

第 1 章 电力系统、电气测量与安全用电

现代社会中,人们的生活与电密不可分。无论是工农业生产中的风力、水力发电,还是生活中的洗衣机、电磁炉及各类通信装置,它们都是电力系统的一部分。然而,电给人们带来各种便利的同时,也引发了各类安全事故,如短路引发的各类火灾、控制系统故障引发的通信故障、各类触电事故等。因此,在学习电类知识之前,必须掌握安全用电基础知识,以避免发生各类用电事故。

1.1 我国的电力系统

【导学】

本节介绍我国电力系统的基本概念,概述了发电和输电,并列出了工业企业和居民生活配电的特点,介绍了电力系统与电力电子系统。

1.1.1 发电与输电概述

人们平时所用的电能不是大自然直接产生的,而是属于二次能源。电能是通过发电厂将自然界中的一次能源(煤、油、水等)经过加工及能量转换后产生的。这种电能相较于自然界中存在的电能有诸多优点,如安全可控、运输方便、易于集中和分散,并且可以自由迅速地转换成其他形式的能量。发电与输电技术的发展有利于提高生产力和产品质量,并增加经济效益,因此,电能已经成为现代社会生产生活中不可或缺的能源。

1) 电力系统的结构组成

电力系统是由发电厂、变电所、电力线路与电能用户等部分组成的完整体系,如图 1-1 所示。电力系统的任务就是完成电能的生产、变换、分配与输送。

(1) 发电厂。发电厂(power plant)又称发电站,是将自然界蕴藏的各种一次能源转换为电能(二次能源)的工厂。19 世纪末,随着电力需求的增长,人们开始提出建立电力生产中心的设想。随着电机相关技术的发展及生产中用电需求的迅速增长,发电厂应运而生。发电厂有多种发电途径:靠火力发电的称为火电厂,靠水力发电的称为水电厂,还有些靠太阳能(光伏)和风力与潮汐发电的电厂等,而以核燃料为能源的核电厂已在许多国家发挥着越来越大的作用。

(2) 变电所。变电所(substation)是改变电压的场所,是电力系统中对电能的电压和电流进行变换、集中和分配的场所。为保证电能的质量及设备的安全,变电所还需要进行电压调整、潮流(电力系统中各节点和支路中的电压、电流、功率的流向及分布)控制,以及输配电线路和主要电工设备的保护。因此,变电所按用途可分为电力变电所和牵引变电所(电气化铁路和电车用)。

(3) 电力线路。电力线路是指在发电厂、变电站和电力用户间传送电能的线路。它是供电系统的重要组成部分,担负着输送和分配电能的任务。

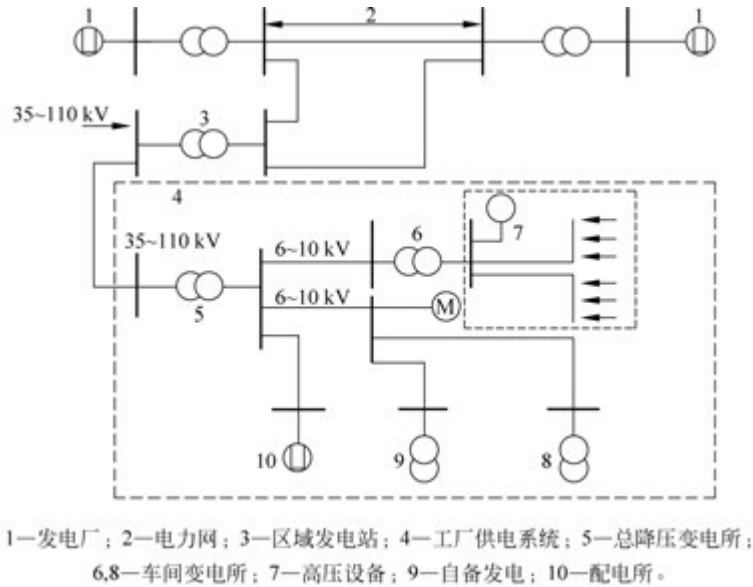


图 1-1 电力系统结构示意图

(4) 电能用户。在电力系统中,一切消费电能的设备都是电能用户。其按用途可分为动力用电设备、发热用电设备、照明用电设备、实验用电设备等。这些设备可将电能转换为不同形式的适用于生产的能量。

2) 电力系统的运行特点和要求

电力系统的运行特点:电能难以大规模储存,所以电力系统中的一系列动作实际是同时进行的,生产的电能基本上随产随用,发电厂的产能要等于用电设备消耗的电能与输送中损耗的电能之和。电力系统建设投入大,速度快,输电过程十分短暂。电力系统与国民经济息息相关,一旦停电将会带来严重的损失和后果。

对电力系统的要求:一是要安全与稳定,安全重于泰山,稳定可靠也是合格的电力系统必须具备的特质;二是要保证供电质量,供电质量高生产才能稳定;三是要具有灵活性、方便性、经济性;四是要考虑未来电力系统扩建的可能性。

3) 电力系统的额定电压

送电距离越远,要求输电线的电压越高。我国国家标准 GB/T 156—2017《标准电压》中规定输电线的额定电压为 35 kV、110 kV、220 kV、330 kV、500 kV、750 kV 等。

降压变电所大型用户的配电电压为 35 kV、110 kV,中小型用户的配电电压为 6 kV、10 kV、380 V、220 V 等。

1.1.2 工业企业和居民生活配电

1) 工业企业配电

工业企业配电就是由输电线末端的变电所将电能分配给各工业企业和城市。工业企业中一般有两个变电所,即中央变电所和车间变电所。中央变电所接收送来的电能,分配到各车间,然后由车间变电所把电能分配到用电设备。从车间变电所到用电设备的线路属于低

压配电线路,主要有放射式和树干式两种连接方式。

当负载的点比较分散而各个负载点又具有相当大的集中负载时,采用放射式配电线路比较合适。放射式配电线路图如图 1-2 所示。

以下两种情况下采用树干式配电线路:

(1) 负载均匀地分布在一条线上,如图 1-3(a)所示。

(2) 负载集中时,各个负载点位于变电所或配电箱的同一侧,其间距离短,如图 1-3(b)所示。

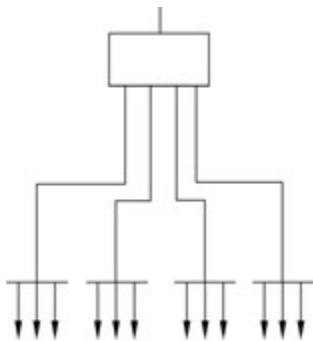


图 1-2 放射式配电线路图

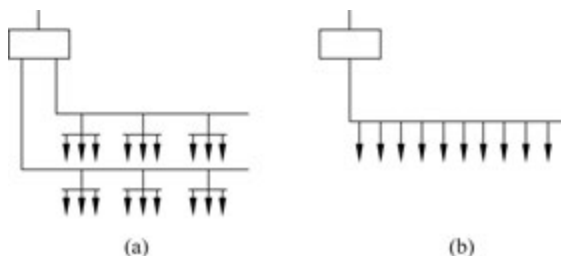


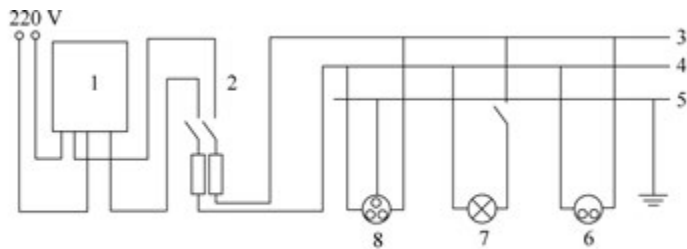
图 1-3 树干式配电线路图

(a) 负载均匀分布式; (b) 负载集中分布式

2) 居民生活配电

居民生活配电是指电力系统通过输电线路将电能调整到合适的电压后输送至家庭用户。

家庭电路一般由两根进户线(也叫电源线)、电能表(俗称电表)、闸刀开关(现一般为空气开关)、漏电保护器、保险设备(空气开关等其他类型符合标准要求的熔断器)、用电器、插座、导线、开关等组成。家庭用电的连接方式大多为并联,少数情况下为串联。图 1-4 为家庭电路示意图,通过该图可直观地理解家庭配电。



1—电能表; 2—闸刀开关; 3—火线; 4—零线; 5—地线; 6—两孔插座; 7—电灯; 8—三孔插座。

图 1-4 家庭电路示意图

1.1.3 电力系统与电力电子系统

按照我国电力系统中工作电压的高低,结合强电与弱电的定义,可将我国电力系统分为电力系统与电力电子系统两部分。

1) 电力系统

可以简单地将电力系统理解为电工系统。电工系统主要研究 220 V 以上电压为主的电

路系统,研究基于系统的稳定分析、暂态分析与控制、继电保护及系统优化等。

2) 电力电子系统

可以简单地将电力电子系统理解为电子系统。电子系统主要研究 36 V 安全电压下工作的系统,以功率半导体为基础,研究基于器件、拓扑结构的分析及应用。

本课程的学习也依据此标准,将教学内容分为电工部分及电子部分。

【课程思政】

社会责任:用电安全重于泰山,无论是在电力系统工作的专业技术人员,还是日常用电的普通人,都要承担一定安全责任。在专业教育过程中,更要培养学生对安全用电的认知、情感和信念,以及敢于承担责任、履行义务的态度。

1.2 电工与电子测量

【导学】

本节主要介绍常用的电工仪表,以及电流、电压、电阻的一般测量方法。

1.2.1 常用电工仪表

1) 万用表

万用表又称为复用表、多用表、三用表、繁用表等,是电力电子行业相关的部门不可或缺的测量仪表,主要用于测量电压、电流和电阻等。万用表按显示方式可分为指针万用表和数字万用表。万用表是一种多功能、多量程的测量仪表,一般可测量直流电流、直流电压、交流电流、交流电压、电阻和音频电平,有的还可以测量电容量、电感量及半导体器件参数等。常用的万用表如图 1-5 所示。

2) 钳形电流表

正常情况下,用普通电流表测量电路中的电流时,需要先将被测电路断开,再将电流表串入线路完成电流的测量。但这样的操作十分不便,而钳形电流表可以避免这个问题,它可以直接用钳口夹住被测导线进行测量,使测量工作变得简单、方便、快捷。钳形电流表如图 1-6 所示。



图 1-5 万用表



图 1-6 钳形电流表

3) 兆欧表

电力系统包含电气设备、家用电器和电气线路,绝缘性能的好坏直接决定了设备能否正

常运行。电气设备本身绝缘电阻值的大小就可以体现出绝缘性能的好坏,绝缘电阻值越大,其绝缘性能越好,电力设备线路也就越安全。

前面列举的万用表也可以测量电阻,但主要是测量低压条件下的电阻值。如果用万用表测量电气设备的绝缘电阻,其阻值一般为无穷大。而电气设备实际的工作条件是成百上千伏,在这种工况下,绝缘电阻不再是无穷大,可能会变得比较小。因此,测量电气设备的绝缘电阻要根据电气设备的额定电压等级来选择仪表。兆欧表就是专门用于测量电气设备绝缘性能的仪表,如图 1-7 所示。



图 1-7 兆欧表

1.2.2 电流的测量

一般情况下,电流分为直流电和交流电两种,测量直流电流通常使用磁电式电流表,测量交流电流主要使用电磁式电流表。电流表在测量过程中应该串联在被测电路中,如图 1-8(a)所示,为了在测量时不影响原有电路的工作,电流表的内阻必须很小。因此,测量时严禁将电流表并联在电路两端,如果并联,电流表将会被烧毁。

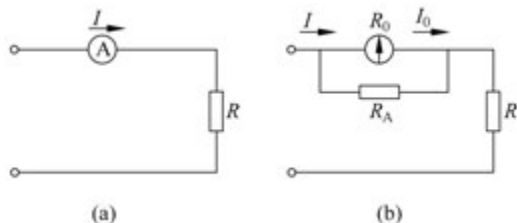


图 1-8 电流表和分流器

(a) 电流表; (b) 分流器

采用磁电式电流表测量直流电流时,电流表的表头所允许通过的电流很小,不能直接测量较大的电流。为了扩大量程,可在测量机构上并联一只低值电阻 R_A ,这个电阻叫作分流器,如图 1-8(b)所示。 I_0 只是被测电流 I 的一部分,二者的关系为

$$I_0 = \frac{R_A}{R_0 + R_A} I \quad (1-1)$$

即

$$R_A = \frac{R_0}{\frac{I}{I_0} - 1} \quad (1-2)$$

式中, R_0 是测量机构的电阻。由式(1-2)可知,需要扩大的量程越大,分流器的电阻应越小。通过分流器的调节就可以实现对不同大小电流的测量。

【例 1-1】 有一块磁电式电流表,当无分流器时,表头的满标值电流为 10 mA,表头电阻为 40 Ω ,现欲使其量程(满标值)为 1 A,问分流器的电阻应为多大?

解: 根据题意,由式(1-2)可得

$$R_A = \frac{R_0}{\frac{I}{I_0} - 1} = \frac{40}{\frac{1}{0.010} - 1} \Omega = 0.4040 \Omega$$

用电磁式电流表测量交流电流,不用分流器扩大量程,因为电磁式电流表的线圈是固定的,可以允许通过较大的电流。另外在测量交流电流时,电流的分配不仅与电阻有关,还与电感有关,因此很难精确控制分流器。

1.2.3 电压的测量

测量直流电压用磁电式电压表,测量交流电压用电磁式电压表。电压表用来测量电源、负载或某段电路两端的电压,所以在测量时必须与被测部分并联,如图 1-9(a)所示。电压表的内阻必须设计得很高,这样电路才不会受接入电压表的影响。测量机构的电阻 R 并不大,为扩大电压表的量程,必须串联一个称为倍压器的高值电阻 R_V ,如图 1-9(b)所示。

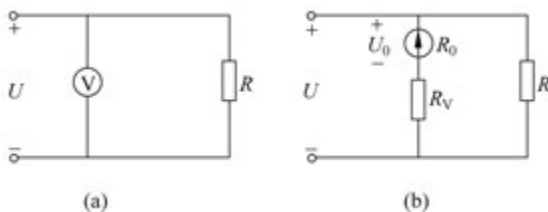


图 1-9 电压表和倍压器

(a) 电压表; (b) 倍压器

由图 1-9(b)可得

$$\frac{U}{U_0} = \frac{R_0 + R_V}{R_0} \quad (1-3)$$

即

$$R_V = R_0 \left(\frac{U}{U_0} - 1 \right) \quad (1-4)$$

由式(1-4)可知,电压表的量程可以通过倍压器的电阻来调节,以达到测量不同电压的目的。电磁式电压表和磁电式电压表都必须串联倍压器。

【例 1-2】 有一块电压表,其量程为 50 V,内阻为 2000 Ω ,现在想要使它的量程扩大到 200 V,问还需要串联多大电阻的倍压器?

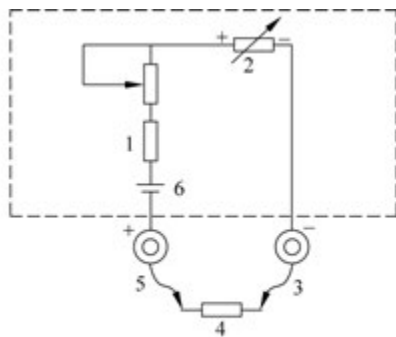
解: 根据题意,由式(1-4)可得

$$R_V = R_0 \left(\frac{U}{U_0} - 1 \right) = 2000 \times \left(\frac{200}{50} - 1 \right) \Omega = 6000 \Omega$$

1.2.4 电阻的测量

可以用前文提到的万用表直接测量电阻。在表头上连接适当的电阻,同时串接一节电池,测量电阻时有电流 I 通过回路。待测电阻值不同,回路中产生的电流和指针的偏转角也不同。根据电流(偏转角)的大小,就可以测量出电阻值。改变分流电阻的阻值,就能改变测量电阻的量程。

如图 1-10 所示,虚框内为万用表的内部结构示意图。特别注意:调到电阻挡时,黑、红表笔之间可输出直流电压,其中黑表笔为直流电压的正极,这对检测半导体管非常重要。



1—表内电阻；2—调零电阻；3—黑表笔；4—待测电阻；
5—红表笔；6—表内电池。

图 1-10 万用表测电阻原理图

【课程思政】

职业道德：电力系统不仅对从业人员的职业技能有较高的要求，对从业人员的道德品质素养也有要求。本小节内容专业性较强，要求学生牢记使命，努力学习专业课，不断提高专业能力，快速成为专业技术人才，充分利用专业技能回馈社会，维护用电安全，为祖国建设添砖加瓦。

1.3 安全用电

【导学】

社会生产中，不仅要提高劳动生产率，减轻繁重的体力劳动，还要尽可能地保护用电者的人身安全。本节内容主要讲解电的危险性，以及在用电时如何保证人身安全。此外还介绍了触电后可以采取的急救措施。

1.3.1 用电前的安全

日常生产生活中，电是必不可少的，它在给人们带来便利的同时，也具有一定的危险性。在生产生活中，利用电能可以减轻繁重的体力劳动，提高劳动生产率，但同时要注意保护劳动者的人身安全。可见，深刻理解用电安全的重要性，是劳动保护教育和安全技术的重要组成部分之一。

要做到安全用电，就必须在用电前牢固树立安全意识，做到安全培训后上岗，特别需要注意以下几点：

1) 严禁直接触碰带电物品

无论在什么情况下，都不可以用手直接触碰测试线端或裸导体是否带电。要想知道线路是否带电，必须使用安全的验电设备进行检验。

2) 严禁带电操作

生活中往往会出现一些简单的电路操作，如更换熔断器或电灯等。在操作时首先要切断电源，不允许带电操作。如果确实需要带电操作，则应采取安全措施，穿戴好绝缘装备，并且有专人在场监护，以防发生事故。

3) 严禁电线暴露

暴露在绝缘材料外的带电导线头,必须及时用绝缘物包好,并且安放到人们接触不到的安全之处。

4) 严禁单独作业

进行电工作业的人数较多时,必须有专人负责安全监护,若要接通电源,一定要提前告知其他操作人员。

5) 严控安全电压

不得把 36 V 以上的照明灯作为安全灯使用。

6) 灭火首先断电

如果用电设备起火,灭火时首先应该考虑的是人身安全,设备的损失、财产的安全要放在其次。一旦设备起火,要迅速切断电源,并且根据火灾的性质选择合适的灭火器材。带电状态下不能用水和泡沫灭火器灭火,因为水和泡沫均导电,可以选择干砂、干土、二氧化碳灭火器等灭火。

7) 严格定时保养

必须加强安全用具及灭火设备的日常保养,并安排专人管理,防止乱动、乱用或降低绝缘水平。平时要定期进行绝缘实验,掌握安全用具及灭火设备的绝缘状态,防止绝缘失效。

1.3.2 触电及其影响因素

牢固树立安全意识后,才允许进行用电操作,而用电过程中,更应该提高警惕,绝不允许掉以轻心。

用电时,若不注意安全,极易发生触电安全事故,造成人身及财产损失。不同的触电事故类型,对人体的伤害也不同。根据人体受到伤害的性质大体可以分为电击和电伤两种。

电击指的是人在触电后,电流通过人体时,对人体内部器官组织造成的损伤。受害者如果不及时摆脱带电物体,就会造成危险甚至死亡。

电伤指的是当熔丝熔断或产生电弧时,人靠得太近而对表皮造成的伤害,如烧伤、金属溅伤等。

触电对人体造成伤害的主要影响因素包括以下几点:

1) 电流通过时间的长短

电流对人体的损伤非常大,电流通过人体的时间越长,对人体产生的影响就越严重。触电时间如果超过人的心脏搏动周期(约为 750 ms),或者触电正好开始于搏动周期的易损伤期,则危险最大。

2) 电流的大小

电流有大小,所以对人体造成的伤害也是分等级的。如果通过人体的电流超过 0.05 A,人就会有生命危险。一般情况下,电压在 36 V 以下,通过人体的电流就不会超过 0.05 A,所以把 36 V 定为安全电压。但是在潮湿的场所,因导电性强,安全电压还要低一些,通常定为 24 V 或 12 V。

3) 电流的频率

40~60 Hz 的交流电对人体的危害最大,在高频作用下,电热作用大,所以容易发生灼伤事故。但是 20 kHz 以上的交流电一般对人体无害,这种高频电流有时还可以用来治疗

某些疾病。

4) 人体电阻的大小

通过人体电流的大小与触电电压、人体电阻有关。人体电阻的大小与身体的自然状况和人体的部位有关,并且与环境条件及接触电压等因素有很大关系。一般情况下,人体电阻为 $1000\sim 2000\ \Omega$,人体的电阻越大,受到的电流伤害越轻。

1.3.3 触电方式及急救措施

1) 触电方式

触电方式主要分为以下几种:

(1) 单相触电。当人体的某一部位触及一相带电体,并且人正站在地面上或其他接地体上时,电流通过人体流入大地,这就是单相触电,如图 1-11 所示。人体在单相触电情况下受到的电压称为相电压($220\ \text{V}$),此时通过人体的电流可以达到 $200\sim 300\ \text{mA}$,这是一个非常危险的电流值。

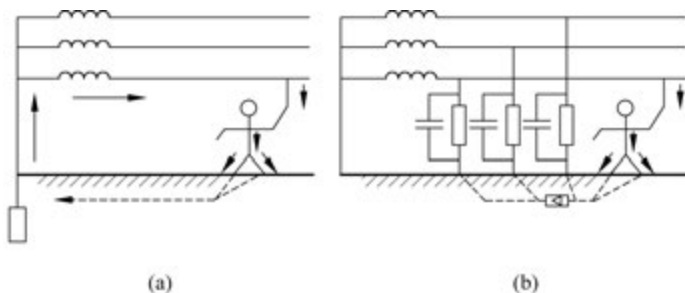


图 1-11 单相触电示意图

(a) 中性点直接接地; (b) 中性点不直接接地

(2) 两相触电。两相触电是指人体两处部位同时触及同一电源的两相带电体,或在高压系统中,人体距离高压带电体小于规定的安全距离,造成电弧放电,电流从一相导体流入另一相导体的触电方式,如图 1-12 所示。这种触电情况下,人体所承受的电压为线电压($380\ \text{V}$),并且电流流经心脏,会造成更大的危险。

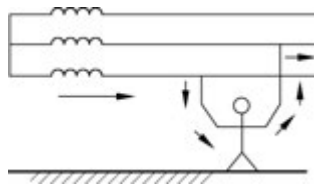


图 1-12 两相触电示意图

(3) 跨步电压触电。跨步电压触电也是间接触电的一种形式。当人的两只脚踏在存在电位差的地面上,并且两脚之间存在一定的距离时,两脚间的电位差就叫作跨步电压。跨步电压造成的触电称为跨步电压触电。

跨步电压主要受以下因素影响:地电流的大小、人体所穿的鞋和地面的特征、两脚之间的跨距、两脚的方位及离接地点的远近等。

(4) 感应电压触电。带电设备具有电磁感应和静电感应两种特性,能在附近的停电设备上感应出一定的电位,这个电位数值的大小取决于带电设备电压的高低、停电设备与带电设备的平行距离及它们的几何形状等因素。

感应电压往往出现得非常突然,因此危险性非常大。在电力系统中感应电压触电事故常有发生,甚至会出现人员伤亡。

(5) 静电触电。静电电位的数值可高达数万伏乃至数十万伏。在这样的电位下,可能发生放电,产生静电火花,引起爆炸、火灾,也可能对人体造成电击伤害。由于静电电击的电流不会持续通过人体,而是静电放电造成的瞬间冲击性电击,这种电击能量较小,通常不会造成人体心室颤动而死亡。但是这种电击会造成二次伤害,如高空坠落或其他机械性伤害,因此同样有较高的危险性。

(6) 剩余电荷触电。电气设备存在一种电容效应,而电容器具有储存电荷的性能,因此在刚断开电源的设备上会保留一定量的电荷,称为剩余电荷。此时如果有人触及停电设备,就可能会遭到剩余电荷的电击。

2) 触电后的急救

在了解触电类型后,还要掌握一定的触电急救知识,这样在发生触电事故时就有机会挽救触电者的生命。

发生触电事故后,可以按照如下步骤操作:第一步,用绝缘物品使触电者脱离电源,此时一定要注意不可以直接去拉触电者;第二步,立即拨打 120,为救治伤者争取宝贵时间;第三步,进行心肺复苏,必要时进行人工呼吸。以上是大致救治步骤,不同情况下现场施救方式也略有差别。

人在触电之后的状态主要分为以下三种:

(1) 未失去知觉。呼喊触电者或者与其说话,发现伤者未失去知觉,应该让触电者在保暖通风的地方静卧休息,请医生到现场进行救治或者将其送往医院治疗。

(2) 失去知觉,但呼吸和心跳正常。呼喊触电者,触电者没有反应,但是有呼吸和心跳。这时应该使触电者平躺,解开其衣服纽扣,松开腰带以便于呼吸。为保持空气流通,四周不要有人围观。气温较低时要注意保暖,如果触电者呼吸困难或心跳失常,则应该立即对其进行人工呼吸或胸外心脏按压,然后送往医院救治。

(3) 触电者假死。触电者失去知觉,呼吸和心跳不正常,呈现一种“假死”状态(即电休克状态)。此时也分为三种情况:心跳停止,但尚能呼吸;呼吸停止,但心跳尚存;呼吸、心跳均已停止。

判断触电者是否假死可以通过以下四点:看胸腔是否起伏,听呼吸有无声音,测口鼻有无呼吸气流,感受脖子侧方有无动脉搏动。

如果触电者出现假死,则应该立即按心肺复苏法就地抢救,保持空气流通,注意触电者呼吸道通畅,进行人工呼吸或胸外心脏按压。同时一定要拨打 120,在不停止抢救的情况下寻求专业人员的救助。

日常工作生活中为了实现安全用电,每个人必须掌握触电急救方法,以确保自身及他人的人身安全。

【课程思政】

法制意识:无论是工作还是日常生活中,都要遵纪守法,按照规章制度工作与生活,才不会出现问题。学生要深入理解法治是国家治理体系和治理能力的重要依托,遵守我国各领域现行的法律规定,正确看待专业与法律两者之间的影响。