

第六章 模拟信号运算电路

6.1 理想运算放大器

6.2 比例运算电路

6.3 求和电路

6.4 积分和微分电路

6.1 理想运算放大器

6.1.1 理想运放的技术指标

开环差模电压增益 $A_{od} = \infty$;

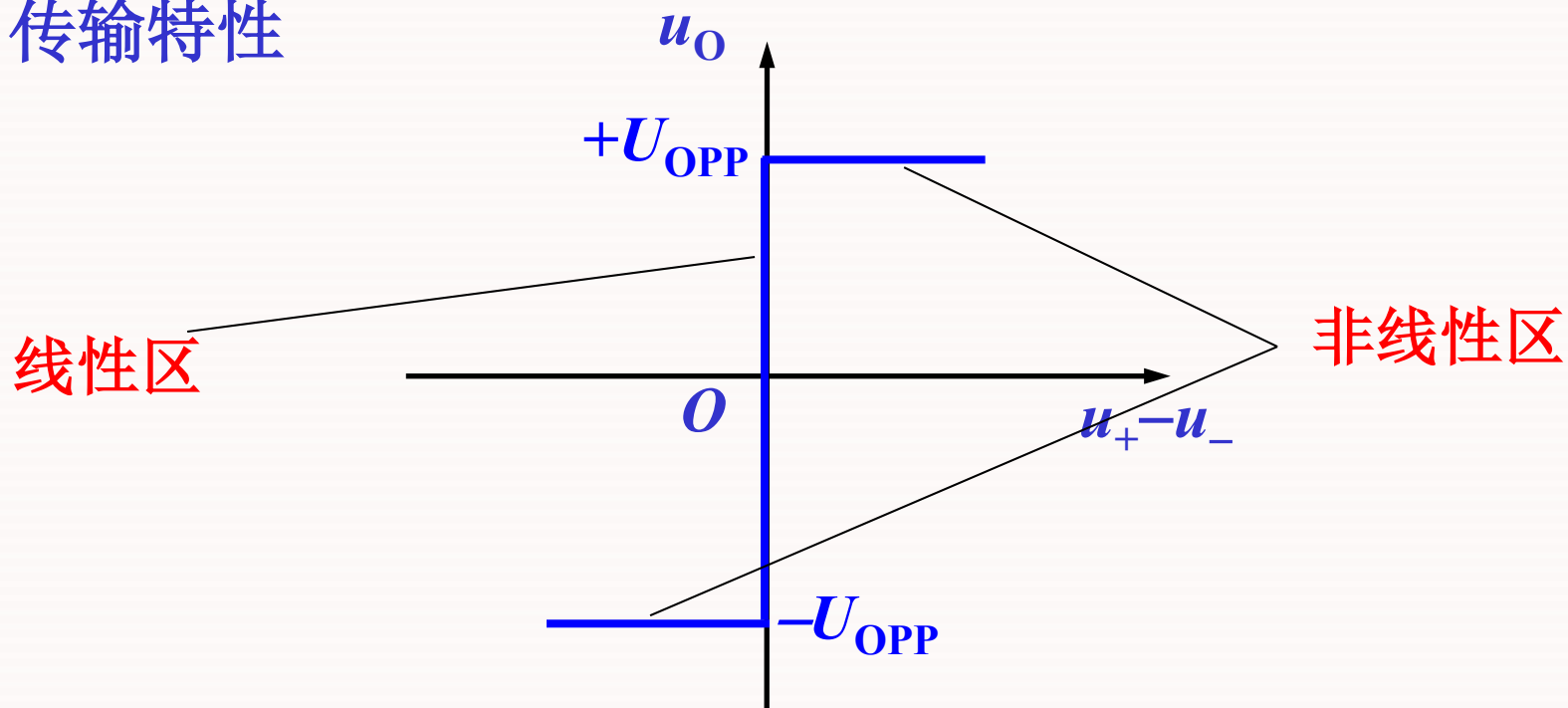
差模输入电阻 $r_{id} = \infty$;

输出电阻 $r_o = 0$;

共模抑制比 $K_{CMR} = \infty$;

第六章：模拟信号运算电路

传输特性

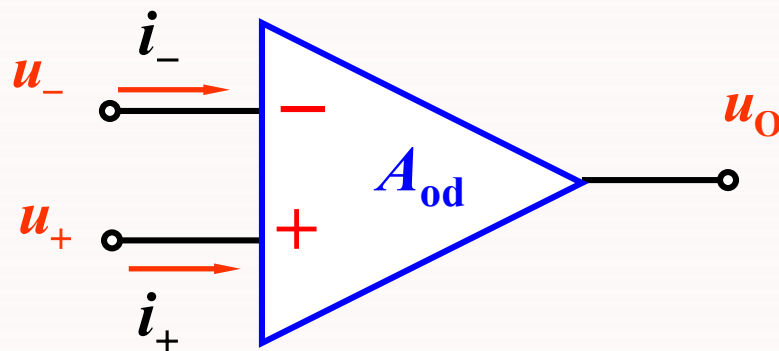


理想运放的传输特性

6.1.2 理想运放工作在线性区时的特点

输出电压与其两个输入端的电压之间存在线性放大关系，即

$$u_o = A_{od}(u_+ - u_-)$$



理想运放工作在线性区特点：

1. 理想运放的差模输入电压等于零

$$(u_+ - u_-) = \frac{u_o}{A_{od}} = 0 \quad \text{即} \quad u_+ = u_- \quad \text{—— “虚短”}$$

2. 理想运放的输入电流等于零

由于 $r_{id} = \infty$ ，两个输入端均没有电流，即

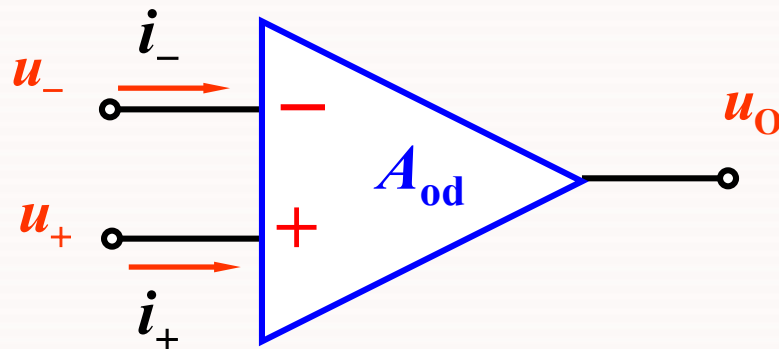
$$i_+ = i_- = 0 \quad \text{—— “虚断”}$$

6.1.3 理想运放在非线性区时的特点

1. u_O 的值只有两种可能

当 $u_+ > u_-$ 时, $u_O = +U_{OPP}$

当 $u_+ < u_-$ 时, $u_O = -U_{OPP}$



在非线性区内, $(u_+ - u_-)$ 可能很大, 即 $u_+ \neq u_-$ 。
“虚短”不存在

2. 理想运放的输入电流等于零

$$i_+ = i_- = 0$$

——“虚断”

6.2 比例运算电路

6.2.1 反相比比例运算电路

由于“虚断”， $i_+ = 0$ ， $u_+ = 0$ ；

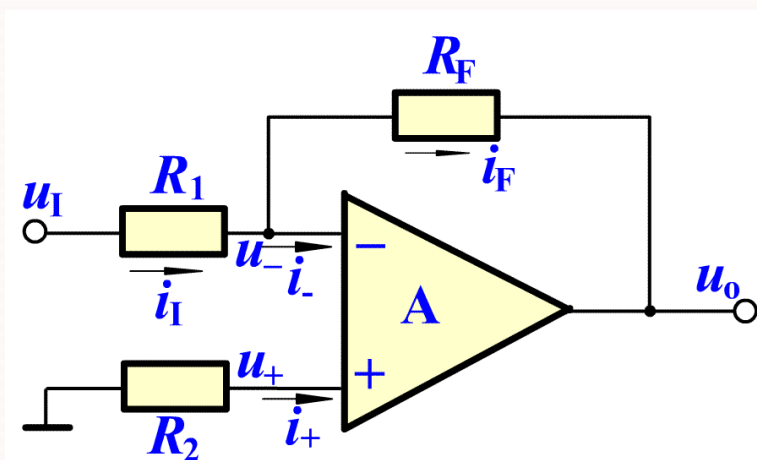
由于“虚短”， $u_- = u_+ = 0$

——“虚地”

由 $i_1 = i_F$ ，得 $\frac{u_1 - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_o}{R_F}$

$$u_o = -\frac{R_F}{R_1} u_1$$

$$R_2 = R_1 // R_F$$



比例系数与运放参数无关，取决于外接电阻，比例系数为 $-R_F/R_1$ ，电路实现反相比比例运算；

$$R_{if} = R_1$$

6.2.2 同相比例运算电路

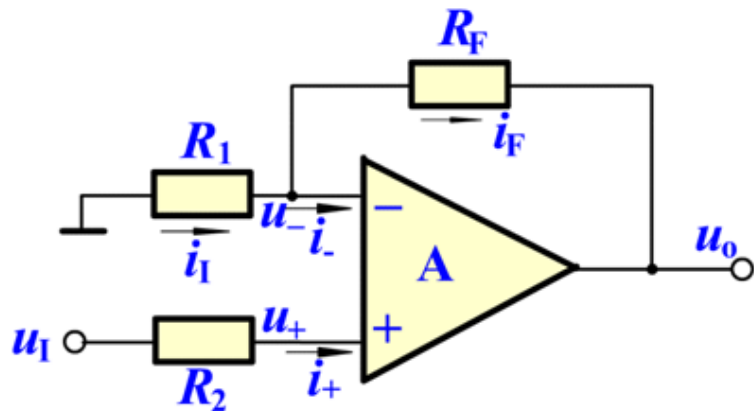
根据“虚短”和“虚断”的特点，可知

$$i_+ = i_- = 0;$$

$$u_- = u_+ = u_I$$

由 $i_I = i_F$ ，可推得 $u_O = (1 + \frac{R_F}{R_1})u_I$

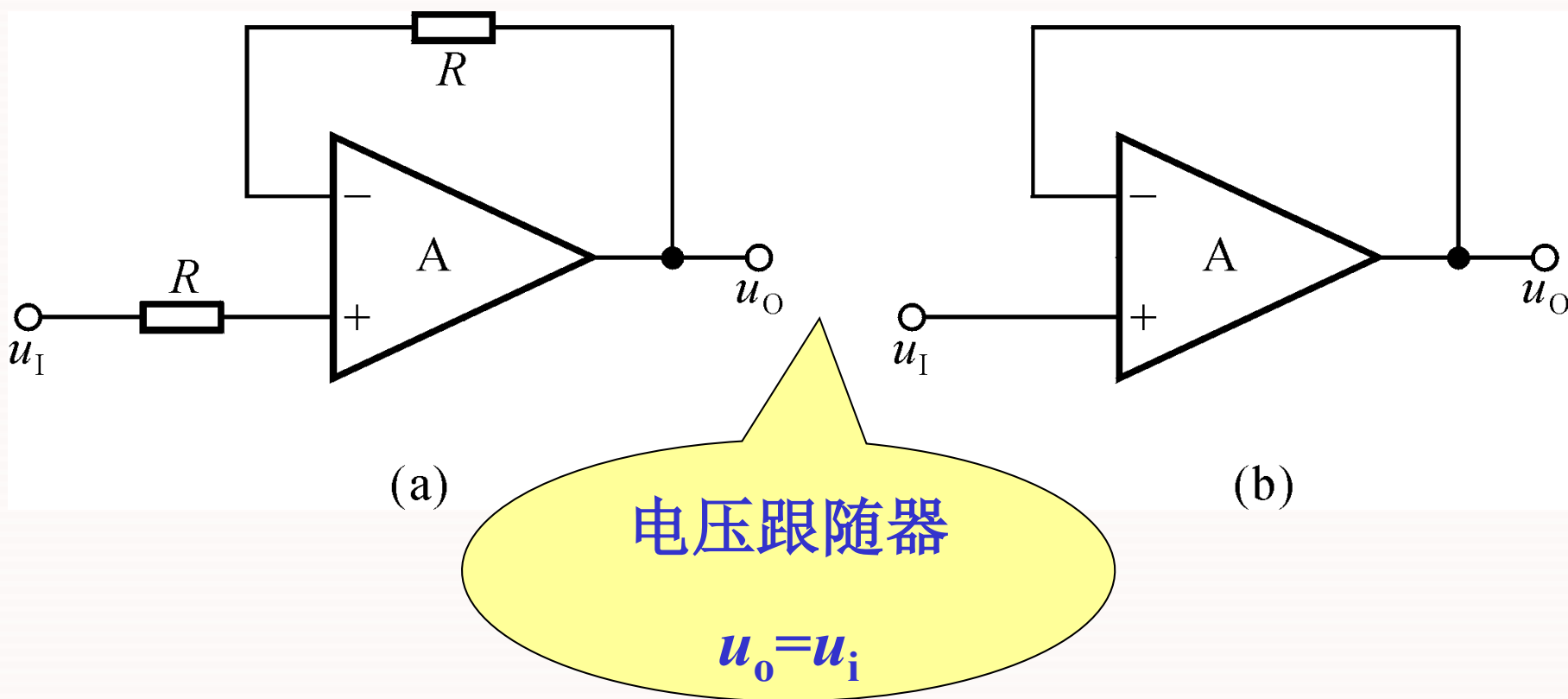
$$R_2 = R_1 // R_F$$



比例系数与运放参数无关，取决于外接电阻，比例系数为 $1 + R_F/R_1$ ，电路实现同相比例运算；

第六章：模拟信号运算电路

当 $R_F=0$ 或 $R_1=\infty$ ，比例系数为1——电压跟随器



6.2.3 差分比例运算电路

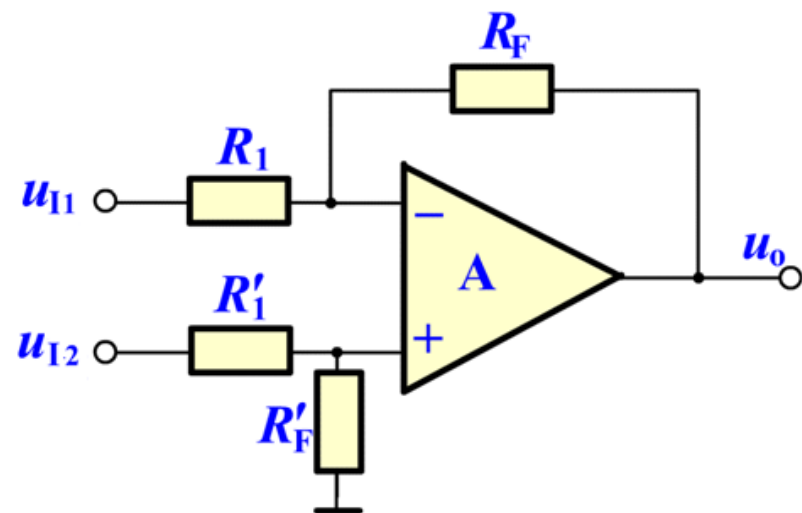
要求 $R_1 = R'_1$

$R_F = R'_F$

推导运算关系得

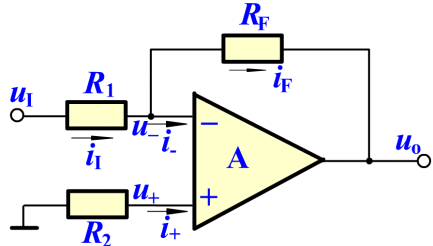
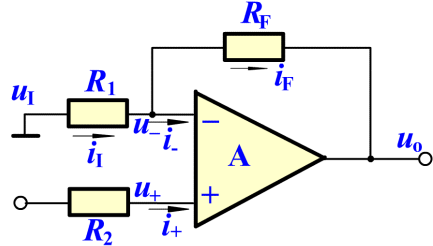
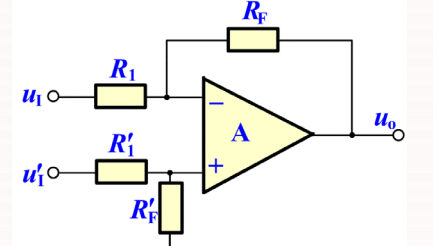
$$u_O = -\frac{R_F}{R_1} u_{I1} + \frac{R_F}{R_1} u_{I2} = -\frac{R_F}{R_1} (u_{I1} - u_{I2})$$

电路输出电压与两输入电压之差成正比，实现了差分比例运算（或减法运算）；



第六章 模拟信号运算电路

三种比例运算电路之比较

	反相输入	同相输入	差分输入
电路组成	 <p>要求 $R_2 = R_1 // R_F$</p>	 <p>要求 $R_2 = R_1 // R_F$</p>	 <p>要求 $R_1 = R_1' \ R_F = R_F'$</p>
电压放大倍数	$A_{uf} = \frac{u_O}{u_I} = -\frac{R_F}{R_1}$ <p>u_O 与 u_I 反相, A_{uf} 可大于、小于或等于 1</p>	$A_{uf} = \frac{u_O}{u_I} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$ <p>u_O 与 u_I 同相, 放大倍数可大于或等于 1</p>	$A_{uf} = \frac{u_O}{u_I - u_I'} = -\frac{R_F}{R_1}$ <p>(当 $R_1 = R_1'$, $R_F = R_F'$ 时)</p>
性能特点	实现反相比值运算; “虚地”	实现同相比值运算; “虚短”但不“虚地”	实现差分比值运算(减法) “虚短”但不“虚地”

6.3 求和电路

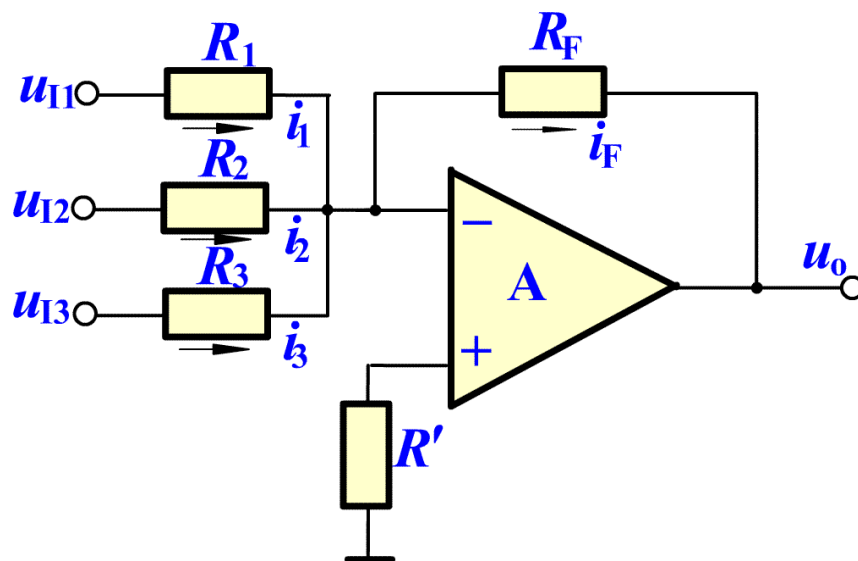
求和电路的输出量反映多个模拟输入量相加的结果。

6.3.1 反相输入求和电路

当改变某一输入回路电阻时，仅改变输出电压与该路输入电压之间的比例关系，对其他各路没有影响，因此调节比较方便；

由于“虚地”，运放输入端无共模电压；

实际电路设计中，反相输入方式应用较广泛。

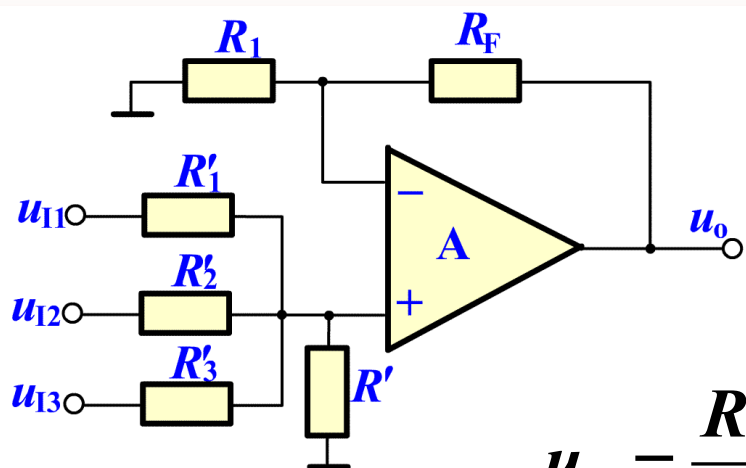


$$u_O = -\left(\frac{R_F}{R_1} u_{I1} + \frac{R_F}{R_2} u_{I2} + \frac{R_F}{R_3} u_{I3}\right) \quad R' = R_1 // R_2 // R_3 // R_F$$

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R$ 时，

$$u_O = -\frac{R_F}{R_1} (u_{I1} + u_{I2} + u_{I3})$$

6.3.2 同相输入求和电路



$$u_+ = \frac{R_+}{R'_1} u_{I1} + \frac{R_+}{R'_2} u_{I2} + \frac{R_+}{R'_3} u_{I3}$$

其中： $R_+ = R'_1 // R'_2 // R'_3 // R'$

解得：

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_+ = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \left(\frac{R_+}{R'_1} u_{I1} + \frac{R_+}{R'_2} u_{I2} + \frac{R_+}{R'_3} u_{I3} \right)$$

由于“虚断”， $i_+ = i_- = 0$ ，故因 R_+ 与各输入回路电阻均有关，故调节某一回路电阻以达到给定关系时，其他各路输入电压与输出电压之间的比值也将随之变化，需反复调节才能确定合适参数，故估算和调试过程较麻烦；

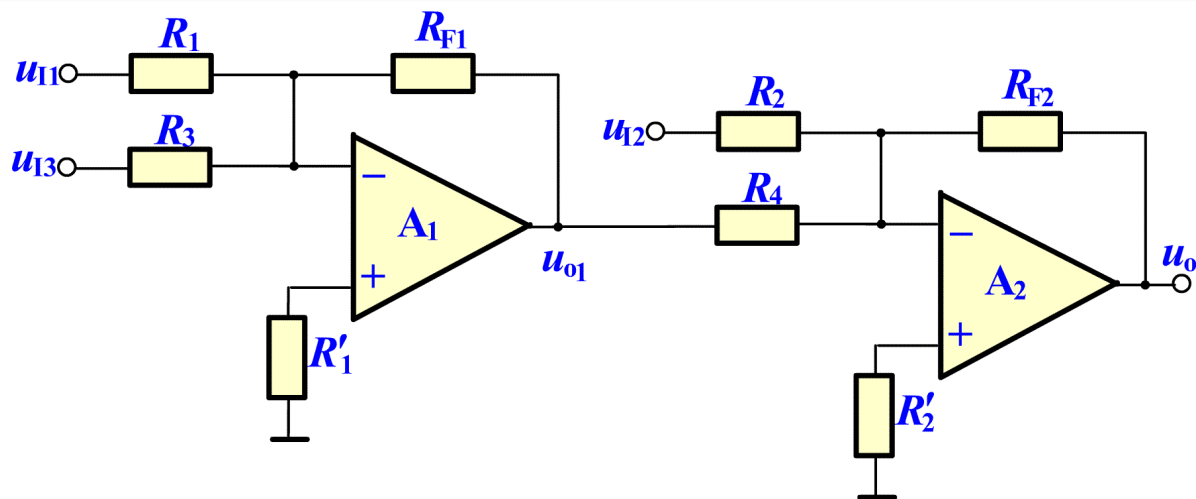
不存在“虚地”，运放输入端共模输入电压较高；

实际电路设计中，同相求和电路不如反相输入方式应用广泛。

第六章 模拟信号运算电路

当求和电路采用双端输入方式时，可以实现多个输入信号的同时加减运算，但该种电路参数的调整比较繁琐，因此实际应用中很少采用。如需实现多个输入信号同时加减运算，可以考虑采用两级反相求和电路。

例：推导运算关系



解：

$$u_{O1} = -\left(\frac{R_{F1}}{R_1} u_{I1} + \frac{R_{F1}}{R_3} u_{I3}\right)$$

$$u_O = -\left(\frac{R_{F2}}{R_2} u_{O1} + \frac{R_{F2}}{R_4} u_{I2}\right) = \frac{R_{F2}}{R_2} \cdot \frac{R_{F1}}{R_1} u_{I1} + \frac{R_{F2}}{R_2} \cdot \frac{R_{F1}}{R_3} u_{I3} - \frac{R_{F2}}{R_4} u_{I2}$$

6.4 积分和微分电路

6.4.1 积分电路

由于“虚地”， $u_- = 0$ ，故

$$u_O = -u_C$$

又由于“虚断”， $i_I = i_C$ ，故

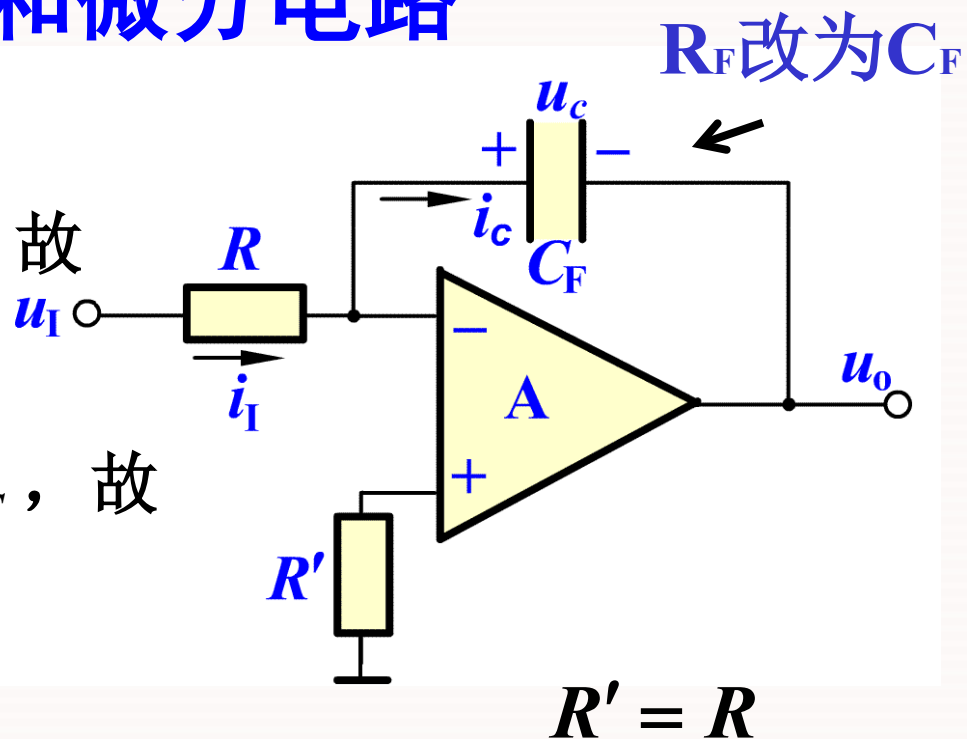
$$u_I = i_I R = i_C R$$

得：

$$u_O = -u_C = -\frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{RC} \int u_I dt$$

$$\tau = RC$$

——积分时间常数

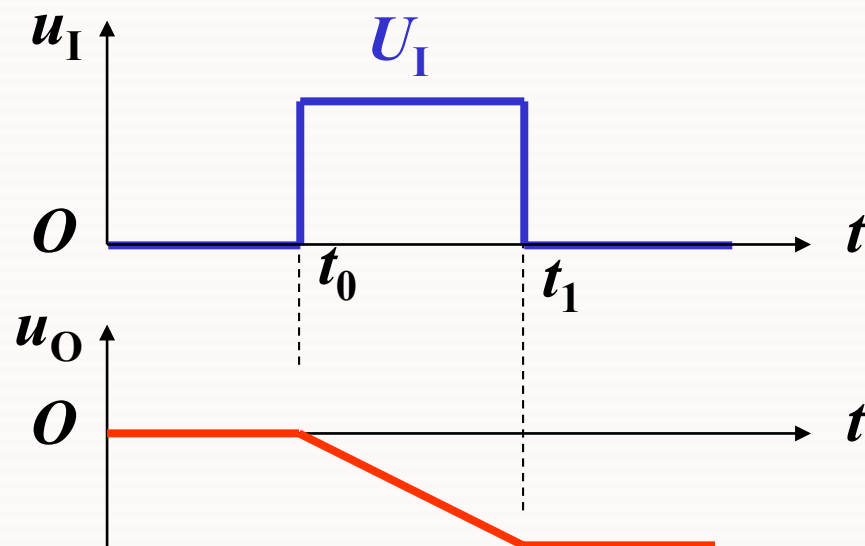


积分电路的输入、输出波形

(1) 输入电压为矩形波

当 $t \leq t_0$ 时, $u_I = 0$,
 $u_O = 0$;

当 $t_0 < t \leq t_1$ 时,
 $u_I = U_I = \text{常数}$,



$$u_O = -\frac{1}{RC} \int u_I dt = -\frac{U_I}{RC} (t - t_0)$$

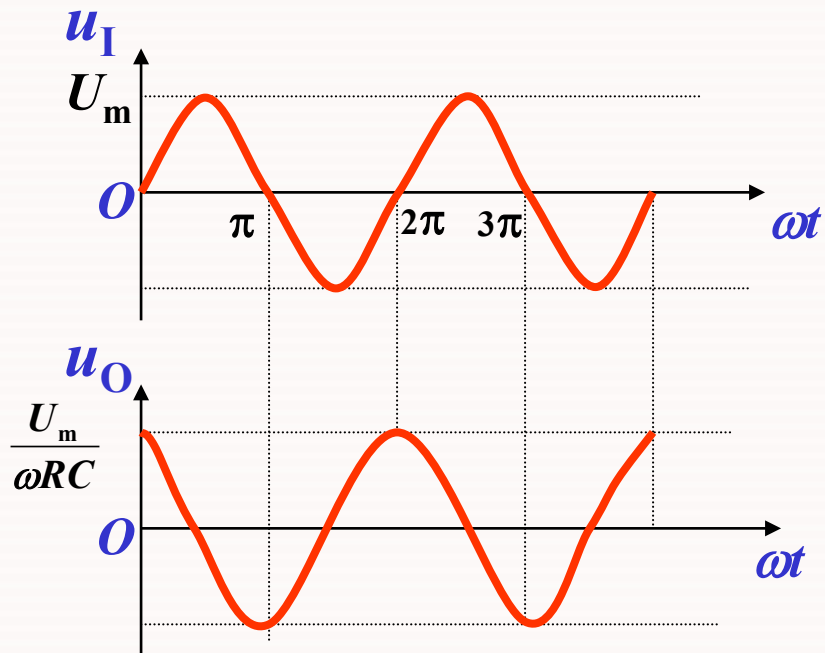
即输出电压随时间而向负方向直线增长。

当 $t > t_1$ 时, $u_I = 0$, u_O 保持 $t = t_1$ 时的输出电压值不变。

(二) 输入电压为正弦波

$$u_I = U_m \sin \omega t$$

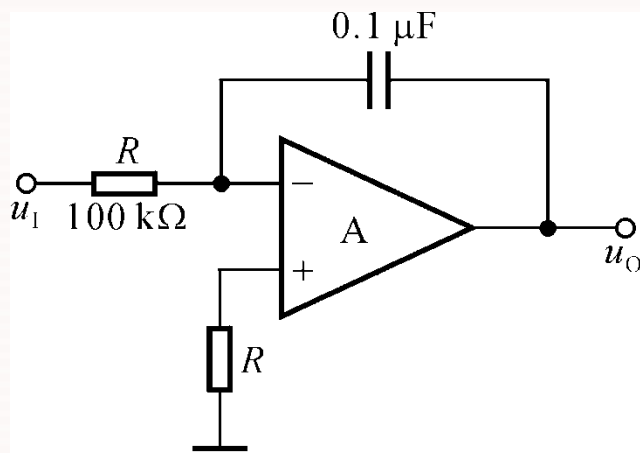
$$\begin{aligned} u_O &= -\frac{1}{RC} \int U_m \sin \omega t dt \\ &= \frac{U_m}{\omega RC} \cos \omega t \end{aligned}$$



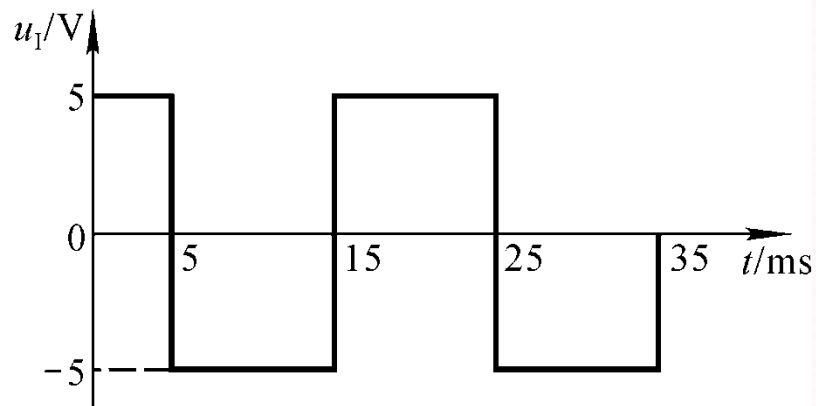
可见，输出电压的相位比输入电压的相位领先 90° 。
因此，此时积分电路的作用是**移相**。

第六章：模拟信号运算电路

例：下图所示电路中，已知输入电压 u_I 的波形如图（b）所示，当 $t=0$ 时 $u_O=0$ 。试画出输出电压 u_O 的波形。



(a)



(b)

第六章：模拟信号运算电路

解：输出电压的表达式为
$$u_O = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} u_I dt + u_O(t_1)$$

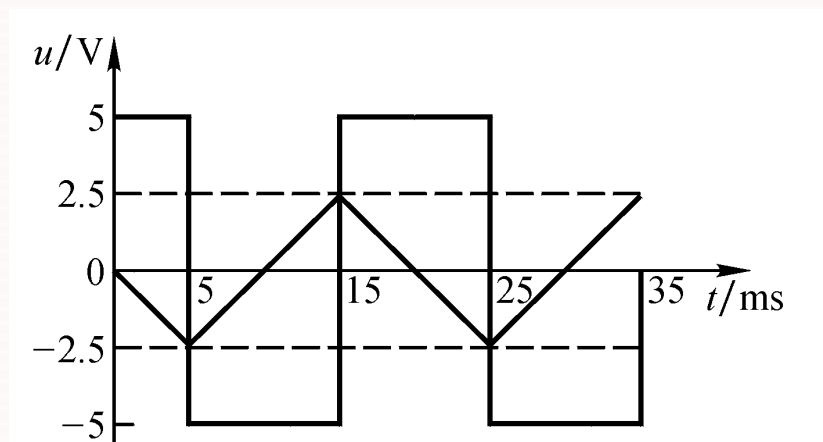
当 u_I 为常量时
$$u_O = -\frac{1}{RC} u_I (t_2 - t_1) + u_O(t_1) = -\frac{1}{10^5 \times 10^{-7}} u_I (t_2 - t_1) + u_O(t_1)$$
$$= -100 u_I (t_2 - t_1) + u_O(t_1)$$

若 $t=0$ 时 $u_O=0$ ，则 $t=5\text{ms}$ 时

$$u_O = -100 \times 5 \times 5 \times 10^{-3} \text{V} = -2.5 \text{V}$$

当 $t=15\text{ms}$ 时

$$u_O = [-100 \times (-5) \times 10 \times 10^{-3} + (-2.5)] \text{V} = 2.5 \text{V}$$



6.4.2 微分电路

由于“虚断”， $i_- = 0$ ，故

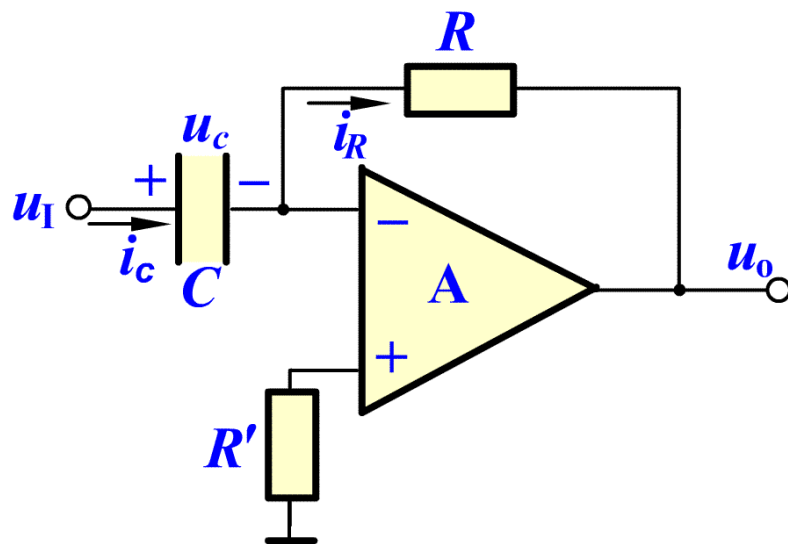
$$i_C = i_R$$

又由于“虚地”， $u_+ = u_- = 0$ ，故

$$u_O = -i_R R = -i_C R = -RC \frac{du_C}{dt}$$

可见，输出电压正比于输入电压对时间的微分。

微分电路的作用：实现波形变换。



第六章：模拟信号运算电路

作业：7-9；7-17第一问。