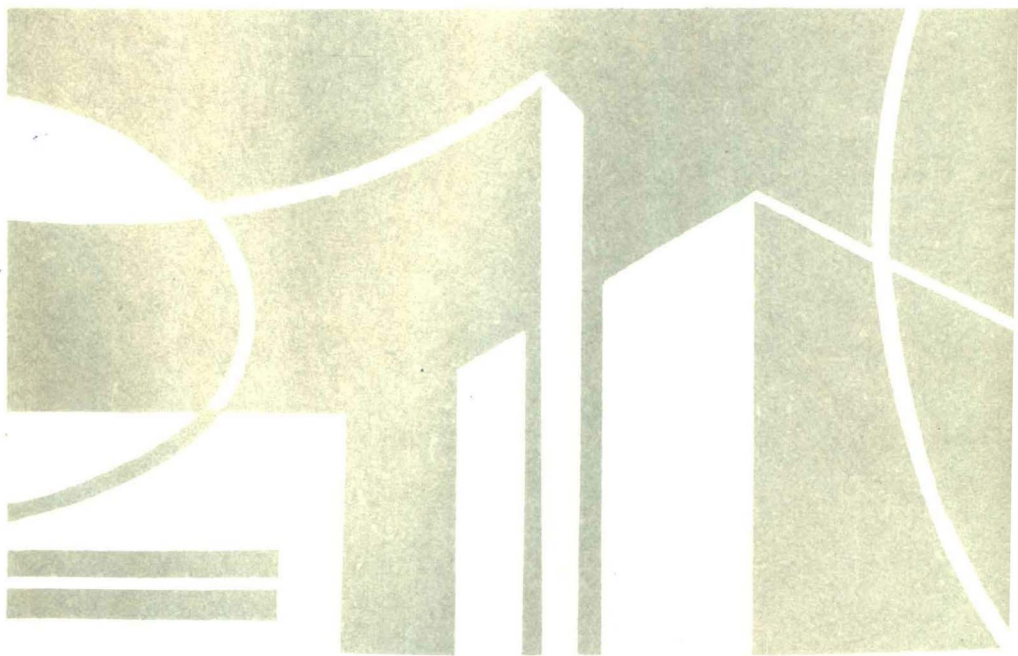


中等专业学校试用教材

电工 与电气设备

万恒祥 主编



中国建筑工业出版社



中等专业学校试用教材

电工与电气设备

万恒祥 主编

中国建筑工业出版社

本教材是根据建设部中等专业学校《电工与电气设备教学大纲》(工科建设类专业通用)编写的。

本教材主要内容是:单相交流电路、三相交流电路、变压器、交流电动机、直流电动机、常用电工仪表、电子技术常识、低压电器和基本控制线路、施工现场供电、建筑电气照明、建筑防雷与安全用电。每章均有小结、标准化练习题及复习思考题,最后附有实验指导书。本书中各种电气元件的图形符号和文字代号一律采用新的国家标准。

本教材适用于建设类非电专业的中专学生,也可作为建设工程技术人员学习电工知识的参考书。

中等专业学校试用教材
电工与电气设备
万恒祥 主编

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市兴顺印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 20¹/₄ 字数: 490 千字

1993年11月第一版 2000年6月第四次印刷

印数: 22,201—27,200册 定价: 21.00元

ISBN 7-112-02007-7

G·189 (7029)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

《电工与电气设备》这本教材是在国家教委颁发的中等专业学校电工学教学大纲基础上，根据建设部近年来颁发的普通中等专业学校建设类非电专业的业务培养规格和教学计划的要求，及《电工与电气设备教学大纲》（工科建设类专业通用）编写的。

按照教学大纲的基本要求，精选教材内容，既注重电工学基本理论，又突出行业特点，紧密结合建筑工程的实践，以期达到学以致用目的，满足建设类中专毕业生业务规格的需要。本书语言通俗易懂，简练准确。各章配备了一定数量的例题，标准化练习题及适量复习思考题，章末均有小结，较好地体现了中专教材的特点，有助于学生的能力培养。全书最后还附有实验指导书，这将有助于实践性教学环节的实施。本书中涉及的各种电气元件的图形符号和文字代号均采用新的国家标准，所有参量采用国际单位制。

《电工与电气设备》是一门重要的技术基础课。根据教学大纲规定：本课程教学时数为80学时和120学时两种，其中80学时适用于工业与民用建筑、村镇建设、城市道路桥梁、水暖通风、给水排水等专业，120学时适用于建筑机械、工业设备安装专业。教材中有“*”的内容，为120学时专业的增学内容。低压电器的基本控制线路一章中的典型线路，各专业可以根据本专业的特点和要求选讲。

全书共十一章，其中绪论、第一、二、三、四、五章由山西建筑工程学校万恒祥编写；第六、七、十、十一章由山西建筑工程学校吴胜娥编写；第八、九章由山西建筑工程学校范仰东编写。全书由万恒祥担任主编。北京建筑工程学院樊伟梁、同济大学陈小龙、刘式雍、陈金铁，建设部赵铁凡对本书初稿进行审阅，并提出宝贵意见，经编者修改后，由樊伟梁担任主审。在此，编者表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，不妥和错误之处在所难免，殷切希望读者提出批评和意见。

目 录

绪论	1	第二节 三相异步电动机的工作原理	78
第一章 单相交流电路	3	第三节 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	83
第一节 电路的基本知识	3	第四节 三相异步电动机的起动	87
第二节 电路的基本定律	7	第五节 三相异步电动机的调速、反转与制动	89
第三节 正弦交流电的产生及其特征	10	第六节 三相异步电动机的铭牌	92
第四节 正弦交流电的有效值	15	第七节 三相异步电动机的使用与维护	96
第五节 正弦交流电的旋转矢量表示法	16	第八节 单相异步电动机	97
第六节 单一参数的交流电路	19	第九节 同步电动机	99
第七节 电阻、电感、电容串联交流电路	25	本章小结	101
第八节 提高功率因数的意义和方法	29	标准化练习题	103
本章小节	32	复习思考题	104
标准化练习题	34	*第五章 直流电动机	106
复习思考题	35	第一节 直流电动机的基本构造	106
第二章 三相交流电路	38	第二节 直流电动机的工作原理	108
第一节 三相交流电源	38	第三节 直流电动机按励磁方式分类	110
第二节 三相负载的星形连接	41	第四节 并励直流电动机的工作特性	112
第三节 三相负载的三角形连接	45	第五节 直流电动机的调速	116
第四节 三相交流电路的功率计算	48	第六节 直流电动机的起动与反转	119
本章小结	50	本章小结	121
标准化练习题	51	标准化练习题	123
复习思考题	53	复习思考题	124
第三章 变压器	54	*第六章 常用电工仪表	125
第一节 磁场与磁路	54	第一节 常用电工仪表的分类与标记符号	125
*第二节 含有铁芯的线圈	58	第二节 指示仪表的误差与准确度	127
第三节 变压器的构造	60	第三节 磁电系电流表与电压表	128
第四节 变压器的工作原理	62	第四节 万用表	131
第五节 三相变压器	66	第五节 电动系功率表	134
第六节 自耦变压器与互感器	69	第六节 感应系电度表及电能的测量	137
第七节 电焊变压器	71	本章小结	139
本章小结	72	标准化练习题	140
标准化练习题	73	复习思考题	140
复习思考题	74	*第七章 电子技术常识	141
第四章 交流电动机	76		
第一节 三相异步电动机的基本结构	76		

第一节	半导体的基本知识	141	第三节	变电所的类型、结构及位置 选择	236
第二节	晶体二极管	143	第四节	变电所的主接线及变压器的 选择	238
第三节	晶体三极管	145	第五节	低压配电线路	243
第四节	基本放大电路的组成和分析 方法	151	第六节	施工现场低压配电线路的基 本要求	247
第五节	静态工作点的设置与稳定	157	第七节	配电导线截面与熔断器的选 择	252
第六节	多级电压放大器	161	第八节	施工现场的电力供应	259
第七节	晶体管直流稳压电源	163	本章小结	268	
本章小结	168	标准化练习题	269		
标准化练习题	169	复习思考题	270		
复习思考题	169				
第八章 低压电器和基本控制线 路	171	第十章 建筑电气照明	271		
第一节	低压电器的分类和基本保护 措施	171	第一节	电气照明的基本知识	271
第二节	常用的控制与保护电器	172	第二节	电光源与灯具	274
第三节	异步电动机的基本控制环节	180	第三节	电气照明计算	278
第四节	行程、时间和电流控制	187	第四节	照明线路的敷设	283
第五节	普通车床的电器控制线路	193	第五节	电气照明识图	285
第六节	建筑施工机械中的电气控制 线路	196	本章小结	293	
*第七节	水泵及液位的自动控制	205	标准化练习题	294	
*第八节	锅炉的电气控制线路	206	复习思考题	294	
*第九节	空调系统典型控制线路	211	第十一章 建筑防雷与安全用电	295	
*第十节	汽车电路	215	第一节	雷电的形成及危害	295
本章小结	225	第二节	防雷等级	297	
标准化练习题	227	第三节	防雷装置	297	
复习思考题	227	第四节	接地与接零保护	300	
第九章 施工现场供电	229	本章小结	303		
第一节	电力系统概述	229	标准化练习题	304	
第二节	电力负荷的分类及计算	231	复习思考题	304	
			附录 实验指导书	305	

绪 论

电能广泛地应用于建筑工程的各个领域，主要是由于电能具有以下重要特点：首先是它非常便于转换为其它形式的能量。例如利用一台电动机就可以很容易将电能转换为机械能，并用它来驱动各种建筑施工机械。如工地上常用的塔式起重机、搅拌机、电锯、电刨等都是靠电动机来驱动。其次，电能便于输送，仅需要有几根导线，就可以将电能输送到施工现场的每一个角落。再则，使用电能便于控制，容易实现施工过程的机械化和自动化。随着建筑施工现场机械化、电气化程度的提高，施工进度可以大大加快，施工质量也能得到显著提高，促进建筑业的发展。建筑施工离不开“电”，因此从事建筑施工的工程技术人员也必须懂“电”，并能正确使用“电”。

学习“电工与电气设备”这门课程的主要目的，就是要掌握电工技术的基本理论知识，学会初步的计算，并受到识读电气工程图和电工实验技能的训练，正确地选择和使用建筑施工过程中常用的电气设备。为今后从事专业技术工作准备必要的电工知识。

“电工与电气设备”这门课程是建筑类中等专业学校各专业的一门重要的技术基础课程。它的主要内容包括以下四个部分：

1. 电路的基本理论

为了避免与物理学的不必要的重复，本课程以交流电路为起点。阐述单相交流电路与三相交流电路的基本理论，电路的电流、电压和电功率。懂得提高交流电路功率因数的意义和方法，懂得三相四线供电系统的特点。

2. 常用电气设备与电工仪表

要了解变压器、电动机、低压控制与保护电器的一般结构与简单的工作原理。着重掌握这些电气设备的外部特性与使用方法。熟悉交流电动机用接触器控制的基本环节，看懂一般的电动机控制线路。为在建筑施工过程中，正确使用各类电气设备打好基础。

3. 电子技术常识

为了适应建筑机械类专业的需要，增设了电子技术这部分内容。主要是了解晶体二极管、三极管的结构与工作特性，整流、放大的基本原理。为进一步学习有关电子技术打下基础。

4. 与建筑工程有关的电工技术问题

主要包括建筑施工现场的供电、建筑电气照明、建筑防雷与安全用电等。

“电工与电气设备”是一门实践性较强的课程，它的基本理论与生产实践有着密切的联系。特别是建筑工程类专业的学生，学习本课程的主要目的在于应用。因此在学习本课程时要特别强调理论联系实际，强调能力的培养。为此在学习时要注意以下几点：

(1) 掌握必要的基本理论和基本知识，学会分析问题的正确方法，提高解决问题的能力。习题是提高这方面能力的重要手段，本书安排了一定数量的例题和较多的标准化练习与习题，希望在教与学的过程中适当选用。

(2) 要熟悉各种常用电气设备和电工元器件的型号及主要参数的含义, 以及它们的标准图例符号。这将有助于今后选择使用电器设备, 有助于看懂电气工程图纸。

(3) 实验是培养学生基本技能的主要环节, 本书专门编写了实验指导书, 供教学过程中参考使用。在教学过程中应尽力创造良好的实验条件, 保证实验教学的正常实施。严格的实验教学将有助于学生们基本技能的训练, 同时通过实验以及实物模型和现场教学, 帮助学生加深基本理论和基本概念的理解。

本课程的不少内容都与数学、物理学中的基本知识有关, 所以在学习本课程前必须具备一定的数学和物理学的知识。

第一章 单相交流电路

就理论上讲，直流电路要比交流电路简单得多，但是在实际应用中，或者说在实现电能和其它形式能量的转换过程中，交流电会给我们带来极大的方便。从电源上讲，在将其它形式的能量转换为电能的过程中，交流发电机与直流发电机相比，具有较高的经济效益。所以目前各国的发电机厂大多采用交流发电机。在电能的输送上，为了减少电能在输电导线上的损失和节约输电导线的材料，远距离输电时，都普遍采用高压输电。目前我国已出现多条五十万伏的超高压输电线路。但是任何发电机组输出端的电压是不可能达到高压输电线路上的电压值，用电单位考虑到安全因素和节约用电设备的绝缘费用，一般也要求低压供电。因此，电能从生产到输送，直到用户使用，需要电压不断升降。而交流电可以非常方便地实现电压的升降变换。最后在用电的环节上，交流电也在许多情况下优于直流电，如交流电动机与直流电动机相比，它具有结构简单，价格便宜，运行可靠，维护方便等优点。所以动力用电，在绝大多数情况下是采用交流电动机，尤其是建筑施工现场。而在某些必须使用直流电的场合（如工业生产中的电解、电镀；城市交通用的电车等），也都是采用整流设备，将现有的交流电变为直流电使用。正因为上述这些原因，不论是在工农业生产上，还是在人们的日常生活中都是普遍应用交流电。另外有关直流电路的理论在物理学中已经讨论过。因此这里在研究电路运行规律时，以交流电路为主。

第一节 电路的基本知识

一、电路的组成

电路，就是电流所经过的路径。我们在使用任何一种用电设备时，都要将用电设备与电源构成一个闭合完整的电路，使之能够实现能量的传输与转换。一个闭合完整的电路，一般必须有下列四个部分组成：电源 E 、负载（用电器） R 、控制与保护电器 S 与 FU 以及连接导线，如图1-1所示。

1. 电源，即电能的源泉

其作用是将非电形式的能量转换成电能。例如常用的干电池，就是将化学能转换为电能的电源；又如发电机就是将机械能转换为电能的电源。

电路中一旦有了电源装置以后，就可以使电源两端产生一个电压。在这个电压的作用下，在闭合电路中电荷将作有规则的运动，形成电流。所以说，电源是在电路中产生电流的“动力”。

2. 负载或称为用电器

它是将电能转换为其它形式能量的装置。例如一个电热器，就是将电能转换为热能的装置；电动机就是将电能转换为机械能的装置。任何负载或者用电器在实现能量转换过程

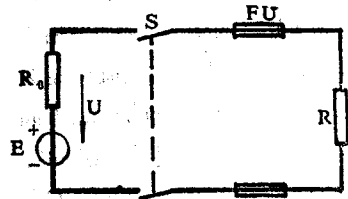


图 1-1 电路的组成

中，都有一定的承受能力，超过了这一限度，电器设备就可能发生故障。这一限度通常是用若干个额定值（额定电压、额定电流、额定功率等）来表示。所以在使用电器设备时，了解它的额定值是至关重要的。

3. 控制与保护电器

它也是电路中不可缺少的环节。最简单的控制电器就是开关，通常用S表示。通过一个开关，可以来控制电路的接通和切断。所谓保护电器就是当电路出现故障以后，装置可以立即将电路切断以便使电路的故障及时的排除，或者将故障限制在一定范围内，而不影响其它无故障部分。最简单的保护电器就是图1-1中的熔断器FU。

4. 连接导线

以上三个部分需要用导线将它们连接起来，构成一个闭合的回路。导线起着联通电路的作用，实现电能的传输。由于任何导线都存在一定的电阻，因此当电流通过导线时，就会产生一定的能量损耗。为了减少线路上的能量损耗，选择导线材料时，就要求材料的电阻率愈小愈好。考虑到材料的经济成本，一般都选用铜和铝作为导线材料。在研究电路过程中，为了简化计算，若不作特别说明，可将导线的电阻忽略不计。

二、电路的基本参量

为了定量地描述电路在运行过程中的特征，通常采用电流强度、电压、电动势、电动率等基本参量。正确地理解这些基本参量的概念将有助于对电路的分析与计算。

1. 电流强度（简称电流）

物理学中已经讲过，电路中的电流强度是指单位时间内流过导线截面的电量。电流通常用I表示：

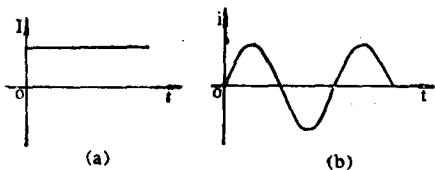


图 1-2 电流随时间变化的波形图
(a) 直流电；(b) 交流电

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-1)$$

式中的Q是电量，单位是库仑(C)；t是时间，单位是秒(s)；I为电流强度，单位是安培(A)。当电流较小时，可采用毫安(mA)或微安(μA)表示，即 $1\text{A} = 10^3\text{mA}$ ； $1\text{A} = 10^6\mu\text{A}$ 。

为了描述电荷在电路中的流动方向，首先要规定正电荷流动的方向为电流方向。但是在有些情况下，并不了解电路中电荷流动的实际方向，这会给分析计算电路带来困难。为了解决这一矛盾，可以采用事先假设电流的参考方向来解决。当按照参考方向分析、计算电流时，得出的电流值可能为正，也可能为负。正值表示电流的实际方向与参考方向一致，负值表示电流的实际方向与参考方向相反。

按照电路中流过电流的特点，可以把电路分为直流电路与交流电路两种。所谓直流电路，就是在电路中的电流方向不随时间变化。交流电路是指电路中的电流大小和方向都随时间作周期性变化。常见的交流电流按正弦规律变化，所以又称为正弦交流电。电路中电流强度随时间变化的波形图如图1-2所示。

2. 电压（也称电势差）

电压只对电路中的两点来讲才有意义。根据物理学中的知识可知，电路中两点的电压不等于零，就意味着两点之间的电路中存在着电场力，在电场力的作用下，一正电荷将从

高电势端移至低电势端，形成了电荷的定向运动，即电流。可见，电路两端有无电压，是电路中有无电流的必要条件。通常电压用 U 来表示，单位是伏特（V），当电压较小时，可采用毫伏（mV）作单位，当电压较大时，可采用千伏（kV）作单位。 $1\text{kV} = 10^3\text{V}$ ； $1\text{V} = 10^3\text{mV}$ 。

为了说明电路两端的电势高低，我们规定了电压的方向为：从高电势指向低电势。与电流的参考方向一样，在分析、计算电路时，也可假设电压的参考方向。当最后计算出电压值为正值，则表示电压的实际方向与参考方向一致，反之两者方向相反。电压的参考方向在电路中除了可以用箭头表示之外，还可以用加角注的方法来表示。如电路中AB两点的电压参考方向规定为由A指向B，则可以写作 U_{AB} 。

3. 电源电动势

电源是组成电路不可缺少的部分，它是在电路中产生电压驱动电流的必要条件。为了描述电源作用能力的大小，引入了一个重要的物理概念——电源电动势 E 。它的定义是：

$$E = \frac{W_{*}}{q} \quad (1-2)$$

式中 W_{*} 是指该电源将正电荷 q 由电源负极（低电势）通过电源内部移至电源正极（高电势时），非静电力所做的功。电动势通常用 E 来表示，它的单位是伏特（V）。例如干电池，它的电动势为 1.5V 。

电源电动势也有“方向”，也即有正极与负极之分。我们规定：由电源的负极通过电源的内部，指向电源的正极为电源电动势的方向。在实际分析计算过程中，也和电流电压一样，可先假设一个电源电动势的参考方向。在电路中电源电动势的参考方向除了用箭头表示外，还可以用“+”和“-”来表示。

综上所述，以后在电路的分析计算过程中，电路中所标注的电流、电压、电动势的方向均为参考方向。它们的真实方向由最后的计算结果是正值还是负值来判断，是正值则与参考方向一致，是负值则与参考方向相反。

4. 电动率

在电压的作用下，电流通过负载（各种类型的用电器）时，电场力将会做功。单位时间做的功称为通过负载的电功率 P ，电功率等于负载两端的电压与通过负载电流的乘积，即：

$$P = IU \quad (1-3)$$

电压的单位是伏特（V）、电流的单位是安培（A），功率的单位为瓦特（W）。功率较大时，也可采用千瓦（kW）作单位， $1\text{kW} = 10^3\text{W}$ 。

由于负载两端的电压以及通过负载的电流可能为正值，也可能为负值。因此，电压与电流的乘积（即电功率）也可能为正值，也可能为负值。当负载上的电压和电流实际方向一致时，电功率为正，表示负载将从电源吸收能量；当负载上的电压和电流的实际方向不一致时，电功率为负值，表示负载将要向电源释放能量。

三、电路的三种状态

电路在运行过程中，通常有通路、断路、短路三种状态。

1. 通路状态

将负载 R_L 与电源 E 接通，电路中有电流通过，电源与负载之间发生能量交换，这就称

电路处于通路状态。如图1-3所示,在通路状态中,电路中的电流可按全电路欧姆定律计算:

$$I = \frac{E}{r_0 + R_L} \quad (1-4)$$

由公式(1-4)可看出,当电源 E 和 r_0 一定时,电路中的电流大小取决于负载电阻 R_L , R_L 减小,电流随之增加。但是通过负载 R_L 的电流是不可能无限止增长,否则会由于电流过大

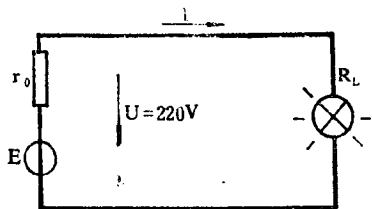


图 1-3 电路的通路状态

而烧毁电源和用电设备。任何一台电气设备,在正常工作过程中,它承受的电压、电流、电功率都有一个额定值。这些额定值的大小是由生产厂家,根据使用时的经济性、可靠性及其寿命等因素而规定的。电气设备在工作过程中,电压、电流和电功率都等于所规定的额定值时,就称为电气设备处于额定工作状态(简称满载)。长期处在这种状态下工作,电气设备是

不会产生过热或绝缘被击穿等现象,并且具有最佳的经济效益。例如一个额定电压为220V,额定功率为100W的白炽灯泡,当将它接入220V的电路中去,它就能处于额定的工作状态。

若某一电气设备接入一个电路中去,通过负载的电流或所加的电压超过其额定值(简称过载),在此状态下长期工作,将会发生发热过多或绝缘材料被击穿等现象,使之发生事故或减少电气设备的使用寿命。若电流电压值低于所规定的额定值(简称轻载),电气设备将不能得到充分利用,经济效益降低,也是不可取的。为了使电气设备安全可靠地运行,并且具有较高的经济效益,我们总是希望电气设备处于额定的工作状态。

各种电气设备和用电器的额定值经常是标在铭牌上或打印在外壳上,使用时务必核对各额定值的数据,并正确理解其意义。

2. 断路状态

断路就是指电气设备与电源断开,电路中没有电流通过,电气设备处于不工作状态,电源也没有功率输出。

断路可以分为控制性断路和事故性断路两种,如图1-4所示。

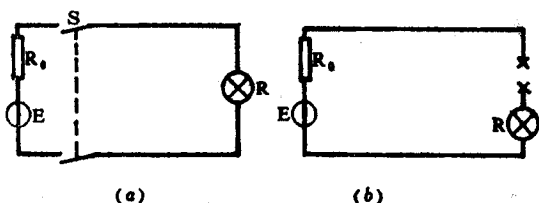


图 1-4 两种断路状态

(a) 控制性断路; (b) 事故性断路

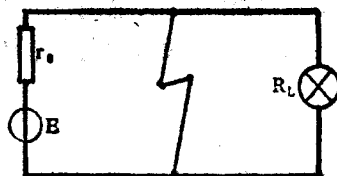


图 1-5 短路状态

控制性断路是利用控制电器(如开关 S),使电路处于断路状态,属于正常现象;事故性断路是由于电源、负载或导线某处发生故障而引起的断路。这种事故性断路的发生,就需要查出故障,及时予以排除。

3. 短路状态

当电源未经负载而直接由导线接通而成闭合电路,外电路的电阻几乎等于零,这时电路称为短路状态,如图1-5所示。

发生短路的原因，主要是由于电气设备的绝缘损坏或接线错误所造成。当电源发生短路时，电路中的电流为：

$$I_b = \frac{E}{r_0 + R_L} = \frac{E}{r_0} \quad (1-5)$$

式中 E 为电源电动势； r_0 为电源的内阻； R_L 为电路中导线的电阻，可以近似等于零，即 $R_L = 0$ 。电源内阻 r_0 一般都很小，所以短路电流 I_b 很大。电路中若无保护措施，颇大的短路电流必然导致线路过热或电源设备发生永久性损坏，造成严重事故。可见，电路的短路状态应当力求避免。为了保护电源设备和供电线路的安全运行，通常在电源的输出端和用电设备的输入端装设熔断器FU（保险丝）。当线路一旦发生短路，强大的短路电流会在极短的时间内将保险丝熔断，切断电路，从而达到保护线路和电源设备的目的。

第二节 电路的基本定律

在由电源、负载组成的电路中，电路各部分的电压与电流都存在一定的约束关系。电路的基本定律就是研究电路中电流与电压的关系。这些基本定律主要有欧姆定律和克希荷夫定律。

一、欧姆定律

1. 一段电路的欧姆定律

图1-6是闭合电路中的一段。在这一段电路中，不含有电源电动势，仅有电阻 R 。根据实验测得：流经电阻 R 的电流大小与加在电阻两端的电压成正比，而与电阻 R 的阻值成反比，即

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = IR \quad (1-6)$$

式中的 I 为通过电阻 R 的电流， U 为加在电阻 R 两端的电压。

2. 全电路欧姆定律

图1-7是一个最简单的闭合电路。 R 是负载电阻， E 是电源电动势， r_0 是电源的内阻。全电路欧姆定律是说：在这一闭合电路中，电流强度的大小与电源电动势 E 成正比而与电路中的负载电阻 R ，电源内电阻 r_0 之和成反比，即

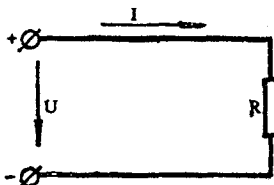


图 1-6 一段电阻电路

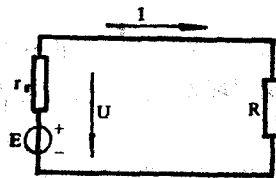


图 1-7 最简单的闭合电路

$$I = \frac{E}{R + r_0} \quad (1-7)$$

公式(1-7)还可以写成：

$$E = IR + Ir_0 = U + U_0 \quad (1-8)$$

式中 $U = IR$ 为负载两端的电压降，又可称为电源的端电压。 $U_0 = Ir_0$ 为电源内电阻上的电压降。公式(1-8)又可称为闭合电路的电压平衡方程式，即任何一个闭合电路中，电

源电动势的大小就等于电源外部负载上的电压降与电源内电阻上的电压降之和。

公式(1-8)还可以写成:

$$U = E - Ir_0 \quad (1-9)$$

即电源的端电压等于电源电动势 E 减去电源内电阻上的电压降 Ir_0 。可见,当电路处于断路状态时,因为 $I = 0$,所以 $U = E$,即电源的端电压在数值上就等于电源电动势。一般情况下,电源的端电压不等于电源电动势,且 $U < E$ 。由于在电路中,电源电动势 E 和内电阻 r_0 是不变的,由公式(1-7)可以看出,外电路中电阻 R 的变化将是影响电流大小的唯一因素。当电阻 R 增大,电路中的电流 I 就要减少,当电阻 R 减少,电路中的电流 I 就要增大。随着电路中电流的变化,电源的端电压也要随之变化。我们将电源的端电压随电源输出电流的变化而发生变化的关系,即 $U = f(I)$ 称为电源的外特性。如果电源输出电流 I 逐渐增大,而电源的端电压 U 下降很少,这说明此电源的外特性较好,反之较差,图1-8就是电源的外特性图。若外特性曲线是一条平行于电流轴的直线,那么这个电源就是内阻 $r_0 = 0$ 的理想电源,它能提供一个不随输出电流变化而变化的固定端电压,有时也称为恒压源。

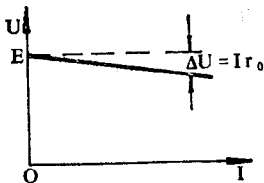


图 1-8 电源的外特性曲线

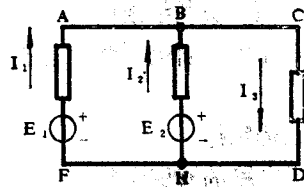


图 1-9 复杂电路示例

二、克希荷夫定律

计算简单电路,利用欧姆定律以及电阻元件的串并联规律,就可以直接求得电路中的电流和电压。遇到复杂电路,欧姆定律就会发生困难,还需要应用克希荷夫定律。克希荷夫定律共有两个:第一定律应用于节点,又称为节点电流定律;第二定律应用于回路,又称为回路电压定律。

1. 克希荷夫第一定律(节点电流定律)

图1-9所示为一个复杂电路示例。电路中各支路电流的参考方向在图中用箭头表示。凡在电路中有三条或三条以上支路汇交的点称为节点,根据这一定义,图1-9的电路中, B和H就是节点。

克希荷夫第一定律就是根据电流的连续性,即在电路中的任意一个节点上均不可能发生电荷的持续积累现象,所以流入节点的电流之和必定等于从该节点流出的电流之和,即

$$\sum I_{\lambda} = \sum I_{\mu} \quad (1-10)$$

根据这一定律,图1-9电路中的节点B上的电流有如下关系:

$$I_1 + I_2 = I_3$$

对于节点H上的电流也可以相应的写出:

$$I_3 = I_1 + I_2$$

显然这两个方程式是不独立的。在一个复杂电路中,若有 n 个节点,根据节点电流定律,能够写出有关电流的独立方程式数只有 $(n-1)$ 个。所以在具有两个节点的复杂电路中,根据节点电流定律,只能写出一个独立方程。

2. 克希荷夫第二定律（回路电压定律）

在一个直流电路中，当各个电源电动势一定，外电路上的负载电阻一定时，电路中各支路的电流和各节点的电势值将都是固定的。若把单位正电荷沿着电路中的任意一个闭合回路绕行一周（即由电路中的任意一点出发，途经任意一个闭合回路再回到原出发点）它所获得的能量与放出的能量必定相等。由此可见，沿任意一闭合回路绕行一周，回路中各电势的升高之和必定等于各电势降落之和。这就是克希荷夫第二定律。

在图1-9的电路中，若沿ABHFA回路绕行，回路中电势升高的是： E_1 和 $I_2 R_2$ ，电势降落的是： E_2 和 $I_1 R_1$ ，故得：

$$E_1 + I_2 R_2 = E_2 + I_1 R_1$$

经整理，又可得到：

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$$

也可以写成：

$$\sum E_i = \sum IR \quad (1-11)$$

公式(1-11)为克希荷夫第二定律的又一种表达式。它表示了，在电路中沿任意一个回路绕行一周，回路中所有的电动势的代数和等于所有的电阻上的电压降的代数和。电动势和电阻上的电压降的正负号，可以由回路绕行方向来确定。当电动势方向与回路绕行方向一致时，可取正值，反之取负值；当电阻上的电流方向与回路绕行方向一致时，此电阻上的电压降取正值，反之取负值。

利用克希荷夫定律可以计算任何复杂电路的电流。在物理学中，我们曾经遇到桥式电路，若用欧姆定律就无法求解，现在可以利用克希荷夫定律来解决桥式电路的问题。

【例 1-1】 图1-10为一桥式电路，它是测量技术中常用的一种电路。

设图中 $E = 4\text{V}$ ， $R_1 = R_3 = R_4 = 400\Omega$ ， $R_2 = 347\Omega$ ， $R_g = 600\Omega$ ， R_t 为热敏电阻，放在需要测温度的地方，用导线把它接到电桥的一个桥臂之中。当温度为 0°C 时， $R_{t0} = 53\Omega$ ，当温度为 100°C 时， $R_t = 75\Omega$ 。求温度为 0°C 及 100°C 时，仪表中通过的电流 I_g 及其两端的电压 U_g 。

【解】 分析电路可知，该电桥电路共有四个节点和六条支路，因此相应有六个未知的电流，需列出6个独立的方程式才能求解。列方程前，还需将各支路上的电流参考方向标定出来，如图中箭头所示。根据克希荷夫第一定律可得：

$$\begin{aligned} \text{A点} \quad I_2 &= I - I_1 \\ \text{B点} \quad I_3 &= I_1 - I_g \\ \text{C点} \quad I_4 &= I_2 + I_g = I - I_1 + I_g \end{aligned}$$

再利用克希荷夫第二定律列出三个方程式。沿回路ABCA可得：

$$I_1 R_1 + I_g R_g - I_2 (R_2 + R_t) = 0$$

将 $I_2 = I - I_1$ 代入上式可得：

$$I_1 R_1 + I_g R_g - (I - I_1)(R_2 + R_t) = 0$$

经整理可写成：

$$I_1 (R_1 + R_2 + R_t) + I_g \cdot R_g - I(R_2 + R_t) = 0 \quad (1-12)$$

沿回路BDCB可得：

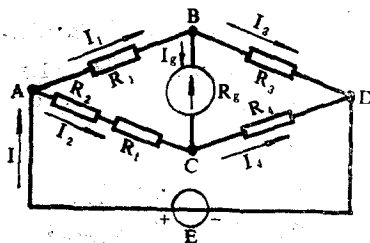


图 1-10 例1-1题图

$$I_3 R_3 - I_4 R_4 - I_2 R_2 = 0$$

将 $I_3 = I_1 - I_2$, $I_4 = I - I_1 - I_2$ 代入上式可得:

$$(I_1 - I_2) R_3 - (I - I_1 + I_2) R_4 - I_2 R_2 = 0$$

经整理写成:

$$I_1 (R_3 + R_4) - I_2 (R_3 + R_4 + R_2) - I R_4 = 0 \quad (1-13)$$

沿回路ABDA可得:

$$I_1 R_1 + I_3 R = E$$

将 $I_3 = I_1 - I_2$ 代入上式可得:

$$I_1 R_1 + (I_1 - I_2) R = E$$

经整理可写成:

$$I_1 (R_1 + R) - I_2 R = E \quad (1-14)$$

应用行列式解联立方程组 (1-12)、(1-13)、(1-14) 可得:

$$I_2 = \frac{(R_1' \cdot R_3 - R_1 \cdot R_4) E}{(R_1 + R_3) [R_2' \cdot R_4 + (R_2' + R_4) R_2] + R_1 \cdot R_3 (R_2' + R_4)}$$

式中, $R_2' = (R_2 + R_1)$

当温度为 0°C 时, 由于 $R_2' \cdot R_3 = R_1 \cdot R_4$, 故得:

$$I_2 = 0, U_2 = 0$$

此时电桥处于平衡状态。

当温度变为 100°C 时, 经计算可得:

$$I_2 = 0.053\text{mA}, U_2 = I_2 R_2 = 31.8\text{mV}$$

由计算可知, 通过仪表所指出的不同的读数, 便可测出不同的温度值。

上述电路的基本定律, 虽然是在直流电路上得出, 实际上欧姆定律、节点电流定律、回路电压定律也可以推广到交流电路中去。

第三节 正弦交流电的产生及其特征

一、正弦交流电的产生

根据法拉第电磁感应定律可知, 一个闭合电路的一部分导体在磁场里作切割磁力线运动时, 导体中就会产生感应电动势。利用这一原理, 就可以制成一台最简单的交流发电机。它的主要结构如图1-11所示。

在固定不变的磁极N与S之间放置一个可以转动的圆柱形铁芯, 铁芯上绕有线圈abcd, 统称为发电机的电枢。电枢线圈上的两个出线端钮分别接到两个固定在转轴的滑环上, 滑环通过滑动摩擦与电刷相连。静止的电刷与外电路的用电负载R连接。

当采用适当形状的磁极, 使磁极正下方中间部分的空气隙最小, 而两边的空气隙逐渐增大, 使得在电枢表面的法线方向上得到一个按正弦规律分布的磁感应强度B。在两个磁极分界面OO'的位置上, 电枢表面法线方向上磁感应强度最小, 即 $B = 0$ (又称OO'平面为中性面), 在磁极正下方磁感应强度最大, 即 $B = B_m$ 。于是在电枢表面任意一点法线方向上的磁感应强度可以用下式表示:

$$B = B_m \sin \alpha \quad (1-15)$$

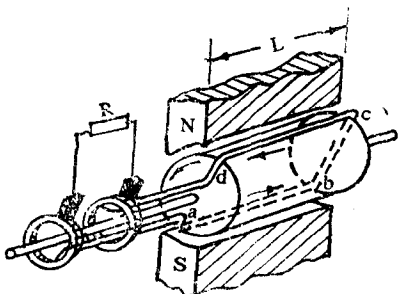


图 1-11 最简单的交流发电机的模型

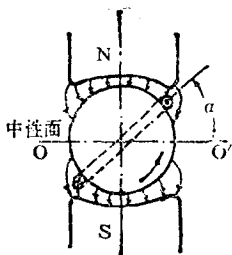


图 1-12 电枢表面磁场分布

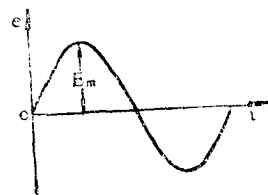


图 1-13 正弦交流电动势的变化曲线

式中 α 角是电枢表面上任意一点和电枢轴线所决定的平面与中性面 OO' 所夹的角。电枢表面的磁场分布如图 1-12 所示。

当发电机的电枢被原动机，如汽轮机或内燃机带动，在按正弦规律分布的磁场中匀速转动时，电枢绕组的两个边 ab 和 cd 将作切割磁力线运动。如果电枢表面的绕组具有 N 匝线圈，这个线圈在转动时产生的感应电动势为：

$$e = N \cdot 2B_m L v \sin \alpha = E_m \sin \alpha \quad (1-16)$$

式中 $E_m = 2NB_mLv$ 称为感应电动势的最大值或称为幅值。可见，当电枢绕组在具有两个磁极的磁场中旋转一周，绕组两端产生的感应电动势的大小和方向也按正弦规律变化了一次，电动势的变化规律可见图 1-13 所示。

当发电机的电枢在原电机带动下，在磁场中作匀速转动时，与绕组两端 a 和 d 相连接的滑环上就会产生一个作周期变化的正弦交流电动势。通过滑动摩擦使滑环和静止电刷相连，可将此正弦交变电动势引出。如果将一个用电器 R 与静止的电刷相连接，形成闭合电路。在用电器 R 中将通过一个大小和方向都随时间作周期性变化的正弦交流电流。

【例 1-2】 有一台简单的交流发电机（具有两个磁极），电枢的直径 $D = 0.2\text{m}$ ，长度 $L = 0.4\text{m}$ ，绕组匝数 $N = 20$ 匝，在正弦分布的磁场中，以恒定转速 $n = 3000\text{r/min}$ 转动。磁感应强度的最大值 $B_m = 1\text{Wb/m}^2$ 。试求：（1）感应电动势的最大值，并写出电动势变化的瞬时表达式；（2）当电枢线圈在 $\alpha_1 = \frac{\pi}{6}$ ， $\alpha_2 = \frac{\pi}{3}$ ， $\alpha_3 = \frac{7}{6}\pi$ ， $\alpha_4 = \frac{13}{6}\pi$

的位置时，电动势的瞬时值。

【解】（1）作切割磁力线运动的电枢线圈边的线速度为：

$$v = \frac{\pi D n}{60} = \frac{3.14 \times 0.2 \times 3000}{60} = 3.14\text{m/s}$$

电动势的最大值为：

$$E_m = 2NB_mLv = 2 \times 20 \times 1 \times 0.4 \times 3.14 = 502\text{V}$$

电动势的瞬时表达式：

$$e = E_m \sin \alpha = 502 \sin \alpha \text{ (V)}$$

（2）当 $\alpha_1 = \frac{\pi}{6}$ 时， $e_1 = 502 \sin \frac{\pi}{6} = 251\text{V}$

当 $\alpha_2 = \frac{\pi}{3}$ 时， $e_2 = 502 \sin \frac{\pi}{3} = 435\text{V}$