

中等职业学校技能型紧缺人才培养培训系列教材

数控技术应用专业

数控机床控制技术基础

——电气控制基本常识

主编 吴文龙 王猛

高等教育出版社

内容简介

本书是中等职业学校技能型紧缺人才培养培训系列教材。

本书根据 2003 年 12 月教育部办公厅、国防科工委办公厅和中国机械工业联合会颁发的《中等职业学校数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训指导方案》的核心课程与训练项目《数控机床控制技术基础——电气控制基本常识》的教学大纲编写,同时参考了相关行业的职业技能鉴定规范及初级电工技术等级考核标准。

本书内容有:直流电路、正弦交流电路、变压器与交流异步电动机、电气控制基础、模拟电子技术基础、数字电子技术基础、数控机床的控制系统概述、PLC 及其应用基础、位置检测及控制基础、进给驱动及控制技术基础、主轴驱动及控制技术基础。

本书以理论实践一体化教学法和项目训练教学法为基本理念,采用综合化和模块化的编写方式,可供中等职业学校数控技术应用专业使用,也可作为相关行业岗位培训或自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

数控机床控制技术基础——电气控制基本常识 /
吴文龙 王猛主编. —北京:高等教育出版社, 2004. 8
ISBN 7 - 04 - 015650 - 4

I. 数... II. ①吴... ②王... III. 数控机床 - 电气
控制 - 专业学校 - 教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 075972 号

策划编辑 李新宇 责任编辑 王莉莉 封面设计 于 涛 责任绘图 朱 静
版式设计 张 岚 责任校对 胡晓琪 责任印制

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 82028899		http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本	787 × 1092 1/16	版 次	年 月第 1 版
印 张	21	印 次	2004 年 月第 次印刷
字 数	510 000	定 价	25.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

出版说明

为实现党的十六大提出的全面建设小康社会的奋斗目标,落实《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》精神,促进职业教育更好地适应社会主义现代化建设对生产、服务一线技能型人才的需要,缓解劳动力市场制造业和现代服务业技能型人才紧缺状况,教育部、劳动和社会保障部、国防科工委、信息产业部、交通部、卫生部联合印发了《教育部等六部门关于实施职业院校制造业和现代服务业技能型紧缺人才培养培训工程的通知》。根据《通知》的要求,教育部办公厅、国防科工委办公厅、中国机械工业联合会组织制定了《中等职业学校数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训指导方案》(以下简称《指导方案》)。

《指导方案》要求本专业领域技能型紧缺人才的培养培训要以综合素质为基础,以能力为本位,把提高学生的职业能力放在突出的位置,加强实践性教学环节,使学生成为企业生产服务一线迫切需要的高素质劳动者。职业教育要以企业需求为基本依据,办成以就业为导向的教育,既要增强针对性,又要兼顾适应性,课程设置和教学内容要适应企业技术发展,体现本专业领域的新知识、新技术、新工艺和新方法,具有一定的先进性和前瞻性,教学组织要以学生为主体,提供选择和创新的空間,构建开放的课程体系,适应学生个性化发展的需要。

为了配合实施数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训工程,我社组织了由制定《指导方案》的专家组牵头,承担培养培训任务的职业院校及合作企业的一线“双师型”教师与工程技术人员参与的编者队伍,开发编写了数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训系列教材。本系列教材以《指导方案》为依据,以就业为导向,以能力为本位,定位准确,精心打造,借鉴了国内外职业教育先进教学模式,从内容到形式都有所创新,理论基础知识教材,有机地整合了多门传统的专业基础课程,知识点以必需、够用为度,体现了大综合化,理论实践一体化教材,倡导情境教学法,强化了知识性和实践性的统一,操作训练和实训指导教材,成系列按课题展开,考评标准具体明确,实用、可操作性强。本系列教材既注重了内在的相互衔接,又强化了相互支持,并将根据教学需要不断增添新内容。

数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训系列教材适用于中等职业学校教学,亦可供企业进行岗前和在职培训时选用。

查阅本系列教材的相关信息,请登录高等教育出版社“中等职业教育资源网”(网址:<http://sv.hep.com.cn>)。

前言

本书根据 2003 年 12 月教育部办公厅、国防科工委办公厅和中国机械工业联合会颁发的《中等职业学校数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训指导方案》的核心课程与训练项目《数控机床控制技术基础——电气控制基本常识》的教学大纲编写,同时参考了相关行业的职业技能鉴定规范及初级技术工人等级考核标准。该大纲借鉴了国外先进职业教育的理念、模式和方法,结合我国数控技术应用专业领域技能型紧缺人才需求的实际情况,大刀阔斧地对专业课程结构、体系、内容和教学方法进行了改革,将电工技术、电子技术、电工仪表、电机与电气控制和数控技术等学科有机综合。本书是中等职业学校技能型紧缺人才培养培训系列数控技术应用专业教材。

本书坚持以就业为导向,以能力为本位,突出职业技能教育,注意与职业技能鉴定的内容和要求相接轨,与企业实践密切联系,理论知识与技能训练内容相统一。本书打破了原来各学科体系的框架,体现了课程的综合化和模块化。在内容的选择和处理上,以“必需、够用”为度,突出了针对性和适应性,力求浅显易懂、少而精、理论联系实际和学以致用。本书采用了案例性教学的内容,并将原来传统学科教学的长处与案例性教学相结合,将专业特点和职业特点相结合。同时,本书结合数控技术的发展,增加新技术、新知识的介绍,为学生的终身学习打下良好的基础。

本书在教学过程中建议采用理论实践(实验)一体化教学法或案例教学法,并根据数控机床的实际应用,优化教学过程。书中打*号的部分是选学内容,可供学生自学。

本书教学学时为 132 学时,学时方案建议如下表,供参考。

序号	课程内容	学时数
1	直流电路	16
2	正弦交流电路	14
3	变压器与交流异步电动机	8
4	电气控制基础	18
5	模拟电子技术基础	18
6	数字电子技术基础	14
7	数控机床的控制系统概述	4
8	PLC 及其应用基础	6
9	位置检测及控制基础	6
10	进给驱动及控制技术基础	12
11	主轴驱动及控制技术基础	12
机 动		4
合 计		132

本书由常州刘国钧职教中心吴文龙、王猛主编,石家庄职教中心王维刚和常州刘国钧职教中心耿淬参编。其中,王猛编写第1、7、9、10、11章;王维刚编写第2章;耿淬编写第3章;吴文龙编写第4、5、6章;王猛、耿淬合编第8章。本书由无锡职教中心校葛金印主审。主审在百忙中审阅了本书,提出许多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者学识和水平有限,错漏之处在所难免,敬请批评指正。

编者

2004年7月

第1章

直流电路

本章将学到：

1. 电路由哪几部分组成,电路的基本物理量有哪些,它们的含义是什么?
2. 直流电路中常见的元件有哪些,它们各有什么作用,如何正确识别和选用?
3. 常用的电工仪表有哪些,它们的工作过程怎样,如何正确选用?
4. 电阻定律、欧姆定律、基尔霍夫定律的含义是什么,它们在电路分析时有何作用?

1.1 电路及其基本物理量

在各种形式的能量中,电能占有重要的地位。由于电具有转换容易、传输简单、控制方便的优点,故在现代工业、农业、国防、科技以及日常生活中得到广泛应用。可以说电气化的程度已成为一个国家现代化的重要标志之一,那么什么是电路?电路由哪几部分组成呢?

1.1.1 电路及电路图

1. 电路

电路是指电流流过的路径,它是为了某种需要,由各种电气设备和元件按照一定的连接方式构成的电流通路。手电筒是人们日常生活中常用的照明器件,通过观察可以知道,它是由干电池、白炽灯、开关经导线连接而成的一个简单实际电路,如图1.1(a)所示。当合上开关,电路中有电流通过,白炽灯就变亮。

由于实际的需求不同,电路的形成多种多样,如通信电路、机床电路、仪表电路、电子电路等,但它们通常都是由电源、负载和中间环节等基本部分组成。

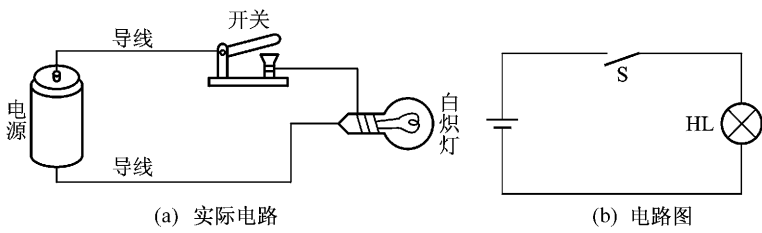


图 1.1 手电筒电路

电源是电路中产生电能的装置。它的作用是把其他形式的能量转变成电能 ,如干电池(将化学能转变电能)、发电机(将机械能转变成电能)等。

负载是电路中消耗电能的装置。它的作用是将电能转换成其他形式能量 ,如白炽灯(将电能转变成光能)、电动机(将电能转变成机械能)等。

中间环节是连接电源和负载的部分。它的作用是传输和分配电能 ,如导线(传输电能)、开关(控制电路的接通和断开)等。

2. 电路图

图 1.1(a)所示的实际电路图 ,直观地表示了电路中各实际元件的实物图形 ,在分析元件的接法和原理时很有用。但是 ,由于实际元件的种类很多、形态各异 ,物理现象复杂 ,若要将所有的实际元件均一一画出 ,不仅会使电路结构复杂 ,更不便进行电路的定量分析和计算。为此 ,通常要将电路中的各种实际元件用一些简单却又能够表征其主要电磁性能的理想元件来替代 ,而对其实际结构、材料、形状等次要特性不予考虑。这种由理想元件构成 ,用规定图形、符号表示的电路称为电路模型 ,简称电路图。图 1.1(b)所示即为图 1.1(a)的电路图。

在一定条件下 ,任何实际元件均可由理想元件来表示 ,故每一个实际电路都有其对应的电路图(电路模型)。电路图中常用的部分图形符号 ,见表 1.1。

表 1.1 部分电工图形符号

图形符号	名称	图形符号	名称	图形符号	名称
	开关		电阻器		接机壳
	电池		电位器		接地
	端子		灯		连接导线
					不连接导线

电路的功能繁多 ,但从总体来说 ,主要有两个方面 :其一是进行能量的传输、分配和转换 ,如上述所示手电筒电路 ,这类电路广泛应用于电力工程中 ;其二是进行信息的传递、处理和运算 ,如常见的扩音机电路 ,图 1.2 所示为扩音机信号放大电路框图。图中信号源相当于电源 ,它将其其他形式的信号(如声、光、温度等信号)转换为电信号。中间环节由信号放大器组成 ,而扬声器则是负载 ,这类电路主要应用在电子线路中。

3. 电路的工作状态

电路的工作状态有如下几种：

(1) 通路

指电源和负载连成的闭合电路 ,简称闭路 ,图 1.3 所示电路中 ,当单刀双掷开关(如图 1.4 所示)扳到位置 2 时 ,电源与负载 R 接通 ,此时电路中有电流通过。

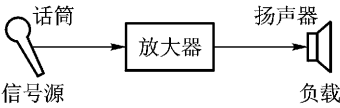


图 1.2 扩音机信号放大电路框图

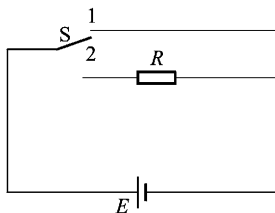


图 1.3 电路的工作状态

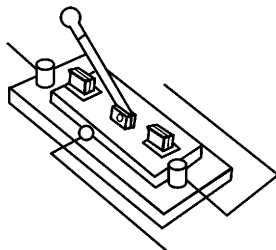


图 1.4 单刀双掷开关

(2) 断路

指电源与负载未接成闭合回路,也称为开路。如图 1.3 所示,当单刀双掷开关处于中间位置时,电路断开,此时电路中无电流。注意在实际电路中电气设备之间、电气设备与导线连接时的接触不良也会使电路处于断路状态。

(3) 短路

指电源未经负载而直接由导线构成闭合电路。如图 1.3 所示,若将单刀双掷开关扳向位置 1,此时电源两端直接由导线相连,此时电路中流过的电流很大,极易烧坏电源和导线而造成事故,故在电力工程中要严防电路发生短路。但有时在调试电子设备的过程中,故意将电路的某一部分短路,这是为了使与调试无关的部分无电流通过而采取的一种方法。

1.1.2 电路的基本物理量

电路的基本物理量有电流、电压、电位、电功、电功率等,这些知识在物理中已经学过,因此在这里作简单的介绍。

1. 电流

电荷在电路中有规则的定向移动形成电流。在金属导体中电流是自由电子在电场力作用下逆电场方向运动形成的。在电离了的气体或液体中,电流是正、负离子在电场力的作用下分别向两个相反方向运动形成的。

(1) 电流的大小

电流的大小取决于单位时间内通过导体横截面的电荷量多少,以字母 I 来表示。

若在 t 秒内通过导体横截面的电荷量为 q ,则电流 I 可表示为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1.1)$$

式中 I ——电流,单位是安[培],符号为 A;

q ——电荷量,单位是库[仑],符号为 C;

t ——时间,单位是秒,符号为 s。

由上式可知,若在 1 s 内通过导体横截面的电荷量是 1 C,则导体中的电流即为 1 A。电流的单位除安[培]外,还有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μA),它们之间换算关系为: $1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$, $1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$, $1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$ 。

(2) 电流的方向

正、负两种电荷的运动都能形成电流,在分析和计算电路时,常常要知道电流的方向。习惯

上规定正电荷的运动方向为电流的方向。图 1.5 所示的导体 ab , 当负电荷由 b 通过截面 A 向 a 移动时, 可以方便地判断出电流的实际方向是 a 到 b 。

但当电路比较复杂时, 某段电路中的电流实际方向往往难以判断, 此时可先任意选择一个方向作为电流的参考方向(不一定是电流的实际方向), 然后以此假定的方向为依据进行计算, 当计算出的电流为正值时, 说明电流的实际方向与参考方向一致, 如图 1.6(a) 所示; 当计算出的电流为负值时, 则说明电流的实际方向与参考方向相反, 如图 1.6(b) 所示。在分析电路时, 电路图中标出的电流方向一般都指参考方向。

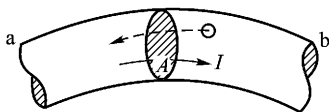


图 1.5 导体中电流的方向

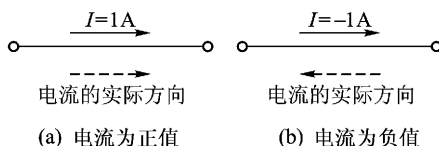


图 1.6 电路中的电流方向

(3) 电流的分类

在生产和生活中, 常把电流分为直流和交流两大类。凡大小和方向都不随时间变化的电流称为直流, 用大写字母 I 表示, 如图 1.7(a) 所示; 凡大小和方向都随时间变化的电流称为交流, 如图 1.7(b) 所示。由于交流电的大小是随时间变化的, 故常用小写字母 i 或 $i(t)$ 表示其瞬时值(交流电详见第 2 章)。

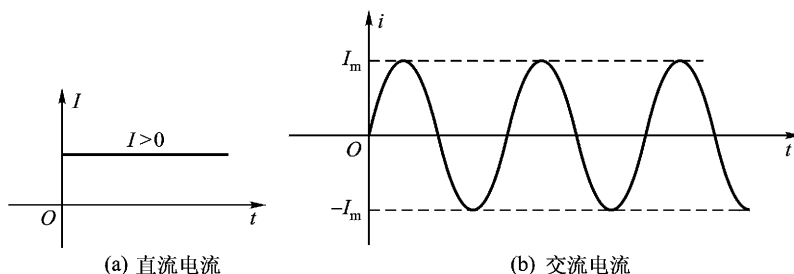


图 1.7 电流的分类

本章只讨论直流电路, 所介绍的物理量若不作说明都是指直流。

2. 电压

导体中存在着大量的自由电荷, 而通常情况下这些电荷的运动是杂乱无章的, 从宏观上看, 没有电荷的定向运动。只有当导体两端保持一定电压, 使导体内存在电场, 才能通过电场力的作用, 不断推动自由电荷做定向运动, 形成电流。故电压是衡量电场力移动电荷做功能力的物理量。

(1) 电压的大小

电压又称电位差, 即电路中两点 a 、 b 之间的电位差, 以字母 U_{ab} 来表示。电压的大小等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功, 如图 1.8 所示。可表示为

$$U_{ab} = \frac{W}{q} \quad (1.2)$$

式中 U_{ab} ——电压,单位是伏[特],符号为 V;

W ——功,单位是焦[耳],符号为 J;

q ——电荷量,单位是库[仑],符号为 C。

由上式可知,若电场力将 1 C 的电荷从 a 点移到 b 点,所做的功是 1 J,则 ab 两点间的电压为 1 V。电压的单位除伏[特]外,还有毫伏(mV)、微伏(μ V)、千伏(kV)等,它们之间的换算关系为:
 $1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$, $1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$, $1 \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V}$ 。

(2) 电压的方向

电压不但有大小,而且有方向。电压的实际方向由高电位指向低电位的方向。图 1.8 中,负载 R_L 两端(a、b 两点),a 点为高电位,用“+”号表示,b 点为低电位,用“-”号表示,电压的实际方向由“+”指向“-”。

同电流一样,电路中任意两点间电压的实际方向往往很难预知,为了分析电路方便,通常在一段电路中事先任意假定一个电压方向作为参考电压方向,然后再根据计算出的电压数值的正、负来判定电压的实际方向。若计算结果为正,则说明实际方向和参考方向相同;反之,则说明实际方向和参考方向相反。在分析电路时,电路图上标出的电压方向一般都是参考方向。

电路中电压的参考方向有三种表示法,如图 1.9 所示。第一种表示方法是用箭头表示。箭头表示由假定的高电位指向低电位,如图 1.9(a)所示;第二种表示方法是用“+”、“-”极性表示。“+”表示假定高电位点,“-”表示假定低电位点,如图 1.9(b)所示;第三种表示方法是用双下标字母表示,如图 1.9(c)所示, U_{ab} 中,前一个下标字母表示假定的高电位点,后一个字母表示假定的低电位点。

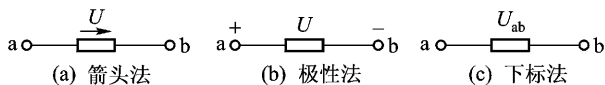


图 1.9 电压的参考方向

(3) 电压的分类

常用的电压可以分成直流电压和交流电压两大类。

若电压的大小和方向不随时间变化,则称为直流电压,用大写字母 U 表示,如图 1.10(a)所示。若电压的大小和方向都随时间变化,则称为交流电压,如图 1.10(b)所示为正弦交流电压。由于交流电压的大小随时间而变化,故常用小写字母 u 或 $u(t)$ 表示其瞬时值。

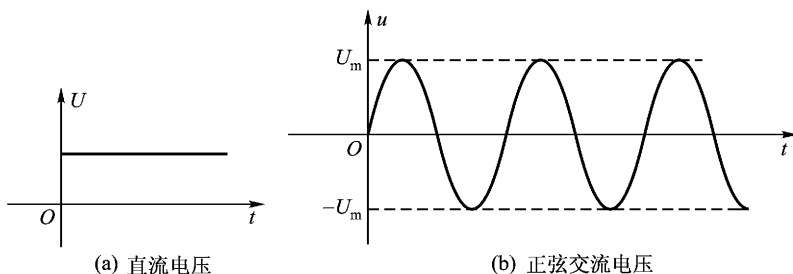


图 1.10 电压的分类

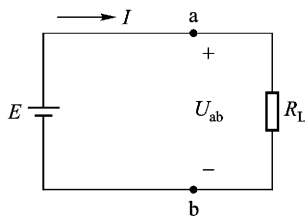


图 1.8 电压

3. 电位

由于电压是对电路中某两点而言的,在分析较复杂的电路(特别是电子电路)时,要一一说明电路中每两点间的电压往往很繁琐,这时利用电位的概念进行分析就显得十分方便。

电路中某点的电位是针对某点的参考点而言的,为了确定电路中某点的电位,必须在电路中事先选定某一点作为“参考点”,并规定该参考点的电位等于零,故该参考点又称为零电位点,在电路图中用符号“—”表示。电力工程上常常选大地作为参考点,即认为大地电位为零,因此凡是外壳接大地的电气设备,其外壳都是零电位,而在电子线路中,则选一条特定的公共线作为零电位点(参考点)。

当参考点确定后,电路上其他各点便有了确定的电位。电路中某一点的电位,等于该点至参考点之间的电压,用字母 V 加下标表示(例如, V_a 表示 a 点的电位),单位也是伏[特](V)。

引入电位的概念后,电路中任意两点之间的电压可以表达为

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1.3)$$

例 1.1 在图 1.11(a)和(b)中,已知 $U_{ac} = 3\text{ V}$, $U_{bc} = 2\text{ V}$, 分别计算电路各点电位及 ab 间的电压。

解 (1) 对图 1.11(a), 因为选择 c 点为参考点, 即 c 点电位为 0, 因此

$$\begin{aligned} V_c &= 0\text{ V} \\ V_b &= U_{bc} = 2\text{ V} \\ V_a &= U_{ac} = 3\text{ V} \end{aligned}$$

ab 间的电压 U_{ab} 由式(1.3)可得

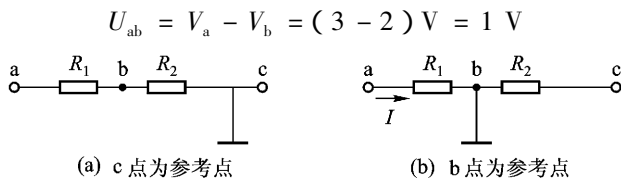


图 1.11 例 1.1 图

(2) 对图 1.11(b), 因为选择 b 点为参考点, 即 b 点电位为 0, 因此

$$V_b = 0\text{ V}$$

因为 $U_{bc} = V_b - V_c$, 所以 c 点电位为

$$V_c = V_b - U_{bc} = (0 - 2)\text{ V} = -2\text{ V}$$

因为 $U_{ac} = V_a - V_c$, 所以 a 点电位为

$$V_a = U_{ac} + V_c = (3 - 2)\text{ V} = 1\text{ V}$$

ab 间的电压为

$$U_{ab} = V_a - V_b = (1 - 0)\text{ V} = 1\text{ V}$$

从上例中可以看出, 电路中各点的电位随参考点选择的不同而发生变化(即与参考点有关), 但电路中任意两点之间的电压不随参考点的不同而改变(即与参考点无关)。

4. 电功与电功率

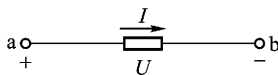
电流通过电炉的电热盘时, 电炉会发热, 将电能转换成热能; 电流通过电风扇的电动机时, 电动机便旋转起来, 带动电风扇转动, 送出阵阵凉风, 将电能转换成机械能。这说明电流通过不同

的负载时,负载就可将电能转换成其他形式的能量,以满足人们不同的需要。

(1) 电功

电路中有电流就必然进行着能量的交换,把电能转换成其他形式的能,称为电流做功,简称电功,用大写字母 W 表示。

若某一负载两端 a、b 之间的电压为 U ,流过负载的电流为 I ,如图 1.12 所示。经过 t 秒后,电功 W 可表示为



$$W = UIt \quad (1.4)$$

图 1.12 负载的电功

式中, W ——电功,单位是焦[耳],符号为 J;

U ——电压,单位是伏[特],符号为 V;

I ——电流,单位是安[培],符号为 A;

t ——时间,单位是秒,符号为 s。

在实际工作中,电功的单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$,俗称“度”。它与焦耳(J)的关系式为: $1\text{kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{J}$ 。

(2) 电功率

电功表示电场力做功的多少,但不能表示做功的快慢,把单位时间电流所做的功称为电功率,用来衡量电路转换能量的速度。电功率简称功率,用大写字母 P 来表示,其表达式为

$$P = \frac{W}{t} \quad (1.5)$$

式中, P ——功率,单位是瓦[特],符号为 W;

W ——电功,单位是焦[耳],符号为 J;

t ——时间,单位是秒,符号为 s。

根据式(1.4),电功率的表达式还有

$$P = UI \quad (1.6)$$

由上式可知,一段电路上的电功率,跟这段电路两端的电压和电路中的电流成正比。

电功率的单位除瓦(W)外,常用的还有毫瓦(mW)、千瓦(kW),它们之间的换算关系为: $1\text{kW} = 10^3 \text{W}$, $1\text{mW} = 10^{-3} \text{W}$ 。

例 1.2 有一个功率为 60 W 的白炽灯,每天使用的照明时间为 4 h(小时)。如果平均每月按 30 天计算,那么每月消耗的电能是多少?若每度电的电费为 0.52 元,则每月要交纳多少电费?

解 因为 $P = \frac{W}{t}$,所以每月消耗的电能为

$$W = Pt = 60 \times 4 \times 3600 \times 30 \text{ J} \approx 2.6 \times 10^7 \text{ J} = 7.2 \text{ kW} \cdot \text{h} = 7.2 \text{ 度}$$

每月应交纳的电费为

$$\text{电费} = 0.52 \times 7.2 \text{ 元} = 3.744 \text{ 元}$$

(3) 焦耳定律

电流通过导体时使导体发热的现象称为电流的热效应。在日常生活中很多的用电设备都是根据电流的热效应制成的,如白炽灯、电烙铁等。

英国科学家焦耳和俄国科学家楞次分别研究了电流的热效应后,各自提出了相同的实验定

律:电流流过导体产生的热量与电流的平方、导体的电阻及通电时间成正比。为了纪念这两位科学家,就把这个实验定律称为焦耳-楞次定律。其表达式为

$$Q = RI^2t \quad (1.7)$$

式中 Q ——热量,单位是焦[耳],符号为 J;

I ——电流,单位是安[培],符号为 A;

R ——电阻,单位是欧[姆],符号为 Ω ;

t ——时间,单位是秒,符号为 s。

电流的热效应也就是电能转换成热能的效应,它给人们带来了许多方便,但电流的热效应也有不利的一面,如电流的热效应会使电路中不需要发热的地方(如导线)也发热,不但消耗能量,而且会使电气设备的温度升高,加速绝缘材料的老化,甚至烧坏设备,所以必须注意。

5. 负载的额定值

为了保证电气设备和电气元件能长期安全地正常工作,合理利用能源,避免温度过高而烧坏设备,任何电气产品都规定了一个最高的工作温度,而工作温度取决于发热量,发热量又取决于电流、电压或功率。故制造厂生产的各种电气设备都规定了电压、电流或功率的额定值。

电气设备或元件所允许施加的最大电压称为额定电压,用 U_N 表示;允许通过的最大电流称为额定电流,用 I_N 表示;在额定电压和额定电流下消耗的功率称为额定功率,用 P_N 表示。这些额定值通常用一块小金属牌(称为铭牌)固定在设备的明显位置,因此有时额定值又可以称为铭牌数据,如常见的白炽灯上标注 220 V 40 W、电烙铁上标注的 220 V 45 W 等。额定值是制造厂对电气设备运行在最可靠、最经济状态下的使用规定。实际使用时,电压、电流和功率的实际值不一定等于它们的额定值,例如电源额定电压为 220 V,但受到外界的影响,电源电压经常波动,稍低于或高于 220 V,这样,额定值为 220 V 40 W 的白炽灯上所加的实际电压不是 220 V,实际功率也就不是 40 W 了。

电气设备或元件在额定功率下的工作状态称为满载,低于额定功率的工作状态称为轻载,高于额定功率的工作状态称为过载或超载。轻载时,电气设备不能得到充分利用或根本无法正常工作,过载时,电气设备的使用寿命会降低甚至被烧坏。因此,各种电气设备应尽量在满载状态下运行,并在电路中安装保护装置(如熔断器),保证各元件在突然发生过载时不被损坏。

例 1.3 一个 220 V 100 W 的白炽灯正常发光时,通过的电流是多少?

解 $U_N = 220 \text{ V}$, $P_N = 100 \text{ W}$

因为 $P_N = U_N I_N$, 所以白炽灯正常发光时的额定电流 I_N 为

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{100}{220} \text{ A} \approx 0.455 \text{ A}$$

1.2 电路中的基本元件

电路中的基本元件有电阻、电源、电容、电感^①等,它们是构成电路的基本单元,它们的基本特性是电路分析的基础。本节主要分析电阻、电源、电容元件的基本特性。

^① 关于“电感”的介绍见 2.2.2 节。

1.2.1 电阻元件

电阻元件是耗能的理想元件,如白炽灯、电热炉等。用来描述电阻元件特性的基本参数称为电阻。

1. 电阻

当电流通过金属导体时,做定向移动的自由电子会与金属中的带电粒子发生碰撞,这种碰撞会阻碍自由电子的定向移动。表示这种阻碍作用的物理量称为电阻,用大写字母 R 表示,单位为[欧·姆],符号为 Ω 。电阻的常用符号如图 1.13 所示。

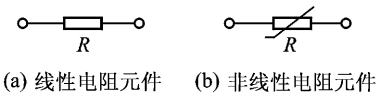


图 1.13 电阻的常用符号

当导体两端的电压是 1 V,导体内通过的电流是 1 A 时,这段导体的电阻就是 1 Ω 。常用的电阻单位还有 $k\Omega$ 和 $M\Omega$,它们之间的换算关系是:1 $k\Omega = 10^3 \Omega$,1 $M\Omega = 10^3 k\Omega = 10^6 \Omega$ 。

导体的电阻是由它本身的物理条件决定的。不同的导体对电流的阻碍作用不同。实验证明,在一定温度下,截面均匀的导体的电阻与导体的长度成正比,与导体的截面积成反比,还与导体的材料有关,即

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{1.8}$$

- 式中 R ——电阻,单位是[欧·姆],符号为 Ω ;
 l ——导体的长度,单位是米,符号为 m;
 A ——导体的截面积,单位是平方米,符号为 m^2 ;
 ρ ——导体的电阻率,单位是欧米,符号为 $\Omega \cdot m$ 。

上式称为电阻定律,式中的电阻率 ρ 是与材料性质有关的物理量,也称为电阻系数。它通常是指在 20℃ 时,长 1 m、截面积为 1 m^2 的某种材料的电阻值。同一种材料,在一定温度下,电阻率为常数。表 1.2 列出了几种常用材料的电阻率及其用途。

表 1.2 几种常用材料的电阻率及电阻温度系数(20℃)

材料名称	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot m)$	电阻温度系数 $\alpha/(1/^\circ C)$	用途
铜	1.7×10^{-8}	4.1×10^{-3}	导线
铝	2.8×10^{-8}	4.2×10^{-3}	
钨	5.5×10^{-8}	4.4×10^{-3}	灯丝
铂	1.05×10^{-7}	4.0×10^{-3}	热电偶或电阻温度计
锰铜、康铜	$(4.2 \sim 5.2) \times 10^{-7}$	$(0.5 \sim 0.6) \times 10^{-5}$	标准电阻
镍铬丝	$(1.0 \sim 1.2) \times 10^{-6}$	15×10^{-5}	电炉丝
碳	3.5×10^{-5}	-0.5×10^{-5}	电刷
纯锗	0.60		半导体材料
纯硅	2 300		
电木、塑料	$10^{10} \sim 10^{14}$		绝缘体材料
橡胶	$10^{13} \sim 10^{16}$		

由上表可知,不同材料的电阻率不同,其用途也不相同。电阻率的大小反映了各种材料导电性能的好坏,电阻率越小,表示其导电性能越好。

通常将 $\rho < 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ 的材料称为导体,如铜、铝等金属材料; $\rho > 10^7 \Omega \cdot \text{m}$ 的材料称为绝缘体,如电木、塑料等;而 $10^{-5} \Omega \cdot \text{m} < \rho < 10^6 \Omega \cdot \text{m}$ 之间的材料称为半导体,如锗、硅等。

导线的电阻率要尽可能小,工程中的各种导线都用铜、铝等电阻率小的纯金属制成。绝缘体材料的电阻率很大,故通常认为其几乎不通电流(并不是说不导电)。为了安全,电工用具上都带有用橡胶、塑料等电阻率很大的绝缘体做成的保护层。半导体材料的电阻率介于二者之间,其导电性可受外界条件控制。

2. 电阻与温度的关系

导体的电阻除了和材料的种类以及电阻体的尺寸有关外,还和温度有关。人们把温度升高 1°C 时,电阻所产生的变动值与原电阻的比值称为电阻温度系数,用字母 α 表示,单位是 $1/^\circ\text{C}$ 。

如果在温度 t_1 时导体的电阻为 R_1 ,在温度 t_2 时导体的电阻 R_2 ,电阻的温度系数为 α ,则它们之间关系可表达为

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1.9)$$

通常金属导体(如铜、铝等)的电阻都是随温度升高而增大,但它们的电阻温度系数较小,故温度变化小时,金属导体电阻可以认为是不变的,但当温度变化大时,电阻的变化就不可忽视了。例如 40 W 的白炽灯不通电时,其灯丝电阻约为几欧,而正常发光时的灯丝阻值可达 $1\text{ k}\Omega$ 。利用这一特性,可用铂丝制成电阻温度计。

半导体材料的电阻一般都是随温度的升高而减小,故在电子工业中常用半导体制造能够灵敏地反映温度变化的热敏电阻。此外,半导体材料的电阻还会随光照等外界因素的变化而变化。

绝缘体材料的电阻也是随温度的升高而减小,故各种绝缘体材料都规定了它们在使用过程中的极限温度。此外,绝缘材料的绝缘电阻还与电路中的电压有关。

而某些由合金材料制成的电阻,如锰铜(85%铜 + 3%镍 + 12%锰)、康铜(58.8%铜 + 40%镍 + 1.2%锰),其阻值几乎不受温度的影响,故常用来制作标准电阻。

还有一些材料,例如某些金属、合金、化合物等,当温度下降到某一数值时(这个温度称为临界温度),它们的电阻等于零,这种现象称为超导现象。具有超导性质的物质称为超导体。对超导体的研究,是当今科研项目中最热门的课题之一。

3. 常用电阻器

在生产实际中,利用导体对电流产生阻碍作用的特性而专门制造的一些具有一定阻值的实体元件,称为电阻器,电阻器简称电阻。这样,电阻这一词既表示了元件,又表示了一个物理量。

(1) 电阻器的分类及应用特点

电阻器是工程技术中应用最多的器件之一。为了适应不同电路和不同工件条件的需要,电阻器的品种规格很多,按其外形结构主要可分成固定电阻器和可变电阻器两大类。

固定电阻器主要用于阻值不需要变动的电路,其外形和图形符号如图 1.14 所示。常用固定电阻器按其制造材料不同,又可分为金属绕线式、膜式两类。

① 绕线式电阻器是由镍铬、康铜等电阻丝绕在瓷管上制成,外涂保护层。具有功率较大、稳定性高的特点,但其阻值范围较小。

② 膜式电阻器由瓷棒上涂一层碳膜或金属膜并刻以槽纹而制成,具有阻值范围大、误差小、

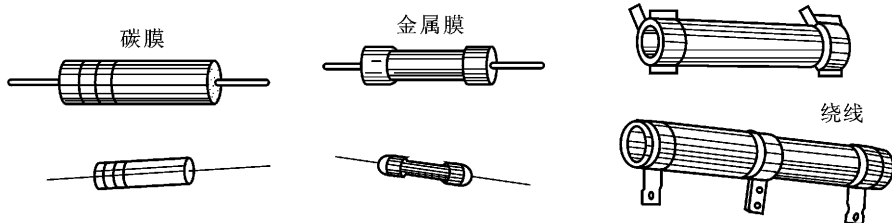


图 1.14 固定电阻器

稳定性较好的特点,但其功率较小。

可变电阻器主要用于阻值需要变动的电路,其外形和图形符号如图 1.15 所示。图 1.15(b)所示的可变电阻器具有三个引出端(A、P、B),也称为电位器。

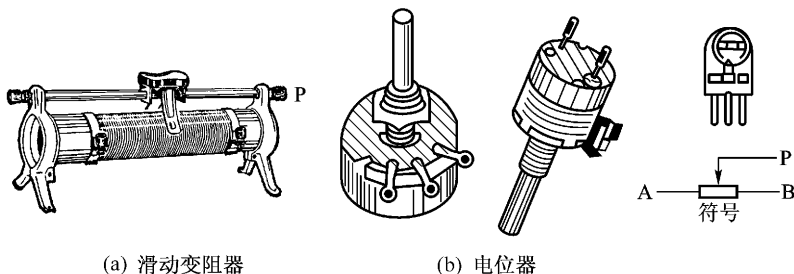


图 1.15 可变电阻器

除上述两类电阻外,电路中还有许多特种电阻,例如光敏电阻、压敏电阻、热敏电阻、磁敏电阻等。它们的电阻值对光照、压力、温度和磁场的变化特别敏感,正被日益广泛地应用于工程技术的各个领域,如温度控制、过压保护等。这些电阻一般都是用各种半导体材料制成的。

(2) 电阻器的主要参数

电阻器的参数很多,在实际应用中,主要考虑标称阻值、允许误差和额定功率三项参数。

① 电阻器的标称阻值是指电阻器表面所标的阻值,它是按国家规定的阻值系列标注的,因此选择电阻器的阻值时,必须符合相关的国家标准。

② 允许误差是指实际阻值与标称阻值之差除以标称阻值所得的百分数。它反映了电阻器阻值的准确程度。普通电阻器的允许误差一般可分为三级,即 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$,或用 I、II、III 表示。

③ 电阻器的标称功率也称为额定功率,是指在一定条件下,电阻器长期连续工作所允许消耗的最大功率。

(3) 电阻器的标注方法

标称阻值、允许误差、标称功率等电阻器的性能参数一般都标注在电阻体的表面上。电阻器的标注方法常用文字符号法和色标法两种。

① 文字符号法是指将电阻器的主要参数用数字和文字符号直接在电阻体表面上的方法。

② 色标法是用颜色表示电阻元件的各种参数,并直接标志在产品上的一种标志方法。它具有颜色醒目、标志清晰等特点,在国际上广泛使用。

各种固定电阻器色标符号如表 1.3 所示。

表 1.3 电阻值的色标符号

颜色	有效数字	乘数	允许偏差 (%)	颜色	有效数字	乘数	允许偏差 (%)
银色	—	10^{-2}	± 10	黄色	4	10^4	—
金色	—	10^{-1}	± 5	绿色	5	10^5	± 0.5
黑色	0	10^0	—	蓝色	6	10^6	± 0.2
棕色	1	10^1	± 1	紫色	7	10^7	± 0.1
红色	2	10^2	± 2	灰色	8	10^8	—
橙色	3	10^3	—	白色	9	10^9	+ 50 - 20

电阻器的色环通常有四道 ,其中前三道相距较近 ,作为阻值标注 ,另一道距前三道较远 ,作为误差标注 ,如图 1.16 所示。

第一道、第二道各代表一个数值 ,第三道表示乘数(即乘以 10^n)。例如某色环电阻第一道为红色 ,第二道为蓝色 ,第三道为橙色 ,第四道为金色。查表可知 ,此电阻器的阻值为 $26\ 000\ \Omega$,允许误差为 $\pm 5\%$ 。

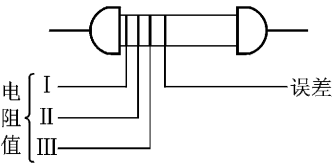


图 1.16 电阻色环

(4) 电阻器的选用

电路中应用的电阻多种多样 ,例如有些电气设备需要阻值大的电阻 ,有些设备需要功率大的电阻等。故选择电阻器时 ,应以电路和设备的实际要求(电气性能要求)为主 ,同时兼顾经济价值。一般情况下 ,应遵循以下原则 :

- ① 尽量选用标准系列电阻器。
- ② 电阻的标称阻值和电路要求相符。
- ③ 标称功率应是电阻器在电路中实际消耗功率的 1.5 ~ 2 倍。
- ④ 允许误差应在要求的范围之内。

4. 部分电路欧姆定律

前面已经讲过 ,只有在导体两端加上电压后 ,导体才有持续的电流 ,那么在电阻元件两端所加的电压与电流又有什么关系呢 ?

德国物理学家欧姆通过大量的实验研究 ,于 1827 年总结出电阻元件的电压和电流的关系。如图 1.17 所示 ,部分电路欧姆定律的内容是 :流过电阻 R 的电流 I 与电阻两端的电压 U 成正比 ,与电阻 R 成反比 ,其表达式为

$$I = \frac{U}{R} \tag{1.10}$$

或

$$U = RI \tag{1.11}$$

式中 U ——电压 ,单位是伏[特] ,符号为 V ;

I ——电流 ,单位是安[培] ,符号为 A ;

R ——电阻 单位是欧[姆] 符号为 Ω 。

从图 1.17 中还可以看出,电阻两端的电压方向是由高电位指向低电位。

除了上述表达式外,电阻元件的电压、电流关系还可以用图形表示。在直角坐标系中,如果以电压为横坐标,电流为纵坐标,可画出电阻的 $U-I$ 关系曲线,这条曲线被称为电阻元件的伏安特性曲线,如图 1.18 所示。

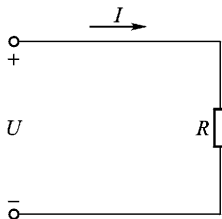


图 1.17 部分电路欧姆定律

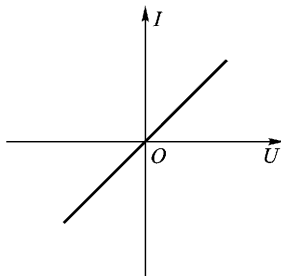


图 1.18 伏安特性曲线

电阻元件的伏安特性曲线是直线时,称为线性电阻,即此电阻元件的电阻值可以认为是不变的常数,直线的斜率的倒数表示该电阻元件的电阻值。如果不是直线,则称为非线性电阻(如半导体二极管)。通常所说的电阻都是指线性电阻。

例 1.4 某电炉接在 220 V 电源上,正常工作时流过电阻丝的电流为 5 A,试求此时电阻丝的电阻。

解 因为 $I = \frac{U}{R}$, 所以此时电阻丝的电阻为

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{5} \Omega = 44 \Omega$$

5. 电阻元件的功率

电阻元件是一个耗能元件,其消耗的功率 P 可表达为

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R} \quad (1.12)$$

例 1.5 试求一个阻值为 100Ω , 额定功率为 $\frac{1}{4} \text{ W}$ 的电阻器所允许的最大工作电流和电压。

解 因为 $P = RI^2 = \frac{U^2}{R}$, 所以电阻器的最大工作电流 I 和最大工作电压 U 为

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{4}}{100}} \text{ A} = \frac{1}{20} \text{ A} = 50 \text{ mA}$$

$$U = \sqrt{PR} = \sqrt{\frac{1}{4} \times 100} \text{ V} = 5 \text{ V}$$

6. 电阻的串联和并联

电阻的串联是指将两个以上的电阻依次相连,使电流只有一条通路的连接方式。如图 1.19(a)所示电路是由三个电阻构成的串联电路。

电阻的并联是指将两个或两个以上的电阻并列地连接在两点之间,使每个电阻两端都承受

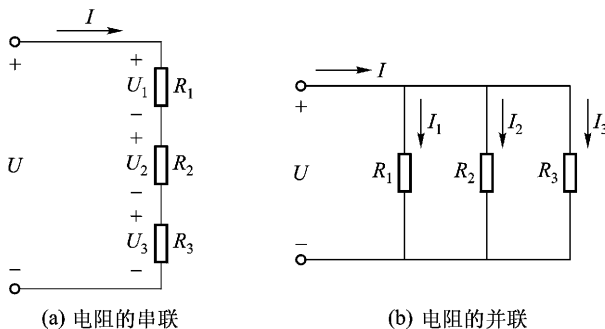


图 1.19 电阻的串联和并联

同一电压的连接方式,如图 1.19(b)所示电路是由三个电阻构成的并联电路。

(1) 串联电路的性质

串联电路具有如下性质:

① 流过各电阻的电流相同,即

$$I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n = I \quad (1.13)$$

若图 1.19(a)所示电路总电流为 I ,流过电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 的电流分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 ,则它们之间存在的关系式为 $I_1 = I_2 = I_3 = I$ 。

② 电路两端的总电压等于各个电阻两端电压之和,即

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n \quad (1.14)$$

图 1.19(a)所示电路中的电压关系式为 $U = U_1 + U_2 + U_3$ 。

③ 电路的等效电阻(即总电阻)等于各串联电阻之和,即

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (1.15)$$

在分析电路时,为了方便起见,常用一个电阻 R 来表示几个相互连接的电阻,如图 1.20 所示,这个电阻称为等效电阻,这个电路也称为等效电路。

④ 电路中消耗的总功率等于各个电阻消耗的功率之和;各个电阻消耗的功率与其阻值成正比,即

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n \quad (1.16)$$

或

$$\frac{P_1}{R_1} = \frac{P_2}{R_2} = \frac{P_3}{R_3} = \dots = \frac{P_n}{R_n} = I^2 \quad (1.17)$$

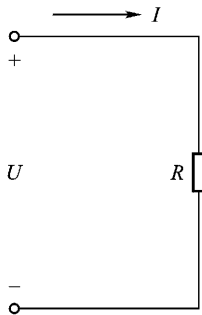


图 1.20 电阻串、并联等效电路

例 1.6 如图 1.21 所示电路,已知 $R_1 = 2 \Omega$ 、 $R_2 = 8 \Omega$,试求(1)电路的总电阻 R 及总电流 I ;(2)电阻 R_1 和 R_2 两端的电压之比;(3)电阻 R_1 消耗的功率 P_1 。

解 因为 R_1 和 R_2 串联,所以电路中总电阻和总电流为

$$R = R_1 + R_2 = (2 + 8) \Omega = 10 \Omega$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10}{10} \text{ A} = 1 \text{ A}$$

R_1 和 R_2 两端电压之比

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 I_1}{R_2 I_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{2}{8} = \frac{1}{4}$$

电阻 R_1 消耗的功率

$$P_1 = R_1 I_1^2 = 1^2 \times 2 \text{ W} = 2 \text{ W}$$

由上例可知 :串联电路的总电阻比任何一个串联电阻大 ;串联电路中 ,各个电阻的两端的电压跟它的阻值成正比。

(2) 串联电路的应用

串联电路的应用十分广泛 ,在实际工作中常见的有 :

- ① 用几个电阻串联获取阻值较大的电阻。
- ② 用几个电阻串联构成分压器 ,使同一电源能供给不同的电压。
- ③ 利用串联电阻的方法 ,限制和调节电路中电流的大小。
- ④ 在电工测量中 ,用串联电阻来扩大电压表的量程(相关内容详见下一节)。

例 1.7 如图 1.22 所示的分压器中 ,已知输入电压 $U = 150 \text{ V}$,d 点是公共接点 , $R_1 = R_2 = R_3 = 50 \text{ k}\Omega$,求输出电压 U_{cd} 和 U_{bd} 。

解 电路中的总电阻和总电流为

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 150 \text{ k}\Omega$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{150}{150 \times 10^3} \text{ A} = 1 \times 10^{-3} \text{ A}$$

输出电压 U_{cd} 和 U_{bd} 为

$$U_{cd} = R_3 I = 1 \times 10^{-3} \times 50 \times 10^3 \text{ V} = 50 \text{ V}$$

$$U_{bd} = (R_2 + R_3) I = 1 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^3 \text{ V} = 100 \text{ V}$$

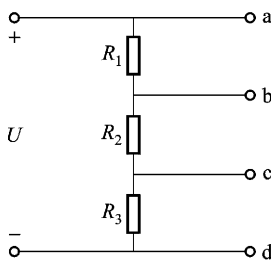


图 1.22 例 1.7 图

(3) 并联电路的性质

并联电路具有如下性质 :

- ① 各个电阻两端的电压相同 ,即

$$U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n = U \quad (1.18)$$

如图 1.19(b)所示电路 ,总电压为 U , R_1 、 R_2 、 R_3 两端的电压分别是 U_1 、 U_2 、 U_3 ,则它们之间存在的关系为 : $U = U_1 = U_2 = U_3$ 。

- ② 电路中的总电流等于各电阻中的电流之和 ,即

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (1.19)$$

图 1.19(b) 所示电路中的电流关系为 $I = I_1 + I_2 + I_3$ 。

③ 并联电路的等效电阻(即总电阻)的倒数等于各个电阻的倒数之和,即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (1.20)$$

在分析电路时,并联电路中也可用图 1.20 所示的等效电路来表示。此时,电路中的总电阻 $R = R_1 // R_2 // R_3 // \dots // R_n$ (式中“//”是并联符号),其值可以用式(1.20)进行计算。

④ 并联电路消耗的总功率等于各个电阻消耗的总功率之和;各个电阻消耗的功率与其阻值成反比,即

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n \quad (1.21)$$

$$P_1 R_1 = P_2 R_2 = P_3 R_3 = \dots = P_n R_n \quad (1.22)$$

例 1.8 如图 1.23 所示电路,已知 $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 8 \Omega$,试求(1)电路中的总电阻 R 及总电流 I (2)流过电阻 R_1 、 R_2 的电流之比 (3)电阻 R_1 消耗的功率。

解 (1) 因为 $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$, 所以电路中总电阻和总电流为

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2 \times 8}{2 + 8} \Omega = 1.6 \Omega$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10}{1.6} \text{ A} = 6.25 \text{ A}$$

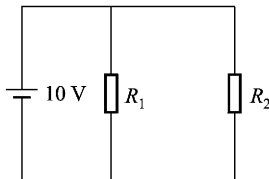


图 1.23 例 1.8 图

(2) 流过电阻 R_1 和 R_2 的电流 I_1 和 I_2 之比为

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{U_1}{R_1}}{\frac{U_2}{R_2}} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{8}{2} = 4$$

(3) 电阻 R_1 消耗的功率为

$$P_1 = \frac{U_1^2}{R_1} = \frac{10^2}{2} \text{ W} = 50 \text{ W}$$

由上例可知:并联电路的总电阻比任一个并联电阻的阻值小。并联电路中,流过各个电阻的电流与它的阻值成反比。

(4) 并联电路的应用

并联电路的应用也十分广泛,在实际工作中常见的有:

① 凡额定电压相同的负载几乎全采用并联,如照明灯具,这样任何一个负载正常工作时都不影响其他负载。

② 用并联电阻来获得一个较小的电阻。

③ 在电工测量中,广泛应用并联电阻的方法来扩大电流表上量程(相关内容详见下一节)。

(5) 电阻的混联

电路中电阻元件既有串联,又有并联的连接方式,称为混联,如图 1.24 所示。

对于混联电路的计算,只要按串、并联的计算方法,一步步将电路化简,最后就可求出总的等效电阻。但是,在某些较为复杂的混联电路中,一般不容易判别出各电阻的串、并联关系,就无法求得等效电阻。这时就要根据电路的具体结构,按照串、并联电路的定义和性质,进行电路的等效变换,将原电路整理成较为直观的串、并联关系的电路图,然后进行计算。进行电路变换的常用方法是:利用电流的流向及电流的分、合,画出等效电路。

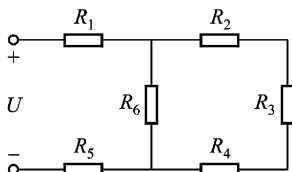


图 1.24 电阻的混联

例 1.9 求图 1.25 所示电路 AB 间的等效电阻 R , 其中 $R_1 = R_2 = R_3 = 2 \Omega$, $R_4 = R_5 = 4 \Omega$ 。

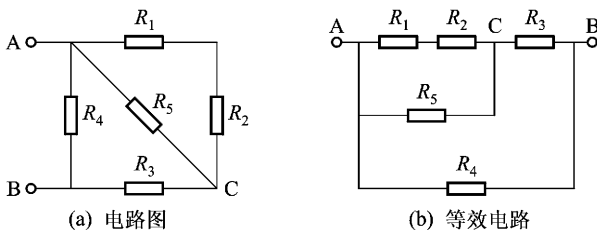


图 1.25 例 1.9 图

解 (1) 将图 1.25(a) 所示的电路根据电流的流向进行整理。总电流 I 分成三路,一支路径 R_4 到 B 点,另两支路分别经过 R_5 、 R_1 和 R_2 到达 C 点,电流汇合后经 R_3 到 B 点,故画出等效电路如图 1.25(b) 所示。

(2) 由等效电路可求出 AB 之间的等效电阻,即

$$\begin{aligned} R_{12} &= R_1 + R_2 = (2 + 2) \Omega = 4 \Omega \\ R_{125} &= R_5 \parallel R_{12} = \frac{R_{12} \times R_5}{R_{12} + R_5} = \frac{4 \times 4}{4 + 4} \Omega = 2 \Omega \\ R_{1253} &= R_{125} + R_3 = (2 + 2) \Omega = 4 \Omega \\ R_{AB} &= R_{1253} \parallel R_4 = \frac{4 \times 4}{4 + 4} \Omega = 2 \Omega \end{aligned}$$

除上述介绍的等效变换方法外,还有其他方法,如利用电路中各等电位点分析电路,画出等效电路的方法等,它们都是将不易看清串、并联关系的电路等效为可直接看出串、并联关系的电路,然后求其等效电阻。

混联电路计算的一般步骤是:

- ① 对原电路进行等效变换,求出电路的总等效电阻。
- ② 由电路的总等效电阻和电路两端的总电压,计算出电路的总电流。
- ③ 根据电阻串联的分压关系和电阻并联的分流关系,逐步推算出各部分的电压和电流。

例 1.10 图 1.26(a) 所示电路中,已知 $R_1 = R_2 = 8 \Omega$, $R_3 = R_4 = 4 \Omega$, 电路两端的电压 $U = 6 \text{ V}$, 试求通过电阻 R_4 的电流和 R_4 两端的电压。

解 (1) 对图 1.26(a) 所示的电路图可等效变换,如图 1.26(b) 所示。根据电路中电阻的串、并联关系可计算出电路中的总电阻 R

$$R = R_1 \parallel R_2 + R_3 \parallel R_4 = 6 \Omega$$

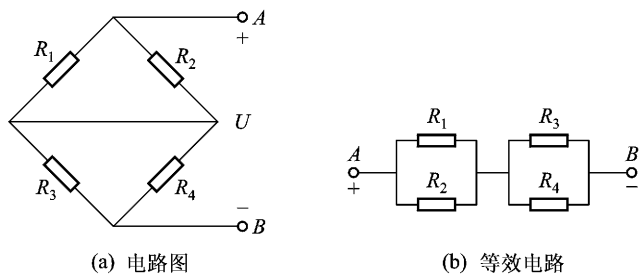


图 1.26 例 1.10 图

(2) 电路中的总电流

$$I = \frac{U}{R} = \frac{6}{6} \text{ A} = 1 \text{ A}$$

(3) 根据电阻的并联的分流关系可计算出通过电阻 R_4 的电流

$$I_4 = 0.5 \text{ A}$$

(4) R_4 两端的电压

$$U_4 = R_4 I_4 = 0.5 \times 4 \text{ V} = 2 \text{ V}$$

1.2.2 电源

电路中要有电流通过,就必须要在它的两端保持电压。将干电池、蓄电池、光电池、发电机等能够在电路中产生和保持电压的部分称为电源。

图 1.27 是一个简化了的带有电源的电路示意图。点画线框内是电源, A 是电源的正极, B 是电源的负极, R 是用电器。电源外部的电路称为外电路, 电源内部的电路称为内电路, 那么电源是如何工作的呢?

1. 电动势

如图 1.27 所示电路,在电场力的作用下, A 极上的正电荷沿导线和用电器到达 B 极, B 极上的负电荷沿导线和用电器到达 A 极(外电路)。随着正、负电荷的中和,正极和负极上的正负电荷都将逐渐减少,最终正、负电荷中和完毕,两极之间电压为 0,电流中断。

为了得到持续不断的电流, A、B 极之间就必须有一种非电场力,将正电荷从负极源源不断地移到正极,这个任务就是由电源来完成的。在电源内部,由于其他形式的能量作用,产生一种对电荷的作用力,称为电源力。不同的电源,电源力的来源不同,如化学作用力、电磁作用力等。

电源力在移动正电荷的过程中要做功。这个做功过程,实际上就是把其他形式的能转化成电能的过程。因此,从能量转换的观点来看,电源就是把其他形式的能转化成电能的装置。例如,电池是把化学能转化成电能的装置,发电机是把机械能转化成电能的装置。对于同一个电源来说,电源力把一定量的正电荷从负极移到正极所做的功是一定的。

通过上述分析可知,在外电路上,正电荷在电场力作用下,从电源的正极经负载流向负极;在内电路上,正电荷在电源力的作用下,克服电场力从电源负极流向正极。这样,在电路中便形成

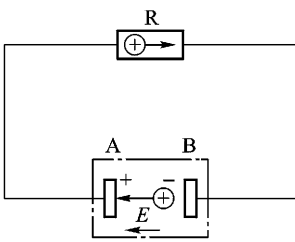


图 1.27 带有电源的电路示意图

了持续不断的电流。为了衡量电源力做功的能力,将在电源内部,电源力把单位正电荷从电源负极经电源内部移到正极所做的功称为电动势,用大写字母 E 表示,其表达式为

$$E = \frac{W}{q} \quad (1.23)$$

式中 E ——电动势,单位是伏[特],符号为 V;

W ——电源力做的功,单位是焦[耳],符号为 J;

q ——电荷量,单位是库[仑],符号为 C。

电源的电动势 E 是由电源本身决定的,只存在于电源内部,跟外电路无关,其方向是由电源负极经电源内部指向正极,如图 1.27 所示。

2. 全电路欧姆定律

全电路是指含有电源的闭合电路,如图 1.28 所示。图中点画线框内代表一个实际的电源。电源内部一般都是有内电阻的,这个电阻称为电源内电阻(一般内电阻较小),用字母 r 表示。那么,在闭合电路中的电流是由哪些因素决定的呢?

当开关 S 闭合时,负载 R 上就有电流通过,根据焦耳定律和能量守恒定律可得出表达式

$$E = RI + rI \quad (1.24)$$

或

$$I = \frac{E}{R + r} \quad (1.25)$$

式中 I ——电路中的电流,单位是安[培],符号为 A;

E ——电源电动势,单位是伏[特],符号为 V;

R ——外电路电阻,单位是欧[姆],符号为 Ω ;

r ——内电路电阻,单位是欧[姆],符号为 Ω 。

式(1.25)表明:闭合电路中的电流,与电源的电动势成正比,与整个电路的电阻(包括内电阻和外电阻)成反比,这就是全电路的欧姆定律。

由于 $RI = U$ 是外电路的电压降(端电压), $rI = U'$ 是内电路上的电压降,故式(1.24)表明:电源的电动势等于内外电路电压降之和,即

$$E = U + U' \quad (1.26)$$

3. 电源的外特性

电源的电动势不随外电路的电阻而改变,而闭合电路中的电流是随电阻而变化的,故电源加在外电路两端的电压(端电压) U 也是随电阻的变化而变化的。把电源的端电压随负载电流变化的规律称为电源的外特性,如图 1.29 所示。

由全电路欧姆定律可知:图 1.28 中,根据 $I = \frac{E}{R + r}$,外电路上电阻增大时,电流 I 减小;根据端电压 $U = E - rI$,电流减小时,端电压 U 增大,反之则减小。图 1.30 中的曲线表示了端电压随负载电阻 R 的变化关系。

下面讨论两种特殊情况:

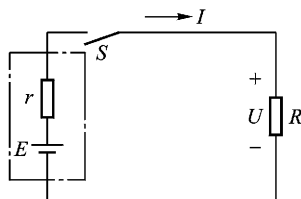


图 1.28 全电路欧姆定律

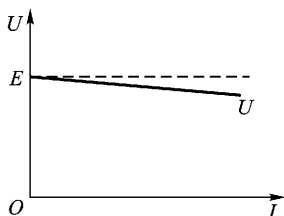


图 1.29 电源的外特性

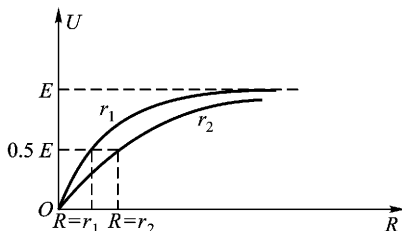


图 1.30 端电压与负载的关系

(1) 当图 1.28 所示电路中 S 断开时 R 变成无穷大, I 变成 0, rI 也变为 0, $U = E$ 。这表明外电路断开时, 端电压的大小等于电源的电动势。但是, 由于电压 U 方向是由高电位指向低电位, 而电动势的方向是由电源的负极指向正极(即低电位指向高电位), 故在电源中, 电动势的方向与电压的方向是相反的。

(2) 当外电路短路时, 即 R 趋近于 0, 端电压 U 也趋近于 0, 这时 $I \rightarrow \frac{E}{r}$ 。由于电源内阻很小, 所以短路时会产生很大的电流, 造成电源烧坏或火灾。

例 1.11 已知电池的开路电压 $U_{oc} = 1.5 \text{ V}$, 接上 9Ω 的负载时, 其端电压为 1.35 V , 求电池的内电阻 r 。

解 在电池开路时, 根据电源外特性可得

$$E = U_{oc} = 1.5 \text{ V}$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{1.35}{9} \text{ A} = 0.15 \text{ A}$$

$$U' = E - U = (1.5 - 1.35) \text{ V} = 0.15 \text{ V}$$

$$r = \frac{U'}{I} = \frac{0.15}{0.15} \Omega = 1 \Omega$$

4. 电源向负载输出的功率

将式(1.26)两端同时乘以 I , 可得

$$EI = UI + U'I \quad (1.27)$$

上式中 EI 是电源产生的功率, $U'I$ 是内电路损失的功率, UI 则是电源向负载输出的功率(实际输出功率)。它表明, 电源产生的电功率等于实际输出功率与内电路损失的功率之和。这个关系式称为电路的功率平衡方程式。图 1.31 所示曲线表示了电动势和内电阻均恒定时, 电源输出功率 P 与负载电阻 R 的关系。那么, 什么情况下电源的实际输出功率最大呢?

由图 1.31 可知, 当外电路电阻 R 等于电源的内阻 r 时, 电源输出的功率最大, 这时称为负载与电源匹配。

5. 电源的分类

电路中向负载提供能量的电源有电压源和电流源两类。

(1) 电压源

当负载在一定范围内变化时, 其输出的电流随着改变, 但电源两端的电压几乎不变, 如常用

的电池、稳压电源等,通常将这类电源称为电压源。电压源的符号如图 1.32 所示。

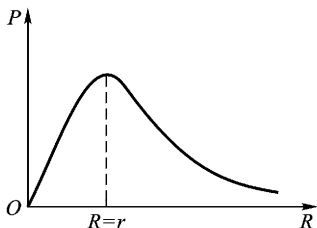


图 1.31 电源输出的功率

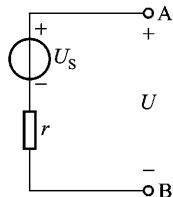


图 1.32 电压源的符号

如果电压源内电阻 $r=0$ 时,电源将提供一个不变的电压,称为理想电压源,如图 1.33 所示。实际上,理想的电压源是不存在的,因为电源总存在内阻。在应用中,稳压电源、内电阻 r 远远小于负载电阻 R 的电源可看作理想电压源。当电压源向负载 R 输出电压时,如图 1.34(a)所示,电源的端电压与输出电流之间的外特性,如图 1.34(b)所示,其表达式为

$$U = U_s - rI \quad (1.28)$$

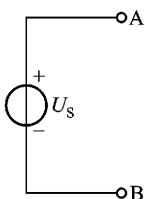
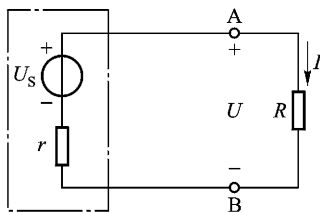
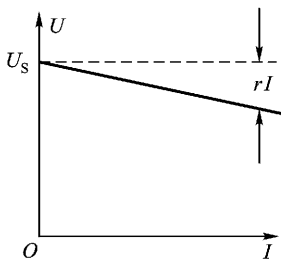


图 1.33 理想电压源的符号



(a) 电路图



(b) 外特性

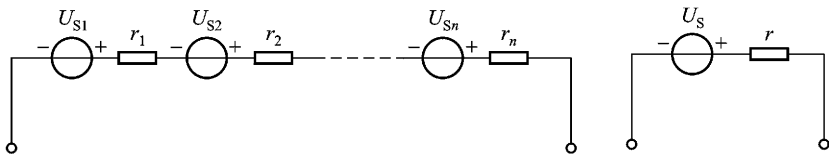
图 1.34 电压源的外特性

当几个电压源串联时,可以合并成一个等效电压源,如图 1.35 所示,等效电压源的值等于各个电压源的代数和,内电阻等于各串联电压源的内阻之和,即

$$U_s = U_{s1} + U_{s2} + \dots + U_{sn} \quad (1.29)$$

$$r = r_1 + r_2 + \dots + r_n \quad (1.30)$$

式(1.29)中,凡方向与 U_s 相同的取正号,反之取负号。



(a) 串联图

(b) 等效图

图 1.35 电压源的串联

(2) 电流源

当负载在一定范围内变化时,电源两端的电压随之改变,但电源的输出电流几乎不变,通常把这类电源称为电流源。光电池就是电流源的一个例子,在具有一定照度的光线照射下,光电池

被激发出一定值的电流 ,只要照度不变 ,即使负载在一定范围内变化 ,电流也几乎不变 ,电流源的符号如图 1.36(a)所示。

当电流源的内阻趋于无穷大时 ,则不论因负载变化引起的端电压如何变化 ,它输出的电流仍不变 ,而且等于电流源的恒定电流 I_S ,即 $I = I_S$,故内阻 $r_s \rightarrow \infty$ 的电流源称为理想电流源 ,其符号如图 1.36(b)所示。

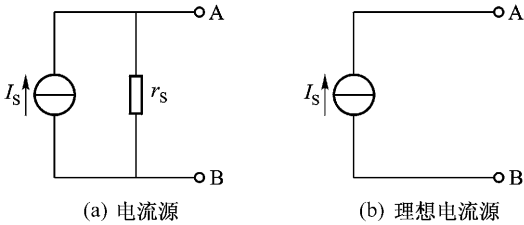


图 1.36 电流源的符号

当电流源向负载 R 输出电流时 ,如图 1.37(a)所示 ,电流源的端电压与输出电流的关系(外特性) ,如图 1.37(b)所示 ,其表达式为

$$I = I_S - \frac{U}{r_s} \tag{1.31}$$

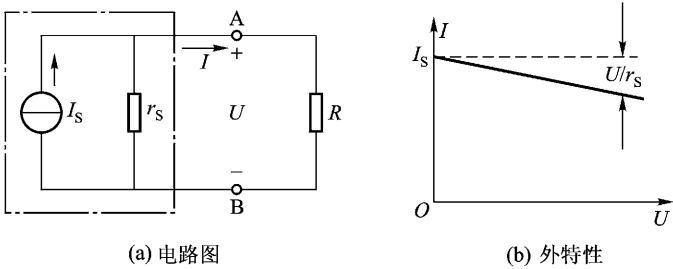


图 1.37 电流源外特性

当几个电流源并联时 ,可以合并成一个等效电流源 ,如图 1.38 所示 ,等效电流源的电流等于各个电流源的电流代数和 ,内电阻的倒数等于各并联电流源内阻的倒数之和 ,即

$$I_S = I_{S1} + I_{S2} + \dots + I_{Sn} \tag{1.32}$$

$$\frac{1}{r_s} = \frac{1}{r_{S1}} + \frac{1}{r_{S2}} + \dots + \frac{1}{r_{Sn}} \tag{1.33}$$

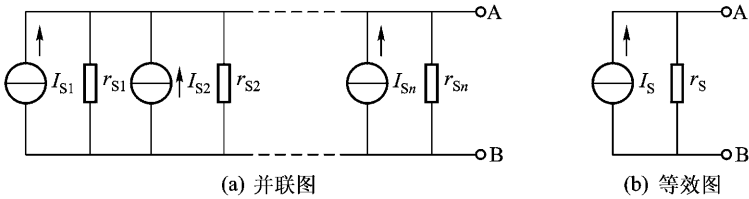


图 1.38 电流源的并联

式(1.32)中 ,凡参考方向与 I_S 相同的电流取正号 ,反之取负号。

在进行电路分析时,电压源和电流源的划分不是绝对的。实际电源表示成电压源形式,还是表示成电流源形式,要看具体情况而定。若内阻很小,可采用电压源形式;若内阻很大,则可采用电流源形式,以便于计算。

当一个电压源与一个电流源的外特性相同时,对外电路来说,这两个电源是等效的,也就是说,在满足一定条件下,两种电源之间能够实现等效变换。但要注意两种电源的等效变换仅仅是对外电路而言,对于电源内部是不等效的。

1.2.3 电容元件

电容元件是储存电场能量的理想元件,如物理中学过的电容器。用来描述电容元件特性的基本参数称为电容。

1. 电容

两块金属导体中间以绝缘材料相隔,并引出两个极,就形成了一个平行板电容器,如图 1.39(a)所示。图中的金属板称为极板,它们可以通过电极接到电路中去,两极板之间的绝缘材料称为介质。图 1.39(b)为电容器的一般表示符号。

如果将电容器的两个极板分别接到直流电源的正、负极上,如图 1.40 所示,则 A、B 两个极板上分别聚集起等量异种电荷(每个极板上带的电荷的绝对值称为电容器所带的电荷量),与电源正极相连的 A 极板带正电荷,与电源负极相连的 B 极板带负电荷,这样 A、B 二极板之间便产生了电场。实验证明,对于同一个电容器,加在两极板上的电压越高,极板上储存的电荷越多,且电容器任一极板上的带电荷量与两极板之间电压的比值是一个常数,这一比值就称为电容量,简称电容,用 C 表示。其表达式为

$$C = \frac{q}{U} \quad (1.34)$$

式中 q ——电容器所带的电荷量,单位是库[仑],符号为 C;

U ——两极板间的电压,单位是伏[特],符号为 V;

C ——电容,单位是法[拉],符号为 F。

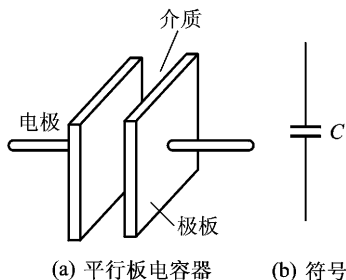


图 1.39 平行板电容器及其符号

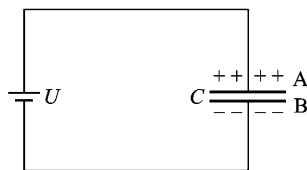


图 1.40 电容

电容是衡量电容器储存电荷本领的物理量。如果一个电容器带 1 C 的电荷量,两极间的电压为 1 V,则该电容器的电容就是 1 F。在实际使用中,一般电容器的电容量都较小,故常用较小的单位,如微法(μF)、皮法(pF),它们之间的换算关系是 $1\text{F} = 10^6 \mu\text{F}$, $1\mu\text{F} = 10^6 \text{pF}$ 。

电容器的电容是由它本身的物理结构(形状、尺寸、介质材料)决定的,理论和实验均表明:

平行板电容器的电容与介质的介电常数成正比 ,与极板正对的面积成正比 ,与极板间的距离成反比。其表达式为

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \tag{1.35}$$

式中 A ——两极板正对面积 ,单位是平方米 ,符号为 m^2 ;
 d ——两极板间的距离 ,单位是米 ,符号为 m ;
 ε ——与介质有关的介电常数 ,单位是法/米 ,符号为 F/m 。

上式表明电容是电容器的固有特性。一个电容器制造好后 ,电容就是一个定值 ,外界条件的变化和电容器是否带电或带多少电都不会使电容改变。在实际工作中 ,为了方便 ,往往将电容器也称为电容 ,这样电容这一词即表示了一个物理量 ,又表示了一种元件的名称。应该注意的是 :并不是只有成品电容器才有电容 ,实际上任何两个相邻的导体之间都存在着电容 ,如输电线之间、晶体管各电极之间等 ,这种电容称为分布电容 ,虽然它的数值较小 ,但有时会给线路和设备的正常工作带来干扰。

2. 常用电容器及其选用

(1) 电容器的分类

电容器的种类很多 ,按电容量是否可调可分为固定电容器、可变电容器和微调电容器三类。

① 凡是电容量不可调节的电容器称为固定电容器 ,其外形如图 1.41 所示。

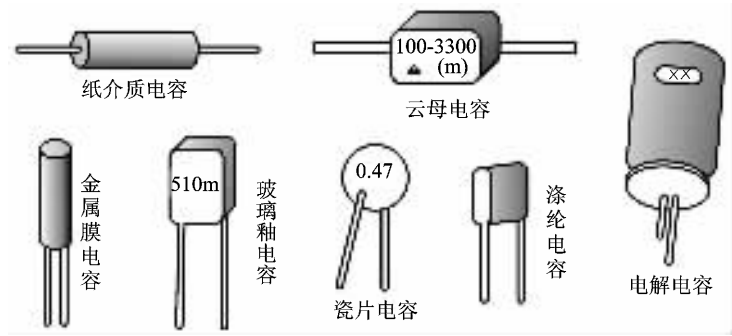


图 1.41 固定电容器

固定电容器是电力工业和电子工业不可缺少的元件 ,它按介质不同 ,可分为纸介电容器、云母电容器、陶瓷电容器、电解电容器等。

一般情况下 ,电解电容器都有固定的极性 ,并把它们的极性标在电路图中。图 1.42(a)所示为电解电容器的外形 ,图中“ + ”号表示正极 ,接线时应接高电位。图 1.42(b)所示为其图形符号。

② 电容量能在较大范围内随意调节的电容器称为可变电容 ,如图 1.43(a)所示。它是通过转轴的旋转改变两组金属片的相对面积来实现电容量的改变。可变电容器常用于电子电路作调谐元件。图 1.43(b)所示为其图形符号。

③ 电容量在某一小范围内可以调节的电容器称为微调电容器 ,如图 1.44(a)所示。它是通过螺钉调节改变金属片之间的距离来实现电容量的微量变化。微调电容器常用于调谐回路中微调频率。图 1.44(b)所示为其图形符号。

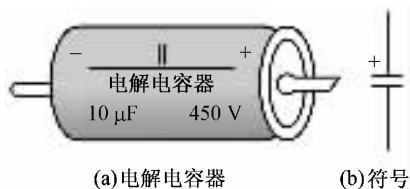


图 1.42 电解电容器及其符号

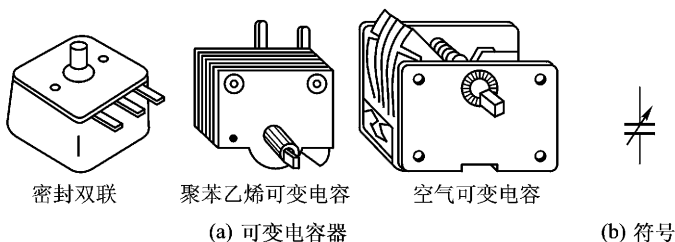


图 1.43 可变电容器及其符号

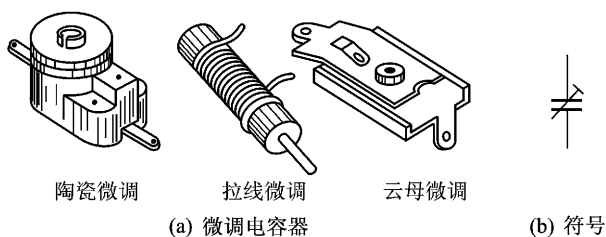


图 1.44 微调电容器及其符号

(2) 电容器的主要性能指标

电容器的主要性能指标有电容值、允许误差和额定工作电压,这些数值一般都直接标在成品电容器的外壳上,它们统称为电容器的标称值,如图 1.42(a)所示。

① 电容器上所标明的电容值称为标称容量。电容器的标称容量和实际容量之间有一定的差额,这一差额称为电容器的误差。实际电容器的误差是在国家标准规定的允许范围之内,它又称为允许误差。

电容器的允许误差按其精度可分为 $\pm 1\%$ (00 级)、 $\pm 2\%$ (0 级)、 $\pm 5\%$ (I 级)、 $\pm 10\%$ (II 级)、 $\pm 20\%$ (III 级) 五个等级。电容器的误差有的用百分数表示,有的用误差等级表示。

② 电容器的额定工作电压习惯上称为耐压,是指电容器长时间安全工作所能承受的最高直流电压。它一般都直接标注在电容器的外壳上,如 450V DC。使用时加在电容器上的实际工作电压不能超过它的额定工作电压,否则电容器会被击穿而损坏。另外要注意:如果电容器两端加上交流电压,那么所加交流电的最大值不能超过其额定工作电压。

(3) 电容器的选择

电容器的用途是极其广泛的,虽然不同的应用场合对它的要求不同,但是选择电容器的总体原则都应遵循以下几点:

① 首先应满足电性能要求,即电容量、允许误差及额定工作电压应符合电路的要求。

② 应考虑电路的特殊要求及使用环境,如用于改善系统的功率因数时,则应选用高电压、大容量的电容器;用于电源滤波时,则选用大容量的电解电容器。

③ 还应考虑电容器的装配形式、成本等。

此外,对电容器的型号及含义的熟悉,也是至关重要的。一般固定电容器的型号和含义可查阅有关手册,这里就不再详述了。

3. 电容器的串联与并联

电容器的串联是指将几只电容器的极板首尾依次相接,连成一个无分支电路的连接方式。

图 1.45(a)所示为两个电容器的串联。

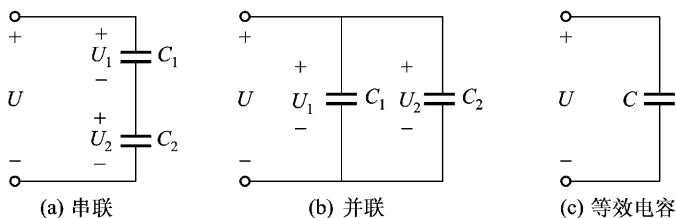


图 1.45 电容器的串、并联

电容器的并联是指将几个电容器的正极连在一起,负极也连在一起的连接方式。图 1.45(b)所示为两个电容器的并联。

在电路分析时,电容器的串、并联也可以等效成类似于电阻器串、并联一样的电路,如图 1.45(c)所示。图中 C 为等效电容。

(1) 电容器串联的特点

电容器串联时,由于静电感应,每个电容器带的电荷量都相等,并具有如下特点:

① 总电压等于各个电容器上的电压之和,其表达式为

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (1.36)$$

② 等效电容 C 的倒数之和等于各个电容的倒数之和,其表达式为

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (1.37)$$

例 1.12 两只额定工作电压为 50 V,容量 C_1 为 100 μF , C_2 为 150 μF 的电容器,串联接入 60 V 的电路中,试求 (1) 等效电容为多少? 每只电容器的实际工作电压为多少? (2) 能否串联接到 100 V 的电路中?

解 (1) 两只电容器串联后的等效电容

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{100 \times 150}{100 + 150} \mu\text{F} = 60 \mu\text{F}$$

由于电容器串联时,每个电容器上所带电荷相等,并等于等效电容中所带的电荷量,故

$$q = q_1 = q_2 = CU = 60 \times 10^{-6} \times 60 \text{ C} = 3.6 \times 10^{-3} \text{ C}$$

所以,每只电容器两端的实际工作电压

$$U_1 = \frac{q}{C_1} = \frac{3.6 \times 10^{-3}}{100 \times 10^{-6}} \text{ V} = 36 \text{ V}$$

$$U_2 = \frac{q}{C_2} = \frac{3.6 \times 10^{-3}}{150 \times 10^{-6}} \text{ V} = 24 \text{ V}$$

(2) 串联接到 100 V 的电路中时

$$q = q_1 = q_2 = CU = 60 \times 10^{-6} \times 100 \text{ C} = 6 \times 10^{-3} \text{ C}$$

每只电容器两端实际工作电压

$$U_1 = \frac{q}{C_1} = \frac{6 \times 10^{-3}}{100 \times 10^{-6}} \text{ V} = 60 \text{ V}$$

$$U_2 = \frac{q}{C_2} = \frac{6 \times 10^{-3}}{150 \times 10^{-6}} \text{ V} = 40 \text{ V}$$

因为 C_1 两端的实际工作电压超过了额定工作电压,故这两只电容器不能串联接入 100 V 的电路中,否则 C_1 将率先被击穿而短路,并导致 C_2 也被击穿。

从上例可看出,当一只电容器的额定工作电压值太小不能满足要求时,可采用电容器串联的方式来获得较高的许用工作电压,但串联后的许用工作电压不是每只电容器额定工作电压的简单叠加。

(2) 电容器并联的特点

电容器并联时,每个电容器两端的电压都相等,并具有如下特点:

① 各电容器储存的总电荷量 q 等于各个电容器所带电荷量之和,其表达式为

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n \quad (1.38)$$

② 等效电容 C 等于各个电容器的电容之和,其表达式为

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (1.39)$$

由上可见,当一只电容器的电容太小不能满足要求时,可采用电容器并联的方式来获得较大的电容,但每只电容的额定工作电压都应大于外加电压。

4. 电容器的充、放电

使电容器带电的过程称为充电,充了电的电容器失去电荷的过程称为放电。

(1) 电容器的充、放电过程

图 1.46 所示为电容器充、放电实验电路。图中 E 为直流电源, S 为单刀双掷开关, HL 为白炽灯, C 是一个电容很大且未充电的电容器。

当开关 S 合向接点 1 (即电容器充电)时,会发现白炽灯闪亮一个,然后就逐渐暗下去,直至完全熄灭。这说明该电路只有短暂的电流。图 1.47 所示为电容器接通直流电源时,其充电电压 u_C 和充电电流 i 随时间变化的曲线。

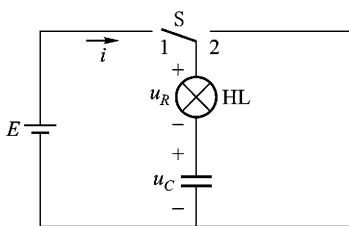


图 1.46 电容器的充、放电

由图可看出,当开关 S 合向 1 的瞬间,电容器的端电压 u_C 的电压较小,充电电流 i 最大(即白炽灯较亮),随着充电的进行,电容器上的电压 u_C 逐渐上升,与电源正极间的电位差随之减小,充电电流也越来越小,当电容器的端电压 $u_C \approx E$ 时,电流 i 为零,充电也就结束。电容器充电结束后,其两极板间就形成了电压 u_C ,建立了一个电场。

当开关 S 合向接点 2 (即电容器放电)时,也会出现同样的现象。产生这一现象是因为在电容器放电过程中,由于电容器两极板间的电压(相当于电源)使回路中有电流产生,开始时电压较大,因此电流较大(即白炽灯较亮),随着两极板上正、负电荷的不断中和,两极板之间的电压越来越小,电流也就越来越小,直至为零。

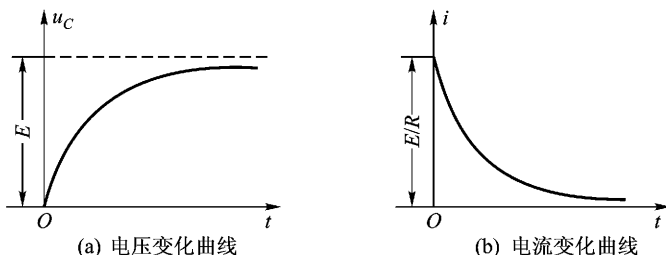


图 1.47 充电电压、电流的变化曲线

综上所述,电容器在充、放电过程中,当电容器的端电压不断变化时,其两极板上的电荷也随之变化,因而电路中就有电流。如果某一电容器的电容量为 C ,在 Δt 时间内,其极板间的电压变化为 Δu_c ,极板上电荷的变化为 Δq ,则电流电路中的电流可表达为

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = C \frac{\Delta u_c}{\Delta t} \quad (1.40)$$

(2) 电容器的特点

通过上述电容器充、放电过程的分析,可以看出电容器具有以下特点:

① 电容器是一个储能元件。电容器在充电时,两极板上有电荷积累,极板间形成电场,电场具有能量,此能量是从电源吸收而来储存在电容器中的,随着放电的进行,其储存的电场能又全部释放出来。理论和实验都已证明,充电电容器中储存的电场能可用下式表示

$$W_c = \frac{1}{2} C U_c^2 \quad (1.41)$$

式中, W_c ——电容器中的电场能量,单位是焦耳,符号为 J;

C ——电容器的电容量,单位是法拉,符号为 F;

U_c ——电容器两极板之间的电压,单位是伏特,符号为 V。

② 电容器能够隔直流、通交流。电容器接通直流电源时,仅在接通瞬间发生充电现象,形成短暂电流,充电结束后 $u_c \approx E$,电路电流为零,电路处于开路状态,这一作用即称为隔直流。而交流电的电压是随时间变化的,这样电容器就会反复的充、放电,从而形成连续变化的电流,这一作用就称为通交流。

1.3 常用电工仪表及其使用

电工仪表又称为电工测量仪表,是测量各种电量、磁量及电路参数的仪表、仪器,它的测量对象主要是指电流、电压、电阻、电功率、电能、转速等。电工仪表的种类繁多,分类分法也各异,按其结构和用途的不同,主要分成比较仪表(如电桥)、数字仪表(如数字式万用表)和指示仪表三类,本节主要介绍的是指示仪表。

指示仪表的特点是能将测量转换成仪表可动部分的机械偏转角,并通过指示器直接显示出被测量的大小,故它又称为直读式仪表。

指示仪表按被测量的名称可分为:电流表、电压表、电阻表、功率表等,按其工作原理可分为:磁电式仪表、电磁式仪表、电动式仪表、感应式仪表等。磁电式仪表是根据通电导体在磁场中产

生电磁力的原理制成的。本节首先介绍磁场的基本知识,再介绍指示仪表的结构、工作原理及使用特点。

1.3.1 磁场的基本知识

日常生活中,大家都知道磁铁具有吸引铁、镍等金属的性质,这种性质称为磁性。具有磁性的物体就称为磁体,磁体可分为天然磁体(如吸铁石)和人造磁体两大类。常见的人造磁体有条形、蹄形和针形等,如图 1.48 所示。

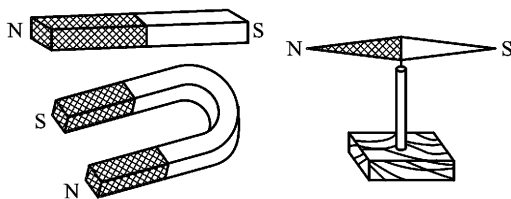


图 1.48 人造磁体

磁体两端磁性最强的部分称为磁极。实验证明,任何一个磁体都有两个磁极,即 N 极和 S 极。任意转动一个磁体,当它静止后,磁体的 N 极总是指向地球北极,磁体 S 极总是指向地球的南极。

磁极之间会产生相互的作用力,这种作用力称为磁力,其表现为同极性互相排斥,异性性互相吸引。

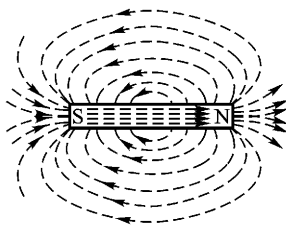
1. 磁场与磁感线

若将一根磁铁放在另一根磁铁附近(互不接触)时,两根磁铁之间也会产生磁力,这说明磁体的周围存在磁力作用的空间,这种作用的空间就称为磁场。磁极之间的作用力正是通过磁场来传递的。磁场和电场一样,是一种特殊的物质,它同样具有力和能的性质。

磁场的力效应说明磁场是有方向的。磁场的方向规定为:将小磁针放入磁场中某一点,当磁针静止时,其 N 极所指的方向即为该点磁场的方向。在磁场中可以利用磁感线来形象地表示各点的磁场方向,所谓磁感线就是在磁场中画出一些曲线,在这些曲线上,每一点的切线方向就是该点的磁场方向。

磁感线是人们假想出来的线,图 1.49 所示为条形磁体的磁感线分布情况。

由图 1.49 所示可知,磁感线是互不交叉的闭合曲线,在磁体外部由 N 极指向 S 极,在磁体内部由 S 极指向 N 极;在磁极附近的磁感线最稠密,远处较稀疏。磁感线的疏密程度反映了磁场的强弱,磁感线越密表示磁场越强,越疏表示磁场越弱,故通常可以用磁感线的多少和疏密程度来定性分析磁场的分布情况。



2. 磁通和磁感应强度

磁通又称为磁通量,它是指通过与磁场方向垂直的某一面积上磁感线总数,用字母 Φ 表示。它的单位是韦[伯],用符号 Wb 表示。

当面积一定时,通过该面积的磁通越大,则说明磁场越强。

为了分析磁场中各点的强弱和方向,把垂直通过单位面积的磁感线的多少称为该点的磁感

图 1.49 条形磁体的磁感线

应强度,用字母 B 来表示。磁感应强度可表示为

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (1.42)$$

式中 B ——磁感应强度,单位是特[斯拉],符号为 T;

Φ ——磁通量,单位是韦[伯],符号为 Wb;

A ——与磁场方向垂直的平面面积,单位是平方米,符号为 m^2 。

上式表明,磁感应强度 B 等于单位面积上的磁通量,所以磁感应强度也称为磁通密度。

磁感应强度是个矢量,它不但表示了某点磁场的强弱,而且表示出该点磁场的方向,磁感应强度的方向为磁感线上某点的切线方向。对于磁场中某一固定点来说,磁感应强度 B 是一个常数,而对于磁场中位置不同的各点 B 可能不同。若磁场中各点磁感应强度的大小和方向相同,这种磁场就称为匀强磁场,可用平行的等距离的磁感线表示。

3. 电流的磁效应

磁铁并不是磁场的唯一来源。1820年,丹麦物理学家奥斯特从实验中发现,放在导线下面的小磁针,当导线通电时,磁针就发生偏转,如图 1.50 所示。这说明通电导线周围也存在着磁场,将这种现象称为电流的磁效应。

电流与其产生的磁场方向可用安培定则(又称右手螺旋定则)来判断。

(1) 通电直导线周围的磁场

通电直导线周围磁场的磁感线处于垂直于导体的平面上,其形状是一个个环绕着导体的同心圆,如图 1.51(a)所示。

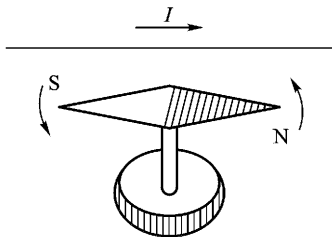


图 1.50 电流的磁效应

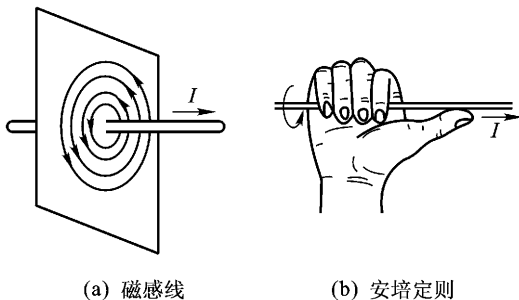


图 1.51 通电直导线周围的磁场

通电直导线磁场方向与电流方向的关系,可用安培定则来判定,如图 1.51(b)所示,右手握住通电直导线,让大拇指方向与电流方向一致,则四指环绕方向就是磁场方向。

(2) 通电螺线管产生的磁场

通电螺线管产生的磁场类似于条形磁铁,一端相当于 N 极,另一端相当于 S 极。如图 1.52(a)所示。

通电螺线管的电流方向跟它的磁感线方向的关系也可用安培定则来判定,如图 1.52(b)所示,右手握住螺线管,弯曲的四指指向与电流方向一致,则大拇指指向通电螺线管内部磁感线的方向即为通电螺线管的 N 极。

4. 磁场对电流的作用力

将一段导电导线垂直地放入磁场中,如图 1.53 所示,导体会受到一个力的作用,这个力称为

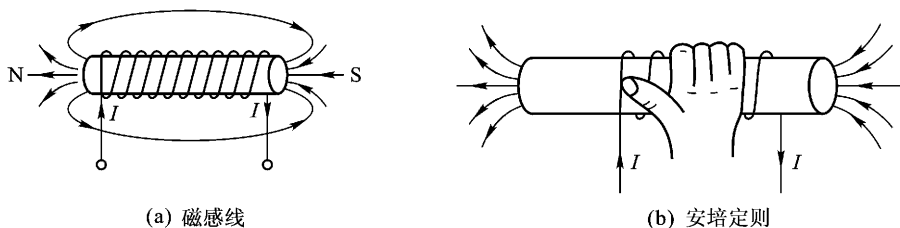


图 1.52 通电螺线管产生的磁场

电磁力。实验证明,电磁力 F 的大小与导体中电流的大小成正比,与处于磁场中导线的有效长度 l 及磁场的磁感应强度 B 成正比,其表达式为

$$F = BIl \quad (1.43)$$

式中 F ——导体受到的电磁力,单位是牛[顿],符号为 N;

B ——磁感应强度,单位是特[斯拉],符号为 T;

I ——导体中的电流强度,单位是安[培],符号为 A;

l ——导体的有效长度,单位是米,符号为 m。

如果通电直导线与磁场方向的夹角为 θ 时,如图 1.54(a) 所示,则导体受到的电磁力可表达为

$$F = BIl \sin \theta \quad (1.44)$$

上式说明,当通电直导线与磁场方向垂直($\theta = \frac{\pi}{2}$)时,电磁力 F 最大;当通电直导线与磁场方向平行($\theta = 0$)时,电磁力 F 最小,等于 0。

通电直导线在磁场中受到的电磁力的方向与磁场方向和电流方向均是垂直的,可以用左手定则来判定:伸出左手,使大拇指跟其余四指垂直,并在同一平面内,让磁感线垂直进入手心,并使四指指向电流方向,则大拇指所指的方向就是导线的受力方向,如图 1.54(b) 所示。

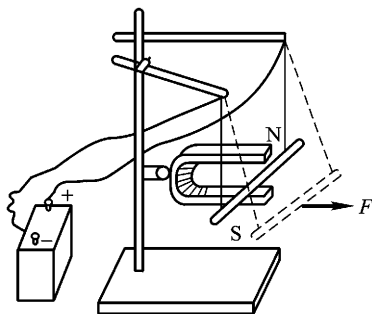
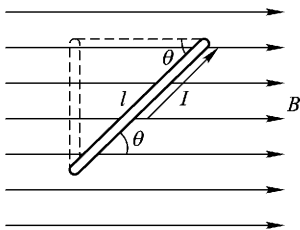
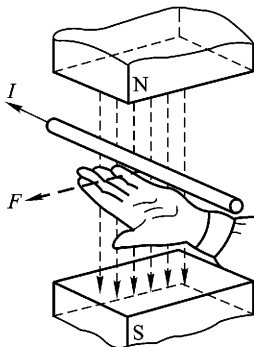


图 1.53 磁场对电流的作用力



(a) 示意图



(b) 左手定则

图 1.54 导体受到电磁力的判定

1.3.2 直流电流表和电压表的工作原理及其使用

目前使用的直流电流表和直流电压表大部分都是采用磁电式测量机构配合适当的测量线路组成的。

1. 磁电式测量机构的工作原理

磁电式测量机构主要由固定的磁路系统和可动线圈两部分组成,如图 1.55 所示。仪表的固定部分由永久磁铁和极掌以及圆柱形铁心组成磁路系统,其作用是在极掌和铁心之间的空气隙中产生较强的均匀辐射磁场。仪表的可动部分由绕在铝框上的线圈、线圈两端装的转轴、与转轴相连的指针、平衡锤以及游丝(即螺旋弹簧)组成。整个可动部分支撑在轴承上,线圈位于环形气隙中。

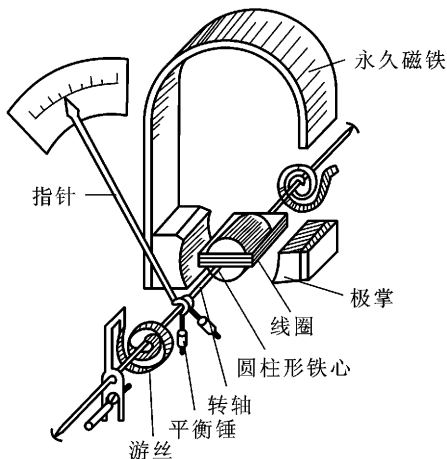


图 1.55 磁电式测量机构

磁电式测量机构中游丝的作用有两个:一是用来产生反作用力矩 $T_f = K\theta$,其中 θ 为指针偏角 K 为比例恒量;二是把被测电流导入和导出可动线圈。

如图 1.56(a)所示,通电的可动线圈 $abcd$ 置于匀强磁场中,当线圈平面与磁感线平行时,由于 ad 边和 bc 边与磁感线平行而不产生电磁力,但 ab 边和 cd 边因与磁感线垂直,将受电磁力 F_1 和 F_2 ,而且 $F_1 = F_2$ 。根据左手定则可知 F_1 和 F_2 方向相反,构成一对力偶 T ,将使线圈绕轴心线作顺时针转动。根据式(1.43)可推出:使线圈转动的力偶 T 与被测电流成正比。即 $T = K_1 I$,其中 K_1 为比例恒量。

由于仪表的极掌和铁心之间气隙的磁场是呈辐射状均匀分布的,如图 1.56(b)所示,不管通电线圈转到哪一个角度,它的平面都与磁感线平行,即使线圈绕轴心线转动的力偶 T 与可动线圈的偏角(指针偏角) θ 无关。

通过上述分析可知,图 1.55 所示测量机构的可动线圈中通入电流时,可动线圈在永久磁铁产生的磁场中受到一对力偶 T 的作用而偏转,力偶的大小与流入线圈电流的大小成正比,此时游丝将产生反作用力矩 T_f ,反作用力矩 T_f 与可动线圈的偏角成正比,当二者平衡时,可动线圈就停在某一偏角上,固定在轴上的指针也转过同样的偏角,指到标度尺的某一刻度上。

T 和 T_f 平衡时 $K_1 I = K_2 \theta$,即 $\theta = KI$,其中 $K = \frac{K_1}{K_2}$,也是一个恒量。可见,测量机构指针偏转的

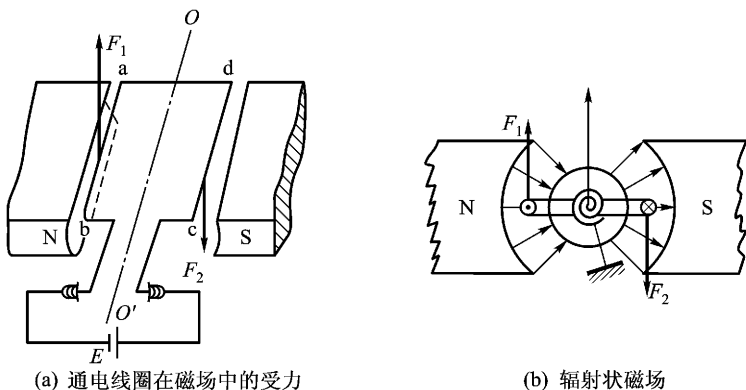


图 1.56 磁电式测量机构的工作过程

角度与电流成正比,即标度尺的刻度是均匀的。

2. 直流电流表

磁电式测量机构具有准确度高、灵敏度高、功率消耗小等特点,但由于其可动线圈的导线很细,而且电流还要经过游丝,故过载能力小,即允许通过的电流很小,约几微安到几百微安。要测量较大的电流,必须加接分流电阻,因此直流电流表实际上是磁电式测量机构与分流电阻(也称分流器)并联组成的,如图 1.57 所示。

设磁电式测量机构的内阻为 R_C ,分流电阻为 R_A ,被测电流为 I ,根据并联电路的特点可知,通过测量机构的电流 I_C 只是被测电流的一部分,两者有如下关系式

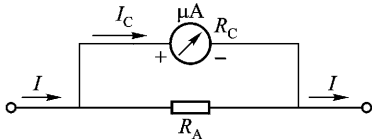


图 1.57 直流电流表的原理

$$I_C = \frac{R_A}{R_C + R_A} I \quad (1.45)$$

若用 n 表示 I 和 I_C 的比值,则 n 值就是电流表并联分流电阻后的量程扩大倍数(也称为倍率),即

$$n = \frac{I}{I_C} = \frac{R_C + R_A}{R_A} = \frac{R_C}{R_A} + 1$$

经整理可得

$$R_A = \frac{R_C}{n - 1} \quad (1.46)$$

由式(1.46)说明,要使电流表量程扩大 n 倍,所并联的分流电阻 R_A 应为测量机构内阻 R_C 的 $\frac{1}{n-1}$ 。可见,需要扩大的量程越大,则分流电阻应越小。对于同一测量机构,只要配上不同的分流电阻,就能制成不同量程的电流表。如果一个测量机构通过不同的量程接头,分别与不同的分流电阻并联,就构成了多量程直流电流表。分流电阻一般放在仪表的内部,成为仪表的一部分,但被测电流超过 30 A 时,分流电阻常放在仪表的外部。

3. 直流电压表

根据欧姆定律可知,一只满刻度电流为 I_C ,内阻为 R_C 的磁电式测量机构,就是一只量程为 $U_C = I_C R_C$ 的直流电压表,但由于测量机构的内阻 R_C 不是很大,故其电压的量程很小。根据电阻串联的分压特点,只要给测量机构串联一个本身高阻值的分压电阻,就能扩大其电压量程。因此,直流电压表实际上是磁电式测量机构与分压电阻(也称分压器)串联组成的,如图 1.58 所示。

设图 1.58 中,磁电式测量机构的额定电压 $U_C = I_C R_C$,串联适当的分压电阻 R_V 后,可使电压量程扩大为 U 。此时,通过测量机构的电流仍为 I_C ,且 I_C 与被测电压 U 成正比。所以,可以用仪表的指针偏角的大小来反映被测电压的数值。

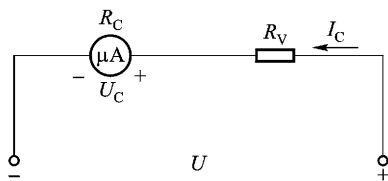


图 1.58 直流电压表的原理

根据串联电路的特点可知, U_C 和 U 之间存在如下关系式

$$U_C = \frac{R_C}{R_C + R_V} U \quad (1.47)$$

若用 m 表示 U 和 U_C 的比值,则 m 值就代表串联分压电阻后,电压表的量程扩大倍数(也称为倍率),即

$$m = \frac{U}{U_C} = \frac{R_C + R_V}{R_C}$$

经整理可得

$$R_V = R_C(m - 1) \quad (1.48)$$

式(1.48)说明,要使电压表量程扩大 m 倍,所串联的分压电阻 R_V 应为测量机构内阻 R_C 的 $(m - 1)$ 倍。可见,需要扩大的量程越大,则分压电阻应越大。对于同一测量机构,只要配上不同的分压电阻,就能制成不同量程的电压表。如果一个测量机构通过不同的量程接头,分别与不同的分压电阻串联,就构成了多量程直流电压表。

分压电阻也采用电阻率较大、电阻温度系数很小的锰铜制成。通常量程低于 600 V 时,分压电阻安装在表壳的内部,量程超过 600 V 时,分压电阻要单独制造,安装在仪表外部,并与仪表配套使用。

4. 直流电流表和电压表的选用

直流电流表和电压表是电力工程中常用的电工仪表,合理地选择和使用电流表、电压表,能尽可能减小测量误差,提高仪表的使用寿命。

(1) 电流表、电压表的选择

选择电流表和电压表时,首先应根据实际电路被测量的大小,确定合适量程。其原则是:所选仪表的量程应大于被测量,且要将被测量范围选择在仪表标度尺满刻度的三分之二以上的范围内。若无法估计被测量大小时,应选用仪表最大量程测试后,再逐步换成合适的量程。

其次要根据工作条件和使用方法确定所选仪表是便携式仪表还是安装式仪表,根据被测电路电压的高低,来确定仪表及附加装置的绝缘强度。

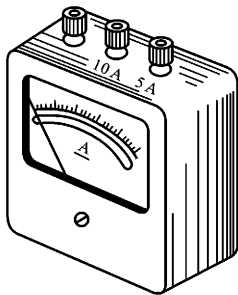
最后还应考虑仪表接入电路后,要尽量减少本身的功耗,即电压表内阻应尽量大些,电流表

内阻应尽量小些。

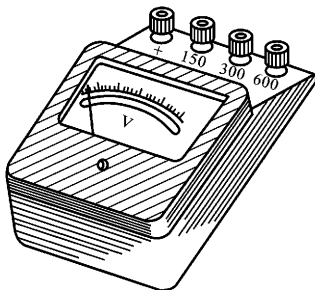
(2) 电流表和电压表的使用

在直流电路中,主要使用电流表和电压表来测量电路的电流和电压。

使用直流电流表和电压表时,首先应明确它们的接线端有“+”、“-”之分。图 1.59(a)所示电流表有 5 A 和 10 A 两个量程,分别标在两个相应的接线端上,标量程的接线端为电流表的“+”极。图 1.59(b)所示的电压表有 150 V、300 V 和 600 V 三个量程,分别标在相应的接线端上,标量程的接线端为电压表的“-”极。使用时应注意被测电流从仪表的“+”端流入,“-”端流出,避免指针反转而损坏仪表。



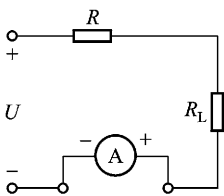
(a) 电流表的外观



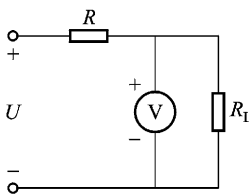
(b) 电压表的外观

图 1.59 电流表和电压表的外观

其次应按要求将仪表接入被测线路。电流表应串联接入被测电路,如图 1.60(a)所示,否则会造成电路短路,并烧坏仪表。若被测电路电压较高时,电流表应串联接在被测电路的低电位端。电压表应并联接入被测电路,如图 1.60(b)所示,否则会因其内阻太大,使测量电路呈开路状态,电压表无法正常工作。



(a) 电流表串联接入被测电路



(b) 电压表并联接入被测电路

图 1.60 电压表、电流表的连接

仪表接入电路后,还应仔细核对线路,保证接线无误,并对仪表进行机械调零操作,然后才能接通电源,从表中读出被测量值。

(3) 伏安法测电阻

伏安法测电阻的基本思路是:把被测电阻接上直流电源,然后用电压表和电流表分别测得电阻两端的电压和流过电阻的电流,再根据欧姆定律计算出被测电阻。伏安法是一种间接测量电阻的方法。用伏安法测量电阻时,有两种不同的接线方法,即电压表内接法和电压表外接法,如图 1.61 所示。

由于电压表和电流表本身都有内阻,因此不管采用哪种接线方法,都将改变电路的工作状

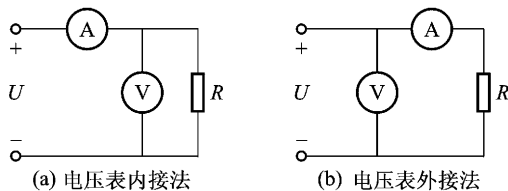


图 1.61 伏安法测电阻

况,引起测量误差。对于图 1.61(a)所示电路,由于电压表的分流作用,电流表测出的电流大于实际通过电阻的电流。这样,根据欧姆定律算出的电阻值要比实际值小;对于图 1.61(b)所示电路,由于电流表的分压作用,电压表测出的电压大于电阻两端的电压。这样,根据欧姆定律算出的电阻值要比实际值大。

由以上讨论看出,用伏安法测电阻时,不但需要计算,而且测量误差大,但它能在通电工作状态下测电阻。为了尽量减小测量误差,通常当被测电阻远小于电压表的内阻时,应采用电压表内接法;当被测电阻远大于电流表的内阻时,应采用电压表外接法。

1.3.3 万用表的工作原理及应用

万用表是一种多用途、多量程的便携式仪表。虽然准确度不高,但是它使用简单、携带方便、可以对电流、电压和电阻等多种电量进行测量,因此在电气安装、设备维修和线路检查等工作中应用十分广泛。

1. 万用表的结构

万用表一般由测量机构、测量线路和转换开关三部分组成。

万用表的测量机构俗称表头,它的作用是把过渡电量转换成仪表指针的机械偏转角。万用表的表头一般都采用磁电式直流微安表,其满偏电流为几微安到几百微安。满偏电流越小,表头的灵敏度越高。由于万用表是多用途仪表,测量各种不同电量时都合用一个表头,故标度盘上有几条标度尺,使用时可根据不同的测量对象进行相应的读数。

万用表测量线路的作用是把各种不同的被测电量(如电压、电流、电阻等)转换成测量机构所能接受的微小直流电流(即过渡电量)。测量线路中使用的元器件主要有分流电阻、分压电阻等。

万用表转换开关的作用是切换测量线路实现量程和测量种类的换接。

图 1.62 所示是常用的 MF-30 型万用表的面板图。面板下方两个(+)、(-)插孔可分别插入红、黑表笔。

2. 万用表的工作原理

万用表的基本原理是建立在欧姆定律和电阻串、并联分压、分流规律基础之上的。

(1) 直流电流的测量

将万用表的转换开关置于测量直流电流挡,就组成了如图 1.63 所示的直流电流测量电路(此时是 50 mA 挡)。

被测电流从“+”、“-”两端进出。 $R_{A1} \sim R_{A5}$ 是分流电阻,它们和微安表构成闭合回路。改变转换开关的位置,就改变了分流电阻,从而改变了量程。所以,万用表的直流电流测量电路实

(3) 交流电压的测量

将万用表的转换开关置于测量交流电压挡,就组成了如图 1.65 所示的交流电压测量电路。

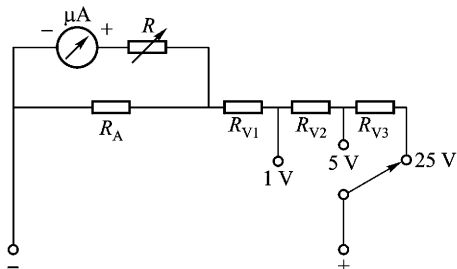


图 1.64 直流电压测量电路

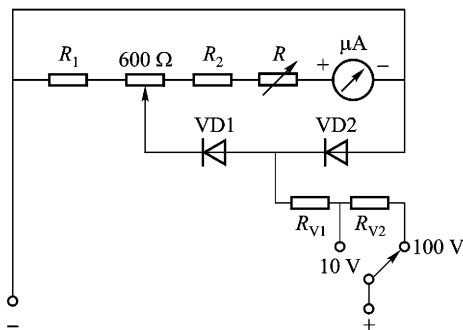


图 1.65 交流电压测量电路

由于万用表表头的磁电式测量机构只能测直流,因此测量交流电压时,必须将交流变换成直流(即整流)后,再送入测量机构。图中 VD1 和 VD2 组成了整流电路(相关知识见第 5 章), R_{V1} 和 R_{V2} 是分压电阻。万用表交流挡的量程改变原理和直流电压时相同,但它的读数是正弦交流电压的有效值。

(4) 电阻的测量

将万用表的转换开关置于测量电阻挡,就组成了一个多量程的电阻表,下面先介绍一下电阻表的测量原理。

图 1.66 所示为电阻表测量电阻的原理图,图中 R_x 是被测电阻; R_0 是可变电阻,也称调零电阻; R_C 是测量机构的内阻;电池的电动势为 E ,内阻为 r 。根据全电路欧姆定律,线路中的电流 I 为

$$I = \frac{E}{R_x + \left(R_1 + \frac{R_0 R_C}{R_0 + R_C} + r \right)} = \frac{E}{R_x + R_z} \quad (1.49)$$

其中 R_z 为电阻表的等效内阻 $R_z = R_1 + \frac{R_0 R_C}{R_0 + R_C} + r$ 。

式(1.49)说明,若电阻表等效内阻 R_z 和电池电动势 E 不变,则线路中的 I 随被测电阻 R_x 的改变而改变,可见电阻表测电阻的实质是测电流。 R_x 越大, I 越小,表头指针的偏转角也越小;反之, R_x 越小, I 越大,表指针的偏转角也越大,所以电阻表的转角能反映 R_x 的大小,其标尺刻度是反向的, $I=0$ 时(指针不偏转),对应着 $R_x = \infty$; $I=I_m$ (满偏电流)时对应着 $R_x = 0$; 当 $R_x = R_z$ 时 $I = \frac{1}{2} I_m$, 指针指在标度尺的中心位置,此时的读数称为欧姆中心值。另外 I 与 R_x 之间的关系是非线性的,所以欧姆表标尺刻度是不均匀的,如图 1.67 所示。

理论上讲,上述电阻表可以测量 $0 \sim \infty$ 之间的任意电阻,但实际上由于电阻表的刻度很不均匀,所以超过了一定的范围,会引起很大的误差。一般情况下,电阻表的有效使用范围是 $0.1 \sim 10$ 倍的欧姆中心值。

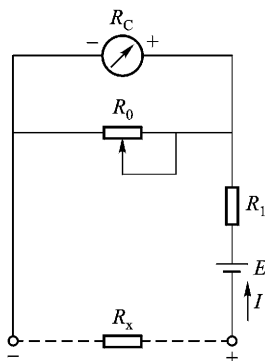


图 1.66 电阻表的测量原理

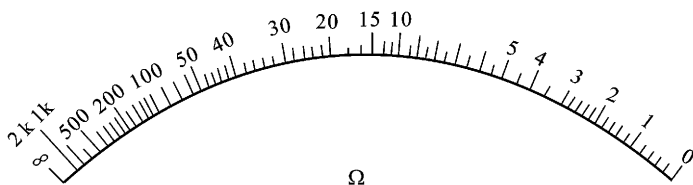


图 1.67 电阻表的标尺刻度

为了使电阻表能在较大范围内对被测电阻进行较准确的测量,万用表电阻挡都做成了多量程的,同时为了能共用一条标度尺,以便于读数,一般都以 R_x 挡为基础,按 10 倍扩大量程。图 1.68 所示万用表的电阻挡具有三个量程。

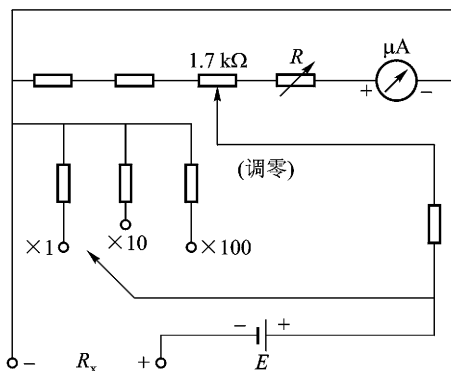


图 1.68 万用表的电阻挡

测量电阻时,要接入电池,被测电阻也是接在“+”、“-”两端。测量前应先“+”、“-”两端短接,看指针是否偏转最大而指在零处,否则应转动零欧姆调节电位器(图中 1.7 kΩ 电阻)进行校正。

3. 电容器质量的判别

电容器的质量异常表现为短路、断路、漏电和容量减少等。电容器质量的好坏通常是用万用表的电阻挡($R \times 100$ 或 $R \times 1 k$)来判别的,其基本原理是电容器的充、放电特性。如果电容器的质量很好,漏电就很小,将表中与“+”、“-”极相连的红、黑表笔分别与电容器的两个引脚接触,则指针会有一定的偏转,并很快回到接近于起始位置的地方。如果电容器的漏电量很大,则指针回不到起始位置,而偏在标度盘的某处,这时指针指出的电阻数值即表示电容器的漏电阻值。如果指针偏转到零欧位置后不再回去,则说明电容器内部短路。如果指针根本不偏转,则说明电容器内部可能断路或电容量很小。

4. 万用表的使用要求

万用表的型号很多,但使用方法基本相同。使用万用表时,应注意以下几点:

(1) 使用之前要调零

在使用万用表之前,要先进行机械调零。测量电阻前,还要进行欧姆调零。否则,测量结果将不准确。

(2) 要准确接线

万用表面板上的插孔和接线柱都有极性标记。使用时将红表笔与“+”极性孔相连,黑表笔与“-”极性孔相连。接入电路时,一方面要注意正、负极性,避免指针反转。另一方面在测量电压和电流时要保证接线正确(即电流表串联接入被测电路,电压表并联接入被测电路);在测量电阻时必须先将被测电路的电源切断,否则会造成万用表的损坏。

(3) 要正确选择测量挡位

测量挡位包括测量项目和量程。如测量电压时应将转换开关置于相应的电压挡,测量电流时应放在相应的电流挡,如误用电流挡去测电压,会造成仪表的损坏。选择电流和电压表的量程时,最好使指针处于标度尺三分之二以上的位置;选择电阻量程时,最好使指针处于标度尺的中间位置,从而尽量减小测量误差。

(4) 要学会正确读取

万用表的表盘上有许多条标度尺,分别用于不同的被测对象,所以首先要根据被测对象明确应往哪一条标度尺上读数,再配合量程明确标度尺上一个格代表多大的数值,读数时眼睛要位于指针正上方。

(5) 要注意操作安全

在进行高电压测量或测量点有高电压时,一定要注意人身和仪表的安全。在测量过程中,严禁带电切换量程开关。万用表用完后,最好将转换开关置于空挡或交流电压最高挡,防止下次测量时不慎损坏表头。

1.3.4 其他仪表简介

1. 直流单臂电桥

直流单臂电桥又称惠斯通电桥,是一种专门用来精密测量电阻的比较式仪表。图 1.69 所示是它的原理图。图中电阻 R_x 、 R_2 、 R_3 、 R_4 分别组成电桥的四个臂。其中 R_x 称为被测臂, R_2 、 R_3 构成比例臂, R_4 称为比较臂。

当接通开关 S 后,调节标准电阻 R_2 、 R_3 、 R_4 ,使检流计 P 的指示为零,即 $I_p = 0$,这种状态称为电桥的平衡状态。

由于电桥平衡时 $I_p = 0$,则有 $I_1 = I_2$, $I_3 = I_4$; $U_{ac} = U_{ad}$, $U_{cb} = U_{db}$ 。根据欧姆定律可推出

$$R_2 R_4 = R_x R_3 \quad (1.50)$$

即

$$R_x = \frac{R_2}{R_3} \times R_4 \quad (1.51)$$

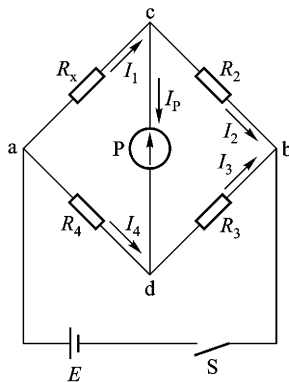


图 1.69 直流单臂电桥

式(1.50)说明,电桥平衡的条件是对臂电阻的乘积相等。式(1.51)表明,电桥平衡时,可根据 R_2 、 R_3 和 R_4 精确地计算出被测电阻值。图 1.70 所示为 QJ 23 型直流单臂电桥的电路图和面板图。图中比例臂 R_2/R_3 由八个标准电阻组成,共分为七挡,由转换开关 SA 换接。比例臂的读数盘设在面板左上方。比较臂 R_4 由四个可调标准电阻组成,它们分别由面板上的四个读数控制,可得到从 $0 \sim 9\,999\,\Omega$ 范围内的任意电阻值。

面板上标有“ R_x ”的两个端子用来连接被测电阻。当使用外接电源时,可从面板左上角标有

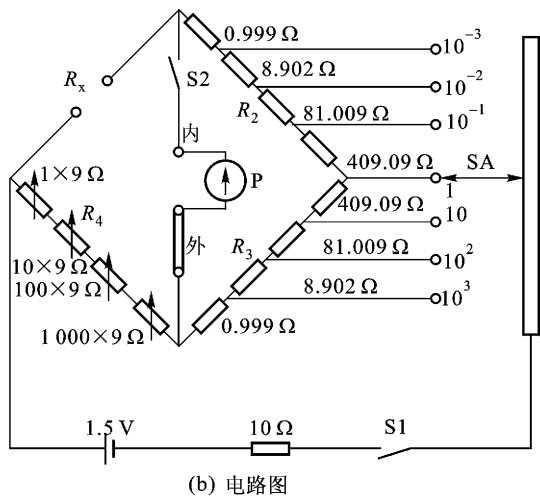
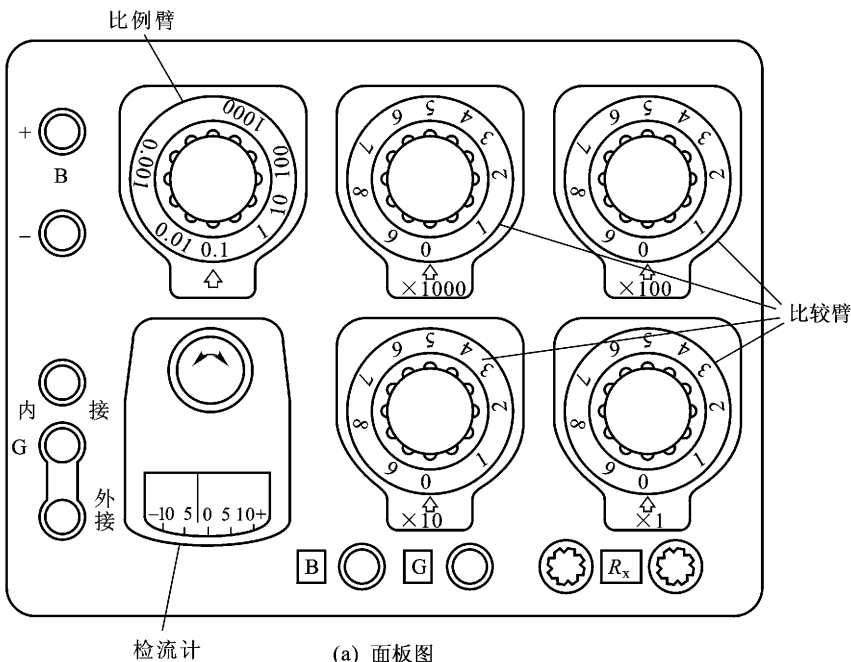


图 1.70 QJ 23 型直流单臂电桥的电路图和面板图

“B”的两个端子接入。如需使用外附检流计时,应用连接片将内附检流计短路,再将外附检流计接在面板左下角标有“外接”的两个端子上。

使用直流单臂电桥测量电阻时,应注意以下几点:

- ① 使用前先将检流计的锁扣打开,调节调零器使指针指在零位。
- ② 接入被测电阻时,应采用较粗、较短的导线,并将接头拧紧。
- ③ 估计被测电阻的大小,选择适当的比例臂,使比较臂的四挡电阻都能被充分利用,从而提高测量准确度。
- ④ 电桥电路接通后,若检流计指针向“+”方向偏转,应增大比较臂电阻;反之则应减小比较

臂电阻。如此反复调节各比较臂电阻,直至检流计指零,电桥处于平衡状态为止。

2. 兆欧表

为了保证电气设备的安全运行,在实际工作中经常要检测电气设备的绝缘电阻。正常情况下,电气设备的绝缘电阻都非常大,通常有几兆欧甚至几百兆欧,远大于万用表电阻挡的有效量程,而且万用表内的电池电压太低,在低电压下测量的绝缘电阻不能真实地反映在高电压下绝缘电阻的真实数值,因此,电气设备的绝缘电阻必须用一种高电压电源的仪表进行测量,这种表就是兆欧表,也称高阻表,俗称“摇表”,其外形如图 1.71 所示。

一般的兆欧表主要由手摇直流发电机、比率型磁电式测量机构及测量电路等组成,其中手摇发电机额定输出电压有 500 V、1 000 V、2 000 V 等不同规格的高压,兆欧表的标尺刻度以“ $M\Omega$ ”为单位。

兆欧表有三个接线柱,分别为线路接线柱 L、地线接线柱 E 和屏蔽接线柱 G。在进行一般测量时,将被测电阻接在 L、E 两个端子之间。如果测量线路绝缘电阻时,应将被测电阻接在 L 端,而将 E 端接地,如图 1.72 所示。

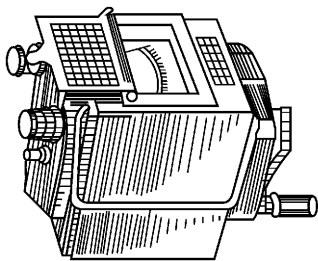


图 1.71 兆欧表的外形

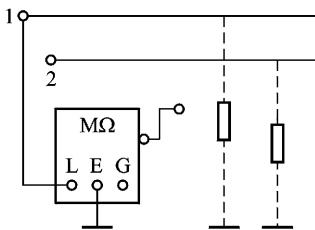


图 1.72 兆欧表的使用

使用兆欧表时,必须在设备或线路不带电的情况下进行,并注意以下几点:

(1) 合理选择兆欧表

选择兆欧表的原则,一是其额定电压一定要与被测电气设备或线路的工作电压相适应;二是其测量范围与被测绝缘电阻的范围相符合。

(2) 正确选择连接线

兆欧表与被测设备间的连接线应用单股线分开单独连接,不能用双股绝缘线或绞线。

(3) 正确操作直流发电机

摇动直流发电机的手柄时应由慢渐快至额定转速 120 r/min。在此过程中,若发现指针为零,说明被测物发生短路故障,应立即停止摇动手柄,避免仪表损坏。

(4) 安全使用仪表

测量具有大电容设备的绝缘电阻,读数后不能立即停止摇动兆欧表,以防止已充电设备放电而损坏仪表。应在读数后一边降低转速,一边拆去接地线。在兆欧表停止转动和被测物充分放电前,不能用手触及被测设备的导电部分。

1.4 复杂直流电路

前面讲述的欧姆定律,电阻的串联、并联等的性质及计算公式可以对简单的直流电路进行具

体分析和计算,但是实际电路(特别是电子电路)不能用串、并联关系来简化电路,这类电路称为复杂电路,如图 1.73 所示。对于复杂电路的分析和计算,除了要应用欧姆定律外,还必须依据另一基本定律,即基尔霍夫定律。

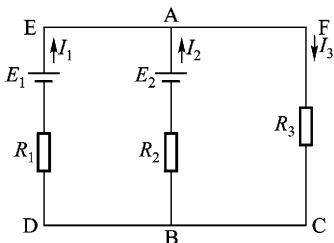


图 1.73 复杂电路

1.4.1 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律包括基尔霍夫第一定律和基尔霍夫第二定律,它具有普遍的适用性(适用于任何电路)。

1. 基尔霍夫第一定律

基尔霍夫第一定律也称为节点电流定律(KCL),它指出:流入电路中某个节点的电流代数和为零。

节点是指三条或三条以上支路连接的点,图 1.74 中的 A 点即为五条支路连接的节点。如果规定流入节点的电流为正,流出节点的电流为负,则基尔霍夫电流定律的表达式为

$$\sum I = 0$$

(1.52)

对于图 1.74 中的节点 A 可以得出

$$I_1 + (-I_2) + I_3 + (-I_4) + (-I_5) = 0$$

或

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4 + I_5$$

后一表达式反映了基尔霍夫节点电流定律的另一种表达方式,即流入某个节点的电流之和等于同一时刻从节点流出的电流之和。

基尔霍夫第一定律是用于节点的,但它可以推广应用到任意假定的封闭面,如图 1.75 所示电路,假定一个封闭面把三个电阻构成的三角形电路全部包围起来,则流入封闭面的电流的代数和也恒为零,即

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

根据基尔霍夫第一定律,可列出任何一个节点或假定封闭面的电流方程。应当指出,在分析与计算复杂电路时,有些支路中电流的实际方向事先往往不知道,这时可按以下原则进行:对于已知电流,按实际方向在图中标定;对于未知电流的方向可以在图中任意标定一个参考电流方

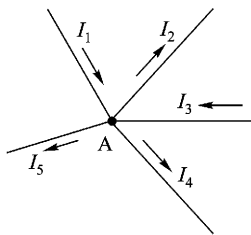


图 1.74 节点

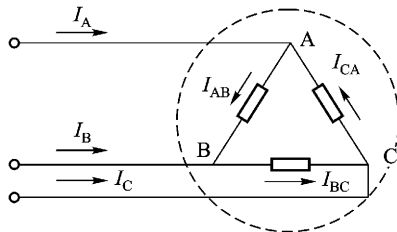


图 1.75 基尔霍夫第一定律的推广

向,然后根据计算的结果确定实际电流方向。

2. 基尔霍夫第二定律

基尔霍夫第二定律也称为回路电压定律(KVL),它指出 :在一个闭合回路中 ,沿回路绕行方向的各段电压(电压降)的代数和等于零。

回路是指电路中任意一个闭合路径。图 1.73 中的 AFCBA、CDEFC、EABDE 都是回路。在任一回路中 ,基尔霍夫回路电压定律可表达为

$$\sum U = 0 \tag{1.53}$$

沿回路绕行方向可以任意确定 ,并在图中标出。对于图 1.73 中的 EABDE 回路 ,绕行方向可以是 $E \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E$ (顺时针) ,也可以是 $E \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow E$ (逆时针)。在这里 ,取顺时针方向为绕行方向 ,如图 1.76 所示。

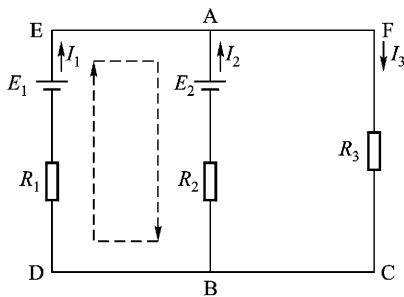


图 1.76 基尔霍夫第二定律

绕行方向确定后 ,就可以依据参考电流方向来确定各电阻的电压(电压降)了 ,若参考电流方向与绕行方向一致 ,则该电阻电压取正 ,反之则取负。在图 1.76 所示的 EABDE 回路中 ,电阻 R_2 两端的电压取负(I_2 的方向与绕行方向相反) ,电阻 R_1 两端的电压取正(I_1 的方向与绕行方向一致)。

对于电源而言 ,若绕行方向与电动势的方向(由电源负极指向正极)一致 ,则电压取负 ;反之则取正。在图 1.76 的 EABDE 回路中 ,电源 E_1 的电压取负 ,电源 E_2 的电压取正。

对于图 1.76 所示的 EABDE 回路 ,根据式(1.53)可以得出

$$E_2 + (- R_2 I_2) + R_1 I_1 + (- E_1) = 0$$

或

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

后一种表达式反映了基尔霍夫电压定律的另一种表达形式 ,即在任一闭合回路中 ,各电阻上电压

的代数和等于各个电动势的代数和。

基尔霍夫第二定律是针对闭合回路的,但它可以推广应用到不闭合的虚拟回路(假想回路)。现以图 1.77 所示电路加以说明,图中 A、B 之间无支路直接相连,但可以假想有一条虚拟支路连接其间,其电压为 U_{AB} ,构成一个虚拟回路 ABCA,在此虚拟回路中,若取 $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$ 为绕行方向,则可列出如下回路电压方程式

$$R_1 I_1 + E_1 - R_2 I_2 - E_2 - U_{AB} = 0$$

即

$$U_{AB} = E_1 - E_2 + R_1 I_1 - R_2 I_2$$

上式表明,电路中某两点 A、B 之间的电压等于从 A 点到 B 点所经路径上全部电压的代数和。

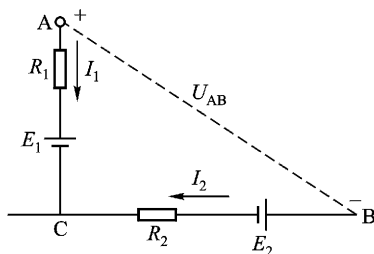


图 1.77 虚拟回路

1.4.2 支路电流法

支路电流法是以各条支路电流为未知量,应用基尔霍夫定律列出方程联立求解的分析方法。支路电流法的解题步骤如下:

- ① 确定电路节点个数 n 和支路个数 m ,并假定各支路电流的参考方向。
- ② 应用基尔霍夫第一定律列出 $(n-1)$ 个独立的节点电流方程式。
- ③ 选定回路的绕行方向,应用基尔霍夫第二定律列出 $m-(n-1)$ 个独立的回路电压方程式。
- ④ 代入数据,求解 m 个独立的联立方程,确定各支路的电流。

例 1.13 如图 1.78 所示电路,用支路电流法计算各支路电流。

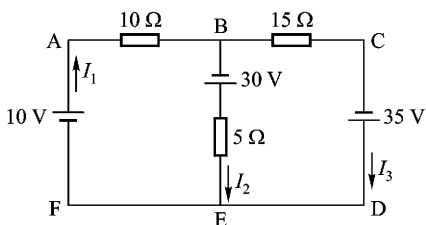


图 1.78 例 1.13 图

解 (1) 假定每一支路电流的参考方向,并用箭头标在电路图上,如图中 I_1 、 I_2 、 I_3 。电路中有 3 条支路(即 $m=3$),两个节点(即 $n=2$)。

(2) 电路中有两个节点,独立的节点电流方程个数为 $n-1=2-1=1$,任选一个节点,列出电流方程

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

(3) 前面已按电流定律列出了一个独立的方程,因此只需选 $m-1=3-1=2$ 个回路,应用基尔霍夫第二定律列出两个独立的方程式求解。这里选择回路 ABEFA 和 BCDEB,选择顺时针方向为各回路的绕行方向,可列出以下两个方程

$$10I_1 - 30 + 5I_2 - 10 = 0$$

$$15I_3 - 35 - 5I_2 + 30 = 0$$

(4) 求解上述三个联立方程, 得

$$I_1 = 3 \text{ A}, \quad I_2 = 2 \text{ A}, \quad I_3 = 1 \text{ A}$$

计算结果中 I_1 、 I_2 和 I_3 均为正值, 说明它们的实际电流方向与参考方向相同。

需要强调的是: 对于上例, 不能直接应用三个回路电压方程式来求解三个未知电流。因为在三个回路方程式中, 只有两个是独立的, 另一个可以从其他两个方程式中导出, 故应用基尔霍夫第二定律列回路方程式时, 为保证方程式的独立性, 要求每列一个回路方程式都要包含一条新支路的电流或电压。

通过上例的分析可见, 支路电流法的优点是比较直接, 所求即所得, 但它也有缺点, 即当电路支路数目较多时, 联立的方程也会相应增加, 计算较麻烦。

* 1.4.3 叠加定理

叠加定理是线性电路的一种重要分析方法。其内容是: 在由多个电源和线性电阻组成的线性电路中, 任一支路中的电流(或电压)等于各个电源单独作用时, 在此支路中产生的电流(或电压)的代数和。

下面通过一个实例来介绍利用叠加定理的步骤。

例 1.14 如图 1.79(a) 所示电路, 应用叠加定理求各支路的电流。

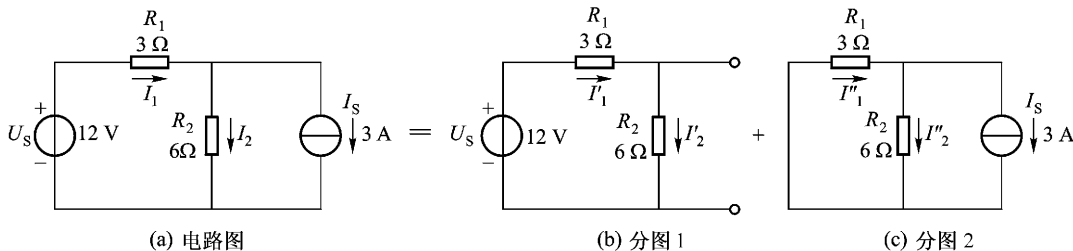


图 1.79 例 1.14 图

解 (1) 分别作出一个电源单独作用时的分图, 而其余电源只保留其内阻(对理想电压源, 在此处用短路替代; 对理想电流源, 在此处用开路替代) 如图 1.79(b)、(c) 所示。

(2) 按电阻串、并联的计算方法, 分别求出分图中每一支路电流(或电压)的大小及方向。对于图 1.79(b) 所示分图, 各支路电流为

$$I'_1 = I'_2 = \frac{U_S}{R_1 + R_2} = \frac{12}{3 + 6} \text{ A} = \frac{4}{3} \text{ A}$$

对于图 1.79(c) 所示分图, 各支路电流为

$$I''_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I_S = \frac{6}{3 + 6} \times 3 \text{ A} = 2 \text{ A}$$

$$I''_2 = I''_1 - I_S = (2 - 3) \text{ A} = -1 \text{ A}$$

(3) 求出各电源在各支路中产生的电流(或电压)的代数和, 这些电流(或电压)就是各电源共同作用时, 在各支路中产生的电流(或电压)。在求和时, 要注意各电流(或电压)的正、负。

$$I_1 = I'_1 + I''_1 = \left(\frac{4}{3} + 2 \right) \text{ A} = \frac{10}{3} \text{ A}$$

$$I_2 = I'_2 + I''_2 = \left[\frac{4}{3} + (-1) \right] \text{ A} = \frac{1}{3} \text{ A}$$

应当注意,叠加定理只能用来求电路中的电流或电压,而不能用来计算功率。

* 1.4.4 戴维宁定理

对于一个复杂的电路,有时并不需要了解所有支路的情况,而只要求出其中某一支路的电流,这时采用戴维宁定理较为简便。

在介绍戴维宁定理前,先解释一下二端网络的概念。电路也称为电网络或网络,任何具有两个出线端的部分电路都称为二端网络。含有电源的二端网络称为有源二端网络,不含电源的二端网络称为无源二端网络。在图 1.80(a)中,点画线框内的部分就是一个有源二端网络。图 1.80(b)是有源二端网络的一般形式。

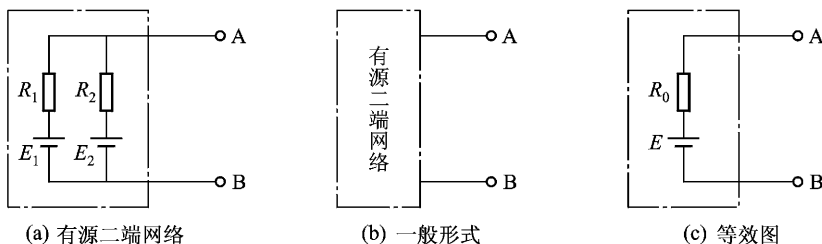


图 1.80 二端网络

戴维宁定理指出:任何一个线性有源二端网络都可以用一个等效电压源来代替,该电压源的电动势等于二端网络的开路电压,其内阻等于有源二端网络内所有电源不作用(理想电压源短路,理想电流源开路),仅保留其内阻时的网络二端等效电阻。

根据戴维宁定理,图 1.80(b)可画成图 1.80(c)。下面通过一个实例来介绍应用戴维宁定理的步骤。

例 1.15 在图 1.81(a)所示的电桥电路中,已知 $R_1 = R_3 = 5 \Omega$, $R_2 = 10 \Omega$, $R_4 = 5 \Omega$, $R_5 = 10 \Omega$, $E = 12 \text{ V}$,求 R_5 所在支路的电流。

解 (1) 把电路分成待求支路和有源二端网络两部分,移开待求支路,可得到有源二端网络,如图 1.81(b)所示。

(2) 求有源二端网络的开路电压 U_{BC} 。图 1.81(b)为一个简单电路,可以方便地求出 I_1 和 I_2

$$I_2 = \frac{E}{R_2 + R_4} = \frac{12}{10 + 5} \text{ A} = 0.8 \text{ A}$$

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_3} = \frac{12}{5 + 5} \text{ A} = 1.2 \text{ A}$$

有源二端网络的开路电压 U_{BC} 为

$$U_{BC} = U_{BD} + U_{DC} = R_3 I_1 - R_4 I_2 = (5 \times 1.2 - 5 \times 0.8) \text{ V} = 2 \text{ V}$$

(3) 求等效电源的内阻 r ,如图 1.81(c)所示。

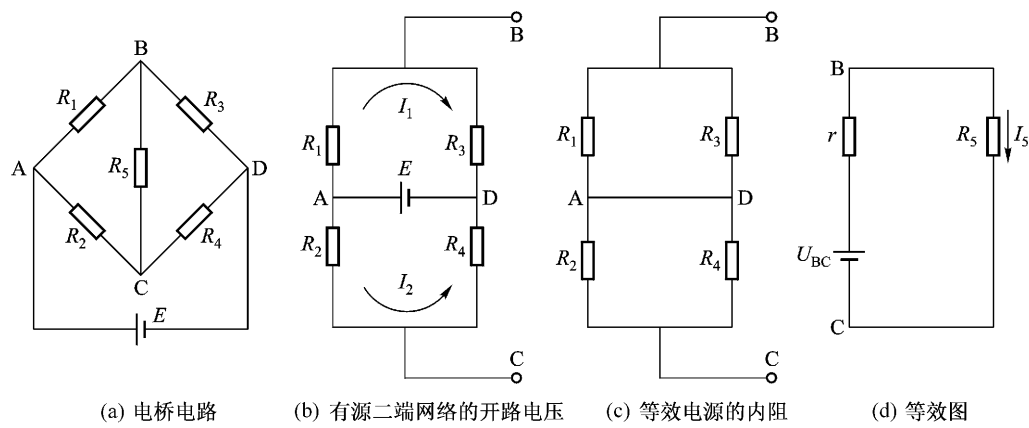


图 1.81 例 1.15 图

$$r = (R_1 \parallel R_3) + (R_2 \parallel R_4) = \left(\frac{5 \times 5}{5 + 5} + \frac{10 \times 5}{10 + 5} \right) \Omega \approx 5.8 \Omega$$

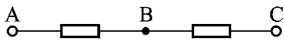
(4) 画出等效电压源 ,接上待求支路 ,如图 1.81(d)所示 ,即可求出通过电阻的电流

$$I_5 = \frac{E}{r + R_5} = \frac{U_{BC}}{r + R_5} = \frac{2}{5.8 + 10} \text{ A} \approx 0.126 \text{ A}$$

应当注意 :应用戴维宁定理时 ,等效电压源的极性必须与开路电压的极性一致。

思考与练习

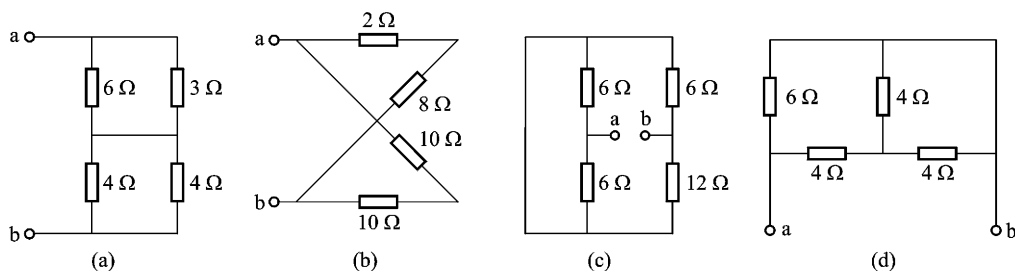
- 1.1 电路有哪些基本组成部分？各部分的作用是什么？
- 1.2 电路有哪几种工作状态？各状态下电路的特点是什么？
- 1.3 A 导体在 5 min 内通过截面积的电荷量为 50 C ,B 导体在 50 s 内通过截面积的电荷量为 5 C ,则 A 与 B 两导体的电流哪个大？
- 1.4 如题图 1.4 所示 ,A 点电位为 3 V ,B 点电位为 −3 V ,则 AB 两点之间的电压为多少？已知 BC 两点间的电压 $U_{BC} = 5 \text{ V}$,则 C 点的电位为多少？



题图 1.4

- 1.5 某一用电器正常工作时的电压为 220 V ,电流为 0.45 A ,则这个用电器正常工作时消耗的功率是多少？若每天工作 5 h (小时) ,按每月 30 天计算 ,一个季度用电多少度？
- 1.6 有一个标有“1 kΩ 40 W”的电位器 ,问 (1) 该电位器允许的最大电流为多少？(2) 允许的最大电压为多少？(3) 当电位器加上 10 V 的电压时 ,功率为多少？
- 1.7 用长 100 m ,截面积为 1 mm² 的康铜线绕制成的电阻是多少欧？当温度上升时 ,此电阻值如何变化？
- 1.8 当某一个电阻加 10 V 电压时 ,电流为 2 A ,那么加 5 V 电压时 ,电流为多少？

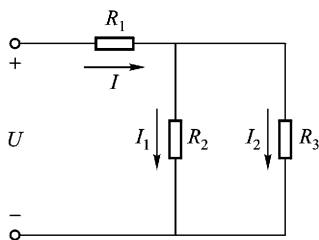
1.9 求出题图 1.9 所示电路的等效电阻 R_{ab} 。



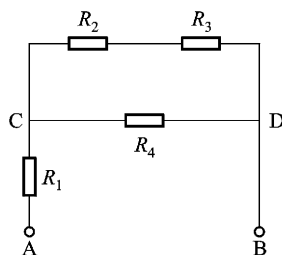
题图 1.9

1.10 在题图 1.10 中, 已知 $R_1 = R_2 = 4\ \Omega$, $R_3 = 6\ \Omega$, $I_2 = 2\text{ A}$, 求 I_1 、 I 、 U 及电路总功率 P 。

1.11 在题图 1.11 中, 设 $U_{AB} = 20\text{ V}$, 电阻 $R_1 = 7\ \Omega$, $R_2 = 3\ \Omega$, $R_3 = 9\ \Omega$, $R_4 = 4\ \Omega$, 求电路中的各电流及 U_{CD} 。



题图 1.10

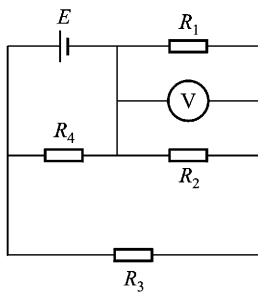


题图 1.11

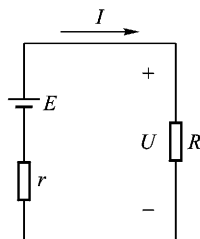
1.12 一只 110 V 8 W 的指示灯, 现要接在 380 V 的电源上, 问需串多大阻值的电阻?

1.13 在题图 1.13 中, $E = 4.5\text{ V}$, $R_1 = R_2 = 18\ \Omega$, $R_3 = R_4 = 9\ \Omega$, 求电压表的读数。

1.14 在题图 1.14 中, 当电阻 R 逐渐增加时, 电路电流 I 、电路端电压 U 应如何变化?



题图 1.13



题图 1.14

1.15 某直流电源的外特性如题图 1.15 所示,则电源电动势和内阻各为多少?

1.16 一个平板电容器,圆形板的半径为 8 cm,极板间距为 1 mm,中介质的相对介电常数为 5.5,如果对它充电到 100 V,则它的带电荷量是多少(真空中的介电常数为 8.86×10^{-12} F/m)?

1.17 有一个电容器,带电荷量为 2×10^{-5} C 时,两极板间电压是 200 V,它的电容量多大?如果电量增加 1×10^{-4} C 时,它的电压是多大?电容量又是多大?

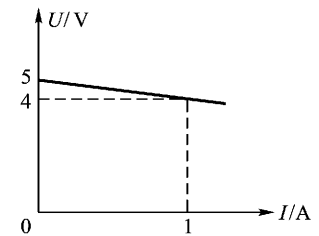
1.18 若将 C_1 (10 μ F, 15 V) 和 C_2 (30 μ F, 15 V) 并联后加 10 V 电压,则哪个电容器储存的电荷量多?若将它们串联后加 10 V 电压,则哪个电容器储存的电荷量多?

1.19 如题图 1.19 所示,已知 $C_1 = C_4 = 2 \mu$ F, $C_2 = C_3 = 6 \mu$ F,求当开关 S 断开和闭合两种情况时, A、B 端的等效电容各是多少?

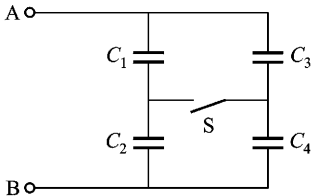
1.20 磁场中某一点的磁场方向是怎样规定的?怎样确定电流形成的磁场方向?

1.21 什么是磁感应强度?它与磁通量有何关系?

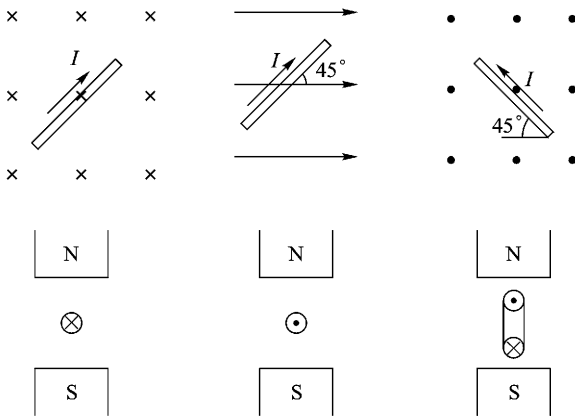
1.22 判断题图 1.22 中通电导体的受力方向。



题图 1.15



题图 1.19



题图 1.22

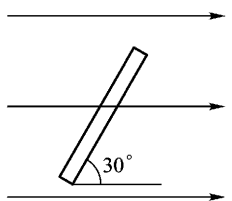
1.23 在题图 1.23 中磁感应强度为 0.4 T 的匀强磁场里,有 0.8 m 长的通电导体与磁场方向成 30° 角,已知导体受 0.1 N 的电磁力,方向为垂直纸面向外,求导线中电流的大小和方向。

1.24 磁电式测量机构的主要结构是什么?游丝的作用是什么?

1.25 磁电式测量机构配合什么样的测量线路可以构成直流电压表和直流电流表?

1.26 有一个磁电式测量机构,其内阻为 300 Ω ,满刻度电流为 200 μ A。若要将其改制成量程为 0.5 A 的直流电流表,应并联多大的分流电阻?

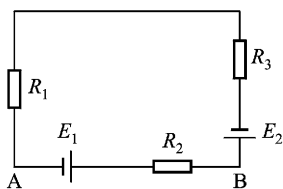
1.27 若将题 1.26 中的磁电式测量机构改装成 60 V 量程的直流电压表,应串联多大的分



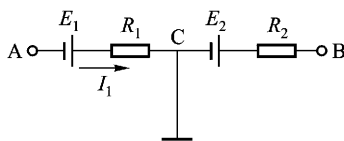
题图 1.23

压电阻？

- 1.28 选用直流电流表和电压表应注意哪些问题？
- 1.29 用伏安法测电阻时，怎样才能减小误差？
- 1.30 怎样用万用表检测电容器质量好坏？
- 1.31 什么是万用表欧姆中心值？其含义是什么？
- 1.32 使用兆欧表应注意哪些？
- 1.33 在题图 1.33 中 $R_1 = R_2 = R_3 = 6\ \Omega$ $E_1 = 3\text{ V}$ $E_2 = 12\text{ V}$ 求 A、B 两点电压 U_{AB} 。
- 1.34 在题图 1.34 中 $E_1 = 1.5\text{ V}$ $I_1 = 1\text{ A}$ $E_2 = 4.5\text{ V}$ $U_{AB} = 12\text{ V}$ $R_1 = R_2 = 6\ \Omega$ 求 A、B、C 三点电位。

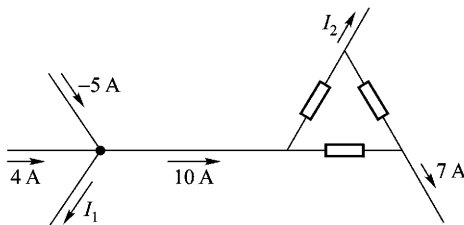


题图 1.33



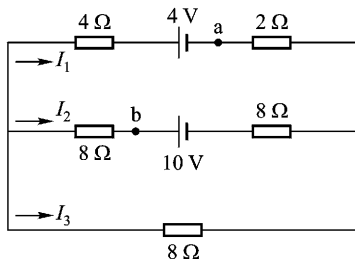
题图 1.34

- 1.35 在题图 1.35 中求 I_1 及 I_2 。
- 1.36 在题图 1.36 中 (1) 用支路电流法求各支路电流。(2) 求电压 U_{ab} 、 I_2 支路上电阻吸收的功率。



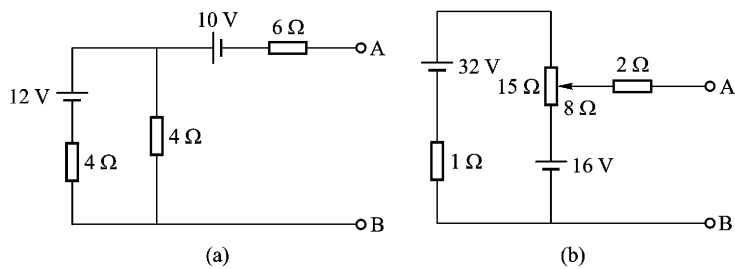
题图 1.35

- * 1.37 用叠加定理求题图 1.36 中各支路电流。



题图 1.36

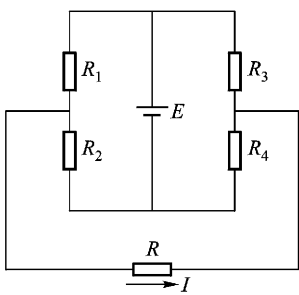
- * 1.38 用戴维宁定理求题图 1.38 中电路的等效电压源。
- * 1.39 在题图 1.39 中已知 $E = 12.5\text{ V}$ $R_1 = 12\ \Omega$ $R_2 = 2.5\ \Omega$ $R_3 = 5\ \Omega$ $R_4 = 20\ \Omega$ 求：电



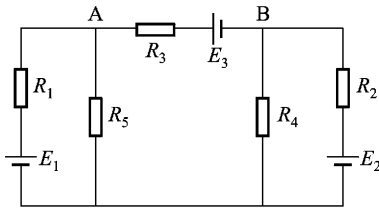
题图 1.38

流 I 。

* 1.40 在题图 1.40 中, 已知 $E_1 = 20\text{ V}$, $E_2 = E_3 = 12\text{ V}$, $R_1 = R_5 = 10\text{ }\Omega$, $R_2 = R_3 = R_4 = 2\text{ }\Omega$, 求 A、B 两点间的电压。



题图 1.39



题图 1.40

第 2 章

正弦交流电路

本章将学到：

1. 什么是电磁感应现象 ,怎样计算感应电动势和判断感应电流的方向？
2. 正弦交流电是怎样产生的 ,表征交流电的基本物理量和描述正弦交流电的常用方法有哪些？
3. 常见的单相交流电路有哪些 ,它们的电压、电流以及功率之间各有什么关系？
4. 示波器操作面板上各个开关、旋钮的作用是什么 ,怎样使用示波器？
5. 什么是三相电源与三相负载的星形联结和三角形联结 ,怎样计算三相电路的电压、电流和功率？

2.1 交流电的基本概念

发电厂向用户提供的电源大多是交流电 ,交流电可以方便地用变压器进行升压和降压 ,可解决远距离输电需要高电压而用电需要低电压的矛盾 ;在需要直流电供电的场合 ,可由变压器、整流、滤波电路将交流电变为直流电供直流电路使用。交流电是由交流发电机产生的 ,而电磁感应是发电机工作的基本原理。

2.1.1 电磁感应定律

电现象和磁现象是客观物质世界的两种现象 ,电场和磁场是两种不同的物质 ,两种物质之间存在着密切联系。电流流过线圈时会在其周围空间中产生磁场 ;一定条件下利用磁场也可以在导体中产生电流 ,这种电流称为感应电流。

1. 直导体切割磁感线运动产生感应电流

如图 2.1 所示 ,直导体 AB 在匀强磁场中垂直纸面向里(外)运动 ,检流计的指针会向右(左)摆动 ,电路中产生了感应电流。若导体 AB 只在纸面内平行磁感线方向运动或相对磁场静止 ,电路中不会产生感应电流 ,由此可知 :闭合电路的一部分在磁场中作切割磁感线运动时 ,电路中会产生感应电流。

直导体切割磁感线运动时 ,导体中感应电动势和感应电流的方向可用右手定则来确定 :平伸右手 ,四指与拇指垂直且保持在同一个平面内 ,磁感线垂直穿过手掌心 ,大拇指指向导体切割磁

感线运动的方向 ,四指的指向为感应电流方向 ,如图 2.2 所示。

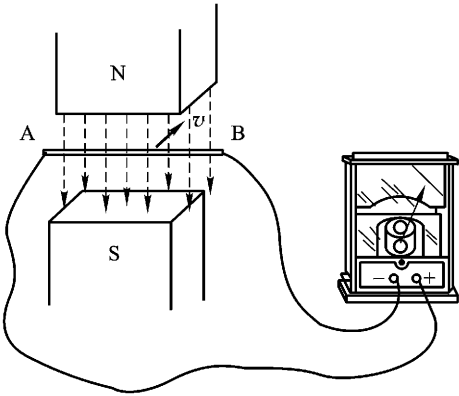


图 2.1 直导体切割磁感线运动

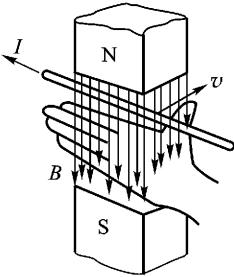


图 2.2 右手定则

感应电动势的大小与磁场的磁感应强度、导体切割磁感线的有效长度和切割磁感线运动的速度成正比 ,即

$$E = Blv \tag{2.1}$$

式中 , l ——导体切割磁感线的有效长度 ,单位为米 ,符号为 m ;

B ——磁场的磁感应强度 ,单位为特 [斯拉] ,符号为 T ;

v ——导体垂直磁场方向切割磁感线运动的速度 ,单位为米/秒 ,符号为 m/s ;

E ——感应电动势 ,单位为伏 [特] ,符号为 V 。

2. 穿过闭合回路的磁通量发生变化产生感应电流

如图 2.3 所示 ,条形磁铁插入线圈或从线圈中抽出时 ,检流计的指针会发生向左或向右的偏转 ,说明闭合电路中也产生了感应电流 ;如果磁铁插入线圈后保持不动或磁铁与线圈以同一速度运动 ,即保持相对静止 ,检流计的指针不偏转 ,闭合电路中没有感应电流产生。磁铁插入线圈与从线圈中拔出时 ,感应电流的方向不同。

条形磁铁插入或从线圈中拔出时 ,穿过线圈的磁感线的条数(磁通量 Φ)发生了变化 ,穿过闭合回路的磁通量发生变化是产生感应电流的原因。

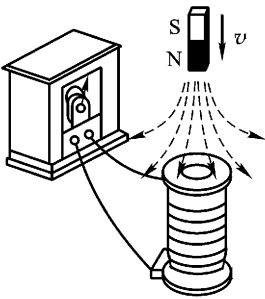


图 2.3 穿过线圈的磁通量变化产生感应电流

线圈中感应电动势的大小可由下式计算

$$e = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1 \tag{2.2}$$

式中 , $\Delta \Phi$ ——穿过线圈的磁通量的变化量 ,单位为韦 [伯] ,符号为 Wb ;

Δt ——磁通量变化所用的时间 ,单位为秒 ,符号为 s ;

N ——线圈的匝数。

式(2.2)表明 ,感应电动势的大小在数值上等于穿过闭合回路的磁通量变化率与匝数的乘积 ,这一规律称为电磁感应定律。

直导体切割磁感线与条形磁铁插入或从线圈中拔出产生感应电动势的现象在本质上都是穿

过闭合回路的磁通量发生了变化。

2.1.2 交流电的类型

大小和方向都随时间作周期性变化的电压或电流称为交流电。

交流电的种类很多,如图 2.4(a)为矩形波交流电压,(b)为尖脉冲交流电压,(c)为正弦波电压,(d)为锯齿波电压。

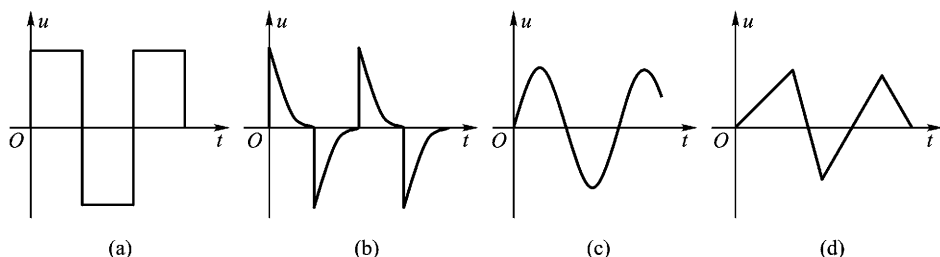


图 2.4 常见的交流电压波形

生活和生产中使用最多的是正弦交流电,非正弦交流电只有在特殊场合应用,如矩形波电压在数控机床的电气控制中应用很广,本章主要讨论正弦交流电和正弦交流电路。

2.1.3 正弦交流电

1. 交流电的产生

图 2.5(a)为交流发电机的结构模型,它由一对正对的磁极与转子线圈组成,转子线圈在外力作用下在磁场中匀速转动,穿过线圈平面的磁通量不断变化,根据电磁感应定律,线圈中产生大小和方向随时间变化的感应电动势。线圈转动一周,感应电动势的大小和方向完成一次周期性的变化。

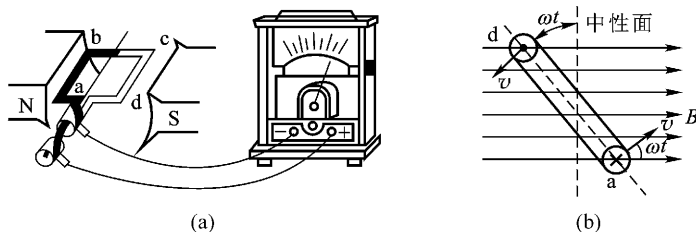


图 2.5 交流发电机结构

2. 电动势按正弦规律变化

交流发电机中的转子线圈在匀强磁场中沿逆时针方向匀速转动,如图 2.5(b)所示,由线圈平面垂直磁场方向(此时线圈所在平面称为中性面)开始计时,线圈转动的角速度为 ω ,单位是 rad/s ,经过时间 t 以后,线圈转过的角度为 ωt ,此时 ab 边线速度 v 的方向与磁感线方向的夹角也等于 ωt , ab 边切割磁感线运动的速度是速度 v 的一个分量 v' ,即 $v' = v \sin \omega t$,设矩形线圈 ab 边的长度为 l ,磁场的磁感应强度为 B ,由于 cd 边也有感应电动势且与 ab 中的感应电动势串联,故这一瞬间整个线圈中的感应电动势为

$$e = 2Blv\sin \omega t$$

令 $E_m = 2Blv$,如果 $t = 0$ 时 线圈平面与中性面的夹角为 φ_0 ,则有

$$e = E_m\sin(\omega t + \varphi_0) \tag{2.3}$$

上式表明 瞬时电动势随时间按正弦规律变化。

3. 正弦交流电波形

交流发电机中的电动势按正弦规律变化 ,电动势波形是一条正弦曲线 ,图 2. 6(b)是转子线圈在磁场中转动一周时几个主要位置的电动势及由这些数值描绘出的电动势曲线。曲线的波动表示电动势的大小在变化 ,正、负半周表示电动势的正、反两个方向 ,曲线过横轴时表示电动势的方向发生一次改变。

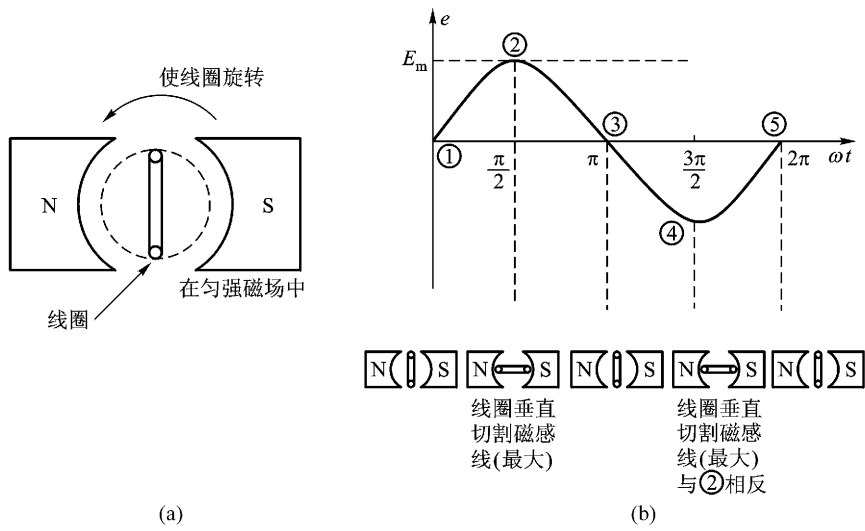


图 2. 6 交流发电机电动势波形

2. 1. 4 正弦交流电的三要素

1. 周期和频率

交流电的大小和方向都在随时间作周期性变化 ,交流电完成一次周期性变化所经历的时间称为交流电的一个周期 ,波形图中一个完整正弦波对应的时间就是交流电的一个周期。周期用符号 T 表示 ,单位是秒(s)。

交流电在一秒内完成周期性变化的次数称为交流电的频率。频率用 f 表示 ,单位是赫 [兹] (Hz) ,周期和频率互为倒数 ,即

$$T = \frac{1}{f} \tag{2.4}$$

交流电的角频率常用 ω 表示 ,单位为弧度/秒 ,符号 rad/s ,角频率与频率之间的关系为

$$\omega = 2\pi f \tag{2.5}$$

周期和频率都是用来表示交流电变化快慢的物理量。我国和世界上大多数国家工农业生产和生活所用交流电的频率都是 50 Hz ,称为工频 ;日本、德国等少数国家采用的工频是 60 Hz。

2. 瞬时值、最大值和有效值

瞬时值：交流电在某一时刻的值称为瞬时值，用小写斜体字母表示，如 e 、 u 、 i 分别表示电动势、电压、电流的瞬时值。

最大值：交流电在一个周期内能达到的最大幅度称为交流电的最大值，用大写斜体字母加下标 m 表示，如 E_m 、 U_m 、 I_m 分别表示电动势、电压、电流的最大值。

有效值：最大值不适宜用来表示交流电做功的效果，常用有效值来表示交流电的大小。交流电的有效值是根据交流电的热效应来规定的，让交流电与直流电同时分别通过同样阻值的电阻器，如果它们在同样的时间内产生的热量相等，那么这个交流电流的有效值在数值上就等于这个直流电流的大小。

电动势、电压和电流的有效值分别用大写斜体字母 E 、 U 、 I 表示，正弦交流电的有效值与最大值之间有如下关系

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2.6)$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (2.7)$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \quad (2.8)$$

生活中所说的 220 V 交流电，指的是交流电压的有效值，其最大值为 $220\sqrt{2}$ V。各种交流用电器铭牌上所标电压和电流均为交流电的有效值，交流电压表和电流表所标刻度以及测量出来的数值也都是交流电的有效值。

3. 相位和相位差

在交流电动势的瞬时值表达式 $e = E_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ 中 $(\omega t + \varphi_0)$ 对于确定电动势瞬时值的大小和方向至关重要，称为交流电的相位。 $t=0$ 时的相位 φ_0 称为初相。

电工技术中常用相位差来比较两个交流电的步调，相位差是指两个同频率交流电的相位之差，用 $\Delta\varphi$ 表示。因为频率相同，所以相位差就等于初相之差，即

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$$

① 两个交流电的频率、初相相同时，称这两个交流电同相。同相时，两个交流电流 i_1 和 i_2 的波形如图 2.7(a) 所示，由图可以看出它们的变化规律总是相同的，即两个电流的步调一致。

② 两个交流电的频率相同、相位差为 180° 时，称这两个交流电反相。反相时，两个交流电 i_1 和 i_2 的波形如图 2.7(b) 所示，两个电流变化的步调相反。

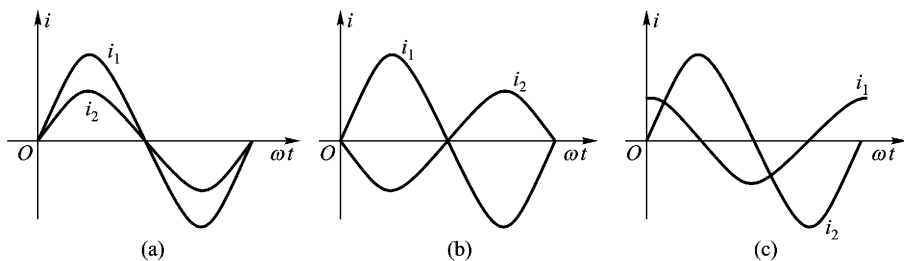


图 2.7 交流电的相位关系

③ 两个交流电频率相同但初相不同,它们的步调关系有两种情况:超前或滞后。由图 2.7 (c)可以看出交流电流 i_1 总是比 i_2 提前达到正的最大值、零或负的最大值,称 i_1 超前 i_2 一个相角 φ_0 ,或 i_2 滞后 i_1 一个相角 φ_0 。

交流电的有效值(最大值)、频率(周期或角频率)、初相是表征正弦交流电的三个基本物理量,由这三个量可写出交流电的瞬时值表达式,从而确定正弦交流电的变化规律,这三个量称为交流电的三要素。

2.1.5 正弦交流电的表达式

表示正弦交流电的方法主要有三种:解析式、波形图和相量。其中相量表示法又有相量图和复数式,本书主要介绍解析式、波形图和相量图。

1. 解析式表示法

解析式表示法是用正弦三角函数形式来表示交流电。交流电的电动势、电压、电流的瞬时值表达式就是交流电的解析式,式(2.3)就是交流电动势的解析式,同理正弦交流电压、电流的解析式为

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u) \quad (2.9)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (2.10)$$

式中, U_m 、 I_m ——交流电压、电流的最大值;

ω ——交流电的角频率;

φ_u 、 φ_i ——交流电压、电流的初相。

给出交流电的三要素,即有效值(或最大值)、频率(或周期、角频率)和初相可以写出交流电的解析式,给出交流电的解析式也可得到交流电的三要素并能求出任意时刻交流电的值。

例 2.1 已知正弦交流电压的最大值 $U_m = 220\sqrt{2}$ V,频率 $f = 50$ Hz,初相 $\varphi_u = \frac{\pi}{2}$,试写出交流电压的解析式。

解 由题意得

$$\omega = 2\pi f = 100\pi$$

所以,该交流电压的解析式为

$$u = 220\sqrt{2}\sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{2}\right) \text{ V}$$

例 2.2 某交流电压的解析式为 $u = 110\sqrt{2}\sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{3}\right)$ V,求(1)交流电的 U_m 、 T 和 φ_u (2) $t = 0.01$ s 时,交流电压的大小和方向。

解 (1)由题意得

$$U_m = 110\sqrt{2} \text{ V} \quad \varphi_u = \frac{\pi}{3}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{100\pi} \text{ s} = 0.02 \text{ s}$$

(2)将 $t = 0.01$ s 代入交流电压瞬时值表达式得

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u) = 110\sqrt{2}\sin\left(100\pi \times 0.01 + \frac{\pi}{3}\right) \text{ V} \approx -135 \text{ V}$$

上式中负号表示交流电压的方向与规定的正方向相反,该点在波形图 2.6(b) 的负半周上。

2. 波形图表示法

在平面直角坐标系中用正弦曲线来表示交流电的方法称为波形图表示法,如图 2.8 所示。图中横坐标表示时间 t 或角度 ωt ,纵坐标表示随时间变化的电压(或电流、电动势)的瞬时值。

从波形图可以看出,振幅为交流电的最大值 U_m ,一个完整的正弦波对应的时间为交流电的一个周期 T , $t=0$ 时所对应的正弦波的相位是电压的初相 φ_u 。

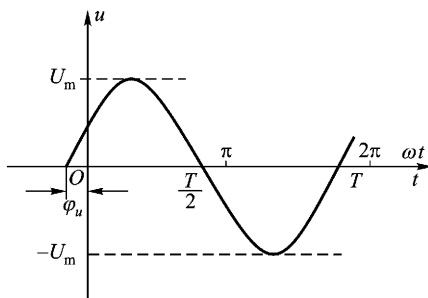


图 2.8 正弦交流电的波形图

3. 相量图表示法

正弦交流电可用一个旋转矢量来表示,以正弦电动势 $e = E_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ 为例,在平面直角坐标系中,从原点作一矢量,使其长度等于正弦交流电动势的最大值 E_m ,矢量与横轴 Ox 正方向的夹角等于正弦交流电动势的初相角 φ_0 ,矢量以角速度 ω 逆时针方向旋转,如图 2.9(a) 所示,这样旋转矢量在任一瞬间与横轴 Ox 正方向的夹角就是正弦交流电动势的相位 $\omega t + \varphi_0$,而旋转矢量在纵轴上的投影对应正弦交流电动势的瞬时值。例如,当 $t=0$ 时,旋转矢量在纵轴上的投影为 e_0 ,相当于图 2.9(b) 中电动势波形的 a 点,当 $t=t_1$ 时,矢量与横轴的夹角为 $\omega t_1 + \varphi_0$,矢量在纵轴上的投影为 e_1 ,相当于波形图的 b 点,矢量继续旋转下去,就可得到电动势 e 的波形图,如图 2.9(b) 所示。

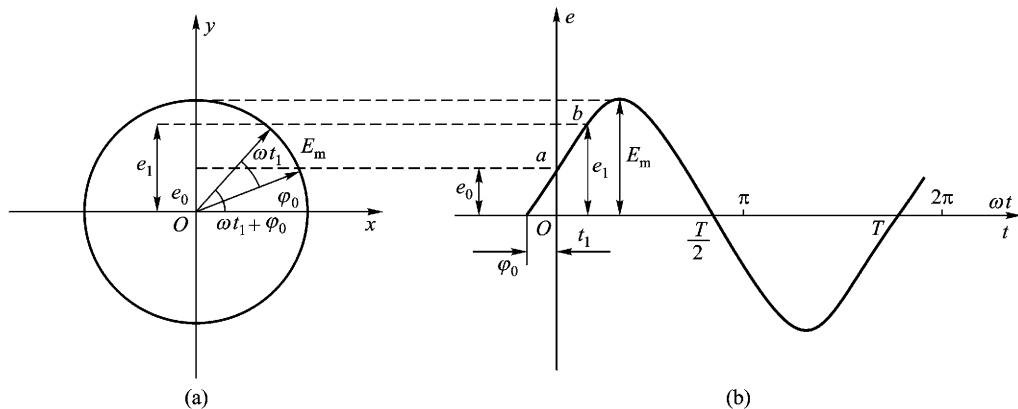


图 2.9 正弦交流电相量图

由此可见,一个正弦量可以用一个旋转矢量表示,矢量以角速度 ω 沿逆时针方向旋转,对于这样的矢量不可能也没有必要把它的每一个瞬间的位置都画出来,只要画出它的起始位置即可,因此一个正弦量只要它的最大值和初相确定后,表示它的矢量就可确定。

必须指出,表示正弦交流电的矢量与一般的空间矢量是不同的,它只是正弦量的一种表示方法,为了与一般的空间矢量相区别,通常把表示正弦交流电的这一矢量称为相量,并用大写字母上加黑点的符号来表示,如 $\dot{I}_m$ 和 $\dot{E}_m$ 分别表示电流相量和电动势相量。

同频率的几个正弦量的相量,可以画在同一个图上,称相量图。例如有三个同频率的正弦量

为 $e = 60\sin(\omega t + 60^\circ) \text{ V}$ $u = 30\sin(\omega t + 30^\circ) \text{ V}$ $i = 5\sin(\omega t - 30^\circ) \text{ A}$,它们的相量图如图 2. 10 所示。

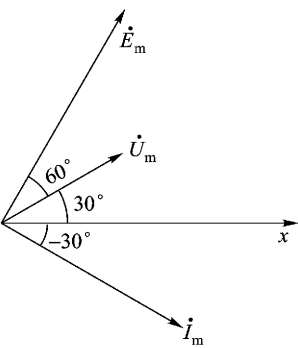


图 2. 10 相量图

2.2 单相交流电路

日常照明电路是单相交流电路 ,电路中的常见负载有白炽灯、日光灯、电炉、电动机等 ,可把它们归为电阻性、电感性或电容性负载来研究。最简单的交流电路是纯电阻、纯电感和纯电容电路。

2.2.1 纯电阻电路

负载只有电阻的电路称为纯电阻电路 ,白炽灯、电炉、电烙铁等可看作纯电阻负载 ,故这类用电器的电路可以看作是纯电阻电路 ,如图 2. 11(a)所示。

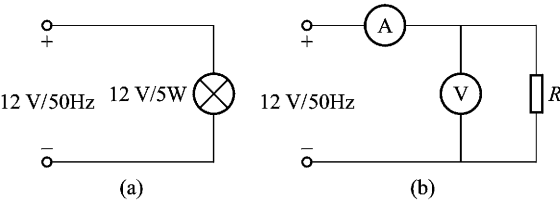


图 2. 11 白炽灯及其等效电路

1. 电阻上电压和电流的相位关系

给 12 V 5 W 的白炽灯通以 12 V 50 Hz 交流电 ,用示波器观察电路端电压和电流 ,发现两者波形步调完全一致 ,如图 2. 12 所示 ,说明纯电阻电路中的电流与电压同相。

图 2. 13 是纯电阻电路电压、电流的相量图。具体的画法为 :以电流为参考相量 ,水平向右画出(初相位为零) ,长度表示电流有效值。因电压与电流相位相同 ,所以电压相量也水平向右画出 ,长度表示电压有效值。

若已知电阻上电压的瞬时值表达式为

$$u = U_m \sin \omega t$$

则电阻中电流瞬时值表达式为

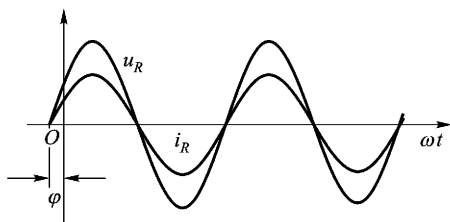


图 2.12 纯电阻电路电压、电流波形图

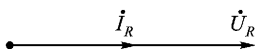


图 2.13 纯电阻电路电压、电流相量图

$$i = I_m \sin \omega t$$

2. 纯电阻电路的欧姆定律

在纯电阻电路中,电阻两端电压与电路中的电流有效值之间的关系为

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.11)$$

电压与电流最大值和瞬时值之间也有类似关系式

$$I_m = \frac{U_m}{R} \quad (2.12)$$

$$i = \frac{u}{R} \quad (2.13)$$

式(2.11)称为纯电阻电路的欧姆定律,该表达式与直流电路的欧姆定律表达式形式相同,只是公式中电压和电流分别是交流电的有效值。

例 2.3 在交流电路中接有一段电热丝,已知电热丝的电阻 $R = 100 \, \Omega$,交流电压表达式为 $u = 220\sqrt{2}\sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{2}\right) \text{ V}$,求(1)电路中电流有效值的大小(2)写出通过电热丝的电流瞬时值表达式。

解 由题意得电压有效值为

$$U = 220 \text{ V}$$

由欧姆定律得电流有效值为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{100} \text{ A} = 2.2 \text{ A}$$

电热丝可看作纯电阻电路,电流与电压同相,故电流解析式为

$$i = 2.2\sqrt{2}\sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{2}\right) \text{ A}$$

2.2.2 纯电感电路

1. 电感线圈与理想电感元件

把漆包线或纱包线逐圈绕制在绝缘骨架或铁心上,就可以形成电感线圈。电感线圈是电工技术中的一种重要元件,应用非常广,在交流电路中能够起到储存、转换能量及限流作用。绕制在铁磁材料上的称为铁心电感线圈,如变压器线圈、电动机线圈、接触器线圈、日光灯的镇流器线圈等,绕制在非铁磁性材料上的线圈称为空心电感线圈。

当电流通过线圈时在线圈周围就会产生磁场,线圈电流方向和磁场方向符合右手螺旋定则。如果线圈有 N 匝,并且绕得比较集中,可认为通过线圈各匝的磁通相同,线圈所有各匝磁通的总和称为磁链,表达式是

$$\Psi = N\Phi \quad (2.14)$$

式中, Ψ ——磁链,单位为韦[伯],符号为 Wb;

Φ ——磁通,单位为韦[伯],符号为 Wb。

通常,磁链或磁通是由通过线圈的电流产生的,当线圈中没有铁磁材料时,磁链与电流有正比关系,即

$$\Psi = N\Phi = Li \quad (2.15)$$

将上式变形为

$$L = \Psi/i = N\Phi/i \quad (2.16)$$

式中 L 称为线圈的电感,也称自感,是电感线圈的重要参数,电感的单位是亨[利],符号为 H。常用单位还有毫亨(mH)和微亨(μH),它们之间的关系为

$$1\text{ H} = 10^3\text{ mH} = 10^6\text{ }\mu\text{H}$$

空心电感线圈的电感是一个常数,这样的电感称为线性电感。线性电感的大小只与线圈的形状、尺寸、匝数有关,与线圈中有无电流或电流的大小均无关。

铁心电感线圈的电感不是一个常数,它随线圈中的电流变化而变化,因此铁心电感线圈是一种非线性电感元件,在规格相同的情况下,铁心线圈的电感比空心线圈的电感大得多。

实际的空心电感线圈由于由导线绕制,故总是存在一定的内阻,若忽略电阻的空心电感元件,则称为理想电感元件或纯电感元件,其图形符号如图 2.14(a)所示。

2. 自感现象和自感电动势

当流过电感线圈中的电流大小发生变化时,线圈中会产生感应电动势,这是一种特殊的电磁感应现象,产生的感应电动势称为自感电动势,自感电动势的大小与流过电感线圈的电流变化率成正比,比例系数为电感线圈的电感,表达式为

$$e_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (2.17)$$

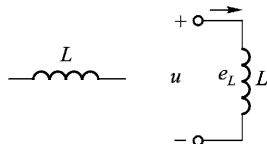
式中, L ——线圈的电感量,单位为亨[利],符号为 H;

$\frac{\Delta i}{\Delta t}$ ——线圈中电流的变化率,单位为安/秒,符号为 A/s。

式(2.17)中的负号表示自感电动势总是阻碍引起自感电动势的电流的变化。

从上式可知,当流过线圈的电流发生急剧变化时,线圈两端会产生很高的自感电动势,日光灯就是利用该原理点亮的,如图 2.15 所示。

图 2.15(a)所示为日光灯电路,当电源开关 S 闭合时,交流电压经镇流器和灯管两端的灯丝,加在启辉器两端,启辉器是一只充有氖气的玻璃泡,其内部构造如图 2.15(b)所示。当 220 V 交流电压加在 U 形触片与静触片之间时,氖泡中的氖气被击穿产生辉光放热,氖泡中的 U 形触片受热形变弯曲后与静片接触,使电路接通。此时,双金属片冷却并与静片断开,在断开的瞬时,



(a) 图形符号 (b) 参考方向

图 2.14 电感元件及参考方向

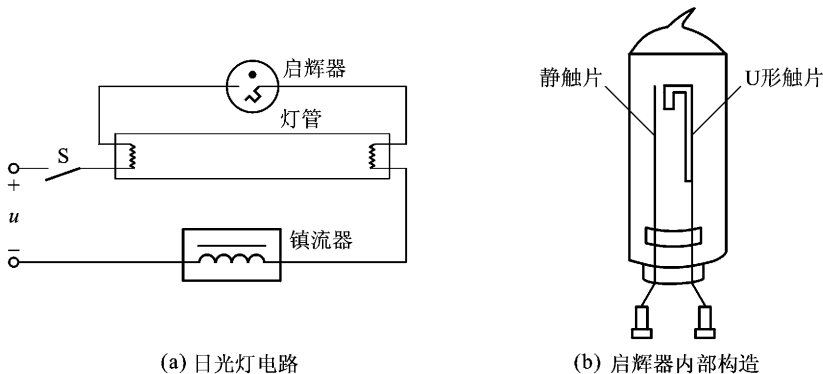


图 2.15 日光灯工作原理

镇流器中的电流突然减为零,这时镇流器线圈中会产生很高的自感电动势,这个瞬时高压通过灯管两端的灯丝使灯管内的水银蒸发为水银蒸气,水银蒸气导电,发出紫外线,使得灯管壁上的荧光粉发出白光。日光灯发光后,其正常工作电压低于 220 V,此时镇流器就起到限流作用。

由于电感线圈产生自感电动势,则线圈两端就会产生一定的电压,其参考方向如图 2.14(b)所示,电压与电流参考方向一致,电流所产生的磁通由右手螺旋定则决定,而自感电动势的参考方向与磁通的方向之间也符合右手螺旋定则,故 e_L 的参考方向与线圈的电流方向一致。

根据基尔霍夫电压定律便可写出

$$u + e_L = 0$$

或

$$u = -e_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

这就是电感元件上的电压与通过的电流之间的关系式。

3. 感抗

将理想的电感元件即纯电感接入交流电路中就构成了纯电感电路。

电感器对交流电的阻碍作用称为感抗,用符号 X_L 表示。电感线圈的感抗与它的电感量以及交流电的频率成正比,即

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (2.18)$$

式中, X_L ——为线圈的感抗,单位为欧姆,符号为 Ω 。

4. 纯电感电路中电压与电流的关系

(1) 电压与电流的相位关系

如图 2.16 所示的电路中,使用 1 ~ 10 Hz 低频交流信号源加在电感线圈两端,用双向电压表和电流表来观测电感两端的电压和流过电路的电流,可以发现电流表和电压表指针摆动的步调是不一致的,即电压与电流之间存在着相位差。借助示波器可以清楚地看到:电感两端的电压超前电流 90° ,如图 2.17 所示。

纯电感电路电压、电流相量图如图 2.18 所示,以电流为参考相量,电压超前电流 90° ,由于规定相量是按逆时针旋转的,则电压相量应垂直电流相量向上画出。

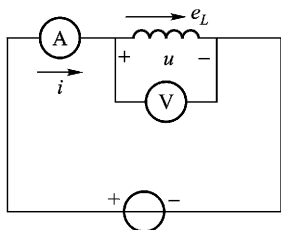


图 2.16 纯电感电路

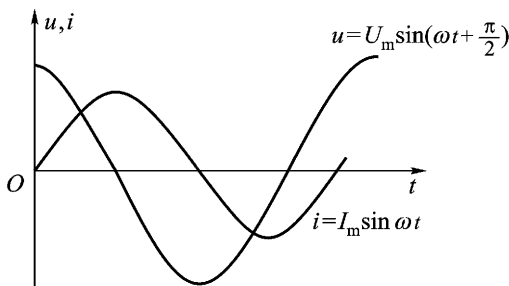


图 2.17 纯电感电路电压、电流波形图

设电感器中电流表达式为

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0)$$

因电压超前电流 $\frac{\pi}{2}$, 故电压表达式为

$$u = U_m \sin\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right)$$

图 2.18 纯电感电路
电压、电流相量图

(2) 纯电感电路的欧姆定律

保持交流电频率不变(则感抗 X_L 不变), 只改变电感两端电压有效值 U , 通过电感的电流有效值 I 也随之变化。经研究证明: 流过电感器的电流与电感器两端的电压成正比, 与感抗成反比, 即

$$I = \frac{U}{X_L} \quad (2.19)$$

这个关系式称为纯电感电路的欧姆定律。

例 2.4 已知电感线圈的自感系数 $L = 2.5 \text{ mH}$, 加在线圈两端的交流电压为 $u = 15\sqrt{2}\sin\left(500\pi t + \frac{\pi}{3}\right) \text{ V}$, 求 (1) 线圈的感抗 X_L 及通过该线圈的电流有效值 I (2) 电路中电流的瞬时值表达式。

解 (1) 由题意得

$$X_L = 2\pi fL = 500 \times 3.14 \times 2.5 \times 10^{-3} \Omega = 3.925 \Omega$$

线圈中电流有效值为

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{15}{3.925} \text{ A} \approx 3.8 \text{ A}$$

(2) 纯电感电路中电流滞后电压 $\frac{\pi}{2}$, 故电流的初相位为

$$\varphi_i = \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{2} = -\frac{\pi}{6}$$

电流瞬时值表达式为

$$i = 3.8\sqrt{2}\sin\left(500\pi t - \frac{\pi}{6}\right) \text{ A}$$

2.2.3 纯电容电路

负载只有电容的电路称纯电容电路,如图 2.19 所示。电容器对交流电的阻碍作用称为容抗,用符号 X_C 表示。

1. 电容器的容抗

电容器具有隔直流、通交流的作用。其容抗的大小与电容器容量和交流电角频率的乘积成反比,即

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.20)$$

2. 电压与电流的相位关系

通过示波器,可以看出电容器两端的电压与电流频率相同但相位不同。纯电容电路中,电流超前电压 90° ,电压和电流的波形如图 2.20 所示。

图 2.21 是纯电容电路中电压、电流的相量图,以电流为参考相量,因电压滞后电流 90° ,故电压相量应垂直向下画出,有向线段的长度分别表示电压和电流有效值的大小。

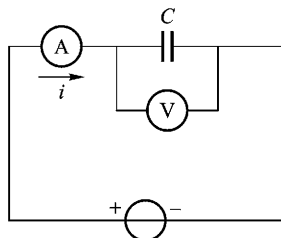


图 2.19 纯电容电路

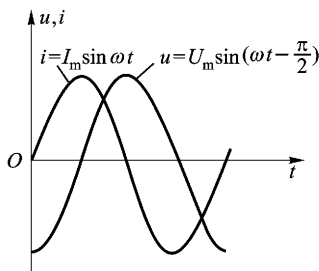


图 2.20 纯电容电路电压、电流波形图

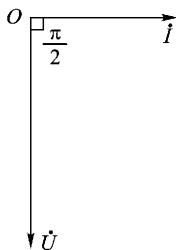


图 2.21 纯电容电路电压、电流相量图

设电路中的电流表达式为

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0)$$

则电压表达式为

$$u = U_m \sin\left(\omega t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}\right)$$

3. 纯电容电路的欧姆定律

在图 2.19 所示的电路中,保持交流电的频率不变,改变电容两端的交流电压有效值,电路中的电流有效值会随之发生变化,实验表明,在纯电容电路中,电流与电压成正比,与容抗成反比。即

$$I = \frac{U}{X_C} \quad (2.21)$$

这是纯电容电路中欧姆定律的表达式。

例 2.5 将容量 $C = 40 \mu\text{F}$ 的电容器接到 $u = 220 \sqrt{2} \sin\left(100\pi t - \frac{\pi}{3}\right) \text{ V}$ 的交流电源上,试求:

(1) 电容的容抗 X_C (2) 电流的有效值的大小 (3) 瞬时值表达式 (4) 作出电压和电流的相量图。

解 (1) 容抗为

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \times 40 \times 10^{-6}} \Omega \approx 80 \Omega$$

(2) 电压有效值为

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{220\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \text{ V} = 220 \text{ V}$$

则电流有效值为

$$I = \frac{U}{X_C} = \frac{220}{80} \text{ A} = 2.75 \text{ A}$$

(3) 电流的初相位

$$\varphi_i = \varphi_u + \frac{\pi}{2} = -\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{6}$$

故电流的瞬时值表达式为

$$i = 2.75\sqrt{2}\sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{6}\right) \text{ A}$$

(4) 电压、电流相量图如图 2.22 所示。

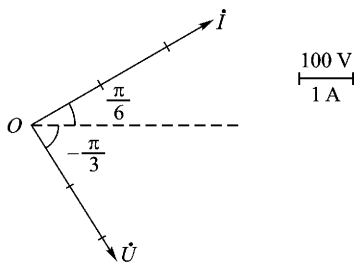


图 2.22 例 2.5 图

2.2.4 RLC 串联电路

由电阻、电感和电容串联组成的电路称为 RLC 串联电路,如图 2.23 所示。这种电路由于含有 R 、 L 、 C 三个参数,所以是最具有一般意义的串联电路。

设图 2.23 所示电路中通过的正弦交流电流为

$$i = I_m \sin \omega t$$

因为电阻两端的电压 u_R 与电流 i 同相,所以有

$$u_R = RI_m \sin \omega t = U_m \sin \omega t$$

电感两端的电压超前电流 $\frac{\pi}{2}$,所以

$$u_L = X_L I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_{Lm} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

电容两端的电压滞后电流 $\frac{\pi}{2}$,所以

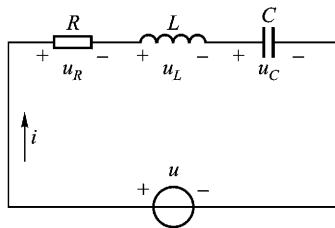


图 2.23 RLC 串联电路

$$u_C = I_m X_C \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = U_{Cm} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

电路的端电压为

$$u = u_R + u_L + u_C$$

1. 端电压与电流的相位关系

串联电路中的电流处处相等,以电路中的电流为参考相量作相量图,由前面知识可知,各元件上的电压与电流的相位关系是 u_R 与 i 同相, u_L 超前于电流 90° , u_C 滞后于电流 90° 。电感上的电压与电容上的电压是反相的,故 RLC 串联电路的性质主要是由这两个电压分量的大小来决定的。

① 当 $X_L > X_C$ 时,则 $u_L > u_C$,端电压应为三个电压 $\dot{U}_R$ 、 $\dot{U}_L$ 、 $\dot{U}_C$ 的相量和,如图 2.24(a)所示,端电压 u 较电流 i 超前一个小于 90° 的 φ 角,电压超前电流的电路称为感性电路。端电压 u 与电流 i 的相位差为

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i = \arctan \frac{U_L - U_C}{U_R} > 0$$

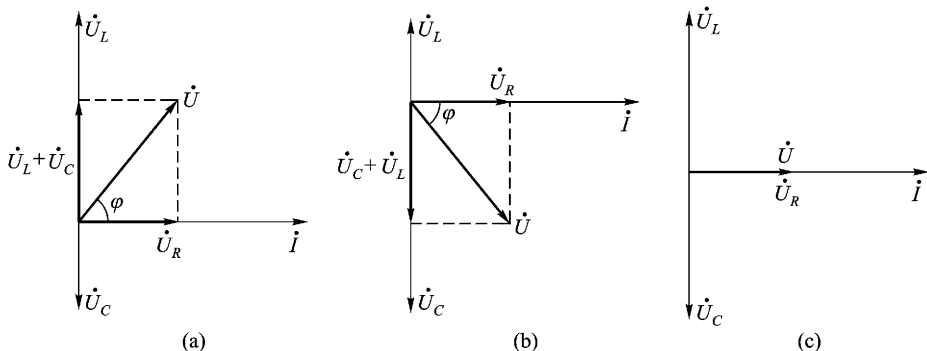


图 2.24 RLC 串联电路相量图

② 当 $X_L < X_C$ 时, $u_L < u_C$,它们的相量关系如图 2.24(b)所示,端电压 u 总滞后电流 i 一个小于 90° 的 φ 角,电压滞后电流的电路称为容性电路。端电压 u 与电流 i 的相位差为

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i = \arctan \frac{U_L - U_C}{U_R} < 0$$

③ 当 $X_L = X_C$ 时,电感两端电压与电容两端电压大小相等、相位相反,相互抵消,故端电压就等于电阻两端电压,端电压 u 与电流 i 的相位差为

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 0$$

电压与电流同相时,电路呈电阻性,电路的这种状态称为串联谐振,相量关系如图 2.24(c)所示。

2. RLC 串联电路的欧姆定律

由图 2.24(a)可以看出,电路的端电压 $\dot{U}$ 与各分电压 $\dot{U}_R$ 、 $\dot{U}_L$ 、 $\dot{U}_C$ 构成一个直角三角形,称为电压三角形,端电压 $\dot{U}$ 为直角三角形的斜边,直角边由两个分量组成,一个分量是与电流相位相同的分量,也就是电阻两端的电压 $\dot{U}_R$;另一个分量是与电流相位差为 90° 的分量,也就是电感与

电容两端电压之差 $U_L - U_C$ 。

由电压三角形可得到 端电压有效值与各分电压有效值的关系是相量和 ,而不是代数和 ,即

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \quad (2.22)$$

将 $U_R = RI$, $U_L = X_L I$, $U_C = X_C I$ 代入上式 ,得

$$U = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} I = |Z| I$$

或

$$I = \frac{U}{|Z|} \quad (2.23)$$

式 (2.23) 是 RLC 串联电路中欧姆定律的表达式 ,其中

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2.24)$$

称为电路的阻抗 ,单位是 Ω 。

感抗与容抗统称为电抗 ,用 X 表示 ,即

$$X = X_L - X_C$$

电抗的单位也是 Ω ,因此又有

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.25)$$

将电压三角形各边同除以电流 I 可得到阻抗三角形 ,斜边为阻抗 $|Z|$,直角边为电阻 R 和电抗 X ,如图 2.25 所示。

$|Z|$ 和 R 两边的夹角 φ 称为阻抗角 ,它也等于端电压和电流的相位差 ,即

$$\varphi = \arctan \frac{X_L - X_C}{R} = \arctan \frac{X}{R} \quad (2.26)$$

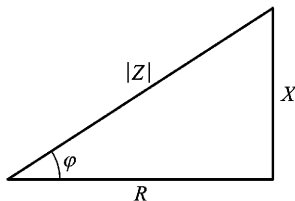


图 2.25 阻抗三角形

3. RLC 串联电路的两个特例

① 当电路中 $X_C = 0$,即 $U_C = 0$,这时电路就是 RL 串联电路 ,相量图如图 2.26(a) 所示。

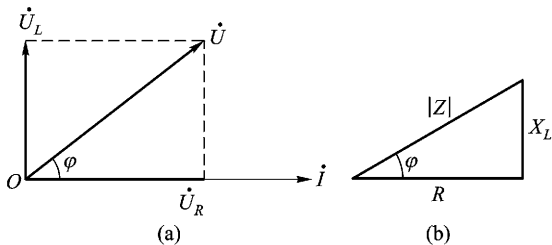


图 2.26 RL 串联电路相量图和阻抗三角形

RL 串联电路端电压与电流的数值关系为

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{R^2 + X_L^2} I = |Z| I$$

或

$$I = \frac{U}{|Z|}, |Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (2.27)$$

这就是 RL 串联电路中的欧姆定律的表达式。

由图 2.26(b)可知阻抗角为

$$\varphi = \arctan \varphi = \arctan \frac{X_L}{R} \quad (2.28)$$

例 2.6 交流电路中电感线圈的电阻不能忽略时,可看作是 RL 串联电路。有一个电感线圈,用万用表电阻挡测其电阻为 220Ω ,把它接在 220 V 、 50 Hz 的交流电源上,电流为 0.5 A ,求线圈的电感量。

解 串联电路的阻抗为

$$|Z| = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.5} \Omega = 440 \Omega$$

又因为 $|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2}$, 则感抗为

$$X_L = \sqrt{|Z|^2 - R^2} = \sqrt{440^2 - 220^2} \Omega \approx 381 \Omega$$

根据公式 $X_L = 2\pi fL$, 得自感系数

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{381}{2 \times 3.14 \times 50} \text{ H} \approx 1.2 \text{ H}$$

② 当电路中 $X_L = 0$, 即 $U_L = 0$, 这时电路就是 RC 串联电路, 其相量图如图 2.27(a)所示。 RC 串联电路端电压与电流的数值关系为

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} = \sqrt{R^2 + X_C^2} I = |Z| I$$

或

$$I = \frac{U}{|Z|}, |Z| = \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad (2.29)$$

这就是 RC 串联电路中欧姆定律的表达式。

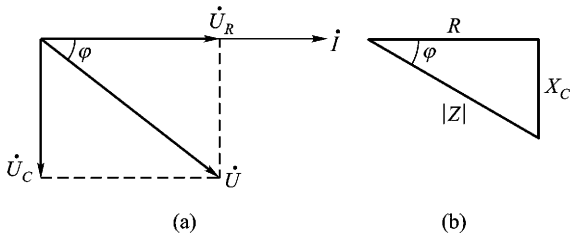


图 2.27 RC 串联电路相量图和阻抗三角形

由图 2.27(b)可得阻抗角为

$$\varphi = \arctan \frac{X_C}{R} \quad (2.30)$$

例 2.7 在图 2.28(a)所示的 RC 串联电路中,已知输入电压频率为 800 Hz , $C = 0.046 \mu\text{F}$,需要输出电压 u_o 较输入电压 u 滞后 30° ,求电阻的数值应为多少?

解 画出电流和各元件两端电压的相量图,如图 2.28(b)所示,因 u_o 较 u 滞后 30° ,所以,端电压和电流的相位差为

$$\varphi = 90^\circ - 30^\circ = 60^\circ$$

因为

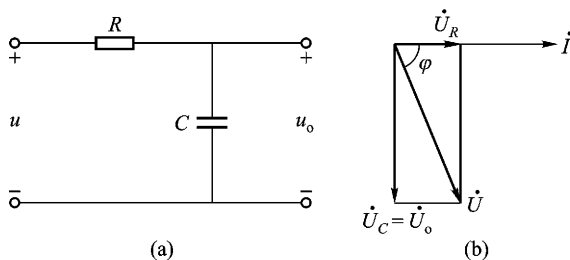


图 2.28 例 2.7 图

$$\tan \varphi = \frac{X_C}{R}$$

所以

$$R = \frac{X_C}{\tan \varphi} = \frac{1}{2\pi f C \tan \varphi} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 800 \times 0.046 \times 10^{-6} \times \tan 60^\circ} \Omega \approx 2.5 \text{ k}\Omega$$

2.2.5 交流电路的功率

电功率等于电压与电流的乘积,在交流电路中,电压和电流是不断变化的,因此将电压瞬时值 u 与电流瞬时值 i 的乘积称为瞬时功率,用小写字母 p 来表示,即

$$p = ui \quad (2.31)$$

1. 纯电阻电路的功率

在纯电阻电路中,设 $u = U_m \sin \omega t$, $i = I_m \sin \omega t$,瞬时功率为

$$p = ui = U_m \sin \omega t \times I_m \sin \omega t$$

画出 u 、 i 和 p 三者的波形,如图 2.29 所示。从函数式和波形图均可看出:由于电压与电流同相,两者的乘积总为正值。这表示电阻总是消耗功率,把电能转换为热能,这种能量转换是不可逆的。

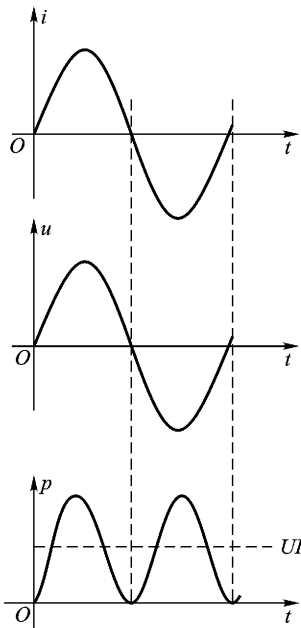
瞬时功率是不断变化的,不便于表示电路的功率,为了反映电阻消耗功率的大小,在实用中常用有功功率(也称平均功率)来表示。所谓有功功率就是瞬时功率在一个周期内的平均值,用大写字母 P 表示,有功功率的单位是 W(瓦)。由图 2.29 的功率曲线可以看出,在一个周期内位于功率曲线中水平虚线 UI 上方的面积与下方的面积是相等的,即有功功率 P 为

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R} \quad (2.32)$$

通常所说电器消耗的功率,例如 40 W 白炽灯,100 W 电烙铁等都是指有功功率。

2. 纯电容电路的功率

在纯电容电路中,设 $u = U_{Cm} \sin \omega t$,则 $i = I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$,瞬时功率为

图 2.29 纯电阻电路的
电流、电压和功率

$$\begin{aligned}
 p &= ui = U_{cm} \sin \omega t I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \frac{1}{2} U_{cm} I_m \sin 2\omega t = \frac{\sqrt{2} U_c \sqrt{2} I}{2} \sin 2\omega t \\
 &= U_c I \sin 2\omega t
 \end{aligned}$$

结果表明:瞬时功率是正弦函数,因此瞬时功率的平均值为零,即 $P=0$,说明电容元件不消耗有功功率。

图 2.30 是纯电容电路中 u 、 i 和 p 的波形。由图可以看出,功率曲线一半为正,一半为负,这说明电容器是一种储能元件; p 为正值时,电容器从电源吸收能量储存在电容器内部,此时电容器两端的电压增加; p 为负值时,电容器将存储的电能量释放给电源,此时电容器两端的电压减小。在一个周期内电容从电源吸收的能量与释放给电源的能量相等。

纯电容电路中,瞬时功率的最大值 $U_c I$ 称为无功功率,它表示电容与电源之间能量交换的规模,用 Q_c 来表示,单位是乏(var),即

$$Q_c = U_c I = X_c I^2 \quad (2.33)$$

3. 纯电感电路的功率

在纯电感电路中,设 $i = I_m \sin \omega t$,则 $u = U_{Lm} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$,功率的瞬时值表达式为

$$p = ui = I_m \sin \omega t U_{Lm} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \frac{1}{2} U_{Lm} I_m \sin 2\omega t = U_L I \sin 2\omega t$$

其电流、电压和功率的波形如图 2.31 所示。

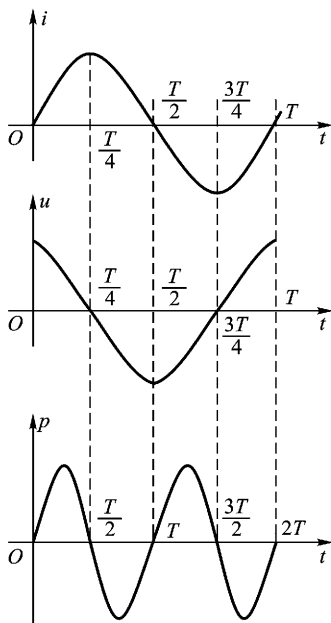
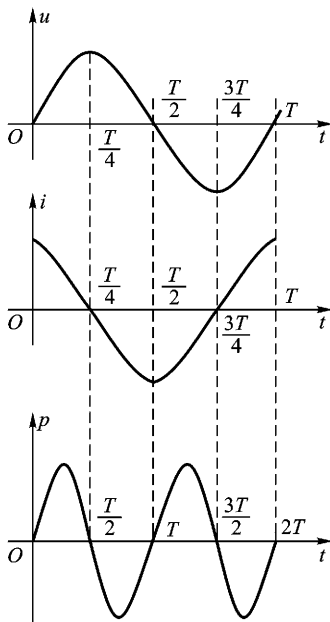


图 2.30 纯电容电路的电压、电流和功率波形

图 2.31 纯电感电路的电流、电压和功率波形

结果表明:瞬时功率也是正弦函数,其平均值为零,即 $P=0$,说明电感线圈不消耗有功功率,只是在线圈与电源之间进行着可逆的能量交换。

把瞬时功率的最大值称为无功功率,它表示电感线圈与电源之间能量交换的规模,用符号

Q_L 表示,单位是乏(var),其大小为

$$Q_L = U_L I = X_L I^2 \quad (2.34)$$

无功功率并不是“无用”功率,电感负载与电源之间的能量相互转换是正常工作时所必需的。具有电感性质的变压器、电动机等设备都是靠电磁转换工作的,没有电源和磁场间能量的不断转换,这些设备就无法工作。冠以“无功”二字的含义是说这部分电能没有被消耗掉,只是被电感器所占用。

4. RLC 串联电路的功率

在 RLC 串联电路中,只有电阻消耗功率,电容和电感都不消耗功率,因此 RLC 串联电路中的有功功率就是电阻消耗的有功功率,即

$$P = U_R I \quad (2.35)$$

由图 2.24(a)可知,电阻两端的电压和总电压的关系为

$$U_R = U \cos \varphi$$

所以电路的有功功率为

$$P = UI \cos \varphi \quad (2.36)$$

根据前面的分析知道,交流电路中,电容与电感要储存和释放能量,因此它们与电源之间要进行能量交换,其相应的无功功率由式(2.33)和式(2.34)得

$$Q = U_L I - U_C I = (U_L - U_C) I = (X_L - X_C) I^2 = UI \sin \varphi \quad (2.37)$$

在交流电路中,总电压有效值与电流有效值的乘积称为视在功率,它表示电源提供的总功率。视在功率用符号 S 表示,即

$$S = UI \quad (2.38)$$

视在功率的单位是 $V \cdot A$ 。将图 2.24(a)中的电压三角形的三边同时乘以电流有效值 I ,就可以得到由视在功率 S 、有功功率 P 和无功功率 Q 组成的功率三角形。功率三角形是直角三角形,它们之间的关系为

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.39)$$

在 RLC 串联电路中,当 $X_L \neq X_C$ 时, $\cos \varphi \neq 1$,由式(2.36)可知,电路所消耗的功率即有功功率总小于视在功率;当 $X_L = X_C$ 时, $\varphi = 0$,则 $\cos \varphi = 1$,电路消耗的功率与视在功率相等,这表明电路中电容、电感储存和释放的能量只在电容与电感之间交换,电容、电感与电源之间不交换能量,此时,电路为电阻性;当 $R = 0$ 时, $\varphi = \frac{\pi}{2}$ 或 $-\frac{\pi}{2}$, $\cos \varphi = 0$,电路的有功功率等于零,这时电路不消耗能量,只有电容或电感与电源之间进行能量的转换。

2.2.6 提高功率因数

1. 功率因数

有功功率 P 与视在功率 S 的比值 $\cos \varphi$ 称为电路的功率因数,即

$$\lambda = \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2.40)$$

功率因数的大小是表示电源功率被利用的程度,因为任何发电机都只能工作在额定电压和额定电流范围内,即额定视在功率以内,电路的功率因数越大,表示电源所发出的电能转换为热

能或机械能越多,而与电容或电感之间相互交换的能量就越少,由于交换的这一部分能量没有被利用,因此功率因数越大,说明电源的利用率越高。同时,在同一电压下,要输送同一功率,功率因数越高,则线路中电流越小,故线路中的损耗也越小。

2. 提高功率因数的方法

实际的用电设备大部分是感性负载,功率因数不高,如电动机、变压器、电焊机等,它们可以等效为 RL 串联电路,在其两端并联一只电容量适当的电容器,用容性负载补偿感性负载,从而提高电路的功率因数,如图 2.32 所示。

下面分析并联电容为什么能提高功率因数。图 2.33 所示是 RL 与 C 并联电路的相量图。总电流 $\dot{I}$ 可由电容支路 $\dot{I}_C$ 与电感(RL)支路 $\dot{I}_L$ 按相量求和得出,由图可以看出:并联电容后,总电流 $\dot{I}$ 与端电压的夹角变小了,即 $\varphi < \varphi_1$,故 $\cos \varphi > \cos \varphi_1$,电路的功率因数提高了,且并联电容后,负载从电源索取的总电流比并联电容前也减小了。

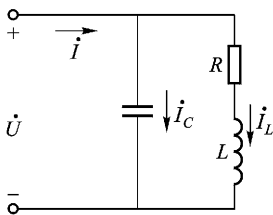


图 2.32 RL 与 C 并联电路

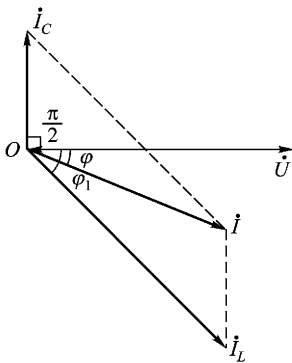


图 2.33 RL 与 C 并联电路相量图

因为 $P = UI \cos \varphi$, 所以

$$I_L = \frac{P}{U \cos \varphi_1} \quad I = \frac{P}{U \cos \varphi}$$

由图 2.33 可得

$$\begin{aligned} I_C &= I_L \sin \varphi_1 - I \sin \varphi = \frac{P}{U \cos \varphi_1} \sin \varphi_1 - \frac{P}{U \cos \varphi} \sin \varphi \\ &= \frac{P}{U} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi) \end{aligned}$$

又因为

$$I_C = \frac{U}{X_C} = U \omega C$$

所以用来提高功率因数的电容为

$$C = \frac{P}{U^2 \omega} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi) \quad (2.41)$$

式中, φ_1 ——并联电容前电路的阻抗角;

φ ——并联后电路的阻抗角。

例 2.8 将一个有功功率为 10 kW, 功率因数为 0.6 的感性负载接到电压有效值为 220 V, 频率为 50 Hz 的电源上, 要将功率因数提高到 0.95, 感性负载上需并联多大的电容器, 并求电容器并联前后电路总电流的有效值?

解 由 $\cos \varphi_1 = 0.6$, $\cos \varphi = 0.95$, 查表可得 $\varphi_1 = 53^\circ$, $\varphi = 18^\circ$, 则并联电容

$$C = \frac{P}{U^2 2\pi f} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi) = \frac{10 \times 10^3}{220^2 \times 2 \times 3.14 \times 50} (\tan 53^\circ - \tan 18^\circ) \text{ F} = 656 \mu\text{F}$$

并联电容器前电路中的总电流为电感支路的电流, 则

$$I_L = \frac{P}{U \cos \varphi_1} = \frac{10 \times 10^3}{220 \times 0.6} \text{ A} = 75.6 \text{ A}$$

并联电容器后电路中的总电流为

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{10 \times 10^3}{220 \times 0.95} \text{ A} = 47.8 \text{ A}$$

可以看出: 并联电容后, 由于电容中无功电流与电感支路无功电流相互补偿, 电路的总电流反而减小了。

2.3 示波器及其使用

示波器可用来帮助分析电路中的电压或电流, 比较它们之间的大小和相位之间的关系。另外示波器也可用来测量电压或电流的幅度、频率、相位、调制度及脉冲信号的各种电参量。它是电工、电子实验中必不可少的电子仪器。

示波器有通用示波器和专用示波器两大类。按功能又可分为: 高频和低频示波器, 单踪、双踪和多踪示波器等, 它们的基本结构和工作原理基本相同。

2.3.1 通用示波器简介

1. 通用示波器基本结构

示波器由示波管、垂直偏转系统、水平偏转系统、扫描发生器、同步触发放大器及电源等部分组成。示波器的核心是示波管, 如图 2.34 所示。它是利用电子束在电场中偏转的原理工作的。

电子枪发射电子束, 经第一阳极聚焦、第二阳极加速后轰击荧光屏发光。改变电子枪加速阳极及调制极电位, 可以起到聚焦、亮度调节和辉度调节等作用, 使图形显示更清晰。

偏转系统由水平偏转(X 轴)和垂直偏转(Y 轴)组成, 被测信号经放大后加在 Y 轴偏转板上, 锯齿波扫描电压加在 X 轴偏转板上时, 电子束则在垂直方向和水平方向发生偏转。

荧光屏内壁涂有荧光物质, 在高速电子束轰击下发光形成光点, 当电子束在偏转系统的作用下发生偏转时, 信号的波形就通过光点的移动轨迹而显示在荧光屏上。

2. 通用示波器面板简介

图 2.35 是通用示波器的面板, 各开关、旋钮等的作用如下:

- ① 电源开关: 开关拨向“开”, 电源接通, 指示灯亮。
- ② 辉度调节: 用来调节图像的亮度。

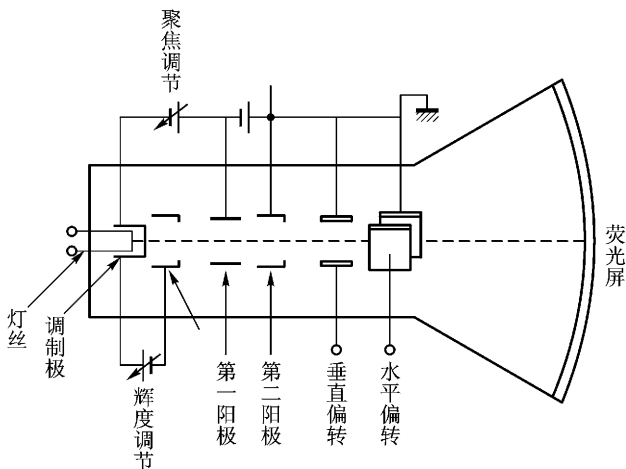


图 2.34 示波管基本构造

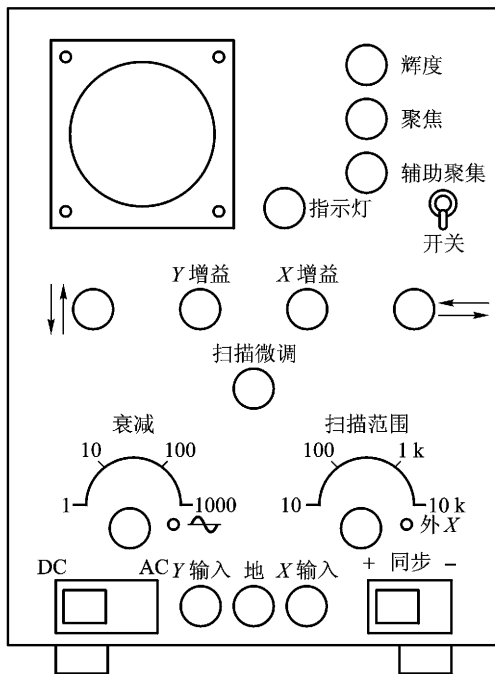


图 2.35 通用示波器面板

③ 聚焦调节 :调节示波器中电子束的焦距 ,使其焦点恰好会聚于屏幕上 ,显现的光点成为清晰的圆点 ,得到清晰的图像。

④ 辅助聚焦 :控制光点在有效工作面内的任意位置上散焦最小 ,与聚焦调节旋钮配合使用。

⑤ 垂直位移 $\downarrow \uparrow$:调节屏幕上光点或信号波形在垂直方向移动。

⑥ 水平位移 $\rightleftarrows$:调节屏幕上光点或信号波形在水平方向移动。

⑦ Y 增益 :垂直放大器增益微调 ,调整图像在垂直方向的幅度。

⑧ X 增益 :控制水平方向扫描迹线长度 ,即水平方向的幅度。

⑨ 衰减 : Y 输入信号衰减 ,可根据被测信号的大小选择 ,使屏幕上得到幅度合适的图像显示。“衰减”分“1”“10”“100”“1 000”四挡 ;“1”不经过衰减 ;“10”“100”“1 000”分别衰减到 $\frac{1}{10}$ 、 $\frac{1}{100}$ 、 $\frac{1}{1\,000}$ 。在“1”位置时 ,试验信号直接送到垂直放大器 ,荧光屏上显示正弦波形。

⑩ 扫描范围 :扫描范围控制开关 ,它可以改变加在水平方向扫描电压的频率范围 ,使波形在 X 轴方向拉伸或压缩。“扫描范围”共分10~100 Hz、100 Hz~1 kHz、1~10 kHz、10~100 kHz 四挡。当置于“外 X ”挡时 ,扫描发生器停止工作 ,外接信号可经“ X 输入”端直接送入水平放大器。

⑪ Y 输入 :垂直方向被测信号输入接线柱。

⑫ X 输入 :水平方向被测信号输入接线柱。

⑬ 地 :公共接地的输入接线柱。

⑭ DC/AC :垂直方向输入信号的直流、交流选择开关 ,置“DC”时 ,被测信号直接输入 ,适用于观察各种信号成分 ;置“AC”时 ,被测信号经电容器耦合输入 ,只能输入交流信号。

2.3.2 通用示波器的使用

1. 观察正弦交流电波形

用示波器观察正弦交流电波形的操作步骤如下 :

- ① 打开示波器电源开关 ,预热1~2 min 后 ,屏幕出现光点或光迹。
- ② 调节水平位移和垂直位移旋钮 ,使光点或光迹移到屏幕中央。
- ③ 将示波器的“ Y 输入端”接地 ,调节 X 轴增益旋钮 ,使光点在水平方向拉伸为一条刚好占据整个显示器水平方向的亮线。
- ④ 调节亮度和聚焦调节旋钮 ,使水平亮线亮度和粗细最佳。
- ⑤ 将被测交流信号电压一端接“ Y 输入” ,另一端接“地端”。
- ⑥ 调节 Y 轴增益 ,使正弦波的幅度适当。
- ⑦ 调节扫描范围旋钮 ,使正弦波的波形在水平方向被拉开 ,呈现完整正弦波曲线。
- ⑧ 根据扫描范围旋钮和 Y 轴增益旋钮观测正弦波的周期、频率以及电压幅值。
- ⑨ 实验完毕 ,将辉度钮逆时针旋到底 ,然后关机 ,切断电源。

2. 波形幅值的测量

示波器可以用来测量波形幅值的大小。测量时 ,将“ Y 增益”旋钮顺时针旋到底 ,即 Y 增益最大 ,这时 ;“ Y 衰减”拨至“1”、“10”、“100”、“1 000” ,则荧光屏坐标上每大格分别表示50 mV、0.5 V、5 V、50 V。

将待测信号从“ Y 输入”与“地”端输入 ,调节“扫描微调” ,使波形稳定 ,再根据波形显示的格数读被测波形的幅值。如图2.36(a)所示的波形 ,其峰峰间的读数为3.6格 ;“ Y 衰减”拨在“10”挡 ,则被测波形峰峰值

$$U_{pp} = 0.5 \times 3.6 \text{ V} = 1.8 \text{ V}$$

当被测信号中含有直流电压时 ,此直流电压也可以测出。测量前 ,先要确定荧光屏上零电位的位置 ,在“ Y 输入”与“地”端用导线短接 ,输入耦合拨至“DC” ,此时荧光屏上扫描线的位置为

零电位。为了便于读数,可将零电位扫描线的位置调至线格上,然后再将被测信号接入。图 2.36(b)是被测信号在荧光屏上的显示图;“Y 衰减”在“100”挡,零电位扫描线在中间往下 2 格处,则被测信号直流分量的读数为 3 格,直流分量的大小为

$$U_D = 5 \times 3 \text{ V} = 15 \text{ V}$$

交流分量峰峰值的读数为 2 格,大小为

$$U_{pp} = 5 \times 2 \text{ V} = 10 \text{ V}$$

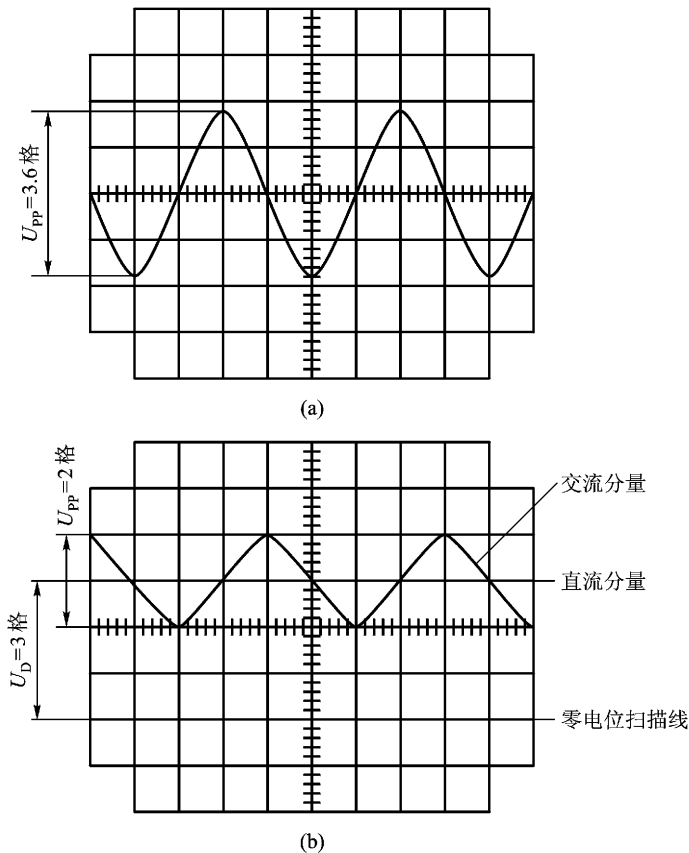


图 2.36 波形幅值的测量

示波器还可以比较两个信号之间的频率及相位关系,有兴趣的读者可以参阅有关书籍。

2.4 三相交流电路

三相交流电在工农业生产和生活中都有十分重要的地位,三相异步电动机就是使用三相交流电工作的,本节主要讨论三相交流电的产生及主要特性。

2.4.1 三相交流电动势的产生

三相交流电由三相交流发电机产生,发电机内有三相绕组,每相绕组是相同的,且三组线圈

平面互成 120° 角,如图 2.37(a)所示。当线圈匀速转动时,由于线圈平面位置的不同,它们产生的电动势在时间上按一定的次序先后达到最大值、零和负最大值。三个电动势的频率相同,最大值相等,仅初相不同。三相电动势的相量图如图 2.37(b)所示,波形图如图 2.38 所示。

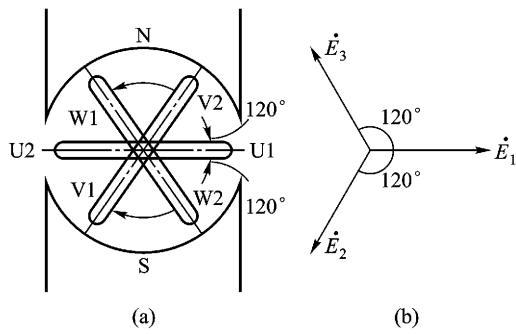


图 2.37 三相交流发电机构造

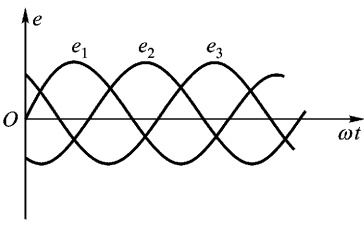


图 2.38 三相交流电动势波形

这种有效值相等、频率相同、相位彼此相差 120° 的三相电动势称为对称三相电动势,三个绕组分别用 U、V、W 来表示,电动势分别用 e_1 、 e_2 、 e_3 表示。设 U 相电动势的初相 φ_0 为 0° ,则 V 相的初相为 -120° ,W 相的初相为 120° ,所以各相电动势的表达式为

$$e_1 = E_m \sin \omega t$$

$$e_2 = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_3 = E_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

由上式和三相电动势相量图可以看出三相电动势的瞬时值或相量和为零,即

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0 \tag{2.42}$$

$$\dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dot{E}_3 = 0 \tag{2.43}$$

2.4.2 三相四线制输电

三相发电机的三相绕组按照一定的连接方式向外送电,其连接方法有两种,一种是星形(Y)联结,一种是三角形(Δ)联结。

1. 电源的星形联结

发电机三相绕组的末端 U2、V2、W2 连接在一起成为一个公共点,始端 U1、V1、W1 分别引出,这种连接方法称为三相电源绕组的星形(Y)联结,如图 2.39 所示。

三个末端连接在一起的点称为中性点,用“N”表示。由中性点引出的连线称为中性线,从始端 U1、V1、W1 引出的三根连线称为相线(俗称火线),这种供电方式称为三相四线制。

星形联结可以提供相电压和线电压两种电压。相电压为各相线与中性线之间的电压,线电压为两条相线之间的电压。

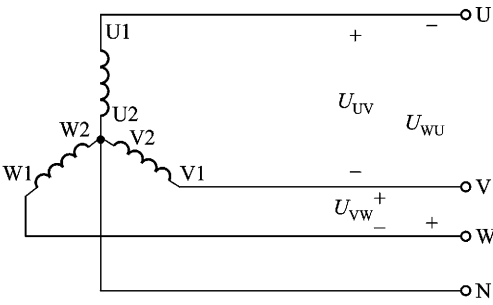


图 2.39 三相电源星形联结

相电压的有效值用 U_U 、 U_V 、 U_W 或一般用 U_P 表示,且满足

$$U_U = U_V = U_W = U_P$$

线电压的有效值用 U_{UV} 、 U_{VW} 、 U_{WU} 或一般用 U_L 表示,三个线电压的有效值大小也相等,即

$$U_{UV} = U_{VW} = U_{WU} = U_L$$

在三相四线制供电线路中,线电压有效值是相电压有效值的 $\sqrt{3}$ 倍,即

$$U_L = \sqrt{3}U_P$$

通常所说的 380 V 和 220 V 分别是指电源星形联结时输出电压的线电压和相电压的有效值。

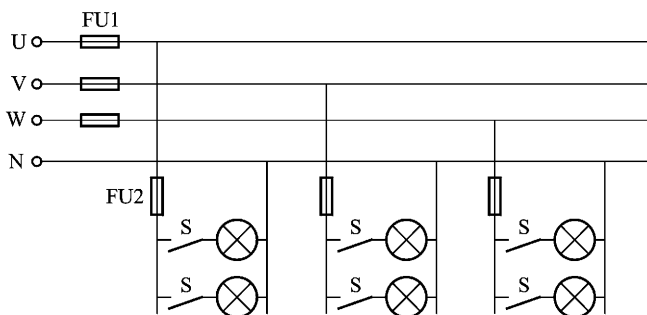
2. 电源的三角形联结

三相绕组的另一种连接方法是三角形联结,即将一个绕组的末端与相邻的另一个绕组的首端依次相连,然后由三个连接点引出三根导线向外供电。发电机三相绕组接成三角形,要求三相电动势绝对对称,绕组回路不得产生环流,否则就将烧毁发电机,这是不易做到的,所以实际上很少采用,但供电系统中的三相变压器绕组有时采用三角形联结。

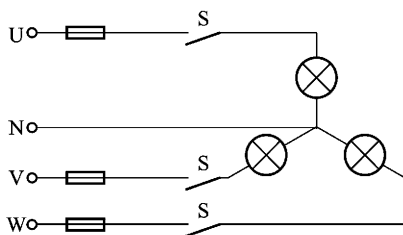
2.4.3 三相负载的连接

1. 三相照明电路的星形联结

三相四线制的生活照明线路如图 2.40(a)所示,将负载分为三组分别接入三条相线与中性线之间,这种接法称为星形联结。



(a) 三相四线制照明电路



(b) 照明电路的星形联结

图 2.40 三相四线制的一般照明电路及其接法

照明电路的三相负载一般是不对称的,不对称三相负载必须接成星形,且中性线不能省去。

负载的星形联结中,相电流等于线电流,线电压等于相电压的 $\sqrt{3}$ 倍,即

$$\begin{aligned} I_P &= I_L \\ U_P &= \frac{U_L}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2.44)$$

2. 三相负载的三角形联结

三相负载的三角形联结如图 2.41 所示,它只适用于三相对称负载,如三相变压器的一次绕组和三相异步电动机。

负载为三角形联结时,相电压等于线电压,线电流等于相电流的 $\sqrt{3}$ 倍,即

$$U_P = U_L$$

$$I_P = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (2.45)$$

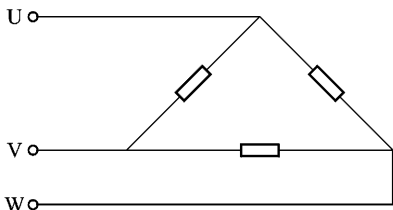


图 2.41 三相负载的三角形联结

2.4.4 三相电路的功率

三相交流电路总的有功功率等于各相负载有功功率的总和,即

$$P = P_U + P_V + P_W$$

若三相电路中负载为三相对称负载,则各相有功功率相同,总功率为

$$P = 3P_P = 3U_P I_P \cos \varphi_P \quad (2.46)$$

式中, U_P ——负载的相电压;

I_P ——负载的相电流;

$\cos \varphi_P$ ——各相的功率因数。

由于有的三相负载中的相电压和相电流不易测量,一般通过线电压和线电流来计算三相电路的功率。

星形联结时,三相负载总的有功功率

$$P_Y = 3U_P I_P \cos \varphi_P = 3 \frac{U_L}{\sqrt{3}} I_L \cos \varphi_P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi_P$$

三角形联结时,三相负载总的有功功率

$$P_\Delta = 3U_P I_P \cos \varphi_P = 3U_L \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cos \varphi_P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi_P$$

可见,在对称三相电路中,不论负载采取星形联结还是三角形联结,有功功率的公式可统一写成

$$P = \sqrt{3} U_P I_P \cos \varphi_P \quad (2.47)$$

上面的公式虽然对星形和三角形联结的负载都适用,但不能认为在线电压相同的情况下,将负载由星形改接成三角形时,它们所耗用的功率相等。

例 2.9 有一对称三相负载,每相的电阻为 6Ω ,电抗为 8Ω ,电源线电压为 380 V ,试计算负载星形和三角形联结时的有功功率。

解 每相负载的阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} \Omega = 10 \Omega$$

负载为星形联结时

$$U_P = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} \text{ V} \approx 220 \text{ V}$$

$$I_L = I_P = \frac{U_P}{Z} = \frac{220}{10} \text{ A} = 22 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_P = \frac{R}{Z} = \frac{6}{10} = 0.6$$

三相负载的有功功率为

$$P_Y = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi_P = \sqrt{3} \times 380 \times 22 \times 0.6 \text{ W} \approx 8.7 \text{ kW}$$

负载为三角形联结时

$$U_P = U_L = 380 \text{ V}$$

由于

$$I_P = \frac{U_P}{Z} = \frac{380}{10} \text{ A} = 38 \text{ A}$$

故

$$I_L = \sqrt{3} I_P = \sqrt{3} \times 38 \text{ A} \approx 66 \text{ A}$$

负载的功率因数不变, 所以有功功率为

$$P_\Delta = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi_P = \sqrt{3} \times 380 \times 66 \times 0.6 \text{ W} \approx 26 \text{ kW}$$

由上面的计算可见, 在相同线电压下, 因为负载三角形联结时的线电流是星形联结时线电流的三倍, 所以负载作三角形联结的有功功率是星形联结的有功功率的三倍。

思考与练习

2.1 在垂直磁场方向有一金属杆 AB 以 5 m/s 的速度作切割磁感线运动, 磁感应强度为 0.1 T, AB 长 10 cm, 求 AB 两端感应电动势的大小。

2.2 一个 50 匝的线圈, 在 0.01 s 内穿过它的磁通量由 1.2 Wb 减小到零, 求这段时间内线圈中感应电动势平均值的大小。

2.3 公式 $e = E_m \sin \omega t$ V 中, 当 $E_m = 100$ V 时, 求 ωt 值分别为下面各值时, 瞬时电压的大小。(1) $\frac{\pi}{3}$ (2) $\frac{3\pi}{2}$ (3) $\frac{2\pi}{3}$ 。

2.4 已知正弦交流电电压的有效值 $U = 220$ V, 频率 $f = 50$ Hz, 初相 $\varphi_0 = \frac{\pi}{3}$, 试写出交流电压的解析式并求出 $t = 0.03$ s 时交流电压的值。

2.5 两个同频率的正弦量的解析式为 $i_1 = 2 \sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{6}\right)$ A, $i_2 = 3 \sin\left(100\pi t - \frac{\pi}{3}\right)$ A, 在同一个相量图中画出它们的最大值相量图。

2.6 一个标有 220 V、100 W 的白炽灯, 接到 220 V 的电源上, 线路中的电流有效值和最大值各是多少?

2.7 在纯电阻电路中,请指出下列各式中哪些是正确的,哪些是错误的?

$$(1) i = \frac{U}{R}; \quad (2) I = \frac{U}{R}; \quad (3) i = \frac{u}{R}; \quad (4) i = \frac{U_m}{R};$$

$$(5) I_m = \frac{U_m}{R}; \quad (6) p = UI; \quad (7) P = UI; \quad (8) p = ui。$$

2.8 一个额定值为 220 V、500 W 的电炉丝,接到 $u = 220\sqrt{2}\sin\left(100\pi t - \frac{2\pi}{3}\right)$ V 的电源上,求流过电炉丝的电流解析式,并画出电压、电流的相量图。

2.9 一个电感量 5 mH 的电感线圈,接在 10 V 50 Hz 的交流电源上,它呈现出的感抗是多少?流过电感线圈的电流有效值是多少?

2.10 一个电感量为 100 mH 的线圈,加在它两端的交流电压瞬时值表达式为 $u = 220\sqrt{2}\sin 100\pi t$ V,求(1)电路中电流有效值的大小(2)写出电流瞬时值表达式(3)画出端电压和电流的相量图。

2.11 有一只电容器,当外加电源频率为 $f = 50$ Hz 时,容抗 $X_C = 100 \Omega$,当电源频率为 5 kHz 时,容抗是多少?

2.12 电容器的容量为 $4.7 \mu\text{F}$,加在它两端的交流电压瞬时值表达式为 $u = 220\sqrt{2}\sin 100\pi t$ V,求电路中电流有效值的大小并写出电流瞬时值表达式。

2.13 在 RL 串联电路中,已知电阻的阻值为 100Ω ,电感量为 50 mH,接在 12 V、50 Hz 的正弦交流电源中,电源内阻不计,求 RL 串联电路的阻抗和电路中的电流有效值大小。

2.14 RL 串联电路接在 12 V、50 Hz 的正弦交流电源中(电源内阻不计)阻抗为 50Ω ,已知电阻的阻值为 40Ω ,电感量的大小是多少?

2.15 在 RC 串联电路中,已知电阻为 100Ω ,电容为 $47 \mu\text{F}$,接在 12 V、50 Hz 的正弦交流电源中,求串联电路的阻抗和电路中电流有效值的大小。

2.16 把一个 6Ω 的电阻和容量为 $1.25 \mu\text{F}$ 的电容器串联后接到 $u = 110\sqrt{2}\sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$ V 的交流电源上,求(1)电容的容抗(2)电路的阻抗(3)电流有效值和瞬时值表达式(4)电路的有功功率、无功功率和视在功率。

2.17 RLC 串联电路接在 12 V、50 Hz 的正弦交流电源上,已知电阻 $R = 40 \Omega$,电感的感抗为 50Ω ,电容的容抗为 20Ω ,利用阻抗三角形求电路的阻抗和电流的大小。

2.18 一个线圈与电容器相串联,已知线圈的电阻 $R = 4 \Omega$, $L = 254$ mH,电容 $C = 637 \mu\text{F}$,外加电压 $u = 311\sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$ V,求(1)电路的阻抗(2)电流的有效值和瞬时值表达式(3) U_R 、 U_L 和 U_C 的大小并画出相量图(4)有功功率、无功功率和视在功率。

2.19 为什么感性负载上并联电容器后可以提高功率因数?

2.20 在有效值为 220 V、频率为 50 Hz 的电源两端,接有感性负载,负载有功功率为 10 kW,要使功率因数从原来的 0.6 提高到 0.9,试求需并联多大的电容?

2.21 在直流并联电路中,总电流必大于各支路电流,但在交流并联电路中,却有总电流小于支路电流的情况,试解释原因。

2.22 三相四线制供电的中性线有什么重要作用？在什么情况下可以省掉中性线？若三相照明电路的中性线断了，会产生什么后果？

2.23 星形联结的三相对称负载上的线电压为 380 V ，每相电阻为 $6\ \Omega$ ，感抗为 $8\ \Omega$ ，试求三相对称负载上的相电流及各线的线电流。

2.24 电阻性负载为星形联结，各相的电阻分别为 $R_U = 20\ \Omega$ ， $R_V = 20\ \Omega$ ， $R_W = 10\ \Omega$ ，接到线电压为 380 V 的对称三相电源上，求相电流、线电流和中性线电流。

2.25 一个三相电炉，每相电阻均为 $22\ \Omega$ ，接到线电压为 380 V 的对称三相电源上，求（1）当电炉接成星形时的相电压、相电流和线电流（2）当电炉接成三角形时的相电压、相电流和线电流。

第 3 章

变压器与交流异步电动机

本章将学到：

1. 磁导率和磁场强度的基本概念是什么,铁磁性材料有哪些性质,磁路欧姆定律的内容是什么?
2. 变压器由哪几部分组成,它是如何工作的,有何特性?常用的变压器有哪几类,它们的作用是什么,如何正确使用?
3. 三相异步电动机由哪几部分组成,它是如何工作的,三相异步电动机的机械特性有哪些,三相异步电动机的铭牌数据有哪些,它们有何实际意义,如何正确地使用三相异步电动机?
4. 单相异步电动机由哪几部分组成,它的工作特点是什么,单相电容式异步电动机的工作过程是什么?

3.1 磁路与变压器

前面两章讲述了电路的基本概念、基本规律和分析计算方法,但在工程上广泛应用的许多电工设备(如变压器、电动机等)既涉及电路的问题,还涉及磁路的问题。

3.1.1 磁路的基本知识

1. 磁导率和磁场强度

通电导体周围存在着磁场,说明了磁场是由电荷运动产生的,即磁场中各点磁感应强度的大小与电流的大小和导体的形状有关。

用一个插有铁棒的通电线圈去吸引铁钉,然后把通电线圈中的铁棒换成铜棒去吸引铁钉,便会发现,两种情况下吸力的大小不同,这表明磁场的强弱,即磁感应强度的大小还与磁场中介质材料的导磁性能有密切的关系。

(1) 磁导率

磁导率是一个用来表示磁场介质导磁性能的物理量,用符号 μ 表示,其单位是亨/米,符号为H/m。不同的介质材料有不同的磁导率,真空中的磁导率为一常数 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。

自然界大多数物质对磁场的影响甚微,如空气、铜等,它们的磁导率与真空的磁导率非常接近。为了比较介质对磁场的影响,把任一物质的磁导率与真空中磁导率的比值称为相对磁导率,

用 μ_r 表示,即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3.1)$$

相对磁导率的单位为 1,它表明在其他条件相同的情况下,介质中的磁感应强度是真空中多少倍。根据相对磁导率大小的不同,可把物质分成反磁性物质(μ_r 略小于 1)、顺磁性物质(μ_r 略大于 1)和铁磁性物质(μ_r 远大于 1)三类。

反磁性物质和顺磁性物质的相对磁导率都近似等于 1,统称为非铁磁性物质。在其他条件相同的情况下,铁磁性物质产生的磁场要比真空中产生的磁场强几千甚至几万倍,因此广泛应用在各种电气设备中。常见的铁磁性材料有铁、钢、钴、镍及某些合金。

(2) 磁场强度

由于磁场中各点磁感应强度的大小与介质材料有关,所以磁场的计算比较复杂。为了使计算简便,常用磁场强度这个物理量来表示磁场的性质。在磁场中,各点磁场强度的大小只与电流的大小和导体的形状有关,而与介质材料无关。

磁场中某点磁感应强度 B 与介质磁导率 μ 的比值,称为该点的磁场强度,用字母 H 表示,其单位是安/米,符号为 A/m,表达式为

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (3.2)$$

磁场强度也是一个矢量,在均匀的介质中,它的方向和磁感应强度的方向一致。

2. 铁磁性材料的性质

铁磁性材料具有高的导磁性能,利用这类材料来制造电磁器件,将会使其体积大大缩小,质量大为减轻,但铁磁性材料的相对磁导率不是一个常数,它们的导磁性能直接关系到电气设备的工作质量。

(1) 铁磁性材料的磁化曲线

铁磁性材料本身对外不具备磁性,当它受到外磁场的作用而具有了磁性的现象称为该材料的磁化。

磁性材料在磁化的过程中,其磁感应强度 B 和磁场强度 H 之间有一定的关系,通常把 B 随 H 变化的曲线称为磁化曲线,又称 $B-H$ 曲线,如图 3.1 所示。由图可见, B 与 H 的关系是非线性的,即 $\mu = \frac{B}{H}$ 不是常数。

磁性材料的磁化曲线可分成四段:当 H 从 0 开始增加时, B 随之缓慢增加(曲线 Oa 段),称为起始磁化段; H 继续增大时, B 急剧上升(ab 段),这是由于磁畴在外磁场作用下大部分都趋向 H 方向, B 几乎直线上升,称为直线段;在曲线 bc 段,因为大部分磁畴已转向外磁场方向,所以随着 H 增大, B 值的增强已渐缓慢;到了 c 点以后,因磁畴已几乎全部转向外磁场方向,故 H 值增加时, B 值基本上不再增加了,称为饱和段,这时的磁感应强度称为饱和磁感应强度。不同的铁磁性材料, B 的饱和值不同,但同种材料, B 的饱和值都是一定的。对于电动机和变压器,通常工作在曲线 bc 段。

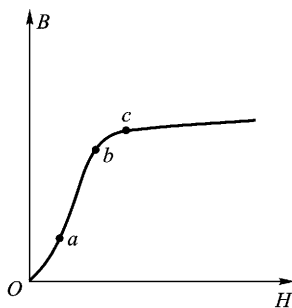


图 3.1 磁化曲线

上面分析的磁化曲线反映了铁磁性材料在外磁场由零逐渐增强时的磁化过程,但实际应用中,铁磁性材料经常工作在交变的磁场中,故了解它们反复交变磁化的过程也是十分必要的。

(2) 磁滞回线

铁磁材料在交变磁场中反复磁化时,可得到如图 3.2 所示的 $B-H$ 关系曲线,该曲线称为磁滞回线。

由图可知,在反复磁化的过程中,磁场强度 H 先从 0 开始增大,磁感应强度 B 也随之增大,直到其饱和值 B_m (Oa 段)。当 B 达到饱和值后, H 从最大值 H_m 逐渐减小, B 也随之减小,但 B 的下降曲线是 ab ,这说明在去磁过程中,磁感应强度 B 值比磁化过程中同一 H 值对应的 B 值大一些,这种 B 值变化落后于 H 值变化的现象称为磁滞。

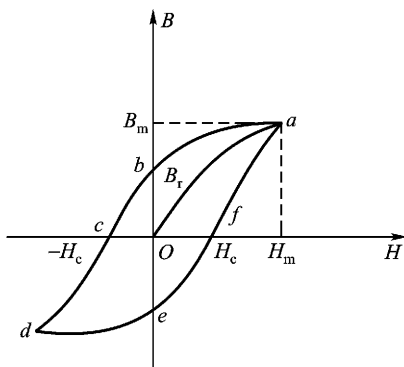


图 3.2 磁滞回线

当 H 减至零时, B 值不等于零,而是保留一定的值,称为剩磁,用 B_r 表示。为了消除剩磁,必须外加反向磁场,随着反向磁场的增强,磁性材料逐渐退磁 (bc 段),当反向磁场增大到一定值时, B 值为零,剩磁完全消失,这时的磁场强度称为矫顽力,用 H_c 表示。随着反向磁场继续增大,就会使 B 值反向并由零增至反向的饱和值 (cd 段)。然后再将反向磁场减小,即反向去磁, B 值将出现反向剩磁 (de 段)。再逐渐增大正向磁场, $B-H$ 曲线将沿 efa 变化而完成一个循环。经过多次循环,可以得到一个封闭的对称于原点的闭合曲线,即磁滞回线。

不同的铁磁性材料,其磁滞回线的形状不同。铁磁性材料的反复交变磁化,会产生能量的损耗,磁滞回线包围的面积越大,能量损耗越大。故磁滞回线的形状是判断铁磁性材料性质和选择材料的依据。根据磁滞回线的形状,铁磁性材料可分为软磁性材料、硬磁性材料和矩磁性材料。

软磁性材料的磁滞回线窄而陡,因此剩磁和矫顽力都很小,如硅钢,常用于电动机、变压器中;硬磁性材料的磁滞回线宽而平,其剩磁和矫顽力都较大,如铝镍合金,常用于制造永久磁铁;矩磁性材料的磁滞回线接近于矩形,具有较小的矫顽力和较大剩磁,常用于计算机和自动控制系统中作为记忆元件。

(3) 磁路

铁磁性材料不但在被磁化后能产生附加磁场而且还能够把绝大部分的磁感线约束在一定的闭合路径上,这种集中磁感线(磁通)所经过的闭合路径称为磁路。在电工设备中,为了获得较强的磁场常利用铁磁材料按照电器的结构要求而做成各种形状的铁心,从而使磁通形成各自所需要的磁路。

图 3.3 所示是几种电气设备中的磁路,图中线圈分别绕在由铁磁材料制成的不同形状的铁心上,当线圈通以电流时,便产生磁通,形成了不同的磁路(图中虚线所示),故此线圈称为励磁线圈,线圈中的电流称为励磁电流。励磁电流若为直流,则磁路为直流磁路,励磁电流若为交流,则磁路为交流磁路。

从图 3.3(a)可看出,励磁线圈产生的磁通有主磁通 Φ (沿铁心由铁磁形成闭合)和漏磁通 Φ_0 (在磁路以外闭合)两部分。由于铁磁材料的磁导率 μ 远大于空气的磁导率,所以磁通主要沿铁心而闭合,只有很少一部分磁通经过空气或其他材料,即漏磁通很小,一般情况下,可忽略不计。

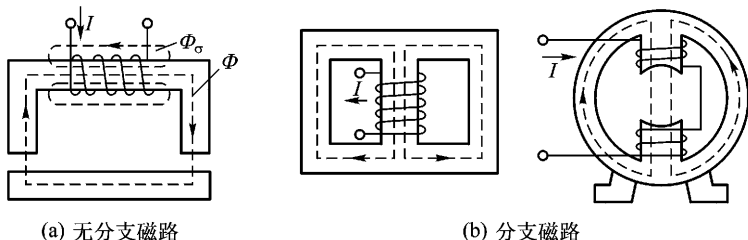


图 3.3 几种电气设备中的磁路

磁路的形状取决于铁心的形状和励磁线圈在铁心上的位置,磁路按其结构可分为无分支磁路和分支磁路两类。图 3.3(a)所示为无分支磁路,图 3.3(b)为分支磁路。

3.1.2 磁路欧姆定律

图 3.4(a)所示是简单的无分支磁路,若励磁线圈匝数为 N ,线圈中的电流为 I ,铁心的截面积为 A ,磁路的平均长度为 l ,则磁路中的磁通可根据磁路的欧姆定律进行定性分析,其表达式为

$$\Phi = \frac{NI}{R_m} \quad (3.3)$$

1. 磁通势

电流是产生磁场的原因,故通电线圈产生的磁场与电流有关,电流越大,磁场越强,磁通也越多。通电线圈的每一匝都要产生磁能,根据安培定则可知,这些磁通是彼此相加的,线圈的匝数越多,磁通也越多,因此线圈中所产生的磁通量与线圈的匝数和通过的电流成正比。

将通过线圈的电流和线圈匝数的乘积称为磁通势(旧称磁动势),用符号 F 表示,即 $F = NI$ 。磁通势的单位是安,符号为 A。

磁通势是产生磁通的磁源,它相当于电路中的电动势。

2. 磁阻

磁阻就是磁通通过磁路时所受到的阻碍作用,用符号 R_m 表示,单位是 $1/\text{亨}$,符号为 $1/\text{H}$ 。与导体的电阻相似,磁路中磁阻的大小与磁路的长度成正比,与磁路的截面积成反比,并与组成磁路的材料的性质有关。对于图 3.4(a)所示磁路,磁阻 R_m 的表达式为

$$R_m = \frac{l}{\mu A} \quad (3.4)$$

式中, l ——磁路的长度,单位是米,符号为 m;

μ ——材料的磁导率,单位是亨/米,符号为 H/m ;

A ——磁路的截面积,单位是平方米,符号为 m^2 。

通过以上分析可知,通过磁路的磁通量与磁通势 F 成正比,与磁阻 R_m 成反比,故磁路欧姆定律还可表达式为

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (3.5)$$

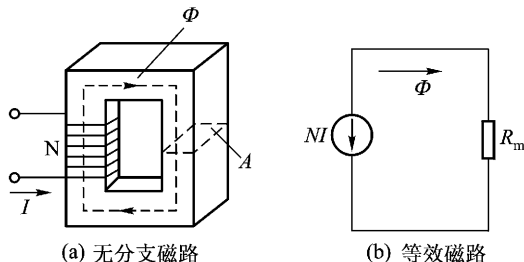


图 3.4 磁路欧姆定律

式(3.5)在形式上与电路中的欧姆定律 $I = \frac{E}{R}$ 相似,磁路中的磁通 Φ 对应于电路中的电流 I ,磁通势 F 对应于电动势 E ,磁阻 R_m 对应于电阻 R ,因此图 3.4(a)所示磁路也可等效成图 3.4(b)所示磁路。

应当指出,磁路与电路有着本质的不同。电路断开时,电流为零,电动势依然存在,可是磁路没有开路状态,因为磁感线是不可断的闭合曲线。

3.1.3 变压器

变压器是一种静止的电气设备,具有变换电压、电流和阻抗等作用,因此它的应用极为广泛,是输配电、电工测量、电子技术等方面不可缺少的电气设备。

变压器的种类很多,但是它们的基本结构和工作原理都是相同的,本书以单相变压器为例来介绍变压器的结构、工作原理和性能。

1. 变压器的结构

变压器主要由铁心和绕在铁心上的绕组(又称线圈)两部分组成。

铁心是变压器的磁路部分,通常是用磁导率较高的硅钢片(厚度为 $0.35 \sim 0.5 \text{ mm}$)叠装而成,硅钢片两侧涂有绝缘漆,使叠片相互绝缘。铁心的构造形式可分为心式和壳式两种。心式铁心呈“口”字形,线圈包着铁心,如图 3.5(a)所示;壳式铁心呈“日”字形,铁心包着线圈,如图 3.5(b)所示。

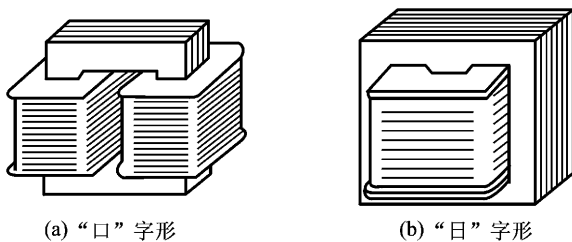


图 3.5 变压器的结构

绕组是变压器的电路部分。绕组是由具有良好绝缘性的圆形或矩形截面的导线绕成一定形状的线圈。在变压器中,接到高压电网上的绕组称为高压绕组,接到低压电网的绕组称为低压绕组。为了便于与铁心绝缘,电力变压器通常将低压绕组安装在靠近铁心的内层,将高压绕组安装在外层。

一般的变压器都有两个或两个以上的绕组,为了分析方便,通常把变压器与电源相接的一侧绕组称为一次绕组(旧称初级绕组),把变压器与负载相接的一侧绕组称为二次绕组(旧称次级绕组)。图 3.6 所示为一台两绕组变压器的示意图和符号。

2. 变压器的工作原理

变压器是利用电磁感应原理工作的电气设备。

(1) 互感

互感也是电磁感应的一种形式。下面通过一个实验来分析互感现象。

图 3.7 所示的实验电路中,线圈 1 和 2 距离很近,在线圈 2 两端接一个灵敏检流计。当开关

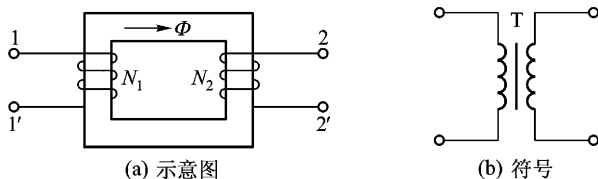


图 3.6 变压器的示意图和符号

S 闭合瞬间,会发现检流计指针偏转一下后又回到零点。这种现象的原因是由于开关闭合瞬间,线圈 1 中发生了电流由无到有的变化,因而线圈 1 中产生了变化的磁通 Φ_1 ,其中一部分磁通 Φ_{12} 穿过线圈 2。线圈 2 由于有变化的磁通 Φ_{12} 穿过,便在线圈 2 中产生了感应电动势 e_{m2} ,并向检流计回路提供了感应电流,使检流计指针发生偏转。当线圈 1 的电流恒定不变时,不再发生上述过程,检流计因无电流而回到零位。

人们把由一个线圈的电流发生变化,在另一线圈中产生电磁感应的现象称为互感,由互感产生的感应电动势称为互感电动势。

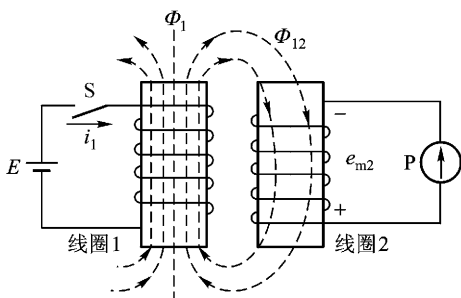


图 3.7 互感现象

互感电动势的大小正比于穿过此线圈磁通的变化率,或正比于另一线圈中电流的变化率。

互感电动势的方向不仅与原磁通及其变化的趋势有关,而且还与线圈的绕向有关,虽然仍可用楞次定律来判断,但是在实际的电路图上,要把线圈的绕法和线圈的相对位置都画出来,再来判别感应电动势的极性是很不方便的,因此常在电路图中的互感线圈上标注互感电动势极性,这就是同名端标记。

如图 3.8 所示的互感线圈 L_1 、 L_2 绕在同一圆柱形磁棒上。设 L_1 通入电流 i 并正在增大,根据楞次定律,可判断出各线圈的感应电动势极性,如图所示,端点 1 与 3、2 与 4 的极性相同。若电流 i 不是增大而是减小,则各端的正、负极都要改变,但端点 1 与 3、2 与 4 的极性仍然相同。无论电流从哪端流入线圈,上述端点 1 与 3、2 与 4 的极性仍保持相同,因此把这种由于绕向一致而使感应电动势的极性始终保持一致的端点称为同名端,反之称为异名端。一般用符号“ $\bullet$ ”表示同名端。在标出同名端后,每个绕圈的具体绕法和它们的相对位置就不需要在图上表示出来了,这样图 3.8 就可画成图 3.9 的形式。

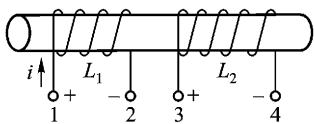


图 3.8 互感线圈

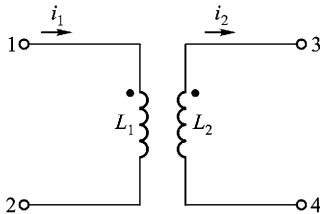


图 3.9 同名端

知道同名端后,可以根据电流的变化趋势,很方便地判断出互感电动势的极性,如图 3.9 所示。若电流 i_1 由端点 1 流入并在减小,根据楞次定律可判定端点 1 的自感电动势的极性为负,再

根据同名端,立即判定端点3也为负。

(2) 变压器的工作原理

图3.10所示为一台简单变压器的工作原理图和电路图。图中一、二次绕组的匝数为 N_1 和 N_2 ,一次绕组两端的交流电压为 u_1 。为了分析方便,假设变压器无漏磁通和能量损失,即将其看作理想变压器。

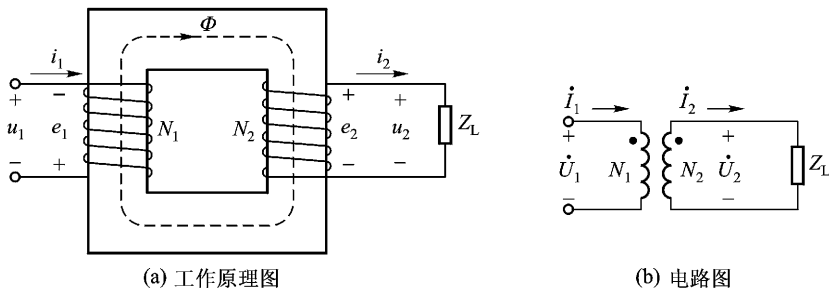


图 3.10 变压器的工作原理

① 变压原理。当一次绕组接入交流电源时,一次绕组中便有交流电流 i_1 流过,并产生交变磁通 Φ ,这个变化的磁通经过闭合磁路同时穿过一、二次绕组时,就在两个绕组中分别产生与电源频率相同的感应电动势。

一次绕组中产生的自感电动势起着阻碍电流变化的作用,与加在一次绕组两端的电压 U_1 相等(忽略绕组的电阻);与此同时,二次绕组中也产生互感电动势,此时,二次绕组相当于一个电源,若忽略绕组的电阻,则二次绕组两端的电压 U_2 约等于互感电动势。根据法拉第电磁感应定律可推出

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (3.6)$$

式中 K 称为变压比。

上式表明,变压器一、二次绕组的端电压比等于它的匝数比。当变压器的一、二次绕组采用不同的匝数比时,就可达到升高或降低电压的目的。

② 变流原理。由上面的分析可知,变压器能从电网中获取能量,并通过电磁感应进行能量转换后,再把电能输送给负载,根据能量守恒定律,在忽略损耗时,变压器输出的功率 P_2 和它从电网中吸收的功率 P_1 相等,根据交流电功率的计算公式可推出

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K} \quad (3.7)$$

上式表明,变压器工作时一、二次绕组中的电流跟绕组的匝数成反比。变压器的高压绕组匝数多而通过的电流小,可用较细的导线绕制,低压绕组匝数少而通过的电流大,应当用较粗的导线绕制。

例 3.1 如图3.11所示变压器,一次绕组电压 $U_1 = 220 \text{ V}$,要为负载 $Z_L = R_2 = 15 \Omega$ 提供15 V的电压,试求(1)该变压器的变压比 K (2)一次和二次电流 I_1 、 I_2 。

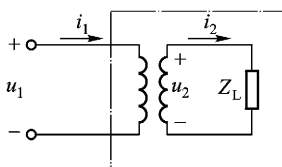
解 (1)由式(3.6)可得

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{15} \text{ A} = 14.67$$

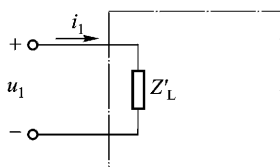
(2)

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{15}{15} \text{ A} = 1 \text{ A}$$

$$I_1 = \frac{I_2}{K} = \frac{1}{14.67} \times 1 \text{ A} = 0.0682 \text{ A} = 68.2 \text{ mA}$$



(a) 经变压器接电源的阻抗



(b) 直接接电源的阻抗

图 3.11 阻抗变换

③ 阻抗变换原理。由于理想变压器本身无功率损耗,所以一、二次回路的视在功率、有功功率和无功功率均相同,功率因数也相同,设变压器二次阻抗为 Z_L ,一次等效阻抗为 Z'_L ,如图 3.11 所示,则可推出

$$|Z'_L| = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 |Z_L| = K^2 |Z_L| \quad (3.8)$$

上式表明,接在变压器二次绕组上的负载 Z_L 与不经过变压器直接接在电源上的负载 Z'_L 相比减小到 $1/K^2$ 倍。换句话说,也就是负载阻抗通过变压器接电源时,相当于阻抗增加到 K^2 倍(阻抗性质不变),这就是变压器可以变换阻抗的原理。电子技术中,为了使负载获得最大功率,常常用变压器来改变阻抗,实现阻抗匹配。

例 3.2 将接入变压器二次绕组上的负载 $Z_L = 8 \Omega$ 变换成所需的 20Ω 阻抗,应选择变压比 K 为多少的变压器?如果一次绕组匝数 $N_1 = 300$ 匝,则二次绕组匝数 N_2 为多少?

解 由式(3.8)可得

$$K = \sqrt{\frac{Z'_L}{Z_L}} = \sqrt{\frac{20}{8}} = 1.58$$

$$N_2 = \frac{N_1}{K} = \frac{300}{1.58} \text{ 匝} = 190 \text{ 匝}$$

3. 变压器的运行特性

要正确合理地使用变压器,必须了解变压器在运行时的主要性能指标及特性。

(1) 变压器的额定值

变压器的运行情况分空载(无负载)运行和有负载运行,制造工厂所拟定的满负荷运行情况称为额定运行,额定运行的条件称为变压器的额定值(即铭牌数据)。

① 额定容量 S_N 。即二次回路的最大视在功率,其单位是伏安($\text{V} \cdot \text{A}$)或千伏安($\text{kV} \cdot \text{A}$)。

② 额定一、二次电压 U_{1N} 和 U_{2N} 。额定一次电压 U_{1N} 是指接到一次绕组电压的规定值,额定二次电压 U_{2N} 是指变压器空载时,一次侧加上额定电压 U_{1N} 后,二次侧两端的电压值。

③ 额定电流 I_{1N} 、 I_{2N} 。即规定的满载电流。

变压器的额定值取决于变压器的构造和所用材料。使用变压器时除了不能超过其额定值外,还要注意变压器的工作温度。

(2) 变压器的外特性及电压变化率

变压器空载运行时,若一次电压 U_1 不变,则二次电压 U_2 也是不变的,但变压器加上负载后,随着负载电流 I_2 的变化,输出电压 U_2 也会随之变化。变压器的外特性就是用来描述输出电压 U_2 与负载电流 I_2 的变化关系的,如图 3.12 所示。

图 3.12 所示的外特性曲线,描述的是当变压器一次电压 U_1 和负载的功率因数 $\cos \varphi$ 一定时,二次电压 U_2 随负载电流 I_2 的变化而变化的情况。从图中可以看出,当 $I_2 = 0$ (空载)时, $U_2 = U_{2N}$ 。当负载为电阻性和电感性时,随着 I_2 的增大, U_2 逐渐下降, U_2 的下降程度取决于负载功率因数的大小。当负载为电容性时,随着 I_2 的增大, U_2 逐渐提高。因此为了减小电压的变化,对感性负载而言,可在其两端并联电容,以提高负载的功率因数。

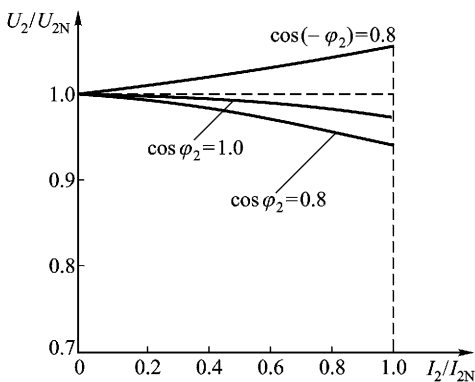


图 3.12 变压器的外特性

一般情况下,变压器的负载大多数是感性负载,因而当负载增加时,输出电压 U_2 总是下降的,其下降程度常用电压变化率 ΔU 来表示。电压变化率是指变压器二次绕组空载时的端电压 U_{2N} 减去额定负载时的端电压 U_2 再除以 U_{2N} 的百分比。其表达式为

$$\Delta U = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% \quad (3.9)$$

电压变化率反映了供电电压的稳定性,是变压器的一个重要性能指标, ΔU 越小,变压器输出的电压越稳定。常用的电力变压器从空载到满载,电压变化率约为 3% ~ 5%。

(3) 变压器的效率

前面讨论的是理想变压器,即认为输入给变压器的能量通过电磁转换全部转换成输出的能量,因此无损耗,但实际变压器在运行中是有功率损耗的,包括铜损和铁损两部分。

① 铜损 P_{Cu} 。铜损主要是指电流在一、二次绕组上产生的损耗。电流越大,铜损越大。

② 铁损 P_{Fe} 。铁损主要是指交变磁场在铁心中引起的磁滞损耗以及在组成铁心的硅钢片内部形成的涡流损耗。频率越高,铁损越大。

变压器的输出功率 P_2 与输入功率 P_1 之比称为变压器的效率 η ,其表达式为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (3.10)$$

变压器的效率一般都比较高的,大型电力变压器的效率可达到 98% ~ 99%。

3.1.4 常用变压器简介

变压器的种类很多,本节主要介绍单相变压器、三相变压器、多绕组变压器、自耦变压器和仪用互感器。

1. 单相变压器

单相变压器是一种最常见的变压器,一般为壳式,如图 3.5(b)所示。通常用来为车间或工厂内部的局部照明灯具提供安全电压。这种变压器的一次额定工作电压有 220 V 和 380 V 两

种,二次电压多为 36 V。在特殊危险场合使用时,二次电压为 24 V 或 12 V。有的变压器二次侧还有 6 V 左右的电压,专供指示灯用。

2. 多绕组变压器

如果变压器的二次侧有两个以上绕组或一、二次侧都有两个以上的绕组,则称为多绕组变压器。这种变压器多用于各种电子设备中,输出多种电压。多绕组变压器各二次和一次电压关系仍符合变压比。

在使用多绕组变压器时,经常会遇到两个线圈极性正确连接的问题。例如某变压器的一次绕组由两个匝数相等的绕组组成,如图 3.13(a)所示。若每个绕组的额定电压为 110 V,则当电源电压为 220 V 时,应将两个绕组串联起来,即将线圈的异名端相接,如图 3.13(b)所示;如果电源电压为 110 V 时,则应将它们并联起来,即将线圈的同名端相接,如图 3.13(c)所示。

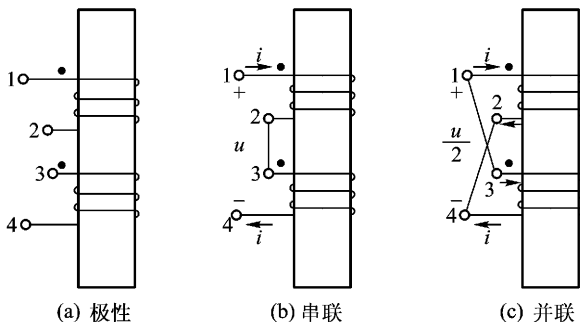


图 3.13 多绕组变压器的连接

由上述分析可知,绕组串、并联时,确定同名端是十分重要的。对于一台已经制成的变压器,若无法辨认其同名端时,可采用实验的方法进行测定,测定的方法有交流法和直流法两种。

(1) 交流法

如图 3.14(a)所示,将两个绕组 N_1 和 N_2 ,各取一个接线端连接在一起,如图中的 2 和 4 相连接,在 1、2 两端加一个较低的交流电压 u_{12} ,用交流电压表分别测量 U_{12} 、 U_{13} 、 U_{34} 各值,如果测量结果为 $U_{13} = U_{12} - U_{34}$,则 1 和 3 为同名端,如果 $U_{13} = U_{12} + U_{34}$,则 1 和 4 为同名端。

(2) 直流法

将两个绕组的接线端子 1、2 和 3、4 分别与 1.5 V 或 3 V 的直流电源和直流毫伏表按图

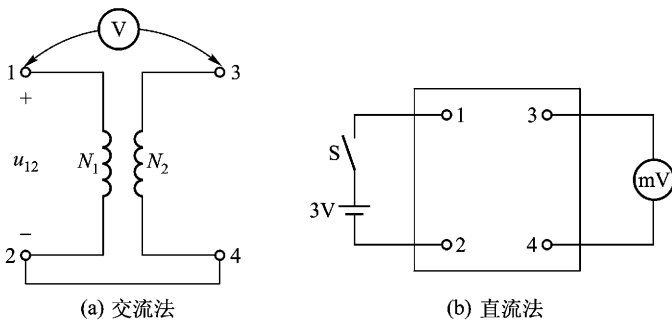


图 3.14 同名端的测定

3.14(b)所示连接,当开关S合上的瞬间,如毫伏表指针向正方向摆动,则接直流电源正极的端子与接直流毫伏表正极的端子为同名端。

3. 三相变压器

三相变压器实际上就是三个单相变压器的组合,其用途是变换三相电压。它主要用于输电、配电系统中,也用于三相整流电路等场合。其结构特点是具有三个铁心柱,每个铁心柱上绕着属于同一相的高压绕组和低压绕组。三个高压绕组始端标以 U_1 、 V_1 、 W_1 ,末端相应地标有 U_2 、 V_2 、 W_2 。对应的低压绕组始端标以 u_1 、 v_1 、 w_1 ,末端标以 u_2 、 v_2 、 w_2 ,如图 3.15 所示。

在三相电力变压器中,不论是高压绕组,还是低压绕组,我国均采用星形联结和三角形联结两种方法。

星形联结是指三相绕组的末端 U_2 、 V_2 、 W_2 (或 u_2 、 v_2 、 w_2) 连接在一起,而把它们的首端 U_1 、 V_1 、 W_1 (或 u_1 、 v_1 、 w_1) 分别用导线引出,如图 3.16(a) 所示。

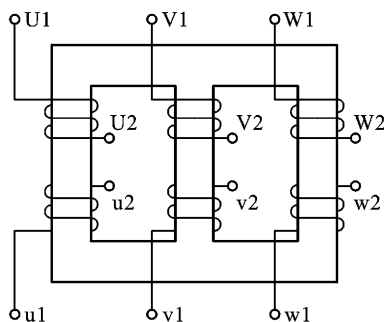


图 3.15 三相变压器

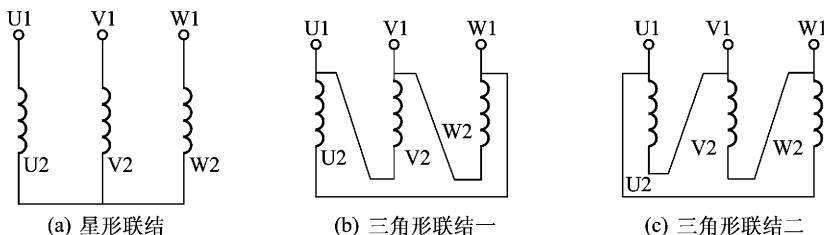


图 3.16 三相变压器的连接

三角形联结是把一相绕组的末端和另一相绕组的首端连在一起,顺次连接成一个闭合回路,然后从首端 U_1 、 V_1 、 W_1 (或 u_1 、 v_1 、 w_1) 用导线引出,如图 3.16(b)、(c) 所示。

三相变压器的额定电压 U_{2N} 、额定电流 I_{1N} 均指线电压、线电流,但变压比是指一次额定相电压与二次额定相电压之比值。

4. 自耦变压器

自耦变压器只有一个绕组,如图 3.17 所示,即将一、二次绕组合二为一,使二次绕组成为一次绕组的一部分。

自耦变压器一、二次绕组之间除了有磁的耦合外,还有电的关系,但一、二次绕组的电压和电流与绕组匝数之间的关系仍为 $\frac{U_1}{U_2} =$

$$\frac{N_1}{N_2} = K; \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}。$$

自耦变压器具有铜损小、效率高、体积小等优点,但由于它的一、二次侧的电路直接连在一起,故高压侧的电气故障会波及低压侧,很不安全,因此要求自耦变压器在使用时必须正确接线,且外壳必须接地,并规定安全照明变压器

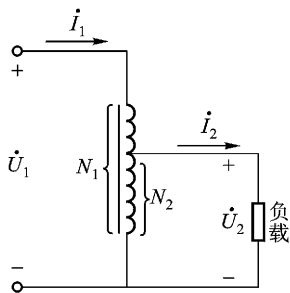


图 3.17 自耦变压器

不允许采用自耦变压器。

如果把自耦变压器的抽头改成滑动触点,就可构成输出电压可调的自耦变压器。实验室中用来连续改变电源电压的调压变压器就是这类自耦变压器,其外形和电路原理图如图 3.18 所示。图 3.18(b)中 u_1 、 u_2 为输出端。 U_2 (u_2)端接中性线, U_1 端接相线。

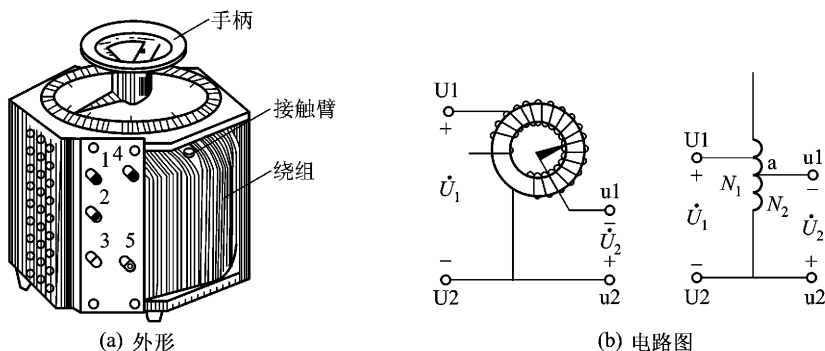


图 3.18 调压变压器

5. 仪用互感器

仪用互感器简称互感器,是有特殊用途的变压器,它的主要作用是扩大仪表的量程,并使测量电路和高压电路绝缘,以保证工作安全。按照用途的不同,互感器可分为电压互感器和电流互感器两类。

(1) 电压互感器

电压互感器是一种精确地变换电压的降压变压器,其工作情况相当于空载运行的变压器。电压互感器的一次绕组匝数多,直接与待测高压电网并联相接,如图 3.19 所示。

根据变压器的变压原理,被测电压 U_1 与电压表电压 U_2 之间存在 $U_1 = KU_2$ 的关系,这样一方面实现用低量程的电压表来测量高电压,另一方面使仪表和所接设备与高电压隔离,从而保障了操作人员的安全。

使用电压互感器时应注意:二次绕组不能短路,且铁心和二次绕组必须可靠接地。

(2) 电流互感器

电流互感器是能够精确地将大电流变小的变压器,它的一次绕组常用粗导线绕成,匝数很少;二次绕组的导线较细,匝数较多。工作时一次绕组串联到被测电路里,二次绕组与电流表相接(相当于变压器的短路状态),如图 3.20 所示。

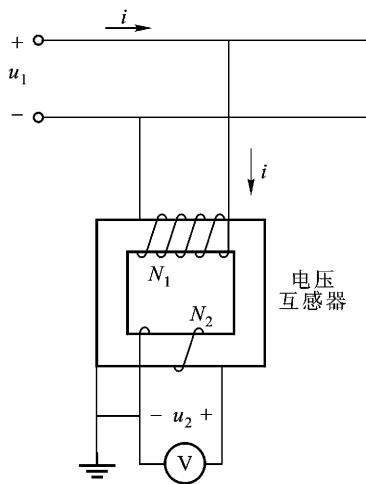


图 3.19 电压互感器

根据变压器的变流原理,被测电流 I_1 和电流表的电流 I_2 之间存在 $I_1 = \frac{1}{K}I_2$ 的关系,因此改变一、二次绕组的匝数比,就可在二次绕组中电流表量程不变的情况下测出较大电流。常用的电流互感器二次绕组的额定电流是 5 A。

使用电流互感器时应注意：二次绕组绝对不允许开路，且铁心和二次绕组必须可靠接地。

钳形电流表就是电流互感器与电流表合成的测量仪表，如图 3.21 所示。测量时张开铁心，将被测导线套进铁心内，该导线就是电流互感器的一次绕组，二次绕组绕在铁心上并与电流表相接。由电流表的指针偏转位置可直接读出被测电流的大小。钳形电流表的优点是使用时不必断开被测电路，所以用它来测量或检查电气设备的运行十分方便。钳形电流表又称测流钳，是实际工作中常用的仪表之一。

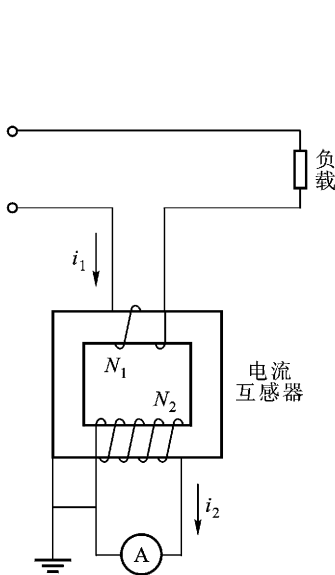


图 3.20 电流互感器

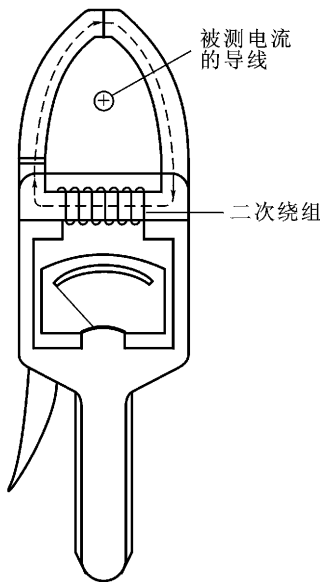


图 3.21 钳形电流表

3.2 三相异步电动机

电动机是将电能转换成机械能，并输出机械转矩的动力设备。根据电动机所使用的电源性质可分为交流电动机和直流电动机两大类。交流电动机按所使用的电流相数分为单相电动机和三相电动机两种，其中三相电动机又分为同步和异步两种。

三相异步电动机具有结构简单、工作可靠、使用和维护方便的特点，因此在工农业生产中得到广泛的应用。

3.2.1 三相异步电动机的结构

三相异步电动机由两大部分组成，其中固定不动的部分称为定子，转动的部分称为转子，转子又分为笼型和绕线式，图 3.22(a)、(b)所示为笼型异步电动机和绕线转子异步电动机的外形图。

图 3.23 所示为目前广泛使用的三相笼型异步电动机的结构图。

1. 定子

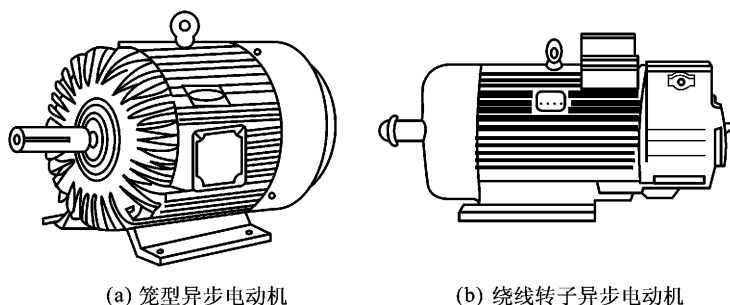


图 3.22 三相异步电动机的外形

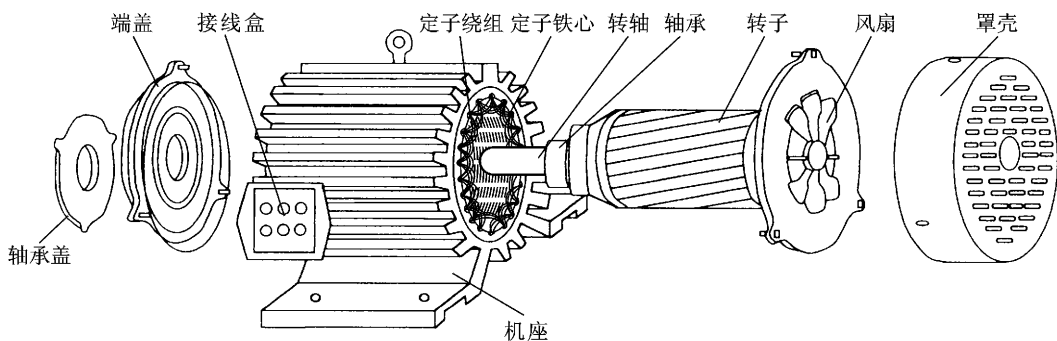


图 3.23 三相鼠笼式异步电动机的结构图

三相异步电动机的定子主要由定子铁心、定子绕组、机座、端盖、轴承等组成。

(1) 定子铁心

定子铁心是电动机磁路的一部分,一般是由表面涂有绝缘层的硅钢片叠压而成,硅钢片内圆表面冲有沿圆周均匀分布的槽孔,用以嵌放定子绕组,如图 3.24 所示。

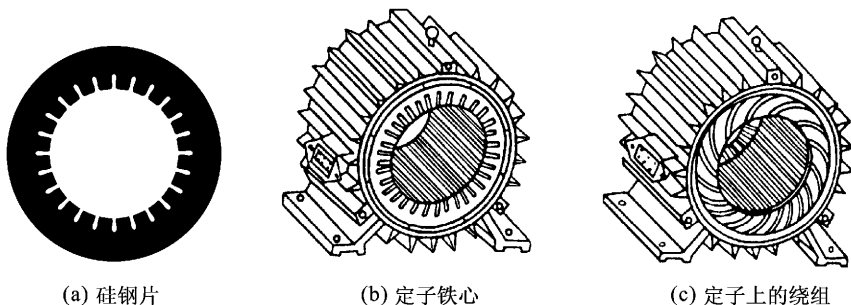


图 3.24 定子的结构

(2) 定子绕组

定子绕组是电动机的电路部分,它由嵌放在定子铁心槽中的线圈按一定规则连接成的三相

绕组组成,定子三相绕组结构完全对称,并与铁心绝缘。三相绕组的六根端线都引到机座侧面的接线盒中,与电源连接时,可根据需要接成星形(Y)或三角形(Δ)。

(3) 机座、端盖

机座用来固定定子铁心和定子绕组,并通过两端的端盖和轴承支承转动部分。机座通常用铸铁和铸钢制成,它的外表面铸有散热筋,以提高散热效果。电动机的端盖装在机座的两端,它起着保护铁心和绕组的作用。

2. 转子

三相异步电动机的转子主要由转子铁心、转子绕组、转轴、风扇等组成。

(1) 转心铁心

转子铁心是电动机磁路的一部分,一般由 0.5 mm 厚且表面有绝缘层的硅钢片叠压而成,硅钢片外圆周有均匀分布的导线槽,用以放置转子绕组,如图 3. 25(a)所示。

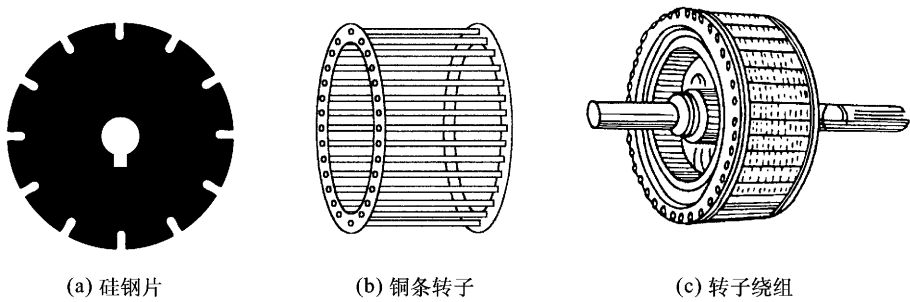


图 3. 25 转子绕组的结构

(2) 转子绕组

转子绕组的形式有笼式和绕线式两种,它们的结构不同,但工作原理基本相同。

笼式的转子绕组做成鼠笼状,它有两种结构形式,一种结构为铜条转子,即在转子铁心槽内嵌入没有绝缘的铜条,铜条的两端用铜环短接,如图 3. 25(b)(c)所示;另一种结构为中小型异步电动机常用的铸铝式转子,即将熔化了的铝浇铸在转子铁心槽内成为一个整体,与两端的短路环和风扇叶片一起铸成。如图 3. 26 所示。

绕线式转子的绕组与定子绕组相似,它由绝缘导线绕制而成,按一定规律嵌放在转子铁心槽中,组成三相绕组(通常接成星形)。转子一端装有三个彼此绝缘的滑环,三相绕组的首端引出线分别与三个滑环相接。每个滑环上各有一个电刷,通过电刷将转子绕组与外部电路相连,以改善起动性能或调节电动机的转速。图 3. 27 所示为绕线转子电动机的结构及接线图。

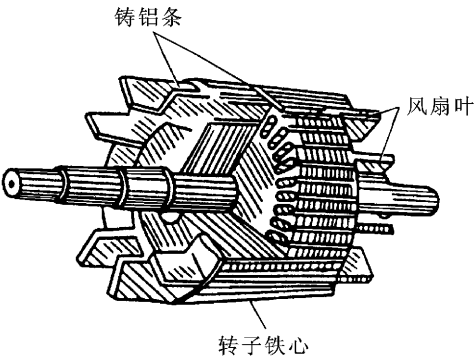


图 3. 26 铸铝式转子的结构

转轴是支承转子铁心和输出转矩的零件,一般用中碳钢制成。风扇的作用是冷却电动机。

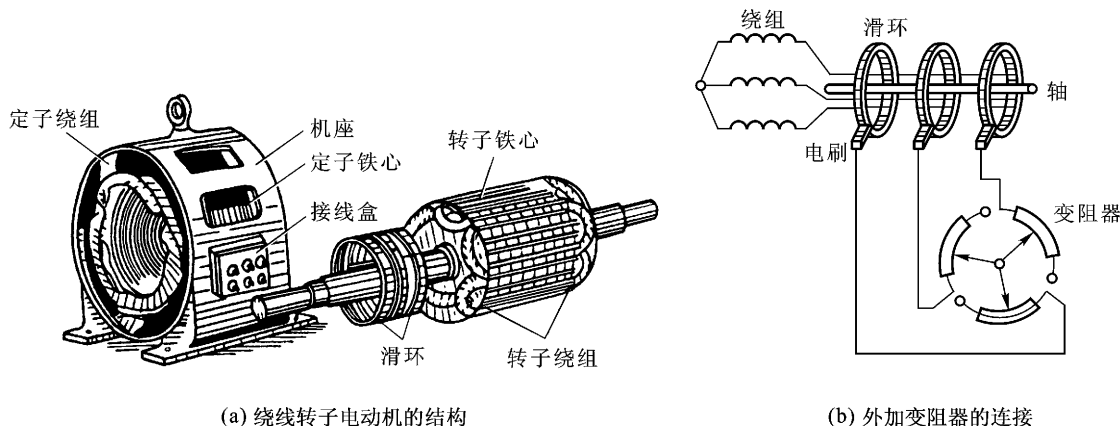


图 3.27 绕线转子电动机的结构及接线图

3.2.2 三相异步电动机的工作原理

三相异步电动机是指由三相交流电源供电,利用电磁感应原理,输出转矩的旋转电动机。其转动的关键是旋转磁场的形成。

1. 旋转磁场

三相异步电动机的旋转磁场是由三相定子绕组通入三相对称交流电流形成的。在三相异步电动机中,向在空间彼此相差 120° 的三个相同的定子绕组中通入三相交流电流,如图 3.28 所示,则将产生一个沿定子内圆旋转的磁场,这就是旋转磁场。

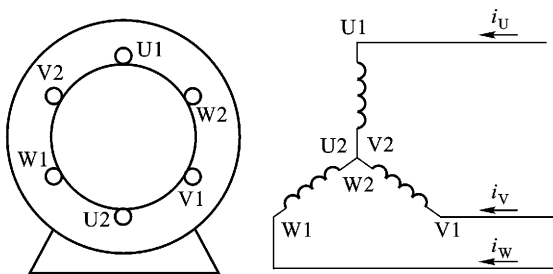


图 3.28 通入的三相交流电流

2. 旋转磁场的转速和转向

旋转磁场的转速与交流电的变化速度(频率)有关,交流电变化一周,旋转磁场也转过一周,设交流电的频率为 50 Hz ,则旋转磁场每秒转过 50 转,而每分钟的速度 $n_0 = 60f = 60 \times 50\text{ r/min} = 3\,000\text{ r/min}$ 。旋转磁场的转速又称同步转速。同步转速的快慢除了与电源的频率有关,还与定子绕组的结构有关,如果三相异步电动机的每相定子绕组是由两个串联的线圈组成,则定子绕组由六个线圈组成,每组线圈在空间相隔 60° ,三相接成星形,如图 3.29 所示,通入三相交流电,同理分析可得出:由三相交流电产生的磁场有四个磁极,即极对数 $p = 2$ 。当交流电变化 90° 时,磁场只转过 45° ,当电流变化一个周期时,磁场只转过 180° ,这就是说磁场的转速与极对数 p 成反比关系,极对数增加,磁场的转速就减小。旋转磁场的转速公式可表示为

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (3.11)$$

式中, n_0 ——旋转磁场转速,单位是转/分,符号 r/min;

p ——电动机的极对数。

如果任意改变交流电源中的两相与电动机定子绕组的接线,即改变交流电源相序,如 U1U2 绕组接电源 V 相,V1V2 绕组接电源 U 相,则旋转磁场的转向将相反。

综上所述,当三相异步电动机的定子绕组通入三相交流电时,产生的旋转磁场转速与电源的频率和磁场的极对数有关,旋转磁场的转向与电源的相序有关,要使旋转磁场反转(即改变电动机的转向),只要把接到三相绕组首端上的任意两根电源线对调即可。

例 3.3 通入三相异步电动机定子绕组中的交流电频率 $f = 50$ Hz,试分别求电动机极对数 $p = 1$ 、 $p = 2$ 、 $p = 3$ 及 $p = 4$ 时旋转磁场的转速 n_0 。

$$\text{解 当 } p = 1 \quad n_0 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{1} \text{ r/min} = 3\,000 \text{ r/min}$$

$$\text{当 } p = 2 \quad n_0 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} \text{ r/min} = 1\,500 \text{ r/min}$$

同理,当 $p = 3$ 时 $n_0 = 1\,000$ r/min;当 $p = 4$ 时 $n_0 = 750$ r/min。

上述四个数据很重要,因为目前使用的各类三相异步电动机的转速与上述四种转速密切相关。

3. 电动机的转动原理

图 3.30 为一台三相笼型电动机定子和转子剖面图。当电动机的定子绕组通以三相对称交流电时,就会产生一个旋转磁场。设旋转磁场以同步转速 n_0 顺时针转动,则静止的转子与旋转磁场之间就有相对运动,相当于定子静止,转子逆时针方向运动。转子上半部分的导体相当于向左作切割磁感线运动,产生感应电动势,感应电动势的方向用右手定则判断,方向垂直纸面向外;转子下半部分的导体相当于向右作切割磁感线运动,产生感应电动势的方向垂直纸面向里。由于转子导体两端被铜环短接,构成闭合回路,因此转子导体中就有感应电流通过,如图 3.30 所示。

有电流流过的转子导体将在旋转磁场中受电磁力 F 的作用,其方向可用左手定则判定,如图中箭头所示,该电磁力 F 在转子轴上形成电磁转矩,使电动机的转子以转速 n 旋转。由图可见,转子的转向和旋转磁场的转向一致,因此要改变电动机的转动方向,只需改变旋转磁场的转向即可。

从上面的分析还可看出,电动机的转子产生感应电流并受电磁转矩旋转是因为转子与旋转磁场间存在相对运动,也就是说两者保持着一定的转速差,这是异步电动机能正常工作的必要条件。因为若转子转速达到旋转磁场的转速时,两者之间就没有相对运动,转子也就不再作切割磁

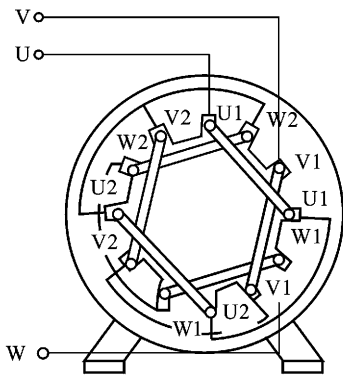


图 3.29 四极电动机

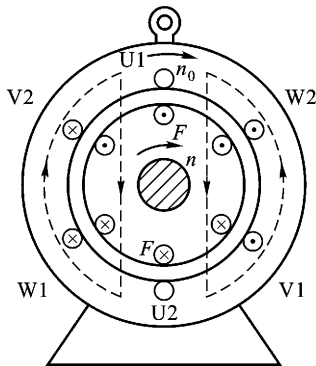


图 3.30 笼型电动机的剖面图

感线的运动,转子导体也不再产生感应电流,转子受到的电磁转矩为零,转子就会自动减速。另一方面,一旦转子转速变慢,转子和旋转磁场间又重新产生相对运动,使转子重新受到电磁转矩的作用,而且电磁转矩增大。当电磁转矩和负载产生的阻力矩平衡时,转子就不再减速,而且在较低的转速下又作等速运动。

综上所述,在负载不变时,当转子转速偏高而接近同步转速时,转子受到的电磁转矩变小,使转子减速;当转子转速偏低时,转子受到的电磁转矩变大,又会迫使转子加快转速。最后使转子基本稳定在某一转速上。而转子的转速 n 是总是小于同步转速 n_0 (即步调不一致),所以这种电动机称为异步电动机。又因为这种电动机的转子电流是由电磁感应产生的,故又称为感应电动机。

(1) 转差率

三相异步电动机旋转磁场的转速 n_0 与转子转速 n 之间的差值除以 n_0 的值称为异步电动机的转差率,用 s 表示,其表达式为

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (3.12)$$

转差率是分析电动机运行状况的一个重要参数。通常电动机在正常运行时的转速和同步转速非常接近,所以它的转差率很小,约为 $0.01 \sim 0.08$ 。但是在电动机起动瞬间,即 $n = 0$, $s = 1$,旋转磁场以同步转速 n_0 切割静止的转子导体,此时转子与旋转磁场间的相对转速最大,因此转子导体内产生很大的感应电动势和电流。同变压器工作原理一样,转子电流增大,定子电流必然也增大,此时的电流称为起动电流,它一般为正常工作时电流的 $4 \sim 7$ 倍,易造成电动机绕组损耗过大,严重发热,故三相异步电动机起动时,常常要采取一些措施把起动电流限制在一定数值上,如采取降压起动的方法。

例 3.4 有一台三相异步电动机,其额定转速 $n_N = 1\,440 \text{ r/min}$,求电动机的极数和额定转差率 s_N 。

解 $n_N = 1\,440 \text{ r/min}$,与其最近的同步转速为

$$n_0 = 1\,500 \text{ r/min}$$

结合例 3.3 可知,电动机的极对数 $p = 2$,故电动机为四极电动机。

额定转差率为

$$s_N = \frac{n_0 - n_N}{n_0} = \frac{1\,500 - 1\,440}{1\,500} = 0.04$$

(2) 电动机的转速

根据式(3.11)和式(3.12),可以得到电动机转子的转速 n 与电动机输入定子绕组的交流电频率 f 、转差率 s 和电动机极对数 p 之间的关系式为

$$n = \frac{60f}{p}(1 - s) \quad (3.13)$$

从式(3.13)可知,三相异步电动机调速的方法有三个:①改变定子绕组极对数 p ;②改变转差率 s ;③改变电源频率 f 。在数控机床中,交流电动机的调速采用变频调速的方式。

3.2.3 三相异步电动机的机械特性

三相异步电动机的机械特性是指在一定条件下,电动机转速与电磁转矩之间的关系。图

3.31 所示即为机械特性曲线。图中横坐标表示电动机的电磁转矩,纵坐标表示转子转速。

分析机械特性的目的是为了帮助使用者了解电动机的运行性能。从图中可知,该曲线可分为两个区, ac 段称为稳定运行区, cd 段称为不稳定区。

当电动机工作在稳定区上某一点(如 b 点)时,电磁转矩 T 与负载转矩 T_L 相平衡而保持匀速转动。若由于某种原因引起负载转矩突然增加,则在此瞬间 $T < T_L$,于是转速 n 下降,工作点将沿特性曲线下移,电磁转矩自动增大,直到 $T = T_L$ 时 n 不再降低,电动机便在较低转速下达到新的平衡;反之若负载转矩由于某种原因突然减小,同理可推出电动机将在较高的转速下稳定运行,可见,当电动机运行在 ac 段时,无论负载如何变化,在 T_L 不超过 T_m 的情况下,电动机轴上输出转矩必定随负载而变化,最后达到平衡,并稳定运行。这说明电动机具有适应负载变化的能力,由于异步电动机机械特性的稳定区比较平坦,即当负载转矩有较大变化时,异步电动机的转速变化并不大,因此这样的机械特性称为硬特性。硬特性适用于金属切削机床等。

当电动机工作在不稳定区时,电磁转矩不能自动适应负载转矩的变化,因而不能稳定运行。此时,当负载转矩 T_L 增加使转速 n 降低时,工作点将沿特性曲线下移,电磁转矩反而减小,导致电动机的转速越来越低,直到停转;当负载转矩 T_L 减小时,电动机转速又会越来越高,直到进入稳定区运行。

1. 额定转矩

额定转矩是指电动机在额定负载下稳定运行时的电磁转矩,用字母 T_N 表示。此时电动机的转速为额定转速,如图3.31所示。异步电动机的额定工作点(N 点)通常在机械特性稳定区的中部,为了避免电动机出现过热现象。一般不允许电动机在超过额定转矩情况下长期运行,但允许短期过载运行。

异步电动机的额定转矩 T_N 可以根据额定功率 P_N 和额定转速 n_N 来计算,其表达式为

$$T_N = 9\,950 \frac{P_N}{n_N} \quad (3.14)$$

式中, T_N ——电动机的额定转矩,单位是牛米,符号为 $N \cdot m$;

P_N ——电动机的额定功率,单位是千瓦,符号为 kW 。

2. 最大转矩

最大转矩是电动机能够提供的极限转矩,用字母 T_m 表示。由于它是机械特性上稳定区和不稳定区的分界点,故电动机运行中的负载转矩不能超过最大转矩,否则电动机的转速会越来越低,直至停转(俗称闷车),此时电动机的电流会增至额定值的 $6 \sim 7$ 倍,时间过长将引起电动机的严重过热,甚至烧毁。

电动机最大转矩 T_m 与额定转矩 T_N 的比值称为过载系数,用符号 λ 表示,其表达式为

$$\lambda = \frac{T_m}{T_N}$$

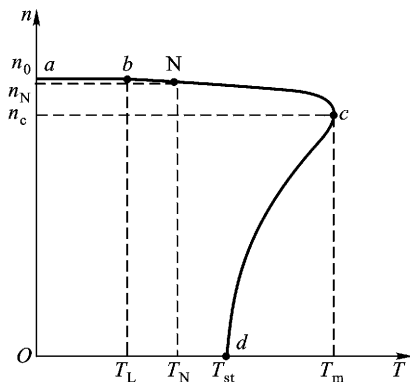


图 3.31 异步电动机的机械特性

过载系数用来描述电动机允许的瞬时过载能力。一般三相异步电动机的过载系数为 1.8 ~ 2.2。

3. 起动转矩

电动机的起动转矩是指电动机刚起动瞬间($n = 0$)的转矩 ,用字母 T_{st} 表示。起动转矩必须大于负载转矩 ,电动机才能旋转。因此 ,起动转矩是衡量电动机起动性能好坏的重要指标 ,通常用起动转矩倍数 λ_{st} 来表示 ,其表达式为

$$\lambda_{st} = \frac{T_{st}}{T_N}$$

一般异步电动机的起动转矩倍数在 1.4 ~ 2.2 之间。

4. 转矩与外加电压的关系

电动机的电磁转矩除与转速有关外 ,还与外加电压有关。在电源频率、电动机结构和转速一定时 ,异步电动机转矩的大小与加在定子绕组上的电压的平方成正比 , $T \propto U^2$,因此外加电压变化很小时 ,异步电动机的起动转矩将显著变化。

3.2.4 三相异步电动机的铭牌数据

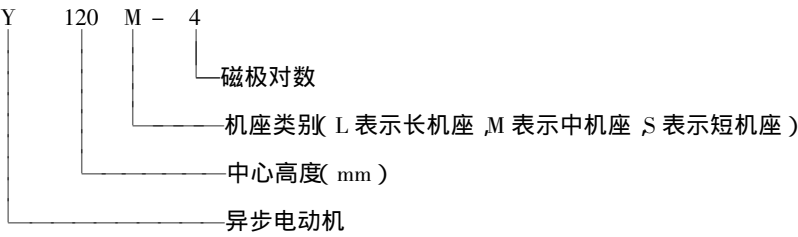
为了使用户正确合理地使用电动机 ,每一台电动机的机座上部都有一块铭牌。铭牌上标有该电动机的型号及一些技术数据 ,如图 3.32 所示。看懂铭牌数据的含义是正确使用和维护电动机必不可少的。现以 Y120M-4 型异步电动机的铭牌为例 ,说明铭牌上各数据的含义。

三相异步电动机			
型号	Y120M-4	功 率	7.5 kW
电压	380 V	电 流	15.4 A
转速	1 440 r/min	绝缘等级	B
	年 月	编 号	× × 电机厂

图 3.32 三相异步电动机铭牌

1. 型号

为了适应不同用途和不同工作环境的需要 ,电动机制成不同的系列 ,每种系列电动机用各种型号表示。Y120M-4 各个符号表示的含义如下



2. 额定电压

额定电压指电动机定子绕组规定使用的线电压。一般规定电动机的电压不应高于或低于额

定值的 5%。如果铭牌上有两个电压值 ,表示定子绕组不同接法时的线电压。

3. 额定转速

额定转速是指电动机在额定运行状态下转子的转速。

4. 额定功率与效率

额定功率是指电动机在额定工作状态下运行时允许输出的机械功率 P_{2N} 。电动机的输出功率 P_{2N} 并不等于输入功率 P_{1N} ,其差值等于电动机的损耗功率 ,包括铜损、铁损和机械损耗等。电动机的输出功率 P_{2N} 与输入功率 P_{1N} 之比称为效率 η_N 。以 Y120M-4 型电动机为例：

输入功率 $P_{1N} = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 15.4 \times 0.85 \text{ W} = 8.6 \times 10^3 \text{ W} = 8.6 \text{ kW}$

输出功率 $P_{2N} = 7.5 \text{ kW}$

效率 $\eta = \frac{P_{2N}}{P_{1N}} \times 100\% = \frac{7.5}{8.6} \times 100\% \approx 87\%$

一般三相异步电动机的额定效率为 72% ~ 93%。

5. 额定电流

额定电流是电动机在额定工作状态下定子绕组的线电流 ,用字母 I_N 表示。如果铭牌上有两个电流值 ,表示定子绕组在两种不同接法时的额定电流。

6. 绝缘等级

绝缘等级表示电动机绕组及其他绝缘部件所用绝缘材料的等级。绝缘材料按耐热性能可分为 7 个等级 ,如表 3.1 所示。

表 3.1 绝缘材料耐热性能等级

绝缘等级	Y	A	E	B	F	H	C
最高允许温度/°C	90	105	120	130	155	180	大于 180

7. 额定频率

额定频率是指加在电动机定子绕组上的电源频率。我国规定工业用电标准频率为 50 Hz。

8. 接法

这是指电动机定子三相绕组在额定电压下的连接方法。若铭牌上写 Δ ,额定电压是 380 V 时 ,就表明电动机额定电压为 380 V 时 ,定子绕组应接成 Δ 形 ,若铭牌上的电压写 380/220 V ,接法写 Y/ Δ ,则表明电源电压为 380 V 时应接成 Y 形 ,电源线电压为 220 V 时应接成 Δ 形。

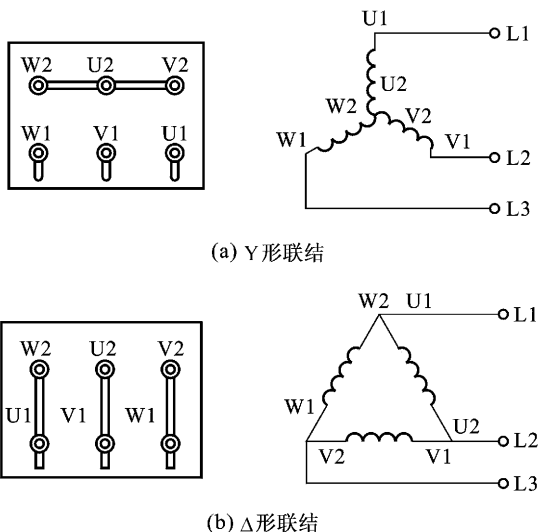
图 3.33 所示为三相笼型异步电动机接线盒中其六个线端采用 Y 形和 Δ 形联结时的接线方法。采用 Y 形联结时 ,应将三相绕组的首端 U1、V1、W1 接电源 ,末端 U2、V2、W2 连接在一起 ,采用 Δ 形联结时 ,应将 U1 接 W2、V1 接 U2、W1 接 V2 ,再将这三个点接在三相电源上。

9. 工作方式

这是指电动机按铭牌值工作时可持续运行的时间 ,一般分为连续运行、短时运行、断续运行三种 ,分别用 S_1 、 S_2 、 S_3 表示。

10. 功率因数

功率因数是指电动机输出额定功率时定子绕组相电压与相电流之间相位差的余弦。三相异步电动机的功率因数较低 ,在额定负载时约为 0.7 ~ 0.9 ,而在轻载和空载时更低 ,因此必须正确选择电动机的容量 ,防止“大马拉小车” ,并尽量缩短电动机在轻载和空载状况下运行的时间。

图 3.33 三相笼型异步电动机的 Y 形和 Δ 形联结

3.3 单相异步电动机

单相异步电动机是利用单相交流电源供电的一种小容量交流电动机。由于它具有结构简单、成本低廉、振动和噪声小以及可直接在 220 V 交流电源上使用的特点,因此被广泛应用于家用电器、医疗、自动控制系统中,如电风扇、电冰箱、小型机床等。

3.3.1 单相异步电动机的结构及工作特点

1. 单相异步电动机的结构

单相异步电动机的总体结构和三相异步电动机类似,主要由定子、转子、端盖等组成,如图 3.34 所示。

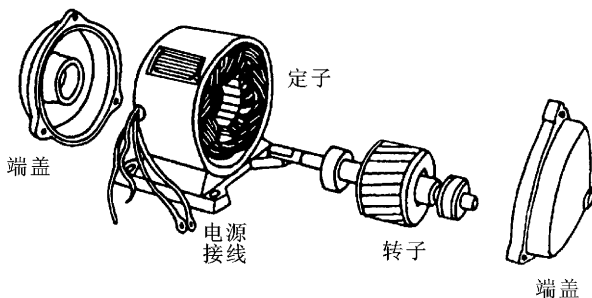


图 3.34 单相异步电动机的结构

(1) 定子

单相异步电动机的定子与三相异步电动机大体相似,定子铁心由硅钢片叠压而成,在定子铁心槽内嵌放定子绕组。单相异步电动机的定子上绕组一般有两套,一套是主绕组或称为工作绕

组,另一套是副绕组或称为起动绕组,主、副绕组在空间相隔 90° 。

(2) 转子

单相异步电动机的转子与三相笼型异步电动机相同,只是体积较小。转子铁心由硅钢片叠压而成,套装在转轴上。转子铁心槽内装有笼式转子绕组。

2. 单相异步电动机的工作特点

单相异步电动机定子绕组上的工作绕组是单相绕组,当工作绕组接通单相交流电源后,就会产生一个磁场,磁场的分布如图 3.35 所示。当通入电流为零时,产生的磁场也为零;当交变电流经过 $T/4$ 达到最大时,磁场也为最大;当电流反向(由正半周变为负半周)时,产生的磁场也反向。

由此可见,单相异步电动机定子工作绕组通入单相交流电后,产生的磁场大小及方向在不断地变化,但磁场的轴线在空间保持固定的位置,这种磁场称为脉动磁场。

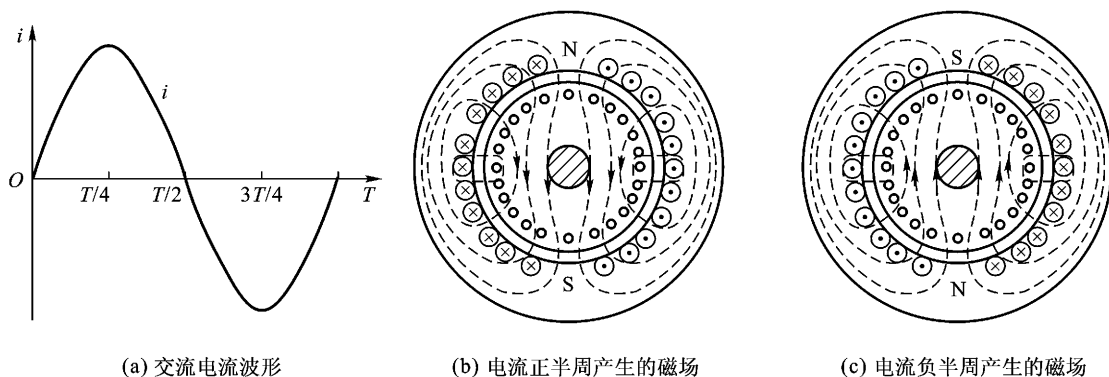


图 3.35 脉动磁场的形成

由于单相异步电动机的转子原来静止不动,则在脉动磁场的作用下,转子导体因与磁场之间没有相对运动而不产生感应电动势和电流,也就不存在电磁力的作用,因此转子仍然静止不动,即单相异步电动机没有起动转矩,不能自行起动。此时,如果拨动一下电动机的转子,则转子导体就切割定子脉动磁场,从而产生感应电流,并在磁场中受到电磁力的作用,与三相异步电动机转动原理一样,转子将顺着拨动的方向转动起来。

通过上述分析可知,单相异步电动机转动的关键是要解决电动机起动问题。

3.3.2 单相电容式异步电动机

单相异步电动机根据不同的起动方法可分为电容起动式、电容式和罩极式等几种。由于电容式电动机的效率高、运行性能好、过载能力大而且制作方便,所以应用较为广泛。

图 3.36 所示为单相电容式异步电动机的电气原理图。由图可知,单相电容式异步电动机的定子绕组,除了工作绕组 U_1U_2 外,还有一个与工作绕组在空间相隔 90° 的起动绕组 Z_1Z_2 ,起动绕组与电容 C 串联后再与工作绕组并联接在单相交流电源上。

当电动机接通交流电源时,在 U_1U_2 和 Z_1Z_2 两个绕组中流过的电流分别是 i_U 和 i_Z 。由于工作绕组的线圈匝数较多,电感大,是电感性电路。而起动绕组中因串有电容,只要选择适当的电容,就可使起动绕组电路为电容性电路,并可使流过起动绕组 i_Z 的电流超前工作绕组电流 i_U 90° ,如图 3.37 所示。

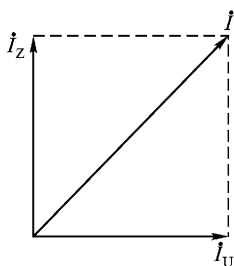
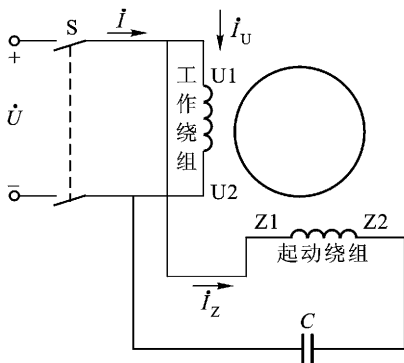


图 3.36 单相电容式异步电动机电气原理图

图 3.37 电流相量图

在空间相隔 90° 的两个绕组中,分别通入相位互差 90° 的两相电流就可在空间产生旋转磁场。在这个旋转磁场的作用下,电动机的转子就会获得起动转矩,并沿着磁场旋转的方向转动。

改变单相异步电动机转向的具体方法是:将任意一个绕组的两个接线端换接,电容分相的异步电动机要实现反转,只要将电容从一个绕组换接到另一绕组中。

思考与练习

- 3.1 匀强磁场中,垂直放置一个横截面积为 12 cm^2 的铁心,设其中的磁通为 $4.5 \times 10^{-3} \text{ Wb}$,铁心的相对磁导率为 5 000,求磁场的磁场强度。
- 3.2 一个空心环形螺管线圈,1 000 匝,内径为 0.2 m,外径为 0.3 m,当流入 5 A 的电流时,求(1)线圈的 H 、 B 、 Φ 值(2)以铸铁为线圈铁心时的 H 、 B 、 Φ 值。
- 3.3 供电线路电压 220 V,通过变压器降至机床照明电压 36 V,若变压器的一次绕组是 1 140 匝,二次绕组是多少匝?用这台变压器给 40 W 白炽灯供电,如果不考虑变压器本身的损耗,一、二次绕组的电流各是多少?
- 3.4 在电压为 220 V 交流电路中,接入一个变压器,它的一次绕组匝数为 800 匝,二次绕组匝数为 46 匝,二次绕组接在白炽灯的电路上,通过的电流是 8 A,如果变压器的效率为 90%,求一次绕组中通过的电流是多大?
- 3.5 某晶体管收音机的输出变压器,其一次绕组匝数 $N_1 = 240$ 匝,二次绕组匝数 $N_2 = 60$ 匝,原接有音圈阻抗为 4Ω 的扬声器,现在改接 16Ω 的扬声器,二次绕组匝数如何变动?
- 3.6 电流互感器、电压互感器、自耦变压器在使用时应注意什么?
- 3.7 三相异步电动机的结构是怎样的?绕线转子异步电动机和笼型异步电动机结构的区别什么?
- 3.8 三相异步电动机的旋转磁场是怎样产生的?
- 3.9 简述三相异步电动机的工作原理。
- 3.10 Y100L1-4 型三相异步电动机输出功率 $P_2 = 2.2 \text{ kW}$,电压 $U_1 = 380 \text{ V}$,转速 $n_N = 1 420 \text{ r/min}$,功率因数 $\lambda = 0.82$,效率 $\eta = 81\%$, $f = 50 \text{ Hz}$,试计算电流 I_1 、转差率 s 、输出转矩 T_2 。
- 3.11 Y200L1-4 型三相异步电动机输出功率 $P_2 = 30 \text{ kW}$,电压 $U_1 = 380 \text{ V}$,电流 $I_1 = 56.8 \text{ A}$,

效率 $\eta = 92.2\%$,转速 $n = 1\,470\text{ r/min}$, $f = 50\text{ Hz}$,求电动机功率因数、输出转矩和转差率。

3.12 什么是三相异步电动机的起动转矩 T_{st} ? 什么是额定转矩 T_{N} ? 只有当起动转矩大于额定转矩时 ,电动机才能够起动 ,这句话对吗 ,为什么 ?

3.13 某台笼型三相异步电动机 ,额定功率 $P_{\text{N}} = 20\text{ kW}$,额定转速 $n_{\text{N}} = 970\text{ r/min}$,过载系数 $\lambda = 2.0$,起动转矩倍数 $\lambda_{\text{st}} = 1.8$,求该电动机的额定转矩 T_{N} ,最大转矩 T_{m} 和起动转矩 T_{st} 。

3.14 画出三相异步电动机的机械特性曲线 ,说明异步电动机的稳定运行区域和不稳定运行区域。

3.15 单相交流电产生的磁场是什么磁场 ? 在脉动磁场作用下的转子能否自行起动 ? 说明单相异步电动机的工作原理。

第 4 章

电气控制基础

本章将学到：

1. 常用的手动和自动控制的低压电器有哪些 ,它们各有什么作用 ?
2. 用于机床电气控制常见的电动机直接起动、降压起动、制动等控制电路有哪些 ,它们的工作过程怎样 ?
3. CA6140 车床和 X62W 铣床的控制电路各有什么特点 ,它们机床部件的运动是怎样来控制的 ?
4. 电是怎样从发电厂送到企业的 ,怎样才能做到安全用电 ?

4.1 常用低压电器

电器是在电能的生产、输送、分配和应用中起着通断、控制、保护、检测和调节等作用的电气设备。

电器的用途广泛 ,种类繁多 ,按工作方式可分为高压电器和低压电器 ,低压电器通常是指工作在交、直流电压 1 200 V 及以下的电器。低压电器按其用途又可分为低压配电电器和低压控制电器 ,前者主要用于低压配电系统 ,如刀开关、熔断器等 ,后者主要用于电气控制系统 ,如主令电器、接触器、继电器等。

4.1.1 低压开关

开关是应用最广泛的手动电器。其主要作用是接通或断开长期工作的电气设备的电源。在电气控制电路中 ,刀开关常用作电源引入开关 ,也可用作不经常起动、停止的小容量电动机和局部照明电路的控制开关。

1. 胶壳刀开关

胶壳刀开关也称开启式负荷开关 ,主要由操作手柄、动触刀、静夹座、进线座、出线座、熔丝等组成。常用的胶壳刀开关有 HK1、HK2 等系列 ,它们的结构和符号如图 4.1 所示。

HK 系列刀开关不设专门的灭弧装置 ,因此不宜带负载操作。若带一般小负载操作 ,动作应迅速 ,且不宜频繁地分、合电路。

2. 铁壳开关

铁壳开关也称封闭式负荷开关 ,由触刀、熔断器、操作机构和铁外壳等组成。常用的铁壳开关有 HH3、HH4、HH10 等系列 ,其结构如图 4.2 所示 ,图形及文字符号与胶壳刀开关相同。

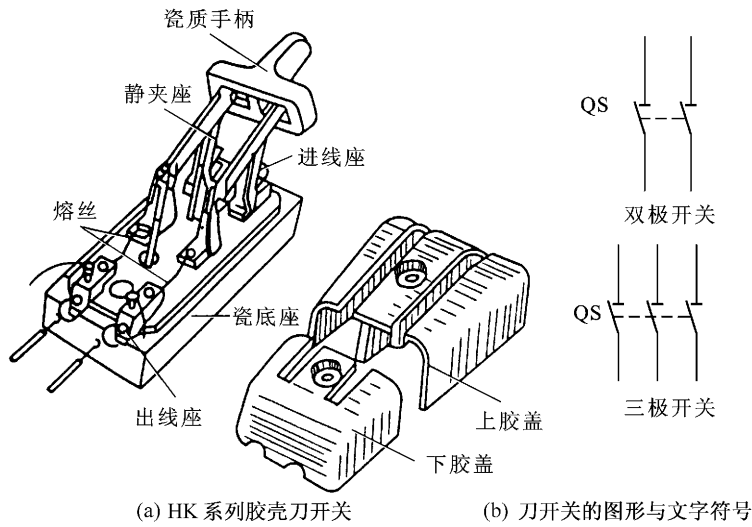


图 4.1 胶壳刀开关

HH 系列铁壳开关有灭弧装置 ,它的操作机构一是装有速断弹簧 ,缩短了开关的通断时间 ,改善了灭弧性能 ;二是设有联锁装置 ,以保证开关合闸后不能打开开关盖 ,而开关盖打开后又不能合闸。

3. 组合开关

组合开关又称转换开关 ,它实质上是一种特殊的刀开关 ,用动触片的旋转代替闸刀的推合和拉开。常用的组合开关有 HZ5、HZ10、HZ15 等系列 ,如图 4.3 所示。

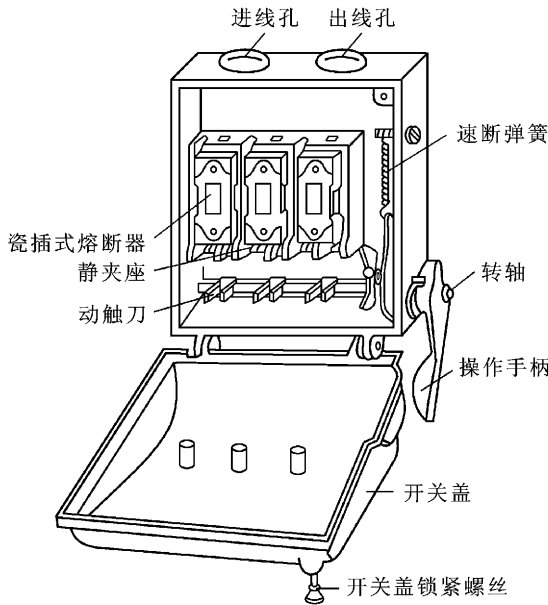
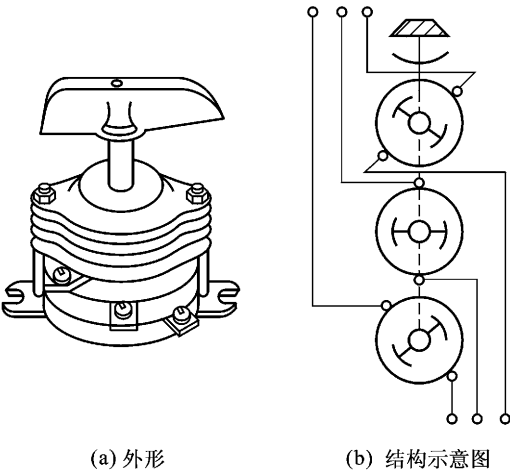


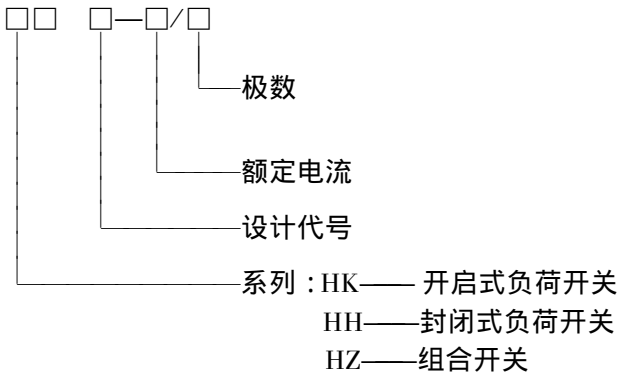
图 4.2 HH 系列铁壳开关



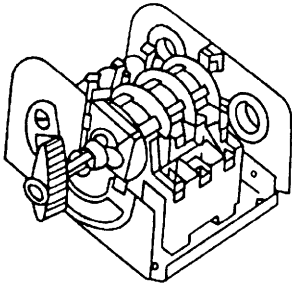
(a) 外形 (b) 结构示意图
图 4.3 HZ 10 系列三极组合开关

组合开关由装在同一根轴上的单个或多个单极旋转开关叠装在一起组成。转动手柄时 ,每层的动触片随转轴一起转动 ,使多对触点同时接通和断开。

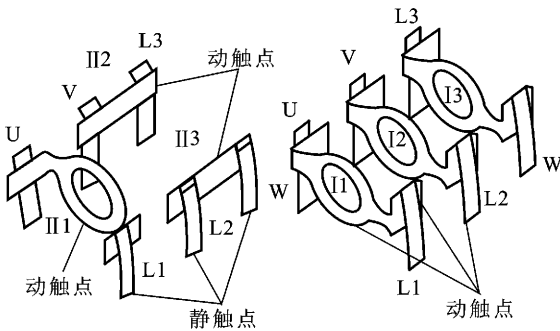
开关的型号意义：



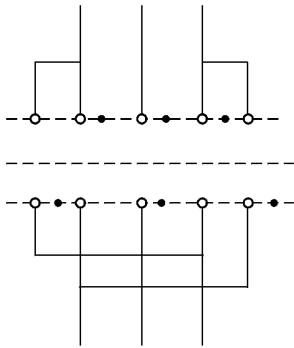
有一种组合开关,它不但能接通和断开电源,而且还能改变电源输入的相序,用来直接实现对小容量电动机的正反转控制,这种组合开关称为倒顺开关,也称为可逆转换开关。常用的有 HZ3 系列,其外形结构和符号如图 4.4 所示。图 4.4(c)中虚线表示手柄操作的位置线,有“•”表示手柄位于该位置时相对应的触点接通,无“•”表示不通。



(a) 外形



(b) 触点位置



(c) 符号

图 4.4 倒顺开关

4. 低压断路器

低压断路器又称自动空气断路器,是用作低压配电或电动机的保护开关,它既有开关作用,又能实现短路、过载、欠压等保护。

低压断路器的结构有塑壳式、框架式等形式,其中塑壳式应用较广,其操作多为扳动式和按钮式。常用的塑壳式有 DZ5、DZ10、DZ20 等系列,图 4.5 是 DZ5 - 20 型低压断路器的外形和结构,其工作原理示意图如图 4.6 所示。

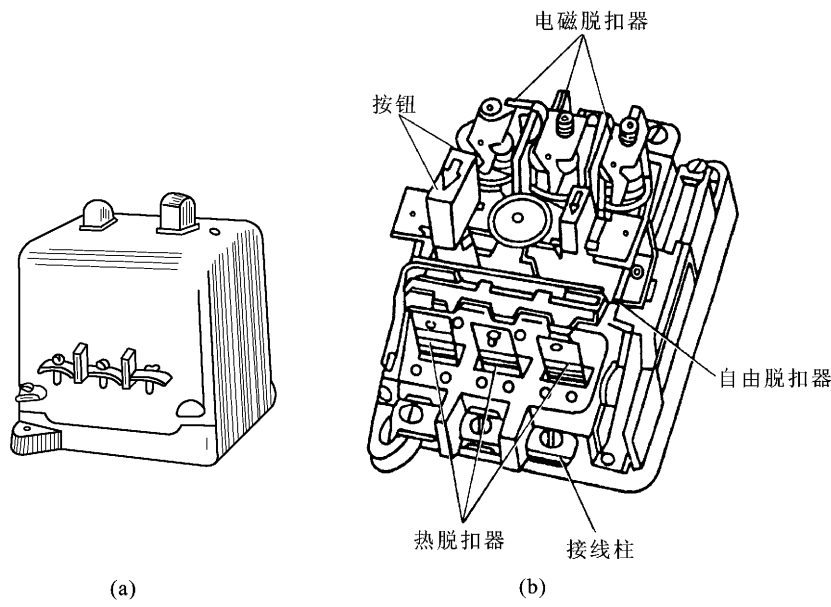


图 4.5 DZ5 - 20 型低压断路器

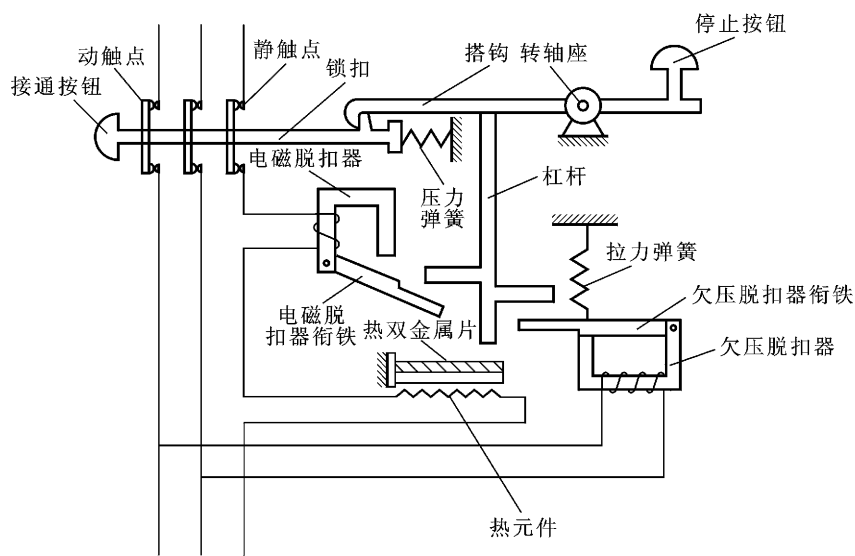


图 4.6 低压断路器工作原理示意图

低压断路器主要由触点系统、各种脱扣器和操作机构等部分组成。外壳上有“分”按钮(红色)和“合”按钮(绿色)以及触点接线柱。按下“合”按钮,搭钩钩住锁扣,使三对触点闭合;按下“分”按钮,搭钩松钩,触点分断。

低压断路器是怎样实现短路、过载、欠压等保护呢？当电路发生短路或严重过载时，电磁脱扣器会吸引衔铁，使触点分断。当发生一般过载时，电磁脱扣器不动作，但热元件会使双金属片受热弯曲变大，推动杠杆使触点断开。欠压脱扣器与电磁脱扣器恰恰相反，当电路正常工作时，衔铁吸合；当电源电压降到某一值时，欠压脱扣器的衔铁释放，杠杆被撞击而导致触点分断。

4.1.2 主令电器

在电路中用来控制其他电器动作，以发送控制“指令”的电器称为主令电器。主令电器的种类很多，常用的有按钮开关、行程开关、万能转换开关和主令控制器等。

1. 按钮开关

按钮开关简称按钮，它是用来短间接通或断开小电流控制电路的手动电器。按钮开关由按钮帽、复位弹簧、桥式动触点、静触点等组成，它的结构和符号如图 4.7 所示。

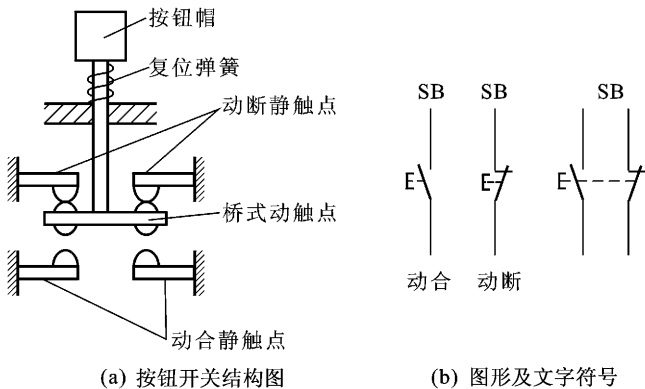


图 4.7 按钮开关

按钮开关在电气控制电路中被广泛应用，而且同一控制电路中往往有几个按钮，为了标明各按钮的作用，通常将按钮帽做成不同的颜色以示区别，避免误操作。一般用红色表示停止，绿色或黑色表示起动、工作，其他还有黄、白、蓝等颜色，供不同场合选用。

按钮开关的种类繁多，常用的按钮开关有 LA18、LA19、LA20 及 LA25 等系列，图 4.8 是部分常见按钮开关的外形。

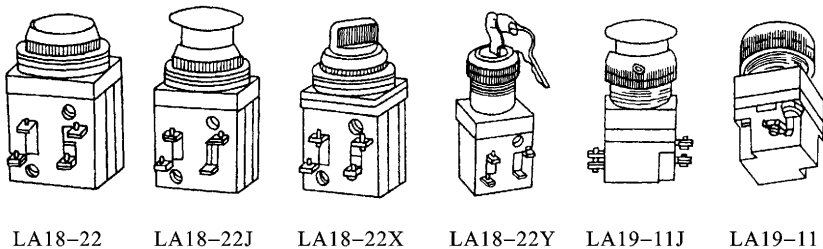
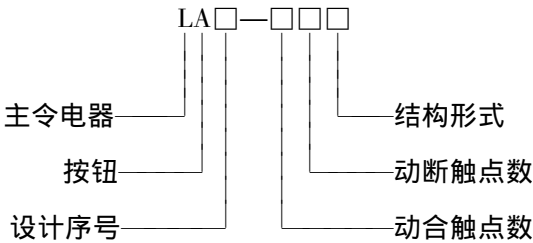


图 4.8 常用按钮开关的外形

按钮开关的型号意义：



2. 行程开关

在生产机械中,需要有一种开关来控制某些机械部件的运动行程或位置,这种开关称行程开关,又称限位开关。

行程开关的种类虽然很多,但其结构大体相同,可分为三部分:操作机构、触点系统和外壳。下面以图 4.9 所示的按钮式行程开关的结构示意图来说明它的工作原理。当运动机械的挡块碰压到顶杆,使动断触点断开,动合触点闭合;当挡块离开顶杆时,动断、动合触点恢复原状。图 4.10 是常见的三种行程开关的外形。其中按钮式和单轮旋转式行程开关为自动复位式。双轮旋转式行程开关由于没有复位弹簧,当挡块离开后不能自动复位,必须由挡块从反方向碰压后才能复位。

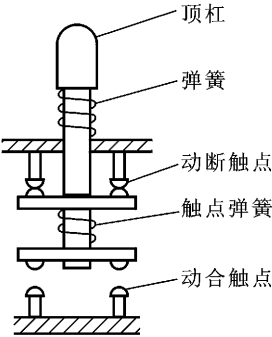


图 4.9 按钮式行程开关结构示意图

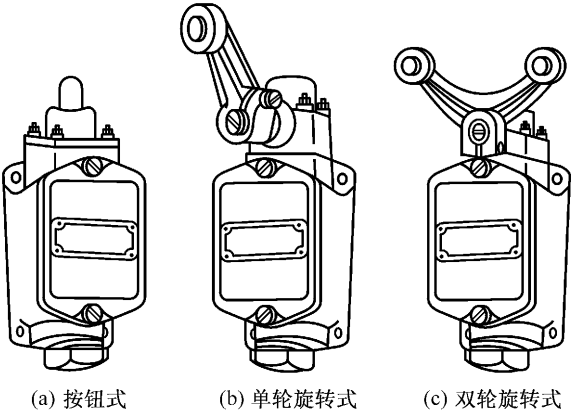


图 4.10 行程开关

常用的行程开关有 LX19、LX31、LX32、JLXK1 等型号。行程开关的符号如图 4.11 所示。

行程开关的型号意义:

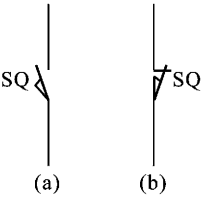
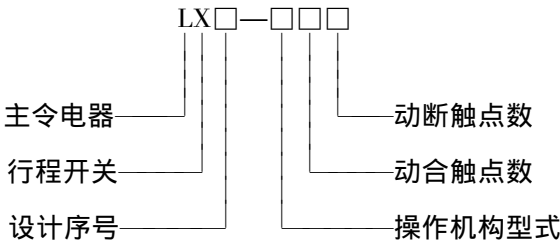


图 4.11 行程开关的符号

3. 接近开关

接近开关是一种无触点的开关,它的功能是当物体与之接近到一定距离时,就发出动作信号,以控制继电器或逻辑元件。它克服了有触点行程开关操作频率低、使用寿命较短、可靠性较差等缺点,目前已在自动控制系统中得到广泛应用。它的用途除作行程控制和限位保护外,还可

应用于检测、计数、定位等方面。

接近开关的种类较多 ,有高频振荡型、电磁感应型、电容型、永磁型及磁敏元件型、光电型、超声波型等。常用的高频振荡型接近开关有 LXJ6、LXJ7、LXJ3 和 LJ5A 等系列。

4.1.3 熔断器

熔断器是一种最简单有效的保护电器 ,它在低压配电和电气控制系统中主要作短路保护。

1. 熔断器的构造及性能

熔断器主要由熔体和放置熔体的熔管或熔座两部分组成。熔体由易熔合金(如铅锡合金等)制成丝状或片状 ,熔体的熔点一般在 200℃ ~ 300℃ 左右。

熔断器接入电路时 ,熔体串联在电路中。电路正常工作时 ,熔体发热的温度低于熔化温度 ,故长期不熔断。一旦发生短路或严重过载时 ,熔体温度急剧上升而熔断 ,切断电路 ,从而保护了电路和设备。熔断器对过载反应不很灵敏 ,当电气设备发生轻度过载时 ,熔断器将持续很长时间才熔断 ,有时甚至不熔断。因此 ,熔断器一般不宜作过载保护。

熔断器的种类很多 ,结构也不同 ,有插入式、螺旋式、有填料封闭管式、快速熔断器等。在电气控制电路中 ,常使用插入式和螺旋式两种。常用的有 RC1A 系列和 RL1 系列等 ,其外形结构和符号如图 4.12 所示。

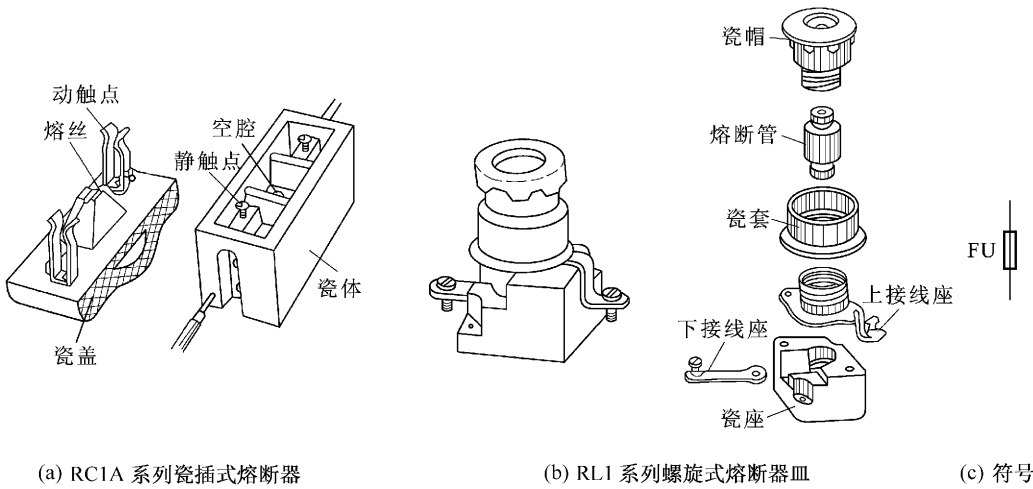
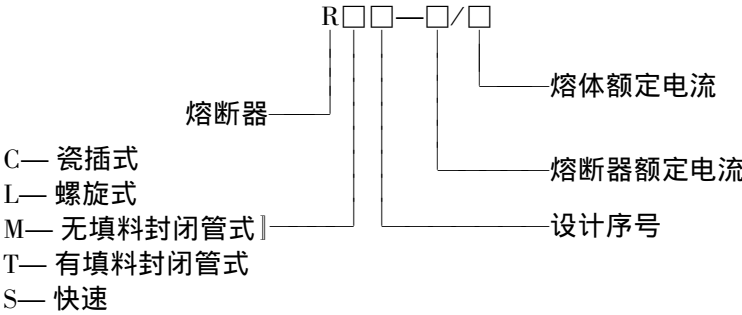


图 4.12 常用熔断器的外形结构和符号

熔断器的型号意义：



2. 熔断器的选用

正确选用熔断器和熔体 ,才能既保证电路正常工作 ,又起到应有的保护作用。

- ① 熔断器的额定电压应等于或大于被保护电路的工作电压。
- ② 熔断器的额定电流应等于或大于所装熔体的额定电流。
- ③ 熔体的额定电流根据不同的负载有以下几种选择：
 - a. 照明、电炉等阻性负载 额定电流应等于或稍大于负载的工作电流。
 - b. 对一台电动机 ,为了防止电动机较大起动电流的短时冲击 ,则取

$$I_{RN} = (1.5 \sim 2.5) I_N \tag{4.1}$$

式中 I_{RN} ——熔体的额定电流；

I_N ——电动机的额定电流。

- c. 对多台不同时起动的电动机 ,则有

$$I_{RN} =(1.5 \sim 2.5) I_{Nmax} + \sum I_N \tag{4.2}$$

式中 I_{Nmax} ——最大的一台电动机的额定电流；

$\sum I_N$ ——其余电动机额定电流的总和。

4.1.4 交流接触器

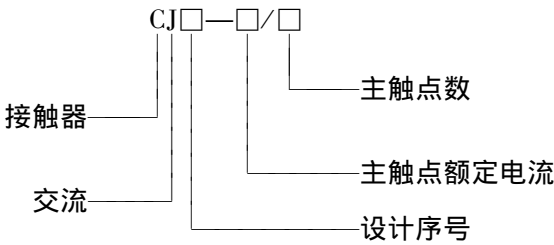
接触器是用来频繁接通和断开电动机或其他负载的一种自动电器。它不仅具有手动电器所不能实现的遥控功能 ,还具有低压释放保护功能 ,而且操作频率高 ,是电气控制系统中应用最广泛的电器。按其工作电流的种类 ,可分为交流接触器和直流接触器两种 ,这里主要介绍交流接触器。

1. 交流接触器的结构与工作原理

交流接触器主要由电磁系统、触点系统、灭弧装置等部件组成。图 4.13 是交流接触器的外形及结构 ,图形及文字符号如图 4.14 所示。交流接触器的触点有主触点和辅助触点之分。主触点是三对动合触点 ,用来通断电流较大的主电路 ;辅助触点有两对动合触点和动断触点 ,用来通断电流较小的控制电路。

当交流接触器线圈通电后 ,流过线圈的电流产生磁场 ,将动铁心吸合 ,通过传动杠杆使动断触点断开 ,动合触点闭合 ;当线圈失电后 ,在弹簧的作用下 ,动铁心释放 ,触点复位。

交流接触器的型号意义：



2. 交流接触器的选用

由于控制对象、使用场合、动作频繁程度等各方面的条件不一定相同 ,这就需要正确选择交流接触器 ,使其技术数据满足电路的要求 ,同时兼顾经济等因素。

- ① 交流接触器主触点的额定电压应大于或等于负载回路的额定电压。

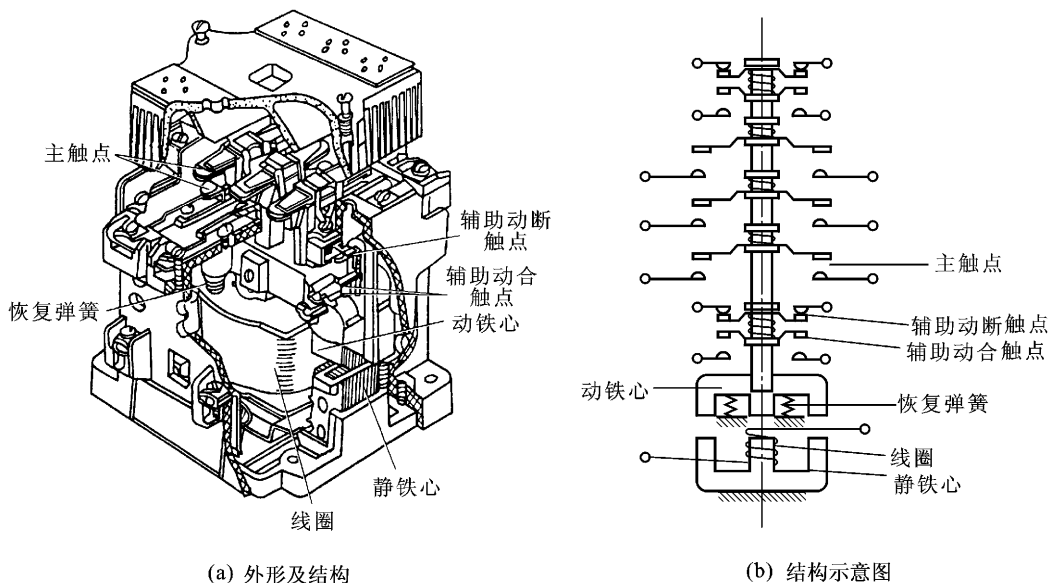


图 4.13 交流接触器的外形及结构示意图

② 交流接触器主触点的额定电流应大于或等于负载的额定电流。对中小型容量的交流电动机,当额定电压为 380 V 时,其额定电流值一般可按 2 倍的额定功率来计算。例 380 V、7.5 kW 的三相笼型电动机,其额定电流约为 15 A。

在电动机频繁起动、制动和频繁正反转的场合下,接触器的容量应增大一倍。

③ 交流接触器线圈的额定电压应与控制电路的电压相同。

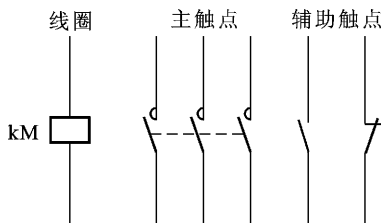


图 4.14 接触器的符号

④ 交流接触器的触点数量和类型应满足控制电路的要求。

常用的交流接触器有 CJ10、CJ20、CJX1、CJX2、CJ12 等系列,以及近年来从国外引进的一些产品,如德国 BBC 公司的 B 系列、西门子公司 3TB、3TD 系列等。

4.1.5 继电器

电气控制电路中,往往需要根据某种输入信号(如电压、电流、时间、转速等)的变化来接通或断开所控制的电路,实现自动控制或保护电气设备。继电器就是具有这种功能的自动电器。继电器的种类很多,下面介绍几种常用的继电器。

1. 中间继电器

在电气控制中,经常需要把某一信号进行传递、放大或变成多路信号,中间继电器就是这样一种具有中间转换作用的自动电器。

中间继电器实质上是一种小容量的交流接触器,它的结构与交流接触器相似,工作原理完全相同,但它的触点没有主、辅之分。每对触点允许通过的电流大小是相同的,其额定电流为 5 A。常用的中间继电器有 JZ7、JZ8 等系列,图 4.15 是中间继电器的外形结构和符号。

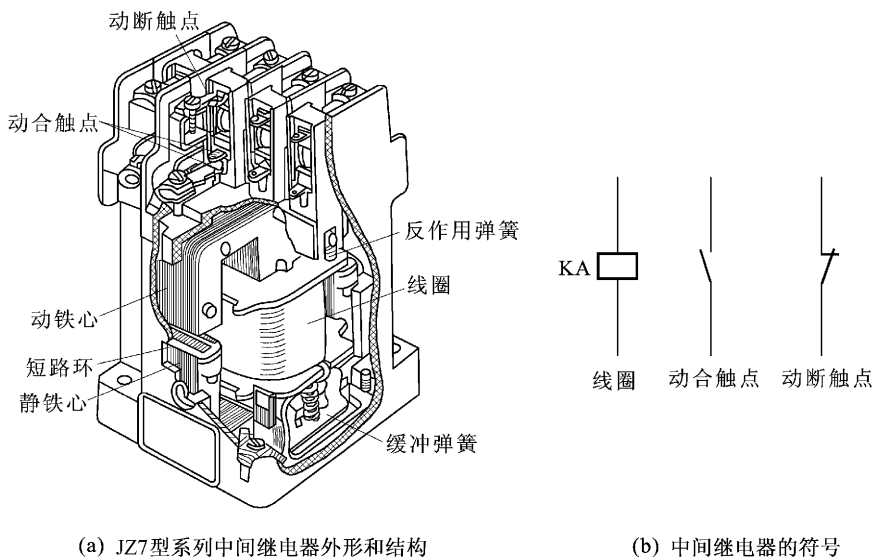


图 4.15 中间继电器外形结构和符号

2. 热继电器

电动机在运行中往往会遇到负载过大或发生一相断路等现象,此时电动机的电流就会超过额定电流。若过载不是很大,过载时间较长,而熔断器的熔体不能熔断,这就会影响电动机的寿命,甚至烧毁电动机,因此就需要过载保护。热继电器就是对电动机或其他负载进行这样一种保护的自动电器。

热继电器主要由热元件、动作机构、触点、电流整定装置和复位机构等组成。图 4.16 是常见的两相热继电器的外形和结构,图 4.17 是热继电器的图形及文字符号。

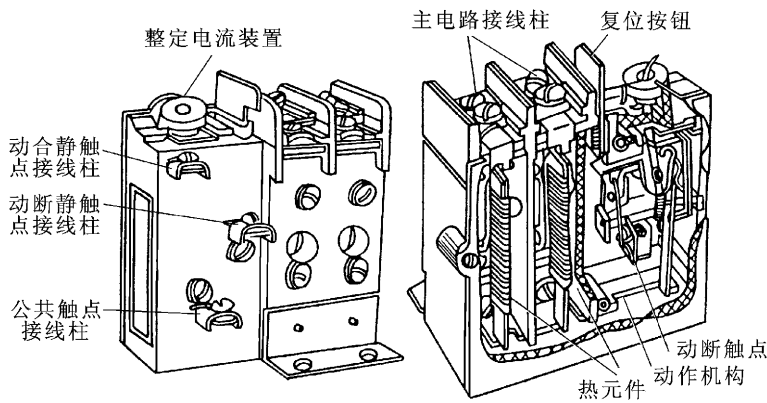


图 4.16 JR10 型热继电器

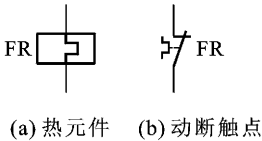


图 4.17 热继电器的符号

热继电器是利用电流的热效应来工作的。它的发热元件由电阻丝和双金属片组成,电阻丝串联在主电路中。当电动机正常工作时,双金属片虽发热稍有弯曲,但未能触及动作机构;当电动机过载时,双金属片弯曲增大,从而推动动作机构使触点动作。

热继电器从结构上分两相和三相两种,三相热继电器又分为带断相保护装置和不带断相保

护装置两种,它们对电动机都能实现过载保护。但两相或三相结构不带断相保护的热继电器,仅对星形联结的电动机能起到断相保护,对三角形联结的电动机一般要选用三相结构带断相保护的热继电器,才能起到断相保护。

3. 时间继电器

时间继电器是按时间顺序对电路进行控制的自动电器。它的种类较多,常用的有电磁式、电动式、空气阻尼式和晶体管式等。由于空气阻尼式时间继电器结构简单,延时范围较大($0.4 \sim 180 \text{ s}$),在交流电路中应用广泛,因此,下面仅介绍常用的空气阻尼式时间继电器。

空气阻尼式继电器的结构如图 4.18 所示,它主要由电磁系统、触点系统、延时机构等部分组成。触点系统由两对瞬时动作触点(一对动合、一对动断)和两对延时动作触点(一对动合、一对动断)组成。

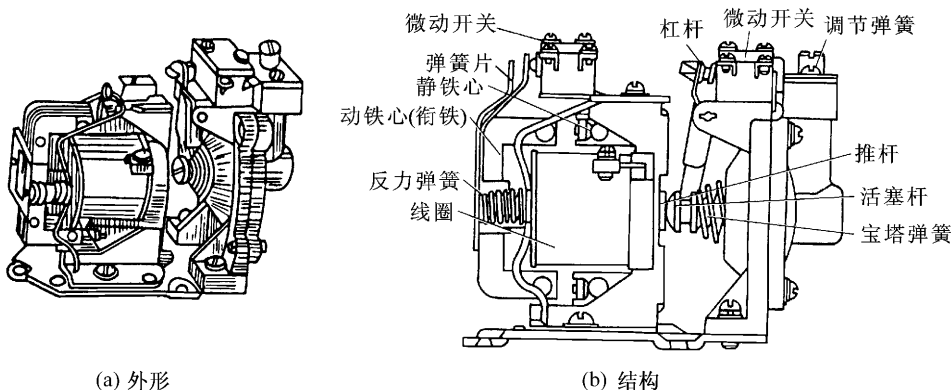


图 4.18 JS7-A 系列时间继电器

空气阻尼式时间继电器可分为通电延时和断电延时两种。通电延时(或断电)型时间继电器,当线圈通电(或断电)后,瞬时动作触点立即动作,而延时动作触点由于延时机构的作用,需经过一定时间才动作,延时的时间可以调节。

常用的空气阻尼式时间继电器有 JS7、JS16、JS23 系列。时间继电器的符号如图 4.19 所示。

4. 速度继电器

速度继电器是反映转速和转向变化的自动电器。它是依据转速的快慢及方向的变化为指令信号,通过触点分合来控制其他电器,从而实现了对电动机的速度控制。

JY1 型速度继电器外形及结构如图 4.20 所示,它主要由定子、转子和触点系统等部分组成。定子是一个由硅钢片叠成的笼型空心圆环,并装有笼型短路绕组。转子是用永久磁铁制成,它和被控制的电动机轴连在一起。触点系统有两组动合、动断触点。

电动机旋转时,与电动机同轴的速度继电器的转子也转动,在空间产生一个旋转磁场,定子内短路绕组产生的感应电流与磁场相互作用产生的转矩,使定子顺着转子的转动方向而偏转,并带动摆杆推动动触点弹簧片,使动断触点断开,动合触点闭合。由于弹簧片的作用,所以只有当电动机转速大于一定值时,触点动作;当转速小于一定值时,触点复位。

一般速度继电器触点动作的转速在 130 r/min 左右,当转速低于 100 r/min 时,触点即复位。常用的速度继电器有 JY1 和 JFZO 型两种。速度继电器的符号如图 4.21 所示。

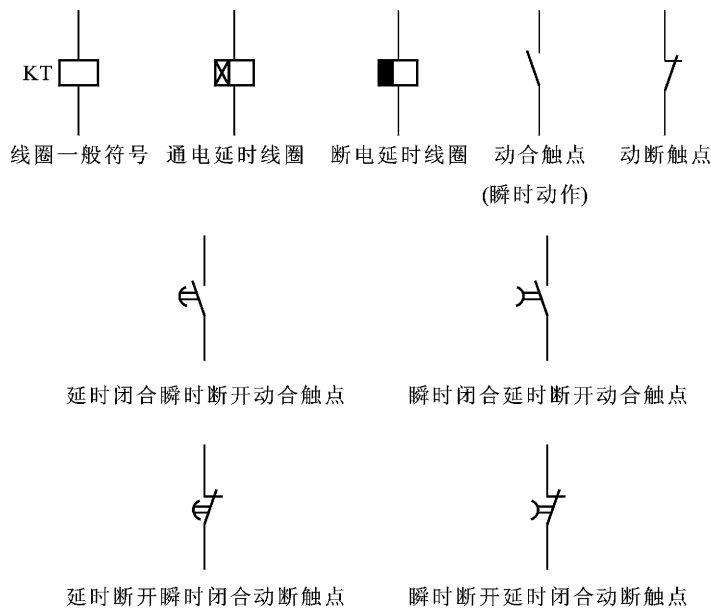


图 4.19 时间继电器的图形及文字符号

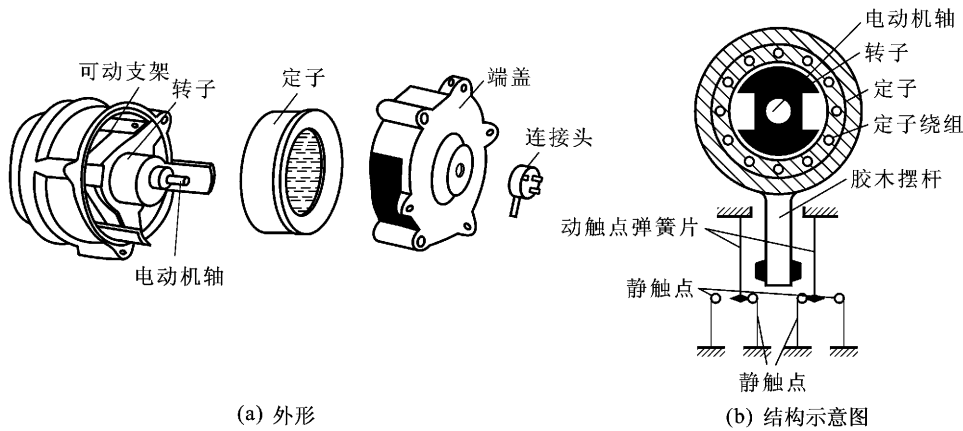


图 4.20 速度继电器

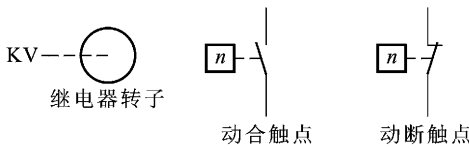


图 4.21 速度继电器的图形及文字符号

4.2 三相异步电动机的直接起动电路

三相异步电动机的起动有直接起动和降压起动两种方式。直接起动是指电动机直接在额定电压下的起动。直接起动的电路常用开关或按钮、接触器来控制电动机的起停,具有结构简单、经济可靠、安装维护方便等优点,所以,当电动机容量较小时,一般采用这种起动方法。

4.2.1 手动控制直接起动电路

对小型台钻、砂轮机、冷却泵和风扇等,可用刀开关、转换开关或组合开关等,直接控制三相异步电动机的单向起动,如图 4.22 所示。开关 QS 控制电源通断,熔断器 FU 起短路保护。当闭合开关 QS,电动机 M 通电运转;断开开关 QS,电动机断电停转。

该电路虽然电路简单,所用电器少,但这种手动控制既不方便,也不安全,操作强度大,且不能进行自动控制,尤其是缺乏一些必要的电路保护作用,因此,使用范围很小。

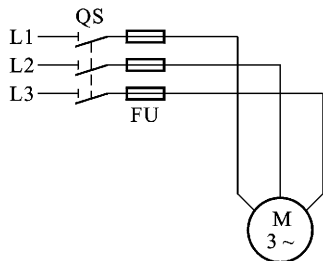


图 4.22 开关直接控制电路

4.2.2 点动控制电路

机床刀架、横梁、立柱的快速移动,机床的试车、调整和对刀等场合,常需要点动控制。所谓点动,是指电动机较短时间的转动,即按住按钮,电动机转动,松开按钮,电动机停转。电动机点动控制电路如图 4.23 所示,开关 QS 作电源隔离,熔断器 FU 作主电路短路保护,按钮 SB 为起动按钮,控制接触器 KM 线圈的通电和断电,接触器 KM 控制电动机 M 的起动和停转。

工作过程 先合上电源开关 QS。

起动 按住 SB→KM 线圈通电→KM 主触点闭合→M 起动运转

停止 松开 SB→KM 线圈断电→KM 主触点断开→M 停转

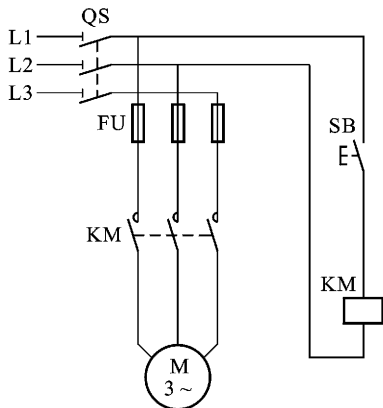


图 4.23 点动控制电路

4.2.3 长动控制电路

机床的主轴等电动机往往需要较长时间的连续运转,这就需要采用长动控制,其电路如图 4.24 所示。该电路在点动控制的基础上,增加了停止按钮 SB2、热继电器 FR、熔断器 FU2。

对长动控制的要求是按起动按钮 SB1 并松开后,电动机仍然能通电转动。为此,电路在 SB1 的两端并联 KM 的一对动合辅助触点。它的作用是一旦 KM 线圈通电后,松开 SB1,由于其动合触点已闭合而保持了 KM 线圈仍能通电,保证了电动机连续运转。这种通过接触器自身动合辅助触点而保持本身线圈通电的作用称为自锁,该电路称为自锁电路,该动合辅助触点称为自锁触点。

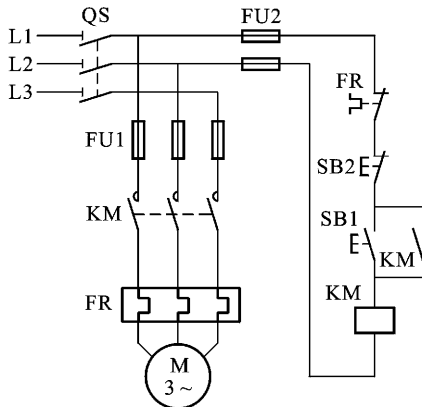


图 4.24 长动控制电路

工作过程 :合上电源开关 QS。

起动 :按 SB1→KM 线圈通电→KM 主触点闭合、KM 自锁触点闭合自锁→M 通电运转。

停止 :按 SB2→KM 线圈断电→KM 主触点断开、KM 自锁触点断开解除自锁→M 断电停转。

熔断器 FU1、FU2 分别对主电路和控制电路实现短路保护。过载保护由热继电器 FR 实现。当电动机过载时 ,经过一段时间 ,串接在电动机定子电路中的热继电器双金属片因过热变形 ,致使其串接在控制电路中的动断触点断开 ,KM 线圈断电 ,KM 主触点断开 ,电动机停转 ,达到了过载保护的目 的。

同时 ,该电路具有欠压和失压保护作用。电路电压的下降将引起电动机转矩减小 ,转速降低 ,导致电动机工作电流增大 ,影响电动机的正常运转 ,严重时还会发生“堵转”现象 ,以致损坏电动机 ,因此电动机需要欠压保护。由于接触器 KM 的电磁吸引力随线圈两端的电压下降而减小 ,所以当电路电压下降一定值时(一般低于额定电压的 85% 以下) ,接触器的电磁吸引力小于弹簧的拉力 ,衔铁释放 ,动合主触点和自锁触点断开 ,电动机 M 停转 ,从而达到欠压保护的目 的。

失压保护是指电动机在正常运行中因突然断电 ,电路自动切断电动机电源 ,并且在恢复供电后 ,电动机不会自行起动。在生产中 ,失压保护是很有必要的。例如 ,机床加工时突然断电 ,会引起切削刀具的刃口卡在工件的加工面上 ,如果操作人员不及时处理 ,那么恢复供电时 ,电动机和机床便自行起动运转 ,此时很可能导致工件报废、刀具折断等设备及人身伤亡事故。采用接触器自锁控制后 ,电源断电引起接触器的主触点和自锁触点都断开 ,使主电路和控制电路都不接通 ,因此电源恢复供电后 ,电动机也不会自行起动。

图 4.25 所示的电气控制电路是既能点动又能长动的两种电路 ,图(a)中 ,当手动开关 SA 打开时 ,作点动控制 ;SA 闭合时 ,作长动控制。图(b)按钮 SB2 作点动控制 ,按钮 SB1 作长动控制。其工作原理请读者自己分析。

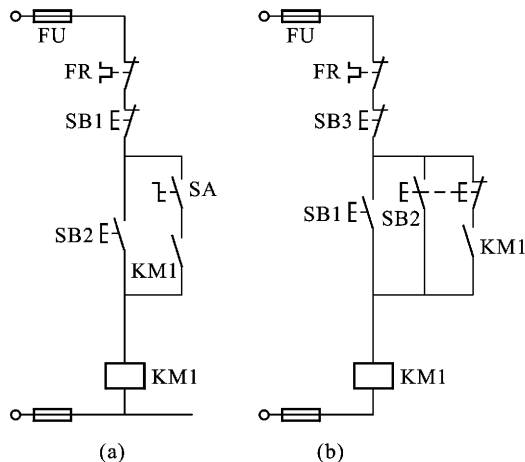


图 4.25 点动与长动控制电路

4.2.4 三相异步电动机正反转控制电路

机床的工作部件往往需要向正反两个方向运动 ,如主轴的正转与反转、摇臂的上升和下降

等,很多是靠对电动机的正反转控制来实现的。

要实现电动机的反转只需对调其中任意两根电源的相线,根据这一方法,正反转控制电路通常有倒顺开关控制和按钮、接触器控制两种电路。

1. 倒顺开关正反转控制电路

倒顺开关正反转控制电路如图 4.26 所示,所用电器主要是倒顺开关。

正转:合上电源开关 QS1。倒顺开关 QS2 手柄位于“正转”位置→接通 L1—U、L2—V、L3—W→M 正转。

反转:倒顺开关 QS2 手柄位于“反转”位置→接通 L1—W、L2—V、L3—U→M 反转。

停止:倒顺开关 QS2 手柄位于“停止”位置→动、静触点断开→M 断电停转。

由于电动机从正(反)转改为反(正)转时,电源突然反接,致使电动机定子绕组中产生很大的电流,易使定子绕组因过热而损坏,所以在操作中,欲使电动机改变转向时,应先将手柄扳在“停”位置,并稍许停留,再将手柄扳到另一方。如 X62W 万能铣床铣削加工的顺铣和逆铣,须在加工前选好方向,不能在加工过程中转换铣削方向,所以其主轴电动机的正反转就采用倒顺开关来控制。

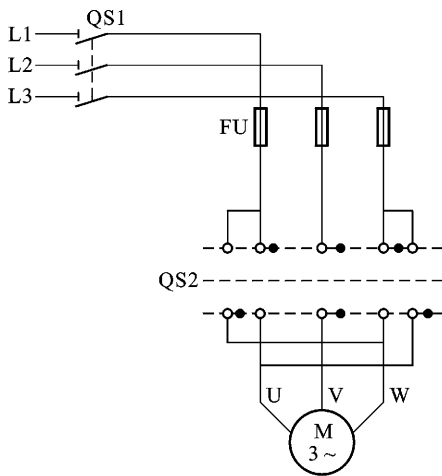


图 4.26 倒顺开关正反转控制电路

2. 接触器控制的正反转电路

常用的接触器控制正反转电路有接触器联锁和按钮、接触器双重联锁两种。

(1) 接触器联锁的正反转控制电路

接触器联锁的正反转控制电路如图 4.27 所示。KM1 为正转接触器, KM2 为反转接触器, 它们分别由正转按钮 SB1 和反转按钮 SB2 控制。按钮 SB3 控制停止, 熔断器 FU1、FU2 和热继电器

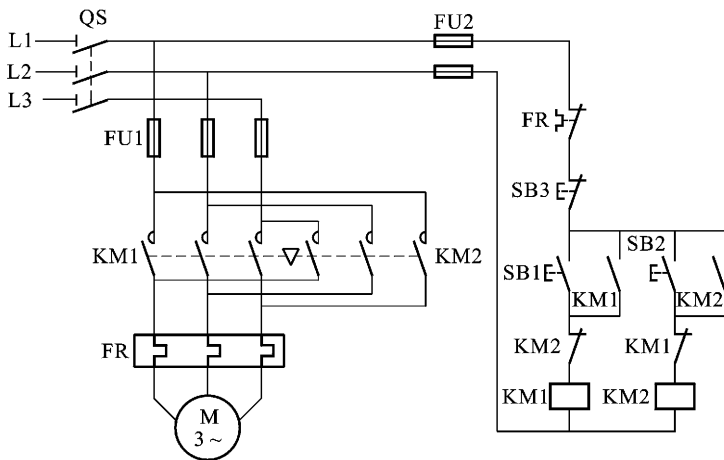


图 4.27 接触器联锁的正反转控制电路

器 FR 分别作短路和过载保护。

正反转控制电路中 KM1 和 KM2 不能同时动作,否则会出现两相电源短路。为了避免这类事故的发生,将 KM2 的动断辅助触点与 KM1 线圈串联,而 KM1 的动断辅助触点又与 KM2 线圈串联。当 KM1 线圈通电时,其串联在 KM2 线圈电路中的动断辅助触点就断开,保证了 KM2 线圈不能通电。同样, KM2 线圈通电后, KM2 动断辅助触点断开,也就保证了 KM1 线圈不能通电。这种将两只接触器的动断辅助触点串联在对方线圈的电路中,使它们不能同时动作,形成互相制约的控制,称为联锁或互锁。起这种作用的动断辅助触点称为联锁或互锁触点,主触点的联锁符号用“ ”表示。

正转控制:先合上电源开关 QS。按 SB1→KM1 线圈通电→KM1 主触点闭合、自锁触点闭合自锁、联锁触点断开对 KM2 联锁→电动机 M 正转。

反转控制:先按 SB3→KM1 线圈断电→KM1 主触点断开、自锁触点断开解除自锁、联锁触点闭合解除对 KM2 联锁→电动机 M 断电停转,再按 SB2→KM2 线圈通电→KM2 主触点闭合、自锁触点闭合自锁、联锁触点断开对 KM1 联锁→电动机 M 反转。

(2) 按钮、接触器双重联锁的正反转控制电路

从上述过程可以看出,电动机从正转到反转,必须先按停止按钮 SB3,才能再按反转按钮 SB2(从反转到正转同样如此)。按钮、接触器双重联锁的正反转控制电路可使操作更简捷一些,如图 4.28 所示。这种电路是将上面电路中的正、反转控制按钮 SB1、SB2 由单一的动合触点按钮改为复合按钮,将各自的动断触点分别串联在对方按钮所控制的接触器线圈的电路中,使正、反转控制按钮联锁,即在接触器互锁的基础上增加了按钮的联锁。

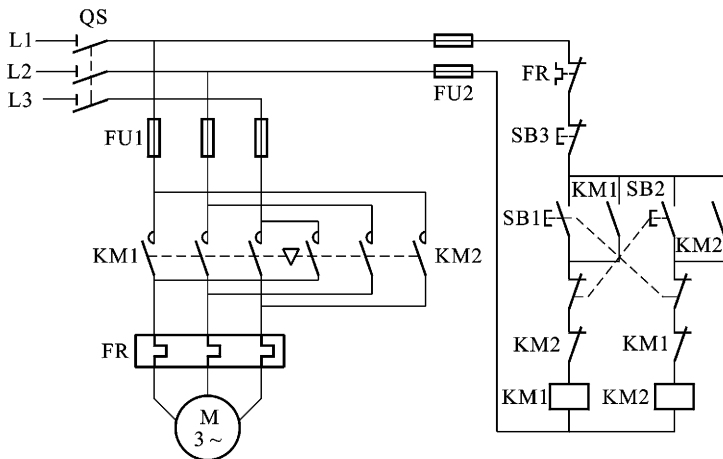


图 4.28 按钮、接触器双重互锁的正反转控制电路

正转控制:先合上电源开关 QS。按 SB1→SB1 动断触点先断开对 KM2 联锁,SB1 动合触点后闭合→KM1 线圈通电→KM1 主触点闭合、KM1 自锁触点闭合自锁、KM1 联锁触点断开对 KM2 联锁→M 正转。

反转控制:按 SB2→SB2 动断触点先断开→KM1 线圈断电→KM1 主触点断开、KM1 自锁触

点断开解除自锁、KM1 联锁触点闭合解除对 KM2 的联锁→M 断电 ;SB2 动合触点后闭合→KM2 线圈通电→KM2 主触点闭合、KM2 自锁触点闭合自锁、KM2 联锁触点断开对 KM1 联锁→M 反转。

停止 按 SB3→KM2 线圈(或 KM1)断电→KM2(或 KM1)触点复位→M 断电停转。

从以上分析中可以看出这种双重联锁的正反转控制电路 ,不仅工作安全可靠而且操作方便 ,因此在电气控制电路中被广泛采用。

例 4.1 图 4.29 所示的几种正反转控制电路图能否正常工作?请加以分析。

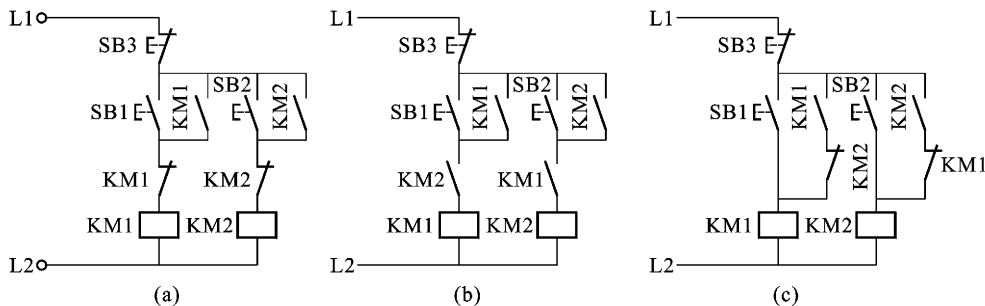


图 4.29 例 4.1 图

解 图(a)不能正常工作。因为联锁触点不能用接触器自身的动断触点。该电路不仅起不到联锁 ,而且还会出现下列现象 按 SB1→KM1 线圈通电→KM1 动断辅助触点断开→KM1 线圈断电→KM1 动断辅助触点恢复闭合→KM1 线圈通电→..... ,即控制电路时通时断。松开 SB1 , KM1 线圈会断电。按 SB2 会出现同样的现象。

图(b)不能正常工作。因为联锁触点不能用动合辅助触点。当按下 SB1 ,因 KM2 动合触点断开 ,KM1 线圈无法通电 ,触点不能动作。

图(c)能实现正反转长动控制 ,但无联锁作用。分析控制电路 按下 SB1→KM1 线圈通电→KM1 动合辅助触点闭合(KM2 动断辅助触点仍闭合) ,自锁。按 SB3→控制电路断电→KM1 触点复位。再按 SB2 ,情况与按 SB1 相类同。

4.2.5 多地控制电路

在一些机床或大型机械设备上 ,如 CW6163B 车床、X62W 铣床主轴电动机的起、停控制 ,采用两地控制。这种为了便于操作 ,在两处或两处以上地方对电动机进行控制的方法 ,称为多地控制。

图 4.30 是两地控制电路 ,该电路在一地控制的基础上增加了一对动合和一对动断按钮。它的特点是 :两地的起动按钮并接在同一控制电路中 ;两地的停止按钮串接在同一控制电路中。

对两地以上的多地控制 ,只要根据以上特点 ,将各地的起动按钮并接、停止按钮串接就可以实现。

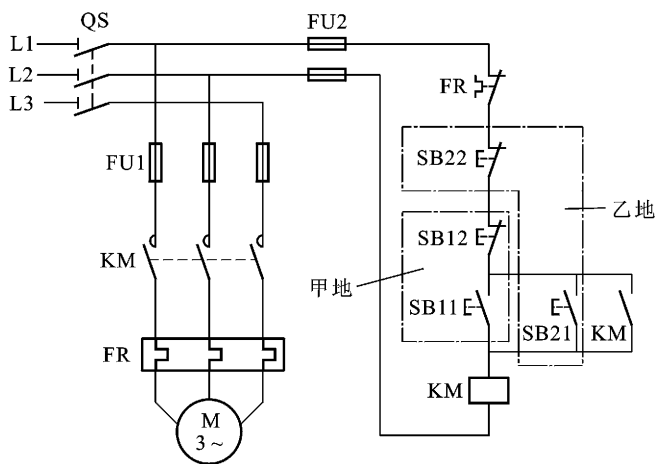


图 4.30 两地控制电路

4.2.6 自动往返行程控制电路

机床的工作台、自动生产线的送料设备等一些运动部件需要在一定的位置之间自动往返运行。实现这种控制主要依赖于行程开关,由它来检测机械运动部件的相对位置,从而实现对电动机的控制。

图 4.31 是自动往返行程控制电路,该电路是在接触器联锁的正反转电路上,增加了行程开

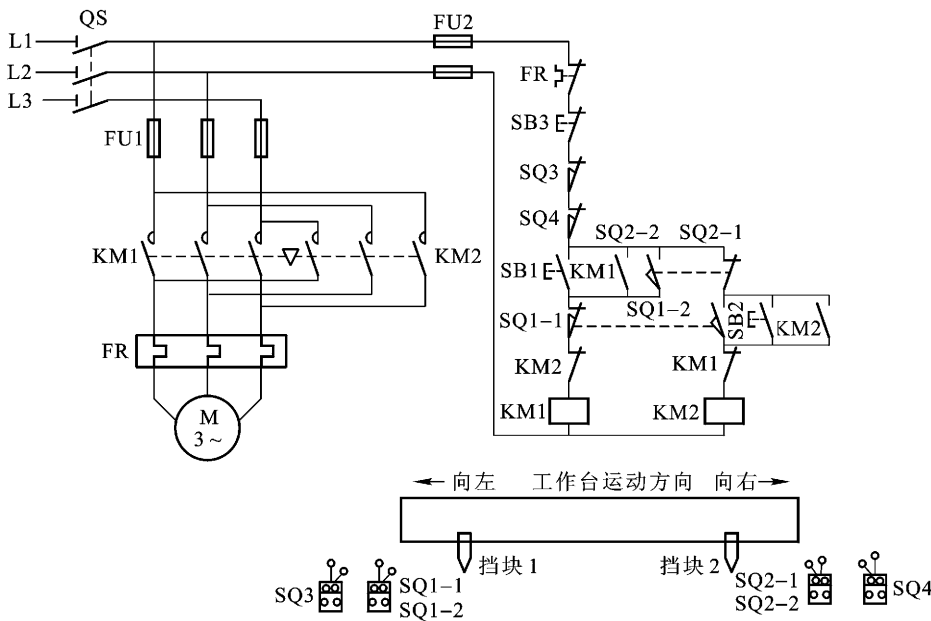


图 4.31 自动往返行程控制电路

关 SQ1、SQ2、SQ3 和 SQ4。SQ1 和 SQ2 的作用是自动切换电动机正反转的控制。SQ3 和 SQ4 是终端保护,以防止 SQ1、SQ2 失灵,运动部件(工作台)超越限定位置而造成事故。

电路工作原理: 先合上电源开关 QS,按 SB1→KM1 线圈通电→KM1 联锁触点断开对 KM2 联锁、主触点闭合、自锁触点闭合自锁→电动机 M 通电正转→工作台左移→移至限定位置,挡块 1 碰撞 SQ1→SQ1-1 断开→KM1 线圈断电→KM1 主触点和自锁触点断开、联锁触点闭合解除对 KM2 的联锁→电动机 M 断电停转→工作台停止左移。SQ1-1 断开后,SQ1-2 立刻闭合→KM2 线圈通电→KM2 联锁触点断开对 KM1 联锁、主触点闭合、自锁触点闭合自锁→电动机 M 通电反转→工作台右移→移至限定位置,挡块 2 碰撞 SQ2→SQ2-1 断开→KM2 线圈断电→KM2 主触点和自锁触点断开、联锁触点闭合解除对 KM1 的联锁→电动机 M 断电停转→工作台停止右移。SQ2-1 断开后,SQ2-2 立刻闭合→KM1 线圈通电→……重复上述过程,工作台在限定行程内作自动往返。

停止: 按 SB3→控制电路断电→KM1 或 KM2 线圈断电、触点复位→M 断电停转→工作台停止运动。

起动时: 也可以先按 SB2,这时工作台先向右移动。

4.2.7 顺序控制电路

对多台电动机拖动的机床或其他生产机械,有时需要按照一定的顺序来控制各台电动机的起停,如铣床,只有主轴转动后,工作台才可移动,这种控制称为顺序控制。

如图 4.32 所示的电路,顺序控制的特点是顺序起动(M1 先起动,M2 后起动),同时停止。从主电路看,M1 和 M2 的电路是并列的,无先后顺序之分。控制电路是在 M2 长动控制支路中串接 KM1 的动合触点,SB1 和 SB2 分别控制 M1 和 M2 的起动。这样,KM2 线圈通电的前提是 KM1 线圈必须通电,从而达到了顺序起动的目的。停止按钮 SB3 同时控制 KM1 和 KM2 线圈的断电,因此 M1 和 M2 同时停转。

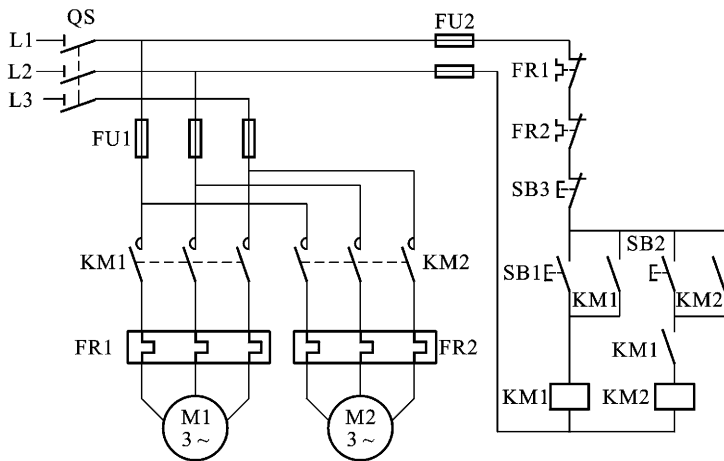


图 4.32 顺序控制电路

例 4.2 如图 4.33 所示的电气控制电路,其起动和停止的顺序有何特点?

解 分析图 4.33 所示的电气控制电路,发现有两个特点:第一个特点是 KM2 线圈所在的控制支路中串联了 KM1 的动合触点。这表示只有 KM1 线圈通电→KM1 辅助动合触点闭合后,KM2 线圈才能通电。第二个特点是停止按钮 SB3 的两端并接了 KM2 动合触点。这表示只有 KM2 线圈断电→KM2 辅助动合触点断开后,按 SB3 才能使 KM1 线圈断电。综合以上两个特点,可以得出其顺序控制特点是:顺序起动(M1 先起动,M2 后起动),逆序停止(M2 先停止,M1 后停止)。

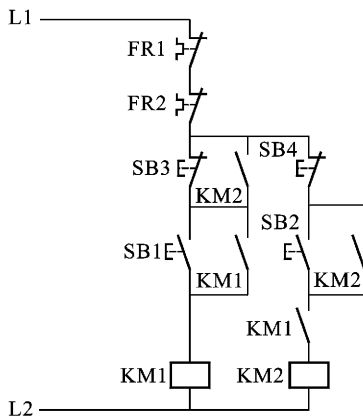


图 4.33 例 4.2 图

4.3 三相笼型异步电动机降压起动控制电路

由于三相笼型异步电动机的起动电流很大,是额定电流的 4~7 倍,大容量的电动机如果采用直接起动,将会引起电网电压的大幅下降,从而影响同一电网其他电气设备的正常工作,同时电动机本身的起动转矩也将显著减小,导致不能起动,因此对较大容量的电动机必须采取降压起动。降压起动是指电动机定子绕组的起动电压低于额定电压,以限制起动电流,当电动机转速接近额定值时,才使电动机全压运行。

常见的降压起动有串联电阻降压起动、星-三角形降压起动、自耦变压器降压起动等方法。

4.3.1 定子绕组串联电阻降压起动控制电路

定子绕组串联电阻降压起动可以采用人工手动控制或时间继电器控制,图 4.34 所示的电路是时间继电器控制的串电阻降压起动控制电路。图中接触器 KM1 的作用是接通串联电阻,使电动机 M 降压起动,接触器 KM2 的作用为切除串联电阻,使电动机 M 全压运行。时间继电器 KT 决定降压起动的的时间,可根据具体情况调整。 R 为降压起动电阻,它的阻值一般是使起动电流限制为额定电流的 2~3 倍。

电路工作原理: 闭合电源开关 QS,按 SB1→KM1 线圈通电→KM1 主触点、自锁触点闭合且自锁→M 串入 R 降压起动。KM1 线圈通电后,接入 KT 线圈支路的 KM1 辅助动合触点同时闭合→KT 线圈通电→延时,M 转速上升→KT 动合触点闭合→KM2 线圈通电→KM2 动断触点断开对 KM1 联锁→KM1 线圈断电→KM1 触点复位→KT 断电、触点复位。KM2 线圈通电后,KM2 主触点和自锁触点立刻闭合且自锁→ R 短接,M 全压运行。

按 SB2→KM2 线圈断电,触点复位→M 断电停转。

这种起动方式的优点是不受定子绕组连接方式的限制,设备简单,成本较低,功率因数提高,有利于保证电网质量,缺点是起动时电阻上消耗大量电能,因此仅适用于要求起动平稳且不频繁的中小容量电动机。

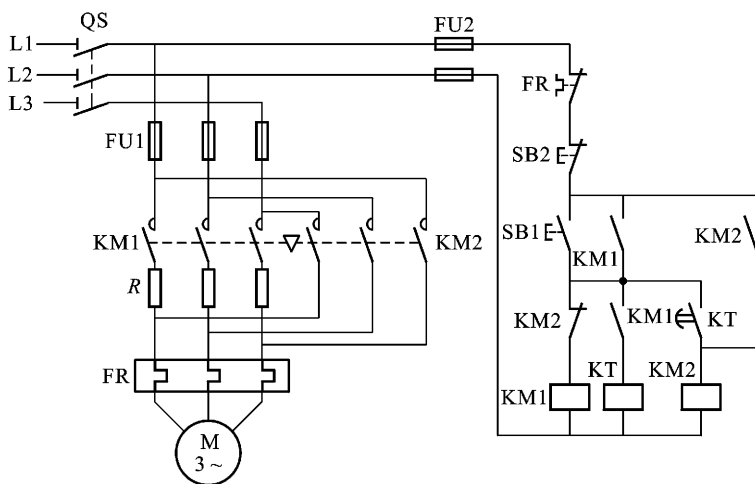


图 4.34 串联电阻降压起动控制电路

4.3.2 星 - 三角形降压起动控制电路

星 - 三角形降压起动的控制电路如图 4.35 所示。图中接触器 KM1 用作接通或切断电源，接触器 KM2 和 KM3 分别使电动机定子绕组连接成星形和三角形，时间继电器 KT 控制星形起动的的时间。

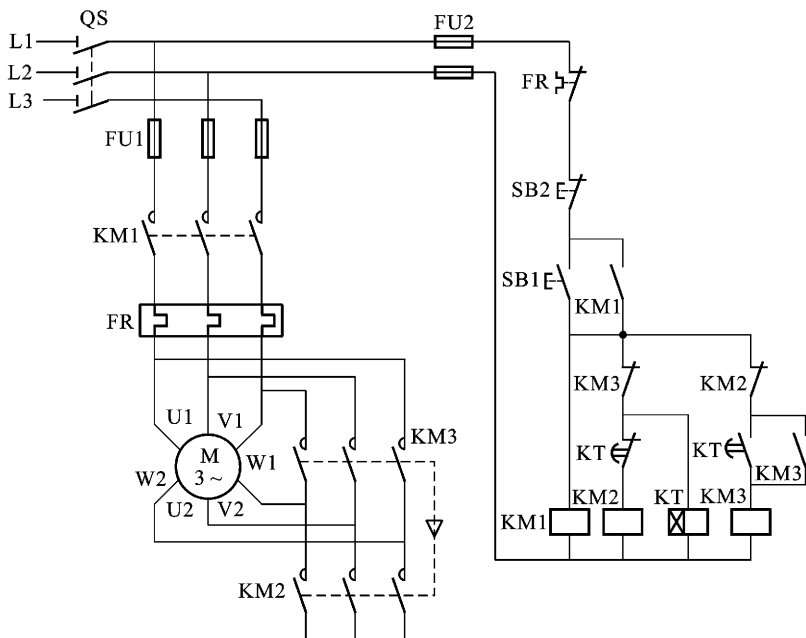


图 4.35 星 - 三角形降压起动电路

电路工作原理:合上电源开关 QS,按 SB1→KM1、KM2 和 KT 线圈同时通电→KM1 触点动作并自锁、KM2 触点动作使 M 星形联结和对 KM3 联锁→M 星形起动→延时, M 转速上升→KT 延时结束,触点动作→KM2 线圈断电、KM3 线圈通电→KM2 触点复位,断开 M 的星形联结;KM3 触点动作且自锁, M 三角形联结、KT 断电触点复位→M 三角形联结,全压运行。

按 SB2→KM1 和 KM3 线圈断电,触点复位→M 断电停转。

星-三角形降压起动方式的优点在于起动过程中没有电能损耗,起动电流为三角形接法的 $1/3$,设备简单经济。其缺点是起动转矩为三角形全压起动的 $1/3$,因此只适用于轻载或空载起动的场合,而且正常运行时为三角形联结的电动机。目前 4 kW 以上的额定电压为 380 V 的 Y 系列电动机都为三角形联结,就是为了适用星-三角形降压起动而设计的。

星-三角形降压起动控制电路有定型产品 QX3-13、QX3-30、QX3-55、QX3-125 等几种,称为星-三角自动起动器。QX3 后面的数字(如 13、30、55、125)是指额定电压为 380 V 时,起动器控制电动机的最大功率(kW)。

4.3.3 自耦变压器降压起动控制电路

自耦变压器降压起动控制电路如图 4.36 所示。接触器 KM1 是将自耦变压器接入电网使电动机降压起动。接触器 KM2 使电动机全压运行,同时它的动断辅助触点在电动机起动时,将自耦变压器接成星形,起动结束后,切除星形联结,使自耦变压器与电网断开。时间继电器 KT 控制着起动时间,中间继电器 KA 的作用是控制起动。

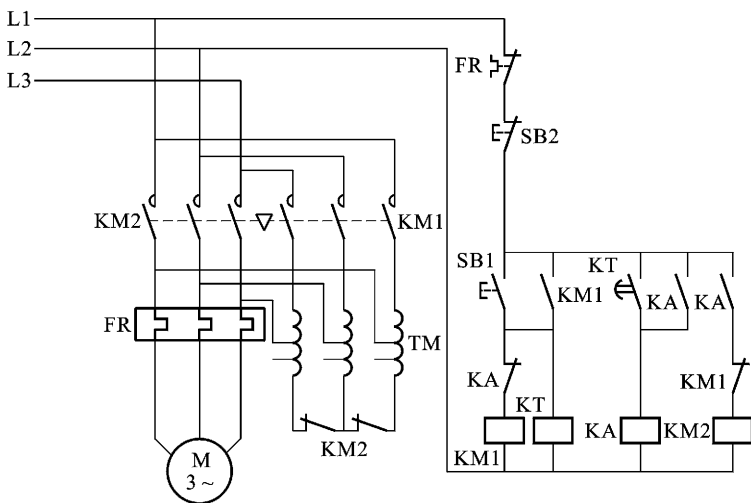


图 4.36 自耦变压器降压起动电路

该电路的工作原理请读者自行分析。

自耦变压器降压起动的优点是:由于自耦变压器的二次侧常有几个抽头,因此起动电流和起动转矩可以调节;在获得同样起动转矩的情况下,自耦变压器降压起动的起动电流比串电阻降压起动要小得多。因此,它适用于容量较大,正常运行时星形联结的电动机。其缺点是设备庞大,成本较高。

自耦变压器降压起动控制电路有成型产品,如目前广泛应用的 QJ3、QJ5、XJO1 等系列补偿降压起动器,其中 QJ3、QJ5 型为手动操作,XJO1 型为自动操作。

例 4.3 试分析图 4.37 所示的控制电路(主电路与图 4.35 所示的主电路相同)能否进行星-三角形降压起动控制?如果不能进行星-三角形降压起动,应怎样改进?

解 首先分析电路,知道 KM1、KM2 和 KM3 的作用。KM1 是接通或切断电动机的电源,KM2 和 KM3 分别使电动机定子绕组成星形和三角形联结。

其次,分析工作过程。按 SB1→KT 和 KM2 线圈通电→KM2 触点动作→M 星形联结、KM1 线圈通电→KM1 触点动作(KM2 动断辅助触点断开,KM3 不能通电)→M 星形起动→过一段时间,KT 延时结束,KT 动断触点断开→KM2 线圈断电→KM2 触点复位→KM1 线圈断电→KM1 触点复位(整个控制电路都断电)→M 断电停转。从工作过程看,该电路不能进行星-三角形降压起动控制。

改进的办法是将 KM1 的自锁触点改接在 A、C 两点,使其起到自锁的作用。工作过程请读者自行分析。

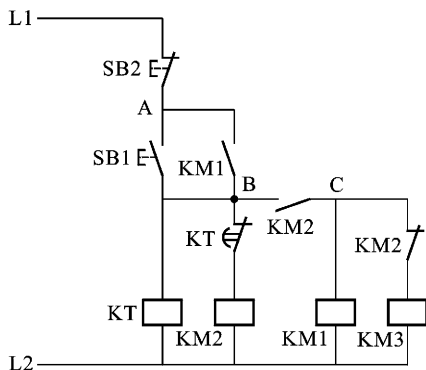


图 4.37 例 4.3 图

4.4 三相笼型异步电动机制动控制电路

三相笼型电动机切断电源后,由于惯性不会马上停止转动,这使得非生产时间拖长,影响生产效率。而且有的生产机械,如万能铣床、卧式镗床、起重机等,需要迅速停车和准确定位,这就需要强迫电动机停车,即制动。

4.4.1 反接制动

反接制动是利用改变电动机三相电源的相序,使定子绕组产生的旋转磁场方向发生改变,即反向旋转,由此在转子上产生与旋转方向相反的制动力矩,从而使电动机转速迅速下降,实现制动。

反接制动的关键是,当电动机转速接近零时,控制电路应能自动切除电源,避免电动机反向转动。为此,采用速度继电器来检测电动机转速变化,当制动使电动机转速接近零时(在 100 r/min 以下),速度继电器触点复位,自动切除电源。这种用速度继电器的制动控制,比采用时间继电器要准确。

同时,由于反接制动时,转子旋转方向与定子的旋转磁场方向相反,两者的相对转速接近于 2 倍的同步转速,因此定子绕组中的反接制动电流相当于全压起动电流的 2 倍。为了避免这一制动电流对电动机及机械传动系统的过大冲击,通常对功率较大(10 kW 以上)的电动机进行反接制动时,在其定子电路中串入对称或不对称电阻,以减小制动电流。这种电阻称为反接制动电阻。

图 4.38 是单向反接制动控制电路。该电路的主电路和正反转控制电路的主电路相类似,只是在反接制动时增加了三个反接制动电阻 R 。图中 KM1 为正转运行接触器,KM2 为反接制动接触器,KV 为速度继电器,其轴与电动机轴相连。

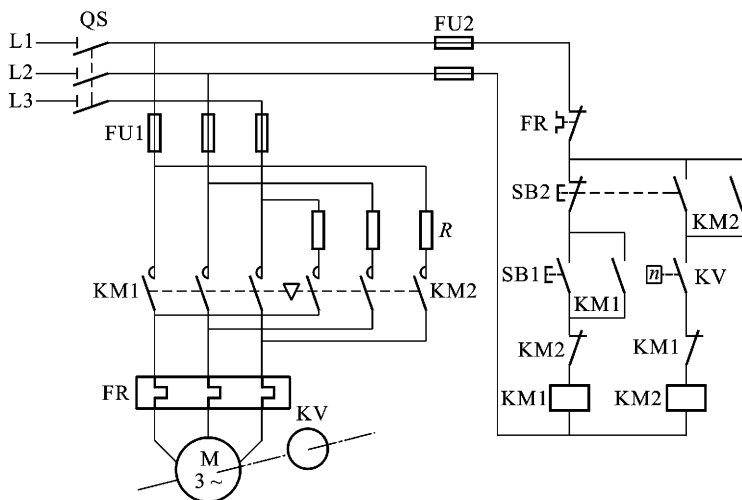


图 4.38 单向反接制动控制电路

起动 :合上电源开关 QS。按 SB1→KM1 线圈通电→KM1 触点动作 ,自锁并对 KM2 联锁→M 起动→M 转速上升到一定值时→KV 动合触点闭合 ,为制动作准备→M 运行。

制动 :按 SB2→SB2 动断触点断开→KM1 线圈断电→KM1 触点复位→M 断电。同时 ,SB2 动合触点闭合→KM2 线圈通电(KM1 动断触点已闭合 ,解除联锁)→KM2 触点动作 ,自锁并对 KM1 联锁→M 反接制动→M 转速降到一定值时→KV 动合触点断开→KM2 线圈断电→KM2 触点复位→M 制动结束。

反接制动的优点是制动力强 ,制动效果显著。其缺点是制动过程中冲击强烈 ,易使机械设备产生振动。所以 ,反接制动一般适用于制动要求迅速、系统惯性较大 ,不经常起动与制动的场合。

4.4.2 能耗制动

能耗制动是在切断电动机电源后 ,立即在定子绕组的任意两相中通入直流电 ,利用转子感应电流与静止磁场的作用产生制动力矩 ,使电动机迅速停车。在能耗制动过程中 ,当电动机转速为零时 ,制动力矩也变为零 ,因此它不可能使电动机反转。为此 ,能耗制动可采用时间继电器或速度继电器来进行控制。

图 4.39 是用时间继电器控制的单向能耗制动控制电路。制动时的直流电源由单相桥式整流器 VD 供给 ,TC 是整流变压器 ,电阻 R_p 是用来调节直流电流 ,从而调节制动强度 ,整流变压器一次和二次侧同时由交流接触器 KM2 控制。交流接触器 KM1 控制正转运行。时间继电器 KT 控制制动的时间。停止按钮 SB2 的作用是在制动时先使 KM1 断电 ,后使 KM2 通电。

起动过程与前面所述的相类似 ,请读者自行分析。

制动 :按 SB2→SB2 动断触点断开→KM1 线圈断电→KM1 触点复位→M 断电。同时 ,SB2 动合触点闭合→KM2 和 KT 线圈通电→KM2 触点动作 ,自锁并对 KM1 联锁→M 通入直流电制动→M 转速下降 ,延时结束→KT 动断触点断开→KM2 线圈断电→KM2 触点复位→切断直流电 ,制动结束。

能耗制动的特点是制动过程平稳、能量消耗较小 ,且不会产生反转。其缺点是制动力弱 ,制

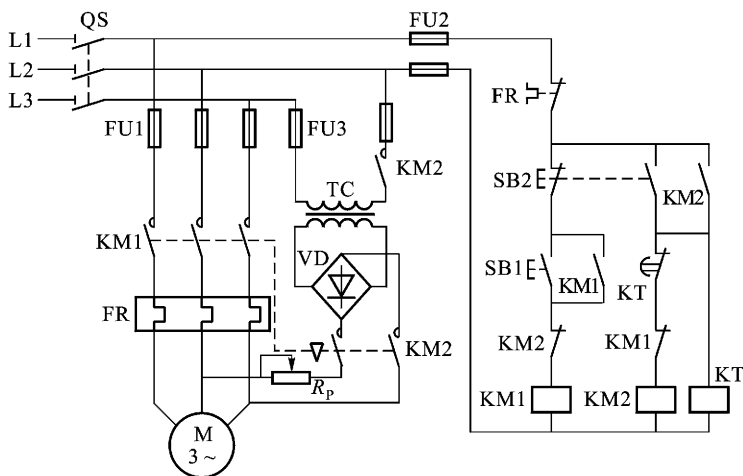


图 4.39 单向能耗制动控制电路

动速度较反接制动慢,而且需要整流电路,所以能耗制动适用于容量较大的电动机或制动较频繁的场所。

例 4.4 将图 4.39 用时间继电器控制的能耗制动电路改为用速度继电器控制的能耗制动电路。

解 用速度继电器控制的单向能耗制动电路可以在图 4.39 所示的电路上进行改进。其主电路可以不变,只要将速度继电器的轴与电动机的轴相连接。对电动机 M 起动运行的控制电路,其要求相同,也保持不变。

要变动的是对直流电(即制动部分)的控制电路。去除 KT 线圈及串入 KM2 线圈电路中的 KT 延时动断触点,将速度继电器 KV 的动合触点代替 KT 的延时动断触点。这样,按速度原则控制的单向能耗制动控制电路设计结束,如图 4.40 所示。该电路的改进是否合理,需对其进行工作原理分析来进行判断,这里请读者自行分析。

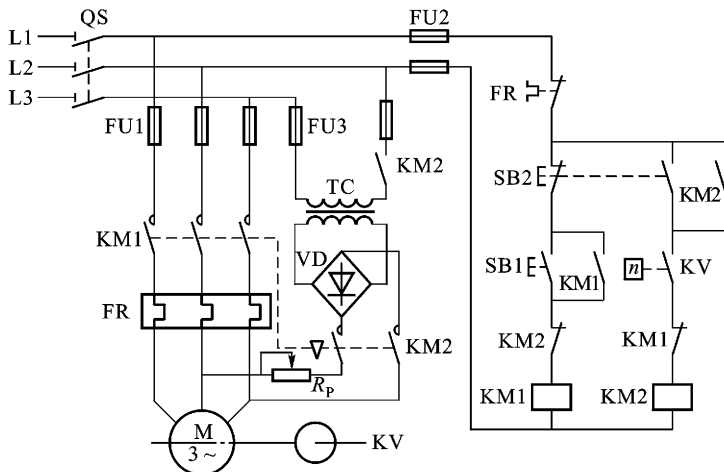


图 4.40 用速度继电器控制的单向能耗制动电路

4.5 常用机床电气控制电路

近年来,尽管数控技术的飞速发展加快了数控机床应用的步伐,但是普通机床在一般机械加工中的地位仍是不可替代的。由于机床种类繁多,它们部件的运动情况和生产工艺各不相同,因此作为机床重要组成部分的电气控制电路显现了各自的特点,并具有相应的各种保护装置。

4.5.1 机床电气控制电路的阅读

机床电气控制电路是为机床及其工艺过程服务的,它与机械操作、液压系统有着密切的关系,电气控制环节多,电路复杂,因此要掌握机床电气控制电路的工作原理,首先要学会阅读机床电气控制电路的方法。

① 了解机床的主要结构、运动形式、加工工艺和电气控制的特点,即做到了解控制对象,明确控制要求。

② 了解各操作手柄、开关、按钮等的位置、作用;了解机械操作手柄与开关等元件的关系;了解机床液压系统与电气控制的关系,即做到了解机、电、液之间的相互联系。

③ 分析电气控制电路。这是阅读电气图的中心内容,其方法一般应从主电路着眼,从控制电路着手。

从主电路着眼,就是先从主电路看,有哪些控制元件的主触点等,然后根据其组合规律就可以大致判断电动机的工作状况,如起动方式、有无正反转、制动、顺序控制等。

从控制电路着手,就是根据主电路中控制元件主触点的文字符号,找到控制电路中有关控制环节(支路),把整个控制电路分解成与主电路相对应的几个基本环节,逐一分析。在分析中,特别要注意各环节之间的相互联系和制约关系,如自锁、联锁、顺序控制、保护环节等,以及与机械、液压部件的动作关系。逐步分析结束后,还应把各环节串起来,从整个控制电路来理解。

最后分析照明、信号等辅助电路。

归纳起来,机床电气控制电路的分析过程应从“主”至“控”,顺藤摸瓜,化整为零,积零为整。

4.5.2 CA6140 车床电气控制电路

车床是机械加工中应用最广泛的金属切削机床,而在各种车床中,使用最多的又是普通车床。CA6140 是普通精度级车床,它的加工范围广、性能优越、结构先进、操作方便。

1. 主要结构及运动形式

CA6140 型普通车床主要由床身、主轴变速箱、进给箱、溜板箱、刀架、尾架、丝杠和光杠等部件组成,图 4.41 是该车床的外形图。其中主轴变速箱的作用是使主轴获得不同级别的正反转转速,进给箱的作用是变换被加工螺纹的种类和导程,以获得所需的各种进给量,溜板箱的作用是将丝杠或光杠传来的旋转运动转变为直线运动等带动刀架进给。

CA6140 车床的主运动是卡盘的旋转运动,进给运动是溜板箱带动刀架的直线移动,辅助运动是刀架快速直线移动。

2. 电力拖动和控制特点

① 主运动和进给运动由一台主轴电动机拖动。

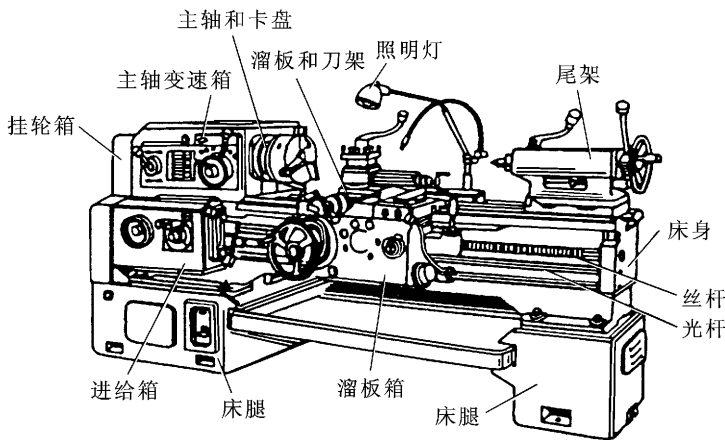


图 4.41 CA6140 型普通车床外形图

- ② 主轴正反转由操作手柄通过双向多片摩擦离合器控制 ,制动采用机械制动 ,调速由主轴变速箱进行机械有级调速。
- ③ 刀架的快速移动由一台电动机拖动 ,采用点动控制。
- ④ 冷却泵电动机在主轴电动机起动后方可选择起动与否 ,当主轴电动机停止时 ,冷却泵电动机应立即停止。

3. 电路分析

CA6140 型普通车床的电气控制电路如图 4.42 所示。为了便于检索和阅读 ,一般可将机床电气原理图分成若干个图区。电路图顶部是用途区 ,按各电路的功能分区 ;电路图底部是数字

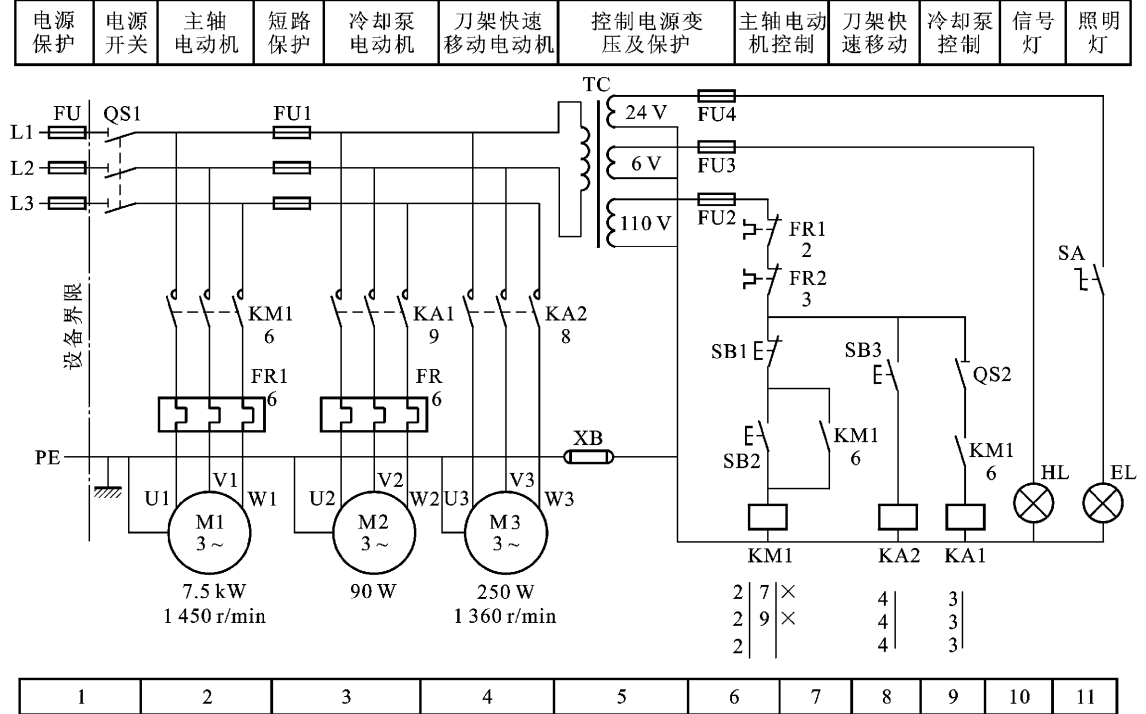


图 4.42 CA6140 型车床电气控制电路

区 ,按各支路的排列顺序分区。控制电路各线圈所驱动的触点在图中的位置均以简表的形式列于各线圈的图形符号下 ,其标记方法如表 4.1 所示。

表 4.1 接触器、继电器触点分区位置简表

	标 记 示 例			标 记 含 义			说 明
接 触 器	KM			左 栏	中 栏	右 栏	“ × ”表示未使用的触点 ,有的表中对未使用的触点不作表明
	3	6	8	主触点所在图 区号	辅助动合触点 所在图区号	辅助动断触点 所在图区号	
	3	×	×				
	3	×	×				
继 电 器	KA			左 栏	右 栏		
	8	9		动合触点所在图区号	动断触点所在图区号		
	12	×					
	×	×					
	×	×					

（1）主电路

电源由开关 QS1 引入。主电路有三台电动机 ,M1 为主轴电动机 ,由接触器 KM1 控制 ;M2 为冷却泵电动机 ,由中间继电器 KA1 控制 ;M3 为刀架快速移动电动机 ,由中间继电器 KA2 控制。热继电器 FR1、FR2 分别为 M1、M2 作过载保护。由于 M3 是短期工作 ,故没有过载保护。熔断器 FU1 对 M2、M3 及控制电路等作短路保护。

（2）控制电路

控制电路的电源由控制变压器 TC 将 380 V 交流电降为 110 V 电压供电 ,并由熔断器 FU2 作短路保护。

主轴电动机控制 :按 SB2→KM1 通电动作 ,自锁并为 KA1 通电(冷却泵电动机通电)作准备 →M1 起动运转。

按 SB1→KM1 断电 ,触点复位→M1 停车。

冷却泵电动机控制 :M1 运转后 ,合上 QS2→KA1 通电动作→冷却泵电动机 M2 起动运转。当 M1 停转时 ,M2 也自动停止。

刀架快速移动电动机的控制 :控制按钮 SB3 安装在进给操作手柄的顶端 ,将操纵手柄扳到所需的方向 ,按下 SB3→KA2 通电动作→M3 起动运转。操纵手柄复位 ,则松开 SB3→KA2 断电 →M3 停转。

（3）照明和信号电路

照明灯 EL 由控制变压器 TC 二次侧 24 V 安全供电 ,开关 SA 控制 ,熔断器 FU4 作短路保护。

指示灯 HL 由 TC 二次侧 6 V 供电 ,熔断器 FU3 作短路保护。当电源开关 QS1 合上后 ,指示灯 HL 亮 ,表示车床已开始工作。

例 4.5 当 CA6140 车床分别出现以下电气故障时 ,试分析可能产生的故障原因。

（1）主轴电动机起动后不能自锁。

（2）主轴电动机能起动运转 ,但刀架快速移动电动机不能起动。

解 (1) 主轴电动机起动后不能自锁,造成这种故障的原因是接触器 KM1 自锁触点(动合辅助触点)的连接导线松脱或接触不良。

(2) 主轴电动机能起动运转,而刀架快速移动电动机不能起动,说明控制电路中的 FU2、FR1 和 FR2 的动断触点及连接都完好,故障可能产生的部位是刀架快速移动电动机的主电路和控制电路的支路部分。此时可按下 SB3,观察中间继电器 KA2 是否吸合。如果 KA2 吸合,说明故障在主电路的刀架快速移动电动机支路中,可能是 KA2 主触点或电动机 M3 接线端松脱或断路等,如果 KA2 不吸合,则故障在刀架快速移动电动机的控制电路中,可能是点动按钮 SB3 或 KA2 线圈连接导线松脱、接触不良或断路等。

4.5.3 X62W 万能铣床电气控制电路

铣床主要用于加工平面、阶台、沟槽和成形面。如果采用分度盘,可以加工花键、齿轮和螺旋槽等,如果装上回转工作台,则可以加工凸轮、弧形槽等。铣床的种类很多,按结构型式和加工性能的不同,可分为立式铣床、卧式铣床、仿形铣床、龙门铣床等,其中卧式万能升降台式铣床应用较广。本节就以 X62W 万能铣床为例进行分析。

1. 主要结构及运动形式

X62W 万能铣床的外形如图 4.43 所示。它主要由床身、主轴、悬梁、工作台、回转盘、溜板和升降台等部分组成。床身固定在底座上,床身内装有主轴的传动机构和变速机构,床身顶部有水平导轨,悬梁可沿导轨水平移动。刀杆支架装在悬梁上,并能在悬梁上作水平移动,刀杆支架用来支承铣刀心轴的一端,而铣刀心轴的另一端则固定在主轴上,由主轴带动铣刀切削。升降台可沿床身前面的垂直导轨上下移动。溜板在升降台的水平导轨上,可作平行于主轴轴线方向的横向移动。溜板上部有可转动部分,即回转盘。工作台在溜板上部可转动部分(回转盘)的导轨上作垂于主轴轴线方向的纵向移动。工作台上 T 型槽,用来固定工件。

此外,由于转动部分(回转盘)对溜板可绕垂直轴线转动一个角度(通常为 45°),因此工作台在

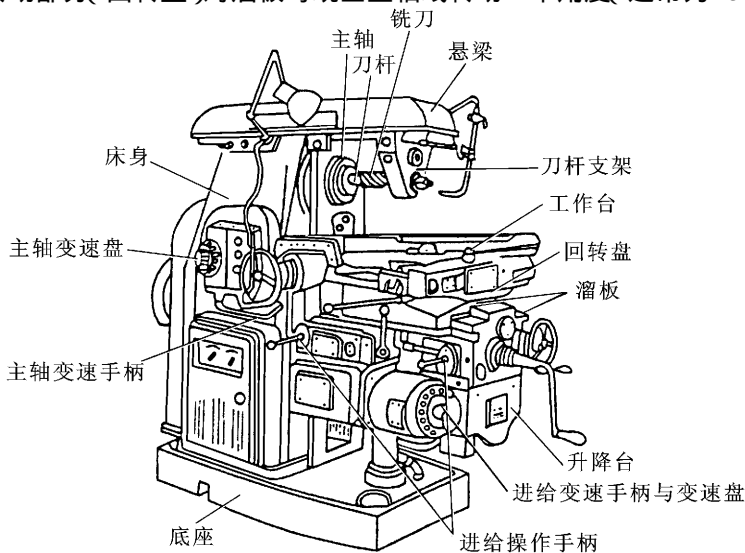


图 4.43 X62W 万能铣床简图

水平面上除了能在平行或垂直于主轴轴线方向进给外,还能在倾斜方向上进给,以加工螺旋槽。

由此可知,铣床的主运动是主轴带动铣刀的旋转运动。进给运动是工作台在三个相互垂直方向上,即上下、左右(纵向)、前后(横向)的直线运动。辅助运动是工作台在三个相互垂直方向上的快速直线运动。

2. 电力拖动和控制特点

铣床采用单独传动形式,主轴、工作台和冷却泵分别由三台电动机拖动。

① 铣削加工有顺铣和逆铣两种方式,要求主轴能正反转,但不能在加工过程中转换铣削方向,须在加工前选好转向,故采用倒顺开关控制主轴电动机方向。

② 铣削加工是多刃不连续的切削,负载不稳定,所以主轴轮上装有惯性轮,以提高主轴转动的均匀性。这样主轴传动系统的惯性大,为确保迅速停车,因此采用电磁离合器制动。

③ 工作台在各个方向上应能往返运动,要求工作台进给电动机能正反转。工作台快速进给移动由快速电磁离合器通过齿轮传动来实现。

④ 主轴运动和进给运动采用变速盘来进行速度选择,为了使变速箱内齿轮易于啮合,要求主轴电动机和工作台进给电动机分别在主轴和进给变速时稍微转动一下,即变速冲动。

⑤ 为了防止刀具、机床的损坏和减小加工表面的粗糙度,主轴与进给运动要求顺序控制,即只有主轴旋转后才允许有进给运动,主轴和进给同时停止。

⑥ 为了控制方便,采用两地控制的方式,在机床的正面及左侧面设置了两套操作系统。

⑦ 工作台上下、左右、前后这几个方向的进给,必须联锁,即任何时刻工作台只能有一个方向的运动。

3. 电气控制电路工作原理

图 4.44 是 X62W 万能铣床的电气控制电路。该电路的特点是采用了较多的控制开关和行程开关。

(1) 主电路

三相电源由隔离开关 QS1 引入,熔断器 FU1 作总的短路保护。主电路中共有三台电动机。M1 为主轴电动机,交流接触器 KM1 控制起停,主轴转换开关 SA3 控制转向。M2 为工作台进给电动机,交流接触器 KM3 和 KM4 控制其正反转的起停。M3 为冷却泵电动机,由开关 QS2 直接控制。热继电器 FR1、FR2 和 FR3 分别对 M1、M3 和 M2 作过载保护。

(2) 控制电路

控制电路分为直流和交流两部分。直流控制部分主要由主轴制动、工作台正常进给和快速移动三只电磁离合器组成,其电源由整流变压器 T2 提供,经硅整流桥 VD 后变为直流电。交流控制部分主要由接触器 KM1、KM2、KM3 和 KM4 的控制回路组成,交流电压为 110V,由变压器 TC 供给。

① 主轴电动机的控制。起动按钮 SB1 和 SB2、停止按钮 SB5 和 SB6 是两地控制按钮,YC1 是主轴制动用的电磁离合器,SQ1 是主轴变速冲动行程开关。

a. 主轴电动机起动。起动前先合上电源开关 QS1,再把主轴转换开关 SA3 扳到所需要的方向。

按 SB1(或 SB2)→KM1 通电动作,自锁并为工作台的进给运动做好准备(15 区动合触点闭合)→M1 起动。

b. 主轴电动机的制动。按住 SB5(或 SB6)→SB5-1(或 SB6-1)断开→KM1 断电→M1 断电;

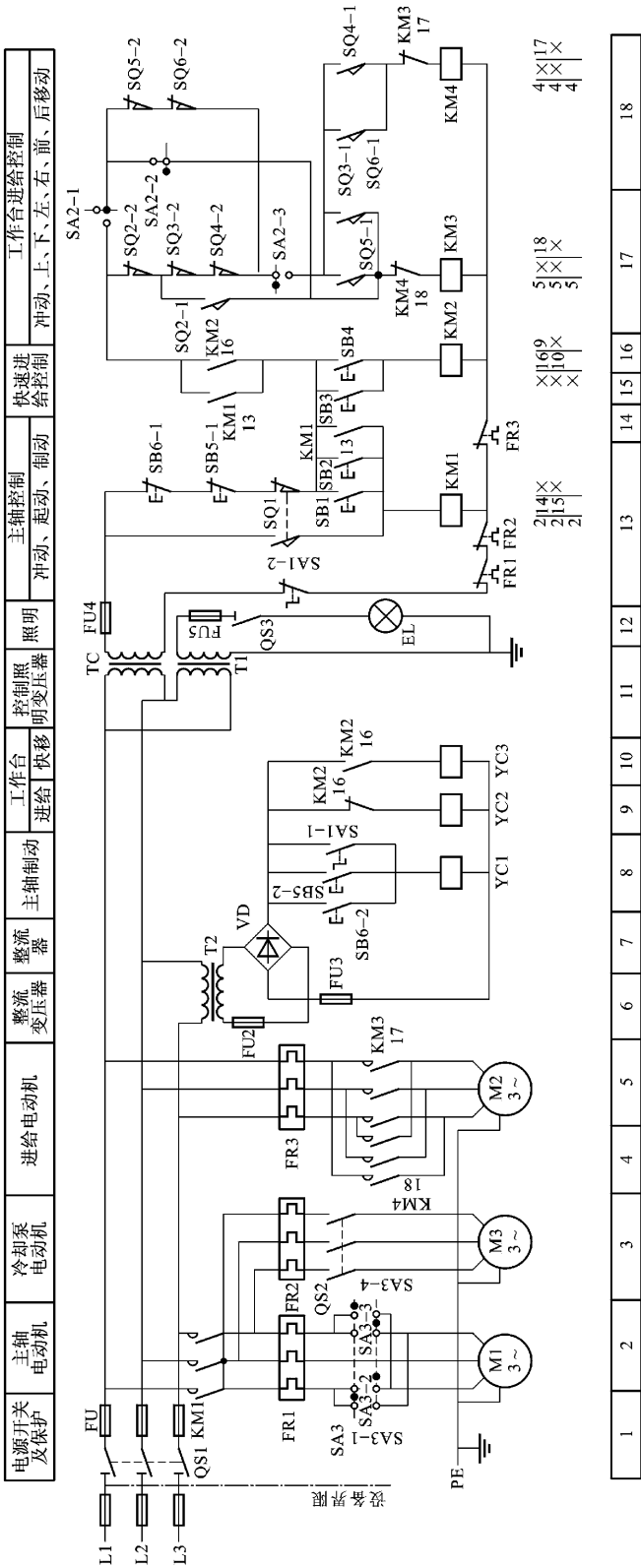


图 4.44 X62W 万能铣床电气控制电路

同时由于 SB5 - 2(或 SB6 - 2) 闭合→YC1 通电→M1 制动。当主轴停车后方可松开 SB5(或 SB6)。

主轴制动电磁离合器 YC1 装在与 M1 转轴相连的轴上, 当 YC1 通电吸合时, 将摩擦片压紧, 对 M1 制动。

c. 主轴变速时的控制。主轴变速时的冲动控制, 是利用变速手柄与冲动行程开关 SQ1 通过机械上的联动机构进行点动控制的。

拉出变速手柄, 然后转动变速手柄, 选好所需的主转转速, 将变速手柄推入复位→SQ1 瞬时动作→KM1 瞬时通电动作→M1 瞬时通电转动→齿轮抖动啮合。

d. 主轴换铣刀的控制。主轴换刀时, 主轴的意外转动将造成事故, 所以此时主轴应处于制动状态。主轴换刀前, 将转换开关 SA1 扳到“接通”位置→SA1 - 1(8 区) 闭合→YC1 通电→M1 制动, 同时 SA1 - 2(13 区) 断开→切断控制电路→机床无法运行。

换刀结束后, 将 SA1 扳到“断开”位置→SA1 - 1、SA1 - 2 触点复位→解除 M1 的制动并为起动作做好准备。

② 工作台进给电动机的控制。工作台作进给运动前, 圆形工作台控制开关 SA2 应扳到“断开”位置, 此时 SA2 - 1 闭合, SA2 - 2 断开, SA2 - 3 闭合。

a. 工作台纵向进给。工作台的左右进给运动也称为纵向进给运动, 是由“工作台纵向操作手柄”来控制。手柄有三个位置: 向左、向右、零位(停止)。将操作手柄扳到向左或向右位置时, 在机械上通过联动机构接通纵向进给离合器, 在电气上压下行程开关 SQ6 或 SQ5。

工作台向右运动: 主轴电动机 M1 起动后, 将操作手柄扳至向右位置→压下行程开关 SQ5→SQ5 - 2 先断开, SQ5 - 1 后闭合→KM3 通电动作→M2 正转起动→M2 拖动工作台(因为接触器 KM2 断电, KM2 的动断触点(9 区) 仍闭合, 正常进给电磁离合器 YC2 通电动作, 接通了进给电动机 M2 与工作台之间的转动机构) 向右运动。

停止时, 将操作手柄扳至中间零位→SQ5 触点复位→KM 断失电→M2 停转→工作台向右进给停止。

工作台向左进给: 其控制过程与向右进给相似, 手柄拨至向左位置→行程开关 SQ6 被压下→KM4 通电动作→进给电动机 M2 反转→工作台向左进给。停止时, 仍将手柄扳至中间零位。

b. 工作台升降和横向进给。工作台的前后进给也称横向进给, 它与工作台的上下进给一起“由工作台‘横向与垂直操纵手柄’”控制。该操纵手柄有五个位置, 即上、下、前、后和中间位置。当手柄扳至向上或向下位置时, 机械上接通了垂直进给离合器; 当手柄扳至向前或向后位置时, 机械上接通了横向进给离合器; 当手柄位于中间位置时, 垂直和横向进给离合器都不接通。

工作台向下或向前进给: 当工作台横向与垂直操纵手柄扳至向下或向前位置时, 手柄通过机械联动机构压下行程开关 SQ3→SQ3 - 2 先断开, SQ3 - 1 后闭合→KM3 通电动作→M2 正转→工作台向下或向前进给。

停止时, 将手柄扳至中间位置→SQ3 释放→KM3 断电→M2 停转→工作台向下或向前进给停止。

工作台向上或向后进给: 将手柄扳至向上或向后位置, 此时行程开关 SQ4 被压下→KM4 通电动作→M2 反转→工作台向上或向后进给, 其控制过程与工作台向下或向前进给相类似。

在操作横向与垂直操纵手柄时, 纵向操纵手柄应扳到中间位置。同样, 在操作纵向操纵手柄时, 横向和垂直操纵手柄也应扳到中间位置。否则, 将会出现两个方向同时进给, 造成机床重大事

故,所以必须实行联锁保护。该电路的联锁是通过行程开关 SQ5、SQ6、SQ3、SQ4 的动断触点来实现的。假定横向和垂直操纵手柄已扳至向上位置,行程开关 SQ4 被压下,动合触点 SQ4 - 1 闭合,动断触点 SQ4 - 2 断开,接触器 KM4 通电动作。若此时不慎将纵向操纵手柄扳至向左或向右位置,则动断触点 SQ5 - 2 或 SQ6 - 2 中的一个将断开,则 KM4 立刻断电,电动机 M2 停转,从而得到保护。

c. 进给变速冲动。进给变速与主轴变速一样,为使齿轮进入良好的啮合状态,工作台进给电动机 M2 也要做变速后的瞬时点动。进给变速必须在主轴电动机启动后(15 区的 KM1 动合触点已闭合,进给控制电路的电源已接通),将纵向操作手柄、横向与垂直操纵手柄均扳至中间位置后方可进行。

进给变速时,先将变速盘拉出,转动变速盘,选择好合适的进给速度,再将变速盘推回原位→压动行程开关 SQ2→SQ2 - 2 先断开, SQ2 - 1 后闭合→KM3 通电动作→M2 启动。但它稍动一下,行程开关 SQ2 马上复位→KM3 断电→M2 停转。电动机 M2 瞬时通一下电源,稍作转动,使齿轮顺利啮合。如果一次瞬时点动齿轮仍未进入良好啮合状态时,可以再重复进行,直到齿轮进入良好的啮合状态为止。

d. 工作台快速移动。以工作台快速向右进给为例。当主轴电动机未启动时,工作台需向右快速移动,则将纵向操作手柄扳至向右位置(机械上接通纵向进给离合器,电气上压下行程开关 SQ5),再按住快速移动按钮 SB3 或 SB4(两地控制)→KM2 通电→KM2 动断触点(9 区)断开,切断正常进给电磁离合器 YC2; KM2 动合触点(10 区)闭合,接通快速进给电磁离合器 YC3; KM2 动合触点(16 区)闭合,接通进给控制电路→KM3 通电(因纵向操作手柄已压下行程开关 SQ5,使动合触点 SQ5 - 1 已闭合)动作→电动机 M2 通电正转→工作台向右快速进给移动。

松开快速移动按钮 SB3 或 SB4,工作台停止向右快速移动。

如果在工作台已经作向右进给运动的情况下,要作向右快速移动,则需按住快速移动按钮 SB3 或 SB4→KM2 通电动作→切断进给电磁离合器 YC2 的电源,接通快速移动电磁离合器 YC3 电路→工作台即按原来进给的方向作快速移动。松开 SB3 或 SB4→快速移动结束→工作台按原方向进给。

其他五个方向快速移动都可以通过相应的手柄操作和快速移动按钮的配合来实现,其控制原理与工作台向右快速移动相同。

e. 限位保护。工作台在各进给方向上的限位保护采用机械和电气相配合的方法。各进给方向上的极限位置由挡块确定。当工作台运动到极限位置时,挡块将操纵手柄撞回中间位置,使相应进给方向上被压下的行程开关复位,切断进给电动机的控制电路,使进给运动停止,以确保工作台在规定的范围内运动。

③ 圆形工作台的控制。为了扩大机床的加工能力,如铣削圆弧和凸轮,可在工作台安装附件圆形工作台。其操作可以手动,也可以自动。

将圆形工作台控制开关 SA2 拨至“接通”位置,此时 SA2 - 1 和 SA2 - 3 断开, SA2 - 2 闭合。

按下主轴电动机启动按钮 SB1 或 SB2→KM1 通电并自锁→M1 启动;同时由于 KM1 的动合辅助触点(15 区)闭合→KM3 通电动作(其通路为 TC 二次侧电源→SB6 - 1→SB5 - 1→SQ1 动断触点→KM1 动合触点→SQ2 - 2→SQ3 - 2→SQ4 - 2→SQ6 - 2→SQ5 - 2→SA2 - 2→KM4 动断触点→KM3 线圈→FR3、FR2、FR1 动断触点→SA1 - 2→TC 二次侧电源)→进给电动机 M2 正转→通过机械传动机构使圆形工作台作旋转运动。

按下主轴停止按钮 SB5 或 SB6→KM1 和 KM3 断电→主轴停转、圆形工作台停转。

圆形工作台在运动时,其他进给一律不准运动,否则将造成事故,因此圆形工作台的运动必须和六个方向的进给运动有可靠联锁,其联锁电路由行程开关 SQ3、SQ4、SQ5、SQ6 的动断触点串联组成。当圆形工作台运动时,若有误操作,拨动了两个进给操纵手柄中的任意一个,则行程开关 SQ3、SQ4、SQ5、SQ6 中的某一个被压下→其动断触点断开→KM3 断电→M2 停转。

(3) 冷却泵和照明控制

冷却泵电动机 M3 只有在主轴电动机起动后才能起动,并由开关 SQ2 控制。

机床照明灯 EL 由变压器 T1 供给 24 V 安全电压,由开关 QS3 控制。

4.6 企业供电与安全用电

4.6.1 电力系统与企业配电

企业等用户的电力是由发电机产生的,但大中型发电厂往往与用户距离较远,因此就需要采用高压输电来解决远距离输电中的电能损耗问题。一般大中型发电机输出的交流电压有 6.3 kV、10.5 kV、15.75 kV、18 kV 等,而我国远距离交流输电电压有 110 kV、220 kV、330 kV 及 500 kV 几个等级,因此,发电机发出的交流电要由升压变压器升高后再向远距离输送。高压输电到用户后,再经降压变压器降至用户所需的各种电压。由发电设备、输配电设备、用电设备等组成的电力系统如图 4.45 所示。

联系发电和用电设备的输配电系统称为电力网,电力网原理图如图 4.46 所示。大中型企业

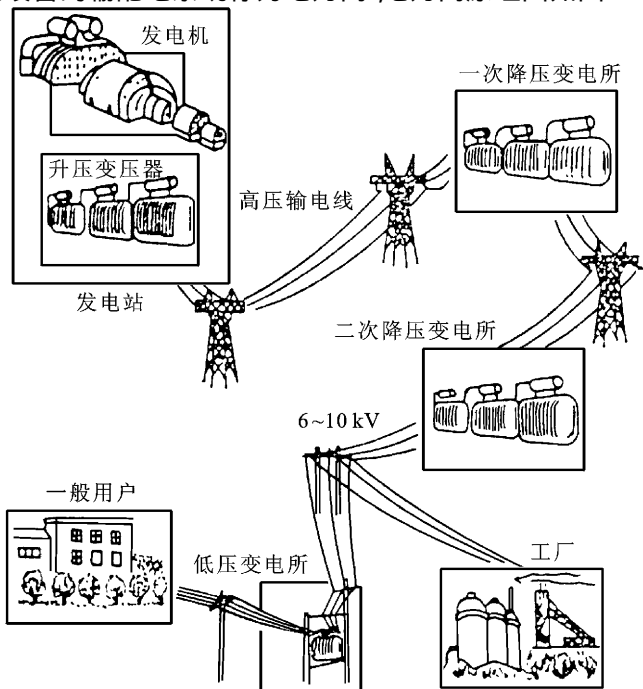


图 4.45 电力系统示意图

都设有变电所,小型企业因用电量较少,一般只设置配电室。企业采用的配电电压等级分为高压和低压两种,高压配电常采用 6 kV 或 10 kV,低压配电则采用 380/220 V。

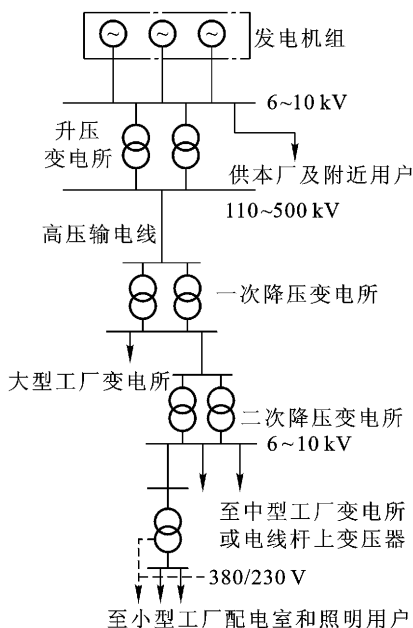


图 4.46 电力网原理图

4.6.2 安全用电

1. 电流对人体的危害作用

人体接触或接近带电体所引起的局部受伤或死亡的现象称为触电。根据人体伤害的程度,触电又可分为电伤和电击两种。

电伤是指人体外部的受伤,如电弧或熔丝熔断时的灼伤等。电击是指电流流过人体而使内部器官受伤。在很多情况下,电伤和电击是同时发生的,但绝大多数触电死亡是电击所造成的,因此电击是最危险的触电事故。

电击对人体的伤害程度主要由流过人体的电流大小、时间、途径等因素决定。对 50 Hz 的交流电,通过人体的电流大于 0.05 A 就会有生命危险。而且,电流流过心脏和大脑时,最容易致死,人体通电的时间越长危险性越大。

一般情况,当电压在 36 V 以下时,流过人体的电流不超过 0.05 A,所以把 36 V 称为安全电压。如果环境潮湿或充满导电粉末等情况时,安全电压还要低一些,通常是 24 V 或 12 V。

2. 触电方式

常见的触电方式有单相触电和两相触电,如图 4.47 所示。其中(a)图为人同时接触两根相线,形成两相触电,人体处于 380 V 的电压作用下,危险最大。(b)图为中性线接地的单相触电,人体处于相电压的作用下,危险大。(c)图为中性线不接地的单相触电,交流电可以通过人体→大地→导线的对地电容或绝缘电阻→两相电源形成电流回路,也有危险。此外,对高压电,

还有高压电弧触电和跨步触电。

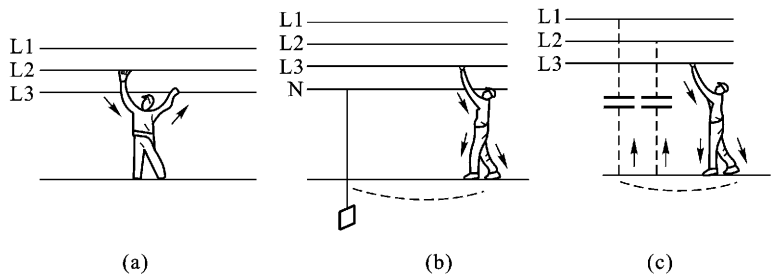


图 4.47 常见的触电方式

3. 安全用电常识

① 严格遵守安全操作规程。

② 正确安装用电设备。如开关应接在相线上,以保证断开开关后用电器上不带电。刀开关必须垂直安装,手柄要向上,以免闸刀落下,引起意外事故。电源线应接在上端(静触点),负载线接在下端(动触点),这样拉闸后便于更换熔丝。用电器的带电部分应有防护罩,高压带电体更应加以防护,使一般人无法靠近高压带电体。

③ 保护接零和保护接地。正常情况下,电气设备的外壳是不带电的,但为了避免因绝缘损坏而造成的外壳带电,通常采用保护接零和保护接地。

a. 保护接零。保护接零是将电气设备的金属外壳与供电系统中的中性线相连,如图 4.48(a)所示。保护接零适用于三相四线制中性线直接接地的电气设备。保护接零后,当电气设备因绝缘损坏而漏电时,则短路电流立即将该相熔丝熔断或使其他保护电器动作,切断电源。

b. 保护接地。保护接地是将电气设备的金属外壳通过接地体与大地连接,如图 4.48(b)所示。保护接地适用于电源中性线不直接接地的供电系统中的电气设备。采用保护接地后,因为金属外壳与地的接地电阻(接地电阻小于 $4\ \Omega$)很小,当人接触了漏电的金属外壳时,漏电电流几乎全部经接地电阻流入大地,从而保证了人身安全。

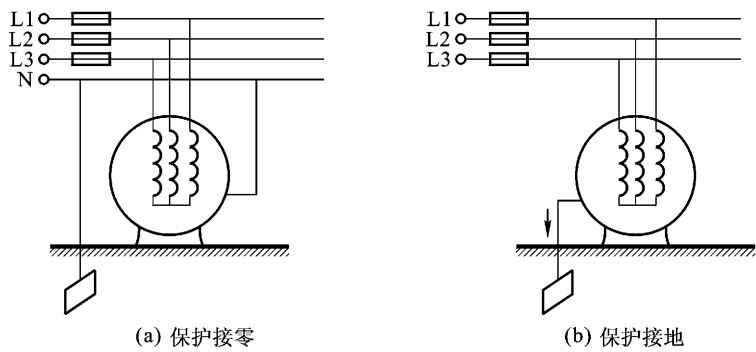
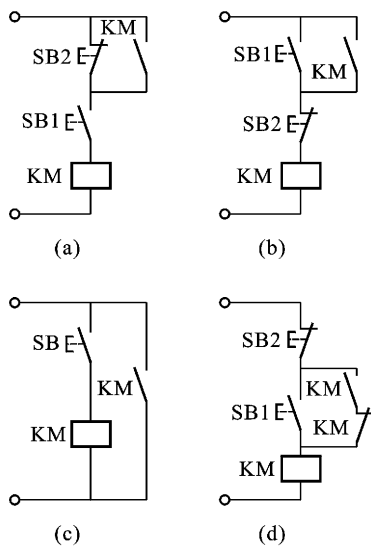


图 4.48 保护接零与保护接地

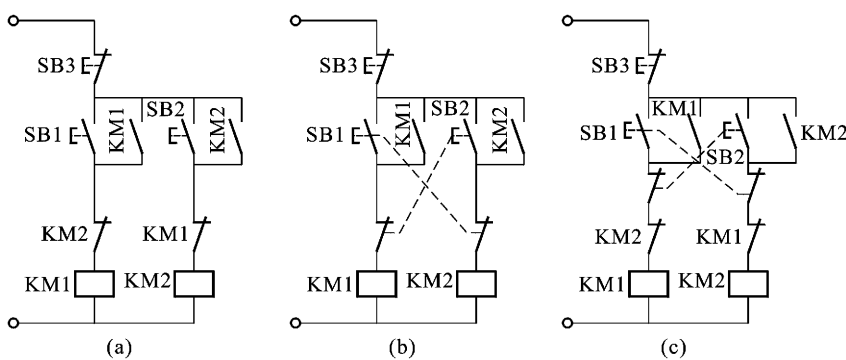
思考与练习

- 4.1 HK 系的刀开关与 HH 系列的铁壳开关有何不同？
- 4.2 为什么低压断路器具有短路、过载和欠压保护？
- 4.3 简述刀开关、组合开关、按钮、行程开关这四种开关在电气电路中的主要用途。
- 4.4 熔断器的主要作用是什么？为什么熔断器一般不能作过载保护？
- 4.5 怎样正确选用熔断器和熔体？
- 4.6 怎样正确选用交流接触器？
- 4.7 简述热继电器的工作原理。
- 4.8 时间继电器的作用是什么？通电延时和断电延时继电器的触点动作有何相同和不同之处？
- 4.9 速度继电器的作用是什么？触点动作和复位的速度是否相同？
- 4.10 试分析判断题图 4.10 所示的各控制电路能否实现自锁控制。若不能,会出现什么现象？

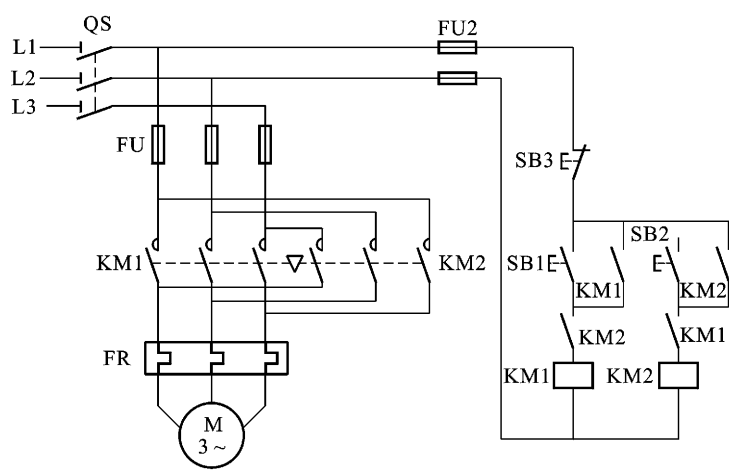


题图 4.10

- 4.11 什么是联锁控制？在接触器控制的电动机正反转电路中,为什么必须有联锁控制？判断题图 4.11 所示控制电路中,哪些电器元件起联锁作用？各电路有什么优缺点？
- 4.12 题图 4.12 为电动机正反转控制电路,试判断图中哪些地方画错了？试加以改正,并说明改正的原因。
- 4.13 某一工作台能在左右限定的位置内自动往返,其电气控制电路与图 4.31 相同,试判断出现以下几种情况的原因。



题图 4. 11

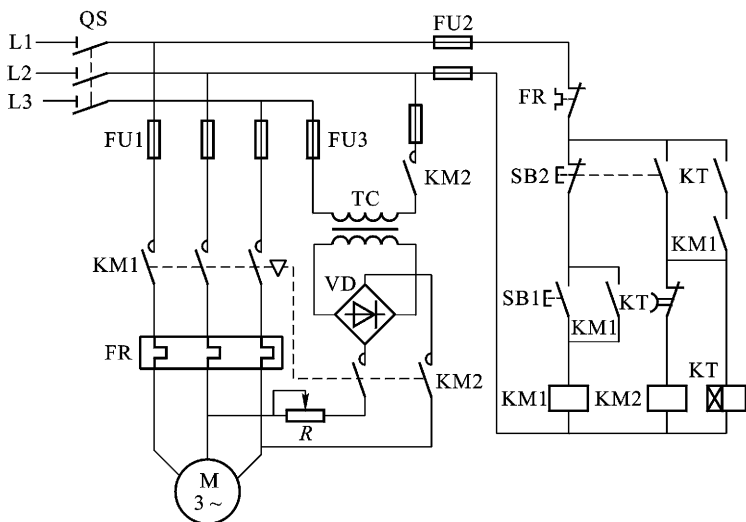


题图 4. 12

- (1) 工作台到达左端限定位置就停下。
- (2) 工作台到达右端限定位置就停下。
- (3) 工作台到达右端后停下 ,并向左运动 ,但挡块一离开右端的行程开关后就停下。

4. 14 某车床由两台电动机拖动 ,其要求如下 :一台主轴电动机正反转控制 ;另一台冷却液泵电动机单向控制 ,两台电动机都要有短路、过载、欠压、失压保护。试画出该车床的电气控制电路图。

- 4. 15 多地控制电路的特点是什么 ?
- 4. 16 为什么要采用降压起动 ,常用降压起动的方法有哪些 ,各有什么特点 ?
- 4. 17 题图 4. 17 是 Y - Δ 降压起动控制电路 ,判断图中哪些地方画错了 ,将错处改正 ,并按改正后的电路叙述工作原理。
- 4. 18 叙述题图 4. 18 所示的反接制控制电路工作原理。



题图 4.19

工作,为什么?

- 4.22 简述 X62W 铣床主轴变速冲动和制动的控制过程。
- 4.23 简述 X62W 工作台向左快速移动的控制过程。
- 4.24 X62W 铣床电气线路中,电磁离合器 YC1、YC2、YC3 的作用是什么?
- 4.25 X62W 铣床电气控制线路具有哪些联锁与保护,为什么要有这些联锁与保护,它们是如何实现的?