

第5章 集成运算放大器

- 5.1 集成运放的基本组成
- 5.2 集成运放的基本特性
- 5.3 放大电路中的负反馈
- 5.4 集成运放在模拟信号运算方面的应用
- 5.5 集成运放在幅值比较方面的应用
- 5.6 应用举例





5.1 集成运放的基本组成

5.1.1 概述

5.1.2 集成运放的输入级电路 ——差分放大电路

5.1.3 集成运放的输出级电路 ——互补对称电路

5.1.4 集成运放的图形符号和信号输入方式

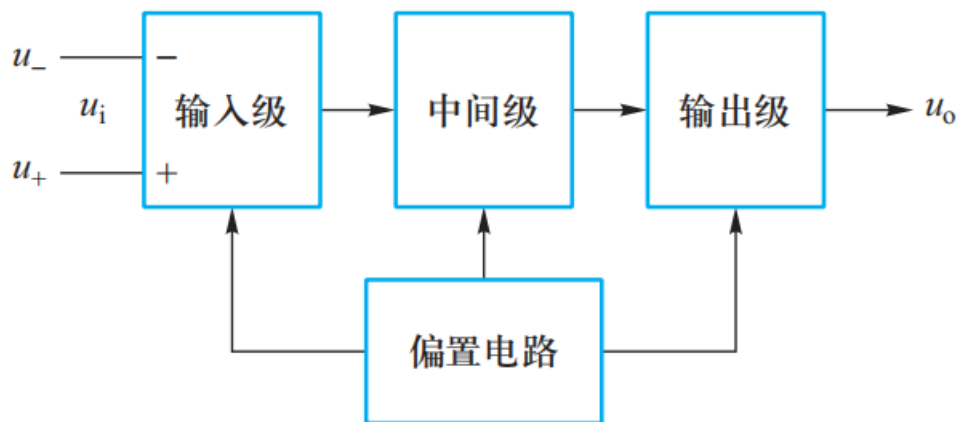


5.1.1 概述

集成运放是一种具有很高的电压放大倍数，性能优越，集成化的多级放大器。

类型：通用型、专用型

集成运放的基本组成框图



5.1.1 概述

各级主要作用和要求：

输入级 输入电阻大、漂移小、抗干扰能力强。

中间级 电压放大倍数高。

输出级 输出电阻小、负载能力强、输出电压稳定。

偏置电路 为各级提供稳定的偏置电流。

多级放大器的级间耦合方式：

阻容耦合 通过电容联接前后级，传递交流信号。

变压器耦合 用变压器联接前后级，传递交流信号。

直接耦合 用导线联接前后级，传递交直流信号。



5.1.2 集成运放的输入级电路—差分放大电路

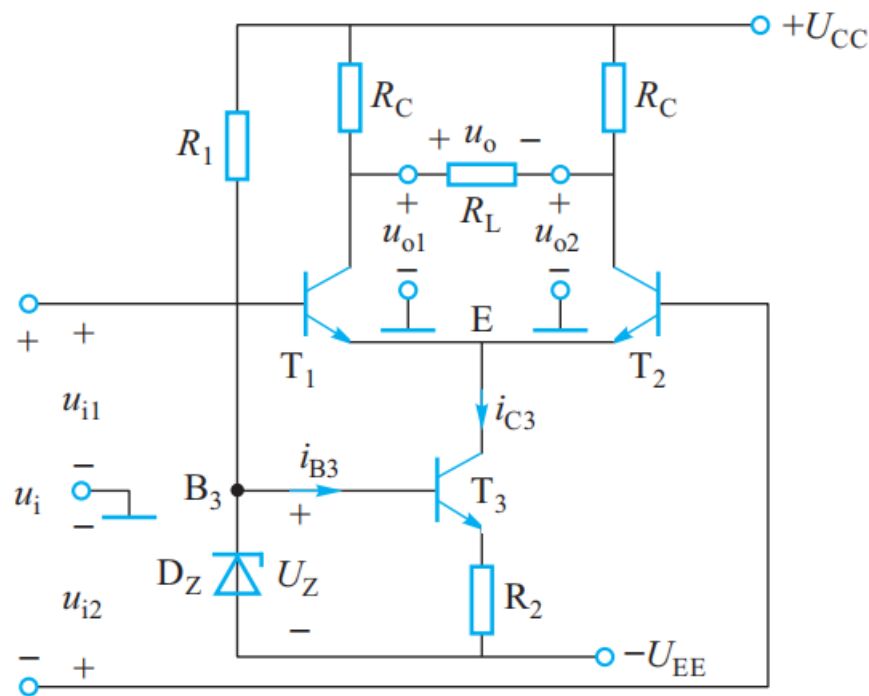
电路特点：对称；双端输入，
双端输出。

1. 静态分析

$$u_{i1} = u_{i2} = 0$$

$$I_{B1} = I_{B2}, I_{C1} = I_{C2}, u_{C1} = u_{C2}$$

$$u_o = u_{C1} - u_{C2} = 0$$



温度变化引起的漂移

$$i'_{B1} = i'_{B2}, i'_{C1} = i'_{C2}, u'_{C1} = u'_{C2}$$

$$u'_o = u'_{C1} - u'_{C2} = 0$$



5.1.2 集成运放的输入级电路—差分放大电路

2. 动态分析

• 差模信号输入

差模信号—— $u_{i1} = -u_{i2}$

u_{i1} 与 u_{i2} 大小相同，极性相反。

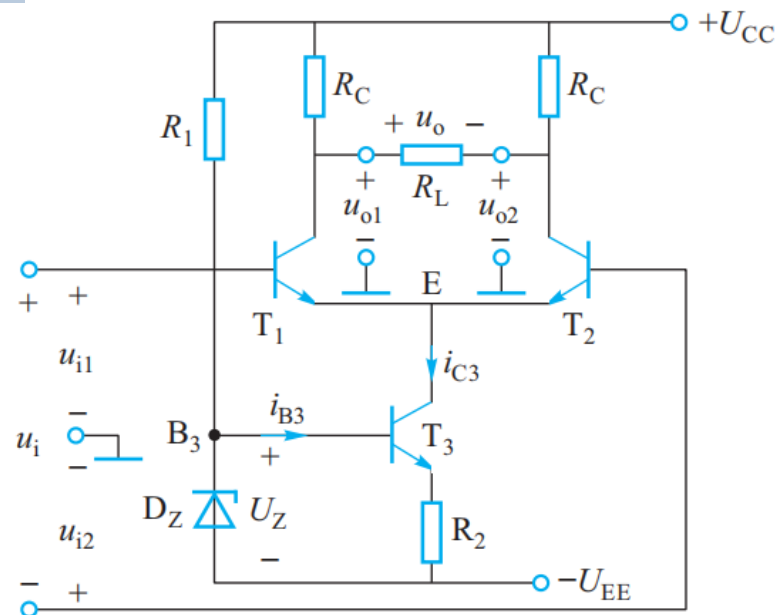
$u_{i1} \rightarrow i_{b1}$ 、 i_{c1} , $u_{i2} \rightarrow i_{b2}$ 、 i_{c2}

i_{b1} 、 i_{c1} 分别与 i_{b2} 、 i_{c2} 大小相同，方向相反；

u_{o1} 与 u_{o2} 大小相同，极性相反。

故 $u_o = u_{o1} - u_{o2}$ ，有输出电压，具有放大作用。

记差模放大倍数为 A_d



5.1.2 集成运放的输入级电路—差分放大电路

• 共模信号输入

共模信号—— $u_{i1} = u_{i2}$

u_{i1} 与 u_{i2} 大小和极性均相同。

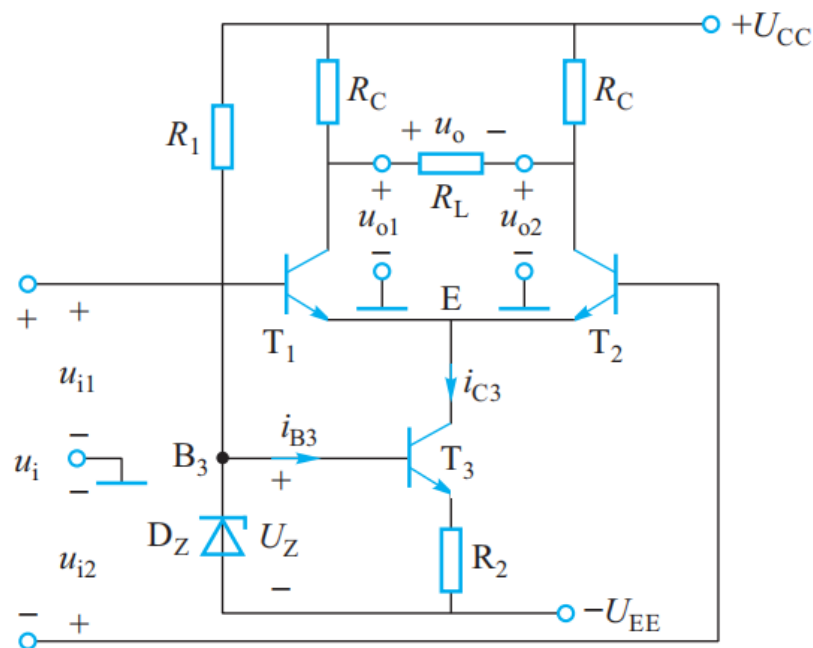
理想情况——电路完全对称

$u_o = 0$ ——无放大作用

实际电路, $u_o \neq 0$, 但很小。

记共模放大倍数为 A_c

共模抑制比 $K_{CMR} = \frac{A_{d1}}{A_c}$





5.1.2 集成运放的输入级电路—差分放大电路

差分放大电路的输入—输出方式：

- 双端输入，双端输出；
- 双端输入，单端输出；
- 单端输入，双端输出；
- 单端输入，单端输出。

为提高集成运放的输入电阻，降低噪声，输入级的静态电流常取得很小，还采用场效晶体管组成差分放大电路。



5.1.3 集成运放的输出级电路—互补对称电路

静态时, $U_E = 0$

动态时, 在 u_i 正半周, T_1 导通,

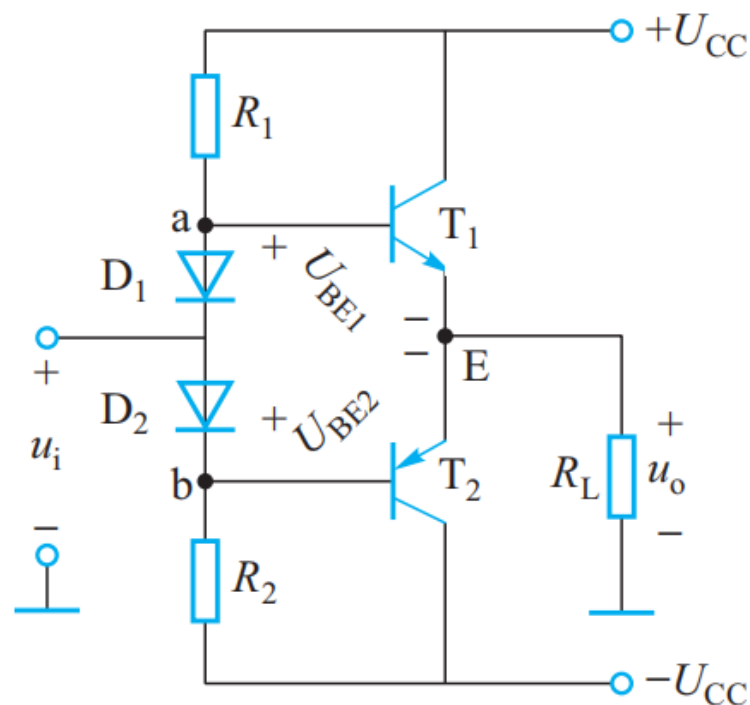
T_2 截止, 电流回路:

$U_{CC} \rightarrow T_1 \rightarrow R_L \Rightarrow u_o$ 正半周

在 u_i 负半周, T_2 导通, T_1 截止

电流回路:

$-U_{CC} \rightarrow R_L \rightarrow T_2 \Rightarrow u_o$ 负半周



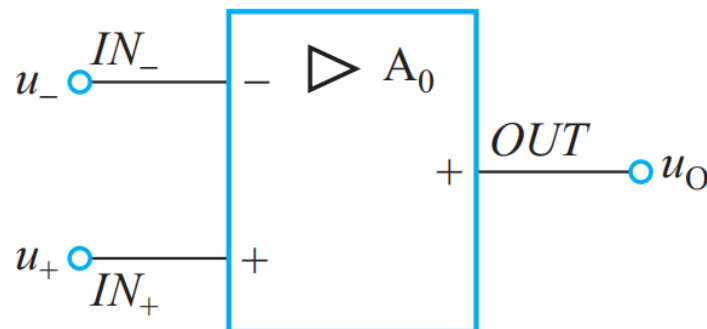
5.1.4 集成运放的图形符号和信号输入方式

- 图形符号

IN_- ——反相输入端

IN_+ ——同相输入端

OUT ——输出端



信号传递方向——输入端→输出端

- 信号输入方式： 反相输入方式；
同相输入方式；
差分输入方式。





5.2 集成运放的基本特性

5.2.1 集成运放的主要参数

5.2.2 集成运放的电压传输特性和电路模型

5.2.3 集成运放的理想特性



5.2.1 集成运放的主要参数

1. 输入失调电压 u_{IO}
2. 输入失调电流 I_{IO}
3. 输入偏置电流 I_{IB}
4. 开环差模电压放大倍数 A_o
5. 最大差模输入电压 $U_{id\max}$
6. 最大共模输入电压 $U_{ic\max}$
7. 最大输出电压 $U_{o\max}$
8. 最大输出电流 $I_{o\max}$
9. 共模抑制比 K_{CMR}
10. 输入电阻 r_i
11. 输出电阻 r_o
12. 电源电压 $\pm U_{CC}$



5.2.2 集成运放的电压传输特性和电路模型

• 电压传输特性

$$u_o = f(u_i) \quad (u_i = u_+ - u_-)$$

线性区：

$$u_o = A_0 u_i = A_0 (u_+ - u_-)$$

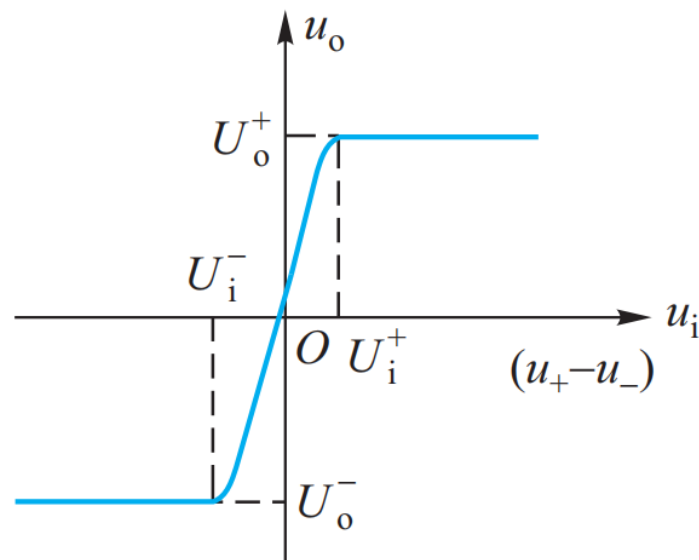
因 A_0 很大，故线性区很窄，

即 $(u_i^+ - u_i^-)$ 极小。

饱和区：

$u_i > U_i^+, u_o = U_o^+$ ——正饱和

$u_i < U_i^-, u_o = U_o^-$ ——负饱和



5.2.2 集成运放的电压传输特性和电路模型

• 电路模型

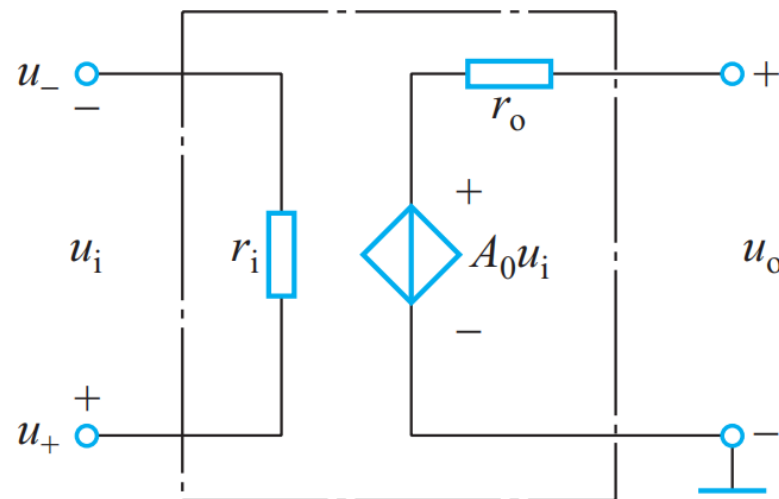
——线性工作区模型

输入电压 u_i 控制输出电压 u_o ,

即为电压控制电压源的模型。

r_i 为输入电阻 r_o 为输出电阻

A_0 为开环差模电压放大倍数



5.2.3 集成运放的理想特性

- 理想化参数:

开环电压增益 $A_0 \rightarrow \infty$

输入电阻 $r_i \rightarrow \infty$

输出电阻 $r_o \rightarrow 0$

共模抑制比 $K_{CMR} \rightarrow \infty$

- 线性区工作的两个重要特性:

$$u_+ \approx u_- \quad i_+ = i_- \approx 0$$



5.2.3 集成运放的理想特性

- 理想的电压传输特性

$u_+ > u_-$ ——正饱和

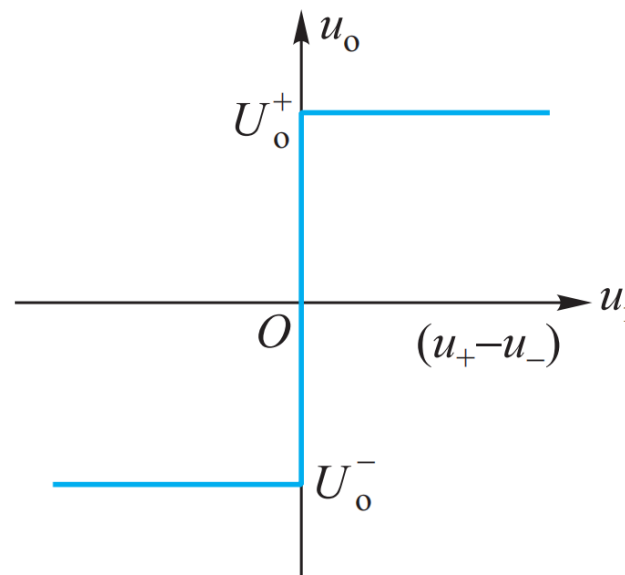
$u_+ < u_-$ ——负饱和

- 集成运放工作状态的判断

开环工作 ——饱和区

闭环正反馈 ——饱和区

闭环负反馈 ——线性区





5.3 放大电路中的负反馈

5.3.1 反馈的基本概念

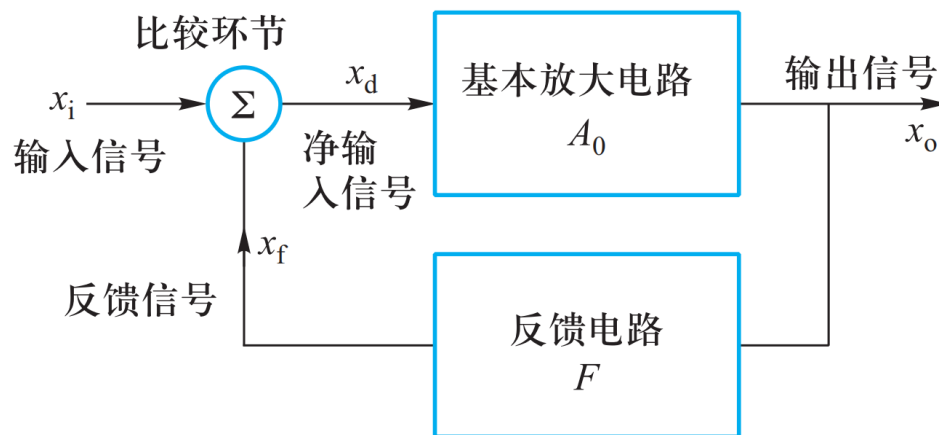
5.3.2 负反馈的四种类型

5.3.3 负反馈对放大电路性能的影响



5.3.1 反馈的基本概念

反馈：将电路的输出信号（电压和电流）的一部分或全部通过一定的电路（反馈电路）送回至电路的输入回路。



负反馈

反馈信号 x_f 与输入信号 x_i 极性相反，用于放大电路；

正反馈

反馈信号 x_f 与输入信号 x_i 极性相同，用于振荡电路。



5.3.1 反馈的基本概念

对于负反馈 $x_d = x_i - x_f$

反馈系数 $F = \frac{x_f}{x_o}$

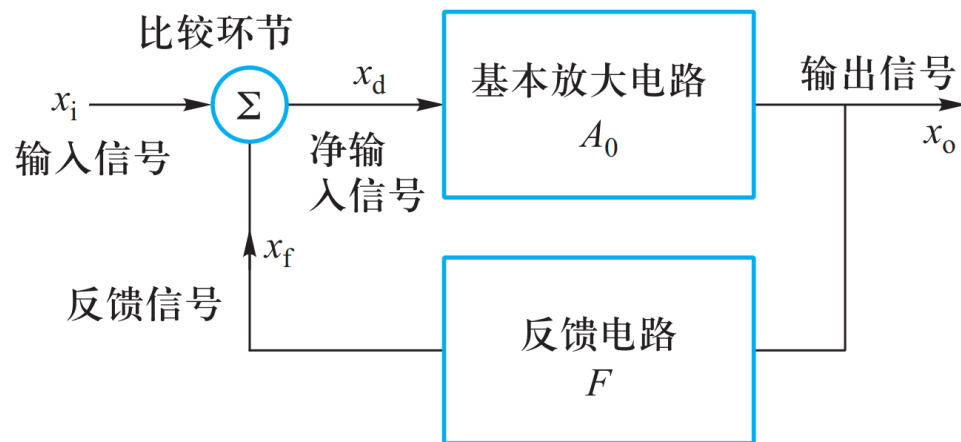
开环放大倍数 $A_0 = \frac{x_o}{x_d}$

$$x_i = x_d + x_f = x_d + Fx_o = x_d + FA_0x_d = x_d(1 + FA_0)$$

闭环放大倍数 $A_f = \frac{x_o}{x_i} = \frac{A_0x_d}{x_d(1 + FA_0)} = \frac{A_0}{1 + FA_0}$

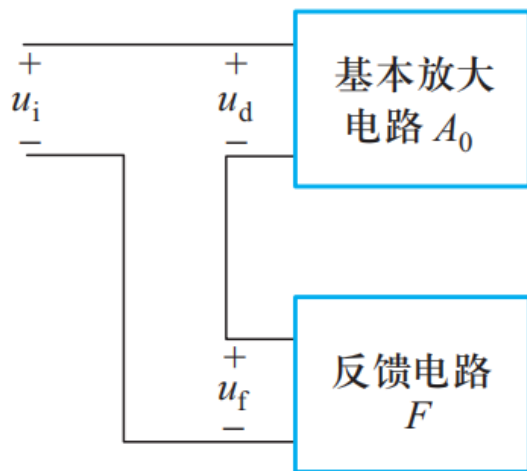
当 $|1 + FA_0| \gg 1$ (深度负反馈)

$$A_f = \frac{A_0}{1 + FA_0} \approx \frac{A_0}{FA_0} = \frac{1}{F}$$



5.3.2 负反馈的四种类型

- 按输入回路连接方式：

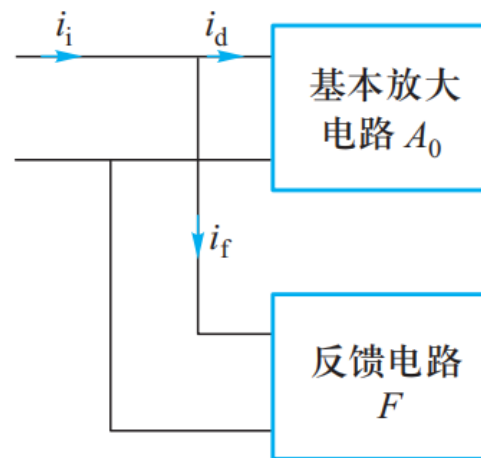


串联反馈

输入量 反馈量 净输入量

以电压形式比较

$$\dot{U}_d = \dot{U}_i - \dot{U}_f$$



并联反馈

输入量 反馈量 净输入量

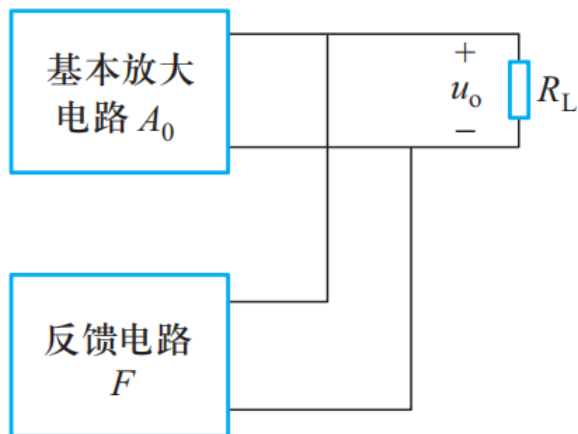
以电流形式比较

$$\dot{I}_d = \dot{I}_i - \dot{I}_f$$



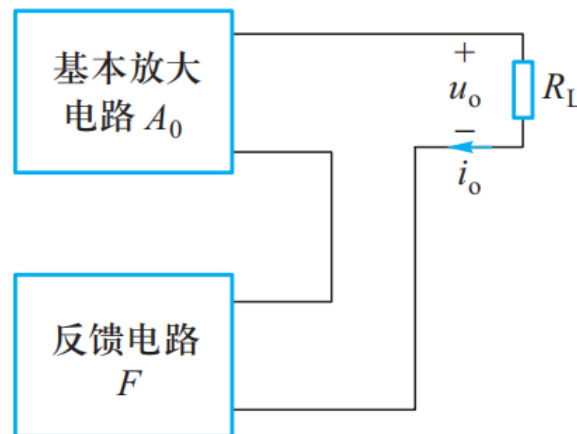
5.3.2 负反馈的四种类型

- 按输出回路连接方式:



电压反馈

反馈量取决于输出电压



电流反馈

反馈量取决于输出电流

四种类型: 电压串联负反馈 电压并联负反馈
 电流串联负反馈 电流并联负反馈



5.3.2 负反馈的四种类型

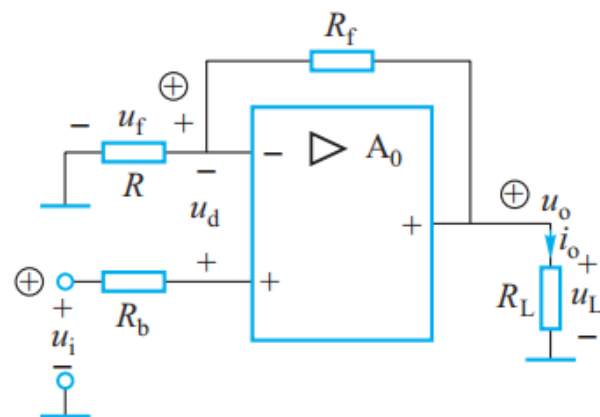
1. 电压串联负反馈

如何判定图中各电压极性？

用瞬时极性法判定！

输入回路 $u_d = u_i - u_f$

反馈电压 $u_f = \frac{R}{R + R_f} u_o = \frac{R}{R + R_f} R_L i_o$

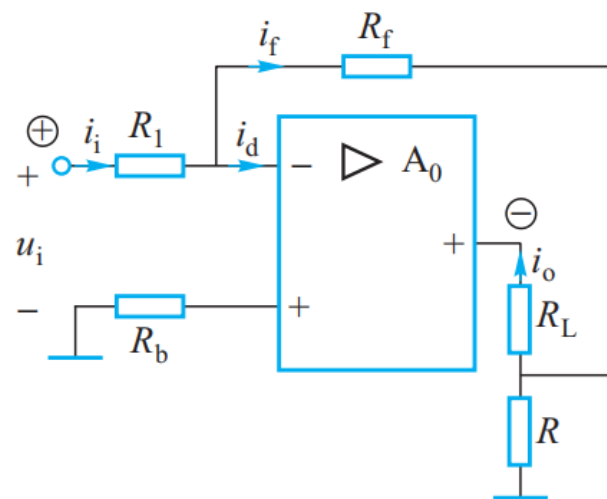


2. 电流并联负反馈

如何判定图中各电流方向？

输入回路 $i_d = i_i - i_f$

反馈电流 $i_f = \frac{R}{R + R_f} i_o$



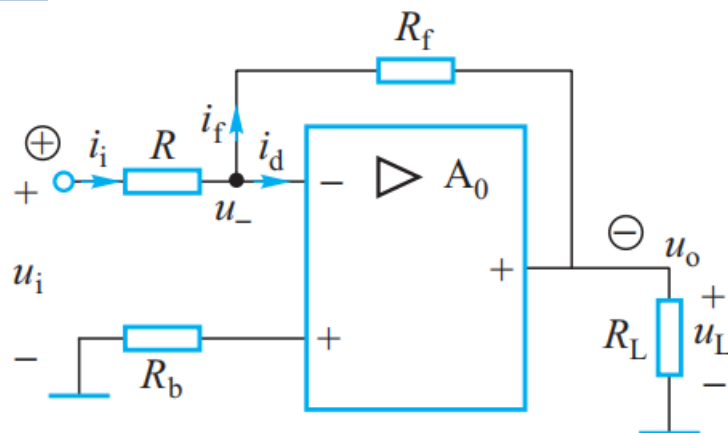
5.3.2 负反馈的四种类型

3. 电压并联负反馈

各电流方向如图

输入回路 $i_d = i_i - i_f$

反馈电流 $i_f = \frac{u_- - u_o}{R_f}$

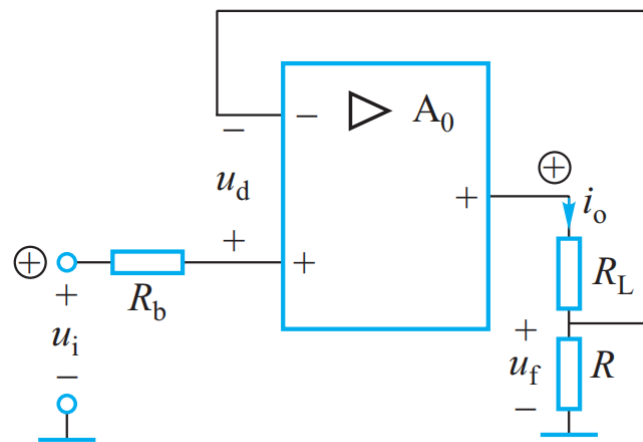


4. 电流串联负反馈

各电压极性如图

输入回路 $u_d = u_i - u_f$

反馈电压 $u_f \approx Ri_o$



5.3.3 负反馈对放大电路性能的影响

1. 提高放大倍数的稳定性

在深度负反馈下 $A_f = \frac{A_0}{1 + FA_0} \approx \frac{1}{F}$

$$\frac{dA_f}{dA_0} = \frac{(1 + FA_0) - FA_0}{(1 + FA_0)^2} = \frac{1}{(1 + FA_0)^2} \quad \frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + FA_0} \cdot \frac{dA_0}{A_0}$$

$\frac{dA_f}{A_f}$ 表示闭环放大倍数相对变化量

$\frac{dA_0}{A_0}$ 表示开环放大倍数相对变化量

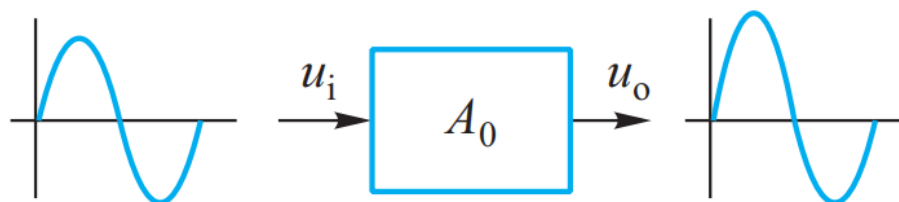
即 $\frac{dA_f}{A_f} < \frac{dA_0}{A_0}$ —— 闭环放大倍数稳定性高



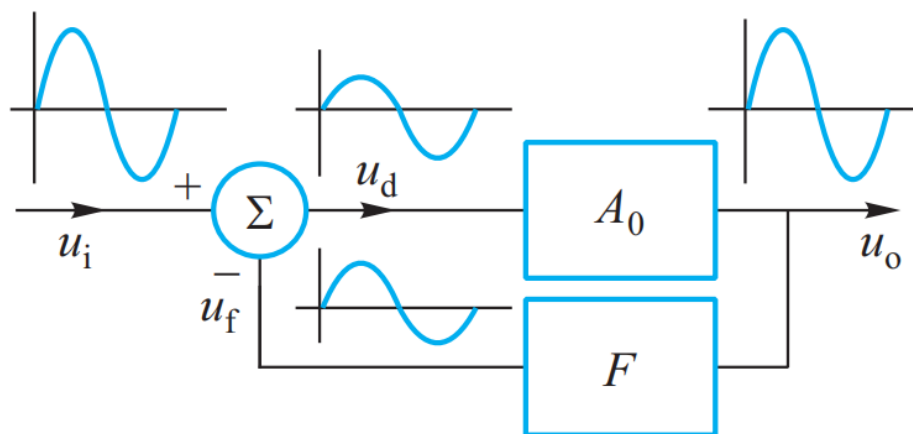
5.3.3 负反馈对放大电路性能的影响

2. 减小非线性失真

无负反馈



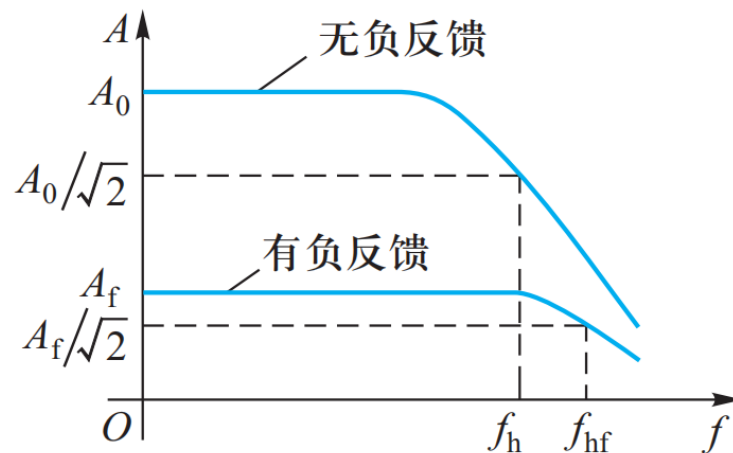
有负反馈



5.3.3 负反馈对放大电路性能的影响

3. 扩展通频带

$$f_{hf} > f_h$$



4. 改变输入电阻和输出电阻

串联反馈 输入电阻增大

并联反馈 输入电阻减小

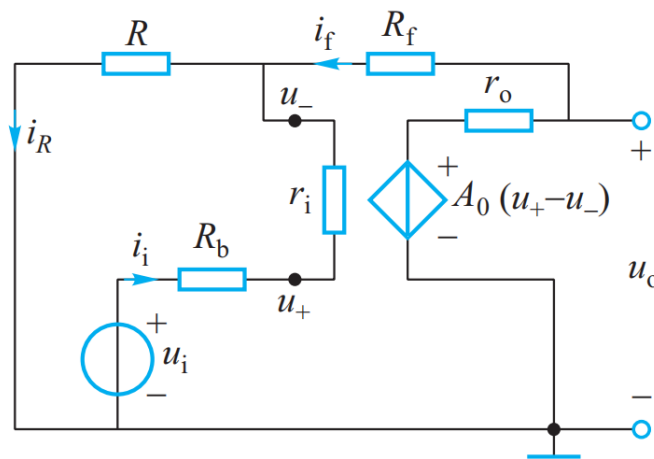
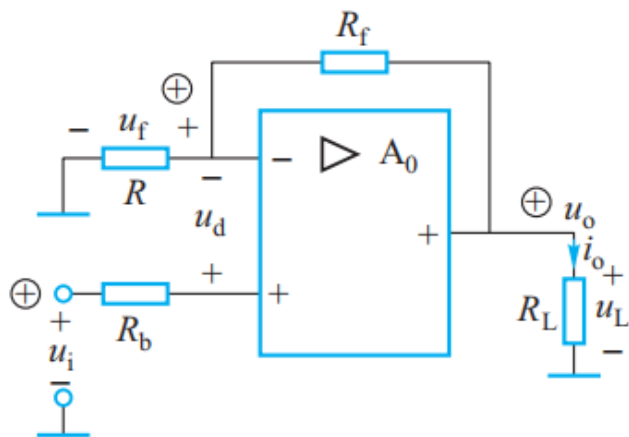
电压反馈 输出电阻减小

电流反馈 输出电阻增大



[例题5.3.1]

在图示电压串联负反馈电路中，设 $R_f = 100K\Omega$, $R = R_b = 10K\Omega$, 负载电阻 R_L 不接，输入电压 u_i 为直流电压 $0.1V$ ，集成运放的开环电压放大倍数 $A_0 = 10000$ ，输入电阻 $r_i = 500K\Omega$ ，输出电阻 $r_o = 500\Omega$ 。试用集成运放的电路模型求此电路的输出电压 u_o ，闭环电压放大倍数 A_f 、输入电阻 r_{if} 和输出电阻 r_{of} 。



[解] 集成运放用电路模型表示后，原电路可画成右上图所示的等效电路，据图列出方程：



[例题5.3.1]

$$\begin{cases} i_R - i_i - i_f = 0 \\ (R_b + r_i)i_i + Ri_R = u_i \\ (R_f + r_o)i_f + Ri_R = A_0(u_+ - u_-) = A_0r_i i_i \end{cases}$$

代入参数可解得电流：

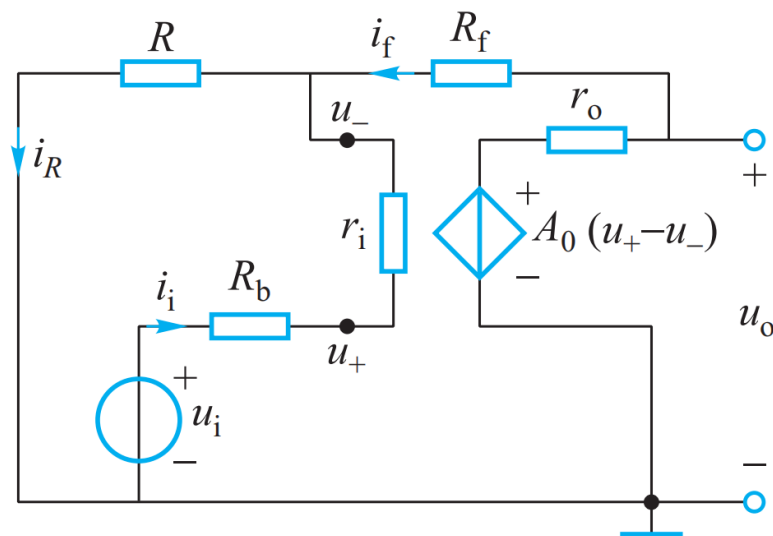
$$i_i \approx 22.07 \times 10^{-5} \mu A$$

$$i_f \approx 9.99 \mu A$$

$$i_R \approx i_i + i_f \approx 9.99 \mu A$$

输出电压 $u_o = A_0 r_i i_f \approx 1.099V$

闭环电压放大倍数 $A_f = \frac{u_o}{u_i} = 10.99$



[例题5.3.1]

输入电阻 $r_{if} = \frac{u_i}{i_i} \approx 453M\Omega$

为求输出电阻, 令 $u_i = 0$ 得图

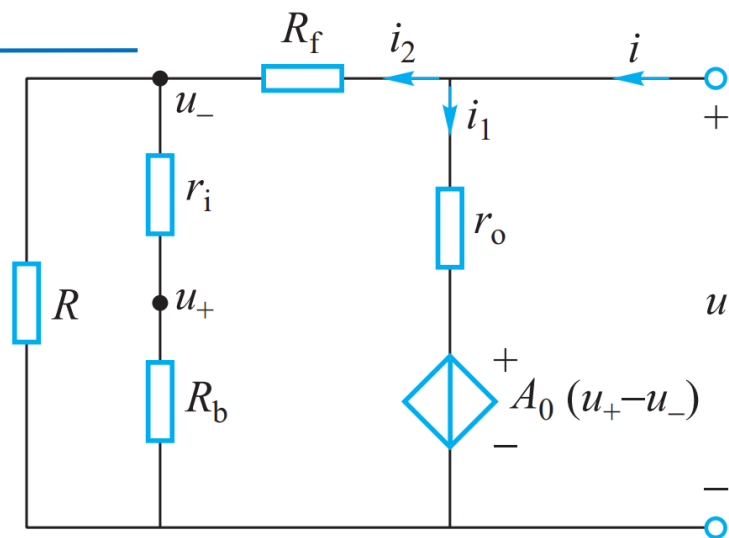
$$i = i_1 + i_2 = \frac{u - A_0(u_+ - u_-)}{r_o} + \frac{u}{R_f + [(r_i + R_b) // R]}$$

整理后代入参数得 $r_{of} = \frac{u}{i} \approx 0.6\Omega$

可见, $r_{if} = 453M\Omega \square r_i = 500K\Omega$

$r_{of} = 0.6\Omega \square r_o = 500\Omega$

r_i 和 $(u_+ - u_-)$ 均很小, (理想特性 $i_i \approx 0, u_+ \approx u_-$)。





5.4 集成运放在模拟信号运算方面的应用

5.4.1 比例运算电路

5.4.2 加、减运算电路

5.4.3 积分、微分运算电路



5.4.1 比例运算电路

输出电压与输入电压成比例关系： $u_o = Ku_i$

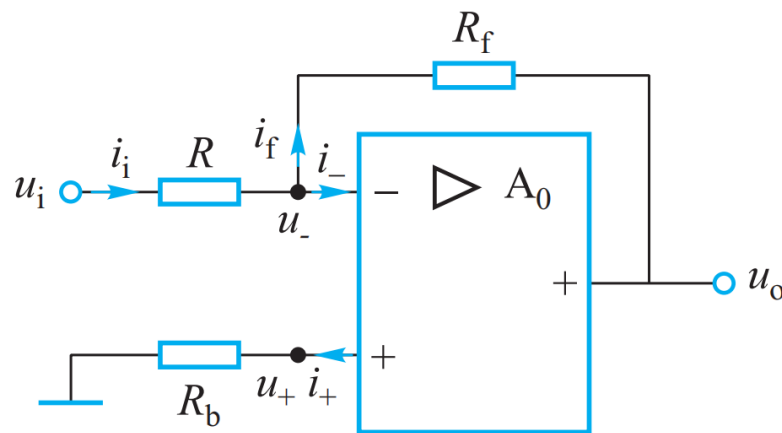
1. 反相输入比例运算电路

◇ 电路一：

电路构成负反馈，集成运放工作在线性区。

$$i_- = i_+ \approx 0$$

$$u_- \approx u_+ = R_b i_+ \approx 0$$



(电路一)

反相输入端非接地，但电位为地（零）电位

—— “虚地”



5.4.1 比例运算电路

$$i_f = i_1 = \frac{u_i - u_-}{R} \approx \frac{u_i}{R} \quad \text{得} \quad u_o \approx -R_f i_f = -\frac{R_f}{R} u_i$$

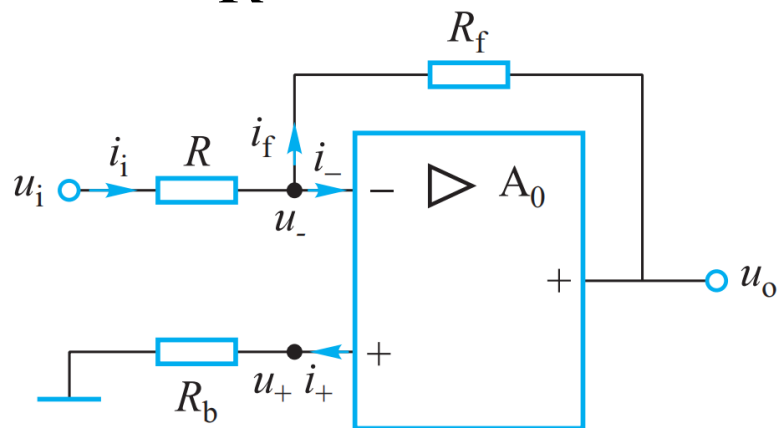
$$\text{即} \quad A_f = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R}$$

R 、 R_f 的阻值一般取 $1k\Omega \sim 1M\Omega$ 。

当 $R_f = R \Rightarrow A_f = -1$, $u_o = -u_i$ ——反相器

电路的输入电阻 $r_{if} = \frac{u_i}{i_i} = R$

平衡电阻 $R_b \approx R // R_f$



5.4.1 比例运算电路

◇电路二：

$$\text{因 } i_f = i_1 = \frac{u_i}{R_1}, \quad i_2 = -\frac{u_a}{R_2} = -\frac{-R_f i_f}{R_2} = \frac{R_f}{R_1 R_2} u_i$$

$$i_3 = i_f + i_2 = \frac{1}{R_1} \left(1 + \frac{R_f}{R_2}\right) u_i$$

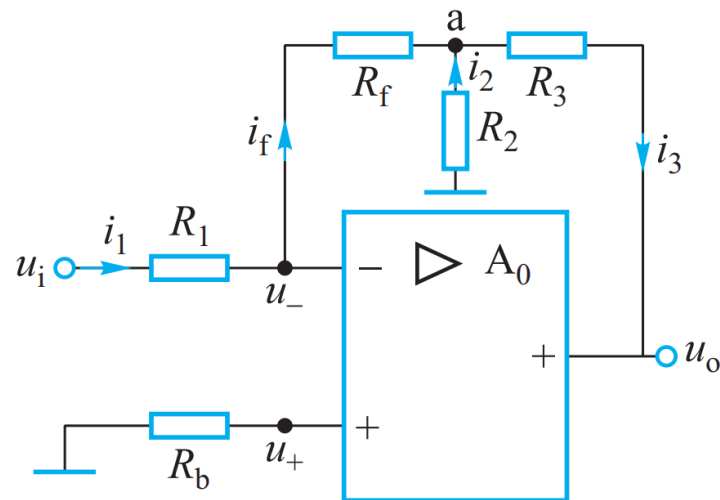
$$\text{得 } u_o = -R_3 i_3 - R_2 i_2 = -\frac{R_3}{R_1} \left(1 + \frac{R_f}{R_2}\right) u_i - \frac{R_f}{R_1} u_i$$

$$u_o = -\left[\frac{R_f}{R_1} + \left(1 + \frac{R_f}{R_2}\right) \frac{R_3}{R_1} \right] u_i$$

则

$$A_f = \frac{u_o}{u_i} = -\left[\frac{R_f}{R_1} + \left(1 + \frac{R_f}{R_2}\right) \frac{R_3}{R_1} \right] = -\frac{1}{R_1} \left(R_f + R_3 + \frac{R_f R_3}{R_2} \right)$$

此电路可用较小的 R_f 阻值获得较大的放大倍数。



(电路二)



5.4.1 比例运算电路

2. 同相输入比例运算电路

$$i_i \approx 0 \quad u_- \approx u_+ \approx u_i$$

$$i_f \approx i_R = \frac{u_-}{R} \approx \frac{u_i}{R}$$

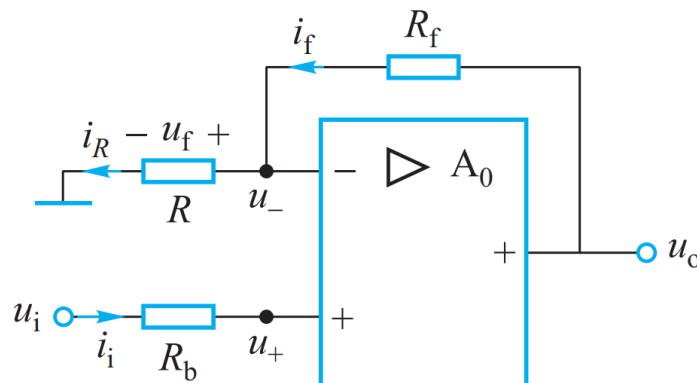
$$u_o = u_- + R_f i_f = u_i + \frac{R_f}{R} u_i = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) u_i$$

$$\text{即 } A_f = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R}$$

当 $R_f = 0$ 或 $R \rightarrow \infty \Rightarrow A_f = 1, \quad u_o = u_i$ —— 电压跟随器

电路的输入电阻 $r_{if} = \frac{u_i}{i_i} \rightarrow \infty$

集成运放承受的共模电压 $u_c = u_+ = u_- = u_i$



$$R_b \approx R // R_f$$



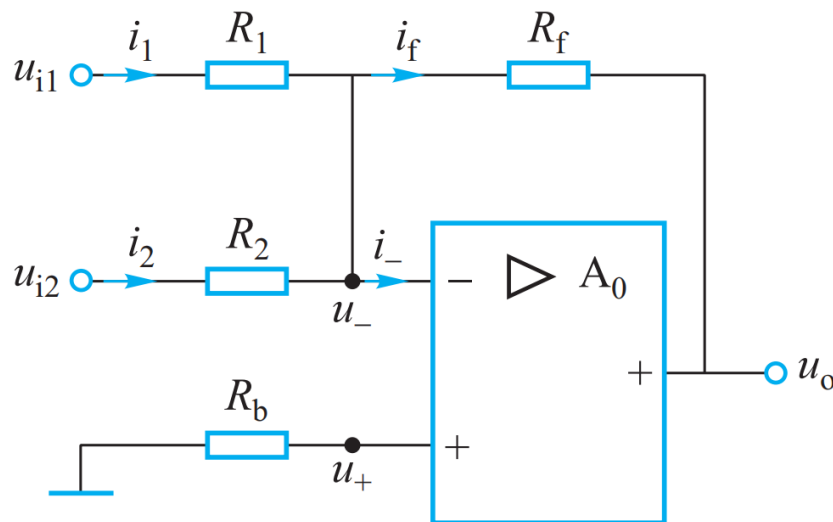
5.4.2 加、减运算电路

1. 加法运算电路

根据 $i_- = i_+ \approx 0, u_- \approx u_+ \approx 0$

得 $i_f \approx i_1 + i_2 \approx \frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2}$

$$u_o \approx -R_f i_f = \left(\frac{R_f}{R_1} u_{i1} + \frac{R_f}{R_2} u_{i2} \right)$$



如取 $R_1 = R_2 = R \Rightarrow u_o = -\frac{R_f}{R} (u_{i1} + u_{i2})$ ——和放大

如取 $R_1 = R_2 = R_f \Rightarrow u_o = -(u_{i1} + u_{i2})$ ——加法运算



例题

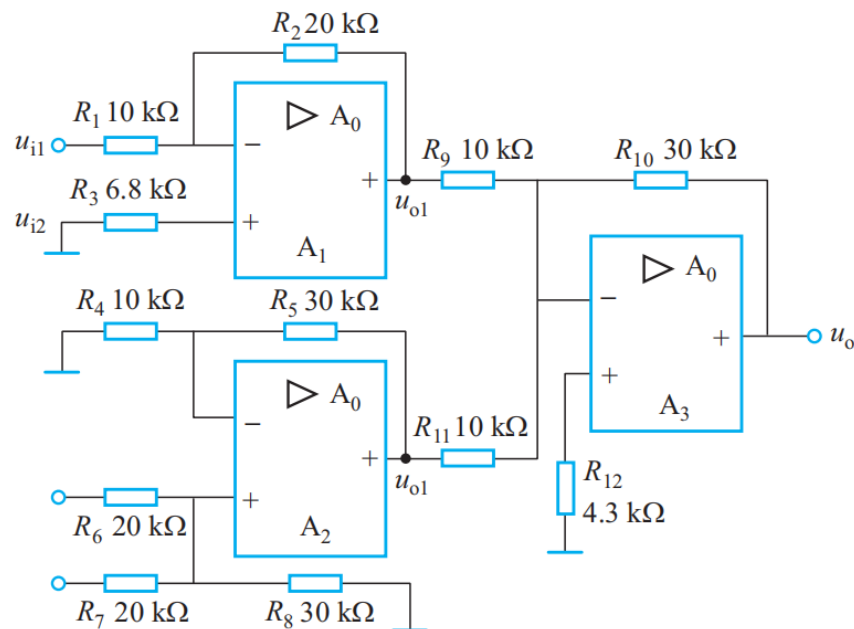
[例题5.4.1] 电路如图5.4.5所示, 写出 u_{o1} , u_{o2} , u_o 的表达式。

[解]
$$u_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} u_{i1} = -\frac{20}{10} u_{i1} = -2u_{i1}$$

$$\begin{aligned} u_{+2} &= \frac{R_7 // R_8}{R_6 + R_7 // R_8} u_{i2} + \frac{R_6 // R_8}{R_7 + R_6 // R_8} u_{i3} \\ &= \frac{12}{20+12} u_{i2} + \frac{12}{20+12} u_{i3} \\ &= \frac{3}{8} (u_{i2} + u_{i3}) \end{aligned}$$

$$u_{o2} = \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) u_{+2} = \left(1 + \frac{30}{10}\right) \times \frac{3}{8} (u_{i2} + u_{i3}) = 1.5(u_{i2} + u_{i3})$$

$$u_o = -\left(\frac{u_{o1}}{R_9} + \frac{u_{o2}}{R_{11}}\right) R_{10} = -3(u_{o1} + u_{o2}) = 6u_{i1} - 4.5u_{i2} - 4.5u_{i3}$$



5.4.2 加、减运算电路

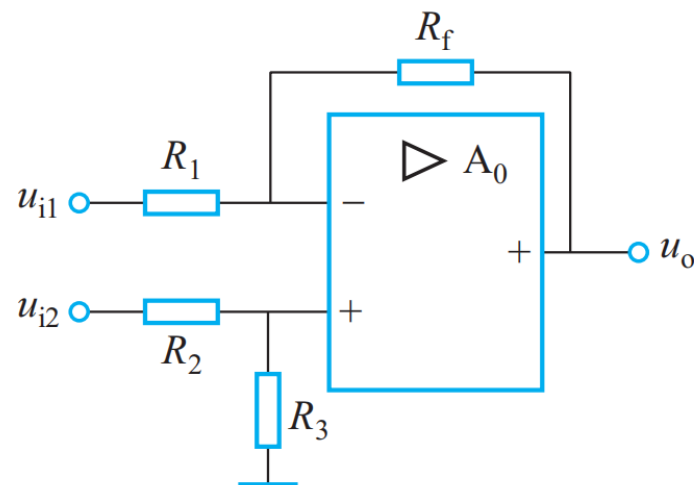
2. 减法运算电路

$$u_- \approx u_+ \approx \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$$

$$u_o = u_- - \frac{u_{i1} - u_-}{R_1} R_f = u_- - \frac{R_f}{R_1} u_{i1} + \frac{R_f}{R_1} u_-$$

$$= (1 + \frac{R_f}{R_1}) u_- - \frac{R_f}{R_1} u_{i1}$$

$$= \frac{R_1 + R_f}{R_1} \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_f}{R_1} u_{i1}$$



常取 $R_1 = R_2, R_3 = R_f$

则 $u_o = \frac{R_f}{R_1} (u_{i2} - u_{i1})$ ——差分放大



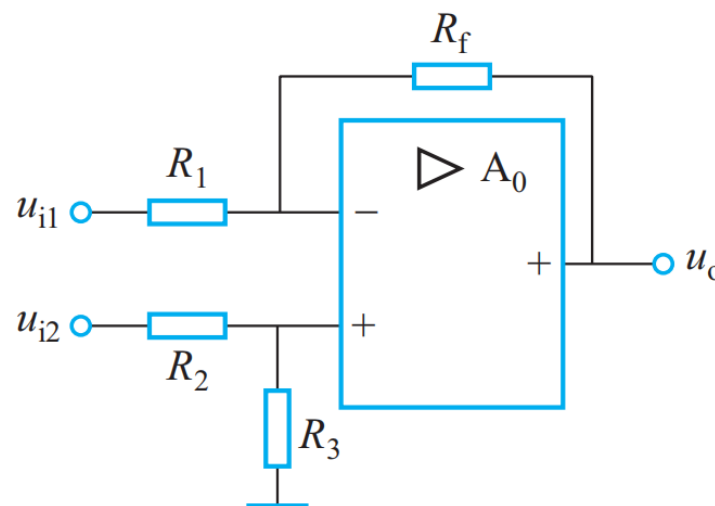
5.4.2 加、减运算电路

2. 减法运算电路

当取 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$

得 $u_o = u_{i2} - u_{i1}$

——减法运算



集成运放承受的共模电压

$$u_c = u_+ = u_- = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$$

(此电路也可用叠加原理分析输入、输出关系)



例题

[例题5.4.2] 电路如图所示, 已知: $R=100k\Omega$, $U_I=2V$ 。

求: U_O

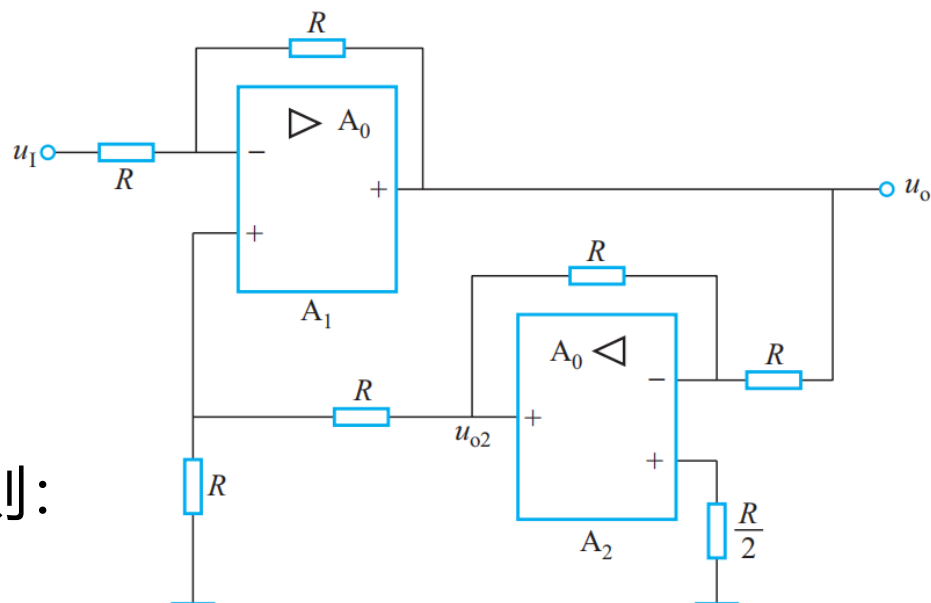
解: 由图 A_2 构成反相输入比例运算电路, 则:

$$U_{O2} = -\frac{R}{R}U_O = -U_O$$

A_1 构成差分输入减法运算电路, 则:

$$U_O = \frac{R}{R}(U_{O2} - U_I) = -U_O - U_I$$

$$\text{因此 } U_O = -\frac{1}{2}U_I = -1(V)$$

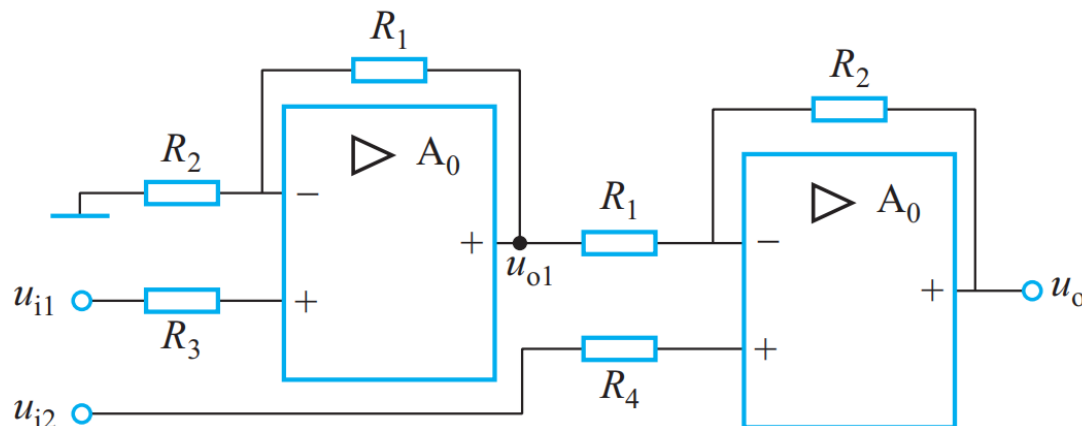


5.4.2 加、减运算电路

2. 减法运算电路

双运放减法运算电路

用叠加原理分析输入、输出关系式：



$$u_{o1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} u_{i1}$$

当 u_{o1} 单独作用时，输出电压分量： $u'_o = -\frac{R_2}{R_1} u_{o1} = -(1 + \frac{R_2}{R_1}) u_{i1}$

当 u_{i2} 单独作用时，输出电压分量： $u''_o = (1 + \frac{R_2}{R_1}) u_{i2}$

得 $u_o = u'_o + u''_o = (1 + \frac{R_2}{R_1})(u_{i2} - u_{i1})$

特点：输入电阻大



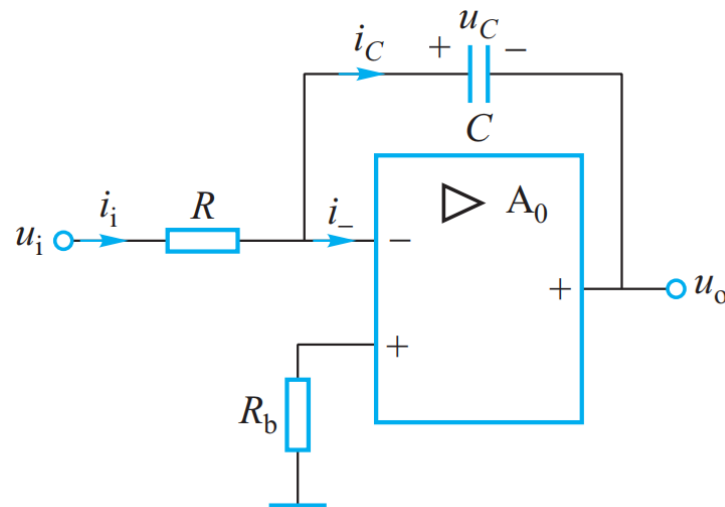
5.4.3 积分、微分运算电路

1. 积分运算电路

◇ 基本积分电路

$$i_- = i_+ \approx 0 \quad u_- = u_+ \approx 0$$

$$i_C = i_i = \frac{u_i}{R}$$



设电容电压初始值为 $u_C(0)$

$$u_o = u_- - u_C = -u_C = -u_C(0) - \frac{1}{C} \int i_C dt$$

$$= -u_C(0) - \frac{1}{C} \int i_i dt$$

$$= -u_C(0) - \frac{1}{RC} \int u_i dt$$



5.4.3 积分、微分运算电路

1. 积分运算电路

当 $u_c(0) = 0$, $u_o = -\frac{1}{RC} \int u_i dt$

当输入电压为直流电压时,

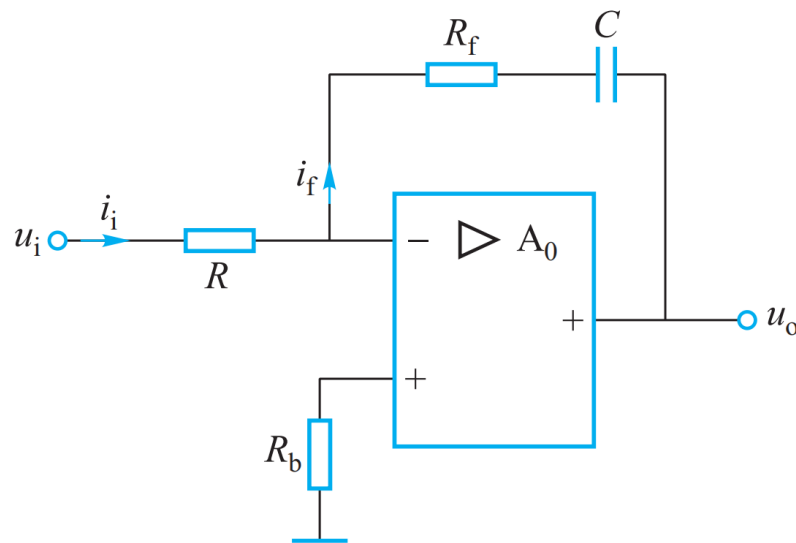
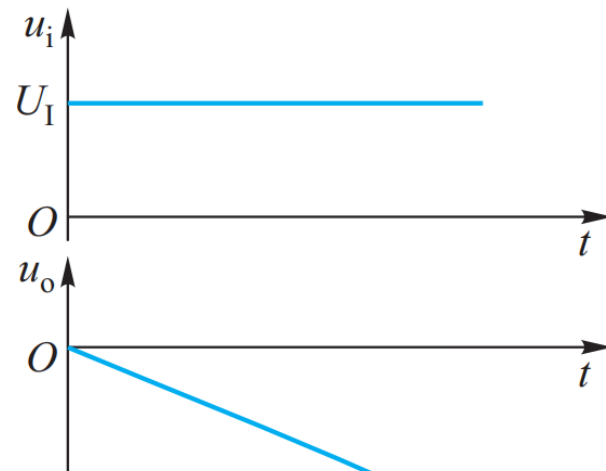
即 $u_i = U_i$, 得 $u_o = -\frac{U_i}{RC} t$

输入、输出电压波形如图

◇ 比例积分电路

$$u_o = -(R_f i_i + \frac{1}{C} \int i_i dt)$$

$$u_o = -(\frac{R_f}{R} u_i + \frac{1}{RC} \int u_i dt)$$

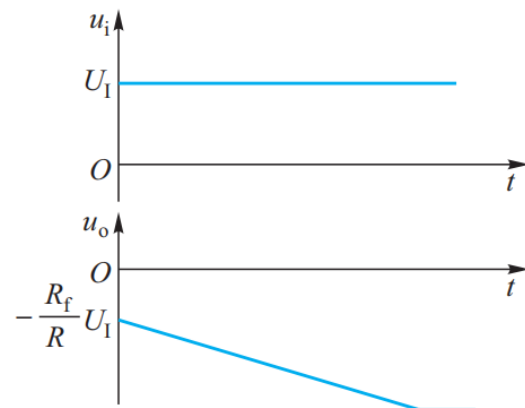


5.4.3 积分、微分运算电路

1. 积分运算电路

当 $u_i = U_i$ (直流), 得

$$u_o = -\left(\frac{R_f}{R} U_i + \frac{U_i}{RC} t\right)$$

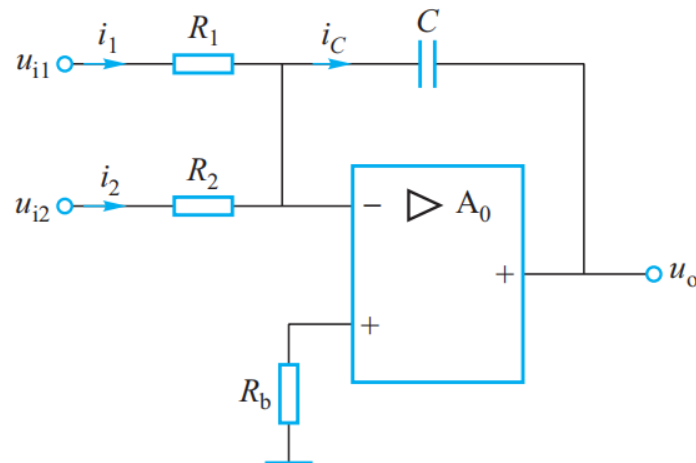


◇ 和积分电路

$$u_o = -\frac{1}{C} \int i_c dt = -\frac{1}{C} \int (i_1 + i_2) dt$$

$$= -\frac{1}{C} \int \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2}\right) dt$$

当 $R_1 = R_2 = R$, $u_o = -\frac{1}{RC} \int (u_{i1} + u_{i2}) dt$

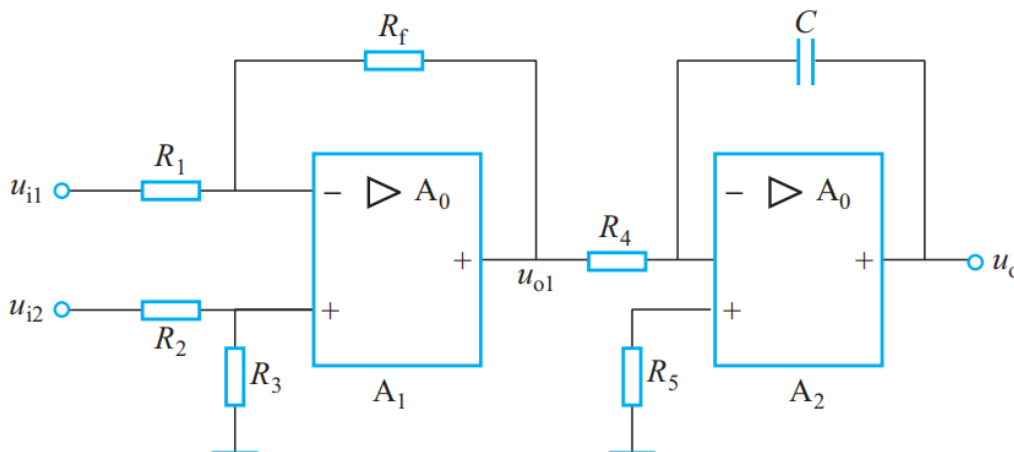


积分电路可将矩形波电压变换为三角波电压。



例 题

[例题5.4.3] 图示电路中，集成运放的电源电压为 $\pm 15V$ ，
 $R_1 = R_2 = 10k\Omega$ ， $R_3 = R_f = 20k\Omega$ ， $R_4 = 100k\Omega$ ， $C = 1\mu F$ ，
在 $t = 0$ 时加入 $u_{i1} = 0.6V$ ， $u_{i2} = 0.5V$ ，电容无初始储能。
试求输出电压上升到6V所需的时间。



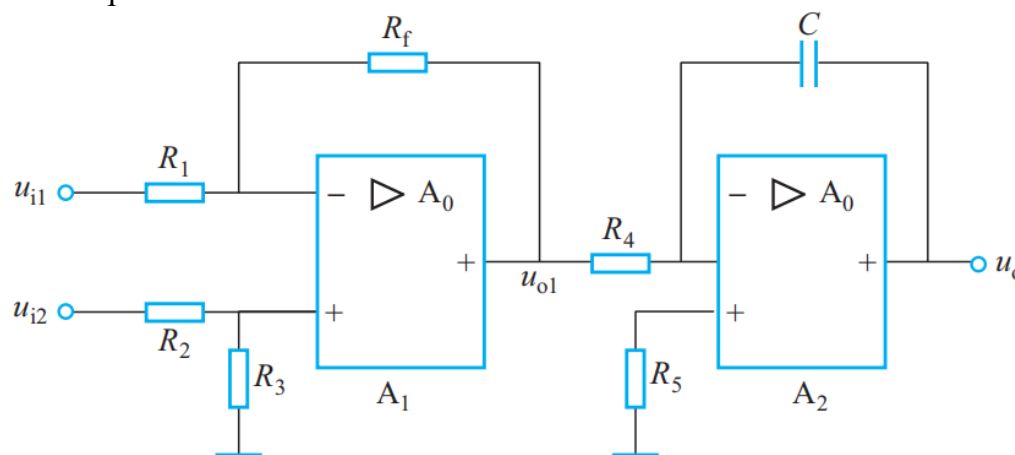
[解] 集成运放 A_1 等构成差值放大电路， A_2 等构成基本积分电路。



[例题5.4.3]

$$u_{o1} = \frac{R_1 + R_f}{R_1} \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_f}{R_1} u_{i1}$$

$$= \frac{R_f}{R_1} (u_{i2} - u_{i1}) = \frac{20}{10} \times (0.5 - 0.6) = -0.2V$$



$$u_o = -\frac{1}{R_4 C} \int u_{o1} dt = \frac{0.2}{100 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6}} = 2t$$

当 $u_o = 6V$, $t = \frac{u_o}{2} = \frac{6}{2} = 3s$



5.4.3 积分、微分运算电路

2. 微分运算电路

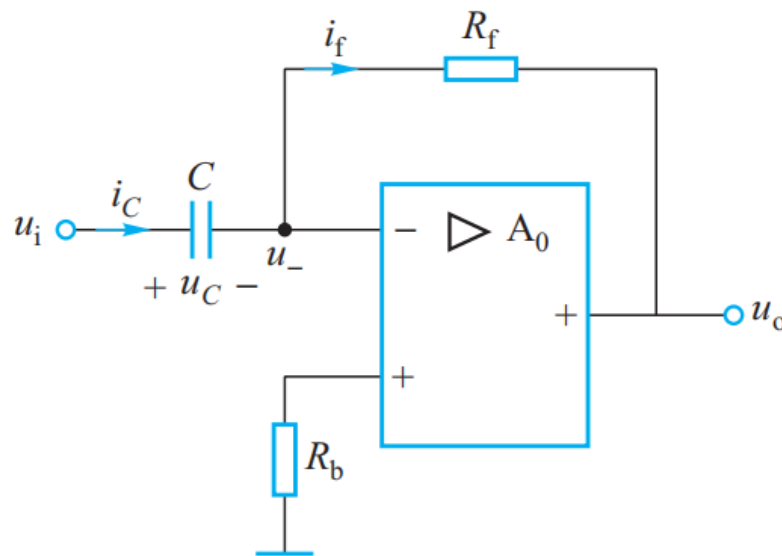
$$u_- = u_+ = 0$$

$$i_f = i_C$$

$$\begin{aligned} u_o &= -R_f i_f = -R_f i_C \\ &= -R_f C \frac{du_C}{dt} \end{aligned}$$

$$u_C = u_i$$

$$u_o = -R_f C \frac{du_i}{dt}$$



微分电路可将矩形波变换成正负尖脉冲波。





5.5 集成运放在幅值比较方面的应用

5.5.1 开换工作的比较器

5.5.2 滞回比较器



5.5.1 开环工作的比较器

开环状态——集成运放工作在非线性区。

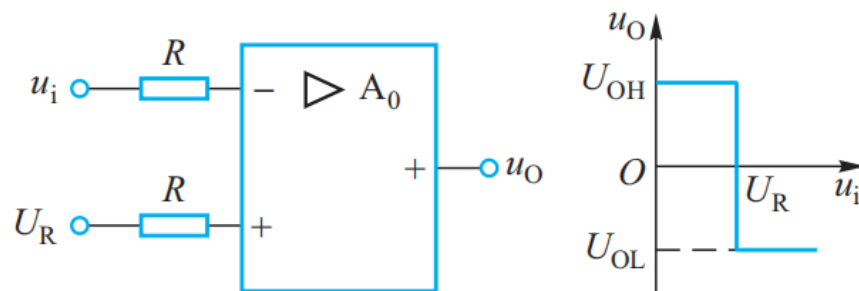
1. 反相输入比较器

u_i —— 输入电压

U_R —— 参考电压

当 $u_i < U_R$, 运放正饱和, $u_o = U_{OH}$

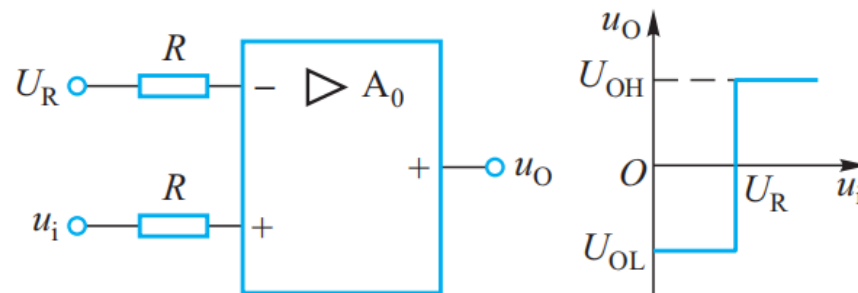
$u_i > U_R$, 运放负饱和, $u_o = U_{OL}$



2. 同相输入比较器

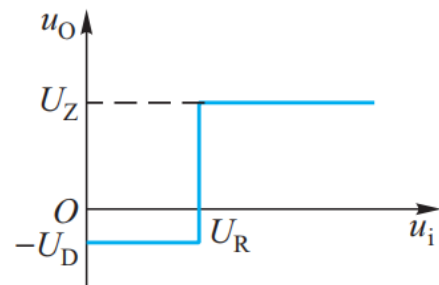
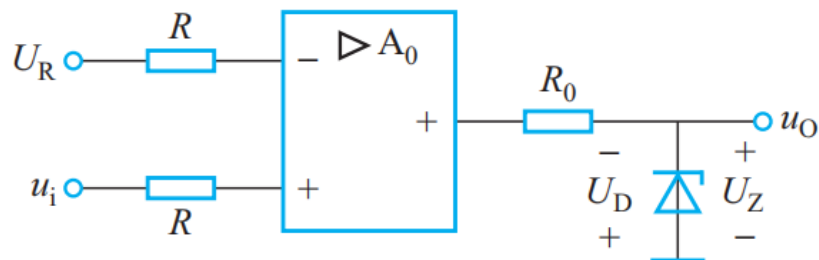
$u_i < U_R$ $u_o = U_{OL}$

$u_i > U_R$ $u_o = U_{OH}$

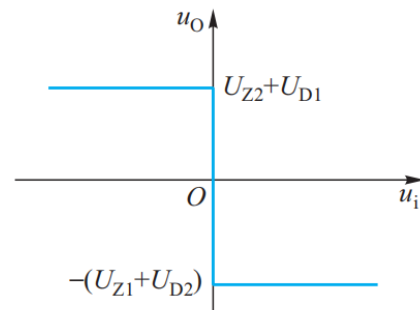
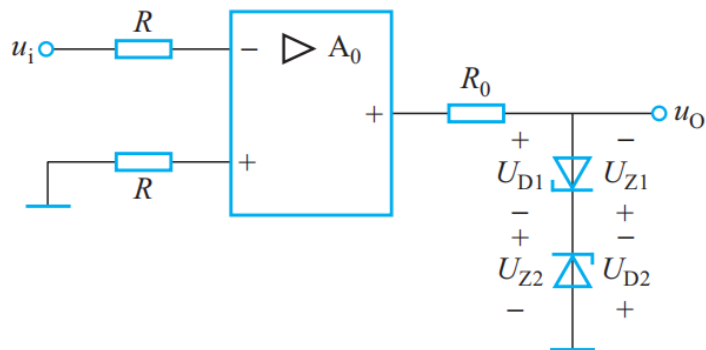


5.5.1 开环工作的比较器

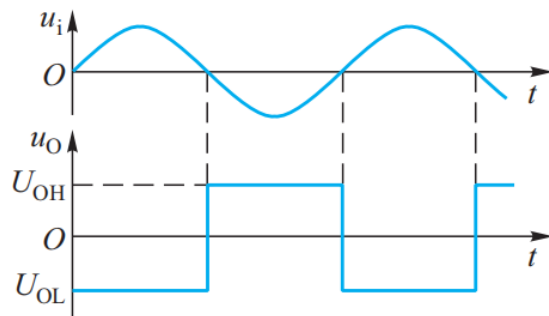
3. 输出加限幅电路的比较器



4. 过零比较器(即 $U_R=0$)

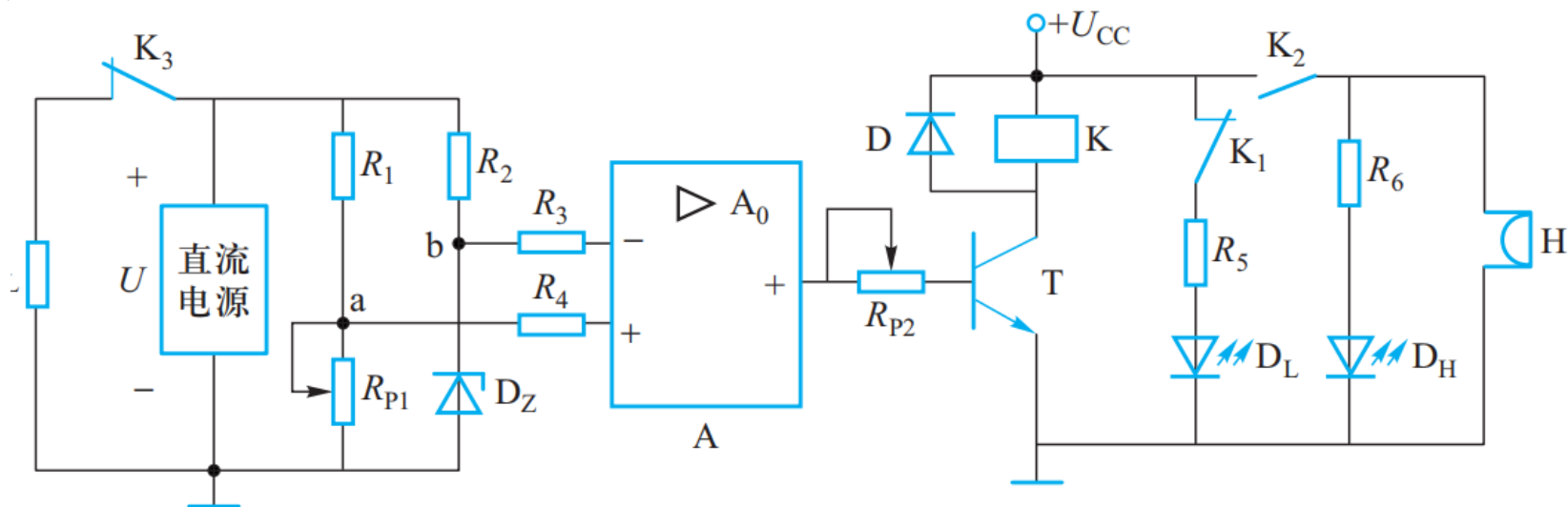


可将其它波形变换为矩形波。
如输入为正弦波，输出为方波。



例 题

[例题5.5.1] 图示为电源电压过压报警电路，试分析其工作原理。

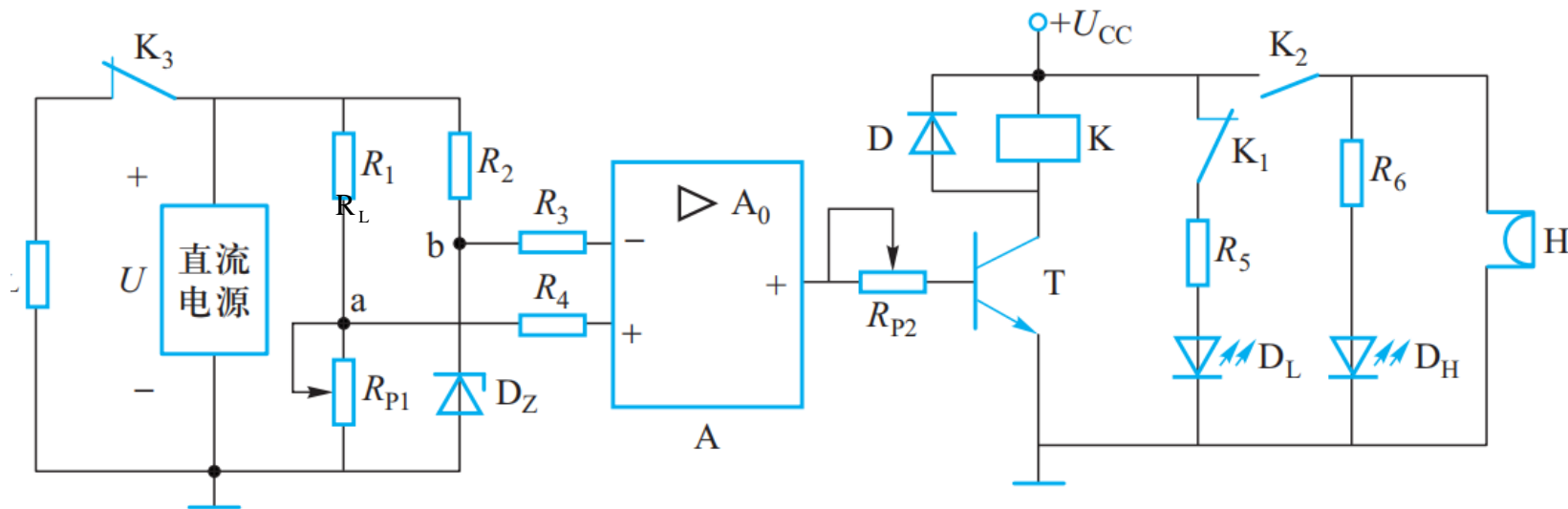


解：集成运放构成电压比较器，参考电压 $U_b = U_Z$ 。当直流电源输出电压小于上限值时， $U_a < U_b$ ，比较器A 输出低电平，三极管T 截止，继电器K线圈无电压，触点 K_1 闭合， D_L 发光； K_2 断开， D_H 不发光，蜂鸣器H 不发声； K_3 闭合，负载 R_L 正常工作。



例 题

[例题5.5.1] 图示为电源电压过压报警电路，试分析其工作原理。



解: 当直流电源电压超过上限值时, $U_a > U_b$, A 输出高电平, T 饱和导通, K 加电压, K_1 断开, D_L 不发光, K_2 闭合, D_H 发光, H 发声报警, K_3 断开, R_L 断电。

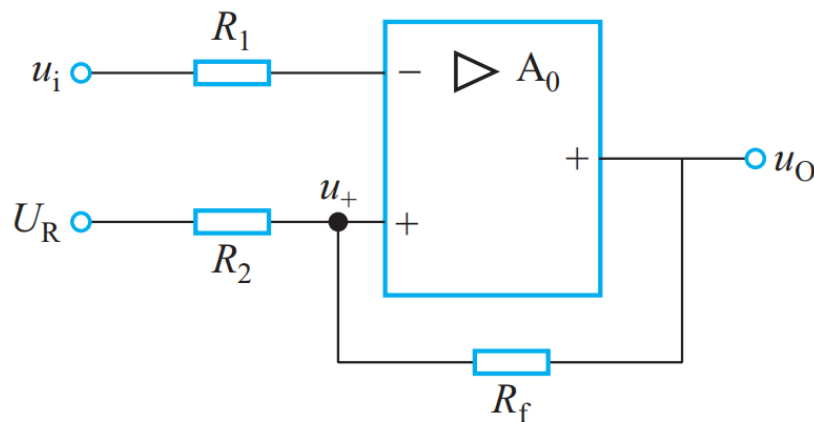


5.5.2 滞回比较器

闭环正反馈——集成运放工作在非线性区

集成运放同相输入端电压 u_+

由输出电压 u_o 和参考电压 U_R 共同确定。



$$u_+ = \frac{R_f}{R_2 + R_f} U_R + \frac{R_2}{R_2 + R_f} u_o$$

设加电源后集成运放正饱和, $u_o = U_{OH}$, 并设 $U_R > 0$,

$$u_+ = U_{+H} = \frac{R_f}{R_2 + R_f} U_R + \frac{R_2}{R_2 + R_f} U_{OH} \quad (\text{正值})$$

加入 u_I , 当 u_I 增大至 $u_I > U_{+H}$, 运放负饱和, $u_o = U_{OL}$



5.5.2 滞回比较器

$$u_+ = U_{+L} = \frac{R_f}{R_2 + R_f} U_R + \frac{R_2}{R_2 + R_f} U_{OL}$$

当 u_I 减小至 $u_I \leq U_{+L}$,

运放正饱和, $u_o = U_{OH}$ 。

$$\text{当 } U_R > 0, \frac{R_f}{R_2 + R_f} U_R > \left| \frac{R_2}{R_2 + R_f} U_{OL} \right|$$

时的电压传输特性如图。

主要
参数:

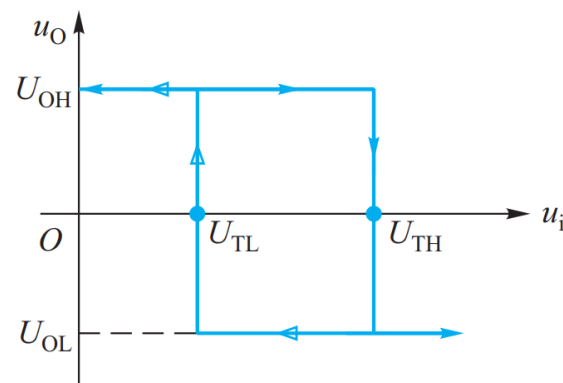
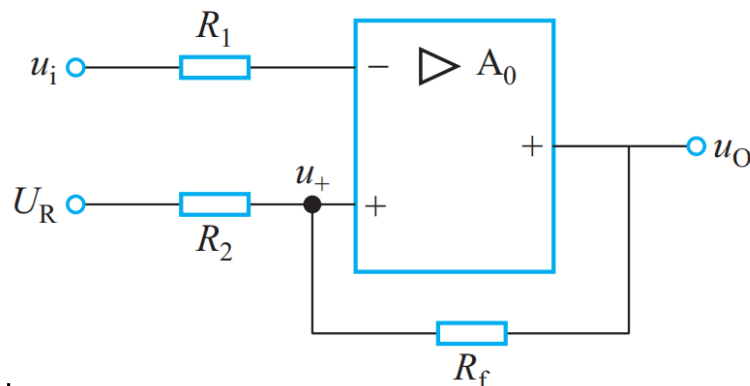
正向阈值电压

$$U_{TH} = U_{+H}$$

负向阈值电压

$$U_{TL} = U_{+L}$$

滞回电压 (回差) $\Delta U_T = U_{TH} - U_{TL}$



5.5.2 滞回比较器

滞回电压

$$\Delta U_T = \frac{R_2}{R_2 + R_f} (U_{OH} - U_{OL})$$

改变 $\frac{R_2}{R_2 + R_f}$ 值, 可改变 U_{TH} 、 U_{TL} 、 ΔU_T

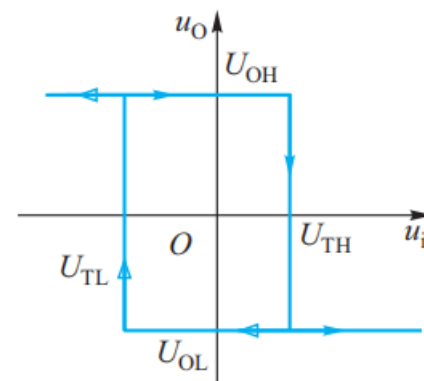
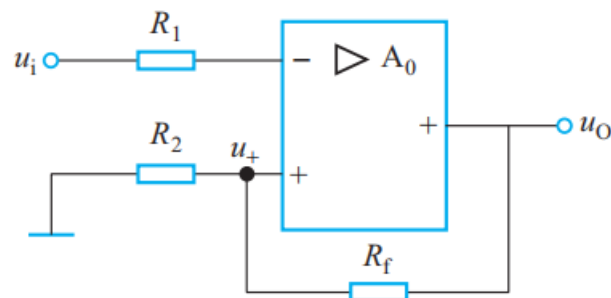
改变 U_R , 可使电压传输特性左、右移动。

当 $U_R = 0$, 如图:

$$U_{TH} = \frac{R_2}{R_2 + R_f} U_{OH} \quad (\text{正值})$$

$$U_{TL} = \frac{R_2}{R_2 + R_f} U_{OL} \quad (\text{负值})$$

$$\Delta U_T = \frac{R_2}{R_2 + R_f} (U_{OH} - U_{OL}) \quad (\text{不变})$$

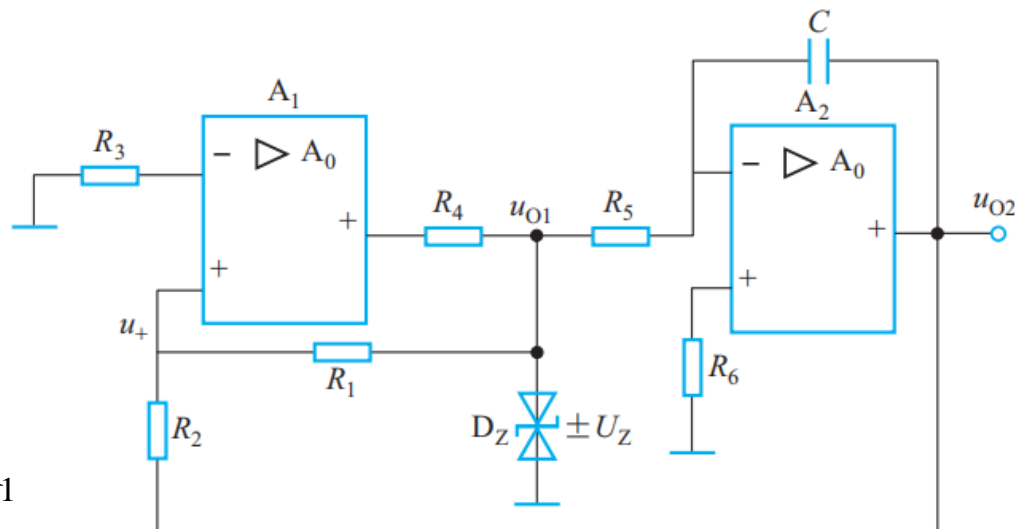


例 题

[例题5.5.2] 分析图示方波-三角波产生电路的工作原理。

解：电路由电压比较器和基本积分电路构成。集成运放 A_1 工作在非线性区， A_2 工作在线性区。

设加电源后，集成运放 A_1 正饱和，电容 C 无初始储能，则



$$u_{o1} = U_z$$

$$u_{o2} = -\frac{1}{R_5 C} \int_0^t u_{o1} dt = -\frac{U_z}{R_5 C} t \quad (\text{下降})$$



[例题5.5.2]

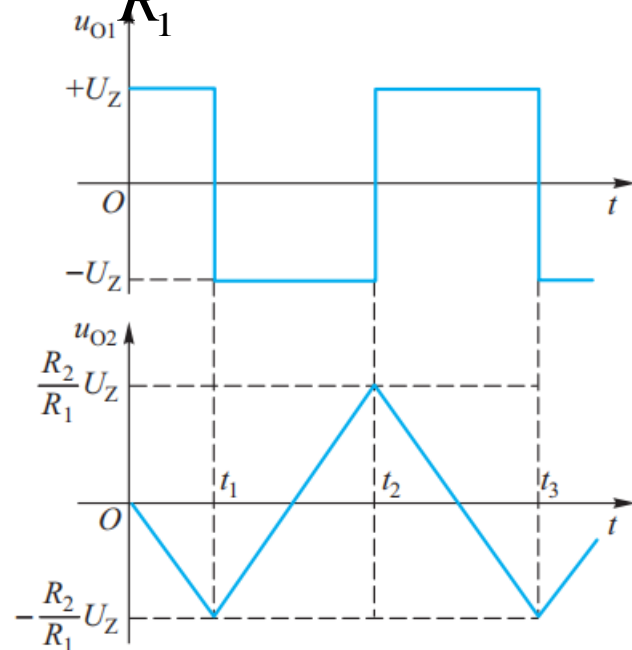
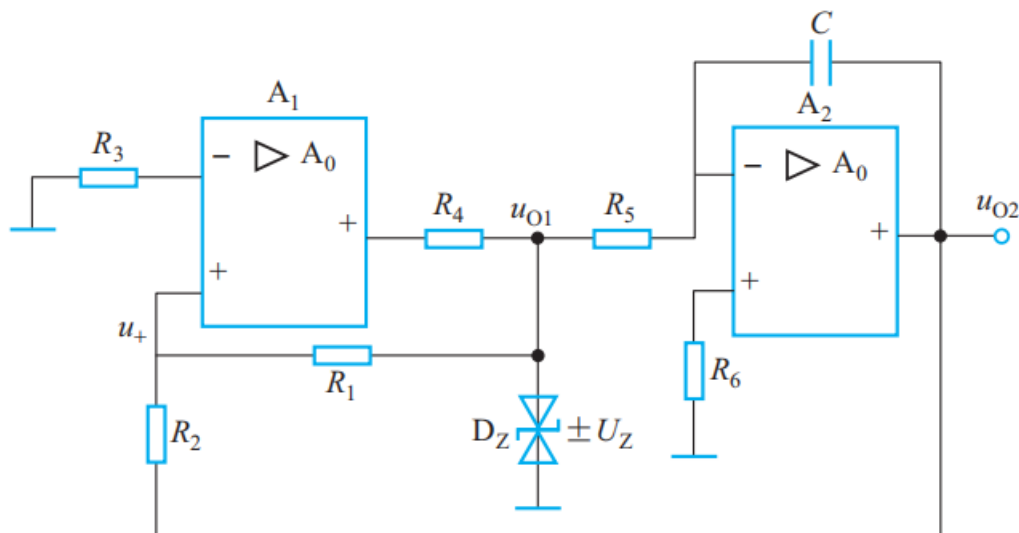
集成运放 A_1 同相输入端电压 $u_{+H} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{o2} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_Z$

当 u_{o2} 下降至使 $u_{+H} \leq 0$

即 $\frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{o2} \leq -\frac{R_2}{R_1 + R_2} U_Z$

$$u_{o2} \leq -\frac{R_2}{R_1} U_Z$$

集成运放 A_1 负饱和, $u_{o1} = -U_Z$



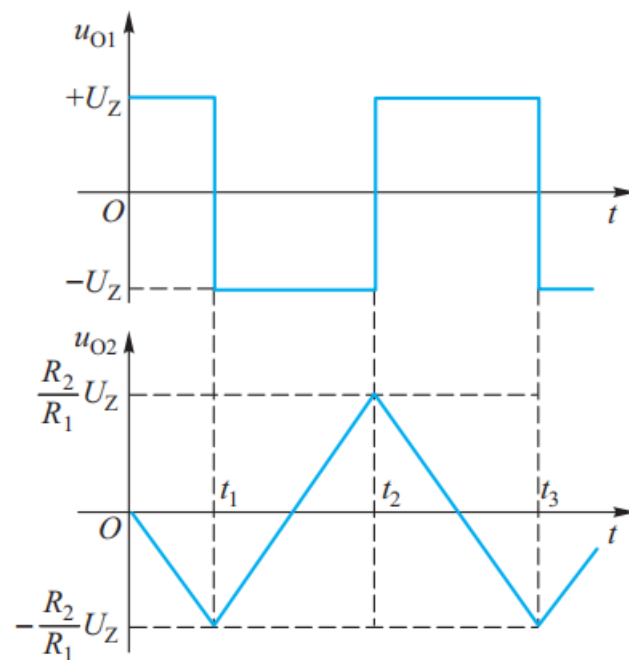
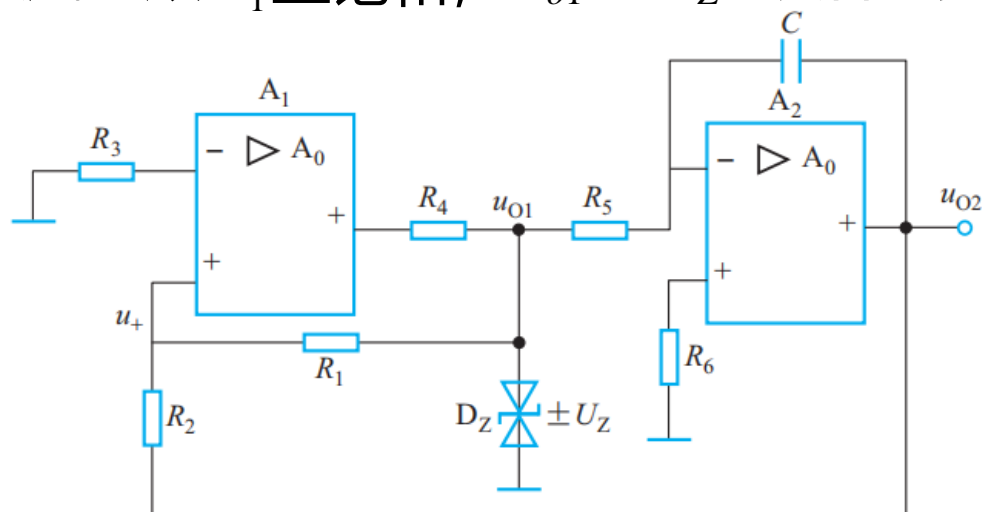
[例题5.5.2]

此时集成运放 A_1 同相输入端电压 $u_{+L} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{o2} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_Z$

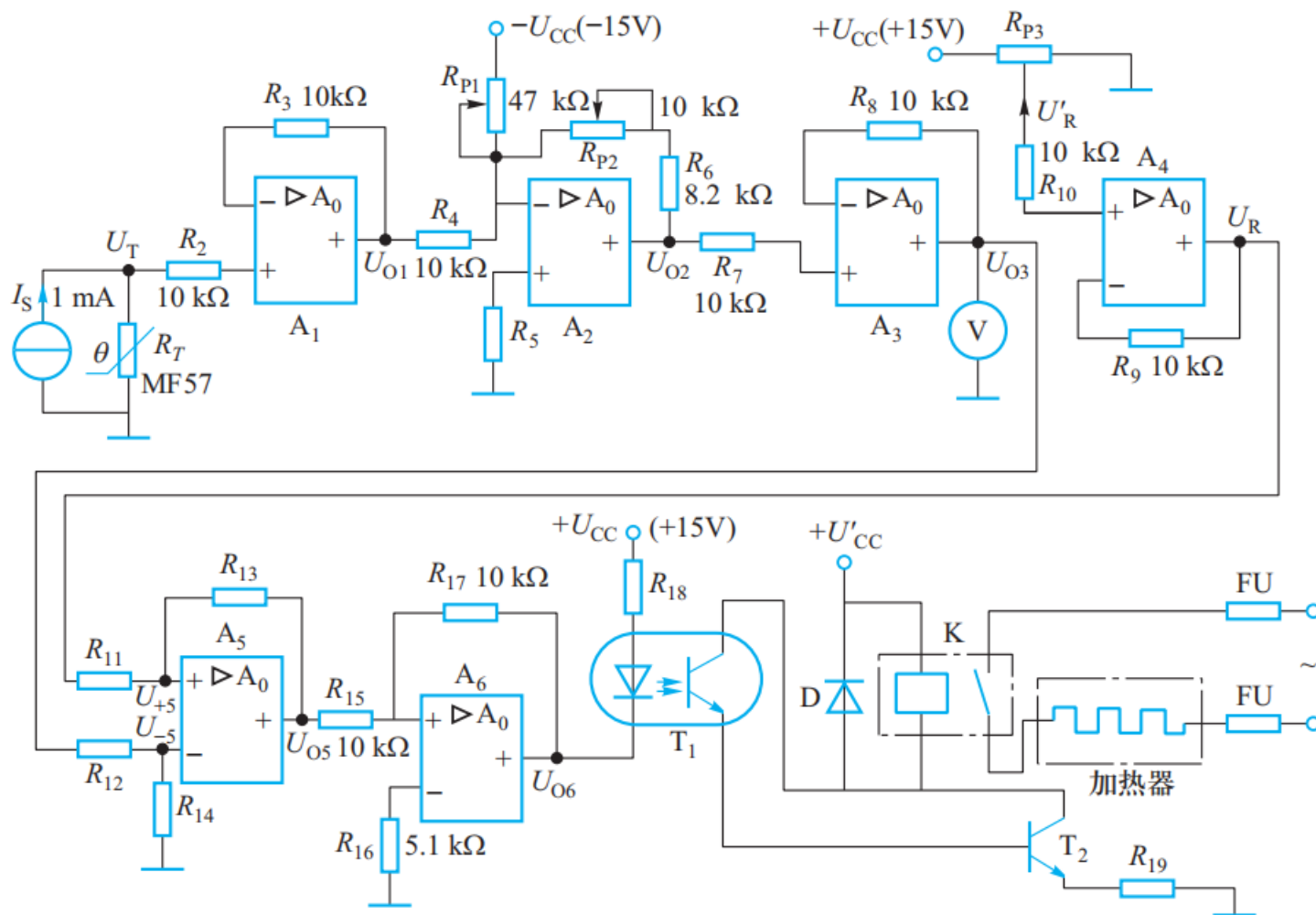
而 $u_{o2} = -\frac{R_2}{R_1} U_Z + \frac{U_Z}{R_5 C} (t - t_1)$ (上升) 当 u_{o2} 上升至使 $u_{+L} \geq 0$

即 $\frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{o2} \geq \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_Z$ $u_{o2} \geq \frac{R_2}{R_1} U_Z$

集成运放 A_1 正饱和, $u_{o1} = U_Z$ 以后重复。



5.6 应用举例—温度监测控制电路



5.6 应用举例—温度监测控制电路

电路包含：温度传感器、电压跟随器、加法定标电路、滞回比较器、反相器、光电耦合器、继电器、加热器等。

• 温度传感器：

由热敏电阻和恒流源等组成。

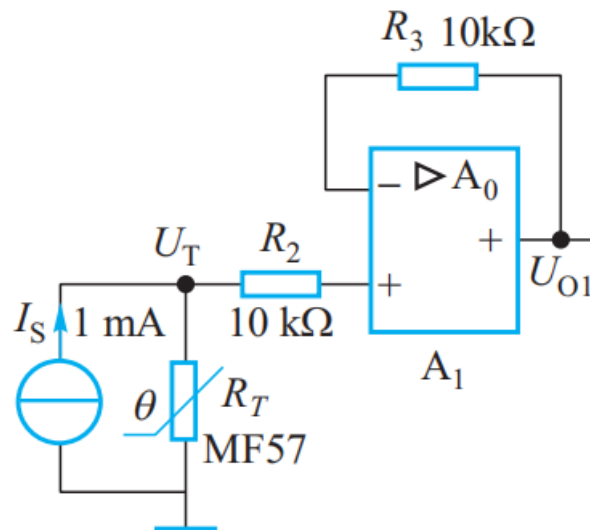
温度： $0^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$

$$R_T : 7355\Omega \sim 153\Omega$$

$$U_T = R_T I_S = 7.355\text{V} \sim 0.153\text{V}$$

集成运放构成电压跟随器：

$$U_{O1} = U_T$$

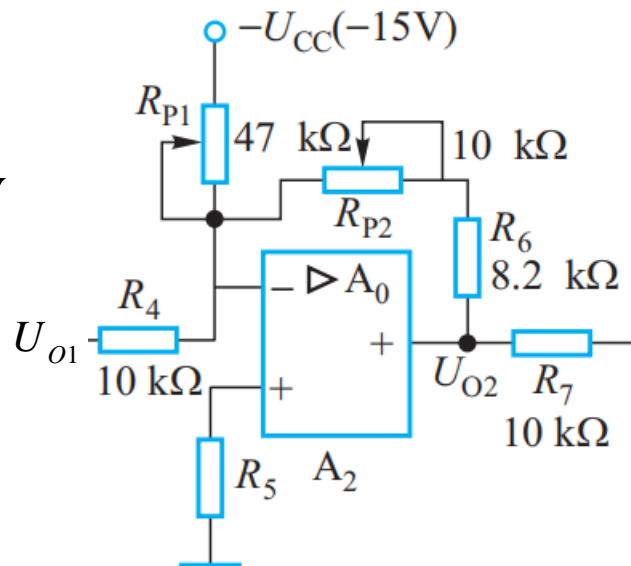


5.6 应用举例—温度监测控制电路

• 加法定标电路

要求: $U_{O1} = 7.355V \sim 0.153V \Rightarrow U_{O2} = 0 \sim 10V$

即当 $U_{O1} = U_{O1L} = 7.355V$ 时 $U_{O2} = U_{O2L} = 0$



$$\text{得 } \frac{U_{O1L}}{R_4} + \frac{-U_{CC}}{R_{P1}} = 0$$

$$R_{P1} = \frac{U_{CC}}{U_{O1L}} R_4 \approx 20.39k\Omega$$

当 $U_{O1} = U_{O1H} = 0.153V$ 时, $U_{O2} = U_{O2H} = 10V$

$$\frac{U_{O1H}}{R_4} + \frac{U_{O2H}}{R_6 + R_{P2}} + \frac{-U_{CC}}{R_{P1}} = 0 \quad \text{即} \quad \frac{0.153}{10} + \frac{10}{R_6 + R_{P2}} + \frac{-15}{20.39} = 0$$

$$(R_6 + R_{P2}) \approx 13.89k\Omega$$

$$U_{O3} = U_{O2}$$



5.6 应用举例—温度监测控制电路

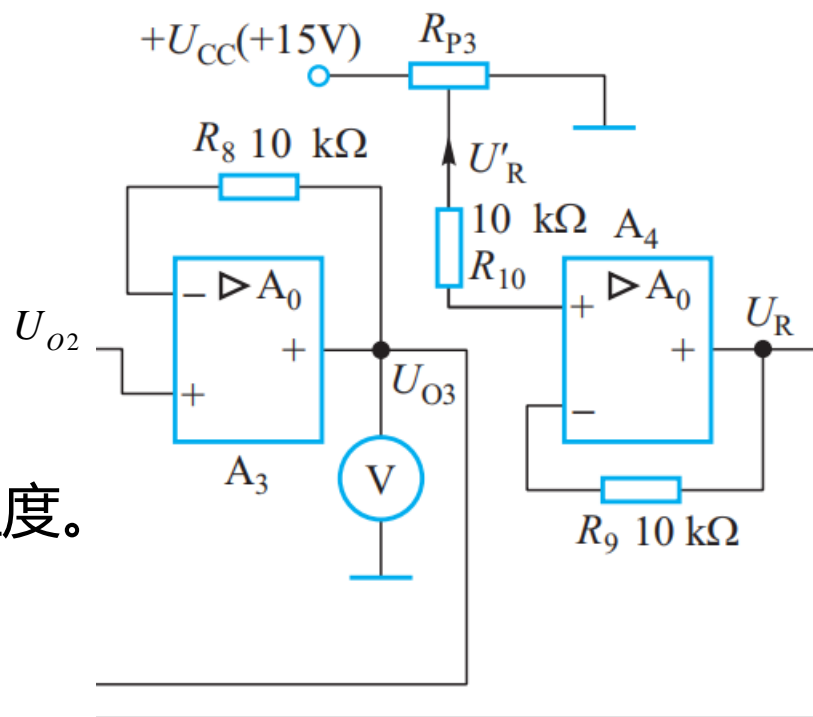
• 测量和参考电压

两个集成运放均构成电压跟随器。

$$U_{O3} = U_{O2}$$

电压表以温度为刻度则可显示被测温度。

$$U_R = U'_R$$



作为滞回比较器的参考电压（可调）。

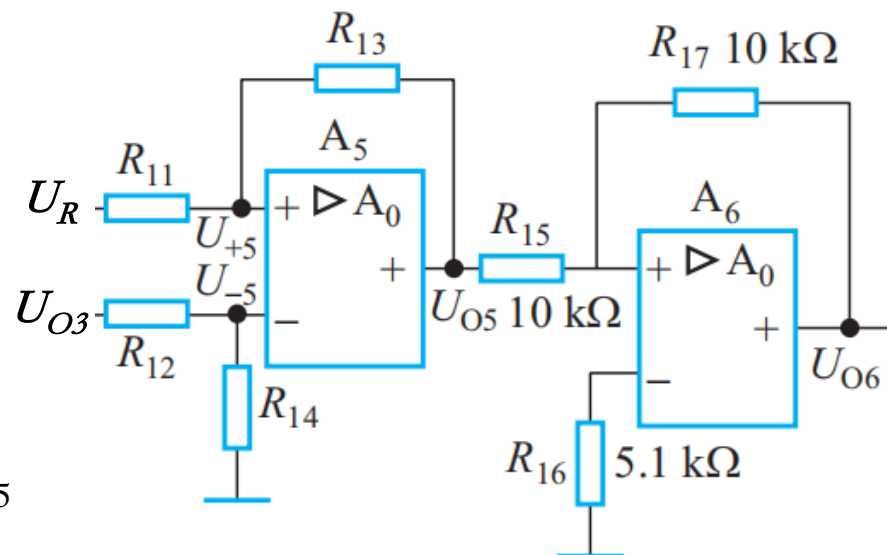


5.6 应用举例—温度监测控制电路

• 滞回比较器

$$U_{-5} = \frac{R_{14}}{R_{12} + R_{14}} U_{O3}$$

$$U_{+5} = \frac{R_{13}}{R_{11} + R_{13}} U_R + \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{13}} U_{O5}$$



在加温时，集成运放 A_5 正饱和，

$$U_{O5} = U_{O5H}$$

当温度上升至控温范围上限时， $U_{-5} > U_{+5}$ ，集成运放 A_5 负饱和。 $U_{O6} = -U_{O5}$ （反相作用）



5.6 应用举例—温度监测控制电路

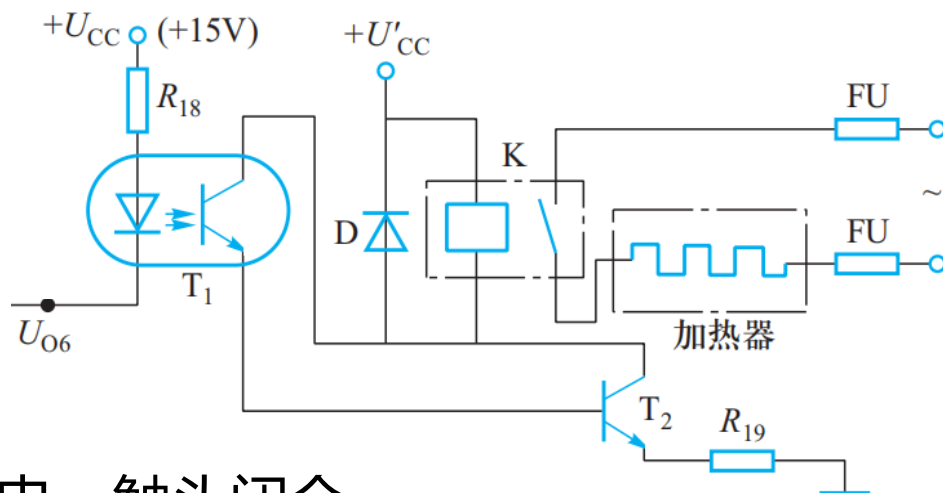
• 光电耦合和加温电路

T_1 ——光电耦合器件

K ——继电器

当 U_{O6} 为低电平时,

T_1 、 T_2 导通, 继电器线圈带电, 触头闭合,
加热器工作; 当 U_{O6} 为高电平时, 停止加热。





本章结束 返回目录

第6章 波形产生和变换

