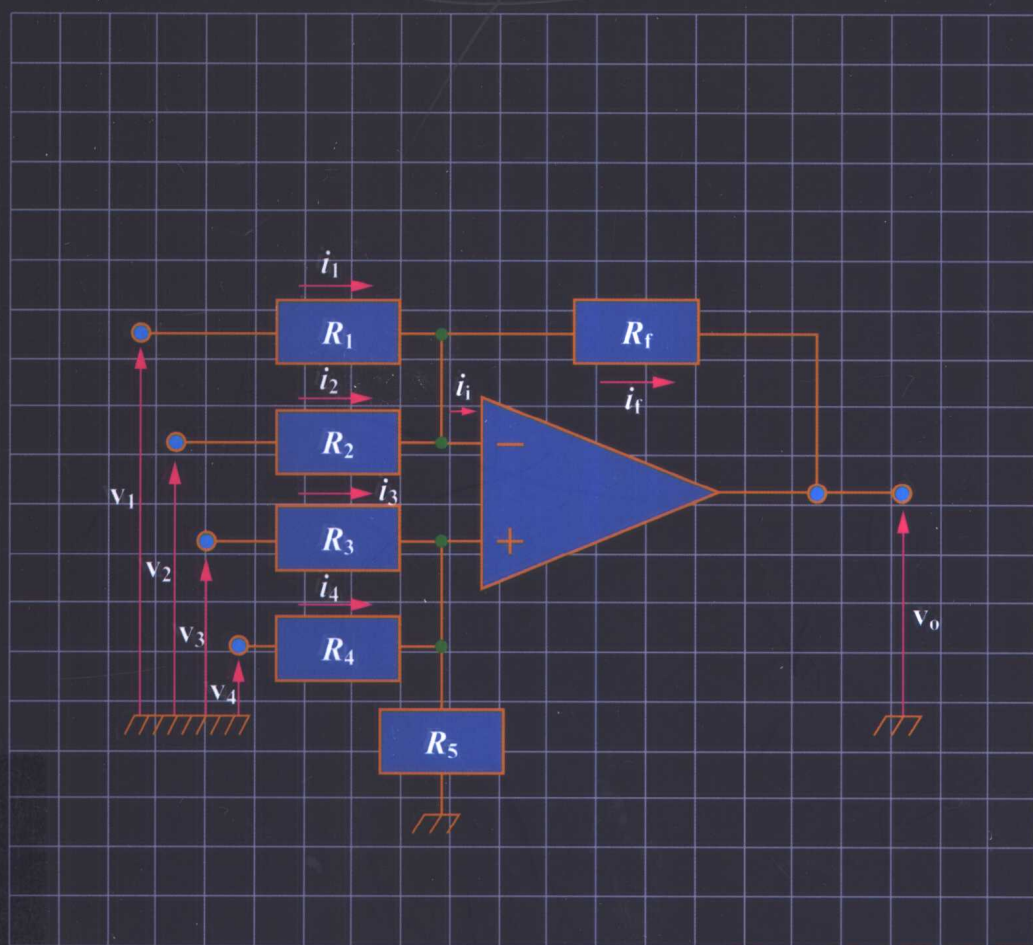


OHM 大学理工系列

模拟电子电路

〔日〕小牧省三 编著



科学出版社

www.sciencepress.com

TN710
46



模拟电子电路

〔日〕小牧省三 编著
何希才 译

科学出版社
北京

图字:01-2003-4418 号

Original Japanese language edition

Shinsedai Kougaku Series Analog Denshi Kairo

Edited by Shouzou Komaki

Written by Shouzou Komaki, Yasumasa Noguchi, Hiroshi Suga and Shigemasa Takai

Copyright © 2002 by Shouzou Komaki

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese version published by Science Press, Beijing

Under license from Ohmsha, Ltd.

Copyright © 2003

All rights reserved

新世代工学シリーズ

アナログ電子回路

小牧省三 オーム社 2002

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子电路/(日)小牧省三编著;何希才译. —北京:科学出版社,2003

((OHM 大学理工系列))

ISBN 7-03-011761-1

I. 模… II. ①小…②何… III. 模拟电路-高等学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 060222 号

责任编辑 崔炳哲 责任制作 魏 谨

责任印制 刘士平 封面设计 李 力

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

2003年9月第一版 开本: B5(720×1000)

2003年9月第一次印刷 印张: 12 1/4

印数: 1—5 000 字数: 175 000

定 价: 24.00 元

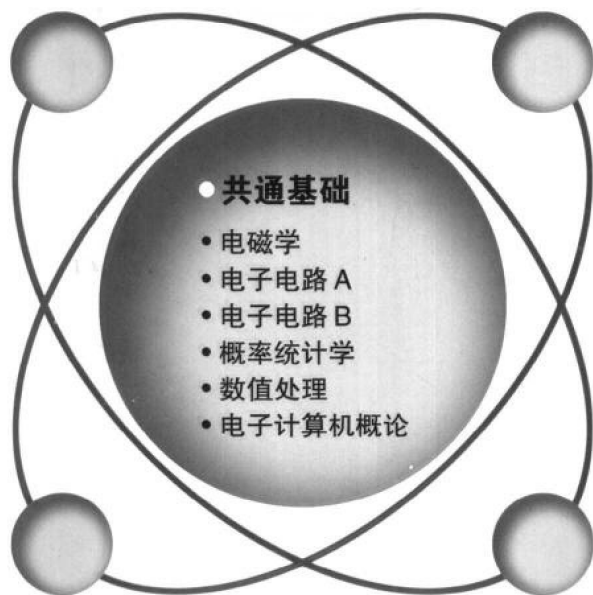
(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

通信、信息领域

- 通信工程学
- 信息通信工程
- 光通信与无线通信系统
- 信号处理
- 计算机构成
- 系统软件
- 编程语言
- 控制系统
- 计算机网络
- 数据库
- 计算机应用
- 人工智能

电子、材料领域

- 模拟电子电路
- 数字电路
- 电子电气材料
- 半导体器件
- 集成电路
- 电子功能材料
- 光电子学
- 光与电磁波
- 激光工程
- 电子与离子



系统、控制领域

- 传感工程
- 控制理论
- 数字控制
- 系统工程
- 机电一体化
- 机器人工程
- 人工接口
- 控制系统
- 计算机网络
- 计算机图形学
- 信息媒体工程

电力、能源领域

- 能源环境学
- 电力电子学
- 电气机器
- 电力系统工程
- 电力传输工程
- 超电导工程
- 电化学

编著者、著者简历

小牧省三

编著者:第1章,第4章

1972年 大阪大学研究生院工学研究科硕士
毕业

1983年 获工学博士学位

现在 大阪大学研究生院工学研究科通信
工程专业教授

野口泰正

著者:第3章,第5章

1964年 近畿大学理工学部电气工学科毕业

1993年 获工学博士学位

现在 近畿大学理工学部电气电子工学科
副教授

菅 博

著者:第2章,第7章,第8章

1970年 大阪府立大学研究生院博士毕业

1970年 获工学博士学位

现在 广岛国际大学社会环境科学部信息
通信专业教授

高井重昌

著者:第6章,附录

1989年 神户大学工学部系统工程专业毕业

1995年 获工学博士学位

现在 和歌山大学系统工学部光机电一体化
专业副教授

丛 书 序

主编 樱井良文

现在,很多大学正在进行院系调整以及学科、专业的重组,以研究生培养为重点,引入学期制,采用新的课程体系授课,特别是由于学期制教学计划的引入,使得原来分册编写的教材很难在一个学期的教学中消化。因此,各学校对“易教”、“易学”教材的需求越来越迫切。

本系列是面向通信、信息,电子、材料,电力、能源,以及系统、控制等多学科领域的新型教学参考系列。系列中的各册均由活跃在相应学科领域第一线的教授任主编,由年轻有为的学者执笔,内容丰富、精炼,有利于对学科基础的理解。设计版面时着意为学生留出了写笔记的空间,是一种可以兼作笔记,风格别致的教学参考书。

希望肩负新世纪工程技术领域发展重任的青年读者们,通过本教程系列的学习,建立扎实的学科基础,在实践中充分发挥自己的应用能力。

OHM 大学理工系列编辑委员会

主 编

樱井良文 大阪大学名誉教授

副主编

西川祐一 大阪工业大学校长
京都大学名誉教授

编委(按姓氏笔画顺序)

广濑全孝	产业技术综合研究所 下一代半导体研究中心主任	井口征士	大阪大学教授
木村磐根	大阪工业大学教授 京都大学名誉教授	仁田旦三	东京大学教授
白井良明	大阪大学教授	西原 浩	放送大学教授 大阪大学名誉教授
池田克夫	大阪工业大学教授 京都大学名誉教授	滨川圭弘	立命馆大学教授 大阪大学名誉教授

前 言

可以毫不夸张地说,在 20 世纪后半叶,电子电路,尤其是模拟电子电路及其电子产品与设备给日本带来了经济的繁荣。以电视接收机、磁带录像机及电视摄像机为主的日本制造的家电产品,无论在高品质、高性能,还是在低价格方面,不仅在日本本土,在世界上也同样拥有相当大的竞争力,因此长时间占据着主导地位。然而,从 20 世纪 80 年代开始,在高集成化与数字化的大潮中,日本在电子产品组装、集成电路制造方面的技术优势逐渐发生改变,1990 年以后,因劳务费用居高不下而使日本的优势地位急剧下降。尤其在以微处理器、因特网为主的计算机和网络产品方面,日本将芯片设计与软件设计的技术优势集中于具有竞争力的少数厂家,其后果,使得日本擅长的批量生产、部件组装厂家的生存出现了危机。在这种大潮中,出现了更具有竞争力的领域,这些领域不同于液晶显示屏、移动电话用陶瓷滤波元件、晶体振荡器、DVD 等高集成度数字电路的领域,不仅要求采用数字电路,而且在模拟电路中也要求有新的设想。过去,日本在元件领域中有很多发明,近几年来,还发明了以 HEMT 晶体管、蓝色激光二极管为代表的氮化镓等新的器件,对电子技术的发展作出了极大的贡献。对于氧化物高温超导体材料元件等的发明虽不属于日本,但开始阶段确有很多日本研究人员参与了这项世界性课题的研究¹⁾。

本书可作为学习模拟电路的基础,其中吸收了前辈们不断积累的技巧与智慧,同时期待着数字时代的年轻人温故而知新,以新的观点重新修订书中内容并提出新的设想。今后即使有新的元件出现,但作为公共基础知识,大多数已包含在前辈的研究成果之中,希望读者能牢牢掌握这些知识。

本书主要介绍晶体管放大器和振荡器,此外还用较大篇幅介

1) IBM 苏黎世研究所宣布发现氧化物高温超导体时,编者正在某企业的规划部门工作,亲自接触过过去的研究规划书与计划书。在 10 年以前日本就制订了这项课题的研究规划并进行了研究,但发布氧化物高温超导体消息的当时还未完成这项研究。一听说这则消息,日本立即再次进行实验,并取得了良好的结果。日本的企业虽参与了这项世界性课题的研究,但从外界看来有很多成果被埋没了。

绍了模拟电路与数字电路的混合电路、调制解调电路、电源电路、多级放大等特殊电路。由于电子电路设计的发展,要求读者不仅要掌握书本中的理论知识,还要具有在现场实际中组装电路的能力。最近以来,由于元器件的小型化,已较难用焊锡将元器件焊接成电路。另外,由于大量电路的集成化,分立元器件也很难买到,因此,很多情况下也就变设计组装为具有黑匣子功能的部件。对此,本书增设了一章电路仿真的内容,使用仿真软件可设计所需功能的电路,期望借此对现场实践者助一臂之力。

参加本书编写的都是具有丰富电子电路教学经验的大学教师,如广岛国际大学的菅博先生编写第2章,第7章,第8章;近畿大学的野口泰正先生编写第3章,第5章;歌山大学的高井重昌先生编写第6章及附录;小牧先生编写第1章,第4章。

主编 小牧省三

目 录

第 1 章 电子电路的发展史与学习方法	1
1.1 电子电路的起源及发展史	1
1.1.1 电池与电磁时代	1
1.1.2 第一代半导体即二极管与矿石检波器	4
1.1.3 电子管	5
1.1.4 第二代半导体即晶体管	6
1.1.5 第三代半导体即集成电路与电路技术	7
1.2 电子电路的发展及未来	8
1.3 本书的学习方法	9
第 2 章 半导体器件与集成电路	11
2.1 半导体	11
2.1.1 半导体材料与特性——特征与种类	11
2.1.2 半导体中电子消耗一定宽度的能量 ——能带	13
2.1.3 半导体中载流子密度	14
2.1.4 费米能级	15
2.1.5 半导体中的两种电流——扩散电流 与漂移电流	16
2.2 pn 结	18
2.2.1 何谓 pn 结——pn 结的结构与性质	18
2.2.2 pn 结中电流如何流通——pn 结的 整流作用	20
2.2.3 pn 结及其应用	20
2.3 pn 结晶体管	21

2.3.1	晶体管的放大作用——pn 晶体管的 基本原理	22
2.3.2	pn 晶体管的电流流通情况——pn 结 晶体管的电压与电流特性	24
2.4	场效应晶体管	25
2.4.1	场效应晶体管——种类与原理 ...	25
2.4.2	场效应晶体管的特性——电压与 电流特性	26
2.5	集成电路	28
2.5.1	集成电路的内部结构——集成电路的 结构与工作原理	28
2.5.2	集成电路的类型——集成电路的 分类	29
2.5.3	模拟集成电路的分类——模拟 IC 的 分类	30
2.5.4	高性能模拟 IC 的类型——专用 IC	31
2.5.5	高性能集成电路的应用实例——简单 构成高性能电路	32
	练习题	33
第 3 章	晶体管放大电路	35
3.1	晶体管的放大作用	35
3.2	晶体管应用技术	37
3.2.1	晶体管的特性	37
3.2.2	晶体管放大电路	45
	练习题	66
第 4 章	多级放大器与功率放大器	67
4.1	多级放大器的必要性	67
4.2	差动放大器	68
4.3	达林顿电路	72
4.4	多级放大器的频率特性	73
4.5	放大器的噪声与噪声指数	75
4.6	功率放大器	78

4.6.1	A类放大器	80
4.6.2	B类放大器	81
4.6.3	C类放大器	83
	练习题	84
第5章	负反馈电路与运算放大器	87
5.1	反馈电路	87
5.2	负反馈放大电路	88
5.2.1	负反馈放大电路的放大倍数	88
5.2.2	反馈放大电路的频率特性	89
5.2.3	负反馈对其他特性的改善	90
5.3	运算放大器	90
5.3.1	运算放大器的基本特性	91
5.3.2	运算放大器的基本电路	91
5.4	运算放大器的应用电路	93
5.4.1	加减运算电路	94
5.4.2	微积分电路	95
5.4.3	比较器	96
5.4.4	限幅电路	97
	练习题	100
第6章	振荡电路	101
6.1	振荡原理	101
6.1.1	振荡电路的原理	101
6.1.2	振荡条件	102
6.2	LC振荡器	102
6.2.1	调谐式振荡电路	102
6.2.2	三点式振荡电路	103
6.2.3	哈特莱振荡电路	105
6.2.4	科耳皮兹振荡电路	106
6.3	石英晶体振荡电路	106
6.3.1	石英晶体	106
6.3.2	石英晶体振荡电路实例	108
6.4	适用于低频的RC振荡电路	109
6.4.1	RC移相式振荡电路	109

6.4.2	文氏电桥振荡电路	110
6.5	锁相环	111
6.5.1	锁相环	112
6.5.2	锁相环的应用	113
	练习题	115
第7章	晶体管应用电路	117
7.1	A/D转换器	117
7.1.1	A/D转换过程	117
7.1.2	采样	118
7.1.3	量化	119
7.1.4	A/D转换器的实例	120
7.1.5	编码	121
7.1.6	大规模集成电路(LSI)A/D转换器的应用实例	122
7.2	D/A转换器	123
7.2.1	D/A转换的过程	123
7.2.2	D/A转换器实例	124
7.2.3	大规模集成电路D/A转换器的应用实例	126
7.3	振幅调制电路	127
7.3.1	通信系统中的调制与解调	127
7.3.2	振幅调制(AM)	128
7.3.3	振幅调制电路	128
7.3.4	AM波的解调	131
7.4	频率调制电路	133
7.4.1	频率调制的理论	133
7.4.2	频率调制(FM)电路	134
7.4.3	FM波的解调	138
7.4.4	大规模集成电路构成的FM调制解调电路	139
7.5	电源电路	140
7.5.1	整流电路	141
7.5.2	平滑电路	144
7.5.3	稳压电路	145

7.5.4 集成稳压器的应用	146
7.5.5 开关电源	147
练习题	149
第 8 章 电路仿真	151
8.1 电路仿真的历史——始于伯克莱(U. C. Berkeley)学院	151
8.2 电路仿真软件的工作——电路特性的事前分析	152
8.3 典型电路仿真软件及其功能——PSpice, Circuit Viewer, B ² Spice	152
8.3.1 PSpiceA/D	152
8.3.2 Circuit Viewer Ver. 2.5	153
8.3.3 B ² SpiceA/D2000	154
8.4 设计电路的特性分析——B ² Spice 的使用方法与仿真实例	155
8.4.1 B ² Spice A/D 2000 的使用方法	155
练习题	165
附 录	167
1. 电阻	167
2. 电容	168
3. 线圈	168
4. 二极管与晶体管	169
5. 分贝表示	170
练习题简答	173
参考文献	181

第 1 章

电子电路的发展史与 学习方法

本章简要介绍电子电路,尤其是模拟电路的发展史,阐述其发展过程以及如何继承前人的研究成果。所谓电子电路,就是用电子元器件构成的电路。以这种电路为研究对象,考察其历史,范围很广,也包括使用电磁的范畴,即电池与电磁时代。对于半导体,可划分为第一代,即矿石检波器和二极管时代;第二代,即电子管和晶体管时代;第三代,即集成电路时代以及将来的新时代¹⁾。本章的最后介绍本书的结构与学习方法。

1.1 电子电路的起源及发展史

电子电路的发展史如图 1.1 所示,如上所述,可划分为电池与电磁时代;矿石检波器和二极管等半导体的第一代;电子管和晶体管等半导体的第二代;集成电路等半导体的第三代以及将来发展的新时代。

1.1.1 电池与电磁时代

如果要追溯到刚开始使用电子电路的时期,则在通信领域可追溯到能使用莫尔斯或无线通信的时代,那时采用的是由电池与电动机、发电机、变压器等组成的磁路装置。

图 1.2 所示为莫尔斯于 1832 年发明的电报机原理示意图。这

1) 为方便起见,这里将电子电路按这种时代划分,但应注意,这些技术并没有随着时代而结束,以后,根据使用的目的不同,会周而复始地作为新时代的最先进技术活跃在技术舞台上。作为学习电子电路的基本方式,不仅要学习单项技术,更重要的是要应用于实际,要具有对过去技术重新认识的一种综合素质。



图 1.1 电子电路的发展史图

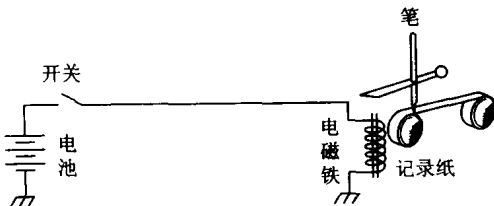


图 1.2 莫尔斯发明的电报机原理示意图(1832年)

种电报机的结构极其简单,使用的是由伏打于1800年发明的电池,用开关通/断远处的电磁铁,使笔上下移动并在记录纸上记下信息。

另外,1876年贝尔申请的电话专利非常接近这种形式,电话中开关使用磁性送话器,电磁铁使用磁性扬声器。其后,送话器使用改进型的炭粒送话器,这种送话器如今仍在使用。

图1.3所示为1895年马可尼进行无线通信的原理示意图。图中,电池或发电机供给线圈电流,开关使线圈中电流断续流通,由变压器产生的高电压形成火花放电,产生的电磁波传送到空中,通过接收方的粉末检波器接收到的电磁波使铁粉末磁化导电,这样就使电池电流断续流通,使电磁铁带动笔在纸上记录信息,由此可知,其基本结构与上述的莫尔斯电报机类似。

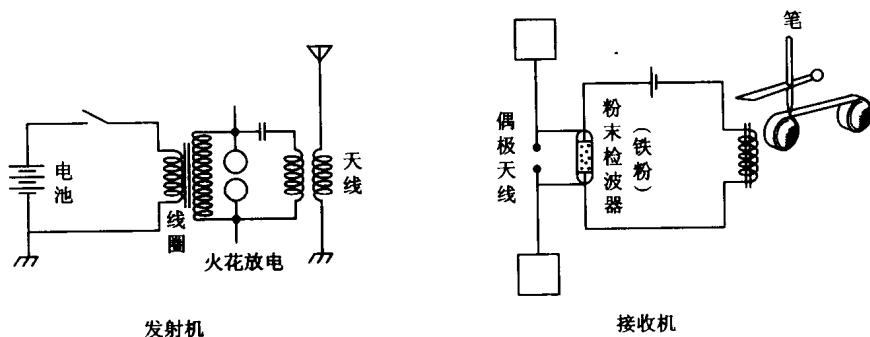


图 1.3 马可尼进行无线通信的原理示意图(1895年)

这种技术并没有停滞不前,其后,研究人员不断地发展与改进了这种技术,并用作电磁继电器式计算机,经历了磁放大器、磁鼓、磁线、磁带与磁板等的应用,现在作为磁盘、光磁盘、DVD等仍用于计算机外围设备与图像记录器中。另外,弹性表面波滤波器(SAW)等也属于这种范畴。

电桥与过渡现象

编者认为,在电路理论中都学习过惠斯通电桥等各种桥路与拉普拉斯变

换等过渡前者是为了避免莫尔斯电码判断的繁杂性而发明的各种指针式的电报装置,其中也是在长距离通信技术的竞争中得以发展的,后者是在火花放电的无线通信中,作为延长通信距离,使频率稳定所采取的各种措施及发明得以发展。现在电气专业的学生的头脑中有关理论体系的概念,以及实际实现这种想法的必要性及方法而发展起来的概念有很多。从形成的概念到谋求科学的体系化这就是工程学,但考虑将科学应用何处也是工程学的重要内容。

1.1.2 第一代半导体即二极管与矿石检波器

以无线通信为契机,根据高灵敏度接收电磁波信号的需求,开发了替代粉末检波器的接收检波器,即在磷青铜天然矿石上安装有触针的检波二极管。图 1.4 示出在日本无线电话中使用的矿石检波器,改变触针的位置就可提高检波灵敏度。这种二极管是在锗上安装触针的锗二极管,其后发展为合金、pn 结二极管。此外,利用硒的光电效应的二极管也获得了快速发展,利用适宜的材料,在适当的位置,利用各种光电效应制成的二极管列举如下:

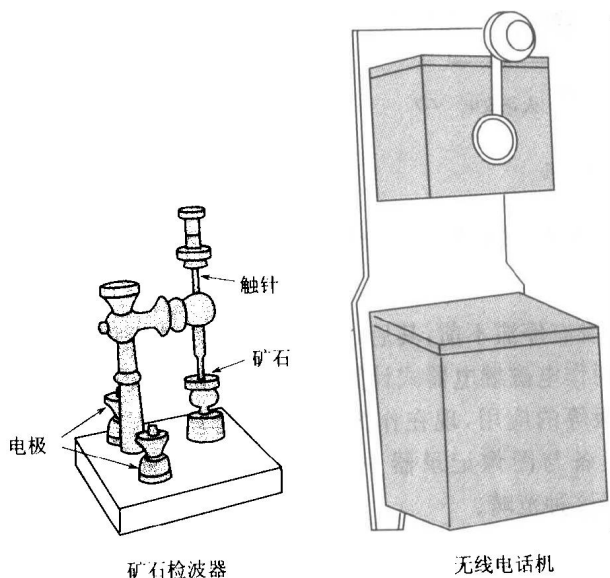


图 1.4 日本原始的无线电话机与矿石检波器(1912年)

已获得广泛应用的功率和高频二极管有锗二极管、银键二极管、隧道二极管、晶闸管、变容二极管、稳压二极管、pin 二极管、肖特基势