

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！



Part 16 基本运算电路

原作者：b站up主—这个ximo不太冷

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本运算电路

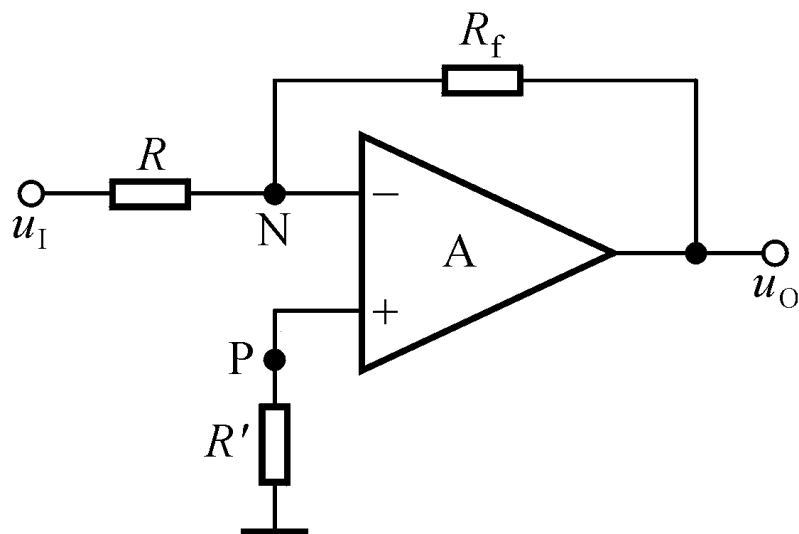
运算电路的分析方法

集成运放引入负反馈，工作在线性区，利用“**虚短**”、“**虚断**”分析问题是基本出发点，结合电路理论中的基本知识，如KCL、KVL、VCR、叠加原理等；

本章教材中给出的典型的运算电路都是电压型运算电路，即输出电压是输入电压的函数，稳定输出电压；事实上运算电路不局限于电压运算电路，掌握本章几种典型运算电路的分析方法，对其他的由集成运放引入负反馈、工作在线性区的电路的分析同样适用；

基本运算电路

反相比例运算电路



对 N 点应用虚断、KCL:

$$\frac{u_I - u_N}{R} = \frac{u_N - u_O}{R_f}$$

虚短:

(由于虚断 R' 上无压降)

$$u_N = u_P = 0$$



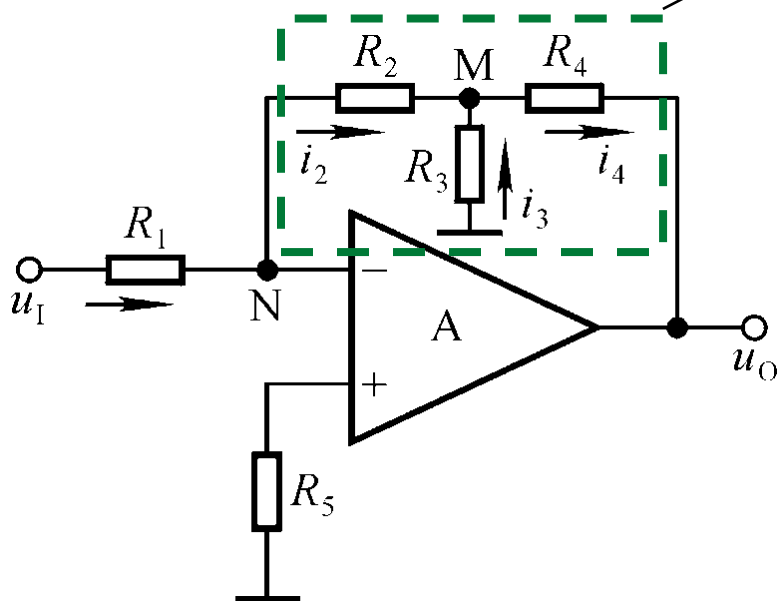
$$u_O = -\frac{R_f}{R} u_I$$

虽然电阻 R' 在运算关系式中没有出现，但一般为了保证两个输入端口等效电阻的对称性，通常选择令 $R_P = R_N$ ；

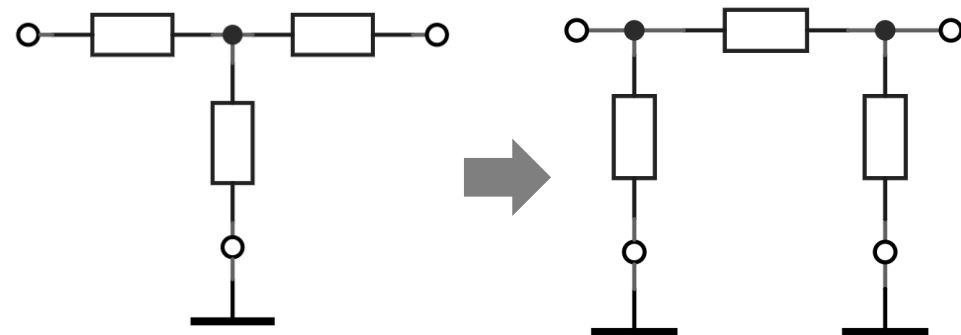
$$R' = R // R_f$$

基本运算电路

T型反相比例运算电路



应用 Y- Δ 变换:



等效的反馈电阻为:

$$R_2 + R_4 + \frac{R_2 R_4}{R_3}$$

对 M 点应用 KCL:

$$\frac{u_N - u_M}{R_2} + \frac{0 - u_M}{R_3} = \frac{u_M - u_O}{R_4}$$

对 N 点应用虚断和 KCL:

$$\frac{u_I - u_N}{R_1} = \frac{u_N - u_M}{R_2}$$

虚短:

(由于虚断 R' 上无压降)

$$u_N = u_P = 0$$

$$u_O = - \frac{R_2 + R_4 + \frac{R_2 R_4}{R_3}}{R_1} u_I$$

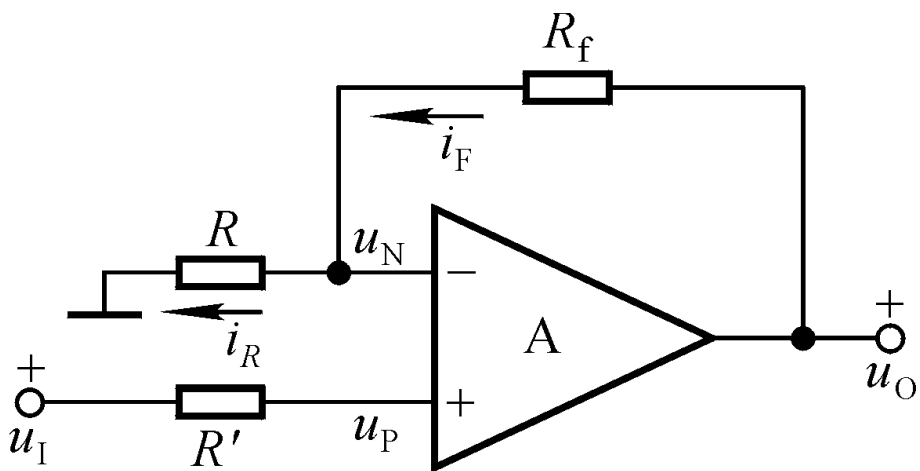
思考:

T 型反相比例运算器有什么优点?

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本运算电路

同相比例运算电路



对 N 点应用虚断、KCL:

$$\frac{0 - u_N}{R} = \frac{u_N - u_O}{R_f}$$

虚短:

$$u_N = u_P$$

P点虚断, R' 上压降为零:

$$u_P = u_I$$

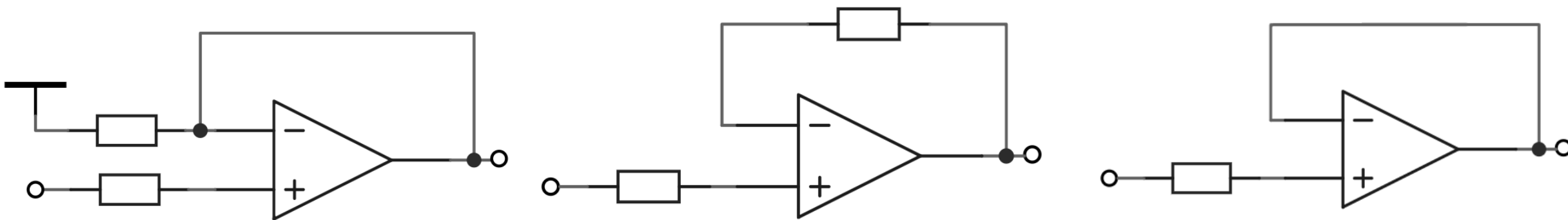


$$u_O = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) u_I$$

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本运算电路

○ 同相比例运算电路的特殊形式 —— 电压跟随器



当同相比例运算器中的 $R_f = 0$ 即短路，或 $R = \infty$ 即开路时，
输出电压等于输入电压，称为电压跟随器；
由于其具有输入电阻无穷大，输出电阻为零的特点，
可以用于前后级隔离；

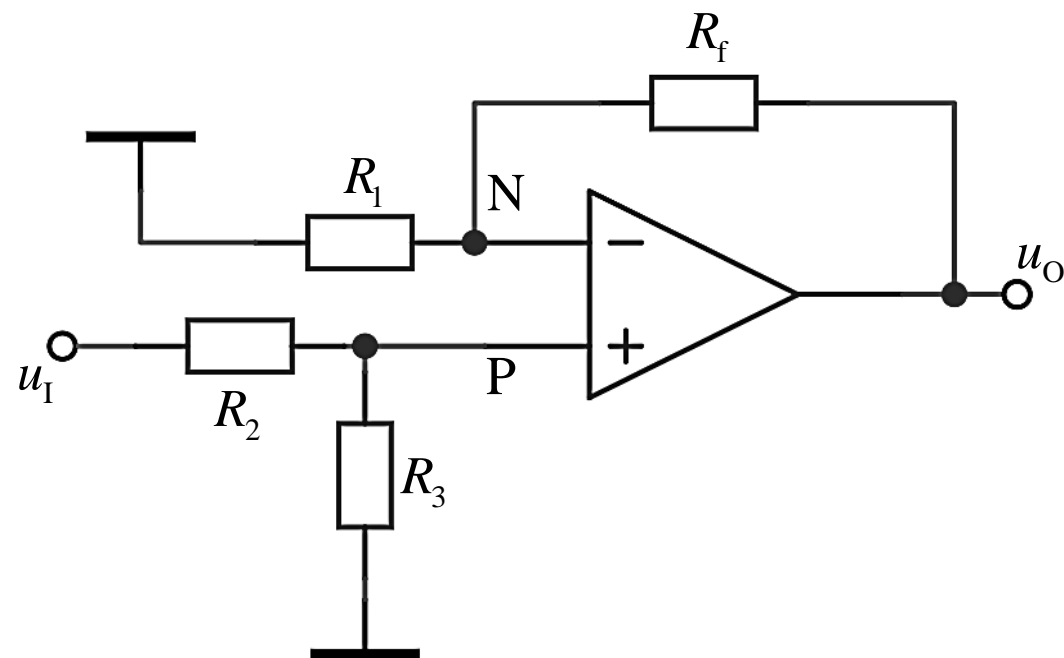
请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！

课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本运算电路

结果表达式中 R_2 指的是输入端口与同相输入端之间的电阻
除了前面要乘以 R_P / R_N ，
与反相比例运算电路公式一致！
此电路是掌握加减运算电路的基础！

同相比例运算电路的一般形式



对 N 点应用虚断、KCL:

$$\frac{0 - u_N}{R_1} = \frac{u_N - u_O}{R_f}$$

虚短:

$$u_N = u_P$$

对 P 点应用虚断、KCL

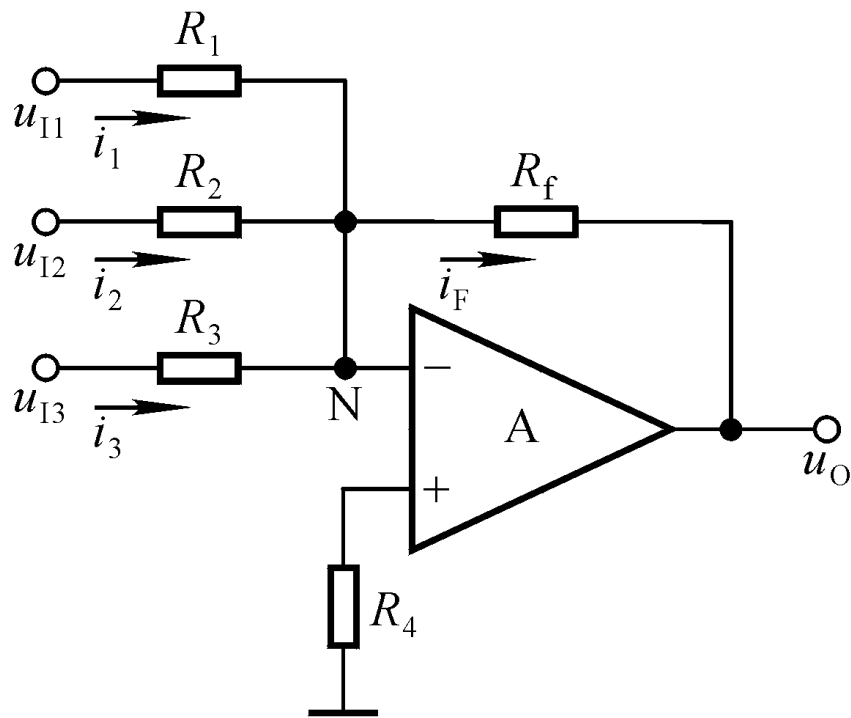
$$\frac{u_I - u_P}{R_2} = \frac{u_P - 0}{R_3}$$

$$u_O = \frac{R_P}{R_N} \cdot \frac{R_f}{R_2} u_I$$

其中， $R_P = R_2 // R_3$ ， $R_N = R_1 // R_f$

基本运算电路

反相求和运算电路



对 N 点应用虚断、KCL:

$$\frac{u_{I1} - u_N}{R_1} + \frac{u_{I2} - u_N}{R_2} + \frac{u_{I3} - u_N}{R_3} = \frac{u_N - u_O}{R_f}$$

虚短：
(由于虚断 R' 上无压降)

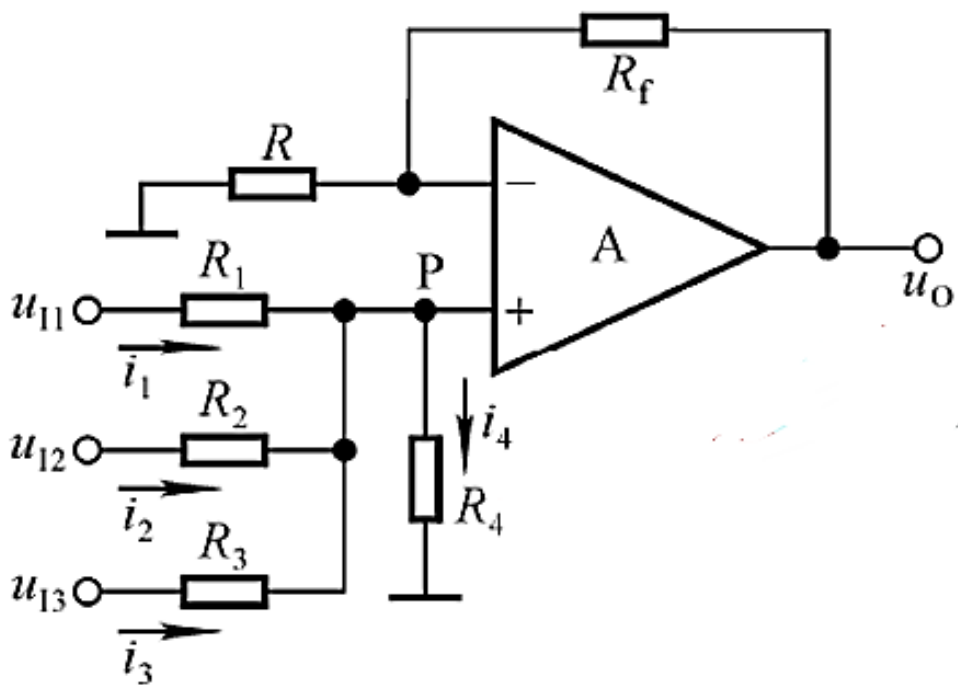
$$u_N = u_P = 0$$



$$u_O = -\left(\frac{R_f}{R_1} u_{I1} + \frac{R_f}{R_2} u_{I2} + \cdots + \frac{R_f}{R_n} u_{In}\right)$$

基本运算电路

同相求和运算电路



对 N 点应用虚断、KCL:

$$\frac{0 - u_N}{R} = \frac{u_N - u_O}{R_f}$$

虚短:

$$u_N = u_P$$

对 P 点应用虚断、KCL:

$$\frac{u_{I1} - u_P}{R_1} + \frac{u_{I2} - u_P}{R_2} + \frac{u_{I3} - u_P}{R_3} = \frac{u_P - 0}{R_4}$$



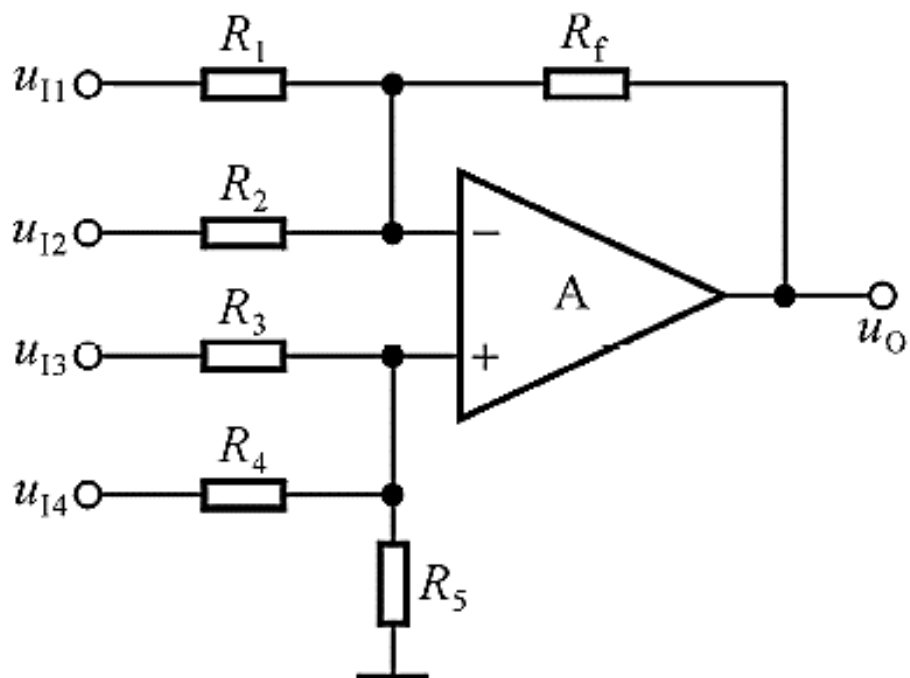
$$u_O = \frac{R_P}{R_N} \left(\frac{R_f}{R_1} u_{I1} + \frac{R_f}{R_2} u_{I2} + \cdots + \frac{R_f}{R_n} u_{In} \right)$$

原作者：b站up主—这个ximo不太冷

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本运算电路

○ 加减运算电路



利用叠加原理：

$$u_O = \frac{R_P}{R_N} \left(\frac{R_f}{R_3} u_{I3} + \frac{R_f}{R_4} u_{I4} \right) - \left(\frac{R_f}{R_1} u_{I1} + \frac{R_f}{R_2} u_{I2} \right)$$

当 $R_P = R_N$ 时：

$$u_O = R_f \left(-\frac{u_{I1}}{R_1} - \frac{u_{I2}}{R_2} + \frac{u_{I3}}{R_3} + \frac{u_{I4}}{R_4} \right)$$

同相部分乘以 R_P / R_N ，反相部分不乘！

基本运算电路

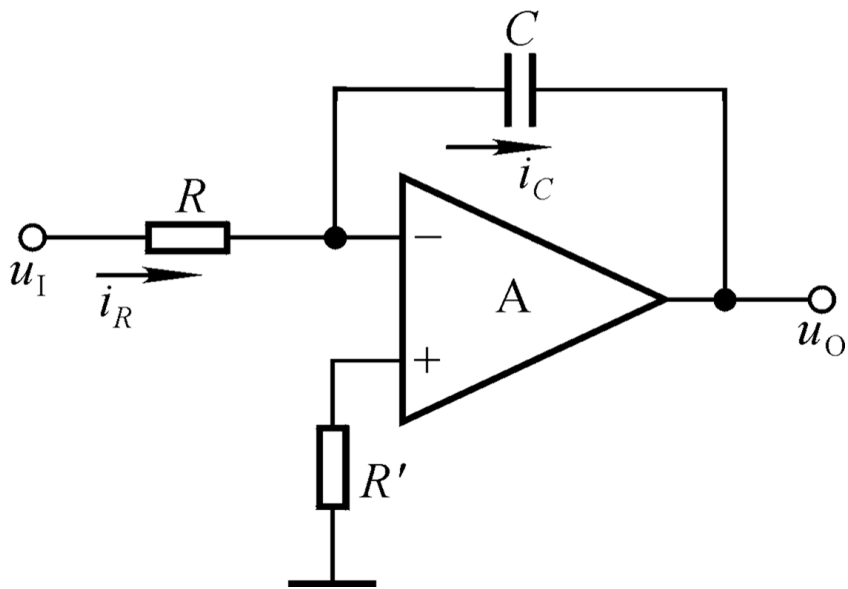
思考：

积分运算电路输入矩形波，输出是什么波形？

积分运算电路输入正弦波，输出相位相较于输入如何变化？

可见，积分运算电路有什么功能？

积分运算电路（反相）



利用电容的 VCR：

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad u_C = u_N - u_O$$

对N点应用虚断、KCL：



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

$$i_C = i_R = \frac{u_I - u_N}{R}$$

虚短：

(由于虚断 R' 上无压降)

$$u_N = u_P = 0$$

当求解某一段时间内
输出电压的变化
要求解定积分
注意初始电压

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本运算电路

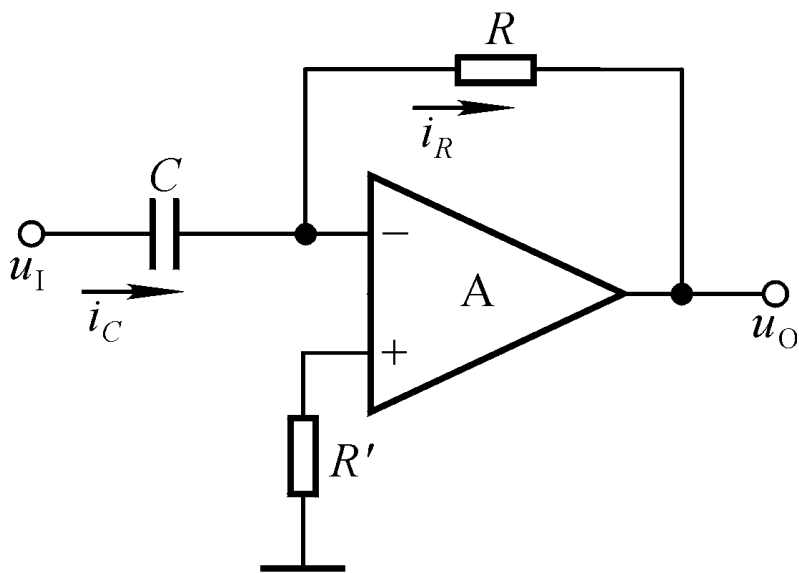
思考：

微分运算电路输入矩形波，输出是什么波形？

微分运算电路输入正弦波，输出相位相较于输入如何变化？

可见，微分运算电路有什么功能？

微分运算电路（反相）



利用电容的 VCR：

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad u_C = u_I - u_N$$

对N点应用虚断、KCL：

$$i_C = i_R = \frac{u_N - u_O}{R}$$



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

虚短：

（由于虚断 R' 上无压降）

$$u_N = u_P = 0$$

基本运算电路

基本运算电路小结

- 熟悉各个基本运算电路的电路结构；
- 在会推导的基础上记住各个基本运算电路的运算公式；
- 掌握基本运算电路的分析方法（包括：虚短虚断、节点KCL、欧姆定律、有电容的电路应用电容的 VCR、其他电路理论知识.....）

会记忆，会推导，会设计！

基本运算电路

例 1

现有电路：A.反相比例运算电路 B.同相比例运算电路 C.积分运算电路 D.微分运算电路
E.反相输入求和运算电路 F.同相输入求和运算电路 G.加减运算电路 H.电压跟随器

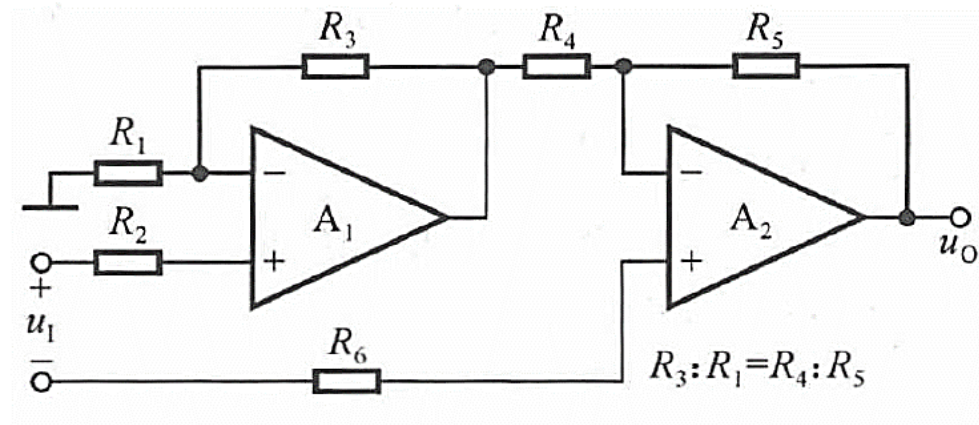
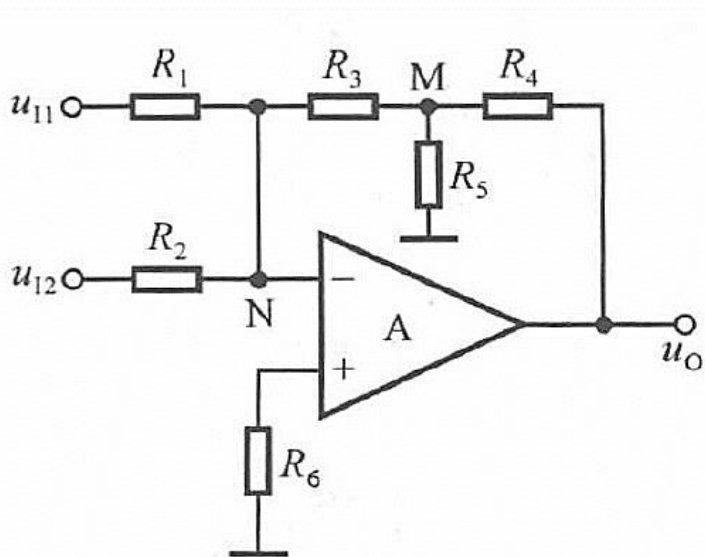
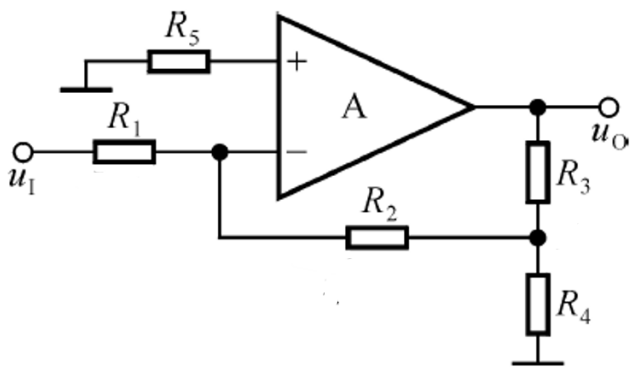
- (1)欲将正弦波电压移相 $+90^\circ$ ，应选用 _____；
- (2)欲将正弦波电压叠加一个直流偏移量，应选用 _____；
- (3)欲将方波电压转换为三角波电压，应选用 _____；
- (4)欲将方波电压转换为尖顶波电压，应选用 _____；
- (5)欲实现 $A_u = -100$ 的电压放大，应选用 _____；
- (6)欲实现 $A_u > 1$ 的电压放大，应选用 _____；
- (7)欲实现 $A_u = 1$ ，隔离前后级，应选用 _____；
- (8)欲实现函数 $Y = aX_1 + bX_2 + cX_3$ ， a 、 b 和 c 均大于零，应选用 _____；
- (9)欲实现函数 $Y = aX_1 + bX_2 + cX_3$ ， a 、 b 和 c 均小于零，应选用 _____；
- (10)欲实现函数 $Y = aX_1 + bX_2 + cX_3$ ， a 和 b 均小于零， c 大于零，应选用 _____；

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本运算电路

例 2

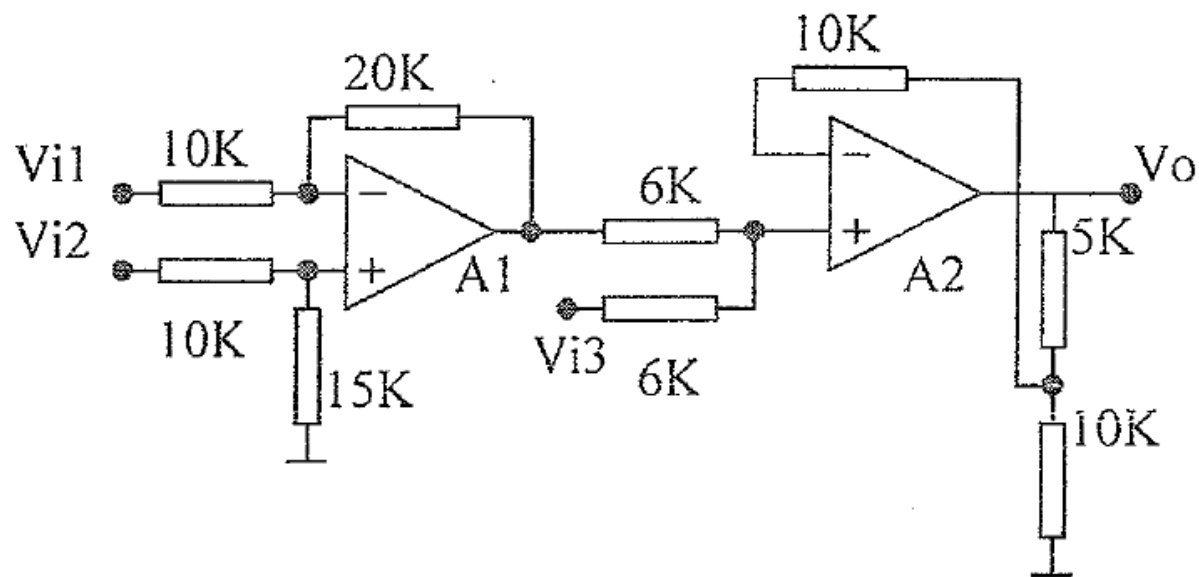
写出下列各个电路输出电压和输入电压的运算关系的表达式。



基本运算电路

例 3

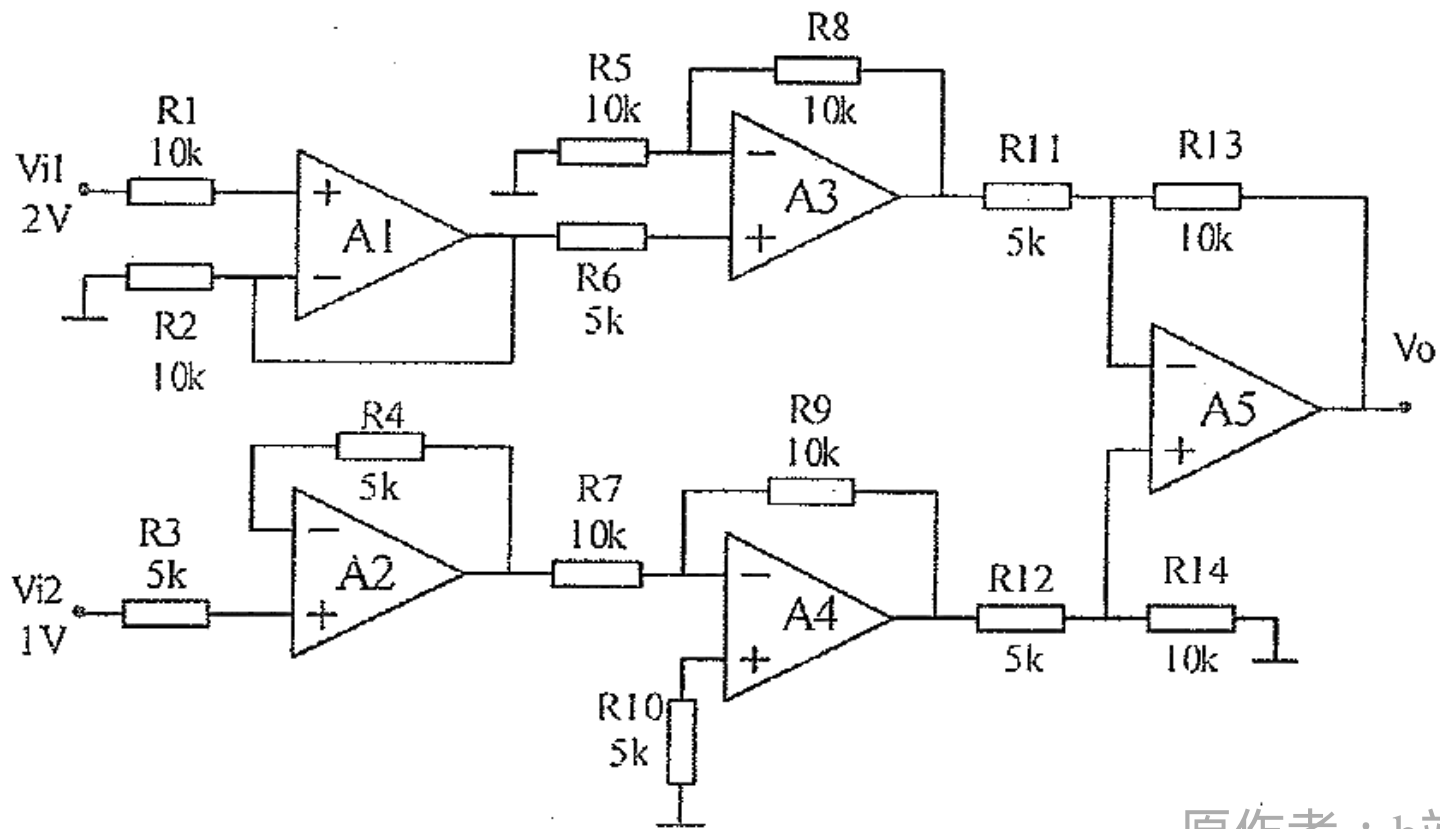
已知多级运算电路如图所示，求解此电路的输出电压与输入电压的运算关系。



基本运算电路

例 4

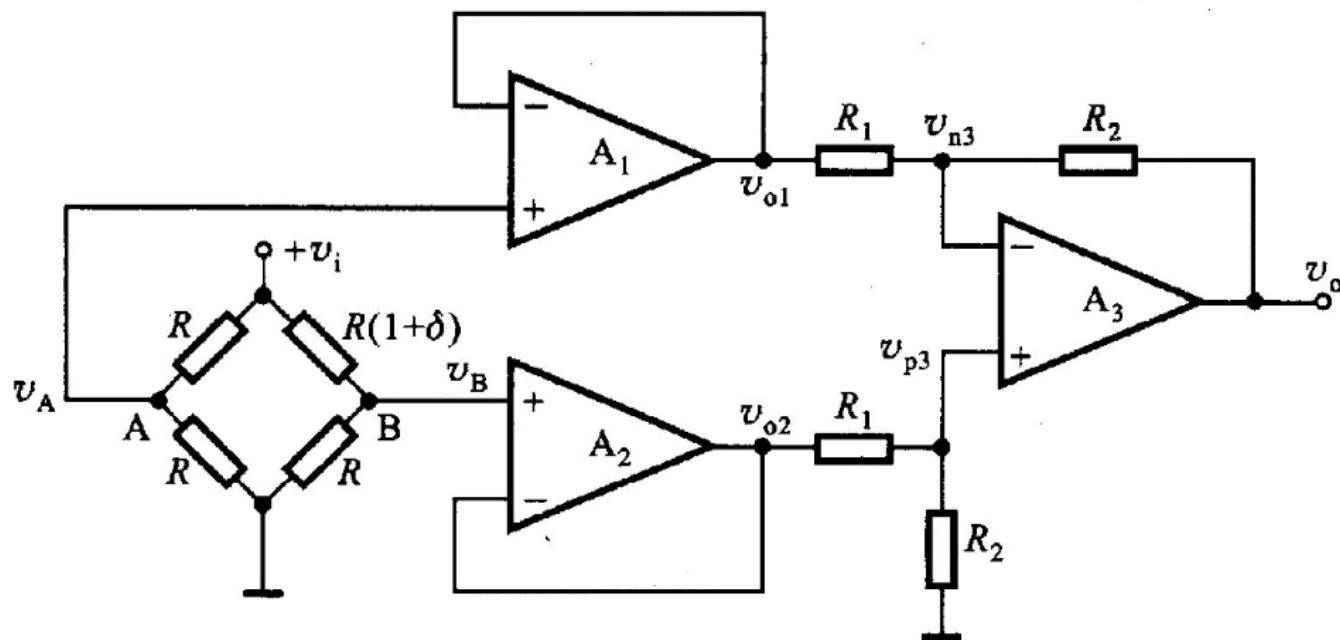
已知多级运算电路如图所示，求解此电路的输出电压 V_O 的大小。



基本运算电路

例 5

一高输入电阻的桥式放大电路如图所示，试写出 $v_o = f(\delta)$ 的表达式 ($\delta = \Delta R/R$)。

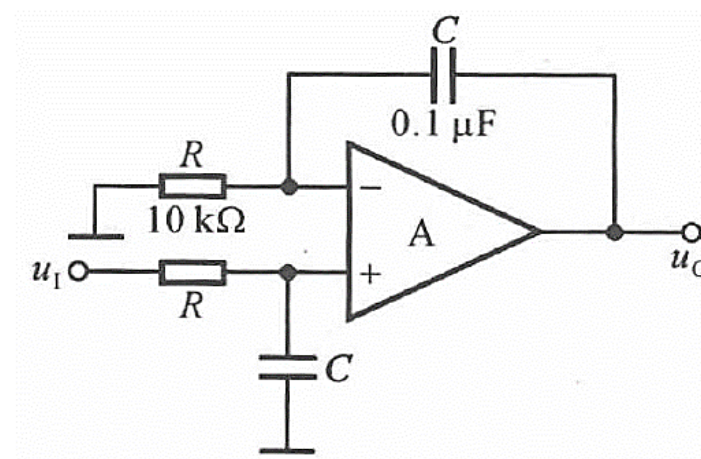
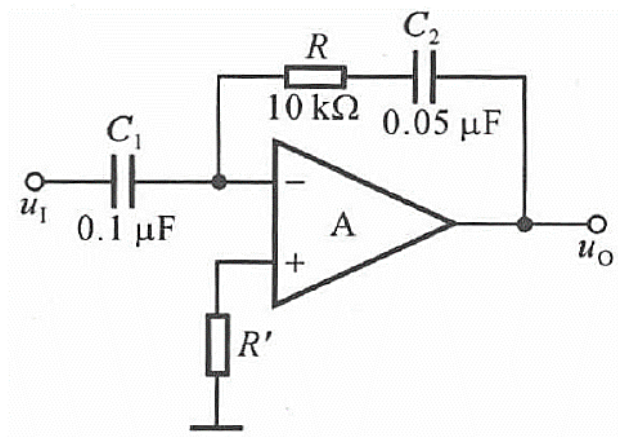
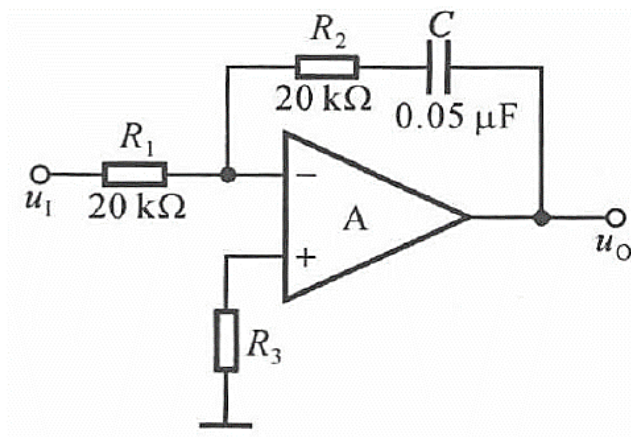


请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本运算电路

例 6

求解下列各个电路输出电压和输入电压的运算关系。

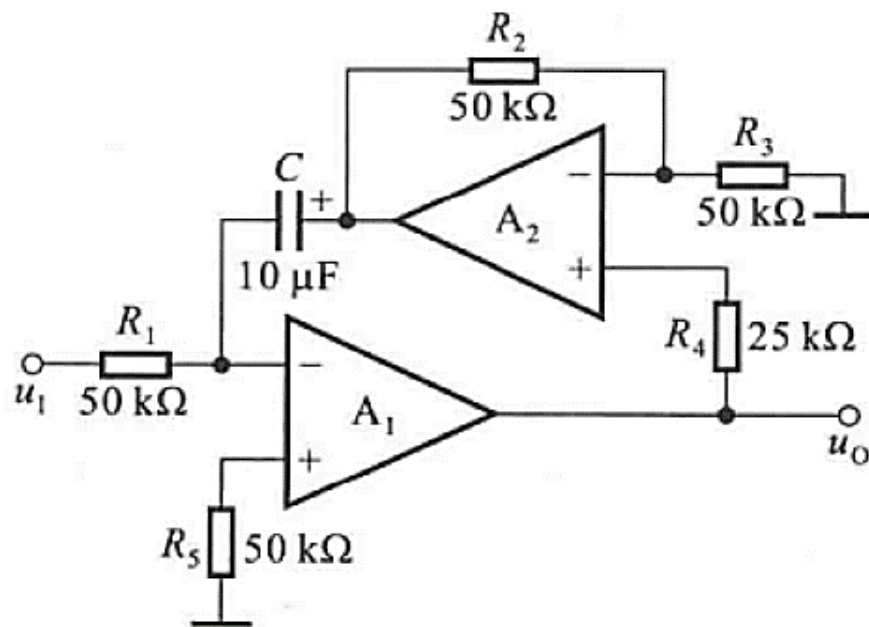


请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本运算电路

例 7

求解如图所示电路输出电压和输入电压的运算关系。



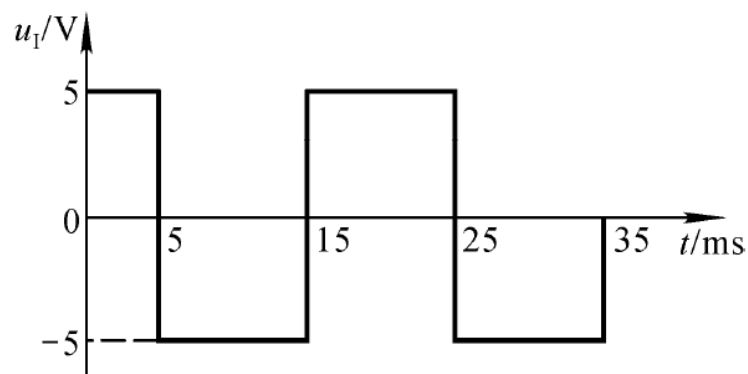
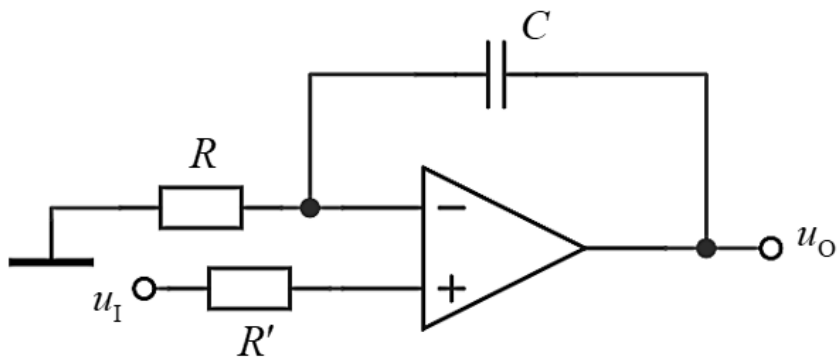
请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本运算电路

例 8

已知运算电路如左图所示， $R = 20\text{k}\Omega$ ， $C = 0.5\mu\text{F}$ ；

- (1)分析该电路的输入输出运算关系；
- (2)已知输入电压的波形如右图所示，电容初始电压为 2 V ，请绘制出输出电压的波形。

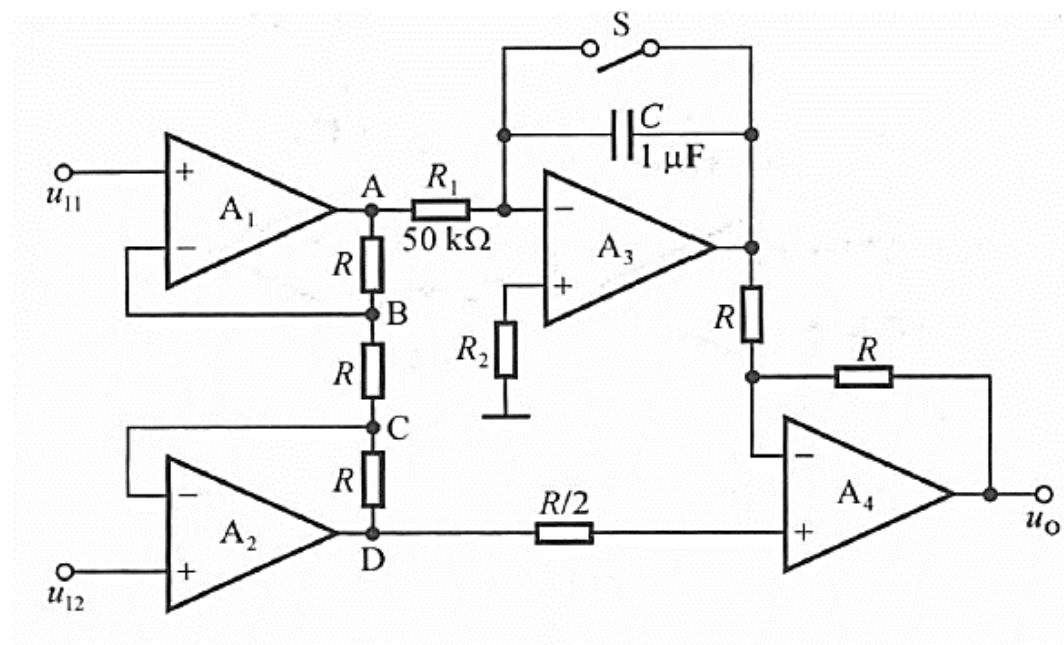


基本运算电路

例 9

电路如图所示，已知 $u_{I1} = 4V$ ， $u_{I2} = 1V$ ；

- (1) 当开关 S 闭合时，分别求解 A 、 B 、 C 、 D 和 u_O 的电位；
- (2) 设 $t = 0$ 时 S 打开，试求解输出电压 $u_O = 0$ 所需要的时间。



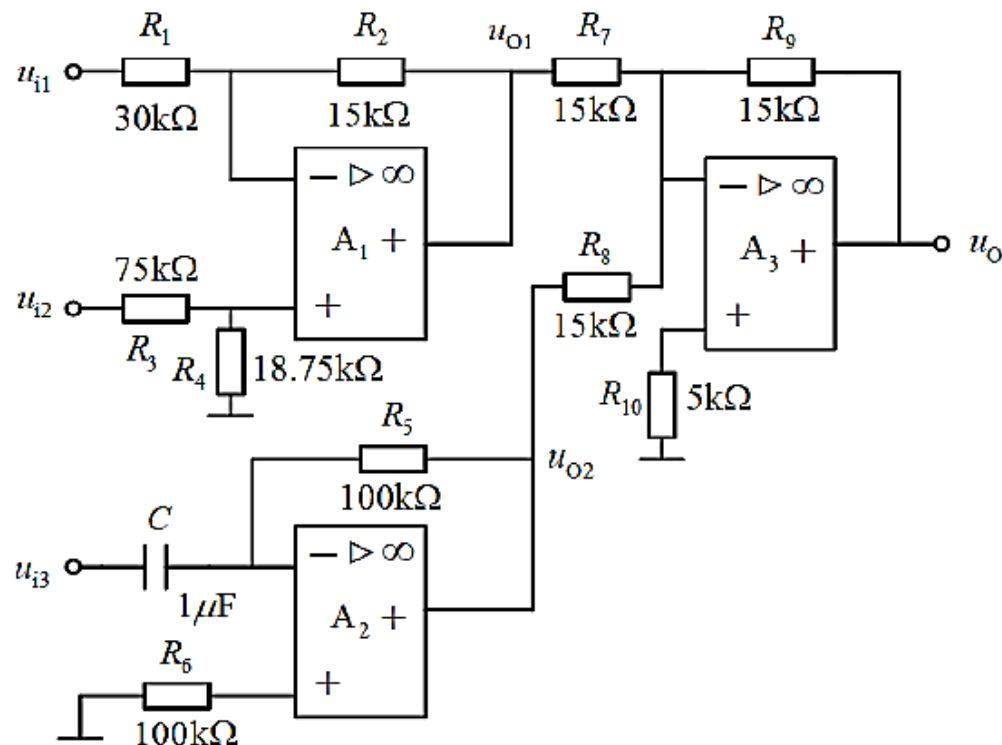
基本运算电路

例 10

运算电路如图所示，回答下列问题：

(1) 求解该电路的输出电压 u_O 与输入电压 u_{i1} 、 u_{i2} 、 u_{i3} 的运算关系；

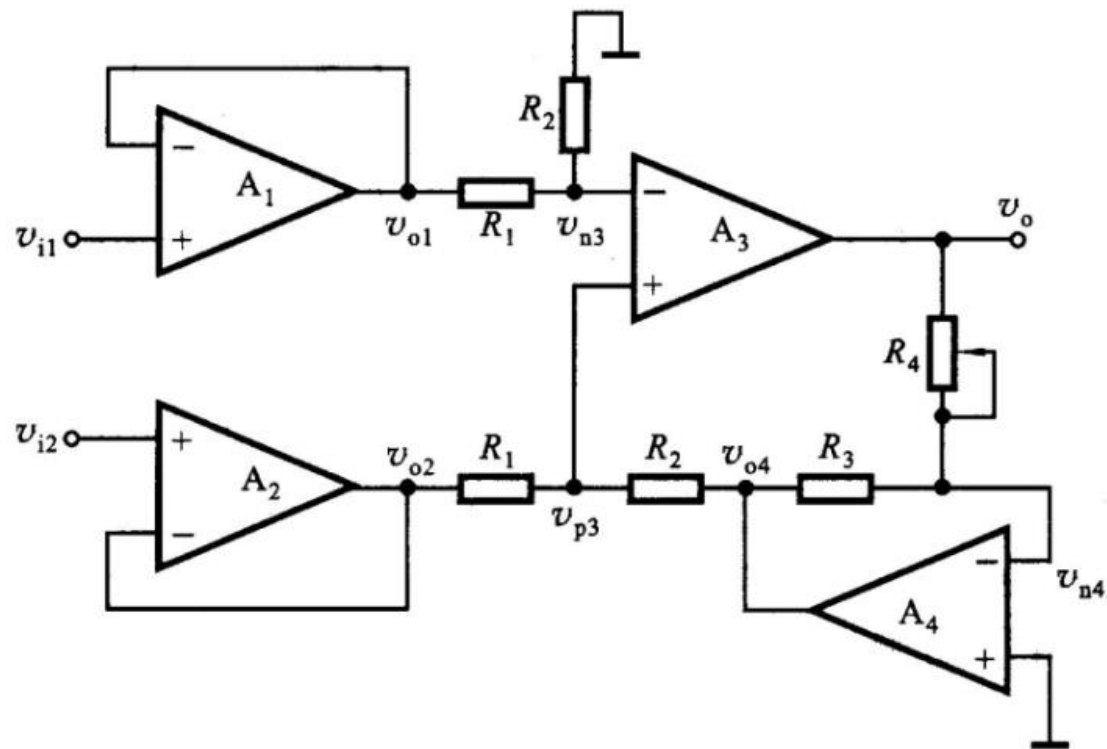
(2) 假设 $u_{i1} = 2V$ ， $u_{i2} = -1.5V$ ， $u_{i3}(t) = t^2 V$ ，欲使 $u_O = 3.85V$ ，从接入信号算起，需要经过多少时间？



基本运算电路

例 11

如图所示为一增益线性调节运放电路，试求出该电路的电压增益 $A_v = v_o / (v_{i1} - v_{i2})$ 的表达式。

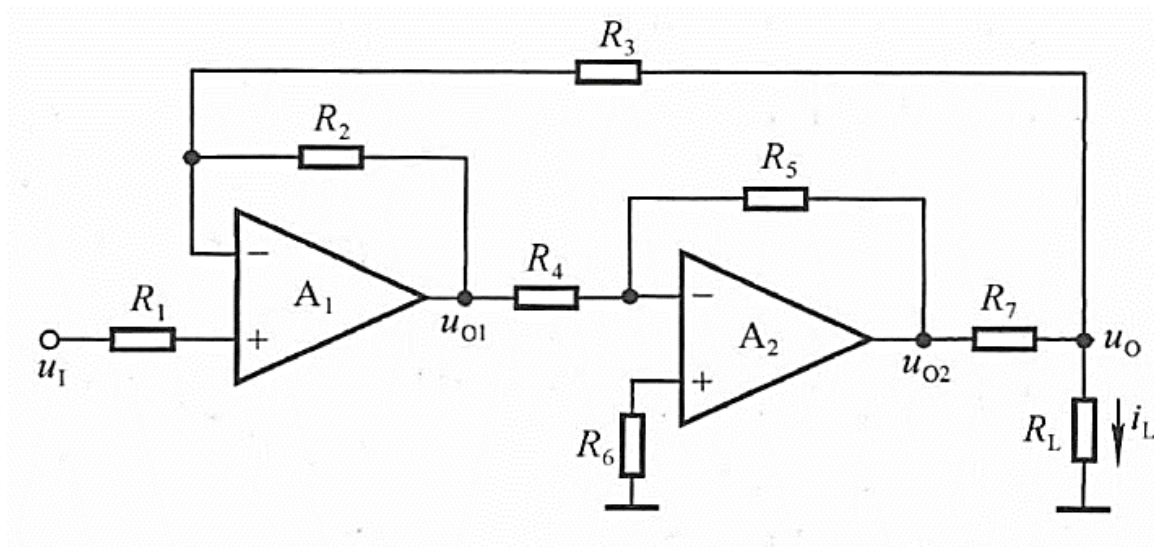


请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本运算电路

例 12

电路如图所示，已知 $R_2 = R_3 = R_4 = R_7 = R$ ， $R_5 = 2R$ ，请写出输出电流即负载电流 i_L 的表达式，并分析此电路的功能；



请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本运算电路

例 13

请利用集成运放设计一个运算电路，满足 $u_O = 10u_{I1} - 5u_{I2} - 4u_{I3}$

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本运算电路

例 14

要求利用集成运放设计一个运算电路，实现 $u_O = 100 \int u_{I1} dt + 10u_{I2}$ ；已知现有的电阻的最大值为 $100k\Omega$ 。

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本运算电路

例 15

请利用集成运放设计一个运算电路，满足 $u_O = 100 \int (2u_{I1} + 4u_{I2}) dt - 2u_{I3} - 3u_{I4}$

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

基本运算电路

小结

- 运算电路的计算分析；
- 集成运放工作在线性区的其他应用电路的分析；
- 运算电路的设计；