

超大规模集成电路设计技术

——从电路到芯片

汪庆宝 宿昌厚 等编著



PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电子工业出版社

超大规模集成电路设计技术 ——从电路到芯片

汪庆宝 宿昌厚 等编

电子工业出版社

内 容 简 介

本书是一本学习集成电路设计的非常实用的书。它从基本单元电路的分析和计算出发,讨论了各种典型的数字和模拟集成电路的设计技术,直至超大规模系统集成电路,包括了从电路到芯片的设计技术。为了适应不熟悉集成电路制造的读者,本书以一定篇幅介绍了集成电路工艺以及电路的计算机辅助分析技术。本书的编写力求做到由浅入深、内容丰富和实用化,只要学过基本电路和一般电子技术基础,都能阅读本书。本书可供微电子技术、电子与信息技术、自动控制等专业作为大学生或研究生教材或参考书,也可供有关科技人员自学使用。

超大规模集成电路设计技术

——从电路到芯片

汪庆宝 宿昌厚 等编

责任编辑 魏永昌

电子工业出版社 出版

北京市海淀区万寿路173信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

电子工业出版社计算机排版室排版

北京市顺义县李史山印刷厂印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:32.5 字数:785千字

1996年9月第一版 1996年9月北京第一次印刷

印数:2000册 定价:48.00元

ISBN 7-5053-3465-4/TN·948

序 言

自从 1958 年美国德州仪器公司的 J. Kilby 发明集成电路以来,特别是在最近的二十多年,集成电路技术的发展,无疑已成为当代科技界最引人注目的焦点之一。事实上,可以毫不夸张地说,在当今世界上,无论是科学技术、经济、军事、还是人们的日常生活,都早已和它密切结合,息息相关。至于从事电子技术工作的各级科技人员,无论是在半导体微电子技术专业岗位,还是在有关线路、整机、系统等技术专业岗位工作,集成电路的基础知识,都已成为不可缺少的重要方面之一;集成电路的设计技能,也日益变成电子科技人员工作中的重要手段。而不是像半导体集成电路发展的早期,集成电路的设计仅仅只是从事半导体微电子技术专业的专业人员的事。

在科学技术飞速发展的今天,一门学科常常和其它学科相辅相成地发展,即通常人们所说的跨学科现象。集成电路的发明和发展,既推动了电子科学技术和其它科技部门的发展,也得益于相关学科的发展和进步。因此在目前的形势下,一方面从事其它电子技术的科技人员需要集成电路设计的知识,而从事半导体工作的人员和学习微电子专业的学生也需要加强电子线路方面的基础。

作为从事电子信息技术和微电子技术教学和科研工作的教师来说,通过我们近一些年来的亲身体会,包括对社会科研生产实践情况的调查研究,深深感到,一个好的集成电路设计者,除了半导体的基础外,还必须具有丰富的线路乃至系统设计的知识;而一个好的电路整机甚至系统设计人员,也常会碰到要设计他独特需要的专用集成电路(即 ASIC)的问题。本着为解决这一问题及改进教学的需要,我们在有关文献的基础上编写了这本书。它可以作为微电子技术专业从增强线路知识入手进行集成电路设计教学的教材,也可以作为电子信息类专业学习超大规模集成电路设计的教材。自然,它也可供有关方面的科技人员阅读,作为他们工作中的参考。阅读本书应当具备基本的电路理论和电子技术的基础知识。

本书共分八章。第一章主要讨论集成电路设计中首先要进行的步骤方法,即电路模拟。电路模拟即用计算机辅助分析电路,或计算机辅助电路设计。本章以著名的 SPICE 电路模拟软件为典型进行讨论,且围绕电路的核心——有源器件模型展开。书中讨论了集成电路之中用得最多的 MOS 器件模型和双极型器件模型,还介绍了集成电路中所用的无源元件模型。

第二章讨论集成电路中常用的基本单元电路模块。它们包括有源开关、有源电阻、电流源和电流阱、镜像电流源、电压基准、电流基准等。

第三章讨论集成电路中常用的模拟单元电路。模拟电路的最基本电路是放大器。因此,本章从基本的反相放大电路开始,讨论了放大器的基本电路结构和 MOS、双极型集成放大器的结构。然后,在此基础上进一步讨论了常用的差分放大器、小功率放大器(或输出放大器),以至可以作为单独集成电路出现的运算放大器和比较器电路。在运算放大器和比较器的讨论中,明显较多地引入了复杂电路设计的思想和方法。

数字逻辑电路是和集成电路关系最密切的领域。第四章讨论基本的单元数字逻辑电路。

本章从数字电路的基本特性开始,讨论了各种逻辑反向电路(反向门)、各种门电路、延时电路、以及数字电路中的功率耗散、噪声等问题。

第五章讨论数字电路系统的设计。书中讨论了常用的可编程逻辑阵列(PLA)、时钟电路、各种半导体存储器(静态、动态、随机、只读存储器)、以及用各种单元电路构成的系统,如有限状态控制器、微码控制器、以及微处理器等。

第六章从应用的角度讨论了模拟集成电路的设计。内容包括处理模拟信号常用的数/模和模/数转换器、有源滤波器、开关电容滤波器、调制器、振荡器等。为便于读者理解,还扼要地介绍了一些信号处理的概念。

在这些讨论中,为了便于读者更好地学习,都是电路设计与版图设计结合起来进行的。

对于电路专业的学生或主要从事线路技术工作的科技人员,我们还为之编写了介绍集成电路工艺的第七章,扼要地讲述集成电路制造的基本工艺知识。对于这些读者来说,本章将为他们清楚地理解集成电路设计中有关的工艺参数提供方便。

最后,第八章讨论了集成电路设计自动化的问题。集成电路,主要是大规模和超大规模集成电路的设计,依靠手工进行是不可想象的。在当今的集成电路设计中,出现了大量的自动设计技术和先进的设计软硬件工具(系统)。本章简单介绍这方面的基本知识和技术。

本书第一章由汪庆宝、谭慕端、刘秀兰编写,第二章由汪庆宝、殷梅竹编写,第三章由孙景琪编写,第四章和第五章由胡健编写,第六章由徐爱新编写,第七章由吕长志编写,第八章由宿昌厚编写。最后,由汪庆宝和宿昌厚整理汇总及校订。在编写过程中,得到蔡景河、俞庠、王东风、钱晓晖、陈敏、余绍祖、赵正刚、李晔、李华章、杜行简、张建国、钟陵等同志的协助,在此表示诚挚的感谢。

本书得到北京市高校重点学科建设基金的支持。

编者

1995年9月20日

目 录

| | |
|--------------------------------------|------|
| 第一章 电路模拟和器件模型 | (1) |
| 第一节 器件模型的建立和使用 | (1) |
| 一、直流模型 | (1) |
| 二、小信号模型 | (2) |
| 三、器件模型在电路分析中的使用 | (4) |
| 四、用 SPICE 进行电路模拟 | (7) |
| 第二节 MOS 器件模型 | (8) |
| 一、MOS 场效应晶体管的直流模型 | (8) |
| 二、MOS 场效应晶体管的小信号模型 | (17) |
| 三、高频 MOS 场效应晶体管模型 | (18) |
| 四、MOS 场效应晶体管模型参数的测量 | (22) |
| 五、短沟道器件 | (25) |
| 六、亚阈值工作 | (26) |
| 七、在 I_b - V_{DS} 平面的第三象限工作 | (28) |
| 八、MOS 场效应晶体管的噪声源模型 | (30) |
| 第三节 电路模拟程序中的 MOS 场效应晶体管模型 | (32) |
| 一、Level1 大信号模型 | (33) |
| 二、Level2 大信号模型 | (34) |
| 三、高频 MOS 场效应晶体管模型 | (36) |
| 四、MOS 场效应晶体管的噪声模型 | (38) |
| 五、MOS 场效应晶体管的温度特性 | (39) |
| 第四节 二极管模型 | (39) |
| 一、二极管直流模型 | (39) |
| 二、小信号二极管模型 | (41) |
| 三、高频二极管模型 | (41) |
| 四、电路模拟程序中的二极管模型 | (41) |
| 第五节 双极型晶体管模型 | (42) |
| 一、双极型晶体管的直流模型 | (42) |
| 二、小信号双极型晶体管模型 | (49) |
| 三、高频双极型晶体管模型 | (51) |
| 四、双极型晶体管模型参数的测量 | (53) |
| 第六节 电路模拟程序中的双极型晶体管模型 | (54) |
| 一、大信号双极型晶体管模型 | (55) |
| 二、高频双极型晶体管模型 | (58) |
| 三、双极晶体管的噪声模型 | (59) |
| 四、双极晶体管的温度特性 | (59) |

| | | |
|-----|-------------------|-------|
| 第七节 | 无源元件模型 | (60) |
| 一、 | 单片电容器 | (61) |
| 二、 | 单片电阻器 | (61) |
| 第二章 | 集成电路的基本模块 | (67) |
| 第一节 | 开关 | (68) |
| 第二节 | 有源电阻 | (76) |
| 第三节 | 电流源和电流阱 | (86) |
| 第四节 | 镜像电流源和电流放大器 | (96) |
| 第五节 | 电压基准和电流基准 | (109) |
| 第三章 | 模拟电路基础 | (122) |
| 第一节 | 反相放大器 | (122) |
| 一、 | 反相放大器概述 | (123) |
| 二、 | MOS反相放大器 | (129) |
| 三、 | BJT反相放大器(共发射极放大器) | (143) |
| 第二节 | 共源-共栅、共射-共基放大器 | (148) |
| 一、 | 电流驱动CMOS共源-共栅放大器 | (149) |
| 二、 | 电压驱动CMOS共源-共栅放大器 | (150) |
| 三、 | CMOS共源-共栅放大器增益的改善 | (151) |
| 四、 | BJT共射-共基放大器 | (155) |
| 第三节 | 差动放大器 | (158) |
| 一、 | CMOS差动放大器 | (159) |
| 二、 | BJT差动放大器 | (167) |
| 三、 | 差动放大器的频率响应 | (171) |
| 四、 | 差动放大器的噪声特性 | (173) |
| 第四节 | 输出放大器 | (175) |
| 一、 | 无反馈输出放大器 | (175) |
| 二、 | 带有反馈的输出放大器 | (183) |
| 第五节 | 运算放大器 | (190) |
| 一、 | 运算放大器的特点 | (190) |
| 二、 | 两级BJT运算放大器 | (194) |
| 三、 | CMOS两级运算放大器 | (198) |
| 四、 | 共射-共基和共源-共栅运算放大器 | (199) |
| 五、 | 带有输出级的运算放大器 | (202) |
| 六、 | 运算放大器的模拟与测试 | (203) |
| 第六节 | 比较器 | (207) |
| 一、 | 比较器的特性 | (207) |
| 二、 | 高增益比较器 | (210) |
| 三、 | 两级比较器的传播延迟 | (213) |
| 四、 | 采用正反馈的比较器 | (216) |
| 五、 | 自动调零 | (216) |
| 第四章 | 数字电路基础 | (222) |

| | | |
|-----|-----------------------------|-------|
| 第一节 | 设计级别的抽象 | (222) |
| 第二节 | 数字电路的特征 | (223) |
| 一、 | 标准逻辑电平 | (224) |
| 二、 | 反相器对的特性 | (225) |
| 三、 | 逻辑扇出特性 | (226) |
| 四、 | 数字逻辑分析 | (226) |
| 第三节 | 单沟道 MOS 反相器 | (227) |
| 一、 | 基本反相器 | (227) |
| 二、 | 反相器的器件尺寸 | (228) |
| 三、 | 增强型负载与耗尽型负载反相器的比较 | (231) |
| 第四节 | NMOS NOR 与 NAND 逻辑电路 | (231) |
| 一、 | 基本 NMOS NOR 逻辑电路 | (231) |
| 二、 | 基本 NMOS NAND 逻辑电路 | (233) |
| 三、 | 多输入 NAND 和 NOR 逻辑电路 | (234) |
| 第五节 | 互补 MOS 反相器 | (234) |
| 一、 | 基本 CMOS 反相器 | (235) |
| 二、 | CMOS 反相器逻辑电平 | (236) |
| 三、 | CMOS 反相门器件的尺寸设计 | (237) |
| 第六节 | CMOS 逻辑门 | (239) |
| 一、 | CMOS NOR 逻辑门 | (239) |
| 二、 | CMOS NAND 逻辑门 | (241) |
| 三、 | 多输入端 CMOS 逻辑门 | (241) |
| 第七节 | 传输门 | (244) |
| 一、 | NMOS 传送晶体管 | (244) |
| 二、 | CMOS 传输门 | (246) |
| 第八节 | 信号传输延迟 | (248) |
| 一、 | 有比率逻辑电路模型 | (248) |
| 二、 | 与工艺有关的特性时间常数 | (252) |
| 三、 | 反相器对的延迟 | (252) |
| 四、 | 超缓冲器 | (255) |
| 五、 | NMOS NAND 和 NOR 电路的延迟 | (256) |
| 六、 | 增强型与耗尽型负载比较 | (257) |
| 七、 | CMOS 逻辑电路的延迟 | (258) |
| 八、 | 互连特性 | (261) |
| 第九节 | 容性负载及其影响 | (262) |
| 一、 | 容性负载 | (262) |
| 二、 | 逻辑扇出延迟 | (263) |
| 三、 | 离散式驱动器 | (264) |
| 四、 | 驱动芯片外负载 | (265) |
| 五、 | 级联驱动器 | (266) |
| 第十节 | 功率损耗 | (269) |
| 一、 | NMOS 功率损耗 | (270) |

| | |
|------------------------------|-------|
| 二、 CMOS 功率损耗 | (271) |
| 第十一节 数字逻辑电路中的噪声 | (272) |
| 一、 阻性噪声耦合 | (273) |
| 二、 容性噪声耦合 | (274) |
| 三、 噪声容限的定义 | (275) |
| 四、 NMOS 噪声容限 | (276) |
| 五、 CMOS 噪声容限 | (277) |
| 第五章 数字系统设计 | (279) |
| 第一节 随机逻辑与结构化逻辑形式 | (279) |
| 第二节 可编程序逻辑阵列 | (281) |
| 一、 PLA 的结构 | (282) |
| 二、 PLA 版图的自动生成 | (284) |
| 三、 PLA 的折叠 | (286) |
| 四、 大型 PLA | (287) |
| 第三节 结构化逻辑门设计 | (288) |
| 一、 温伯格(Weinberger)阵列 | (288) |
| 二、 栅矩阵布图设计 | (290) |
| 第四节 逻辑门阵列 | (292) |
| 第五节 MOS 时钟电路 | (297) |
| 第六节 动态 MOS 存储电路 | (299) |
| 一、 动态电荷存储 | (299) |
| 二、 简单的移位寄存器 | (301) |
| 三、 其它移位寄存器 | (302) |
| 第七节 CMOS 同步逻辑 | (303) |
| 一、 C^2 MOS | (304) |
| 二、 预充电鉴别逻辑 | (305) |
| 三、 多米诺(Domino)CMOS | (306) |
| 第八节 半导体存储器 | (307) |
| 第九节 只读存储器 | (309) |
| 一、 可擦可编程只读存储器(EPROM) | (309) |
| 二、 电可擦可编程只读存储器(EEPROM) | (310) |
| 第十节 静态随机存储器(SRAM) | (311) |
| 第十一节 动态 RAM 存储器 | (316) |
| 第十二节 寄存器存储电路 | (319) |
| 一、 准静态寄存器单元 | (319) |
| 二、 静态寄存器单元 | (321) |
| 第十三节 以 PLA 为基础的有限状态机 | (323) |
| 第十四节 微指令控制器 | (327) |
| 第十五节 微处理器的设计 | (329) |
| 一、 数据通道 | (329) |
| 二、 桶型移位器 | (331) |

| | |
|--------------------------------|-------|
| 三、 算术逻辑单元 | (333) |
| 四、 微指令控制器 | (334) |
| 第十六节 收缩阵列 | (334) |
| 一、 收缩矩阵乘法 | (335) |
| 二、 一般线性方程系解算器 | (335) |
| 三、 按位串行的处理器单元 | (335) |
| 第六章 模拟系统设计 | (338) |
| 第一节 模拟信号处理 | (338) |
| 第二节 数-模(D/A)转换器 | (339) |
| 一、 D/A 转换器的原理和技术性能 | (340) |
| 二、 权电阻 D/A 转换器 | (342) |
| 三、 倒置 R-2R 梯形 D/A 转换器 | (343) |
| 四、 2^n 个电阻及开关树 D/A 转换器 | (344) |
| 五、 权电容 D/A 转换器 | (346) |
| 六、 组合式 D/A 转换器 | (347) |
| 七、 串联 D/A 转换器 | (350) |
| 八、 D/A 转换器的主要技术指标 | (352) |
| 第三节 模-数(A/D)转换器 | (353) |
| 一、 A/D 转换器的原理和技术性能 | (353) |
| 二、 采样-保持(S/H)电路 | (354) |
| 三、 串联 A/D 转换器 | (357) |
| 四、 逐次逼近式 A/D 转换器 | (359) |
| 五、 并联型 A/D 转换器 | (361) |
| 六、 高性能 A/D 转换器 | (363) |
| 第四节 连续时间滤波器 | (365) |
| 一、 低通滤波器 | (367) |
| 二、 高通滤波器 | (373) |
| 三、 带通滤波器 | (374) |
| 第五节 开关电容滤波器(SCF) | (377) |
| 一、 等效于电阻的开关电容电路 | (378) |
| 二、 无源 RLC 原型开关电容滤波器 | (383) |
| 三、 Z 域综合技术 | (391) |
| 第六节 模拟信号处理电路 | (396) |
| 一、 精密折线电路 | (396) |
| 二、 调制器和乘法器 | (400) |
| 三、 振荡器 | (407) |
| 四、 锁相环(PLL) | (415) |
| 第七章 集成电路工艺 | (418) |
| 第一节 概述 | (418) |
| 第二节 集成电路生产过程 | (418) |
| 一、 工艺步骤 | (418) |

| | |
|------------------------------|-------|
| 二、封装和测试 | (424) |
| 第三节 半导体工艺 | (425) |
| 一、MOS工艺 | (428) |
| 二、双极工艺 | (439) |
| 三、混合技术 | (441) |
| 第四节 设计规则和工艺参数 | (444) |
| 第五节 布局技术和实际考虑 | (448) |
| 附录 7A. NMOS工艺 | (454) |
| 7B. CMOS工艺 | (462) |
| 7C. 双极工艺 | (472) |
| 7D. 厚膜工艺 | (481) |
| 第八章 集成电路设计自动化 | (485) |
| 第一节 VLSI设计及其CAD | (485) |
| 一、设计要求 | (486) |
| 二、设计流程 | (486) |
| 三、集成电路的计算机辅助设计与设计自动化 | (486) |
| 第二节 VLSI设计方法 | (487) |
| 一、正向与逆向设计方法 | (487) |
| 二、非定制与定制设计方法 | (488) |
| 三、全定制设计方法 | (488) |
| 四、半定制设计方法 | (488) |
| 五、可测试性设计 | (490) |
| 第三节 VLSI的CAD软件工具及设计单元库 | (492) |
| 一、软件工具 | (492) |
| 二、设计单元库 | (494) |
| 第四节 版图设计及验证 | (495) |
| 一、版图设计基本内容 | (495) |
| 二、版图的生成与编辑 | (496) |
| 三、自动布局 | (497) |
| 四、自动布线 | (498) |
| 五、版图验证 | (502) |
| 第五节 硅编译器和VLSI专家系统 | (503) |
| 一、硅编译器 | (503) |
| 二、专家系统 | (504) |

第一章 电路模拟和器件模型

在集成电路设计工作中,首先是对电路进行计算机模拟,也就是用计算机预测或模拟所设计电路或系统的工作情况和性能。被模拟的电路可能包含几个乃至几十万个元器件。根据所需分析的类型和对应电路的规模,可采用不同类型的计算机程序进行集成电路模拟。对电路进行计算机模拟,即通常所谓计算机辅助电路设计,或计算机辅助电路分析。众所周知,这一工作的重点是建立或确定所使用的有源器件模型。因此,本章将着重分析器件模型的建立和使用。然后,通过 SPICE 程序的应用进行电路模拟的讨论。

针对集成电路所采用的不同工艺,本章将介绍 MOS 场效应晶体管、二极管、双极型晶体管的模型以及无源元件模型。按器件在电路中不同的工作状态,器件模型又常分为直流模型和小信号交流模型。直流模型用于直流偏置和大信号(瞬态)分析,交流模型用于小信号正弦稳态分析。在 SPICE 程序中,直流模型常常又称为大信号模型,不过,在作高频或高速电路分析时,往往要附加一些必要的杂散电容参量。

SPICE 程序早已被国际工程和学术界所承认,得到广泛的应用;在我国也为同行业的多数科技人员所熟悉。因此,读者可以结合本章的内容和《SPICE 用户指南》,逐步了解并掌握用 SPICE 或类似的电路分析程序进行集成电路的计算机模拟。

第一节 器件模型的建立和使用

建立器件模型的主要目标,是取得器件各端电压和电流之间的函数关系。这些关系说明器件在电路中所起的作用和各种性能特性。这些性能特性,取决于器件内部的几何尺寸和物理参数。在已有的器件中,这些参数和器件的结构及工艺有关。因此,对于集成电路设计来说,可以把它们看作设计参数和工艺参数。关于集成电路工艺,请读者参看第七章。

在器件模型的建立中,理想地自然是希望取得各参数之间的严格而精确的关系。但是,由于严格精确的关系十分复杂,各种数据的测量获取非常不易,甚至不可能,而实际使用中也不一定确实需要。所以,在实际应用中所采用的器件模型,其精确程度或复杂程度,总是和实际使用的要求相权衡,采取折衷的方法来处理的。一般来说,人工分析所用的模型比较简单,计算机分析所用的模型则视电路模拟分析所要求的精度而定。模型的建立,最初一般是分析基本的物理原理,得到基本的数学关系。然后,利用经验修改这些数学表达式,使理论和实验结果一致,达到使用的要求。

本节先讨论 MOS 场效应晶体管和双极晶体管的直流模型。从直流模型入手,推导出线性小信号模型及简化的直流和交流等效电路。然后得到计算机模拟实际所用的器件模型。

一、直流模型

直流模型表示器件在直流及低频下工作时,端电压和电流之间的数学函数关系。因此,它应该在很宽的电压和电流范围内都有效。通过研究可以认为,在一定频率范围内,真实解

和直流解之间的差别可以忽略。所以,这种模型对于实际应用是有效的。

MOS 场效应晶体管、二极管和双极型晶体管的直流模型,都不是直线性的。因此,对含有这些器件的电路进行直流分析有一定的难度。

二、小信号模型

对于大多数电路来说,输入信号的幅度都处在有限的范围内。这样,信号在电路内部工作点附近所引起的偏移幅度(正弦变化),和电源电压相比就很小。对这种电路状态的分析即为小信号分析或交流分析。小信号分析或电路设计时,一般把 MOS 场效应晶体管和双极型晶体管看作线性器件。因为只要信号的幅度限制在很小范围内时,完全可以认为器件是工作在其特性的线性区间内。

为了区别小信号值、静态值和大信号(总体)值,本章采用如下规定:大写字母和带大写字母下标的符号表示总变量的瞬态值。小写字母和带小写字母下标的符号表示小信号值。带小写字母下标的大写字母表示静态值。例如

$$V_c = v + V_c \quad (1.1.1)$$

表示小信号变量关系,若式中交流信号周期为 T ,则其静态值为

$$V_c = \frac{1}{T} \int_0^T V_c(t) dt \quad (1.1.2)$$

而小信号变量 v 是 V_c 的时变分量。一般 v 小,因此静态值 V_c 几乎与 v 的幅度无关。 V_c 、 V_c 、 v 之间的关系如图 1.1.1 所示,其中 V_P 和 V_1 是常数。

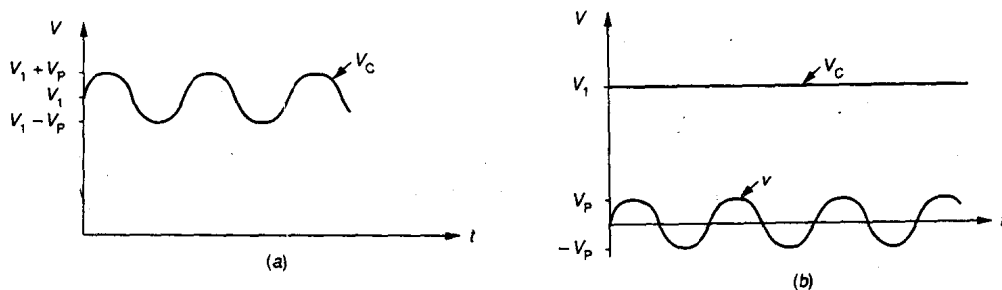


图 1.1.1 总体 V_c 小信号 v 及静态值 V_c 之间的关系

(a)总瞬态值;(b)静态和小信号值

线性多端口网络的电特性,一般可用一组或几组确定的转移函数参数作为模型。例如 h 参数、 y 参数、或 g 参数。以下讨论 MOS 场效应晶体管和双极晶体管的线性小信号等效电路的 y 参数模型。它们很容易从器件的(非线性)直流模型推导得出。

在图 1.1.2(a)所示的四端小信号线性网络中,设端点 4 为参考点,通过端电压和端电流的线性表达式,定义 y 参数如下:

$$\begin{aligned} i_1 &= y_{11}v_1 + y_{12}v_2 + y_{13}v_3 \\ i_2 &= y_{21}v_1 + y_{22}v_2 + y_{23}v_3 \\ i_3 &= y_{31}v_1 + y_{32}v_2 + y_{33}v_3 \end{aligned} \quad (1.1.3)$$

式中

$$y_{kj} = \frac{i_k}{v_j} \Big|_{v_m = 0, m \in \{1, 2, 3\}, m \neq j} \quad (1.1.4)$$

因为小信号电压电流变量,是与静态工作点有关的原网络(图 1.1.2 (b))相应的总电压电流中的时变部分,所以 y 参数也可以从大信号变量和直流模型得到。

$$y_{ki} = \left. \frac{\partial I_k}{\partial V_j} \right|_{v_m = \text{静态值}} \quad m \in \{1, 2, 3\} \quad (1.1.5)$$

在电路分析和设计中,多端口网络的小信号等效电路非常有用。不难证明,图 1.1.2(c)所示电路与图 1.1.2(a)的四端网络,具有完全相同的电压电流特性,都可以用方程(1.1.3)描述。在以后章节中可以看到,描述 MOS 场效应晶体管要用四端网络,而双极晶体管只用三端网络就可以了。三端网络的小信号模型和对应的等效电路,可以很容易地从上述四端网络的方程推导出来。

以下例题证明从直流模型得到小信号等效电路是非常容易的。本章后面用同一方法得到 MOS 场效应晶体管和双极晶体管的小信号模型。

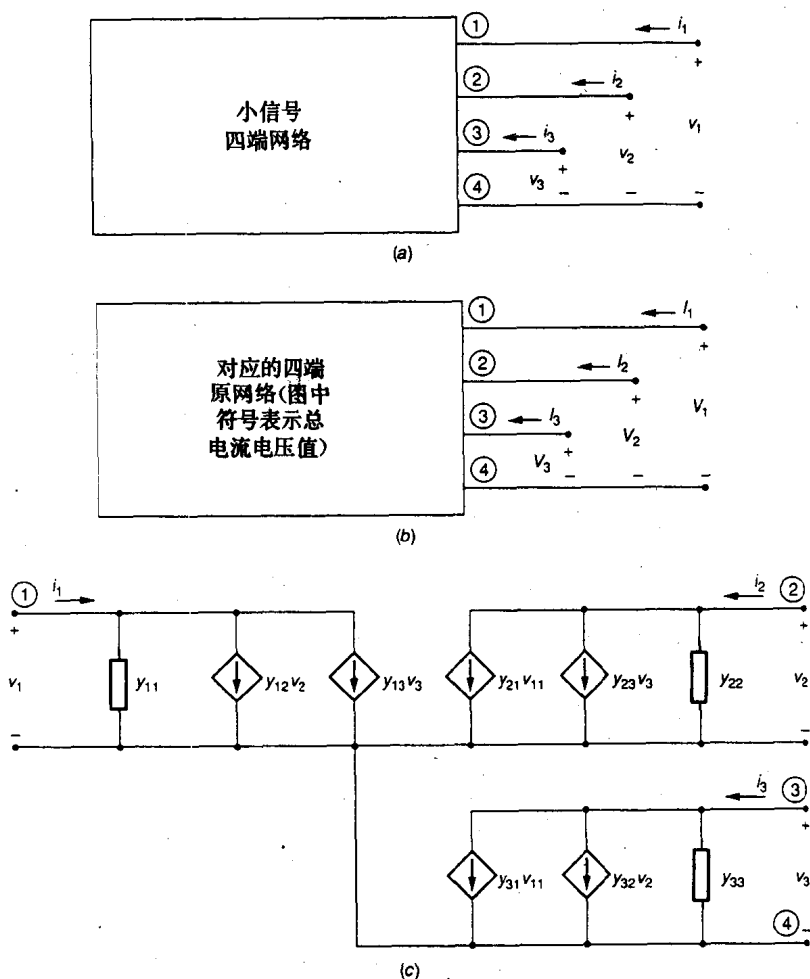


图 1.1.2 通用四端网络

(a)小信号网络;(b)原网络;(c)小信号等效电路

例 1.1.1:如图 1.1.3 所示网络,变量 V_1 、 V_2 、 I_1 和 I_2 之间的数学关系由以下方程表示:

$$V_1 = I_1 R_1$$

$$I_2 = \begin{cases} I_0 \exp(k_1 V_1) + V_2/R_2 & V_1 > 0 \\ k_2 V_1^2 + I_0 + V_2/R_2 & V_1 < 0 \end{cases}$$

- (a) 试确定网络的直流模型；
 (b) 试确定网络在 $V_1 > 0$ 时的小信号模型；
 (c) 试确定网络在 $V_1 < 0$ 时的小信号模型；
 (d) 试画出器件偏置在 $I_1 = 10\text{mA}$, $V_2 = 4\text{V}$ 时的小信号等效电路。设 $I_0 = 5\text{mA}$, $k_1 = 0.2\text{V}^{-1}$, $k_2 = 3\text{mA/V}^2$, $R_1 = 2\text{k}\Omega$, $R_2 = 4\text{k}\Omega$ 。

解：

(a) 网络的直流模型由 V_1 和 I_2 的表达式给出。

(b) 小信号电压和电流的关系由以下方程决定：

$$\begin{aligned} i_1 &= y_{11}v_1 + y_{12}v_2 \\ i_2 &= y_{21}v_1 + y_{22}v_2 \end{aligned} \quad (1.1.6)$$

当 $V_1 > 0$ 时，由 (1.1.6) 式和 V_1, I_1 对于 $V_1 > 0$ 的表达式可得

$$\begin{aligned} y_{11} &= \left. \frac{\partial I_1}{\partial V_1} \right|_{V_1+V_{1Q}, V_2=V_{2Q}} = \frac{1}{R_1} \\ y_{12} &= \left. \frac{\partial I_1}{\partial V_2} \right|_{V_1+V_{1Q}, V_2=V_{2Q}} = 0 \\ y_{21} &= \left. \frac{\partial I_2}{\partial V_1} \right|_{V_1+V_{1Q}, V_2=V_{2Q}} = k_1 I_0 \exp(k_1 V_1) \\ y_{22} &= \left. \frac{\partial I_2}{\partial V_2} \right|_{V_1+V_{1Q}, V_2=V_{2Q}} = \frac{1}{R_2} \end{aligned}$$

(c) 由 (1.1.6) 式以及 V_1 和 I_2 的相应表达式得到 $y_{11} = 1/R_1$, $y_{12} = 0$, $y_{21} = 2k_1 V_1$, 和 $y_{22} = 1/R_2$ 。

(d) 因为 $I_1 > 0$, 所以按照 (b) 的方法, 用 $V_1 > 0$ 时 I_2 的表达式可得 $y_{11} = 1/(2\text{k}\Omega)$, $y_{12} = 0$, $y_{22} = 1/(4\text{k}\Omega)$, 以及

$$y_{21} = (0.2\text{V}^{-1})(5\text{mA})\exp[(0.2\text{V}^{-1})(10\text{mA})(2\text{k}\Omega)] = 54.6\text{mS}$$

于是, 得到小信号等效电路如图 1.1.4 所示。

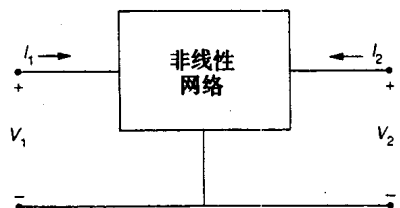


图 1.1.3 例 1.1.1 网络

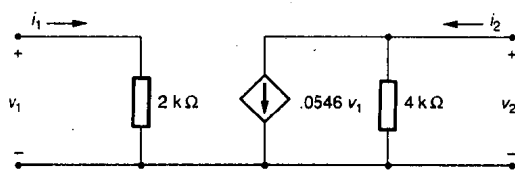


图 1.1.4 例 1.1.1 的解

三、器件模型在电路分析中的使用

电子线路一般由一个或若干个有源器件(双极晶体管或 MOS 场效应管)和若干无源元件(电阻电容)所组成。设计者通常是对电路各端口的变量及它们之间的关系感兴趣。如:大

信号转移特性 $V_o \sim V_i$ 的函数关系、小信号转移特性的电压增益 $A_v = v_o/v_i$ 以及与频率有关的输入阻抗 $Z_{in} = v_i/i_i$ 。图 1.1.5 为一典型二端口网络，图中同时标出了大信号和小信号端口变量。

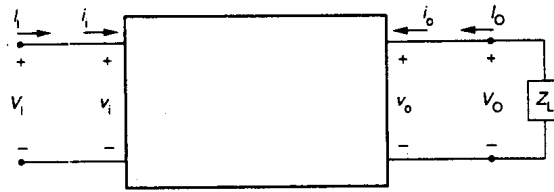


图 1.1.5 典型二端口网络

在设计模拟集成电路时，大信号特性和小信号特性都有用。大信号特性用于设计直流偏置点(Q点)，小信号特性则用于设计所需要的技术性能。

用器件的直流模型表示网络中的所有器件，就可以得到电路的直流转移特性。在标准的节点电压分析法中，常常要用到器件的非线性直流模型。读者以后会看到，即使是非常简单的双极晶体管或 MOS 场效应晶体管电路，这种分析也十分麻烦。原因有两点：首先，多数实际的电路往往是由许多很简单的基本单元电路所组成。要对整个电路进行分析，必须先把它分解成各自独立的单元电路。这一工作十分复杂，一般的工程技术人员往往不能胜任。其次，即使是对于简单的网络，要深入地分析其直流特性，通常也需对器件模型作必要的简化假设。而且，器件的各个电参数的数学表达式非常复杂，甚至电路的基本功能也很难直接看清。而采用简化的直流分析，能提供足够精确的直流偏置参数，也有助于对小信号电路工作的理解。

电路的低频小信号特性可以用两种方法获得。一种方法是用线性小信号等效电路取代电路中的所有元器件，等效电路的小信号模型参数是偏置点(Q点)的函数，其结果电路是线性的，很容易进行分析。另一种方法直接以直流转移特性为基础。如果 x_i 和 x_o 是网络的小信号输入和输出变量，而 X_i 和 X_o 是对应的大信号变量，则这些变量之间的关系可用下式表示

$$\frac{x_o}{x_i} = \left. \frac{\partial X_o}{\partial X_i} \right|_{Q点} \quad (1.1.7)$$

(1.1.7)式和(1.1.5)式的意义相似。显然，如果小信号模型是从同一个器件的直流模型，按规定的偏置点得到的话，则从小信号转移特性分析得到的结果，和用大信号分析，在Q点进行偏微分所得到的结果，是完全一致的。不过，对于小信号转移特性分析来说，用小信号分析比用大信号直流变量微分分析还是有一些优点的。首先，因为小信号等效电路是线性的，它的分析一般可以不涉及直流分析。其次，直接进行小信号分析可以达到较高的精度。因为直流分析中通常要作一些简化假设，以便从数学上容易得到 X_o ，而这些简化假设必然使(1.1.7)式中导数的精度降低。而在小信号分析中，只要使用精度高一些模型，即使分析稍复杂一些，也可获得更高精度的结果。

最后，我们用小信号电参数表示一个网络的频率响应。这时，在小信号等效电路中要附加一些必要的杂散电容。这些电容不影响电路的线性，所以，模型还是很简单。反之，直接从大信号转移特性得到频率响应，还没有实际可用的方法。

例 1.1.2: 假设二端口器件的特性由以下方程表示：

$$I_1 = 0$$

$$I_2 = hV_1^2(1 + \lambda V_2) \quad V_1 > 0, V_2 > 0$$

该器件用在图 1.1.6 的电路中。

(a) 得出 $V_1 > 0$ 和 $V_2 > 0$ 时该器件的小信号模型。

(b) 若 $V_{CC} = 5V$, $h = 0.04mA/V^2$, $\lambda = 0.1V^{-1}$, $R_L = 4k\Omega$, 得出图示电路中 $V_O \sim V_I$ 的直流转移特性。

(c) 若模型由 $\lambda = 0$ 的假设简化, 求出大信号直流转移特性参数。

(d) 若电路偏置工作在 $V_1 = 5V$, 用(c)步的简化大信号直流转移特性, 求出 v_o/v_i 。

(e) 若电路偏置在 $V_1 = 5V$ 的工作点 Q, 用小信号分析求 v_o/v_i 。

(f) 若器件在节点②和节点④之间存在寄生电容, 试确定图 1.1.6 电路的频率响应。

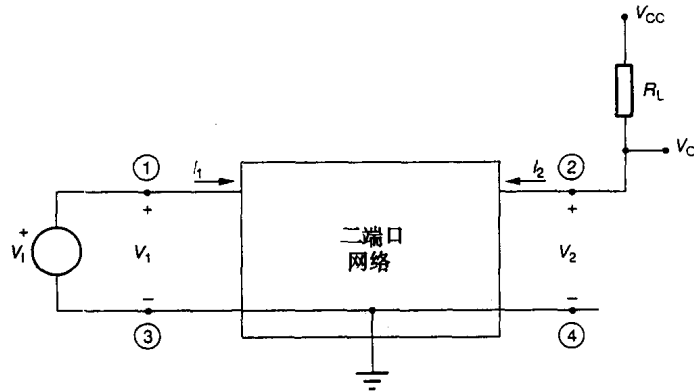


图 1.1.6 例 1.1.2 的电路

解:

(a) 由方程(1.1.5),

$$y_{21} = \left. \frac{\partial I_2}{\partial V_1} \right|_{Q点} = 2hV_1(1 + \lambda V_2) \Big|_{Q点}$$

$$y_{22} = \left. \frac{\partial I_2}{\partial V_2} \right|_{Q点} = \lambda hV_1^2 \Big|_{Q点}$$

$$y_{12} = y_{11} = 0$$

我们得到如图 1.1.7(a) 所示的等效电路。

(b) 从 I_2 的表达式和 KVL(克希霍夫电压定律), 在输出点,

$$V_O = V_{CC} - I_2 R_L = V_{CC} - 0.16V_1^2(1 + \lambda V_O)$$

因此, 画出图 1.1.7(b) 所示的直流转移特性。注意该表达式是非线性的。

(c) 若 $\lambda = 0$, 则由(b)步, $V_O = V_{CC} - (4k\Omega)hV_1^2$ 。注意 $\lambda = 0$ 的假设是简化输入输出关系。

(d)

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \left. \frac{\partial V_O}{\partial V_1} \right|_{V_1=5V} = -2(4k\Omega)hV_1 \Big|_{V_1=5V}$$

如果 $V_1 = 5V$, 则

$$A_v = \left. \frac{\partial V_O}{\partial V_1} \right|_{V_1=5V} = -1.6$$