

# 双极型与CMOS 放大器分析

〔美〕 Amir M.Sodagar 著

王志华 李冬梅 杨东 译

# 双极型与 CMOS 放大器分析

〔美〕 Amir M. Sodagar 著  
王志华 李冬梅 杨 东 译

科学出版社

北 京

图字：01-2008-5375 号

## 内 容 简 介

本书从放大器的基本结构入手,介绍了双极型和 CMOS 放大器的特性及分析方法。内容包括:放大器基础、晶体管、偏置、单级放大器、多级放大器、电流源和电路镜、放大器的低频和高频特性分析。本书采用论述理论与工程实际相结合的分析方法,并注重双极型与 CMOS 电路的对比。

本书可作为高等院校信息与通信工程、电子科学与技术及相关专业师生的参考用书,也可以供相关专业技术人员阅读使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

双极型与 CMOS 放大器分析/(美)Amir M. Sodagar 著;王志华,李冬梅,杨东译. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-025794-9

I. 双… II. ①A… ②王… ③李… ④杨… III. MOS 集成电路-运算放大器-电路分析 IV. TN433

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 185238 号

责任编辑:孙力维 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 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>

北京天时彩色印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009 年 11 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2009 年 11 月第一次印刷 印张: 21

印数: 1—4 000 字数: 727 000

定 价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

---

## 译者序

随着集成电路技术的飞速发展,其应用领域日益广泛。集成系统芯片(SOC)成为集成电路发展的主流趋势,对模拟及混合信号集成电路设计人才的需求越来越迫切。关于模拟集成电路设计方面的参考书也备受关注。本书从模拟电路基础内容入手,介绍了双极型和CMOS放大器的特性及分析方法。作者结合自己在模拟和混合信号电路方面丰富的教学及科研经验,介绍了在放大器分析中采用的简捷而有效的“观察分析法”。其中,对频率特性的分析方法独具特色。论述过程中注重双极型与CMOS电路的性能对照,且每章都配有仿真实例和习题。是一本有价值的教学和技术参考书。

本书可供高等院校信息与通信工程、电子科学与技术及相关专业的师生使用,也可作为集成电路设计领域技术人员的参考用书。

本书第1,2章由王志华翻译,第3~8章由李冬梅和杨东翻译。全书由李冬梅统一审校。

鉴于译者水平,译文中的错误与疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

译者于清华园

2009年9月

# 前言

在已出版的参考书中,有些介绍基本模拟电路的分析和设计,并将放大器作为对这些概念的特定应用,这对于放大器的分析来说,帮助并不大。这些书通常采用典型的方法来分析小信号放大器,包含了所有影响因素,并对所需参数进行精确的定量计算。这种方法很繁琐,有时会遇到困难,尤其是当元件数量增加时。即使是经过手工精确设计或分析的电路,在实际应用中的参数与预期值也是有偏差的。所以,有时采用直接的方法粗略估算所需的参数会更好,可以避免为了精确分析而在求解方程上耗费过多的时间和精力。

我从事了 14 年多模拟和混合信号电路的科研和教学工作,我认为除了从宽泛的角度阐述的参考书以外,还应该有一本集中介绍更简捷的分析方法的书,称为对双极型和 CMOS 小信号放大器的“观察分析法”。在可接受的精度范围内,且基于科学分析的基础上,可以采用直接的方法,快速分析小信号电路的各种特性。包括对双极型和 CMOS 电路在中频、低频和高频区的交流分析。

本书的读者包括电气工程及相关学科的本科生、研究生。假设读者已经具有电路分析及信号与系统的基础知识。

第 4,5,7,8 章讨论了本书的主要概念。在第 1~3 章和第 6 章中给出的是为了讨论的连续性所必需的基本概念。例如,在第 2 章中介绍了晶体管的电特性,没有介绍其物理行为。因为实际使用的是尽可能简单的晶体管小信号模型,所以没有讨论 MOS 晶体管的衬底效应或短沟效应。

在本书编写过程中,得到了很多人的帮助:A. Ashrafi 教授(阿拉巴马大学)、P. Bhatti 教授(佐治亚理工学院)、M. Ghovanloo 教授(北卡罗莱纳州立大学)、R. Lofti 教授(马什哈德菲尔多西大学)、Y. Yao 博士(密歇根大学),以及密歇根大学的研究生 A. Borna, R. M. Haque, G. E. Perlin, S. Naraghi。这里向他们表示谢意。同时感谢在本书出版过程中作出贡献的 Taylor 和 Francis/CRC 出版社的所有人,特别是工程与环境科学的编辑 Nora Konopka,项目协调人 Marsha Pronin 和项目编辑 Jennifer Smith。

借此机会,我向 G. Roientan Lahiji 教授表示感谢。是他带我进入了令人兴奋的高层次的电子世界。

最后,我从内心感谢我的父母,他们是我的第一任也是最好的老师。本书的完成也离不开我妻子的耐心、支持和帮助。在此,我向她表示最真挚的感激之情。

Amir M. Sodagar

密歇根大学

Ann Arbor, 密歇根

# 目录

<b>第 1 章 放大器基础</b> .....	1
1.1 概    述 .....	3
1.2 基本概念 .....	3
1.3 信号及其直流和交流分量 .....	4
1.3.1 信号及其分量的命名 .....	4
1.4 放大器的基本类型 .....	4
1.4.1 电压放大器 .....	5
1.4.2 电流放大器 .....	8
1.4.3 跨导放大器 .....	11
1.4.4 跨阻放大器 .....	13
1.5 放大器的级联 .....	14
1.6 小信号与大信号放大器 .....	14
1.7 基本问题 .....	15
1.8 仿真实例 .....	16
习    题 .....	21
<b>第 2 章 晶体管</b> .....	25
2.1 概    述 .....	27
2.2 基本概念 .....	27
2.3 金属-氧化物-半导体场效应晶体管 .....	28
2.3.1 NMOS 晶体管 .....	29
2.3.2 PMOS 晶体管 .....	32
2.4 双极型晶体管 .....	33
2.4.1 NPN 晶体管 .....	34
2.4.2 PNP 晶体管 .....	38
2.5 仿真实例 .....	39

习 题 .....	41
<b>第 3 章 偏 置</b> .....	43
3.1 概 述 .....	45
3.2 双极型晶体管的偏置 .....	45
3.2.1 工作点 .....	45
3.2.2 晶体管的偏置 .....	46
3.2.3 电路图绘图惯例 .....	48
3.2.4 电路分析中的近似 .....	50
3.2.5 简单回顾 .....	51
3.2.6 饱和模式下的双极型晶体管 .....	53
3.3 分压偏置 .....	54
3.3.1 分压偏置电路:不同角度的分析 .....	57
3.4 PNP 晶体管的偏置 .....	59
3.5 MOS 晶体管的偏置 .....	61
3.5.1 工作点 .....	62
3.6 仿真实例 .....	65
习 题 .....	75
<b>第 4 章 单级放大器</b> .....	81
4.1 概 述 .....	83
4.2 用作放大的晶体管 .....	83
4.2.1 晶体管的小信号模型 .....	84
4.3 小信号放大器的两步分析法 .....	86
4.4 放大器输入(输出)信号的耦合 .....	88
4.5 基本单级放大器的结构 .....	91
4.5.1 共源结构 .....	92
4.5.2 共栅结构 .....	98
4.5.3 共漏结构或源极跟随器 .....	102
4.6 观察分析法 .....	105
4.6.1 晶体管端口的等效电阻 .....	105
4.6.2 用观察法对放大器进行交流分析 .....	108
4.7 放大器的其他基本类型 .....	111



4.8	双极型放大器 .....	113
4.8.1	双极型晶体管作为放大器 .....	113
4.8.2	双极型单级结构 .....	119
4.8.3	双极型放大器的其他基本类型 .....	124
4.9	重要说明 .....	126
4.10	仿真实例 .....	128
	习 题 .....	133
<b>第 5 章</b>	<b>多级放大器 .....</b>	<b>139</b>
5.1	概 述 .....	141
5.2	偏置与耦合 .....	141
5.3	交流分析 .....	145
5.4	一些有用的组合结构 .....	151
5.4.1	达灵顿对 .....	151
5.4.2	Cascode 放大器 .....	156
5.4.3	差分放大器 .....	159
5.5	仿真实例 .....	178
	习 题 .....	183
<b>第 6 章</b>	<b>电流源和电流镜 .....</b>	<b>187</b>
6.1	概 述 .....	189
6.2	电流源和电流镜 .....	189
6.3	Cascode 电流源和电流镜 .....	196
6.4	电流缩放 .....	199
6.5	多输出电流源(电流镜) .....	199
6.6	双极型电流源(电流镜) .....	200
6.7	电流源用作偏置和有源负载 .....	203
6.7.1	有源负载差分放大器 .....	207
6.8	仿真实例 .....	212
	习 题 .....	217
<b>第 7 章</b>	<b>放大器的低频特性分析 .....</b>	<b>221</b>
7.1	概 述 .....	223

7.2 频域基本概念 .....	223
7.3 放大器低频响应曲线 .....	225
7.3.1 低频传输函数的波特图 .....	228
7.4 使用交流分析方法进行低频分析 .....	232
7.5 低频特性的观察分析法 .....	236
7.5.1 具有一个耦合电容的放大器 .....	236
7.5.2 具有一个旁路电容的放大器 .....	239
7.6 时域响应 .....	243
7.6.1 阶跃响应 .....	246
7.6.2 方波响应 .....	247
7.6.3 正弦波响应 .....	250
7.6.4 旁路电容的情况 .....	251
7.7 多于一个外接电容的情况 .....	252
7.7.1 传输函数 .....	252
7.7.2 下限截止频率 .....	255
7.8 仿真实例 .....	257
习 题 .....	270
<b>第 8 章 放大器的高频特性分析 .....</b>	<b>277</b>
8.1 概 述 .....	279
8.2 高频基本概念 .....	279
8.3 放大器的高频特性 .....	279
8.4 放大器的高频响应曲线 .....	280
8.4.1 高频传输函数的波特图 .....	283
8.5 高频分析 .....	285
8.5.1 用观察法进行高频分析 .....	288
8.6 时域响应 .....	298
8.6.1 阶跃响应 .....	300
8.6.2 方波响应 .....	300
8.7 上限截止频率 .....	304
8.8 全频率响应特性 .....	305
8.8.1 传输函数和频率响应 .....	305
8.8.2 时域响应 .....	307
8.9 多级放大器的高频特性案例分析 .....	307

8.9.1 案例分析 1: 共源(共射)放大器 .....	308
8.9.2 案例分析 2: Cascode 放大器 .....	309
8.9.3 案例分析 3: 多级放大器 .....	310
8.10 仿真实例 .....	311
习 题 .....	316
<b>参考文献</b> .....	<b>322</b>

# 放大器基础

- 1.1 概 述
  - 1.2 基本概念
  - 1.3 信号及其直流和交流分量
  - 1.4 放大器的基本类型
  - 1.5 放大器的级联
  - 1.6 小信号与大信号放大器
  - 1.7 基本问题
  - 1.8 仿真实例
- 习 题



## 1.1 概 述

顾名思义,放大器是一种将输入端接收到的信号进行放大并在其输出端输出的电路。信号的种类和放大器的特性是决定放大器种类的关键因素。本章介绍放大器的基本概念和定义,这些概念和定义将是理解、分析、设计电子放大器的基础。

## 1.2 基本概念

首先定义什么是信号以及信号的特征,便于分析方法的引入。根据韦伯(Merriam-Webster)字典的定义,信号是可被检测的、能够传输消息或者信息的物理量。

关于信号的最简单、最容易理解的一般定义可以表述为:“‘信号’是传输有用信息的量”。

例如,传统温度计中水银柱的高度可以看作告诉人们温度信息的信号。在电子电路与系统中,信号通常是电压或电流。在很多应用中,信号传输的是实际物理量的信息,例如,压力、温度、光强、语音,这些物理量被传感器转换成电压或电流信号。在另外一些应用中,信号携带的是由人造系统产生或者合成的虚拟信息(例如,电视机的遥控器发出的改变音量或者切换频道的命令)。在本书后续内容中,信号指的是那些将要或已经被所研究的电子电路处理的电压或电流。

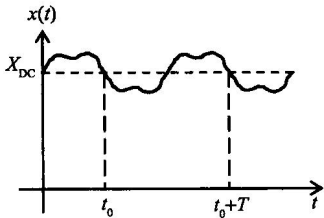
本书中研究的放大器均假定为线性电路,这将在 1.6 节中讨论。为此,我们需要定义一个电路,或具体到一个放大器在什么情况下是线性的。线性电路的最简单定义如下:

假设一个电路对输入信号  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  的响应分别是  $y_1(t)$  和  $y_2(t)$ ,如果该电路对输入信号  $[ax_1(t) + bx_2(t)]$  的响应是  $[ay_1(t) + by_2(t)]$ ,则称该电路是线性电路。

现在研究信号的形状。在本书中,假设所有信号都是具有固定频率的周期信号(在某些特定的章节,也会研究电路对任意形状波形的非周期信号的响应)。此外,根据工程数学中的知识,任何周期信号都可以表示为正弦分量的线性组合(傅里叶级数展开),因此在本书中,除非特别说明,信号的基本波形都是正弦波。同时由于假设本书中研究的放大器是线性工作的放大器,在找出电路对输入信号中特定频率分量的响应之后,很容易据此求出该电路对任意周期信号的响应。

## 1.3 信号及其直流和交流分量

将信号分解为直流(DC)和交流(AC)分量可以大大简化在基本电路理论课程中学过的常规电路分析方法。周期信号的直流分量是其平均值或者说均值。数学上,对于图 1.1 所示的信号  $x(t)$ ,其直流分量  $X_{DC}$  定义为



$$X_{DC} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) dt \quad (1.1)$$

图 1.1 周期为  $T$  的周期信号  $x(t)$  其中,  $t_0$  是时间轴上的任意点;  $T$  是信号的周期。

如果将信号中所包含的直流分量分离出去,则余下部分称为交流分量。换句话说,对于一个周期信号,它的直流分量表示信号的平均值,是一个常数且不随时间变化;其交流分量的平均值为零,表示信号随时间发生变化的部分。

### 1.3.1 信号及其分量的命名

为了在表示一个信号本身以及其直流、交流分量时不引起混淆,本书将采用以下表示方式:完整的信号变量用带有大写字母下脚标的小写字母表示;信号的直流分量用带有大写字母下脚标的大写字母表示;交流分量用带有小写字母下脚标的小写字母表示。图 1.2 所示是用此规则表示电压信号的示例。

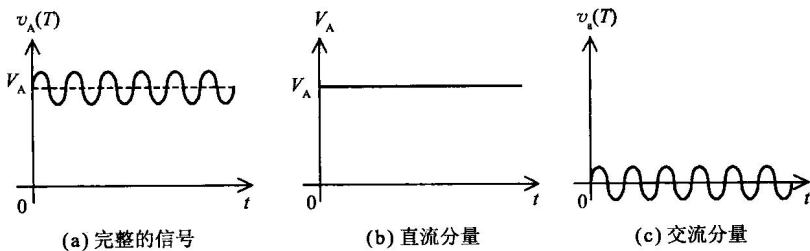


图 1.2 信号及其分量的命名规则

## 1.4 放大器的基本类型

图 1.3 所示是放大器的一般方框图表示。其中,  $x_1(t)$  是输入信号,  $x_0(t)$  是输出信号,放大系数用  $K$  表示,也称为增益。

如前所述,根据输入和输出信号的种类,放大器可以分为不同的类型。根据输入和输出信号是电流或者电压的不同情况,基本放大器分为四种类型,如表 1.1 所示。

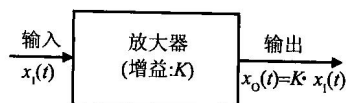


图 1.3 放大器

表 1.1 四种基本放大器

放大器类型	输入信号	输出信号
电压放大器	电 压	电 压
电流放大器	电 流	电 流
跨导放大器	电 压	电 流
跨阻放大器	电 流	电 压

### 1.4.1 电压放大器

将输入的电压信号放大,并以电压形式输出的放大器是电压放大器。

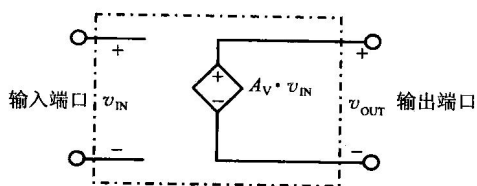


图 1.4 理想电压放大器的二端口模型

图 1.4所示是理想电压放大器的二端口模型,其中,  $A_V$  是放大器的增益,通常称为电压增益。

放大器的输入信号由信号源提供,信号源可以是一个实验室的仪器(例如,波形发生器),可以是能将物理量转换成电信号的传感器或变换器,也可以是其他电路。无论是什么样的信号源,只要它为放大器提供的是电压型的输入信号,就都可以用戴维南定理(Thevenin's theorem)得到等效模型。其戴维南等效电路由一个电压源  $v_s$  和一个串联电阻  $R_S$  构成。另外,在放大器的输出端,经过放大的信号通常要驱动一个器件或者电路,这个器件或者电路称作负载。一般来讲,负载可以是任何形式的电路或者器件,例如,线性或非线性、有源或无源等。最复杂的负载形式通常是一个阻抗。在本书中,除非特别说明,均将阻抗简化为纯阻性。连接信号源和负载的理想放大器如图 1.5 所示。

对于图 1.5 所示的电路,由于没有电流流经电阻  $R_S$ ,因此在这个电阻上不产生电压降,所以放大器的输入端电压是信号源电压  $v_s$ ,即

$$v_{\text{IN}} = v_s \quad (1.2)$$

放大后的电压  $A_V \cdot v_{\text{IN}}$  将全部输出到负载,即

$$v_{\text{OUT}} = A_V \cdot v_{\text{IN}} = A_V \cdot v_s \quad (1.3)$$

在实际应用中,不存在理想的受控电压源,放大器要由电气元件和电子器



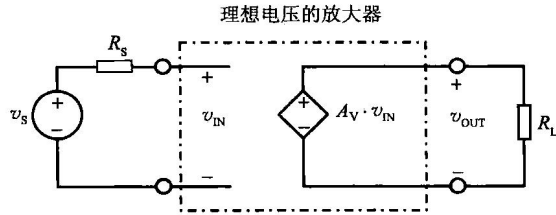


图 1.5 连接信号源和负载的理想电压放大器

件构成。这使得放大器的二端口模型与图 1.4 所示的模型略有不同,但它们表示的基本功能相同。图 1.6 所示是实际电压放大器的二端口模型。

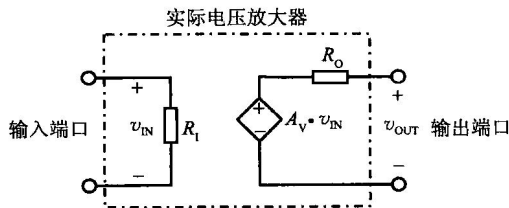


图 1.6 实际电压放大器的二端口模型

显然,上述两个放大器模型的差别在于非理想模型中存在输入电阻  $R_1$  和输出电阻  $R_O$ ,是分别从放大器的输入端口和输出端口采用戴维南等效得到的等效电阻。将输入有限电阻(不是特别大)的实际放大器的输入端连接到信号源,则有电流从输入信号源流出。换句话说,电阻  $R_1$  和电阻  $R_S$  形成了一个分压电路,如图 1.7 所示。

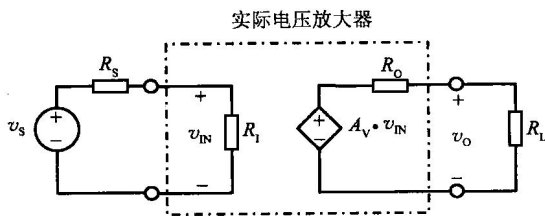


图 1.7 连接信号源和负载的实际电压放大器

这种情况下,由于在电阻  $R_S$  上出现了本不希望出现的电压降,信号源电压  $v_S$  中只有一部分作为输入信号加到放大器上并被放大。放大器输入端所获得的信号分压为

$$v_{IN} = \frac{R_1}{R_1 + R_S} v_S \quad (1.4)$$

此外,图 1.7 所示的电压放大器具有非零输出电阻。当放大器输出端连接