

# 绪 论

## 一、电工技术和电子技术发展简史

在 19 世纪中后期，在物理电学实验研究的基础上开始了电能的工业应用阶段，而且发展颇为迅速。19 世纪末期已经形成了以研究电磁现象的工业应用为核心的电工科学技术，并分成电力与电信两大分支，分别从事电能的产生、传输、应用和电信号的产生、传输以及接收的研究工作。20 世纪的一百年间，在电工科学技术的基础上发展了电子技术、无线电技术、计算机技术、自动控制技术、精密遥控技术等，特别是军事工业的发展和战争的需要加速了电子科学技术及相关新兴学科的产生与发展，反过来先进的军事科技应用到民用工业及人民生活、文化教育及医疗卫生事业中，又使整个社会经济生活面貌大为改观，所以电能的应用、电信技术的发展是现代社会的核心技术支柱。

人们很早就认识电和磁，中国古代应用天然磁石指示方向做成早期的定向仪——司南，之后为了航海事业的需要，又在 11 世纪发明了指南针。对电的认识首先是对雷电现象及摩擦产生的电现象进行研究。1747 年富兰克林通过实验证明了闪电和摩擦产生的电荷是相同的。1785—1789 年法国库仑设计了静电扭秤实验装置，确定了静电作用力与二电荷电量的乘积成正比，与电荷距离平方成反比的库仑定律，后来他又将此定律应用到磁极间作用力的研究。以后由拉普拉斯、泊松、高斯等将万有引力的研究成果应用到静电场的研究，从而得到了有关静电场空间分布的泊松方程、高斯定理，这样就把教学与实验物理的研究结合起来。1826 年德国科学家欧姆通过实验得出了欧姆定律，1840 年焦耳发现了电阻发热的焦耳定律，开始了对电路的研究工作。

1820 年丹麦科学家奥斯特发现雷闪电流会引起磁针抖动，进一步观察到载流导线会引起附近的磁针发生偏转。之后法国安培又作了进一步研究，确定载流线圈磁场方向的右螺旋法则即载流导体中电流相互作用力和方向的法则，以后又提出了磁通连续性原理和安培环路定律。1831 年英国科学家法拉第提出了电磁感应定律，1834 年俄国的楞次提出了确定感应电流方向的楞次定律，这样就通过电生磁和磁生电把磁现象和电现象紧密结合起来，并在以后由麦克斯韦进一步发展成为统一的电磁场理论及电磁场波动理论，在此基础上，1887 年赫兹通过实验证实了电磁波的存在，从而发展了新学科无线电技术。

法拉第根据电磁感应定律在 1831 年制成了圆盘发电机，这说明可以用水轮

机或蒸汽机带动发电机得到电能，以代替昂贵的伏打电池。之后又有多位科学家及工程师对发电机的结构及励磁方式加以改进，到 1870 年已能制造功率高达 100 kW 的直流发电机可供实用。另外，1834 年俄国科学家雅可比制成了第一台电动机，并用以驱动一条小船在涅瓦河上航行，初步显示了电动机的实用性。由于人们是从电池中得到直流电，因此早期的发电机、电动机都是直流的，但是后来的研究发现，长距离输送直流电的电能损耗及电压降太大，而高压直流电的产生和使用具有一定的困难，这就使交流电的研究得以迅速开展。1885 年意大利的费拉里斯提出了交流电机的旋转磁场理论，1886 年美国的特斯拉制成三相异步电动机，1889 年俄国的多利沃 - 多布罗沃利斯基发明了三相笼型异步电动机，应用在由他于 1888 年开创的三相交流输电系统中，加上由他发明的三相变压器，这就奠定了现代三相供电系统的基础，到 1900 年左右交流输电几乎全部采用三相制。

在电信方面，1835—1838 年陆续完成了各种商用电报机的制造。1838 年美国的莫尔斯发明了以点画组成的电码代表数字和字母的信息。于是欧美各国在 1840 年以后纷纷敷设电报线路提供商用电报，1866 年从英国到美国的大西洋海底电缆敷设成功，1869 年已实现了包括穿越太平洋、印度洋的全球范围的海底电缆网的敷设。1876 年美国的贝尔试验电话成功，1877 年爱迪生发明了商用电话机，1878 年美国大力推广使用电话，通信事业得到长足的发展。同时由于电信线路的敷设推动了电路理论的发展，1845 年德国科学家基尔霍夫提出了汇集一个结点上的各个电流的代数和为零及沿一个回路电动势的代数和等于电压降的代数和，称为基尔霍夫电流定律及电压定律。1839 年美籍电气工程师施泰因梅茨提出了正弦交流电路的相量分析法，简化了交流电路的分析计算。

由于电机制造及输电技术的发展，在 19 世纪末，欧美各国相继出现了商用发电厂，向附近一定范围内的用户提供电力。1882 年 7 月，在上海建立了我国第一座商用发电厂，发电机功率为 12 kW，当时距世界上最早的商用电厂（1882 年 1 月建于伦敦）的建立时间仅 6 个月。

起初的电能应用仅限于电气照明及电动机，美国发明家爱迪生曾发明了碳丝灯泡、电弧灯、留声机等许多电器，并创立了美国通用电气公司生产各种电气设备。1883 年爱迪生在研究白炽灯灯丝时发现了炽热的灯丝与带正电的阳极之间存在电流，并称为爱迪生效应，1887 年汤姆逊确定爱迪生效应的本质为热电子发射。1904 年弗莱明就发明了真空二极管作为无线电接收的检波器，1906 年德福雷斯特又发明了真空三极管，使电信号放大成为可能，以后又相继出现了四极管、五极管、七极管、功放束射管等，使无线电技术得到了迅猛发展，无线电通信、无线电广播很快地应用到军事、航空及生活中。在很长一段时间里无线电设备都是由真空管构成的。

1948年贝尔实验室巴丁等人研制出第一个晶体三极管，1957年贝尔实验室发明了面结合晶体管，以后由于材料及工艺方面的进展又制成了场效应晶体管。1958年美国得州仪器公司制成集成振荡器，首次把晶体管和电阻、电容集成在一块硅片上，构成基本完整的单片功能电路。1961年美国仙童公司制成了集成触发器。随着集成电路制造工艺及材料的发展，以后相继出现了小规模、中规模、大规模、超大规模集成电路，应用于计算机、无线电通信和其他通用及专用的电子设备，目前医疗设备、工业及交通设备、家用电器、现代化农业设备中已广泛地采用电子装置。由于微电子技术的发展，使集成电路的规模大、功能强、体积小、耗电省，其对国民经济增长的拉动效应日益显现。近年来我国已经引进了许多条集成电路生产线，其中部分生产线的水平已经达到国际水准。

电子器件发展的另一个方向是大功率半导体器件的研究、制造，已经过了普通晶闸管、可关断晶闸管（GTO）、大功率晶体管（GTR）、功率场效应晶体管（V-MOS）、绝缘层双极型功率管IGBT等各个阶段，从而产生了新兴学科电力电子技术。利用电力电子器件能够很方便地实现交直流电能之间的互换以及各种电压、频率的交流电能的互换。

近一百年来电工技术、电子技术的发展及电能的普遍使用已经使人类的日常生活及社会发展发生了翻天覆地的变化，我国建国以来特别是从1978年以来电力工业的发展更是令人瞩目，到1996年下半年已经基本上扭转我国长期缺电的局面，电力供需基本平衡，初步解决了我国工业发展的瓶颈问题。到2000年我国发电厂的装机容量已经超过了3亿千瓦，达到世界第二位，全国电网覆盖率已经超过97%，许多边远地区的农户也能用上电。2003年8月，已经蓄水的三峡水力发电站正式向华中、华东以及广东省电网供电，该电站近期装机容量为1820万千瓦，远期装机容量将达4000万千瓦。我国已经拥有水电、火电、核电、风力、地热、太阳能、潮汐等多种发电手段，到2010年预计装机容量将达5亿千瓦，计划到2020年装机容量为8亿千瓦以上，将大大地促进国民经济及国防事业的发展。

## 二、为什么要学习《电工学概论》

如前所述，电工技术、电子技术的发展及大规模的使用电能已经成为我们所处时代的特征，电的应用无处不在。电气应用知识教育不仅是工科专业所必须的，而且是目前所有高等教育以及职业教育所必须的，当然对于不同专业所开设的有关电气的课程，其目的要求、内容与深度会有不同。

经管、文科类学生学习电工学的目的，首先是一种工程素质教育，即作为当代的大学生必须对当前的用电知识有一个基础的了解，虽然这些专业所学的知识并不需要电气知识作为基础或者以电工课程作为先修课程，但是学生们需要

对电能的生产以及应用方法、电能传输的一些规律、常见电气设备及安全用电规则等有一个概貌的认识，否则将会成为高学历的“电盲”，这是与我们所处的时代很不相称的。其次，这些专业学生很可能在以后的工作与生活中接触到电气设备，除了计算机以外会出现一些新颖的电气装置作为经管、文科专业发展的技术手段，会由一些经管、文科的专业人员及高层管理人员根据其所具有的电气知识提出一些改革思路而由电气工程师来实现。进一步而言，也可以由文科的专业人员参与并共同完成这种技术改造。这样就需要再深入学习一些电工专业知识，或阅读一些专业杂志及工具书，这就需要一定的入门基础知识。

综上所述，有必要开设一门比较全面地介绍电工技术、电子技术基础知识，同时又适当介绍应用知识的概论课程。该课程具有一定的综述性及应用性，但并不专业和深入，能够适应学生的原有基础，通过规定学时的学习达到上述的目的。

### 三、《电工学概论》的主要内容

教材内容分成“电工技术”、“电子技术”、“综合应用”三大部分，各部分相对独立，没有十分紧密的联系。其中前两部分为核心内容，与传统的电工技术、电子技术两门课程相对应，综合应用部分为扩展内容，是以扩大学生的知识面和增加其应用知识为目的编写的。

#### 1. 电工技术——电能的生产、传输及应用

电工技术部分的内容包括第一章到第五章，每章叙述一个方面的问题，包括电能的生产、电路理论、电能的传输、电能与机械能的转换与控制及安全用电五个方面。在电路一章中集中介绍电源与负载的关系，侧重于电能传输回路及实用负载分析，去除了传统的复杂电路分析等内容，形成以单相串、并联及三相交流电路为主，直流电路为辅的系统。把过渡过程的有关概念放入到有关储能元件的电路中介绍，简化推导，力求通过物理概念及类比方式进行叙述，把结论引出。

在电能的生产及电能的传输和分配两章中分别介绍了发电和输电的基本技术知识，而且也概要地介绍了我国电力工业的发展及能源政策，这两章中叙述较多，有相当内容可由学生自学。

在常用电动机一章中集中介绍三相交流异步电动机、单相交流异步电动机及直流电动机等三种常用电动机的工作原理及应用。PLC（可编程控制器）作为一种已经普遍采用的现代工业控制手段，放入三相交流异步电动机一节中略作介绍，让学生对其使用及优点初步了解。

安全用电独立一章的目的是强调安全用电的重要性，并介绍主要的安全用电知识。

## 2. 电子技术——电子器件、电子电路

电子技术部分的内容包括第六章到第八章，由于近年来电子技术飞速发展很大程度上是得益于电子器件的发展，电子电路只能在电子器件的基础上开发出各种功能，所以把电子器件独立一章，并选择常用的器件作原理性的介绍，如晶体管、集成电路、光电子器件、显示器件等使学生对这些器件的功能及特性达到一般了解即可。

电子电路一章包括模拟电子电路和数字电子电路两大部分，其中对传统的电子技术中的电子电路部分作了概要的介绍，内容比较系统，也比较充实，包括晶体管放大电路、集成运算放大器应用电路、组合逻辑电路、时序逻辑电路、转换电路（555 电路及 A/D、D/A 转换等）其内容不要求学生深入掌握，但要对主要内容有清晰的概念，理解一些器件的组成及功能。

电力电子技术是一个新兴的电子应用技术，主要研究应用电子器件进行电能转换的方法，本章重点介绍常用的电力电子器件及整流（交流变直流）、逆变（直流变交流）的原理及电路功能，并对生产与生活中常见的电力电子装置作一般介绍。学生通过本章学习后将会对整个电力电子技术领域有一个全面的了解。

在整个电子技术部分不引导亦不要求学生进行电子电路分析、计算元件参数及选择元件等工作，只要求大概知道电子器件的作用，电子电路能够对电信号起哪些处理作用，采用哪些元器件来实现此种处理，这样就精简和压缩了传统内容而增加了如电力电子技术等的新内容。

## 3. 综合应用——电子信息系统的原理和应用

综合应用部分主要目的是扩大学生的知识面，增加其应用知识。传感器是现代测控系统中必不可少的元件，目前任何电气装置中都少不了它。但传感器形式繁多，原理各异，教材中只能选取常用的典型实例予以一般介绍，要求学生对主要的几种类型能够清楚其原理和应用。

广播、电视、声像系统是生活中最典型的电子信息系统，介绍这部分内容能够使理解系统的组成原理及应用功能。我们日常见到的一些设备、家电都是系统的一个组成部分，其功能及电路设计必须符合系统的组成要求，才能发挥其正常的工作性能。

信息通信系统一章的编写目的也是使学生对目前各种各样的现代通信方式有一般性的了解，能够知道通信系统的组成及工作原理，有了关于通信方面的基础知识后能够应对通信事业的新发展，并在自己工作中充分利用其新成果。

办公设备及智能卡系统是一项新的发展前途无限的电子信息系统，特别是经济管理及文科类专业会经常接触、利用该系统并促进其进一步发展。该系统本身是一项电子技术装备，但是其服务对象是各类专业人员，特别是经管类专业

人员，所以发展该系统，实现管理工作、经济工作、资料工作的自动化和智能化，对促进国民经济的发展是极其重要的。

#### 四、学习方法及学习安排

本教材所适用的讲课学时为 45 ~ 54 学时，相应的课外自学学时数为 80 学时左右（包括完成复习思考题的时间）。学生除了通过课堂教学及课后复习教材获得知识外，还应参加一定数量的实验或参观演示，以得到感性认识及形象体验。有条件的学生可以参阅一定数量的参考书，选择所感兴趣的内容重点深入，或者完成一些电子小制作以练习自己的动手能力。

电工及电子技术实际上是一门颇为有趣的实用技术，即使对经管及文科类学生而言如能把理论学习与实际动手很好地结合，并有始有终地完成学习过程，同样也能获得颇为丰富的收益。

各章的讲课学时的安排建议如表 0.1。

表 0.1 课时安排

	绪论	0.5 学时
第一章	电能的产生	2 学时
第二章	电路	9 学时
第三章	电能的传输和分配	2.5 学时
第四章	常用电动机	7 学时
第五章	安全用电	1 学时
第六章	电子器件	4 学时
第七章	电子电路	10 学时
第八章	电力电子技术	4 学时
核心内容 合计		40 学时
第九章	传感器及其应用	3 学时
第十章	广播、电视、声像系统	3 学时
第十一章	信息通信系统	4 学时
第十二章	办公设备及智能卡系统	4 学时
扩展内容 合计		14 学时
总计		54 学时

考虑到一般院校的实际教学时数不尽相同，建议不能少于 45 学时，否则核心内容的教学无法保证。讲课时建议教师根据教材内容有重点的讲解，在特殊情况下也可以把教材内容编成若干个专题开设讲座。教材中打 \* 号及扩展的内容为自选教学内容，教学安排比较灵活，教师可以根据学时及教学条件决定取舍。

# 第一章 电能的产生

电能是带电粒子在电场中所具有的能量，带正电的粒子受到电场力的作用沿电场方向移动时就会放出电能并转换为粒子的动能，反之，带正电的粒子在外力作用下逆电场方向移动时，则外力反抗电场力对粒子所作的功转换为粒子的电能。所以电能和其他形式的能量是可以相互转换的，而带电粒子的运动则是电能转换所必须的。

一群带电粒子在导体中作定向移动时就形成电流，通常以正电荷移动方向作为电流的实际方向，其大小用单位时间（秒）内通过导体横截面的电荷来表示，称为电流。其表达式为

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (1.0.1)$$

式中  $i$  为电流 单位为 A [安[培]]，若  $i$  的方向和大小不随时间变化，则为直流电 用  $I$  表示。 $q$  为电荷 单位为 C [库[仑]]。 $t$  为时间 单位为 s [秒]。

在分析实际问题时，有时难以判定电流的实际方向，这时可以假设电流在导体中的流动方向并以此为依据进行分析，这个事先选定的假设方向就称为电流的参考方向。以此为参考，若分析结果电流为正值则实际方向与参考方向一致，若为负值则实际方向与参考方向相反。

一般情况下，任何导体中的正电荷与负电荷是中和的，不呈现带电性质。若在外因作用下使导体中的电荷分离，使导体一端为正电荷聚集，另一端为负电荷聚集，形成正极和负极，在导体内部就会形成从正极指向负极的电场，阻止电荷的分离。此时若外因继续分离电荷，就要反抗电场力继续对带电粒子做功，这样的导体就构成了电源，在两极所聚集的电荷就带有电能，这个电能会在电荷复合的过程中释放出来。

在电源中，外力对单位电荷所作的功也就是单位电荷所获得的能量称为电动势，其实际方向为使正电荷分离的方向，从电源的负极指向正极，其大小为

$$E = \frac{\Delta W_e}{\Delta q} \quad (1.0.2)$$

式中  $E$  为电动势 单位为 V [伏[特]]，若  $E$  的大小和方向随时间变化，则用  $e$  表示。 $\Delta W_e$  为电荷所获得的功或能量，单位为 J [焦[耳]]。

电动势只存在于作为电源的导体中。在电源中，若电流方向与电动势方向一致，表示外力超过电场力，外力作正功，电荷得到能量；若电流方向与电动势方

向相反，表示电源两极间的电场力超过外力，外力作负功，此时在电源中电能将转化为其他形式的能量。

电源的两极如果通过另外的导体连接起来，则正极的正电荷和负极的负电荷就在另外的导体中产生电场，并使导体中的带电粒子在导体内部定向移动，形成电流，此时电场力对单位电荷所作的功，也就是单位电荷在正向移动中所释放的电能称为电压，其实际方向为从电源正极指向负极，也就是使正电荷复合的方向 其大小为

$$U = \frac{\Delta W}{\Delta q} \quad (1.0.3)$$

式中  $U$  为电压 单位为 V [ 伏 [ 特 ] ) 若  $U$  的大小方向随时间变化，则用  $u$  表示。 $\Delta W$  为电荷在移动中的能量损失，单位为 J ( 焦 [ 耳 ] )。

以上所说的电压就是电源两端的电压，实际上外导体中电荷通过每段导体都会有电压降 单位电荷从 A 点移动到 B 点时所释放的电能就称为从导体的 A 点到 B 点的电压  $U_{AB}$  如图 1.0.1 所示。并有

$$U_{AB} = \frac{\Delta W_{AB}}{\Delta q} \quad (1.0.4)$$

若以 B 点为参考点，则电压降  $U_{AB}$  可以用  $U_A$  表示，称为 A 点的电位。按照图 1.0.1 中电流  $I$  的实际方向，可见  $U_{AB}$  为正值 即 A 点电位高于 B 点，反过来可以说是 B 点电位低于 A 点 或者电压  $U_{BA}$  为负值。也就是说

$$U_{BA} = -U_{AB}$$

在很多情况下往往事先难以确定导体中各点实际电位的高低，这时可以根据假设的电流方向来确定导体中各点之间的电压指向，称为电压的正极，即是从假想的高电位点（带正电）指向低电位点（带负电），也可以确定电源中电动势的指向，称为电动势的正极，这个正极不必用箭头表示，只要在图中用 +、- 号标出各段导体两端相对的电位高低就可以了。

电能是现代生活中必不可少的，它涉及日常生活及工农业生产的各个领域，为了能更好的应用电能我们需要了解有关电能产生、合理使用和节约用电的知识。在这一章内将介绍电能是如何产生的，并具体了解各种电源，即把其他形式的能量转换成电能的装置。按电源性质可分为直流电源和交流电源。

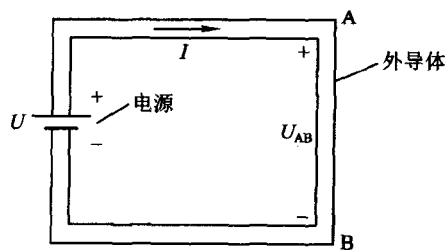


图 1.0.1 在外导体中的电压降

# 1.1 直流电源

## 1.1.1 直流电源的特征

直流发电机、各种电池都是直流电源，它们产生电能的原理各不相同，其功率可以从几瓦到几千瓦，但是他们共同的特点是电压和电流的大小和方向不随时间而变，所以称为直流电源。尽管直流电源形式多样，但从它们的外部特性而言是类似的，即接上用电负载以后，就能向负载提供电流，而且接上负载后的电源端电压要低于不接负载（即电源两端是悬空的）时的电源端电压。

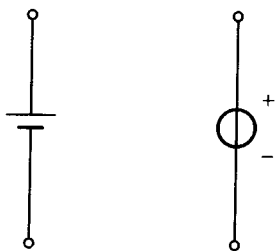
为了方便更直观地描述其特性，可以在电路中用一种由理想电路元件组成的电路模型表示实际的电源，电压源和电流源就是两种表征理想电源特性的理想电路元件。

### 1. 电压源

常用的一次性干电池、蓄电池等电源，端电压基本不变，其大小等于电动势 ( $U = E$ )，端电压  $U$  的方向从电源的正极（高电位）指向负极（低电位），电动势  $E$  的方向与其相反即从电源负极指向正极，其符号如图 1.1.1 所示。图 (a) 为常用的实际电源符号，图中长线段表示正极，短线段表示负极。图 (b) 为电压源的一般符号。图中  $+$ 、 $-$  号用以表示端电压的正负极（假设的电压方向， $+$  端为假设的高电位端， $-$  端为假设的低电位端），对于已知的直流电源常使参考方向与实际方向一致。

电压源输出端电压  $U$  与输出电流  $I$  之间的关系——外部特性如图 1.1.2 所示。由图可知电压源有两个基本性质：

- (1) 它的端电压是定值，而与输出电流无关。
- (2) 其输出电流的大小和方向，是由与它连接的外电路负载决定的。



(a) 实际电源符号 (b) 电压源的一般符号

图 1.1.1 电压源的电路符号

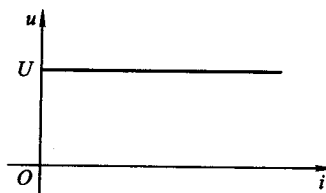


图 1.1.2 电压源的外部特性曲线

电压源只是一种理想化的电源，实际上是不存在的，实际电源总是有内阻的，所以其端电压将随负载电流的增大而降低，只是在内阻很小时才能近似的看成是一个电压源。在一般情况下，可以用一个电动势为  $E$  的电压源和内阻为  $R_0$  相串联的电压源模型来表示一个实际电源，其符号如图 1.1.3 所示 图 1.1.4 是实际电源的外特性曲线，图中  $U$  是实际电源输出的端电压。

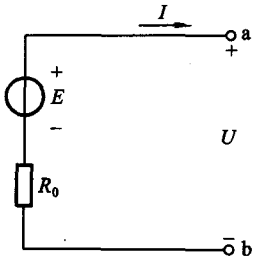


图 1.1.3 实际电源的电压源模型

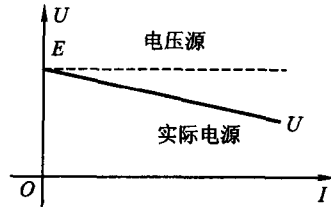


图 1.1.4 实际电源的外部特性曲线

由图 1.1.3 可得

$$U = E - IR_0 \quad (1.1.1)$$

从上式可知，电源的端电压低于电源的电动势，随输出电流  $I$  的增大即负载增大，端电压降低。实际电源的内阻越小，端电压降得越少，实际电源的外特性曲线越平，接近于电压源特性。

## 2. 电流源

电流源是另一种理想电路元件，它的两个基本性质是：

(1) 它发出的电流是定值  $I_s$  而与其输出的端电压无关 即使是端电压为零时，它发出的电流仍为定值  $I_s$ 。

(2) 其输出端电压的大小和方向是由与它连接的外电路负载所决定的。

电流源的符号如图 1.1.5 所示，图中箭头用以表示电流的正方向，对已知的直流电源一般参考方向与实际方向一致。电流源的外部特性如图 1.1.6 所示。

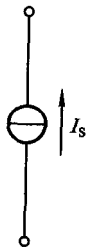


图 1.1.5 电流源的符号

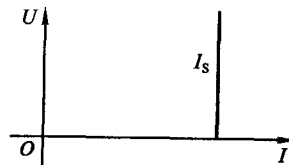


图 1.1.6 电流源的外部特性曲线

电流源实际上也是不存在的。实际电源可用电压源模型模拟，也可以用一个电流源  $I_s$  和电阻  $R_0$  相并联的电流源模型来模拟，如图 1.1.7 所示 电流源的电流等于实际电源的短路电流  $I_s$ ，并联电阻等于实际电源的内阻  $R_0$ ，它起着电源内部分流的作用。由图可得

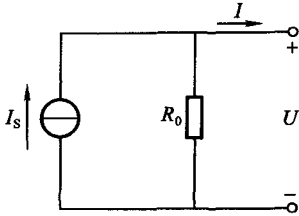


图 1.1.7 实际电源的电流源模型

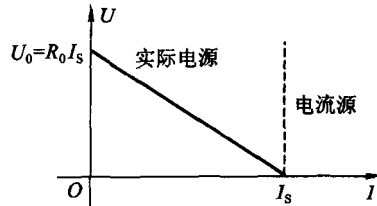


图 1.1.8 实际电源的外部特性

$$I = I_s - \frac{U}{R_0} \quad (1.1.2)$$

从上式可作出实际电源的外特性曲线如图 1.1.8 所示。当  $R_0 \rightarrow \infty$  (相当于并联支路  $R_0$  断开) 时 电流  $I$  恒等于电流  $I_s$  是一定值 而其两端电压  $U$  是任意的，所以实际电源的内阻越大，其特征越接近电流源，实际生活中光电池所产生的电流基本上不随负载电阻改变，近似为电流源特性。

### 3. 电压源模型与电流源模型之间的等效变换

一个实际电源既可以用电压源模型来表示，也可以用电流源模型来表示，那么这两种模型之间一定存在相互等效变换的关系。所谓等效是对外电路而言的，即两种电源模型分别连接相同的外电路，对外电路产生的效果完全一样，但这两种电源模型内部并不等效。

对于电压源模型，将式 (1.1.1) 改写为

$$I = \frac{E}{R_0} - \frac{U}{R_0} \quad (1.1.3)$$

比较式 (1.1.3) 和式 (1.1.2) 可知只要满足式 (1.1.4) 的换算条件，则两个关系式是完全相同的。所以，一个电压源模型完全可以由一个电流源模型来代替，如图 1.1.9 所示。

$$I_s = \frac{E}{R_0} \quad \text{或} \quad E = R_0 I_s \quad (1.1.4)$$

可见，一个电动势为  $E$  的电压源和某个电阻  $R_0$  串联的电路，都可用式 (1.1.4) 变换为一个电流为  $I_s$  的电流源和这个电阻  $R_0$  并联的电路，反过来，一个电流源  $I_s$  与电阻  $R_0$  并联的电路也可以变换为一个电压源  $E$  和电阻  $R_0$  串联的电路，两者是等效的。变换时电压源的电压极性和电流源的电流方向有一定

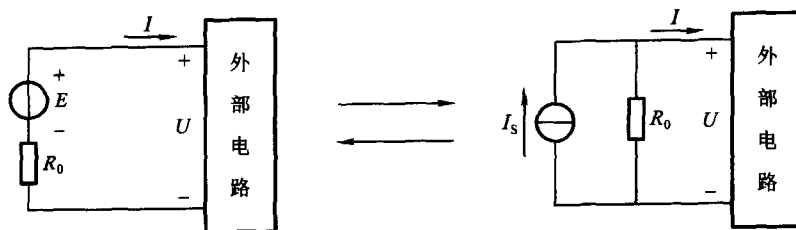


图 1.1.9 电压源模型与电流源模型的等效变换

的关联关系，如图 1.1.9 所示，而且两种模型中的电阻  $R_0$  是相同的，仅是连接（串联或并联）方式不同。

另外，理想电压源和电流源本身之间没有等效关系。因为电压源的内阻  $R_0 = 0$  而理想电流源的内阻  $R_0 \rightarrow \infty$ ，所以两者之间不存在等效变换的条件。

### 1.1.2 一次性电池

化学电源是把化学能直接转换成电能的装置。按可否充电分为一次电池（不可再充电）和二次电池（可再充电）两类。一次性电池又称于电池（电解质不流动），广泛应用于各种便携式电器。干电池主要有六个系列：普通锌锰（中性锌锰）、碱性锌锰、锌汞、锌空气、镁锰和锌银。其中锌汞电池因汞造成污染，锌银电池又消耗大量的白银，因而使其发展受到一定的限制。锌空气电池随技术的发展有一定的市场，镁锰电池主要用于军事项目，普通锌锰电池已发展为纸板式干电池，碱性锌锰电池已有很大的发展，比普通锌锰电池更适用于高负载，目前被普遍采用。

干电池主要由负极、正极和电解质三部分组成，如图 1.1.10 所示。

负极——向外电路释放电子，在电化学反应中自身或反应物被氧化，一般由锌片等构成。

正极——从外电路接受电子，在电化学反应中自身或反应物被还原，一般由碳棒、二氧化锰和石墨构成。

电解质——离子导体，离子在电池正、负极之间移动。典型电解质是液态的，某些电池采用在运行温度下呈离子导体的固体电解质。

和其他电源符号一样，图 1.1.11 是电池的等效电路。一般干电池的单体电动势  $E$  约为  $1.4 \sim 1.6 \text{ V}$  特殊干电池各不相同 内电阻  $R_0$  约为  $0.1 \sim 0.5 \Omega$  随着使用时间的增长逐渐增大。

干电池根据实际情况，可串联或并联使用。在使用时可根据不同的要求，如额定电压、工作温度、重量、体积和容量等选择适合型号的电池。另外，电池在长

时间不使用时，应将它退出电器设备，以免存放太久因内部放电使电解液渗漏腐蚀电器设备。而且，电池应保存在阴凉、干燥之处。用完后的电池应投入专门的回收箱内，不要随便丢弃，防止发生环境毒性污染。

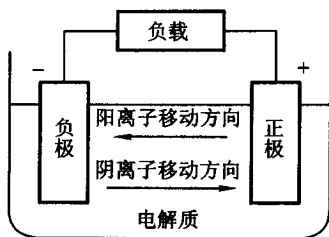


图 1.1.10 电池的组成

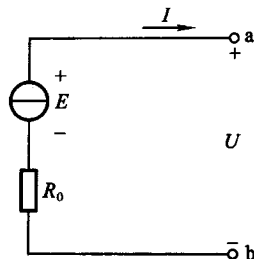


图 1.1.11 电池的等效电路

无论是民用还是军用微型电子装置中都迫切需要电动势高、重量轻、体积小、性能好的电源系统。20 世纪 50 年代发展起来的锂电池具有容量大、自放电少、温度特性好等优点，其电动势为 3 V 左右，在航空技术、监控装置、心脏起搏器、高级石英手表以及存储器等电子装置中被广泛使用。

### 1.1.3 可充电电池

可充电电池是一种可反复充电的还原性二次电池。充电时将电能转变成化学能并储存起来，使用时，再将化学能转换成电能并向负载释放。这种电能——化学能的转换是可逆的。

可充电电池最主要的是酸性的铅蓄电池和碱性的镍镉蓄电池两类，还有目前发展迅速的二次锂电池。

#### 1. 铅酸蓄电池

铅酸蓄电池已有一百多年的历史，其特点是电动势较高、结构简单、适用温度范围大、容量大、原料丰富、价格低廉。但也存在比较笨重、防震性差、自放电较强、有氢气放出、易爆等缺点。它主要用于车辆的起动电源和实验室中。

铅酸蓄电池的基本部件包括正极板、负极板、电解液、隔板、蓄电池槽等。正极板是由二氧化铅  $\text{PbO}_2$  构成的生极板，负极板是由海绵状的金属铅（活性物质）构成的熟极板，电解液为稀硫酸  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液，隔板是由玻璃丝等聚合物材料构成如图 1.1.12 所示。

充电后的蓄电池两极之间的电压约为 2.1 V。如果在两极间接上负载如白炽灯，就有电流从正极经负载流到负极，再从电解液中流回，如图 1.1.12(a)。当两极板间的电压  $U$  降低到 1.8 V 时，电解液中硫酸  $\text{H}_2\text{SO}_4$  成分逐渐减少，两极板均变成硫酸铅  $\text{PbSO}_4$ ，蓄电池放电结束如图 1.1.12(b) 所示。蓄电池充

电时，将两极接在电源的正负极上如图 1.1.12(c) 所示，组成充电电路。反方向的充电电流使电解液中硫酸 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 浓度逐渐增大， $\text{H}^+$  不断移向负极，在负极上生成海绵状的铅，并放出氢气， $\text{SO}_4^{2-}$  不断移向正极，使正极还原成  $\text{PbO}_2$  并有氧气放出，所以充电过程中必须加水以补充水的流失。当极间电压达到 2.5 ~ 2.7 V 时，充电结束。目前，已经生产出免维护的密封式铅蓄电池，能方便的使用于汽车及电动车上，运用中基本上对环境没有污染。

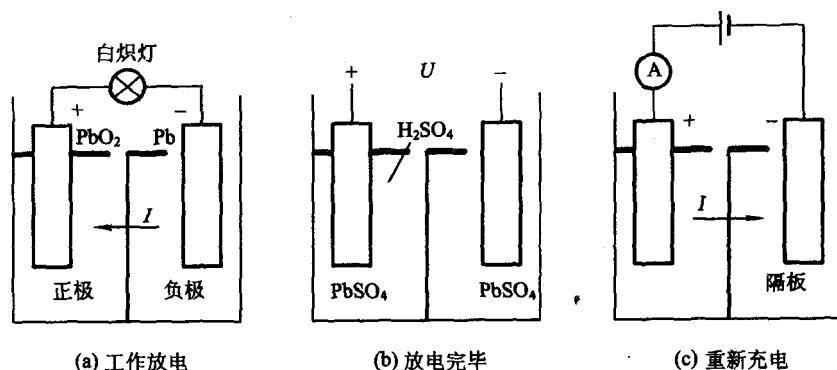


图 1.1.12 铅蓄电池工作原理及结构

## 2. 镍镉电池

镍镉电池的研究虽然比铅酸蓄电池晚，但它比铅酸蓄电池具有更优越的性能：容量高、内阻小、能大电流充放电、寿命长、自放电小、低温性能好、维护简单。尤其密封式电池可以以任何放置方式加以使用，无需维护。其缺点是价格较贵、有污染、单体电压低 (1.25 V)，而应用不及铅蓄电池广。不过它的重复使用可达上千次，这样使用成本往往比干电池还便宜。

镍镉电池的负极为氢氧化镉 [ $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ] 和氢氧化铈 [ $\text{Ce}(\text{OH})_3$ ]，正极为氢氧化镍 [ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ]，电解液溶液为氢氧化钾 (KOH) 壳体使用二次防爆装置封装，外壳为负极，盖板为正极，盖上有排气孔。为了适应特殊需要，它的形式和结构是多种多样的，按形式可大致分为开口式和密闭式两种，按其结构又可分为平面式、圆筒式和纽扣式等。

镍镉电池在正常的放电时间内，电压基本保持不变，但一旦超过正常放电时间，电压将骤然下降。使用中若过度放电或充电不当，将会影响其使用寿命。

镍镉电池在电气设备、通信器材、卫星火箭等方面得到广泛的应用，由于存在着严重的镉污染，使镍镉电池的应用和开发受到限制。目前开发的以新型储氢材料——钛镍或镧镍合金作为负极材料做成的镍氢电池，其容量是镍镉电池的 1.5 倍，而开路电压及售价基本相同，同时它充电时间比镍镉电池短，并能低温快速充电，所以应用日益广泛。

### \* 1.1.4 燃料电池

燃料电池是利用在电池内发生的所谓燃烧反应，将化学能直接转换为电能的装置。从理论上讲，其能量转换效率要比火力发电高很多，只要不断地供给它燃料，就像往炉膛里添加煤和油一样，就可连续不断的输出电能。实际上，由于部件老化和故障等原因，它也有一定的寿命。前面所介绍的一次或二次电池与环境只有能量交换而没有物质交换，是一个封闭的电化学体系，而燃料电池却是一个开放的电化学体系，与环境既有能量的交换，又有物质的交换。由于需要不断地提供燃料，带走反应生成的水和热量，因此需要一个复杂的辅助系统。

图 1.1.13 是氢氧燃料电池工作原理及结构示意图。其结构主要包括氢电极(负极)、氧电极(正极)和电解液。氢在负极扩散,与电解液发生化学反应,并放出电子,这些电子经过负载到达正极。在正极上氧原子接受电子后生成氧离子,与电解液中的水发生反应产生氢氧离子,再与失去电子的氢离子结合生成水,并放出热量。为提高反应速率,电极一般采用多孔材料,以增加气体与电解液的接触面积,并采用催化剂提高电池的工作效率。而其他燃料如天然气、煤气等,须经催化裂化或改质以得到氢,在燃料电池中氢电极亦称为燃料极。燃料电池的输出电压约为 1V。

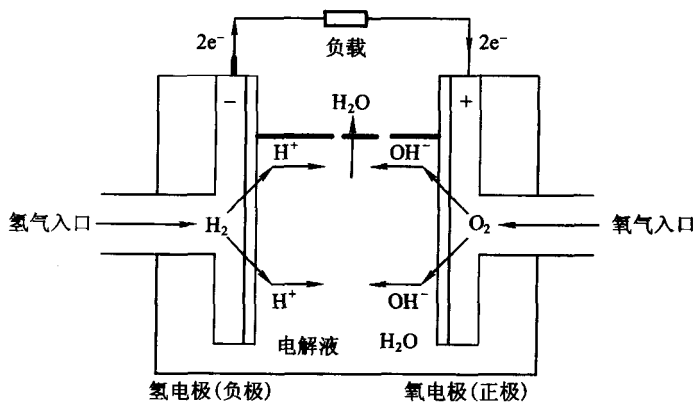


图 1.1.13 氢氧燃料电池原理示意图

根据使用电解质的不同和使用温度的高低，燃料电池可分为以下几种类型：低温碱性燃料电池 (<120 ℃)、磷酸燃料电池 (120 ℃ ~ 260 ℃)、熔融碳酸盐燃料电池 (260 ℃ ~ 750 ℃)、高温固体电解质燃料电池 (750 ℃ 以上)。

燃料电池的主要优点为：

(1) 能量转换效率高。燃料电池的最高效率可达 90%，且与规模无关。它还可半额定功率下运行。它可以设在用户附近，大大减少了电能传输费用及

损耗。在其发电的同时，还可产生热水及蒸汽。

(2) 可靠性高。由于燃料电池的转动部件很少，因而系统更加安全可靠，不会发生像燃气涡轮机或内燃机因转动部件失灵而发生的恶性事故。

(3) 良好的环境效益。环境污染大多来源于各种燃烧，普通火力发电厂排放的废物有颗粒物(粉尘)、硫氧化物( $\text{SO}_x$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、碳氢化合物(HC)以及废水、废渣等。燃料电池排放的气体仅为最严格的环境标准的十分之一，温室气体的排放量也远小于火力发电厂。它的电化学副产物是水，其量极少，且清洁得多，无需设置废气处理系统。另外，它在运转过程中噪声很小，对环境影响小。

目前，燃料电池由于技术不够普及，无完善的燃料供应系统，市场价格昂贵，高温时寿命及稳定性不理想，还未进入大规模的商业化应用。

### \* 1.1.5 太阳能电池

太阳能是一种可再生的、取之不尽的有效能源。每年太阳照射到地球上的总热量有  $1.5 \times 10^{18} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，相当于世界总需求能量的数万倍。利用太阳能不会改变地球的热能平衡，不会产生生态污染和温室效应。但它的能量密度很低，只有  $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ ，且昼夜及季节间的差别很大，所以在使用上需要解决设备工作效率低和成本高的问题。太阳能电池是利用半导体的光电效应，使光能直接转换成电能的装置。最常见的太阳能电池的结构示意图如图 1.1.14 所示。

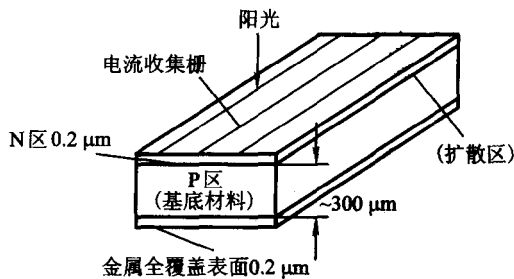


图 1.1.14 太阳能电池的结构示意图

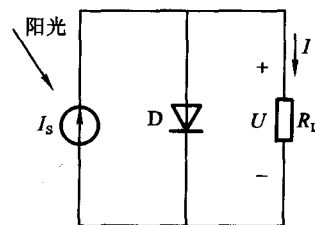


图 1.1.15 太阳能电池的等效电路

图中，当 N 型和 P 型半导体结合时，处于 N 区的电子扩散到 P 区，P 区的空穴又扩散到 N 区，结果 N 区带正电，P 区带负电，于是在它们的交界处就产生一个约  $0.2 \mu\text{m}$  厚的扩散区，称之为 PN 结。在 PN 结内具有一个内电场，由于空穴和电子的扩散力与内电场力平衡，此时没有电流流动。但是，当光照射到 PN 结时，吸收光子的能量产生的电子和空穴（又称载流子），扩散到太阳能电池的背面和正面。其背面完全被金属接触所覆盖，金属电极把电子（负电荷）移向负载。正面指状的金属细栅有助于从电池的正面收集电荷。导电的收集极表面覆