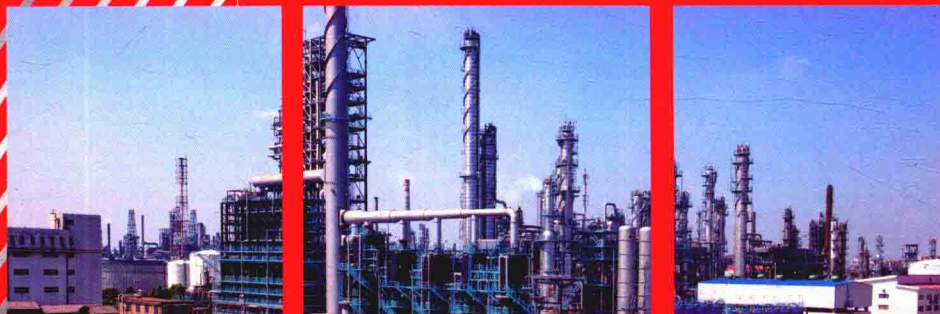




普通高等教育“十三五”规划教材——化工安全系列



# 电气安全

DIANQI ANQUAN

主 编 孙东亮

副主编 张增亮 李义鹏



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等院校“十三五”规划教材——化工安全系列

# 电气安全

主 编 孙东亮  
副主编 张增亮 李义鹏

中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书为“普通高等教育‘十三五’规划教材——化工安全系列”之一。主要介绍了电气安全基础知识、电气安全的防护、电气环境安全、建筑物的防雷保护、电气安全设计及电气安全管理等内容。为便于读者学习，每章后还附有化工安全典型案例分析。

本书可作为高等院校安全技术及工程、安全管理工程等相关专业的教学用书，也可供相关企业的安全和技术管理人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电气安全 / 孙东亮主编. —北京 : 中国石化出版社, 2019. 3  
普通高等教育“十三五”规划教材. 化工安全系列  
ISBN 978-7-5114-5101-9

I. ①电… II. ①孙… III. ①电气安全-高等学校-教材 IV. ①TM08

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 039701 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

#### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号  
邮编:100020 电话:(010)59964500  
发行部电话:(010)59964526  
<http://www.sinopec-press.com>  
E-mail:press@sinopec.com  
北京富泰印刷有限责任公司印刷  
全国各地新华书店经销

\*

787×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 271 千字  
2019年3月第1版 2019年3月第1次印刷  
定价:38.00元

# 《普通高等教育“十三五”规划教材 ——化工安全系列》编委会

主 任：王凯全（常州大学）

委 员（按姓氏笔画为序）：

李少香（青岛科技大学）

李 伟（东北石油大学）

杨保平（兰州理工大学）

陈海群（常州大学）

修光利（华东理工大学）

柴 文（常熟理工学院）



# 前 言

---

随着我国科技与经济的发展,当今工业企业涉及的自动化操作及控制过程逐渐增多,电气设备及装置已广泛应用于工农业生产和居民日常生活,对发展社会生产力、提高人民生活质量有着不可替代的作用。

电气安全在工业企业的日常生产过程,以及人民的生活中显得尤为重要。在生产或生活活动中,人员所接触的电气设备或装置种类繁多,数量庞大,且电气系统工艺连续性强,集中化程度高,技术复杂,如若操作或使用不当,则会引发电气系统损毁及人员伤亡事故,严重危及工业企业的安全及社会的稳定。近些年,我国因电气设备或系统故障导致的触电及电气系统损毁事故数量有增多趋势,如何落实并执行电气安全技术及管理措施,保障电气系统正常运行,以及人员生命及财产安全是当今重大课题,必须高度重视,警钟长鸣。

电气安全是研究电气事故的定义、类型、发生机理,以及电气事故应急、预防、管理技术,在实践中指导如何采取技术措施与管理措施,避免电气事故的发生,最大限度地减小其引发的损失,以达到安全管理的目的的科学。电气安全所涵盖的知识十分广泛。本书是作者在多年教学和科研的基础上,考虑到近年来电气安全工程与技术迅速发展的状况,以及广大技术人员和管理人员进行知识更新的需要而编写的。第一章从电气安全基础知识入手,讲述电路基本概念,电流、电压对人体的伤害,电气事故的类型与特点等。第二章讲述电击防护技术内容,其中涉及直接接触电击防护、间接接触电击防护、漏电保护与继电保护等。第三章介绍用电设备的环境条件,包括常见手持式电动工具、移动式电气设备和电动机的安全。第四章为电气环境安全,主要讲述电气火灾及爆炸预防、静电的产生与消除、电磁干扰与电磁兼容等。第五章内容包括雷电基本知识,雷电种类及其危害、雷电伤及救治、建筑物防雷装置、建筑物的防雷措施等,还介绍了避免化工企业建筑遭受雷击的技术及管理对策。第六章介绍电气安全设计,包括防火防爆电气安全设计、电梯和自动扶梯设计、电力工程电缆设计、化工弱电系统设计等。第七章介绍化工企业电气安全管理,如用电场所、设备与设施安全管理,用电人员培训与教育,电工操作岗位培训要求,

以及应急救援等。每章重点知识后，都列举了针对化工企业电气安全事故的相关案例分析。

本书由华东理工大学孙东亮(第一章、第二章、第三章、第七章)，中国石化青岛安全工程研究院李义鹏(第四章)，青岛科技大学张增亮(第五章、第六章)共同编写，孙东亮负责全书统稿。在本书编写过程中，作业参阅和引用了大量文献资料，在此对原著作者表示感谢。

由于作者水平有限，如书中存在不当之处，敬请专家、读者批评指正。



# 目 录

第一章 电气安全基础 .....	( 1 )
第一节 电工学基础 .....	( 1 )
一、电路的概念与定律 .....	( 1 )
二、三相交流电路 .....	( 3 )
三、变压器 .....	( 4 )
第二节 电流对人体的作用 .....	( 5 )
一、人体阻抗的组成 .....	( 6 )
二、电击伤害的机理 .....	( 7 )
三、电击效应的影响因素 .....	( 9 )
第三节 电气事故分类及其致因分析 .....	( 15 )
一、电气事故的类型 .....	( 15 )
二、电气事故的特点 .....	( 19 )
第四节 化工电气事故案例 .....	( 20 )
第二章 电击防护与安全接地 .....	( 24 )
第一节 直接接触电击防护 .....	( 24 )
一、绝缘 .....	( 24 )
二、屏护和间距 .....	( 31 )
第二节 间接接触电击防护 .....	( 36 )
一、IT 系统 .....	( 37 )
二、TT 系统 .....	( 44 )
三、TN 系统 .....	( 46 )
四、保护接零的应用范围 .....	( 48 )
五、重复接地 .....	( 49 )
六、速断保护元件 .....	( 52 )
七、保护导体 .....	( 53 )
第三节 漏电保护与继电保护 .....	( 57 )
一、漏电保护装置的原理 .....	( 57 )
二、漏电保护装置的应用 .....	( 61 )
第四节 安全接地 .....	( 63 )
一、自然接地体和人工接地体 .....	( 63 )
二、接地测量 .....	( 66 )

三、接地装置的检查和维护 .....	( 67 )
第五节 化工电击防护案例 .....	( 68 )
<b>第三章 用电设备的环境条件</b> .....	( 70 )
第一节 手持式电动工具和移动式电气设备 .....	( 70 )
一、手持式电动工具 .....	( 70 )
二、移动式电气设备 .....	( 72 )
第二节 电动机 .....	( 74 )
一、电动机的安装环境要求 .....	( 74 )
二、电动机机械安装安全要求 .....	( 74 )
三、电动机电气接线的安全技术 .....	( 75 )
四、电动机安全运行要求 .....	( 76 )
<b>第四章 电气环境安全</b> .....	( 79 )
第一节 电气火灾及爆炸的预防 .....	( 79 )
一、电气火灾形成机理 .....	( 79 )
二、电气火灾爆炸防护措施 .....	( 81 )
第二节 静电的产生与消除 .....	( 93 )
一、静电的产生 .....	( 93 )
二、静电放电 .....	( 99 )
三、静电的消除 .....	( 103 )
第三节 电磁干扰与电磁兼容 .....	( 107 )
一、电磁干扰 .....	( 107 )
二、电磁兼容 .....	( 108 )
第四节 化工电气防火防爆案例 .....	( 117 )
<b>第五章 建筑物的防雷保护</b> .....	( 119 )
第一节 雷电基本知识 .....	( 119 )
一、雷云的产生和雷电放电过程 .....	( 119 )
二、雷电放电的形式与选择性 .....	( 127 )
三、雷电放电种类与特点 .....	( 129 )
第二节 建筑物防雷装置 .....	( 131 )
一、外部防雷装置及其作用 .....	( 131 )
二、避雷针防雷法 .....	( 132 )
三、尖端放电与避雷针 .....	( 132 )
四、避雷针的应用 .....	( 134 )
第三节 建筑物的防雷措施 .....	( 138 )
一、室外防雷措施 .....	( 138 )
二、室内防雷措施 .....	( 141 )
第四节 常见设备设施防雷措施 .....	( 143 )
一、电源防雷 .....	( 143 )

二、建筑防雷 .....	(144)
三、等电位连接 .....	(145)
四、生产装置防雷 .....	(145)
五、油罐区与液化气球罐区防雷 .....	(146)
六、DCS 控制系统与常规仪器仪表控制系统防雷 .....	(147)
第五节 化工企业建筑物防雷保护案例 .....	(148)
<b>第六章 电气安全设计</b> .....	(149)
第一节 防火防爆电气安全设计 .....	(149)
一、电气火灾与爆炸的原因 .....	(149)
二、电气防火防爆措施 .....	(151)
三、电气灭火常识 .....	(152)
第二节 通用用电设备配电设计 .....	(154)
一、电动机装置设计 .....	(154)
二、电动机的启动 .....	(155)
三、低压电动机的保护 .....	(157)
四、低压交流电动机的主回路 .....	(159)
五、低压交流电动机的控制回路 .....	(160)
六、起重运输设备 .....	(161)
七、日用设备 .....	(164)
第三节 供配电系统及变电所设计 .....	(165)
一、低压配电系统的设计 .....	(165)
二、高层建筑消防供配电设计 .....	(166)
第四节 电力工程电缆设计 .....	(167)
一、110kV 及以上高压电缆线路的设计 .....	(167)
二、从设计选型方面提升电力电缆及附件质量稳定性 .....	(168)
第五节 化工弱电系统设计 .....	(169)
一、智能化弱电系统设计原则 .....	(169)
二、智能化弱电系统设计 .....	(170)
第六节 化工电气安全设计案例 .....	(171)
一、工程概况 .....	(171)
二、供电系统 .....	(172)
三、车间配电 .....	(174)
四、供电外线及厂区照明 .....	(175)
五、防雷接地系统 .....	(176)
<b>第七章 企业电气安全管理</b> .....	(177)
第一节 用电场所、设备与设施安全管理 .....	(177)
一、用电设备的环境条件和外壳防护等级 .....	(177)
二、化工电气设备的设计 .....	(181)

三、加强化工电气设备安全管理的几大措施 .....	(181)
第二节 用电人员培训与教育 .....	(182)
第三节 电工操作岗位培训要求 .....	(183)
一、电工作业人员的资质资格 .....	(183)
二、电工人员管理要求 .....	(183)
第四节 应急救援 .....	(184)
第五节 化工企业电气安全管理案例 .....	(188)
参考文献 .....	(190)

# 第一章 电气安全基础

电气安全是安全工程专业课程的一个分支,主要涵盖电气事故类型、人员伤亡因素、企业用电设备及作业安全、建筑物防雷保护及电气安全管理、电气安全及环境设计等内容。本课程与电工学关系密切,因此本章从电工学基础切入,明确电气安全相关概念,进而讲述电流对人体的作用,电气事故分类及其致因分析,最后列举了若干化工电气事故案例,并讨论分析。

## 第一节 电工学基础

### 一、电路的概念与定律

#### 1. 电路的概念及电路模型

电路的结构和功能是多种多样的,如电力系统,其电路示意图如图 1-1 所示。它的作用是实现电能的传输和转换,由电源、负载和中间环节 3 个部分组成。



图 1-1 电力系统示意图

发电机是产生电能的设备。可把热能、水能或核能等转换为电能。除发电机外,电池也是产生电能的设备,它把化学能转换为电能。这些可以产生电能的设备我们统称之为电源。

电视、电动机、空调等都是取用电能的设备,它们分别把电能转换为光能、机械能和热能等。这些取用电能的设备我们统称之为负载。变压器和输电线是中间环节,是连接电源和负载的部分,它起传输和分配电能的作用。

电路的另一种作用是传递和处理信号。常见的如扩音机,其电路示意如图 1-2 所示。

信号处理和传递的例子有很多,如收音机和电视机,它们的接收天线(信号源)把载有语言、图像信息的电磁波接收,转换为相应的电信号后,通过电路把信号传递处理(调谐、变波、放大等),达到扬声器和显像管(负载),还原为声音和图像。



图 1-2 扩音机电路示意图

把一些电路元件或器件按不同的需要和作用组合到一起就是我们实际的电路。例如变压器、电动机、电池、晶体管以及各种电阻器和电容器等。它们的电磁性质较为复杂。最简单的，例如一个白炽灯，它除具有消耗电能的性质(电阻性)外，当通有电流时还会产生磁场，就是说它还具有电感性，但电感微小，可忽略不计，于是可认为白炽灯是一电阻元件。

## 2. 电压和电流的参考方向

我们规定正电荷运动的方向为电流的方向(实际方向)，电流的流向客观存在。在分析较复杂的直流电路时，往往难于事先判断某支路中电流的实际方向；对交流来讲，其方向随时间而变，在电路图上也无法用一个箭标来表示它的实际方向。为此，在分析与计算电路时，常可任意选定一方向作为电流方向，我们称为参考方向，所选的电流参考方向并不一定与电流的实际方向相同。当所求的电流值为正时说明它的实际方向与其参考方向一致，反之，说明电流的实际方向与其参考方向相反。因此，参考方向的指定，决定电流值的正负，如图 1-3 所示，虚箭头表示电流参考方向，实箭头表示电流实际方向，所选的电流参考方向并不一定与电流的实际方向一致。

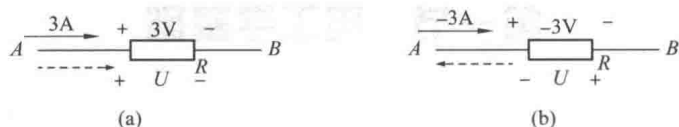


图 1-3 电流和电压参考方向

电压也具有方向，电压的方向规定为由高电位端指向低电位端(实际方向)，即为电位降低的方向。当无法确定电压方向时，也可任意选定某一方向作为电压方向，我们称为电压参考方向。同电流一样，只有在参考方向选定之后，电压才有正负之分。

## 3. 电功率和能量

因为电路在工作状况下总伴随有电能与其他形式能量的相互交换，所以能量和功率的分析十分重要；另一方面，电气设备、电路部件本身都有功率的限制，在使用时要注意其电流值或电压值是否超过额定值。过载会使设备不能正常工作或部件损坏。

功率是表示电流做功快慢的物理量，一个用电器功率的大小数值上等于它在 1s 内所消耗

的电能。如果在  $t$  (SI 单位为 s) 时间内消耗的电能  $W$  (SI 单位为 J)，那么这个用电器的电功率就是  $P=W/t$  (定义式)，电功率等于导体两端电压与通过导体电流的乘积。

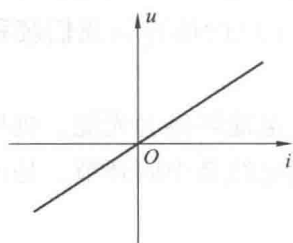


图 1-4 线性电阻的伏安特性曲线

## 4. 电阻元件

实际电阻器抽象出来的理想模型称之为电阻元件。线性电阻元件的伏安特性曲线是一条经过坐标原点的直线。如图 1-4 所示，电阻值可由直线的斜率来确定。凡是不能用线性方程描述伏安特性的电阻元件就称为非线性电阻元件。

# 二、三相交流电路

三相交流电路是生产、生活中广泛应用的电路之一。三个频率相同、有效值相等、相互之间的相位差为  $120^\circ$  的电动势称为对称三相电动势，如果它们的内阻抗相等，将其按一

定的方式连接后就构成对称三相电源。采用三相电源供电的体系称为三相制，而仅用一个正弦电源供电则称为单相制。采用三相制就同容量的发电机和电动机来说比单相制体积小、效率高；就输送相同的电功率来说比单相制节省导线用量。

### 1. 三相交流电源

对称三相电动势可以由三相交流发电机产生，也可以由三相变压器提供。现以三相交流发电机为例子以介绍。图 1-5 所示是一台具有两个磁极的三相同步交流发电机的结构示意图。它由定子和转子两大部分组成。定子为一对磁极，转子铁芯上安装有三个相同的线圈 AX、BY 和 CZ，这三个绕组的始端 A、B 和 C 在空间彼此各相隔  $120^\circ$ 。假定采取适当形状的磁极，使得定子与转子间缝隙的磁场均沿半径方向，且磁感应强度的大小沿圆周按正弦规律分布，当转子在外力带动下沿逆时针方向做加速转动时，根据电磁感应定律，每个绕组切割磁力线都产生了按正弦规律变化的感应电动势。因三个绕组的线圈边切割磁力线的速度相同，所以各绕组产生的交流电动势的角频率  $\omega$  相同。由于三个绕组的结构相同，所以交流电动势的最大值相等。又因三个绕组在空间位置上彼此相隔  $120^\circ$ ，所以三个交流电动势在相位上彼此有  $120^\circ$  的相位差。一般规定：电动势的正方向由绕组的末端经绕组内部指向始端。

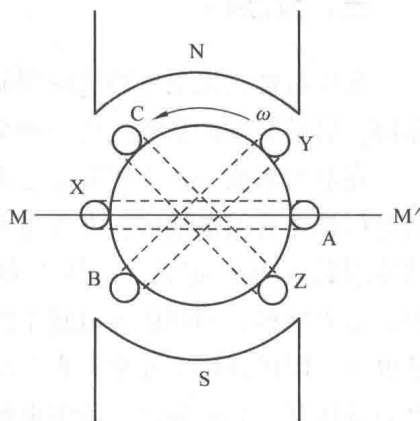


图 1-5 三相交流发电机  
(两磁极)结构示意图

### 2. 负载星形连接与三角形连接

如果把三相交流发电机的每相绕组看作是一个独立的电源，从每相绕组的始末端各引出两根导线，分别与负载相连这就构成了三相绕组互不联系的三相制电路，如图 1-6 所示。通常三相电源绕组的接法有两种：星形连接和三角形连接。

把三相电源绕组的三个末端连在一起，成为一公共点  $O$ ，从绕组的始端 A、B、C 分别引出三条端线，则构成星形连接法，如图 1-7 所示。

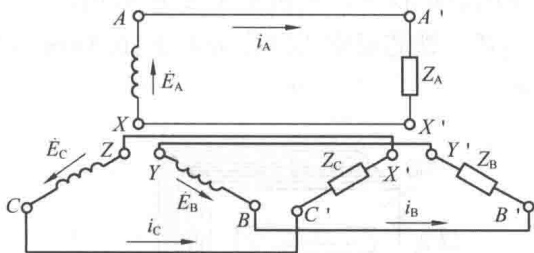


图 1-6 三相绕组互不联系的三相制电路

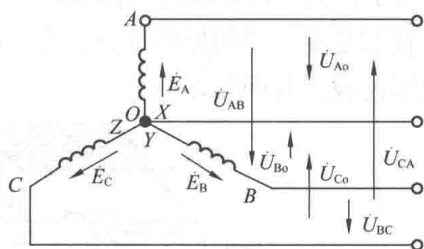


图 1-7 三相电源的星形连接法

从始端引出的导线叫作相线(又称火线)，公共点  $O$  称为中性点，从中性点引出的导线称为中性线。这种具有中性线的三相供电系统称为三相四线制，用符号 YN 表示，如果不引出中性线，则称为三相三线制。

在星形连接的三相四线制供电系统中，如果相电压对称，则线电压也是对称的。线电

压的有效值是相电压有效值的 $\sqrt{3}$ 倍，在相位上线电压超前相应的相电压 $30^\circ$ 。这样，三相四线制可为负载提供两种电压。

### 三、变压器

变压器是根据电磁感应原理制成的一种常用电气设备，具有变换电压、电流和阻抗的作用，但最基本的功能是将一种交流电压变为同一频率的另一种或几种电压。

在电力系统中，变压器是远距离输送电能所必需的重要设备。通常，电能从发电站以高电压输送到用电地区，在发电站先用变压器升高电压。因为当输送功 $P=UI\cos\phi$ 及负载功率因数 $\cos\phi$ 一定时，电压 $U$ 越高，则线路电流 $I$ 越小。这不仅可以减小输电线的截面积，节省材料，同时还可以减小线路的功率损耗。当电能输送到目的地后，再用变压器降低电压，以保证用电安全和合乎用电设备的电压要求。这种完成输送电能的变压器统称为电力变压器。有些场合，由于电流太大，不能直接用电表测量。这时，必须采用电流互感器，将大电流变为小电流，然后进行测量。这类用于各种测量装置的变压器称为仪用变压器。

在无线电和电子线路中，变压器除用来变换电压、电流之外，还常用来变换阻抗，实现阻抗匹配，如收音机中的输出变压器。

变压器虽然种类很多，用途各异，不同的变压器在容量、结构、外形、体积和重量方面有很大的区别，但是它们的基本构造和工作原理是相同的。主要由磁路和电路两部分构成。变压器中用来传递电能而又彼此绝缘的线圈，一般称为绕组。根据它们相对工作电压的大小可分为高压绕组和低压绕组，为了加强它们之间的耦合作用，绕组都绕在闭合的铁芯柱上。

#### 1. 变压器的结构

变压器主要由铁芯和绕组两部分构成。变压器常见的结构形式有两类：芯式变压器和壳式变压器。如图1-8所示，芯式变压器的特点是绕组包围铁芯，它的用铁量较少，构造简单，绕组的安装和绝缘比较容易，因此多用于容量较大的变压器中。壳式变压器，如图1-9所示，其特点是铁芯包围绕组。这种变压器用铜量较少，多用于小容量变压器。

铁芯是变压器的磁路部分，为了减少铁芯损耗，铁芯通常用厚度为 $0.2\sim 0.5\text{mm}$ 的硅钢片叠压而成，片间相互绝缘。

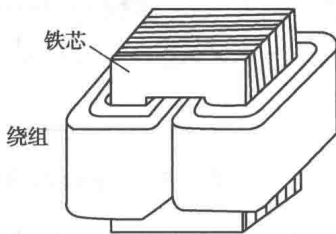


图 1-8 芯式变压器

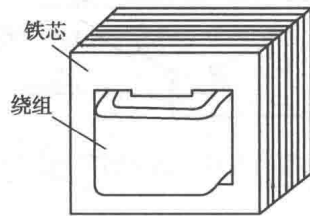


图 1-9 壳式变压器

绕组是变压器的电路部分，它是由圆形或矩形截面的导线绕成一定形状的线圈。通常，电压高的绕组称为高压绕组，电压低的称低压绕组。低压绕组靠近铁芯放置，而高压绕组

则置于外层。此外，大容量变压器还具有外壳、冷却设备、保护装置及高压套管等。大容量变压器通常是三相变压器。

## 2. 变压器的工作原理

图 1-10 是单相变压器的原理图。由于三相变压器只须接入三相绕组，其原理和单相完全相同。为便于分析，主要针对单相变压器来分析变压器的工作原理。将高压绕组和低压绕组分别画在两边，接电源绕组为一次绕组，又称原绕组，也就是吸收电能的绕组，其匝数为  $N_1$ ；接负载绕组为二次绕组，又称副绕组，其匝数为  $N_2$ ，通常一次绕组中各物理量均用下标“1”表示，二次绕组中的各物理量均用下标“2”表示。

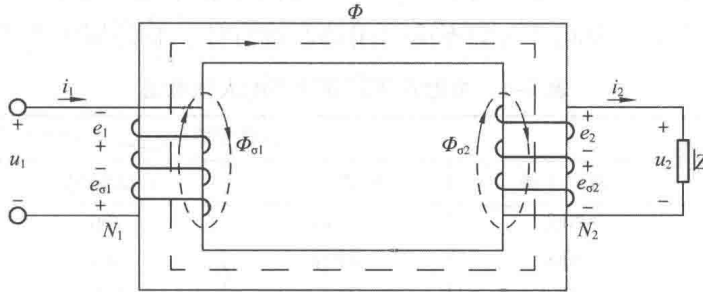


图 1-10 单相变压器原理

## 第二节 电流对人体的作用

电流通过人体时，会引起人体的生理反应及机体的损坏。国际电工委员会（英文缩写为 IEC）通过大量的试验研究和统计分析计算，定性和定量地描述了电流通过人体和动物躯体时出现的生理学和病理学效应，阐述了电击致伤、致死的原因。相关理论和数据对于制定防触电技术标准，鉴定安全型电气设备，设计安全措施，分析电气事故，评价安全水平等是必不可少的。

### 一、人体阻抗的组成

人体受到电击伤害的程度与人体阻抗密切相关，人体阻抗是由人体皮肤、血液、肌肉、细胞组织及其结合部等构成了含有电阻和电容的阻抗，各部分的电阻率按依次降低的顺序排列为：皮肤、脂肪、骨骼、神经、肌肉、血液，其中皮肤电阻在人体阻抗中占有最大的比例。人体阻抗包括皮肤阻抗和体内阻抗，其等效电路如图 1-11 所示。研究表明，人体阻抗为接触电压、频率、皮肤潮湿程度和接触面积的函数。

#### 1. 皮肤阻抗

皮肤由外层的表皮和表皮下面的真皮组成。皮肤

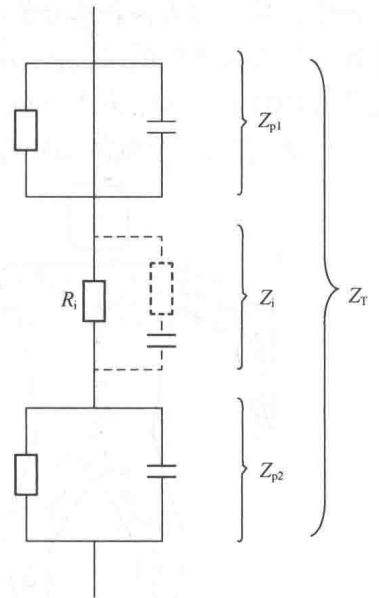


图 1-11 人体阻抗等效电路  
 $Z_i$ —体内阻抗； $Z_{p1}$ ,  $Z_{p2}$ —皮肤阻抗；  
 $Z_T$ —总阻抗

阻抗是指表皮阻抗，即皮肤上电极与真皮之间的电阻抗，可视为由半绝缘层和许多的小导电体（毛孔）组成的电阻和电容网络。皮肤电容是指皮肤上电极与真皮之间的电容。表皮最外层的角质层电阻很大，在干燥和清洁的状态下，其电阻率可达  $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6 \Omega \cdot m$ 。

皮肤阻抗值与接触电压、电流幅值和持续时间、频率、接触面积、施加压力、皮肤潮湿程度、皮肤的温度和种类等因素有关。当接触电压小于 50V 时，皮肤阻抗随接触面积、温度、皮肤潮湿程度、呼吸急促程度等因素的影响有显著的变化，其值比较高。当接触电压在 50~100V 时，皮肤阻抗明显下降。当皮肤击穿或破损时，其阻抗可忽略不计。电流频率升高时，皮肤阻抗随之降低。

皮肤潮湿和出汗、带有导电的化学物质和导电的金属尘埃、皮肤破坏时，人体电阻急剧下降，如表 1-1 所示。因此，人们不应当用潮湿或有汗、有污渍的手去操作电气装置。

表 1-1 皮肤在不同状况下的人体电阻

接触电压/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	1500	1000	650	325

## 2. 体内阻抗 $Z_i$

体内阻抗是除去表皮之后的人体阻抗，存在的电容较小，可以忽略不计。因此，体内阻抗基本上可以视为纯电阻。体内阻抗主要决定于电流途径，与接触面积的关系较小。人体不同部位的体内阻抗值如图 1-12 所示，它是以人的单手到单脚途径的阻抗的百分数表示的。图中的数字为人体各部分的体内阻抗值。要计算某一途径的体内阻抗时，将该电流途径上所有的人体部位的阻抗值相加即可。当电流途径为手-手，或单手-双脚时，则体内阻抗主要在四肢上，可略去人体躯干部分的阻抗，得出如图 1-13 所示的体内阻抗简化电路图。图中  $Z_{ip}$  表示一个肢体部分的体内阻抗。

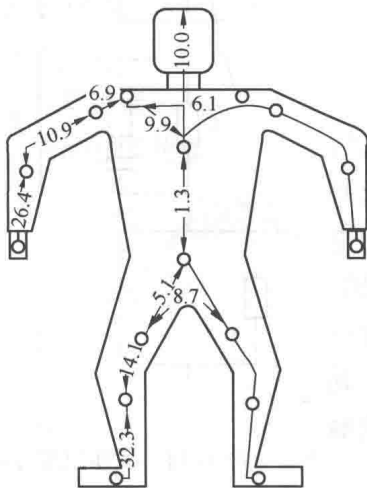


图 1-12 人体不同部位的体内阻抗值

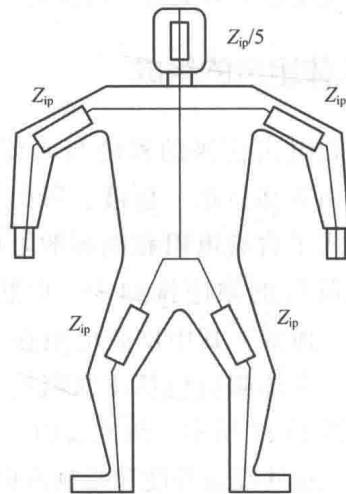


图 1-13 人体的体内阻抗简化电路图

### 3. 人体总阻抗 $Z_T$

人体总阻抗是包括皮肤阻抗及体内阻抗的全部阻抗。接触电压在交流 50V 以下时, 由于皮肤阻抗的变化, 人体阻抗也在很大的范围内变化; 接触电压较高时, 皮肤被击穿, 人体阻抗与皮肤阻抗关系不大, 近似等于体内阻抗。另外, 由于皮肤存在电容, 人体的直流电阻高于交流阻抗。通电瞬间的人体电阻叫作人体初始电阻。在这一瞬间, 人体各部分电容尚未充电, 相当于短路状态。因此, 人体初始电阻近似等于体内阻抗, 其影响因素也与体内阻抗相同。表 1-2 列出了不同接触电压下的人体阻抗值, 表中数据是干燥条件、较大的接触面积(50~100cm<sup>2</sup>)、电流途径为左手-右手的情况。

表 1-2 50Hz 交流电条件下的人体总阻抗值

接触电压/V	按下列分布秩(测定人数的百分比)统计时, $Z_T$ 不超过以下数值/ $\Omega$		
	5%	50%	95%
25	1750	3250	6100
50	1450	2625	4375
75	1250	2200	3500
100	1200	1875	3200
125	1125	1625	2875
220	1000	1350	2125
700	750	1100	1550
1000	700	1050	1500
渐近值	650	750	850

## 二、电击伤害的机理

人体被电击时, 会有发麻、刺痛、压迫、打击等感觉, 还会出现痉挛、血压升高、昏迷、心律不齐、窒息、心室颤动等症状, 严重时导致死亡。

### 1. 电击致伤机理

① 细胞激动作用。电流作用于人体组织, 可直接引起细胞激动, 产生神经兴奋波, 传递到中枢神经系统后, 还可间接引起人体的其他部分发生异常反应, 造成伤害。

② 破坏生物电作用。由于人体的整个神经系统是以电信号和电化学反应为基础的, 且生物电信号和电化学反应所涉及的能量十分微弱。当电流通过人体时, 在必要能量以外电能的作用下, 系统功能很容易被破坏。

③ 发热作用。电流通过人体时, 部分电能转化为热能, 破坏体内热平衡, 导致功能障碍, 发热引起体内液体汽化, 产生的机械力导致剥离、断裂等破坏。

④ 离解作用。机体液体成分在电流的作用下发生离解而导致破坏。

### 2. 电击致命原因

电击致命原因主要有心室颤动、窒息和电休克三种。

#### (1) 心室颤动

电流通过人体, 一般既可引起心室颤动或心脏停止跳动, 也可导致呼吸中止, 前者的出现比后者早得多, 所以心室颤动是电击致命的主要原因。电流既可直接作用于心肌, 引