

---

## 接触电流-人体阻抗、电流对人体的效应

了解接触电流的原理首先应该了解接触电流的定义,所谓接触电流是指在正常条件下或故障条件下接触一个或多个可触及件时流过人体的电流(接触电流原来包含在术语“泄漏电流”定义内)。电流通过人体的效应是研究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,IEC479《电流通过人体的效应》是最具权威性的研究成果。为了更好地帮助读者理解并掌握接触电流测试方法,本文在此先介绍关于人体阻抗及电流对人体的影响的一些基本概念。

### 一、人体阻抗

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。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、皮肤潮湿程度、接触表面积、压力和温度等诸多因素。人体阻抗由内阻抗和皮肤阻抗组成。

#### ① 人体内阻抗( $Z_i$ )

即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。人体内阻抗存在较小的容性分量,大部分可认为是阻性的,与接触表面积关系不大。

#### ② 皮肤阻抗( $Z_p$ )

是皮肤上的电极与皮下导电组织之间的阻抗。接触电压和电流频率是影响皮肤阻抗的重要因素。当交流接触电压小于 50V 时,皮肤阻抗值变化较大;当接触电压大于 50V 时,皮肤阻抗值大大降低。由于皮肤容性分量的存在,皮肤阻抗随着频率的增加而降低。

#### ③ 人体总阻抗( $Z_T$ )

--- 50/60Hz 正弦交流时的  $Z_T$

人体总阻抗是人体内阻抗与皮肤阻抗的向量和,由阻性和容性分量组成。在接触电压为 50V 以下时,由于皮肤阻抗  $Z_p$  的变化较大,使人体总阻抗具有很大变化。随着接触电压进一步增高,人体阻抗值将趋近于内阻抗  $Z_i$ 。

--- 20kHz 及以下正弦交流时的  $Z_T$

由于皮肤电容的影响,人体总阻抗随着频率增加而下降。当频率大于 5kHz 时将接近人体内电阻  $Z_i$ 。

--- 直流电流时的阻抗( $R_T$ )

当接触电压为 150V 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。

#### 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手到脚时,在大接触面积条件下,无论是交流 50/60Hz,还是直流时,多数人的初始电阻为 500Ω。

---

## 二、电流对人体的效应

使用者在操作过程中可能会产生接触电流，由设备经人体到达大地。由于高频电流对人体的影响与普通工频电流不同，尤其是对人体造成危害的阈值不同，为了能够合适地评价测量结果对人体造成伤害的程度，一般采用对高频测试电流进行加权的方法，通过加权后的测试结果与工频下的人体阈值进行比较。IEC60990 采用频率因数的概念来表征测试网络对电流加权的程度，频率因数是指通过该测试网络的实际电流与测试结果的指示电流的比，相当于高频电流进行加权的倍数。同样，人体本身对高频电流的效应也适用于频率因数的概念，其意义是指引起同样人体生理效应的频率为  $f$  的电流阈值于 50Hz 的电流阈值之比。

人体触电时可视为一个电阻，一般情况下手脚之间的体内电阻约为  $500\Omega$ ，皮肤电阻则与皮肤类型、触电面积有很大关系。当电流流经人体时，按照不同人体呈现的反应略有差异。引起人体不同的生理反应的电流可分为三个等级：

- 感知电流：是人体能感觉到的最小电流，通常在  $(0.5\sim 2)$  mA 范围。
- 摆脱电流：是人体触电后能自主摆脱的最大电流，通常在  $(6\sim 22)$  mA 范围。
- 致命电流：指在很短的时间内危及人体生命的最小电流，一般在 50mA 以上。触电致死的主要原因是电流引起心室颤动，从而使心脏丧失血液循环功能，导致血液停止循环而致命。

电流对人体的效应主要有以下几种：

- 感知 (Perception)
- 反应 (Reaction)
- 摆脱 (Let-go)
- 电灼伤 (Burn hazard)

这四种人体效应中任何一种都具有唯一的阈值，但其中的某些阈值随频率变化的差异是很大的。感知、反应和摆脱与接触电流峰值有关，并且随频率变化而不同。电灼伤与接触电流的有效值有关，而与频率无关。

在接触电流的测量中大都采用模拟人体阻抗的网络对电流（电压）的测量方法作为接触电流的测量方法。不同的国家，不同的产品，不同的标准，对模拟人体阻抗网络的定义不同。人体阻抗网络的制造工艺难度极大，而且对电阻、电容的精度、热稳定性要求高，电阻的功率大，高频特性要好。一般选用精密的金属密封大功率电阻（这种电阻在高温高压时呈极高的线性）和精密的高频电容。