

第1章 模拟电子电路导论

1.1 信号与电子系统

1.1.1 信号

信号包含很多关于物理世界的事情和行为的信息，是信息传输的载体。人类的自然环境中存在着各种各样的信息。例如，气候变化时包含的温度、气压、风速等信息；播音员播音时话筒将声信号转换为电信号，就会产生描述播音员声音特征的信息，如频率、频带宽度等。任意一种自然现象都包含大量的能够描述该现象的信息参数，这些信息通过一定的传感器可以转换为电信号，电信号的处理由电子系统来完成。

为了从一系列的信号中抽取所需要的信息，观测后要预先确定一些处理信号的方法，来分析该信号的特征。信号可以用两种不同的形式出现——时域信号和频域信号。针对这两种信号，目前都有专门的理论和实验手段进行分析和处理。

1.1.2 信号频谱

对时域信号最有用的一种描述方式是它的频谱，可以通过傅里叶变换来完成。如图 1.1 所示的一个任意电信号，它相对的频谱如图 1.2 所示。

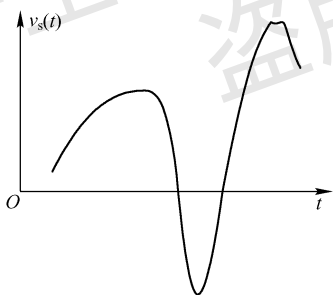


图 1.1 时域信号

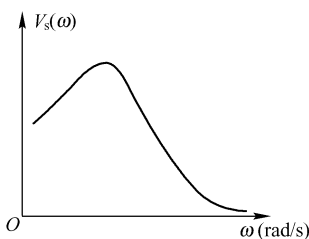


图 1.2 频域信号

也就是说，一个信号既可以用随时间变化的波形来描述，也可以用它的频谱来表示。

1.1.3 模拟信号和数字信号

和自然界中广泛存在的实际信号类似，图 1.1 所示的信号为模拟信号，它在幅度和时间上都是连续的函数。

现代电子系统处理信号时，在很多场合都采用数字的处理方法。这样就需要一种处理方式，将模拟信号变换为数字信号，然后再进行处理。

所谓数字信号，是在时间上和幅度上都是离散的一种信号，便于用数字来描述。将模拟信号转换为数字信号，需要经过采样和量化编码两个环节。图 1.3 所示为采样后时间离散的信号，该信号再

经过量化编码得到如图 1.4 所示的数字信号（用 8 位二进制数表示）。

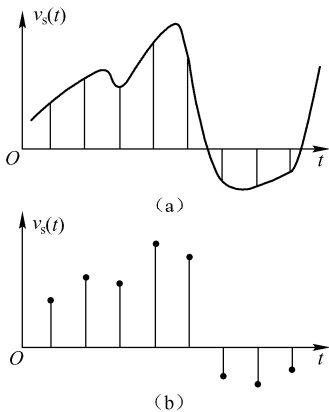


图 1.3 时间离散的信号

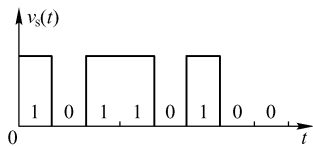


图 1.4 数字信号

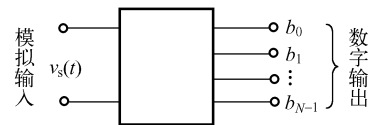


图 1.5 A/D 转换器

目前有专用的电子电路来完成上述任务，称为 A/D 转换器，如图 1.5 所示。对数字信号的处理可以借助计算机软件辅助完成。总之，尽管目前信号的数字处理技术非常普遍，但还是存在只能用模拟电路才能实现的信号处理方式。因此，许多电子系统既包括模拟部分，也包括数字部分，且学科前沿部分多处在两种信号混合的电路设计上。作为一个优秀的电子工程师，必须对模拟电路和数字电路的设计都要擅长。

1.1.4 电子系统

“电子系统”有很多种描述定义，一般来说，将多个具有一定功能的单元模块电路相互连接，组成规模较大、能够完成特定功能的电路整体，可以称为“电子系统”。图 1.6 所示为电子系统的一般结构框图，主要包括“信号输入”、“预处理”、“模数转换”、“信号处理”、“信号输出”等基本部分。

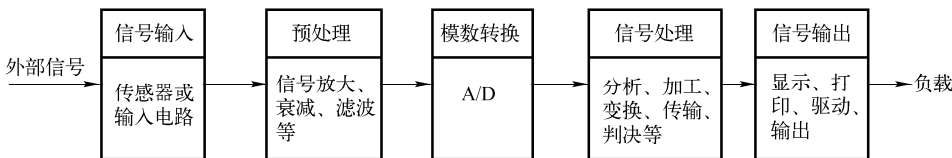


图 1.6 电子系统的一般结构框图

由于从外界采集的信号往往非常微弱，而且伴随着噪声及其他干扰，因此预处理是电子系统中的重要环节。预处理主要是解决信号的放大、衰减、滤波等，即通常所说的“信号调理器”，经预处理后的信号，在幅度和其他方面都比较适合做进一步的分析或数字化处理。这一部分的信号仍多为模拟信号。在这个环节中，放大器是重要的组成部分。

放大器是模拟信号处理中最重要、最基本的单元。放大电路不仅具有独立实现信号不失真放大的功能，而且也是其他模拟电路，如振荡器、滤波器、稳压器、调制解调器的基础和基本组成部分。

1.2 放大器基本概念及模型

在电子系统中，由于采集信号的换能器（或传感器）输出的信号往往比较微弱，范围基本在毫伏或微伏级，不利于进行可靠的后续处理，因而需要将这样的信号进行幅度放大，但不改变信号的其

他特性，即输出波形和输入波形除了幅度外都是一模一样的，任何波形上的变化都认为是失真。能够实现这样功能的电路称为放大器。一个处理电压信号的放大器可以用式（1.1）来描述：

$$v_o = Av_i \tag{1.1}$$

式中， A 表示放大器的放大能力，称为放大器的增益； v_i 和 v_o 分别是输入信号和输出信号。

1.2.1 放大器的符号

放大器是一个双口网络，一端是信号输入口，另一端是信号输出口，常用符号如图 1.7（a）所示，一个电压输入、电压输出的放大器的实际连接电路如图 1.7（b）所示。

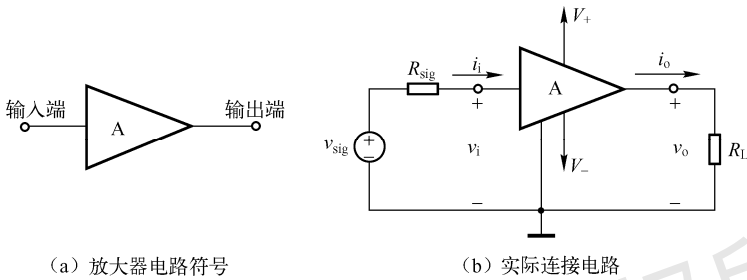


图 1.7 放大器电路符号及实际连接电路

放大器本质上是一种换能器，因此工作时需要有电源提供能量，图 1.7（b）中的 V_+ 和 V_- 代表了供电的直流电源，供电方式有双电源供电和单电源供电两种形式。放大器的输入端和输出端之间存在一个公用端子，这个公用端子作为一个参考点，称为地或者零电位。图中 v_{sig} 为信号源， R_{sig} 为信号源内阻， R_L 为电路的负载， v_i 为电路的输入电压， i_i 为电路的输入电流， v_o 为负载上的输出电压， i_o 为电路的输出电流。

放大器最重要的参数就是增益，增益的定义式为

$$\text{增益} = \frac{\text{输出量}}{\text{输入量}}$$

则电压增益为

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \quad \text{V/V} \tag{1.2}$$

电流增益为

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} \quad \text{A/A} \tag{1.3}$$

功率增益为

$$A_p = \frac{P_L}{P_i} = \frac{v_o i_o}{v_i i_i} = A_v A_i \quad \text{W/W} \tag{1.4}$$

为了拓宽坐标轴的显示范围，电子工程师经常使用对数来表示放大器的增益，即

$$\text{电压增益的分贝表示} = 20 \lg |A_v| \text{ dB}$$

$$\text{电流增益的分贝表示} = 20 \lg |A_i| \text{ dB}$$

$$\text{功率增益的分贝表示} = 10 \lg |A_p| \text{ dB}$$

因此在增益计算分析时，要注意两种表示方法的换算。

1.2.2 放大器的主要参数

放大器的主要参数是衡量放大器性能优劣的标准，并决定了放大器的使用范围。

1. 增益

增益是描述放大器放大能力的重要参数。实际上根据放大器端口的输入量与输出量的不同，增益有 4 种定义：

电压增益 $A_v = \frac{v_o}{v_i}$ ，相应的放大器称为电压放大器；

电流增益 $A_i = \frac{i_o}{i_i}$ ，相应的放大器称为电流放大器；

互阻增益 $A_r = \frac{v_o}{i_i}$ ，相应的放大器称为互阻放大器；

互导增益 $A_g = \frac{i_o}{v_i}$ ，相应的放大器称为互导放大器。

也就是说，放大器根据输入、输出量的不同，可以分为 4 类基本放大器。每一类对信号源要求不同，对负载输出的信号要求也不同，实际应用中可以根据需要进行选取。

2. 输入电阻 R_i

输入电阻是放大器在输入端的等效电阻，同时作为信号源的负载，它表明了放大器从信号源有效吸取信号大小的能力。其定义为

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} \quad (1.5)$$

如图 1.8 (a) 所示，计算出 v_i 与由 v_i 引起的输入电流 i_i 的比值，即可得到 R_i 。

引入源电压增益的定义，即

$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_{sig}} \quad (1.6)$$

又因为

$$v_i = \frac{R_i}{R_i + R_{sig}} v_{sig} \quad (1.7)$$

故

$$A_{vs} = \frac{v_i}{v_{sig}} \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_i}{R_i + R_{sig}} A_v \quad (1.8)$$

式中， R_{sig} 为信号源内阻， v_{sig} 为信号源电压。

可见只有当 $R_i \gg R_{sig}$ 时， $v_i \approx v_{sig}$ ， $A_v \approx A_{vs}$ ，此时，信号源内阻几乎不损失信号，信号源信号几乎全被放大器吸取。

3. 输出电阻 R_o

输出电阻是放大器在输出端的等效电阻，同时作为放大器的内阻，它的大小决定了放大器带负载的能力。其定义为

$$R_o = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{\substack{v_{sig}=0 \\ R_L \rightarrow \infty}} \quad (1.9)$$

图 1.8 (b) 所示为输出电阻的测试方法，在输出端加一测试电压 v_i ，由其引起的电流为 i_i ，通过计算两者的比值即可得到输出电阻。

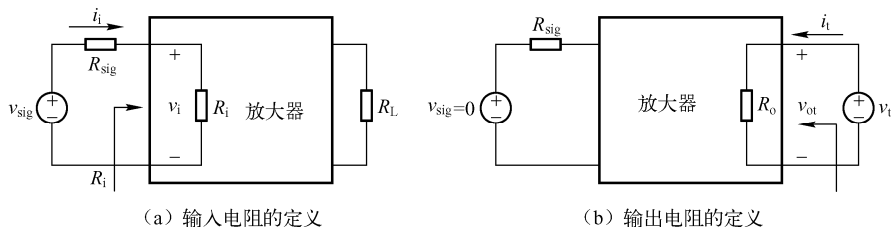


图 1.8 输入、输出电阻测试方法

引入开路电压增益，即

$$A_{v_o} = \left. \frac{v_{ot}}{v_i} \right|_{R_L \rightarrow \infty}$$

(1.10)

式中， v_{ot} 为负载开路时的输出电压。

又因为

$$v_o = \frac{R_L}{R_L + R_o} v_{ot}$$

(1.11)

故

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_{ot}} \cdot \frac{v_{ot}}{v_i} = \frac{R_L}{R_L + R_o} A_{v_o}$$

(1.12)

可见只有当 $R_o \ll R_L$ 时， $v_o \approx v_{ot}$ ， $A_v \approx A_{v_o}$ ，此时放大器几乎将处理后的信号无损地送到负载上输出。

表 1.1 所示为 4 类基本放大器及其模型。

表 1.1 4 类基本放大器及其模型

类 型	电 路 模 型	增 益 参 数	理 想 特 性
电压放大器		开路电压增益 $A_{v_o} = \left. \frac{v_o}{v_i} \right _{i_o=0} \text{ (V/V)}$	$R_i \rightarrow \infty$ $R_o \rightarrow 0$
电流放大器		短路电流增益 $A_{i_s} = \left. \frac{i_o}{i_i} \right _{v_o=0} \text{ (A/A)}$	$R_i \rightarrow 0$ $R_o \rightarrow \infty$
互导放大器		短路互导增益 $G_m = \left. \frac{i_o}{v_i} \right _{v_o=0} \text{ (A/V)}$	$R_i \rightarrow \infty$ $R_o \rightarrow \infty$
互阻放大器		开路互阻增益 $R_m = \left. \frac{v_o}{i_i} \right _{i_o=0} \text{ (V/A)}$	$R_i \rightarrow 0$ $R_o \rightarrow 0$

1.3 放大器的频率响应

在实际电路中，除电阻外，还存在许多电抗元件，如电路的分布电容、杂散电容、器件的极间

电容和分布电感等。不同电抗元件对频率呈现不同的阻抗特性，这必然会导致放大器的增益也是频率的函数，即增益为一个“复数”：

$$A(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = |A(\omega)| e^{j\varphi_A(\omega)} \quad (1.13)$$

其中， $|A(\omega)|$ 和角频率 ω 的关系曲线称为“幅频特性”，相移 $\varphi_A(\omega)$ 和角频率 ω 的关系曲线称为“相频特性”。一般工程上习惯用分贝 (dB) 来表示增益函数的幅度，因此得到 $20\lg|A(\omega)|$ 与频率的关系曲线。

图 1.9 所示为某放大器的幅频特性示意图，图中， $f = \omega / 2\pi$ ，单位为 Hz。可以看到放大器的幅频特性在一定宽度的频率范围之内，增益几乎是固定不变的，这个频率范围称为“中频区”，而当频率很高或很低时，增益会逐渐减小，分别称为“高频区”和“低频区”。若中频增益为 A_0 ，则随着频率的升高或降低，增益会下降，当增益下降到 $A_0 / \sqrt{2}$ 时，对应的频率分别为上限截止频率 f_H 和下限截止频率 f_L 。

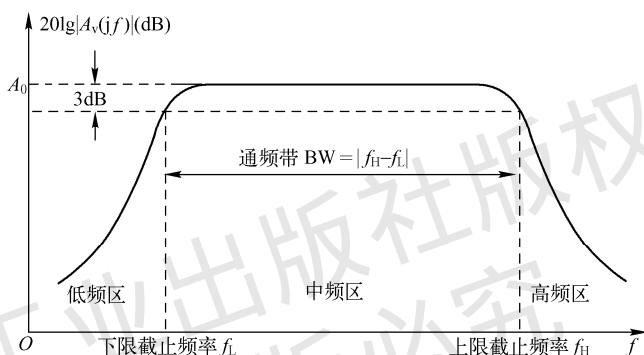


图 1.9 放大器的幅频特性

工程上更习惯采用另外一种定义方式。若增益采用分贝 (dB) 来表示，则

$$20\lg \left| \frac{A_0}{\sqrt{2}} \right| = 20\lg |A_0| - 20\lg \sqrt{2} = 20\lg |A_0| \text{ (dB)} - 3\text{dB} \quad (1.14)$$

即由中频增益下降 3dB 对应的频率分别为上限截止频率 f_H 和下限截止频率 f_L 。

定义放大器的通频带（也称为带宽 BW (BandWidth)）为

$$BW = |f_H - f_L| \quad (1.15)$$

要计算放大器的频率响应，必须分析所有电抗元件的等效电路模型。一个电感 L 的电抗或阻抗是 $j\omega L$ ，而一个电容 C 的电抗或阻抗是 $1/j\omega C$ ，等效的电纳或导纳是 $j\omega C$ 。因此在频域分析中我们处理的是阻抗或导纳，分析的结果是放大器的增益函数 $A(j\omega)$

$$A(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} \quad (1.16)$$

在对一个电路进行分析以确定它的频率响应时，可以通过使用复数频率变量 s 来简化运算，即一个电感 L 的阻抗是 sL ，电容 C 的阻抗是 $1/sC$ 。用阻抗代替相应的电抗元件并进行标准的电路分析，就可以得到如下的传输函数 $A(s)$ ：

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} \quad (1.17)$$

然后, 用 $j\omega$ 代替 s 就可以得到用物理频率表示的传输函数 $A(j\omega)$ 。

第 1 章习题

1.1 某放大器用 $\pm 3\text{V}$ 的电源供电。当输入为峰值为 0.2V 的正弦波时, 可获得峰值为 1.0mA 的电流, 并在 100Ω 负载上产生峰值为 2.2V 的正弦波。每个电源的平均电流为 20mA 。求用分贝表示的电压增益、电流增益和功率增益。

1.2 某电压放大器的输入电阻为 $10\text{k}\Omega$, 输出电阻为 200Ω , 增益为 1000V/V 。它被连接在内阻为 $100\text{k}\Omega$ 、开路电压为 10mV 的信号源和负载 100Ω 之间, 则:

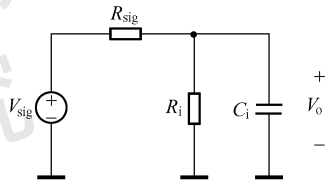
- (1) 输出电压为多少?
- (2) 从源到负载的电压增益为多少?
- (3) 从放大器输入端到负载的电压增益为多少?

1.3 某电流放大器有 $R_i = 1\text{k}\Omega$, $R_o = 10\text{k}\Omega$, $A_{is} = 100\text{A/A}$, 它被连接在电阻为 $100\text{k}\Omega$ 的 100mV 信号源和 $1\text{k}\Omega$ 负载之间。整个放大电路的电流增益、电压增益和功率增益分别为多少?

1.4 某互导放大器的 $R_i = 2\text{k}\Omega$, $G_m = 40\text{mA/V}$, $R_o = 20\text{k}\Omega$, 它由电阻为 $2\text{k}\Omega$ 的电压源激励, 并接有 $1\text{k}\Omega$ 的电阻负载, 求实际得到的电压增益。

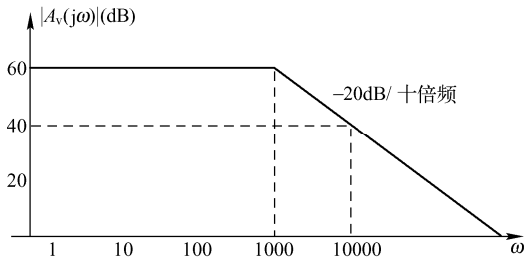
1.5 某互阻放大器由内阻为 R_{sig} 的电流信号源 i_{sig} 激励, 输出端接 R_L 的负载电阻。证明下式给出的总增益: $\frac{v_o}{i_{\text{sig}}} = R_m \frac{R_{\text{sig}}}{R_{\text{sig}} + R_i} \frac{R_L}{R_L + R_o}$ 。

1.6 如图题 1.1 所示, 推导 $V_o(s)/V_i(s)$ 的表达式, 说明类型 (高通还是低通)。当 $R_{\text{sig}} = 20\text{k}\Omega$, $R_i = 80\text{k}\Omega$, $C_i = 5\text{pF}$ 时, 求 3dB 频率。



图题 1.1

1.7 某一电压放大器的幅频特性如图题 1.2 所示, 求: (1) 中频增益; (2) 上限截止频率; (3) 下限截止频率。



图题 1.2