

TURING

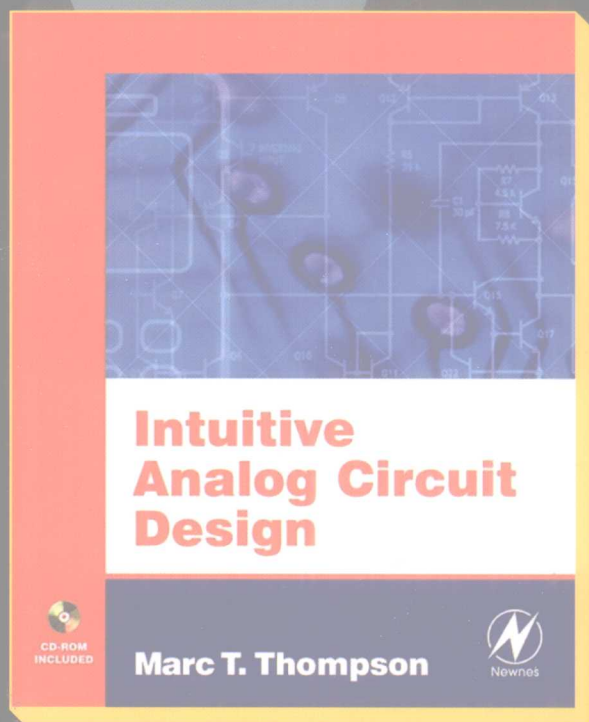
图灵电子与电气工程丛书

ELSEVIER
爱思唯尔

实用模拟电路设计

Intuitive Analog Circuit Design

[美] Marc T. Thompson 著
张乐锋 等译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

TN710.02
24

TN710.02
24

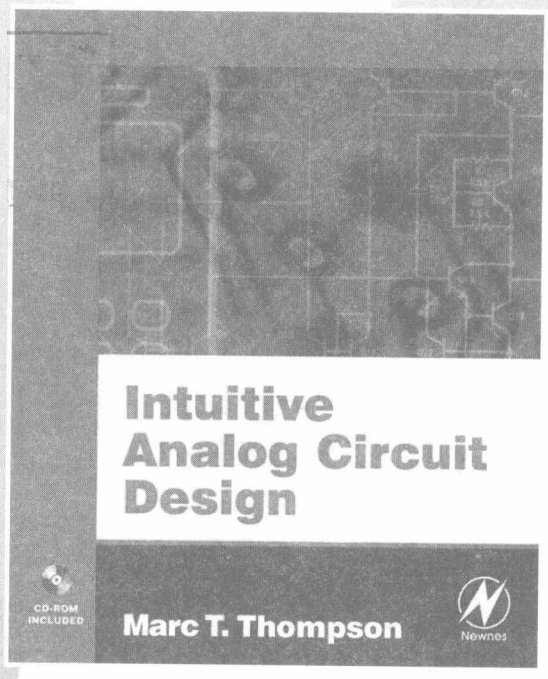
TURING

图灵电子与电气工程丛书

实用模拟电路设计

Intuitive Analog Circuit Design

[美] Marc T. Thompson 著
张乐锋 等译



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

实用模拟电路设计/ (美) 汤普森 (Thompson, M. T.), 著; 张乐锋等译. —北京: 人民邮电出版社, 2009. 2

(图灵电子与电气工程丛书)

书名原文: Intuitive Analog Circuit Design: A Problem-Solving Approach using Design Case Studies

ISBN 978-7-115-19235-6

I. 实… II. ①汤… ②张… III. 模拟电路—电路设计
IV. TN710.02

中国版本图书馆CIP数据核字 (2008) 第 181470 号

内 容 提 要

本书是Marc Thompson博士20年模拟电路设计和教学经验的总结, 讲述了模拟电路与系统设计中常用的直观分析方法。本书提出了“模拟电路直观方法学”, 力图帮助学生和设计人员摆脱复杂的理论推导与计算, 充分利用直观知识来应对模拟电路工程设计挑战。全书共分为16章, 内容涵盖了二极管、晶体管、放大器、滤波器、反馈系统等模拟电路的基本知识与设计方法。

本书深入浅出, 易学易懂, 既适合作为大中专院校的教材与教学参考书, 也可用作模拟电路设计人员的参考手册。

图灵电子与电气工程丛书

实用模拟电路设计

-
- ◆ 著 [美] Marc T. Thompson
 - 译 张乐锋 等
 - 责任编辑 舒 立
 - 执行编辑 马晓燕
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
 - 邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 北京艺辉印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 24
 - 字数: 568千字 2009年2月第1版
 - 印数: 1-3000册 2009年2月北京第1次印刷
 - 著作权合同登记号 图字: 01-2008-3336号
 - ISBN 978-7-115-19235-6/TN
-

定价: 59.00元

读者服务热线: (010) 88593802 印装质量热线: (010) 67129223

反盗版热线: (010) 67171154

版 权 声 明

Intuitive Analog Circuit Design: A Problem-Solving Approach using Design Case Studies by
Marc T.Thompson, Ph.D.,ISBN:0-7506-7786-4.

Copyright © 2006 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN:978-981-272-1099.

Copyright © 2009 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

3 Killiney Road

#08-01 Winsland House I

Singapore 239519

Tel: (65) 6349-0200

Fax: (65) 6733-1817

First Published 2009

2009年初版

Printed in China by POSTS & TELECOM PRESS under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由Elsevier (Singapore) Pte Ltd.授权人民邮电出版社出版。本版仅限在中华人民共和国（不包括香港特别行政区和台湾地区）出版及标价销售。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

译者序

模拟电路设计几乎无处不在，电力、交通、工业控制、信息技术、军事航空等领域都少不了它，模拟电路设计已成为电子技术类大中专学生的基本教学内容之一。本书作者Marc Thompson博士是模拟电路设计的一线教学人员，二十年孜孜不倦，积累了丰富的模拟电路教学经验。他同时又是模拟电路设计的一线工程师，拥有坚实的模拟电路实践经验。理论与实践紧密结合指导直观模拟电路设计，是本书的最大特色。译者在翻译本书的过程中，也深深地感受到作者的独具匠心、与众不同之处。本书既是很好的电路教学参考书，也是很好的电路实践参考书。

译者认为本书具有三大特点：理论讲述深入浅出、大量使用近似计算、电路实例恰到好处。作者在讲述二极管、晶体管、放大器的物理原理时，经常使用“思考性实验 (thought experiment)”和耳熟能详的类比方法，使得这些深奥的理论一下子直观地 (intuitively) 呈现在读者面前。作者在推导二极管的 V/I 关系曲线、晶体管的带宽和增益等过程中进行了大量的近似计算。开路时间常数和短路时间常数方法本身就是一种近似计算技术，使用这些近似处理方法，大大简化了模拟电路的数学计算，同时又保证了这些直观的近似结果的工程可靠性。电路设计实例在书中随处可见，有些例子本身就是作者的电路实践，设计难度由浅入深，设计结果尤可借鉴。我们相信，任何从事模拟电路设计教学的人们，任何希望能快速、准确地设计模拟电路系统的人们，都会从本书的阅读中受益匪浅，这也是我们愿意翻译该书的原因所在。

全书共分为16章，可以分为三部分。第1章与第2章为介绍性材料，第3章到第8章讲述二极管和双极性晶体管方面的知识，第9章讲述CMOS管和CMOS管放大器的基础知识，第10章讲述晶体管的开关效应，这些内容可以作为本书的第一部分。第11章讲述反馈系统的理论，第12章和第13章讲述实际运算放大器的设计，第14章讲述模拟低通滤波器的设计与实现，第15章讲述实际电路设计问题，这可以作为本书的第二部分，是前面10章基础内容的提高与应用。第16章主要是一些电路分析技巧，这可以作为本书的第三部分。读者可以有选择地阅读本书的内容。刚接触模拟电路设计的读者可以只阅读第一部分的基础内容，有模拟电路设计基础的读者可以深入学习第二部分的提高内容，增强设计复杂模拟电路的能力。读者可以根据自己的喜好来决定是否阅读第三部分的内容。

本书主要由张乐锋翻译，张鼎校对。此外，参与本书翻译的还有张鼎、何小威、闫志强、邓彬、林龙信、肖枫涛、马蓉、陈钢、杨明军、焦贤龙、岳虹、肖国尊等。Be Flying工作室负责人肖国尊 (http://blog.csdn.net/be_flying) 负责本书翻译质量和进度的控制以及翻译思想的指导，在此表示衷心感谢。

译文虽经多次修改和校正，但是由于译者的水平有限，加之时间仓促，疏漏及缺点、错误在所难免，我们真诚地希望同行和读者不吝赐教，不胜感激之至。

张乐锋

2008年6月22日

于国防科技大学

前 言

什么？又是一本模拟电路设计教科书？不，它可不仅仅是一本教科书。这本书更多地是要为一线的工程师和学生提供一本设计手册，以满足他们渴望多学习关于晶体管、二极管以及运算放大器的模拟电路设计与分析方面的实用技术的需要。同时，我更希望读者在阅读过程中能够发现，本书完美地结合了理论技术、设计实例以及测试结果。

我是一名工作在模拟与电力电子学领域一线的电子工程师，同时又在伍斯特理工学院（Worcester Polytechnic Institute, WPI）从事教学工作。

细心的读者只要对照本书各章的参考文献就会发现，我非常喜欢引用年代较为久远的文献资料。部分原因是这些早期著作与文章的作者们还没有计算机进行电路仿真，也无法在计算机上进行数值分析。而这些文献从多个方面给出了极其有用的近似计算方法（approximation）、直观分析方法（intuitive insight）以及用来解决较难的电路分析问题的不同方法。

读者对象

这本书是在我为伍斯特理工学院的研究生模拟电路设计课程编写的教学讲义的基础上编著而成的。参加这门课程的学生都学过晶体管、信号处理、伯德图等方面的本科生课程。此外，我还希望本书的内容对一线的模拟设计工程师（甚至数字设计工程师）能够有所帮助。

本书大纲

第1章与第2章为介绍性材料。第1章是本书的引言，同时介绍了模拟电路设计的发展动机，其中引用了一些精选的历史事件。第2章讲述后续章节中用到的重要的信号处理概念，以使读者们能够跟上作者的思路。

第3章到第8章讲述双极性器件的物理学原理、双极性结型晶体管（bipolar junction transistor, BJT）、晶体管放大器，以及用于带宽估计与开关速度分析的近似技术。

第9章讲述CMOS管和CMOS管放大器的基础知识。前面章节介绍的用于放大器设计的带宽估计技术也同样适用于CMOS管器件。

第10章讲述晶体管的开关效应。晶体管是如何实现导通和关闭呢？又如何估计它的开关速度呢？

第11章回顾反馈系统（feedback system）的基本知识以及设计稳定反馈系统的伯德图/相位裕度方法（Bode plot/phase margin）。

第12章和第13章讲述实际运算放大器的设计、使用和限制，包括电压反馈（voltage-feedback）以及电流反馈（current-feedback）放大器。

第14章讲述模拟低通滤波器设计的基本知识，包括巴特沃思（Butterworth）、切比雪夫（Chebyshev）、椭圆（elliptic）以及贝塞尔（Bessel）滤波器的无源梯形实现和有源实现。

第15章讲述实际电路设计问题，比如PCB版图设计规则、无源器件的使用和限制等。

第16章是一些有用的设计技术和设计技巧的大杂烩，这些内容又不适合放在其他章节，

所以作为独立的章节进行讲述。

一些说明性的分析问题以及MATLAB和PSPICE设计示例点缀在全书的字里行间，以帮助读者理解本书的内容。

致谢

我在这里要感谢麻省理工学院（Massachusetts Institute of Technology, MIT）的知名教授和助教们，他们向我传授了本书使用的许多模拟电路技术。他们包括Jim Roberge教授、Bill Siebert教授、Bill Peake教授、Marty Schlecht教授、Leo Casey、Tom Lee、Harry Lee教授、Campbell Searle教授、Amar Bose教授和Dick Thornton教授。

本书改编自我在伍斯特理工学院执教多年的模拟电路课程讲义。因此，这里还要感谢伍斯特理工学院以及它的学生和教职员们，他们直接或间接地为本书提供了帮助。再次感谢伍斯特理工学院的学生们，他们在课堂上提出了富有针对性的问题，仔细地阅读了课程讲义，并且指出了讲义中大量的印刷错误和含混不清的用词，间接地为本书提供了帮助。衷心希望本书在出版时已经完全修正了类似的错误和不当的用词，不会对读者造成误解。

感谢Elsevier公司的员工为本书成功出版提供的耐心帮助和技术支持。我希望我的朋友加同事Alexander Kusko博士能够收到这份诚挚谢意，是他审阅了本书的书稿，并且提出了许多有用的建议。也要感谢我的朋友Jeff Roblee博士，他从机械工程师的视角阅读了本书的书稿，提出了许多有用的建议。

书中的曲线图使用了MATLAB软件和Microsim公司的PSPICE 8.0版学生版软件进行绘制。

Marc T. Thompson
Harvard Labs
Harvard, Massachusetts
2005年10月

目 录

第1章 引言	1	3.3 漂移、扩散、复合和产生	36
1.1 模拟设计仍然必不可少	1	3.3.1 漂移	36
1.2 模拟集成电路技术早期发展历史	2	3.3.2 扩散	37
1.3 数字实现与模拟实现比较	5	3.3.3 产生和复合	40
1.4 模拟电路设计者有挑战也有乐趣	6	3.3.4 半导体内的总电流	40
1.5 命名规则说明	6	3.4 半导体的掺杂效应	40
1.6 内容说明	7	3.4.1 施主 (donor) 掺杂材料	41
1.7 参考文献	7	3.4.2 受主 (acceptor) 掺杂材料	41
1.8 美国专利	9	3.5 热平衡状态的PN结	42
第2章 信号处理基础知识回顾	10	3.6 施加正向偏置电压的PN结	44
2.1 拉普拉斯变换、传递函数和零点 点图	10	3.7 反向偏置二极管	47
2.2 一阶系统响应	11	3.8 理想二极管方程	47
2.2.1 一阶系统的低频和高频响应估计	13	3.9 二极管内的电荷存储	48
2.2.2 一阶系统的短时阶跃响应	15	3.10 正向偏置二极管内的电荷存储	49
2.2.3 一阶系统附加额外高频极点	16	3.11 双极性二极管的反向恢复	50
2.3 二阶系统	17	3.12 反向击穿	51
2.3.1 弹簧振子系统	18	3.13 二极管数据手册	52
2.3.2 一个二阶电路系统	18	3.14 肖特基二极管	54
2.3.3 品质因数 Q	21	3.15 本章习题	54
2.3.4 二阶系统的瞬态响应	22	3.16 参考文献	56
2.3.5 二阶电路系统附加额外的高频 极点	22	第4章 双极性晶体管模型	58
2.3.6 实轴极点分布间隔较大的二阶 系统	23	4.1 历史点滴	58
2.3.7 从传递函数的分母求解极点的 大致位置	24	4.2 基本NPN型晶体管	59
2.4 谐振电路	26	4.3 处于不同工作区的晶体管模型	61
2.5 使用能量法分析无阻尼谐振电路	26	4.4 双极性晶体管的低频增长模型	63
2.6 传递函数、零点极点图以及伯德图	28	4.5 双极性晶体管的高频增长模型	66
2.7 级联系统的上升时间	29	4.6 阅读晶体管数据手册	69
2.8 本章习题	29	4.6.1 大信号参数 (β_F 、 $V_{CE,SAT}$)	69
2.9 参考文献	32	4.6.2 小信号参数 (h_{fe} 、 C_{μ} 、 C_{π} 和 r_x)	69
第3章 二极管物理学、理想 (及非理想) 二极管	33	4.7 “混合 π ”模型的限制	73
3.1 绝缘体、良导体和半导体内的电流	33	4.8 本章习题	73
3.2 电子和空穴	34	4.9 参考文献	75
3.3 漂移、扩散、复合和产生	36	第5章 基本双极性晶体管放大器及其 偏置设置	76
3.3.1 漂移	36	5.1 晶体管偏置设置	76
3.3.2 扩散	37	5.2 某些晶体管放大器	79
3.3.3 产生和复合	40	5.2.1 共射极放大器	79
3.3.4 半导体内的总电流	40		
3.4 半导体的掺杂效应	40		
3.4.1 施主 (donor) 掺杂材料	41		
3.4.2 受主 (acceptor) 掺杂材料	41		
3.5 热平衡状态的PN结	42		
3.6 施加正向偏置电压的PN结	44		
3.7 反向偏置二极管	47		
3.8 理想二极管方程	47		
3.9 二极管内的电荷存储	48		
3.10 正向偏置二极管内的电荷存储	49		
3.11 双极性二极管的反向恢复	50		
3.12 反向击穿	51		
3.13 二极管数据手册	52		
3.14 肖特基二极管	54		
3.15 本章习题	54		
3.16 参考文献	56		

5.2.2 射极跟随器的增益、输入电阻和 低频输出电阻	84	9.3 MOS器件的 V_I 曲线	190
5.2.3 差分放大器	88	9.4 MOS器件的低频小信号模型	192
5.3 本章习题	93	9.5 MOS器件的高频小信号模型	193
5.4 参考文献	97	9.6 基本MOS放大器	193
第6章 开路时间常数方法与带宽估计 技术	99	9.6.1 源极跟随器	194
6.1 时间常数介绍	99	9.6.2 共源极放大器	194
6.2 晶体管放大器实例	103	9.6.3 共栅极放大器	195
6.3 本章习题	122	9.6.4 MOS电流镜	196
6.4 参考文献	124	9.7 本章习题	206
第7章 晶体管放大器高级技术	125	9.8 参考文献	207
7.1 复杂电路开路时间常数计算	125	第10章 双极性晶体管开关与电荷控制 模型	209
7.2 射随器缓冲电路的高频输出和输入 电阻	130	10.1 概述	209
7.3 自举电路	137	10.2 开关模型的推导过程	209
7.4 短路时间常数	143	10.3 反向放大区	210
7.5 极点分裂技术	152	10.4 饱和	211
7.6 本章习题	156	10.5 结电容	212
7.7 参考文献	159	10.6 电荷控制参数与混合 π 参数的关系	213
第8章 高增益双极性放大器和BJT 电流镜	161	10.7 从数据手册中获取结电容值	213
8.1 增大混合 π 模型的需求	161	10.8 制造商测试	215
8.2 基区宽度调制	162	10.9 电荷控制模型实例	215
8.3 从晶体管数据手册查阅晶体管参数	163	10.10 发射极开关	226
8.4 驱动电流源负载的共射极放大器	165	10.11 2N2222数据手册摘录	228
8.5 搭建电路模块	166	10.12 本章习题	232
8.5.1 双极性电流源的增长输出电阻	166	10.13 参考文献	236
8.5.2 射随器的增长输入电阻	167	第11章 反馈系统	238
8.5.3 电流镜	169	11.1 反馈系统基本知识与早期历史 点滴	238
8.5.4 发射极退化的基本电流镜	171	11.2 负反馈放大器的发明	238
8.5.5 “ β 助推器”电流镜	171	11.3 控制系统基础	240
8.5.6 Wilson电流镜	172	11.4 环路传输与干扰抑制	241
8.5.7 共射共基放大器电流镜	172	11.5 稳定性	242
8.5.8 Widlar电流镜	173	11.6 劳斯稳定性准则	243
8.6 本章习题	185	11.7 相位裕度与增益裕度测试	245
8.7 参考文献	186	11.8 阻尼系数和相位裕度的关系	245
第9章 MOSFET器件与基本MOS放 大器简介	188	11.9 环路补偿技术——超前电路与 滞后电路	246
9.1 场效应晶体管早期历史	188	11.10 反馈环路简介	247
9.2 基本MOS器件的定性讨论	188	11.11 附录：MATLAB脚本	264
		11.12 本章习题	268
		11.13 参考文献	269

第12章 运算放大器的基本电路结构与实例分析271	15.2 贴片电阻简介330
12.1 器件的基本工作特性271	15.3 电阻类型330
12.2 运算放大器LM741电路的简短回顾280	15.4 电容331
12.3 运算放大器的一些实际限制因素281	15.5 电感333
12.4 本章习题286	15.6 PCB设计问题讨论333
12.5 参考文献287	15.6.1 供电电源旁路334
第13章 电流反馈运算放大器289	15.6.2 接地平面335
13.1 传统电压反馈运算放大器及其“增益带宽乘积”常数289	15.6.3 PCB线宽335
13.2 传统运算放大器的转换速率限制290	15.7 接地平面上PCB走线的大致电感336
13.3 电流反馈运算放大器基础291	15.8 本章习题342
13.4 电流反馈运算放大器无转换速率极限294	15.9 参考文献343
13.5 电流反馈放大器的制造商数据手册信息297	第16章 实用设计技术与其他345
13.6 电流反馈运算放大器的更精细模型及其限制因素评论298	16.1 热电路345
13.7 本章习题299	16.2 热传导的稳态模型345
13.8 参考文献299	16.3 热量存储346
第14章 模拟低通滤波器302	16.4 使用热电路类比技术确定静态半导体的结温348
14.1 引言302	16.5 机械电路类比技术349
14.2 低通滤波器基础知识302	16.6 跨导线性原理353
14.3 巴特沃思滤波器303	16.7 无限长电阻梯形网络的输入电阻354
14.4 切比雪夫滤波器305	16.8 传输线基础(Transmission Lines 101)355
14.5 贝塞尔滤波器309	16.9 节点方程与克莱姆法则358
14.6 不同类型滤波器响应比较312	16.10 求解振荡模式361
14.7 滤波器实现314	16.11 尺度定律应用简介365
14.7.1 梯形滤波器(Ladder)314	16.11.1 几何尺度定律365
14.7.2 滤波器实现——有源方式317	16.11.2 鱼/船的速度(弗劳德定律)365
14.7.3 椭圆(“砖墙”)滤波器318	16.11.3 树上的果实366
14.7.4 全通滤波器320	16.11.4 挠矩(bending moment)366
14.8 本章习题326	16.11.5 身体的尺寸和热量(伯格曼定律)366
14.9 参考文献326	16.11.6 身高与跳跃(博雷利定律)367
第15章 无源元件综述与PCB设计案例研究328	16.11.7 步行速度(弗劳德定律)367
15.1 电阻328	16.11.8 电容367
	16.11.9 电感368
	16.11.10 电磁场的升力368
	16.12 本章习题369
	16.13 参考文献371

第1章 引言

本章概要

□ 本章介绍全书的知识体系与主题内容，叙述晶体管发展的简短历史，模拟集成电路的创新发明，以及运算放大器的发展。

1.1 模拟设计仍然必不可少

近年来，电路设计领域一个不可阻挡的发展趋势是“走向数字”，也就是说，出于所谓的“设计灵活性”的考虑，越来越多的信号转为用数字方式进行处理。然而，现实世界是个模拟空间，使用模拟处理方法便于电子电路与物理世界的互动。这里并不是有意忽视DSP以及其他数字技术的重要性，今天有许多模拟电路模块依然在使用，比如运算放大器、晶体管放大器、比较器、A/D和D/A变换器件、锁相环与电压参考源等，并且在可以预见的未来仍然还会继续使用它们。因此，模拟电路设计基本原理与高级技术的课程建设与教育培训需求依然存在。

模拟电路设计如此有趣的原因之一是它包含了诸多不同的学科领域。下面随机列出模拟电路设计这一广泛领域所涉及的部分学科。

- 模拟滤波器 (analog filter): 分立或梯形滤波器、有源滤波器、开关电容滤波器、晶体滤波器。
- 音频放大器 (audio amplifier): 功率运算放大器、输出级电路 (扬声器驱动器)。
- 振荡器 (oscillator): 包括LC振荡器、晶体振荡器、弛豫振荡器 (relaxation oscillator)、反馈振荡器 (feed back oscillator)、锁相环 (phase-locked loop, PLL)、视频解调。
- 器件制造与器件物理学 (Device fabrication and device physics): 金属氧化物半导体场效应晶体管 (Metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET)、双极性晶体管、二极管、绝缘栅极双极性晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT)、可控硅整流器 (silicon-controlled rectifier, SCR)、MOS控制型晶闸管 (MOS-controlled thyristor, MCT) 等。
- 集成电路制造 (IC fabrication): 运算放大器、比较器、电压参考源、锁相环等。
- 模拟/数字接口 (analog-to-digital interface): A/D和D/A器件、电压参考源。
- 射频电路 (radio frequency circuit): 射频 (RF) 放大器、滤波器、混频器 (mixer) 和传输线 (transmission line); 有线电视 (cable TV)。
- 控制领域 (control): 控制系统设计和补偿、伺服机构 (servomechanism)、速度控制。
- 电力电子 (power electronics): 该领域需要MOSFET驱动器、控制系统设计、印制电路板 (PCB) 布线、热学以及磁学方面的知识，电机驱动器，晶体管、MOSFET、IGBT以及SCR等器件的制造。
- 医用电子 (medical electronics): 仪表 (例如EKG^①、NMR)、(电击) 去纤颤器

^① EKG, 也称ECG, 全称是Electrocardio graphy, 即心电图。它是描绘心脏或心肌在心跳期间引起的电压图表。NMR 全称是nuclear magnetic resonance, 即核磁共振。它是一种广泛应用于医学、化学等领域的成像技术。——编者注

(defibrillator)、植入式医疗器件 (implanted medical device)。

- 仿真 (simulation): SPICE以及其他电路仿真器。
- PCB版图设计 (PCB layout): 该领域需要电感和电容效应、接地、屏蔽以及PCB设计准则方面的知识。

既然我们还是生活在数字处理越来越普及的现实世界,那么模拟设计者也必须熟悉数字处理的概念,使得我们可以在模拟处理与数字处理之间相互协作。在数字世界中,某些子系统的设计必须以对应的模拟系统为基础。数字滤波器设计就是如此,通常首先要设计相应的模拟原型滤波器 (analog prototype filter),然后经过模数转换,将原型滤波器变换到数字域。比如,可以采用双线性变换 (bilinear transformation) 方法将s域 (模拟,使用电感、电容元件与/或有源器件) 设计的原型滤波器变换为z域 (数字,使用增益元件与延迟元件) 的数字滤波器。

这项技术之所以出现,部分原因是,碰到滤波问题时,设计者通常觉得在模拟域工作起来会更加得心应手。设计二阶巴特沃思模拟滤波器是件非常容易的事情 (在很多教科书和模拟滤波器手册都可以找到),但是在数字域实现二阶巴特沃思滤波器则需要额外的设计步骤与其他仿真工具。

并且,在高频设计领域中,数字传输线或者PCB上的高速信号走线必须按照电压/电流行波 (traveling wave) 特性的分布式模拟系统来处理。数字集成电路密度不断增大,开关速度不断加快,凸现了额外的功率需求以及其他问题 [如地弹 (ground bounce)], 这都对良好的PCB设计提出了新的挑战。

其结果是:即使数字设计者也必须了解模拟设计方面的知识。

1.2 模拟集成电路技术早期发展历史

半导体器件的历史可以追溯到Julius Lilienfeld博士,他设计了多种MOS管结构 (如图1-1所示),拥有多项美国专利。在其中三个专利中,Julius Lilienfeld博士给出了MOSFET、MESFET以及其他MOS管器件的结构。

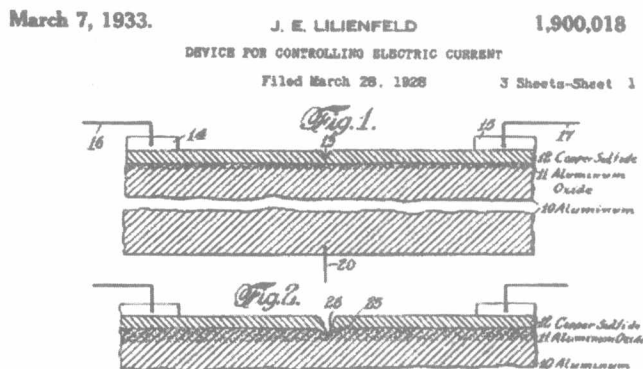


图1-1 摘自Lilienfeld的美国专利第1900018号^① (1933年)

50多年前,伴随着固态物理学的早期研究以及双极性晶体管的创新发明,人类开始进入双极性晶体管半导体时代。从那以后,模拟电路设计和器件制造不断取得重大技术进步。在

^① Lilienfeld连续获得了3个基本MOS晶体管结构的专利。

1947年至1948年间，Bardeen、Brattain和Shockley向人们展示了第一款双极性晶体管（如图1-2所示）^①。

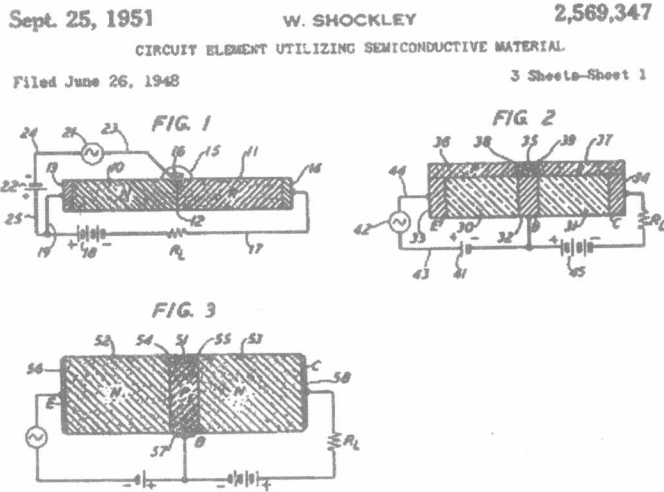


图1-2 摘自Shockley的美国专利第2569347号 (1951年)

大约在1959年，Fairchild Semiconductor公司^②和Texas Instruments公司^③的研究小组制造出世界上的第一块集成电路（integrated circuit, IC）（如图1-3所示）。TI公司因为拥有J.S.Kilby的第3138743号美国专利“Miniaturized Electronic Circuits”，因此声称是他们最先发明了集成电路，该专利是于1959年2月6日提出申请的。之后不久，Fairchild公司的员工申请了最早的平面IC专利（有人认为该设计比TI公司的更益于简化半导体集成电路的制造）。参见R.N.Noyce于1959年7月30日提出申请的第2981877号美国专利“Semiconductor Device-and-Lead”

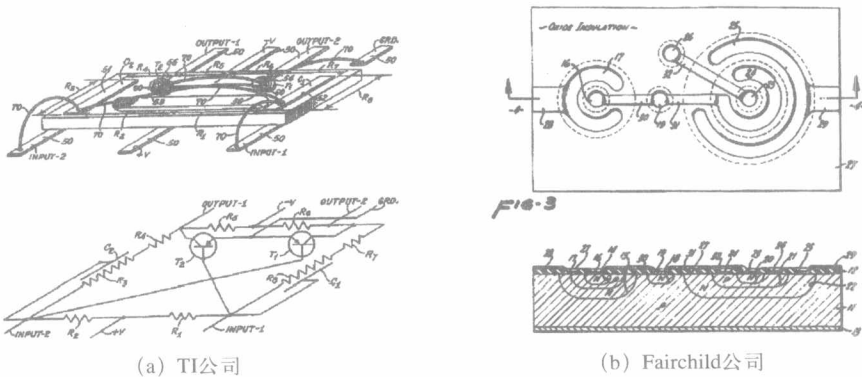


图1-3 TI公司和Fairchild公司相互竞争的集成电路专利^④图解

① 参见美国专利第2569347号，“Circuit Element Utilizing Semiconductor Materials”，该专利于1951年9月25日授予William Shockley。因为晶体管方面的相关发现，Bardeen、Brattain和Shockley分享了1956年的诺贝尔物理学奖。1956年12月11日，Shockley在诺贝尔颁奖大会上发表“Transistor Technology Evokes New Physics”演讲，对半导体晶体管的物理学原理进行了精彩描述。
 ② 简称Fairchild公司，常翻译为仙童半导体公司。——译者注
 ③ 简称TI公司，常翻译为德州仪器公司。——译者注
 ④ 专利的全文和图像可以从美国专利管理局的网站<http://www.uspto.gov>上获取。

Structure”。

这些集成电路的最小特征尺寸约为125 μm 。从那以后,随着IC的发明创造以及快速改进,器件的几何尺寸越来越小。Fairchild公司和Intel公司^①的创始人Gordon Moore提出的Moore定律预测集成电路内晶体管的封装密度大约每18个月提高1倍,集成电路过去30多年的发展趋势证明该预测相当准确。

目前,IC制造商正使用45nm的CMOS制造工艺,更小尺寸的晶体管很快就会到来。晶体管的尺寸越小就使得可以在给定的晶圆面积上封装越多的复杂结构。研究人员^②也正在积极地研究三维集成电路结构,试图将越来越多的功能封装到给定的晶圆体积内。

1958~1959年间,TI公司和Fairchild公司的研究人员发明集成电路之后,第一片集成电路运算放大器也于20世纪60年代中期的稍早时候问世。最早取得商业成功的运算放大器是Fairchild公司的 $\mu\text{A}709$ (1965年)和National公司(全称为National Semiconductor Corporation,美国国家半导体公司)的LM101(1967年),它们均是由富有传奇色彩的模拟电路先驱人物Bob Widlar^③设计的。这些器件的电压失调(voltage offset)为几个毫伏,单位增益带宽为1MHz左右,需要使用外部元件进行频率补偿。在此之后不久(1968年),工业上第一款内部补偿运算放大器,即Fairchild公司的 $\mu\text{A}741$ 问世。该器件一经推出,迅速占领市场,成为极为畅销的运算放大器。在 $\mu\text{A}741$ 的内部,通过金属氧化物技术将一个30pF的补偿电容集成到芯片内部。因为这个补偿电容集成到器件内部^④,所以 $\mu\text{A}741$ 在某种程度上比LM101更容易使用。这些单片集成运算放大器与更早时候设计的分立放大器(比如Philbrick公司的电子管放大器)相比较^⑤,具有更低的价格以及更高的性能,迅速取得了商业成功。

从那时起,新设计和新问世的运算放大器具有更低的电压失调和更宽的带宽等指标,输入电流、共模范围等其他指标也同时得到改进。20世纪70年代,FET(field effect transistor,场效应管)输入型运算放大器投入应用,它比双极性输入型运算放大器具有更低的输入电流特性。适用于高速应用场合的电流反馈运算放大器等新颖结构运算放大器也成功问世^⑥。今天,典型高速运算放大器的带宽已达数百兆赫兹^⑦。可以驱动扬声器以及其他笨重电阻/电感

① 世界上最大的CPU制造商,常翻译为英特尔公司。——译者注

② 参见Matrix Semiconductor公司信息和Thomas H.Lee的论文“A Vertical Leap for Microchips”。

③ 更早的运算放大器 $\mu\text{A}702$ 是由Widlar设计的,于1963年由Fairchild公司推出,但是从未取得大的商业成功。Widlar又埋头设计,在1965年左右推出了709;它是首款成本低于10美元的运算放大器。与Fairchild公司发生薪酬纠纷之后,Widlar加入美国国家半导体公司,在新公司里,他设计了LM101,稍后又改进设计推出了LM101A(1968年)。Widlar在论文“Design Techniques for Monolithic Operational Amplifier”中描述运算放大器LM101和709的细节与历史,本章最后注明了该项引述的参考文献。

④ $\mu\text{A}741$ 确实不需要外部补偿电容,这与它前面的LM101和709截然不同。 $\mu\text{A}741$ 的“即插即用”易用特性掩盖了它的明显不足:它在闭环增益大于1的多数应用中总是过补偿的。本书后续章节讲述了运算放大器拓扑结构的更多细节。Walt Jung在*IC Op-Amp Cookbook, third edition*一书的75~78页描述 $\mu\text{A}709$ 、LM101和741的细节与历史。

⑤ 比如,Philbrick公司的K2-W运算放大器,使用分立器件制造(晶体管),于1951年至1971年之间销售。它的小信号带宽约为300kHz,开环增益约为10 000倍,销售价格22美元左右。参见Bob Pease的文章“What’s all this K2-W Stuff, Anyway?”。Philbrick公司还制造了低输入电流分立运算放大器P2,它使用少量晶体管和其他分立元件搭建,销售价格200美元左右。参见Bob Pease的文章“The Story of the P2-The First Successful Solid-State Operational Amplifier with Picoampere Input Currents”,该文章收录在Jim Williams编辑的书*Analog Circuit Design Art Science and Personalities*中。

⑥ 电流反馈运算放大器确实没有恒定的增益带宽乘积,这与标准电压反馈运算放大器完全不同。

⑦ 参见美国国家半导体公司的LM6165,它的增益带宽乘积(GBP)达725MHz,凌力尔特公司(Linear Technology Corporation)的LT1818,它的增益带宽乘积达400MHz,或者模拟器件公司(Analog Devices, Inc.)的AD8001,它的增益带宽乘积达到600MHz。

负载的功率运算放大器^①也已存在，负载电流为几安培。具有微瓦级备用耗散功率的低功率运算放大器现在已非常常见。现在已可轻易地获取轨到轨^②运算放大器。

上述这些进步已经为模拟和数字信号处理器件掀开了新的应用商机和产品市场。现在，手机、有线电视和无线网络技术正驱动着射频模拟电路设计和微型手持功率电子产品的商务应用。低功率器件的应用得以设计出能够具有长时间电池寿命的电池供电器件。

1.3 数字实现与模拟实现比较

在许多电子系统设计中，与相对简单的模拟实现方法相比，在数字域实现各项功能时难度大、成本高、功耗多。比如对数放大器的设计，就可以利用众所周知的双极性晶体管工作在线性放大区域时的对数/指数电压-电流关系来实现对数放大功能^③，如式(1-1)所示。

$$I_C \approx I_s e^{\frac{qV_{BE}}{kT}} \quad (1-1)$$

$$V_{BE} \approx \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_C}{I_s}\right)$$

式(1-1)的电压-电流关系在晶体管集电极电流的多个幅度量级上都是成立的。因此，可以利用晶体管PN结来实现低成本的对数放大器(图1-4)。假设图中均使用理想晶体管和理想运算放大器，则该电路的输入-输出传递函数为

$$v_o = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{v_i}{RI_s}\right) \quad (1-2)$$

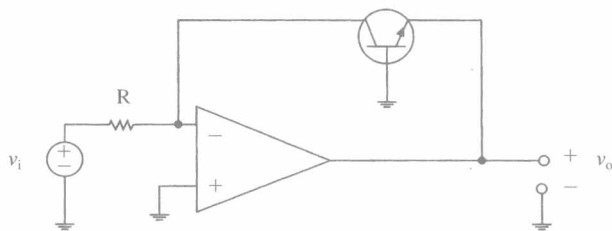


图1-4 简单对数放大器

该电路的输出电压与输入电压的自然对数呈比例关系。对数放大器的数字域实现方法则需要花费相当大的投入。该原理同样适用于模拟乘法计算^④。

双极性晶体管电压和电流之间的对数关系可用来实现模拟乘法器、除法器以及平方根电路。观察图1-5所示的电路。使用跨导线性原理(translinear principle)(本书后面将会讨论)，可以发现多个晶体管集电极电流之间的函数关系如式(1-3)所示

$$I_{C1}I_{C2}=I_{C3}I_{C4} \quad (1-3)$$

这就意味着可以按照式(1-4)的函数关系计算输出电流 I_o 。

① 美国国家半导体公司的LM12就属于功率运算放大器，它也是由Bob Widlar设计的。讨论LM12设计的优秀论文是IEEE上发表的“A Monolithic Power Op Amp”，本章的最后注明了该项引述的参考文献。

② “轨到轨”即“rail-to-rail”，指的是输出电压范围可达到电源电压的峰峰值。——编者注

③ 也可以利用该指数关系设计模拟乘法器，比如吉尔伯特单元(Gilbert Cell)，模拟除法器以及平方根和立方根电路。

④ 比如参见跨导线性原理。

$$I_o = \sqrt{I_1 I_2} \quad (1-4)$$

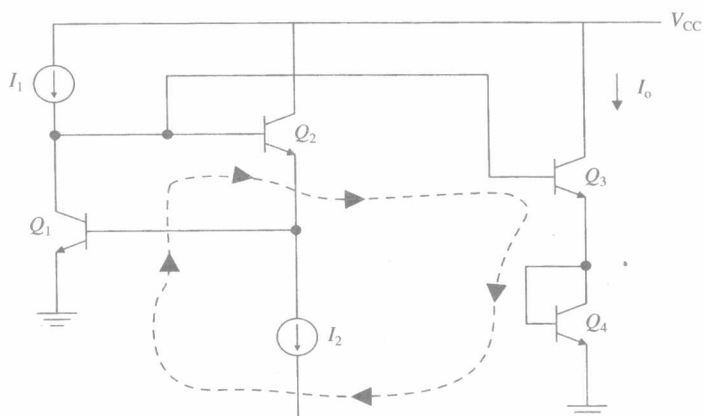


图1-5 跨导线性电路，该电路的输出电流等于两个输入电流乘积的平方根

下面考虑截止频率 (cutoff frequency) 为5MHz的5阶椭圆低通滤波器的设计问题。这是视频低通滤波器的典型指标。设计人员可以在数字域使用分立的硬件或者数字信号处理器件来实现该滤波器，也可以只使用少量的模拟分立元件来实现这个具有尖锐截止特性的低通滤波器^① (图1-6)。请注意，在该滤波器中，输入端的源电阻和端接电阻均为75Ω，以与常见的视频BNC (即同轴电缆接插件) 电缆的特征阻抗 (characteristic impedance) 保持一致。再重复一次，在数字域实现该滤波器时将极为复杂，在对滤波器的高频截止频率有明确要求时尤其如此。

1.4 模拟电路设计者有挑战也有乐趣

任何给定的模拟设计问题都不存在绝对唯一的正确答案，或者“完美”的设计。事实上，设计人员如果认为自己在模拟域找到了唯一的完美解决方案，那么，毫无疑问这是错误的。关于如何实现一个给定的电路功能，在模拟设计空间中存在无数种可能的解决方案。其设计挑战就在于，如何在给定的设计空间内同时满足成本、体积和性能等各种约束要求，这也是对模拟电路设计者的最高奖励 (希望确实如此)。

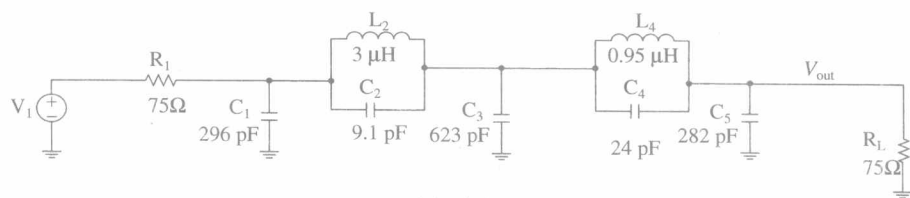
1.5 命名规则说明

本书采用了下面的信号命名规则。通常，运算放大器的晶体管端点电压包括直流工作电压 (DC operating point) 以及围绕该工作点的小信号变量 (small-signal variation) 两部分。以晶体管的基极-发射极电压为例，命名规则如式 (1-5) 所示。

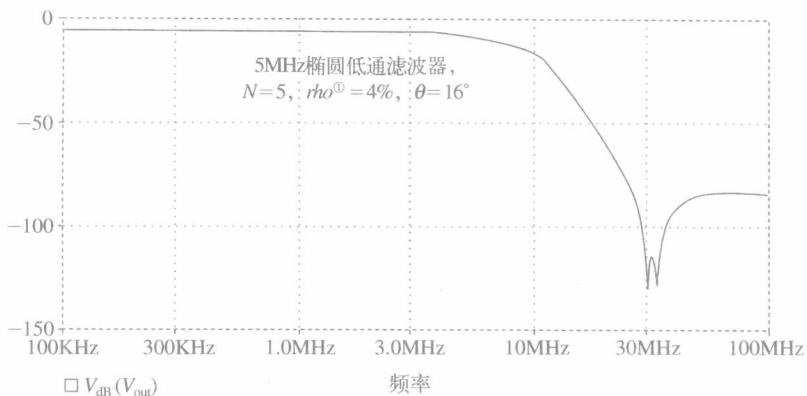
$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be} \quad (1-5)$$

这里 v_{BE} (v 小写, BE大写) 表示整体变量, V_{BE} (V 大写, BE大写) 表示直流工作电压, v_{be} (v 小写, be小写) 表示小信号变量。

^① 椭圆滤波器常用于模拟的视频抗混叠滤波电路中，该类滤波器要求具有非常尖锐的截止过渡带。椭圆滤波器和其他阶梯滤波器设计的表格形式参见Anatol Zverev的著作*Handbook of Filter Synthesis*。当然，读者还可以使用电感构建实用模拟滤波器。



(a) 电路



(b) 频率响应

图1-6 截止频率为5MHz的5阶椭圆阶梯形滤波器

1.6 内容说明

不可能在一本书内涵盖模拟电路设计各个方面的内容。不过，本书为读者提供了诸多重要的技术、技巧以及分析工具等内容的合集，在实际模拟电路设计中，这些内容将会非常有用。书中在必要时也给出理论技术的数学推导。在其他地方，使用了直观技术（intuitive technique）和类比方法（analogy）将解决方案从其他设计领域映射到模拟设计领域，希望能够避开大量繁杂的数学推导。

很明显，本书没有涵盖下列重要主题：

- 噪声
- JFET放大器
- 开关电容滤波器

本书在每章末尾都提供了教材、学术期刊等参考文献，可以帮助读者更深入地学习这些主题内容；此外，也对引用的某些参考文献进行了解释和评论。

我们假设本书的读者熟悉拉普拉斯变换、零极点图、伯德图、系统阶跃响应等概念以及差分方程的基本知识。本书第2章将对这些信号处理基本理论进行回顾和复习。这些基本知识对于读者理解后续章节的更为高级的主题内容是十分必要的。

1.7 参考文献

Analog Devices, *Nonlinear Circuits Handbook*, Analog Devices, 1976. 这本书很好地讲述了对数放大器与其他非线性模拟电路。

① rho是曲线饱满值。一般情况下，rho值越小，曲线就越平坦，rho值越大，曲线就越饱满。——编者注