

模拟集成电子电路

下 册

王汝君 钱秀珍 编

东南大学出版社

模拟集成电路

(下 册)

王汝君 钱秀珍 编

东南大学出版社

(苏)新登字第 012 号

内 容 提 要

本书系根据国家教委批准颁布的《电子线路(I)、(II)课程教学基本要求》，结合电信工程等通信类专业特点编写的，经多年使用修改后，由邮电部高等院校专业基础课教学指导委员会评审通过推荐出版的八五规划教材。

本书分上、下册共 12 章。第 1 章，介绍器件与模型；第 2~5 章，介绍模拟集成电路的各种基本放大单元电路、集成运算放大器、反馈放大电路、放大电路的频率响应和相位补偿；第 6~12 章，介绍集成运算放大器的应用、集成功率放大器、正弦波振荡器、集成模拟乘法器及其基本运算电路、调制与解调电路、集成锁相环以及集成稳压器。各章后面附有习题。

本书可作为通信、电子、计算机和自动控制类专业的“线性电子电路”和“非线性电子电路”课程的本科教材，亦可供电子技术工程人员参考。

责任编辑：张 克

模 拟 集 成 电 子 电 路

(下 册)

王汝君 钱秀珍 编

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210018)

江苏省新华书店经销

南京邮电学院印刷厂印刷

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 13 字数 318 千

1993 年 12 月第 1 版 1994 年 5 月第 2 次印刷

印数：3001—6000 册

ISBN 7-81023-803-5/TN·63

定价：10.40 元

(上下册总价：24.00 元)

(凡因印装质量问题，可直接向承印厂调换)

前 言

根据国家教委批准颁布的《电子线路(I)、(II)课程教学基本要求》，结合电信工程等通信类专业特点编写的这本教材，经我院使用多年并作了三次修改后，于1991年由邮电部高等院校专业基础课教学指导委员会评审通过推荐出版。

本书包括三个部分共12章，上册第一部分《器件与模型》，即第1章器件与模型。第二部分《模拟集成电子电路基础》，即第2~5章，介绍模拟集成电路的各种基本放大单元电路、集成运算放大器、反馈放大器、放大电路的频率响应和相位补偿。下册第三部分《模拟集成电路与系统》，即第6~12章，介绍集成运算放大器的应用、集成功率放大器、正弦波振荡器、集成模拟乘法器及其基本运算电路、调制与解调电路、集成锁相环以及集成稳压器。

本书在编写时注意了这样几点：

1. 是以模拟集成电路为主的电子线路教材，也兼顾了分立元件电路。这是因为在一段时期内还将有相当数量的分立元件电路；同时，模拟集成电路和与之相应的分立元件电路，在电路原理、分析方法以及它们的功能方面也是基本一致的。本教材把集成运放作第三章，居负反馈放大电路和频响之前；把集成乘法器和锁相环都单独设章，更加突出集成电路为主的体系。

2. 加强了FET特别是MOSFET电路内容，并适当介绍了开关电容电路的内容，以适应电子技术越来越广泛的应用要求。

3. 注意到本课程的工程特点。在等效电路分析法中，BJT的模型主要使用简化的混合 π 模型，以简化电路的分析计算，同时更加突出了工作原理，便于理解基本概念。负反馈放大电路侧重于深负反馈条件下的分析计算等。

4. 注意结合电信工程等通信专业的特点。同时，把高频功率放大器等与之关系并不太大的内容略去，更有利于电子、计算机以及自动控制等类专业使用。

为提高本书的质量，特请国家教委电子线路教学指导小组组长、东南大学谢嘉奎教授作了仔细的审校，使本书在基本概念讲深、讲透，分析计算上注重工程估算，内容上注意引入新技术的几个特点上得到了进一步加强，在此表示衷心的感谢。

文中谬误、不妥之处，恳请读者批评、指正。

编者

1993年5月

常用文字符号表

1. 基本符号

U, u	电压
I, i	电流
P, p	功率
R, r	电阻
G, g	电导
X, x	电抗
B, b	电纳
$Z(j\omega) = R + jX$	阻抗
$Y(j\omega) = G + jB$	导纳
L	电感
C	电容
M	互感
T	热力学温度, 脉冲重复周期
t	时间, 摄氏温度
F, f	频率
ω, Ω	角频率
$S = \sigma + j\omega$	复频率
BW	带宽
NF	噪声系数

2. 电压、电流

大写 $U(I)$ 电压(电流)

下标大写表示直流电压(电流), 如 U_c, I_D

下标小写表示正弦电压(电流)有效值, 如 U_c, I_d

小写 $u(i)$ 电压(电流)

下标大写表示直流和交流电压(电流)总的瞬时值如 u_D, i_D

下标小写表示交流电压(电流)的瞬时值, 如 u_c, i_d

$U = U(j\omega)$	正弦电压的复数值
$U(s)$	电压的拉氏变换
$U_m(I_m)$	正弦电压(电流)振幅值
$U_Q(I_Q)$	工作点直流电压(电流)
$u_i(i_i)$	输入交流电压(电流)瞬时值
$u_o(i_o)$	输出交流电压(电流)瞬时值
$u_s(i_s)$	交流信号源电压(电流)瞬时值
$A_u(A_i)$	电压(电流)增益
A	增益的复数值

U_R	参考电压
$U_{IO}(I_{IO})$	输入失调电压(电流)
$U_{id}(U_{ic})$	差模输入电压(电流)
U_i	反馈电压有效值
$E_C(E_D), (E_+)$	正电源电压
$E_E(E_S), (E_-)$	负电源电压

3. 功率

P_i	输入信号功率
P_o	输出信号功率
P_C	集电极耗散功率
P_E	直流电源供给功率

4. 阻抗

R_i	输入电阻
R_o	输出电阻
R_S	信号源内阻
R_L	负载电阻
R_t	回路固有谐振电阻
R_T	电路有载谐振电阻
RP	电位计

5. 频率

f_o	回路固有谐振频率, 晶体串联谐振频率
ω_o	回路固有谐振角频率, 晶体串联谐振角频率
$f_o(f_{osc})$	振荡频率
ω_o	振荡角频率
f_L	3dB 下限频率(下截止频率)
f_H	3dB 上限频率(上截止频率)
f_n	调制信号频率
f_c	载波频率(载频)

6. 器件参数

D	二极管
T	晶体管(三极管), 场效应管
U_o	内建电位差, 势垒电压
U_{th}	导通电压、门限电压
I_S	PN 结反向饱和电流
U_{BR}	PN 结击穿电压
U_T	热电压
U_Z	稳压管的稳定电压
C_j	结电容

C_T	势垒电容
C_D	扩散电容
α	共基极短路电流传输系数
β	共发射极短路电流传输系数
f_α	共基极交流电流传输系数的截止频率
f_β	共发射极交流电流传输系数的截止频率
f_T	特征频率
r_e	发射结电阻
$r_{bb'}$	基区体电阻
I_{CBO}	发射结开路时集电结反向饱和电流
I_{CEO}	基极开路时的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流
U_{CS}	集电极饱和压降
$U_{(BR)CBO}$	发射极开路时 C、B 结反向击穿电压
$U_{(BR)CEO}$	基极开路时 C、E 结反向击穿电压
U_A	厄尔利电压
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
g_m	跨导
I_{DSS}	$U_{GS} = 0$ 时的饱和漏极电流
U_P	场效应管夹断电压
U_T	场效应管的开启电压
$U_{(BR)DS}$	漏、源极间击穿电压

7. 其他符号

Q_0	回路空载品质因数或回路固有品质因数
Q_T	回路有载品质因数
η	效率
n	接入系数, 匝数比, 变容管的变容指数
N	匝数
Q	静态工作点
τ	时间常数
E	电场强度, 电子能量
F	反馈放大器的反馈深度
B	反馈系数
T	反馈放大器的环路增益
$G \cdot BW$	增益带宽积
K_{CMR}	共模抑制比
S	选择性
φ	角度

下 册 目 录

6 集成运放的应用

6.1 集成运放的模拟运算电路	1
6.1.1 加、减运算电路	1
6.1.2 积分和微分运算电路	3
6.1.3 对数和反对数运算电路	6
6.1.4 乘法运算电路	9
6.2 运放在信号处理方面的应用	9
6.2.1 RC 有源滤波器	10
6.2.2 开关电容滤波器	12
6.2.3 电压比较器	19
6.2.4 采样—保持电路	24
6.2.5 整流和限幅电路	26
6.3 非正弦信号发生电路	29
6.4 信号测量电路	34
习题	35

7 集成功率放大电路

7.1 概述	44
7.2 甲类功率放大器	45
7.3 乙类推挽功率放大器	48
7.3.1 乙类推挽功率放大器的工作原理	48
7.3.2 互补推挽乙类功放的基本关系式	49
7.3.3 乙类推挽功放的非线性失真	51
7.3.4 复合互补乙类推挽功率放大器	52
7.3.5 BTL 电路	54
7.3.6 集成功率放大器举例	54
7.4 场效应管功放电路	57
7.5 功率管的散热与安全运用	60
7.5.1 功率管的散热问题	60
7.5.2 功率管的二次击穿	62
习题	62

8 正弦波振荡器

8.1 正弦波振荡器的基本原理	67
8.1.1 反馈振荡器的组成	67
8.1.2 振荡器的起振条件和平衡条件	68

8.1.3	振荡器的稳定条件	69
8.1.4	分析方法	70
8.2	LC 振荡器	71
8.2.1	变量器反馈振荡器	71
8.2.2	三点式 LC 振荡器	73
8.2.3	改进型电容反馈振荡器	77
8.2.4	差分对管振荡器	78
8.2.5	场效应管振荡器	80
8.3	RC 振荡器	81
8.4	开关电容振荡器	84
8.5	石英晶体振荡器	84
8.5.1	石英晶体谐振器的特性	84
8.5.2	石英晶体振荡电路	86
8.6	振荡器频率的稳定	89
8.6.1	频率稳定度	90
8.6.2	LC 振荡器频率稳定度的分析	90
8.6.3	石英晶体振荡器频率稳定度的分析	91
	习题	92
9	集成模拟乘法器	
9.1	模拟乘法器的基本概念	99
9.2	乘法器的主要技术参数	100
9.3	可变跨导模拟乘法器	100
9.3.1	差分对模拟乘法器	100
9.3.2	双平衡模拟乘法器	102
9.3.3	线性化可变跨导型模拟乘法器	103
9.4	集成模拟四象限乘法器举例	106
9.4.1	BG314 单片集成模拟乘法器	106
9.4.2	MOS 模拟乘法器	108
9.5	模拟乘法器应用举例	110
	习题	113
10	调制和解调电路	
10.1	概述	116
10.2	幅度调制波的基本特性	117
10.2.1	普通调幅信号	117
10.2.2	载波抑制的双边带和单边带调制信号	119
10.3	双边带调制电路	121
10.3.1	模拟乘法器调制器	121
10.3.2	二极管调制电路	122
10.4	普通调幅电路	126

10.5	调幅波的解调	127
10.5.1	同步检波	128
10.5.2	包络检波	131
10.6	混频电路	133
10.7	角度调制与解调	135
10.7.1	调频和调相的基本特性	135
10.7.2	调频电路	138
10.7.3	鉴频电路	141
	习题	147
11	集成锁相环路	
11.1	概述	153
11.2	锁相环路的相位模型和性能分析	155
11.2.1	锁相环路的相位模型和基本方程	155
11.2.2	锁相环路的几种状态、同步带和牵引捕捉过程	159
11.3	锁相环的主要部件和单片集成锁相环	161
11.3.1	鉴相器	161
11.3.2	压控振荡器	164
11.3.3	单片集成锁相环路	165
11.4	锁相环路的应用举例	168
	习题	173
12	集成稳压器	
12.1	概述	175
12.2	串联型集成稳压器的基本原理和组成	176
12.2.1	串联型集成稳压器的工作原理及参数	176
12.2.2	串联型集成稳压器的部分单元电路	179
12.3	串联型集成稳压器电路和应用	185
12.3.1	三端固定输出集成稳压器	185
12.3.2	三端可调输出集成稳压器	188
12.4	开关型集成稳压器	189
	习题	192
	参考书目	194

集成运放的应用

随着微电子技术的迅速发展,模拟集成电路的品种与数量也日益增多,它所能完成的功能越来越广泛,精度也越来越高。模拟集成电路除已介绍过的集成运放以外,模拟乘法器、集成功放、集成锁相环、集成时基电路、A/D 和 D/A 变换器、开关电容电路和集成稳压电源等,不仅有功能化的集成单片应市,而且也是大规模集成电路中重要的基本单元。本章仅介绍集成运放的应用。集成功放、模拟乘法器、集成锁相环和集成稳压器将在以后的相应章节逐一介绍。

集成运放已广泛地应用到电子技术的各个领域(线性的或非线性的,模拟的或数字的)。本章将在第 3 章集成运放基础电路的基础上介绍集成运放在信号运算、信号处理、非正弦信号发生和波形变换等方面的应用。

6.1 集成运放的模拟运算电路

6.1.1 加减运算电路

1. 反相加法器

反相加法器电路如图 6-1-1 所示,若干信号从运放的反相端输入(图中加了三个信号)。假定运放是理想的,则可认为 A 点为虚地和 $I=0$,那么可得

$$\frac{U_{i1}}{R_1} + \frac{U_{i2}}{R_2} + \frac{U_{i3}}{R_3} = -\frac{U_o}{R_F}$$

所以

$$U_o = -\left(\frac{R_F}{R_1}U_{i1} + \frac{R_F}{R_2}U_{i2} + \frac{R_F}{R_3}U_{i3}\right) \quad (6-1-1)$$

当 $R_1=R_2=R_3=R$ 时,式(6-1-1)可简化为

$$U_o = -\frac{R_F}{R}(U_{i1} + U_{i2} + U_{i3}) \quad (6-1-2)$$

由上式可见:在运放为理想的条件下,输出电压与运放的基本参数无关,仅与输入电压之和成比例,式中负号表示输出电压与输入电压反相,故称反相加法器。等式中的比例因子由外加电阻决定,补偿电阻 R_F 的选取应保证从运放的两个端子看出去的直流电阻相等,即 $R_F=R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_F$ 。

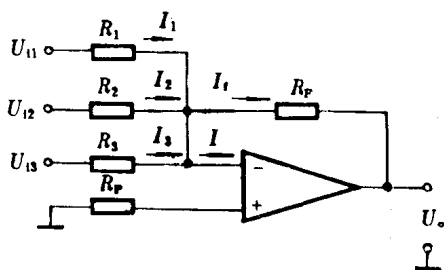


图 6-1-1 反相加法器

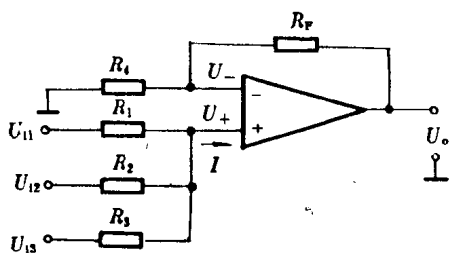


图 6-1-2 同相加法器

2. 同相加法器

同相加法器电路如图 6-1-2 所示,三个信号加到运放的同相端。如果运放是理想的,则可以写出

$$U_- = U_+ = \frac{R_4}{R_4 + R_F} U_o \quad (6-1-3)$$

而

$$\frac{U_{11} - U_+}{R_1} + \frac{U_{12} - U_+}{R_2} + \frac{U_{13} - U_+}{R_3} = I = 0$$

则

$$U_+ = \left(\frac{U_{11}}{R_1} + \frac{U_{12}}{R_2} + \frac{U_{13}}{R_3} \right) R_\Sigma \quad (6-1-4)$$

式中 $R_\Sigma = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3$ 。根据式(6-1-3)、(6-1-4)可得

$$U_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_4} \right) R_\Sigma \left(\frac{U_{11}}{R_1} + \frac{U_{12}}{R_2} + \frac{U_{13}}{R_3} \right) \quad (6-1-5)$$

为减小失调,应使同相输入端和反相输入端对地电路对称,即 $R_\Sigma = R_4 \parallel R_F$,则式(6-1-5)可以简化成

$$U_o = R_F \left(\frac{U_{11}}{R_1} + \frac{U_{12}}{R_2} + \frac{U_{13}}{R_3} \right) \quad (6-1-6)$$

式(6-1-5)和式(6-1-6)表明了输出电压与输入电压之和成正比,输出电压同输入电压同相,故称同相加法器。由于 R_Σ 与每个回路的电阻都有关系,所以,设计和调节都较麻烦。

[例 6-1] 试设计满足 $U_o = 2U_{11} + 5U_{12}$ 的电路。

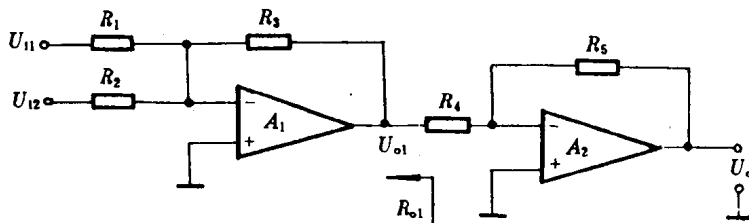


图 6-1-3 [例 6-1] 的电路

解 要满足所给关系式,可用同相加法器或用反相加法器和反相器。现采用图 6-1-3 电路,运放 A_1 作为 U_{11} 和 U_{12} 的反相加法器,运放 A_2 作为反相器。因为 $R_4 \gg R_{o1}$,所以可以忽略 A_2 对 A_1 的负载作用,选择 $R_3 = R_4 = R_5 = 10\text{k}\Omega$,则

$$U_o = -U_{o1} = \frac{R_3}{R_1}U_{i1} + \frac{R_3}{R_2}U_{i2} = \frac{10}{R_1}U_{i1} + \frac{10}{R_2}U_{i2}$$

根据要求可以选用 $R_1=5k\Omega$, $R_2=2k\Omega$ 。

3. 减法器

利用 3.4 节的差动运算放大器可以进行减法运算,将图重画于图 6-1-4。根据 3.4 节的分析,如果 $R_1=R_2$, $R_3=R_F$, 则

$$U_o = -\frac{R_F}{R_1}(U_{i1} - U_{i2}) \quad (6-1-7)$$

从上式可以看出,输出电压是与输入信号电压之差成比例的。

图 6-1-4 是用一个运算放大器构成的减法电路,也可以用加法放大器构成减法电路,如图 6-1-5 所示。图中,先把减数的符号倒相,即运放 A_1 把 U_{i2} 倒相成 $-U_{i2}$, 于是输出电压为

$$U_o = -(U_{i1} - U_{i2}) \frac{R_3}{R_2} \quad (6-1-8)$$

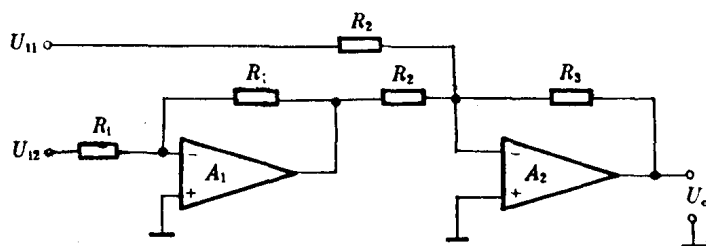


图 6-1-5 用加法放大器构成的减法电路

6.1.2 积分和微分运算电路

1. 基本积分电路

基本积分电路如图 6-1-6 所示,属于反相运放结构,它的输入元件为电阻 R ,反馈元件为 C 。利用虚地的概念可得

$$i_1 = \frac{u_i}{R} = i_c \quad (6-1-9)$$

对于电容 C 来说,还可以写出

$$u_o = -u_c = -\frac{1}{C} \int i_c dt \quad (6-1-10)$$

将式(6-1-9)代入式(6-1-10)可得

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int u_i dt \quad (6-1-11)$$

从上式看出,输出电压与输入电压的积分成比例。如果输入电压是一个固定的直流电压 U_i ,则由式(6-1-11)可得输出电压是一个随时间线性上升的电压,即

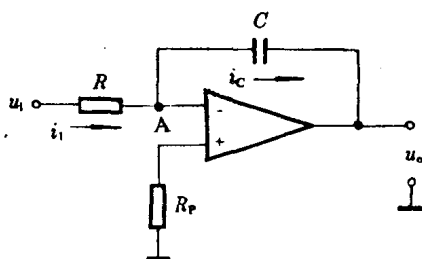


图 6-1-6 基本积分电路

$$U_o = -\frac{1}{RC}U_i t \quad (6-1-12)$$

积分电路的主要用途是:将方波转换为三角波、信号延迟、移相 90° 以及将电压量转换为时间量等。

[例 6-2] 电路如图 6-1-6 所示。其中 $C=0.1\mu\text{F}$, $R=10\text{k}\Omega$, 输入信号波形如图 6-1-7(a) 所示, 试画出输出波形。设电容的初始条件为零。

解 在 $t=0\sim 1\text{ms}$ 时间内, 输入电压保持 $+6\text{V}$ 不变, 输出电压将作线性变化, 由零变到 -6V , 即

$$\begin{aligned} U_{o(t=1\text{ms})} &= -\frac{1}{RC}U_i t \\ &= -\frac{1}{10 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6}} \times 6 \times 10^{-3} \\ &= -6\text{V} \end{aligned}$$

同理可求得在 $t=1\sim 3\text{ms}$ 时间内, 输出电压将由 -6V 线性变到 $+6\text{V}$ 。由此可得输出电压波形如图 6-1-7(b) 所示, 已将方波转换成三角波。

如果输入电压是一正弦波 $u_i = U_m \sin \omega t$, 则输出电压为

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int U_m \sin \omega t dt = -\frac{1}{\omega RC} U_m \cos \omega t$$

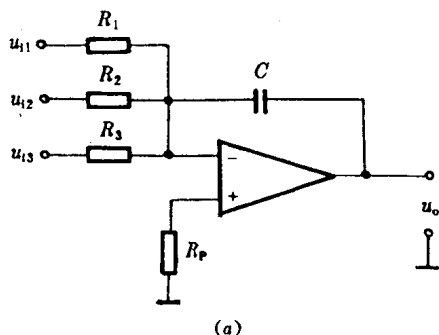
可见, 输出电压对输入电压移相 90° , 幅度与频率成反比。

2. 其他形式的积分电路

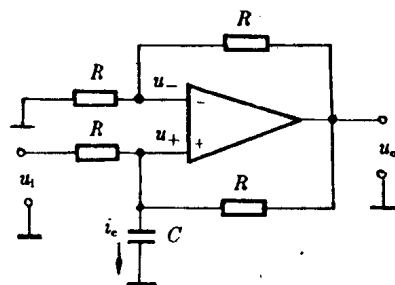
1) 加法积分电路

加法积分电路如图 6-1-8(a) 所示, 输入信号有三个, 反馈元件仍为电容。其输出电压与输入电压之间的关系式为

$$u_o = -\frac{1}{C} \int \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3} \right) dt \quad (6-1-13)$$



(a)



(b)

图 6-1-8 其他形式的积分电路

(a) 加法积分电路 (b) 同相积分电路

若 $R_1=R_2=R_3=R$ 时,则上式可写成

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int (u_{i1} + u_{i2} + u_{i3}) dt \quad (6-1-14)$$

2) 同相积分电路

同相积分电路如图 6-1-8(b)所示,积分电容接在同相端。利用图(b)中的关系: $u_+ = u_- = \frac{1}{2}u_o$, $u_+ = \frac{1}{C} \int i_c dt$, $i_c = \frac{u_i - u_+}{R} = \frac{u_+ - u_o}{R} = \frac{u_i}{R}$ 可以得出输出电压与输入电压的关系式为

$$u_o = \frac{2}{RC} \int u_i dt \quad (6-1-15)$$

3) 差动积分电路

差动积分电路如图 6-1-9 所示,是平衡结构。利用图中的关系: $u_+ = u_-$, $u_+ = \frac{1}{RC} \int (u_{i2} - u_+) dt$, $u_- - u_o = \frac{1}{RC} \int (u_{i1} - u_-) dt$ 可以得出输出电压与输入电压的关系式为

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int (u_{i1} - u_{i2}) dt \quad (6-1-16)$$

对于实际的积分器,由于运放的失调与漂移,以及有限的带宽、放大倍数和输入电阻都会给运算带来误差。电容器的漏电阻和吸附现象也会引入误差。^①

【例 6-3】 利用加法器和积分器解微分方程:

$$\frac{d^2 u_o}{dt^2} = U_{im} \cos \omega t - 3 \frac{du_o}{dt} - \frac{u_o}{4}$$

式中 u_o 是由输入信号电压 $U_{im} \cos \omega t$ 产生的输出电压,设所有电容器的初始条件为零。

解 对题中所给微分方程积分可解得一阶导数,为与式(6-1-10)对应,写成

$$\frac{du_o}{dt} = - \int \left(- \frac{d^2 u_o}{dt^2} \right) dt = - \int \left(- U_{im} \cos \omega t + 3 \frac{du_o}{dt} + \frac{u_o}{4} \right) dt$$

上式可以用加法积分器来实现,如图 6-1-10(a)所示。图中有三个输入信号,分别为 $-U_{im} \cos \omega t$, $\frac{du_o}{dt}$ 和 u_o ,比例常数分别为 1, 3, $\frac{1}{4}$ 。对 $\frac{du_o}{dt}$ 再积分就得到 u_o ,即 $u_o = \int \frac{du_o}{dt} dt$, 此式可用图 6-1-10(b)实现,先积分,再反相。图(a)和图(b)相连,则可得图(c),这就是解方程的完整模拟电路。

3. 基本微分电路

微分运算是积分的逆运算。将基本积分电路图 6-1-6 中的输入电阻与反馈元件电容 C 的位置对换,就可组成基本微分电路,如图 6-1-11(a)所示。

基本微分电路也是反相运算结构,根据虚地概念可得

$$u_o = -i_f R = -i_i R = -RC \frac{du_i}{dt} \quad (6-1-17)$$

从上式可见,输出电压与输入电压的微分成比例。

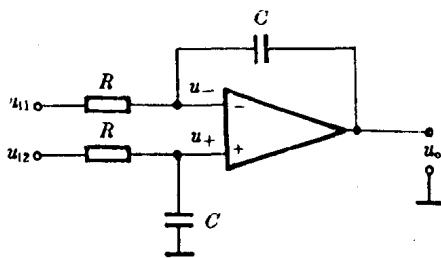


图 6-1-9 差动积分电路

① 详见参考书目[7] P222-229

图 6-1-11(a)所示基本微分电路中的 RC 对反馈信号具有滞后作用,它与集成运放内部电路的滞后作用合在一起,使电路的工作不稳定。为使电路稳定的工作,可采用图 6-1-11(b)电路,其中 R_1 和 C_2 起相位补偿作用①。

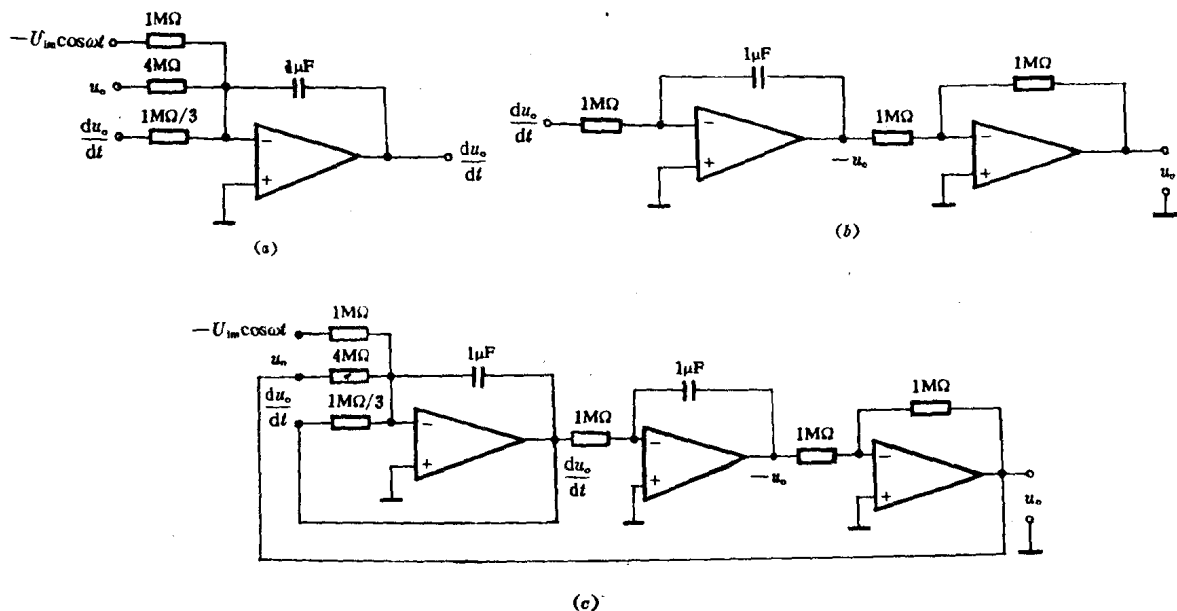


图 6-1-10 模拟计算机解微分电路

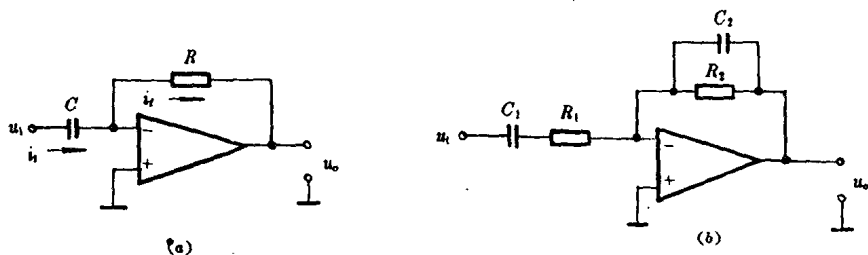


图 6-1-11 基本的和实用的微分电路

微分电路应用广泛,除了可作微分运算外,常用作波形变换,如将矩形波变换为尖顶脉冲波等。

6.1.3 对数和反对数运算电路

1. 对数运算电路

对数运算电路是把一个双极型晶体管 T 作为反馈元件的反相运算电路,如图 6-1-12 所示。根据埃伯尔斯—莫尔方程(略去厄尔利效应)、并利用虚地概念可以得出

① 详见参考书目[7] P231—237

$$i_e \approx I_{ES} \cdot e^{\frac{u_{BE}}{U_T}} = I_{ES} \cdot e^{-\frac{u_o}{U_T}} = \frac{u_i}{R} \quad (6-1-18)$$

对上式取对数可得

$$u_o = -U_T \ln \frac{u_i}{RI_{ES}} \quad (6-1-19)$$

上式表明:输出电压同输入电压的对数成比例,或者说,对数运算电路能对输入信号进行对数运算。这是一种得到广泛应用的非线性函数运算放大器,特别是和反对数运算电路适当组合,可组成具有各种功能的非线性运算放大器,如乘法、除法电路等。

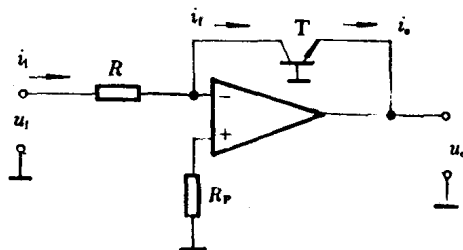


图 6-1-12 对数运算电路

需明确指出:由于 U_T 和 I_{ES} 都是温度的函数,因此,这种电路的运算精度受温度的影响很大。

为提高运算精度,通常加温度补偿,图 6-1-13 就是一个具有温度补偿的对数运算电路。图中有两个输入信号 u_{i1} 和 u_{i2} ,通常 u_{i2} 为固定的参考电压, T_1 、 T_2 为对管,接在两个运放之间提供反馈,由图可以得出

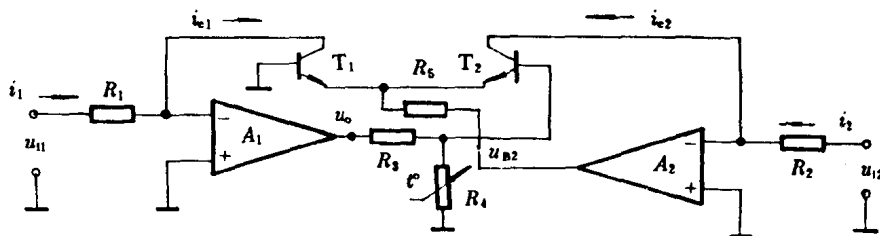


图 6-1-13 具有温度补偿的对数放大器

$$i_1 = i_{C1} = \frac{u_{i1}}{R_1} = I_{ES} \cdot e^{\frac{u_{BE1}}{U_T}}$$

$$i_2 = i_{C2} = \frac{u_{i2}}{R_2} = I_{ES} \cdot e^{\frac{u_{BE2}}{U_T}}$$

将上两式相除,并取对数可得

$$u_{BE1} - u_{BE2} = U_T \ln \frac{u_{i1} R_2}{u_{i2} R_1} \quad (6-1-20)$$

从图上还可以看出

$$u_{BE1} - u_{BE2} = -u_{B2} = -u_o \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (6-1-21)$$

将式(6-1-20)代入式(6-1-21)可以得出

$$u_o = -\frac{R_3 + R_4}{R_4} U_T \ln \frac{u_{i1} R_2}{u_{i2} R_1} \quad (6-1-22)$$

由上式可以看出: u_o 与 I_{ES} 无关,说明采用 T_1 、 T_2 对管接在反馈回路内,可以消除反向饱和电流