

Electric Power Technology

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI (高职高专教育)



ANQUAN YONGDIAN

# 安全用电

吴新辉 汪祥兵 编



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI (高职高专教育)



ANQUAN YONGDIAN

# 安全用电

吴新辉 汪祥兵 编  
余建华 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材（高职高专教育）。

本书共分8章，主要内容包括人身触电及其防护、电气绝缘及电气试验、过电压及其防护、电气设备安全检查和电气安全用具、电气工作安全措施和电气装置的防火与防爆、用电事故调查与管理。

本书主要作为高职高专院校电力技术类专业教学用书，也可作为函授及工程技术人员参考用书。

## 图书在版编目（CIP）数据

安全用电/吴新辉，汪祥兵编. —北京：中国电力出版社，2007

普通高等教育“十一五”规划教材. 高职高专教育

ISBN 978-7-5083-5174-2

I. 安... II. ①吴... ②汪... III. 用电管理—安全技术—高等学校：技术学校—教材 IV. TM92

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 004569 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2007 年 2 月第一版 2007 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11 印张 264 千字

印数 0001—3000 册 定价 16.50 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

（本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换）

# 前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

随着社会的发展,人民生活水平的日益提高,电能在国民经济的各个部门的应用将愈来愈广泛。人们在使用电能的同时,如果使用和控制不当,将会带来危害,这些危害会给人们的生活带来不幸甚至痛苦,也会给国家经济带来重大的损失。本书的编写目的就是希望对人们今后的安全用电有所帮助。

安全用电是高职高专供电专业的主要课程。通过本课程的学习,能使熟悉防止人身触电的技术措施,懂得触电急救,掌握电气设备的防火防爆技术、扑灭电气火灾的方法,以及学会电气安全用具的使用,掌握分析和处理用电事故的方法。

全书共分为八章:第一章阐述人身触电及防护措施,第二章阐述电介质在电场作用下的极化现象和电气绝缘试验,第三章阐述过电压产生和防雷设备的应用,第四章介绍电气设备安全检查的内容,第五章介绍电气安全用具的正确使用,第六章介绍安全组织措施、技术措施和操作安全技术,第七章介绍电气防火防爆的措施和扑灭电气火灾的方法,第八章阐述用电事故调查和管理。

本书第二章至第四章和第八章由吴新辉编写,其余章节由汪祥兵编写。全书由吴新辉统稿。本书由余建华担任主审。

本教材在编写过程中收集和参阅了各方面的资料,有关现场工作人员给予了大力的支持和帮助,并提出了宝贵的意见和建议。在此一并致以衷心的感谢。

由于水平有限,不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2006年12月

## 目 录

## 前言

|                            |    |
|----------------------------|----|
| <b>第一章 人身触电及防护</b> .....   | 1  |
| 第一节 触电及触电方式 .....          | 1  |
| 第二节 防止发生触电事故的措施 .....      | 7  |
| 第三节 触电急救 .....             | 16 |
| 思考题 .....                  | 20 |
| <b>第二章 电气绝缘及电气试验</b> ..... | 21 |
| 第一节 电介质的极化 .....           | 21 |
| 第二节 电介质的电导 .....           | 24 |
| 第三节 电介质的损耗 .....           | 27 |
| 第四节 电介质的击穿 .....           | 30 |
| 第五节 绝缘电阻、吸收比和极化指数的测量 ..... | 32 |
| 第六节 泄漏电流试验 .....           | 35 |
| 第七节 介质损失角正切值试验 .....       | 37 |
| 第八节 绝缘油的电气性能试验 .....       | 39 |
| 第九节 交流耐压试验 .....           | 40 |
| 第十节 直流耐压试验 .....           | 43 |
| 思考题 .....                  | 44 |
| <b>第三章 过电压及其防护</b> .....   | 46 |
| 第一节 雷电的基本知识 .....          | 46 |
| 第二节 避雷针、避雷线 .....          | 52 |
| 第三节 避雷器 .....              | 55 |
| 第四节 变电所防雷保护 .....          | 61 |
| 第五节 配电设备防雷保护 .....         | 65 |
| 第六节 小电机的防雷保护 .....         | 67 |
| 第七节 架空电力线路的保护 .....        | 69 |
| 第八节 接地装置 .....             | 70 |
| 第九节 内部过电压 .....            | 74 |
| 思考题 .....                  | 80 |
| <b>第四章 电气设备安全检查</b> .....  | 81 |
| 第一节 变压器检查 .....            | 81 |
| 第二节 成套配电装置检查 .....         | 85 |
| 第三节 断路器检查 .....            | 90 |
| 第四节 高压熔断器和互感器检查 .....      | 91 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第五节 电力电容器检查 .....           | 95  |
| 第六节 电力线路检查 .....            | 97  |
| 第七节 安全距离 .....              | 99  |
| 思考题 .....                   | 105 |
| <b>第五章 电气安全用具</b> .....     | 106 |
| 第一节 绝缘安全用具 .....            | 106 |
| 第二节 一般防护安全用具 .....          | 111 |
| 思考题 .....                   | 113 |
| <b>第六章 电气工作安全措施</b> .....   | 114 |
| 第一节 电气工作安全组织措施 .....        | 114 |
| 第二节 电气工作安全技术措施 .....        | 121 |
| 第三节 电气倒闸操作安全技术 .....        | 126 |
| 第四节 防止误触电的措施 .....          | 131 |
| 第五节 变电所安全制度及事故处理 .....      | 137 |
| 思考题 .....                   | 141 |
| <b>第七章 电气装置的防火与防爆</b> ..... | 142 |
| 第一节 电气火灾和爆炸 .....           | 142 |
| 第二节 电气装置的防火防爆 .....         | 144 |
| 第三节 扑灭电气火灾 .....            | 152 |
| 思考题 .....                   | 155 |
| <b>第八章 用户事故调查与管理</b> .....  | 156 |
| 第一节 用户事故及性质分类 .....         | 156 |
| 第二节 事故调查及分析 .....           | 159 |
| 思考题 .....                   | 163 |
| <b>附录</b> .....             | 164 |
| <b>参考文献</b> .....           | 167 |

## 第一章 人身触电及防护

在电能的生产、传输和使用过程中,如果人们不懂得电的安全知识、不采取可靠的防护措施或者违反有关的安全规程和规定,就可能发生人身触电事故。触电事故是较为常见的电气事故,其特征是突发性大、死亡率高。因此,触电事故是各个行业、人民生活乃至整个社会都应重视和预防的,也是电气安全技术工作的重点。本章将介绍人身触电的方式、防止发生触电事故的技术措施及触电急救的方法。

### 第一节 触电及触电方式

#### 一、触电

人体触及带电体并形成电流通路,造成对人体的伤害称为触电。

电作用于人体的机理是一个很复杂的问题,其影响因素很多。对于同样的情况,不同的人产生的生理效应不尽相同,即使是同一个人,在不同的环境、不同的生理状态下,生理效应也不相同。通过大量的研究表明,电对人体的伤害主要来自电流。

电流流过人体时,电流的热效应会引起肌体烧伤、炭化,或在某些器官上产生损坏其正常功能的高温;肌体内的体液或其他组织会发生分解作用,从而使各种组织的结构和成分遭到严重的破坏;肌体的神经组织或其他组织因受到刺激而兴奋,内分泌失调,使人体内部的生物电遭到破坏;产生一定的机械外力引起肌体的机械性损伤。因此,电流流过人体时,人体会产生不同程度的刺麻、酸疼、打击感,并伴随不自主的肌肉收缩、心慌、惊恐等症状,伤害严重时会出现心律不齐、昏迷、心跳呼吸停止直至死亡的严重后果。

电流对人体的伤害可以分为两种类型,即电伤和电击。

##### 1. 电伤

电伤是指由于电流的热效应、化学效应和机械效应对人体的外表造成的局部伤害,如电灼伤、电烙印、皮肤金属化等。

(1) 电灼伤。电灼伤一般分为接触灼伤和电弧灼伤两种。

接触灼伤发生在高压触电事故时,电流流过人体皮肤的进、出口处。一般进口处比出口处灼伤严重,接触灼伤的面积较小,但深度大,大多为三度灼伤,灼伤处呈现黄色或褐黑色,并可累及皮下组织、肌腱、肌肉及血管,甚至使骨骼呈现炭化状态,一般需要治疗的时间较长。

当发生带负载误拉、合隔离开关及带地线合隔离开关时,所产生的强烈电弧都可能引起电弧灼伤,其情况与火焰烧伤相似,会使皮肤发红、起泡,组织烧焦、坏死。

(2) 电烙印。电烙印发生在人体与带电体之间有良好的接触的部位处。在人体不被电击的情况下,在皮肤表面留下与带电体接触时形状相似的肿块痕迹。电烙印边缘明显,颜色呈灰黄色,有时在触电后,电烙印并不立即出现,而在相隔一段时间后才出现。电烙印一般不发病或化脓,但往往造成局部的麻木和失去知觉。

(3) 皮肤金属化。皮肤金属化是由于高温电弧使周围金属熔化、蒸发并飞溅渗透到皮肤表面形成的伤害。皮肤金属化以后,表面粗糙、坚硬,金属化后的皮肤经过一段时间后方能自行脱离,对身体机能不会造成不良的后果。

电伤在不是很严重的情况下,一般无致命危险。

## 2. 电 击

电击是指电流流过人体内部造成人体内部器官的伤害。当电流流过人体时会造成人体内部器官(如呼吸系统、血液循环系统、中枢神经系统等)生理或病理变化,工作机能紊乱,严重时会导致人体休克乃至死亡。

电击使人致死的原因有三个方面:第一是因流过心脏的电流过大、持续时间过长,引起“心室纤维性颤动”而致死;第二是因电流作用使人产生窒息而死亡;第三是因电流作用使心脏停止跳动而死亡。其中“心室纤维性颤动”致死所占比例最大。

电击是触电事故中后果最严重的一种,绝大部分触电死亡事故都是电击造成的。通常所说的触电事故,主要是指电击。

电击伤害的影响因素主要有如下几个方面。

(1) 电流强度及电流持续时间。当不同大小的电流流经人体时,往往有各种不同的感觉,通过的电流愈大,人体的生理反应愈明显,感觉也愈强烈。按电流通过人体时的生理机能反应和对人体的伤害程度,可将电流分成以下三级。

1) 感知电流是人体能够感觉,但不遭受伤害的电流。感知电流通过人体时,人体有麻酥、灼热感。通过对人体直接进行的大量试验表明,对于不同的人、不同的性别,感知电流是不相同的。如取其平均值,成年男性的平均感知电流约为  $1.1\text{mA}$ ,成年女性的平均感知电流约为  $0.7\text{mA}$ 。

感知电流还和电流的频率有关,随着频率的增加,感知电流的数值将相应地增加。例如,对于男性来说,当频率从  $50\text{Hz}$  增加到  $5000\text{Hz}$  时,感知电流将从  $1.1\text{mA}$  增加到  $7\text{mA}$ 。直流电对人体的伤害较轻,此时男性的感知电流为  $2.5\text{mA}$ ,女性的感知电流约为  $3.5\text{mA}$ 。

2) 摆脱电流是人体触电后,不需要任何外来帮助的情况下,能够自主摆脱的最大电流。摆脱电流通过人体时,人体除有麻酥、灼热感外,主要是疼痛、心律障碍感。摆脱电流是一项十分重要的安全指标,正常人在规定的时间内,反复经受摆脱电流,不会有严重的后果。

试验研究表明,成年男性的平均摆脱电流约为  $16\text{mA}$ ,女性的为  $10.5\text{mA}$ 。为安全起见,考虑多方面的因素,规定正常成年男性的允许摆脱电流为  $9\text{mA}$ ,女性的为  $6\text{mA}$ 。

3) 致命电流是人体触电后危及生命的电流。电击使人致死的主要原因是“心室纤维性颤动”,所以致命电流也称为心室颤动电流或致颤电流。

心室颤动电流与电流流过人体的路径和持续时间有着密切的关系。电流持续时间越长,电流对人体的危害越严重。这是因为时间越长,人体内积累的外能量越多,人体电阻因出汗及电流对人体组织的电解作用而变小,使伤害程度进一步增加;另外,人的心脏每收缩、舒张一次,中间约有  $0.1\text{s}$  的间隙,在这  $0.1\text{s}$  的时间内,心脏对电流最敏感,若电流在这一瞬间通过心脏,即使电流很小(几十毫安),也会引起心室颤动。显然,电流的持续时间越长,重合这段危险期的几率越大,危险性也越大。一般认为,工频电流  $15\sim 20\text{mA}$  以下及直流  $50\text{mA}$  以下,对人体是安全的,但如果持续时间很长,即使电流小到  $8\sim 10\text{mA}$ ,也可能使人致命。

(2) 人体电阻。人体触电时, 流过人体的电流在接触电压一定时由人体的电阻决定, 人体电阻愈小, 流过的电流则愈大, 人体所遭受的伤害也愈大。

人体的不同部分(如皮肤、血液、肌肉及关节等)对电流呈现出一定的阻抗, 即人体电阻。其大小不是固定不变的, 它决定于许多因素, 如接触电压、电流途径、持续时间、接触面积、温度、压力、皮肤厚薄及完好程度、潮湿、脏污程度等。总的来讲, 人体电阻由体内电阻和表皮电阻组成。

1) 体内电阻是指电流流过人体时, 人体内部器官呈现的电阻。它的数值主要决定于电流的通路。当电流流过人体内的不同部位时, 体内电阻呈现的数值不同。电阻最大的通路是从一只手到另一只手, 或从一只手到另一只脚或双脚, 这两种电阻基本相同; 电流流过人体其他部位时, 呈现的体内电阻都小于这两种电阻。一般认为, 人体的体内电阻为  $500\Omega$  左右。

2) 表皮电阻指电流流过人体时, 两个不同触电部位皮肤上的电极和皮下导电细胞之间的电阻之和。表皮电阻随外界条件的不同而在较大范围内变化。当电流、电压、电流频率及持续时间、接触压力、接触面积、温度增加时, 表皮电阻会下降; 当皮肤受伤甚至破裂时, 表皮电阻会随之下降, 甚至降为零。可见, 人体电阻是一个变化范围较大, 且决定于许多因素的变量, 只有在特定条件下才能测定。不同条件下的人体电阻见表 1-1, 一般情况下, 人体电阻可按  $1000\sim 2000\Omega$  考虑, 在安全程度要求较高的场合, 人体电阻可按不受外界因素影响的体内电阻( $500\Omega$ )来考虑。

表 1-1

不同条件下的人体电阻

| 加于人体的电压 (V) | 人体电阻 ( $\Omega$ ) |      |      |        |
|-------------|-------------------|------|------|--------|
|             | 皮肤干燥              | 皮肤潮湿 | 皮肤湿润 | 皮肤浸入水中 |
| 10          | 7000              | 3500 | 1200 | 600    |
| 25          | 5000              | 2500 | 1000 | 500    |
| 50          | 4000              | 2000 | 875  | 440    |
| 100         | 3000              | 1500 | 770  | 375    |
| 250         | 2000              | 1000 | 650  | 325    |

注 1. 表内数值的前提: 电流为基本通路, 接触面积较大。

2. 皮肤潮湿相当于有水或汗痕。

3. 皮肤湿润相当于有水蒸气或特别潮湿的场合。

4. 皮肤浸入水中相当于游泳池内或浴池中, 基本上是体内电阻。

5. 此表数值为大多数人的平均值。

(3) 作用于人体的电压。作用于人体的电压对流过人体电流的大小有直接的影响。当人体电阻一定时, 作用于人体的电压越高, 则流过人体的电流越大, 其危险性也越大。实际上, 流过人体电流的大小, 也并不与作用于人体的电压成正比, 由表 1-1 可知, 随着作用于人体电压的升高, 人体电阻下降, 导致流过人体的电流迅速增加, 对人体的伤害也就更加严重。

(4) 电流路径。电流流过人体的路径不同, 使人体出现的生理反应及对人体的伤害程度是不同的。电流流过心脏、脊椎和中枢神经系统等要害部位时, 伤害程度严重, 特别是心

脏,是人体最软弱的器官,其危害性最大。试验表明,同样大小的电流流过人体的路径不同时,流过心脏的电流大小不相同,由此造成的电击危险性也不相同。人体内不同电流路径对心脏电流的影响,可由心脏电流系数表示。心脏电流系数就是从左手到双脚的心室颤动电流与任一电流路径的心室颤动电流的比值。不同电流路径的心脏电流系数见表 1-2。

由表 1-2 可以看出,胸至左手是最危险的电流路径;其次是胸至右手。对经常发生的触电的四肢来说,左手至左脚、右脚或双脚是最危险的电流路径;脚至脚的电流路径偏离心脏较远,从心脏流过的电流小,但也不能忽视,不能说没有危险。例如,由跨步电压而造成的触电,开始也是从经过两脚,但由于痉挛而摔倒,电流就会流过其他重要部位,同样会造成严重的后果。

表 1-2 不同电流路径的心脏电流系数

| 电 流 路 径           | 心 脏 电 流 系 数 | 电 流 路 径     | 心 脏 电 流 系 数 |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| 左手至左脚、右脚或双脚;双手至双脚 | 1.0         | 背部至左手       | 0.7         |
| 左手至右手             | 0.4         | 胸部至右手       | 1.3         |
| 右手至左脚、右脚或双脚       | 0.8         | 胸部至左手       | 1.5         |
| 背部至右手             | 0.3         | 臂部至左手、右手或双手 | 0.7         |

(5) 电流种类及频率的影响。电流种类不同,对人体的伤害程度则不一样。当电压在 250~300V 以内时,触及频率为 50Hz 的交流电,比触及相同电压的直流电的危险性大 3~4 倍。不同频率的交流电对人体的影响也不相同。通常,50~60Hz 的交流电,对人体危险性最大。低于或高于此频率的电流对人体的伤害程度要显著减轻。但高频率的电流通常以电弧的形式出现,因此有灼伤人体的危险。

(6) 人体状态的影响。电流对人体的作用与人的年龄、性别、身体及精神状态有很大的关系。一般情况下,女性比男性对电流敏感,小孩比成人敏感。在同等的触电情况下,妇女和小孩更容易受到伤害。此外,患有心脏病、精神病、结核病、内分泌器官疾病或酒醉的人,因触电造成的伤害都将比正常人严重;相反,一个身体健康、经常从事体力劳动和体育锻炼的人,由触电引起的后果相对会轻一些。

## 二、人体的触电方式

人体的触电方式有直接接触电和间接接触电及与带电体的距离小于安全距离的触电。

### 1. 人体与带电体的直接接触触电

人体与带电体的直接接触触电可分为单相触电和两相触电。

(1) 单相触电。人体接触三相电网中带电体中的某一相时,电流通过人体流入大地,这种触电方式称为单相触电。

电网可分为大接地短路电流系统和小接地短路电流系统。由于这两种系统中性点的运行方式不同,发生单相触电时,电流经过人体的路径及大小就不一样,触电危险性也不相同。

1) 中性点直接接地系统的单相触电。以 380/220V 的低压配电系统为例,当人体触及某一相导体时,相电压作用于人体,电流经过人体、大地、系统中性点接地装置、中性线形成闭合回路,如图 1-1(a) 所示。由于中性点接地装置的电阻  $R_0$  比人体电阻小得多,则相电压几乎全部加在人体上。设人体电阻  $R_r$  为  $1000\Omega$ ,电源相电压  $U_{ph}$  为 220V,则通过人体的电流  $I_r$  约为 220mA,足以使人致命。一般情况下,人脚上穿有鞋子,有一定的限流作

用；人体与带电体之间以及站立点与地之间也有接触电阻，所以实际电流较 220mA 要小，所以人体触电后，有时可以摆脱。但人体触电后由于遭受电击的突然袭击，慌乱中易造成二次伤害事故（例如空中作业触电时摔到地面等）。所以电气工作人员工作时应穿合格的绝缘鞋；在配电室的地面上应垫有绝缘橡胶垫，以防止触电事故的发生。

## 2) 中性点不接地系统的单相触电

如图 1-1 (b) 所示，当人站立在地面上，接触到该系统的某一相导体时，由于导线与地之间存在对地阻抗  $Z_c$ （由线路的绝缘电阻  $R$  和对地电容  $C$  组成），则电流以人体接触的导体、人体、大地、另外两相导线对地阻抗  $Z_c$  构成回路，通过人体的电流与线路的绝缘电阻及对地电容的数值有关。在低压系统中，对地电容  $C$  很小，通过人体的电流主要决定于线路的绝缘电阻  $R$ 。

正常情况下， $R$  相当大，通过人体的电流很小，一般不致造成对人体的伤害；但当线路绝缘下降， $R$  减小时，单相触电对人体的危害仍然存在。而在高压系统中，线路对地电容较大，则通过人体的电容电流较大，将危及触电者的生命。

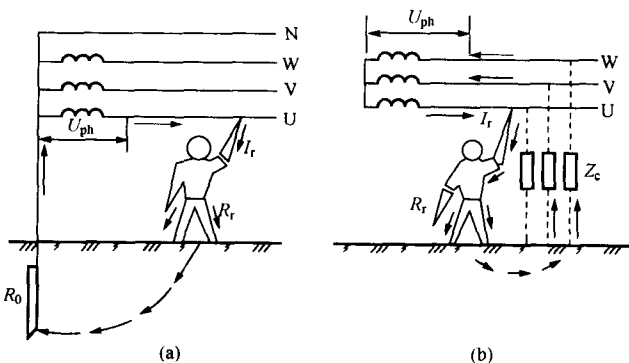


图 1-1 单相触电示意图

(a) 中性点直接接地系统的单相触电；

(b) 中性点不接地系统的单相触电

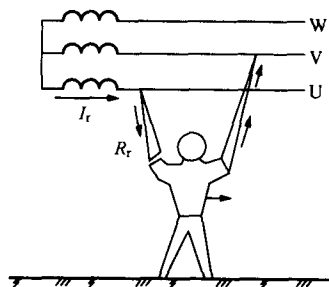


图 1-2 两相触电示意图

(2) 两相触电。当人体同时接触带电设备或线路中的两相导体时，电流从一相导体经人体流入另一相导体，构成闭合回路，这种触电方式称为两相触电，如图 1-2 所示。此时，加在人体上的电压为线电压，它是相电压的  $\sqrt{3}$  倍。通过人体的电流与系统中性点的运行方式无关，其大小只决定于人体电阻和人体与相接触的两相导体的接触电阻之和。因此，它比单相触电的危险性更大，例如，380/220V 低压系统线电压为 380V，设人体电阻  $R_t$  为  $1000\Omega$ ，则通过人体的电流  $I_t$  可达 380mA，足以致人死亡。电气工作中两相触电

多在带电作业时发生，由于相间距离小，安全措施不周全，使人体直接或通过作业工具同时触及两相导体，造成两相触电。

## 2. 间接触电

间接触电是由于电气设备绝缘损坏发生接地故障，设备金属外壳及接地点周围出现对地电压引起的。它包括跨步电压触电和接触电压触电。

(1) 跨步电压触电。当电气设备或载流导体发生接地故障时，接地电流将通过接地体流向大地，并在大地中的接地体周围作半球形的散流，如图 1-3 所示。

在以接地故障点为球心的半球形散流场中，靠近接地点处的半球面上，电流密度线密，离开接地点的半球面上的电流密度线疏，且愈远愈疏；另一方面，靠近接地点处的半球面的截面积较小，电阻大，离开接地点处的半球面面积大，电阻减小，且愈远电阻愈小。因此，在靠近接地点处沿电流散流方向取两点，其电位差比远离接地点处同样距离的两点间的电位

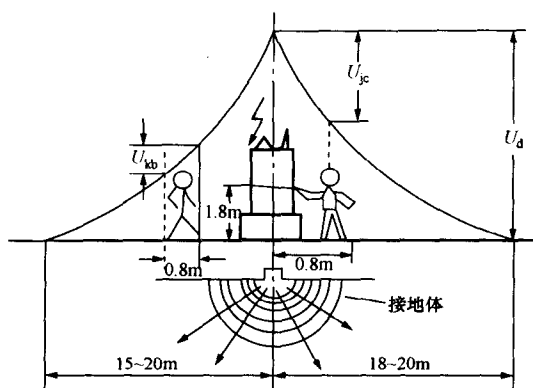


图 1-3 接地电流的散流场、地面电位分布示意图

$U_d$ —接地短路电压； $U_{jc}$ —接触电压； $U_{kb}$ —跨步电压

差大，当离开接地故障点 20m 以外时，这两点间的电位差即趋于零。将两点之间的电位差为零的地方称为电位的零点，即电气上的“地”。显然，该接地体周围，对“地”而言，接地点处的电位最高为  $U_d$ ，离开接地点处，电位逐步降低，其电位分布呈伞形下降，此时，人在有电位分布的故障区域内行走时，其两脚之间（一般为 0.8m 的距离）呈现出电位差，此电位差称为跨步电压  $U_{kb}$ ，如图 1-3 所示。

由跨步电压引起的触电叫跨步电压触电。由图 1-3 可见，在距离接地故障点 8~10m 以内，电位分布的变化率较大，人在此

区域内行走，跨步电压高，就有触电的危险；在离接地故障点 8~10m 以外，电位分布的变化率较小，人的一步之间的电位差较小，跨步电压触电的危险性明显降低。人在受到跨步电压的作用时，电流将从一只脚经腿、跨部、另一只脚与大地构成回路，虽然电流没有通过人体的全部重要器官，但当跨步电压较高时，触电者脚发麻、抽筋，跌倒在地，跌倒后，电流可能会改变路径（如从手至脚）而流经人体的重要器官，使人致命。因此，发生高压设备、导线接地故障时，在室内人不得接近接地故障点 4m 以内（因室内狭窄，地面较为干燥，离开 4m 之外一般不会遭到跨步电压的伤害），室外不得接近距故障点 8m 以内。如果要进入此范围内工作，为防止跨步电压触电，进入人员应穿绝缘鞋。

当避雷针或者避雷器动作，其接地体周围的地面也会出现伞形电位分布，同样会发生跨步电压触电。

(2) 接触电压触电。在正常情况下，电气设备的金属外壳是不带电的，由于绝缘损坏，设备漏电，使设备的金属外壳带电。接触电压是指人触及漏电设备的外壳，加于人手与脚之间的电位差  $U_{jc}$ ，（脚距漏电设备 0.8m，手触及设备处距地面垂直距离 1.8m），如图 1-3 所示由接触电压引起的触电叫接触电压触电。

若设备的外壳不接地，在此接触电压下的触电情况与单相触电情况相同；若设备外壳接地，则接触电压为设备外壳对地电位与人站立点的对地电位之差，如图 1-3 所示。当人需要接近漏电设备时，为防止接触电压触电，应戴绝缘手套、穿绝缘鞋。

### 3. 与带电体的距离小于安全距离的触电

当人体与带电体（特别是高压带电体）的空气间隙小于一定的距离时，虽然人体没有接触带电体，也可能发生触电事故。这是因为空气间隙的绝缘强度是有限度的，当人体与带电体的距离足够近时，人体与带电体间的电场强度将大于空气的击穿场强，空气将被击穿，带电体对人体放电，并在人体与带电体间产生电弧，此时人体将受到电弧灼伤及电击的双重伤害。这种与带电体的距离小于安全距离的弧光放电触电事故多发生在高压系统中。此类事故的发生，大多是工作人员误入带电间隔，误接近高压带电设备所造成的。因此，为防止这类事故的发生，国家有关标准规定了不同电压等级的最小安全距离，工作人员距带电体的距离不允许小于此距离值。

## 第二节 防止发生触电事故的措施

### 一、发生触电事故的主要原因及规律

造成人身触电事故的原因很多,但归纳起来大致有如下几个方面。

(1) 缺乏电气安全知识。攀爬高压线杆及高压设备;架空线附近放风筝;不明导线用手错抓误碰;低压架空线路断线后不停电,用手去接触;在安全措施不完善时带电作业;零线做地线使用;带电体任意裸露,随意摆弄电器;没有经过电工专业培训,进行电器的安装、接线、私拉乱接等造成本人和他人的触电事故。

(2) 违反操作规程。带电拉隔离开关或跌落式熔断器;在高压线路下违章建筑施工;带电进行线路或电气设备的操作而又未采取必要的安全措施;误入带电间隔,误登带电设备;带电修理电动工具;带电移动电气设备;带电作业;不遵守安全规章制度,违章操作或约时停、送电;抢救触电者时,用手直接拉伤员,从而使救护人员触电等。

(3) 设备不合格。高低压线路安全距离不够;电力线路与通信线路同杆近距离架设;用电设备进出线绝缘破坏或没有进行绝缘处理,导致设备外壳带电;设备超期使用绝缘老化等。

(4) 维修管理不善。架空线断线不能及时处理;设备损坏没有及时更换;临时线路不按规定装设或不装设保护装置等。

通过对触电死亡事故统计材料的分析,可以大致总结出以下几个方面的规律性。

(1) 触电事故的发生与季节有关。人身触电事故大多发生在6、7、8三个月,这三个月发生的触电死亡事故,一般占全年的65%~70%。这是因为夏季天气潮湿多雨,使电气设备的绝缘性能下降,而且人体也因天热多汗,绝缘电阻下降,特别是在人们赤足或只穿布鞋,在地面较为潮湿的情况下,由于地面导电性好,从而增加了人身触电的可能性。

(2) 触电事故多发生在低压电气设备上。统计数字表明,在380V及以下供用电系统中发生的触电事故约占全部事故的80%以上,可见低压触电事故占绝大多数。主要原因是由于低压电气设备分布很广,人们与其接触机会较多而造成的,所以对低压电气设备要经常进行维修和检查,以防止事故的发生。

(3) 触电事故多发生在缺乏电气基本知识的人员身上。某地区的统计资料表明,两年内发生的20次触电事故中,由于缺乏电气基本知识而造成触电死亡的共17次,占全部事故的80%以上。

(4) 触电事故与工作环境和生产性质有一定的关系。按生产行业分类,冶金、矿业、建筑施工、机械等部门的触电事故较多。统计资料表明,这些行业的触电事故约占全部触电事故的50%以上。

此外,从触电方式上看,单相触电事故和人体的某一部位触及一相带电导体所造成的触电事故占绝大多数。

由于发生触电时,电流大部分或全部从人体内部通过,故触电伤者的外观烧伤现象一般并不严重,大多只留下几处放电斑点,这也是触电的另一个特点。

### 二、防止人身触电的技术措施

防止人身触电最根本的是对电气工作人员或用电人员进行安全教育和培训,做到思想重

视、措施落实和组织保证,严格执行有关安全用电和安全工作规程,防患于未然。同时,对设备本身或工作环境采取一定的技术措施也是行之有效的办法。

防止人身触电的技术措施包括:绝缘和屏护措施;在容易触电的场合采用安全电压;电气设备进行安全接地;采用剩余电流保护方式等。

### (一) 绝缘和屏护

将带电体进行绝缘,以防止与带电部分有任何接触的可能,是防止人身直接触电的基本措施之一。任何电气设备和装置,都应根据其使用环境和条件,对带电部分进行绝缘防护,绝缘性能都必须满足该设备国家现行的绝缘标准,并能耐受运行中容易受到的电、热、化学及机械力等的作用。为保证人身安全,一方面要选用合格的电器设备或导线,另一方面要加强设备检查,掌握设备绝缘性能,发现问题及时处理,防止发生触电事故。

电气工作人员在工作中应尽可能停电操作,操作前要验电,防止突然来电,并与附近停电的设备保持安全距离。如确实需要在低压情况下带电工作,要遵守带电作业的相关规定。在绝缘站台、垫上工作,穿绝缘鞋、戴绝缘手套,使用有绝缘手柄的工具等都是防止人体接入电流回路、电流流过人体发生触电的绝缘措施。

屏护就是用遮栏、护罩、护盖等将带电体隔离,防止工作人员无意识地触及或过分接近带电体。在屏护上还要有醒目的带电标识,使人认识到越过屏护会有触电危险而不故意触及。屏护应牢固地固定在应有的位置上,有足够的稳定性和持久性,与带电体之间保持足够的安全距离。需要移动或打开屏护时,必须使用钥匙等专用工具,还应有可靠的闭锁,保证在供电确已切断、设备无电的情况下才能打开屏护,屏护恢复后方可恢复供电。这些都能防止人体直接接触带电体而造成直接接触。

### (二) 采用安全电压

在人们容易触及带电体的场所,动力、照明电源采用安全电压,是防止人体触电的重要措施之一。

安全电压是为防止触电事故而采用的由特定电源供电的电压系列。通过人体的电流决定于加于人体的电压和人体电阻,安全电压就是根据人体允许通过的电流(30mA)与人体电阻(1700Ω)的乘积为依据确定的。我国规定的安全电压额定值是交流42、36、24、12、6V,空载交流电压的最大值是50V,直流安全电压的上限是72V。

采用安全电压可有效地防止触电事故的发生,但由于工作电压降低,要传输一定的功率,工作电流就必须增大,这就要求增加低压回路导线的截面积,使投资费用增加。一般安全电压只适用于小容量的设备,如行灯、机床局部照明灯及危险度较高的场所中使用的电动工具等。采用安全电压的电气设备、用电电器应根据使用场所的环境、使用方式和人员因素等,选用国家标准规定的不同等级的安全电压额定值。如手提式照明灯、安全灯、危险环境的携带式电动工具,在无特殊的安全结构和安全措施情况下,应采用36V安全电压;在金属容器内、隧道内、矿井内等工作地点,以及较狭窄、有金属导体管板或金属壳体、粉尘多或潮湿环境使用的手提式照明灯,应采用24V或12V安全电压。安全电压等级系列不适用于水下等特殊场所,也不适用于插入人体内部的带电医疗设备。

采用降压变压器(即行灯变压器)取得安全电压时,须采用双绕组变压器而不能采用自耦变压器,以使一、二次绕组之间只有电磁耦合而不直接发生电的联系。此外,安全电压的供电网络必须有一点接地(中性线或某一相线),以防止电源电压偏移引起触电危险。

采用安全电压并不意味着是绝对安全。如人体在汗湿、皮肤破裂等情况下长时间触及电源,也可能发生电击伤害。当电气设备电压超过 24V 安全电压等级时,还要采取防止直接接触带电体的保护措施。另外,由于电流刺激,要采取预防可能引起的高空坠落、摔倒等二次性伤害事故。

### (三) 安全接地

安全接地包括电气设备外壳(或构架)保护接地、保护接零或零线的重复接地,它是防止接触电压触电和跨步电压触电的根本方法。

#### 1. 保护接地

保护接地是将一切正常时不带电而在绝缘损坏时可能带电的金属部分(如各种电气设备的金属外壳、配电装置的金属构架等)与独立的接地装置相连,从而防止工作人员触及时发生触电事故。它是防止接触电压触电的一种技术措施。

保护接地是利用接地装置足够小的接地电阻值,降低故障设备外壳可导电部分对地电压,减小人体触及时流过人体的电流,达到防止接触电压触电的目的。

(1) 中性点不接地系统的保护接地。在中性点不接地系统中,用电设备一相绝缘损坏,外壳带电。如果设备外壳没有接地,如图 1-4 (a) 所示,则设备外壳上将长期存在着电压(接近于相电压),当人体触及到电气设备外壳时,就有电流流过人体,其值为

$$I_r = \frac{3U_{ph}}{3R_r + Z_c} \quad (1-1)$$

接触电压

$$U_{jc} = \frac{3U_{ph}R_r}{3R_r + Z_c} \quad (1-2)$$

式中  $I_r$ ——流过人体电流, A;

$U_{jc}$ ——作用于人体的接触电压, V;

$R_r$ ——人体电阻,  $\Omega$ ;

$Z_c$ ——电网对地绝缘阻抗,  $\Omega$ ;

$U_{ph}$ ——系统运行相电压, V。

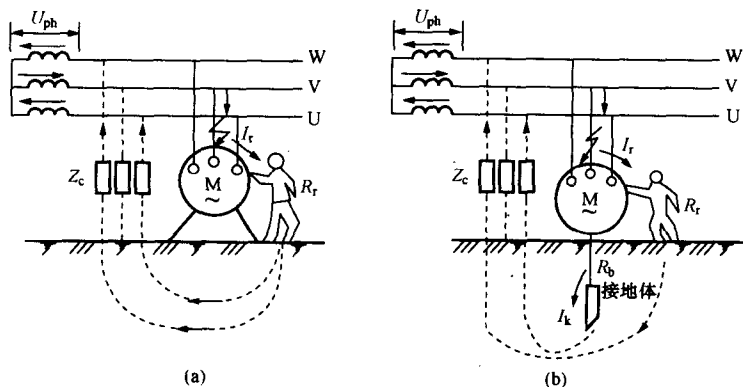


图 1-4 中性点不接地系统的保护接地原理

(a) 没采用保护接地时; (b) 采用保护接地时

但若采用保护接地,如图 1-4 (b) 所示,保护接地电阻  $R_b$  与人体电阻  $R_r$  并联,由于  $R_b \ll R_r$ , 设备对地电压及流过人体的电流可近似为

$$U_{jc} = \frac{3U_{ph}R_b}{|3R_b//R_r + Z_c|} \approx \frac{3U_{ph}R_b}{|3R_b + Z_c|} \quad (1-3)$$

$$I_r = \frac{U_{jc}}{R_r} = \frac{3U_{ph}R_b}{|3R_b + Z_c|R_r} \quad (1-4)$$

式中  $R_b$ ——保护接地电阻,  $\Omega$ 。

比较式(1-2)与式(1-3), 由于  $Z_c \gg R_r$ 、 $R_b$ , 所以其分母近似相等; 而分子因  $R_r \ll R_b$ , 使得接地后对地电压大大降低。同样由式(1-1)与式(1-4)得知, 保护接地后, 人体触及设备外壳时流过的电流也大大降低。由此可见, 只要适当地选择  $R_b$  即可避免人体触电。

例如, 220/380V 中性点不接地系统, 对地阻抗  $Z_c$  取绝缘电阻 7000 $\Omega$ , 有设备发生单相碰壳。若没有保护接地, 有人触及该设备外壳, 人体电阻  $R_r$  为 1000 $\Omega$ , 则流过人体电流约为 66mA; 但如果该设备有保护接地, 接地电阻为  $R_b = 4\Omega$ , 则流过人体电流约为 0.26mA, 显然, 该电流不会危及人身安全。

同样, 即使在 6~10kV 中性点不接地系统中, 若采用保护接地, 尽管其电压等级较高, 也能减小设备发生碰壳而人体触及设备时流过人体的电流, 减小触电的危险性, 如果进一步采取相应的防范措施, 增大人体回路的电阻, 例如人脚穿胶鞋, 也能将人体电流限制在 50mA 之内, 保证人身安全。

(2) 中性点直接接地系统的保护接地。在中性点直接接地系统中, 若不采用保护接地, 当人体接触一相碰壳的电气设备时, 人体相当于发生单相触电, 如图 1-5 (a) 所示, 流过人体的电流及接触电压为

$$I_r = \frac{U_{ph}}{R_r + R_0} \quad (1-5)$$

$$U_{jc} = \frac{U_{ph}}{R_r + R_0} R_r \quad (1-6)$$

式中  $R_0$ ——中性点接地电阻,  $\Omega$ ;

$U_{ph}$ ——电源相电压, V。

以 380/220V 低压系统为例, 若人体电阻  $R_r = 1000\Omega$ ,  $R_0 = 4\Omega$ , 则流过人体电流  $I_r \approx 220$ mA, 作用于人体电压  $U_{jc} \approx 220$ V, 足以使人致命。

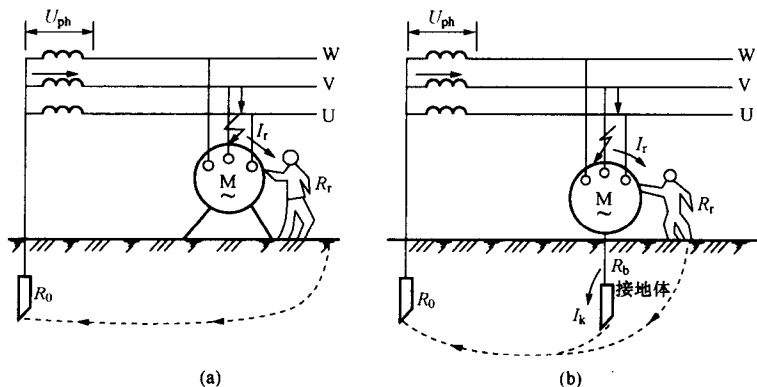


图 1-5 中性点接地系统保护接地原理

(a) 无保护接地时; (b) 有保护接地时

若采用保护接地,如图1-5(b)所示,电流将经人体电阻 $R_r$ 和设备接地电阻 $R_b$ 的并联支路、电源中性点接地电阻、电源形成回路,设保护接地电阻 $R_b=4\Omega$ ,流过人体的电流及接触电压为

$$U_{jc} = I_d R_b = U_{ph} \frac{R_b}{R_0 + R_b // R_r} \approx U_{ph} \frac{R_b}{R_0 + R_b} = 110 \text{ (V)} \quad (1-7)$$

$$I_r = \frac{U_{jc}}{R_r} = \frac{U_{ph}}{R_r} \frac{R_b}{R_0 + R_b} \approx 110 \text{ (mA)} \quad (1-8)$$

110mA 的电流虽比未装保护接地时的小,但对人身安全仍有致命的危险。所以,在中性点直接接地的低压系统中,电气设备的外壳采用保护接地,仅能减轻触电的危险程度,并不能保证人身安全;在高压系统中,其作用就更小。

## 2. 保护接零及零线的重复接地

(1) 保护接零。在中性点直接接地的低压供电网络中,一般采用的是三相四线制的供电方式。将电气设备的金属外壳与电源(发电机或变压器)接地中性线(零线)做金属性连接,这种方式称为保护接零,如图1-6所示。

采用保护接零时,当电气设备某相绝缘损坏碰壳,接地短路电流流经短路线和接地中性线构成回路。由于接地中性线阻抗很小,接地短路电流 $I_d$ 较大,足以使线路上(或电源处)的自动断路器或熔断器以很短的时限将设备从电网中切除,使故障设备停电。另外,人体电阻远大于接零回路中的电阻,即使在故障未切除前,人体触到故障设备外壳,接地短路电流几乎全部通过接零回路,也使流过人体的电流接近于零,确保人身的安全。

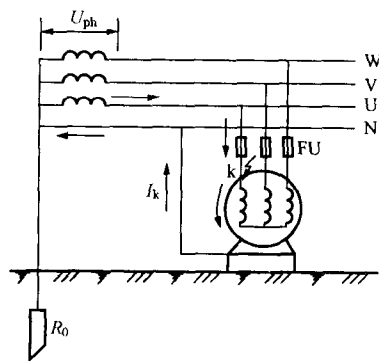


图 1-6 保护接零

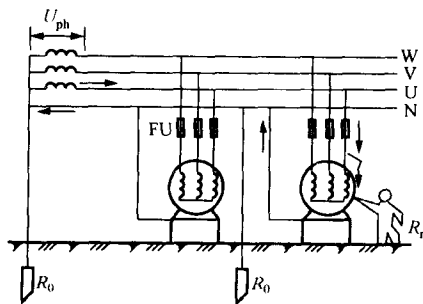


图 1-7 零线的重复接地

(2) 零线的重复接地。运行经验表明,在保护接零的系统中,只在电源的中性点处接地还是不够安全的,为了防止接地中性线的断线而失去保护接零的作用,还应在零线的一处或多处通过接地装置与大地连接,即零线重复接地,如图1-7所示。

在保护接零的系统中,若零线不重复接地,当零线断线时,只有断线处之前的电气设备的保护接零才有作用,人身安全得以保护;在断线处之后,当设备某相绝缘损坏碰壳时,设备外壳带有相电压,仍有触电的危险。即使相线不碰壳,在断线处之后的负载群

中,如果出现三相负载不平衡(如一相或两相断开),也会使设备外壳出现危险的的对地电压,危及人身安全。

采用了零线的重复接地后,若零线断线,断线处之后的电气设备相当于进行了保护接地,其危险性相对减小。

## 3. 安全接地的注意事项

电气设备的保护接地、保护接零及零线的重复接地都是为了保证人身安全的,统称为安