

绪 论

机械制造业中主要加工设备的质量、数量及自动化水平，直接影响整个机械工业的发展。设备的自动化水平对提高生产效率和产品质量，减轻体力劳动等方面都起到极为重要的作用。

设备控制技术对于现代加工设备的发展有着非常重要的作用。从广义上说，现代设备控制技术的重要标志是：自动调节技术、电子技术、检测技术、计算机技术、综合控制技术在设备中的应用。目前，不同的设备使用各种不同的动力装置，如液压装置、气压装置及电气控制装置等，但即使使用液压或气压装置做动力，也离不开电气控制，因此，机械、电气、液压（气压）联合控制装置的配置情况正是设备自动化水平的重要标志。在机械行业中，机、电、液（气）联合控制技术应用相当广，图 0-1、0-2 所示为液压动力滑台的液压控制系统和具有一次工进和死挡铁停留的进给电气控制系统图。

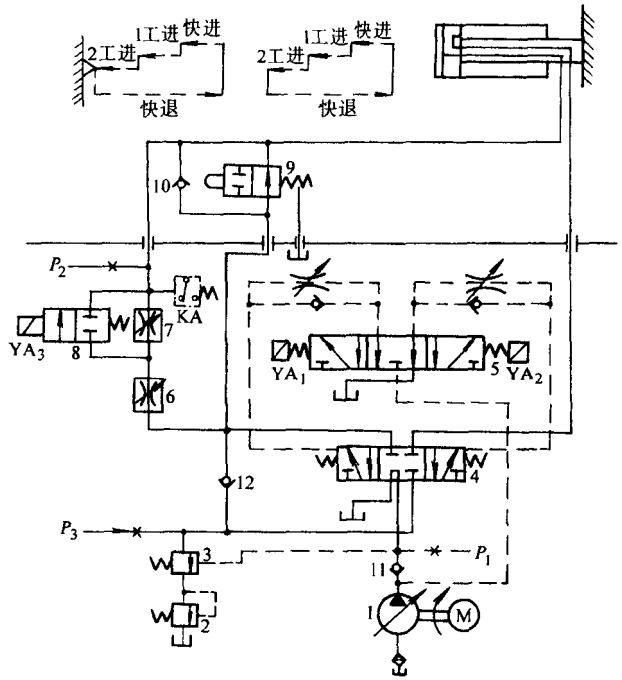


图 0-1 液压动力滑台液压系统图

- 1—变量泵 2—溢流阀 3—顺序阀 4—液动换向阀 5—电磁换向阀
6 7—调速阀 8—换向阀 9—行程阀 10、11、12—单向阀

图 0-1 所示液压装置中的电磁铁的动作是由电气系统来控制的，而电气系统中控制电磁铁得、失电往往是由机械行程开关来实现的。可见，这是由机械、电气、液压控制技术联合控制的一个典型设备。

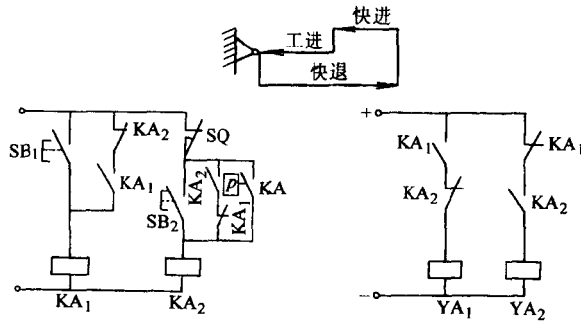


图 0-2 具有一次工进和死挡铁停留的进给电气控制线路

电工和电子技术是电气控制的基础，电气控制在机械控制中起着最重要的作用。液压和气压传动装置是机械控制中最重要的动力设备。

第一节 电工和电子技术概述

一、电能的应用及其与生产发展的关系

电工学是研究电能在技术领域中的应用的技术基础课程。电能的应用范围是极其广泛的。现代一切新的科学技术的发展无不与电有着密切的关系。

电能的应用，在生产技术上曾引起了划时代的革命。在现代工业、农业及国民经济的其他各个部门中，逐渐以电力作为主要的动力来源。工业上的各种生产机械设备（如机床、起重机械、轧钢机、锻压和铸造设备等）都是用电动机来驱动的。机械制造工艺，如电镀、电焊、高频淬火、电炉冶炼金属、电蚀加工、超声波加工、电子束和离子束加工等，都是电能的应用。对生产过程中所涉及的一些物理量（如长度、速度、压力、温度、水位、流量等），都可用电的方法来测量和进行自动调节，以实现生产过程的自动化。农业上将日益广泛地采用电力排灌设备、粮食和饲料的电力加工装置等。电也是现代物质、文化生活中所不可缺少的，如电灯、电话、电影、电视、无线电广播及 X 射线透视等都是电能的应用。

随着生产和科学技术发展的需要，电子技术得到高度发展和广泛应用（如空间电子技术、生物医学电子技术、信息处理和遥感技术、微波应用等），它对于社会生产力的发展也起着变革性的推动作用。电子水准是现代化的一个重要标志，电子工业是实现现代化的重要物质技术基础。电子工业的发展速度和技术水平，特别是电子计算机的高度发展及其在生产领域中的广泛应用，直接影响到工业、农业、科学技术和国防建设，关系着社会主义建设的发展速度和国家的安危，也直接影响到亿万人民的物质、文化生活，关系着广大群众的切身利益。

此外，工业生产中为了实现自动控制和调节，也可以利用传感器将非电量转换为电量（信号）。控制利用电能可以达到高度自动化。例如，能控制生产过程或设备，实现程序控制、数字控制或最佳状态控制；能检测生产过程的各种参数，并转换成一定的电信号，实现自动调节和管理自动化。利用电能还能实现巡回检测、分析数据、程序显示、处理故障等功能。所以，电能的应用对劳动生产率的提高和社会生产力的发展起着巨大的作用。

二、电工和电子技术发展概况

现在，人们已经掌握了大量的电工技术方面的知识，而且电工技术还在不断地发展着。这些知识是人们长期劳动的结晶。

在 18 世纪末和 19 世纪初，由于生产发展的需要，在电磁现象方面的研究工作发展得很快。库仑（C. A. Coulomb）在 1785 年首先通过实验确定了电荷间的相互作用力，电荷的概念开始有了定量的意义。1820 年，奥斯特（H. C. Oersted）在实验中发现了电流对磁针有力的作用，揭开了电学理论的新的一页。同年，安培（A. M. AmPere）确定了通有电流的线圈的作用与磁铁相似，这就指出了磁现象的本质问题。有名的欧姆定律是欧姆（G. S. Ohm）在 1826 年通过实验得出的。法拉第（M. Faraday）对电磁现象的研究有特殊贡献，他在 1831 年发现的电磁感应现象是以后电工技术的重要理论基础。在电磁现象的理论与实用问题的研究上，楞次（Э. Х. Ленц）发挥了巨大的作用，他在 1833 年建立了确定感应电流方向的定则（楞次定则）。其后，他致力于电机理论的研究，并阐明了电机可逆性的原理。楞次在 1844 年还与英

国物理学家焦耳 (J. P. Joule) 分别独立确定了电流热效应定律 (焦耳-楞次定律) 与楞次一道从事电磁现象研究工作的雅可比 (Б. С. Якоби) 在 1834 年制造出世界上第一台电动机, 从而证明了实际用电能的可能性。电机工程得以飞跃地发展是与多里沃-多勃罗沃尔斯基 (М. О. Доливо-Доброльский) 的工作分不开的。这位杰出的俄罗斯工程师是三相系统的创始者, 他发明和制造出三相异步电动机和三相变压器, 并首先采用了三相输电线。在法拉第的研究工作基础上, 麦克斯韦 (С. Maxwell) 在 1864 年~1873 年提出了电磁波理论。他从理论上推测出电磁波的存在, 为无线电技术的发展奠定了理论基础。1888 年, 赫兹 (Hertz) 通过实验获得电磁波, 证实了麦克斯韦的理论。但实际利用电磁波为人类服务的还应归功于马可尼 (Marconi) 和波波夫 (А. С. Попов)。大约在赫兹实验成功七年之后, 他们彼此独立地分别在意大利和俄国进行通信试验, 为无线电技术的发展开辟了道路。

1883 年, 美国发明家爱迪生 (Edison) 发现了热电子效应, 随后, 在 1904 年, 弗莱明 (Fleming) 利用这个效应制成了电子二极管, 并证实了电子管具有“阀门”作用, 它首先被用于无线电检波。1906 年, 美国的德福雷斯 (De Forest) 在弗莱明的二极管中放进了第三个电极——栅极, 而发明了电子三极管, 从而建树了早期电子技术上最重要的里程碑。从 1948 年美国贝尔实验室的几位研究人员发明晶体管以来, 在大多数领域中已逐渐用晶体管来取代电子管。但是, 我们不能否定电子管的独特优点, 在有些装置中, 不论从稳定性、经济性还是从功率上考虑, 仍需要采用电子管。

集成电路的第一个样品是在 1958 年见诸于世的。它实现了材料、元件、电路三者之间的统一, 同传统的电子元件的设计与生产方式、电路的结构形式有着本质的不同。随着集成电路制造工艺的进步, 集成度越来越高, 出现了大规模和超大规模集成电路, 进一步显示出集成电路的优越性。

随着半导体技术的发展和科学研究、生产与管理等的需要, 电子计算机应时而兴起, 并且日臻完善。从 1946 年诞生第一台电子计算机以来, 已经历了电子管、晶体管、集成电路及大规模集成电路四代, 现在正向“第五代” (智能化) 进军。特别是从 20 世纪 70 年代微型计算机问世以来, 由于它价廉、方便、可靠、小巧, 大大加快了电子计算机的普及速度。

第二节 设备电气控制概述

一、设备电气拖动的发展

设备的拖动装置发展迅速, 变革很大。20 世纪初, 由于电动机的出现, 使设备的动力发生了根本改变。最初是由电动机直接代替蒸汽机, 来驱动一台设备, 后发展到由一台电动机拖动一组设备的成组拖动。

成组拖动是通过中间机构 (天轴) 实现能量分配与传递的, 机构复杂, 传递路径长, 损耗大, 生产灵活性小, 不适应现代化生产的需要。20 世纪 20 年代, 出现了单独拖动形式, 即由一台电动机拖动一台机床。由于生产发展的需要, 设备结构改变。床体增大, 运动增多, 各种辅助运动也要由同一台电动机拖动, 机械传动机构更变得十分复杂, 仍不能满足生产工艺上的要求, 于是出现由多台电动机分别拖动各运动机构的多电动机拖动。

多电动机拖动的被采用, 不但简化了设备本身的机械结构, 提高了传动效率, 而且使设备各运动部分能够选择最合理的运动速度, 缩短了工时, 也便于分别控制, 促进了设备的自

动化。

由于直流调速性能好，调速范围可相应扩大，调速精度高，平滑性强，在 20 世纪 30 年代出现了直流发电机-直流电动机组的调速系统，以及通过电机扩大机等元件实现控制的自动调速系统。由于晶闸管等大功率整流元件的出现，变流技术的发展，晶闸管-电动机直流调速系统在新的设备中已越来越多地被采用。

二、设备电气控制的基本概念

一般说来，电力拖动系统可分为两部分：即电力拖动部分（包括电动机以及使电动机和设备相互联系起来的传动机构）和电气自动控制部分。从图 0-3 示意图中，可清楚地看出普通车床电力拖动系统的两大部分。

电力拖动系统主要分为直流拖动和交流拖动两大类，直流拖动以直流电动机为动力，交流拖动以交流电动机为动力。电动机不同，其电气控制装置也就不同。因交流拖动系统的交流电动机有结构简单、制造容易、造价低及容易维护等许多特点，在普通设备中仍占主导地位。直流

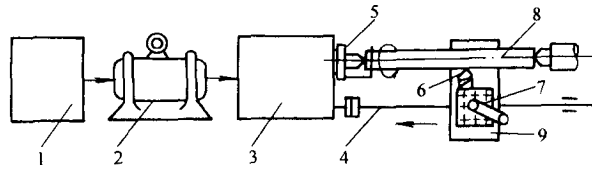


图 0-3 普通车床加工示意图

- 1—控制装置 2—电动机 3—机械变速装置 4—光杆
5—主轴 6—车刀 7—刀架 8—工件 9—拖板

电动机具有良好的起动、制动特性和调速性能，能在很宽的范围内进行平滑调速，因此对调速性能要求较高、对速度要求精确控制的设备都采用直流电动机拖动系统。

电动机以及与电动机有关联的传动机构合并称为“电力拖动”部分；把为满足加工工艺要求使电动机起动、制动、反向、调速等的电气控制和电气操纵部分称为“电气自动控制”部分，或称电气自动控制装置。

设备电气控制系统类型很多，按使用的电气设备分，主要有继电器-接触器控制系统、电机扩大机控制的直流调速系统、晶闸管-电动机直流调速系统、数字控制系统、计算机控制系统等。

三、设备电气控制的发展

设备电气控制，最初是采用手动控制，后来除了少数容量小、动作单一的机床（如小型台钻、砂轮机）使用手动控制电器外，多采用继电器-接触器自动控制方式。这种控制方式，可以实现对设备各种运动的控制，如起动、停止、反转、改变转速等。它的控制方法简单、直接，工作稳定，成本低，能在一定范围内适应单机和生产自动线的需要。

但继电器-接触器控制系统由于它的固定接线，使用的单一性，即一台控制装置只能针对某一种固定程序的设备，一旦工艺程序有所变动，就得重新配线，满足不了程序经常改变、控制要求比较复杂的系统的需要。

20 世纪 70 年代以来，随着电子技术的发展，一种新型的控制装置——可编程序控制器得到迅速发展，它把继电器-接触器控制的优点与计算机功能齐全、灵活性、通用性强的特点结合起来，用计算机的编程软件逻辑代替继电器——接触器控制的硬接线逻辑，实现对程序需要经常变动的控制要求，使设备控制系统具有更大的灵活性和通用性。其主要特点是：通用性强、程序可变、编程容易、可靠性较高、使用维护方便。它在机械制造业的应用，提高了设备的自动化水平。

但无论是有触点电器还是无触点逻辑元件，其输入和输出信号又有‘通’和‘断’两种

状态，因而这种控制是断续的，不能连续地反映信号的变化，故称为断续控制。为了使控制系统获得更好的静态和动态特性，完成更为复杂的控制任务，现在广泛采用了反馈控制系统。反馈控制系统是由连续控制元件组成的，它不仅能反映信号的通或断，而且能反映信号的数值大小，这种由连续控制元件组成的反馈控制系统，叫作连续控制系统。

随着半导体器件和晶闸管的发展，越来越多地采用晶闸管作为控制元件，组成先进的、用途广泛的晶闸管控制系统。由于数控技术的发展和电子计算机的应用，电力拖动自动控制又发展到一个新的水平，即向着生产过程自动化的方向迈进。应用电子计算机可以不断地处理复杂生产过程中的大量数据，计算出最佳参数，然后通过自动控制设备及及时调整各部分生产机械，使之保持最合理的运行状态，实现整个生产过程的自动化。这是今后电力拖动自动控制发展的方向。

第三节 液压与气压传动概述

一、液压传动概述

任何一台完整的机器，都可以归纳为由下列三个主要部分所组成，即原动部分、传动部分和工作部分。液压传动在机器中有时能兼起这三方面的作用。如作为原动部分的液压泵，作为工作部分的液压缸、液压马达，作为传动部分的液压阀，用来调节和控制工作机与原动机之间的联系。

传动的类型很多，有机械传动、电气传动、气压传动、液体传动和复合传动等。

那么，什么是液压传动呢？首先要知道什么是液体传动。用液体作为工作介质进行能量传递，称为液体传动。液体传动按其工作原理的不同，又可分为“容积式液体传动”和“动力式液体传动”两类。前者靠液体的压力能进行工作，后者除压力能外，还靠液体的动能进行工作。因此，一般将前者简称为“液压传动”，后者简称为“液力传动”，以资区别，本书只讨论前者。用液体（液压油）作为工作介质，并以压力能的形式，进行能量的传递或转换，这种传动方式，称为液压传动。

液压传动是根据 17 世纪帕斯卡指出的液体静压力传送原理（即帕斯卡原理），而发展起来的一门技术。1795 年，英国人约瑟夫·布拉曼（Joseph Braman），在伦敦用水作为工作介质，以水压机的形式将其应用于工业上，发明世界上第一台水压机。1905 年将工作介质水改为油。

我国液压技术在 20 世纪 50 年代刚刚兴起，20 世纪 60 年代有较大的发展。1976 年制订了元件型谱，设计了部分基型，近十年液压技术得到普遍应用。目前，应用范围已涉及到各个领域，不是在什么部门应用的问题，而是在什么部门不能应用的问题。

二、气压传动概述

气压传动是以压缩空气为工作介质进行能量传递的一种传动形式。由于气压传动具有省能、高效、价廉和无污染等优点，因此近年来在国内、外发展都较快。

气动技术在我国 20 世纪 50 年代开始应用于某些工业部门。20 世纪 60 年代中期开始建立气动元件厂，生产气动产品。在此之后，又相继建立了一批新的气动元件生产厂，使生产能力大幅度提高，产量迅速增加。目前，我国生产的气动产品，品种、规格都很多。

最近几年，我国的气动行业，已成为一个初具规模，并有一定科研开发能力的新兴行业。

无论在老产品质量提高方面，还是在新产品开发方面，都取得了可喜的成绩，在提高工艺水平和研究能力方面，也有了新进展。今天，我国的气动技术已不再是原有概念上的气压传动技术，而是发展成为包括传动、控制与检测在内的自动化技术，并已广泛用于机械、电子、轻工、纺织、食品、医药、包装、冶金、石化、航空、交通运输等各个工业部门。气动机械手、组合机床、加工中心、生产自动线、自动检测和试验装置等已大量涌现，在提高生产效率、自动化程度、产品质量、工作可靠性和实现特殊工艺、机床配置等方面越来越显示出其优越性。

第四节 本课程的性质、任务及学习方法

本课程是模具专业的一门主干课程，它把以前先修课程“电工学与工业电子学”、“电气控制”和“液压与气动”等几门课程的内容有机地结合起来，形成一个完整的课程体系。其任务是要求学生掌握学习设备电气控制系统（继电器-接触器控制、可编程序控制器控制）所必备的电工学与工业电子学的基础理论和基本知识，掌握设备电气控制、液压与气动控制系统的结构、组成、工作原理和应用的基础理论和基本知识，以及机、电、液（气）联合控制技术的基本概念。学生学完本课程后，应具有对设备电气控制系统进行分析、调试的能力；会使用可编程序控制器；会分析液压、气压传动系统及排除简单故障。

由于本课程与生产实际关系密切，因此，在教学及学习过程中，应多与实际结合，除学好基本理论知识外，还必须加强动手能力的训练，以巩固所学知识。

第一章 电工技术

本章主要介绍直流电路、单相交流电路、三相交流电路的基本分析方法和变压器的基本结构、工作原理与应用。

第一节 直流电路

本节首先讨论电路的基本概念，其中包括电路、电路模型、电路的基本物理量、电路的工作状态、电路的基本定律以及电压和电流的参考方向等。然后重点讨论电位的计算方法和如何应用基本定律分析一些简单的直流电路。这些内容是学习电工学知识的基础。

一、电路与电路模型

电路就是电流所通过的路径，它是为了完成某种任务由某些电工设备及元器件按照一定连接方式而构成的一个整体。

电路按其功能可以分为两类：一类是为了实现能量的传输和转换，这类电路称为电力电路；另一类是为了实现信号的传递和处理，这类电路称为信号电路。

电力电路的典型例子是电力系统，它包括电源、负载和中间环节三个重要组成部分。典型的电力系统如图 1-1a 所示。

电源是将非电能转换成电能的装置。例如，干电池和蓄电池是将化学能转化成电能，而电力系统中的发电机是将热能、水的势能或原子能等转换成电能。因此，电源是电路中的能量来源，在它的内部进行着由非电能到电能的转换。

负载是将电能转换成非电能的装置。例如，电力系统中的电灯、电炉、电动机等负载分别是将电能转换成光能、热能和机械能。因此，负载是电路中取用电能的装置，在它的内部进行着由电能到非电能的转换。

中间环节是把电源与负载连接起来的部分，起传递和控制电能的作用。如电力系统中的变压器、输电线以及一些控制与保护电器。

信号电路的典型例子是电子技术中的信号放大器，如图 1-1b 所示。图中话筒的作用是将语言或音乐等声音振动信号转换成相应的电信号，这一信号即是放大器的信号源。由于话筒输出的电信号比较微弱，不足以推动作为负载的扬声器，所以中间必须用放大器来进行放大，最后通过扬声器将电信号还原成语言或音乐，而放大器所需的电能是由另外的直流电源提供的。

由此可见，对于一个完整的电路来说，电源（或信号源）、负载和中间环节是三个基本组成部分，它们是缺一不可的。

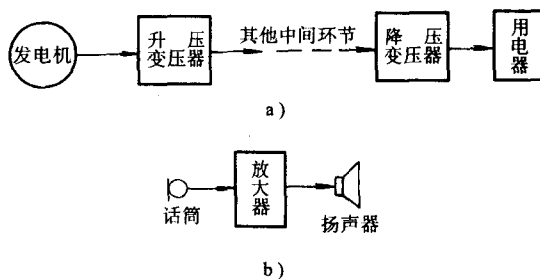


图 1-1 两种典型电路示意图
a) 电力系统 b) 扩音机

由实际元件组成的电路，由于其电磁性能比较复杂，这对电路进行定量的分析与计算带来了相当大的难度。通常是将实际的电路元件理想化（或模型化），即在一定的条件下，突出其起主导作用的电磁性能，而忽略其次要因素，把它近似地看作理想电路元件，用一个理想电路元件或由几个理想元件的组合来代替实际的电路元件。如用“电阻”这个理想的电路元件来代替电阻炉、白炽灯等消耗电能的实际元件，用内电阻 R_0 和电动势 E 相串联的理想元件的组合来代替实际的电压源等等。

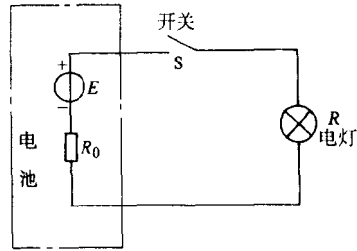


图 1-2 最简单的电路模型

用理想电路元件及其组合来代替实际的电路元件，就构成了与实际电路相对应的电路模型。图 1-2 就是一个最简单的电路模型，灯泡为理想电阻元件，文字标注为 R ；实际电源表示为理想电压源与内阻的串联组合；导线和开关组成中间环节，导线视为无阻的理想导体。我们以后在进行理论分析时所指的电路，就是这种电路模型。根据对电路模型的分析所得出的结论，有着广泛的实际指导意义。

二、电路的基本物理量

1. 电流

电流是一种物理现象，是带电粒子有规律的定向运动形成的。

电流的强弱用电流强度来度量，电流强度在数值上等于单位时间内通过某一导体横截面的电荷量。设在时间 dt 内，通过导体横截面的电荷量为 dq ，则通过该截面的电流强度为

$$i = \frac{dq}{dt} \tag{1-1}$$

上式表示，在一般情况下，电流强度是随时间而变化的，是时间的函数。如果电流强度不随时间变化，即 $dq/dt = \text{常数}$ ，则这种电流就称为恒定电流，简称直流。于是式（1-1）可写成

$$I = \frac{Q}{t} \tag{1-2}$$

电流强度的单位用安培表示，简称安（A）， $1A = 10^3mA = 10^6\mu A$ 。

习惯上规定正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向为电流的实际方向。电流的实际方向是客观存在的，但在分析比较复杂的电路时，往往难于事先判断某电路中电流的实际方向。如图 1-3 中流过 R_5 的电流是由 A 流向 B 还是由 B 流向 A，无法判断。为此，在分析和计算电路时，可先任意假设一个方向，然后根据所假设的方向列出方程，再求解方程。如果该电流计算结果为正值，表示该电流的实际方向与所假设的方向相同；如果该电流计算结果为负值，表示该电流的实际方向与所假设的方向相反，如图 1-4 所示。我们所假设的方向，称为电流的参考方向，或称为正方向。电流的正方向的选取，原则上是任意的。

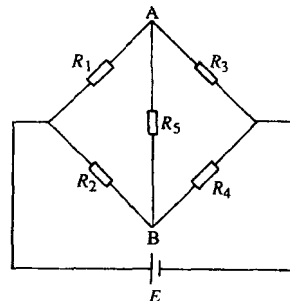


图 1-3 电桥电路

2. 电位与电压

电路中任意两点（A、B）间的电压等于这两点的电位之差，即

$$U_{AB} = V_A - V_B \tag{1-3}$$

电路中某点的电位就是该点到参考点之间的电压。电路中同一点由于参考点选择不同，其电位值是不相等的，但电路中任意两

点之间的电压却与参考点的选取无关。

电位为标量，它有大小和正负，但无方向。电压的实际方向规定为从高电位点指向低电位点，即电压的方向为电位降低的方向。在复杂电路中，有时很难确定某两点间电压的实际方向，这时可以先选取一个参考方向。分析计算后根据计算结果的正负和电压的参考方向，便可确定两点间电压的实际方向。所以，只有在参考方向选定后，电压的正负才有实际意义。

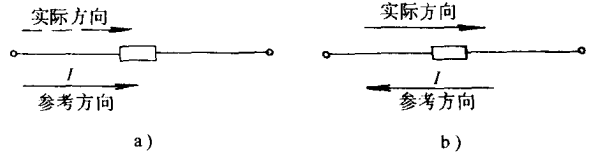


图 1-4 电流参考方向与实际方向的关系

a) $I > 0$ b) $I < 0$

电压和电位的单位都为伏特 (V)，其中， $1\text{kV} = 10^3\text{V} = 10^6\text{mV}$ 。

3. 电动势

在图 1-5 中，为了维持电流不断地在连接导体中流通，并保持恒定，则必须使电源两端 ab 间的电压 U_{ab} 保持恒定，受电场力作用经外电路移动到 b 并积累在负极板 b 上的正电荷，经电源内部重新回到正极板 a。

电荷受到的电源力是一种非静电力，它可以克服电源内的电场力，使正电荷在电源内部的这种逆电场方向的移动成为可能，在干电池中电源力为化学力，在发电机中电源力为电磁力。

电动势是用来衡量电源力对电荷做功的能力的。电源的电动势 E_{ab} 在数值上等于电源力把单位正电荷从电源的低电位端 b 经电源内部移到高电位端 a 所做的功，也就是单位正电荷从 b 点移动到 a 点所获得的电位能。在电源力的作用下，电源不断地把其他形式的能量转换为电能。

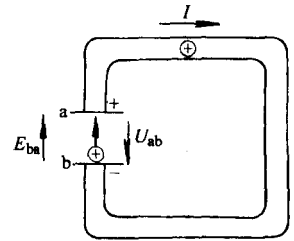


图 1-5 电荷在电路中的回路

电动势的实际方向规定为从低电位点指向高电位点，即电动势指向电位升的方向。电动势的参考方向，总是与电压的参考方向相反。电动势的单位与电压、电压的单位相同，都是伏特 (V)。

4. 电能和电功率

电能等于电压、电流和电流所持续时间的乘积，即

$$W = UI t \quad (1-4)$$

如果电压的单位为伏特 (V)、电流的单位为安培 (A)、时间的单位为秒 (s) 则电能的单位为焦耳 (J)。

单位时间内负载所消耗的电能，称为电功率，用 P 来表示，单位为瓦 (W) 或千瓦 (kW)

$$P = \frac{W}{t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-5)$$

有时电能的单位可用千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) 表示， $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 就是指功率为 1kW 的用电设备，正常使用 1h 所消耗的电能。如 100W 的灯泡，工作 10h，其消耗的电能就是 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 俗称 1 度电。

三、电路的三种状态

本节以图 1-6 所示的简单电路来讨论电路的状态。

1. 空载状态

空载状态又称为断路或开路状态，图 1-6 在开关 S 断开时，电路就处于开路（空载）状态。此时外电路所呈现的电阻对于电源来说相当于无穷大，故电路具有如下特点：

- 1) 电路中的电流为零，即 $I=0$ 。
- 2) 电源内阻上的电压为零，故电源的端电压等于电源的电动势，即

$$U_{ab} = E - IR_0 = E$$

此电压称为空载电压或开路电压。

- 3) 负载所吸收的功率 P 和电源的输出功率 P_0 都为零。这是因为电源对外不输出电流。

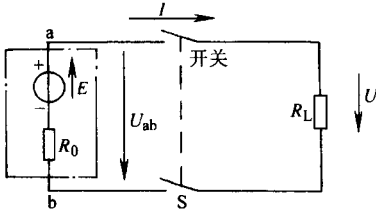


图 1-6 电路的开路状态

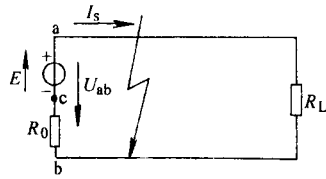


图 1-7 电路的短路状态

2. 短路状态

在图 1-6 中，当电源的两端 a 和 b 由于某种原因（如电源线绝缘损坏，操作不慎等）而连在一起时，会造成电源被直接短路的情况，如图 1-7 所示。当电源被短路时，外电路的电阻可视为零，故电路具有如下特点：

- 1) 通过电源中的电流最大，而输出电流为零。此时通过电源中的电流称为短路电流 I_s ，即

$$I_s = \frac{E}{R_0}$$

在一般的供电系统中，电源的内电阻 R_0 很小，故短路电流 I_s 很大。但对于外电路却无电流输出，即 $I=0$ 。

- 2) 电源和负载的端电压都为零，即

$$U_{ab} = E - I_s R_0 = 0$$

$$E = I_s R_0$$

上式表明电源的电动势全部加在电源的内阻上，因而无输出电压。

- 3) 由于电源所发出的功率全部被内阻所消耗，因此电源的输出功率和负载所吸收的功率均为零，即

$$P_0 = P = 0$$

电源被短路时，电源所发出的功率全部被内阻所消耗，这就使电源的温度迅速上升，有可能导致烧毁电源及其他电气设备，甚至引起火灾，或由于短路电流产生强大的电磁力而造成机械上的损坏。电源的短路通常是一种严重的事故，应该尽力预防。为此，通常在电路中接入熔断器（俗称保险丝）或自动断路器，以便发生短路时，能迅速切断故障电路，避免电源或电气设备的严重毁坏。但是，有时为了满足电路工作的某种需要，可以将局部电路（如某些电路元件或仪表等）短路（又称为短接）或按技术要求对电源设备进行短路实验，这些属于正常的现象。

3. 负载状态

在图 1-6 中当开关 S 闭合时，电路就处于负载状态，如图 1-8 所示。此时电路具有如下特

点：

1) 电路中的电流为

$$I = \frac{E}{(R_0 + R_L)}$$

2) 电源的端电压为

$$U_{ab} = E - IR_0$$

电源的端电压总是小于电源的电动势。如果忽略线路上的电压降，则负载两端的电压就等于电源的端电压。

3) 电源的输出功率为

$$P_0 = U_{ab}I = (E - IR_0)I = EI - R_0I^2$$

上式表明，电源电动势发出的功率 EI 减去内阻上的消耗 R_0I^2 ，才是供给外电路的功率。它们是满足功率平衡关系的。

另外，需要特别指出的是，在实际电路中，各种电气设备的电压、电流和功率都有一个额定值。额定值是电器制造厂为了使产品能在给定的工作条件下正常运行，而规定的正常允许值。例如一灯泡上面标注的电压 $220V$ ，功率 $100W$ ，就是它的额定值，告诉使用者该灯泡在 $220V$ 电压下工作是正常的，其消耗的功率为 $100W$ 。

当电气设备在超过额定值很多的状态下工作时，会使元件损坏，影响寿命，甚至烧毁；当在低于额定值很多的状态下工作时，不能发挥元件的潜力，不能使它正常工作，甚至造成设备的损坏，如电压过低时，灯泡发光亮度不够，电动机不能拖动生产机械正常运转。

电气设备或元件的额定值通常标注在铭牌上，在使用时必须充分考虑额定数据。额定值常用带有下标“N”的字母来表示。如额定电压、额定电流、额定功率分别用 U_N 、 I_N 、 P_N 来表示。

例 1-1 有一额定值为 $5W$ 、 500Ω 的线绕电阻，试计算其额定电流 I_N 和额定电压 U_N 。

解 根据题意，已知 P_N 和电阻值 R ，可以先求额定电流

$$I_N = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{5W}{500\Omega}} = 0.1A$$

额定电压

$$U_N = I_N R = 0.1A \times 500\Omega = 50V$$

例 1-2 图 1-9 所示的电路可用来测量电源的电动势 E 和内阻 R_0 。若开关 S 打开时电压表的读数为 $6V$ 开关闭合时

电压表的读数为 $5.8V$ ，负载电阻 $R_L = 10\Omega$ 。试求电源的电动势 E 和内阻 R_0 （电压表的内阻可视为无穷大）。

解 当开关 S 断开时

$$U = E - IR_0 = E$$

所以此时电压表的读数，即为电源的电动势

$$E = 6V$$

当开关 S 闭合时，电路中的电流

$$I = \frac{U}{R} = \frac{5.8V}{10\Omega} = 0.58A$$

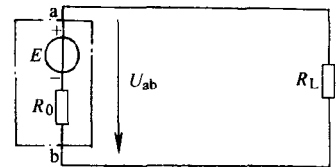


图 1-8 电路的负载状态

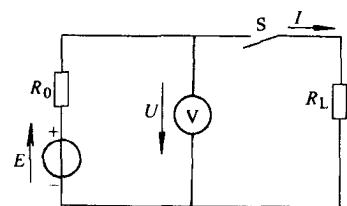


图 1-9 例 1-2 的电路图

故内阻为

$$R_0 = \frac{(E-U)}{I} = \frac{(6-5.8)V}{0.58A} = 0.345\Omega$$

四、电路中电位的计算

在分析电子电路时，常常需要计算晶体管各电极的电位值，求出各极间的电位差，从而确定该晶体管的工作状态，便于我们调试电路，因此，电位的计算在电路分析和计算中有着重要的作用。

在本节开始，曾介绍了电位的基本概念以及电位与电压的联系。简言之，电路中某一点的电位就是该点与参考点之间的电压。从这里不难看出电位和电压的计算实际上是统一的。

由于电路中某一点的电位值与参考点有关，参考点不同，电位值也不同，所以在求解电路中某一点的电位值时，必须在电路图中选择一个参考点。参考点在电路图中标上接地符号“ \perp ”，但是，在这里所谓接地并不像在电工技术实践中，为了工作安全，把电路中的某一点（例如电动机的外壳）通过良导体真正与大地相接，而是作为我们求解电路中某一点电位高低的比较标准。

在研究同一电路系统中，只能选择一个参考点作为比较标准。一旦参考点选定后，参考点的电位则认为是零。原则上，参考点的选择是任意的，但在实际计算过程中，参考点的选择应使分析和计算更方便和更简化。

一般采用“走”的方法来求解电路中某一点的电位值。即从待求点出发，沿着任意一条路径“走”到参考点，一路上要经过许多元件，这些元件两端的电压有可能是电位升，也有可能是电位降，将电位升取负，电位降取正，最后将所经过的每个元件两端的电位升或电位降求代数和即为待求点的电位值。

例 1-3 如图 1-10 所示电路， $R_1=20\Omega$ ， $R_2=5\Omega$ ， $R_3=6\Omega$ ， $E_1=140V$ ， $E_2=90V$ ， $I_1=4A$ ， $I_2=6A$ ， $I_3=10A$ ，试问：

- (1) 如果选择 a 点作为参考点，计算电路中 b、c、d 各点的电位。
- (2) 如果选择 b 点作为参考点，计算电路中 a、c、d 各点的电位。

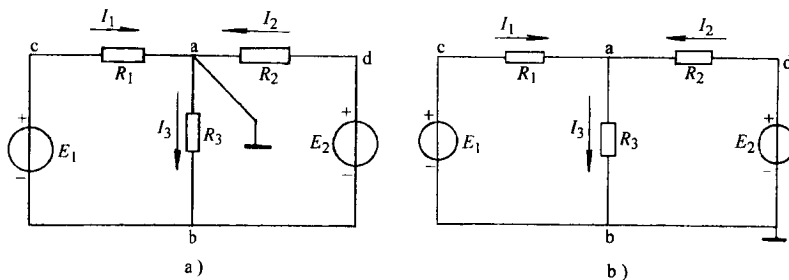


图 1-10 例 1-3 电路图

a) a 点为参考点的电路图 b) b 点为参考点的电路图

解 (1) 如果选择 a 点作为参考点，如图 1-10a 所示，则 a 点的电位 $V_a=0$ 。

$$V_b = -I_3 R_3 = -10A \times 6\Omega = -60V$$

$$V_c = I_1 \times R_1 = +4A \times 20\Omega = +80V$$

$$V_d = +I_2 \times R_2 = +6A \times 5\Omega = +30V$$

上面在求解 b 的电位时，选取的路径是从 b 点出发经过 R_3 到达参考点 a 点。另外还可以选取从 b 点出发经过 E_1 ，再经过 R_1 到达参考点 a 点，则方程为

$$V_b = -E_1 + I_1 R_1 = -140\text{V} + 80\text{V} = -60\text{V}$$

通过上式不难发现，虽然路径选择不同，但求解出来的电位值却是相同的。通常我们选择最简单的路径进行分析计算。

(2) 如果选择 b 点作为参考点，如图 1-10b 所示，则 b 点的电位 $V_b = 0$ 。

$$V_c = +I_3 R_3 = +10\text{A} \times 6\Omega = +60\text{V}$$

$$V_c = +E_1 = +140\text{V}$$

$$V_d = +E_2 = +90\text{V}$$

从上面分析可得出结论：参考点选的不同，电路中各点的电位值也不同。还可以自行验证：参考点选的不同，但电路中两点间的电压却不会改变。

如在本例中，选择 a 点为参考点时，c 与 d 点之间的电压 $U_{cd} = V_c - V_d = 80\text{V} - 30\text{V} = 50\text{V}$ ；当选择 b 点为参考点时 $U_{cd} = 140\text{V} - 90\text{V} = 50\text{V}$ ，与选择 a 点为参考点时电压相同。

例 1-4 在电路图 1-11 中，试求 B 点的电位 $V_B = ?$

解 先求出回路中的电流 I ，再求 V_B

由图 1-11a 可得

$$I = \frac{(6+9)\text{V}}{(100+50)\text{k}\Omega} = 0.1\text{mA}$$

$$V_B = IR_1 - E_1 = 0.1\text{mA} \times 100\text{k}\Omega - 9\text{V} = 1\text{V}$$

或

$$V_B = -IR_2 + E_2 = -0.1\text{mA} \times 50\text{k}\Omega + 6\text{V} = 1\text{V}$$

另外图 1-11a 在电子线路中经常简化为图 1-11b 的形式，不画电源，各端只标出对参考点的电位值。

五、电压源和电流源及其等效变换

在本章第一节中我们已经讲过，为了有效地对电路进行分析和计算，必须用模型来代替电路中的实际元件。任何一个实际的电源（或信号源），如发电机、干电池等，对外电路所呈现的特性（即电源端电压与输出电流之间的关系）可以用电压源或电流源两种模型来表示。一种是用理想电压源串联内阻的模型来表示实际电源，这种模型称为电压源模型，简称电压源；另一种是用理想电流源并联内阻的模型来表示实际电源，称为电流源模型，简称电流源。

1. 电压源

一个实际的电源（如干电池）它的电动势 E 和内阻

R_0 从电路结构上来看，是紧密结合在一起而不能分开的。但为了便于对电路进行分析和计算，我们可以用一个电动势 E 和内阻 R_0 相串联的理想元件的组合来代替。如图 1-12 所示电压源与外电路的连接电路。电压源的电动势、电流及其端电压的关系可由下式表示：

$$U = E - IR_0 \quad (1-6)$$

式中， U 为实际电源的端电压； E 为电源的电动势； I 为回路中的电流； R_0 为电压源的内阻。

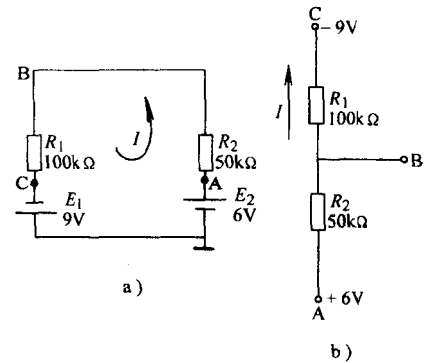


图 1-11 例 1-4 电路图

a) 电路原理图 b) 简化图

由上式可作出电源的端电压 U 与输出电流 I 之间的关系曲线，即 $U=f(I)$ 。这种关系曲线称为电源的外特性曲线，如图 1-13 所示。

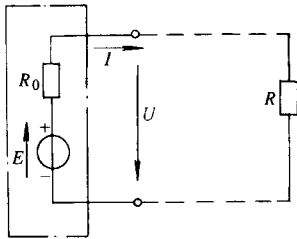


图 1-12 电压源与外电路的连接

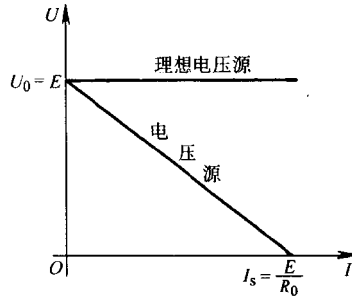


图 1-13 电压源和理想电压源的外特性曲线

当电压源开路时， $I=0$ ， $U=U_0=E$ ；当电压源短路时， $U=0$ ， $I=I_s=E/R_0$ 。当输出电流 I 增大时，端电压 U 随之下降。 R_0 越小，则直线越平。在理想情况下，当 $R_0=0$ 时，它的外特性是一条平行于横轴的直线，表明负载变化时，电源的端电压恒等于电源的电动势，即 $U=E$ ，与负载的变化无关。这种端电压恒定的电压源称为理想电压源，又称恒压源，其符号如图 1-14 所示。

理想电压源实际上是不存在的。但如果电源的内阻远小于负载电阻，即 $R_0 \ll R$ ，则电源的端电压基本恒定，此时就可以忽略 R_0 的影响，近似认为它是一个理想的电压源。



图 1-14 理想电压源

2. 电流源

一个实际的电源除了用电压源表示外，还可以用理想电流源 I_s 与内阻 R_0 并联的电路模型来表示。

将电压源的外特性方程 $U=E-IR_0$ 两边同时除以 R_0 ，则可改写成为

$$\frac{U}{R_0} = \frac{E}{R_0} - I = I_s - I$$

或
$$I = I_s - \frac{U}{R_0} \tag{1-7}$$

式中， $I_s=E/R_0$ 是电压源的短路电流； I 是电压源的输出电流； U 是电源的端电压； R_0 为电源的内阻。

图 1-15 所示是电流源的模型，即可用一个电流为 I_s 和电阻为 R_0 相并联的理想元件的组合来表示。

由 $I=I_s-U/R_0$ 可以作出电流源的外特性曲线，如图 1-16 所示。当电流源开路时， $I=0$ ， $U=U_0=-I_s R_0$ ；当电源短路时， $U=0$ ， $I=I_s$ 。由电流源的外特性曲线还可以看出，内阻 R_0 越大，则直线越陡。在理想情况下，如果 $R_0=\infty$ ，此时的负载电流 I 恒等于电流 I_s ，外特性是一条与纵轴平行的直线。这种输出电流恒定，输出电流与端电压无关的电源称为理想电流源，又称为恒流源，其符号如图 1-17 所示。

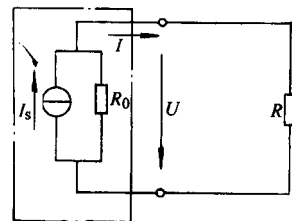


图 1-15 电流源与外电路的连接

同样，理想电流源实际上是不存在的。但如果电源的内阻远大于负载电阻，即 $R_0 \gg R$ ，则输出电流基本恒定，此时就可以近似认为它是一个理想的电流源。

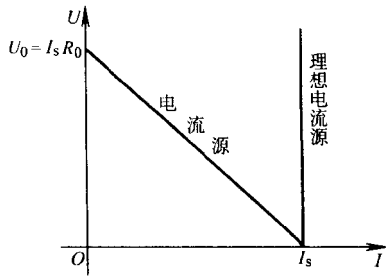


图 1-16 电流源和理想电流源的外特性曲线

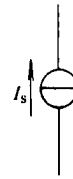


图 1-17 理想电流源

3. 电压源与电流源的等效变换

比较图 1-13 和图 1-16，我们可以知道，电压源的外特性和电流源的外特性是相同的。此电压源与电流源之间可以相互等效变换，如图 1-18 所示。

将电压源变换为电流源时，内阻 R_0 保持不变

$$I_s = \frac{E}{R_0} \quad (1-8)$$

I_s 的作用方向应该与 E 的作用方向一致，内阻 R_0 与 E 串联应该变为与 I_s 并联。

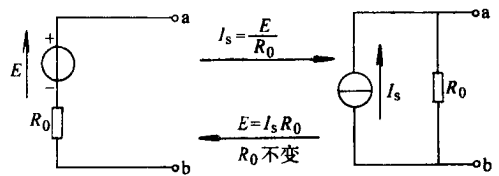


图 1-18 电压源和电流源等效变换示意图

将电流源变换为电压源时，内阻 R_0 不变

$$E = I_s R_0 \quad (1-9)$$

电动势 E 的作用方向应该与 I_s 的作用方向相同，内阻 R_0 与 I_s 并联应该变为与 E 串联。

但应该注意的是，电压源与电流源的等效变换只是相对于外电路而言的，至于对于电源内部，则是不等效的。例如，当电压源开路时， $I=0$ ，电源内阻 R_0 上不再消耗功率；但是当电流源开路时，电源内部仍然有电流通过，内阻 R_0 上仍有功率损耗。另外，当电压源和电流源短路时，电压源内阻 R_0 上功率损耗很大，而对于电流源来说，其内阻 R_0 被短路，无电流通过，因此 R_0 上无损耗。

运用电压源和电流源等效变换的方法，可以把一些复杂的电路简化，使计算非常简单。另外，在实际运用中， R_0 不仅限于实际电源的内电阻，只要是与理想电压源串联或与理想电流源并联的电阻都可以被视为 R_0 参与变换。

例 1-5 在图 1-19a 所示电路中，已知 $E_1=130\text{V}$ ， $E_2=117\text{V}$ ， $R_1=1\Omega$ ， $R_2=0.6\Omega$ ， $R=24\Omega$ 。试求通过电阻 R 的电流 I 。

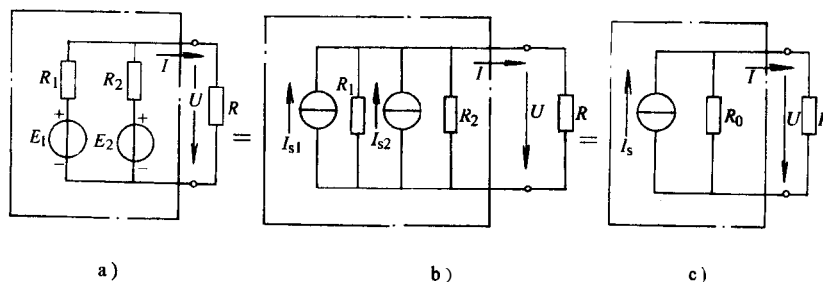


图 1-19 例 1-5 电路图及其等效变换过程示意图

解 该电路为复杂电路。首先应该把图中的两个电压源等效变换为两个并联的电流源，如图 1-19b 所示。

$$I_{s1} = \frac{E_1}{R_1} = \frac{130\text{V}}{1\Omega} = 130\text{A}$$

$$I_{s2} = \frac{E_2}{R_2} = \frac{117\text{V}}{0.6\Omega} = 195\text{A}$$

第二步将两个并联的电流源进行合并，如图 1-19c 所示。

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} = 130\text{A} + 195\text{A} = 325\text{A}$$

$$R_0 = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)} = 0.375\Omega$$

第三步对简单电路 1-19c 利用电阻的分流原理可直接求得通过 R 的电流 I

$$I = \frac{I_s R_0}{R_0 + R} = 5\text{A}$$

第三步可以不用电阻的分流原理，可以继续将合并后的电流源等效变换为电压源，最后运用欧姆定律求解通过 R 的电流 I ，读者可以自行分析。

六、基尔霍夫定律及支路电流法

对于一些简单的电路，可以利用电阻的串、并联知识和欧姆定律进行分析和计算。但对于有些比较复杂的电路，欧姆定律、电阻的分压分流公式等是不能直接应用来求解电路的。对于这类电路的分析和计算，我们必须掌握解决这类问题的基本定律——基尔霍夫定律。

在介绍基尔霍夫定律之前，先介绍一下几个有关的基本概念和术语。

支路：电路中的一个分支称为支路。支路中必须含有元件并且流过每一个元件的电流相同。

节点：电路中三条或三条以上支路的汇合点称为节点。

回路：由一条或多条支路所组成的闭合路径称为回路。

网孔：不被支路所分割的回路称为网孔。实际上，网孔是特殊的回路。

在图 1-20 中有 a 、 b 两个节点， c 和 d 不是节点；有三条支路 acb 、 adb 、 ab ，流过这三条支路的电流分别是 I_1 、 I_2 和 I_3 ；有三个回路分别是： $adbca$ 、 $adba$ 和 $abca$ ，其中 $adba$ 和 $abca$ 是两个网孔。

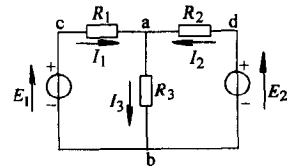


图 1-20 电路基本概念举例

1. 基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律是反映电路中任一节点各支路电流之间关系的定律，又称为节点电流定律。由于电流具有连续性，电路中任何一点均不能有电荷的堆积，因此，在任一瞬间，流入某一节点的电流之和应该等于流出该节点的电流之和，即

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}} \quad (1-10)$$

在电流的正方向选定后，可以假设流入节点的电流为正，流出节点的电流为负，则上式又可变形为

$$\sum I_k = 0 (k=0, 1, 2, \dots, n) \quad (1-11)$$

即在任一瞬间，流过电路中任一节点的电流代数和恒等于零。

例如在图 1-21 中，选取各支路电流的正方向如图所示，则对于节点 a 有

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

或者说

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

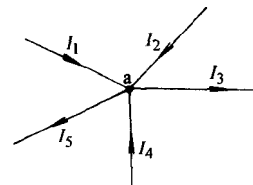


图 1-21 节点

2. 基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫电压定律反映电路中任一回路各支路电压之间的关系，又称为回路电压定律，其具体内容为：

如果从回路中任意一点出发，以顺时针方向（或逆时针方向）沿回路绕行一周，在绕行过程中要经过许多元件，这些元件两端的电压有可能是电位升，也有可能是电位降，则在绕行方向上的电位升之和应该等于电位降之和，即

$$\sum U_{升} = \sum U_{降} \quad (1-12)$$

在绕行方向选定后，可以假设电位升为负，电位降为正，则上式又可变形为

$$\sum U_k = 0 \quad (k=0, 1, 2, \dots, n) \quad (1-13)$$

即在任一瞬间，沿任一回路绕行一周（顺时针或逆时针），回路中各段电压的代数和恒等于零。

这里需要说明的是，凡电动势的方向与所选回路绕行方向一致者则为电位升，否则为电位降；凡电阻中电流的参考方向与回路绕行方向一致者则为电位降，否则为电位升。图 1-22 是某电路的一部分，现在我们来列出其中的一个回路 ABCA 的电压方程。在如图所示的各支路电流的参考方向和回路的绕行方向下，则有

$$-E_1 + I_1 R_1 - I_2 R_2 + E_2 + I_3 R_3 = 0$$

或

$$E_1 + I_2 R_2 = I_1 R_1 + E_2 + I_3 R_3$$

基尔霍夫电压定律不仅应用于闭合回路，也可以推广应用于求回路中的开路电压。

3. 支路电流法

对于一些比较复杂的电路，如果要求解出各未知的支路电流，可以直接应用基尔霍夫定律、节点电流定律和回路电压定律，分别对电路中相应的节点和回路列出所需要的方程组，而后解出各未知的支路电流。这种方法通常称为支路电流法。它是基尔霍夫定律最重要、最直接的应用，具体求解步骤如下：

第一步，选取各支路电流的参考方向，若有 n 个节点，根据基尔霍夫电流定律列出 $(n-1)$ 个节点电流方程，因为只有 $(n-1)$ 个节点是独立的。

第二步，选定回路的绕行方向，若有 b 条支路，根据基尔霍夫定律列出 $(b-n+1)$ 个回路电压方程。为了计算方便，通常选网孔列回路方程。

第三步，求解所列方程组，求出各支路电流。

第四步，判断各支路电流的实际方向。

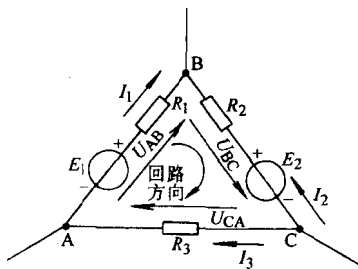


图 1-22 基尔霍夫电压定律示例

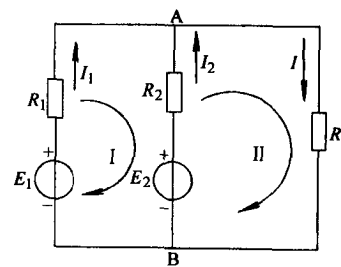


图 1-23 例 1-6 电路图

例 1-6 用支路电流法求解上节例 1-5 图 1-19a 中各支路的电流。

解 选定各支路电流的参考方向如图 1-23 所示。