

最新仪器分析技术全书

「美」罗伯特 D·布朗 著



化学工业出版社

最新仪器分析技术全书

[美] 罗伯特 D. 布朗 著

北京大学化学系

清华大学分析中心 合译

南开大学测试中心

化学工业出版社

内 容 提 要

本书为美国西南路易斯安纳大学的罗伯特 D·布朗教授新近的力作。书中按物质的光、声、磁、电、重、核、热等多种物理性质归类,概括了现今人们所能接触到的十多个门类的几十种最新仪器分析技术的基本原理、历史渊源、发展过程、最新进展及相当可观的应用实例。同时也横向描述了各种方法之间的有机联系及相互比较。各章均附有相当数量的习题,书后给出答案和实用性很强的附录。本书内容新,方法全,实用性强,应用范围广,既可作为大专院校师生的教学参考书,也可作为有关专业研究人员及分析工作者的自修全书,适用于化学、化工、生物、医药、卫生、环保、轻工、农业、国防、法医等多种部门或行业的有关人员参阅。

Robert D. Braun

Introduction to Instrumental Analysis

McGraw-Hill Book Company 1987

最新仪器分析技术全书

西南联大 < 北京大学化学系 (中关村)
清华大学分析中心 合译 (清华园)
南开大学测试中心 (南开园)

责任编辑:李重凯

封面设计:任 辉

*

化学工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

开本787×1092 1/16印张41 字数1,045千字

1990年9月第1版 1990年9月北京第1次印刷

印 数 1—2,900

ISBN 7-5025-0656-X/TQ·390

定 价 24.00 元

译 序

化学分析手段几乎是伴随着化学这门古老而又年轻的学科的形成而产生的。它的出现对人们确定物质的成分、数量、结构以至空间取向等多方面的研究提供了强有力工具；它的应用推广为精确地剖析物质的形态、了解物性的内因、进而更充分地利用这些物质以至人工合成各种物质奠定了基础,也提供了保障。今天,化学分析已在一切与化学相关的领域中广泛、深入地应用着。

正如其他一切门类的科学一样,化学分析的形式和内容也在日新月异地变化着。尤其是仪器技术的出现,更大大地推进了分析化学的发展。在科技高度发达的现今人类社会,随着物质的物理性质、化学性质的进一步利用和开发,新的仪器分析方法或原有方法的新应用、新突破正在与日俱增。正如原作者所说,许多新技术在成文公诸于众之前就已成为过时的东西,就已被新的、更有效的方法所替代。因此人们需要一本综合、系统、全面地介绍各种分析技术的参考书,其中既包括了各种仪器分析技术的基本原理、方法渊源、发展过程及最新进展,也包括了足够数量的应用实例、问题剖析;既纵向描述每一技术的全貌,也横向比较各种技术之间的内在关系。同时,由于教学、科研人员出于各种原因,也常常需要广泛了解自己从事的分析方法之外的其他分析技术,并能较快地入门。这样,一本能作为自学教材的,全面而实用的工具书就成了人们的迫切需求。布朗教授(Prof. Robert D. Braun)的新著《最新仪器分析技术全书》(英文原名为 Introduction to Instrumental Analysis)就是这样的一本书。书中分别按物质的光、声、磁、电、重、核、热等多种物理性质,逐一介绍了各种最新的仪器分析方法,除列入了交直流电路及电子学线路的原理外,还在本书的前后分别根据现代科学技术的发展状况增加了电子计算机及机器人、自动分析等部分,其内容之全是迄今为止国内所没有的。教学、研究人员或分析技术人员案头置备一册,足可作为经常查阅的小型百科,同时它又是一本不可多得的教学参考书。阅读本书能令人耳目一新。简洁、明了、实用、内容新且全是它的几大特点。它既是一本入门读物、也有一定的理论深度,适用的读者面远较浅易读物或高深的理论研究书籍为广。章后的重要术语是查索其他文献的关键词,也是内容的纲要;练习题及答案有助于复习和巩固所讲知识;书后的附录也是分析工作者不可缺少的工具。因而我们郑重地将本书奉献给广大的分析专业的师生及广大的分析技术工作者、研究或应用操作人员。我们期待读者们发现它有用,也盼望它能成为读者今后相当一段时间内的忠实助手。当然还热忱欢迎读者在阅读使用的过程中对其中的失误遗漏之处提出宝贵的意见。

本书的主要译者为北京大学化学系、清华大学分析中心、南开大学测试中心的从事教学和科研工作的同志。按章节顺序他们是李重凯(前言,第五、十一章),智华澎(第一、二十二章),孙扬名(第二章),刘庆华(第三、四章),何华焜(第六章),陈见薇(第七章),乌钢(第八章),常文保、兰章华、王芳(第九章),常文保、何红兵(第十章),刘会洲、刁宁(第十二章),许振华(第十三、十四章),尹立华(第十五章),吕木坚(第十六章),王盈康(第十七章),马锦华、庞建民(第十八章),郭沁林(第十九章),陈志良(第二十章),林孝元(第二十一章),邹晓鸽(第二十三章),李超(第二十四、二十五章),卜欣(第二十六章),张泽民(第二十七

章),陈蓓荣(第二十八章)。对本书的各个部分分别进行过审校的有孙亦梁教授、慈云祥教授、吴瑾光教授、王盈康教授、桂琳琳教授、李以圭教授、李安模副教授、张经坤副教授和施明连同志。智华澎同志对全书的图表、附录做了整理工作。参加本书整理工作的还有刘冠华、杨海鹰、龙义成等同志。在此我们对参与本书工作的各位同志表示感谢。

本书适于大专院校师生作教学参考书,也可供化学、化工、生物、医药、卫生、环保、轻工、农业、国防、法医等多种部门或行业的科研工作者、分析技术人员阅读参考。

译 者

一九八八年十二月

一九九一年三月廿八日

大雨磅礴

前 言

为仪器分析课写教材是一件十分棘手的事，因为用于化学分析的仪器方法种类多得惊人。由于篇幅和时间有限，在一本书里介绍所有的仪器分析方法是不可可能的。这样，作者就不得不对一些部分进行舍弃，而这种选择难免让人感到有点武断。在仪器分析的一些领域里，其进展速度又是如此之快，以致对它的任何文字描述都将在成书之前变成过时的内容。

本书所涉及的范围，既包括化学分析中比较成熟的方法——它们已经为几乎每一位分析化学家所熟悉；也包括相对而言较新的方法——这些方法在作者看来是极有前途的，它们很快将在许多分析实验室里装备起来。前一类方法包括原子吸收分光光度法（第六章）、紫外-可见光谱（第九章）、电位分析法（第二十二章）和色谱分析法（第二十四到第二十六章）。属于后一类仪器方法的例子有激光增强离子化分析法（第八章）、光声光谱法（第十二章）及实验室机器人的使用（第二十八章）等。作者早先也曾有过列上蒸馏及萃取两章的打算，现在这些技术之所以没有写入本书是因为它们并非完全仪器化的，也由于通常的有机化学课程中都较全面地讲述过这些方法。目前，几乎所有的分析仪器都是电动的，关于电学和电子学的基本知识能使分析工作者更有效地使用这些仪器。本书的第二到第四章用来讲述电学、电子学及逻辑元件。

在描述特定仪器的构思时，作者不久就发现了这里面内在的困难，有时候觉得仪器厂商对仪器类型改变之快，就如同汽车工业改变汽车的型号一样。由于仪器类型在迅速地变化，以及需要一段相当长的时间用于写作本书（约四年半）和印刷出版（约1年），本书中大多数的仪器都采用了通用的术语来描述。作者认为在本书的有效使用时间内，有些特定的仪器还可能继续生产，书中也给出了这些仪器的设计图。为此，作者衷心地感谢仪器生产厂家的合作，他们为本书提供了许多仪器的示意图和照片。

写教材最重要的是使之准确和通俗易懂，审校者们的意见使本书的这两个特点更为突出。作者非常感谢所有审校者及朋友们，他们在阅读了部分或全部手稿后给予了有益的指点。基于他们的意见，修订稿有了显著的改进。作者的同事中有不少人为本书的编著作过贡献，他们是亚特兰大大学的里德博士（Dr. James L. Reed），杜克大学的龙博士（Dr. K. Rick Lung），北达科他大学的巴塔克博士（Dr. Duane Bartak），劳威尔大学的巴里博士（Dr. Eugene F. Barry）和西南路易斯安纳大学的加洛、沃尔特斯和基利博士（Drs. August A. Gallo, Frederick H. Walters, Dean F. Keeley），特在此一并致谢。作者还感谢学生们对原稿中一些部分的建设性意见，这些部分都曾用于课堂教学并被证实是行之有效的。

罗伯特 D. 布朗
(Robert D. Braun)

目 录

前言

第一章	化学仪器分析法导论.....	(1)
第二章	简单直流电路和交流电路.....	(6)
第三章	电子线路.....	(31)
第四章	运算放大器, 逻辑器件和计算机.....	(54)
第五章	光谱分析法导论.....	(92)
第六章	原子吸收分光光度法.....	(118)
第七章	火焰发射和原子发射光谱.....	(145)
第八章	原子荧光, 共振电离和激光增强电离光谱.....	(154)
第九章	多原子分子的紫外-可见光谱 ✓.....	(172)
第十章	化学发光和电致化学发光.....	(196)
第十一章	荧光和磷光.....	(207)
第十二章	红外光谱 ✓.....	(226)
第十三章	光声光谱.....	(274)
第十四章	辐射散射法.....	(283)
第十五章	折射分析法.....	(296)
第十六章	核磁共振谱 ✓.....	(308)
第十七章	电子自旋共振谱.....	(341)
第十八章	X-射线分析法.....	(354)
第十九章	电子能谱.....	(387)
第二十章	放射化学分析法.....	(405)
第二十一章	质谱法 ✓.....	(426)
第二十二章	电位分析法.....	(459)
第二十三章	非电位电分析法.....	(501)
第二十四章	色谱法导论.....	(541)
第二十五章	液相色谱法 ✓.....	(553)
第二十六章	气相色谱 ✓.....	(585)
第二十七章	热分析.....	(611)
第二十八章	自动化分析.....	(622)
附录		(640)
附录一	习题答案.....	(640)
附录二	与八进制、十进制、十六进制及二进制数值相对应的ASCII码表.....	(644)
附录三	缩略语表.....	(645)
附录四	常数表.....	(650)

第一章 化学仪器分析法导论

第一章旨在给出一些术语的定义，这些术语在学习分析化学时经常使用。同时还准备简要地对化学分析中仪器方法给出一个总的评价。作者希望本章的导论能展示出书中其余章节的全貌及分析仪器的应用领域。这一章中不打算详细叙述具体分析方法。有些分析家认为化学分析有别与化验。他们把化学分析定义为：对样品中某物质进行定性或定量的全过程。化学分析包括了采样、合理地对待样品作物理或化学的处理并进行实验室或非实验室的测试、按需要对数据作数学处理得到有意义的结果及作出结论报告；而化验仅指实验室或非实验室的测试。其他的分析家则对分析和化验不加区别。大多数分析家把“化验”定义为实验室或非实验室测试，而把“分析”定义为前述全过程，也有定义为仅指测试。本书采用后一种定义法。

化学分析主要考虑确定样品中化学物质的种类，或样品中某一特定物质的量。前一种分析称为定性化学分析，后一种是定量化学分析。

有时又把化学分析划分为经典分析和仪器分析。尽管今天这种划分可能已不象过去那么为人们所看重，许多分析家至今仍旧对二者加以区别。“经典”（或“非仪器”）分析所包含的分析方法仅需要用试剂、天平、校正过的玻璃器皿，及其他的实验室常见装置如漏斗、煤气灯或电热器、烧瓶和烧杯等。仪器分析则除需要经典分析所需用的器具之外，还需要分析仪器。这两类分析方法都可用于定性或定量分析。

不论用经典或仪器分析方法，许多定量分析都可划为重量分析和容量分析两类。重量分析依赖于对化学反应产物特征质量的测定，或对化学反应中质量变化的测定，以确定在样品中化学反应物的量。质量的测定利用准确的天平完成。经典的重量分析总是让待检验物质生成一种盐的沉淀，通过过滤收集沉淀，干燥并称重。仪器重量分析还常需要将盛有样品的天平盘置于烘箱中加热，与此同时观察质量的变化。加热过程中样品温度逐渐变化，仪器上读得的质量作为样品温度的函数可作出图表。这种技术就是所谓的热重量分析（见第二十七章）。

容量分析依赖于对化学反应物特征体积的测量，以确定该反应物在样品中的浓度。容量分析即滴定分析，它需将盛于滴定管中的一种化学反应物溶液滴加入第二种化学反应物溶液中。滴定管中的溶液称为滴定液，置于反应容器中的溶液称为被滴定液，它们中任何一者都可以是待测样品，测量出滴定液在滴定终点时已加入的体积并用于计算样品的浓度。经典的容量分析使用化学指示剂来确定本身无颜色变化的反应的滴定终点，仪器容量分析则借助实验室仪器进行终点的确定。

一、仪 器 分 析

所有的分析仪器基本上都是电动的。因此，对仪器中电气部分作用的了解有助于确定仪器故障的部位，也有助于分析家最大限度地使用仪器并从中得到更多的信息。此外，还有一些分析研究人员需要设计和开发可用于化学分析的新仪器。因此，第二到第四章对电子线路作了一个导论性介绍。

分析仪器即测量待检验物质的物理和化学性质的装置，它也可以测量其他一些参数以使确定物质的某个性。按照常规的划分方法，根据待检验物质在分析过程中被测量或用到的性质，仪器分析可以分成三大类（见图1-1）。光谱分析法利用或测量检测过程中的一些形式的辐射。电分析法是对样品施加一个电信号，然后监测样品的电性质。分离分析法则依赖于在测量某成分的性质前对样品组分的分离。在下述几个部分里将要提到一些比较重要的仪器技术。由于这些技术的种类繁多，在此只能作一个大略的介绍。

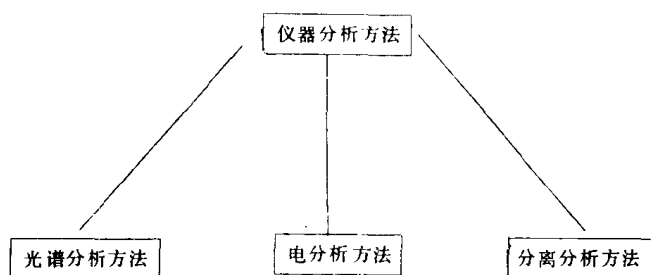


图 1-1 化学分析中仪器分析方法的三个主要的门类

二、光谱分析法

光谱分析法利用仪器测量被样品吸收、发射或散射的辐射的量。如果测量的是被吸收掉的辐射，则称此技术为吸光分析法或吸收分光光度法。除了天然的放射性物质，样品只有从外界吸收了能量才能产生辐射。如果吸收的能量来自X-射线、紫外或可见区域的电磁辐射，则因此而产生的，光随着其退激的形式不同，分别称之为荧光或磷光。第五章叙述了荧光和磷光的区别所在。原子和多原子物质对紫外-可见辐射的吸收，将分别在第六和第九章里讨论，原子产生的荧光在第八章里叙述，分子产生的荧光和磷光在第十一章里详述，X-射线的吸收及荧光则将出现在第十八章中。

样品发射之前所吸收的能量并不一定是电磁辐射的形式。如在分析过程中要测量的是化学发光和电致化学发光，则吸收的是来自化学反应的能量或电能（见第十章）。有时火焰的热能或放电的电都能引起发射（见第七章）。类似地，样品产生辐射和粒子所需要的能量可以来自样品与电子之间的碰撞（见第十九章）或样品与质子或离子的碰撞（见第十八章）。

在放射化学分析法的检测过程中，测量的是样品衰变后的放射性产物（见第二十章）。

如果由中子轰击样品后吸收能量并产生衰变，这种分析技术称为中子活化分析。放射分析法是用放射性试剂与待检测物质产生化学反应，然后直接测量反应产物的放射性并进而推算出待检验物的浓度。它还可用在放射性试剂的滴定反应上，通过测量整个滴定过程中被滴定剂的放射性而得到滴定的终点。

被样品粒子散射的辐射同样可用于分析。浊度法、比浊法及拉曼散射法就是这种依赖被散射辐射的分析技术（见第十四章）。在浊度法及比浊法中，被散射辐射的波长与入射辐射的波长完全相同，但在拉曼散射中二者却是不一样的。

电磁辐射在真空中的速度与同波长的电磁辐射在样品中的速度的比值即这个样品的折射

率。通常，当辐射进入样品后，测量辐射方向发生改变的程度就可确定折射率。由于折射率是物质特征性质，故折射法可用于分析（见第十五章）。

在使用光声光谱的分析中（见第十三章），红外、可见、紫外区域的被斩波的入射辐射可在一个密闭的空间里被样品所吸收。被吸收辐射中的一部分转化成热能，它加热了样品附近的气体。利用一个拾音器就可以监测到气体中的压力波。而入射辐射则被斩波器待测声波的特征频率斩波。

其余的光谱分析法按用于检测的辐射的能量进行分类。检测可以在紫外-可见区域（见第六到第十一章及第十三到第十五章）、红外区域（见第十二章）、无线电波区域（见第十六章）、微波区域（见第十七章）及热辐射区域（见第二十七章）进行。在任一个区域都可以进行吸光度的测量。荧光测量通常限于在X-射线及紫外-可见区域的激发，磷光测量则多在紫外-可见区域里激发之后用于分析多原子物质。浊度法及比浊法一般都属于可见光区域的。拉曼散射则用于紫外-可见区域。

顺磁共振光谱使用光谱在微波区域的电磁辐射。核磁共振光谱利用无线电波区域的电磁辐射。还可以采用几个用到了热辐射的方法。每一种电磁辐射的能量、波长及频率范围将在第五章中详述。分析用光谱方法及叙述每种方法的章节列于表1-1中。

表 1-1 化学分析中的主要光谱分析方法表及叙述每种方法的章次

方 法	章	方 法	章
原子吸收	6	散 射	14
原子荧光和电离	7	折 射	15
火焰及原子发射	8	核磁共振	16
多原子物质的紫外吸收	9	顺磁共振	17
化学发光和电致化学发光	10	X-射线法	18
荧光和磷光	11	电子能谱	19
红外吸收	12	放射化学法	20
光声光谱	13	热分析	27

三、电分析方法

在用于化学分析的仪器方法中，凡是需加一个电信号于浸入样品溶液的某一电极，或测量这个溶液的某一电性质的方法都称之为电分析方法。大多数的电分析技术都要加一个电信号，以便监测溶液的另外一些电参数。如图 1-2 所示，电分析方法按所作电测量的类型及施加的电信号的类型可分成几大类。

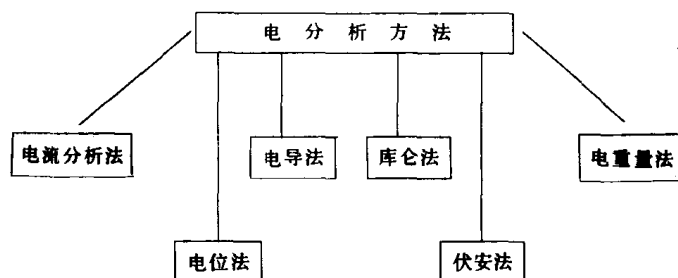


图 1-2 电分析方法的主要类型

在大多数电分析方法中,通常是把至少两个电极浸入溶液,以达到与样品的电接触。电流分析法(也称安培法)是控制两电极间的电位而测量电极上通过的电流的方法。若电极间的电流受到控制(通常是接近于零)而测量其电位的变化,则这种方法称为电位分析法。

在用库仑法和电重量法进行的电分析研究中,电位或电流都可加于溶液中的电极上。当测量的是电化学反应中消耗的电量 Q ,则该方法为库仑法。当测量的是在完全电解后反应产物(通常为某种金属)的质量,则该方法为电重量法。由于待检测金属镀上电极表面的同时也即发生了分离,因而电重量分析法也可以划入化学分析中分离分析法这一类。

电导分析法是测量样品溶液的电导 G 的电分析方法。电导定义为电阻的倒数。通常情况下测量电导的过程中要在电极上施加一个交变的电位。

伏安法需要施加一个电位于某个电极上并同时测量流过该电极的电流。在测量电流时,电位按某种预先确定的形式作变化。而各种伏安法正是在所施加电位的不同这一点上相互区别的。

极谱是由一系列的伏安分析所组成的方法。在这种方法中,施加电位的电极具有一个持续地更新着的表面。事实上,这也就意味着该电极是一种流动着的液体。用于极谱测量的最普通的电极是滴汞电极,另一种是滴镉电极,迄今为止用于极谱测量的电极只有这两种。除电位分析法外的所有电分析方法都将在第二十三章中进行讨论,电位分析法则在第二十二章中给出。

四、分离分析方法

分离分析方法是利用混合物中有关组分的物理或化学性质去分离它们,分离以后再逐一对这些组分作定性或定量分析。有些分离仪器同时进行了分离和分析工作,而在其他情况下则是先进行分离,然后再采用其他方法进行分析。

非仪器的分离方法有蒸馏、萃取、沉淀、过滤、渗析和反渗透。由于其他一些教程通常都包括了对这些方法的描述,在本书中就不再进行讨论。如图1-3所示,按起分离作用的方法可把仪器分离分析技术分为几个大类。



图 1-3 化学分析中的几类主要的分离分析方法

色谱分析法是利用每一个组分在流动相的吹洗下,沿(或穿过)固定相迁移的相对能力的差异,从混合物中分离出各组分的方法。样品置于固定相(一种固体或液体)的边缘,然后让流动相(一种液体或气体)在固定相上流动并在其径向上将样品吹扫过固定相。与固定相结合力较强的组分被吹扫过固定相时不及结合力弱的组分迁移得快。其结果是在分离开始后的固定时间里,样品组分由于空间距离上的差异而得到分离;或沿固定相径向行进一确定距离时样品组分由于到达的时间先后上的差异而得到分离。按照流动相的状态及性质,色谱分析法又分成液相色谱分析法和气相色谱分析法。通常,人们还对液相和气相色谱分析法作了

进一步的细分，这些将在第二十四至第二十六章中详述。

电泳分析法是利用离子移向与自身电荷相反的电极并离开与自身电荷相同的电极时，其相对速度的差异进行分离分析的方法。由多孔纸或凝胶做成的支承物浸透了缓冲溶液，以利于离子的正常迁移。由于高流动性离子比低流动性离子更快地接近了带有相反电荷的电极，因而产生了分离。

质谱分析法中的分离主要基于样品离子的气态混合物组分在一个电场或磁场中相对运动的差异。电场或磁场导致离子以不同轨迹或以不同速度运动。每一种离子的相对运动由该离子的质荷比决定。质谱法可单独使用，也可与一些其他分析技术联合使用，如与气相或液相色谱法的联机分析。质谱法将在第二十一章中详细讨论。

五、计算机化和自动化

与分析仪器联接的计算机通常用作数据处理，有时也用于控制仪器的操作。在分析实验室中使用的计算机已经显著地缩短了分析家们每一个实验所必须花费的时间。在化学分析中计算机的应用将在第二十八章中介绍。

在许多情况下，通过使分析装置自动化，可以使常规分析完成得更为准确和更为迅速。对一些工业过程自动分析的结果可用于对该过程的自动控制。过程控制装置通常是两种形式中的一种：或是对工业过程产物作自动取样，同时调节过程中的一个或数个可变因素以使产物符合设计要求；或是对一个可变因素抽样分析而对第二个可变因素进行控制。当要求这种调节能迅即作出，或在取样或过程控制有危险的情况下，过程控制装置尤其有用。

除使分析仪器自动化以外，还可以利用实验室机器人去完成一些过去由分析家个人去完成的工作。不论自动分析方法是何种形式，现代的自动化实验室仍需采用计算机控制。在第二十八章中将讨论实验室自动化和过程控制等课题。

六、如何选择分析方法

分析家面前的各种分析方法的确是琳琅满目，在许多情况下不止一种仪器方法可用于某个特定的分析。在选择一个分析方法时诸多应考虑的因素中有：

- a. 仪器型号是否容易得到的一类？
- b. 分析家对使用该特定仪器的经验如何？
- c. 样品含量与仪器有效的浓度范围是否相符？
- d. 分析所要求的精密度和准确度如何？
- e. 分析过程中内在的干扰情况如何？
- f. 使用该仪器必须取用的样品个数有多少？
- g. 要求给出结果的速度如何？
- h. 使用该仪器进行的每一次分析所带来的开销有多大？

在阅读本书时，记住上述八点是很有用处的。

第二章 简单直流电路和交流电路

分析仪器多数都是由电路控制的。用于大多数分析仪器的设计原则如图2-1所示。通常在分析中测量的参数是电信号或在测量前可转变为电信号的非电信号。测得的电信号如有需要，可经电路放大后送至读出。测量参数向电信号的转变是由转换器完成的。转换器就是将能量从一种形式转换成另一种形式的装置。转换器的例子包括光电管和光电倍增器，它们可将电磁辐射转换成电流或电势。

虽然设计仪器对分析化学家来说并非必不可少，但理解仪器的操作却是很重要的。这种对仪器操作的理解可使化学家能最佳地使用分析仪器，并可避免由于对仪器的不正确使用而给分析结果带来的某些误差。而且，一些基本电路知识有时也可帮助化学家修复有故障的仪器，而不用完全依赖于维修人员。基于上述原因，本书内包括了一些关于电和重要分析电路的描述。由于教材篇幅和课程学时的限制，第二章至第四章仅对简单电路作了叙述。更深入的知识可参阅参考文献及其他教科书。

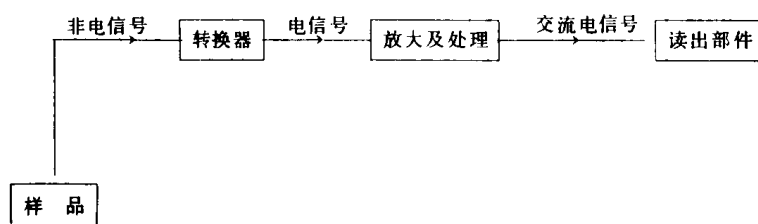
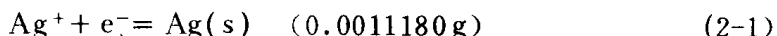


图 2-1 分析仪器设计框图

一、直 流 电 路

电是由带电的粒子流组成。直流电路就是电流方向不改变的电路。在直流电路中的任一支路内电流总按一定的方向流动，但并不一定以相同的速率流动。金属中，如导线，电是由电子流组成。在溶液中，电是由离子流组成。电量 Q 以库仑(*coulombs*) C 为单位进行测量。化学家定义1库仑为硝酸银溶液还原出0.0011180g单质银所需的电荷数：



相当于阿佛加德罗(*Avogadro*)常数量的电子电荷为一法拉第(*a faraday*) F ，一法拉第电量相当于96487 C 。电荷流过导体媒介的速率是电流 I ：

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (2-2)$$

电流的测量以安培(*amperes*) A 为单位。一安培等于每秒钟流过1库仑的电量。尽管导线内

的电流实际上是带负电的电子流，电流仍被认为是由正电粒子流组成的。认为电流是由正电粒子组成只是一种惯例，是在人们知道电流的实际组成之前形成的概念。

例题 2-1 一个恒定电流在 3 分 45 秒的时间内流过在 AgNO_3 溶液内的两 Pt 电极。电解之前一个电极质量为 10.337 g。电解过程中，Ag 沉积在阴电极上，其质量增至 10.462 g。计算电解中的库仑数及法拉第数，并确定使用的电流值。

解 沉积 Ag 的质量为 $10.462 - 10.337 = 0.125 \text{ g}$ 。
所用的电量可由析出 Ag 的质量算出：

$$0.125 \text{ g Ag} \times \frac{1 \text{ C}}{0.001118 \text{ g Ag}} = 112 \text{ C}$$

法拉第数由库仑数计算：

$$112 \text{ C} \times \frac{1 \text{ F}}{96,487 \text{ C}} = 1.16 \times 10^{-3} \text{ F}$$

电解中的电流可由方程 (2-2) 移项积分得到：

$$\int_0^Q dQ = \int_0^t I dt$$

因为 I 是常数，结果为 $Q = It$ 。测量值 Q 和 t 代入方程可得 I 。从方程 (2-2) 定义很明显，如果 I 以 A 为单位， Q 以库仑为单位，则 t 必须以秒为单位：

$$t = 3 \text{ min} 45 \text{ s} = 225 \text{ s}$$

$$112 \text{ C} = I(225 \text{ s})$$

$$I = 0.498 \text{ C/s} = 0.498 \text{ A}$$

电流的存在必须具有一定能量的可能性，也就是说，带电粒子具有势能。电动势或者说电势差是电荷流过的电介质两端的势能差。两点间的电位差相当于两点间移动单位正电荷所需的功。电位差常简写为电位 E 。电化学分析中，电势定义为一个测试电极与一个参考电极间的电位差。希望用两种方式表达这个概念不致引起混乱。电势单位为伏特 (volt) V。1 V 相当于将 1 库仑电荷在两点间移动所需的功 (焦耳)。

$$1 \text{ volt} = 1 \text{ joule/coulomb} \quad (2-3)$$

电路中两点间的电位差正比于两点间流过的电流：

$$E = RI \quad (2-4)$$

方程 (2-4) 中的比例常数是电路的电阻 R 。电阻是对电路中电流流动阻力的量度。当电位差一定，电流与电阻成反比。

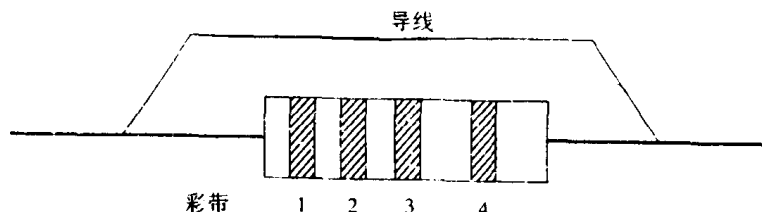


图 2-2 电阻器侧视图，4 条带标志电阻值

方程 (2-4) 是欧姆定律 (Ohm's law) 的表达式。电阻的单位为欧姆 Ω 。一欧姆相当于电路

中 1 A 电流流过电势差为 1 V 的两点间的电阻：

$$1 \text{ ohm} = 1 \text{ volt/ampere} \tag{2-5}$$

电阻器是为电流流动提供阻力的电路元件。电路中的电阻可由电阻器按需要设置。电阻器简图如图(2-2)所示。通常，电阻器是一个固体圆柱形元件，每端露出一根导线。电阻器上的彩色符号带标志着电阻的大小。前三个条带规定了电阻的大小，第四条带规定了相对精度，可由此精度算出电阻值。电阻器所用的彩色符号代表的电阻数见表2-1。例如，一个依次具有黄、紫、红、银色四条带的电阻器具有电阻值4700Ω，相对精度10%，即±470Ω。精密电

表 2-1 电阻器上的颜色标志

颜 色	阻 值			颜 色	阻 值		
	带 1 和 2	带 3	带 4		带 1 和 2	带 3	带 4
黑	0	× 1		紫	7		
棕	1	× 10		灰	8		
红	2	× 10 ²		白	9		
桔红	3	× 10 ³		无色			± 20%
黄	4	× 10 ⁴		银		× 10 ⁻²	± 10%
绿	5	× 10 ⁵		金		× 0.1	± 5%
蓝	6	× 10 ⁶					

阻器的电阻精度高于 5%，它是在每个电阻器上标明电阻值和精度，或者用第五条彩带来表示。一个电阻器就是一个线性装置的例子。通过线性装置的电流随着装置的电势的增大而增大。

电导 G 是电阻 R 的倒数：

$$G = \frac{1}{R} \tag{2-6}$$

当电势差一定，电导直接与电流成正比。电导的单位是(*siemens*) S。1 siemens 是与 1 Ω 电阻对应的电导：

$$1 \text{ siemens} = 1 \text{ ohm}^{-1} \tag{2-7}$$

功率 P 是作功的速率：

$$P = \frac{\text{work}}{\text{time}} \tag{2-8}$$

功率的单位是瓦特(*watt*) W，相当于 1 J/s。在电路中，当电流流过电阻时，消耗功率。消耗掉的功率转化成热散发到环境中去。电阻消耗的功率可由下式给出：

$$P = E I \tag{2-9}$$

式中 E 的单位为伏特， I 单位为安培。

如果电路中电势差未知，但已知电阻值，方程(2-9)可用下式代换：

$$P = I^2 R \tag{2-10}$$

方程(2-10)是由方程(2-9)用欧姆定律[方程(2-4)]将 E 替换得来。对(2-9)式的电流进行相似代换，可得方程 (2-11)：

$$P = \frac{E^2}{R} \tag{2-11}$$

方程 (2-11) 可在电势差及电阻已知的条件下计算功率。

例 2-2 一个电阻器两端施加50.0 V 电压后，有0.400 A 的恒定电流流过电阻器。计算电

阻器的电阻和电导值。确定电阻器消耗的功率值。

解 可用欧姆定律计算电阻值:

$$\begin{aligned} E &= IR \\ 50.0 \text{ V} &= (0.400 \text{ A}) R \\ R &= 125 \Omega \end{aligned}$$

电导可由方程 (2-6) 计算:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{125 \Omega} = 8.00 \times 10^{-3} \text{ S}$$

所消耗的功率可由方程 (2-9), (2-10) 或 (2-11) 求得

$$P = EI = (50.0 \text{ V})(0.400 \text{ A}) = 20.0 \text{ W}$$

1. 电路图

电路是一个或多个电子元件由导体 (通常是导线或电路板上的薄膜连接而成。电路可用电路图来表示, 在电路图中, 一个电子元件用一个符号表示。电阻器为 $\sim\sim\sim$, 变阻器, 即电阻值可改变的电阻器, 表示为 $\sim\sim\sim$ 或 $\sim\sim\sim$, 伏打电池 (voltage cell) + , 电池组, $\text{+} \text{+} \text{+}$ 。

伏打电池就是使电流在闭合电路中流动的装置, 可认为是稳压电源。在伏打电池和电池组的表示中, 短线一端代表负极, 长线一端代表正极。电池组中的电池数可由电池符号的对数表示, 如 $\text{+} \text{+} \text{+}$ 可用来代表两个电池组成的电池组。通常只有当必须知道电池数目时才标出确切的电池数。连接元件的导线用直线表示。开关通常在导线上开个口来表示, 如图 2-3。其他电子元件符号将在后面介绍。

如图 2-4 所示的直流电路的例子可作为用两个指示电极的电位测量中的连续电流源。可

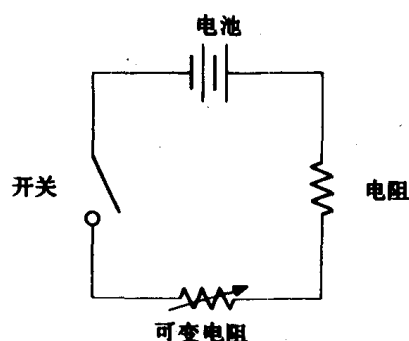


图 2-3 简单直流电路

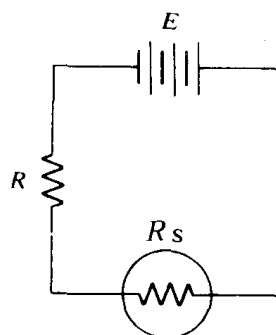


图 2-4 恒流源。E 是电池, R 为电阻, R_s 为与恒流源相接装置的内电阻。R 远大于 R_s 。

有几种方法对电流进行调节。在第四章中叙述了利用运算放大器控制电流的方法。最直接调节电流的方法是利用恒压电源, 如电池或稳压器, 将产生的电流通过一个电阻器。电流的大小取决于电阻的大小 (欧姆定律)。如果除了电阻器外电路的其余部分可变化, 则通过电路的电流亦会变化。所以, 应选择这样的电阻器, 使其电阻比电路中其余部分的任何可能电阻都大。可选择稳压电源来提供所需的稳定电流 (见习题 2-14)。

2. 复杂直流电路

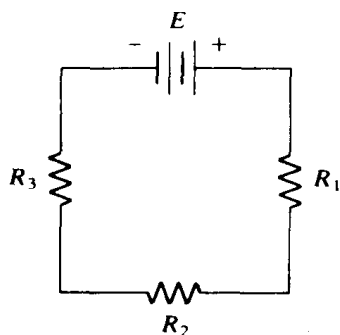


图 2-5 简单串联电路

由方程 (2-12) 整理得到:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = IR_1 + IR_2 + IR_3 \quad (2-12)$$

$$E = I(R_1 + R_2 + R_3) = IR_{eq} \quad (2-13)$$

从方程 (2-13) 看显然串联电阻的等效电阻 R_{eq} 等于各电阻器电阻的总和:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (2-14)$$

图 2-5 所示电路的等效电路可由一个阻值为 R_{eq} 的单电阻代替三个电阻 R_1 , R_2 , R_3 得到。

分析仪器中常见的重要串联电路是分压器(图2-6)。分压器是用来将电池或其他电源的电势减少至适用值。用两个指示电极的电流测试法(第23章)就是分压器在分析中的一个应用例子。在那儿用电池作为电源在两电极间产生一小的电势差,只要有电流通过电路即可测出。

对图2-6所示的分压器,可应用方程(2-13)得到:

$$E = I(R_{out} + R) = IR_{eq}$$

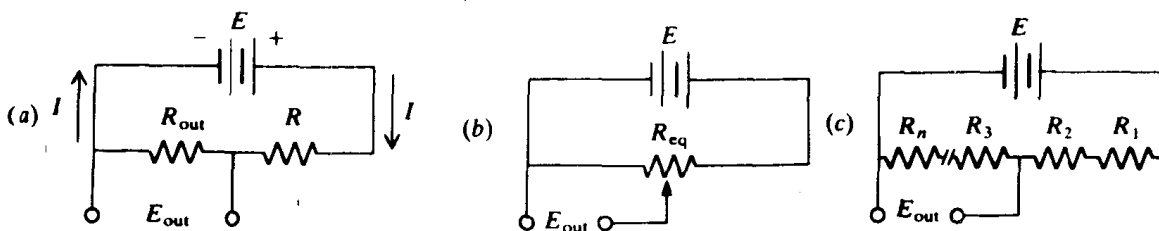


图 2-6 典型分压器

(a) 电路中含有二个电阻器 (b) 电路中含有一个可变电阻器 (c) 电路中含有多个电阻器

由分压器输出的电势 E_{out} 可由 $E_{out} = IR_{out}$ 给出, 输出电压与电池总电压的比率由下式给出:

$$\frac{E_{out}}{E} = \frac{IR_{out}}{IR_{eq}} = \frac{R_{out}}{R_{eq}} \quad (2-15)$$

变形得:

$$E_{out} = E \frac{R_{out}}{R_{eq}} \quad (2-16)$$

应用(2-16)式时, 必须假定通过与输出端相连的外电路的电流是可忽略不计的。通常这就意味着外电路的电阻远大于分压器电路电阻。

例 2-3 计算如图2-6b所示的分压器的输出电压, 已知 E 为 50.0 V, R_{eq} (总电阻) 为