

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套参考书



《模拟电子电路及技术基础(第二版)》 教、学指导书

孙肖子 主编

孙肖子 张企民 赵建勋
朱天桥 顾伟舟 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套参考书

《模拟电子电路及技术基础(第二版)》 教、学指导书

孙肖子 主编

孙肖子 张企民 编著
赵建勋 朱天桥 顾伟舟

西安电子科技大学出版社

2009

内 容 简 介

本书是配合孙肖子主编的《模拟电子电路及技术基础(第二版)》(西安电子科技大学出版社, 2008)教材而编写的教、学指导书。其主要内容包括该教材的使用指南(教材特点、教学方法、重点与难点等), 建议的授课时数分配, 各章习题类型分析及例题精解、各章习题解答等。希望本书对从事模拟电子电路及技术基础课程教学的老师和广大同学、以及自学的同志们能有所帮助。

图书在版编目(CIP)数据

《模拟电子电路及技术基础(第二版)》教、学指导书/孙肖子主编.

—西安: 西安电子科技大学出版社, 2009. 4

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套参考书

ISBN 978-7-5606-2208-8

I. 模... II. 孙... III. 模拟电路—高等学校—教学参考资料 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 020068 号

责任编辑 云立实 张晓燕

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2009年4月第1版 2009年4月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 13.75

字 数 325千字

印 数 1~4000册

定 价 20.00元

ISBN 978-7-5606-2208-8/TN·0492

XDUP 2500001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本书图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

前 言

本书是配合孙肖子主编，孙肖子、张企民、赵建勋、朱天桥、顾伟舟编著的《模拟电子电路及技术基础(第二版)》(西安电子科技大学出版社，2008)教材而编写的教、学指导书。其目的是帮助从事模拟电子电路及技术基础课程教学的教师更好地实施教学，开展互相交流和教学研究，以进一步提高教学质量；帮助学习该课程的同学和广大读者更好地掌握该课程的基本概念、基本电路、基本分析方法及应用技术。

本书主要包括如下内容：

第一部分 《模拟电子电路及技术基础(第二版)》教材使用说明

- 一、本课程的特点及教学方法、学习方法指导
- 二、本教材授课学时数的分配(建议)

第二部分 各章基本要求、习题类型分析及例题精解、习题解答

附录 模拟试题及答案

本书由孙肖子负责总策划，孙肖子、张企民、赵建勋、朱天桥、顾伟舟参与编写，朱天桥负责全书统稿。云立实副编审为本书的出版付出了辛勤的劳动，在此对帮助过我们的老师和同学们表示深深的谢意。

作者希望本书的出版对广大教师、同学、有志考研者和自学的同志们能有所帮助。

由于受时间和水平所限，书中可能存在不足之处，请广大读者指正。

编 者

2008年5月于西安电子科技大学

目 录

第一部分 《模拟电子电路及技术基础(第二版)》教材使用说明	1
第二部分 各章基本要求、习题类型分析及例题精解、习题解答	4
第一章 绪论	4
1.1 基本要求	4
1.2 习题类型分析	4
1.3 习题解答	4
第二章 集成运算放大器的线性应用基础	8
2.1 基本要求及重点、难点	8
2.2 习题类型分析及例题精解	8
2.3 习题解答	27
第三章 电压比较器、弛张振荡器及模拟开关	59
3.1 基本要求及重点、难点	59
3.2 习题类型分析及例题精解	59
3.3 习题解答	63
第四章 常用半导体器件原理	75
4.1 基本要求及重点、难点	75
4.2 习题类型分析及例题精解	75
4.3 习题解答	87
第五章 基本放大电路	104
5.1 基本要求及重点、难点	104
5.2 习题类型分析及例题精解	104
5.3 习题解答	110
第六章 集成运算放大器电路原理	127
6.1 基本要求及重点、难点	127
6.2 习题类型分析及例题精解	127
6.3 习题解答	131

第七章 频率响应	141
7.1 基本要求及重点、难点	141
7.2 习题类型分析及例题精解	141
7.3 习题解答	145
第八章 反馈	155
8.1 基本要求及重点、难点	155
8.2 习题类型分析及例题精解	155
8.3 习题解答	159
第九章 功率放大电路	178
9.1 基本要求及重点、难点	178
9.2 习题类型分析及例题精解	178
9.3 习题解答	180
第十章 电源电路	188
10.1 基本要求及重点、难点	188
10.2 习题类型分析及例题精解	188
10.3 习题解答	189
第十一章 模拟集成电路设计新技术	195
11.1 基本要求及重点、难点	195
11.2 习题类型分析及例题精解	195
11.3 习题解答	195
附录	199
模拟试题(一)	199
模拟试题(二)	204
模拟试题(一)答案	208
模拟试题(二)答案	212

第一部分 《模拟电子电路及技术基础(第二版)》 教材使用说明

一、本课程的特点及教学方法、学习方法指导

“模拟电子电路及技术基础”课程是一门介绍电子器件、电子电路和技术应用的专业基础课程，其特点是将电路理论扩展到包含有源非线性器件(晶体管、场效应管、集成运放、电压比较器等)的电子电路中。该课程的概念性、工程性、实践性都很强，初学者会因不适应而倍感困难。本着“打好基础、学以致用”的教学理念，我们对该课程做了重大改革，即实行“先集成、后分立”，“先宏观、后微观”，“先外部、后内部”，从系统应用入手，与“电路分析基础”课接口的原则，让学生首先掌握集成电路的外部特性及其在诸多领域的应用，然后再带着问题去追究集成电路内部元器件及电路的实现原理。实验课也做了相应的改革。实践证明，这种改革方案符合人们的认识规律，学生反映，学习该课“很有意思”，“目的性很明确”，变“被动学习”为“主动学习”，变“要我学”为“我要学”，变“没有意思，学了没什么用”为“快乐学习”。

根据内容多、时数少的具体情况，我们主张“以路为主”、“管路结合”。对于电路，要注重电路的组成原理，元件对性能的影响，电路的应用背景，以及快捷的工程近似估算分析法，将重点放在集成电路的应用上。对于器件，要注重物理概念，掌握电压、电流的控制关系。在教学中要向学生推荐一些直观的、易于掌握的 EDA 工具和仿真软件，让学生了解现代化的分析和设计理念及方法。

对于广大同学和读者，根据本课程的特点，我们提倡：

- 注重物理概念，采用工程观点；
- 重视实验技术，善于总结对比；
- 理论联系实际，注意应用背景；
- 寻求内在规律，增强抽象能力。

以期较好、较快地掌握器件与电路的基本工作原理和基本分析方法，并具备本课程学习后所应有的基本工程应用和设计能力。

二、本教材授课学时数的分配(建议)

《模拟电子电路及技术基础(第二版)》教材授课学时分配表(供参考)

章节号	内 容		学时数		备 注
一	绪论			2	
二	集成运算放大器的线性应用基础				本章是全书的重点之一，要求学生熟练掌握基本运算
	(1)	集成运放符号、模型、理想运放条件、传输特性，引入深度负反馈——扩大线性动态范围	1	10	
	(2)	比例放大、相加、相减、积分、微分、V-I、I-V	3		
	(3)	RC 有源滤波器	3		
	(4)	非理想特性对电路性能的影响	1		
	(5)	习题讨论课	2		
三	电压比较器、弛张振荡器及模拟开关				难点为迟滞比较器的传输特性以及弛张振荡器的波形分析
	(1)	简单比较器的传输特性及应用，迟滞比较器的传输特性及应用	2	4	
	(2)	弛张振荡器的原理和分析模拟开关的介绍	2		
四	常用半导体器件原理				本章除介绍器件原理及特性外，还要介绍管子与运放结合而产生的新的功能电路
	(1)	PN 结及其特性	2	10	
	(2)	二极管、稳压管的特性及应用举例	3		
	(3)	双极型晶体三极管的特性及应用举例	3		
	(4)	场效应管的特性及应用举例	2		
五	基本放大电路				本章又是一个重点内容，许多重要概念要建立，三种组态电路分析及特点要掌握
	(1)	放大原理、偏置电路、图解法分析	3	10	
	(2)	小信号模型及共射放大器分析	2		
	(3)	共集、共基电路分析	1		
	(4)	场效应管放大器分析	2		
	(5)	放大器级联分析及习题课	2		
六	集成运算放大器电路原理				重点是恒流源、差分放大器、有源负载电路
	(1)	集成运放电路特点，恒流源电路	2	8	
	(2)	差分放大器分析	2		
	(3)	大信号工作传输特性及应用，集成运放输出级	2		
	(4)	典型集成运放电路举例及 CMOS 运放特点	2		

续表

章节号	内 容		学时数		备 注
七	频率响应				重点是高频响应，重点在概念，而不是计算公式
	(1)	频率响应概念、高频等效电路、共射放大器高频响应分析	2	4	
	(2)	共集、共基、多级放大器的高频响应特点，了解低频响应	2		
八	反馈				重点在反馈类型判断，负反馈对放大器性能的影响，深反馈条件下的增益估算法
	(1)	反馈框图，反馈方程及反馈概念、反馈类型及判别	2	6	
	(2)	反馈对放大器性能的影响及深反馈条件下增益的估算举例	2		
	(3)	稳定性分析及相位补偿技术	2		
九	功率放大电路			2	功放的概念，互补跟随功放功率效率计算
十	电源电路				各种整流电路的特点，稳压电源原理
	(1)	整流及滤波	1	3	
	(2)	串联型线性稳压电源、开关稳压电源的概念	2		
十一	模拟集成电路设计新技术			1	电流模、电流反馈、开关电容的概念
总时数			60		

第二部分 各章基本要求、习题类型分析及 例题精解、习题解答

第一章 绪 论

1.1 基 本 要 求

(1) 了解模拟信号、采样数据信号、数字信号的特点和区别,认识模拟信号处理及模拟电路的重要性。

(2) 熟识放大器的模型,根据输入量、输出量、受控源的不同,有电压放大器(电压增益)、电流放大器(电流增益)、互导放大器(互导增益)、互阻放大器(互阻增益)之分。

(3) 深入了解放大器的主要性能指标:放大倍数(增益)、输入电阻、输出电阻、频率响应、非线性失真系数(全谐波失真系数)等。

(4) 了解反馈的基本概念,负反馈、正反馈的基本含义。

1.2 习题类型分析

本章习题可分为以下三类:

- (1) 对模拟信号、数字信号、取样数据信号的认识;
- (2) 求放大器的模型,其主要性能指标的含义;
- (3) 在放大器与信号源以及负载相连时,分析输入电阻、输出电阻对放大器增益的影响。

1.3 习 题 解 答

1-1 放大器模型如图 P1-1 所示,已知输出开路电压增益 $A_{uo}=10$,试分析计算下列情况的源电压增益 $A_{us}=\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s}$ 。

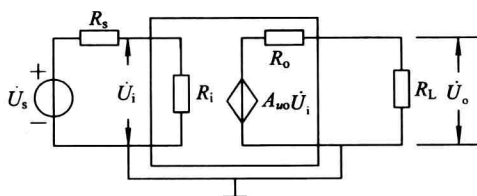


图 P1-1

(1) $R_i = 10R_s$, $R_L = 10R_o$;

(2) $R_i = R_s$, $R_L = R_o$;

(3) $R_i = \frac{R_s}{10}$, $R_L = \frac{R_o}{10}$;

(4) $R_i = 10R_s$, $R_L = \frac{R_o}{10}$ 。

解 (1)
$$\begin{aligned} \dot{U}_i &= \frac{R_i}{R_s + R_i} \dot{U}_s = \frac{10R_s}{R_s + 10R_s} \dot{U}_s = \frac{10}{11} \dot{U}_s \\ \dot{U}_o &= A_{uo} \dot{U}_i \frac{R_L}{R_o + R_L} = 10 \times \frac{10}{11} \dot{U}_s \frac{10R_o}{R_o + 10R_o} \\ &= 10 \times \frac{10}{11} \times \frac{10}{11} \dot{U}_s \end{aligned}$$

因此

$$A_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = 10 \times \frac{10}{11} \times \frac{10}{11} = 8.264$$

(2) $A_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \times \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{2} \times 10 \times \frac{1}{2} = 2.5$

(3) 同理 $A_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \times \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{0.1}{1.1} \times 10 \times \frac{0.1}{1.1} = 0.0826$

(4) 同理 $A_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \times \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{10}{11} \times 10 \times \frac{0.1}{1.1} = 0.826$

1-2 放大器模型如图 P1-1 所示, 已知 $R_s = 1 \text{ k}\Omega$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$, 用示波器测得 $u_s = 1 \sin \omega t (\text{V})$, $u_i = 0.8 \sin \omega t (\text{V})$, 将 R_L 开路, 测得 $u_o^{R_L \rightarrow \infty} = 5 \sin \omega t (\text{V})$, 接上 R_L 后, 测得 $u_o = 4 \sin \omega t (\text{V})$, 试求:

(1) R_i 、 R_o 、 A_{uo} 及 A_{us} 的值;

(2) 电流放大倍数;

(3) 功率放大倍数。

解 (1)
$$\begin{aligned} R_i &= \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s - \dot{U}_i} R_s = \frac{0.8}{1 - 0.8} \times 1 \text{ k}\Omega = 4 \text{ k}\Omega \\ A_{uo} &= \left. \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \right|_{R_L \rightarrow \infty} = \frac{5}{0.8} = 6.25 \\ R_o &= \frac{\dot{U}_o' - \dot{U}_o}{\dot{U}_o} \times R_L = \frac{5 - 4}{4} \times 2 \text{ k}\Omega = 0.5 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

(式中: $\dot{U}_o'$ 为 $R_L \rightarrow \infty$ 时的输出电压值, $\dot{U}_o$ 为 $R_L = 2 \text{ k}\Omega$ 时的输出电压值。)

$$A_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \times \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{0.8}{1} \times \frac{4}{0.8} = 4$$

(2) 电流放大倍数

$$A_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{U}_o/R_L}{\dot{U}_i/R_i} = \frac{4 \text{ V}/2 \text{ k}\Omega}{0.8 \text{ V}/4 \text{ k}\Omega} = 10$$

(3) 功率放大倍数

$$A_P = \frac{P_o}{P_i} = \frac{\frac{1}{2} \dot{U}_o \dot{I}_o}{\frac{1}{2} \dot{U}_i \dot{I}_i} = \frac{4 \text{ V} \times 2 \text{ mA}}{0.8 \text{ V} \times 0.2 \text{ mA}} = 50$$

$$A_{Ps} = \frac{P_o}{P_s} = \frac{\frac{1}{2} \dot{U}_o \dot{I}_o}{\frac{1}{2} \dot{U}_s \dot{I}_i} = \frac{4 \text{ V} \times 2 \text{ mA}}{1 \text{ V} \times 0.2 \text{ mA}} = 40$$

1-3 有三级放大器, 第一级为高输入阻抗型($R_i=1 \text{ M}\Omega$, $A_{uo}=10$, $R_o=10 \text{ k}\Omega$); 第二级为高增益型($R_i=10 \text{ k}\Omega$, $A_{uo}=100$, $R_o=1 \text{ k}\Omega$); 第三级为低输出电阻型($R_i=10 \text{ k}\Omega$, $A_{uo}=1$, $R_o=20 \Omega$)。现有信号源电势 $\dot{U}_s=30 \text{ mV}$, 内阻 $R_s=0.5 \text{ M}\Omega$, 将三级放大器级联驱动 100Ω 的负载, 求:

(1) 负载得到的电压 U_L ;

(2) 流过负载的电流 I_L ;

(3) 负载得到的功率 P_L 。

解 因为信号源内阻大($R_s=0.5 \text{ M}\Omega$)、负载小($R_L=100 \Omega$), 所以为了有效传输与放大信号, 三级放大器级联如图 P1-3 所示。

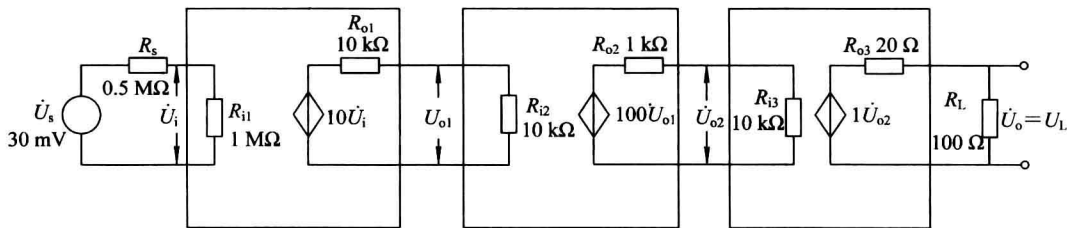


图 P1-3

(1) 求负载得到的电压 U_L :

$$\begin{aligned} A_{us} &= \frac{U_L}{U_s} = \frac{U_i}{U_s} \times \frac{U_{o1}}{U_i} \times \frac{U_{o2}}{U_{o1}} \times \frac{U_L}{U_{o2}} \\ &= \left(\frac{R_{i1}}{R_s + R_{i1}} \right) \times \left(\frac{R_{i2}}{R_{o1} + R_{i2}} \times 10 \right) \times \left(\frac{R_{i3}}{R_{o2} + R_{i3}} \times 100 \right) \times \left(\frac{R_L}{R_{o3} + R_L} \times 1 \right) \\ &= \frac{1}{0.5 + 1} \times \frac{10}{10 + 10} \times 10 \times \frac{10}{1 + 10} \times 100 \times \frac{100}{20 + 100} \times 1 \\ &= 0.66 \times 5 \times 90.9 \times 0.833 \approx 250 \end{aligned}$$

因此

$$U_L = A_{us} \times U_s = 250 \times 30 \text{ mV} = 7.5 \text{ V}$$

(2) 求流过负载的电流:

$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = \frac{7.5 \text{ V}}{0.1 \text{ k}\Omega} = 75 \text{ mA}$$

(3) 求负载得到的功率:

$$P_L = I_L U_L = 75 \text{ mA} \times 7.5 \text{ V} \approx 0.563 \text{ W}$$

1-4 (1) 有一个方波, 经放大器放大后的波形产生了畸变(如图 P1-4(a)所示), 试问该放大器产生了什么失真? 产生失真的原因是什么?

(2) 有一个正弦波, 经放大器放大后的波形产生了畸变(如图 P1-4(b)所示), 试问该放大器产生了什么失真? 产生失真的原因是什么?

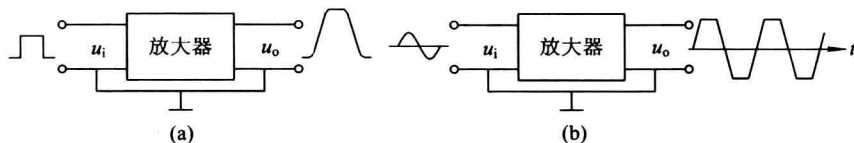


图 P1-4

解 (1) 输出方波边缘变差是因为放大器产生了线性失真, 即波形的高频分量受到损失, 原因是放大器内部存在电容, 使其对高频分量的放大倍数比低频分量的放大倍数小。

(2) 该放大器产生了非线性失真, 使输入正弦波变成输出为非正弦波, 输出含有输入所没有的新的谐波分量, 产生了新的频率成分, 原因是放大器中存在非线性元件, 使输出波形产生限幅。

1-5 有一个放大器的对数振幅频率响应如图 P1-5 所示, 试求:

- (1) 中频放大倍数或低频放大倍数 A_{u1} ;
- (2) 上限频率 f_H ;
- (3) 下限频率 f_L 。

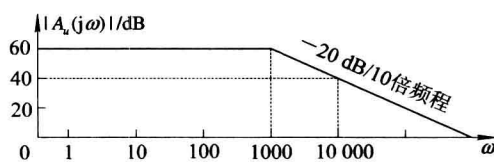


图 P1-5

解 (1) 中频放大倍数或低频放大倍数

$$A_{u1} = 60 \text{ dB} \quad \text{即} \quad A_{u1} = 1000$$

(2) 上限频率

$$f_H = \frac{\omega_H}{2\pi} = \frac{1000 \text{ rad/s}}{2\pi} = 159.23 \text{ Hz}$$

(3) 下限频率

$$f_L = 0 \text{ Hz}$$

第二章 集成运算放大器的线性应用基础

2.1 基本要求及重点、难点

1. 基本要求

(1) 了解集成运算放大器的符号、模型、理想运放条件和电压传输特性。

(2) 理解在理想集成运放条件下, 电路引入深度负反馈对电路性能的影响, 掌握“虚短”、“虚断”和“虚地”的概念。

(3) 熟练掌握理想集成运放基本应用电路(包括同相/反比例放大, 同相/反相相加、相减, 积分, 微分, $V-I$ 和 $I-V$ 变换电路)的分析、计算, 对于给定电路能判断电路类型, 计算主要参数, 绘制输出波形和传输特性; 能够根据给定输入输出关系式和电路功能, 选择并设计电路。

(4) 了解二阶低通、高通、带通、带阻和全通滤波器的传递函数与幅频特性的特点。对于给定滤波器能判断其类型和功能, 并定性绘制其幅频特性; 能设计和计算一阶低通、高通及移相器(全通)等简单滤波器电路。

(5) 了解集成运算放大器主要技术指标的含义, 了解实际集成运放电路的非理想特性对实际应用的限制, 包括输入失调电压、输入偏置电流、有限的开环增益、带宽和压摆率对电路的影响。

2. 重点、难点

重点: 各种集成运放基本应用电路的分析、计算和设计。

难点: 滤波器电路的分析、计算和集成运放电路的非理想特性对实际应用的影响。

2.2 习题类型分析及例题精解

本章习题类型主要有分析计算题和设计题。

分析计算类题目一般是给定电路, 要求分析电路所完成的功能, 计算输入输出关系式, 求放大倍数、传输函数或画出电压传输特性、输出波形, 判断滤波器类型, 分析滤波器频率响应等。

设计类题目是给定设计要求及电路特性, 要求选择电路结构, 设计计算满足性能指标的电路元件值。

“分析”与“设计”是最主要的两大类题目。

1. 分析计算题解题技巧

(1) 一定要仔细观察电路结构, 注意元件数量级, 与已掌握的电路对比, 逐级判断电路的功能。

(2) 正确运用“虚短”、“虚地”概念，以及理想运放条件。

只有在电路引入深度负反馈的条件下，才可以运用“虚短”、“虚地”概念，即 $U_+ = U_-$ 。也只有运放满足理想条件，即 $A_u \rightarrow \infty$, $R_i \rightarrow \infty$, $R_o \rightarrow 0$ ，才有运放输入电流 $i_i' = 0$ ；在线性运用范围内可视为 $U_+ = U_-$ ；负载变化对输出电压影响不大等。这里提醒大家运放输入电流 $i_i' = 0$ ，但输出电流 i_o' 一定不为零，流过负载及反馈支路的电流都是由运放输出电流 i_o 供给的。运放的驱动能力有限，一般 i_o 最大为几毫安或几十毫安，所以所有电阻都不可以太小，否则运放不能输出那么大的电流。运放输出电压摆动范围也是有限的，在分析设计中要注意，否则会出现限幅现象。

(3) 关于引入负反馈问题，也提请注意。一般情况下，从运放输出端直接经一阻抗网络将反馈引向运放的反相输入端，以保证实现深度负反馈。但如果反馈回路包含有源器件，则要判断该有源器件构成的电路是否已将信号反相，若已经反相(如下面例 2-1 中的图 2-1(b)所示电路)，则反馈应引到运放的同相端，以保证整体电路引入“负反馈”。

【例 2-1】 电路如图 2-1 所示。

(1) 判断正、负反馈类型；

(2) 计算输入输出关系式。

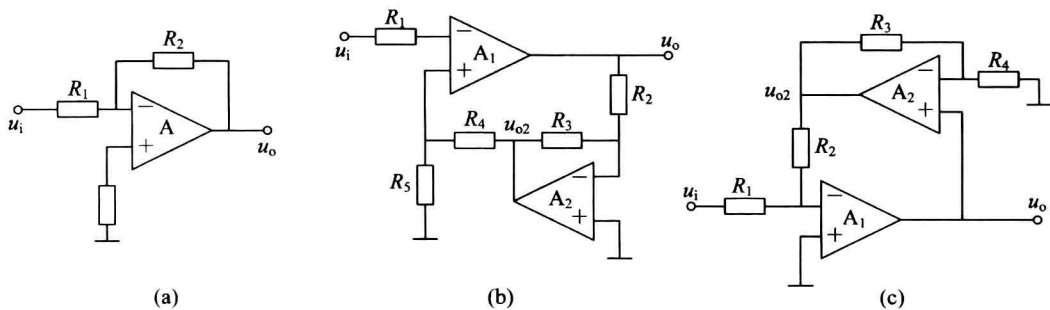


图 2-1 例 2-1 的电路图

解 (1) (a)图引入了负反馈，故

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

(2) (b)图引入了负反馈。因为 u_o 与 u_i 反相， u_o 经 A_2 、 R_3 、 R_2 构成的反相比例放大器反相放大，再经 R_4 和 R_5 分压后加到 A_1 的同相输入端， U_+ 与 U_- 同相相减，所以是负反馈。可根据“虚短”概念，得出

$$U_i = U_- = U_+ = \frac{R_5}{R_4 + R_5} U_{o2} = \frac{R_5}{R_4 + R_5} \left(-\frac{R_3}{R_2} U_o \right)$$

因此

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} = - \left(1 + \frac{R_4}{R_5} \right) \left(\frac{R_2}{R_3} \right)$$

(3) (c)图也引入了负反馈。因为 u_o 与 u_i 反相，而 u_o 又经 A_2 、 R_3 、 R_4 组成的同相比例放大器放大后，再经 R_2 引向 A_1 的反相端，所以仍然引入了负反馈，故 $U_- = U_+ = 0$ ， A_1 反相端为“虚地”，则

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{U_{o2}}{U_i} \times \frac{U_o}{U_{o2}} = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) \times \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right)$$

2. 多级运算电路的求解——分解技术

多级运算电路要分解成单级运算电路来求解,而任何复杂电路又可分解为典型的反相比例运算电路和同相比例运算电路。可将比例放大器的 R_1 、 R_2 扩展为 Z_1 、 Z_2 ,若 Z_1 、 Z_2 中含有电容或电感,则用容抗 $\left(\frac{1}{j\omega C}\right)$ 或感抗 $(j\omega L)$ 来参与运算。

【例 2-2】 电路如图 2-2 所示,求传输函数 $A_{uf}(j\omega) = \frac{U_o(j\omega)}{U_i(j\omega)} = ?$

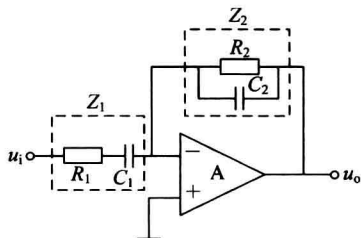


图 2-2 例 2-2 电路图

解

$$\begin{aligned} A_{uf}(j\omega) &= \frac{U_o(j\omega)}{U_i(j\omega)} = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_2 \parallel \frac{1}{j\omega C_2}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} \\ &= \frac{-R_2}{\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right)(1 + j\omega R_2 C_2)} \\ &= \frac{-j\omega R_2 C_1}{(1 + j\omega R_1 C_1)(1 + j\omega R_2 C_2)} \end{aligned}$$

3. 叠加原理的应用

当电路中存在多个输入信号时,可应用叠加原理来处理,即分别计算单个信号独立作用电路所获得的输出结果,然后将所有信号的作用结果相加即可。假如电路是多级级联的,则仍然将其分解为单级电路来计算。

【例 2-3】 电路如图 2-3 所示,试分析计算输入输出关系。

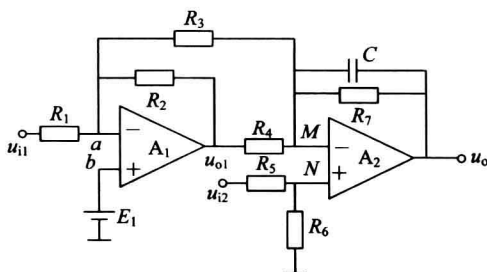


图 2-3 例 2-3 电路图

解 该电路由两级组成, 且有三个输入信号(u_{i1} , E_1 , u_{i2}), 将电路分解成两级, 然后用叠加原理计算, 如图 2-4(a)、(b) 所示。

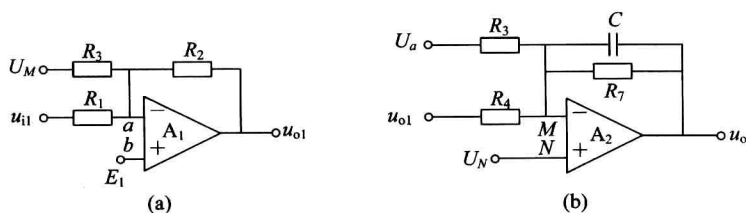


图 2-4 例 2-3 的分解电路

由“虚短”概念, 得

$$U_M = U_N = \frac{R_6}{R_5 + R_6} u_{i2}$$

$$U_a = U_b = E_1$$

由图 2-4(a), 根据叠加原理, 得

$$u_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} u_{i1} - \frac{R_2}{R_3} U_M + \left(1 + \frac{R_2}{R_1 \parallel R_3}\right) E_1$$

由图 2-4(b), 根据叠加原理, 得

$$u_o = -\frac{(R_7 \parallel \frac{1}{j\omega C})}{R_3} U_a - \frac{(R_7 \parallel \frac{1}{j\omega C})}{R_4} u_{o1} + \left[1 + \frac{(R_7 \parallel \frac{1}{j\omega C})}{R_3 \parallel R_4}\right] U_N$$

4. 绘制波形类题目

此类题目一般已知电路及输入信号波形, 要求绘出输出波形图。解此类题目时要注意:

- (1) 时间轴一定要对齐, 对准。
- (2) 注意输出波形是否因超出输出动态范围而出现“限幅”现象。
- (3) 如果电路中有电容存在(如积分器), 则要注意电容的起始电压值, 积分时间的上、下限等, 并注意一周内电容充放电的平衡, 以使波形达到稳定状态。

【例 2-4】 电路如图 2-5(a) 所示, 已知电源电压为 $\pm 12\text{ V}$, 输入信号 $u_i = 4 \sin \omega t (\text{V})$, 试绘出该电路的输出波形图。

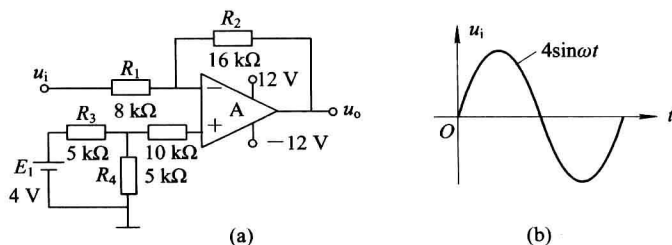


图 2-5 例 2-4 的电路图及输入波形