



薛金星·教材全解 畅销20年
全国亿万读者首选

普通高等教育“十五”国家级规划教材配套用书
配康华光《电子技术基础·模拟部分》第五版

大学教材全解 电子技术基础

模拟部分（康华光·第五版）

考拉进阶《大学教材全解》编委会 编
宋爱娟 魏永涛 主编

—— 同步辅导 + 考研复习 ——

讲透重点难点 | 详解教材习题 | 精析考研真题 | 提升考研能力

延边大学出版社



大学教材全解

电子技术基础

模拟部分(康华光·第五版)

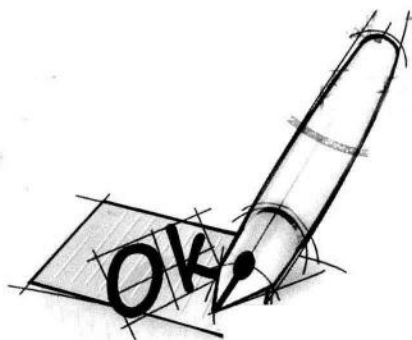
总策划: 薛金星

主 编: 宋爱娟 魏永涛

副主编: 张家生 王芬芬 邱新芸 王巧云

盖君雪 刘 扬 王野驰 姜潇潇

谷琼婵 吴亚萍



延边大学出版社

前言



“教材全解”系列丛书十多年来一直是最畅销的教材辅导类图书，种类涵盖了大学、中学、小学的几十门主要学科，帮助千万学子取得了理想的成绩。为了帮助广大读者学好《电子技术基础·模拟部分》这门课程，我们邀请全国各地治学严谨、业务精湛的一线名师，严格遵循教育部发布的最新高等院校教学大纲和最新研究生入学考试大纲，精心编写了这本《大学教材全解——电子技术基础·模拟部分》。

本书编排科学，详略得当，方法齐全，图文并茂，希望通过“教材全解”系列全心全意、解疑解难的独有特色，全面透彻地解析电子技术基础知识，帮助读者真正吃透教材，快速提升学习能力与思维水平，轻松达到期末、考研等各项考试的测试要求。本书亦可作为教师教学参考、考研人员考前系统复习用书。

本书共分十一章，章节的划分与教材完全保持一致。每章包括五大部分内容，每部分可简述如下：

- 1 本章知识结构图解：**用网络结构图的形式揭示出本章知识点之间的有机联系，以便于学生从总体上掌握本章知识体系和核心内容。重点知识、核心知识一览无余，是考前复习的指南。
- 2 本章考试出题点：**精准定位本章在期末、考研等考试中涉及的知识点及考查方式和方向，为快速有效地备考指明方向。
- 3 本章教材内容全解：**用简洁、易懂的语言对本章涉及的基本概念、基本公式等进行了系统的梳理，并指出理解与应用时需要注意的问题及各类考试中经常考查的重要知识点。对于教材知识内容的讲解，本书比市场上同类竞品讲解得更全面，更详细，更到位。对于重要知识点和难点，我们都辅以典型例题来诠释，可谓是核心知识与典型例题完美结合，以便于读者更快速地吸收知识。
- 4 名校考研真题精析：**精选全国各地考研名校典型真题并进行权威解析。解析过程详尽、细致，步骤连贯、无跳跃，配图齐全、形象；并对解题方法进行提炼，使读者对于同类题可以“举一反三”。
- 5 本章课后习题全解：**此部分对于每章里的练习及思考题和所有习题进行详细、全面的解答，对于有代表性的习题还给出了多种解法，以培养读者归纳问题能力和发散思维能力。解题步骤详细，运用最直接、最容易想到的解答方法，以便于读者理解。

在此特别指出的是，【温馨提示】和【特别提醒】两个栏目中的内容乃点睛之笔，可谓是一语点醒梦中人！

全书内容编写系统、新颖、清晰、独到，充分体现了如下特色：

- 1 知识梳理清晰、简洁：本书直观、形象的图表总结，精炼、准确的考点提炼，权威、独到的方法归纳，将内容抽丝剥茧、层层展开，呈现给读者简明扼要、层次分明的知识结构，便于读者快速复习、高效掌握，形成稳固、扎实的知识网，为提高解题能力夯实基础。
- 2 能力提升迅速、持续：所有重点、难点、考点，统统归纳为在考试中可能出现的基本题型，结合考研真题，深入讲解，真正将掌握知识和提升解题能力高效结合。
- 3 内容深入浅出、易学易用：为适应广大读者的不同需求，本书进行了科学的编排，读者不仅可以在有教师指导的情况下使用，更可作为自学必备用书。

本书编排时博采众家之长，参考了多本同类书籍，吸取了不少养分。在此向这些书籍的编著者表示感谢！由于我们水平有限，书中难免有疏漏与不妥之处，敬请广大读者提出宝贵意见，以便我们改进。

考拉进阶教育研究院
“大学教材全解”编委会



目录

1 绪 论

本章知识结构图解	1	本章教材内容全解	1
本章考试出题点	1	本章课后习题全解	4

2 运算放大器

本章知识结构图解	8	名校考研真题精析	13
本章考试出题点	8	本章课后习题全解	23
本章教材内容全解	8		

3 二极管及其基本电路

本章知识结构图解	37	名校考研真题精析	42
本章考试出题点	37	本章课后习题全解	53
本章教材内容全解	37		

4 双极结型三极管及放大电路基础

本章知识结构图解	62	名校考研真题精析	76
本章考试出题点	62	本章课后习题全解	101
本章教材内容全解	62		

5 场效应管放大电路

本章知识结构图解	122	名校考研真题精析	131
本章考试出题点	122	本章课后习题全解	135
本章教材内容全解	122		

6 模拟集成电路

本章知识结构图解	148	名校考研真题精析	160
本章考试出题点	148	本章课后习题全解	164
本章教材内容全解	148		

7 反馈放大电路

本章知识结构图解	182	名校考研真题精析	191
本章考试出题点	182	本章课后习题全解	194
本章教材内容全解	182		

8 功率放大电路

本章知识结构图解	203	名校考研真题精析	207
本章考试出题点	203	本章课后习题全解	210
本章教材内容全解	203		

9 信号处理与信号产生电路

本章知识结构图解	218	名校考研真题精析	233
本章考试出题点	218	本章课后习题全解	239
本章教材内容全解	218		

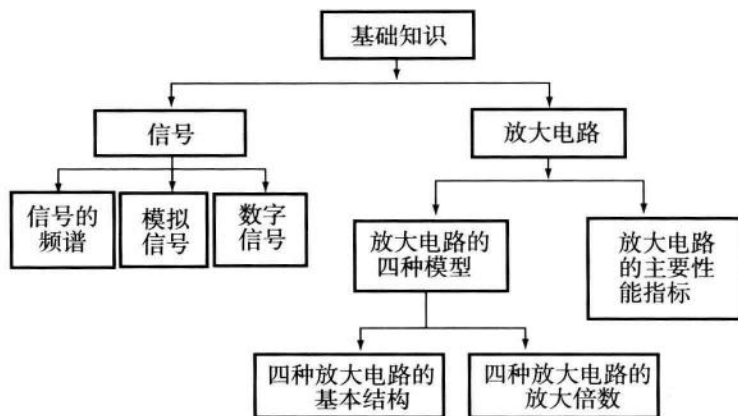
10 直流稳压电源

本章知识结构图解	260	名校考研真题精析	265
本章考试出题点	260	本章课后习题全解	268
本章教材内容全解	260		

11 电子电路的计算机辅助分析与设计(略)

1 绪 论

本章知识结构图解



本章考试出题点

本章考试出题比例较小,且多为概念考查题。

1. 信号、频谱、模拟信号、数字信号等概念。
2. 放大电路的表述形式,四种类型放大电路的概念与区别。
3. 放大电路的主要性能指标。

本章教材内容全解

本章是绪论部分,教材内容主要集中在基本概念上,要从实质上把握基本概念的内涵和外延。

1. 信号

信号是信息的载体,自然界的物理量经过传感器可以转换为承载信息的电压或电流,称为电信号。电信号分模拟信号和数字信号,本书主要研究模拟电信号。

模拟信号:时间和幅值皆连续的信号。

数字信号:时间和幅值皆离散的信号。

2. 信号的频谱

任意满足狄利克雷条件的周期函数都可展开成傅里叶级数,当把一个满足条件的信号进行傅里叶展开分解为正弦信号的集合时,各正弦信号幅值随角频率变化的分布即为信号的频谱。相应地,电信号被分解为直流分量、基波、高次谐波。

幅度频谱:各频率分量的振幅随频率变化的分布。

相位频谱:各频率分量的相位随频率变化的分布。

3. 放大电路的 4 种模型(难点)

(1) 电压放大电路: $v_o = A_v v_i$, 输入为电压信号, 输出为电压信号; 电路结构模型如图 1.1 所示。

$$\text{电压增益: } A_v = \frac{v_o}{v_i} = A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

适用于信号源内阻 R_s 较小而且负载电阻 R_L 较大的场合。

(2) 电流放大电路: $i_o = A_i i_i$, 输入为电流信号, 输出为电流信号; 电路结构模型如图 1.2 所示。

$$\text{电流增益: } A_i = \frac{i_o}{i_i} = A_{is} \frac{R_o}{R_L + R_o}$$

适用于信号源内阻 R_s 较大而负载电阻 R_L 较小的场合。

(3) 互阻放大: $v_o = A_r i_i$, 输入为电流信号, 输出为电压信号; 电路结构模型如图 1.3 所示。

适用于需要将微弱的电流信号转化为较大电压信号的场合。

(4) 互导放大: $i_o = A_g v_i$, 输入为电压信号, 输出为电流信号; 电路结构模型如图 1.4 所示。

适用于需要将微弱的电压信号转化为较大电流信号的场合。

4. 放大电路的主要性能指标(重点)

(1) 输入电阻 R_i : 是输入电压 v_i 与输入电流 i_i 的比值, 即 $R_i = v_i / i_i$ 。

(2) 输出电阻 R_o : 在电路输出端加一测试电压 v_i 与其相应产生的测试电路 i_i 的比值, 即

$$R_o = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{v_s=0, R_L=\infty}$$

(3) 增益 A : 四种放大电路分别有不同的增益——电压增益、电流增益、互阻增益、互导增益。前两种增益的常用单位是分贝。

$$\text{电压增益} = 20 \lg |A_v| \text{ dB}$$

$$\text{电流增益} = 20 \lg |A_i| \text{ dB}$$

由于功率与电压(或电流)的平方成比例, 因而功率增益 $= 10 \lg A_p \text{ dB}$ 。

温馨提示: 模拟电路中提到“电压增益”, 一般应用 dB 来表示; 提到“电压放大倍数”, 则常用具体的倍数表示。

(4) 频率响应: 在输入正弦信号情况下, 输出随频率连续变化的稳态响应。

考虑电抗性元件的作用和信号角频率变量, 放大电路的电压增益可以表示为 $\dot{A}_V(j\omega) =$

$$\frac{\dot{V}_o(j\omega)}{\dot{V}_i(j\omega)} \text{ 或 } \dot{A}_V = A_V(\omega) \angle \varphi(\omega)$$

其中,

$A_V(\omega)$ 表示电压增益的模与角频率之间的关系, 称为幅频响应;

$\varphi(\omega)$ 表示放大电路输出与输入正弦电压信号的相位差与角频率之间的关系, 称为相频响应。

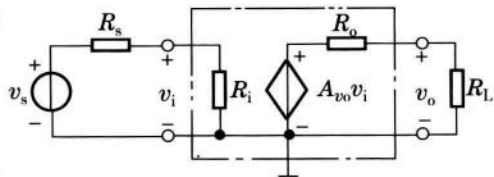


图 1.1 电压放大电路

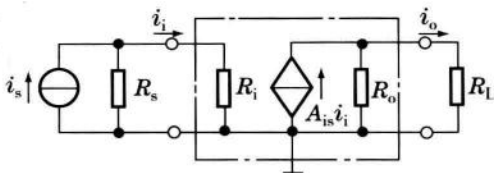


图 1.2 电流放大电路

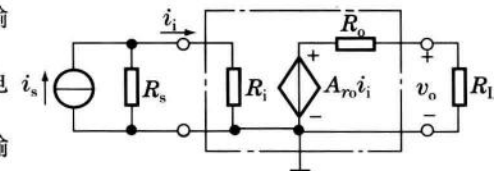


图 1.3 互阻放大电路

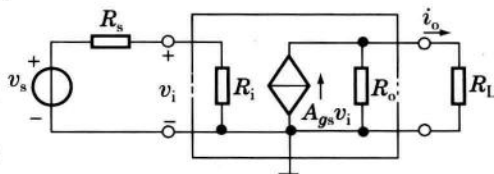


图 1.4 互导放大电路

$A_V(\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$ 综合起来表征放大电路的频率响应。

(5) 带宽:幅频响应的高、低两个半功率点(该频率点电路输出功率约为中频区输出功率的一半)间的频率差,也称通频带。即 $BW=f_H-f_L$ 。

f_H 是频率响应的高端半功率点,也称为上限频率;

f_L 是频率响应的低端半功率点,也称为下限频率。

由于通常有 $f_L \ll f_H$ 的关系,故有 $BW \approx f_H$ 。

(6) 频率失真:因放大电路内部结构造成的对不同频率输入信号的放大倍数不同,又称线性失真。分为幅度失真和相位失真。

(7) 非线性失真:由电路的放大倍数非线性造成的输出波形与输入波形形状不一致。可以用非线性失真系数来衡量:

$$\gamma = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_{ok}^2}}{V_{o1}} \times 100\%$$

温馨提示:本节所列出的放大电路主要性能指标会在后续的学习中频繁用到,必须要透彻理解其含义并熟练记忆。

例1 可以用电压表测量放大电路的部分参数,如图1.5。当开关K闭合时,电压表显示 $V=100\text{ mV}$,当K断开时 $V=200\text{ mV}$,求输入电阻 R_i 。

解 由已知条件和电路分析知,当开关K闭合时,电压表V显示的 100 mV 即为电路的输入电压值;而当K断开时电压表V所测得的实际是信号源电压 V_s 值,即 $V_s=200\text{ mV}$ 。

从此电路的输入端看,输入电压即为信号源电压在 R_i 上的分压,所以

$$V_i = \frac{R_i}{R_i + R_s} V_s$$

其中,按照测量结果知 $V_i=100\text{ mV}$, $V_s=200\text{ mV}$,而 $R_s=1\text{ k}\Omega$,代入上式可得

$$R_i = 1\text{ k}\Omega。$$

例2 已知某信号为方波,波形如图1.6所示,求信号中的直流分量、基波、各次谐波。

解 由波形图可知,信号函数表达式为

$$v(t) = \begin{cases} V_s & \text{当 } nT \leq t < (2n+1)\frac{T}{2} \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } (2n+1)\frac{T}{2} \leq t < (n+1)T \text{ 时} \end{cases}$$

对其进行傅里叶展开,可得

$$v(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)]$$

其中

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} v(t) \cos(n\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_s \cos(n\omega t) d\omega t = \frac{V_s}{\pi n} \sin(n\omega t) \Big|_0^{\pi} = 0$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} v(t) \sin(n\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_s \sin(n\omega t) d\omega t = \frac{-V_s}{\pi n} \cos(n\omega t) \Big|_0^{\pi} = \frac{2V_s}{\pi n}$$

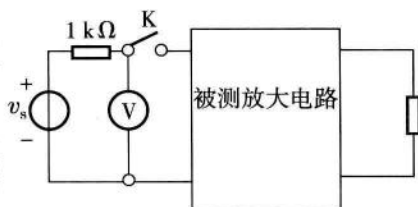


图 1.5

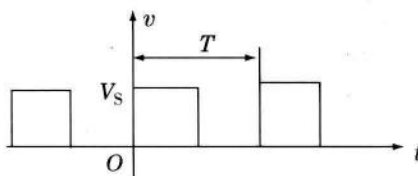


图 1.6

$$\text{所以 } v(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) = \frac{V_s}{2} + \frac{2V_s}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots \right)$$

即信号中直流分量为 $\frac{V_s}{2}$, 基波分量为 $\frac{2V_s}{\pi} \sin \omega t$, n 次谐波为 $\frac{2V_s}{\pi n} \sin(n\omega t)$ 。

本章课后习题全解

一、复习思考题部分

注:原题目 1.3.1 见教材 P7, 1.4.1、1.4.2 见教材 P12, 1.5.1~1.5.4 见教材 P19。

1.3.1 答 气温和水银温度计的温度值都是时间连续、数值连续信号;定时观测读出的温度值则属于时间离散、数值离散信号。

1.4.1 答 属于互阻放大电路。互阻增益 $A_r = v_o/i_i = 500 \text{ mV}/(10 \text{ pA}) = 50\,000 \text{ M}\Omega$ 。

1.4.2 答 直接相连时,扬声器电压为 $1 \text{ V} \times 10 \text{ }\Omega / (1 \text{ M}\Omega + 10 \text{ }\Omega) \approx 0.01 \text{ mV}$;通过放大电路相连时,放大电路获得的电压为 $1 \text{ V} \times 1 \text{ M}\Omega / (1 \text{ M}\Omega + 1 \text{ M}\Omega) = 0.5 \text{ V}$,放大后通过输出电阻加到扬声器上的电压为 $0.5 \text{ V} \times 1 \times 10 \text{ }\Omega / (10 \text{ }\Omega + 10 \text{ }\Omega) = 0.25 \text{ V}$

该电路信号源内阻大而负载电阻小,应该使用电流放大电路。

1.5.1 答 根据放大电路的输入输出电阻模型,开路输出电压即相当于放大电路所提供的电压,短路输出电流即为此开路电压单独作用在输出电阻上所形成的电流,所以输出电阻 $R_0 = V'_0/i_{os}$ 。

1.5.2 答 因为任何满足狄利克雷条件的周期信号都可展开成正弦(余弦)信号的叠加,所以用频率连续可变的正弦信号可以测试电路对不同信号分量的性能。可以用来测量增益、频率响应、非线性失真等参数。

1.5.3 答 对于指定频率的正弦信号,不会有频率失真现象,频率失真是发生在含有多种谐波的复合信号放大过程中的。

1.5.4 答 2 节 1.5 伏的干电池,输出电压信号的峰值最大不会超过电源电压,即 3 V,输出最大功率 $(1.5/\sqrt{2})^2/8 \text{ W} = 0.14 \text{ W}$ 。

二、习题部分

注:原题目见教材 P20~P21。

1.2.1

解 正弦波电压表达式为 $v(t) = V_m \sin(\omega t + \theta)$, 由于 $\theta = 0$, 于是

(1) 因为 $V_{PP} = 2V_m = 10 \text{ V}$, $V_m = 5 \text{ V}$, $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 10^4 \text{ rad/s}$

则电压信号为: $v(t) = 5 \sin(2 \times 10^4 \pi t) (\text{V})$;

(2) 因为 $V = 220 \text{ V}$, $V_m = \sqrt{2}V = 220\sqrt{2} \text{ V}$, $\omega = 2\pi f = 100\pi \text{ rad/s}$

则电压信号为: $v(t) = 220\sqrt{2} \sin(100\pi t) (\text{V})$;

(3) 因为 $V_{PP} = 2V_m = 100 \times 10^{-3} \text{ V}$, $V_m = 0.05 \text{ V}$, $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \times 10^3 \text{ rad/s}$

则电压信号为: $v(t) = 0.05 \sin(2\,000\pi t) (\text{V})$;

(4) 因为 $V_{PP} = 2V_m = 0.25 \text{ V}$, $V_m = 0.125 \text{ V}$, $\omega = 1\,000 \text{ rad/s}$

则电压信号为: $v(t) = 0.125 \sin(1\,000t) (\text{V})$ 。

1.2.2

解 (1) 方波信号在电阻上的耗散功率:

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v^2(t)}{R} dt = \frac{V_s^2}{TR} \int_0^{\frac{T}{2}} dt = \frac{V_s^2}{2R}$$

$$\text{周期信号各阶谐波分量的功率: } P_n = \frac{1}{T} \int_0^T [V_{mn}^2 \sin^2(n\omega t)/R] dt = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} V_{mn} \right)^2 / R$$

(2) 由式(1.2.3)可知,直流分量、基波分量、三次谐波分量分别为 $\frac{V_s}{2}$ 、 $\frac{2V_s}{\pi}$ 、 $\frac{2V_s}{3\pi}$,所以它们在电阻上的耗散功率为

$$\text{直流分量: } P_0 = \left(\frac{V_s}{2}\right)^2 / R = \frac{V_s^2}{4R}$$

由频谱分析可知: $V_{m1} = \frac{2V_s}{\pi}$, 于是

$$\text{基波分量: } P_1 = \left(\frac{2V_s}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 / R = \frac{2V_s^2}{\pi^2 R}$$

同理, $V_{m3} = \frac{2V_s}{3\pi}$, 于是

$$\text{三次谐波分量: } P_3 = \left(\frac{2V_s}{3\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 / R = \frac{2V_s^2}{9\pi^2 R}$$

(3) 3个分量占电阻上总耗散功率的百分比:

$$\text{前三者之和为: } P_{0\sim 3} = P_0 + P_1 + P_3 = \frac{V_s^2}{4R} + \frac{2V_s^2}{\pi^2 R} + \frac{2V_s^2}{9\pi^2 R} \approx 0.475 \frac{V_s^2}{R}$$

$$\text{所占百分比: } (P_{0\sim 3}/P_s) \times 100\% \approx \frac{0.475V_s^2/R}{V_s^2/2R} \times 100\% = 95\%$$

1.4.1

解 由图可知,电压放大电路模型

$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \times \frac{v_i}{v_s}$$

$$\text{由图知: } \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_L}{R_o + R_L} \times A_{vo}, \frac{v_i}{v_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i}$$

$$\therefore A_{vs} = \frac{R_L}{R_o + R_L} \times A_{vo} \times \frac{R_i}{R_s + R_i} = \frac{A_{vo} R_i R_L}{(R_o + R_L)(R_s + R_i)}$$

(1) 将 $R_i = 10R_s$, $R_L = 10R_o$, $A_{vo} = 10$ 代入公式

$$A_{vs} = \frac{A_{vo} R_i R_L}{(R_o + R_L)(R_s + R_i)} = \frac{10 \times 10R_s \times 10R_o}{(R_o + 10R_o)(R_s + 10R_s)} = \frac{10^3}{11^2} \approx 8.26$$

同理可得

$$(2) A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = 2.5$$

$$(3) A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} \approx 0.0826$$

$$(4) A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} \approx 0.826$$

1.5.1

解 放大电路中电压增益 $A_v = \frac{v_o}{v_i}$, 电流增益 $A_i = \frac{i_o}{i_i}$, 功率增益 $A_p = \frac{P_o}{P_i}$, 注意计算 A_v 和 A_i , 可利用对应的峰-峰值或对应的最大值或有效值计算, 计算 A_p 时, 利用功率 $P_o = i_o^2 R =$

$\frac{v_o^2}{R}$, $P_i = v_i i_i$, 其中 v_o, i_o, v_i, i_i 均为有效值。所以,

$$\text{电压增益 } A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{1 \text{ V}}{0.005 \text{ V}} = 200$$

$$20\lg|A_v| = 20\lg 200 \approx 46 \text{ dB}$$

$$\text{电流增益 } A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{1 \text{ V}/2000 \Omega}{5 \times 10^{-6} \text{ A}} = 100$$

$$20\lg|A_i| = 20\lg 100 = 40 \text{ dB}$$

$$\text{功率增益 } A_p = \frac{P_o}{P_i} = \frac{(1 \text{ V})^2/2000 \Omega}{5 \times 10^{-3} \text{ V} \times 5 \times 10^{-6} \text{ A}} = 20000$$

$$10\lg A_p = 10\lg 20000 \approx 43 \text{ dB}$$

1.5.2

解 电压放大电路输出端等效为 R_o 串 R_L 。

设负载开路时输出电压为 v'_o , 负载电阻 $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ 时输出电压为 v_o , 根据题意 $v_o = (1 - 20\%)v'_o = 0.8v'_o$

而 $v_o/v'_o = R_L/(R_o + R_L)$

$$\text{则 } R_o = (v'_o/v_o - 1)R_L = (1/0.8 - 1) \times 1 \times 10^3 \Omega = 250 \Omega$$

1.5.3

解 因为电压放大电路输出端等效为 R_o 与 R_L 串联。

设 v'_o 为负载电阻断开时的输出电压, 即 $v'_o = 1.1 \text{ V}$; 负载电阻 $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ 时, 输出电压为 $v_o = 1 \text{ V}$ 。根据 $v_o/v'_o = R_L/(R_o + R_L)$, 则输出电阻为

$$R_o = (v'_o/v_o - 1)R_L = (1.1 \text{ V}/1 \text{ V} - 1) \times 1 \times 10^3 \Omega = 100 \Omega$$

1.5.4

解 该放大电路的电路模型如图解 1.5.4。

根据题意可得输出电阻

$$R_o = \frac{\text{开路电压}}{\text{短路电流}} = 10 \text{ V}/(10 \times 10^{-3} \text{ A}) = 1 \text{ k}\Omega$$

由于放大电路开路输出电压为 $v'_o = 10 \text{ V}$, 电流信号源电流 $i_s = 1 \mu\text{A}$, 负载电阻 $R_L = 4 \text{ k}\Omega$, 于是可得

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v'_o \cdot R_L / (R_o + R_L)}{i_s \cdot R_i} = \frac{10 \times 4 \times 10^3 / (1 \times 10^3 + 4 \times 10^3)}{1 \times 10^{-6} \times 10 \times 10^3} = 800$$

$$20\lg|A_v| = 20\lg 800 \approx 58 \text{ dB}$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_s} = \frac{v'_o / (R_o + R_L)}{i_s} = \frac{10 / (1 \times 10^3 + 4 \times 10^3)}{1 \times 10^{-6}} = 2000$$

$$20\lg|A_i| = 20\lg 2000 \approx 66 \text{ dB}$$

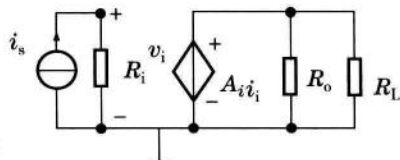
$$A_p = \frac{P_o}{P_i} = \frac{v_o^2 / R_L}{i_s^2 \cdot R_i} = \frac{[v'_o R_L / (R_o + R_L)]^2 / R_L}{i_s^2 \cdot R_i} =$$

$$\frac{[10 \times 4 \times 10^3 / (1 \times 10^3 + 4 \times 10^3)]^2 / 4 \times 10^3}{(1 \times 10^{-6})^2 \times 10 \times 10^3} = 1.6 \times 10^6$$

$$10\lg A_p = 10\lg(1.6 \times 10^6) \approx 62 \text{ dB}$$

1.5.5

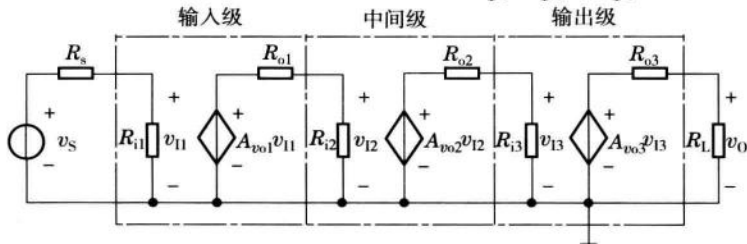
解 由于高输入电阻放大电路对电压信号源衰减减小, 所以输入级(第一级)宜采用高输入电阻型放大



图解 1.5.4

电路;低输出电阻放大电路带负载能力强,所以输出级(第三级)宜采用低输出电阻型放大电路;中间级(第二级)用高增益型。于是三种放大电路模型互连组成的放大电路如图解 1.5.5 所示。

在该放大器中,输出信号源为 $v_s = 30 \text{ mV}$ 、内阻 $R_s = 0.5 \text{ M}\Omega$ 的电压源;前级放大电路的受控源及输出电阻是后级放大电路的信号源和内阻,而后级放大电路的输入电阻则是前级放大电路的负载电阻。设三个放大电路模型的输入电压分别为 v_{11} 、 v_{12} 和 v_{13} , 于是



图解 1.5.5

$$v_{11} = \frac{R_{i1}}{R_s + R_{i1}} \cdot v_s = \frac{1 \times 10^6}{(0.5 + 1) \times 10^6} \times 0.03 \text{ V} = 0.02 \text{ V}$$

$$v_{12} = \frac{R_{i2}}{R_{o1} + R_{i2}} \cdot A_{vo1} v_{11} = \frac{10 \times 10^3}{(10 + 10) \times 10^3} \times 10 \times 0.02 \text{ V} = 0.1 \text{ V}$$

$$v_{13} = \frac{R_{i3}}{R_{o2} + R_{i3}} \cdot A_{vo2} v_{12} = \frac{10 \times 10^3}{(1 + 10) \times 10^3} \times 100 \times 0.1 \text{ V} = \frac{100}{11} \text{ V}$$

$$v_o = \frac{R_L}{R_{o3} + R_L} \cdot A_{vo3} v_{13} = \frac{100}{20 + 100} \times 1 \times \frac{100}{11} \text{ V} = \frac{1000}{132} \text{ V} = \frac{250}{33} \text{ V}$$

放大器输出功率

$$P_O = v_o^2 / R_L = [(250/33)^2 / 100] \text{ W} \approx 0.574 \text{ W} > 0.5 \text{ W}$$

1.5.6

解 根据电路可得 $i_2 = \beta i_1$, 由 KCL 定律

$$i_1 = i_1 + i_2 = i_1 + \beta i_1 = (1 + \beta) i_1 = (1 + \beta) v_s / R_1$$

$$\text{则 } R_i = v_s / i_1 = R_1 / (1 + \beta)$$

1.5.7

解 设输入电压为 \dot{V}_i ; 中频区输出电压为 \dot{V}_o , 电压增益为 \dot{A}_{VO} ; 上限频率点输出电压为 \dot{V}_H , 增益 \dot{A}_{VH} 。依题意

$$20 \lg |\dot{A}_{VH}| - 20 \lg |\dot{A}_{VO}| = -3 \text{ dB}$$

又因为

$$20 \lg |\dot{A}_{VH}| - 20 \lg |\dot{A}_{VO}| = 20 (\lg |\dot{V}_H / \dot{V}_i| - \lg |\dot{V}_o / \dot{V}_i|) = 20 \lg \left| \frac{\dot{V}_H}{\dot{V}_o} \right| = -3 \text{ dB}, \lg \left| \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_H} \right| =$$

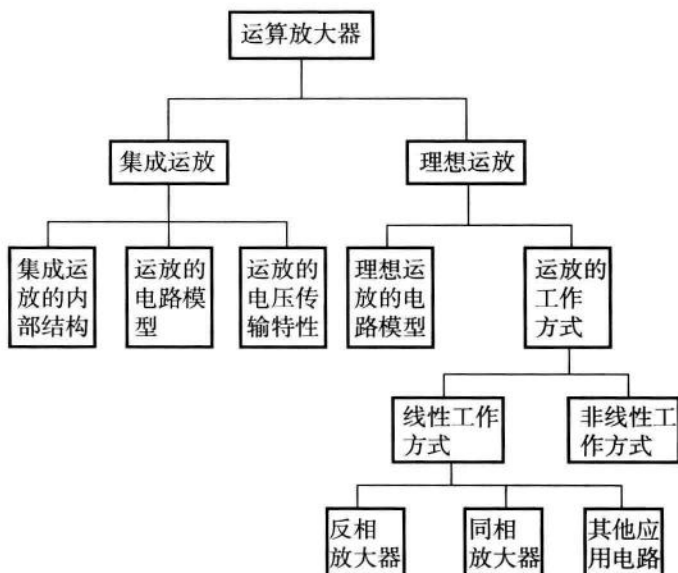
$$\frac{3}{20}, \frac{|\dot{V}_o|}{|\dot{V}_H|} = 10^{\frac{3}{20}}, |\dot{V}_H| = \frac{|\dot{V}_o|}{10^{\frac{3}{20}}}$$

$$\text{所以 } |\dot{V}_H| \approx 0.708 |\dot{V}_o|$$

在相同输入电压条件下, 上限频率点的输出电压约下降到中频区的 0.708。

2 ▶ 运算放大器

本章知识结构图解



本章考试出题点

本章考试出题比例一般,有少数概念考查题,重点在运放的线性工作方式。

1. 集成运放的输入级、中间级、放大级,同相输入端、反相输入端,理想运放等概念。
2. 集成运放的内部结构模型和电压传输特性。
3. 运放工作在线性方式下的几种典型电路(电路结构和输入输出关系):
反相放大器;
同相放大器;
求差电路和求和电路;
微分电路和积分电路。

本章教材内容全解

本章介绍运算放大器及其简单应用电路,教材内容主要集中在基本概念、基本电路和基本运算上,要从实质上把握运放的特性,掌握电路的构建规律,能够求出电路的输入输出关系。

1. 集成电路运算放大器各级组成部分与外部特性(重点)

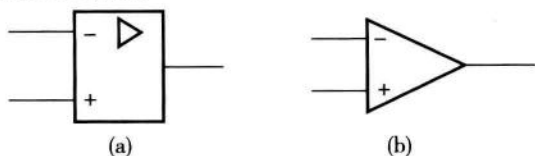
- (1) 输入级——差分放大电路,具有较大的输入电阻;

(2) 中间级——电压放大电路,具有较高的电压放大倍数;

(3) 输出级——功率放大电路,具有较小的输出电阻。

集成运放输出电压 $v_o = A_{vo}(v_p - v_N)$ 。

集成运放电气符号如图 2.1 所示。



(a) 国家标准规定的符号 (b) 国内外常用符号

图 2.1 集成运放的电气符号

从符号上,集成运放有两个输入端,一个输出端,关系如下:

反相输入端 N——反相输入端电位升高则输出端电位降低;

同相输入端 P——同相输入端电位升高则输出端电位升高;

具体地,输入输出端之间服从图 2.2 的电压传输特性。

电压传输特性曲线中,过原点的斜线部分称为线性工作区,线性区以外的水平直线部分称为饱和工作区或非线性工作区。

2. 理想运放

理想运放是实际集成运放的理想化模型,主要特点为:输入电阻无穷大,输出电阻无穷小(近似为 0),电压放大倍数无穷大,共模抑制比无穷大,输出饱和电压等于电源电压,线性区差分输入电压无穷小。

理想运算放大器的电路模型如图 2.3 所示。

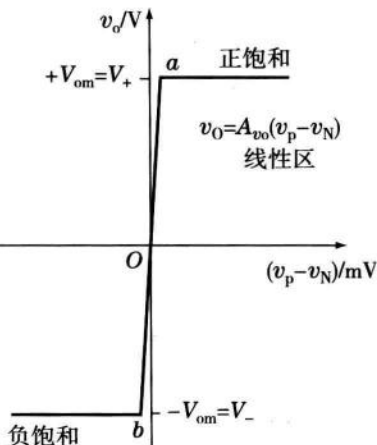


图 2.2 集成运放的电压传输特性

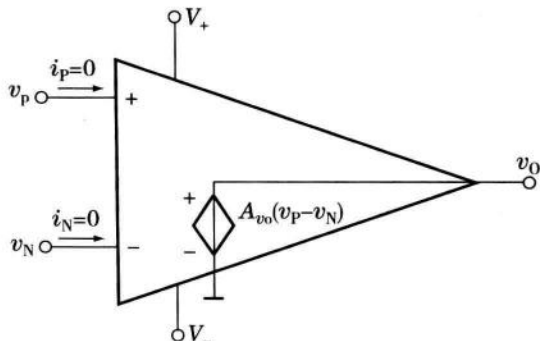


图 2.3 理想运放电路模型

3. 基本线性运放电路(重点)

(1) 同相放大电路

同相放大电路的特点是输出与输入电压同相,进而在存在反馈的闭环工作状态下,接入两

输入端的信号电压大小近似相等,相位也相同。典型电路结构如图 2.4 所示。

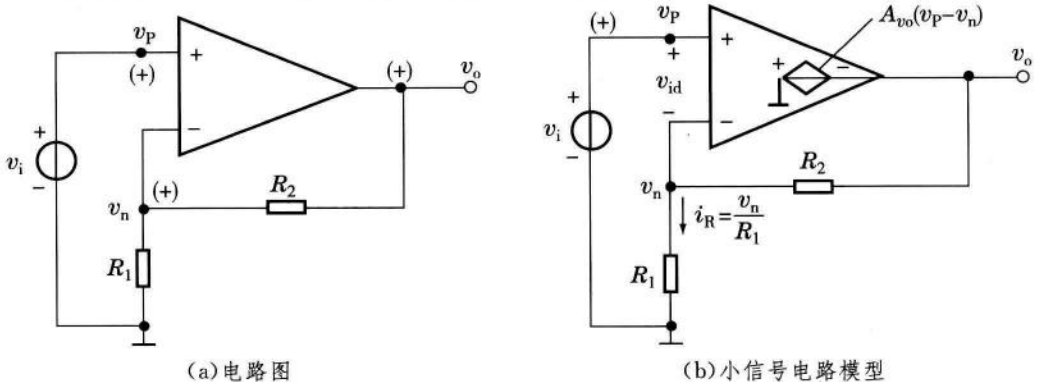


图 2.4 同相放大电路

从电路上看,同相放大电路的输入信号是接在运放的同相(P)输入端的。同相放大电路采用的反馈组态(详见第 7 章)形式是电压串联负反馈。本节中引入了负反馈的概念,在负反馈存在的状态下,电路存在虚短($v_p \approx v_n$, 或 $v_{id} = v_p - v_n \approx 0$)和虚断($i_p = i_n \approx 0$)两个概念,虚短是本质属性,虚断则是由虚短引申出的。

温馨提示: 虚短和虚断两个概念是求解几乎所有运算放大电路输出表达式(电压增益)的敲门砖,必须深入理解、灵活运用。

由于虚短概念的存在,

$$v_i = v_p \approx v_n = v_i = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o$$

可得此电路的闭环增益为

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

由式可见此电路的闭环增益与运放器件本身无关,而是取决于反馈电路参数。从图 2.4(b)的小信号模型可以看出,输入电阻无穷大,输出电阻近似为 0。

特殊地,令反馈电阻为 0,可得到闭环增益为 1 的电压跟随器电路,如图 2.5 所示。

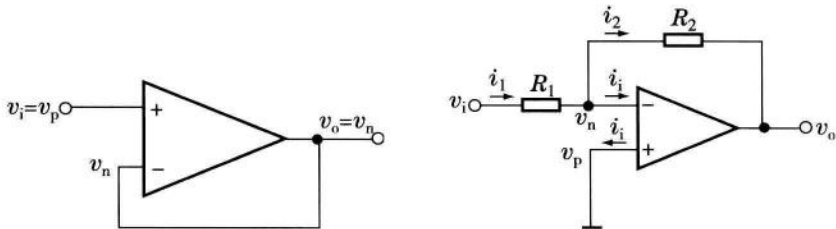


图 2.5 电压跟随器

图 2.6 反相放大电路

(2) 反相放大电路

反相放大电路的特点是输出与输入电压反相,同相输入端接地,由虚短可以引出虚地的概念,典型电路结构如图 2.6 所示。

从电路上看,反相放大电路的输入信号是由运放的反相(N)输入端接入电路的。反相放大电路采用的反馈组态(详见第 7 章)形式是电压并联负反馈。

由虚短的概念可知 $\frac{v_i}{R_1} = -\frac{v_o}{R_2}$

因此电路闭环增益为 $A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$

输入电阻 $R_i = \frac{v_i}{i_1} = \frac{v_i}{v_i/R_1} = R_1$, 输出电阻无穷小。

(3) 求差电路和求和电路

使用同一个运放合并构建同相和反相运算电路, 可以得到求差电路, 也称差分放大电路, 如图 2.7 所示。

利用虚短和虚断的概念, 可得

$$\begin{aligned} v_o &= \left(\frac{R_1+R_4}{R_1}\right) \left(\frac{R_3}{R_2+R_3}\right) v_{i2} - \frac{R_4}{R_1} v_{i1} \\ &= \left(1+\frac{R_4}{R_1}\right) \left(\frac{R_3/R_2}{1+R_3/R_2}\right) v_{i2} - \frac{R_4}{R_1} v_{i1} \end{aligned}$$

如果阻值 $R_4/R_1 = R_3/R_2$, 则有 $v_o = \frac{R_4}{R_1} (v_{i2} - v_{i1})$ 。输入电阻 $R_i = \frac{v_{i2} - v_{i1}}{i_2} = 2R_1$, 输出电阻无穷小。

构建多个输入端的反相放大电路, 即可得到求和电路, 如图 2.8 所示。

利用虚短和虚断的概念, 可推出电路的输出表达式:

$$\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} = -\frac{v_o}{R_3}$$

$$-v_o = \frac{R_3}{R_1} v_{i1} + \frac{R_3}{R_2} v_{i2}$$

若 $R_1 = R_2 = R_3$, 则 $-v_o = v_{i1} + v_{i2}$ 。

(4) 积分电路和微分电路

利用电容的伏安特性可以构建积分和微分电路, 如图 2.9 所示。

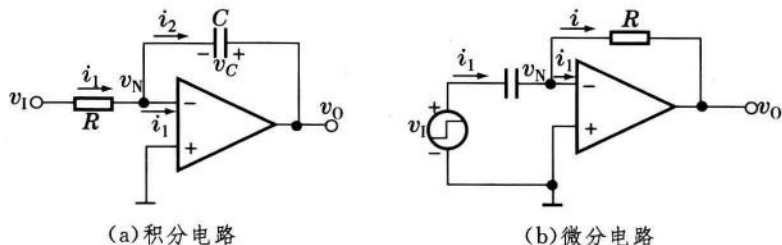


图 2.9 积分电路和微分电路

对于积分电路,

$$v_N - v_o = \frac{1}{C} \int i_1 dt = \frac{1}{C} \int \frac{v_1}{R} dt$$