

冯建国 冯建兴 编著

分析仪器 电子技术

fenxi
yiqi
dianzi
jishu

原子能出版社

79.80
648

分析仪器电子技术

冯建国 编著
冯建兴



原子能出版社

8610804

内 容 简 介

本书作为化学与电子学的桥梁,力图给仪器分析工作者提供必要的基础电子技术知识。全书共八章,分三个部分。第一部分为分析仪器的基本结构、无源器件的一般特性、分析仪器常用器件、分析仪器的基本电路等;第二部分介绍电化学方法分析仪器、光学分析仪器和气相色谱分析仪器;第三部分为低噪声元件及仪器的抗干扰措施。

书中阐述了分析仪器电子技术的基本概念、基本原理和基本方法,以及分析仪器电子技术的特点。讨论了主要的三大类分析仪器常见实际使用电路的原理。

本书可供仪器分析工作者以及从事分析仪器制造的工人、技术人员自学和参考,也可作为有关高等院校、中专分析化学专业师生的教学参考书。

0578/21/16

分析仪器电子技术

冯建国 编著
冯建兴

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本785×1092¹/₁₆·印张16¹/₈·字数402千字

1986年7月北京第一版·1986年7月北京第一次印刷

印数1—5000·统一书号:15175·661

定价:3.30元

1010102

前 言

仪器分析方法已逐渐成为近代分析化学的重要手段。它的特点是灵敏度高、分辨能力强、分析速度快,并且易于自动化或半自动化;既能单个项目检测,又能多组分检测,甚至能连续监测。因此仪器分析方法广泛地应用于化学、化工、环保、石化、医疗卫生、资源勘探、金属冶炼等领域。分析仪器已成为工、农业生产,科研、教学等部门不可缺少的重要工具。

仪器分析工作者只有熟悉、掌握分析仪器的元、器件性能及电子技术的知识,才能充分发挥仪器的性能,有助于分析仪器的技术革新和设计新的仪器设备。

本书力图以最短的篇幅,使化学工作者获得分析仪器电子技术的基本知识。全书共分三部分。第一部分介绍分析仪器的常见结构及常用器件的知识,在第一、二、三、四章叙述;第二部分介绍实验室常用的三大类分析仪器的电子线路,在第五、六、七章叙述;第三部分说明对检测灵敏度的突破是受本征性的噪声制约,区别基本噪声机构和人为干扰将对设计、安装工作甚有裨益,在第八章中叙述。

本书是作者在多年教学和科研工作的实践基础上编写成的。电子学的知识浩瀚,仪器发展日新月异,而我们的学识浅薄,难以全面概括。书中错误和不妥之处,敬希读者指正。

本书在定稿过程中,承蒙天津大学周昌震同志和饶夫基同志审阅,并提出了许多宝贵意见,我们深表谢意。

作者

1983年7月1日

目 录

第一章 分析仪器的基本结构

§ 1-1	检测器.....	(1)
§ 1-2	信号的放大与变换.....	(2)
§ 1-3	显示设备.....	(5)

第二章 无源器件的一般特性

§ 2-1	电路的基本规律.....	(6)
§ 2-2	电阻衰减器及 RC 选频网络.....	(14)
§ 2-3	一阶积分电路和微分电路.....	(22)

第三章 分析仪器常用器件

§ 3-1	光源及光电器件.....	(30)
§ 3-2	集成运算放大器 (线性组件)	(52)
§ 3-3	其它适用于分析仪器的器件.....	(65)

第四章 分析仪器的基本电路

§ 4-1	反相放大器	(72)
§ 4-2	同相放大器	(78)
§ 4-3	差分放大器.....	(81)
§ 4-4	电压源和恒定电流源.....	(83)
§ 4-5	比较器.....	(85)
§ 4-6	积分电路.....	(86)
§ 4-7	微分电路.....	(88)
§ 4-8	对数及反对数电路	(91)
§ 4-9	函数发生器	(95)
§ 4-10	采样-保持电路.....	(99)
§ 4-11	电压-频率变换器和模-数变换电路.....	(100)

第五章 电化学方法分析仪器

§ 5-1	电导法分析仪器.....	(103)
§ 5-2	电位法分析仪器.....	(115)
§ 5-3	库仑分析法仪器.....	(125)
§ 5-4	极谱仪.....	(135)

第六章 光学分析仪器

§ 6-1	原子吸收分光光度计.....	(147)
§ 6-2	可见及紫外分光光度计.....	(168)
§ 6-3	荧光分光光度计.....	(176)

§ 3-4	红外(吸收)光谱仪.....	(180)
-------	----------------	---------

第七章 气相色谱法分析仪器

§ 7-1	几种检测器的电路.....	(194)
§ 7-2	温度的测量和控制.....	(206)
§ 7-3	积分仪电路.....	(212)
§ 7-4	记录仪.....	(217)

第八章 低噪声元件及仪器的抗干扰

§ 8-1	噪声机构.....	(221)
§ 8-2	有源器件的噪声.....	(227)
§ 8-3	无源器件的噪声.....	(234)
§ 8-4	低噪声电源.....	(239)
§ 8-5	低噪声输入级.....	(242)
§ 8-6	布线及接地.....	(247)

第一章 分析仪器的基本结构

分析仪器是测量物质的化学组成、结构以及某些物理特性的装置。它利用各种物质固有特性的差异，以区分自然界中千差万别的各种物质。物质固有特性的差异愈大以及仪器的分辨能力愈高，我们愈能鉴别物质的存在、组成、结构及特性。由于物质种类繁多、差异各别，因而应用的检测原理也就异常不同。

电子技术对信息反应迅速、灵敏而且精确度高。电子技术的迅速发展使电量和非电量的电测法在现代化学分析仪器中占有重要的地位。采用仪器分析，我们能精确、迅速地完成任务。分析仪器的品种繁多，但就测量框图来说，可分成三个主要部分，见图1-1的2、3、4框图。它们是：检测器——把浓度、温度、光强或其他物理量变换成电信号；信号放大与变换装置——根据信号的特点进行加工处理，排除不必要的干扰因素，使它易于测量；显示设备——把经过加工的信号再变换成易于记录和指示的物理量，例如用表头（机械偏转）、记录仪或示波器（二维图形）以及数码管（数字显示）等。

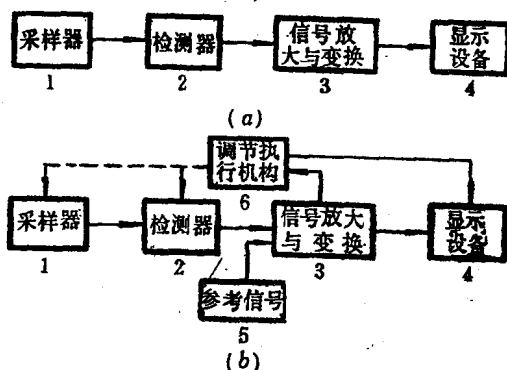


图1-1 (a) 直接测量式分析仪器框图

(b) 自控式分析仪器框图

在生产线上采用比较和反馈的办法，可以使测量环节与调节环节构成一个闭路的自控系统，用它来调节生产过程。对于分析仪器也经常采用这种方法，使单机具有自动控制功能，例如自动电位滴定仪和自动滴定微库仑计等。图1-1 (b) 示出了这种方案，框图5提供参考信号，检测器检测到的信号通过“信号放大与变换装置”并与参考信号进行比较，然后把信息反馈回检测器或采样器，使检测器输出信号返回规定值。框图6 调节执行机构同时推动显示设备，用以计量。

§ 1-1 检 测 器

在分析仪器中，检测器把化学、物理变化的信息转变为电量。这些电信号分为数字信号与模拟信号两类，我们仅介绍模拟型的检测器，其特性列于表1-1。

表1-1 几种检测器的特性

检 测 元 件	测量的物理量	输 出 信 号	阻 抗	前置放大器的输入阻抗
电导电极	溶液电导	电流	中	中
离子选择性电极	溶液中离子活度	电动势	高	高
极谱电极	溶液中去极剂浓度	电流	中	中
脉冲极谱	溶液中去极剂浓度	电流	中	低
光电池	光强	电压	低	中
光电管	光强	电流	高	中
光电倍增管	光强	电流	高	中
色谱热导池	物质浓度	电压	低	中
色谱氢火焰	物质浓度	电流	高	中
热敏电阻	温度	电阻	低	中
热电偶	温度	电压	低	中

有些检测器本身就是一个换能器。例如：光电池将光能转变为电能，原电池则是一个化学电源，它将化学能转变为电能。这类检测器既可以输出电压（电位法），也可以输出电流（如原电池库仑法）。另一些检测器采用线性或非线性器件，这是在外加电压的作用下测量它的电流响应，电导电极（线性）和极谱电极（非线性）就是典型的例子。其实象色谱氢火焰和光电管也是一个非线性器件，这类检测器一般输出电流，但是串接一个负载电阻后，就转换为输出电压。有的把检测器作为一个动态电阻接入惠斯登电桥的一个桥臂或两个桥臂（如电导电极和热导池检测器），然后测定电桥的电压输出或平衡电阻。

§ 1-2 信号的放大与变换

检测器的输出信号，功率往往很小，在某些简单仪器中，可以用高灵敏的显示仪表（如检流计）进行显示。但更普遍的是将输出信号通过放大器放大，以便进一步再加工处理或直接用廉价的动圈式仪表显示。为此，必须注意放大器的质量，使信号能够保持它原来的性质。所以放大器往往是仪器的关键部件。对于放大器要考虑的问题是：

第一，要考虑放大器与检测器的阻抗匹配。我们使用匹配这个字眼，是从配合这个广泛的意义上理解的。除了有时采用电工学中的共轭匹配获取最佳功率传输之外（即使检测器阻抗与放大器输入阻抗共轭，实部相等，虚部数值相等而反号），更多的是从获取电压、电流信号以及提高信号噪声比的角度来考虑。电压源适于采用高阻负载，电流源适于采用低阻负载。如果检测器输出参量是电压，原则上选用高输入阻抗的放大器。当放大器的输入阻抗大于检测器输出阻抗100倍时，电压传输损失约为1%。以配用玻璃电极的pH计为例，由于玻璃电极输出电阻很高（50M Ω —1000M Ω ），所以要求pH计的输入阻抗必须大于 $10^{11}\Omega$ （这里不仅有电压传输问题，还有极化问题）。若检测器输出参量是电流，原则上选用低输入阻抗的放大器，当放大器的输入阻抗低于检测器的输出阻抗100倍时，电流传输损失约为1%。对具有极高输出电阻的氢火焰检测器和光电管来说（输出电阻大于 $10^{15}\Omega$ ），即使达到1000M Ω 的输入电阻也算低阻；但是极谱电极的输出电阻只有50—5000 Ω ，这样就要求放大器具有更低的输入电阻，否则便要采取补偿装置。

在检测极微弱的信号时，还要从噪声影响的角度来考虑阻抗匹配，即所谓噪声匹配。我

们把一切影响仪器正常工作的各种不期望的电扰动统统称为噪声。如果噪声淹没了信号,测量就会失去了意义,因此我们既要考虑噪声电平,又要考虑信噪比。检测器的源电阻会影响放大器的噪声系数,但是最佳源电阻 $R_{0,1}$ 不是功率传输最大的电阻。 $R_{0,1}$ 和放大器的输入阻抗之间没有直接关系, $R_{0,1}$ 由放大器的噪声机构决定,但它能导致获取最大的信噪比。

检测器与输入级的阻抗匹配有上述三种考虑方式。至于级间耦合或采用衰减器变换量程,它们之间的匹配问题则采用负载阻抗与输出阻抗(两者多为纯阻)相等的方式加以解决,以期得到最大的信号能量传输。

第二,噪声电平和漂移电平。这是放大器需要考虑的另一个问题,它影响到检测器的灵敏度能否充分发挥。漂移是指输入信号为零时,输出电压(电流)偏离其初始值的现象,亦称零漂。在衡量放大器零点漂移大小时,用放大倍数除以输出漂移(电压、电流)折算到输入端,这个量称输入漂移(有时亦简称为漂移),这样就便于比较。

检测器的检测极限是这样定义的:当某个物理量(浓度、温度等)的变化引起检测器输出信号大于噪声(或漂移)电平一倍时,这个变化的物理量就是检测器的检测极限。当匹配放大器的噪声(或漂移)电平低于检测器的噪声(或漂移)电平一个数量级时,可以认为检测器的灵敏度已充分发挥。若两者为同一数量级,大致会使检测器的灵敏度下降一半。

对于响应较慢而测量时间较长的检测器(如离子选择性电极),可以用RC滤波器把噪声滤掉。这时候,漂移成为主要考虑的因素。对于交流信号源(象电导电极),使用交流放大器可以消除漂移的影响,这样便主要考虑噪声因素。至于处理象脉冲极谱的阶跃信号,则既要考虑噪声电平,也要考虑漂移电平。

漂移也要具体对待。例如配合氢火焰检测器的微弱电流放大器,电压漂移电平不重要而电流漂移电平很重要。因为放大器本身必然存在输入电流(正或负),输入电流的漂移(称电流漂移)低于输入电流本身一个数量级,所以放大器的输入电流不要大于被测电流,否则电流漂移会把信号淹没掉。当然,电压漂移也不能太大,因为它可以换算为电流的等效漂移,即等于 U_m/R_a 。例如电压漂移为 $100\mu\text{V}$ 的放大器,当检测器负载电阻选用 $100\text{M}\Omega$ 时,等效漂移电流为 10^{-12}A 。

噪声问题很重要,本书将在第八章中再全面地讨论它。

第三,放大器的响应速度。这是指输入激励信号时放大器的输出响应快慢。一般说来,模拟型检测器并不要求很高的响应速度,因为象离子选择性电极,它的平衡时间需要几十秒甚至几十分钟,因而采用频响较窄的放大器,以利于抑制噪声。某些检测器本身是高速响应的,例如光电倍增管为 10^{-8} 秒,但是原子吸收仪采用了低频调制光源,也就不必要求放大器具有毫微秒的响应速度。

第四,信号波形及频谱决定使用放大器的形式。综前所述,我们将会遇到如图1-2所示的各种信号波形。直流信号是化学反应中最常见的信号之一。其次是正弦波,除了仪器供电是50赫的正弦交流电之外,在测量过程中有时为了避免极化作用而采用交流,例如电导分析法。其余的几种非正弦波也是必不可少的。但是对于非正弦的周期信号,可以利用傅立叶级数分解成若干个正弦波。以图1-2(c)为例,方波信号可分解成

$$u = \frac{U_m}{2} + \frac{2U_m}{\pi} \left(\sin\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right)$$

第一项为直流分量, $\frac{2U_m}{\pi} \sin \omega t$ 为基波分量, $\frac{2U_m}{\pi} \frac{1}{3} \sin 3\omega t$ 为三次谐波分量, 依次类推。显然谐波的次数愈高, 其振幅愈小, 只要取若干项迭加就能够近似地获得要求的波形。如果将各次谐波的振幅按其频率次序排列起来, 就得到方波的频谱。

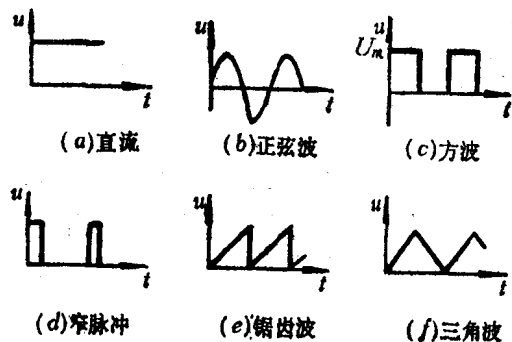


图1-2 各种信号波形

图1-3示出几种波形的频谱图。研究频谱可以改正设计方案。我们希望信号不失真地通过放大器, 同时又使噪声限制到可以接受的程度。对于谐波衰减得迅速的波形, 采用窄频带的放大器就能达到这个目的。由于噪声是一个连续频谱, 窄频带意味着把噪声的频谱限制在一定的数量级范围内, 因此, 它可以提高仪器的检测极限。波形愈平滑, 谐波分量愈少, 需用的频带愈窄。化学分析常常会碰到慢变化弱信号, 采用调制方式和交流放大, 可以解决棘手的零点漂移问题。至于信号变换采用什么方式能得到最佳效果, 还有待于我们对各方面的资料作全面的综合分析。

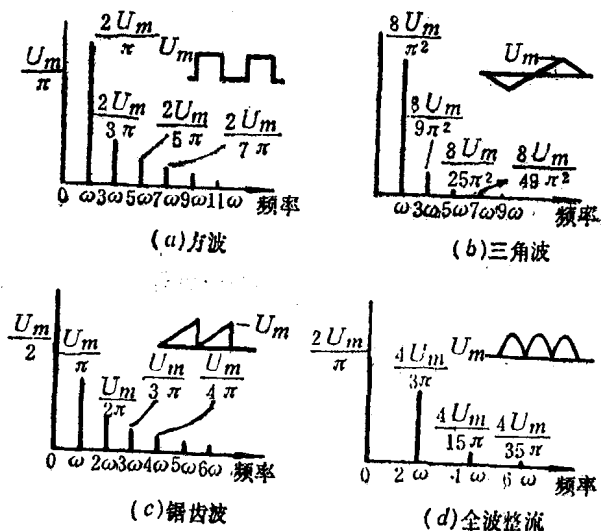


图1-3 频谱图

信号经过放大以后, 有时还要进一步进行复杂的加工处理, 才能得到需要的有用信号或适合于计量的输出形式。例如: 在脉冲极谱仪中分离电容电流, 库仑计或色谱仪中进行积分

运算, 电位滴定法中进行微分运算, 吸收光谱中实施对数变换等。此外, 还有为配合数字显示而进行的 A/D 变换, 等等。

为了进行自动控制, 就要将获得的信号电平和给定电平进行比较, 把差值信号放大并反馈到控制器, 控制被测的物理量达到我们所要求的数值 (如恒温器)。

§ 1-3 显 示 设 备

动圈式仪表是测量电流 (电压) 的最简单的仪表, 它把电能转换成机械能, 用指针沿刻度盘的机械偏转给出指示。由于指示机构的惯性, 所以只适用于显示缓慢变化的直流量。

动圈式仪表精度较差, 它只能读出两位数字而估计第三位。数字电压表不但直观, 而且显示精度较高 (一般为四至五位数字)。当然, 显示的位数要与整套设备的测量精度配合, 如果前级漂移很大, 则位数多也无用。数字式仪表的另一个优点是能够附加打印输出, 并能够与数字计算机连接。

如果希望把随时间连续变化的物理量记录下来, 可以采用记录仪, 它显示信号随时间变化的情况。记录仪适用于监测河流中电导率随时间的变化关系; 也适用于同时进行多组分的显示 (色谱仪中)。在极谱仪中基线发生连续变化, 就需要用记录仪进行显示。此外, 象石墨炉原子化原子吸收仪的输出信号短暂, 时间只有 1—2 秒, 动圈式仪表来不及反映, 或者人们来不及记下读数, 最好也采用记录仪。

有些函数过程为非线性 (参变量不是随时间线性变化), 在观察应变量与参变量的关系时, 可以使用 X-Y 函数记录仪。把参变量转换成电压信号加在 X 输入端, 应变量加在 Y 输入端。正弦波或三角波扫描的非线性伏安法, 就可以把扫描电压加在 X 输入端, 而响应电流转换成电压加在 Y 输入端, 这样就可以绘出伏安特性的曲线图。

示波器具有 X-Y 函数记录仪相似的功能, 响应速度却快得多, 如果没有照相设备, 它就不能给我们留下永久性的图形。示波极谱仪就是用示波器显示的。长余辉示波管适用于较慢的一次过程 (数秒), 它的余辉可以保留十几秒, 时间足以容许读取所需的数据。中、短余辉示波管则适用于多次重复的快过程。

当分析仪器引用了计算机技术时, 计算机内的模数变换器可以直接处理模拟量的原始数据, 甚至还可以通过计算机进行测量过程的控制。

第二章 无源器件的一般特性

电子学电路有两个要点：一是元件本身的电压-电流关系，称伏安特性；二是遵守克希荷夫定律（包括由它派生出来的电路规律）。电子学电路虽然千变万化，但离不开这两点基本约束。分析电子学电路就是以此作为依据。本章讨论基本的电路规律和分析仪器常用的电路网络。

§ 2-1 电路的基本规律

§ 2-1-1 伏安特性和欧姆定律

1826年德国物理学家欧姆从实验得出导体的电压-电流关系，即导体的伏安特性，称为欧姆定律

$$U = RI \quad (2-1)$$

式中 R 为导体的电阻，单位为欧（ Ω ）； I 为流过该电阻的电流，单位为安（A）； U 为该电阻两端的电压，单位为伏（V）。电阻的电流方向和电压降落的相关方向如图2-1所示，这对于任意电路网络中的任意支路都是正确的。电阻是一个结构常数，当材料与温度一定时，粗细均匀的导体电阻与它的长度 l 成正比，与它的横截面 S 成反比，即

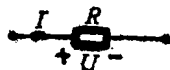


图2-1 电阻符号和伏安相关方向

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2-2)$$

式中比例常数 ρ 称为电阻率，它由材料决定，单位为欧·米（ $\Omega \cdot m$ ）。

欧姆定律是电路的最基本规律。分析仪器中广泛使用的电导法就是以欧姆定律为依据的。对于溶液导体，欧姆定律采用下列形式表示更方便：

$$I = GU \quad (2-3)$$

式中 $G = 1/R$ ，称为电导，单位为西门子（S）。同样地，电阻率 ρ 的倒数称为电导率 κ ，可得

$$\kappa = G \frac{S}{l} \quad (2-4)$$

电导池的截面 S 和极板距离 l 很难精确测定，往往用实验的方法求它们的比值 θ ， $\theta = S/l$ ，

称为池常数。显然, $\theta = \kappa/G$, 把已知电导率的溶液置于电导池中, 测出它的电导 就可以 求出池常数。

金属导体的电阻率受温度影响。实验证明它们有下列关系:

$$\rho_t = \rho_0 [1 + \alpha(t - t_0)] \quad (2-5)$$

式中 t 、 t_0 为温度, α 为金属导体的温度系数。公式表明金属电阻与溶液电导均 具有正的温度系数。在电导法中, 常用金属电阻作溶液电导的温度补偿。

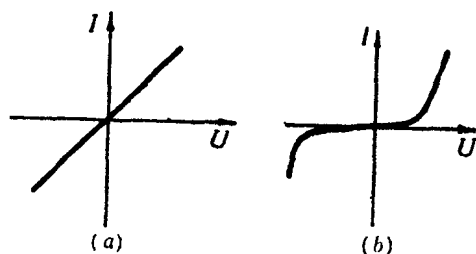


图2-2 (a) 线性电阻元件的伏安特性
(b) 非线性器件的伏安特性

将欧姆定律在伏-安的坐标图上画出来的曲线是一条直线, 如图2-2 (a) 所示。因此符合欧姆定律的电阻元件, 称为线性电阻, 亦称欧姆电阻。然而, 多数元、器件的伏安特性不呈线性关系, 如图2-2 (b) 所示, 称它们为非线性元、器件。因而, 必须注意欧姆定律的适用范围。有时, 非线性器件的工作范围仅取某段线性区, 限定在这个动态范围内, 仍然可以应用欧姆定律。

§ 2-1-2 电压源、电流源及其等效变换

电流通过电阻时电阻会发热, 就要不断地消耗能量。因此, 电路中必须有能源, 否则在电阻电路中不可能有电流和电压。我们熟悉的能源就是原电池, 在电路中可以用电压源或电流源两种模型来表达它。

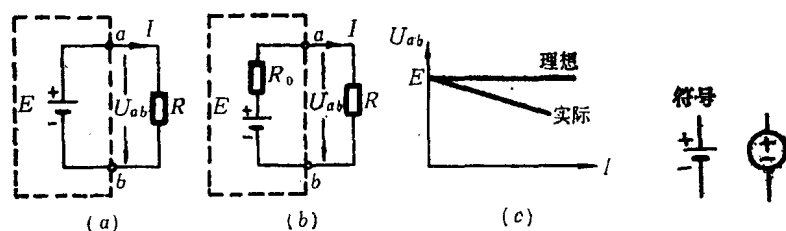


图2-3 电压源的伏安特性
(a) 理想电压源 (b) 实际电压源 (理想电压源与内阻串联) (c) 伏安特性

电流在电池内部流动时也会消耗能量, 表现在取用电流时端电压下降, 电流愈大, 端电压降得愈低。因此, 为了分析电路的方便, 定义一个理想电压源, 简称电压源或恒压电源。参阅图2-3, 理想电压源有两个基本性质: (1) 电压源的端电压 U_{ab} 是个恒定值, 并且与

流过的电流大小无关；（2）电压源给出的电流大小由外部电路决定。考虑到实际情况，我们再用一个内电阻 R_0 （亦称输出电阻），通过它表征电池内部的电能消耗。图2-3（a）表示理想电压源，端电压 $U_{ab} = E$ 。图2-3（b）表示实际电源，它是由理想电压源与内阻串联而成的，端电压为

$$U_{ab} = E - IR_0 \quad (2-6)$$

图2-3（c）为理想电压源与实际电压源的伏安特性。理想电压源的电流可为任意值而端电压 U_{ab} 不变；而实际电压源的端电压随着电流增加而降低，当外电阻 $R = 0$ 时形成短路，端电压 $U_{ab} = 0$ ，而短路电流 $I = E/R_0$ ，这是电源所能提供的最大电流。在实际运用中如果取用电流不大，端电压 U_{ab} 与 E （称电池电动势）相差不大，则常常把内阻 R_0 略去以简化运算。一般在图上标出的电压源符号都是代表理想电压源，符号两端的电压是恒定不变的。

实际电源的另一种表达方式，是采用理想电流源（简称电流源或恒流电源）和内阻 R'_0 的并联来模拟。

理想电流源也有两个基本性质：（1）电流源的电流 I_0 为恒定值，与端电压 U_{ab} 无关；（2）端电压 U_{ab} 由外电路决定。参阅图2-4（a），端电压 $U_{ab} = I_0 R$ ，外电阻 R 愈大，端电压愈大，因此电流源是不能开路的。图2-4（b）为实际电流源，其中比图（a）多了一个并联内阻 R'_0 ，电流源的恒定电流值 I_0 流到节点 A 处分成两路，一路通过内阻 R'_0 表征内部电能消耗（大小为 U_{ab}/R'_0 ），余下的流到外电阻 R 处。所以外电路的电流为

$$I = I_0 - \frac{U_{ab}}{R'_0} \quad (2-7)$$

图2-4（c）为电流源的伏安特性，理想电流源输出电流为恒定值（ $I = I_0$ ），而端电压可为任意值；实际电流源则比理想的多一个起分流作用的并联内阻 R'_0 。从图2-4（b）中可以看出， ab 两点的开路电压为 I_0 流过内阻 R'_0 所产生的电压，对照（2-7）式，当外电流 $I = 0$ 时， $U_{ab} = I_0 R'_0$ ，这是图2-4（c）实际特性曲线与横坐标的交点。而 ab 两点短接， $U_{ab} = 0$ ，流出外电路的短路电流 $I = I_0$ 。这是电源所能提供的最大电流。

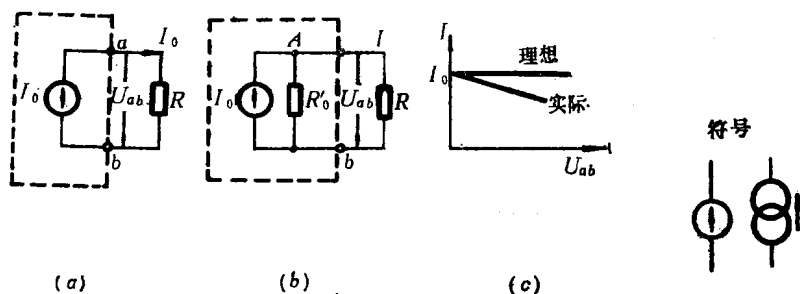


图2-4 电流源的伏安特性

(a) 理想电流源 $U_{ab} = I_0 R$ (b) 实际电流源 (c) 伏安特性

电压源和电流源是电源的两种表达方式，对于同一个电源，则图2-3(b)和图2-4(b)虚线框内的电路应该是效果相同的，即是等效的，可以互相进行等效变换。等效变换的条件是

$$\left. \begin{aligned} R'_0 &= R_0 \\ I_0 &= \frac{E}{R_0} \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

很明显，公式表明理想电源是不能变换的。在运算中，电压源为零， $E=0$ ，这意味着把电源短路保留内阻参与运算；如果是电流源为零， $I_0=0$ ，这表示把电流源移去（即接电流源的端头开路）保留电阻。这样表达电源为零的两种结果是相同的。

原电池作为能源时通常内阻都比较小，故多用电压源来表示。而内阻高的信号源则用电流源表达比较合适。虽然我们对此不太熟悉，但有时会遇到的，例如以氢火焰离子室电流作检测信号时，把信号源等效成电流源会更方便。因为它的内阻 R_0 非常大，以致可以看成是个理想电流源。在化学分析仪器中，电源除了能源的含意之外，还有信号源的含意。当检测器得到的电压信号与化学信息相关时，作为电压源，可提高测量电压的精度；当检测器得到的电流强度与化学信息相关时，作为电流源，可提高测量电流的精度。设计时要按相关性质来决定测量电路型式。

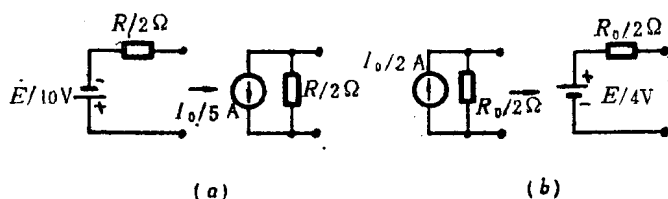


图2-5 电源等效变换图例

$$(a) \quad I_0 = \frac{10\text{ V}}{2\Omega} = 5\text{ A} \quad (b) \quad E = 2\text{ A} \times 2\Omega = 4\text{ V}$$

为了便于读者掌握电源的等效变换方法，我们列举了图2-5的图例供参考。图2-6示出几种电源的合并情况，特别要注意极性方向。

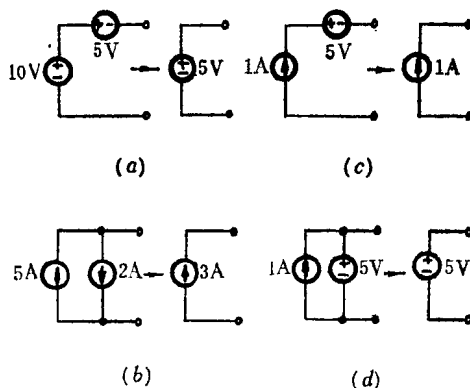


图2-6 电源的化简

§ 2-1-3 克希荷夫定律

克希荷夫定律包括电流定律 (KCL) 和电压定律 (KVL) 两条。

电荷不灭和电流连续性是克希荷夫电流定律的物理基础。电流定律指出：在任一瞬间，

流出节点的电流代数和为零。假定节点为高电位，规定流出节点的电流为正，流入节点的电流为负。电流定律的表达式为

$$\Sigma I = 0 \quad (2-9)$$

图2-7示出三种 $\Sigma I = 0$ 的情况。

在图2-7 (a) 的电路中，三条支路必需有三个独立方程才能解出它们的电压电流参数。研究发现，根据节点 a 和节点 b 列出的方程是相同的，进一步还发现， n 个节点只能列出 $(n-1)$ 个独立方程，因此单纯靠电流定律还不能解决全部问题，留下的部分要靠克希荷夫电压定律解决。

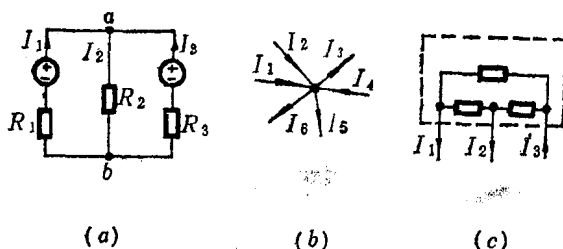


图2-7 克希荷夫电流定律的三种情况

(a) 在节点 a	(b) 流出任意节点	(c) 流出封闭曲面满足
$\Sigma I = 0$	$\Sigma I = 0$	$\Sigma I = 0$
即 $-I_1 + I_2 - I_3 = 0$	即 $-I_1 - I_2 + I_3 - I_4 + I_5 + I_6 = 0$	即 $I_1 + I_2 - I_3 = 0$

能量交换和能量不灭是克希荷夫电压定律的物理基础。电压定律指出：在任一瞬间，沿闭合回路的电压降的代数和为零。

$$\Sigma U = 0 \quad (2-10)$$

图2-8为在电路中任意选出的一个回路。显然 a 、 b 两点的电位都是单值的，则电压降 U_{ab} 只有一个数值。也就是说，单位正电荷由 a 点出发从上面通路绕到 b 点，或由下面通路绕到 b 点，所消耗的能量相同。因此

$$U_{ab\uparrow} = U_{ab\downarrow}$$

即

$$U_1 + U_2 = U_3 + U_4 \quad (2-11)$$

如果按图2-8规定的绕行方向，按(2-10)式列方程，符合规定方向的为正，反之为负，可得

$$U_1 + U_2 - U_4 - U_3 = 0 \quad (2-12)$$

结果和(2-11)式完全相同。

为了保证回路电压方程的独立性，可按网孔列回路电压方程。网孔是指中间没有支路的回路。

最后要指出,先在电路上标明电流方向(电压方向再由 $U=IR$ 定),然后列方程求解,当解答为负值时,这表示实际方向和标图的方向相反。

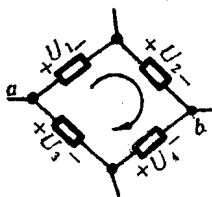


图2-8 电路中任一回路

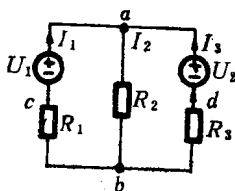


图2-9 例题图

例 在图2-9的电路中, $U_1=5\text{V}$, $U_2=10\text{V}$, $R_1=2\Omega$, $R_2=4\Omega$, $R_3=2\Omega$ 。求各支路的电流。

解: 标出 I_1 、 I_2 、 I_3 的方向。 a 、 b 两个节点可以列出一个独立方程,由节点 a , 根据 (2-9) 式得

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

再从 $abca$ 和 $adba$ 两个网孔,按顺时针方向绕行列出回路电压方程。

$$I_1 R_1 - U_1 + I_2 R_2 = 0$$

$$U_2 - I_3 R_3 - I_2 R_2 = 0$$

把数值代入经整理后得方程组

$$\begin{cases} -I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ 2I_1 + 4I_2 = 5 \\ 4I_2 + 2I_3 = 10 \end{cases}$$

由此式解得 $I_1 = -0.5\text{A}$, $I_2 = 1.5\text{A}$, $I_3 = 2\text{A}$ 。 I_1 的负号表示实际方向与图标方向相反。

§ 2-1-4 戴文宁定理和诺顿定理

复杂电路可以利用克希荷夫定律列出方程组来进行求解。而实际工作中往往只需要知道某一支路的电流或电压。以分析仪器的检测器电路为例,它通常是由敏感元件部分和参比部分构成的复杂电路,但我们只对反映检测信号的输出电流或电压感兴趣,即在整个复杂电路中只求输出端口的响应(电流或电压),而对其它支路的参数可以不讨论。假如求解克希荷夫联立方程,就作了许多不必要的工作。为此,我们介绍一个有力的工具——戴文宁定理。

戴文宁定理指出:任何一个线性有源一端口网络,就对其端口来说,总可以用一个电压源 U_0 和一个内阻 R_0 的串联来代替,电源电压 U_0 等于有源网络的端口开路电压,内阻 R_0 等于有源网络的电源全部为零时的等效电阻*。

* 含有受控电源的电路,则保留受控源来求等效电阻。