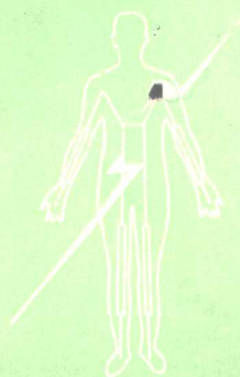


国外人身安全电流

专 辑



科学技术文献出版社重庆分社

欢 迎 订 阅

电 工 技 术

《电工技术》第一、二、三、四集已出版,第五集预定11月份出版,以后逢双月出版。《电工技术》是综合性科技刊物,主要报导国外有关电工方面的设计、生产、运行、维修等先进技术和科研成果、发展动向和消息。选题着重厂矿电气设备、农业电气设备、节能和测试技术的实际应用科技资料,文章短小精悍、图文并茂,易为读者理解和利用。本刊从第二集起增添了如下新内容:1.《科技情报知识介绍》,为读者提供查找电工方面的专利和文摘的方法,以使读者能获得更多的国外文献;2.《科技知识问题解答》,帮助读者广开思路,增添智慧,掌握新技术。3.国内外创造发明、技术革新。第五集征求订户广告已登在新华书店9月5日《科技新书目》第182期,欢迎各机关、团体、学校、图书馆、资料室及个人及时向当地新华书店订阅。本刊第一集定价0.75元,第二集定价0.80元,第三集定价0.70元,第四集定价0.60元。第一集,第二集已全部售完,三、四集有少量零售。凡无法在新华书店订阅者可直接向重庆2104信箱邮购。

国外人身安全电流(专辑)

中国科学技术情报研究所重庆分所	编 辑
科学技术文献出版社重庆分社	出 版
重庆市市中区胜利路91号	
四川省新华书店重庆发行所	发 行
重 庆 新 华 印 刷 厂	印 刷

开本:787×1092毫米1/16 印张:8.25 字数:21万
1980年10月第一版 1980年10月第一次印刷
科技新书目:179—146 印数:7200

书号:15176·434

定价:0.90元

内 容 提 要

本专辑是“国外触电保安器”一书的续集。主要收集了柯温霍文、达耳基尔、柯宾、里伊、山野等著名学者在人身安全电流方面的研究成果。这对我国开展人身安全电流的研究、触电保安器的研制以及电击事故的预防都有较大的裨益。本专辑可供农电、电力、医疗、厂矿和院校等有关单位从事科研、生产和教学人员以及电工等参考。

目 录

脉冲电流的危险	(1)
不同参量的交流电击对心脏的影响	(17)
电击所造成的死亡	(25)
从医学角度看触电事故及其影响参数	(32)
致命电流的重新评价	(39)
动物电击实验的讨论	(49)
电击对人体的影响	(54)
人在电流短时作用下的一些生理反应	(56)
电流对动物作用的实验研究	(60)
人体电流的作用范围及其对制订安全措施的意义	(63)
人身允许接触电压与人体允许电流暂行规程草案	(70)
电流的危险范围— $I_{\Delta N} = 30$ 毫安故障电流保护开关的安全范围	(72)
电击灾害及其预防	(78)
工频电流短时作用下的电气安全基本准则	(82)
触电保安	(86)
电流对人体的影响	(91)
人体的允许安全电流和保安对策	(103)
静态和动态下的人体电容	(107)
鞋的电阻特性	(111)
电击伤	(115)

附 录

触电现场急救问答	(123)
谈谈农村触电现场抢救的几个问题	(126)
触电务必现场急救	(128)

脉冲电流的危险

C.F.达耳基尔

内容摘要：从欧美实验室的研究与各国的事故报告中得到瞬间电击和脉冲放电危险的标准。从工频电路和脉冲装置所得到的瞬间电击危险，首先在于放电时所具有的能量，而脉冲电流起始幅值波动的大小和电击持续时间则是次要的。为减少电击危险而建议的安全标准公式是适于脉冲放电和振荡所产生的脉冲。文中用实例说明公式的应用。希望这个研究有助于判定和减少工业装置发生的脉冲危险，并估价有效的接地措施，以及用于其他类似的情况。

按现有的知识对雷击的危险作进一步的推测是不合适的，同时，估计可能的安全范围也是没有必要的，但从脉冲发生器、高压电容器和高压电子式直流电源所得类似的脉冲放电则正是我们需要加以研究的。

从国家安全委员会得到的最新统计资料指出，美国每年电死人数的中大致有 1/4 是由于闪电造成的(表 1)。当然忽视闪电这一明

西欧诸国及美国的高压研究所负责人有所接触。虽然报导了多起脉冲的严重事故，但只有一件死亡事故列于表中。因此，在雷电所产生的危险与人为的类似放电的经验之间，存在着较大的差距。

在选择评价脉冲电流产生危险的标准方面，最严重的障碍是脉冲电流致死的确切机理。虽然高压经常使触电部位的组织产生严重的破坏，但通常都相信电击的致命效果是由电流经过人体所造成的。鉴于这个理由，电击危险的标准只是以电流为根据的。而高压脉冲电击的危险是由已知的电流效应来决定，该效应是由低压试验来加以估价。这里所提出的假设需要许多另外的资料给以证实，然而，即使是一个试探性的解答，其实际重要性在于证实这个说明是可信的。

由于接触到了身体的表面部分和电流的路径包括了胸部，所以一般认为在工频情况下，招致呼吸被抑制，心脏受阻塞和严重损害神经系统的电击强度要比招致心室颤动的强度大得多。因此，取大多数入恰好产生心室颤动的最低限度的电击为危险的标准。而心室颤动、心脏受阻塞和呼吸被抑制包括了神经和肌肉对电流的反应，也就是说这些后果虽然主要依赖于神经和肌肉所受的刺激，但由于热量集中，使组织受到损坏更为可能。

表 1 死于触电及雷击的人数

(国家人口统计局编辑的资料，

由国家安全委员会提供)

年 度	除雷击外的 触电死亡人数	雷击死亡人数
1944	682*	419
1945	620*	268
1946	725*	231
1947	867*	338
1948	871*	256
1949	1046	249
1950	955	219
年 平 均	825	282

* 不包括运输、机械、矿山、农业和林业中因触电而死亡的人数。

显的事实是非常危险的。可是由于放电的特性还不十分清楚，因此这些事故就没有多少技术价值。最近本文作者与一些国家如日本、

这就启发了“人体组织的损害是基于放电的能量”这一看法。

在以往的论文中，作者曾指出：在一定情况下，电流峰值和它的持续时间对确定电击强度是有益的。现在企图证明电击强度同样也可以能量为依据来规定。对瞬间电击提出这样的假设，即电流等级、数量和持续时间相对地说来被视为次要的参数，而能量是基本的依据。这一能量的概念提供了一个从数量上估价瞬时工频和脉冲电击危险的基础。但在发展的现阶段，对瞬时工频的电击，比对直流脉冲大概更为正确。

在这种假设下，若不考虑电击的型式，心室颤动的界限值比前文所列举的其它可能的死亡机理为低。因此，将大多数人中的0.5%产生心室颤动的理论所需最低能量作为考虑危险的标准，这一假定是必须的，因为在呼吸被抑制，心脏受阻塞或组织被破坏方面没有可以用来分析事故的资料。这个建议对工频瞬时的电击将会得出合理的结果，但对脉冲电击，其结果只是较为近似。对人身事故的研究指出，这个理论值是保守的，即这个标准的使用将是偏于安全的。

重要的是要区别电流的直接效果与神经系统受到的电击，因为各人的身体情况有很大差异，所以要证明任何电击对所有人都是安全的，这是不可能的。杂志上登载了多次死亡统计，死因是由于过度紧张与强烈的情绪、恐怖或激动招致心脏衰竭。对于这样易受影响的人，触到超过感知电流的任何电路，都可能招致死亡。必须认识到这种可能性，即偶然触到对大多数人来说，是安全的电流，但对某些人来说却可能造成死亡。在这样情况下，应该考虑到死亡是由于对神经系统的电击而不是电流的直接效应所造成的。另一种触电死亡的因素是由于通常的血中毒。毒素是由被损害的组织所产生的，在事故后数小时或几天之后往往会发生死亡。

能量的标准

能量的标准首先是以作者在哥伦比亚大学动物试验中获得的资料作为根据的。参考文献2的图6在这里复制为图1（原文中标记为D和E的曲线，应标为C和D）。由这99个点所描绘的资料是用羊作试验时获得的，该试验用交流60赫，电击时间为0.03~3秒。同样用小牛、狗、猪、猫、兔和豚鼠作了试验，以便获得颤动电流与体重的关系曲线。影线区C适用于所有体重为70公斤（包括人在内）的动物。

在工频下，对人身这个危险界限，事实上一般公认是恰当的，因为现在的假定是以前分析的，包括各种脉冲电流型式对人产生可能反应的一种继续。

图1中的直线方程式可以下式表示

$$I = k t^n$$

式中 n ——斜率 $\left(= -\frac{1}{2} \right)$

t ——电击持续时间(秒)

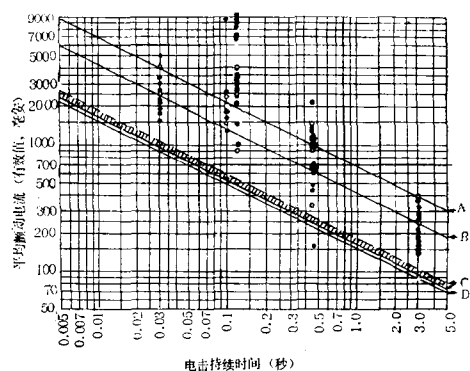


图1 60赫正弦颤动电流与电击持续时间

- 试验点
- 计算点
- A 体重为57.4公斤的羊的99.5%线
- B 体重为57.4公斤的羊的50%线
- C 包括人在内的所有体重为70公斤动物的0.5%线
- D 体重为57.4公斤的羊的0.5%线

I ——电流有效值(安)

由此 $I = kt^{-\frac{1}{2}}$

或 $I^2t = k^2$ (1)

所有体重为70公斤的动物(包括人)的危险界限是取影线区C的下限。正如参考资料中所讨论的,这个界限是以概率0.5%为依据的,如果受到的电击超过规定的极限,则大多数人中的0.5%将会招致心室颤动。

能量常数 k^2 是由对应曲线C上的 I 和 t 值代入后求取的,得出结果为

$$I^2t = 0.027 \quad (2)$$

或 $I^2R_b t = 0.027R_b(\text{瓦} \cdot \text{秒})$ (3)

在上述方程中, R_b 代表人体电阻、皮肤电阻和接触电阻(欧)。这里考虑了严重的电击,假定皮肤电阻和接触电阻急剧下降,并与某一恒定值的人体内部电阻相比时,则前者可忽略不计。

虽然方程(1)一(3)是由连续的60赫的瞬间电击得出,但可假设外加能量的普遍公式为

$$R_b \int i^2 dt = 0.027R_b(\text{瓦} \cdot \text{秒}) \quad (4)$$

例如,可以认为振荡放电是由R-L-C串联电路供给的,这个电路的最大贮存能量为

$$\frac{1}{2}CE^2(\text{瓦} \cdot \text{秒}) \quad (5)$$

假若被人体吸收的最大允许能量等于

$$R_b \int i^2 dt = 0.027R_b(\text{瓦} \cdot \text{秒}) \quad (4)$$

所以,为电路所消耗的能量应等于

$$R_c \int i^2 dt = \frac{1}{2}CE^2 - 0.027R_b(\text{瓦} \cdot \text{秒}) \quad (6)$$

以(4)除(6)解之,得

$$R_c = \frac{CE^2}{0.054} - R_b(\text{欧}) \quad (7)$$

如电路电阻 R_c 与人体电阻 R_b 相比,可以忽略不计,则方程(7)可简化为

$$CE^2 = 0.054R_b \quad (8)$$

在柯温霍文领导下,约翰霍普金斯大学的研究已经证明,电容放电能使狗发生心室颤动和心脏受阻塞。然而发生心室颤动的脉

冲电击界限所需要的定量资料,显然是从来没有介绍过的。由于方程(8)所指出的关系极端重要,人们对发生心室去颤脉冲电击的界限进行了批评性的审议,并期望这个结果可以阐明这种争议。对心室颤动和心室去颤的研究,电的必要条件可以是相似的,因为所刺激的肌肉组织是相同的。而且这种假定是可以得到证实。

图2的对数曲线只表示了三条狗去颤的电压与电容的函数关系。去颤电压取引起去颤的最小电压及不引起去颤的最大电压之和的二分之一。下面两条曲线,即1.2公斤小狗和6.5公斤狗的数据是取之于苏联研究者盖

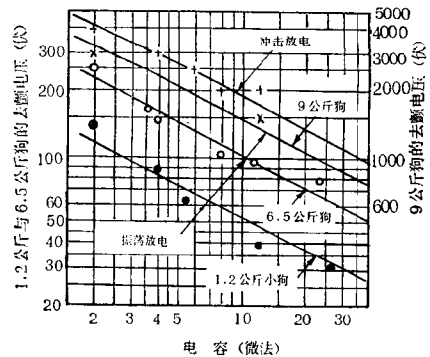


图2 狗的心脏去颤电压与电容的关系。

尔维奇与安耶夫论文中的图2^[3,4]。在这些试验中,心室颤动是由50赫工频电流所引起,然后应用迅速且连续增加振幅的脉冲电击,使心脏搏动周期恢复正常,直至去颤。电容值是变化的,从2到26.5微法,电感值是0.3或0.5亨。电容器组被充电到某预定的直流电压,在对动物放电以前,先断开电源。这些电路参数所具的固有频率在44—205赫工频范围之内。由于使用了很低的电压,可认为这些试验是直接传到动物的心脏。

作者的同事马斯凯得出了9公斤狗的数据。他的去颤研究,是和旧金山一家医院合作,并在内科医生指导下进行的。在这些试验中,心室颤动是由60赫瞬间电击所产生。接触的部件由两个10平方厘米的铜极板组

成,铜板上用浸过盐水的纱布缠着,安放在狗胸的两侧,胸毛被刮净。从示波器观察得到的体电阻平均为75欧,扼流线圈的电感为1亨,电阻为7.5欧,所发生的振荡频率在46和112赫之间。图中所示的数据是同一天得到的,因此完全具有可比性。从其他动物所获得的类似数据亦显示了相似的关系,但在一只给定的动物体上任何时候所取得的点是不多的,这就不适宜于用图表形式来表示。

显然,对这些数据,包括对脉冲放电的最吻合的直线都具有 $-\frac{1}{2}$ 的斜率,它是符合方程(8)所表示双曲线的要求的。

1.2公斤小狗和6.3公斤狗的每个对应点的去颤能量及9公斤狗的非振荡放电曲线上每个点的能量均按 CE^2 的比例进行计算。对每种动物,一个任定的点与这系列点的平均数之间的差所得出的误差曲线画于图3。当这三种情况在概率坐标图纸上密集地沿着同一直线分布时,则表示所获得的关于放电能量的分布是正常的,而且它再次证明符合统计上的分布。因为在一系列数据中,只取少数的点加以充分说明这个答案是困难的。

很有意义的是,三条狗的去颤能量曲线的斜率与图3的电流颤动误差曲线的斜率^[2]是相同的。正如参考文献中所讨论的,这条颤动误差曲线是由哥伦比亚大学研究者所得的数据^[1]而来的。它代表了狗、猪、小牛和羊等动物在60赫电击时间为0.03~3秒时所作的试验。虽然这二条误差曲线描绘了不同情况下的答案,但如果现象相同,则作者以前工作所启示的由电对神经和肌肉的刺激而得出的误差曲线具有相同的斜率^[6-8]。所以,误差曲线具有相同的斜率,其现象亦相似的这种假定是合理的。因此,结论是,在心肌受刺激情况下由正弦交流所引起的心室颤动和由脉冲放电产生的去颤,其现象是相似的,且在方程(8)中所指出的关系亦是正确的。

• 4 •

对非致命的电击,一般认为直流的效应比工频的效应要低,这是对的。手上刚感知电流时,直流和交流60赫的比率为4.2/1^[6]。对安全电流,相应的比率也是4.8/1^[6],根据费勒斯、柯茵和其他人对羊进行3秒电击的极为有限的试验,表明直流与交流的颤动电流界限的比率为5比1^[2]。所以,容许的冲击放电比振荡放电为大,这是不足为奇的。

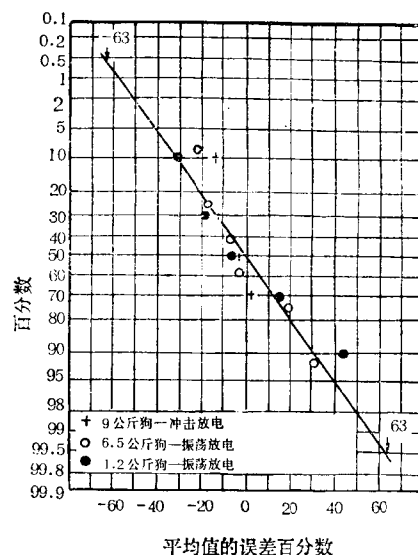


图3 三只狗的去颤曲线的能量误差

根据图2中9公斤狗的数据,明显地看出容许冲击放电比振荡放电为大。因为对于振荡放电的答案只有两点是有用的,这两点与取自表示冲击放电曲线的比值相比如下:

对于 $C = 12$ 微法

冲击放电的电量 $= CE = 12 \times 10^{-6} \times 1750 = 21.0$ 毫库,

冲击放电的能量 $= \frac{1}{2} CE^2 = \frac{1}{2} \times 12 \times 10^{-6} \times 1750^2 = 18.4$ 瓦·秒,

振荡放电的能量 $= \frac{1}{2} CE^2 \times \frac{R_b}{(R_b + R_c)}$
 $= \frac{1}{2} \times 12 \times 10^{-6} \times 1500^2 \times \frac{75}{75 + 7.5} = 12.3$
 瓦·秒,

脉冲能量的比率 $= \frac{18.4}{12.3} = 1.5$ 。

对于C = 2微法

冲击放电的电量 = $2 \times 10^{-6} \times 4250 = 8.5$ 毫库,

冲击放电的能量 = $\frac{1}{2} \times 2 \times 10^{-6} \times 4250^2$
= 18.1瓦·秒,

振荡放电的能量 = $\frac{1}{2} \times 2 \times 10^{-6} \times 3000^2$
 $\times \frac{75}{75 + 7.5} = 8.2$ 瓦·秒,

脉冲能量的比率 = $\frac{18.1}{8.2} = 2.2$.

盖尔维奇和安耶夫的图3比较了20公斤狗的冲击和振荡去颤界限, 现转载于此如图4. 除引言中所给的资料外, 没有使用其他电

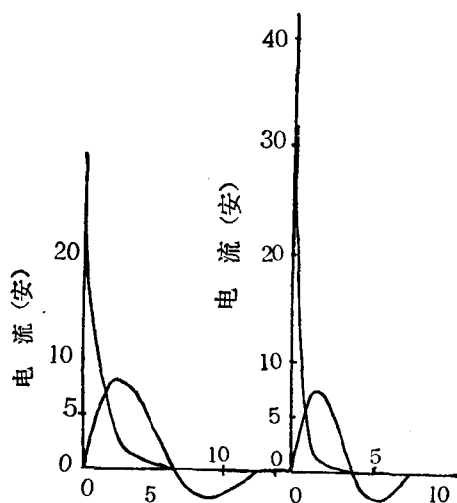


图4 当振荡与非振荡放电使颤动停止时, 重20公斤狗身上电流界限的比较

左: C = 10微法, L = 0.35亨, R_c = 48欧
右: C = 4微法, L = 0.35亨, R_c = 48欧

路参数。然而, 从原图中所得到的量允许很近似地与动物身上可能接受的放电相比较, 结果如下:

对于C = 10微法

冲击放电的电量 = CE = $10 \times 10^{-6} \times 3000 = 30$ 毫库,

冲击放电的能量 = $1/2 CE^2 = \frac{1}{2} \times 10 \times 10^{-6} \times 3000^2 = 45$ 瓦·秒,

振荡放电的能量 = $1/2 CE^2 \times \frac{R_b}{(R_b + R_c)}$
= $\frac{1}{2} \times 10 \times 10^{-6} \times 2585^2 \times \frac{93}{(93 + 48)} = 22$ 瓦·秒,

脉冲能量的比率 = $45/22 = 2.0$.

对于C = 4微法

冲击放电的电量 = $4 \times 10^{-6} \times 4130 = 16.5$ 毫库,

冲击放电的能量 = $\frac{1}{2} \times 4 \times 10^{-6} \times 4130^2$
= 34.1瓦·秒,

振荡放电的能量 = $\frac{1}{2} \times 4 \times 10^{-6} \times 3585^2$
 $\times \frac{145}{(145 + 48)} = 19.3$ 瓦·秒,

脉冲能量的比率 = $\frac{34.1}{19.3} = 1.8$.

可以看到, 能量的比值与对应的电量值相比较, 大约是一致的。因此, 从以前有关人身事故的讨论和随后的评论来看, 必然合理地得出, 放电的能量是电击强度的真正依据。若电击时间短, 也不考虑放电的型式, 则上述结论明显是对的。

当这一概念证明了对危险界限有较大的限制时, 利用一个大于1的脉冲能量比利用

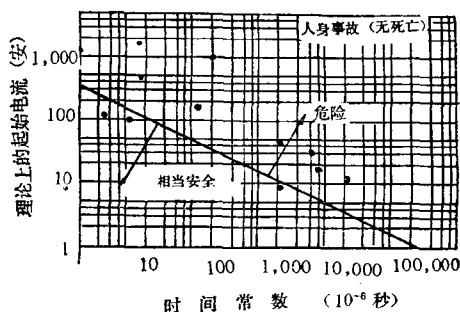


图5 理论上起始电流与时间常数的关系 (从人身冲击放电事故点估算)

更小的安全限流电阻,在经济上要优越。为确定安全限度,可用的脉冲能量比的数量太少了,不足以建立安全界限。然而,分析人身事故的资料指出,比值为2是合适的,它将预示在安全的范围内。因此,方程式(4)变成

$$R_b \int i^2 dt = 0.054 R_b \text{ 瓦} \cdot \text{秒} \quad (9)$$

方程式(7)变成

$$R_c = \frac{CE^2}{0.108} - R_b \text{ 欧} \quad (10)$$

方程式(8)变成

$$CE^2 = 0.108 R_b \quad (11)$$

如果过电压脉冲用下式表示

$$i = I_e^{-\frac{t}{T}}$$

式中: $T = (R_b + R_c)C$

因此, $R_b \int i^2 dt = R_b \int I_e^2 e^{-\frac{2t}{T}} dt =$

$$R_b I_e^2 \frac{T}{2} = 0.054 R_b \quad (12)$$

这就可得 $I_e^2 T = 0.108$ (13)

或 $I_e^2 (R_b + R_c) C = 0.108$ (14)

或 $\frac{CE^2}{R_b + R_c} = 0.108$ (15)

方程式(13)用图解形式表示如图5所示,且依据脉冲电流的电路参数给出所需的能量标准,上述脉冲电流可适当地用一个指数放电来表示。

人体电阻和接触电阻

在应用这些结论时,误差的最大原因也许在于确定接触电阻、皮肤电阻和人体电阻的真正数值。皮肤电阻在限制低压事故的电流中,起着非常重要的作用。不但它有直接限制电流的效果,而且低压也不会破坏皮肤的保护电阻。对于很低的电压,皮肤电阻是确定危险与否的主要因素。不管皮肤表面是干燥的,还是出汗、出血、电介质等引起的潮

湿抑或是皮肉受伤都是极为重要的。对比之下,高压电路、电火花、电弧或电晕放电,由于电流较大,将使正常皮肤的保护恶化,并很快地产生深度烧伤,且使连接或接触不良的电阻趋于失效。

在作者进行的60赫摆脱试验中,双手握有盐水浸湿的电极其手到手的电阻约为1570欧到4430欧。表2给出了另一个试验的结果,它试图研究脉冲电流所引起的人体电阻和皮肤电阻的下降。在这些试验里,被试者站在一个金属盆内,双脚浸在3/4吋深的盐水中,用手同样的溶液浸湿,并握有一根7号的裸铜线。电源包括一个全波整流器和电阻滤波器,以调整起始电流到100毫安,持续电流到15毫安。开路电压被限定为1750伏,用静电伏特计测量。电阻由 E/I 求出,逐渐增加电流,得到脉冲,测量要反复进行,直到电流达到稳定值。虽然电阻有些下降,但这一放电不足以造成皮肤的严重破坏,最低电阻值是1135欧。亦曾作过使皮肤电阻和接触电阻降到最低的试验,即把手臂浸到肘部和沾在10吋深的盐水中。

在60赫和直流情况下,电流被限定在大约10毫安时,结果求得的电阻为400到600欧。

对介于手足之间的体电阻,这些结果是符合通常公认数值500欧的。对于较短的电流路径,这一数值将更小,也许大约为300欧。若电流为1000毫安(用于电疗的),介于太阳穴之间的电阻,大致为100欧。

人身事故

我们获得大量关于人身的脉冲事故资料,总结这些资料是非常有价值的,因为这些结果证实了基于动物试验的推论。除了瑞典的事故(它是从瑞典政府得到的详细报告)和一、二件美国的事故以外,所有的事故都是和遇难者或者和发生事故的实验室主管工程师亲自讨论的。在这一部分中包括了所有

表2 人体电阻的试验

接触——手握7号裸铜线，双脚站在金属盆中，盆内盛有3/4吋深的盐水。

被试人数	正常状态的电阻(欧)		在100毫安脉冲电流后的脉冲电阻(欧)	
	右手到双脚	左手到双脚	右手到双脚	左手到双脚
12	1260	1490	1190	1510
124	1630	1500	1390	1260
125	1450	1600	1410	1490
82	1370	1640	1300	1400
132	1250	1275	1200	1160
104	1480	1500	1710	1440
129	1460	1230	1135	1250
93	2150	1970	1730	1820
137	1650		1170	
最低电阻	1230欧		1135欧	

表3 关于脉冲电流的人身事故一览表

遇难者遭受电击电量的计算值

国别	时间常数 (微秒)	电压 (千伏)	交流电流 (安)	电量 (毫库)	能量 (瓦-秒)	摘 要
冲 击 放 电						
英国	0.99	750	1250	1.2	385	在耳后和胸上有李庭搏图形，遭受电击
美国	2.5	60	120	0.3	9	身上无放电的痕迹，头痛三天
日本	6.0	50	100	0.6	15	短时间的半昏迷和晕眩
日本	7.8	960	1600	12.5	5000	一只眼睛失去视力，感到痛苦，遭受电击，身上无放电的痕迹
法国	8.3	228	456	3.8	429	李庭搏图形，强烈的肌肉反应和手暂时麻痹
日本	62.5	80	160	10.0	400	局部瘫痪三小时
美国	100	500	1000	100	25000	李庭搏图形，强烈的肌肉反应和痛苦，深度烧伤，瘫痪十六小时，电流路径从下腹部至脚
瑞典	1200	25	42	50	520	短时间的失去知觉和瘫痪
日本	1200	5	8	10	21	脚底烧伤
瑞士	3200	17.5	30	96	720	失去知觉，手和臂受伤
瑞士	4070	17.5	16	66	264	二个人串在一起，都受伤
瑞典	11180	6	12	134	402	脚底烧伤
瑞典	35000	2	4	140	140	由于摔倒发生脑震荡
振 荡 放 电						
瑞典	$\frac{1}{2}$ 到1			24	死亡，手指轻微烧伤，	

那些咨询结果被认为是严重事故。咨询表是被送往西欧各国、日本和美国的主要实验室，得到了非常满意的答复，并受到没有发生脉冲事故的许多国家的赞赏。

从理论上分析每个事故，并作简短的摘要，是必要的。为了方便起见，事故摘要按时间常数的顺序列入表3中，冲击放电的各点画于图5。很有意思的是，在危险界限线以下的那三个点，揭示了报导中最不严重事故。重要的是，二件最严重的冲击事故起因于具有最大能量的放电。相比之下，后二件冲击事故就相对地安全，虽然放电量比那些最严重的事故为大。显然，在严重性和电压或电流之间不存在相互关系，这些经验正确地证明了能量是电击强度的真正依据。尤其有趣的是一件单独报导的，因最低事故电压而引起的死亡，显然包含有振荡放电。这一事故列于表3的下部。

除非另外注明人体电阻选定为500欧，不然在许多情况下，当未说明接地回路是金属时，接地电阻都取为100欧。虽然这些值是任取的，但应考虑到电阻的改变不一定会对这一结论有明显的影响。当然，高压电弧或电火花的电阻在计算中被省略。

虽然在任何冲击事故中，没有提到用手按摩使之复苏的需要，但这不能成为不去复苏的理由。关于发生电击事故方面，必须训练我们的工程人员成为机智、敏捷的人，以便从电路上解救出遇难者。在遇难者呼吸停止的情况下，能迅速地采用有效的人工呼吸法和派人请医求救，哪怕节省几秒钟都有可能使一条人命得到拯救。

英国，1936年

布置一台12级的脉冲发生器，各级0.02微法，最高电压为110千伏。将约为750千伏的1/50微秒冲击电压加到一个球隙上。一位工作人员站在混凝土地面上，靠近球隙，当施加电压时，从连接上球的金属构件到他的头上发生放电。这个人被电击倒在地，失去知觉仅一秒左右。给他的一个直接印象是好象有一重物击在头上。他被送回家，随即进

行医学诊察：在两耳后及胸部发现有李庭博图形。约24小时内这些症状就消失了。其后是体温低于正常值，情况像一个人经受了一次手术休克。这个病人恢复到正常的状况要2或3周时间。

分析：

$$C = 0.02 \times 10^{-6} / 12 = 0.00166 \text{ 微法}$$

用 R_d 表示放电电阻器的电阻，为了简化，可忽略波前。

$$T_0 = (50 - 1)10^{-6} / 0.693 = R_d \times 0.00166 \times 10^{-6} \\ R_d = 42400 \text{ 欧。}$$

若人体电阻 $R_b = 500$ 欧，接地电路电阻 $R_g = 100$ 欧。

$$R = 600 \times 42400 / (600 + 42400) = 592 \text{ 欧；}$$

$$T = R \times C = 592 \times 0.00166 \times 10^{-6} = 0.98 \text{ 微秒；}$$

$$I = E/R = 750000 / 592 = 1268 \text{ 安；}$$

$$Q = C \times E = 0.00166 \times 10^{-6} \times 750000 = 1.25 \text{ 毫库；}$$

$$W = 1/2 C \times E^2 = 1/2 \times 0.00166 \times 10^{-6} \times 750000^2 \\ = 469 \text{ 瓦-秒。}$$

遇难者承受到的

$$I_b = 1268 \times 42400 / (600 + 42400) = 1250 \text{ 安；}$$

$$Q_b = 1.25 \times 42400 / 43000 = 1.23 \text{ 毫库；}$$

$$W_b = 469 \times \frac{42400}{43000} \times \frac{500}{600} = 385 \text{ 瓦-秒。}$$

美国，1950年

有人问在电子显微镜上工作的工程师关于测量高压的方法。他开玩笑地说，只要有人用口水沾湿自己的指头，然后去碰管子的阳极就知道了。如果这个设备事先已带电，他的一只手放在该设备的构架上，而另一只手还没有触到管子的阳极时，一个电弧就会击到这只手上。于是，这电流的路径是从手经手臂、胸部到手。二小时后，感觉迟钝的头痛开始了，服用阿斯匹林也无效。三天后才消除，没有发现其它后果。然而奇怪的是，没有烧伤，大概是因为手指弄湿了。管子的阳极由60000±1伏的直流和1/4伏的交流供电。直流由整流器整流，从管子阳极到构架间接有0.005微法的滤波电容。

分析：

假设人体电阻 $R_b = 500$ 欧。

$$T = R \times C = 500 \times 0.005 \times 10^{-6} = 2.5 \text{ 微秒；}$$

$$I_b = E/R = 60000 / 500 = 120 \text{ 安；}$$

$$Q_b = C \times E = 0.005 \times 10^{-6} \times 60000 = 0.3 \text{ 毫库；}$$

$$W_b = 1/2 C \times E^2 = 1/2 \times 0.005 \times 10^{-6} \times 60000^2 =$$

9.0瓦-秒。

日本, 1942或1943年

这位遇难者, 男性, 大约20岁, 用右手抓着脉冲发生器的高压端, 接地线碰着他腹部下面的衣服构成回路。电击使他昏眩, 并处于半昏迷状态约5分钟, 但没有其它的后果。这发生器具有0.015微法电容, 充电到50千伏。放电电阻器 $R_d = 2000$ 欧。

分析:

若人体电阻 $R_b = 500$ 欧,

$$R = 500 \times 2000 / (500 + 2000) = 400 \text{ 欧};$$

$$T = R \times C = 400 \times 0.015 \times 10^{-6} = 6.0 \text{ 微秒};$$

$$I = E/R = 50000/400 = 125 \text{ 安};$$

$$Q = C \times E = 0.015 \times 10^{-6} \times 50000 = 0.75 \text{ 毫库};$$

$$W = 1/2 C \times E^2 = 1/2 \times 0.015 \times 10^{-6} \times 50000^2 = 18.75 \text{ 瓦-秒}。$$

遇难者承受到的

$$I_b = 125 \times 2000 / (500 + 2000) = 100 \text{ 安};$$

$$Q_b = 0.75 \times 2000 / 2500 = 0.60 \text{ 毫库};$$

$$W_b = 18.75 \times 2000 / 2500 = 15.0 \text{ 瓦-秒}。$$

日本, 1950年

一个遇难者站在一张低的木台上, 闪络从连到脉冲发生器高压端的电极棒隙上发生。强烈的肌肉反应使他摔倒在混凝土地面上。在他身上找不出放电的痕迹。但据信, 放电击到他的头上, 且在他一只或两只脚上发生闪电。他的左眼失去视觉, 两天内关节疼得厉害。一个月以后, 视觉恢复一半。这台脉冲发生器由32个电容串联组成, 每个电容是0.5微法, 被充电到30千伏。放电电阻器 $R_d = 3000$ 欧。感到惊奇的是, 这个大的电击却没有在遇难者身上留下痕迹。在这点上作者特别问到该研究所的主管工程师。该事故发生在六月, 可能是放电电击到充分被汗水弄湿的衣服上, 而在很短的放电时间里使皮肤得到了保护。

分析:

若电阻 $R_b = 500$ 欧, $R_g = 100$ 欧,

$$E = 32 \times 30 = 960 \text{ 千伏};$$

$$C = 0.5 \times 10^{-6} / 32 = 0.01563 \text{ 微法};$$

$$R = 600 \times 3000 / (600 + 3000) = 500 \text{ 欧};$$

$$T = R \times C = 500 \times 0.01563 \times 10^{-6} = 7.8 \text{ 微秒};$$

$$I = E/R = 960000/500 = 1920 \text{ 安};$$

$$Q = C \times E = 0.01563 \times 10^{-6} \times 960000 = 15.0 \text{ 毫库};$$

$$W = 1/2 C \times E^2 = 1/2 \times 0.01563 \times 10^{-6} \times 960000^2$$

$= 7200 \text{ 瓦-秒}。$

遇难者承受到的

$$I_b = 1920 \times 3000 / (600 + 3000) = 1600 \text{ 安};$$

$$Q_b = 15.0 \times 3000 / 3600 = 12.5 \text{ 毫库};$$

$$W_b = 7200 \times \frac{3000}{3600} \times \frac{500}{600} = 5000 \text{ 瓦-秒}。$$

法国, 1948年

这个事故是在试验一台被调为1/50微秒波和230伏电压脉冲发生器的瓷套管时, 由于遇难者的疏忽把左手放在套管的末端, 他的肘部搁在靠近左大腿膝盖的地方引起发生器放电造成的。他穿着皮鞋, 并站在一个接地的金属台上。遇难者被摔倒在台上, 过后他站了起来, 突然跑了约10米远, 然后停下, 这时已完全恢复了知觉。他感到头部猛烈地受击, 他的左手麻痹和发育。红和青的李庭博图形出现在他的左手肘上、大腿上和左脚上, 且有皮肤擦破的感觉。这些感觉在5小时后消失, 李庭博图形则约在12小时后消失。显而易见, 电流路径是由手和前臂以及左小腿到脚组成, 而上臂和身躯到大腿, 成为电弧接触的分路。最后他完全恢复了正常。脉冲发生器由12个电容器组成。每个电容器0.22微法, 充电到19千伏。放电电阻器 $R_d = 4500$ 欧。

分析:

若人体电阻 $R_b = 500$ 欧,

$$E = 12 \times 19 = 228 \text{ 千伏};$$

$$C = 0.22 \times 10^{-6} / 12 = 0.01834 \text{ 微法};$$

$$R = 500 \times 4500 / (500 + 4500) = 450 \text{ 欧};$$

$$T = R \times C = 450 \times 0.01834 \times 10^{-6} = 8.25 \text{ 微秒};$$

$$I = E/R = 228000/450 = 507 \text{ 安};$$

$$Q = C \times E = 0.01834 \times 10^{-6} \times 228000 = 4.18 \text{ 毫库};$$

$$W = 1/2 C \times E^2 = 1/2 \times 0.01834 \times 10^{-6} \times 228000^2 = 477 \text{ 瓦-秒};$$

遇难者承受到的

$$I_b = 507 \times 4500 / (500 + 4500) = 456 \text{ 安};$$

$$Q_b = 4.18 \times 4500 / 5000 = 3.76 \text{ 毫库};$$

$$W_b = 477 \times 4500 / 5000 = 429 \text{ 瓦-秒}。$$

日本, 1942年

这个事故是由双手触到一台脉冲发生器的出线端引起的。该发生器的总电容量为0.25微法, 充电电压为80千伏。这个遇难者被电击倒在地上。失去了知觉, 但马上恢复正常, 能说话, 约有8分钟不能动弹。约3小时后, 他才能走动, 但在当天均感关节疼痛。放电电阻 $R_d = 500$ 欧。

分析:

$$\begin{aligned} \text{若人体电阻 } R_t &= 500 \text{ 欧,} \\ R &= 500 \times 500 / (500 + 500) = 250 \text{ 欧;} \\ T &= R \times C = 250 \times 0.25 \times 10^{-6} = 62.5 \text{ 微秒;} \\ I &= E/R = 80000/250 = 320 \text{ 安;} \\ Q &= C \times E = 0.25 \times 10^{-6} \times 80000 = 20 \text{ 毫库;} \\ W &= 1/2 C \times E^2 = 1/2 \times 0.25 \times 10^{-6} \times 80000^2 = \\ &= 800 \text{ 瓦-秒。} \\ \text{遇难者承受到的} \\ I_b &= 320 \times 500 / (500 + 500) = 160 \text{ 安;} \\ Q_b &= 20 \times 500 / 1000 = 10 \text{ 毫库;} \\ W_t &= 800 \times 500 / 1000 = 400 \text{ 瓦-秒。} \end{aligned}$$

美国, 1937年

事故是因脉冲发生器放电未完所致。当调整发生器的终端绝缘间隙时, 脉冲电流从完全被充电的发生器流向遇难者的身体。放电通过他的胃中心, 击到他的下腹部, 往下经双腿进入地板。该地板是由架在钢梁上的4吋厚木板构成。遇难者的鞋上钉有钉子, 因此, 被放电所击穿。烧伤的肌肉凹深约有1/8吋。一个直径为14³/₄吋的李庭博图形出现在他的下腹部。李庭博图形的分枝颜色介于红色和紫色。根据现有的李庭博资料, 用外推法求出他受到约为475~500千伏的电压。

当受到电击时, 他正站着, 背对着1/2吋厚的纤维板墙。当时, 肌肉反应是如此之强烈, 以致墙的一整块被踢穿。他好像被抛出墙外, 没有摔伤, 亦没有失去知觉, 但不能站立, 因为腿的功能丧失。他说这个痛苦是可怕的。

脉冲发生器是由5组电容器组成。每组电容为1微法, 充电到100千伏。这种电路实质上是串联电路, 由充电到500千伏的0.2微法电容器和人体到地串联组成。

分析:

$$\begin{aligned} \text{若人体电阻 } R_t &= 500 \text{ 欧,} \\ T &= R \times C = 500 \times 0.20 \times 10^{-6} = 100 \text{ 微秒;} \\ I_t &= E/R = 500000/500 = 1000 \text{ 安;} \\ Q_b &= C \times E = 0.2 \times 10^{-6} \times 500000 = 100 \text{ 毫库;} \\ W_t &= 1/2 C \times E^2 = 1/2 \times 0.2 \times 10^{-6} \times 500000^2 \\ &= 25000 \text{ 瓦-秒。} \end{aligned}$$

瑞典, 1948年

一个30岁的装配工正在试验一台伦琴仪器。该仪器由0.2微法电容的50千伏整流器供电。在事故发生时, 电压大概为25000伏。当时, 他的左手触

到了联接电容器的裸线部份, 电容器经过他的身躯和左腿对地放电。他失去知觉, 摔倒在地。电击几乎引起全身瘫痪, 4天后才完全恢复正常。

分析:

$$\begin{aligned} \text{若电阻 } R_t &= 500 \text{ 欧, } R_g = 100 \text{ 欧,} \\ T &= R \times C = 600 \times 2 \times 10^{-6} = 1200 \text{ 微秒;} \\ I_b &= E/R = 25000/600 = 42 \text{ 安;} \\ Q_b &= C \times E = 2 \times 10^{-6} \times 25000 = 50 \text{ 毫库;} \\ W_t &= 1/2 C \times E^2 \times R_b / (R_t + R_g) = 1/2 \times 2 \times 10^{-6} \times \\ &= 25000^2 \times 500/600 = 520 \text{ 瓦-秒。} \end{aligned}$$

日本, 1942或1943年

在这个实例里, 遇难者触到一个经大电阻充电到5千伏的0.2微法电容器的一端。电流路径是从右手到右脚, 这一放电在他的脚底留下一个烧伤的痕迹。据这个遇难者讲, 他头晕、眼花, 感觉上好象遭枪刺。

分析:

$$\begin{aligned} \text{若电阻 } R_t &= 500 \text{ 欧, } R_g = 100 \text{ 欧,} \\ T &= R \times C = 600 \times 2 \times 10^{-6} = 1200 \text{ 微秒;} \\ I_t &= 5000/600 = 8.3 \text{ 安;} \\ Q_b &= 2 \times 10^{-6} \times 5000 = 10 \text{ 毫库;} \\ W_t &= 1/2 \times 2 \times 10^{-6} \times 5000^2 \times 500/600 = 21 \text{ 瓦-秒。} \end{aligned}$$

瑞士, 1944年

一台被充电到20.3千伏的8.8微法电容器, 经约675欧电阻串联的间隙闪络。在放电时刻, 有个工匠, 他的左手正巧碰到电阻器的某处(该处电压大约为17.5千伏), 而他的右手触到接地线上, 于是形成了一个放电电路。该遇难者失去知觉片刻, 且有二处受伤, 一处在他的左臂, 另一处在他的右手。不久, 他完全恢复了正常, 没有遗留永久性的创伤。

分析:

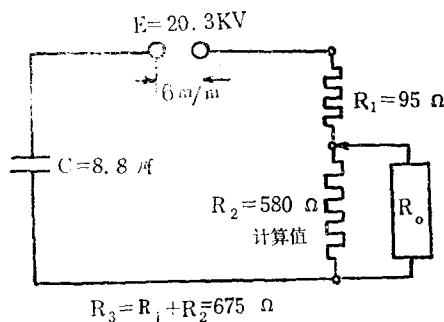


图6 瑞士事故(1944年)的基本电路

分析时仍令人体电阻 $R_b = 500$ 欧。圆括号内的数值表示 $R_b = 250$ 欧；方括号内的数字表示 $R_b = 750$ 欧，电路图见图6。

$$R = R_1 + \frac{R_2 R_b}{(R_2 + R_b)} = 95 + \frac{580 \times 500}{580 + 500}$$

$$= 95 + 269 = 364 \text{ 欧,}$$

$$(\text{若 } R_b = 250, R = 270); (\text{若 } R_b = 750, R = 422);$$

$$T = R \times C = 364 \times 8.8 \times 10^{-6} = 3200 (2375)$$

$$[3710] \text{ 微秒,}$$

$$I = E/R = 20300/364 = 55.8 (75.2) [48.1] \text{ 安,}$$

$$Q_b = C \times E = 8.8 \times 10^{-6} \times 20300 = 178.6 \text{ 毫库,}$$

$$W = 1/2 C \times E^2 = 1/2 \times 8.8 \times 10^{-6} \times 20300^2 = 1813 \text{ 瓦-秒.}$$

遇难者承受到的

$$I_b = I \frac{R_2}{R_2 + R_b} = 55.8 \times \frac{580}{1080}$$

$$= 30.0 (52.6) [21.0] \text{ 安,}$$

$$Q_b = Q \frac{R_2}{R_2 + R_b} = 95.9 (125) [78] \text{ 毫库,}$$

$$W_b = W \frac{R_2}{R_2 + R_b} \times \frac{R_2 R_b}{R_2 + R_b} / R = 1813 \times \frac{580}{1080}$$

$$\times \frac{269}{364} = 720 (820) [610] \text{ 瓦-秒.}$$

瑞士, 1950年

这个事故类似于1944年发生的事故。是在相同的试验设备上和几乎同样的情况下发生的。总的情况是，放电进入一个遇难者的左手，而他的右手正碰到第二个工人的左手，于是放电在第二个遇难者的右膝下入地，从而电流从两个串联着的人体通过。两人都受了伤，一周不能工作。以后，他们都痊愈了，没有遗留永久性的损伤。

分析：

在没有掌握确切数值的情况下，按第一个事故相同的电阻来计算，求得

$$I_b = 43.9 \frac{580}{1580} = 16.1 (30.0) [11.0] \text{ 安,}$$

$$Q_b = 178.5 \times \frac{580}{1580} = 65.6 (55.9) [49.8] \text{ 毫库,}$$

$$W_b = \frac{1813}{2} \times \frac{580}{1580} \times \frac{367}{462} = 264 (360) [206] \text{ 瓦-秒.}$$

瑞典, 1949年

一台50赫1.81千伏、23千乏的电容器用6000伏直流电压进行试验时，引入电源的裸线断开了。

一个工人在接通断开的电源引线时，一只手握着的引线弹簧夹碰上电容器的端子，刚好他又站在地上拖着的接地线上。于是电容器通过他身躯放电，使脚跟烧伤。遇难者33岁，11天以后完全痊愈。

分析：

若人体电阻 $R_b = 500$ 欧，

$$C = VA/(E^2 \times 2\pi f) = 23000/(1810^2 \times 2 \times 50\pi)$$

$$= 22.35 \text{ 微法,}$$

$$T = R \times C = 500 \times 22.35 \times 10^{-6} = 11180 \text{ 微秒,}$$

$$I_b = E/R = 6000/500 = 12 \text{ 安,}$$

$$Q_b = C \times E = 22.35 \times 10^{-6} \times 6000 = 134 \text{ 毫库,}$$

$$W_b = 1/2 C \times E^2 = 1/2 \times 22.35 \times 10^{-6} \times 6000^2 = 402 \text{ 瓦-秒.}$$

瑞典, 1950年

一个27岁的试验者用2000伏直流试验一台70微法、400伏的电容器。在作完试验时，他将电容器放电。在放电过程中，移动电容器时，电容器的一端碰到外壳上，而他碰到电容器的另一端。电容器就通过他的身体放电。他向后跌倒，头撞在背后的一台机器上，造成脑振荡。10天后他才恢复健康。

分析：

若人体电阻 $R_b = 500$ 欧，

$$T = R \times C = 500 \times 70 \times 10^{-6} = 35000 \text{ 微秒,}$$

$$I_b = E/R = 2000/500 = 4 \text{ 安,}$$

$$Q_b = C \times E = 70 \times 10^{-6} \times 2000 = 140 \text{ 毫库,}$$

$$W_b = 1/2 C \times E^2 = 1/2 \times 70 \times 10^{-6} \times 2000^2 = 140 \text{ 瓦-秒.}$$

瑞典, 1952年

1952年10月10日发生一起22岁男子的触电事故。原因是从一台150千瓦广播发射机用的高压滤波器的电容上得到残余电荷的结果。滤波器电路虽已从电源断开，但这个遇难者忘了在更换阳极电路上的熔丝之前要把电容器的电荷放掉。电流路径是从左手、臂的上部，横过胸到碰着接地的设备架子上的右手。唯一明显的伤害是在一个手指上烧伤，直径约15~20毫米，他被送进医院。医生诊断病人已电击死亡，但没有进行尸体解剖。在事故发生前10个月他作过全面的体格检查，全都正常。造成事故的电压估计为500~1000伏。电路的基本参数示于图7。这个电路的电压方程式为：

$$L \frac{d^2 i_1}{dt^2} + r \frac{di_1}{dt} + \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) i_1 - \frac{i_2}{C_2} = 0$$

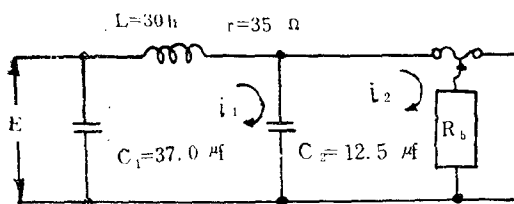


图7 瑞典事故(1952年)的基本电路

$$-\frac{i_1}{C_2} + R_b \frac{di_2}{dt} + \frac{i_2}{C_2} = 0$$

若 $R_b = 500\Omega$, $E = 1060\text{V}$, 方程的解为

$$i_2 = 2.56e^{-142t} + 1.36e^{-9.65t} \sin(30.4t - 0.424)$$

衰减正弦曲线的频率几乎与人体电阻无关。 $R_b = 0 \sim 500\Omega$ 时, 频率变化为每秒5周, $R_b = 1000\Omega$ 时, 增到每秒6周。这被认为是最大的值。

遇难者承受到的

$$W_b = 1/2 C_1 E^2 \frac{R_b}{R_b + r} + 1/2 C_2 E^2 = 1/2 \times 37$$

$$\times 10^{-6} \times 1000^2 \times \frac{500}{535} + 1/2 \times 12.5 \times 10^{-6}$$

$$\times 1000^2 = 23.5 \text{ 瓦-秒。}$$

振荡放电的危险界限(按方程式4)是

$$W_c = 0.027 \times 500 = 13.5 \text{ 瓦-秒。}$$

理论上要求建立危险界限的最低电压从下式得到

$$1/2 \times 37 \times 10^{-6} E^2 \times \frac{500}{535} + 1/2 \times 12.5 \times 10^{-6} E^2 = 13.5$$

从式中得 $E = 755$, 这是由瑞典官方估计的一个电压数值, 在发生事故时是可能的。

例1:

若电流在1/2周时切断, 那么对人来说相当安全的60赫最大电流是多少?

解:

$t = 1/2 \text{ 周} = 0.008 \text{ 秒}$ 时, 用方程式(2)

$$I^2 \times 0.008 = 0.027. \text{ 得 } I = 1.8 \text{ 安(有效值)。}$$

这一结果亦可直接从图1获得。在横座标上取 $t = 0.008 \text{ 秒}$ 作垂线到曲线C, 得1800毫安。

注:

除了设计时确保一些电流能限制在公认的安全值以外, 还必须靠隔离和(或)绝缘来保证电击危险的安全。

例2:

触及一台总电容量为0.0025微法的100千伏整

流滤波器的输出电路时危险程度的研究。

解:

若 $R_b = 500\Omega$, 可利用方程式(8)和(11)。

考虑到脉冲放电的安全, CE^2 应 $< (0.054 \sim 0.108) R_b$, 则 $0.0025 \times 10^{-6} \times 100000^2 < (0.054 \sim 0.108) \times 500$

注:

虽然对生命没有危险, 但偶然的触及亦易引起不随意的肌肉反应, 甚至痛苦的损伤。

例3:

重新考虑上述的例子, 若 $E = 150 \text{ 千伏}$ 。

解:

若振荡放电, 可利用方程式(7),

$$R_c = \frac{0.0025 \times 10^{-6} \times 150000^2}{0.054} - 500 = 540\Omega;$$

若非振荡放电, 则利用方程式(10),

$$R_c = \frac{0.0025 \times 10^{-6} \times 150000^2}{0.108} - 500 = 20\Omega.$$

注:

对超高压设备来说, 可以考虑利用扼流圈输出滤波器, 因为输出扼流圈所固有的电阻本来就可使安全得到提高。至于多级滤波器, 由于利用不等电容器的结果, 明显地增加了安全。输出端电容应尽量小, 以符合良好的运行特性。应该考虑到振荡放电发生的可能性所引起的显著危险。

例4:

在一个2.5/45微秒、15000安的雷击放电情况下, 提供合理而安全的接地极的电阻应是多少?

解:

若放电用 $i_s = 15000e^{-t/T}$ 表示, 且忽略波前, 则 $7500 = 15000e^{-42.5 \times 10^{-6}/T}$ 。

$$\text{解得 } T = 42.5 \times 10^{-6} / 0.693 = 61.3 \text{ 微秒。}$$

如果一个和接地良好的导体接触的人碰到一根接地极上有问题的接地线, 则电流将通过他的身体, 此时,

$$I_b = I_s \frac{R_g}{(R_g + R_b)}, \text{ 利用方程式(13),}$$

$$I^2 \left[\frac{R_g}{(R_g + R_b)} \right]^2 T = 0.108 \text{ 或 } \frac{R_g}{(R_g + R_b)}$$

$$= \frac{1}{I_s} \sqrt{\frac{0.108}{T}}, \text{ 代入这些数值, 取人体电阻为 } 500 \Omega, \text{ 得 } R_g = 1.4 \Omega. \text{ 如取人体电阻为 } 750 \Omega, \text{ 得 } R_g = 2.1 \Omega.$$

注:

这些电阻数是低于通常从接地极得到的数值。在雷雨期间人们常到的场所, 在手臂伸到的范围内, 避雷线线和接地极应该用机械强度牢固的绝缘加以保护。雷雨时若在

原书缺页