

第2章 现代电子系统设计方法

现代电子系统是以超大规模集成电路为基础的高密度高复杂度的系统,传统的系统设计方法已经不能满足现代电子系统设计的需要了,因此产生了EDA技术。本章将介绍采用EDA技术进行现代电子系统设计和实现的一些方法。

2.1 系统建模与仿真

用EDA技术进行电子系统的设计过程是一种“自上而下”的过程,即从系统级的设计入手,在顶层进行功能的划分和结构的设计,并进行系统级的仿真。系统级的设计主要描述系统的功能和技术指标,而不考虑系统的具体实现,因此首先要建立系统的数学模型和算法模型。在此基础之上,利用相应的设计工具对这些模型进行仿真、分析和论证,以保证这些模型的正确性和有效性。

2.1.1 系统与模型

1. 系统

“系统”是一个内涵非常丰富的概念,一种普遍接受的定义是:系统是由互相联系、互相制约、互相依存的若干组成部分(要素)结合在一起形成的具有特定功能和运动规律的有机整体。

从以上定义可以看出,这里的“系统”是广义的,大到宇宙世界,小到分子原子,都可以称之为系统。在我们社会生活中,系统以各种方式呈现出来,可以是自动控制方面的电炉温度控制系统,也可以是商业活动中的商品销售系统,或者是生物体的神经系统等。这些系统虽然在物理性质、功能和构成上截然不同,但是它们却具有如下一些共性:

(1) 系统是实体的集合

实体是指组成系统的具体对象,例如电炉温度控制系统中的比较器、调节器、电炉、温度计等,或者商品销售系统中的部门、商品、货币、仓库等都是实体。系统中的各个实体具有一定的独立性,又相互联系构成一个整体。

(2) 组成系统的实体具有一定的属性

属性是指实体所具有的全部有效特性,如状态、参数等。在电炉温度控制系统中,温度、温度偏差、电压等都是属性,商品销售系统中部门的属性有人员的数量、职能范围,商品的属性有生产日期、进货价格、销售日期、售价等。

(3) 系统处在活动之中

活动是指实体随时间推移而发生的属性变化。例如,电炉温度控制系统中的主要活动是调节电压的变化,而商品销售系统的主要活动有库存商品数量的变化、零售商品价格的变化等。

不论是简单的还是复杂的系统都是由一些实体组成,而每一实体又有其属性,整个系统有其主要活动。因此,实体、属性和活动构成了系统的三大要素。

系统是在不断地运动、发展、变化的。由于组成系统的实体之间的相互作用而引起的属性变化,使得在不同时刻,系统中实体和属性都可能发生变化,这种变化通常用状态的概念来描述。在任意时刻,系统中实体、属性以及活动的信息总和称为系统在该时刻的状态,用于表示系统状态的变量称为状态变量。

系统并不是孤立存在的。自然界中的一切事物都相互联系和相互影响。任何一个系统都会受到系统之外因素变化的影响,这种对系统的活动结果产生影响的外界因素称为系统的环境。对一个系统进行分析时,必须考虑系统所处的环境,而首要的便是划分系统与其所处的环境之间的界限,即系统的边界。系统的边界包含系统中的所有实体。

系统边界的划分在很大程度上取决于系统研究的目的。例如,在商品销售系统中,如果仅考虑商品库存量的变化情况,那么系统只需要包含采购部门、仓库和销售部门即可。但如果要研究商品进货与销售的关系时,系统中还应包括市场调查部门,因为商品销售状况及对进货的影响等统计工作是由该部门完成的。

根据研究对象与目的的不同,系统可大可小。系统本身也可以由一系列相互作用的子系统构成,子系统又可以由更低一级子系统构成;系统和它的部分环境又构成一个更大的系统,这就是系统的等级结构。

系统的分类方法很多,按照不同的分类方法可以得到各种不同类型的系统。以下列出了几种常用的分类方法。

(1) 按系统的特性分类

按系统的特性可以将系统分为工程系统和非工程系统。工程系统是指为了满足某种需要或实现某个预定的功能,人们采用某种手段构造而成的系统,如机械系统、电气系统、化工系统、武器系统等。工程系统有时也称为物理系统。

非工程系统是指在自然和社会发展过程中形成的、被人们在长期的生产劳动和社会实践中逐步认识的系统,如社会系统、经济系统、管理系统、交通系统、生物系统等。非工程系统有时也称为非物理系统。

(2) 按系统中起主要作用的状态随时间的变化分类

按系统中起主要作用的状态随时间的变化可将系统分为连续系统和离散事件系统。状态随时间连续变化的系统称作连续系统。状态的变化在离散时间点上发生,且往往又是随机的,这类系统称作离散事件系统。

(3) 按对系统内部特性的了解程度分类

按对系统内部特性的了解程度可将系统分为白色系统、灰色系统和黑色系统。内部特性全部已知的称为白色系统;内部系统全部未知的称为黑色系统;内部特性部分已知、部分未知的称为灰色系统。

(4) 按系统的物理结构和数学性质分类

按系统的物理结构和数学性质可将系统分为线性系统 and 非线性系统、定常系统和时变系统、集中参数系统和分布参数系统、单输入单输出系统和多输入多输出系统等。

2. 模型

为了对系统进行研究,需要对其进行试验。试验有两种方案,一种是直接在真实系统上进行,另一种是按真实系统的“样子”构造一个模型,在模型上进行。通常由于下列原因而不能采用在真实系统上做试验的方案:

(1) 系统不存在。例如系统还处于设计阶段,还没有真正建立起来,因此不可能在真实系统上进行试验。

(2) 在真实系统上做试验不安全、不经济。例如火箭发动机和控制系统,如果直接在真实系统上进行试验,可能会造成无法挽回的严重损失。在经济活动中,一个新的经济政策出台后往往需要经过一定的时间才能确定其影响。而经过这段时间以后,即使发现该政策有错误,它所造成的损失已是无法挽回的了。因此,在模型上做试验成为对系统进行分析、研究十分有效的手段。

模型是为了某种特定目的、将系统的某一部分信息进行抽象而构成的系统的替代物,可

见模型不是“系统的复现”，而是按研究目的实际需要和侧重面，寻找一个便于研究的“替身”。

因此，在较复杂的情况下，对于由许多实体组成的系统来说，由于其研究目的不同，对同一个系统可以产生对应于不同层次的多种模型，这就是模型的多面性。该特性表明，根据系统研究的需要，可对模型进行粗化（简化）或细化（精化），也可以对模型进行分解或组合。

模型一般可分为物理模型和数学模型两大类。物理模型又称为实物模型，它是根据一定的规则（如相似原理）对系统简化或比例缩放而得到的复制品，因此，其外观与实际系统极为相似，描述的逼真感较强。例如风洞试验的飞行器外形和船体外形。物理模型常用于水利工程、土木工程、船舶工程和飞机制造等领域。

数学模型一般可以描述为：对于现实世界的一个特定对象，为了一个特定目的，根据对象特有的内在规律，做出一些必要的简化假设，运用适当的数学工具，得到的一个数学结构。通过对系统数学模型的研究可以揭示系统的内在运动和系统的动态特性。

3. 数学模型的作用和分类

数学模型的应用十分广泛，它的主要作用有两个方面：提高对现实系统的认识（认识世界）及提高对现实系统决策的能力（改造世界）。从认识世界方面来看，数学模型有三个层次的作用：通讯、思考和理解。首先，一个数学模型必须提供一个准确、易于理解的通讯模式，即当信息传递给别人时，这种模式可以减少引起误解的比率。除了具有清楚的通讯模式外，数学模型还必须能帮助人们进行思考，比如进行推理等。最后，当模型已被综合成为一个公理或定理时，这样的模型将使人们能更好地理解现实世界发生的各种现象，达到认识的顶峰。

从改造世界方面来看，数学模型也有三个层次的作用：管理、控制 and 设计。首先，数学模型应能提供给人们对学生进行管理的依据（比如制定计划、分配资源）。一般来说，管理这个层次要求的数学模型可以比较“粗”；第二个层次是控制，它要求的数学模型比较“细”；第三个层次是设计，它要求包含上述两个层次的数学模型，而且要求更加精细和全面。

数学模型的分类一方面与所讨论的系统特性有关，另一方面与研究系统的方法有关。一般来说，系统的特性有线性与非线性、静态与动态、确定与随机、微观与宏观、定常（时不变）与非定常（时变）、集中参数与分布参数之分，故描述系统的数学模型也有这几种类型。研究系统的方法有连续模型和离散模型、时域模型与频域模型、输入输出模型与状态空间模型之分，因此数学模型也可以按这几种来划分。表 2-1 给出了各种数学模型的表达形式。

表 2-1 数学模型与表达形式

数学模型	表达形式（方程特征）
线性	线性方程
非线性	非线性方程
静态	联立方程、含有空间变量的偏微分方程
动态	含有时间变量的偏微分方程、差分方程、状态方程
确定性	不含随机变量的各类方程式
随机性	含随机变量的各类方程式
微观	微分方程、差分方程、状态方程
宏观	联立方程、积分方程
定常（时不变）	不含时间系数的各类方程式
非定常（时变）	含时间系数的各类方程式
集中参数	常微分方程

分布参数	偏微分方程
连续	微分方程
离散	差分方程
参数	数学表达式（各类方程）
非参数	图、表
时域	状态方程、微分方程、差分方程
频域	频率特性
输入输出	传递函数、微分方程
状态空间	状态方程

2.1.2 数学模型的建立方法

建模的主要目的有三个：科学研究、系统设计和预测。在实际应用中，一旦建立了系统模型，就可以对该系统的动态特性有更深入全面的了解，进而提出新系统的设计理论和方法。在进行设计时，可以在模型上通过仿真比较各种设计方案，优化系统参数，设计出达到要求的最优系统。另外，在自然科学和社会科学的研究中，定量预测大多采用模型法，因此首先要建立所控制系统的数学模型。

建立数学模型的方法一般有分析法、测试法和综合法三类。

（1）分析法

分析法（又称为演绎法、机理建模法）是根据系统的工作原理，运用一些已知的定理、定律和原理推导出描述系统的数学模型，例如能量守恒定理、动量守恒定理、热力学定理、牛顿定理和各种电路定理等，这就是理论建模的方法，也称之为白箱问题，如图 2-1（a）所示。

分析法属于演绎法，是从一般到特殊的过程，并且将模型看作为从一组前提下经过演绎而得到的结果。此时，试验数据只被用来进一步证实或否定原始的原理。

（2）测试法

系统的动态特性必然表现在变化的输入输出数据中。通过测量系统在人为输入作用下的输出响应，或正常进行时系统的输入输出记录，加以必要的数据处理和数学计算，估计出系统的数学模型，这种方法也叫做系统辨识，或称之为黑箱问题。如图 2-1（b）所示。

测试法属于归纳法，是从特殊到一般的过程。归纳法是从系统描述的分类中最低一级开始的，并试图去推断较高水平的信息。由于有效的数据集常常是有限的，也是不充分的，因此所得到的数学模型都是对数据的一种外推，而且是不唯一的。如何附加最少量的信息就能实现这种数据的外推成为测试法建模的一个关键问题。

（3）综合法

分析法是各门学科大量采用的，但是它只能用于比较简单的系统中，如一些电路、测试系统、过程监控、动量学系统、飞行控制等，而且在建立数学模型的过程中必须作一些假设与简化，否则所建立的数学模型过于复杂，不易求解。测试法无需深入了解系统的机理，但必须设计一个合理的实验，以获得系统的最大信息量，这点往往是非常困难的。因此，两种方法在不同的应用场合各有千秋。实际应用时，两种方法应该是互相补充，而不能互相取代。在有些情况下，可以将两种方法结合起来，即运用分析法列出系统的理论数学模型，运用系统辨识法来确定模型中的参数。例如有些控制系统的运动方程式可以用动力学分析法求出，方程式中的参数可以用系统辨识法通过动态校准实验求得。两种方法结合起来往往可以得到较好的效果，而且所求得的数学模型的物理意义比较明确。这种方法也称为灰箱问题，如图 2-1（c）所示。

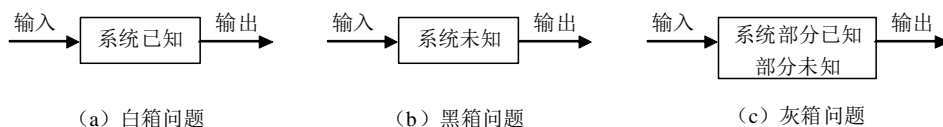


图 2-1 白箱、黑箱、灰箱问题模型

在数学模型中，一种常用的分类方式是按照时间集合进行分类，可以将系统的数学模型分为连续系统时间模型和离散系统时间模型。由于计算机本身是数字系统，所以在计算机仿真中，大量采用离散时间系统来取代连续系统，因此我们以离散时间系统为例来说明系统的数学模型。

(1) 离散时间系统的差分方程

离散时间系统的输入与输出都是离散的时间序列，常用差分方程来描述，即：

$$y[(k+n)T] + a_{n-1}y[(k+n-1)T] + \cdots + a_1y[(k+1)T] + a_0y[kT] = b_mu[(k+m)T] + b_{m+1}u[(k+m-1)T] + \cdots + b_1u[(k+1)T] + b_0u[kT] \quad m \leq n \quad (2-1)$$

其中，输出变量的初始条件为 $y(0), y[T], \cdots, y[(n-1)T]$ ， T 为序列的时间间隔，有时 T 并不真正代表时间点或时刻，而是表示序列的位置点或位置权，因此式 (2-1) 通常也可以写成：

$$y(k+n) + a_{n-1}y(k+n-1) + \cdots + a_1y(k+1) + a_0y(k) = b_mu(k+m) + b_{m+1}u(k+m-1) + \cdots + b_1u(k+1) + b_0u(k) \quad m \leq n \quad (2-2)$$

即：

$$\sum_{j=0}^n a_j y(k+j) = \sum_{j=0}^m b_j u(k+j) \quad (a_n = 1) \quad (2-3)$$

描述离散时间系统的差分方程中，有延时、相乘、相加三种基本单元，如图 2-2 所示。利用这三种单元的组合可以描述系统特性。它们的关系分别为：

$$\text{延迟器: } y(n+1) = u(n)$$

$$\text{加法器: } y(n) = u_1(n) \cdot u_2(n)$$

$$\text{乘法器: } y(n) = u_1(n) + u_2(n)$$

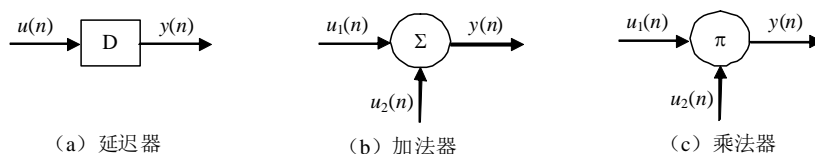


图 2-2 离散系统中的基本单元

(2) 离散时间系统的状态空间表达式

离散时间系统的状态方程可以写为：

$$X(k+1) = \phi X(k) + \phi_m u(k) \quad (2-4)$$

输出方程为:

$$y(k) = CX(k) + Du(k) \quad (2-5)$$

其中, $X(k)$ 是状态列向量, $u(k)$ 是输入列向量, $y(k)$ 是输出列向量, ϕ 是系统状态转移矩阵, ϕ_m 是输入矩阵, C 是输出矩阵, D 是传输矩阵。系统的初始状态向量为 $X(0)$ 。

同一个系统的数学模型可以用不同的形式表示, 它们也可以相互转换, 例如式 (2-3) 描述的系统也可以用状态空间表达式来描述, 只要确定矩阵 ϕ 、 ϕ_m 、 C 和 D 即可。可以推导出此时各矩阵为:

$$\phi = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \cdots & -a_{n-1} \end{bmatrix}, \quad \phi_m = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

若 $m = n$, 则:

$$C = [b_0 - b_n a_0 \quad b_1 - b_n a_1 \quad \cdots \quad b_{n-1} - b_n a_{n-1}]_{1 \times n}, D = \{b_n\} \quad (2-7)$$

若 $m < n$, 则:

$$C = [b_0 \quad b_1 \quad \cdots \quad b_{m-1} \quad 0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0]_{1 \times n}, D = \{0\} \quad (2-8)$$

(3) 离散时间系统的 Z 函数

由离散时间系统时域分析可知, 系统由激励引起的零状态响应 (系统初始条件为零) 为激励 $u(n)$ 与系统单位样值响应 $h(n)$ 的卷积, 即 $y(n) = u(n) * h(n)$ 。对其进行 Z 变换得:

$$Y(z) = U(z)G(z) \quad (2-9)$$

其中, $G(z)$ 为 $h(n)$ 的 Z 变换。

设式 (2-3) 表示的系统的初始条件为零, 即 $y(k)=u(k)=0$ ($k < 0$), 对其两边取 Z 变换得:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_m z^m + b_{m-1} z^{m-1} + \cdots + b_1 z + b_0}{z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \cdots + a_1 z + a_0} \quad (2-10)$$

即系统的传递函数为:

$$G(z) = \frac{\sum_{j=0}^m b_j z^j}{\sum_{j=0}^n a_j z^j} \quad (a_n = 1) \quad (2-11)$$

(4) 离散时间系统的结构图表示

系统结构图 (又称为方块图) 是系统中每个元件或环节的功能和信号流向的图解表示, 各方块表明了系统中各种元件间的相互关系。这种表示方式直观, 能够清楚地表明实际系统中的信号流动情况, 优于抽象的数学表达式。

对于单输入单输出的线性系统, 结构图与传递函数之间很容易转换; 对于多输入多输出或具有非线性环节的系统, 也可通过面向结构图的仿真方法得到系统的动态特性。系统动态结构图的组成符号主要有以下四种:

- 信号线: 表示系统中信号的流通方向, 并标明信号对应的变量;

- 引出点：表示信号从该点取出，从同一信号线上取出的信号，其大小、性质完全相同；
- 比较点：表示两个或两个以上的信号在该点进行叠加；
- 方框：表示输入、输出信号之间的动态传递关系。

只要依据信号的流向，将各元件的方块连接起来，就能够容易地组成整个系统的结构图，还可以通过结构图评价每一个元件对系统性能的影响。结构图比物理系统本身更容易体现系统的函数功能。结构图包含了与系统动态特性有关的信息，但它不包括与系统物理结构有关的信息。因此，许多完全不同和根本无关的系统，可以用同一个结构图来表示。

若已知一个离散时间系统的传递函数为：

$$G(z) = \frac{z^2 + 2z + 1}{12z^2 + 4z + 8} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{(3z^2 + z + 2)} \cdot (z+1)^2 = G_1(z)G_2(z)G_3(z) \quad (2-12)$$

$$\text{其中, } G_1(z) = \frac{1}{4}, G_2(z) = \frac{1}{(3z^2 + z + 2)}, G_3(z) = (z+1)^2$$

则系统的结构图如图 2-3 所示。

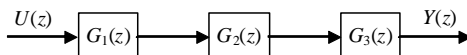


图 2-3 系统结构图

2.1.3 计算机仿真

内勒 (T.H.Naylor) 在其 1966 年的专著中对仿真作了如下定义：“仿真是在计算机上进行试验的数字化技术，它包括数字与逻辑模型的某些模式，这些模型描述某一事件或经济系统（或者它们的某些部分）的若干周期内的特征”。随着计算机技术的不断发展，仿真的概念也不断完善，综合而言，可对计算机仿真作如下定义：计算机仿真就是对真实事物的模拟，是建立在计算机仿真实论、控制理论、相似理论、信息处理技术和计算技术等理论基础之上的，以计算机和其它专用物理效应设备为工具，利用系统模型对真实或假想的系统进行动态研究的一门多学科的综合技术。

从以上定义可以看出，计算机仿真应该包括三个基本要素：系统、系统模型和计算机，而联系这三个要素的基本活动是：系统模型建立、仿真模型建立和仿真实验，如图 2-4 所示。

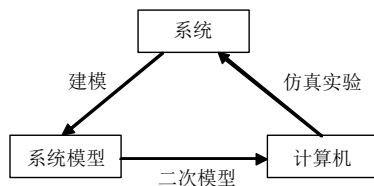


图 2-4 仿真三要素

随着计算机仿真技术的发展，在工程领域已经形成了一些通用的仿真模型（即仿真算法）。比较常见的连续系统的仿真算法有数值积分法、离散相似法和近年来发展的非线性系统仿真算法和分布参数系统仿真算法等。对离散事件系统有事件调度法、活动扫描法、进程交互法等。这些仿真算法可以通过程序设计在计算机上运行，求出系统模型的解。由于这些算法不是本课程的主要内容，在此不对其具体内容进行描述。对仿真算法的研究和编程是软件设计人员的研究内容。

为了满足科学研究和工程设计的需要，目前许多公司推出了一系列的仿真软件，其中美国 MathWorks 公司的 MATLAB 软件是比较突出的一种，为用户提供了一个人机交互式的数字系统环境，使用户可以方便地进行程序设计、数值计算、图形绘制、输入输出和文件管理

等各项操作。下面我们举例说明在 MATLAB 中如何建立用户的仿真模型。

(1) 传递函数模型

在 MATLAB 中, 用函数 `tf()` 来建立系统的传递函数模型, 其调用格式如表 2-2 所示。

表 2-2 MATLAB 函数 `tf()` 的调用格式

调用格式	函数功能	备注
<code>sys=tf(NUM, DEN)</code>	建立连续系统传递函数, 返回变量 <code>sys</code>	输入参数 NUM 为传递函数的分子多项式; 参数 DEN 为传递函数的分母多项式; 参数 <code>T_s</code> 为采样周期。
<code>sys=tf(NUM, DEN, T_s)</code>	建立离散时间系统传递函数, 返回变量 <code>sys</code>	
<code>sys=tf(M)</code>	定义一个增益为 M 的静态系统	

(2) 零极点增益模型

如果系统的传递函数用系统的增益 k 、零点 z 、极点 p 来表示, 则可以得到系统的零极点增益模型。显然, 系统的零极点增益模型是传递函数的特殊表示形式。对于离散时间系统, 零极点增益模型可以表示为:

$$G(z) = k \frac{(z + z_1)(z + z_2) \cdots (z + z_m)}{(z + p_1)(z + p_2) \cdots (z + p_n)} \quad (2-13)$$

其中, z_1, z_2, \cdots, z_m 为系统的 m 个零点, p_1, p_2, \cdots, p_n 为系统的 n 个极点。

在 MATLAB 中, 用函数 `zpk()` 来建立系统的零极点增益模型, 其调用格式如表 2-3 所示。

表 2-3 MATLAB 函数 `zpk()` 的调用格式

调用格式	函数功能	备注
<code>sys=zpk(Z, K, P)</code>	建立连续系统零极点增益模型, 返回变量 <code>sys</code>	输入参数 Z 为系统零点向量; 参数 P 为系统极点向量; 参数 K 为系统增益; 参数 <code>T_s</code> 为采样周期。
<code>sys=zpk(Z, K, P, T_s)</code>	建立离散时间系统零极点增益模型, 返回变量 <code>sys</code>	
<code>sys=zpk(M)</code>	定义一个增益为 M 的静态系统	

(3) 状态空间模型

在 MATLAB 中, 用函数 `ss()` 来建立系统的状态空间模型, 其调用格式如表 2-4 所示。

表 2-4 MATLAB 函数 `ss()` 的调用格式

调用格式	函数功能	备注
<code>sys=ss(A, B, C, D)</code>	建立连续系统状态空间模型, 返回变量 <code>sys</code>	输入参数 A 为系统状态矩阵; 参数 B 为系统输入矩阵; 参数 C 为系统输出矩阵; 参数 D 为系统传输矩阵; 参数 <code>T_s</code> 为采样周期。
<code>sys=ss(A, B, C, D, T_s)</code>	建立离散时间系统状态空间模型, 返回变量 <code>sys</code>	
<code>sys=ss(D)</code>	等价于 <code>sys=ss([], [], [], D)</code> 生成增益为 M 的静态系统	

例如, 对传递函数为 $G(z) = \frac{1.6z^2 - z}{z^2 - 0.8z + 0.5}$ 的离散时间系统, 若要在 MATLAB 中建立其模型, 可在命令窗口中输入如下命令:

```
>> num = [1.6 -1 0];
>> den = [1 -0.8 0.5];
>> TS = 1;
>> sys = tf(num, den, TS);
```

运行后, 在命令窗口得到系统的传递函数模型, 显示如下:

Transfer function:

$$1.6z^2 - z$$

$$z^2 - 0.8z + 0.5$$

MATLAB 软件提供了丰富的数学函数库和应用工具箱, 使用户可以方便地建立仿真模型并进行仿真运算。除此以外, MATLAB 还允许用户以数学形式的语言自己编写程序, 开发特殊的功能模块, 其可扩充性和可开发性有着广阔的发展前景。

由于仿真是对真实事物的模拟, 用模型来模仿实际系统的表现, 使得仿真技术在应用上具有安全性和经济性的特殊功效。因此, 仿真技术在各个领域获得了十分广泛的应用。归纳起来, 在进行系统性能研究的过程中, 计算机仿真技术的主要作用有:

- (1) 难以用数学公式表示的系统, 或者没有建立和求解数学模型的有效方法, 以及虽然可以用解析的方法解决问题, 但数学的分析与计算过于复杂, 这时计算机仿真可以提供简单可行且有效的求解方法。
- (2) 优化系统和参数的设计。在复杂的系统建立之前, 能够通过改变仿真模型结构和调整参数进行优化系统设计, 提高设计质量。
- (3) 难以在实际环境中进行实验和观察时, 仿真是唯一可行的方法。
- (4) 提高设计效率、缩短设计周期, 以达到降低设计成本、节省经费的目的。仿真实验只需要在可重复使用的模型上进行, 也使设计成本大幅度降低。
- (5) 对系统或系统的某些部分进行性能评价, 系统抗干扰性的分析研究等。
- (6) 可重现系统故障, 以便分析、判断故障产生的原因。
- (7) 可以避免试验的危险性, 解决实际试验中难以实现的项目。
- (8) 准确、全面地模拟和分析系统, 通过计算机仿真为管理决策和技术决策提供依据。
- (9) 训练系统操作人员。

2.1.4 电子系统的建模与仿真

电子系统作为一种工程系统也具有以上所描述的系统的特征, 也可以进行抽象而形成系统的数学模型, 并利用计算机进行仿真。这样做的目的是在系统的具体电路制作之前, 先对系统的可行性和有效性进行研究, 避免电子系统设计的盲目性。

电子系统的建模可以看成是一种“概念式设计”。在这个阶段, 设计人员无须考虑具体的电路细节, 而是集中精力进行创造性的概念设计和方案设计。一旦这种概念设计以高层次的描述输入计算机后, 就可以通过 EDA 软件完成模型的仿真, 得到试验结果。这个工作大大提高了后续产品的设计效率, 缩短了开发周期。

目前, 电子系统的建模和仿真软件种类较多, 如 Cadence 公司的 SPW, Synopsys 公司的 COSSAP, 微波设计的 Ansoft 等, 还有一些更通用的设计软件, 如 SPICE、PSPICE、MATLAB 和 SystemView 等。

1. 模拟电路的建模和仿真

模拟电路与数字系统的设计有一些不同。模拟电路一般是由一些元、器件组成, 包括线性元件和非线性元件。线性元件有电阻、电容、电感、恒压源、恒流源等, 非线性元件有非线性电阻、晶体二极管、三极管、场效应管等。如果要用计算机对模拟电路进行设计的话, 首先就要在计算机中为这些元、器件建立模型, 即用计算机中的模块来等效实际的物理器件。这种模型既要便于计算机计算, 又要能比较精确地反映器件的特性。模拟器件模型建立的正确性和精度如何将对电路的设计结果和电路分析产生重大的影响。

最早的模拟电路的建模和仿真软件是 SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), 它是美国加州大学伯克利分校以 Pederson 教授为首的计算机辅助集成电路设计

小组开发的，第一个版本于 1972 年完成。SPICE 是一个通用的电路分析程序，可以对电路进行直流分析、交流分析、瞬态分析、噪声分析、灵敏度分析、傅立叶分析以及谐波失真分析等，还可以对不同温度条件下的电路进行分析。经过不断地完善，SPICE 已经成为一种标准的分析工具。

自从 SPICE 问世以来，其版本的更新持续不断，主要是在电路输入、图形化、数据结构和执行效率上有所增强。同时，各种以 SPICE 仿真算法为核心的商用版本也随之产生，运行在 PC 和 UNIX 平台上，其中最为常用的是 Synopsys 公司的 HSPICE 和 Microsim 公司的 PSICE 软件。HSPICE 是 SPICE 工业标准的仿真软件，在业内应用最为广泛，具有精度高、仿真功能强大等特点，但它没有前端输入环境，需要事前准备好网表文件，不适合初级用户，主要应用于集成电路设计。PSPICE 是个人用户的最佳选择，具有图形化的前端输入环境，用户界面友好，性价比高，主要应用于 PCB 板和系统级的设计。

PSPICE 采用的计算方法与 SPICE 类似，并增加了新的功能。对于一般的元器件，PSPICE 为其建立的是物理模型。对于运算放大器、电压比较器等半导体器件，建立的是外特性模型。

物理模型就是从器件的物理特性出发，获得集中的参数方程式，确定模型参数。能够建立物理模型的元器件有电阻、电感、电压/电流控制部件、传输线等，还有一些晶体二极管、三极管、场效应管也可以建立物理模型。

当器件的内部结构过于复杂，内部结构难于构造时，可以按照器件的外部输入/输出特性来建立模型，也称为宏模型。外特性模型可以是一组数学方程、一组多维数组或一个等效电路，其特征是，在一定的精度范围内其端口特性与器件的端口特性相近，而其结构复杂度明显降低。外特性模型在设计 VLSI 等大规模复杂系统时非常重要。

物理器件在不同的工作环境中，其物理参数会发生变化。比如工作温度或工作电压变化了，器件可能呈现出不同的特性。因此，器件的模型参数也要相应地跟着改变，这样才能比较精确地反映实际情况。

除了可以为模拟元器件建立相应的模型之外，PSPICE 还具有多种仿真功能，包括：

- 直流分析：计算电路的直流工作点、直流小信号传输函数、直流转移特性曲线。
- 交流小信号分析：包括频域分析、噪声分析。
- 瞬态分析：包括瞬态特性分析、计算谐波系数和失真系数。
- 灵敏度分析：包括直流灵敏度分析和交流小信号灵敏度分析。
- 容差分析：计算电路中元器件参数偏离标称值的情况，对电路输出特性的影响。
- 温度特性分析：根据设定的温度值，进行不同温度下的电路特性分析。
- 优化设计：在给定电路拓扑结构和性能约束的情况下，确定电路元器件的最佳参数。

PSPICE 软件包主要包括电路原理图编辑程序（Schematics）、电路仿真程序（PSPICE A/D）、输出结果绘图程序（Probe）、激励源编辑程序（Stmed: Stimulus Editor）、器件建模程序（Parts）和优化程序（PSPICE Optimizer）等。其中：

1. 使用 Schematics 可以直接绘制电路原理图，自动生成电路描述文件，或打开已有的文件，修改电路原理图；可以对元件进行修改和编辑；可以调用电路分析程序进行分析，并可调用输出结果绘图程序（Probe）观察分析结果。它是集 PSPICE A/D、Probe、Stmed 和 PSPICE Optimizer 于一体的一个功能强大的集成环境。

2. PSPICE A/D 是一个数据处理器。它可以对在 Schematics 中所绘制的电路进行模拟分析，运算出结果并自动生成输出文件和数据文件。

3. Probe 相当于一个示波器，它可以将 PSPICE A/D 运算的结果在屏幕或打印设备上显示出来。模拟结果还可以接受由基本参量组成的任意表达式。

4. Stmed 是产生信号源的工具，它在设定各种激励信号时非常方便直观，而且容易查

对。

5. **Parts** 是对器件建模的工具，它可以半自动地将来自厂家的器件数据信息或用户自定义的器件数据转换为 **PSPICE** 中所用的模拟数据，并提供它们之间的关系曲线及相互作用，确定元件的精确度。

6. **PSPICE Optimizer** 是优化设置工具。它可根据用户指定的参数、性能指标和全局函数，对电路进行优化设计。

以下我们用两个例子来说明 **PSPICE** 的应用。第一个例子是二阶动态电路的仿真分析，针对图 2-5 所示的二阶电路，分析 RLC 串联电路的方波响应，其中 $f=1\text{KHz}$, $R=5\text{K}\Omega$, $L=10\text{mH}$, $C=0.022\mu\text{F}$ 。改变电阻 R 值，观察电路在欠阻尼、过阻尼和临界阻尼时 U_c 波形的变化。设计的步骤为：

(1) 在 **PSPICE** 的 **Schematics** 环境下编辑电路。取出电阻 **R1**、电感 **L1**、电容 **C1**、接地端 **EGND**、**PARAM** 符号以及信号源 **V1** 为脉冲型电压源 **VPULSE**。把元件放在所需位置，画导线连接电路；电路图连接完毕，再给每个元件输入各自的名字和参数。其中脉冲型电压源 **VPULSE** 的参数为 **V1**（起始电压）为 0V ，**V2**（峰值电压）为 5V ，**TR**（上升时间）为 $1\mu\text{s}$ ，**TF**（下降时间）为 $1\mu\text{s}$ ，**PW**（脉冲宽度）为 $500\mu\text{s}$ ，**PER**（周期）为 1ms 。为了观察 **V1** 及 **C1** 的波形，设置两个节点电压标识符指向 **V1** 及 **C1**。然后将编辑好的电路起名存盘。

(2) 对电路做电路规则检查。注意有无悬浮节点和零参考点等。如果出现错误，则重新修改编辑电路，重新进行电路规则检查，直到没有错误为止，然后就可以进行下一步工作了。

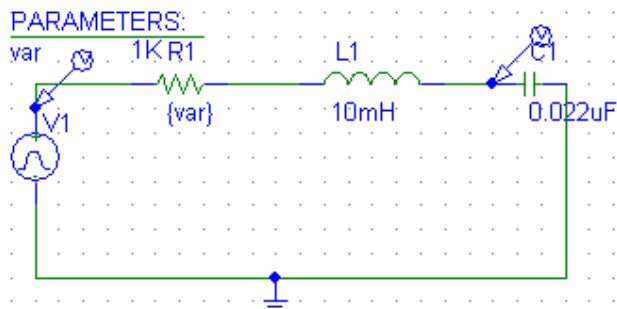


图 2-5 二阶动态电路原理图

(3) 对所编辑的电路进行分析类型的设置。在本例中，要进行瞬态分析（**Transient**）和参数扫描分析（**Parametric**）。在 **Transient** 设置中，将其打印步长 **Print Step** 设为 20ns ，动态分析结束时间 **Final Time** 设为 1ms 。在 **Parametric** 中，扫描变量仍为全局变量 **var**，可以选择线性扫描，线性扫描的起点设为 1P ，终点为 5K ，步长为 500 。

(4) 设置仿真计算完成后，自动调用输出结果绘图程序。运行仿真程序，输出波形如图 2-6 所示。可以观测到电路在欠阻尼、过阻尼和临界阻尼时 U_c 波形的变化。

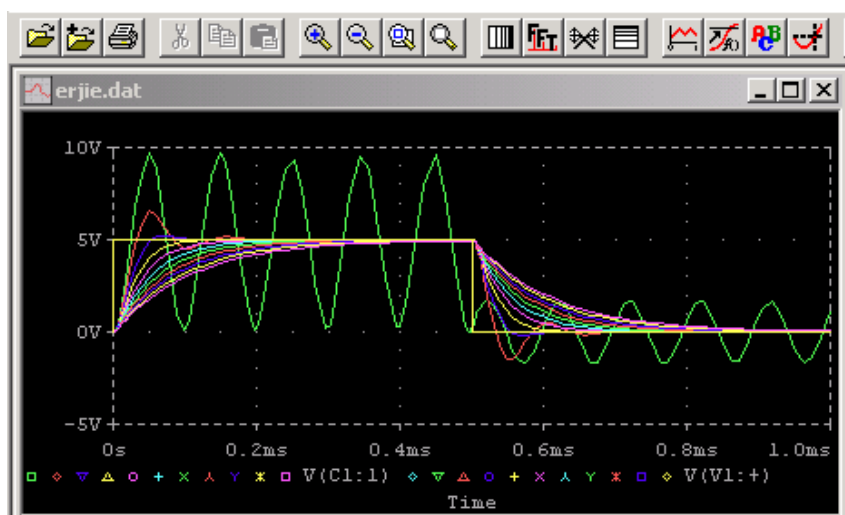


图 2-6 Probe 图形窗口输出的图形

第二个例子是含有运放的直流电路的分析。针对如图 2-7 所示的电路图，分析 R_1 、 R_2 中的电流和运放的输出电压。在 0-4V 范围内，调节电压源 V_1 的源电压，观察运放输出电压 V_{n2} 的变化，总结运放输出电压 V_{n2} 与源电压 V_1 之间的关系。设计的步骤为：

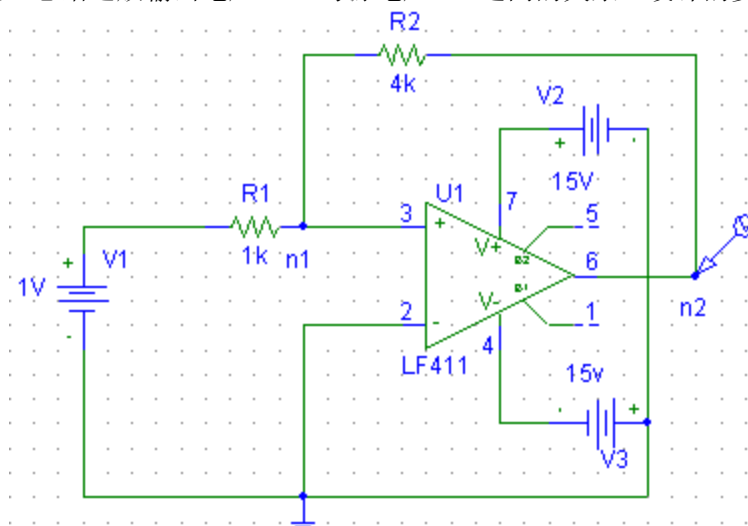


图 2-7 含有运放的直流电路原理图

(1) 在 Schematics 环境下编辑电路。取出元件摆放到合适的位置，画导线连接电路；电路图连接完毕，再给每个元件分别赋值。其中运放在 Analog.slb 库中选取 LF411，注意维持运放正常工作所需要的两个偏置电源的正负极。为了观察仿真的输出波形，还要在电路中设置节点电压标识符。

(2) 对电路做电路规则检查。注意有无悬浮节点和零参考点等。如果出现错误，则重新修改编辑电路，重新进行电路规则检查，直到没有错误为止。

(3) 对所编辑的电路进行分析类型的设置。本例可以设置当前电路为直流扫描分析，扫描变量类型选 Voltage Source，扫描变量名为 V_1 ，选中线形扫描，扫描变量开始值为 0V，扫描变量结束值为 4V，线形扫描时扫描变量的增量为 1V。

(4) 仿真运算后，单击仿真工具栏里的显示电压和显示电流，结果表明，当 V_1 为 1V 时， V_{n2} 为 -4V， I_{R1} 和 I_{R2} 的值都为 1mA。

(5) 设置仿真计算完成后，将自动调用输出结果绘图程序。运行仿真程序，输出波形如图

2-8 所示。

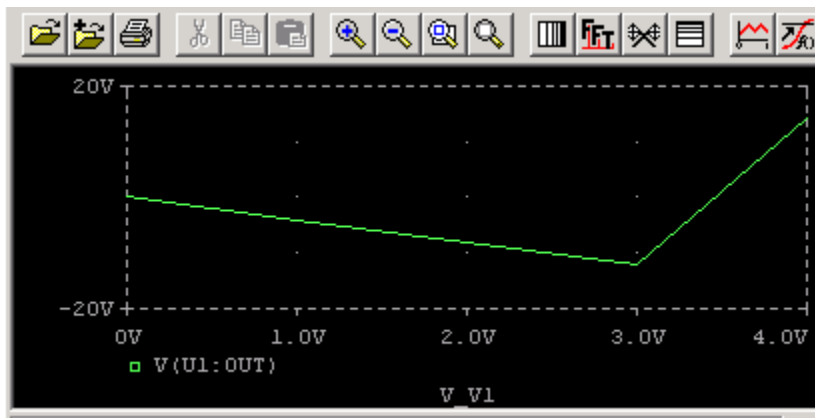


图 2-8 Probe 图形窗口输出的图形

由输出波形可知, 当输入电压源的电压小于 3V 时, 该电路为反向输出比例器, 输出电压 V_{n2} 与输入电压成正比。

2. MATLAB 和 Simulink 简介

MATLAB 是高性能的数值计算和可视化的软件, 它将数值分析、矩阵运算、信号处理和图形显示等汇集成一体, 为各个领域的应用提供了基础。

1980 年前后, 美国新墨西哥大学的 Cleve Moler 教授为减轻学生编程负担, 构思并开发了 MATLAB (MATrix LABoratory, 矩阵实验室)。经过几年的试用, 1984 年, Math Works 公司正式将 MATLAB 推向市场。MATLAB 以线性代数软件包 LINPACK 和特征值计算软件包 EISPACK 中的子程序为基础, 允许用户根据数值问题的复杂程度, 对问题进行分段处理, 这就使得矩阵的运算变得非常容易。

在 MATLAB 后续的版本中, 除原有的数值计算功能外, 还新增了丰富多彩的图形图像处理功能及多媒体功能, 应用范围越来越广。20 世纪 90 年代, MATLAB 已成为国际自动控制界公认的标准计算软件。

在以上的介绍中, 我们已经举例说明了 MATLAB 软件中用于建立系统传递函数模型、零极点模型和状态空间模型的函数, 下面我们再举例说明在 MATLAB 中如何对电路进行建模和仿真。

图 2-9 所示是由电阻、电容和电感组成的电路, 计算开关 K 闭合后电容 C 两端的电压。将开关 K 闭合的时刻记为初始时刻, 其中 $L=0.1H$, $C=10^{-3}F$, $R=10\Omega$, $e=5V$ 。

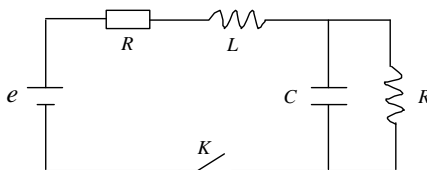


图 2-9 RLC 电路图

(1) 建立系统数学模型

根据电路理论知识, 图 2-9 可以用如下微分方程来表示:

$$LC \frac{d^2 v}{dt^2} + \left(\frac{L}{R} + RC \right) \frac{dv}{dt} + 2v(t) = e \quad (2-14)$$

初始条件 $v(0) = v'(0) = 0$ 。

(2) 化简模型

一般高阶微分方程的求解都是化为一阶常微分方程组来解。这里系统为二阶微分方程，故引入辅助方程 $v'(t) = w(t)$ ，代入式 (2-14) 中得：

$$w'(t) = -\frac{L+R^2C}{LRC}w(t) - \frac{2}{LC}v(t) + \frac{e}{LC} \quad (2-15)$$

取状态变量 $x_1(t) = v(t)$ ， $x_2(t) = w(t)$ ，则系统的状态空间为：

$$\begin{cases} x_1' = x_2 \\ x_2' = -\frac{2}{LC}x_1 - \frac{L+R^2C}{LRC}x_2 + \frac{e}{LC} \end{cases} \quad (2-16)$$

系统的初始条件为 $x_1(0) = x_2(0) = 0$ 。

(3) 利用 MATLAB 求解

在 MATLAB 中建立函数的 M 文件如下：

```
Function x=fsy(t,x);
```

```
L=0.1; C=1.0e-3; R=0; e=5;
```

```
x=[x(2); -2/(LC)*x(1)-(L+R*R*C)/(L*R*C)*x(2)+e/(LC)];
```

在 MATLAB 的命令窗口输入如下命令，可得仿真结果如图 2-10 和 2-11 所示。

```
>>tspan=[0,0.25];
```

```
>>x0=[0,0];
```

```
>>[t,x]=ode45('fsy',tspan,x0);
```

```
>>plot(t,x(:,1));
```

```
>>grid on;
```

```
>>plot(t,x(:,2));
```

```
>>grid on;
```

以上仿真过程中，函数 ode45() 对应 4、5 阶龙格-库塔 (Runge-Kutta) 算法，是连续系统数字仿真中最常用的数值积分法。

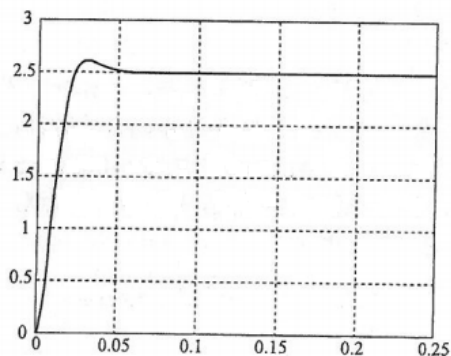


图 2-10 电压 $v(t)$ 曲线

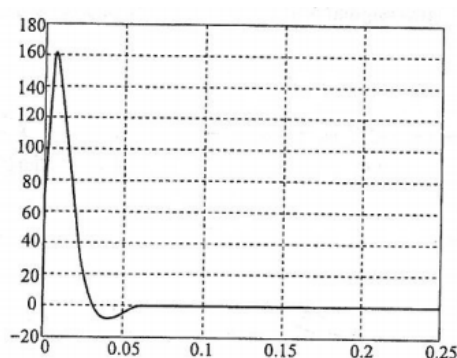


图 2-11 电压 $v(t)$ 导数曲线

为了能够给计算机输入一个准确的系统模型，并进行分析和仿真，1992 年 Math Works 公司为 MATLAB 提供了新的控制系统模型图形输入与仿真工具 Simulink。Simulink 实现了可视化建模，并实现了 Simulink 与 MATLAB 等多工作环境间的文件互用和数据交换。

Simulink 是一个交互式操作的动态系统建模、仿真与分析的集成环境，它支持线性和非线性系统、连续和离散时间模型以及两者的混合模型。在建立系统模型时，Simulink 提供了一个图形化的用户界面（GUI），可以用鼠标点击或拖拉模块的图标来建模。通过图形界面，可以在计算机上快速地“画”出模型图，不需要书写代码。这种直观形象的方式是以前的仿真软件包远远不能相比的。

大多数的物理系统都可用代数方程组、微分方程组或差分方程来描述，而 Simulink 采用的是面向结构图模块化的仿真原理，类似于前面讲过的系统结构图形式。Simulink 的模型不需要编写程序行，整个模型由系统提供的基本模块搭建而成。使用者可以将模块组成子系统，再由子系统组成多级模型。Simulink 对模块和连接的模块数没有限制。

Simulink 提供了许多专用的基本模型库，图形化建模功能就是由模型库支持的。这个库包括接收器、信号源、线性和非线性组件以及连接件等，用户自己也可以定制或创建模块。Simulink 还提供了交互性很强的非线性仿真环境，仿真结果可以在运行的同时通过示波器或图形窗口显示。

Simulink 可以在实际系统制作出来之前，预先对系统进行仿真分析，并可以对系统做适当的实时修正和参数调整，以提高系统的性能，减少设计系统过程中反复修改的时间，实现高效率地开发系统的目标。

图 2-12 是 Simulink 中通信系统的模型库，它提供了组成通信系统的各环节的模型，包括信道模型库（Channels）、接收模块库（Comm Sinks）、信源模型库（Comm Source）、检错和纠错编码模型库（Error Detection and Correction）、交织模型库（Interleaving）、调制模型库（Modulation）、射频修复模型库（RF Impairments）、信源编码模型库（Source coding）以及同步模型库（Synchronization）等。利用这些基本的模型，设计者可以搭建自己的通信系统模型，并进行动态的仿真。图 2-13 是用 Simulink 建立的正交频分复用（OFDM）系统模型。

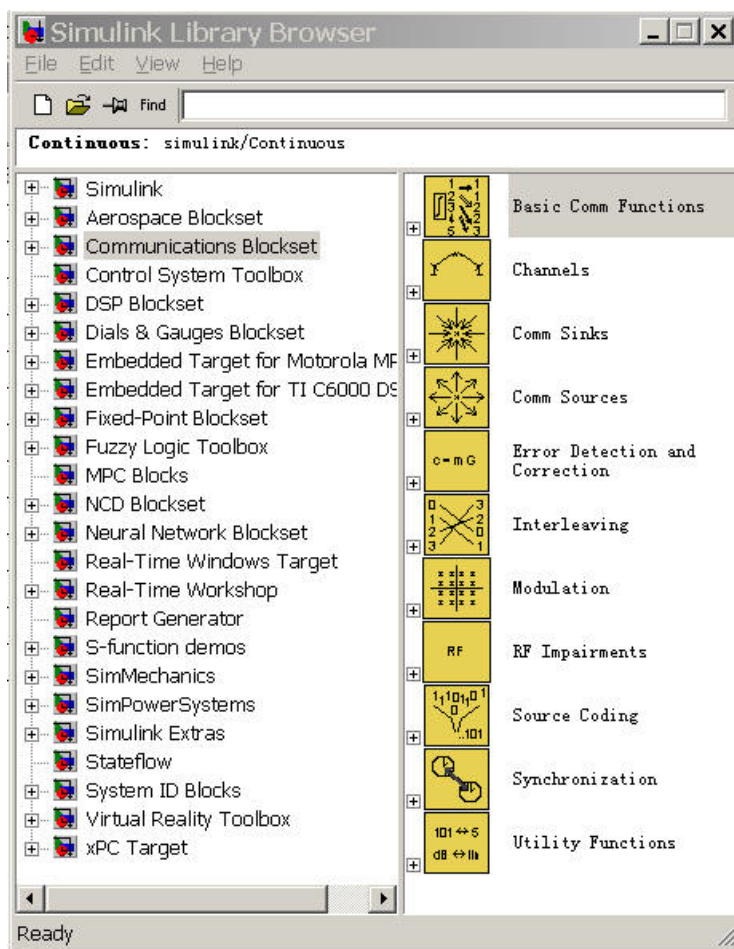


图 2-12 Simulink 中的通信模型库

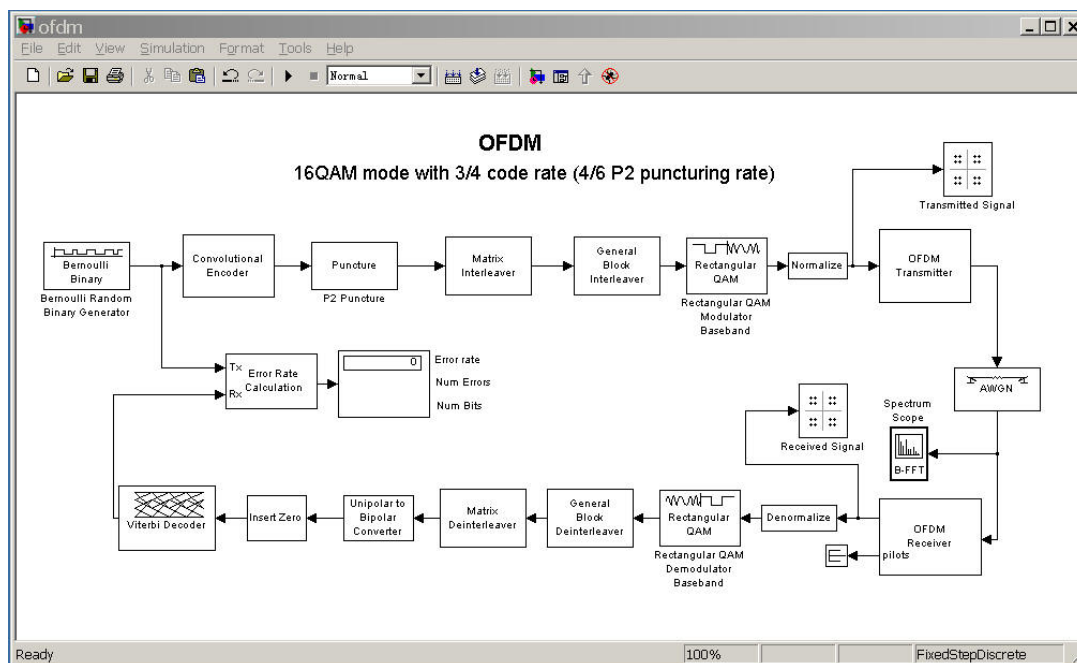


图 2-13 用 Simulink 建立的正交频分复用 (OFDM) 系统模型

当一个系统模型建立以后,就可以通过 MATLAB 的命令窗口或者 Simulink 的菜单对它进行仿真。例如对图 2-13 的系统启动仿真以后,可以观察到系统的误码率和发送端、接收

端符号的星座图等。**Simulink** 菜单对于交互式工作非常方便,而命令行方式对于处理成批的仿真比较有用。在 **Simulink** 的模块库中,有一些显示模块可以在运行仿真时观察到仿真的结果,如 **Scope** 或其他模块。另外,用户还可以在仿真时改变参数并且立即就可以观察到结果的变化。仿真的结果也可以放在 **MATLAB** 的工作空间中以待进一步的处理或者可视化。

系统模型分析可使用的工具包括线性化和平衡点分析工具、**MATLAB** 的其它各种工具以及 **MATLAB** 的应用工具箱。因为 **MATLAB** 和 **Simulink** 是集成在一起的,所以用户可以在两种环境下对模型进行仿真、分析和修改。

3. SystemView 简介

现代通信系统的发展使得通信系统的设计已经成为一个十分复杂的系统工程,人工设计已经不能适应日益复杂的系统设计需求了,必须要利用计算机进行通信系统的设计、仿真和分析。在这种情况下,出现了多种针对通信系统设计的 EDA 软件工具。

SystemView 是美国 ELANIX 公司推出的基于 PC 机 Windows 平台的动态系统仿真软件,特别适合于通信系统的设计和分析,它通过形象、直观的方法构建系统,同时提供了丰富的部件资源、强大的分析功能和开放的可视化体系结构,能满足数字信号处理、滤波器、复杂的通信系统等不同层次的设计、仿真要求。

在 **SystemView** 中,可以直接按物理概念建立系统模型,也可以建立系统的数学模型,它们都有相应的分析和仿真工具支持。**SystemView** 仿真系统有如下特点:

1) 能够对大量的应用系统进行建模

SystemView 可以对数字信号处理、通信和控制系统等大量应用中的模拟、数字、数模混合及多速率系统进行建模。系统具有大量可选择的专业库,包括通信、逻辑、数字信号处理、射频/模拟、自适应滤波器、无线通信系统(GSM、CDMA、FDMA、TDMA、PCS)、数字视频广播(DVB)系统以及卫星通信系统等,用户可以利用这些库建立自己的系统模型。同时, **SystemView** 允许用户自己编写代码库,并可以将用户代码库自动集成到 **SystemView** 中。

2) 能够进行层次式的结构设计

SystemView 提供了子系统对象的无限制分层结构功能,可以很容易对用户的系统进行层次化的设计。用户可以先定义一些简单的功能模块,再将这些简单的功能模块连接形成一个子系统,然后再通过连接多个子系统形成更大的系统。这样,用户的设计就是一个层次结构,单一的图符可以代表一个复杂系统,只要用鼠标双击图符就可以进入下一层来查看更多的细节设计。

3) 能够快速方便地进行动态系统设计与仿真

SystemView 的专业库中提供了几百种的信号源、接收端、操作符和功能模块,用户只需用鼠标点击图符就可创建各种线性、非线性控制系统和各种滤波器,并输入/输出基于真实系统模型的仿真数据。这些数据可以形成供外部处理的各种文件格式。

4) 具有强大的信号分析和数据块处理能力

SystemView 提供了一个交互式的分析窗口,可以对系统波形进行详细检查。数据波形可以被放缩、滚动、滤波,还可以进行谱分析。分析窗口包含一个功能十分强大的数据块处理器,可以对仿真生成的数据进行常规性的处理,满足一般分析的需求。

5) 提供了与其他一些硬件设计工具的接口

SystemView 提供了与一些硬件设计工具的接口,以便将设计结果快速方便地转换成硬件实现。这些接口包括:

- 与 Xilinx 公司的 Core Generator 的 IP 核的接口,可以将 **SystemView** 系统中的部分原件转换成数据文件,下载到 FPGA 芯片中。

- 与 TI 公司的 DSP 集成开发环境 CCS (code composer studio) 的接口, 可以将 DSP 库中的部分器件转换成 C 语言代码, 或在系统仿真中嵌入实际的硬件电路。
- 与 Xpedion 公司的射频/微波仿真工具的接口, 可以将系统级仿真与电路级仿真结合起来, 对分立元件的射频/微波特性进行仿真。

6) 具有自我诊断功能

SystemView 提供了自动检查系统连接的功能, 可以显示连接的出错信息和出错的图符。这对用户的系统检查非常有利。

图 2-14 和图 2-15 分别示出了在 SystemView 中建立的奈奎斯特定理的检验模型和仿真结果。

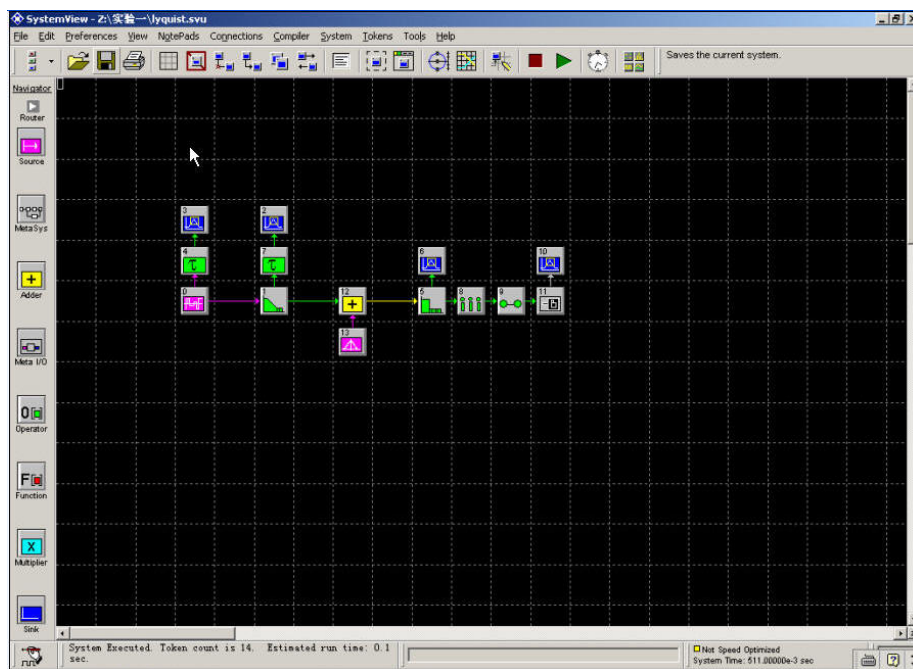


图 2-14 SystemView 中建立的奈奎斯特定理的检验模型

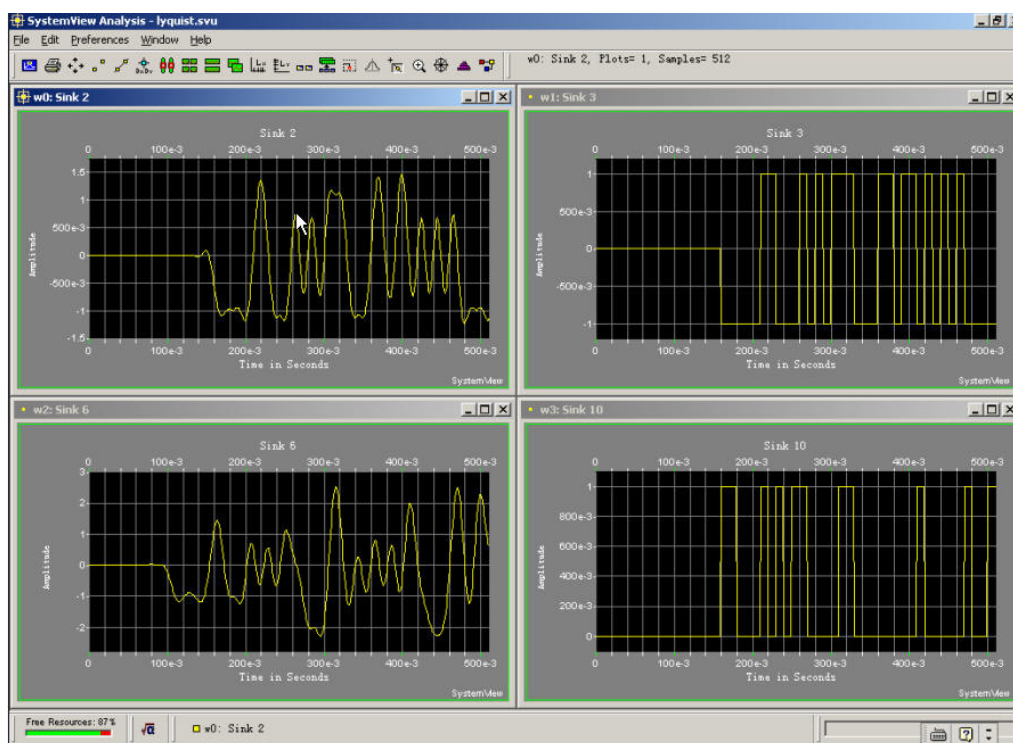


图 2-15 奈奎斯特定理的仿真结果

2.2 模拟集成电路设计

当电子系统的模型经过仿真以后,如果性能达到要求,那么就可以开始考虑电子系统的具体实现了。在现代电子系统的设计中,集成电路已经成为核心元器件,电子系统的设计都是围绕集成电路来进行的。集成电路按照功能不同可分为模拟集成电路、数字集成电路和数/模混合集成电路三大类,它们的设计方法也有很多的不同之处。本小节将重点描述模拟集成电路的设计方法。

2.2.1 信号分类

根据信号在时间和幅度上是否连续,可以将各种电路所处理的信号分为三类:连续时间信号、离散事件信号和数字信号。

连续时间信号在时间和幅度上都是连续的,因此信号在一定时间段内的任何时刻均可以发生任意大小的变化,如图 2-16 所示。模拟电路所处理的信号绝大部分属于这种类型,这类电路在时域上一般采用微分方程来描述,并可通过拉普拉斯变换得到它的频域特性。

离散时间信号在幅度上是连续的,但在时间上是离散的,即信号只能在某些特殊的时刻才发生(任意大小)变化,在其他时刻,信号值保持不变,如图 2-17 所示。模拟电路中一类特殊电路—开关电容电路—就是用来处理这类信号的。开关电容电路在时域上可以采用差分方程来描述,并可通过 z 变换来得到它的频域特性。

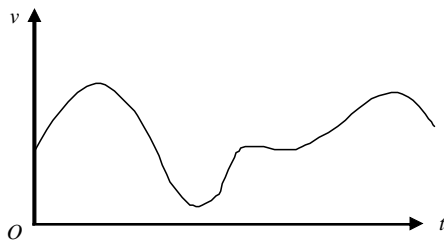


图 2-16 连续时间信号

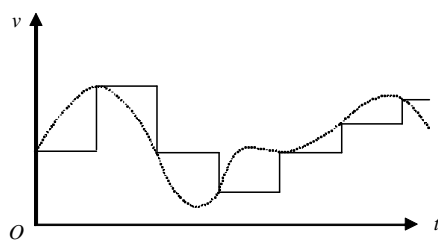


图 2-17 离散时间信号

数字信号无论在时间上还是在幅度上都是离散的，即信号只能在某一特殊的时刻才可以发生变化，变化值只能是某一最小单位的整数倍，在其他时刻，信号值保持不变，如图 2-18 所示。由于数字信号的幅度变化值只能是某一最小单位（图 1-3 中的 a ，称为量化精度）的整数倍，因此数字信号的幅度可表示为两幅度值信号的二进制加权求和，即

$$\begin{aligned} V &= D \cdot a = (b_{N-1}2^{N-1} + b_{N-2}2^{N-2} + \cdots + b_12^1 + b_02^0) \cdot a \\ &= \sum_{i=1}^N (b_{N-i}2^{N-i}) \cdot a \end{aligned} \quad (2-17)$$

其中，仅具有两个幅度值的信号 b_i 仅能取 1 或者 0，分别代表高电平或者低电平， N 为整数，表示数字信号的位数。图 1-3 所表示的数字信号是三位仅具有两幅度值信号的二进制加权求和。数字电路所处理的信号就属于这种类型。同离散时间信号一样，数字信号在时域上采用差分方程来描述，并可通过 z 变换来得到它的频域特性。

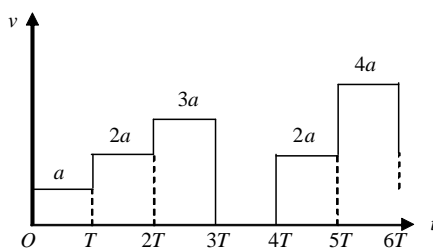


图 2-18 数字信号

对比图 2-16 和图 2-18 可以发现，连续时间信号所包含的信息量远比数字信号丰富，实际上，模拟信号可以看作是无穷多位两幅度值信号的二进制加权求和。正因为这个原因，具有相同功能的模拟电路和数字电路相比，模拟电路将更加紧凑，所需要的元器件数目远小于数字电路。但是，由于连续时间信号不论在时间上还是幅度上都是连续的，这意味着模拟电路必须能在任意时刻准确地处理具有任意精度取值的信号。从这一点来看，模拟信号处理比数字信号处理更复杂、更困难，模拟电路的设计比数字电路的设计需要更多的经验和知识。

2.2.2 集成电路与分立电路

在集成电路工艺技术发明之前，人们采用分立电路来实现各种电路功能。分立电路一般采用印刷电路板（PCB）工艺来制作，将各种元器件（到现在，可能还包括各种规模的集成电路芯片）安装在一块介质材料上，并通过介质材料表面的金属连线将元器件与芯片在电学上连接起来，从而实现一定的电路功能。图 2-19 给出了一个 PCB 板的照片，可以看到 PCB 板上包含有电容、电阻等各种分立元器件和很多集成电路芯片。

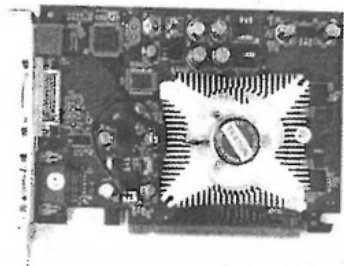


图 2-19 PCB 板照片

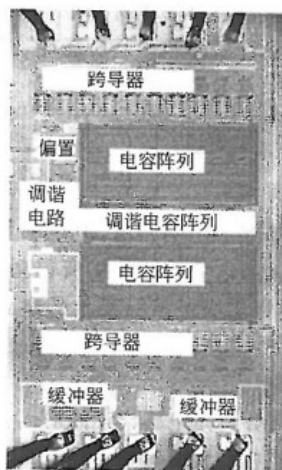


图 2-20 集成电路的芯片显微照片

集成电路 (Integrated Circuit, IC)，是指以半导体材料为衬底，通过一系列加工工艺实现各种元器件，并将各种元器件在电学上连接起来以实现某种电子功能的产品。实际上，集成电路可以看成是缩小之后的分立电路，它的尺寸远小于分立电路的尺寸。它们之间的另一个区别是集成电路工艺同时实现了各种元器件和连线，设计者并不能像设计分立电路那样自由选择不同厂家的元器件或者集成电路芯片。图 2-20 给出了一个集成电路的芯片显微照片。

可以看到，分立电路与集成电路具有很多相似之处，遵从相似的电学规律和设计过程，但它们之间也具有很大的区别：

1) 在分立电路中，设计者可以选择不同厂家生产的元器件，而且通过测试可以准确了解元器件的电学特性，这样设计者可以对电路功能进行很好的控制。而在集成电路中，设计者只能选择集成电路生产厂家提供的有限类型的元器件，而且由于工艺偏差的影响，元器件的特性跟厂家给出的参考值之间存在较大误差，这会影响到电路的性能，设计时必须考虑到工艺偏差的影响。

2) 在分立电路设计中，由于无源元件成本远低于有源器件，而且无源元件的电学特性更易测量，无源元件在分立电路中得到广泛采用；而在集成电路设计中，由于无源元件占用的芯片面积远大于有源器件，而且无源元件的工艺偏差远大于有源器件，集成电路中广泛采用有源器件，尽量少用无源元件。

3) 由于集成电路是在同一衬底上用同一工艺制作元器件，因此相同类型的元器件之间具有很高的匹配性。元器件之间的匹配性能会直接影响模拟电路的很多性能指标，从这点上来说，集成电路比分立电路具有更大的优势。

4) 分立电路的可测性要远好于集成电路。在分立电路中，所有的电学连接点均可以进行电学测量，方便了电路的调试；但在集成电路中，仅连接到焊盘的电学连接点才是可以测量的。由于焊盘需要占用很大的芯片面积，芯片上只能包含有限个数的焊盘，因此集成电路的可测点是很少的，电路的测试问题必须在设计阶段就进行考虑。

5) 分立电路可以很容易地更换元器件，但在集成电路中，若某一个元器件或者元器件之间的连接关系存在问题，除了重新制作或采用激光校准方法外（成本非常高），基本上没有办法进行修正。从这个意义上说，集成电路对设计者提出了更高的要求，设计者必须尽其所能地确保集成电路能一次制作成功。

2.2.3 电路分析与电路设计

电路分析与电路设计是两个相反的过程。电路分析是在已知电路拓扑结构和元器件尺寸的基础上应用简单，但足够精确的元器件模型来分析该电路所具有的各种性能，对一个具体的电路进行分析所得到的结果应该是唯一的；而电路设计是根据一组给定的性能指标，设

设计出满足指标要求的电路拓扑结构并确定其中各种元器件的参数,不同的设计者完成同一设计任务所得到的结果强烈依赖于个人喜好和经验,因此彼此之间可能存在巨大差异。

电路分析是电路设计的前提和基础。电路分析可以帮助设计者增强电路知识,了解各种拓扑结构的优势和缺点,为设计者选择合适的电路结构提供参考;而且电路分析也是进行电路设计的前提,只有对电路进行了全面的分析,设计者才能明确如何在各种设计指标之间进行权衡,从而确定各元器件的参数。因此,对集成电路设计者来说,虽然电路设计是最终目标,但电路分析能力的培养是必不可少的,只有具有了高超的电路分析能力,对各种电路拓扑结构的优缺点有明确认识,才能在进行电路设计时游刃有余,设计出性能优良的电路。

1. 模拟电路的基本分析方法

在模拟电路的分析与设计过程中,有几个定理经常用到,它们是整个模拟电路分析与设计的基础。第一个定理是基尔霍夫电压定理(KVL):任何一个电路回路上的各元器件电压降之和等于0。例如,对于如图2-21所示的电路网络,它有两个环路,由点T断开,绕环路a和b各一圈,则有:

$$v_1 + v_{R1} - v_s = 0 \quad (\text{环路 b}) \quad (2-18)$$

$$v_1 + v_C - v_{R2} = 0 \quad (\text{环路 a}) \quad (2-19)$$

在应用基尔霍夫电压定理时,应注意图中各电压的方向。

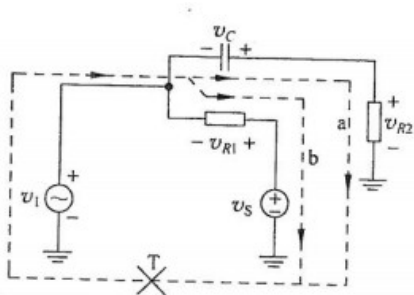


图 2-21 包含两个环路的电路网络

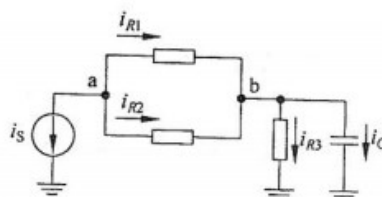


图 2-22 包含两个节点的电路网络

第二个定理是基尔霍夫电流定理(KCL):在电路中流进某个节点的各支路电流之和等于0。例如,对于如图2-22所示的电路网络,它有两个节点a和b,分别应用基尔霍夫电流定理,可得

$$-i_s - i_{R1} - i_{R2} = 0 \quad (\text{节点 a}) \quad (2-20)$$

$$i_{R1} + i_{R2} - i_{R3} - i_C = 0 \quad (\text{节点 b}) \quad (2-21)$$

同样,在应用基尔霍夫电流定理时,应注意图中各电流的方向。

第三个定理是欧姆定理:电阻上的压降等于流过电阻的电流乘以该电阻的阻值,即

$$v_R = i_R \cdot R \quad (2-22)$$

电阻上的压降与流过电阻的电流是同相的,没有引入相位延时。但对于另两种常用到的物源元件,电感和电容,元件上的压降和流过元件的电流之间却不是同相的,它们之间存在相位延时。引入拉普拉斯算子,则描述这两种元件上的压降与流过元件电流之间关系的方程为

$$v_L = i_L \cdot sL \quad (\text{电感}) \quad (2-23)$$

$$v_C = i_C \cdot \frac{1}{sC} \quad (\text{电容}) \quad (2-24)$$

第四个定理是戴维南-诺顿电源等效定理：如果一个网络不包含非线性受控源和非线性元件，则向该网络的输出端口看过去，网络的行为都可以等效为一个电压源和一个阻抗的串联，也可以等效为该阻抗和一个电流源的并联，该阻抗等于向该网络输出端看过去的输出阻抗，电压源等于该端口上的开路电压，而电流源的大小等于该端口的短路电流，如图 2-23 所示。电压源和电流源之间具有如下简单的变换关系

$$v = i \cdot Z \quad (2-25)$$

其中， Z 为等效信号源阻抗，称为信号源的内阻。

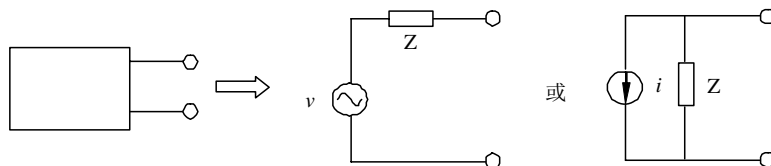


图 2-23 戴维南—诺顿电源等效定理

有了这四个定理的基本知识后，分析任何一个模拟电路的基本步骤为：（1）确定电路的直流工作点；（2）确定各元器件的小信号模型及其中的参数值；（3）画小信号等效电路（在这一步中，要注意交流与直流的划分，直流偏置点都是交流地）；（4）应用 KVL、KCL 和欧姆定理列电路方程；（5）求解方程组得到该电路的分析结果（在这一步中通常要做简化处理）。

2. 模拟集成电路的设计流程

模拟集成电路的设计流程如图 2-24 所示（该图右边给出了每一步可能使用到的设计工具）。该流程从某一组给定的设计指标开始，由系统设计者根据整个系统应满足的要求对系统中的各个子模块进行指标分配，确保各个子模块组合在一起后能满足系统要求，在指标分配过程中还应兼顾各个子模块实现的可行性及实现成本。该过程通常也被称为系统规划，系统规划是一个很复杂的过程，需要系统规划者对整个系统和子模块电路都有清晰的了解并能在规划过程中进行合理的折衷，良好的系统规划是确保整个系统正常工作的前提。

在确保了设计指标后，设计者应根据自己的经验选择合适的电路拓扑结构，并基于分析该电路所获得的信息，依据一定的设计策略来确定电路中各种元器件的初始参数。

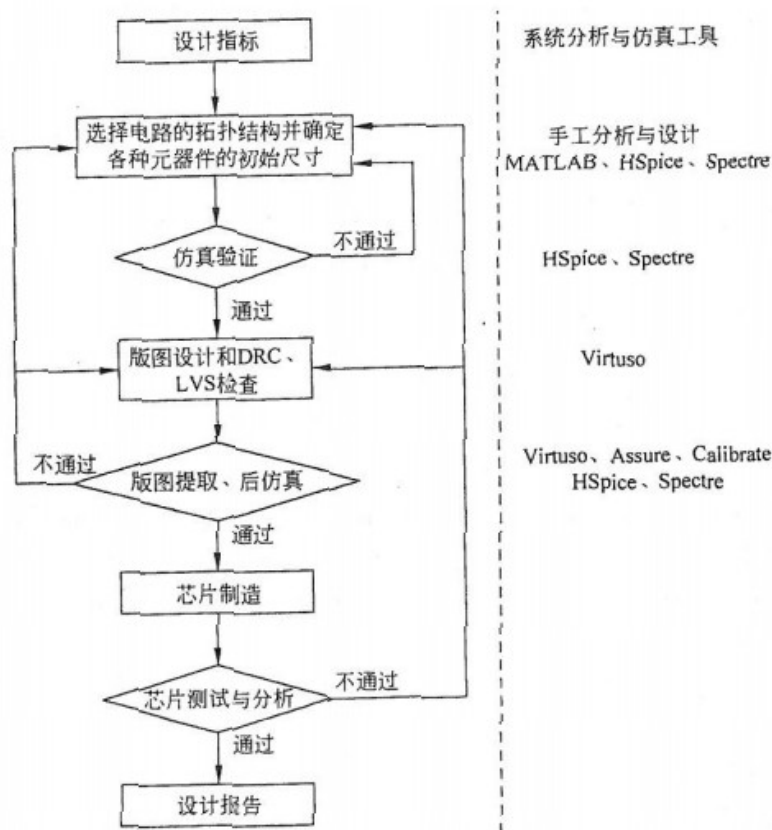


图 2-24 模拟集成电路的设计流程

接下来就可以使用仿真工具验证设计的电路是否满足设计指标，如果不能满足指标要求，则应该对电路中元器件的尺寸进行合理的调整。如果通过调整元器件的尺寸不能满足指标的要求，则应考虑改变整个电路的拓扑结构。

在仿真通过之后进行版图设计，并进行版图设计规则检查（DRC）和电学连接关系检查（LVS）。然后从版图提取电路的寄生参数，并进行版图后仿真，验证集成电路的寄生效应是否会对电路性能造成影响。如果后仿真的结果不能满足设计指标的要求，说明寄生效应对电路性能具有很大的影响，应该修改版图或者修改电路中元器件的尺寸，甚至修改电路的拓扑结构，直至后仿真结果满足设计指标为止。

在后仿真通过后，就可以将版图数据提交集成电路制造厂家进行加工了，等待一定的加工周期后设计者就可以得到芯片，这时就可以对芯片进行测试和分析。如果测试通过，设计者就应该完成整个设计过程的最后一步：撰写芯片的设计报告并将芯片提交生产；但如果测试没有通过，设计者需要根据测试结果，对原始电路进行修改，开始第二轮的设计过程。

从上面的论述可以看到，模拟集成电路的设计周期是很长的，设计过程中的任何一步失误，都会使得集成电路不能正常工作，造成设计失败。设计失败不光推迟了产品的上市时间，而且也带来大量的人力和物力开销，损失是很大的。设计者必须尽其所能确保产品能一次制作成功，这是所有的集成电路设计者都必须承担的压力。

相比于数字电路可以借助于先进的计算机辅助工具来进行设计，模拟集成电路设计起来要困难得多。其主要原因有如下方面：（1）模拟集成电路处理的信号是在时间轴和幅度轴上都连续的信号，对电路处理的精度要求高；（2）数字电路设计的主要性能指标是速度和功耗，但模拟电路除了关注速度和功耗之外，还需要关注增益、线性度、精度、电源电压等很多指标，是一个多维的设计空间，模拟电路的设计必须在这种多维的空间中进行优化；（3）模拟电路对噪声、串扰和其他电路引入的干扰更加敏感，因此在设计中必须将外围环

境的影响考虑在内；（4）模拟电路的性能会受到元器件的二阶效应的影响，特别是工艺进入深亚微米之后，二阶效应的影响更加显著；（5）计算机辅助设计工具对模拟电路的支持力度不如数字电路，到目前为止，还没有刻意商用的模拟电路综合工具；（6）模拟电路的建模和仿真还不够成熟，由于模拟电路要考虑的因素很多，因此对较复杂系统的建模存在很大的困难，仿真时间也会很长；（7）现代工艺主要是针对数字电路进行优化的，对模拟电路的支持和优化力度远不如数字电路。

正是由于以上的各种因素，使得模拟集成电路的设计比数字电路相对来说更难，这也使得模拟电路的设计具有更多发挥和创造的空间。

2.2.4 模拟集成电路中的信号分析

模拟集成电路中的信号分析主要包括：直流信号与直流分析、交流信号与交流分析、小信号分析与大信号分析。

直流信号是指不随时间变化的信号，如图 2-25（a）所示。电路中任何一个节点的信号如果不随时间变化，均可认为是直流信号。直流分析就是确定电路中各节点的直流信号大小的过程，该过程通常也被称为确定电路的直流（或静态）工作点。

交流信号是指随时间变化的信号，如图 2-25（b）所示。电路中任何一个节点的信号如果随时间发生变化，则该信号中必定包含有交流信号成分。交流分析就是用不同频率的正弦信号（平均值为 0）激励电路，确定电路中各节点对不同频率的激励信号所发生的响应的过程。由于任何一个交流信号均可等效为不同幅度、不同频率正弦信号的加权求和，因此模拟电路中通常说的交流信号指的就是平均值为 0 的正弦信号。一旦采用交流分析方法确定了电路对不同频率正弦信号的响应，采用叠加定理就可以确定该电路对不同波形信号的响应。

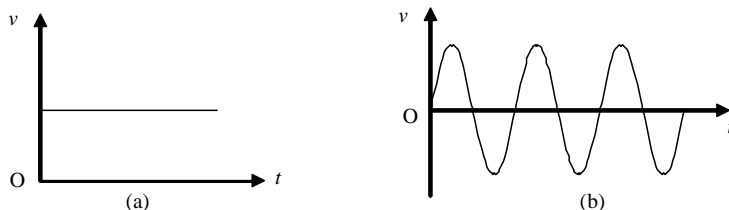


图 2-25 直流信号和交流信号

模拟电路中的小信号分析是指当各节点的交流信号幅度足够小，对电路直接工作点的扰动影响近似可以忽略时采用的一种分析方法。而大信号分析是指当各节点的交流信号幅度很大，对电路直流工作点的扰动影响不可忽略时要采用的分析方法。图 2-26 给出了一个电路的输入/输出传递函数，其中的 Q 点是该电路的静态工作点。

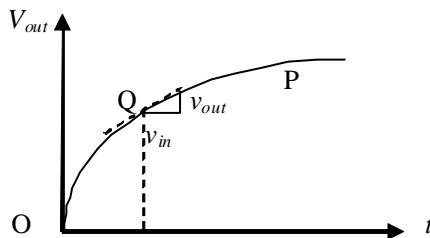


图 2-26 函数的输入/输出传递函数

如果对该传递函数在静态工作点 Q 处进行泰勒展开，可得：

$$\begin{aligned}
 V_{out} &= f(V_{in}) = f(V_{IN}) + f'(V_{IN})dV_{in} + \frac{1}{2}f''(V_{IN})d^2V_{in} + \dots \\
 &= f(V_{IN}) + f'(V_{IN})v_{in} + \frac{1}{2}f''(V_{IN})v_{in}^2 + \dots
 \end{aligned}
 \quad (2-26)$$

其中, $v_{in} = dV_{in}$ 。如果该值足够小, 则上式中的高阶项可以忽略, 即:

$$V_{out} = V_{OUT} + v_{out} \approx f(V_{IN}) + f'(V_{IN})v_{in} \quad (2-27)$$

其中, $V_{OUT} = f(V_{IN})$ 是电路输出端的静态工作点, 故:

$$v_{out} \approx f'(V_{IN})v_{in} = av_{in} \quad (2-28)$$

其中, a 是一个只与电路的静态工作点相关的参数, 它是电路传输曲线在静态工作点 Q 处的斜率。知道了电路的静态工作点信息, 就可以确定 a 的大小。在静态工作点周围, 电路的输出信号与输入信号之间的关系就由 a 唯一确定, 这样给电路分析和设计带来很大方便。可以看到, 小信号分析是一种线性化的分析方法, 它把电路的传输特性在静态工作点进行线性化, 并用来描述电路在静态工作点一定范围内的行为, 在这一小段范围内, 输出信号与输入信号之间成线性关系。该线性化范围的大小与电路线性度的要求有关。对电路线性度的要求越高, 该线性化的范围越小。超出此范围时, 就不能再采用小信号分析方法了, 这时, 式 (2-26) 中的二阶微分项将对电路输出产生较大影响, 电路不再是线性的了, 只能采用大信号分析方法进行分析。

小信号分析一般基于元器件的小信号模型来进行, 所得到的结果可以用来描述电路在静态工作点一定范围内的线性行为; 而大信号分析一般基于元器件的大信号 $I-V$ 特性进行分析, 分析过程很复杂, 但却描述了电路在整个空间的行为。它们是一个部分与整体的关系。

由于小信号分析是对电路的传输特性进行线性化处理之后的结果, 因此, 要分析电路的非线性特性, 只能采用大信号分析方法进行分析。但通过比较电路在不同静态工作点 (如 Q 点与 P 点) 的行为 (如增益), 也可以定性分析电路的非线性特性。

2.2.5 模拟集成电路中的元器件

无论多么复杂的电路都是由一个个基本元器件搭起来的。相对于数字电路来说, 模拟电路的特性与它们所用的元器件关系更为密切。模拟集成电路中用到的元器件可分为三类: MOS 晶体管、双极型晶体管和 无源元件。

1. MOS 晶体管

MOS 晶体管是 CMOS 工艺提供的一种主要有源器件, 可分为 NMOS 管和 PMOS 管两种。MOS 管是一个四端器件: 栅极、源极、漏极和体端, 它的电路图符号如图 2-27 所示。在实际应用中, 由于 NMOS 管的体端通常接电路中的最低电位, 而 PMOS 管的体端通常接电路中的最高电位, 因此常将晶体管电路图符号简化为图 2-28 所示的形式。虽然图 2-28 表示的晶体管只画出了三端, 但它实际上是一个四端器件, 只不过 NMOS 管的体端接电路中的最低电位, PMOS 管的体端接电路中的最高电位。

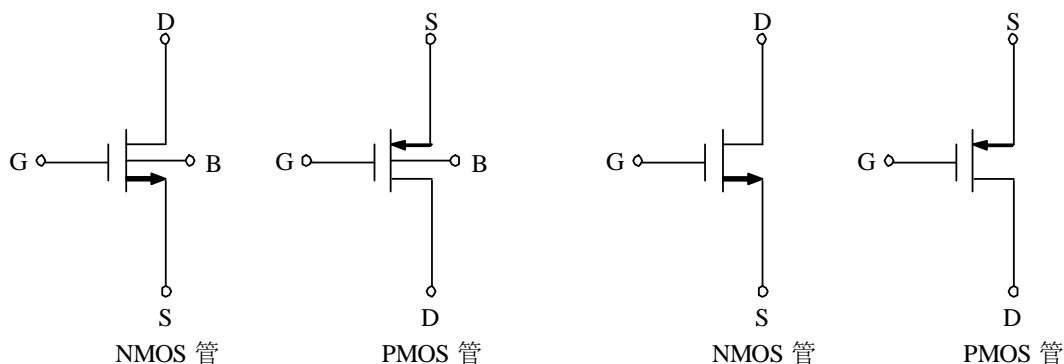


图 2-27 MOS 管的电路图符号

图 2-28 MOS 管的简化电路图符号

由于现代 CMOS 工艺普遍采用平面加工技术, 因此可以用一张图来表示 MOS 管的各种物理信息, 这张图称为版图。版图实际上是一种俯视图, 它将芯片实际加工过程中所需要的各种信息都反映在一张平面图上。图 2-29 给出了一个反相器的电路图、版图和实际的三维立体图。

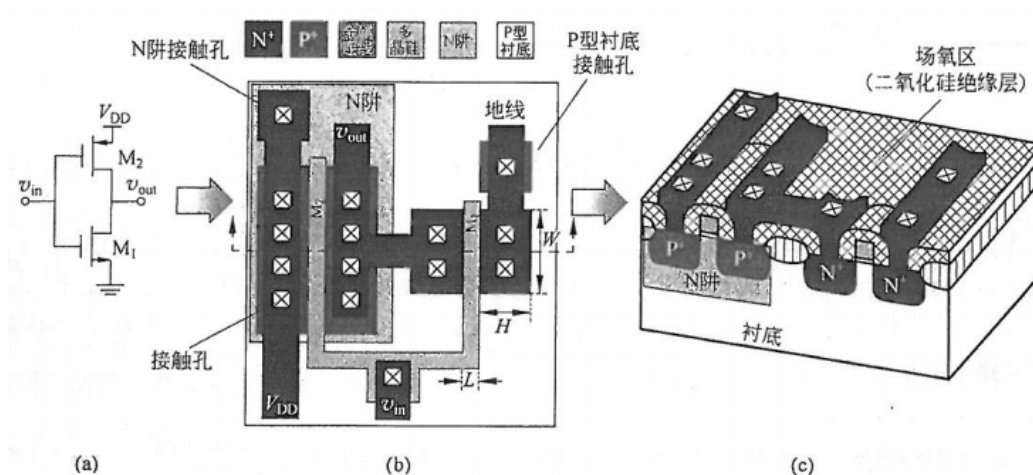


图 2-29 反相器的电路图 (a)、版图 (b) 和实际的三维立体图 (c)

2. 双极型晶体管

双极型晶体管是双极型工艺提供了一种主要有源器件, 它由三个区组成: 发射区、基区和集电区, 并分别引出发射极 E、基极 B 和集电极 C。双极型晶体管可分为 NPN 管和 PNP 管两种, 其电路图符号如图 2-30 所示。

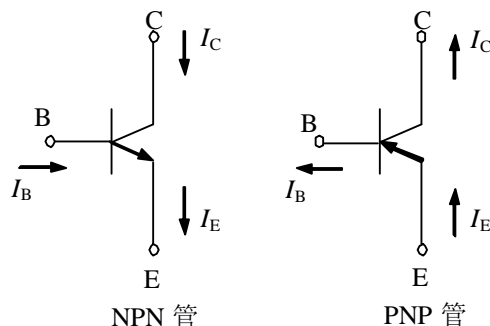


图 2-30 NPN 管和 PNP 管的电路图符号

现代的双极型工艺都是针对 NPN 管来优化的, 而 PNP 管则是在制作 NPN 管过程中顺带产生的, 没有对它的性能作优化, 因此 NPN 管具有比 PNP 管优异得多的性能, 在设计双

极型电路时要尽量使用 NPN 管而尽量避免使用 PNP 管。

3. 集成无源元件

模拟电路的设计中要用到某些无源元件,理解集成无源元件的基本特性,对设计模拟集成电路是非常重要的。在集成电路中,无源元件与电路的其他元器件集成在同一个芯片上。由于受到工艺的限制,集成无源元件的性能远低于分立元件,而且无源元件对模拟集成电路的性能具有很大的影响。因此在工艺允许的情况下,选择合适的元件类型并通过版图设计尽可能地提高集成无源元件的性能,对模拟集成电路的设计具有重要的意义。

电阻是一类非常常见的无源元件,在集成电路中得到广泛应用。图 2-31 给出了电阻的常见结构,它的截面是由相同的均匀材料构成的,其阻值可以粗略估计为:

$$R = \rho \frac{L}{S} = \rho \frac{L}{WH} \quad (2-29)$$

其中, ρ 是材料的电阻率, L 是电阻条的长度, S 是电阻器横截面的面积。

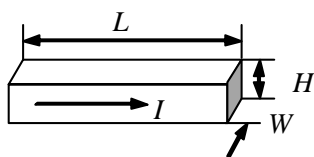


图 2-31 电阻器的常见结构

现代 CMOS 集成电路工艺是一种平面工艺,各种材料的厚度 (H) 由工艺来决定,只能通过改变电阻条的宽度和长度来得到需要的电阻值。为了计算的方便,引入方块电阻的概念。方块电阻定义为宽度 W 和长度 L 相等的电阻条的阻值,它与材料电阻率之间的关系为:

$$R_0 = \frac{\rho}{H} \quad (2-30)$$

其单位为欧姆,但习惯上写为 Ω/\square 。引入方块电阻后,电阻器的阻值可以重新表述为:

$$R = \frac{\rho}{H} \cdot \frac{L}{W} = R_0 \frac{L}{W} \quad (2-31)$$

即只要观察电阻条的俯视平面中包含了多少个方块,就可以知道电阻条的电阻值是方块电阻的多少倍。

衡量一个电阻器性能的因素除了方块电阻外,还包括电阻精度、温度系数、电压系数以及电阻间的匹配程序。在现代 CMOS 工艺中,可以使用的电阻类型包括扩散区电阻、阱电阻、多晶硅电阻、金属线电阻等。图 2-32 给出了使用 P^+ 有源区作电阻材料的一种扩散区电阻器的结构图和版图。

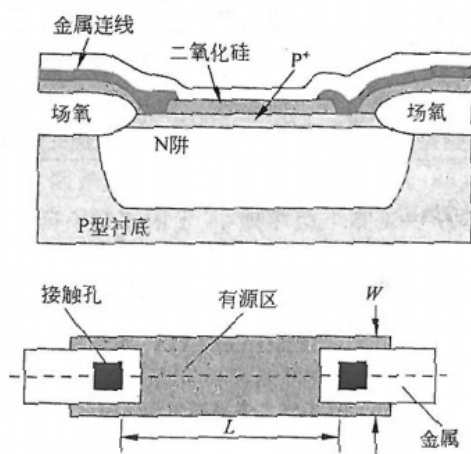
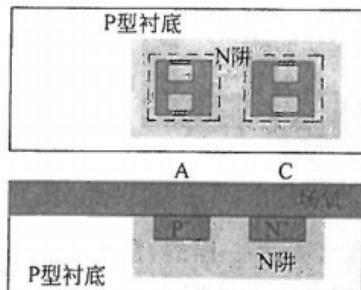


图 2-32 P⁺有源区作电阻材料的电阻器

电容是集成电路中另一种常见的无源器件。同集成电阻一样，描述一个集成电容器的性能指标包括单位面积电容量、电容精度、电压系数、温度系数及电容之间的匹配程度等。在 CMOS 工艺中，常见的电容类型包括：PN 结构垒电容、MOS 电容和各种的平行板电容器。图 2-33 给出了由 P⁺有源区和 N 阱构成的 PN 结的结构图及其版图。

图 2-33 由 P⁺有源区和 N 阱构成的 PN 结的结构图及其版图

2.2.6 模拟集成电路的设计

图 2-24 已经给出了模拟集成电路的设计流程，其中最关键的部分是选择电路的拓扑结构并确定各种元器件的初始尺寸。模拟集成电路的设计是以模拟电路的分析为基础的，因此设计者首先要了解模拟集成电路中常用模块的典型电路拓扑结构以及各种电路结构的优缺点。模拟集成电路中常用的模块有单管放大器、多管放大器、电流源、参考镜、运算放大器等，其主要特性包括大信号分析、小信号分析、频率响应和噪声特性等。

对于一个设计需求，每一个工程师基于不同的思路会提出不同的设计方法，因此每一个电路的设计方法是多种多样的。这里以电阻作负载的共源放大器为例介绍一种基于跨导效率 g_m/I_D 的设计流程。

首先假设设计中选择的电路拓扑结构是如图 2-34 所示的电阻作负载的共源放大器，要求是采用 0.35μm CMOS 工艺，晶体管的尺寸尽可能地小以减少芯片面积。设计指标为：低频小信号增益为 2，消耗的电流小于 2mA，-3dB 带宽为 100MHz，容性负载 C_L 为 10pF，电源电压 V_{DD} 为 2V。设计流程如下：

(1) 分析电阻作负载的共源放大器的特性

根据对电阻作负载的共源放大器的分析可得，该放大器的低频小信号增益和 -3dB 带宽（忽略晶体管的 C_{db} 和 C_{gd} 的影响）分别为：

$$a_v = -g_m R_L \quad (2-32)$$

$$\omega_{-3dB} = \frac{1}{R_L C_L} \quad (2-33)$$

其中，为 g_m 该放大器的跨导。该放大器在输出端所产生的噪声平均功率为：

$$\overline{v_{o,tot}^2} = \frac{kT}{C_L} (1 + \gamma g_m R_L) = \alpha \cdot \frac{kT}{C_L} \quad (2-34)$$

类似于 RC 网络，该放大器的输出噪声平均功率由负载端电容决定， α 为该放大器的噪声放大因子。该放大器输出端的最大电压摆幅（峰-峰值）为：

$$SW_{Max} = 2 \times \text{Min}(V_{DD} - I_D R_L - V_{ov}, I_D R_L) \quad (2-35)$$

其中， V_{ov} 是晶体管的过驱动电压， I_D 是漏极电流。

式(2-32)到式(2-35)就是该放大器的设计方程式。因此设计一个这样的放大器需要确定如下参数：容性负载 C_L 的大小，电阻负载 R_L 的大小，晶体管的尺寸 W 、 L 和栅极所加偏置电压 V_B 。

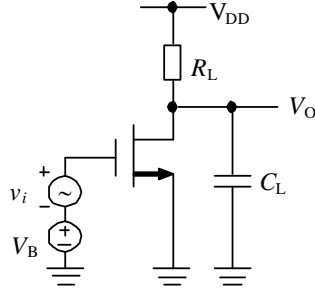


图 2-34 电阻作负载的共源放大器

(2) 根据放大器的设计方程确定所需参数

根据该放大器-3dB 带宽要求，可确定负载电阻 R_L 的大小为：

$$\omega_{-3dB} = \frac{1}{R_L C_L} \Rightarrow R_L = \frac{1}{2\pi f_{-3dB} C_L} = 159\Omega \quad (2-36)$$

根据该放大器队低频小信号的要求，可以确定晶体管的跨导应为：

$$a_v = -g_m R_L = -2 \Rightarrow g_m = \frac{a_v}{-R_L} = 12.6mS \quad (2-37)$$

为了减小晶体管的沟道宽度，应该取设计指标允许的最大电流 2mA，这时晶体管的跨导效率为：

$$\frac{g_m}{I_D} = \frac{12.6}{2} = 6.3V^{-1} \quad (2-38)$$

根据晶体管的跨导效率 g_m/I_D 与流过晶体管的电流密度 I_D/W 之间的一一对应关系曲线，可以得到跨导效率 $6.3V^{-1}$ 对应的电流密度为 $23\mu A/\mu m$ ，因此，晶体管的沟道宽度为：

$$W = \frac{I_D}{I_D/W} = \frac{2000\mu A}{23\mu A} = 87\mu m \quad (2-39)$$

最后，根据晶体管跨导效率随过驱动电压变化的曲线来确定晶体管栅极所加偏置电压 V_B 的大小。可以得到，与跨导效率 $6.3V^{-1}$ 对应的过驱动电压为 0.28V，因此晶体管栅极所加偏置电压 V_B 应为：

$$V_B = V_t + V_o = 0.85V \quad (2-40)$$

(3) 仿真验证设计参数

通过第(2)步的手工计算，放大器的所有电路参数都可以确定。下一步可以通过 HSPICE 仿真来验证手工计算的结果与设计指标之间的差距。图 2-35 给出了 HSPICE 仿真给出的直流工作点信息，可得晶体管的跨导效率为：

$$\frac{g_m}{I_D} = \frac{12.8mS}{2.01mA} = 6.37V^{-1} \quad (2-41)$$

这与前面手工计算的跨导效率 $g_m/I_D=6.3V^{-1}$ 很接近。

**** mosfets			
subckt		beta	60.5664m
element	0:mn1	gam eff	894.1238m
model	0:nch	gm	12.7994m
region	Saturation	gds	223.6427u
id	2.0147m	gmb	2.7928m
ibs	0.	cdtot	112.7289f
ibd	0.	cgtot	154.6957f
vgs	845.0000m	cstot	294.9323f
vds	1.6797	cbtot	300.7032f
vbs	0.	cgs	107.6797f
vth	569.7473m	cgd	19.7903f
vdsat	201.1145m		

图 2-35 HSPICE 仿真给出的直流工作点信息

图 2-36 给出了该共源放大器的 HSPICE 仿真幅频响应曲线。从该图可以看出,该放大器的低频小信号增益约为 1.97, 稍低于指标要求, 这是由于放大器的实际增益是 $g_m R_L$ 与晶体管本征增益 $g_m r_o$ 的并联。为了提高该增益, 可以考虑增加晶体管的增益 (增大晶体管的沟道长度) 或设计时将增益指标提高一些 (如提高 10%)。还可以看出, 该放大器的 -3dB 带宽略低于 100MHz, 这是由于前面的设计中仅仅考虑了负载电容 C_L , 而实际上晶体管的 C_{db} 和 C_{gd} 都会对 -3dB 带宽产生影响。

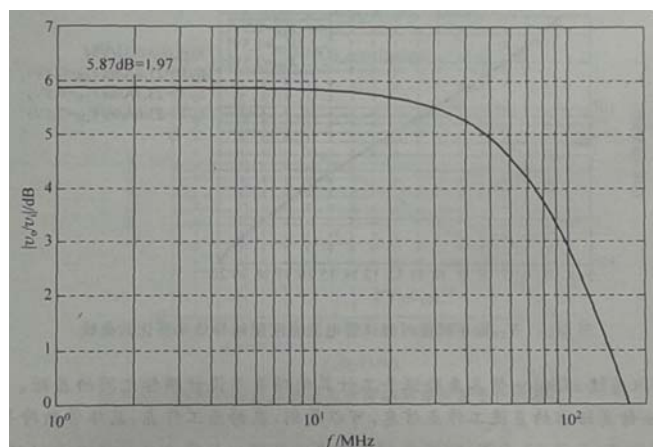


图 2-36 共源放大器的 HSPICE 仿真幅频响应曲线

对比 HSPICE 仿真结果与手工计算结果之间的差距, 很容易发现性能出现偏差的原因, 因此可以对晶体管的电学性能参数进行调整, 为下一次的迭代指明了方向。

2.2.7 模拟集成电路的应用

由于数字电路具有很强的抗干扰性, 而且数字电路计算机辅助设计工具的成熟程度远高于模拟电路, 设计难度和设计周期大大下降, 因此越来越多的电路功能都转变到数字域来处理, 使得传统模拟电路的应用领域越来越窄。但是, 由于我们身边的世界是一个模拟的世界, 数字电路不可能与周围的模拟环境直接接口, 在它们之间必须存在一个模拟电路模块 (模数变换器) 将来自周围环境的连续时间信号转变为数字信号, 才能送给数字电路进行处理, 数字电路处理完后的信号也必须经过另一个模拟电路模块 (数模变换器) 将数字信号转变为连续时间信号才能作用于周围的模拟环境。从这个意义上来说, 模拟电路永远不可能完全被数字电路所取代。

但这并不意味着模拟电路的应用范围只限于模数变换器或者数模变换器, 因为在很多应用领域中, 由于信号动态范围很大, 或各种干扰很强, 又或者信号频率较高, 直接用模数变换器将这些信号转变成数字信号, 要求模数变换器具有非常高的精度或非常快的速度。在目前的条件下, 高精度或者高速度模数变换器实现起来存在很大的困难, 甚至是根本不可能

实现的,即使能够实现,模数变换器的成本和功耗也会很大。更合适的办法是对这些信号在模拟电路领域进行一定的处理,缩小它们的动态范围,滤除各种强干扰源,或者将信号转变到较低的频率,再送给模数变换器转变为数字信号,这样可以大大降低对模数变换器精度或者速度的要求,使得整个系统在性能、成本和设计复杂度上达到最优的折衷。在数字电路与周围环境的输出接口上也存在同样的问题,数字信号转变为模拟信号后也需要做一定的后续模拟信号处理,然后才能作用于周围的环境。图 2-37 对这种情况进行了说明。

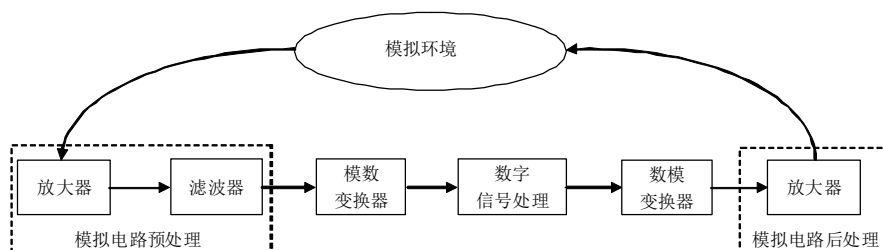


图 2-37 电子系统的典型组成框图

下面以无线通信系统为例来说明模拟电路的应用。在这样的应用中,某些部分暂时还无法采用数字电路来实现,或者采用数字电路来实现从整个系统上来说是不合算的。

各种无线通信系统已经广泛应用于我们的生活中,如 GSM 通信系统、无线局域网通信系统、蓝牙系统等。在这些系统的接收机和发射机之间传递的信号是无线信号,这些信号不但频率很高(如 GSM 系统的信号频率约为 915MHz,无线局域网系统的信号频率为 2.4GHz 或 5GHz),而且信号强度变化范围很大,当接收机离发射机很近时,信号幅度可达几十毫伏,而当接收机离发射机很远时,信号幅度将只有几十微伏,信号强度可变化几千倍。再考虑到无线信号通常伴随着很强的干扰,干扰源的强度可能比有用信号的强度高几十分贝,如果直接用模拟变换器对这些天线接收到的无线信号进行数字化,模数转换器的精度将要求很高,转换速度也要求很快,这样的模数变换器功耗很大,而其也非常难以实现。更合理的办法是先对天线接收到的无线信号在模拟电路领域进行一定的处理,根据信号强度对无线信号进行有控制地放大,滤除各种干扰源,并将信号转变到较低的频率,然后再通过模数变换器转变为数字信号,送给后面的数字电路进行处理。在发射机一端,为了保证足够的通信距离,发射机的输出信号功率必须很大(GSM 通信系统要求达到瓦量级),再考虑到输出信号的频率高达几吉赫,这种信号通过数模变换器是无法直接得到的。可行的办法是采用数模变换器将数字信号转变为低频模拟信号后,再在模拟电路领域进行一定的后续处理,将低频模拟信号转变为高频信号,并送入功率放大器进行功率放大,输出高频高功率的信号给天线。图 2-38 给出了一个典型的无线接收机和发射机的系统框图,虚线框内的部分表示这些模拟电路功能目前还无法被数字电路所取代。

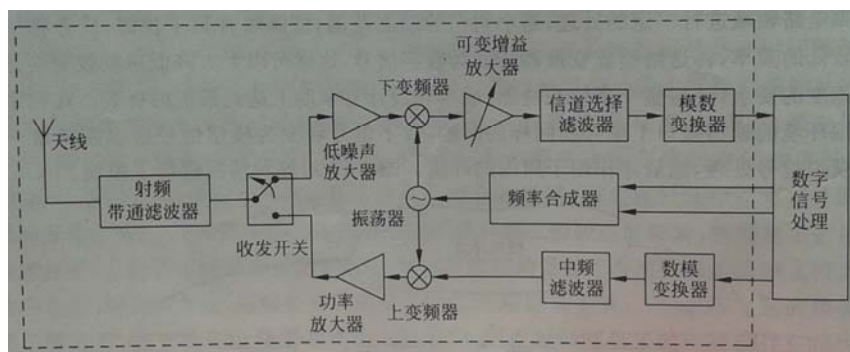


图 2-38 无线接收机和无线发射机的典型系统框图