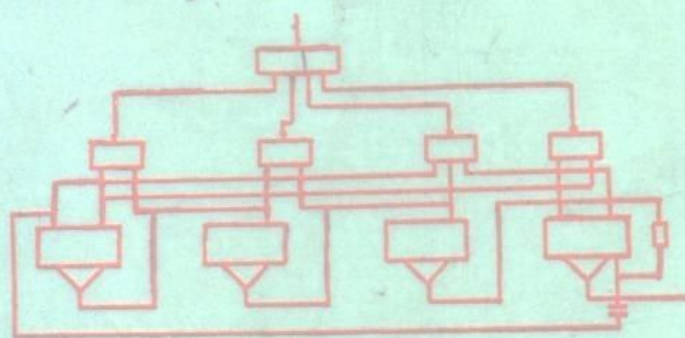


数字和 模拟集成电路电子学

[美] 理查得 J. 希金斯 著



机械工业出版社

数字和模拟集成电路电子学

(美)理查得 J. 希金斯 著

赵良炳 余孟尝 译
常沛田 梁任秋
李衍达 校



机械工业出版社

内 容 提 要

本书以集成电路为基础, 简明扼要地阐述了各种基本电子电路的工作原理和应用, 并介绍了微处理机技术在电子电路中的应用, 对有关锁相技术, 小信号测量、非线性模拟电路、有源滤波、模拟开关、数字滤波器以及稳压块电路等也作了论述。

本书可作为高等院校有关专业的教学参考书, 并可供各个领域中的应用电子技术的科技人员参考。

Electronics with Digital and Analog Integrated Circuits

Richard J. Higgins
Prentice-Hall, Inc.
1983

* * *

数字和模拟集成电路电子学

[美]理查得 J. 希金斯 著

赵良炳 余孟尝 译

常沛田 梁任秋

李衍达 校

*
责任编辑: 孙流芳 版式设计: 乔 玲

封面设计: 刘代

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

北京理工大学出版社印刷厂

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张 32³/₄·插页 1·字数 764 千字

1988年12月北京第一版·1988年12月北京第一次印刷

印数 0,001—3,400·定价: 14.00元

*

ISBN 7-111-00530-9/TN·6

译者的话

现代科学技术的进步离不开利用电子技术。目前，电子技术已广泛地深入到家庭日常生活中，人们对它的兴趣日益增加。许多科研人员和工程技术人员也都想求助于电子技术来解决各自领域中的问题。特别是各种功能的半导体组件的出现，使电子技术的应用进入到一个更便于用户使用的阶段。

因此，一本能反映当代半导体组件特点的电子技术书籍无疑是非常能吸引广大读者的。尤其是，只要花费不多的时间就能迅速地掌握其基本原理及应用技巧的书籍，对于那些从事繁忙研究工作和技术工作的人员来说是备受欢迎的。

美国俄勒冈大学的理查得 J. 希金斯所著的《数字和模拟集成电路电子学》是一本具有上述特点的很好参考书。

首先，本书以集成组件电路为基础，简明扼要地阐明了各种基本电子电路的原理，因此它比较成功地体现了当今电子技术发展的总趋势。

其次，作者又非常重视这些集成组件电路的实际应用，可以说，书中比较好地贯彻了“理论与实际紧密联系”的原则，从而使本书具有很大的实用价值。

因而对于应用电子学解决本领域中各种问题的研究人员，工程技术人员以及研究生和大学生来说，本书是一本费时少而又能迅速学到其基本原理的很好参考书。

我们相信，本书的翻译出版，将对电子技术在更深的层次上的普及推广具有一定的推动作用。

全书共分 19 章。第 1 至 5 章由余孟尝同志翻译，第 10 至第 13 章由常沛田同志翻译，第 14 至 19 章由梁任秋同志翻译，其余由赵良炳同志翻译并负责全书统一修改工作，李衍达同志对全文进行了审核。有错误或不妥之处，敬请读者批评指正。

译者

1987 年 9 月于清华园

序 言

多数对电子学应用自如的人,是经常与电子学长期接触、渗透而掌握它的。在大学时代,我有时搭乘我家附近住的一位教授的车去上学,他发现我居然从未听到过负反馈这个词,对麻省理工学院的课程中竟会遗漏如此精采的概念而大吃一惊。当研究生时,用运算放大器驱动一组功率晶体管来代替笨重的电动机-发电机组,去控制强力电磁铁,取得成功。这时,我才真正看到反馈概念所起的作用。用几毫安的电流就可以控制几百安培的大电流!在做博士论文时,我发现让信号通过运算放大器差动电路后,能够将某些微小的信号加以放大。从此,我也就对信号处理发生了兴趣。后来,我们在自己的实验室里开始做一些极其冗长而又乏味的测量工作。然而,当把实验同小型计算机结合起来时,测量工作就变得不那么麻烦,也不太累人了。微处理机甚至还能够自动地进行更多的实验。

把自己的电路接好,并使其正好按预先设想的那样工作,会使人产生极大的满足感。当人们在电子学方面不再感到措手无策时,那么,电路的调试就象在做侦察工作时一样有趣。唯一的问题就是如何学会它。目前,人人都能买得起一台小型计算机,因而,很需要一门说明如何把计算机与实验工作结合起来的基础性的课程。而且,由于集成电路使得这一切工作进行得更为简单,“黑盒子”分析方法也就变得有效了。这样,人们就不太需要去了解“黑盒子”里面的东西是什么。人们不需要学习电气工程师所学的那样一类课程——它既花费科学家很多的时间,而又不够重视使用者的要求。为此,本书始终贯穿着这样一种指导思想:大胆地应用电子学!

本书包括数字和模拟集成电路两大部分。书中还给出许多与微型计算机之间相互连接的例子。例如,在第四章讨论完触发器时,还论及了三态逻辑与微型计算机总线之间连接的方式。但本书不讨论微型计算机本身,而把讨论重点放在集成电路电子学在测量、控制、信号产生和信号处理方面的应用上。

在写法上,首先介绍一些必备的基础知识,而后就着重讨论电路原理和一些定理。这些原理和定理都是一些有效的“重要准则”,它不仅在许多应用中行得通,而且随着工业技术的逐渐发展仍不会过时。但应当尽可能地避免对电路设计方面作过细的讨论。另一方面,对特定的工业标准的集成电路的内部工作过程也加以说明。同时还列举了许多实际电路的应用情况。此外,在书中还给出 IC 产品的技术规范表的例子,因为这对读者学习如何使用这些规范表以及正确地选用器件来说,都是非常重要的。

本书可供物理、计算机科学、化学和生物方面的学生使用;亦可供其它需利用个人计算机、高级电子技术或通用电子技术的学生们使用。此外,这本书对于那些目前感到有必要使用电子仪器设备的非电工程技术人员、或者在 IC 电路出现以前已学过电子学的专业人员也是适用的。从内容的深浅程度看,本书适合于具有研究生和高年级大学生程度的读者使用。

本书的一半读者曾是典型的物理学家，而另一半大部分曾是计算机专家，这是因为本书能为他们解决科研课题，提供一种有关硬件方面的很有效的手段。其它领域，象化学、生物学、地质学、心理学，偶尔甚至还有音乐、商业、建筑业、城市规划、广播和体育方面的学生也都使用过这本教材。而学生的人数却随着他们数学程度的不同而不同。

学生们的基础知识差别是很大的。对于许多人来说，他们还是第一次遇到微分方程，或者是第一次应用复数。为了能顺利地学习电子学，读者应具备如下起码的基础知识：欧姆定律、简单网络理论和一些有关象电容与晶体管那样的分立元件的知识。有关分立元件和半导体器件电子学一章就是为缺乏基础的学生而安排的。在数学方面，只要具备初步的微积分基础知识——如何求导数和积分，就能顺利地阅读书中三分之二的內容。有关复数部分列于附录中。看来，学生掌握了书中有关的数学，同时又看到数学的用处，从而必然会激励他们去学习更多的数学知识。

课程的内容可以演变成两个独立的短学期课程。从第1~9章，可以形成一个易于处理的数字集成电路电子学部分，其中第9章的内容（数字-模拟和模拟-数字的转换）是沟通模拟和数字两大部分的桥梁。第10~19章组成模拟集成电路电子学部分。为了增加半年长学期课程的灵活性，满足具有不同的基础知识学习者的需要和照顾授课者的爱好，本书还提供了足够的补充教材。例如，对于没有任何一点电子学基础的学生，书中设置了第一章基础知识部分：“分立元件电路及测量”。

讲课顺序可以变化很大，但应不失其系统性。我曾一开始就讲授模拟电路部分的内容，因为当时大家对数字波形的整形及模拟-数字和数字-模拟的转换这方面的基本知识已有了了解。然而，数字部分所涉及的数学更为容易，而且实验室的人都倾向于把课程进行得更为简单一些，因此先学这部分内容所费的力气也就小得多。模拟部分开始时所遇到的数学比较容易，但其中有几部分要求熟悉微分方程，而且还应当学会拉氏变换。在第14~16和19章中所涉及到更难的数学都打上“+”号，事实上这部分的数学只适合于学习科学技术主科的具有高年级大学生或研究生程度的读者。

这本书是在我教授“科学家的电子学”课程四年多后写成的，授课中曾用过 Brophy(布罗菲)的《科学家的基础电子学》、Diefenderfer(迪芬德费)的《电子仪器原理》以及 Malstadt(马尔斯塔德)等人的《科学家的电子测量》等这些标准课本。虽然这些书籍当时都是按照适合于科学家的水平写成的，然而这几本书都存在一些缺点。大部分在应用方面写得很不够，远不足以使学生用现代仪器的观点来处理问题。而且也没有把象741运算放大器或7400系列的TTL这些标准组件包括在课文中。近来，出现了设计手册形式的业余出版物。借此，使用者可立即转入电子学领域，而且依靠原先很少的一点电子学基础知识，也可以意想不到地取得一些非常有效的诀窍。这些出版物有 Rony(罗尼)的《防盗报警器》、Melen(梅伦)和Garland(加兰)的《对IC运算放大器的理解》以及 Lancaster(兰开斯特)的《TTL设计手册》(和《CMOS设计手册》)。在实验室的试验表明，这些手册性质的书籍在激起学生对集成电路的兴趣方面，可能确实是非常成功的。不过离人们的要求还有相当大的差距。也就是说，这些手册在实际应用上虽然收到了良好的效果，然而却满足不了具有大学程度读者的需要。另外，这些书中还没有一本能够满足各学科，特别是测量、

控制和信号处理对电子学提出的要求。本书正是考虑了上述情况，综合了“科学家电子学”和“业余爱好者”或“设计手册”这两大方面的主要优点写成的。

《实验室实验》这本书可以作为业余爱好者学习电子学的参考。只要从把电路的原理同电路的实施联系起来看待问题，就可发现这本书还是非常有用的。目前《实验室实验》的单行本《集成电路的实验》连同本书正文都可以买到。虽然开始时还难于使初学者体会到电子学是很容易入门的，然而一旦当他在厨桌上成功地做几个实验时，人们学习集成电路电子学的惰性就会迅速地消失。集成电路的出现已使电子学变得更加有用，而且成本也变得更加低廉。只要有了在第2章中所介绍的一套零部件，人们就可以把本书中所提到的任何一种想法付之实施。这套零部件共需200美元，加上一些测量仪器（不计示波器）也只稍加一些费用。应当注意到，买一套零件，动手实验，你就会体验到其中的乐趣，而不应当仅仅把它作为一种摆设加以欣赏。

麻省理工学院的 Henry Paynter（亨利·佩因特）最先引导我去思索，利用反馈原理能做什么？我的同事 J. H. Condon（J. H. 康登）鼓励我试验用于物理信号处理的运算放大器电路。许多集成电路制造厂，如 National Semiconductor（全国半导体公司）、Texas Instruments（德克萨斯仪器公司）、Signetics（西格内蒂克斯公司）、RCA（美国无线电公司）、Motorola（摩托罗拉公司）、Analog Devices（模拟器件公司）、Philbrick（菲尔布里克公司）和 Burr Brown（伯尔-布朗公司）在提供目前应用的资料方面作出了有意义的贡献。在此特别值得提出的是，Analog Divices 公司的 D. H. Sheingold（D. H. 星戈尔德）给予我很大的帮助。他的著作使人们对能将自己头脑中出现的一个念头迅速地反映到印制电路板上并最终使之实现的情况感到惊讶。

将近10年的助教工作，对于写成这本书有很大的帮助。我特别感谢 Hal Alles（哈尔·艾莉斯）、Gary Karshner（加里·卡什纳）和 Tom Matheson（汤·马西森）、Margaret Graff（玛格丽特·格拉夫）等人以其极严谨的态度在出版编辑工作上给予的帮助。许多打字员 Liz Rachman（利兹·拉克曼）、Sharon Robbins（莎伦·罗宾斯）、Dolly Allen（多利·艾伦）、Marc Baber（马克·巴伯）、Linda Ficere（琳达·菲舍尔）和 Bev Jeness（贝乌·詹妮斯）为校订做了大量工作。利用 Micropro International（迈克罗普国际公司）的 Word Star（沃德·斯塔）文字处理程序，则大大地方便了手稿的处理工作，特别是把一些报刊评论家的有益建议加以合并、整理的剪辑工作。

感谢许多制造厂，允许我使用属于他们版权所有的材料，而且还要对图或表格加了标题的人们表示感谢。在出版期间，从《电子学杂志》翻印的材料的版权属于 McGraw-Hill（麦克格劳-希尔）有限公司。从《Scientific American》《科学美国》翻印的1977年材料的版权属于《科学美国》杂志社。

理查得 J. 希金斯

目 录

第 1 章 基础知识：分立元件电路及测量	
1.1 电压、电流和电阻的测量	(1)
1.2 电路分析法则	(3)
1.3 分析电路的定理	(6)
1.4 复数阻抗和滤波电路	(10)
1.5 无源网络的阶跃响应	(15)
1.6 P型和N型半导体	(17)
1.7 二极管与电源	(18)
1.8 结型(双极型)晶体管	(23)
1.9 场效应晶体管	(25)
1.10 场效应晶体管电压放大器	(27)
1.11 共发射极放大电路	(31)
1.12 共集电极放大电路(射极跟随器)	(32)
1.13 晶闸管	(34)
1.14 传感器	(35)
习题	(39)
参考文献	(41)
第 2 章 二进制数与数字集成电路	
2.1 引言	(42)
2.2 两状态电子器件和二进制数	(43)
2.3 二进制字长与测量或计算的分辨率	(47)
2.4 整数的表示法	(48)
2.5 集成电路实验	(50)
习题	(52)
参考文献	(53)
第 3 章 门电路和数字逻辑	
3.1 电子开关和数理逻辑	(54)
3.2 如何构成门电路:DTL和TTL门电路	(55)
3.3 MOS 门电路	(59)
3.4 用门电路组成的逻辑电路	(63)
3.5 布尔代数	(68)
3.6 异或门及其应用	(69)
3.7 门电路用作译码器、选择器和多路转接器	(73)
3.8 TTL-CMOS 门电路比较和逻辑系列间的接口	(81)
习题	(84)
参考文献	(86)
第 4 章 触发器	
4.1 分立元件触发器	(88)
4.2 由门电路组成的触发器	(90)
4.3 同步触发器	(92)
4.4 主-从 TTL 触发器	(94)
4.5 边沿触发的 TTL D 触发器	(97)
4.6 CMOS 触发器	(99)
4.7 三态逻辑和微型计算机总线接口	(103)
习题	(106)
参考文献	(109)
第 5 章 计数器和移位寄存器	
5.1 基本计数器的电路和特性	(110)
5.2 TTL 计数器	(115)
5.3 MOS 计数器	(122)
5.4 移位寄存器电路	(130)
5.5 TTL和 CMOS 移位寄存器举例	(133)
5.6 移位寄存器的应用	(136)
习题	(144)
参考文献	(147)
第 6 章 数字波形的整形及其测量仪器	
6.1 引言	(148)
6.2 数字整形电路	(151)
6.3 波形整形在微型计算机接口中的应用	(163)
6.4 数字测量仪器	(166)
习题	(172)
参考文献	(173)
第 7 章 存储器	
7.1 引言	(174)
7.2 存储器类型及术语	(176)
7.3 金属-氧化物-半导体 RAM	(182)
7.4 只读存储器	(191)
习题	(200)
参考文献	(200)
第 8 章 二进制算术	
8.1 二进制加法硬件和软件	(201)
8.2 二进制的补码减法	(209)

8.3 二进制乘法运算的软件和硬件	(211)	生的误差	(303)
习题	(218)	12.5 由于非理想运算放大器的特性引起的积分器的漂移; 高级运算放大器	(306)
参考文献	(219)	12.6 共模误差	(310)
第 9 章 数/模和模/数转换		习题	(313)
9.1 引言	(220)	参考文献	(316)
9.2 数字/模拟转换器电路	(221)	第 13 章 运算放大器在调整和控制方面的应用	
9.3 D/A转换器的应用	(228)	13.1 电压调整器	(317)
9.4 A/D转换方法的特点比较	(232)	13.2 电流调整器	(319)
9.5 双斜率式A/D转换器	(234)	13.3 通用的稳压电源	(321)
9.6 逐次逼近式A/D转换器	(239)	13.4 集成电压调整器	(325)
9.7 其它的A/D转换方法	(245)	13.5 压控电阻器	(327)
习题	(254)	13.6 物理变量的调整	(329)
参考文献	(254)	习题	(333)
第 10 章 差动放大器和反馈的作用		参考文献	(334)
10.1 引言	(255)	第 14 章 运算符号法和线性仿真	
10.2 基本的差动放大器	(255)	14.1 运算符号法	(335)
10.3 负反馈的作用; 无旁路的发射极电阻	(256)	14.2 应用例子; 积分器	(335)
10.4 差动放大器的期望特性	(258)	14.3 应用运算符号法的例子; 具有截止效应的微分器的分析	(337)
10.5 解决办法; 平衡的差动放大器	(259)	14.4 频域和复代数	(338)
10.6 电流源的偏置和运算放大器偏置电流的来源	(260)	14.5 运算符号法的应用; 积分器漂移的分析	(339)
10.7 反馈的作用	(261)	14.6 应用运算符号法的其它例子	(341)
10.8 反馈的方法	(266)	14.7 数字模拟和电子模拟	(343)
10.9 稳定性问题	(269)	14.8 具有阻尼的简谐振荡器的模拟解	(344)
习题	(271)	14.9 稳定性	(348)
参考文献	(272)	14.10 复 s 平面图和系统的特征方程	(350)
第 11 章 基本运算放大器的应用		习题	(351)
11.1 加权加法器	(273)	参考文献	(353)
11.2 减法器	(274)	第 15 章 非线性模拟电路	
11.3 积分器	(275)	15.1 二极管作开关用; 精密交流电压表	(354)
11.4 微分器	(277)	15.2 二极管函数发生器	(357)
11.5 传递函数概念	(278)	15.3 对数放大器	(360)
11.6 传递函数概念的应用	(279)	15.4 乘法器及其应用	(364)
11.7 同相连接的应用	(281)	15.5 乘法器简述	(366)
习题	(283)	15.6 乘法器术语介绍	(367)
参考文献	(286)	15.7 乘法器法	(369)
第 12 章 实用的运算放大器; 非理想的运算放大器		15.8 乘法器的使用技巧	(376)
12.1 运算放大器特性的说明	(287)	15.9 用于仿真的乘法器	(379)
12.2 通用集成运算放大器的内部线路	(290)	习题	(380)
12.3 高性能集成运算放大器	(299)	参考文献	(383)
12.4 输入电压补偿(失调)及偏置电流所产			

第 16 章 有源滤波器	
16.1 引言.....	(384)
16.2 有源低通滤波器.....	(386)
16.3 有源高通滤波器.....	(390)
16.4 有源带通滤波器.....	(390)
16.5 有源陷波滤波器.....	(397)
习题	(397)
参考文献	(398)
第 17 章 振荡器和函数发生器	
17.1 振荡器的设计思想和设计方法.....	(399)
17.2 RC 反馈振荡器	(402)
17.3 调谐电路振荡器.....	(410)
17.4 扫描发生器.....	(412)
17.5 函数发生器.....	(413)
17.6 通用函数发生器.....	(416)
17.7 集成电路函数发生器.....	(418)
习题	(424)
参考文献	(425)
第 18 章 小信号的测量	
18.1 噪声及其来源.....	(427)
18.2 仪表放大器.....	(433)
18.3 相干检测法: 斩波稳定放大器和锁定放大器.....	(435)
18.4 锁相环.....	(444)
习题	(452)
参考文献	(453)
第 19 章 模拟开关与数字滤波	
19.1 比较器.....	(454)
19.2 闭环跟踪电路.....	(460)
19.3 场效应晶体管模拟开关.....	(465)
19.4 模拟多路开关的应用.....	(471)
19.5 采样和保持.....	(475)
19.6 模拟信号离散时间处理.....	(477)
19.7 数字滤波器.....	(487)
习题	(490)
参考文献	(491)
附录 1 2 的方幂	(492)
附录 2 初学者使用示波器指南	(493)
附录 3 复数	(502)
附录 4 傅里叶频谱分析	(505)
参考文献	(507)
带注释的参考文献目录	(508)

第 1 章 基础知识: 分立元件电路及测量

本章介绍了人们仍然需要知道的分立元件电路, 及一些有关的基本测量技术。随着电子学朝着采用“黑盒子分析方法”的方向发展, 电路设计已经变得比较简单了。人们并不需要了解许多有关晶体管的等效电路模型, 因为在两状态二进制设备或者高增益模拟装置中, 最终结果均脱离了大多数晶体管的特性。但是, 即使电子电路大量地集成化, 人们仍然需要知道使用分立的晶体管, 例如去驱动发光二极管或其它大电流器件。此外, 有些基本概念还非常有助于你对电路更深入地理解, 例如任何两端的黑盒子, 几乎都可以看成为仅有一个信号源和一个负载的等效支路。本章末尾, 还介绍了几个怎样用分立元件把实际物理量转换成电信号的例子, 和一些在基本电子测量中需要用到的传感器。

1.1 电压、电流和电阻的测量

1.1.1 动圈式仪表

在基本模拟式仪表即转动指针式仪表(图 1.1a)内部, 有一个形成电磁铁的线圈和一个与之垂直的永久磁铁。当电流 I 通过线圈时, 产生转动力矩 T_I , 与之平衡的是悬挂弹簧的恢复力矩 T_s 。因为 $T_I = \text{常数} \times I$ 、 $T_s = k\theta$, 所以当线圈转动到两个力矩平衡时, 输出转角就与被测的输入电流成比例, 故这种基本的仪表电路

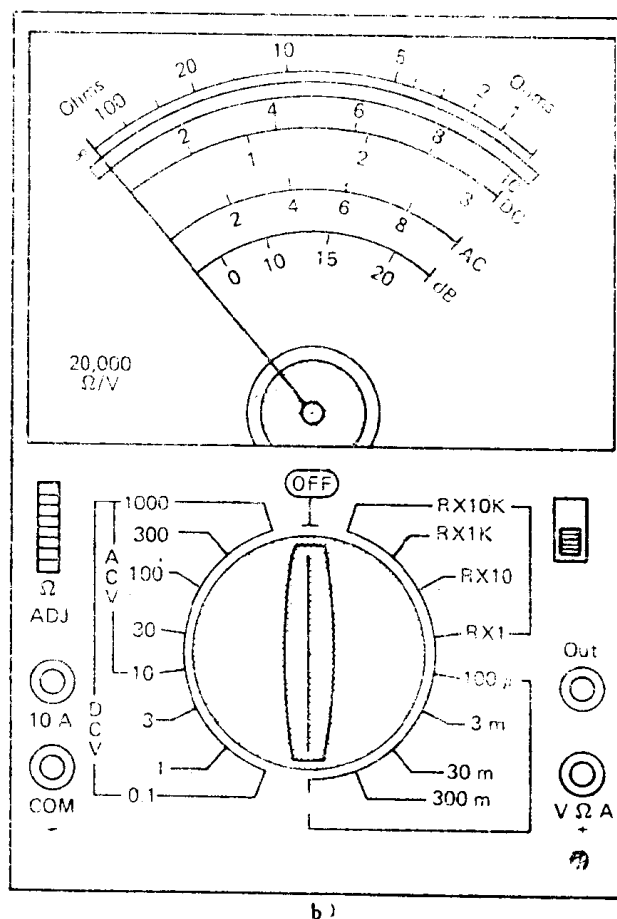
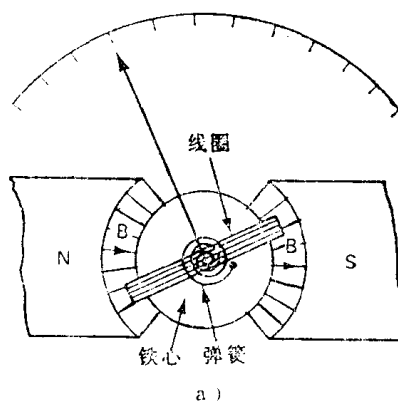


图 1.1 用于测量电压、电流和电阻的仪表

a) 动圈模拟式仪表的内部结构 b) 万用表(VOM)

是一种电流传感器。若要测量非电流量，则需用外部电路把被测量转换成电流量。这种仪表的动作可看成为一个理想电流表串联一个电阻，其阻值与转动线圈的阻值相等（图 1.2a），典型参数值是：满偏对应于 $I_m = 50\mu\text{A}$ 、电阻 $R_m = 100\Omega$ 。

1.1.2 万用表电路

动圈式仪表能测电流、电压或者电阻，这些功能通常都包括在叫做万用表（VOM）的基本测试仪器中。当要测量超过表头满偏值的电流时，就需要分流（否则表就会损坏），其方法是加上分流电阻 R_s （图 1.2b）。 R_s 的值可根据当总的输入电流等于预期满偏值时，表头恰好满偏的原则来确定。例如，对于前面介绍的 $50\mu\text{A}$ 、 100Ω 的表头来说，测量 1A 满偏要求 $R_s = 0.5 \times 10^{-2}\Omega$ （为什么）？

同样的表头也可以用来测量电压，只要接入一个附加串联电阻，使要求的满偏电压值产生满偏表头电流即可（图 1.2c）。要用前面介绍的表头做一个 1V 满偏的电压表，需要串联一个 $20\text{k}\Omega$ 的电阻（为什么）？

万用表是用比较法测量电阻的，未知电阻 R_x 和内部标准电阻 R_1 组成分压器（图 1.2d），当接上未知电阻时，万用表测量的是内部电池加在 R_1 上的电压

$$V_1/V_{FS} = (1 + (R_x/R_1))^{-1} \quad (1.1)$$

非线性表达式说明了，万用表上电阻刻度必然是非线性的。使用万用表测量电阻时要注意最初的校准，即用导线把万用表短接起来（万用表“调零”工作方式）调 R_f ，使表头指针在给定的内部电池电压值下达到满偏（注意， R_1 在这一调零步骤中不起作用）。

1.1.3 仪表的误差

由于上述仪表电路出现在像万用表这类测试仪器中，所以了解在什么情况下可以使用

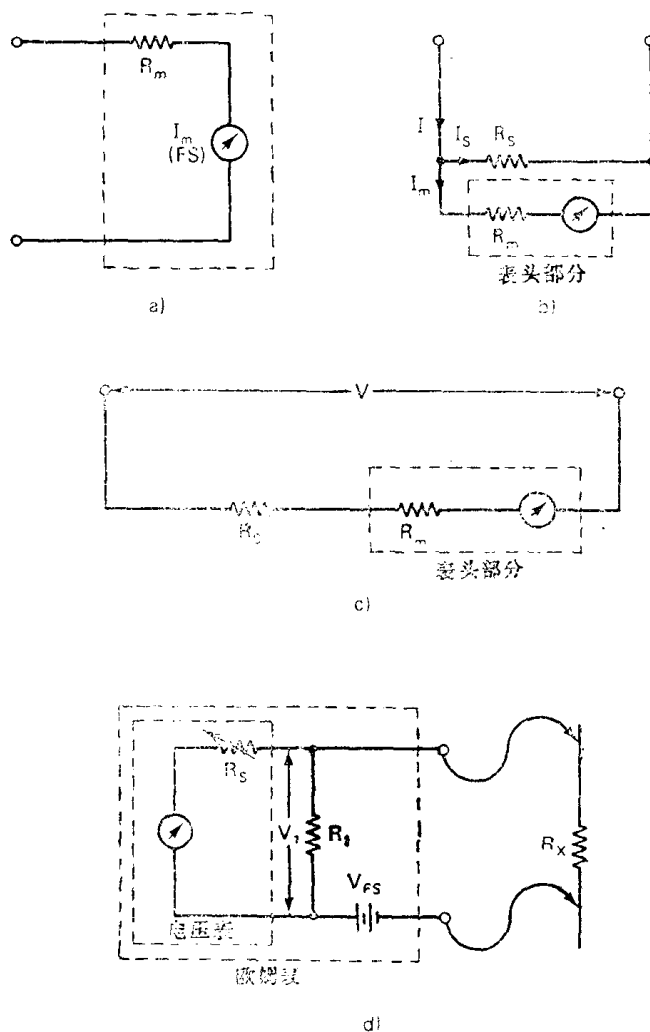


图 1.2 万用表电路

- a) 动圈式仪表的等效电路
- b) 电流表的电路
- c) 电压表的电路
- d) 欧姆表的电路

它们而不致产生测量误差是十分重要的。测量电流，应在测量点断开电路并串联进电流表。只要与被测电路的电阻相比，电流表的等效电阻是微不足道的，就不会产生误差(图1.2b)。否则电流表的串入就会改变被测电流的数值。电流表的等效电阻决定于 R_i ，当被测电路的电阻大于 $1\ \Omega$ 时，在上例中， $R_i = 0.5 \times 10^{-2}\ \Omega$ ，通常是不会产生明显误差的。当用作电压表时(图1.2c)，万用表是并联在一部分电路上的，只要通过电压表的电流在被测电路中不产生明显的电压降，就不会产生太大的误差。因此，电压表中串联的电阻 R_i 必须远大于被测电路的电阻，在高阻抗电路中，这是一个重要的问题。例如，对于 $100\text{k}\Omega$ 的电路电阻，内阻约为 $20\text{k}\Omega$ 的电压表就不适用了。高阻抗电压表使用隔离级(一般用场效应晶体管，即 FET)，将有效输入阻抗增大到 $\sim 10^8\ \Omega$ ，从而减小流入电压表中的电流。对于已经不再使用的高阻抗电压表——真空管电压表有时用缩写词 VTVM 表示，而现在使用的高阻抗电压表——数字万用表(DMM)都设有场效应晶体管输入级。

1.2 电路分析法则

1.2.1 欧姆定律

电路元件上的电压与流过其中的电流成正比。

$$V = IR \quad (1.2)$$

1.2.2 串联电阻相加(图1.3a)

$$R_{\text{串联}} = R_1 + R_2 \quad (1.3)$$

较大的电阻处在支配地位。

1.2.3 并联电阻倒数相加(图1.3b)

$$R_{\text{并联}} = (1/R_1 + 1/R_2)^{-1} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.4)$$

较小的电阻处在支配地位。

1.2.4 串联支路中电压如何相加

在一个电路的串联支路中(图1.3c)，电压降相加得到总电压降，流过所有元件的是同一个电流。在该例子中

$$\begin{aligned} V_1 &= IR_1 & V_2 &= IR_2 & (1.5) \\ V &= V_1 + V_2 = I(R_1 + R_2) \end{aligned}$$

1.2.5 并联支路中电流如何分配

当两个支路并联时(图1.3d)，电流的分配与电阻值成反比，出现在所有并联元件上的是同一个电压。

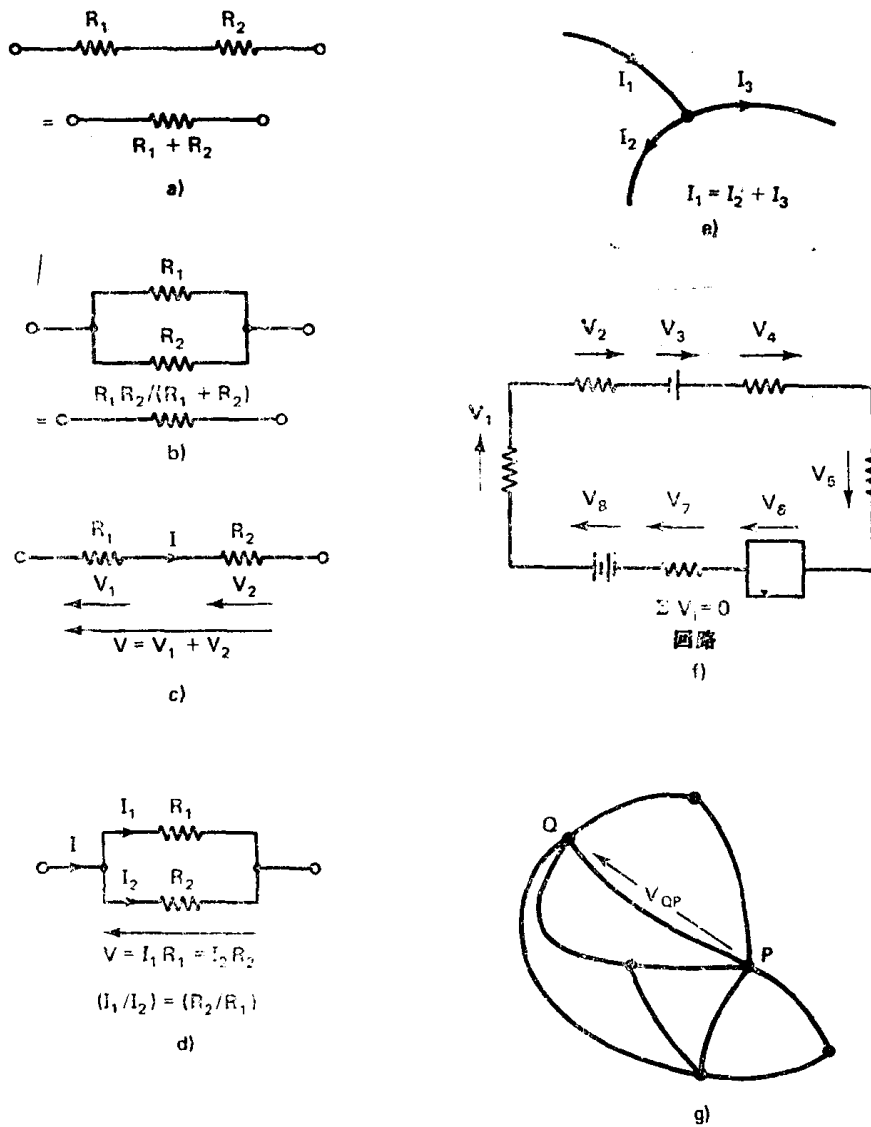


图 1.3 一些直流电路定理

- a) 电阻串联 b) 电阻并联 c) 增压 d) 分流 e) 电流节点
f) 电压回路 g) 电压回路中的路径独立

$$V = I_1 R_1 = I_2 R_2 \quad (1.6)$$

$$I_1 / I_2 = R_2 / R_1$$

1.2.6 节点电流守恒

当 n 条支路连接在一起形成节点时 (图 1.3e), 流入该节点各个电流的总和恒为零。

$$\sum_{\text{节点}} I_n = 0 \quad (1.7)$$

即遵守电荷守恒的基本原理: 电子在电路中流动时是不会消失的。

问题 倘若不知道电流 I_1 箭头的实际指向而假设其方向,在求解中会产生错误吗?
答 不会, I_1 的解答中仅会出现一个负号,表示最初的假设方向是错误的 \ominus 。

1.2.7 回路电压定律

电路中闭合回路各部分电压之总和为零。

$$\sum_{\text{回路}} V_n = 0 \quad (1.8)$$

该定律遵守能量守恒的基本原理。电压象高度一样,是位能的一种形式,把水抽到山上某一地段所消耗的能量和水落下时可利用的位能是相等的。必须注意电压的代数符号(图1.3f),像电池一类的电压源应标上相反的符号,或者从方程式电阻压降一边移到另一边。

一个有用的推论(图1.3g)就是无论沿哪条路径,从点P开始一个闭合回路上电压降之和总等于零。从点Q到点P的电压降,等于沿连接Q和P的任何可能路径上电压降的总和,这显然也是不言而喻的正确结论。

1.2.8 串联电路中可移动元件

在串联电路中,可按任何次序随意调整电路元件的位置(图1.4a),这是符合基尔霍

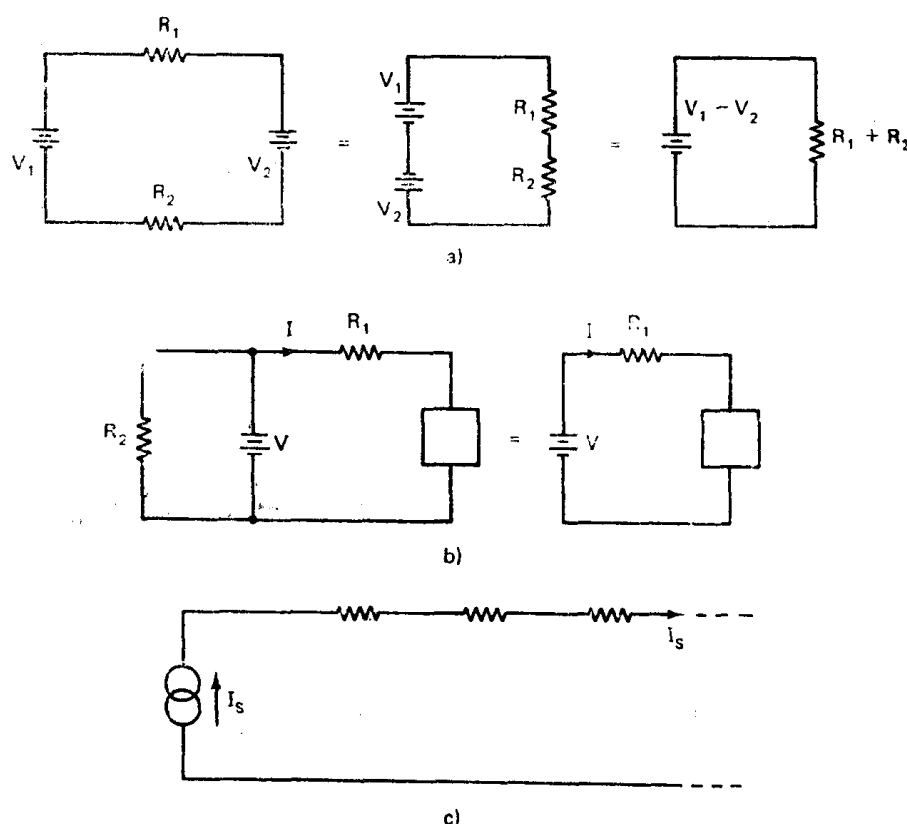


图 1.4 一些直流电路定理

a) 电路元件的移动和电源的叠加 b) 电压源 c) 电流源

\ominus 说明 I_1 的实际方向与假设的方向相反。——译者注

夫回路电压定律的。另外在加法中，运算结果与次序无关： $A+B=B+A$ 。注意：该规则不允许把电路元件移过三支路节点。

1.2.9 叠加原理

在一个有几个独立电源的网络中，总的电流等于每一个电源单独作用时所产生的电流的总和。这只适用于线性网络，即电压加倍，产生的电流也加倍。描述线性网络的代数方程式是一阶线性的。例如，电阻、电容和电感是线性电路元件，晶体管和二极管是非线性电路元件。然而，即使在非线性电路中，叠加原理和其它线性电路中的定理也能够用来描述微变时的情况。

1.2.10 电压源

一个电压源无论取多大电流，其端电压总是恒定不变的，电池十分接近于理想电压源。这条原则的一个有用结论见图 1.4b，去掉电阻 R_2 ，电流 I 不变，由此可知，就电路这一部分来说，与电源并联着的电阻及其它元件是多余的。当然，实际电源都不是完全理想的，但是，利用戴维南等效的方法可以很好地处理非理想电压源（下一节）。

1.2.11 电流源

一个电流源产生的输出电流是恒定不变的，与负载无关。电流源提供的电压决定于连接在它上面的电阻或阻抗的总和（图 1.4c）。当然，这不是完全正确的，连接在一个断开电路上的电流源就不能提供同样恒定的电流，这是由于电子不可能跑到导线外面去。尽管我们不像对电压源那样地熟悉电流源，但是在固态电路中，它却是一种实用的理想化电源，因为晶体管就构成极好的电流源。

1.3 分析电路的定理

1.3.1 戴维南等效电路

我们知道，量测一个黑盒子（不知内部结构）两端的电压，取决于测量时用的仪表（图 1.5a），即使用依据标准电池校准过的仪表，情况也是这样。一个能够解释这种结果的模型（图 1.5b）就是指定黑盒子内部为一串联起来的电池 V_T 和电阻 R_T 。如果仪表的电阻 $R_m < \infty$ ，那么当接上仪表时，就会有电流 I 流过，因此在黑盒子内部电阻 R_T 上，产生电压降 IR_T ，以致 $V < V_T$ ，引起测量误差，而且这个误差可以很容易地计算出来。在图 1.5c 中，把电路重新画成为分压器，这一概念在分析电路时，会多次出现，电源电压 V_T 减去电流在 R_T 上产生的电压降，所得到的便是电压表上读出的电压 V_m 。

$$V_m = V_T - IR_T \quad (1.9)$$

式 (1.9) 中

$$I = V_T / (R_m + R_T) \quad (1.10)$$

联立求解两个式子，可得

$$V_m = V_T (R_m / (R_m + R_T)) \quad (1.11)$$

这样，实际出现在电压表上的电压，只是电压源的一部分 $R_m / (R_m + R_T)$ 。若要求测量误差为1%或者更小，则电压表的内阻至少应为 $100R_T$ 。为了表明带负载后电源的特性（图 1.5d），把输出电压表示成为流经黑盒子电流的函数，即等式（1.9）。显然，电压随着电流增大而降低，其斜率为 R_T 。

直流电路的戴维南定理，说明了在黑盒子中无论有什么样的电池和电阻，输出电压都是流经黑盒子的电流的函数，如图 1.5d 或式（1.9）所示。人们可以不必了解黑盒子的内部结构而直接利用戴维南定理，因为简单的戴维南等效电路（图 1.5b）已充分地描述所观察到的特性曲线，而不论黑盒子内部的实际情况如何。尽管这里的描述只针对直流电路，但是戴维南等效电路定理在线性交流电路中也同样适用。带有二极管和晶体管的电路是非线性的，但是如果人们感兴趣的是在工作点附近的微变情况，则戴维南等效电路便是对小信号电路工作的一种有效描绘。

问题 当人们不能打开黑盒子时，怎样才能测量出戴维南等效电路的参数呢？

答 利用不会构成电路负载的电压表，例如具有场效应晶体管输入级的万用表或数字万用表，测量出的“开路”（ $I = 0$ ）电压值，就是等效电压 V_T 。测量等效电阻 R_T 有两种方法，一是在输出端上跨接可变电阻箱，调节电阻箱的电阻，直到电阻箱上测得的电压达到开

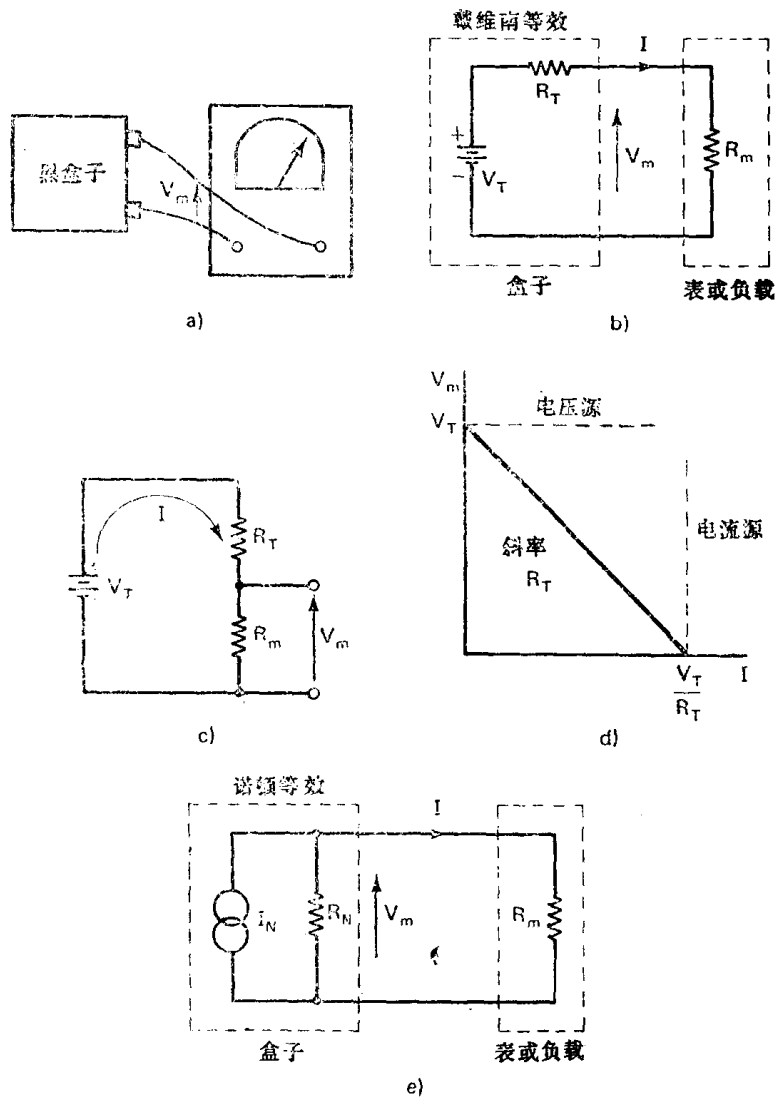


图 1.5 戴维南和诺顿等效电路
a) 正在量测其电压的黑盒子 b) 接上仪表改变了黑盒子的输出电压，此时它被表示成戴维南等效电路 c) 分压器电路 d) 带负载时电源端的伏安特性 e) 诺顿等效电路