗值变得非常小。为此采用了皮肤电容的最小值。

$Z_{h-h}$ 的公式随  $R_{ih-h}$  而变,它相应于是手到手电流路径的内电阻。

e) 皮肤电阻的再调整

所得到  $R_s$  是对应于接触电压长时间持续的皮肤电阻(已认定人体阻抗值  $Z_{h-h}$  是对应于长的接触电压持续时间,时间长到足够使  $R_s$  调整自己适应于直接施加于皮肤的电压达到的数值)。对于较短的持续时间(小于三倍时间常数),皮肤电阻没有足够时间得到完全调整。计算修正曲线如 B.2.3.2 所示为时间的函数。

$$R_s(t) = R_s + [R_s(0) - R_s]e^{-t/0.05} \dots\dots\dots (B.7)$$

为了应用这一算法,需要估算  $R_s(0)$ ,它是电击前的皮肤电阻。

f) 估算初始皮肤电阻

$Z_{h-h}$  为  $V_i$  的函数,所给定  $Z_{h-h}$  曲线的线性外推法提供了  $Z_{h-h}(0)$  的估算值,它可用来计算初始皮肤电阻  $R_s(0)$ 。

图 B.2 使得能用外推法求出手到手路径的阻抗初始值  $Z_{h-h}(0)$ 。线性外推法提供了手到手路径在 0 V 时人体阻抗值为 2 125  $\Omega$ 。

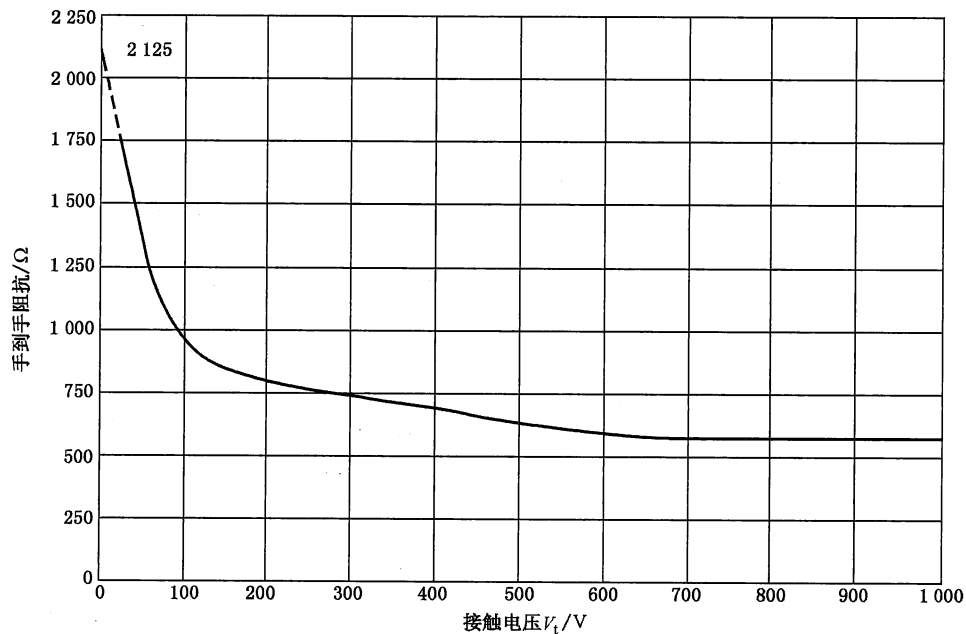


图 B.2 手到手路径、干燥条件、大接触面积在 0 V 时人体阻抗用外推法的示例

g) 皮肤阻抗

当已知皮肤电阻和皮肤电容时,就可能用式(B.8)估算电流流过的某一时刻的皮肤阻抗  $Z_s(t)$ 。

$$Z_{sh-h}(t) = \frac{(1/C_s)}{\sqrt{(2\pi f)^2 + \{1/[R_s(t) \times C_s]\}^2}} \dots\dots\dots (B.8)$$

h) 皮肤电压

求得了皮肤阻抗值,就可用下式估算直接施加于皮肤上的电压  $V_s(t)$  (在皮肤引线端子上)。此电压取决于流过皮肤的电流,且此电流路径为手到手,数值则等于由 a) 项计算得到的手到手的电流。

$$V_s(t) = Z_s(t) \times I_{h-h} \dots\dots\dots (B.9)$$

这里的  $V_s(t)$  能用于流过人体其他电流路径的求值。

所有这些计算需要对各种数值和下列各种参数的组合重复进行:

- 接触电压;



- 皮肤电容密度；
- 皮肤条件(干燥,水湿润,盐水湿润)；
- 电流流过的时间。

**B.3.1.2 双手到双脚的路径**

a) 计算内电阻

对于不同电流路径,其内部身体组织电阻有不同的数值。电流路径为双手到双脚的新阻值  $R_{ih-f}$  可用下面的方法从对应的手到手电流路径的内电阻 ( $R_{ih-h}$ ) 进行估算。

GB/T 13870.1—2008 提供的所有总阻抗为手到手电流路径的数值。当电流横向正交通过内部组织时,对应的是电流通过内部组织的双臂和躯干部分(见图 B.3)。

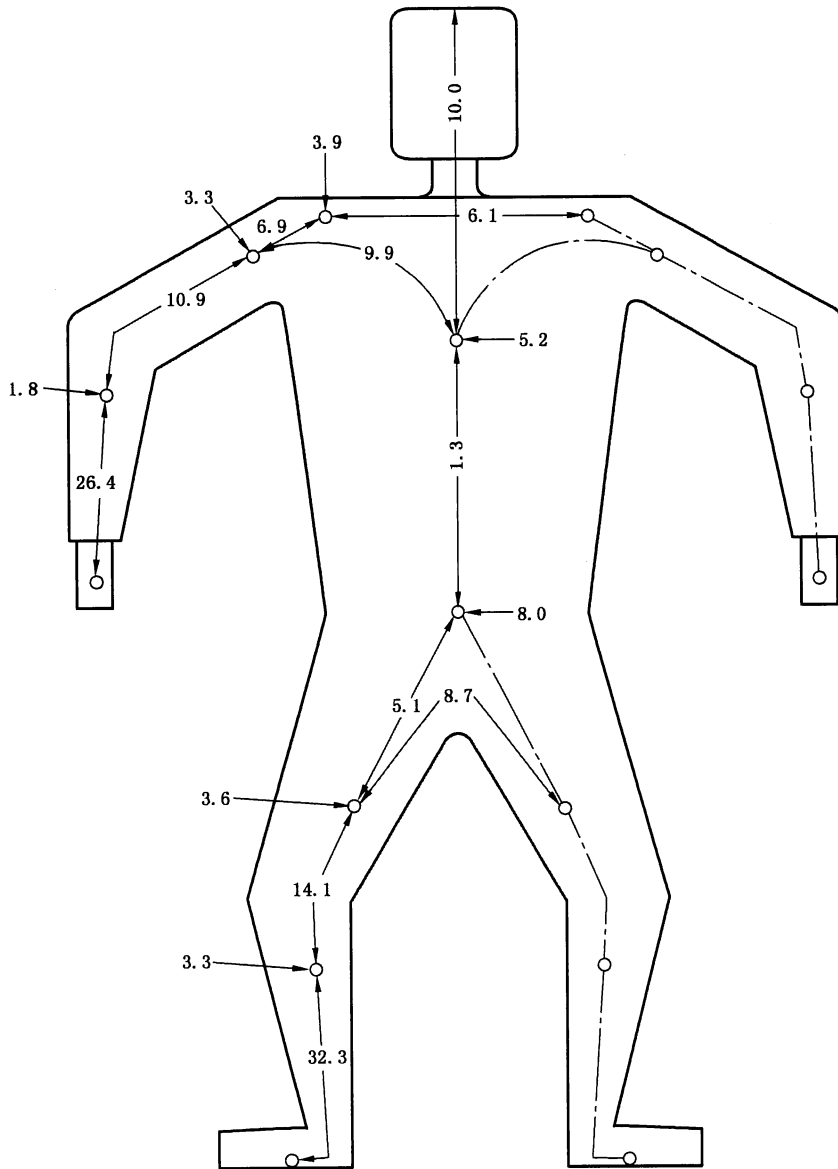


图 B.3 有关身体各部分人体内电阻的百分率

GB/T 13870.1—2008 也提供了利用手到手电流路径内电阻的百分率求取对应于各种电流路径内电阻值的可能性。

——手到手电流路径的百分率：

$$26.4\% + 10.9\% + 6.9\% + 6.1\% + 6.9\% + 10.9\% + 26.4\% = 94.5\%$$

——双手到双脚路径的百分率：

$$\frac{(26.4\% + 10.9\% + 9.9\%)}{2} + 1.3\% + \frac{(5.1\% + 14.1\% + 32.3\%)}{2} = 50.65\%$$

以对应于手到手电流路径为基准,对于双手到双脚电流路径,其内阻抗表达为  $50.65\%/94.5\% = 0.536$  乘以手到手路径的内电阻值。

这就可能从手到手电流路径的内电阻  $R_{ih-h}$  估算人体双手到双脚电流路径内电阻  $R_{ih-f}$ ,如式 (B.10) 所示:

$$R_{ih-f} = R_{ih-h} \times 0.536 \quad \dots\dots\dots (B.10)$$

b) 双手到双脚的电流

从计算所得的手到手电流路径的皮肤阻抗值  $Z_{sh-h}(t)$  和手到手电流路径的皮肤电压  $V_s(t)$ , 就可用式 (B.11) 计算流过人体双手到双脚的电流值:

$$I_{ih-f} = 2 \times \frac{V_s(t)}{Z_{sh-h}(t)} \quad \dots\dots\dots (B.11)$$

这里的系数 2 是由于实际流过躯干的电流是二倍于流过一支手的电流,因为在这种情况下双手是在相同电压与带电体相接触(见图 A.2 所示模型)。

c) 总阻抗

现在有可能用式 (B.12) 估算新的人体总阻抗值:

$$Z_{ih-f} = \frac{R_{ih-f} \sqrt{(2\pi f)^2 + \{[R_{ih-f} + R_s(t)]/[R_{ih-f} \times R_s(t) C_s]\}^2}}{\sqrt{(2\pi f)^2 + \{1/[R_s(t) C_s]\}^2}} \quad \dots\dots\dots (B.12)$$

很明显,双手到双脚人体阻抗新的数值与在相同电压下从手到手电流路径所计算的数值不相对应。而新的接触电压值则对应于从双手到双脚电流路径估算得到的接触电压。

d) 接触电压

新接触电压  $V_{ih-f}$  可用式 (B.13) 进行估算:

$$V_{ih-f} = Z_{ih-f} \times I_{ih-f} \quad \dots\dots\dots (B.13)$$

对前面所述的各个参数必须再次进行这些计算。

**B.3.1.3 一只手到臀部的路径**

a) 计算内电阻

以 B.3.1.2a) 阐明的相似方法,可从相对应的手到手电流路径的内电阻估算特殊电流路径的人体内电阻。

从一只手到臀部电流路径内电阻的百分率如下:

$$26.4\% + 10.9\% + 9.9\% + 1.3\% = 48.5\%$$

从一只手到臀部电流路径的内阻抗数值表述为:  $48.5\%/80.7\% = 0.601^{2)}$  乘以相对应的手到手电流路径的内电阻。

因此,就可从手到手电流路径的内电阻  $R_{ih-h}$  估算人体单手到臀部电流路径的内电阻  $R_{ih-s}$ ,见

2) “80.7%”来源不详。根据 B.3.1.2a), 参照手到手电流路径的百分率,似应为 94.5%。则此处应为  $48.5\%/94.5\% = 0.513$ 。式 (B.14) 中系数应为 0.513。

式(B.14):

$$R_{ih-s} = R_{ih-h} \times 0.601 \quad \dots\dots\dots (B.14)$$

b) 总阻抗

计算方法类似于双手到双脚路径的计算,但做些修改。

人体总阻抗的新数值用式(B.15):

$$Z_{h-s} = \frac{R_{ih-s} \sqrt{(2\pi f)^2 + \{[R_{ih-s} + R_s(t)]/[R_{ih-s} \times R_s(t) C_s]\}^2}}{\sqrt{(2\pi f)^2 + \{1/[R_s(t) C_s]\}^2}} \quad \dots\dots\dots (B.15)$$

就手到臀部电流路径而论,人体手到臀部电流路径新的阻抗值不对应于以相同的接触电压从手到手电流路径计算所得数值。

c) 手到臀部电流

从手到手电流路径计算所得的皮肤阻抗值  $Z_{sh-h}(t)$  和从手到手电流路径计算所得的皮肤电压  $V_s(t)$ , 就可以式(B.16)估算流过人体手到臀部相对应的电流值。

$$I_{h-s} = \frac{V_s(t)}{Z_{sh-h}(t)} \quad \dots\dots\dots (B.16)$$

在这种情况下,流过躯干的电流等于流过手的电流(见图 A.3 所示模型)。

d) 接触电压

此新的接触电压  $V_{th-s}$  用式(B.17)估算:

$$V_{th-s} = Z_{h-s} \times I_{h-s} \quad \dots\dots\dots (B.17)$$

应对上面所述的各种参数进行新的计算。

**B.3.2 计算交流电压阈值的算法**

**B.3.2.1 手到手路径**

已经对  $Z_{h-h}$  和  $I_{h-h}$  的各种接触电压值  $V_{th-h}$  做出了估算,就可绘制示出流过人体的电流为接触电压  $V_{th-h}$  函数的图表。

此外,需要补加所研究的对应于各种生理效应的最小阈值。对于手到手电流路径,阈值如表 B.3 中所示。

**表 B.3 电流路径为从手到手,对应所研究的各种电流效应电流持续时间的最大交流电流阈值**

| 电流阈值/mA | 0.01 s | 0.02 s | 0.06 s | 0.1 s | 0.2 s | 0.6 s | 1 s | 2 s | 6.8 s | 10 s |
|---------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|------|
| 惊吓反应    | 0.5    | 0.5    | 0.5    | 0.5   | 0.5   | 0.5   | 0.5 | 0.5 | 0.5   | 0.5  |
| 强烈肌肉反应  | 200    | 135    | 73     | 55    | 37    | 20    | 15  | 10  | 5     | 5    |
| 心室纤维性颤动 | 1 250  | 1 238  | 1 175  | 1 000 | 650   | 200   | 125 | 105 | 100   | 100  |

当电流持续时间为 200 ms 时,接触电流线与 0.5 mA 惊吓反应(SR) 电流阈值曲线相交于 0.5 V, 与 37 mA 肌肉效应(ME)电流阈值曲线相交于 35 V,与 650 mA 心室纤维性颤动(VF)电流阈值曲线相交于 438 V。

此接触电流是接触电压和对应的人体阻抗特性的函数。

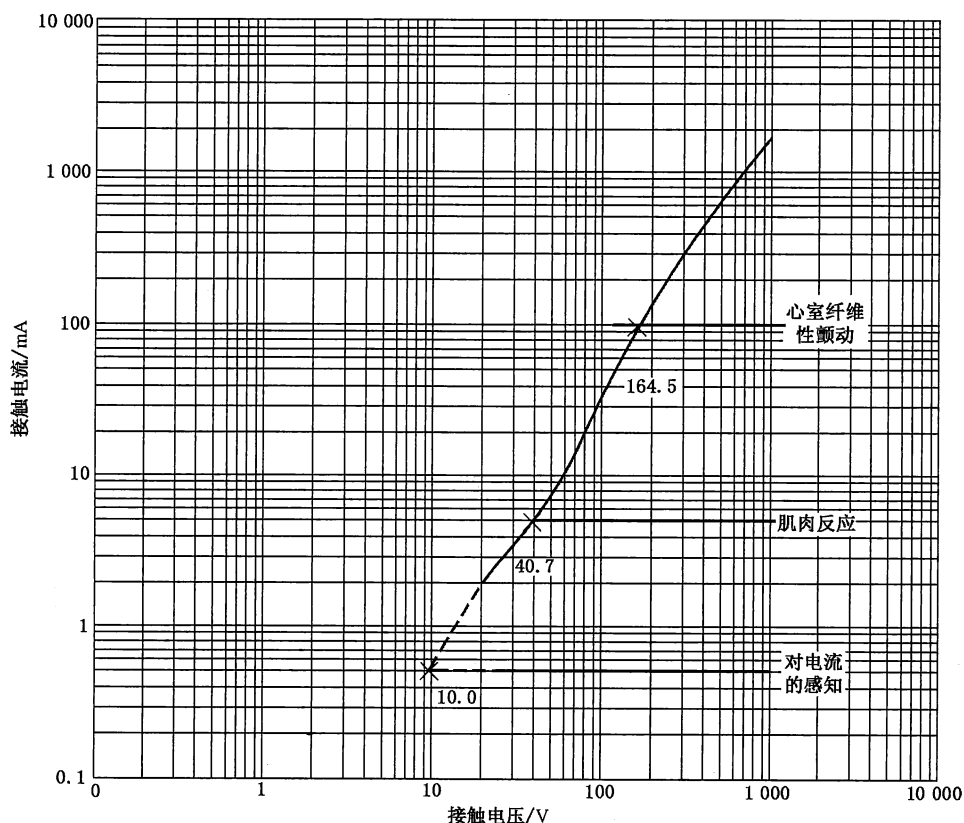


图 B.4 电流路径为手到手,大的接触面积和干燥条件,在电流持续时间 10 ms 时交流电流的强烈肌肉反应和心室纤维性颤动阈值的估算示例图

在图 B.4 所给的示例中,在对数-对数坐标系统绘制的曲线,好像是由直线构成的。如此利用对数的内插法,可足以计算对应于这些曲线相交点的数值。

对下列参数各种数值都应进行上述所有的计算:

- 皮肤状态(干燥、水湿润、盐水湿润);
- 皮肤接触面积(小的、中等、大的);
- 流过电流的持续时间。

### B.3.2.2 双手到双脚路径

类似的方法适用于流过人体这一电流路径的计算。最小电流阈值的各种数值列示于表 B.4:

表 B.4 电流路径为双手到双脚,对应于所研究的各种电流效应电流持续时间的最大交流阈值

| 电流阈值/mA | 0.01 s | 0.02 s | 0.06 s | 0.1 s | 0.2 s | 0.6 s | 1 s | 2 s | 6.8 s | 10 s |
|---------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|------|
| 惊吓反应    | 0.5    | 0.5    | 0.5    | 0.5   | 0.5   | 0.5   | 0.5 | 0.5 | 0.5   | 0.5  |
| 强烈肌肉反应  | 400    | 270    | 146    | 110   | 74    | 40    | 30  | 20  | 10    | 10   |
| 心室纤维性颤动 | 500    | 495    | 470    | 400   | 260   | 80    | 50  | 42  | 40    | 40   |

这里应对上述所有参数再次进行计算。

### B.3.2.3 一只手到臀部路径

使用与前文相同的方法,将最小电流阈值列示于表 B.5 中:

表 B.5 电流路径为从一只手到臀部,对应于所研究的各种电流效应电流持续时间的最大交流阈值

| 电流阈值/mA | 0.01 s | 0.02 s | 0.06 s | 0.1 s | 0.2 s | 0.6 s | 1 s | 2 s | 6.8 s | 10 s |
|---------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|------|
| 惊吓反应    | 0.5    | 0.5    | 0.5    | 0.5   | 0.5   | 0.5   | 0.5 | 0.5 | 0.5   | 0.5  |
| 强烈肌肉反应  | 200    | 135    | 73     | 55    | 37    | 20    | 15  | 10  | 5     | 5    |
| 心室纤维性颤动 | 714    | 707    | 671    | 571   | 371   | 114   | 71  | 60  | 57    | 57   |

这里应对上述所有参数再次进行计算。

### B.3.2.4 电压/时间曲线图

一旦上述所有的计算已经完成之后,就可汇集相对应于类似应用条件(电流路径,皮肤的状态,皮肤接触面积)的数值,但要增加流过电流的持续时间,画出电压/时间曲线图。

但进行一些简化是需要的:

对三种皮肤电容密度(低、中和高)的数值(见 B.2.2.1)的所有计算都已进行。为了人身安全的原因,可选择能得到最小电压阈值的电容值。

有了这个简化的前提,就可画出对应于 GB/T 13870.1—2008 的时间/电流阈值的电压/时间的阈值曲线。所有的数值都已在第 5 章中提供。

### B.3.3 直流电流阻抗计算的算法

直流电流阻抗的计算比交流电流阻抗的计算简单,因为它可忽略皮肤电容的影响。其使用的方法与交流电流类似。

#### B.3.3.1 手到手路径

##### a) 手到手的电流

GB/T 13870.1—2008 提供手到手路径的人体电阻  $R_{h-h}$  和各种接触电压  $V_{th-h}$  (手到手)的数值。

此手到手电流  $I_{h-h}$  为:

$$I_{h-h} = \frac{V_{th-h}}{Z_{h-h}} \quad \dots\dots\dots (B.18)$$

##### b) 内电阻

如同交流电流,内电阻  $R_{ih-h}$  对应于手到手路径阻抗曲线的渐进线值,该阻抗为接触电压的函数。实际上,相同的生理效应与直流电流一起出现。

$$R_{ih-h} = Z_{h-h} (1000) \quad \dots\dots\dots (B.19)$$

##### c) 皮肤电阻

人体电阻等于双手的两个皮肤电阻和内部组织的电阻之总和。因此现在可用式(B.20)估算单只手的皮肤电阻:

$$R_s = \frac{Z_{h-h} - R_{ih-h}}{2} \quad \dots\dots\dots (B.20)$$

##### d) 皮肤电阻的修正

如同交流电流,皮肤电阻需要经过几分之一秒的时间调整到适合的最后数值,它取决于直接施加于皮肤上的电压。在所给定时间  $t$  的皮肤电阻  $R_s(t)$  按式(B.21)进行估算:

$$R_s(t) = R_s + [R_s(0) - R_s] e^{-t/0.05} \quad \dots\dots\dots (B.21)$$

式中:

$R_s(0)$ ——当皮肤电压为零时  $R_s$  的初始电阻。

e) 初始皮肤电阻的估算

在给出的  $V_t$  的函数  $R_{h-h}$  曲线上  $V_t$  等于零时,利用线性外推法可能估算初始皮肤电阻值。从这个手到手路径的电阻值  $R_{h-h}(0)$  初始值,用类似于 c) 和 d) 的计算方法就可能确定皮肤电阻  $R_s(0)$  的初始值。

f) 皮肤电压

这里再次可计算直接施加于皮肤的电压  $V_s$ 。计算方法与交流相同:

$$V_s = R_s(t) \times I_{h-h} \quad \dots\dots\dots (B.22)$$

依此类推,这种  $V_s$  值的计算也可以应用于其他流过人体的电流路径。

对下列参数的各种数值也应进行上述所有的这些计算:

- 接触电压;
- 皮肤状态(干燥、水湿润、盐水湿润);
- 接触面积(小的、中等、大的);
- 流过电流持续时间。

**B.3.3.2 双手到双脚路径**

a) 内电阻

对于不同的电流路径的内阻抗数值是不同的,这种阻抗被认定是电阻。用于交流电流的修改系数适用于直流电流。

$$R_{th-f} = R_{th-h} \times 0.628 \quad \dots\dots\dots (B.23)^3)$$

b) 双手到双脚的电流

用交流所用的相似方法确定双手到双脚的电流:

$$I_{h-f} = 2 \times \frac{V_s}{Z_{sh-h}} \quad \dots\dots\dots (B.24)^4)$$

相同的系数 2 也适用于直流。

c) 总阻抗

总电阻的估算比在交流情况下估算简单得多,因为不必考虑由于存在皮肤电容而引起的相位角。可采用式(B.25)计算:

$$R_{h-f} = R_s(t) + R_{th-f} \quad \dots\dots\dots (B.25)^5)$$

d) 接触电压

新的接触电压  $V_{th-f}$  由式(B.26)求得:

$$V_{th-f} = R_{h-f} \times I_{h-f} \quad \dots\dots\dots (B.26)^6)$$

对上述不同参数都需要进行这些计算。

**B.3.3.3 一只手到臀部路径**

a) 内电阻

就一只手到臀部电流路径而论,它是不同于手到手电流路径的,而手到手路径是计算的基准,

3) 式(B.23)中系数 0.628 来源不详,比较式(B.23)和式(B.10),式(B.23)中系数似乎应为 0.536。  
 4) 式(B.24)在英文版原文中为  $I_{h-f} = 2 \times \frac{V_s}{Z_{h-h}}$ ,对照式(B.11),修改为  $I_{h-f} = 2 \times \frac{V_s}{Z_{sh-h}}$ 。  
 5) 式(B.25)在英文版原文中为  $R_{m-p} = 2 \times R_p(t) + R_{im-p}$ ,对照上下文,本部分从无 m-p 类脚注,应为原文笔误。对照附录 A 中模型,修改为:  $R_{h-f} = R_s(t) + R_{th-f}$ 。  
 6) 式(B.26)在英文版原文中为  $V_{cm-p} = R_{m-p} \times I_{m-p}$ ,对照上下文,本部分从无 m-p 类脚注,应为原文笔误。对照上下文,修改为  $V_{th-f} = R_{h-f} \times I_{h-f}$ 。

其内电阻与其他路径是不同的。同一用于交流的修正系数也可用于直流：

$$R_{ih-s} = R_{ih-h} \times 0.601 \quad \dots\dots\dots (B.27)^{7)}$$

b) 一只手到臀部的电流

手到臀部的电流,现在可用式(B.28)估算：

$$I_{h-s} = \frac{V_s}{Z_{sh-h}} \quad \dots\dots\dots (B.28)^{8)}$$

在这种情况下,通过躯干的电流等于流过手的电流。

c) 总电阻

人体总电阻的新数值可简单地表示为皮肤电阻和内电阻的代数和：

$$R_{h-s} = R_{ih-s} + R_s(t) \quad \dots\dots\dots (B.29)$$

d) 接触电压

新的接触电压  $V_{th-s}$  用式(B.30)计算时求得：

$$V_{th-s} = R_{h-s} \times I_{h-s} \quad \dots\dots\dots (B.30)$$

不过,对上述的各种参数均需进行计算。

### B.3.4 计算直流电压阈值的算法

#### B.3.4.1 手到手的途径

用与交流同样的方法,各种  $V_{h-h}$  数值的  $R_{h-h}$  和  $I_{h-h}$  值已估算出之后,就可画出以流过人体电流  $I_{h-h}$  为接触电压  $V_{h-h}$  的函数的曲线。

如果将所需的生理效应的电流阈值加画在这些曲线上,就可在这些曲线相交点的横坐标上得到电压阈值的数值。

对这个电流路径的最小电流阈值表示于表 B.6 中。

表 B.6 对应于电流路径为手到手所研究的各种电流效应的电流持续时间的最大直流电流阈值

| 电流阈值/mA | 0.01 s | 0.02 s | 0.06 s | 0.1 s | 0.2 s | 0.6 s | 1 s | 2 s | 6.8 s | 10 s |
|---------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|------|
| 惊吓反应    | 2      | 2      | 2      | 2     | 2     | 2     | 2   | 2   | 2     | 2    |
| 强烈肌肉反应  | 200    | 153    | 99     | 81    | 62    | 40    | 33  | 25  | 25    | 25   |
| 心室纤维性颤动 | 1 250  | 1 238  | 1 175  | 1 000 | 650   | 400   | 375 | 350 | 350   | 350  |

在这一例子中,以对数-对数刻度绘制的曲线呈现为一直线,这时可用对数的内推法来计算曲线相交点的数值。然而,在此对数-对数坐标系统中,此曲线不能总是构成直线,这就是为什么应当使用所知两种内推法的原因。

对下列各种参数的数值,都需要上述的计算：

- 皮肤状态(干的、水湿润、盐水湿润)；
- 接触面积(小的、中等、大的)；
- 人口的百分序；
- 流过电流的持续时间。

7) 式(B.27)中系数 0.601 来源不详。

8) 式(B.28)在英文版原文中为  $I_{h-s} = \frac{V_s}{Z_{h-h}}$ ,对照式(B.16),修改为  $I_{h-s} = \frac{V_s}{Z_{sh-h}}$ 。

## B.3.4.2 双手到双脚路径

同样的方法用于流过人体这一电流路径的计算。应使用的最小电流阈值列于表 B.7 中。

表 B.7 对应于电流路径为双手到双脚所研究的各种电流效应的电流持续时间的最大直流电流阈值

| 电流阈值/mA | 0.01 s | 0.02 s | 0.06 s | 0.1 s | 0.2 s | 0.6 s | 1 s | 2 s | 6.8 s | 10 s |
|---------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|------|
| 惊吓反应    | 2      | 2      | 2      | 2     | 2     | 2     | 2   | 2   | 2     | 2    |
| 强烈肌肉反应  | 200    | 153    | 99     | 81    | 62    | 40    | 33  | 25  | 25    | 25   |
| 心室纤维性颤动 | 500    | 495    | 470    | 400   | 260   | 160   | 150 | 140 | 140   | 140  |

对上列全部参数需再次进行计算。

## B.3.4.3 一只手到臀部的路径

类似于前文所用的方法再次应用于最小电流阈值列表 B.8 中。

表 B.8 对应于电流路径手到臀部所研究的各种电流效应的电流持续时间的最大直流电流阈值

| 电流阈值/mA | 0.01 s | 0.02 s | 0.06 s | 0.1 s | 0.2 s | 0.6 s | 1 s | 2 s | 6.8 s | 10 s |
|---------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|------|
| 惊吓反应    | 2      | 2      | 2      | 2     | 2     | 2     | 2   | 2   | 2     | 2    |
| 强烈肌肉反应  | 200    | 153    | 99     | 81    | 62    | 40    | 33  | 25  | 25    | 25   |
| 心室纤维性颤动 | 714    | 707    | 671    | 571   | 371   | 229   | 214 | 200 | 200   | 200  |

对上列全部参数需再次进行计算。

## B.3.4.4 时间/电压曲线图

和交流电流一样,就直流电流而论,现在有可能利用汇集相同应用条件(电流路径、皮肤状态、接触面积)但增加了电流的数值画出时间/电压曲线图。

对直流电流涉及的在两种内推法中的选择需要进行某些简化。关于直流电流,为了有利于人体安全,需要选择提供最小电压阈值的内插法。

有了这种简化的前提,现在有可能画出对应于 GB/T 13870.1—2008 中时间/电流区域图的时间/电压区域曲线。所有的数据在第 5 章中提供。



## 附录 C

(资料性附录)

## 在选定的条件下确定电压阈值

## C.1 简明示例

符合以下的环境标准：

- 电流路径为双手到双脚；
- 大的接触面积。

表 C.1 是估算结果的一个示例。

表 C.1 上述规定的环境情况对应于强烈肌肉反应和心室纤维性颤动交流和直流接触电压阈值的示例

| 最小接触电压/V | 电流类型 | 水湿润 | 干燥 |
|----------|------|-----|----|
| 惊吓反应     | 交流   | 0.4 | 1  |
|          | 直流   | 2   | 14 |
| 强烈肌肉反应   | 交流   | 7   | 11 |
|          | 直流   | 16  | 26 |
| 心室纤维性颤动  | 交流   | 24  | 33 |
|          | 直流   | 75  | 87 |

这些情况对应于图 8、图 11、图 17 和图 20。

## C.2 常见情况

对常见场所的一些例子说明使用表 2 的方法：

## a) 浴室

人员可能裸着双手与双脚站在潮湿的地面上。如果抓住故障带电的毛巾干燥器，接触电压不超过交流 24 V 将不会导致心室纤维性颤动。

## b) 活动受限制的可导电场所

在大的金属容器里面修理人员可能一只手持续地接触金属容器，而同时另一只手又接触带电导体。假定此人没有出汗，接触电压低于交流 104 V 时，不会发生无力摆脱。这个数值对应于干燥的皮肤湿度条件、手到手的电流路径和小的接触面积。

## c) 游泳池

游泳池的水含有化学物质，会增加水的导电性，而且游泳者双手双脚都是裸着的。当人员活动时，潮湿的人可能接触到电气器具，而且接触电压小于交流 11 V 能持续一个长的时间，这符合在中等接触面积下无力摆脱的电压阈值的条件。对于浸泡于池中的游泳者允许的接触电压阈值要大大降低。

**附 录 D**  
**(资料性附录)**  
**适 用 范 围**

**D.1 较高频率的交流电压和电流**

本部分仅讨论 50 Hz/60 Hz 正弦波交流电压和无明显交流分量的纯直流电压。包含有复杂混合频率源和由交流与直流波形合成的、具有较高频率的交流电压要求更复杂的人体阻抗模型,并需要对引起不期望生理效应的电流阈值进行修正。当频率升高超过 50 Hz/60 Hz 时,人体阻抗减少(见 GB/T 13870.1—2008 中的图 12),同时电流的生理效应也减少[2]。人体阻抗的减少,仅在频率低于开始引起生理效应电流阈值增高的频率时才开始发生。其结果是当频率从 50 Hz/60 Hz 升高时,发生生理效应的电压阈值,诸如惊吓反应、无力摆脱或心室纤维性颤动等效应的电压阈值随频率增高先减小,而后增大。

GB/T 12113 按照 GB/T 13870.1—2008 所给定的条件适当地考虑了高频接触电流值。人体阻抗模型设计成代表接触电压从 100 V~240 V 的人体阻抗,但在某些情况下,可能过于简化。

**D.2 水浸没**

诸如用于游泳池、矿泉治疗场、浴盆及其类似场所的产品,涉及人体部分浸没于水中,电压阈值的应用是不容易的。一种复杂的情况是当人体出现在水中时,引起水中的电场畸变;另一种复杂情况是电流流过和流出人体可能有大量电流路径遍及皮肤广大面积。人体相对电场方向的运动,能使接触电流变化,从而改变了电场对人体的效应。人体相对于电场的方位决定了电流流过人体不同部分的幅值,而且影响由电场产生的生理效应的类型。

电流流过浸没于水中游泳者的身体可能会包含人的头部。电流流过人的头部会妨碍人的游泳能力。除了通常所称为肌肉效应在内等生理效应外,溺死的危险可能会发生。

不限流的电源,当人体浸没于水中时只需几伏的电压就能产生有害效应。浸没水中的人体应用的产品应当限制电流和按照限制电流而不是电压的特性进行估算。因此,本部分不涉及人体浸没于水中的情况。

**D.3 医疗环境中的应用**

对于医疗环境应给予特殊的考虑,因此在环境内有对电流高度敏感的患者(例如插入导管的患者)的电流和电压阈值对这些特殊情况可能有相当大的不同。本部分推导出的电压阈值不适用于医疗器械或医疗环境。

参 考 文 献

- [1] WHITAKER, H.B. "Electric shock as it pertains to the Electric fence", 1939 Underwriters Laboratories Inc.
- [2] HART, W.F., "A five-part resistor-capacitor network for measurement of voltage and current levels related to electric shock and burns", in J.E.Bridges, G.L.Ford, I.A.Sherman, and M.Vainberg (eds.) "Electrical Shock Safety Criteria", 1985, Pergamon Press, New York.
- [3] FREIBURGER, H. "The electrical resistance of the human body to commercial direct and alternating currents", Springer 1934.
- [4] CONRAD, HAGGARD and TEARE, "Electrical studies of living tissues", Electrical engineering, July 1936.
- [5] BIEGELMEIER, "Experiments on the electrical impedance of human body", IEC, TC64 WG4, October 1976.
- [6] OSYPKA, "Quantitative investigation of current strength, duration and routing in a.c. electrocution accidents involving human beings and animals: their evaluation and application to power installations", Elektromedizin band 8/1963, Nr3.
- [7] BARNETT, "The phase angle of normal human skin", J.Physiol.1938 Vol 93..
- [8] REILLY, "Electrical stimulation and electropathology", Cambridge university press 1992.
- [9] Underwriters Laboratories Inc, "Development of test equipment and methods for measuring potentially lethal and otherwise damaging current levels", CPSC-C-79-1034, 1981, revised 1982.
-