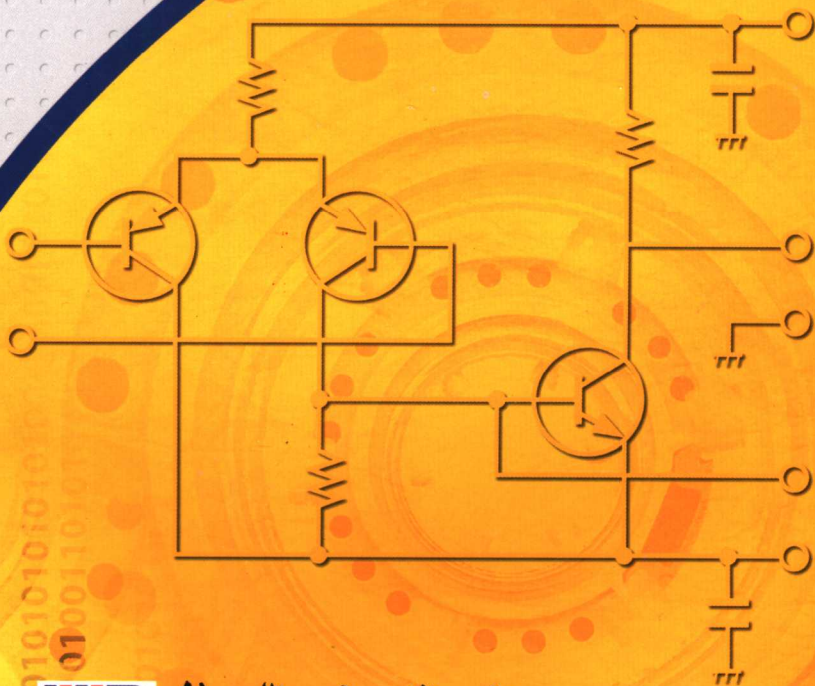


图解实用电子技术丛书

晶体管电路 设计与制作

单管、双管电路以及各种晶体管应用电路

[日] 黑田 彻 著
周南生 译



科学出版社

www.sciencep.com

图字: 01-2006-0590 号

内 容 简 介

本书是“图解实用电子技术丛书”之一。本书首先对各种模拟电路的设计和制作进行详细叙述;然后利用可在微机上使用的模拟器“SPICE”对设计的结果进行模拟。书中介绍了各种电路印制电路板的实际制作,以及电路特性的测量,并对电路的工作机制进行了验证。

全书分为两部分。第一部分介绍单管和双管电路,主要目的是理解晶体管的基本工作机制。第二部分介绍各种晶体管应用电路,包括矩形波振荡器,射极跟随器,宽带放大器,电子电位器,OP放大器,带自举电路的射极跟随器,Sallen-Key型低通滤波器,带隙型稳压电路,三角波→正弦波变换器,低失真系数振荡器,移相器,串联调节器,斩波放大器等。

本书可供电子电路设计有关专业的工程技术人员、学生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

晶体管电路设计与制作/(日)黑田彻著;周南生译. —北京:科学出版社, 2006

(图解实用电子技术丛书)

ISBN 7-03-017497-6

I. 晶… II. ①黑…②周… III. 晶体管-设计-制作 IV. TNT10.2-64

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第069771号

责任编辑:赵方青 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:李 力

北京东方科苑图文有限公司制作

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

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年8月第一版 开本:B5(720×1000)

2006年8月第一次印刷 印张:17 1/2

印数:1—4 000 字数:258 000

定 价: 37.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<明辉>)

前 言

在前些日子总有些不愉快的话题,惟一明快的话题就是计算机降价了。1000 美元的计算机也只是转瞬的事情。现在 500 美元的计算机也可列入购物计划了。如果将零售的 CPU、存储器、主印制电路板等收集起来进行计算机组装,则性能价格比要比厂家的产品更高。然而遗憾的是,在最新的电子设备中,只是一些看不见实质内容的“黑盒子”,计算机的印制电路板也是如此。观察一下印制电路板,能够看到的也只是大规模集成电路(LSI)模块的型号,电路图显然是没有的。

在集成电路(IC)出现以前,就连家庭用的电视机都附带有电路图。当时,印制电路板上元器件与电路图上的元器件是一一对应的。所以,每当观察印制电路板时,就会产生想进一步了解电路工作机制的冲动。在现在,可以被称为经验丰富的老一代电子电路工程师,大多是那些以少年时代的这些体验作为契机,而成为电路设计专家的幸福的人。

但在今天,人们认为,大部分的电路设计都是将现成的 LSI 进行适当组合的枯燥无味的工作。而且,也缺乏面向业余无线电爱好者和不熟练的硬件工程师的参考书。所以当前复杂的电路是如何从教科书中的基本电路发展而来的,其要领也难以找到。在年轻人的心目中,或许有“电路设计是没有魅力”的想法。其原因是,除非受电路规模的制约,由于 IC 的出现,系统被无止境地扩大化的缘故。但是我不认为现代的大规模电路的设计与分立半导体器件时代的设计有根本的差别。如同公司的组织,首先按工作性质划分成部,而各部门再细分为科室、班组一样,优秀的电子电路具有明确的层次结构。就像是一些大企业,各科的人员有几人至几十人那样,模拟 LSI 的内部电路的终端模块也会由几管至几十管的晶体管组成。因此,关于终端模块的电路设计,在过去与现在都没有根本的差别,终端模块的电路规模大约是 OP 放大器 IC 的内部电路的程度。

因此,如果掌握能设计 OP 放大器那种程度的设计技术,则无论多么复杂的电路都是所向无敌的。那么用什么样的方法来掌握技术呢?实际上有所谓“一箭双雕”的方法,即在培养技术的同时,也可体会到电路设计的乐趣。其方法就是用分立晶体管实际制作小规模电路。

本书是在融入上述想法而写成的发表于《晶体管技术》1996 年 4 月号专刊《7 管晶体管》的基础上,增加了两种由于版面的原因当时没有登载的电路和新制作的 6 种电路。新制作的 6 种电路如下:

- 带隙型稳压电路
- 三角波→正弦波变换器
- 低失真系数振荡器
- 移相器
- 串联调节器
- 斩波放大器

包括增加的电路在内,各种电路都是由 10 管以内的晶体管或分立的 FET 组成。也包含用一部分 OP 放大器和 7AHC 型的 CMOS IC 的电路。

以上所列举的所有电路的设计与制作都按下列顺序进行:

- ① 用 SPICE 对电路工作进行模拟;
- ② 实际制作印制电路板;
- ③ 测量特性,并进行工作机制验证。

这次增加的内容特别以负反馈为重点,对于电路的稳定性问题也进行了详细的说明。

低失真系数振荡器的失真系数是在 0.000 1% 以下,具有非常好的实用性。对于“三角波→正弦波变换器”的制作,从理论与实验两方面对差动放大器的失真系数进行了分析。在“斩波放大器”一节中,提出了低频晶体管的模拟和 FET 的开关工作等内容。在附录中,还介绍了印制电路板的简单制作方法。

最后,对各位读者,对在策划和编辑本书过程中给予帮助的小串伸一先生,以及给予再版的 CQ 出版株式会社深表谢意。

黑田 彻

目 录

绪 论	1
0.1 现在制作分立晶体管电路的原因	1
0.2 电路设计的乐趣	2
0.3 电路进化论	3
0.4 SPICE 模拟的应用	5
0.5 本书编写方针	5
0.6 本书中列举的电路	5

第一部分 晶体管的基本特性及 单管、双管电路

第 1 章 晶体管的基本特性	11
1.1 PN 结二极管的结构和特性	11
1.1.1 基础知识	11
1.1.2 电特性	12
1.1.3 SPICE 模拟	13
1.2 晶体管的种类、结构、特性及工作机制	15
1.2.1 种类与结构	15
1.2.2 基本特性	21
1.2.3 温度特性	22
1.2.4 最大额定值	24
第 2 章 单管电路的设计与制作	28
2.1 最简单的单管放大器	28
2.1.1 学习“老古董电路”的理由	28
2.1.2 将电流变化变成电压变化	28
2.1.3 用正弦波进行研究	29
2.2 直流工作解析	29

2.2.1	“直流工作”的概念	29
2.2.2	确定所用的晶体管	29
2.2.3	确定集电极电流	29
2.2.4	确定 I_B 与 R_B	30
2.2.5	SPICE 模拟	30
2.3	交流工作解析	32
2.3.1	“交流工作解析”的概念	32
2.3.2	ΔV_{BE} 与 ΔI_B 关系	32
2.3.3	ΔI_C 与 ΔV_{BE} 关系	33
2.3.4	电压增益计算	34
2.3.5	用 SPICE 验证	34
2.4	h 参数	37
2.4.1	h_{fe}	37
2.4.2	h_{ie} 与增益 A_V	37
2.4.3	π 形模型与 h 参数等效电路	38
2.5	三种类型的接地形式	38
2.6	最简单的单管放大器的缺点	40
2.7	单管反相放大器(之一)	41
2.7.1	稳定化的原理	42
2.7.2	工作点和器件常数的计算	42
2.7.3	用 SPICE 进行作验证	43
2.7.4	制 作	44
2.7.5	测 量	46
2.8	单管反相放大器(之二)	48
2.8.1	R_{B1} 和 R_{B2} 的确定	50
2.8.2	R_C 的确定	51
2.8.3	用 SPICE 进行验证	51
2.8.4	制作与测量	54
2.9	交流负载和直流负载	56
2.9.1	交流负载线	56
2.9.2	利用 NFB 改善失真系数	57
2.10	共集电极电路	59
2.10.1	射极跟随器	59
2.10.2	特 点	59
2.10.3	制 作	60

2.10.4 利用 SPICE 进行验证	61
2.11 Sallen-Key 型高通滤波器	64
2.11.1 巴特沃思特性高通滤波器的设计	65
2.11.2 电路设计	66
2.11.3 过去的一个元器件要承担多种任务	66
2.11.4 实际电路	66
2.11.5 SPICE 模拟	68
2.12 双 T 型正弦波振荡器	69
2.12.1 双 T 电路的概念	69
2.12.2 实际电路	71
2.12.3 SPICE 模拟	72
2.12.4 实测数据	74
2.13 反相晶体管	75
2.13.1 反相晶体管是否能工作	75
2.13.2 SPICE 模拟	75
2.13.3 与齐纳二极管的密切关系	76
2.13.4 要注意局部的击穿	77
2.14 雪崩模式张弛振荡器	77

第 3 章 双管电路的设计与制作

3.1 双管反相放大器	79
3.1.1 双管电路的设计方针	79
3.1.2 工作点的计算	80
3.1.3 增益的计算	81
3.1.4 制 作	82
3.1.5 自 举	82
3.2 厄利效应	84
3.3 双管非反相放大器	86
3.3.1 古典电路	86
3.3.2 去掉救生圈	87
3.3.3 两个讨论题	88
3.4 混合 π 形模型	93
3.4.1 SPICE 能对晶体管工作特性进行更准确的 模拟	93
3.4.2 影响频率特性的因素	94

3.4.3 过渡频率 f_T 和渡越时间 τ_F	96
3.5 双管射极跟随器	97
3.5.1 达林顿射极跟随器	97
3.5.2 不同极性的射极跟随器的串联连接	97
3.5.3 互补射极跟随器	97
3.5.4 不同极性二级射极跟随器的制作	98
3.5.5 减少振荡的对策	98
3.5.6 易于振荡的理由	99

第二部分 晶体管应用电路

第4章 3~5管电路的设计与制作	105
4.1 OP放大器	105
4.1.1 概念	105
4.1.2 原理电路	106
4.1.3 差动放大电路	107
4.1.4 3管OP放大器的注意要点	108
4.2 矩形波振荡器	110
4.3 3管射极跟随器	113
4.3.1 增加电流镜像电路	113
4.3.2 设计	113
4.3.3 测量	115
4.4 4管宽带放大器	116
4.4.1 米勒效应	116
4.4.2 解决米勒效应的电路	117
4.5 电子电位器	120
4.5.1 工作原理	120
4.5.2 改进后的电路	121
4.6 带有自举电路的射极跟随器	125
4.6.1 空载电流、失真、A类工作	125
4.6.2 改良后的电路	127
4.6.3 由自举电路来代替恒流电路	128
4.6.4 相位补偿	128
4.7 Sallen-Key型低通滤波器	131
4.7.1 利用4管射极跟随器制作低通滤波器	131

4.7.2 下垂的原因	132
4.8 5管 OP 放大器	133
4.9 由 5 管 OP 放大器组成的维恩电桥型正弦波振 荡器	135
4.9.1 基本电路	135
4.9.2 振幅的稳定化	135
4.9.3 SPICE 模拟	137
第 5 章 6 管以上的电路设计与制作	141
5.1 8 管脉宽调制电路	141
5.1.1 PWM 电路	141
5.1.2 解调	142
5.2 6 管射极跟随器	144
5.2.1 即使是低负载电阻,也具有良好失真系数特性 的互补射极跟随器	144
5.2.2 失真系数的实测	146
5.3 7 管高速宽带放大器	148
5.3.1 渥尔曼放大电路	148
5.3.2 折叠渥尔曼电路	149
5.3.3 7 管高速宽带放大器电路的结构	149
5.3.4 频率特性	150
5.3.5 转换速率	151
5.4 10 管大输出电流放大器	154
5.4.1 结型 FET	154
5.4.2 参数的代入	156
5.4.3 电路的说明	158
5.5 8W 功率放大器	162
5.5.1 设计制作功率放大器	162
5.5.2 电路说明	163
5.5.3 输出级的设计	163
5.5.4 散热设计	165
5.5.5 偏压的温度补偿	166
5.5.6 稳定化线圈	167
5.5.7 空载电流的调整	167
5.5.8 频率特性	168

5.6 使用 FET 可变电阻电路的低失真系数振荡器	173
5.6.1 FET 构成的可变电阻器	173
5.6.2 低失真系数的正弦波振荡器	178
5.7 串联调节器	187
5.7.1 串联调节器的概念	187
5.8 5 管串联调节器	189
5.8.1 构 成	189
5.8.2 基准电压	190
5.8.3 Q_2 的直流集电极电流	191
5.8.4 稳流电路	192
5.8.5 达林顿连接	194
5.8.6 过电流保护电路	194
5.8.7 散热器与热阻	196
5.8.8 防止振荡的对策	199
5.8.9 模 拟	209
5.8.10 印制电路板	210
5.8.11 实测特性	212
5.9 移相器	213
5.9.1 使用 OP 放大器的移相器	213
5.9.2 移相器的用途	214
5.9.3 关于转移函数	217
5.9.4 阻 抗	219
5.9.5 移相器的转移函数	221
5.9.6 5 管晶体管的 2 级移相器	223
5.9.7 CE 分割型移相器	224
5.9.8 电路组成	225
5.9.9 模拟与实测特性	225
5.9.10 印制电路板	227
5.10 三角波→正弦波变换器	228
5.10.1 函数发生器	228
5.10.2 电路组成	229
5.10.3 模 拟	230
5.10.4 差动放大电路的集电极电流-差动输入电压 特性	231
5.10.5 印制电路板与实测特性	236

5.11 带隙型稳压电路	237
5.11.1 齐纳二极管的缺点	237
5.11.2 带隙型稳压电路的原理	238
5.11.3 实用电路	241
5.11.4 模拟与实测特性	242
5.12 斩波放大器	244
5.12.1 直流放大器的漂移	244
5.12.2 斩波放大器的原理	245
5.12.3 4管斩波放大器	246
5.12.4 变压器的模拟	247
5.12.5 斩波放大器的模拟	252
5.12.6 印制电路板	254
5.12.7 实测特性	255
附 录 印制电路板的简便制作法	259
1. 经济且快速——手工画法	259
2. 需准备的材料	259
3. 电路板的制作	260
4. 描画厚覆盖膜的方法	263
参考文献	265

绪论

0.1 现在制作分立晶体管电路的原因

“唉！为什么？”看过本书标题的各位读者可能都有这种疑问。实际上，在与编辑谈话时我也这么想过。现在还有人用分立半导体器件来组装电路吗？有 OP 放大器还使用分立晶体管，有什么优点吗？

我们的谈话内容，大致是这样的：

“现在的年轻人不喜欢手握电烙铁进行实际制作一些电路之类的麻烦工作。终究是对制作物件没有兴趣。”

可能就是这样的，无论如何，现在的潮流是由硬件转向软件。

谈话继续。“年长的工程师们，从孩童时代开始就喜爱电子方面的工作。按照当时面向初学者的无线电杂志（如《无线电初步》、《无线电的制作》等）上刊登的电路图和实际布线图，自己动手制作各种各样的电路。”

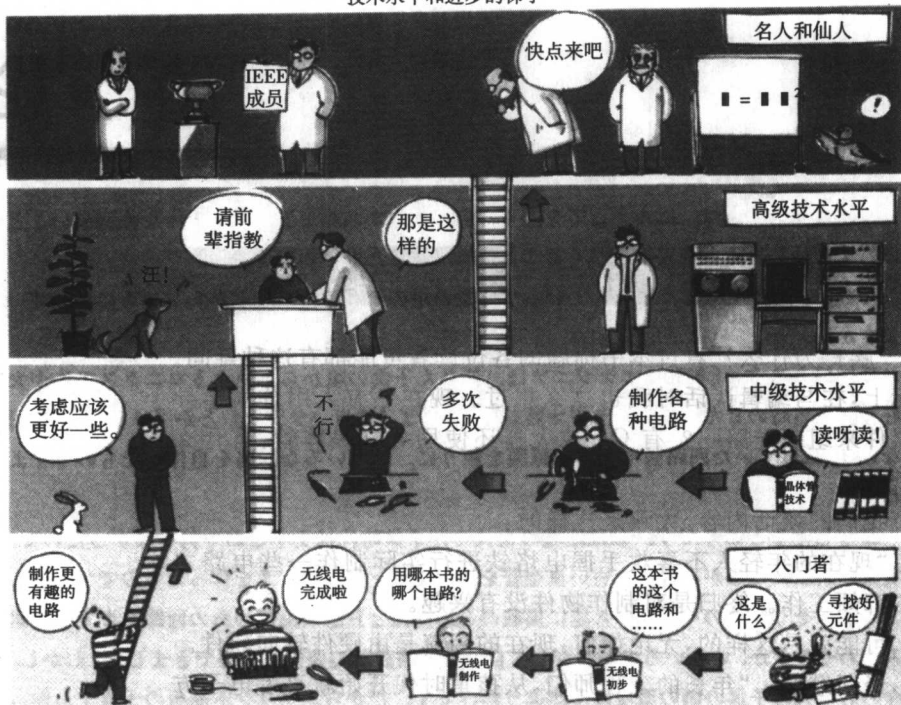
确实如此。我属于顽固的一代，在孩童时代，由于物资匮乏，就曾使用已扔在仓库里的旧真空管制作放大器和收音机。

“是这样的。在那个时期，将 A 杂志刊登的这种电路与 B 杂志刊登的那种电路各取一半进行组合，或者进行各种改装，很自然地就能体会到电路设计的要领。但是，现在的年轻人在少年时代的环境与那时是完全不同的。所以，就连一块印制电路板都没有制作过的人都专门来学习电子学，然后来到公司。因此，将这样的新手分配到模拟电路设计岗位，尽管在计算上没有问题，但实际上可能制作出的电路会不满足工作的要求。于是，他本人就立即失去干劲，变得越来越讨厌模拟电路。”

确实如此，必须立即终止这种恶性循环。

“所以我们才要商量，策划。对于模拟电路一点也没有兴趣的年轻人，包含未设计过模拟电路的人，让他们体会到模拟电路设计

技术水平和进步的梯子



的乐趣,进而传授电路设计的要领,或者介绍模拟电路设计中特有的独到见解和考虑方法。都知道,现在不是分立半导体的时代。但是,当想使用 OP 放大器时,如果不充分了解其内部电路工作机制,在成千上万的 OP 放大器中,挑选哪一种 OP 放大器好呢?可能连判断能力都没有。

好像是走回头路,又一次回到了分立半导体电路上,采取从单管、双管的基本电路出发,阶梯式地增加管子数量,然后接近于实用电路的途径。并且,对于不知道分立半导体电路的年轻人,仅用几个管子就能组装出这样的电路,我想一定有新鲜感。”

以上就是那次谈话的大致内容。基于这种考虑,我是非常赞同的。所以当让我来编写这本书时,我就立即回信表示愿意接受。

0.2 电路设计的乐趣

进行电路设计,并实际制作电路的乐趣可以列举如下:

(1) 思考问题及推敲计划的乐趣。

图(2)工作的乐趣。
 图(3)使完成后的电路进行动作的乐趣。
 更为高兴的是,自己设想的点子(idea)的正确性能够得到证明。如果这是谁也没有想过的新奇点子,就能成为专利的对象。如果是价值很高的电路,则发明者将青史留名。

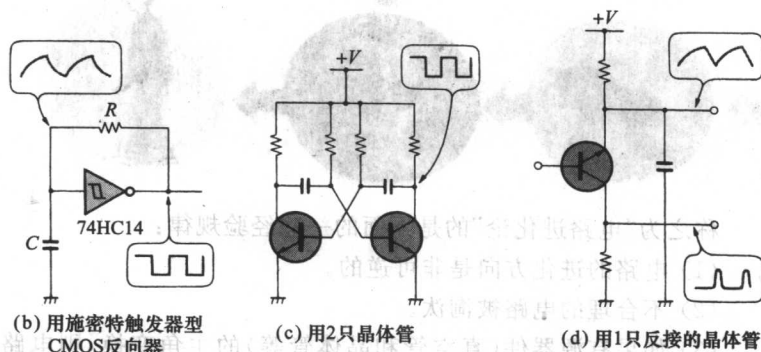
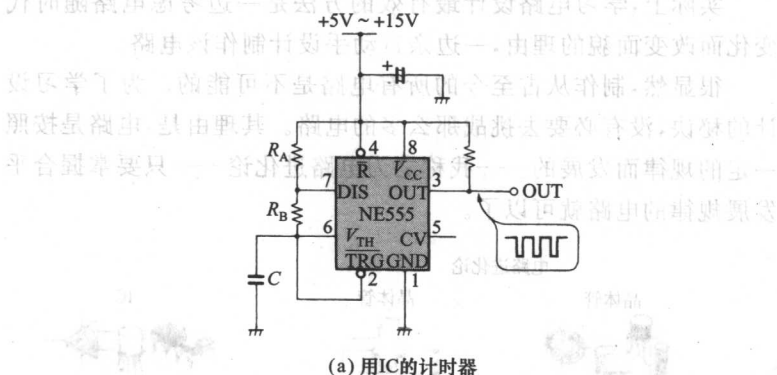


图 0.1 晶体管也能实现与 IC 一样的机能

在过去,提出新的电路而产生一个企业的事也并不罕见。众所周知的一个例子就是惠普公司,其创立者 W. Hewlett 和 D. Packard 师从斯坦福大学的 F. E. Terman 教授,开发了有名的“Terman 正弦波振荡器”,并进行商品化,从而奠定了 HP 公司的基础^[1]。

0.3 电路进化论

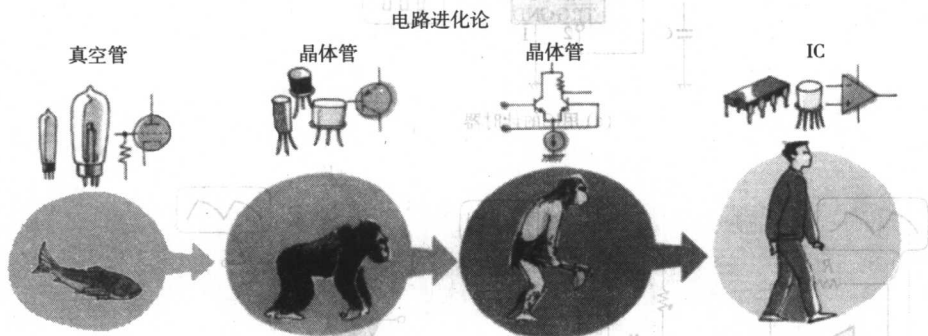
即使极力主张电路设计是有乐趣的,但对于不懂设计要领的人来说,仍如同“望梅止渴”一样。

我是屡经失败才学会了设计方法,为了掌握它花费了很长时间。我不会这样劝你:“只要学习教科书中的分立半导体电路就可以。”电路太古老了。电路是有生命的,所以随着时代的变迁电路也在改变面貌。

学习老电路,在实际中也不起作用。

实际上,学习电路设计最有效的方法是一边考虑电路随时代变化而改变面貌的理由,一边亲自动手设计制作该电路。

很显然,制作从古至今的所有电路是不可能的。为了学习设计的秘诀,没有必要去挑战那么多的电路。其理由是,电路是按照一定的规律而发展的——我称之为电路进化论——只要掌握合乎发展规律的电路就可以了。



称之为“电路进化论”的是下面的一些经验规律:

- (1) 电路的进化方向是非可逆的。
- (2) 不合理的电路被淘汰。
- (3) 如果有源器件(真空管和晶体管等)的主角变换,则电路方式的主角也随之发生变换。
- (4) 只有能隐匿有源器件的缺点,发挥其优点的电路才能生存下来。
- (5) 系统一旦灭绝,复活的可能性极低。
- (6) 革新的电路方式会发生突然的变异。

用这种电路进化论的观点能够很好地说明在过去 30 年间,晶体管电路方式的演变历程。

例如,现在在低频放大电路中是不使用变压器的,其理由是,变压器是真空管及接收机中必须使用的部件,根据规律(3),它被排除了。所以不必深入学习使用变压器的 B 类推挽电路。

相反,从真空管时代到现在都使用差动放大电路和渥尔曼放

大电路。其理由是满足了规律(4)的缘故。

另外,舍弃现在的电路而回到30年前的老电路,可以说是退步,为什么这么说?因为它违背了规律(1)。

0.4 SPICE 模拟的应用

电子电路模拟器 SPICE 对于学习电路设计是非常有用的。常说“一年‘数字’,十年‘模拟’”。意思就是,培养模拟电路技术人员要花10年时间。

对于模拟电路,即便倍加注意地进行设计,也总会有一些遗漏,所设计的电路总是很难如设想的那样地进行工作。自然而然地要做多次修改。

因此可以说,培养模拟电路技术人员的10年,其大半时间是手握电烙铁的时间。由于使用 SPICE,这个时间能大幅度地缩短。对于设计方法的学习也是同样的。

0.5 本书编写方针

(1) 对于沿着电路进化论发展而来的电路进行精选,并稍加改造,变成为现代电路。

(2) 应用 SPICE 模拟来理解晶体管的基本工作机理。

(3) 从电路设计阶段开始就使用 SPICE,在所给定的制约条件下,学习以获得更好的特性为目的的模拟电路设计技法。

(4) 明确晶体管模型的模型参数的意义与等效电路的相关性,对 SPICE 模拟器与实际电路的匹配性及差别进行考察。

(5) 实际制作精选后的电路,测量频率特性、脉冲响应和失真系数等,并验证电路设计的正确性。

内容是从“初步的初步”开始的。在电路设计方面需要电磁学、线性电路网络理论、电气数学等很多领域的知识。至于掌握到什么程度就够用,我想,在阅读本书过程中就能作出判断。

0.6 本书中列举的电路

本书中列举出音频/视频领域的放大电路与振荡(正弦波/矩形波)电路、滤波器等电路。为了能够提出好的(新的电路)电路,