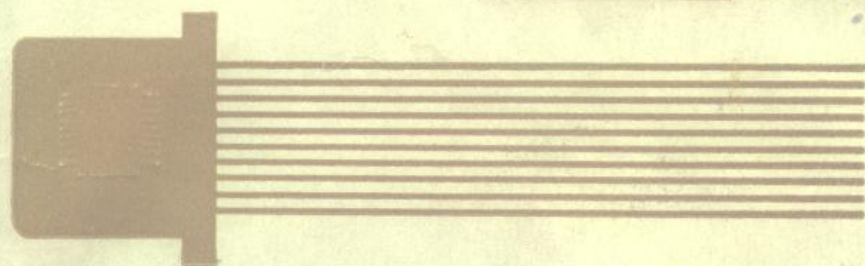


电信技术普及丛书



模拟集成电路

赵保经编著 · 人民邮电出版社

73.7555

780

电信技术普及丛书

模拟集成电路

赵保经 编 著



人民邮电出版社

1111072

0123/08
内 容 提 要

本书扼要阐明模拟集成电路的基本概念和基本原理。较清晰地描绘出模拟集成电路的鸟瞰图；着重阐述它区别于数字集成电路和分立元器件电路的特点；并择要介绍国产模拟集成电路产品系列。全书共九章。一到四章介绍模拟集成电路和集成电子学的基础知识；五到八章分章讲述模拟集成电路四大产品系列——线性集成电路、非线性集成电路、功率集成电路和微波集成电路；第九章是对模拟集成电路的回顾与展望。

本书特点是概念清楚，层次分明，重点突出，通俗易懂；电路设计、工艺制作和应用三者紧密结合。本书可供想学习集成电路的有关专业人员、管理干部和已有一些电子学基本知识的工人阅读。

电信技术普及丛书
模 拟 集 成 电 路

赵 保 经 编著
责任编辑：李洛童

•
人 民 邮 电 出 版 社 出 版
北 京 东 长 安 街 27 号
河 北 省 邮 电 印 刷 厂 印 刷
新 华 书 店 北 京 发 行 所 发 行
各 地 新 华 书 店 经 售
•

开本：787×1092 1/32 1983年5月 第 一 版
印张：9 20/32 页数：154 1983年5月河北第一次印刷
字数：219 千字 印数：1—17,000 册

统一书号：15045·总2699—无6227

定价：0.95 元

出版者的话

为了普及电信技术知识，特别是电信新技术知识，为我国的通信现代化服务，我们组织编写了一套“电信技术普及丛书”，陆续出版。这套丛书的主要读者对象是具有中学文化水平、有一些电信基本知识的工人、管理干部和初级技术人员。在编写中，力求做到内容正确，概念清楚，深入浅出，通俗易懂；使读者读过一书后，能对某项技术的基本原理和主要情况有一个概括的了解，作为进一步学习的入门向导。我们殷切希望广大读者对这套丛书提出意见和建议，帮助我们做好这一工作。

前 言

这是一本关于模拟集成电路基本概念和原理的书。

模拟集成电路在早期又称作线性集成电路。它是当前国际上富有竞赛意义的重要电子产品之一。今天，人们把除了数字集成电路以外的所有集成电路都归入模拟集成电路的范畴。由此可见模拟集成电路品种的繁多和应用的宽广。

如果说数字集成电路给电子计算机带来了光辉年华的话，那么模拟集成电路的兴起则为整个无线电电子学开创了前所未有的美好前景。今天，模拟集成电路的光芒，不仅早已射进象宇航、导弹制导、雷达和卫星通信等一类尖端技术的腹地，同时也普照着生产和日常生活的园地；而且预计在即将开发的许多科技领域，将映出模拟集成电路未来的晨曦。

模拟集成电路是植根于数字集成电路和分立元器件组装的电子电路的基础之上发展起来的。它继承、汲取和综合了数字集成电路与分立元器件电路的设计原理、制作技巧和工艺成果，汇集了多种半导体器件的长处，但在其发展过程中，又陆续地形成了适应模拟集成电路自身特点的设计思想、工艺体系和发展途径；而这些设计思想、工艺体系和发展途径既有别于数字集成电路，也不同于分立元器件电路。

在有限的篇幅里，要把应用领域如此纵深宽广、系列品种浩如烟海、线路结构五花八门和工艺多种多样的模拟集成电路比较详细地描述清楚，显然是不可能的。在写作本书时，作者曾给自己规定了如下的方针和任务——清晰地描绘出模拟集成

• 1 •

电路的鸟瞰图，简要地阐明其基本原理；着重阐述模拟集成电路区别于数字集成电路和分立元器件电路的特点，包括设计原则、工艺特色和应用特点；并择要介绍国产模拟集成电路的产品系列。在叙述具体内容时，反复强调模拟集成电路的基本概念。作者始终认为：对某一事物建立起正确的、或比较正确的概念，往往比记住有关该事物的许多具体内容和细节，更显得重要。

作者并不奢求本书的效果，更无意夸大其作用。当读者看完本书的最后一页时，如果在你们的脑海里已留下一个关于模拟集成电路真实的梗概轮廓和比较正确的概念的话，那么应该说，作者的初衷已经达到了。

在本书写作过程中，作者有幸曾得到杨润生、童本敏同志的协助；初稿写成后，曾经过几位同志的试读。另外，姚金生同志对初稿提出不少宝贵的意见和建议，最后又对本书审阅定稿。作者谨向他们深表谢忱！

作 者

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 集成电路的两大分支.....	(1)
第二节 模拟集成电路的特点.....	(5)
第三节 扬长避短的设计思想.....	(6)
第四节 内繁外简的电路形式.....	(9)
第五节 模拟集成电路的分类.....	(11)
第二章 平面工艺和集成电路的制作	(17)
第一节 平面晶体管和平面工艺.....	(17)
第二节 集成电路制作方法.....	(27)
第三节 制作模拟集成电路的困难和多种工艺的采用.....	(36)
第三章 模拟集成电路中一些特殊元器件的结构和制作	(42)
第一节 横向 $p-n-p$ 晶体管	(43)
第二节 纵向 $p-n-p$ 晶体管	(48)
第三节 二极管.....	(49)
第四节 超 β 晶体管.....	(52)
第五节 场效应晶体管.....	(54)
第六节 MOS晶体管.....	(57)
第七节 夹断电阻和体电阻.....	(59)
第八节 精密电阻和大功率电阻.....	(61)
第九节 膜电容器.....	(65)

第四章 模拟集成电路中的基本单元电路	(69)
第一节 偏置单元电路	(70)
第二节 电流源负载电路	(78)
第三节 电平移位电路	(79)
第四节 差分放大单元电路	(83)
第五节 输出电路	(89)
第五章 线性集成电路	(94)
第一节 集成运算放大器	(94)
第二节 集成稳压器	(134)
第三节 集成中频和宽频带放大器	(167)
第六章 非线性集成电路	(184)
第一节 集成电压比较器	(184)
第二节 集成数-模变换器	(194)
第三节 集成模-数变换器	(214)
第四节 集成模拟乘法器	(229)
第七章 功率集成电路	(239)
第一节 引言	(239)
第二节 功率集成电路的类别	(240)
第三节 功率集成电路所存在的主要问题	(243)
第四节 功率集成电路中 $n-p-n$ 和 $p-n-p$ 型功率晶体管的制作	(247)
第五节 高压功率集成电路	(254)
第六节 功率集成电路的热稳定性	(261)
第七节 国产功率集成电路	(264)
第八章 微波集成电路	(270)
第一节 引言	(270)
第二节 微波集成电路的分类	(272)

第三节	半导体微波集成电路和混合微波集成电路	(275)
第四节	微波半导体器件	(279)
第五节	微波集成电路的应用和发展	(282)
第九章	回顾与展望	(287)
第一节	模拟集成电路发展历程概略回顾	(287)
第二节	向高功能化、高集成化、高功率化和高频化方向发展	(290)
第三节	向“两结合”和混合集成方向发展	(294)

第一章 绪 论

第一节 集成电路的两大分支

一、模拟量与模拟集成电路

测量和计算是自然科学的基础，以致长期来流传着“没有测量就没有科学”的名言。我们的祖先曾用“肘量”、“指数”对物体进行最原始的测量与计算，如今时移境迁，人类智慧的高度结晶——电子计算机和各种电子仪表已成为人们强有力的计算和测量工具。从望天起卜的八卦，发展到现时瞬息万算的电子计算机，充分地反映了在漫长的历史长河中人类文明进一步一阶的进展。

但是这里提出了一个问题。无论是电子计算机，或是其它各种电子测量仪表，就它们的工作实质来说，都只能对电的量（如电压、电流等）起作用（或反映），而我们日常需要测量或进行计算处理的却往往是非电的物理量——如物体的重量、长度、速度、压力、温度和流量等物理量。电子计算机和电子测量仪表是不能直接对其进行计算、测量、分析和处理的。

如何解决这一问题呢？

大家知道，在二进制电子数字计算系统中，我们分别用一个确定的低电平和一个确定的高电平来代表“0”和“1”这两个数字。因此，对数字量的运算和处理就归结为对电的量——低电平和高电平的运算和处理了。

1111072

• 1 •

同样，对于任何一个非电的物理量，如上面提到的长度、重量、压力……等等，都可以用电压的高低或电流的大小，相应地模拟它们的大小。譬如当我们用电压来模拟物体的长度时，长度每增加一倍，电压也相应地增高一倍；当长度减小时，电压也相应地降低。这样，非电的物理量就可用电的量来代表或模拟了。人们就把这种用来代表非电的物理量的电量，称为“模拟量”。

有了模拟量，各种电子仪表就能对形形色色的非电物理量进行测量、计算和处理了。因为电子仪表通过对电压或者电流模拟量的测量、运算、分析和处理，实际上也就间接地对那些被代表或模拟的非电物理量，进行测量、运算、分析和处理了。

模拟量与数字量不同。上述代表数字量“0”和“1”的低电平和高电平是两个确定不变的电量（如通常由两个确定的电压值来代表“0”和“1”这两个数字），但模拟量却是连续可变的。这是因为我们所要测量或计算的物理量，往往总是连续可变的。例如，我们为了计算导弹飞行的轨道，就必须测量一大串数据——导弹的重量、体积、速度、大气压力、风向、风速……等物理量。但是导弹在飞行期间，由于燃料的不断消耗，重量也随之不断地减小；而且随着导弹的逐渐升高，大气压力、风速、风向、导弹所受的阻力与它前进速度，也将连续地发生变化。因此代表这些物理量的模拟量，也必然是连续可变的。

既然我们很方便地可用连续可变的电压或电流量——模拟量，来模拟各种有关的物理量，那么现在剩下的主要问题就是对模拟量进行分析、运算和处理了。这就是模拟集成电路的任务和它所具有的功能。

模拟集成电路是区别于数字集成电路而言的。大家知道，数字集成电路只能对数字信号（“0”和“1”）进行各种计算，它不能直接对连续可变的模拟量进行计算与处理。模拟集成电路就是能对模拟量进行运算和处理的一种集成电路。譬如对于声音或图象等连续变化着的电信号（模拟量），模拟集成电路可对它们进行放大、检波、鉴频、调制、倒相、限幅、稳压和微分、积分、加、减、乘、除等运算。

模拟集成电路往往又被称为线性集成电路，这是由于早期模拟集成电路几乎都属于线性电路的缘故。

二、集成电路的两大分支

现在人们把除了数字集成电路以外的所有集成电路都归纳在模拟集成电路范围内；由此可见模拟集成电路应用领域的纵深宽广、系列品种的丰富庞杂以及电路与工艺的多样性。

如果说数字集成电路赋予了电子计算机以新的生命、开创了电子计算技术极为美好的发展前景的话，那么模拟集成电路将全面地刷新电子仪表的面貌，把工业自动化带到了一个全新的境界，将宇航、军事电子学和医疗电子学推进到前所未有高度；它激起了比数字集成电路更直接的反响，甚至在人们的日常家庭生活中也可觉察到这种反响所激起的涟漪。

虽然人们早已认识到模拟集成电路的重要使用价值，但在六十年代前半期，模拟集成电路并未正式登上集成技术的舞台。与数字集成电路的奔腾大川相比，它只是一条小小的溪流；其品种只限于早期的集成运算放大器和某些专为宇航与军用电子装备配套的线性放大电路。这是由于当时的工艺和材料质量水平限制的缘故。在当时尚未建立起适应模拟集成电路特点的一整套工艺基础和线路设计思想，缺乏实现低成本生产的

手段，所以高昂的成本和售价，迫使人们只能在有限的领域内应用模拟集成电路。

到六十年代末期，集成工艺日臻成熟，已能适应模拟集成电路高耐压的要求；加之模拟集成电路完整的设计思想和基本单元电路也已确立，因之模拟集成电路开始狂潮般地涌入市场，从而成为与数字集成电路并行发展的另一个集成电路分支。

现今的模拟集成电路已远远越出早期的线性电路范围。从近年来的发展趋势看，非线性模拟集成电路的品种已超过线性电路。模拟集成电路产量持续上升，自七十年代后期开始，年增长率达到20%以上；其增长速度已超过数字集成电路。目前国际上模拟集成电路的总产量已占整个数字电路的40%~60%。这条先前不太引人注目的小溪，现在已汇成奔腾浩荡的大川了。

从六十年代后半期开始，我国已开始发展以集成运算放大器为主的模拟集成电路系列。由于多方面的原因，长期以来，发展比较缓慢；不仅与国际上蓬勃发展的模拟集成电路形势很不相称，而且也落后于我国国内数字集成电路业已发展的现状。最近三、四年来，我国的模拟集成电路开始出现了良好的发展趋势。目前已大量生产的有各类集成运算放大器、集成稳压器、电视机和录音机用电路、线性放大电路和功率驱动电路等。

由于我国长期来所形成的以数字集成电路为主体的集成电路生产和应用体系，致使很多人错误地视数字集成电路为集成电路的唯一内容。现在该是纠正这一习惯性错误概念的时候了。

第二节 模拟集成电路的特点

毫无疑问，模拟集成电路是植根于数字集成电路的工艺基础之上发展起来的。它充分吸收了数字集成电路的制作技巧，借用数字集成电路的有用成果。但是在它的发展过程中，为了适应其工作特点、应用特点和电路的功能特点，正如本书在以后各章节中将要陆续介绍的，又不断发展和充实了一些有别于数字集成电路的工艺、结构和器件。

另一方面，从线路设计和电路结构来说，模拟集成电路继承了过去数十年来分立元器件电路的设计理论，充分地运用了现有分立元器件电路的设计方法。但为了适应集成技术的特点，最大限度地发挥集成工艺的独特优点，又形成了模拟集成电路特有的设计思想。

从模拟集成电路的工作机理和功能要求考虑，与数字集成电路相比，概括起来，有下述一些特点。

1. 电路所要处理是连续变化的模拟信号（模拟量）。
2. 除了需要功率输出的输出级电路外，电路中信号的电平值是比较小的，即模拟集成电路一般多工作于小信号状态，不象数字集成电路那样只工作于大信号开关状态。
3. 信号频率往往从直流延伸到高频段。
4. 多样化功能要求：应用的多样性要求各类模拟集成电路具有多种多样、千差万别的电路功能。某些电路可能本身就具有多种功能，而现时更多的小规模模拟集成电路一般包含单项或两三项简单的功能。以最简单的收音机用模拟集成电路来说，就包括高频放大、混频、中放、检波、前置放大和功率放大等功能。

6. 对于某些模拟集成电路来说,要求其输出级输出高功率信号。另外,与数字集成电路相比,模拟集成电路一般总是要求在较高的电源电压下工作。

上述前三个特点要求模拟集成电路在整个线性工作区域内有良好的特性(包括电流放大特性、小电流特性、失真度要求和频响特性等)。后两个特点则要求模拟集成电路不得不采用比较复杂多样的电路结构形式,引用多种半导体器件(包括功率器件),并对工艺和材料等提出了颇为严格的要求。

正是由于模拟集成电路具有上述既不同于数字集成电路、又有别于分立元器件电路的特点,才规定了它的一系列设计、工艺、结构和应用特点——扬长避短的设计思想,内繁外简的电路结构形式和兼容并蓄的多种集成工艺。

模拟集成电路广取各种半导体器件之长(包括双极型晶体管、MOS器件、场效应晶体管和功率器件等),博采多种集成工艺技术,是当前国际上富有竞赛意义的重要电子产品之一。

第三节 扬长避短的设计思想

充分发挥集成技术的独特长处,避开集成电路中某些元件制作的困难以及集成技术的局限性,这是模拟集成电路设计所应遵循的总的准则。为此,我们需搞清楚,什么是集成技术的独特长处,而它的局限性又表现在哪几方面。

一、集成技术的长处

现在我们撇开集成技术的小型化和其它一些特点不谈,单就半导体集成电路结构和工艺本身所固有的内在特点来比较它

与分立元器件电路的不同。显然，集成电路结构和集成工艺的最显著特点是：

1. 电路所包含的元件和器件都集成在几何尺寸十分小的晶片（芯片）上。

2. 组成电路的所有元器件都是在相同的工艺条件下，同时经历同一的工艺流程。

前一个特点告诉我们：由于集成电路芯片很小，各个元器件十分靠近，它们必将在非常相近的应用环境条件下工作。一般情况下，相邻两个元器件的温度差可以小到 0.01°C ，而在分立元器件组装的电子电路中，电路工作时，元件或器件的温度可能相差很大。

第二个特点告诉我们：由于芯片上所有元、器件都经历同一工艺流程，因此结构和几何尺寸相同的元、器件，其特性和参数也是十分相近的。譬如同一块芯片上两个晶体管的电流放大系数的偏差，一般可低于 $2\sim 3\%$ ；两个相邻电阻的阻值相对误差，很少会超过 3% 。对于分立晶体管或元件来说，我们只能从很多的管子或电阻中精挑细选，才能找出具有这么相近特性的配对单元。

集成技术这两个特点给予模拟集成电路设计者一个很大的启示：在设计模拟集成电路时，我们应当采用或找寻具有对称结构或元器件彼此匹配的线路结构形式；在这种线路中，元件或器件参数值并不要求十分精确，但各配对或要求特性匹配的元器件参数应十分接近。

二、集成技术的短处

1. 元件或器件参数的离散性很大

集成电路的制作需要经历数十道不同的工序。不可避免的

工艺偏差和所用各种材料质量的差异，必然会使电路中元件或器件的特性或参数或多或少地偏离设计中心值。表1-1列出了

表 1-1 元、器 件 参 数 偏 离 表

名 称	参 数 误 差 或 范 围
扩散电阻阻值误差	$\pm 20\%$
电容器容值误差	$\pm 20\%$
$n-p-n$ 晶体管 h_{FE} 值范围	20~300
$p-n-p$ 晶体管 h_{FE} 值范围	3~30

集成电路中电阻（扩散电阻）阻值、电容器容值和晶体管电流放大系数（ h_{FE} ）的偏差范围。

对于分立元器件组装的电子电路来说，元器件参数的离散性尚不会带来太多困难，因为人们完全有可能从参数分布离散的元、器件中，挑选出符合设计中心值范围的产品。但在集成电路中，显然，问题就变得难于解决了。

上述情况启示模拟集成电路设计者，除非有特殊必要，一般应尽可能摒弃那些要求具有严格元器件参数值的电路设计方案。

2. 实际可供选择的元件参数范围很窄

尽管从原则或理论来说，制作在半导体集成电路芯片上的电阻阻值或电容器容值并无限制，但实际上，制作过大或过小的电阻和电容器都是分外困难的。须知，一个小功率晶体管或二极管在集成电路芯片上所占据的实际面积远小于一个中等阻值的扩散电阻或小容量的电容器所需的面积（譬如一个30~50 K Ω 扩散电阻或一个容量为30pF的电容器，比起一个小功率晶体管或二极管来，前者所占用的芯片面积要比后者大十倍左