



中华人民共和国国家标准

GB/T 13870.1—92

电流通过人体的效应 第一部分：常用部分

Effects of current passing through the human body
Part 1: General aspects

1992-11-24 发布

1993-05-01 实施

国家技术监督局 发布

中华人民共和国国家标准

电流通过人体的效应 第一部分:常用部分

GB/T 13870.1-92

Effects of current passing through the human body

Part 1: General aspects

本标准参照采用国际标准 IEC479-1(1984)《电流通过人体的效应 第一部分:常用部分》及有关文件。

1 主题内容与适用范围

本标准阐明 15~100 Hz 正弦交流电流、直流电流通过生理状况正常的成人和儿童人体引起的生理效应及其分区、人体的电阻抗。为制定电气安全规范、设计电击防护装置和分析电气事故提供基本数据。

2 术语

2.1 感知阈 threshold of preception

通过人体能引起任何感觉的最小电流值。

2.2 反应阈 threshold of reaction

通过人体能引起肌肉不自觉收缩的最小电流值。

2.3 摆脱阈 threshold of let-go

手握电极的人能自行摆脱电极的最大电流值。

2.4 心室纤维性颤动阈 threshold of ventricular fibrillation

通过人体能引起心室纤维性颤动的最小电流值。

2.5 心脏电流系数 heart current factor

心脏电流系数是指电流通过某一通路在心脏内所产生的电场强度(电流密度)与该电流通过左手到双脚时在心脏内产生的电场强度(电流密度)之比。

在心脏内,电流密度与电场强度成正比。

2.6 纵向电流 longitudinal current

纵向流过人体躯干(如从手到脚)的电流。

2.7 横向电流 transverse current

横向流过人体躯干(如从手到手)的电流。

2.8 向上电流 upward current

流过人体使脚处于正极性的直流电流。

2.9 向下电流 downward current

流过人体使脚处于负极性的直流电流。

2.10 皮肤阻抗 (Z_p) impedance of the skin

在皮肤上的电极与皮下导电组织之间的阻抗。

2.11 人体内阻抗 (Z_i) internal impedance of the human body

国家技术监督局 1993-11-24 批准

1993-05-01 实施

两电极分别接触人体两部位,除去皮肤阻抗后电极间的阻抗。

2.12 人体总阻抗 (Z_T) total impedance of the human body

人体内阻抗与皮肤阻抗的向量和(见图3)。

2.13 人体初始电阻 (R_i) initial resistance of the human body

在接触电压出现瞬间,限制电流峰值的电阻。

3 15~100 Hz 正弦交流电流的效应

电流的效应由生理参数和电气参数决定。心室纤维性颤动是电击引起死亡的主要原因。15~100 Hz 电流¹⁾的生理效应如下。

注:1) 除非另有说明,以后条文中的电流值为方均根值(r.m.s)。

3.1 感知阈和反应阈

这两个阈由人体与电极接触的面积,接触的状态(干、湿、压力、温度)以及个人的生理特点等因素决定。

反应阈的通用值为0.5 mA。

3.2 摆脱阈

摆脱阈由接触面积,电极的形状和大小,以及个人的生理特点等因素决定。

摆脱阈的平均值为10 mA。

3.3 心室纤维性颤动阈

心室纤维性颤动阈由生理参数(人体的解剖特点、心脏功能状态等)和电气参数(电流持续时间和通路、电流的种类等)决定。

a. 50 Hz 或 60 Hz 正弦交流电流持续通电时间超过一个心搏周期,则纤维性颤动阈显著降低;

b. 只有电击落在易致颤期内(见附录B),持续时间不到0.1 s/500 mA 以上的电流就有可能引起纤维性颤动,电流达几安培时那就很可能发生纤维性颤动了。

如此强度的电击持续时间超过一个心搏周期时,可引起可以恢复的心脏停跳;

c. 把动物试验所得的结果应用于人类可以得出一组电流通路为左手到两脚的曲线见图1。在曲线 c_1 以下,心室纤维性颤动不大可能发生。曲线 c_2 、 c_3 相应的心室纤维性颤动概率为5%、50%。

3.4 电流的其他效应

a. 窒息或心跳停止而死亡;

b. 肌肉收缩、呼吸困难、血压升高、心脏内电冲动的形成和传导紊乱包括心房纤维性颤动和心脏短暂停搏等。这些效应并不致命,一般是可恢复的,但可能出现电流伤痕;

c. 电流达数安培延续超过几秒,则可能发生内部烧伤或其他严重损伤,甚至死亡。

3.5 时间/电流区域的说明

把电流通过人体的效应,以时间/电流为坐标,可划分为四个区域见表1及图1。

表1 15~100 Hz 正弦交流电的时间/电流区域

区域代号	区域界限	生理效应
AC-1	一直到线 a/0.5 mA	通常无反应
AC-2	自线 a/0.5 mA 至线 $b^{1)}$	通常无有害的生理效应

续表 1

区域代号	区域界限	生理效应
AC-3	自线 b 至曲线 c_1	通常不会发生器质性损伤。可能发生肌肉痉挛似的收缩,当通电超过 2 s 时呼吸困难。 随着电流量和通电时间增加,使心脏内电冲动的形成和传导有可以恢复的紊乱,包括心房纤维性颤动和心脏短暂停搏。但不发生心室纤维性颤动
AC-4	在曲线 c_1 以右	电流量和通电时间再增加,除出现区域 3 效应外,还可出现如心室纤维性颤动、心跳停止、呼吸停止、严重烧伤等危险的病理生理效应
AC-4-1	c_1 至 c_2	心室纤维性颤动概率可增加到 5%
AC-4-2	c_2 至 c_3	心室纤维性颤动概率可增加到约 50%
AC-4-3	超过曲线 c_3	心室纤维性颤动概率超过 50%

注: 1) 当通电时间小于 10 ms 时线 b 垂直下延,人体电流值仍保持为 200 mA。

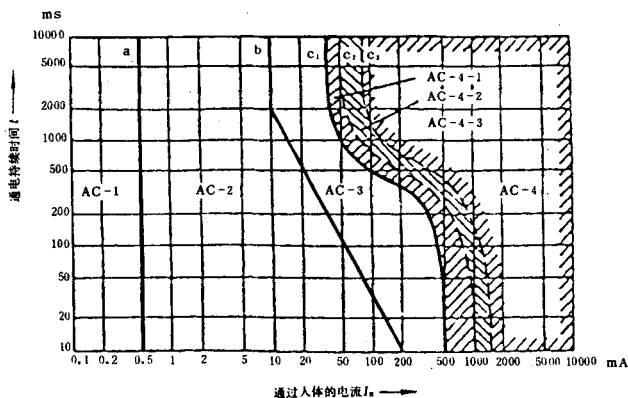


图 1 15~100 Hz 正弦交流电的时间/电流效应区域的划分

注: 图 1 中心室纤维性颤动的效应,其电流通路为“左手到双脚”。其他电流通路的见 3.6 条及表 2。

3.6 不同电流通路的心室纤维性颤动电流的计算

用心脏电流系数 F (见表 2) 和图 1 的数据可以计算某一通路的心室纤维性颤动电流。

表 2 不同电流通路的心脏电流系数

电 流 通 路	心脏电流系数 F
左手到左脚、右脚或两脚	1.0
两手到两脚	1.0
左手到右手	0.4
右手到左脚、右脚或两脚	0.3
后背到右手	0.3

续表 2

电 流 通 路	心脏电流系数 F
后背到左手	0.7
胸部到右手	1.3
胸部到左手	1.5
臀部到左手、右手或双手	0.7

应用心脏电流系数,可算出某一通路的心室纤维性颤动电流 I_h ,这电流与从左手到双脚通路的电流 I_{ref} 有相同的心室纤维性颤动危险。即:

$$I_h = \frac{I_{ref}}{F}$$

式中: I_{ref} ——图 1 中左手到双脚心室纤维性颤动电流;

I_h ——表 2 中某一通路的心室纤维性颤动电流;

F ——表 2 中某一通路相应的心脏电流系数。

心脏电流系数只是用以对各种电流通路引起心室纤维性颤动的相对危险作大致的估算。

例如,从左手到右手($F=0.4$)流过 200 mA 的电流与左手到双脚($F=1$)流过 80 mA 的电流有相同的心室纤维性颤动效应。

4 直流电流的效应

直流电流比交流电流易于摆脱。当电击时间大于心搏周期时,直流电流的心室纤维性颤动阈比交流电流高的多。要产生相同的刺激效应,恒定的直流电流的强度要比交流电流大二到四倍。

注:“直流电流”是指无纹波的直流电流。但是本章所谈到的纤维性颤动效应的数据,考虑到留有相当余地,直流电流含有正弦纹波不超过 10% 的方均根值。

4.1 感知阈和反应阈

这两个阈由接触面积,接触状态(干、湿、压力、温度),通电时间及个人的生理特点等因素决定,与交流不同,在感知阈的水平时,直流电流只有在接通和断开时有感觉,而电流流动期间不会有其他感觉。

直流电流的反应阈约为 2 mA。

4.2 摆脱阈

与交流电流不同,直流电流没有确定的摆脱阈。只有在直流通电和断开时,才会引起肌肉疼痛和痉挛似的收缩。

4.3 心室纤维性颤动阈

与交流电相同,直流电的心室纤维性颤动阈也是由生理参数和电气参数决定。

a. 只是在纵向电流时,才有心室纤维性颤动的危险。横向电流时(如从手到手)不大可能发生心室纤维性颤动;

b. 向下电流的纤维性颤动阈约为向上电流的二倍;

c. 电击持续时间长于一个心搏周期时,直流电的纤维性颤动阈比交流电高好几倍。电击持续时间短于 200 ms 时,直流的纤维性颤动阈大致与交流的方均根值相同;

d. 电流通路为纵向,向上电流的时间/电流区域见图 2。图中在曲线 c_1 之下纤维性颤动不大可能发生。曲线 c_2 、 c_3 的纤维性颤动概率分别为 5%、50%。当电流为纵向、向下时,这些曲线要乘以系数 2 把电流值提高。

4.4 电流的其他效应

a. 接近 300 mA 时,通电期间,四肢有发热感;

b. 在接触面的皮肤内感到疼痛;

c. 300 mA 以下横向电流流过人体几分钟时,随着时间和电流量的增加,可引起可以恢复的心律失常、电流伤痕、烧伤、头晕以及有时失去知觉。超过 300 mA 时,往往会失去知觉;

d. 电流达数安培延续超过几秒,则可能发生内部烧伤或其他损伤,甚至死亡。

4.5 时间/电流区域说明

表 3 直流电的时间/电流区域

区域代号	区域界限	生 理 效 应
DC-1	一直到线 a2 mA	通常无反应。在开关接通或断开时,有轻微针扎痛
DC-2	自线 a2 mA 至线 b ¹⁾	通常无有害的生理效应
DC-3	自线 b 至曲线 c ₁	通常不会发生器质性损伤。随着电流量和时间增加,可能发生心脏内心电冲动的形成和传导有可以恢复的紊乱
DC-4	在曲线 c ₁ 以右	电流量和通电时间再增加,除出现区域 3 效应外,还可能发生如室纤维性颤动、严重烧伤等危险的病理生理效应
DC-4-1	c ₁ 至 c ₂	心室纤维性颤动概率可增加到 5%
DC-4-2	c ₂ 至 c ₃	心室纤维性颤动概率可增加到约 50%
DC-4-3	超过曲线 c ₃	心室纤维性颤动概率超过 50%

注: 1) 当通电时间小于 10 ms 时线 b 垂直下延,人体电流值仍保持为 200 mA。

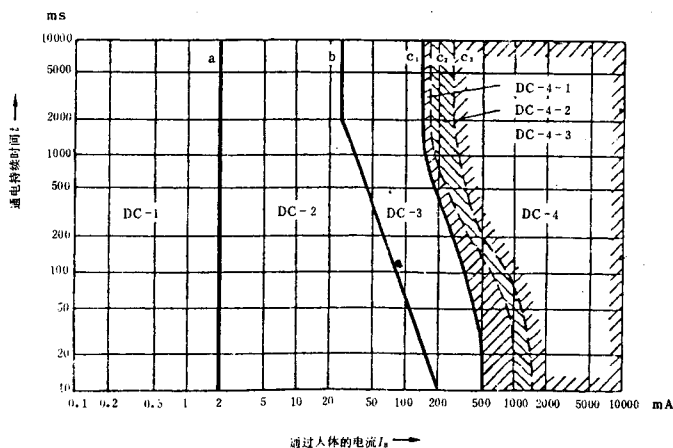


图 2 直流电的时间/电流效应区域的划分

注: 本图中心室纤维性颤动的电流通路为左手到两脚纵向、向上电流的效应。

5 人体的电阻抗

人体阻抗值由电流通路、接触电压、通电时间、频率、皮肤湿度、接触面积、施加压力和温度等因素决定。

由皮肤阻抗和人体内阻抗组成的人体总阻抗是由阻性和容性的分量组成,其等效电路图见图3。

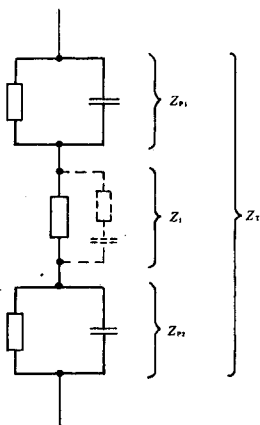


图3 人体阻抗的等效电路

Z_i ——人体内阻抗; Z_{p1} Z_{p2} ——皮肤阻抗; Z_t ——人体总阻抗

5.1 皮肤阻抗(Z_p)

皮肤阻抗是由半绝缘层和许多小的导体(毛孔)组成的电阻和电容的网络。电流增加时皮肤阻抗即下降,有时可见到电流的伤痕。

接触电压约在50 V以下时,皮肤的阻抗值,随接触表面积、湿度、呼吸等而变化很大。即使同一人也如是。

接触电压约为50~100 V等级时,皮肤阻抗明显降低,并且在皮肤被击穿时皮肤阻抗可忽略不计。

当频率增加时,皮肤阻抗减少。

5.2 人体内阻抗(Z_i)

人体内阻抗基本上是阻性的,其数值主要由电流通路决定。接触表面积所占成分较小。但是当接触表面积小至几个平方毫米时,内阻抗就增大。

人体内阻抗存在很少的容性分量(见图3中的虚线)。

图4为各种电流通路的人体内阻抗。

图中数值表示各种电流通路的人体阻抗,相当于手到手通路阻抗的百分数。

无括号的数值是电流通路从一手到所测定部位的值。括号内的数值是电流通路从两手至相应部位的值。

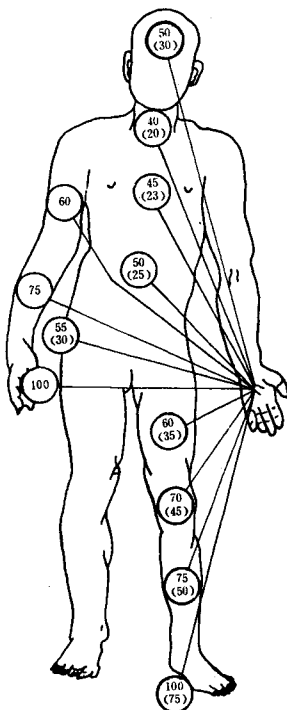


图4 人体内阻抗随电流通路变化

注：① 从一手到两脚的阻抗为手到手阻抗的75%，从两手到两脚的阻抗为手到手阻抗的50%。

② 这些百分数也可以作为人体总阻抗的近似值。

5.3 人体总阻抗(Z_T)

人体总阻抗由阻性分量和容性分量组成。

接触电压约在50 V以下时，由于皮肤阻抗 Z_0 的变化很大，人体总阻抗 Z_T 也同样有很大变化。

在接触电压愈高时，人体总阻抗越来越不取决于皮肤阻抗。当皮肤被击穿破损后，总阻抗值接近于内阻抗 Z_i 。

关于频率的影响，计及皮肤阻抗与频率的依从关系，人体总阻抗在直流时较高，且随着频率增加而减小。

电压50 V以下在带有新鲜水润湿的接触面所测得的数值比干燥状态下降低10%~25%；而导电溶液润湿的接触面的阻抗降低到为干燥状态下的一半。

在电压高约150 V以上时，人体总阻抗只略微与湿度和接触表面积有关。

表4为适用于成人的人体总阻抗值。电流通路为手到手或手到脚在大接触面积(50~100 cm²)并且是在干燥状况。

表 4 交流 50/60 Hz 大接触面积的人体总阻抗 Z_T

接触电压 V	人体总阻抗 Z_T 在以下百分数列时不超过的值, Ω		
	人数的 5%	人数的 50%	人数的 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

注: ① 这些数值是按附录 C 的步骤求得。

② 表中数值的含义, 以第 1 行接触电压为 25 V 时为例: 数值 1 750 是在人群中有 5% 的人的人体总阻抗值不超过 1 750 Ω (其余 95% 的人超过 1 750 Ω); 数值 3 250 是在人群中有 50% 的人 (包含上述 5%) 的人体总阻抗值不超过 3 250 Ω (其余 50% 的人超过 3 250 Ω); 数值 6 100 是在人群中有 95% 的人 (包含上述 5% 和 50%) 的人体总阻抗值不超过 6 100 Ω (其余 5% 的人超过 6 100 Ω)。

图 5 为接触电压 5 000 V 以下时成人的人体总阻抗; 图 6 为接触电压 700 V 以下时成人的人体总阻抗。

儿童的人体总阻抗与成人在同一数量级。

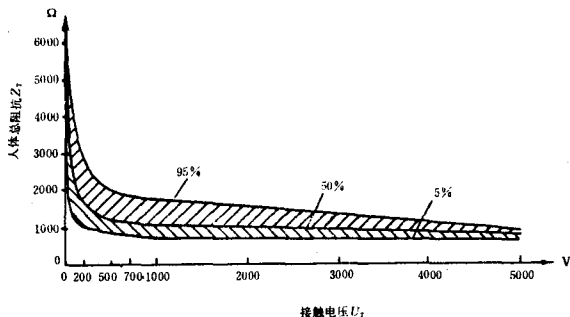


图 5 接触电压 5 000 V 以下, 适用于活人的人体总阻抗统计数值

注: 电流通路为从手到手或从手到脚。

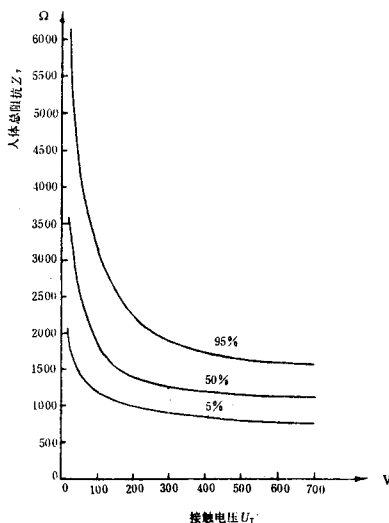


图 6 接触电压 700 V 以下,适用于活人的人体总阻抗统计数值

注: 电流通路为从手到手或从手到脚。

5.4 人体初始电阻(R_i)

在接触电压出现的瞬间,人体电容未充电,所以皮肤阻抗可忽略不计,故人体初始电阻 R_i 大约等于人体内阻抗 Z_i 。 R_i 主要取决于电流通路,与接触表面关系较少。

电流通路为手到手或手到脚并且大接触面积时的人体初始电阻值对 5% 的人来说可取作 500 Ω 。

附录 A

直流/交流等效系数 K

(补充件)

直流/交流等效系数 K (D.C./A.C. equivalence factor) 系指直流电流与能诱发相同心室纤维性颤动概率的等效交流电流 (方均根值) 值之比。

交流与直流电流对人体效应的主要差别是直流电流的刺激作用 (刺激神经和肌肉, 诱发心房或心室纤维性颤动) 与电流量的变化有关, 特别是在接通和断开电流时, 恒定不变的直流电流须比交流大二至四倍, 才能产生同样的刺激效应。

以电击时间超过一个心搏周期, 并且心室纤维性颤动概率为 50% 为例。其等效系数约为:

$$K = \frac{I_{d.c.-纤维}}{I_{a.c.-纤维}(\text{方均根值})} = \frac{300 \text{ mA}}{80 \text{ mA}} = 3.75$$

附录 B

易致颤期

(参考件)

易致颤期 (vulnerable period) 是心搏周期内较短的一部分, 在此期间心脏纤维处于不协调的兴奋状态, 如受到足够强度的电流刺激就发生心室纤维性颤动。

易致颤期相应于心电图中的“T 波”前段, 约为心搏周期的 10%, 见图 B1 和图 B2。

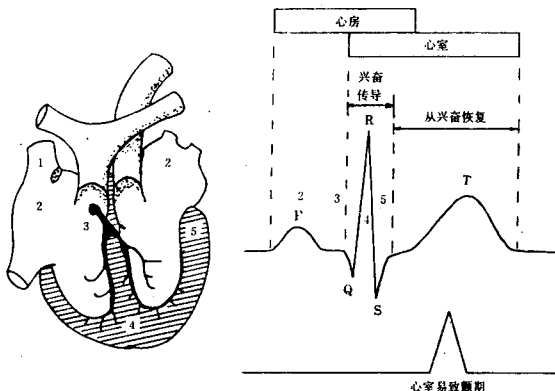


图 B1 心搏周期中的易致颤期, 数字表示兴奋传导的顺序

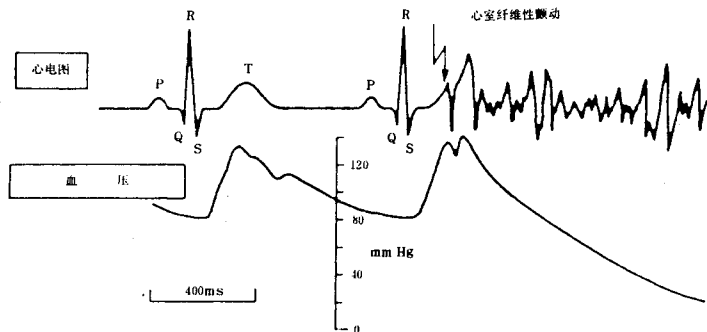


图 B2 在易致颤期内触发心室纤维性颤动对心电图和血压影响

附录 C

人体总阻抗的测量

(参考件)

为了得到活人的人体总阻抗实际数值,采用下列方法步骤。

- a. 在干燥状态下取手到手的电流通路,用大电极(约 80 cm^2)对 50 个活人以 15 V 接触电压和对 100 个活人以 25 V 接触电压在施加电压后 0.1 s 进行测量。

用两种独立的统计方法确定出 5%,50%和 95%的人体总阻抗值。得出的结果几乎相同。

- b. 按照 a. 的条件下对一名活人测量人体总阻抗:用一直到 150 V 的接触电压;另外再用一直到 200 V 的接触电压电击持续时间直到 0.03 s。

- c. 按照 a. 类似的条件下对大量尸体在干燥和潮湿情况下用大电极(约 90 cm^2),对手到手和手到脚电流通路施加接触电压从 25 至 5 000 V 在施加电压后 3 s 进行测量。

按照 a. 的方法确定 5%、50%和 95%的人体总阻抗数值。

- d. 上面 c. 用尸体测得的人体总阻抗,在接触电压 220 V 及以下时呈现很高的皮肤阻抗,故将曲线修正调整到活人测定的数值。

- e. 在实际应用中经验证明,手到手与手到脚电流通路之间的阻抗差别可以忽略不计。

人体总阻抗测量统计分析结果见表 4。

附加说明:

本标准由中华人民共和国劳动部提出。

本标准由全国电气安全标准化技术委员会归口。

本标准由华中理工大学、化学工业部北京化工研究院、上海市劳动保护科学研究所共同起草。

本标准主要起草人罗陶、秦蓉庭、顾月英。