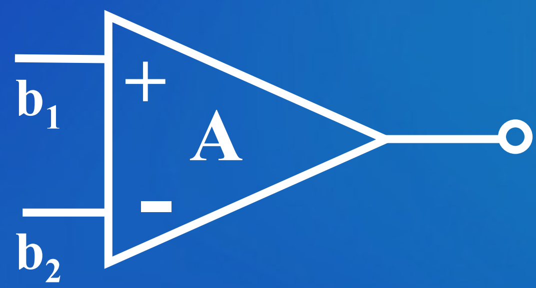
6 集成运算放大器组成的运算电路

理想运放的理想参数:

1. 开环增益: $A_{VO} \approx \infty$
2. 输入电阻: $R_i \approx \infty$
3. 输出电阻: $R_o \approx 0$
4. 开环通频带: $f_{BW} \approx \infty$
5. 共模抑制比: $K_{CMR} \approx \infty$

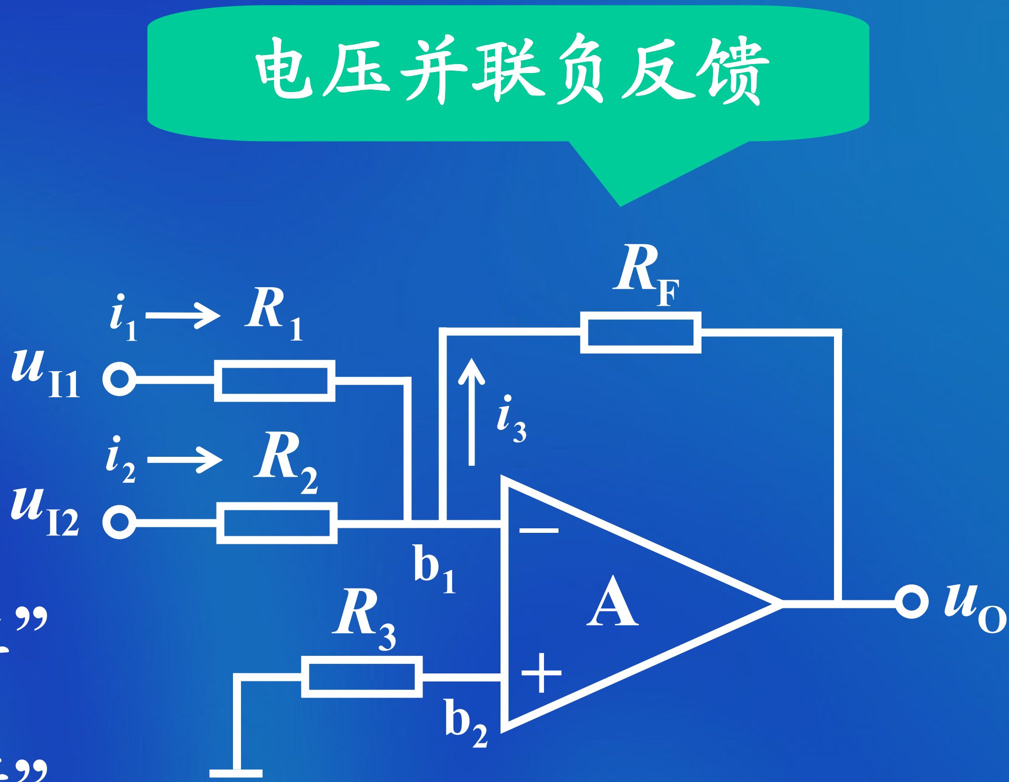


运放工作状态: $\begin{cases} \text{线性---有负反馈} \\ \text{非线性---无反馈或有正反馈} \end{cases}$

6.1 基本运算电路

6.1.1 加法运算

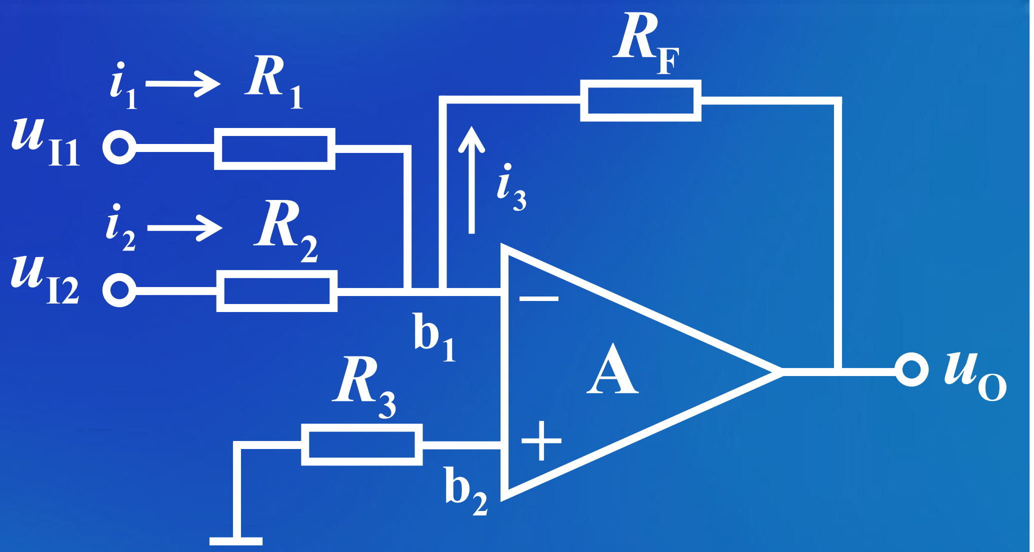
1. 反相输入加法电路



运放工作于线性状态

由两个分析依据 { "虚短" "虚断"

$$
\begin{cases}
i_1 + i_2 \approx i_3 \\
u_{b1} \approx u_{b2} = 0
\end{cases}
$$



其中

$$i_1 = \frac{u_{I1} - u_{b1}}{R_1} = \frac{u_{I1}}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{u_{I2} - u_{b1}}{R_2} = \frac{u_{I2}}{R_2}$$

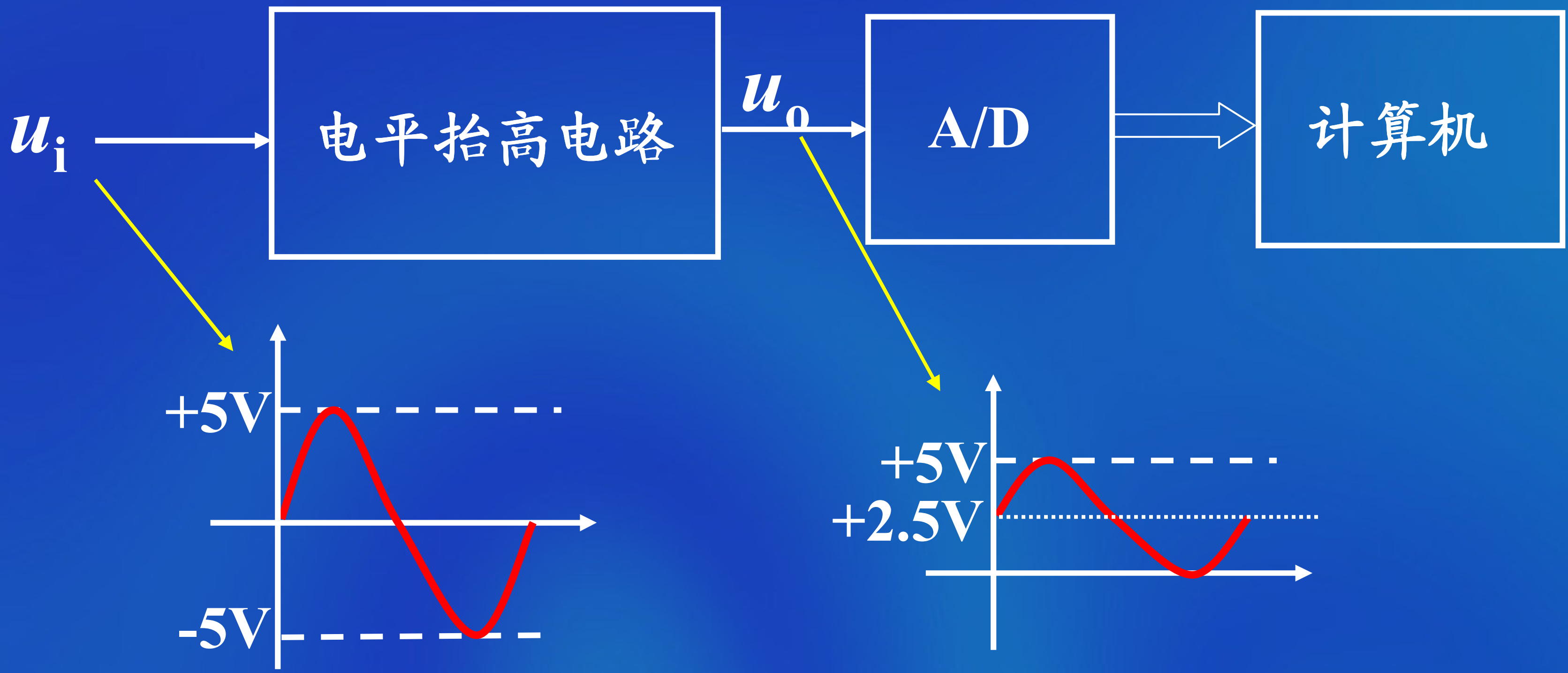
$$i_3 = \frac{u_{b1} - u_O}{R_F} = -\frac{u_O}{R_F}$$

故有

$$-\frac{u_O}{R_F} \approx \frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2}$$

$$u_O = -\left(\frac{R_F}{R_1} u_{I1} + \frac{R_F}{R_2} u_{I2}\right)$$

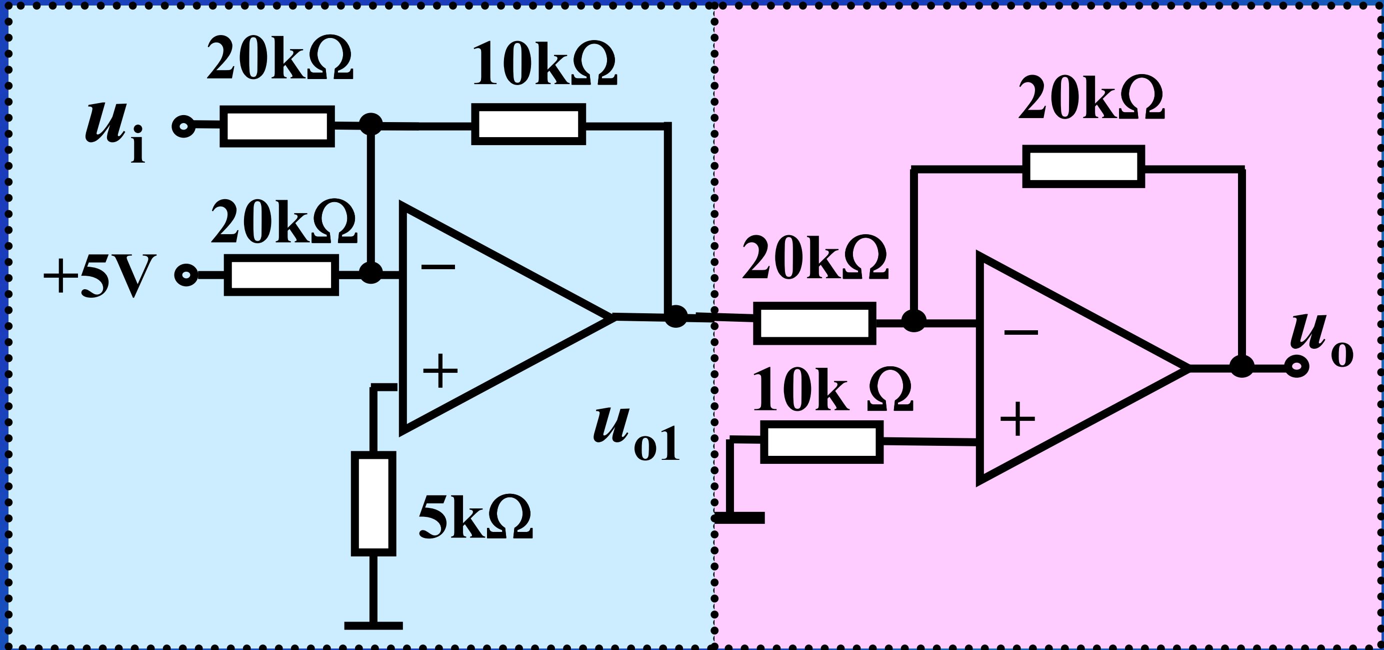
例：A/D变换器要求其输入电压的幅度为0～+5V，现有信号变化范围为-5V~+5V。试设计一电平抬高电路，将其变化范围变为0~+5V。



$$u_o = 0.5u_i + 2.5 \quad \text{V}$$

$$u_o = 0.5u_i + 2.5 \quad \text{V}$$

$$= 0.5\,(u_i + 5) \quad \text{V}$$



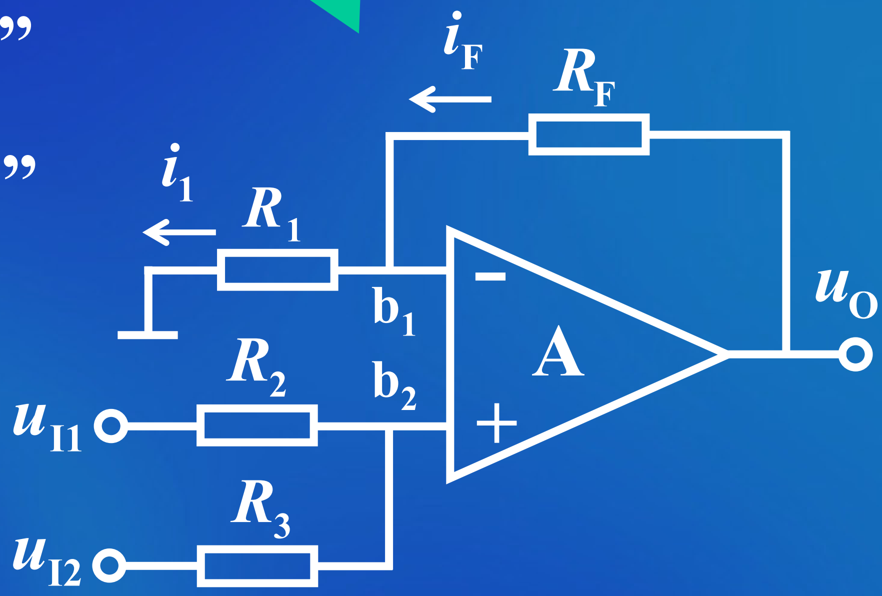
$$u_{o1} = -\frac{10}{20}\times(u_i + 5) = -0.5(u_i + 5)$$

$$u_o = -\frac{20}{20}\times u_{o1} = 0.5(u_i + 5)$$

2. 同相输入加法电路

运放工作于线性状态

电压串联负反馈



根据两个分析依据 $\begin{cases}\text{“虚短”}\\ \text{“虚断”}\end{cases}$

由图可知

$$\begin{cases} i_1 \approx i_F \\ u_{b1} \approx u_{b2} \end{cases}$$

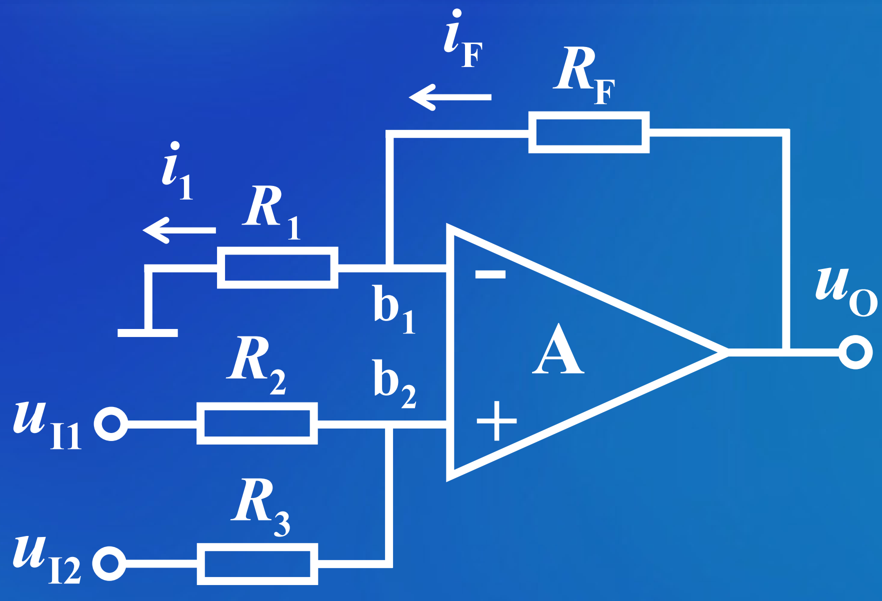
其中

$$i_1 = \frac{u_{b1}}{R_1}$$

$$i_f = \frac{u_O - u_{b1}}{R_F}$$

故 $u_O = (1 + \frac{R_F}{R_1}) u_{b2}$

$$u_O=(1+\frac{R_F}{R_1})u_{b2}$$



同相端电压

$$u_{b2}=\frac{R_3}{R_2+R_3}u_{I1}+\frac{R_2}{R_2+R_3}u_{I2}$$

$$u_O=\frac{R_1+R_F}{R_1}u_{b2}$$

$$=\left(1+\frac{R_F}{R_1}\right)(K_1u_{I1}+K_2u_{I2})$$

式中

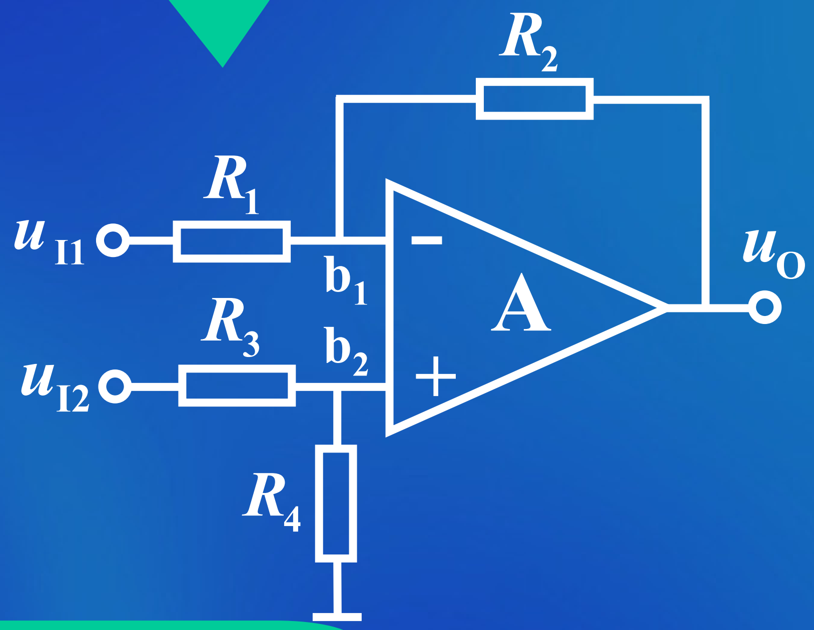
$$K_1=\frac{R_3}{R_2+R_3}$$

$$K_2=\frac{R_2}{R_2+R_3}$$

6.1.2 减法运算

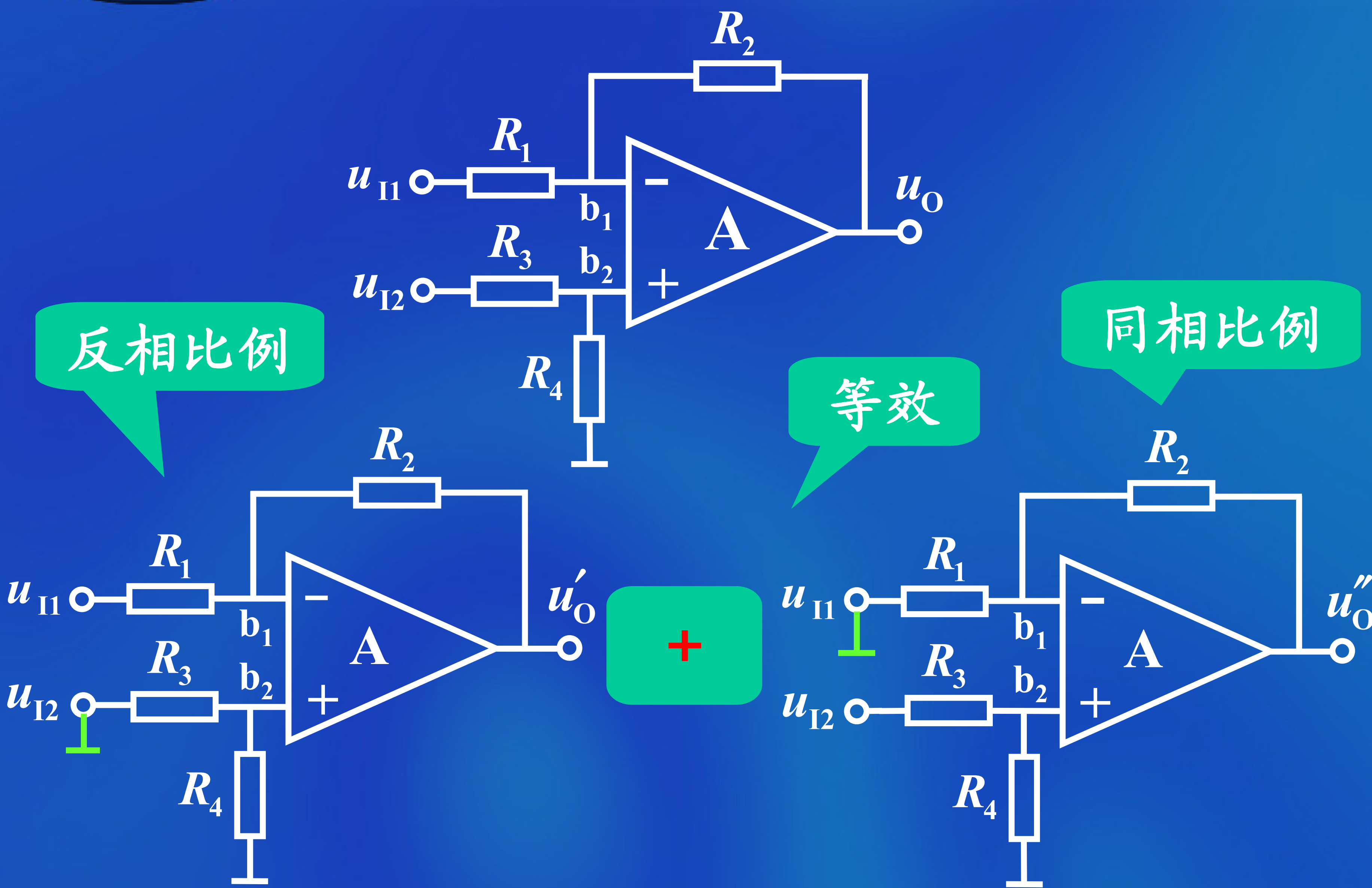
电压负反馈

运放工作于线性状态

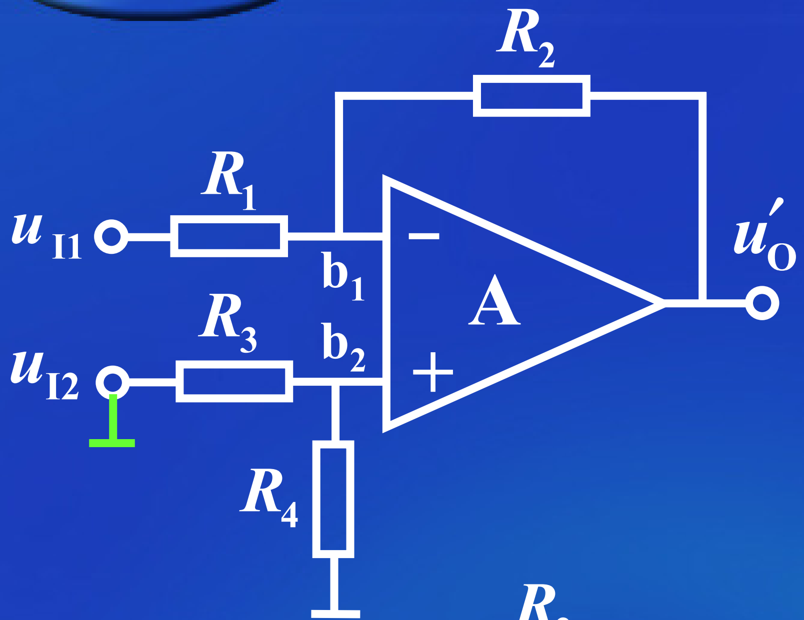


根据叠加原理

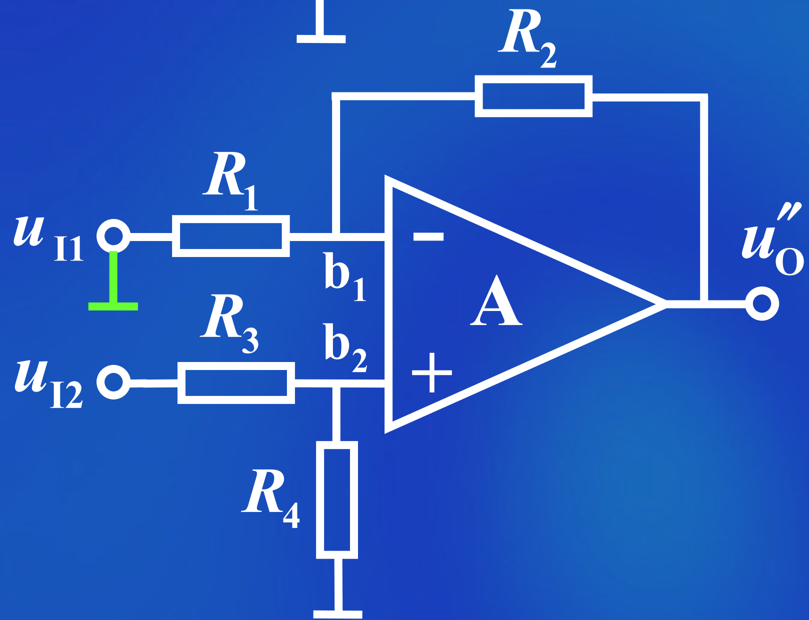
减法运算器 $\xrightarrow{\text{分解}}$ 反相比例器、同相比例器



R_2
R_1
u_{I1}
u_O
b_1
A
R_3
b_2
u_{I2}
R_4
反相比例
等效
同相比例
u'_O
+
u''_O



$$u'_O = -\frac{R_2}{R_1} u_{I1}$$



$$u''_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_{b2}$$

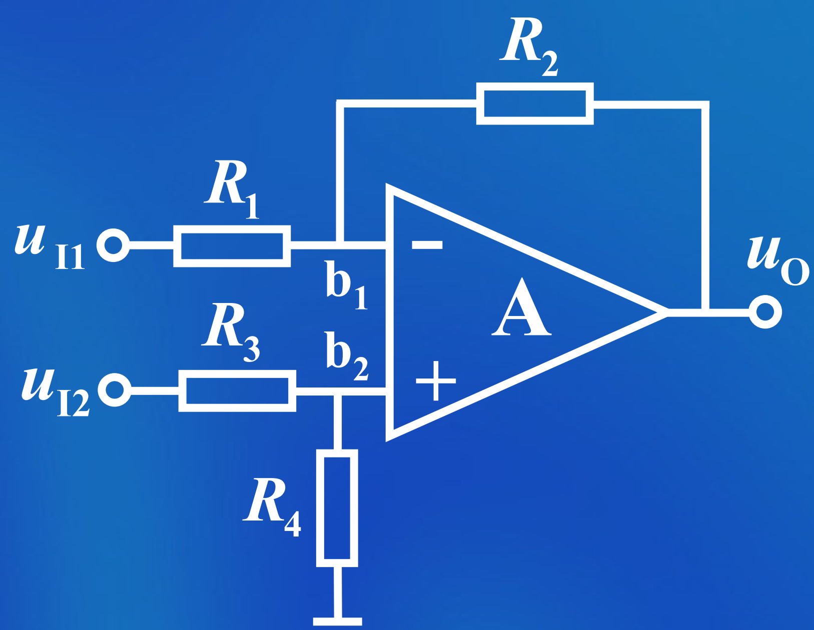
$$= \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) u_{I2}$$

$$u_O = u_O' + u_O''$$

$$= -\frac{R_2}{R_1}u_{I1} + \left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{R_4}{R_3+R_4}\right)u_{I2}$$

如果 $R_1 = R_3 \qquad R_2 = R_4$

则 $u_O = \frac{R_2}{R_1}(u_{I2} - u_{I1})$

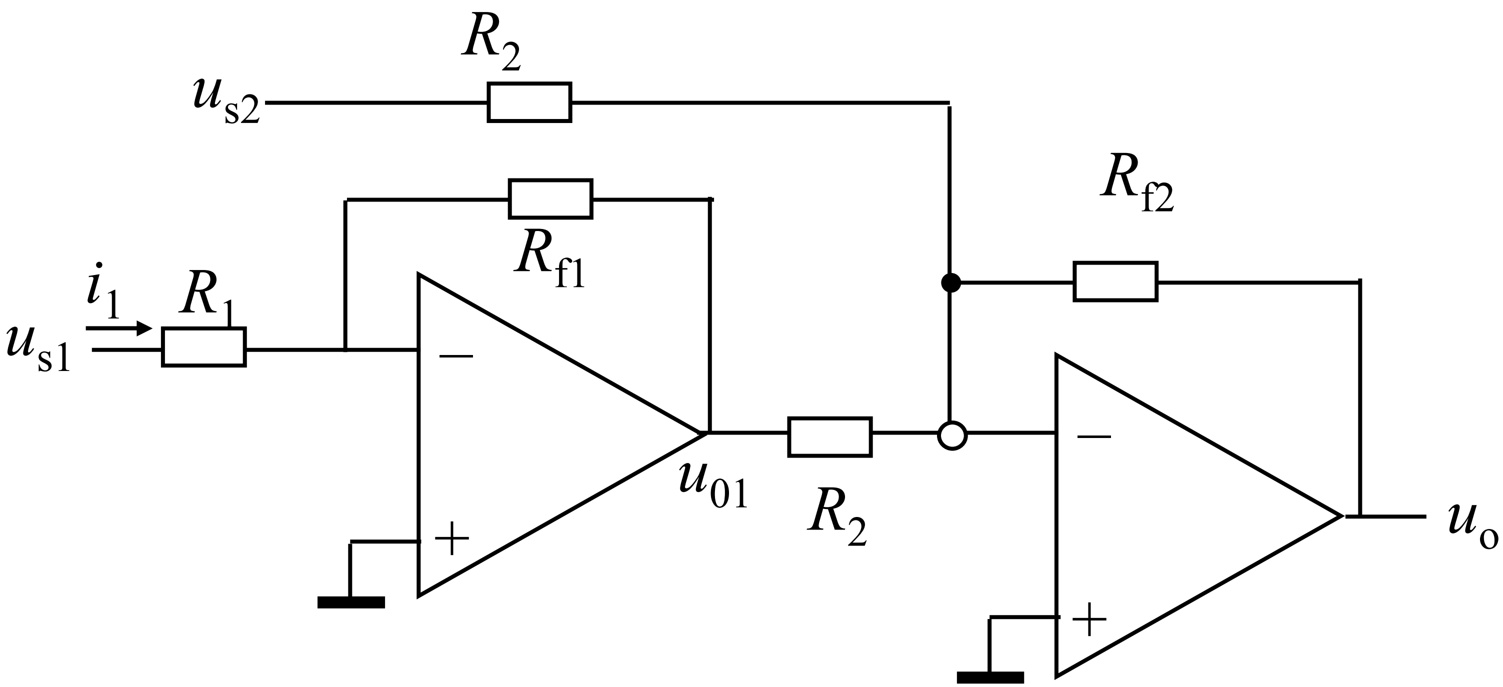


如果 $R_1 = R_2$

则 $u_O = u_{I2} - u_{I1}$

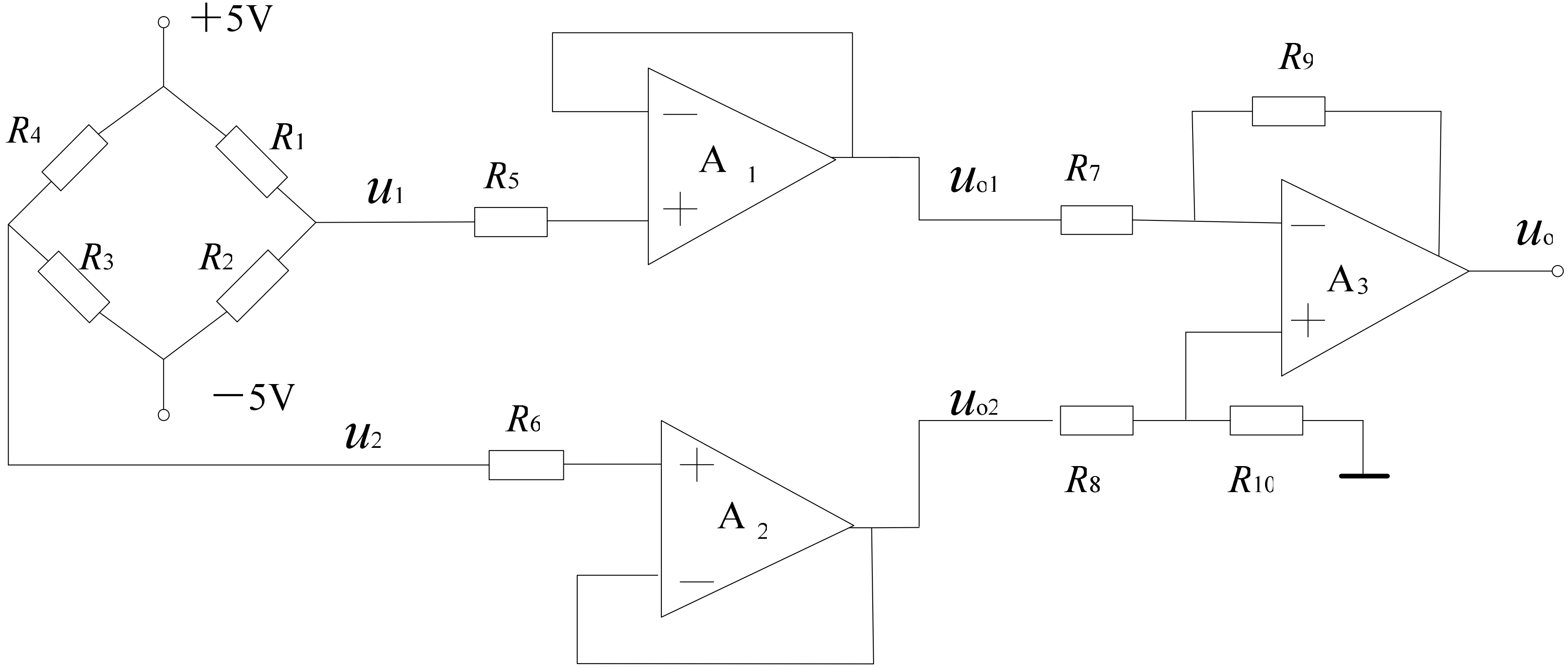
思考　可有其它电路实现减法运算

利用反相求和以实现减法运算

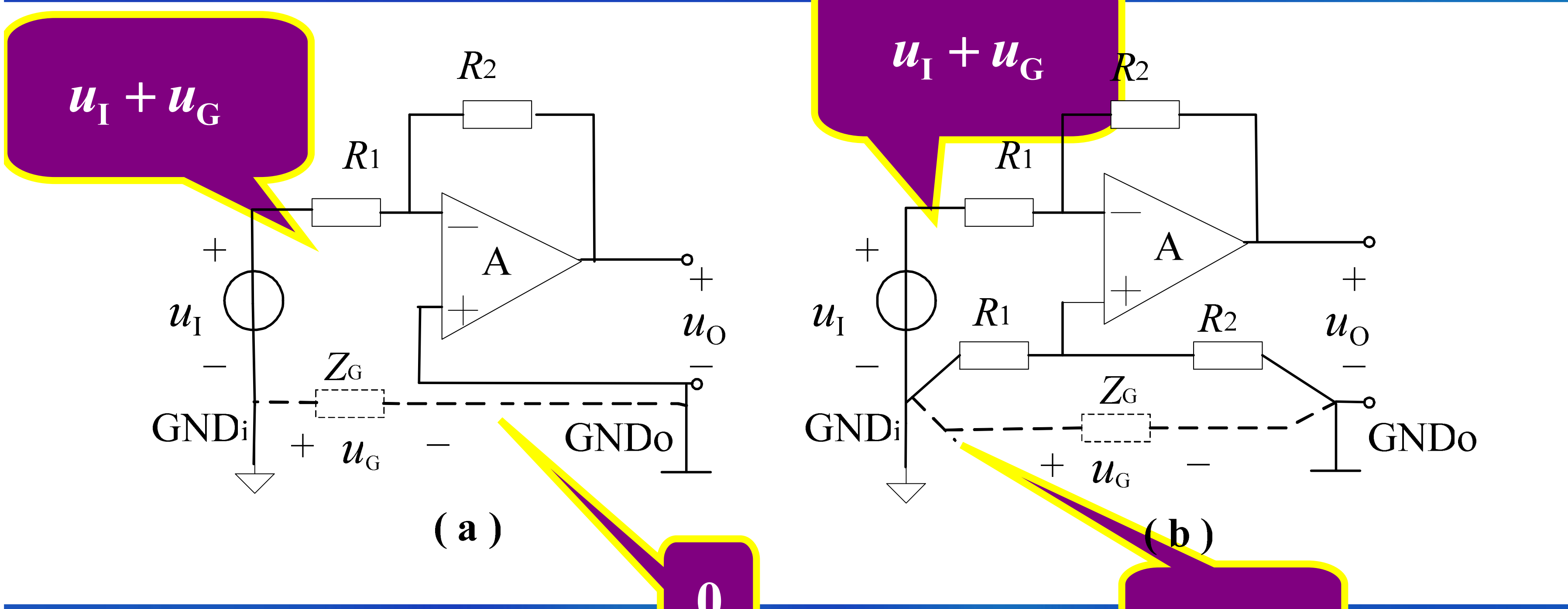


应用举例

1.测量电桥输出的电压信号和分别送入由运放A1和A2组成的高输入阻抗的电压跟随器，A3构成差动输入放大器，放大电桥输出电压 和的差值，而这一信号与压力相关。



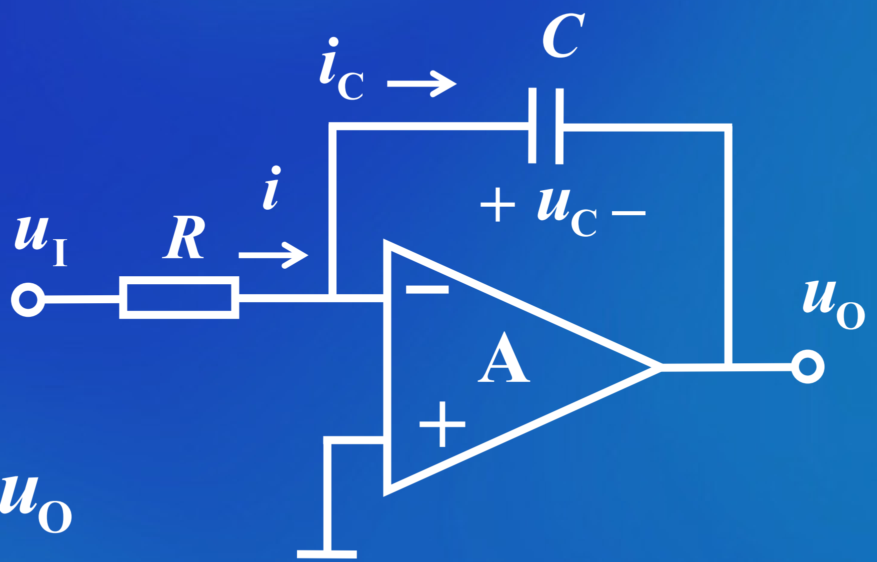
2.在实际应用中，信号源与放大器之间有一定距离，且与其它电路共用接地总线。而这些地线存在分布阻抗（包括电阻、电容和电感），在电流流过时将形成电压降，从而引起总线不同位置的微小电位差异。说明哪种电路更能消除地线引入的干扰？



$$u_O = -\frac{R_2}{R_1}(u_I + u_G)$$

$$u_O = -\frac{R_2}{R_1}(u_I + u_G - u_G) = -\frac{R_2}{R_1}u_I$$

6.1.3 积分运算



由图可知

$$i_C \approx i \qquad i = \frac{u_I}{R}$$

其中 $i_C = C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t} \qquad u_C = -u_O$

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

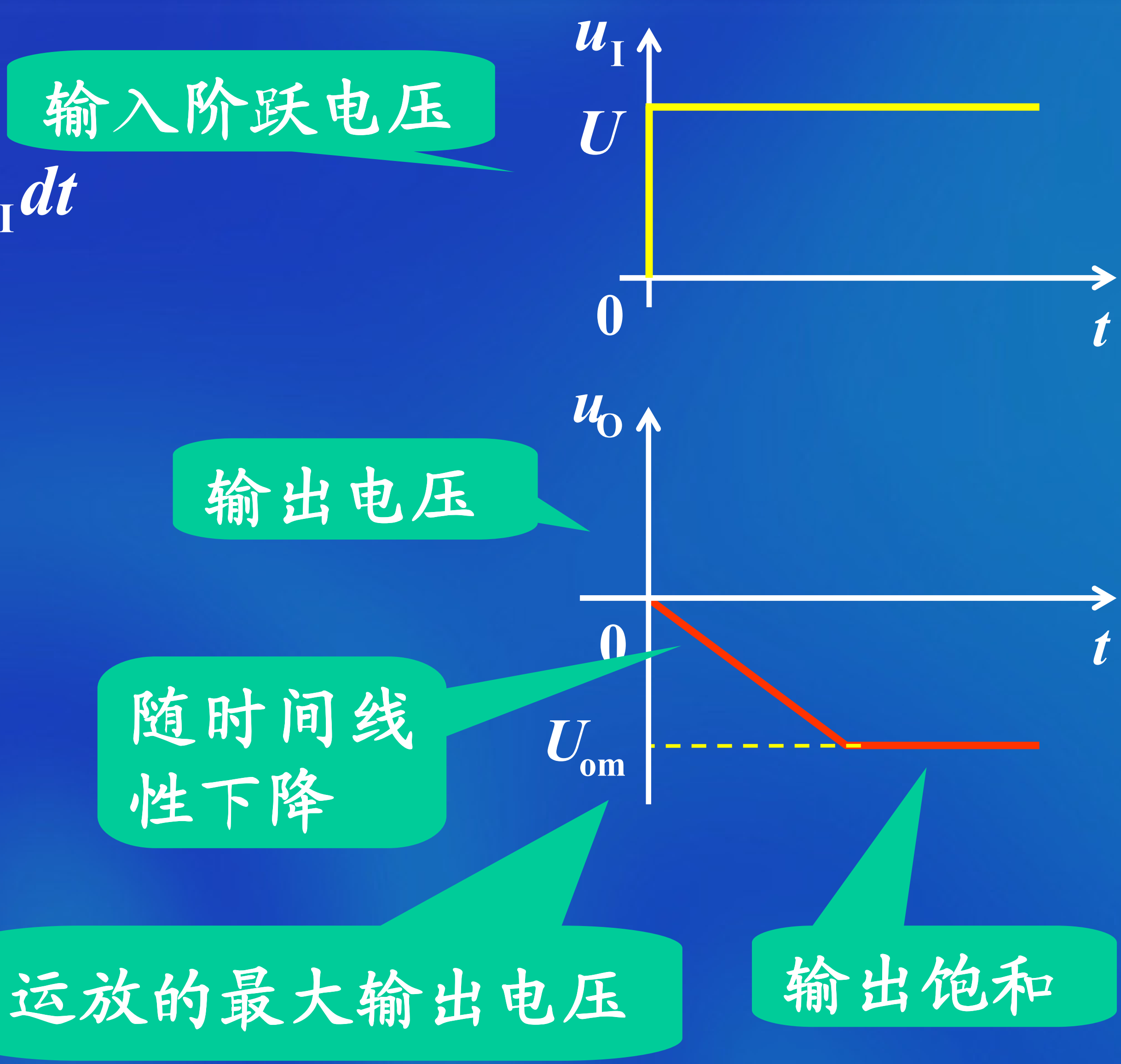
如果计算一个时间段的电压，则

$$u_O = -\frac{1}{RC}\int_{t_1}^{t_2} u_I dt + u_O(t_1)$$

$$u_O = -\frac{1}{RC}\int_0^t u_I dt$$

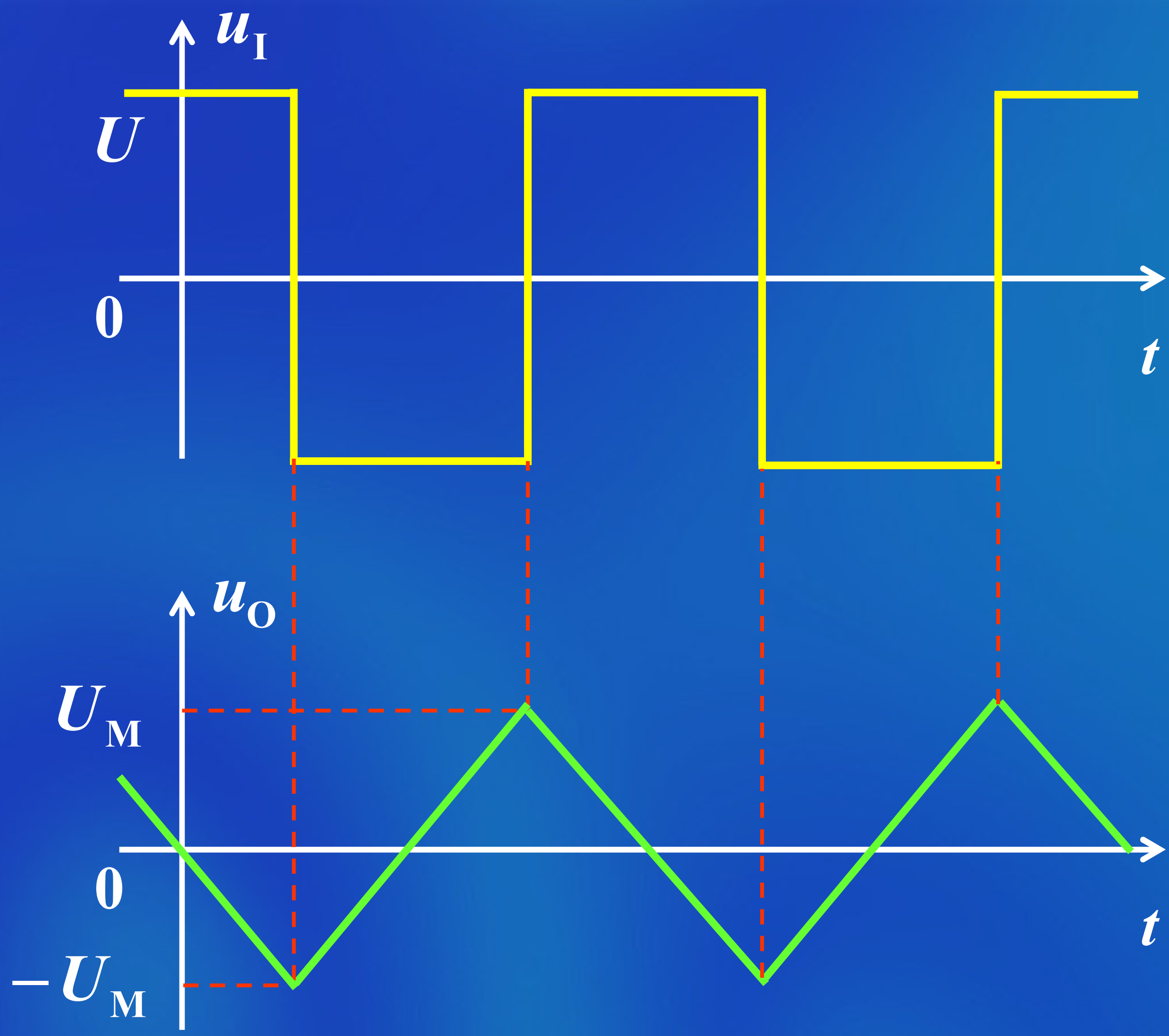
$$= -\frac{1}{RC}\int_0^t U dt$$

$$= -\frac{U}{RC}t$$



输入电压

输出电压

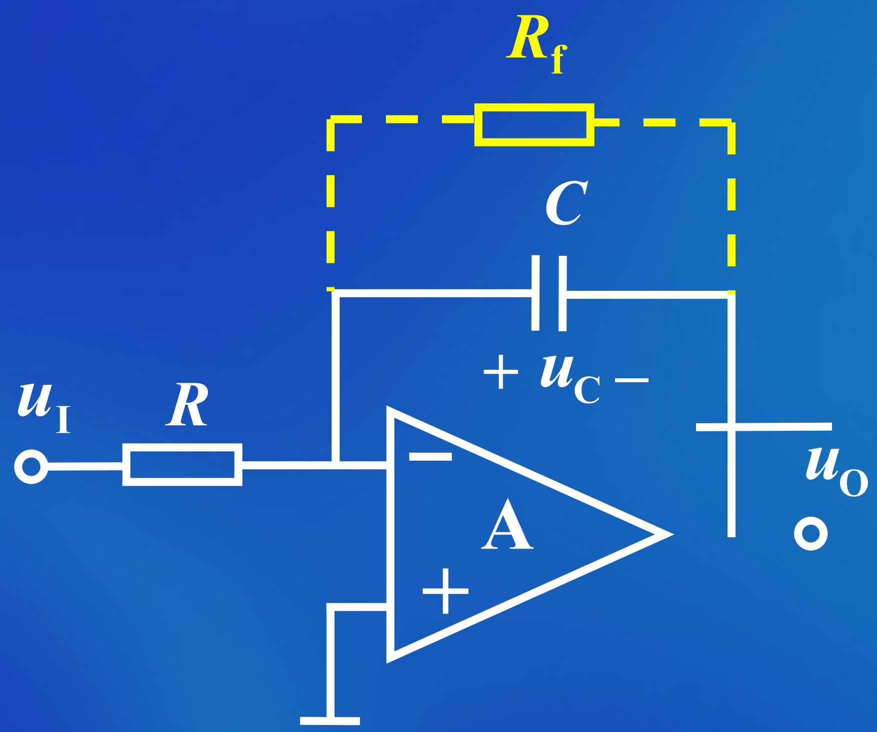


$U_M < U_{om}$

积分电路的主要用途:

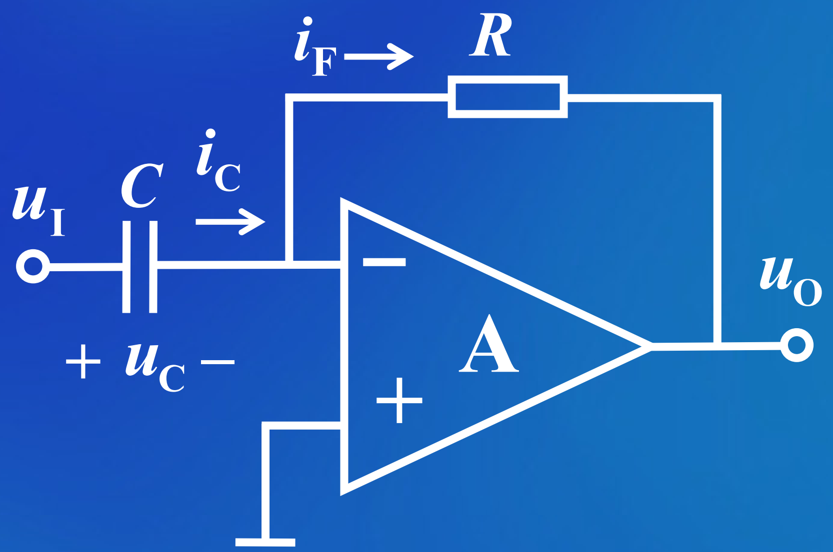
1. 在电子开关中用于延迟;
2. 波形变换;　　例: 将方波变为三角波
3. A/D转换中将电压量变为时间量;
4. 移相.　　例: 正弦波变为余弦波

积分电路的改进:



以防频率非常低时积分电路的增益会非常大，
电路将有可能工作在临界开环状态 。

6.1.4 微分运算



由图可知

$$i_F \approx i_C$$

其中

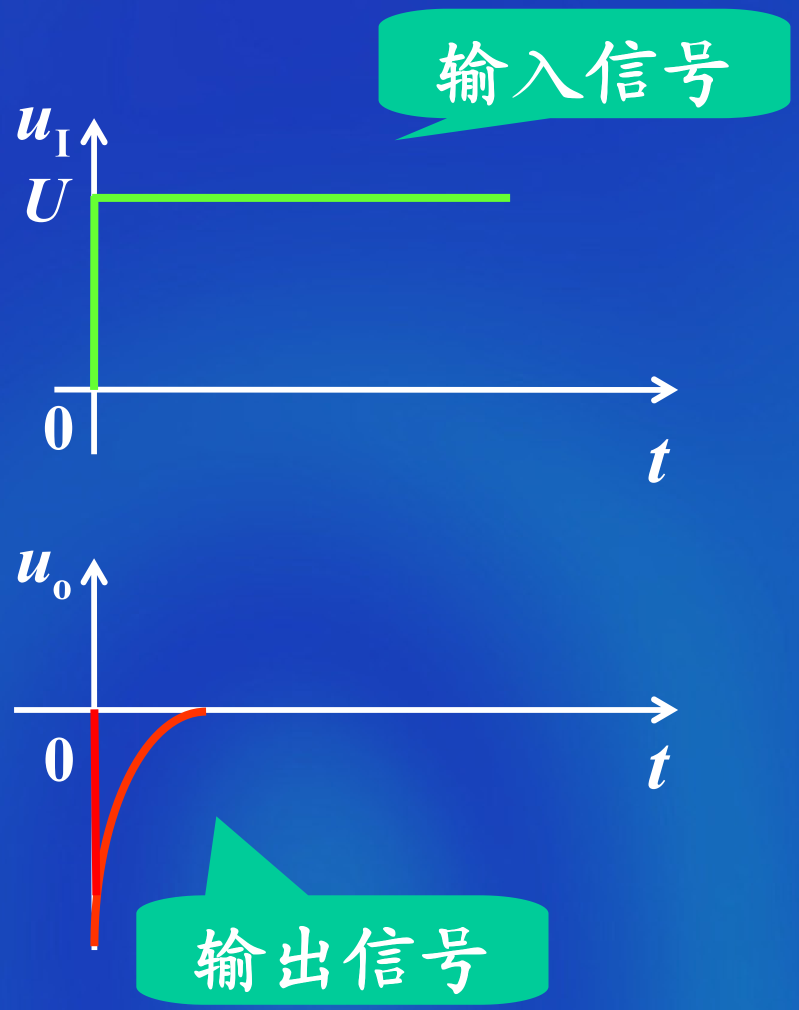
$$i_C = C\frac{du_C}{dt} = C\frac{du_I}{dt}$$

$$i_F = -\frac{u_O}{R}$$

故

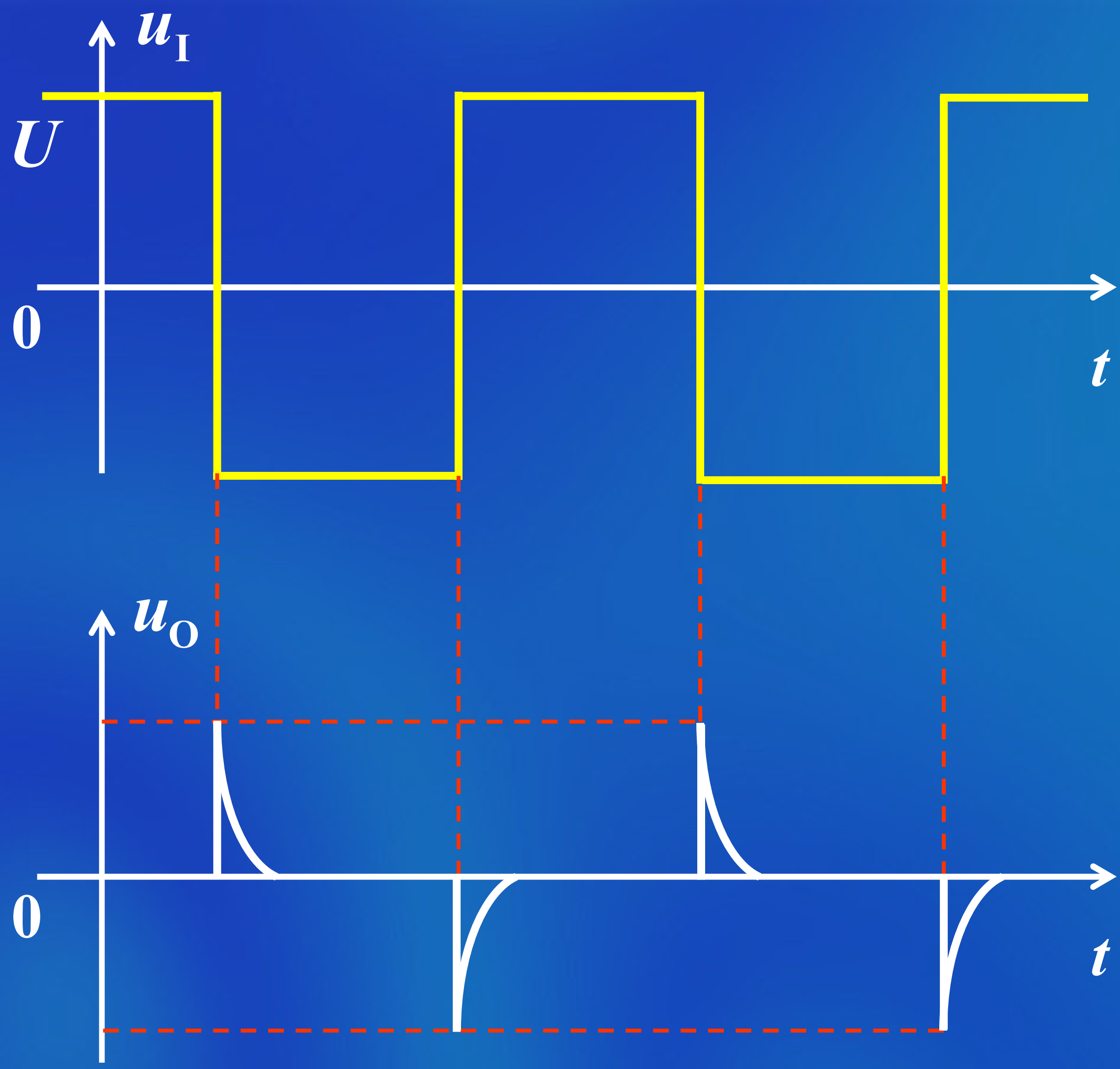
$$u_O = -RC\frac{du_I}{dt}$$

微分电路的阶跃响应



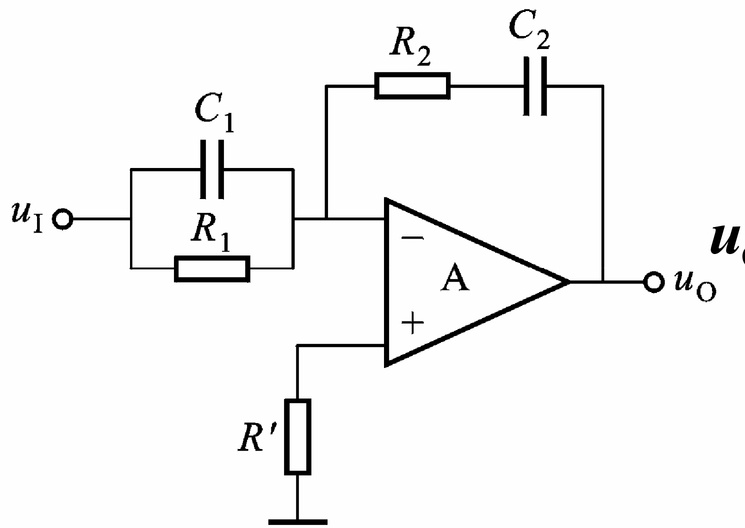
输入电压

输出电压



应用：PID调节

在自动控制系统中，常用比例—积分—微分（Proportional Integral Differential，PID）调节器对控制信号进行响应。PID控制器问世至今已有近70年历史，它以其结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便而成为工业控制的主要技术之一。

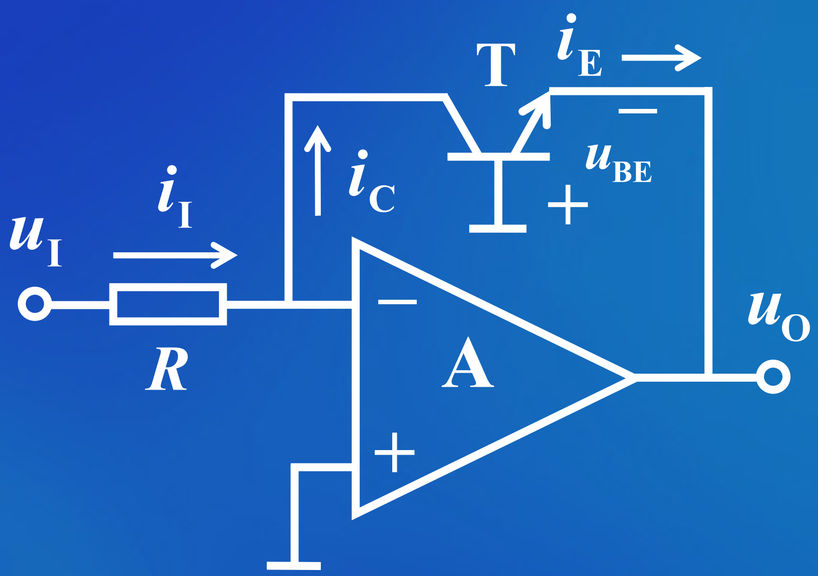


$$u_O = -\left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{C_1}{C_2}\right)u_I - \frac{1}{R_1 C_2}\int u_I \mathrm{d}t - C_1 R_2 \frac{\mathrm{d}u_I}{\mathrm{d}t}$$

$$= -K_1 u_I - K_3 \int u_I \mathrm{d}t - K_2 \frac{\mathrm{d}u_I}{\mathrm{d}t}$$

6.2 对数和反对数运算电路

6.2.1 对数运算



由图可知

$$i_I \approx i_C$$

$$i_I = \frac{u_I}{R}$$

$$i_C \approx i_E = I_S(e^{u_{BE}/U_T} - 1)$$

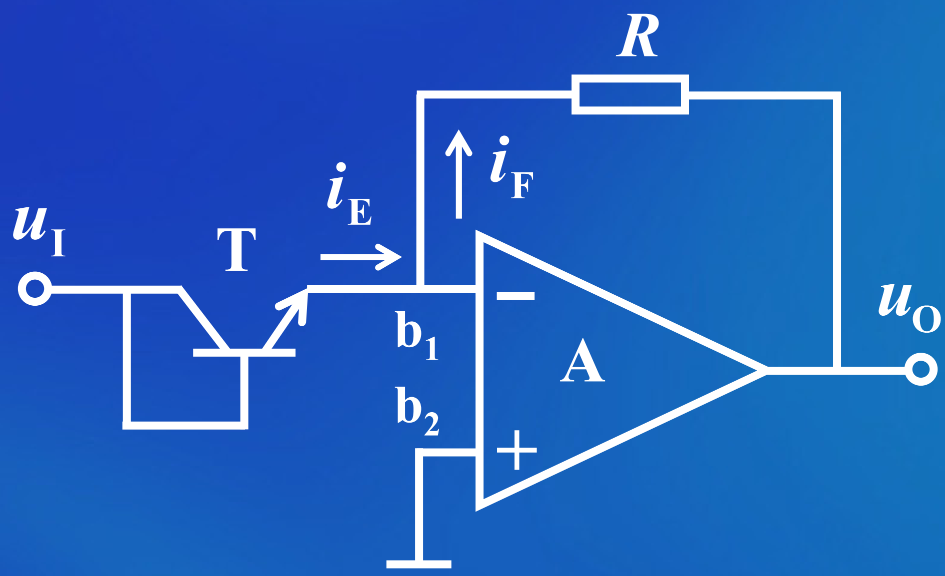
$$\approx I_S e^{u_{BE}/U_T}$$

故 $$u_O \approx -U_T \ln \frac{u_I}{I_s R} \quad (u_I > 0)$$

当u_I<0时

T选用PNP型

6.2.2 反对数运算



由图可知

$$i_E = i_F$$

$$u_{BE} = u_I$$

$$i_E \approx I_S e^{u_{BE}/U_T}$$

故

$$u_O = -Ri_F \approx -RI_S e^{u_I/U_T}$$

6.3 模拟乘法器及其应用

实现的功能

$$u_O = K u_X u_Y$$

6.3.1 乘法器的工作原理

1. 对数乘法器

由 $u_O = Ku_X u_Y$

$= e^{\ln Ku_X u_Y}$

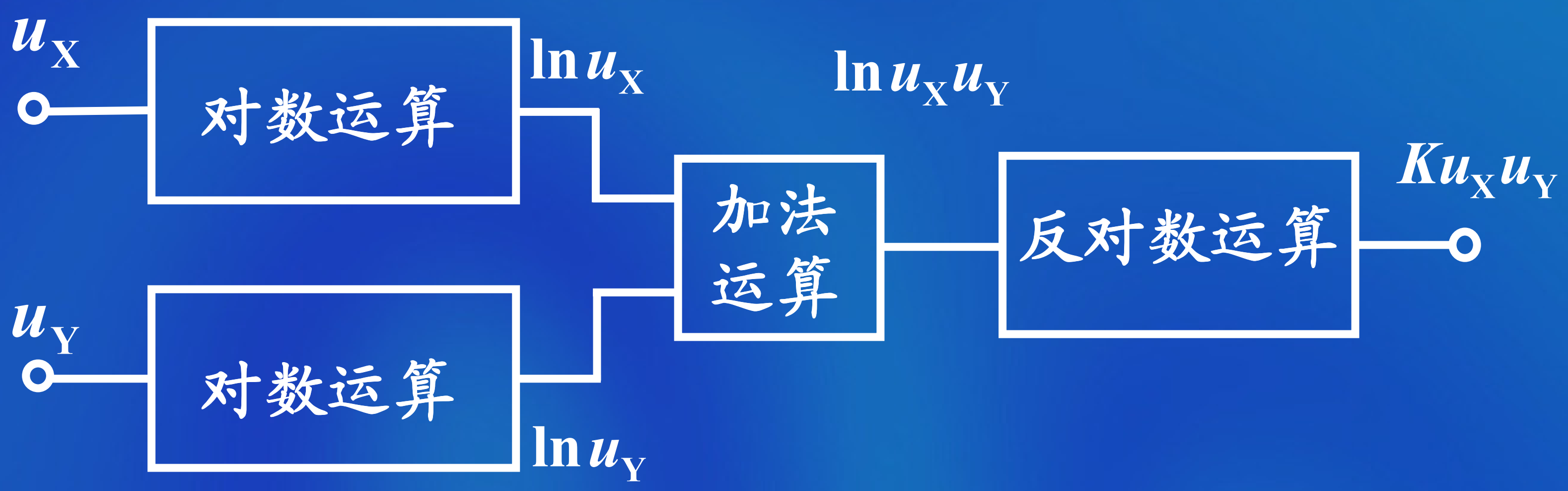
$= e^{\ln K_1 u_X + \ln K_2 u_Y}$

式中 $K = K_1 K_2$

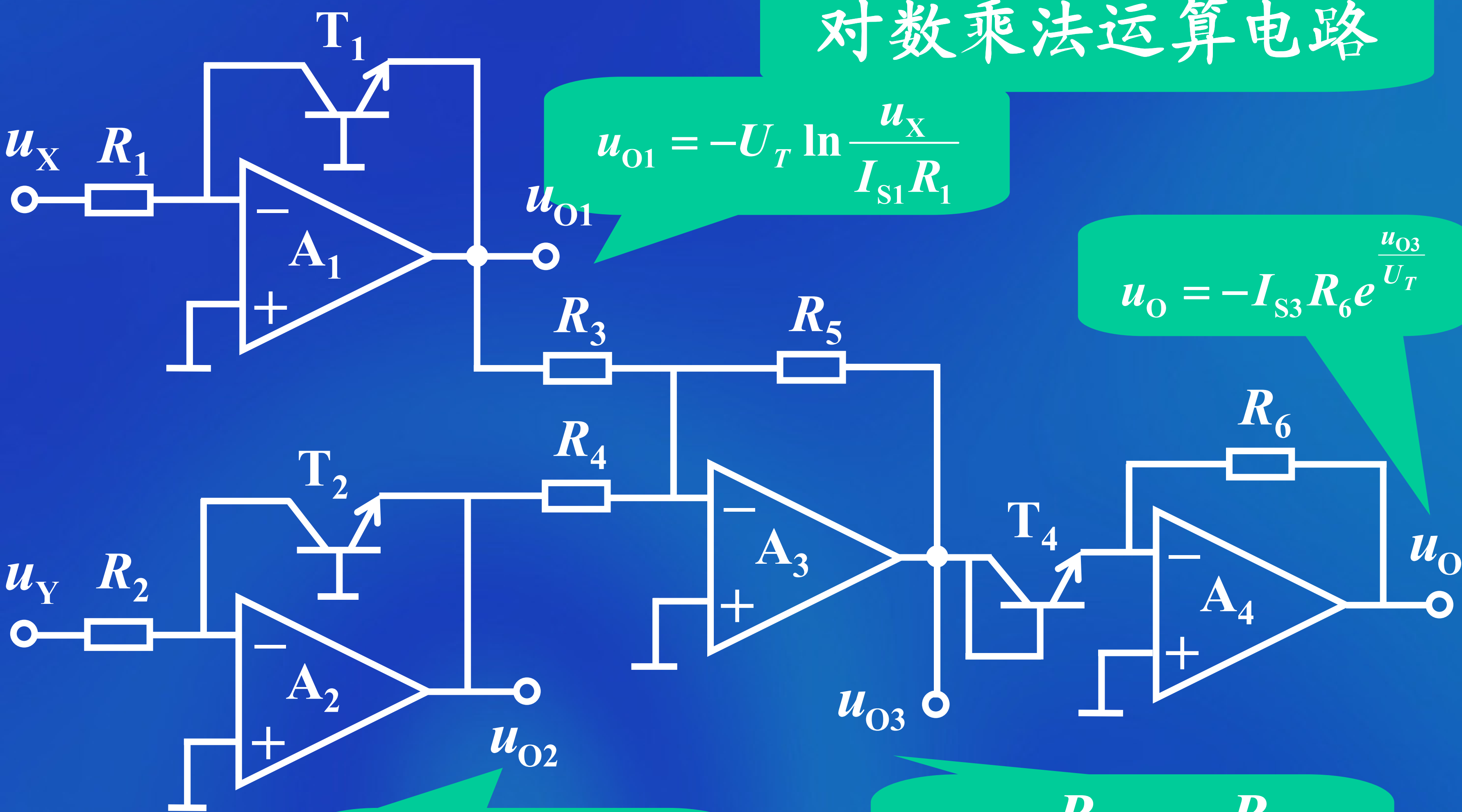
知 可利用对数电路、加法电路和反对数电路实现的乘法运算功能。

$$u_O = Ku_X u_Y = e^{\ln K_1 u_X + \ln K_2 u_Y}$$

原理框图



对数乘法运算电路



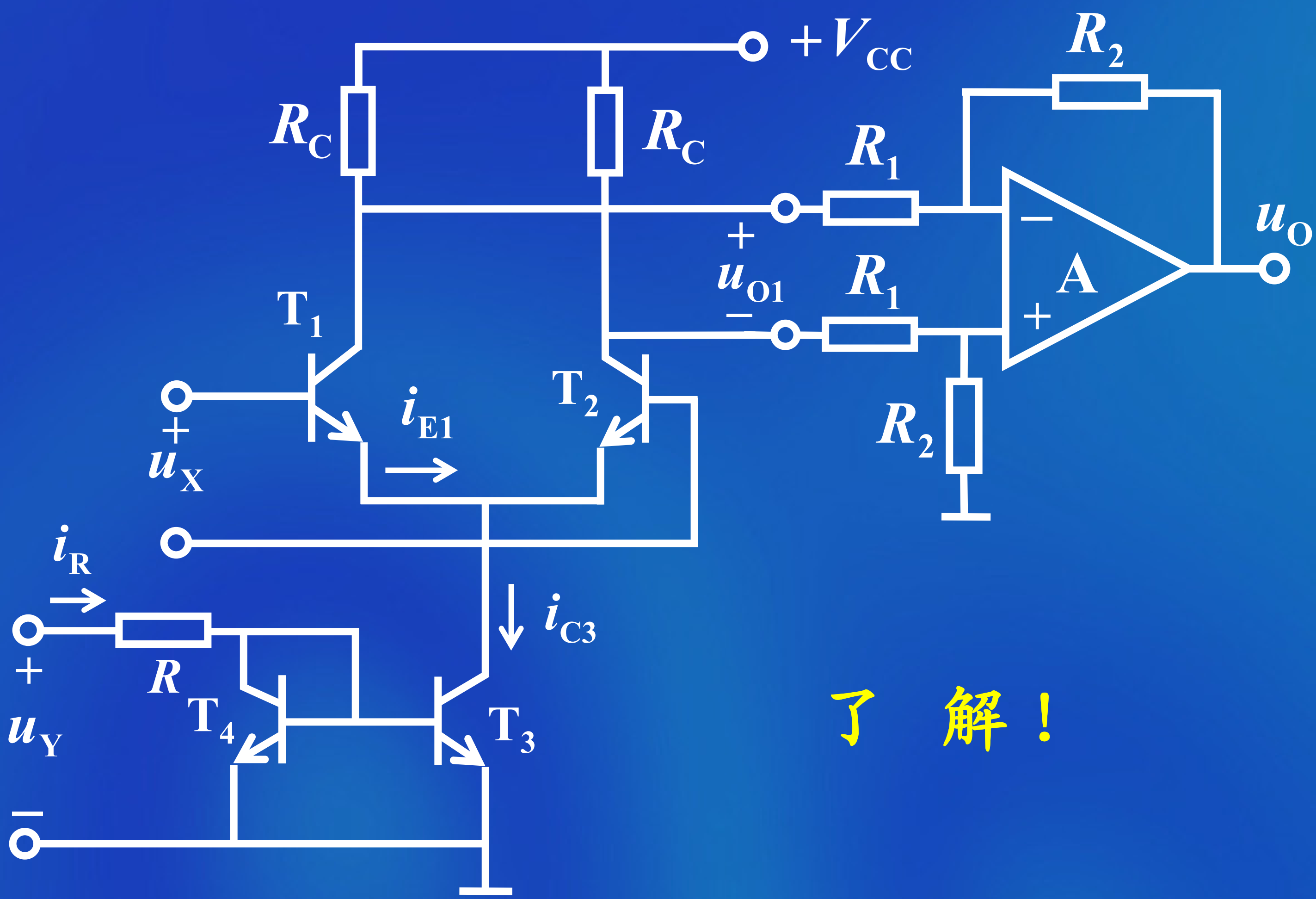
$$u_{O1} = -U_T \ln \frac{u_X}{I_{S1} R_1}$$

$$u_{O2} = -U_T \ln \frac{u_Y}{I_{S2} R_2}$$

$$u_{O3} = -\frac{R_5}{R_3} u_{O1} - \frac{R_5}{R_4} u_{O4}$$

$$u_O = -I_{S3} R_6 e^{\frac{u_{O3}}{U_T}}$$

2. 变跨导式乘法器



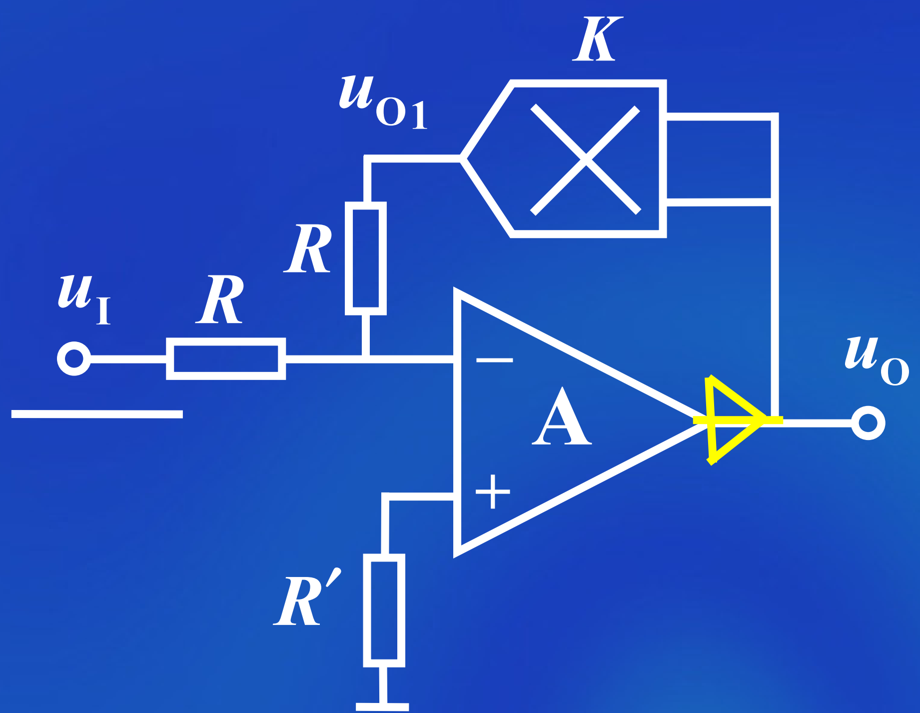
了 解！

6.3.2 乘法器应用电路

1. 平方运算电路

$$u_O = K u_I^2$$

2. 开平方运算电路



由图可知

$$u_{O1} = Ku_O^2$$

$$\frac{-u_{O1}}{R} = \frac{u_I}{R}$$

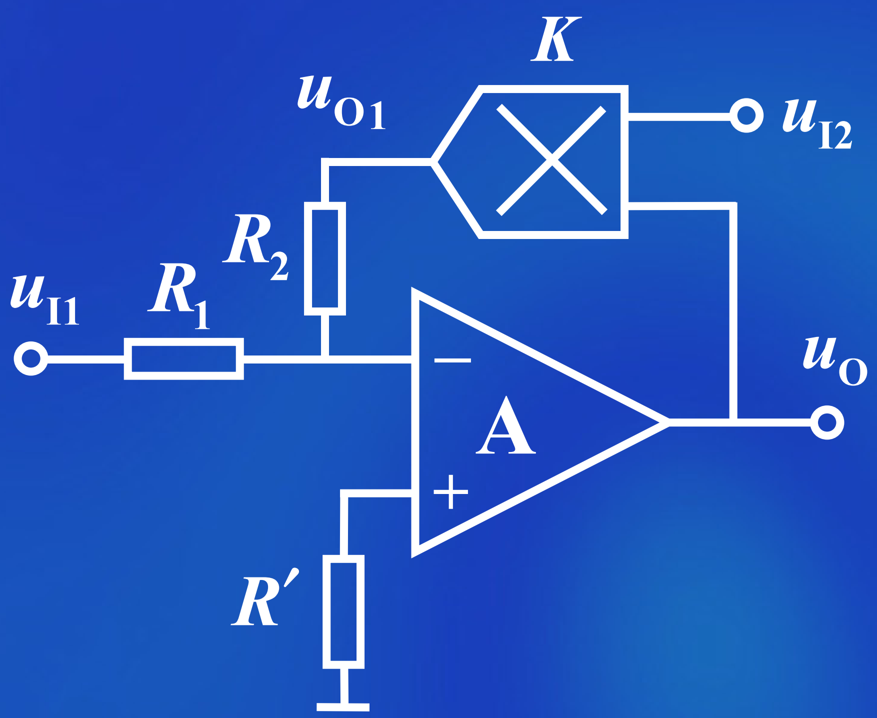
故

$$u_O = \sqrt{-\frac{u_I}{K}}$$

$$(u_I < 0)$$

问：如何防止u_I突然为正，导致运放出现闭锁现象？

3. 除法运算电路



由图可知

$$u_{O1} = K u_O u_{I2}$$

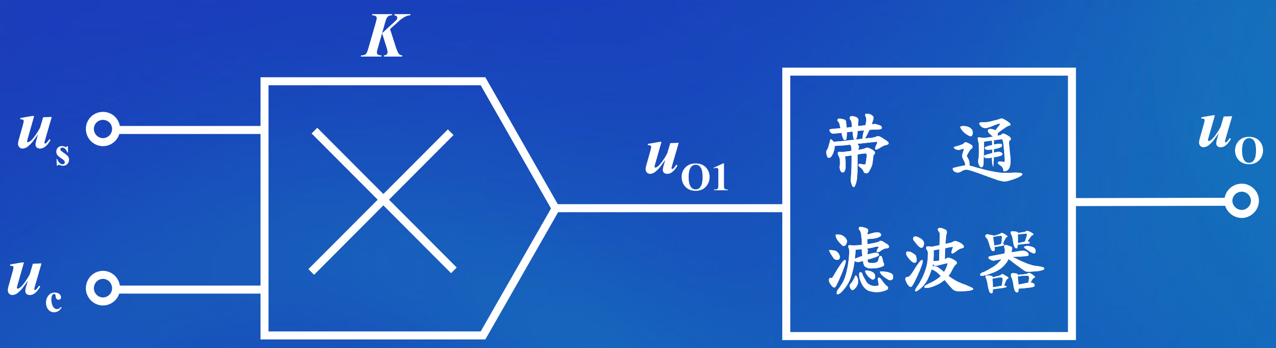
$$\frac{-u_{O1}}{R_2} = \frac{u_{I1}}{R_1}$$

故

$$u_O = -\frac{R_2}{KR_1}\frac{u_{I1}}{u_{I2}}$$

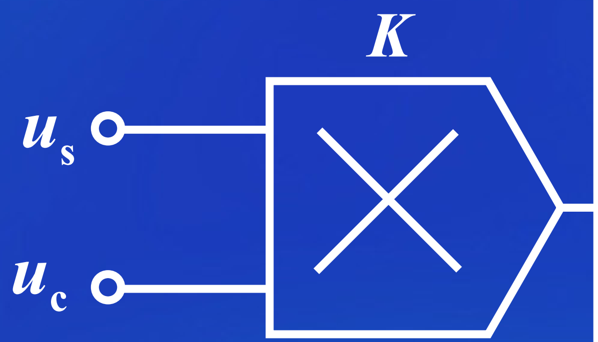
4. 调制与解调

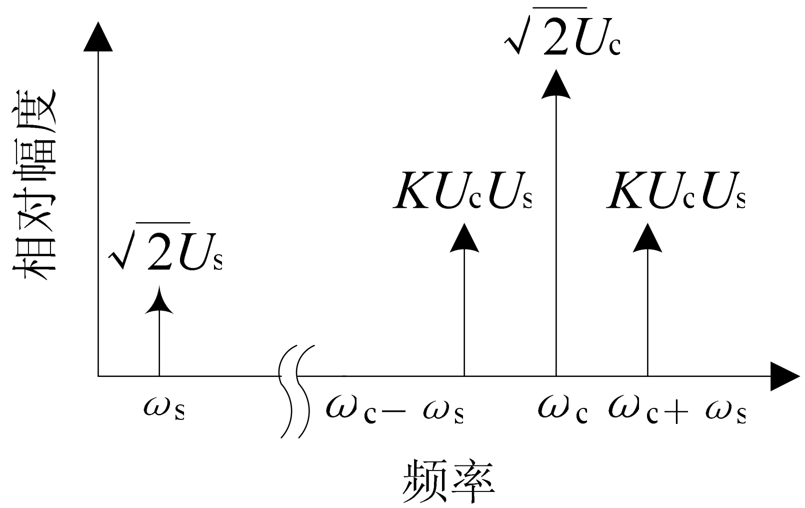
幅度调制原理框图



音频信号 $u_s = \sqrt{2}U_s \cos\omega_s t$

载波信号 $u_c = \sqrt{2}U_c \cos\omega_c t$





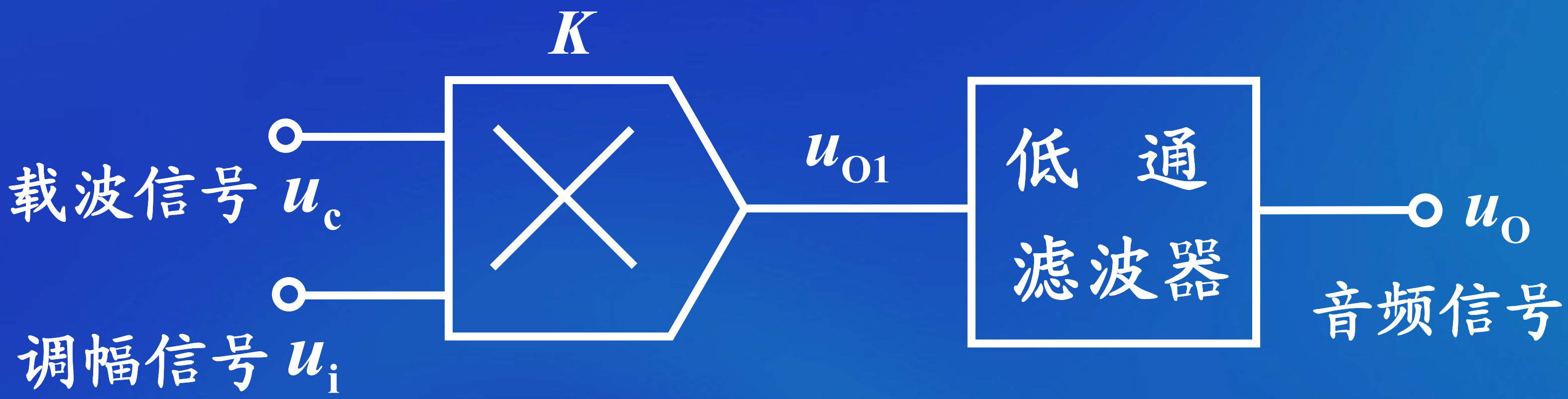
$$u_{O1} = Ku_c u_s$$

$$= KU_c U_s\left[\cos(\omega_c+\omega_s)t + \cos(\omega_c-\omega_s)t\right]$$

滤除单边带信号

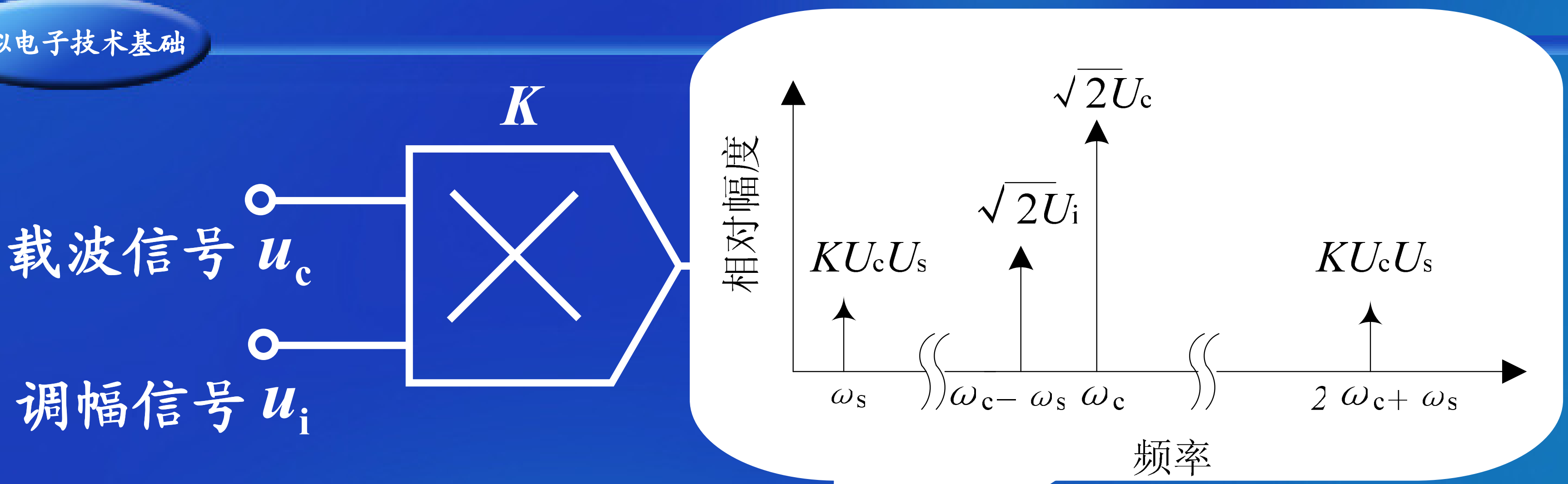
输出信号 $u_o = KU_c U_s \cos(\omega_c-\omega_s)t$

幅度解调原理框图



载波信号 $u_c = \sqrt{2}U_c \cos\omega_c t$

调幅信号 $u_i = \sqrt{2}U_i \cos(\omega_c - \omega_s)t$



$$u_{O1}=KU_cU_i\left[\cos\omega_s t+\cos(2\omega_c-\omega_s)t\right]$$

滤除高频信号

输出信号信号 $u_O=KU_cU_i\cos\omega_s t$

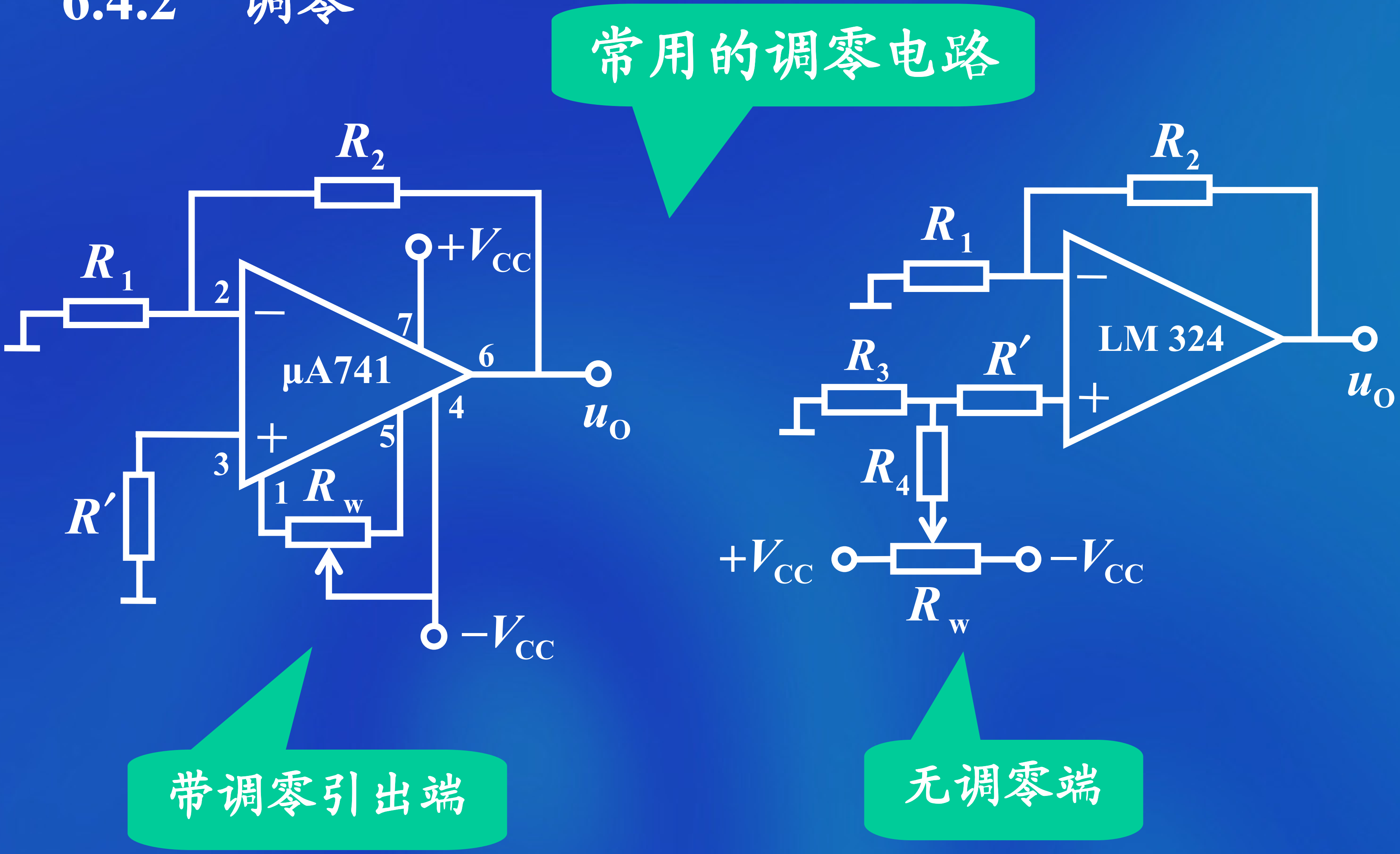
6.4 集成运算放大器使用中的几个问题

6.4.1 选型

集成运放及其特性简表

类型		特点	应用场合
通用型		种类多，价格便宜	一般测量、运算电路
专用型	低功耗型	功耗低	遥感、遥测电路
	高精度型	测量精度高、零漂小	毫伏级或更低微弱信号测量
	高输入阻抗型	R_{id}对被测信号影响小	生物医电信号提取、放大
	高速宽带型	带宽高、转换速率高	视频放大或高频振荡电路
	高压型	电源电压48V～300V	高输出电压和大输出功率

6.4.2 调零


常用的调零电路
R2
R1
+VCC
2
7
6
μA741
4
uO
3
5
R′
1 Rw
−VCC
带调零引出端
R2
R1
LM 324
R3
R′
uO
R4
+VCC
−VCC
Rw
无调零端

6.4.3 消振

自激振荡的原因 { 运放的增益高 / 存在寄生电容

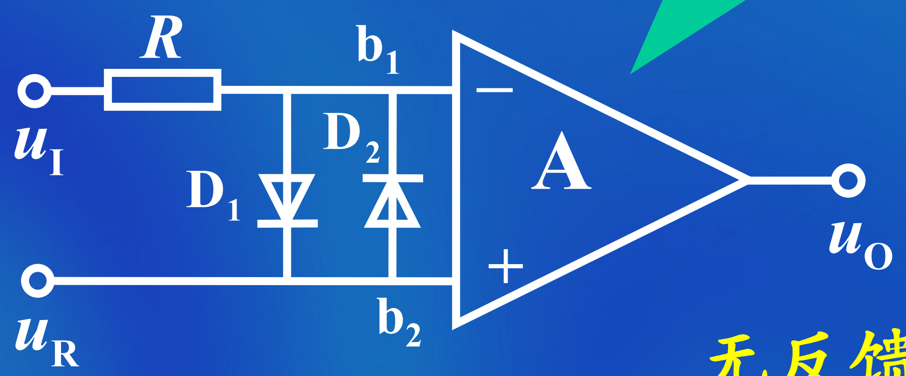
负反馈！

消振的措施：　加入消振电容

6.4.4 保护

保护电路

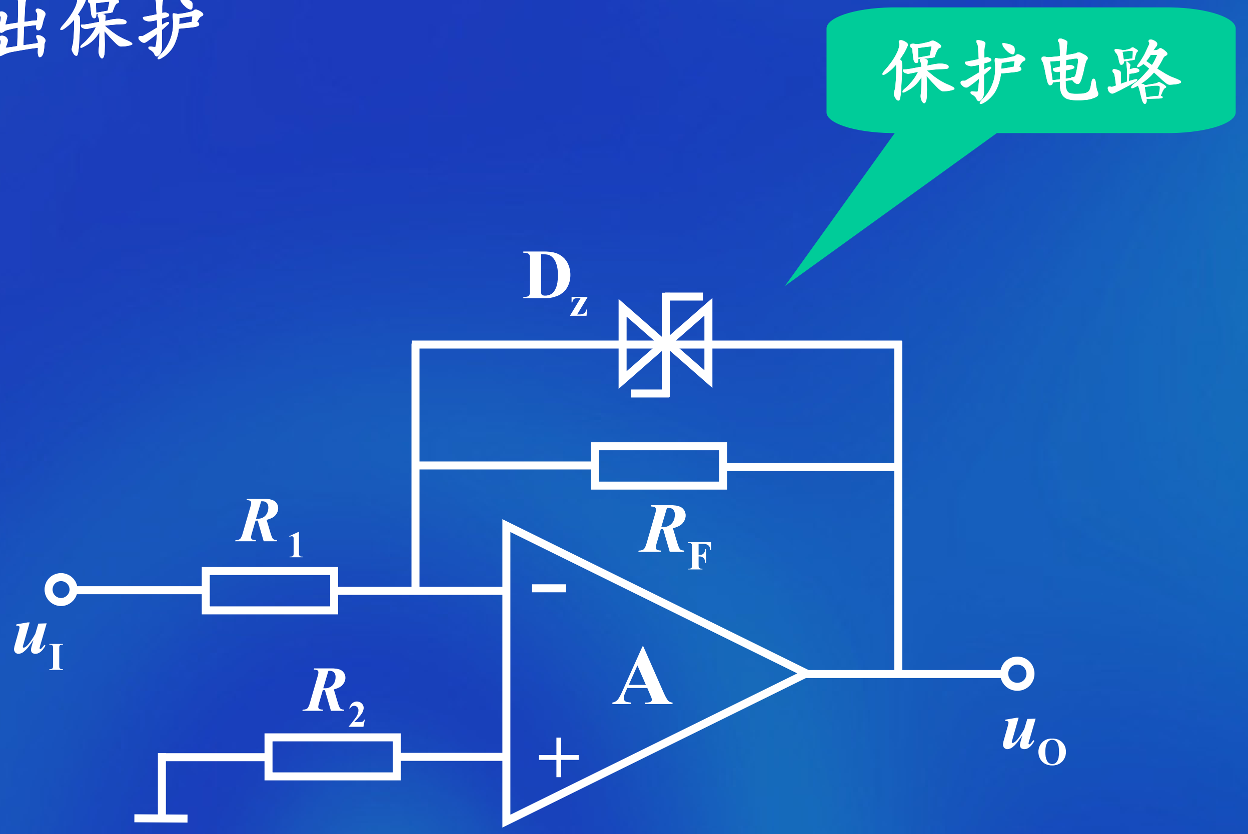
1. 输入保护



无反馈！

问：加法、减法和积分电路为什么不加保护？

2. 输出保护



练习题

例1 用理想集成运算放大器实现下列运算关系，并画出电路图。要求所用的运算放大器为三个，元件的取值范围为：

$$C = 1\mu F \qquad 1k\Omega \le R \le 1M\Omega$$

$$u_o = 2u_{i1} + 3u_{i2} - \int u_{i3}dt$$

解：根据题意，将要求实现下列运算关系变形为

$$u_o = -[-2u_{i1} - 3u_{i2} - (-\int u_{i3}dt)]$$

那么式 $-\int u_{i3}dt$ 可以用积分器来实现。

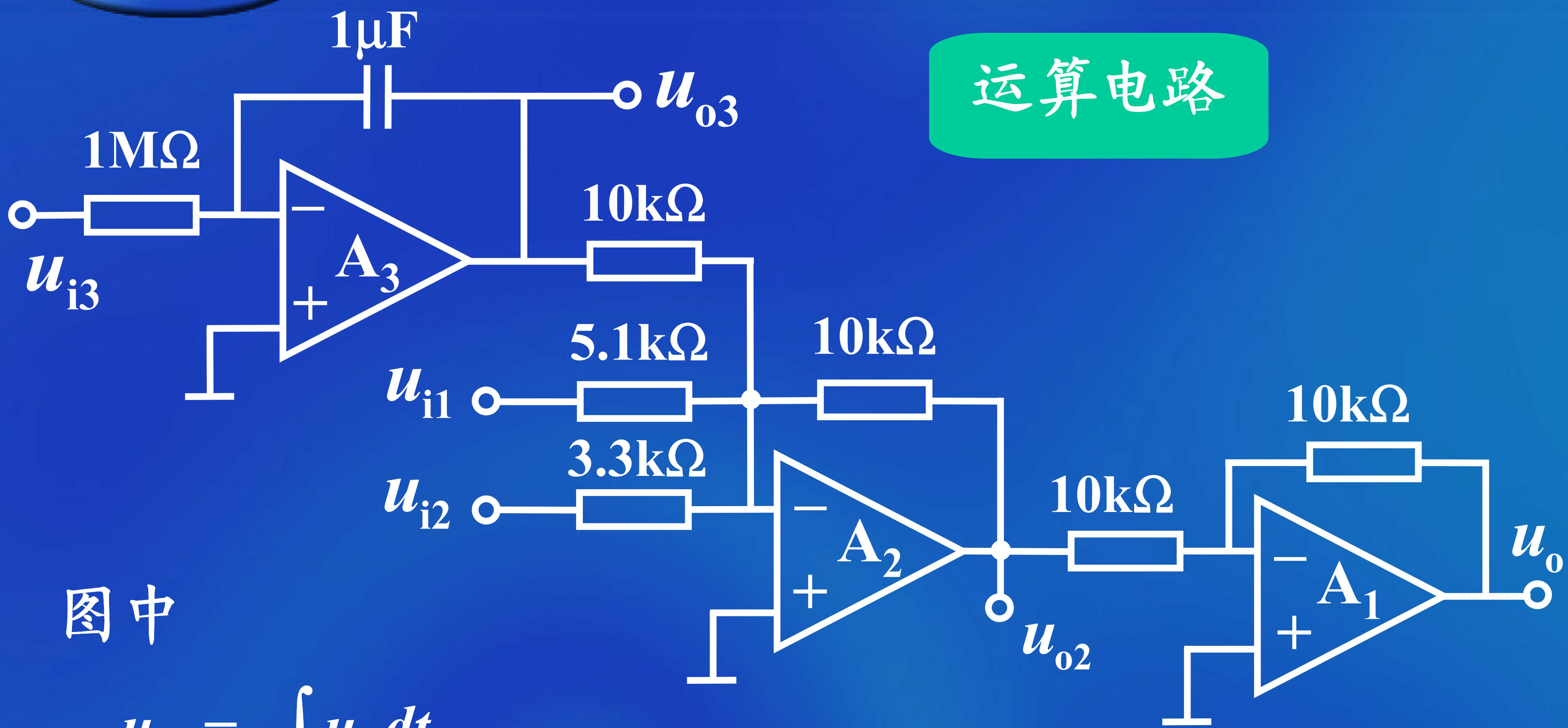
式 $-2u_{i1}-3u_{i2}-(-\int u_{i3}dt)$

可以用反相输入的加法器来实现。

最后，在来一级反相器，即可实现运算

$$u_o=-[-2u_{i1}-3u_{i2}-(-\int u_{i3}dt)]$$

运算电路



图中

$$u_{o3} = -\int u_{i3} dt$$

$$u_{o2} = -2u_{i1} - 3u_{i2} - (-\int u_{i3} dt)$$

$$u_o = -[-2u_{i1} - 3u_{i2} - (-\int u_{i3} dt)]$$