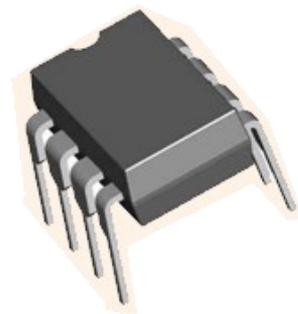


项目 3 集成运算放大器

任务 3.1 认识集成运算放大器

任务 3.2 集成运放的应用





项目导入

集成运算放大器最初应用于模拟计算机，对计算机内部信息进行加法、减法、微分、积分及乘、除法等数学运算，并因此而得名。

集成电路的技术发展将直接促进整机的小型化、高性能化、多功能化和高可靠性。毫不夸张地说，集成电路是工业的“食粮”和“原油”。随着 EDA 技术的普及和深化，电子技术必将会以前所未有的面貌出现。对学习者的而言，必须更新观念，加速对新器件、新特点的理解和应用。

本项目从集成运放的组成和基本特性入手，着重介绍由集成运放构成的线性应用电路，在此基础上再向读者介绍几种非线性应用电路。



知识目标与技能目标

了解集成运算放大器的一般概况；理解运放的基本结构、组成、符号及主要参数；熟悉集成运算放大器的基本类型及其应用；掌握集成运算放大器的理想化条件，并能运用理想化条件对集成运放电路进行分析；了解其常用的非线性应用器件。

具有正确判别集成芯片引脚功能的能力和运用实验手段正确连接集成运放各种运算电路的基本技能，具有对工程实际的集成电路的进行读图和识图的能力。



任务 3.1 认识集成运算放大器

提出问题



何谓集成运算放大器？集成运放芯片有什么特点？实用技术中如何正确选用集成运放？集成运放的哪些性能指标需在应用中注意？实际集成运放具有哪些条件才能按照理想运放来考虑？理想运放的传输条件和实际运放的传输条件一样吗？

知识准备

在半导体制造工艺的基础上，把整个电路中的元器件制作在一块硅基片上，构成特定功能的电子电路，称为集成电路（英文简称 IC）。集成电路的体积很小，但性能却很好。自 1959 年世界上第一块集成电路问世至今，只不过才经历了四十来年时间，但它已深入到工农业、日常生活及科技领域的相当多产品中。例如在导弹、卫星、战车、舰船、飞机等军事装备中；在数控机床、仪器仪表等工业设备中；在通信技术和计算机中；在音响、电视、录象、洗衣机、电冰箱、空调等家用电器中都采用了集成电路。

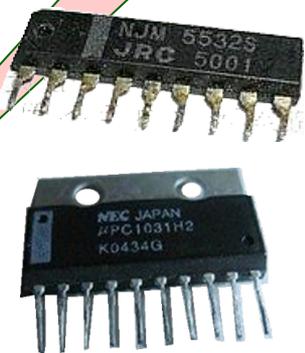
集成电路的技术发展将直接促进整机的小型化、高性能化、多功能化和高可靠性。毫不夸张地说，集成电路是工业的“食粮”和“原油”。



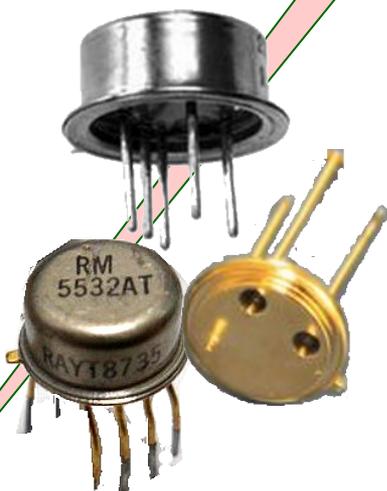
3.1.1 认识集成运算放大器

集成运算放大器简称运放，是一种多端集成电路。集成运放是一种价格低廉、用途广泛的电子器件。早期，运放主要用来完成模拟信号的求和、微分和积分等运算，故称为运算放大器。现在，运放的应用已远远超过运算的范围。它在通信、控制和测量等设备中得到广泛应用。常见集成运放的封装形式如下：

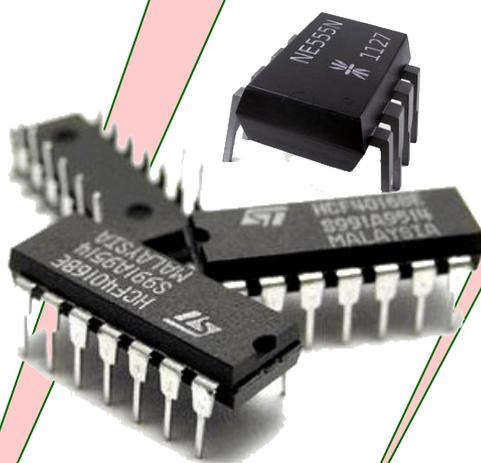
单列扁平式



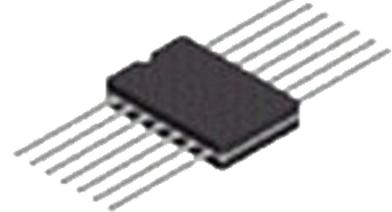
圆壳式



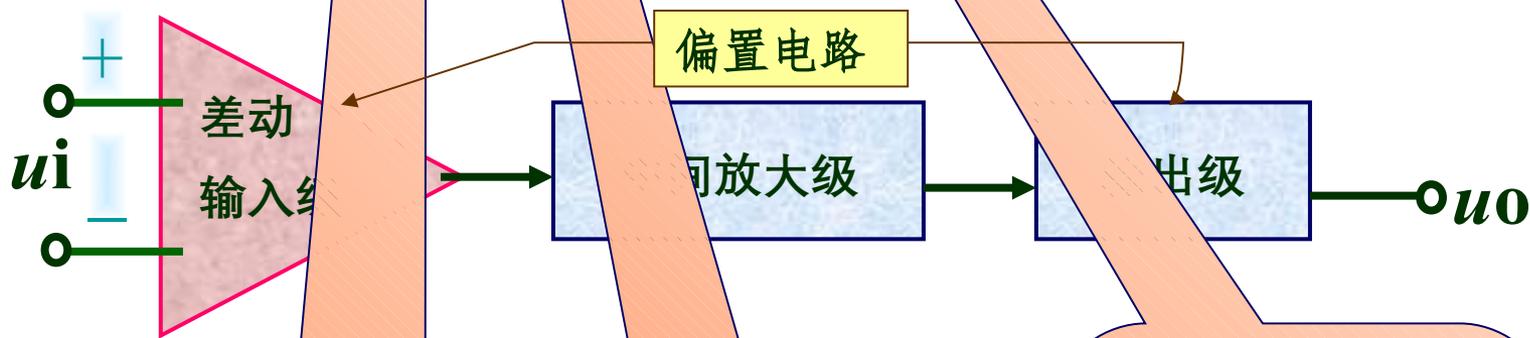
双列直插式



扁平式



集成运放的型号和种类很多，内部电路也各有差异，但它们的基本组成成分相同，如下图所示：



运放的输入级。利用差动放大电路的对称特性可提高整个电路的共模抑制比和电路性能。

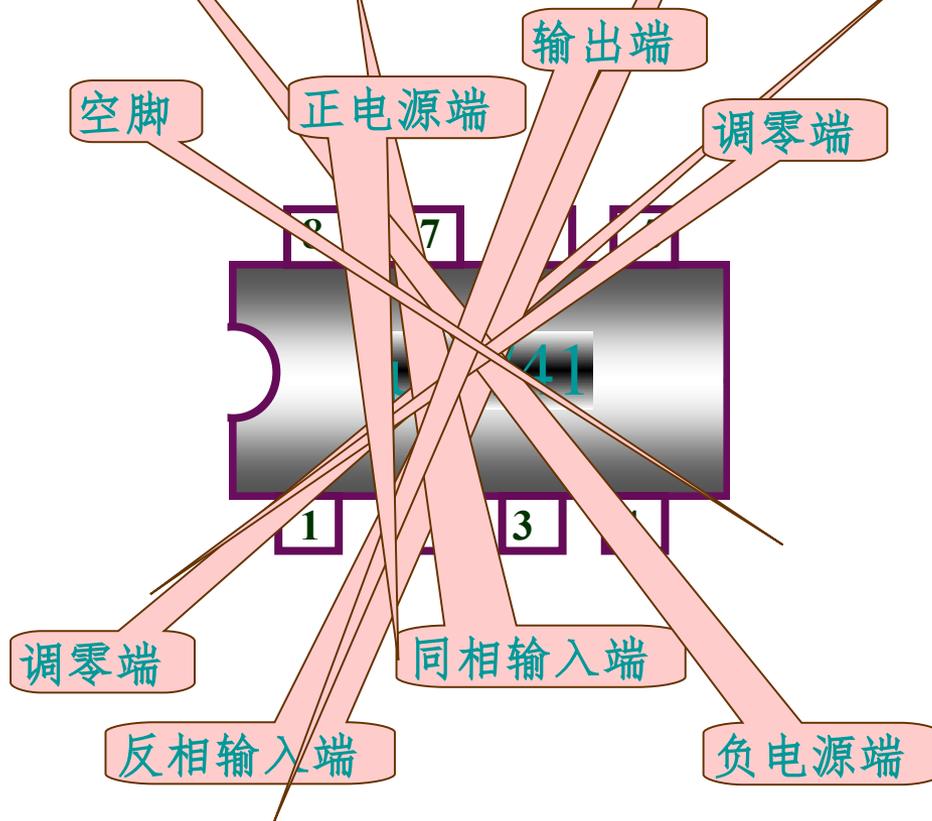
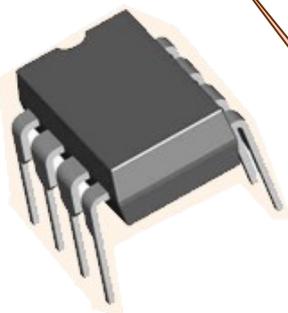
中间级的主要作用是提高电压增益。一般由多级放大电路组成。

输出级常用电压跟随器或互补电压跟随器组成，以降低输出电阻，提高带负载能力。

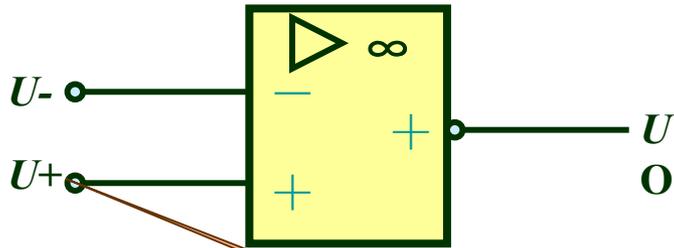
集成运放内部除了上述三个部分，还接有偏置电路，偏置电路的作用是向各级提供合适的工作电流。

3.1.2 集成运放芯片的特点

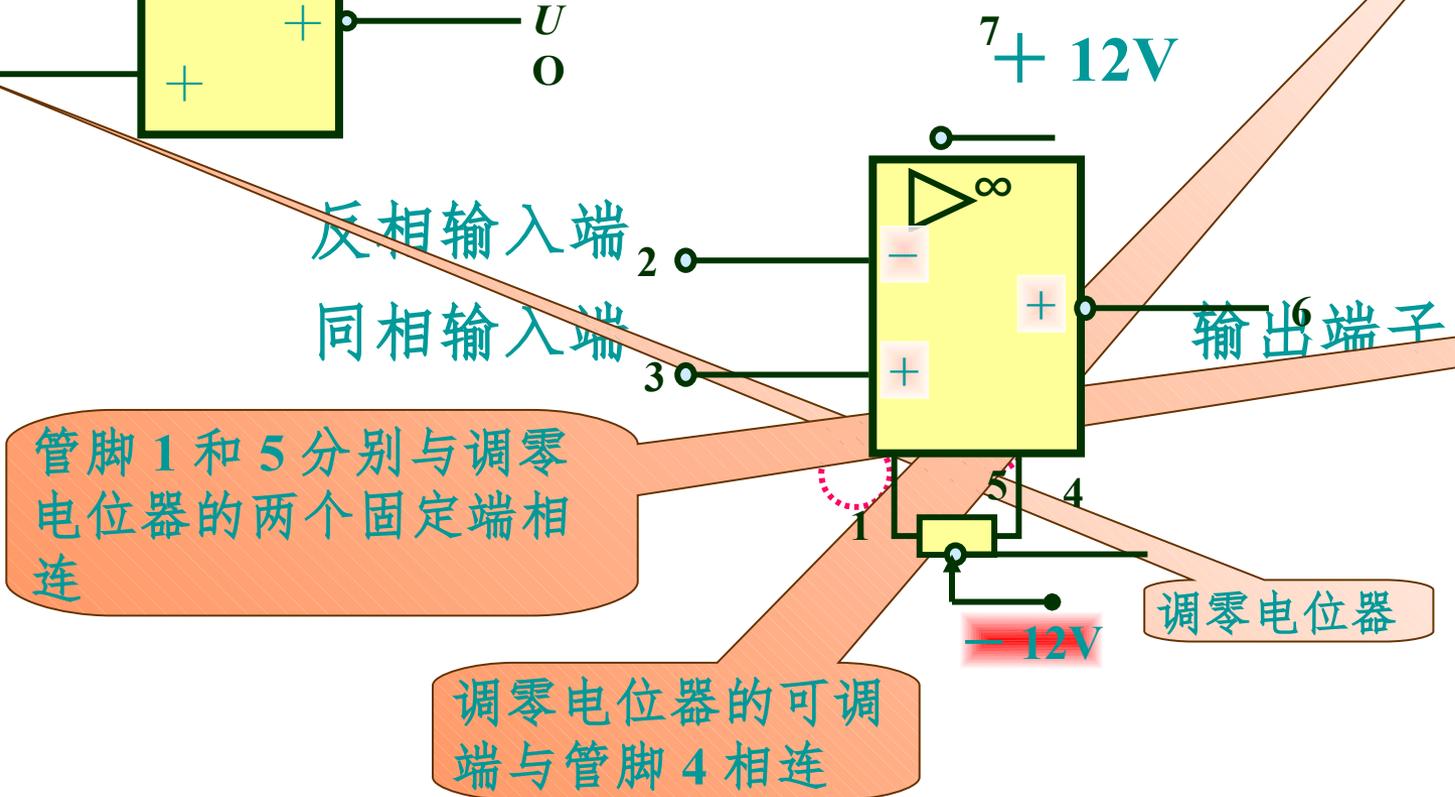
图示为常用 $\mu A741$ 集成运放芯片产品实物图
 $\mu A741$ 集成运放的 8 个管脚排列图如下：



μA741 集成运放图形符号



μA741 集成运放外部接线图



3.1.3 集成运放的选择及主要性能指标

1. 开环电压放大倍数 A_{uo}

其数值很高，一般约为 $10^4 \sim 10^7$ 。该值反映了输出电压 U_o 与输入电压 U_+ 和 U_- 之间的关系。

2. 差模输入电阻 r_i

运放的差动输入电阻很高，一般在几十千欧至几十兆欧。

3. 闭环输出电阻 r_o

由于运放总是工作在深度负反馈条件下，因此其闭环输出电阻很低，约在几十欧至几百欧之间。

4. 最大共模输入电压 U_{icmax}

指运放两个输入端能承受的最大共模信号电压。超出这个电压时，运放的输入级将不能正常工作或共模抑制比下降，甚至造成器件损坏。



3.1.4 集成运放的理想化条件及传输特性

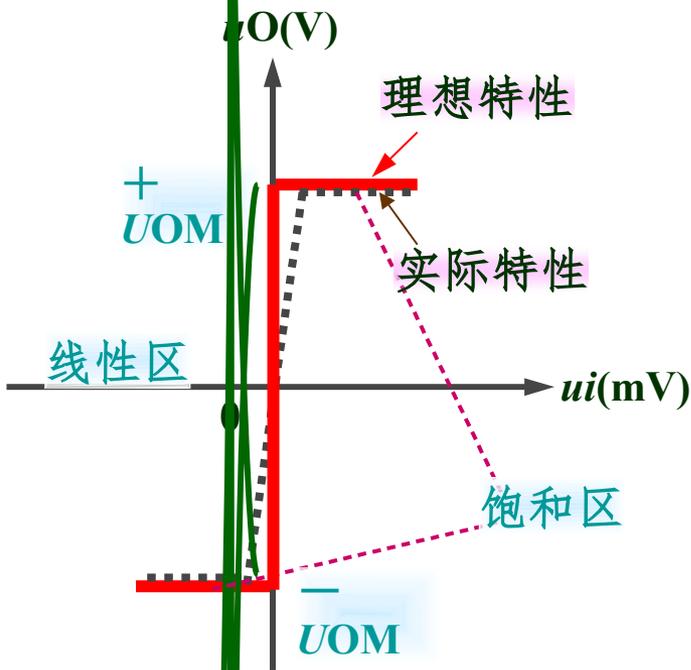
1. 集成运放的理想化条件

为简化分析过程，同时又能满足实际工程的需要，常把集成运放理想化，集成运放的理想化参数为：

- ① 开环电压放大倍数 $A_{uo}=\infty$
- ② 差模输入电阻 $r_i=\infty$
- ③ 输出电阻 $r_o=0$
- ④ 共模抑制比 $K_{CMR}=\infty$



2. 集成运放的传输特性



根据集成运放的实际特性和理想特性，可分别画出其相应的电压传输特性。

可以看出，当集成运放工作在线性区 ($+U_{OM} \sim -U_{OM}$) 时，其实际特性与理想特性非常接近；由于集成运放的电压放大倍数相当高，即使输入电压很小，也足以让运放工作在饱和状态，使输出电压保持稳定。

集成运放工作在线性区时输出电压与输入电压之间的关系



集成运放工作在线性区的特点

由  可知，理想运放工作在线性区时，输出电压 U_O 与输入电压 U_i 之间是线性放大关系。

因 $A_{uo}=\infty$ ，所以可导出

运放工作在线性区差模输入电压等于零，说明  即理想运放的两个输入端电位相等。

两点等电位相当于短路。理想运放的两个输入端并没有真正短接，但却具有短接的现象称为“虚短”。

又由于理想运放的差模输入电阻 $r_i=\infty$ ，所以可近似地认为两个输入端均无电流流入。这种现象称为“虚断”。

“虚短”和“虚断”是运放工作在线性区的两个重要结论





思考与问题

集成运放由哪几部分组成？各部分的主要作用是什么？

试述理想运放的理想化条件有哪些？

工作在线性区的理想运放有哪两条重要结论？试说明其概念？



拓展阅读

位于永川区重庆城市科技学院内的中国集成电路创业史陈列馆是国内唯一的一所宣传展示我国集成电路创业发展历史的陈列馆，这里曾是原电子工业部 1424 研究所旧址，也是我国第一块大规模集成电路诞生的地方。

那时，科研工作时间紧、任务重、条件艰苦，加班加点成了家常便饭，即便累得腰酸背疼，也从无人叫苦叫累。

为了科研，在老一辈集成电路人的努力下，集成电路领域的诸多第一诞生了：我国第一颗 PMOS 型大规模集成电路 LSI-120 位 MOS 移位寄存器，实现了从中小集成电路发展到大规模集成电路的跨越；我国第一个 1K、4K 静态存储器 SRAM、第一块超大规模集成电路单电源 16K 位动态存储器 DRAM、第一块 ECL 电路 S12、第一个 ECL10K 系列和 ECL100K 系列电路；第一代运算放大器系列、集成稳压电源系列和第一套彩色电视机成套电路系列；第一块 A/D、D/A 转换器、第一批抗加模拟电路、第一块 RF 频率合成器、第一块大规模射频接收机单片模拟集成电路……

通过了解中国集成电路创业发展的艰辛历程，感受老一辈共产党员在艰苦环境下创新创业、勇攀高峰、为国奉献的精神，激发青年一代素质过硬业务精湛的新时代大国工匠精神。



任务 3.2 集成运放的应用



提出问题

集成运放的线性应用有何显著特点？应用在哪些场合？
集成运放应用在非线性区又有什么特点？有哪些应用场合？

3.2 集成运放的应用

当集成运放通过外接电路引入负反馈时，集成运放成闭环状态并且工作于线性区。运放工作在线性区可构成模拟信号运算放大电路、正弦波振荡电路和有源滤波电路等。

运算电路分析方法要点

在对集成运放应用电路的分析过程中，一般将实体运放视为理想运算放大器来处理，只有在需要研究应用电路的误差时，才会考虑实际运算放大器特性带来的影响。



1. 反相比例运算电路

因为运放的输入电阻 r_i 很大, 所以 $i_+ \approx i_- \approx 0$,

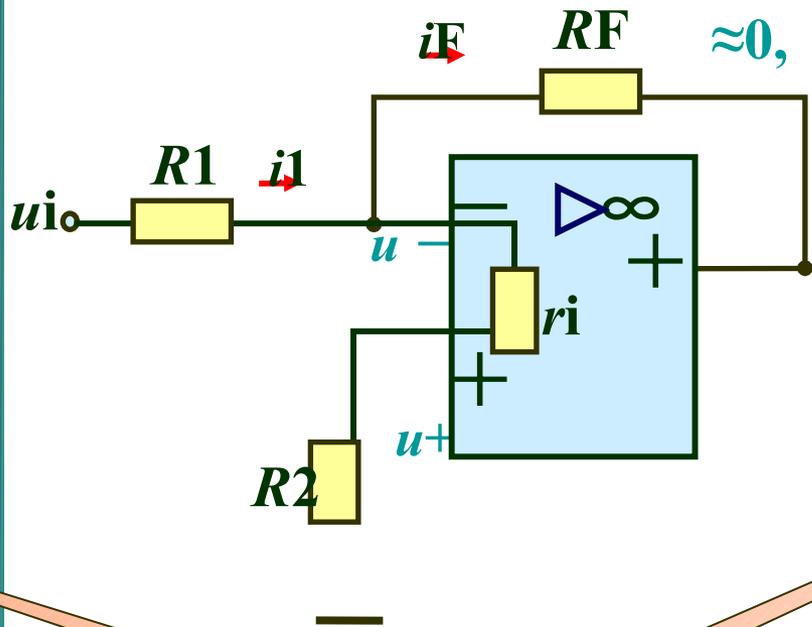
由“虚断”可推出同相端电位 $u_+ = 0$,

根据“虚短”又可推出: $u_- =$

$u_+ = 0$ 可得 $i_1 = \frac{u_i}{R_1}$ $i_F = -\frac{u_o}{R_F}$

由于 $i_- \approx 0$, 所以 $i_1 = i_F$

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



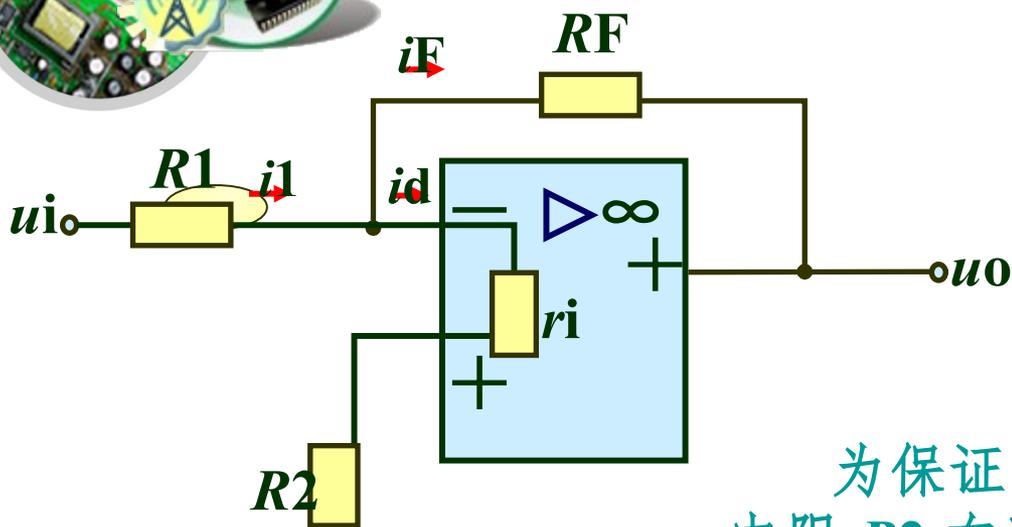
整理后可得

负号说明输入输出反相

输出与输入的比例值

实现了输出对输入的反相比例运算。比例常数等于电路的环路电压增益。





反比例运算电路引入了哪种组态的负反馈？

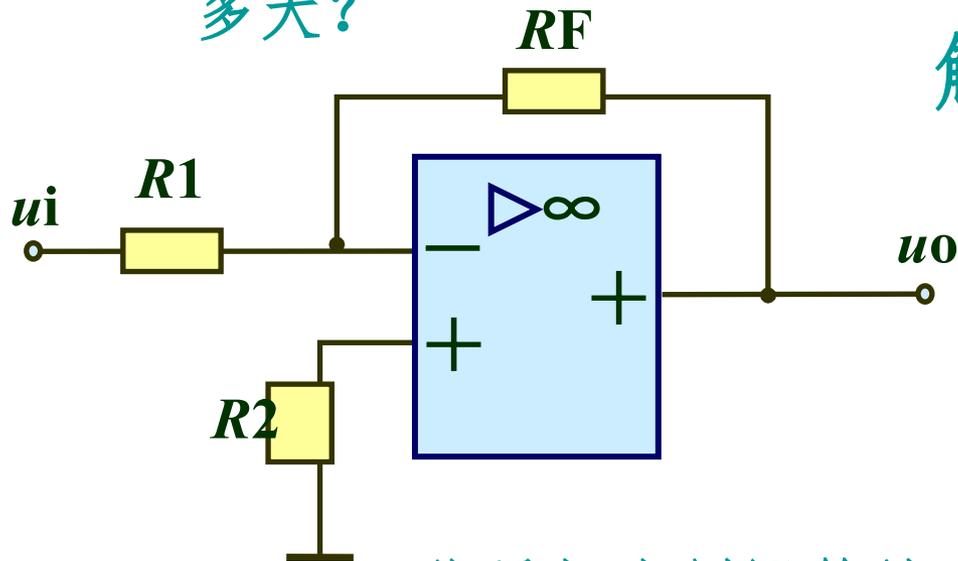
为保证电路的平衡性，要求同相端电阻 R_2 在数值上应设置为 $R_2 = R_1 // R_F$

由反馈量 $i_F = -\frac{u_o}{R_F}$ 可看出，反馈量取自于输出电压，且令输出电压为 0 时，反馈量不再存在，因此判断为电压反馈；

因反馈量 i_F 、输入量 i_1 和运放净输入量 i_d 三者之间在输入端是以电流求和的形式出现，所以判断为并联反馈。因此，反比例运算放大电路的反馈类型为：电压并联负反馈。



例 $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_F=20\text{k}\Omega$, $u_i = -1\text{V}$ 。求 : u_o , R_2 应为多大?



解 该电路为反相比例运算放大器，电路中的闭环电压增益（比例系数）为：

$$A_{uf} = -\frac{R_F}{R_1} = -\frac{20}{10} = -2$$

此反相比例运算放大器的输出电压：

$$u_o = A_{uf}u_i = -2(-1) = 2\text{V}$$

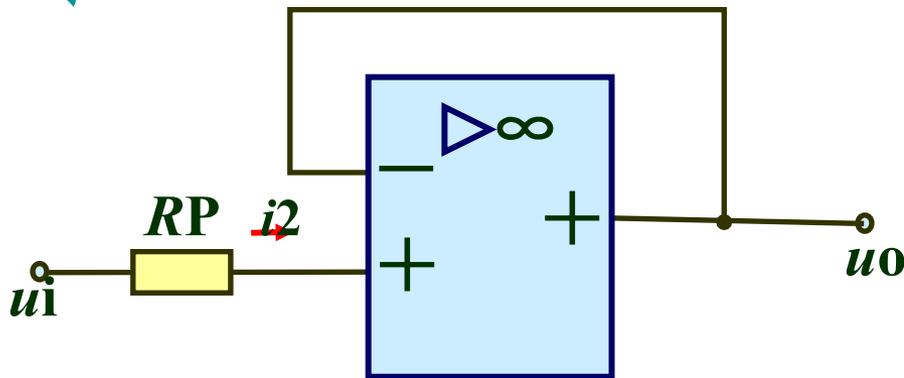
电路中平衡电阻 R_2 为

$$: R_2 = R_1 // R_F = 10 // 20 \approx 6.7\text{k}\Omega$$



应用举例 电压跟随器

如果同相比例运算电路中的 $R_1=\infty$ ， $R_F=0$ 时，电路如图所示



由“虚断”可推出：

$$i_2=0,$$

根据“虚短”又可推出：

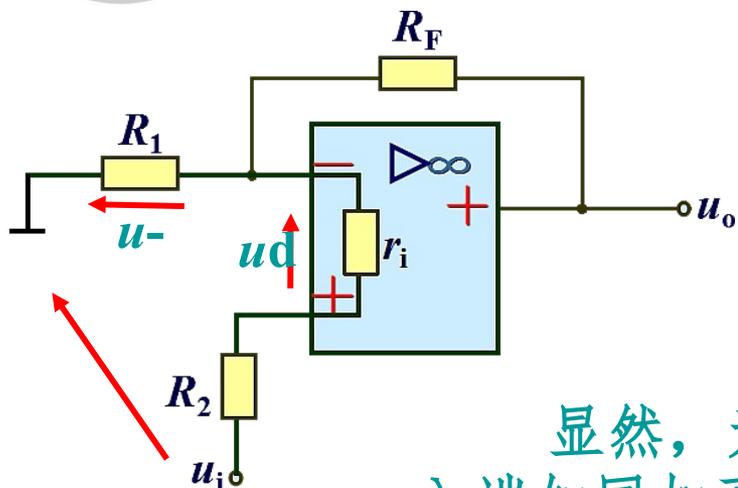
$$u_- = u_+ \approx u_i = u_o$$

$$\text{即 } u_o = u_i \quad A_u = 1$$

此电路是电压并联负反馈；具有输入电阻大，输出电阻小的特点，在电路中作用与分离元件的共集电极放大电路相同，但是电压跟随性能更好一些。



2. 同相比例运算电路



因为运放的输入电阻 $r_i \rightarrow \infty$ ，所以

由“虚断”可推出同相端电位 $u_+ \approx u_i$

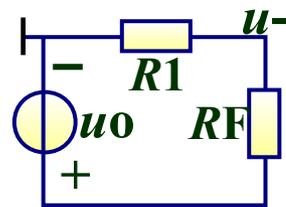
根据“虚短”又可推出： u_-

$\approx u_+ \approx u_i$ ，

显然，无反馈信号时，同相输入运放的两个输入端如同加了一对共模信号，净输入电压 $u_d = u_+ -$

当电路加入反馈通道后，反相端电位

$$u_- = \frac{R_1}{R_1 + R_F} u_o = F_C u_o \quad F_C \text{ 为反馈系数}$$



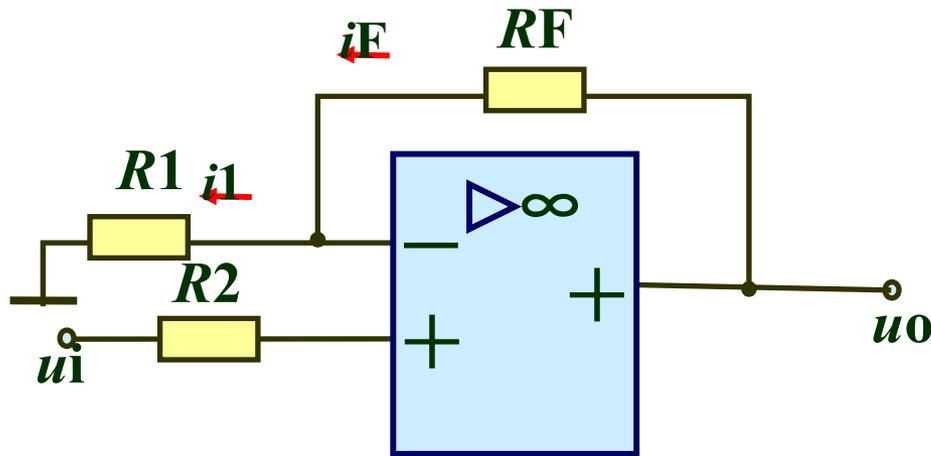
反馈量 u_- 取自于输出电压，为电压反馈，反馈量 u_- 、净输入量 $u_d = u_+ - u_-$ 和输入量 u_i 三者输入端以电压求和出现，为串联反馈

同相比例运算电路的反馈类型：电压串联负反馈

$$u_d = u_i - u_-$$



同相比例运算电路输出输入关系



电路输入电
流

反馈支路电流 $i_F = \frac{u_o - u_i}{R_F}$

整理后可得

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_i$$

输出与输入的比例值或环路电压增益

由“虚断”可得

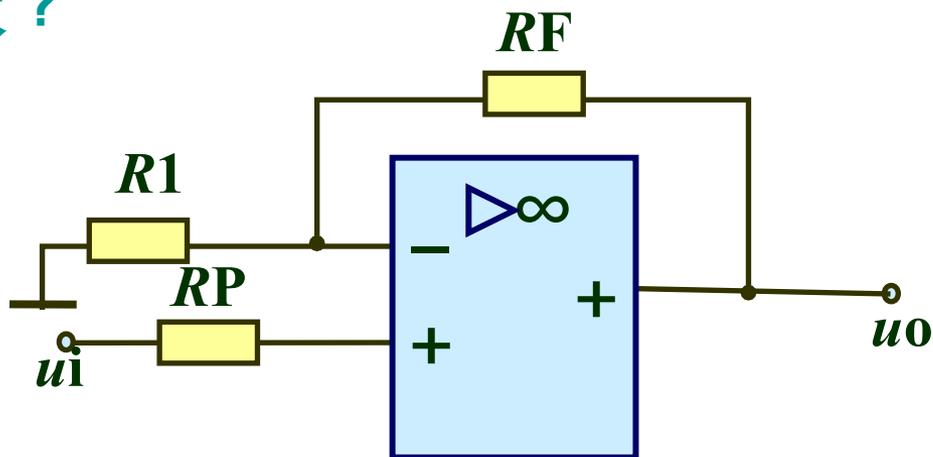
所以 $\frac{u_i}{R_1} = \frac{u_o - u_i}{R_F}$

显然同相比例运算电路的输出必然大于输入。为保证电路的平衡性，与反相比例运算电路相同，平衡电阻

$$R_2 = R_1 // R_F$$



例 $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_F=20\text{k}\Omega$, $u_i = -1\text{V}$ 。求 : u_o , R_P 应为多大 ?



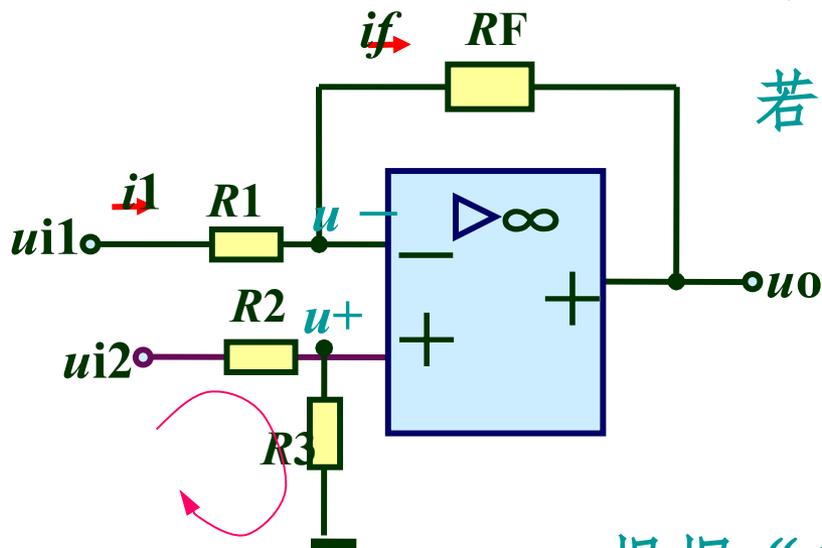
解 $A_{uf} = 1 + \frac{R_F}{R_1} = 1 + \frac{20}{10} = 3$

$$u_o = A_{uf} u_i = 3(-1) = -3\text{V}$$

$$R_P = R_1 // R_F = 10 // 20 \approx 6.7\text{k}\Omega$$



3. 双端输入差分运算电路



不存在“虚地”现象

根据分压关系可得 $u_+ = u_{i2} \frac{R_3}{R_2 + R_3}$

若 $R_2 = R_3$ ，则 $u_- = u_+ = \frac{u_{i2}}{2}$

$$i_1 = \frac{u_{i1} - u_-}{R_1} = \frac{u_{i1} - u_{i2}/2}{R_1}$$

$$i_f = -\frac{u_o - u_-}{R_F} = \frac{-u_o + u_{i2}/2}{R_F}$$

根据“虚断” $i_1 = i_f$

可得 $\frac{u_{i1} - u_{i2}/2}{R_1} = \frac{-u_o + u_{i2}/2}{R_F}$ 若 $R_1 = R_F$ ，整理后可得：

$u_o = u_{i2} - u_{i1}$ 实现了输出对输入的差分减法运算。



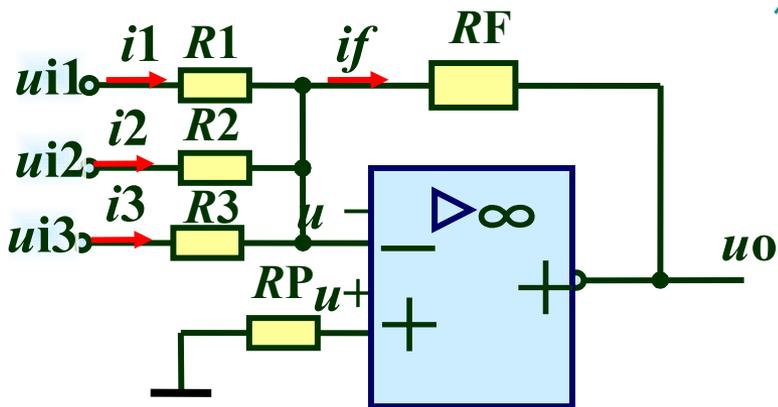
反相求和运算电路

反相电路存在“虚地”现象，因此

$$u_- = u_+ = \text{“地”}$$

可得 $i_1 = \frac{u_{i1}}{R_1}, i_2 = \frac{u_{i2}}{R_2}$

$$i_3 = \frac{u_{i3}}{R_3}, i_f = -\frac{u_o}{R_F}$$



因为 $i_1 + i_2 + i_3 = i_f$ 将各电流代入 $\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3} = -\frac{u_o}{R_F}$

整理上式可得 $u_o = -R_F \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3} \right)$

如果取各输入电阻 $R_1 = R_2 = R_3$ 则有 $u_o = -\frac{R_F}{R_1} (u_{i1} + u_{i2} + u_{i3})$

若再取 $R_1 = R_F$ 则 $u_o = -(u_{i1} + u_{i2} + u_{i3})$ 实现了反相求和运算



4. 微分运算电路

微分电路属于反相输入电路，因此同样存在“虚地”现象，即

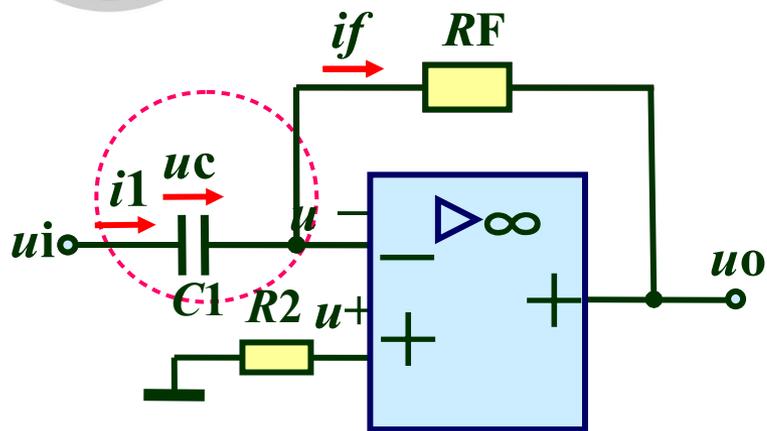
$$u_- = u_+ = \text{“地”电位“0”}$$

因为 $i_1 = C_1 \frac{du_C}{dt} = C_1 \frac{du_i}{dt}$

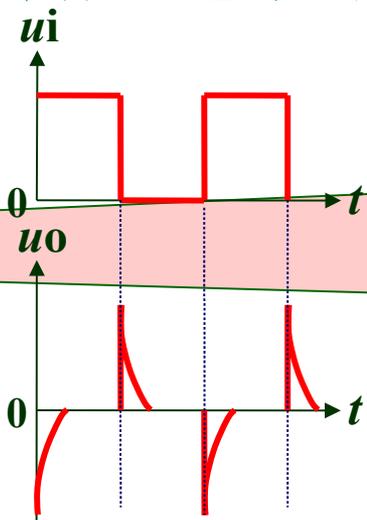
为保证电路的平衡， $R_F = R_2$ 又有 $i_1 = i_f = C_1 \frac{du_i}{dt} = -\frac{u_o}{R_F}$

所以 $u_o = -R_F C_1 \frac{du_i}{dt}$

电路实现了输出电压正比于输入电压对时间的微分。式中的比例常数 $R_F C_1$ 称为电路的时间常数

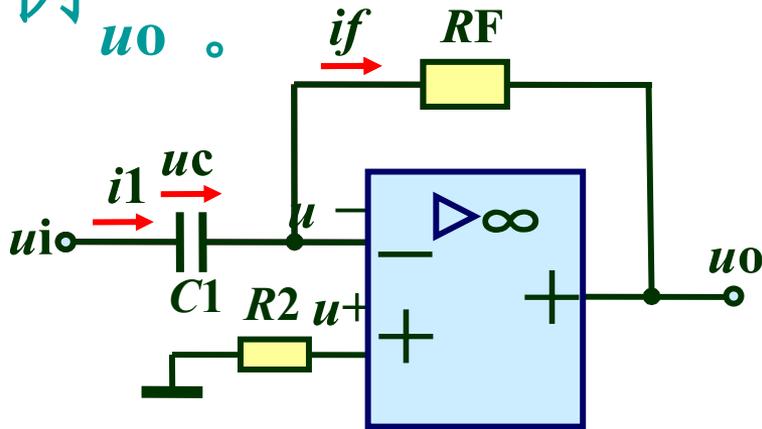


为保证电路的平衡，



微分电路可用于波形变换，将矩形波变换成尖脉冲；且 u_o 与 u_i 相位反相

例 已知微分运算电路的输入量, $u_i = -\sin \omega t \text{V}$, 求 u_o 。

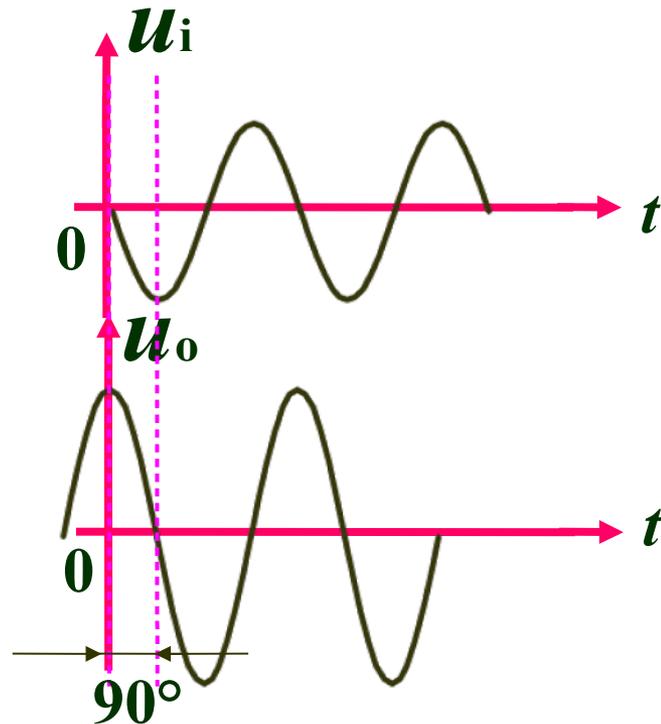


解

$$u_o = -RC \frac{du_i}{dt}$$

$$u_o = RC \omega \cos \omega t$$

$$= RC \omega \sin(\omega t + 90^\circ) \text{V}$$



5. 积分运算电路

反比例运放中的偏置电阻用电容代替即为积分电路

积分电路也存在“虚地”现象，即

$$u_- = u_+ = \text{“地”}$$

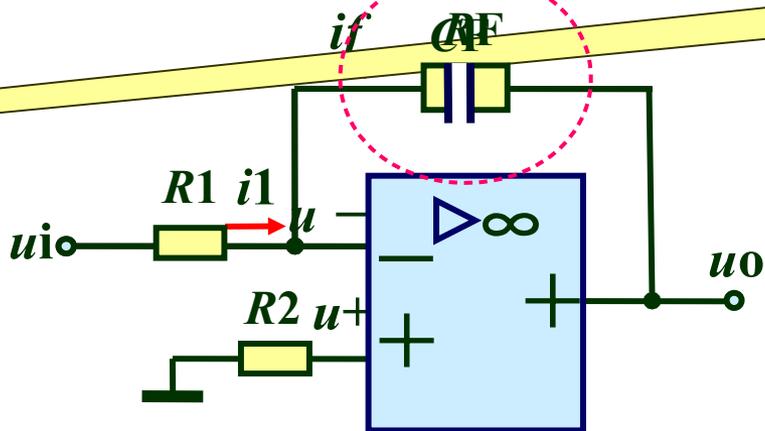
$$\text{可知 } u_o = -u_C = -\frac{1}{C_F} \int i_f dt$$

$$\text{因为 } u_i = i_1 R_1 = i_f R_1$$

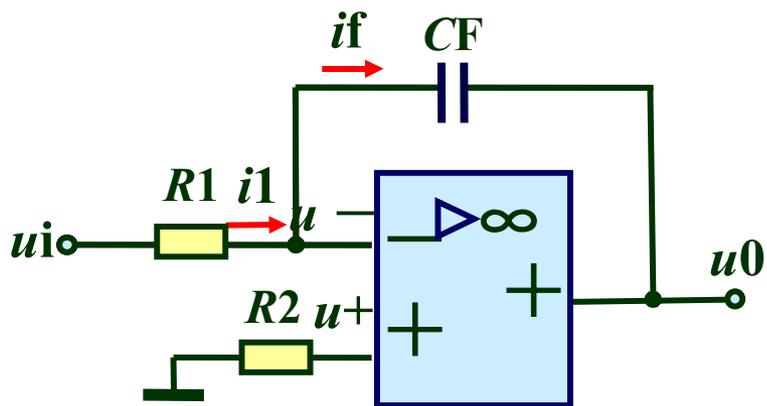
$$\text{所以 } u_o = -\frac{1}{C_F} \int i_1 dt, \text{ 其中 } i_1 = \frac{u_i}{R_1}$$

$$\text{将 } i_1 \text{ 代入 } u_o \text{ 表达式得 } u_o = -\frac{1}{R_1 C_F} \int u_i dt$$

电路实现了输出电压正比于输入电压对时间的积分。式中的比例常数 $R_1 C_F$ 称为电路的时间常数。



应用实例

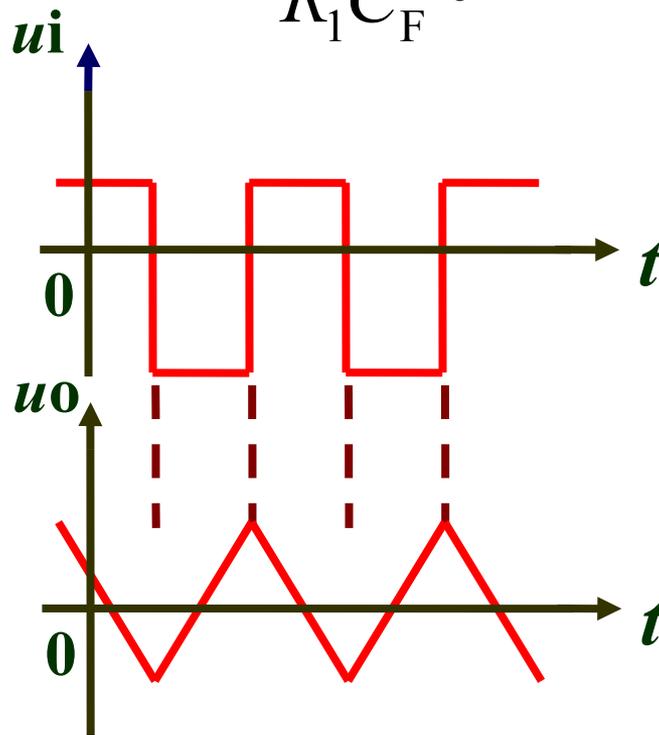


所以
$$u_o = -\frac{1}{C_F} \int i_f dt$$

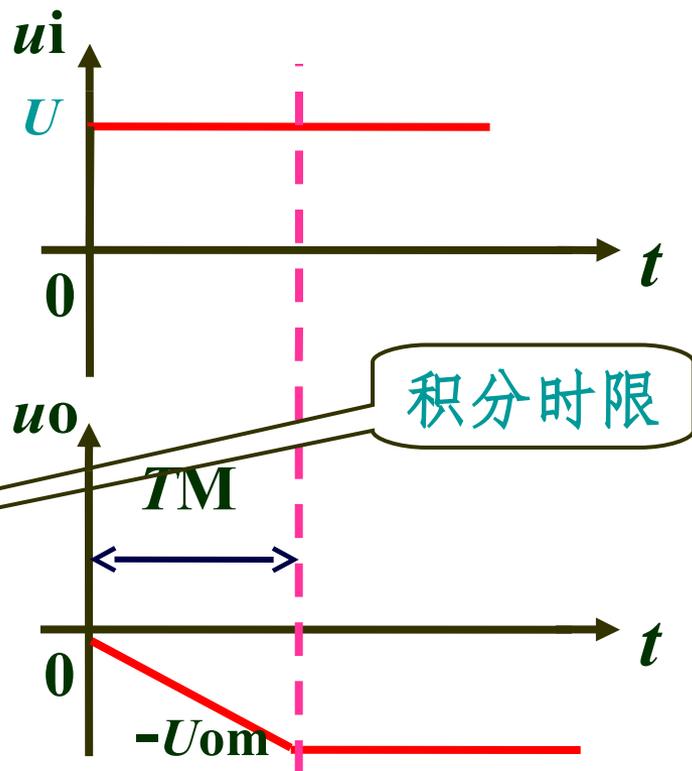
$$= -\frac{1}{R_1 C_F} \int u_i dt$$

(1) 输入方波，输出是三角波（ t_0 时刻电容电压为0）。

因为
$$i_f = i_1 = \frac{u_i}{R_1}$$



(2) 输入直流电压，输出将反向积分，一定时间 T_M 后输出饱和，积分停止。



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

$$-U_{om} = -\frac{1}{RC} U T_M$$

$$T_M = \frac{RC U_{om}}{U}$$

定时作用!



例 已知积分电路的输入量是直流 $U_i = -3V$ ，画出 u_o

解 $u_o = -\frac{1}{RC} \int u_i dt$

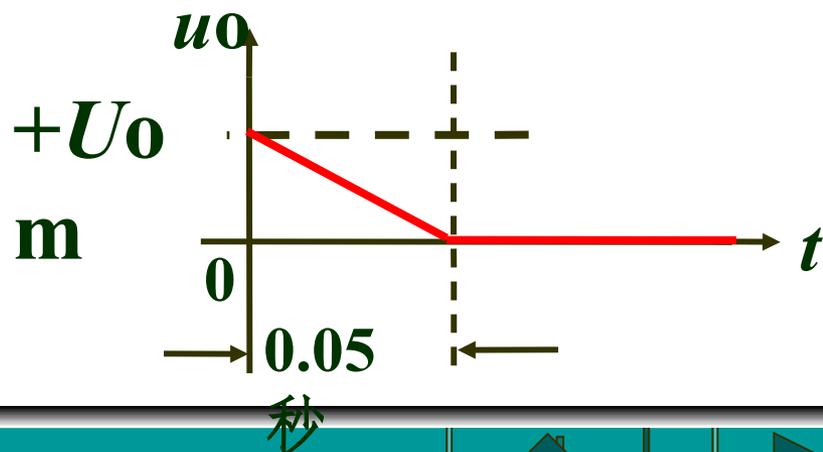
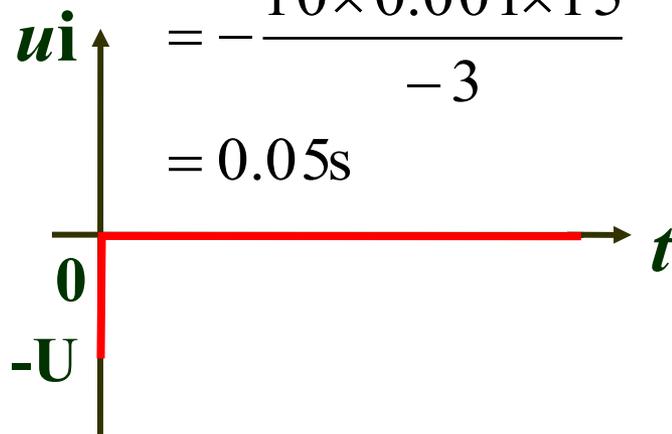
$$= -\frac{1}{RC} \int (-3) dt$$

$$= \frac{3}{RC} t$$

则 $t = -\frac{RCU_{om}}{U}$

$$= -\frac{10 \times 0.001 \times 15}{-3}$$

$$= 0.05s$$



反相积分器：

如果 u_i 是直流电压，输出将反相积分，经过一定的时间 t 后输出饱和。

设 $U_{om}=15V$ ， $R=10k\Omega$ ， $C=1\mu F$



课堂练习

1. 理想运算放大电路的两个重要结论是 c 。
 a. 虚地与反相 b. 虚短与虚地 c. 虚短与虚断 d. 断路和短路
 a
2. 集成运放一般分为两个工作区，它们是 _____ 工作区。
 a. 线性与非线性 b. 正反馈与负反馈 c. 虚短和虚断
3. 施加深度负反馈可使运放进入 _____ ；使运放开环或加正反馈可使运放进入 _____ 。
 a. 非线性区 b. 线性工作区
4. 集成运放能处理 _____ 。
 a. 交流信号 b. 直流信号 c. 交流信号和直流信号
5. 由理想运放构成的线性应用电路，其电路放大倍数与运放本身的参数 _____ 。
 a. 有关 b. 无关 c. 有无关系不确定





思考与练习

1. 集成运放构成的基本线性应用电路有哪些？这些基本电路中，集成运放均工作在何种状态下？
2. “虚地”现象只存在于线性应用运放的哪种运算电路中？
3. 举例说明理想集成运放两条重要结论在运放电路分析中的作用。
4. 工作在线性区的集成运放，为什么要引入深度电压负反馈？而且反馈电路为什么要接到反相输入端？
5. 若给定反馈电阻 $R_F = 100\text{k}\Omega$ ，试设计一个 $u_o = -10u_i$ 的运算电路。



3.2.2 集成运放的非线性应用

1. 集成运放工作在非线性区的特点

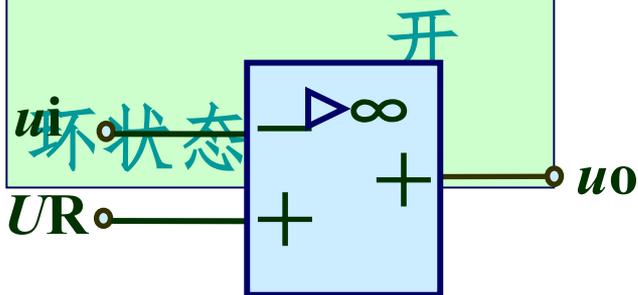
① 集成运放应用在线性电路时，处于开环或正反馈状态下。

② 非线性运用状态下， $U_+ \neq U_-$ ，“虚短”概念不再成立。当同相输入端信号电压 U_+ 大于反相输入端信号电压 U_- 时，输出端电压 U_O

③ 非线性应用下的运放，虽然同相输入端和反相输入端信号电压不相等，但由于其输入电阻很大，所以输入端的信号电流仍可视为零值。因此，非线性应用运放仍可应用“虚断”的概念分析问题。

④ 非线性区的运放，输出电阻仍可以认为是零值。此时运放的输出量与输入量之间为非线性关系，输出端信号电压或为正饱和值，或为负饱和值。

特点：运放处于

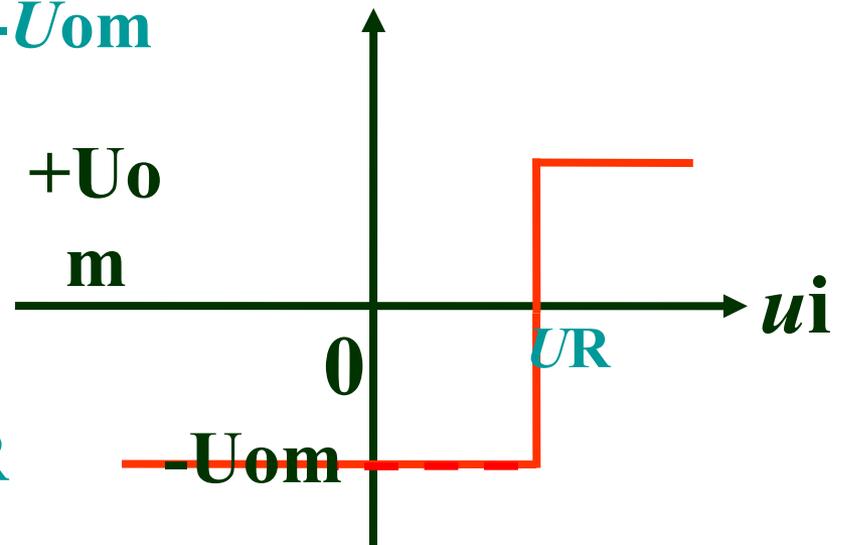


U_R 为参考电压

跃变发生在基准电压 U_R 处

因 U_R 接在同相端，所以当 $u_i < U_R$ 时， $u_o = +U_{om}$

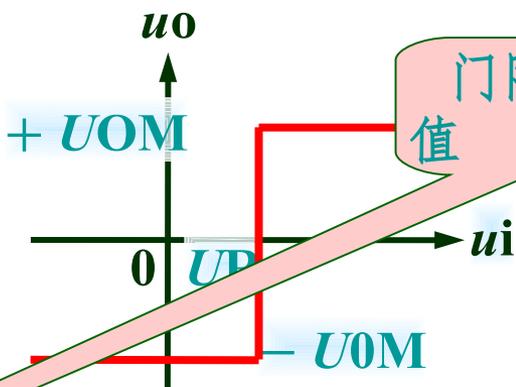
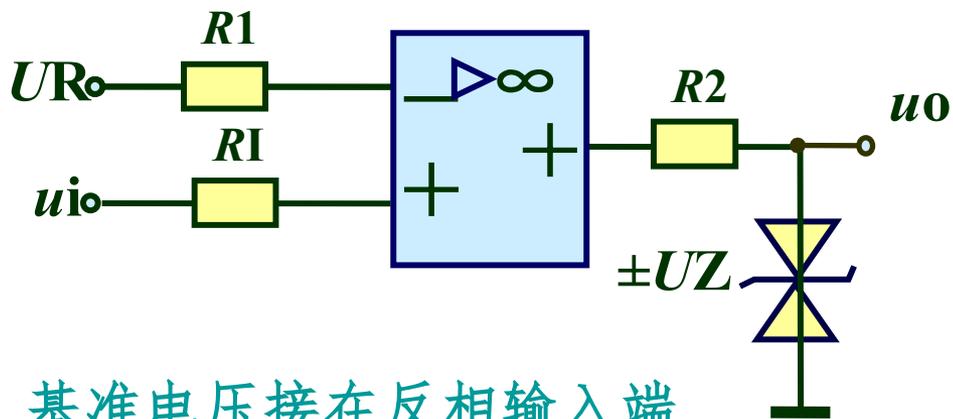
当 $u_i > U_R$ 时， $u_o = -U_{om}$



集成运放工作于非线性区的显著特点就是运行在开环或正反馈状态下；因运放的开环电压放大倍数 A_u 极高，所以只要输入一个很小的信号电压，即可使运放进入非线性区。运放工作于非线性区时，输入和输出不成线性关系。

2. 单门限电压比较器

单门限电压比较器只有一个门限电平，当输入电压达到此门限值时，输出状态立即发生跳变。



门限电平
值

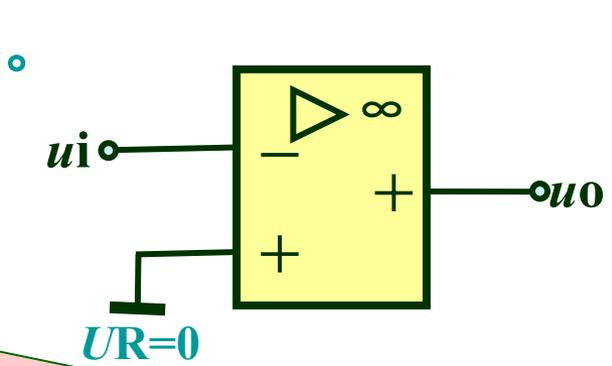
注意：基准电压接在反相输入端时与接在同相端时的情况不同。

电压比较器广泛应用于模/数接口、电平检测及波形变换等领域中。



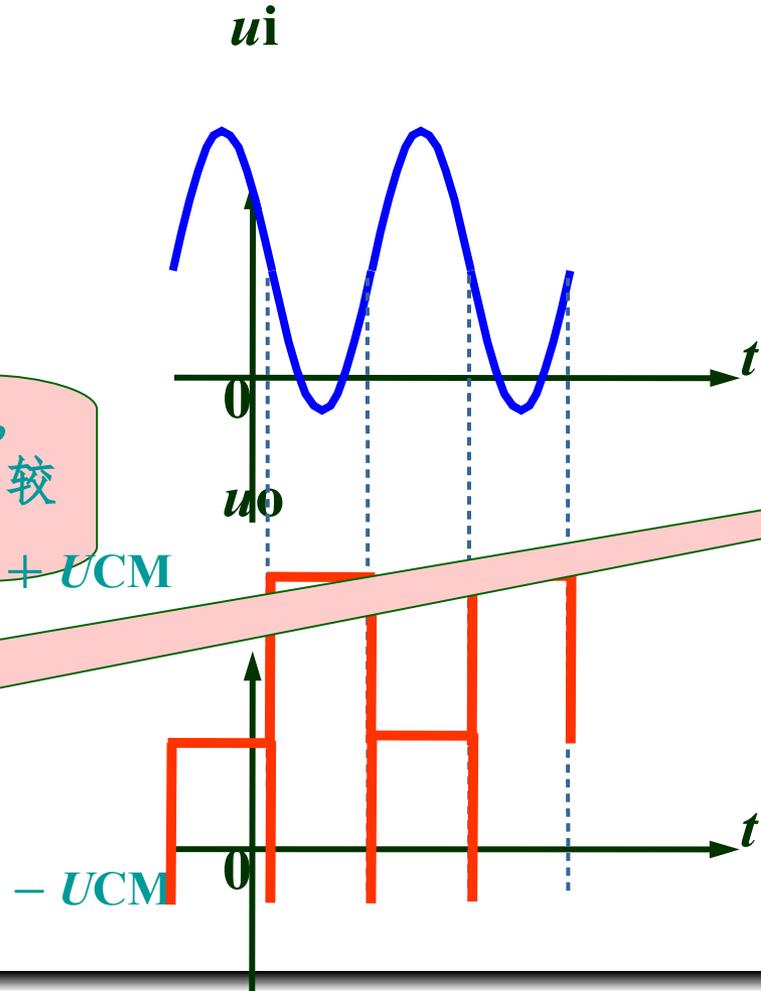
电压比较器应用实例

利用电压比较器可以把正弦波变换成方波



当门限电压等于 0 时，比较器称为过零电压比较器。

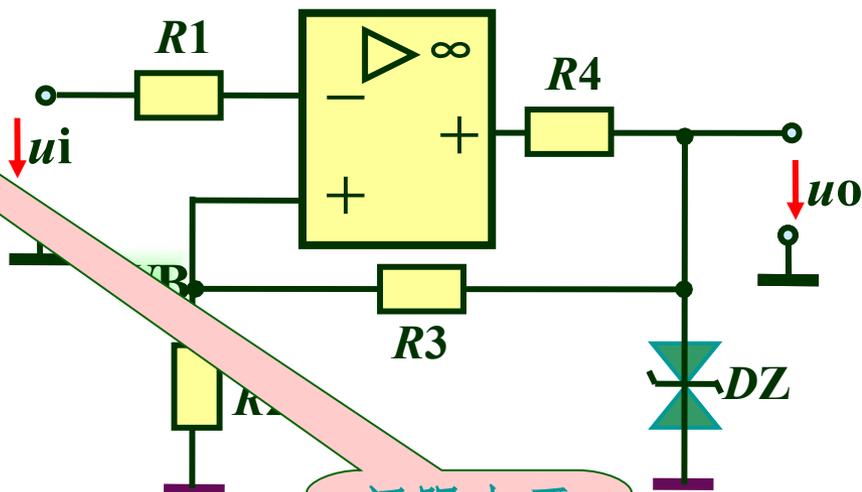
只要输入电压到达门限电压值，输出电压立即发生跳变。



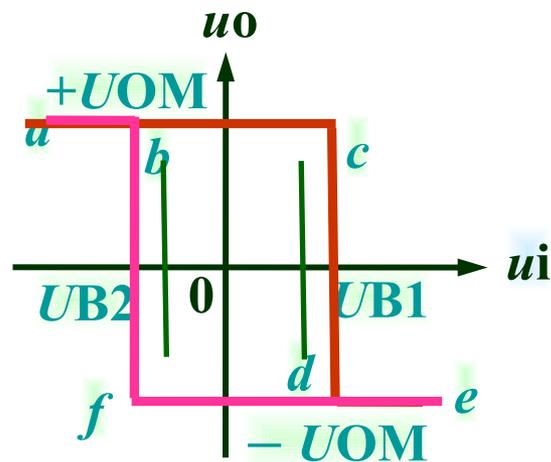
3. 滞回比较器

滞回比较器又称施密特触发器，传输过程中：当输入电压 u_i 从小逐渐增大，或者 u_i 从大逐渐减小时，两种情况下的门限电平是不相同的，由此电压传输特性呈现“滞回”曲线的形状。电路及曲线图如下所示。

当 u_i 等于或大于 UB_1 时



门限电平
值



当 u_i 小等于或小于 UB_2 时

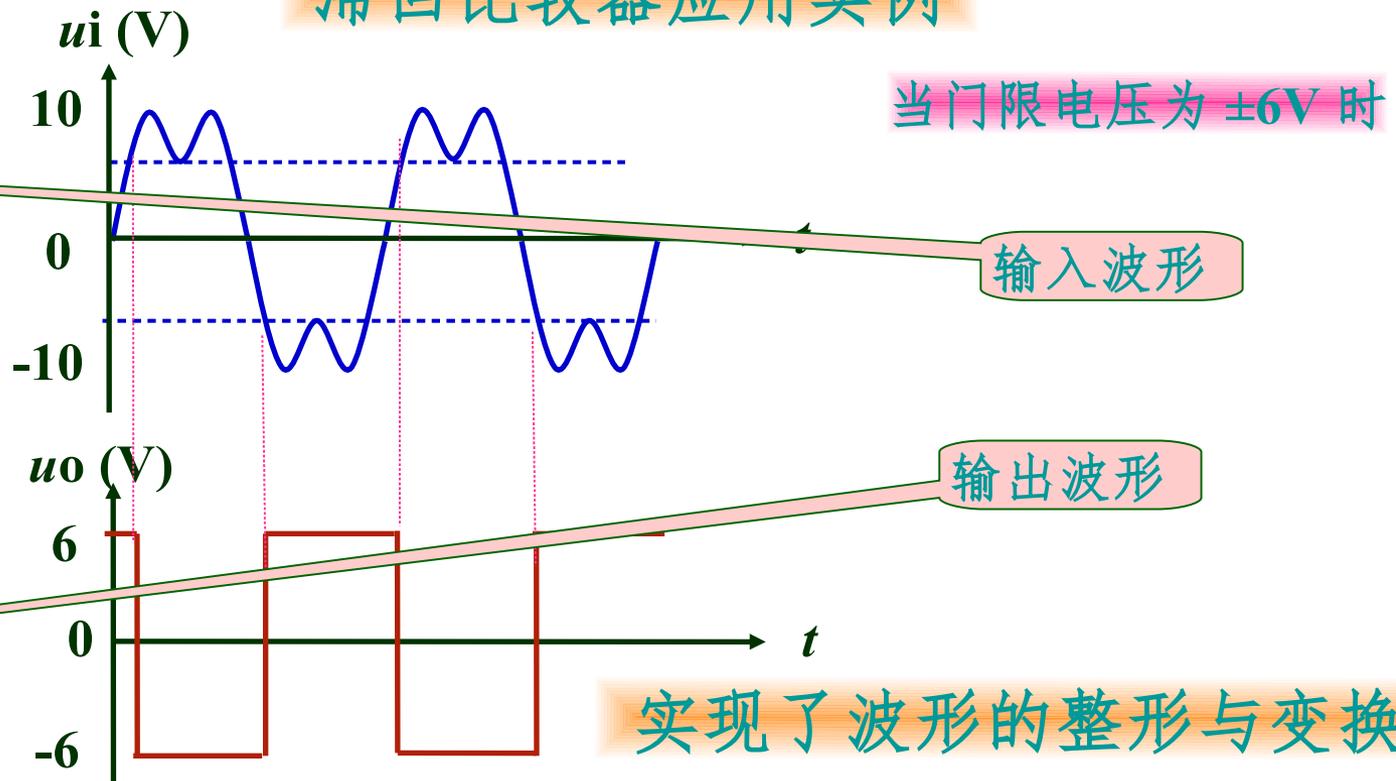
滞回比较器可构成矩形波、锯齿波等非正弦信号发生器电路，也可以实现波形变换。



滞回比较器的特点

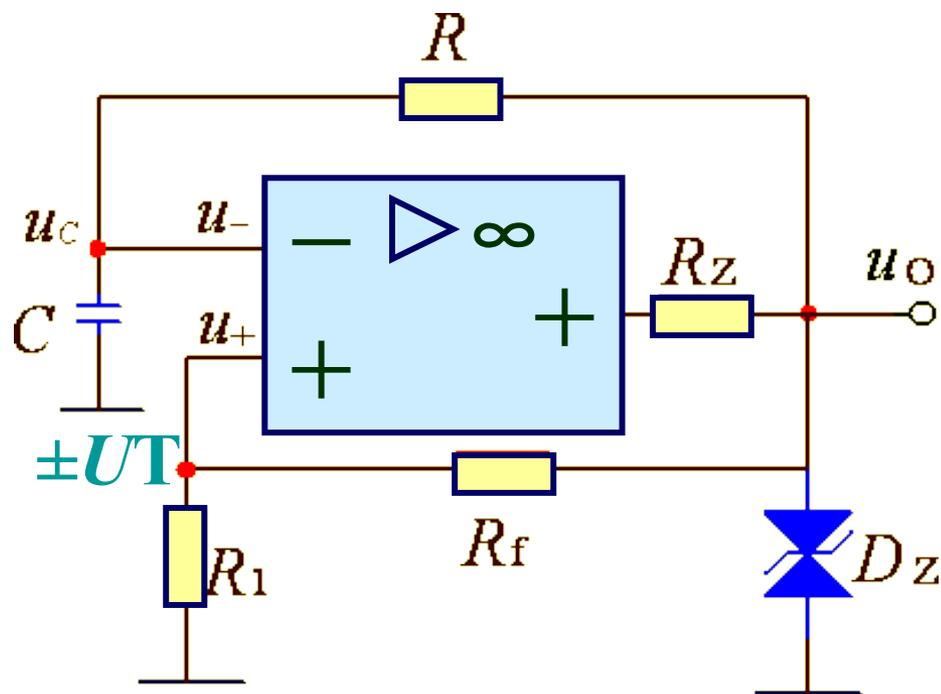
- ① 具有双门限 $UB1$ 和 $UB2$;
- ② 电路具有正反馈环节;
- ③ 电路的抗干扰能力强。

滞回比较器应用实例



4. 方波信号发生器

由滞回比较电路和 RC 定时电路构成

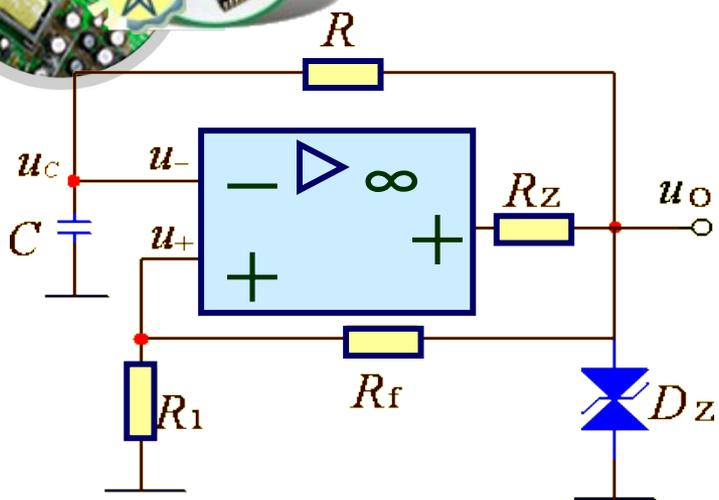


两个门限电平：

$$U_{T+} = \frac{R_1}{R_1 + R_f} U_Z$$

$$U_{T-} = -\frac{R_1}{R_1 + R_f} U_Z$$





工作原理:

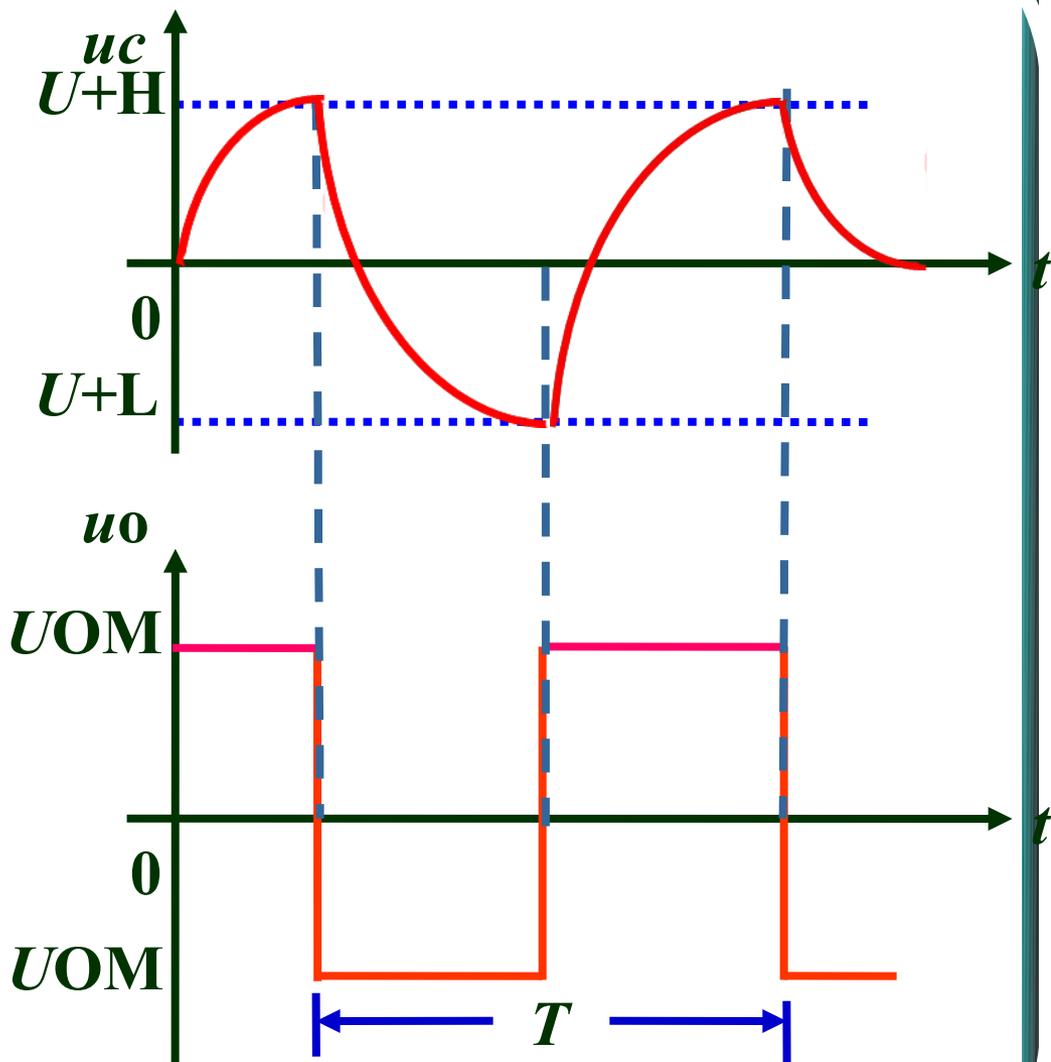
设 $u_o = +U_Z$, 则:

此时, u_o 给 C^+ 充电, u_c ,

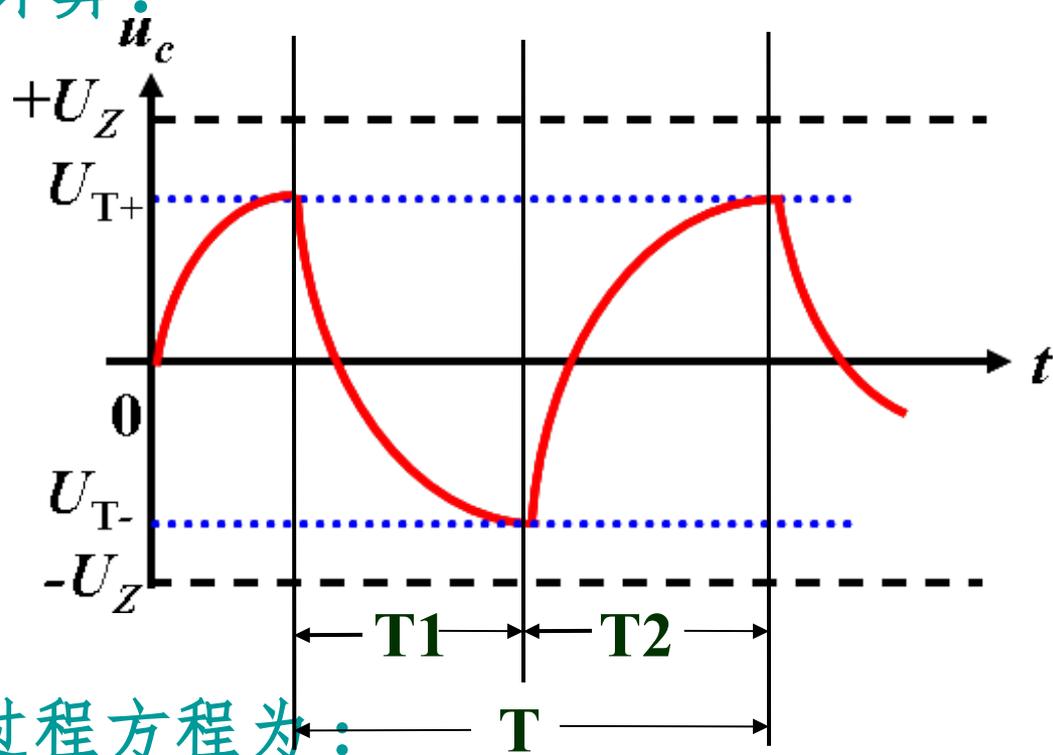
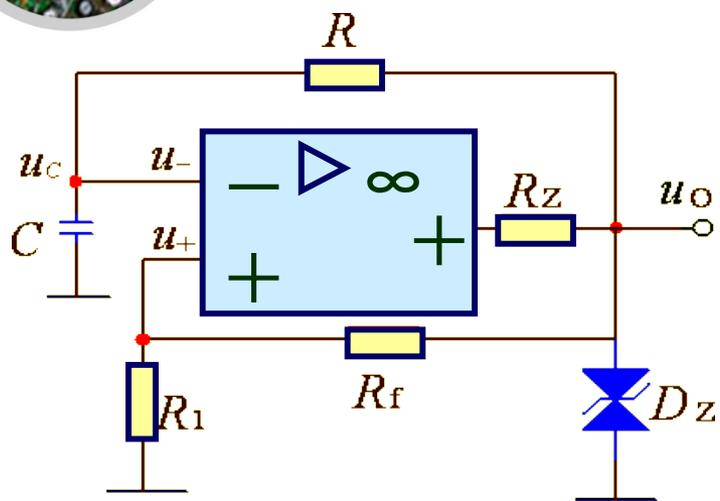
设 u_c 初始值 $u_c(0^+) = 0$

u_o 保持 $+U_{OM}$ 不变

$u_c > U_{T+}$, u_o 立即由 $+U_{OM}$ 变成 $-U_{OM}$ 。



周期与频率的计算:



$$T = T_1 + T_2 = 2 T_2$$

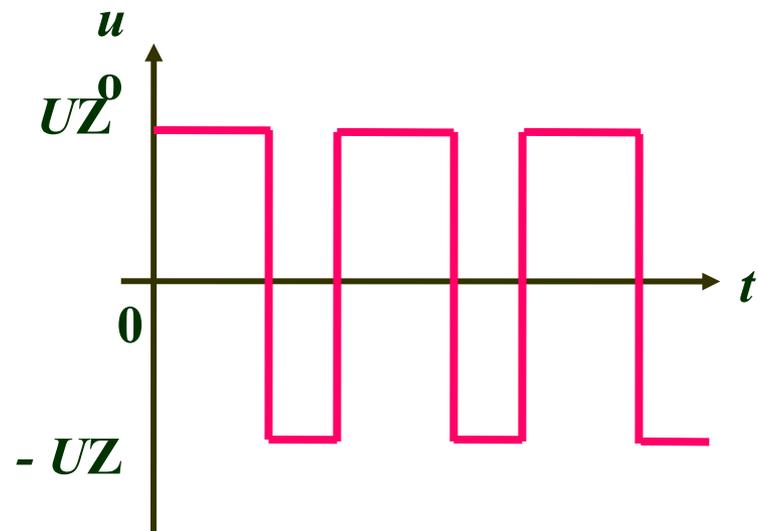
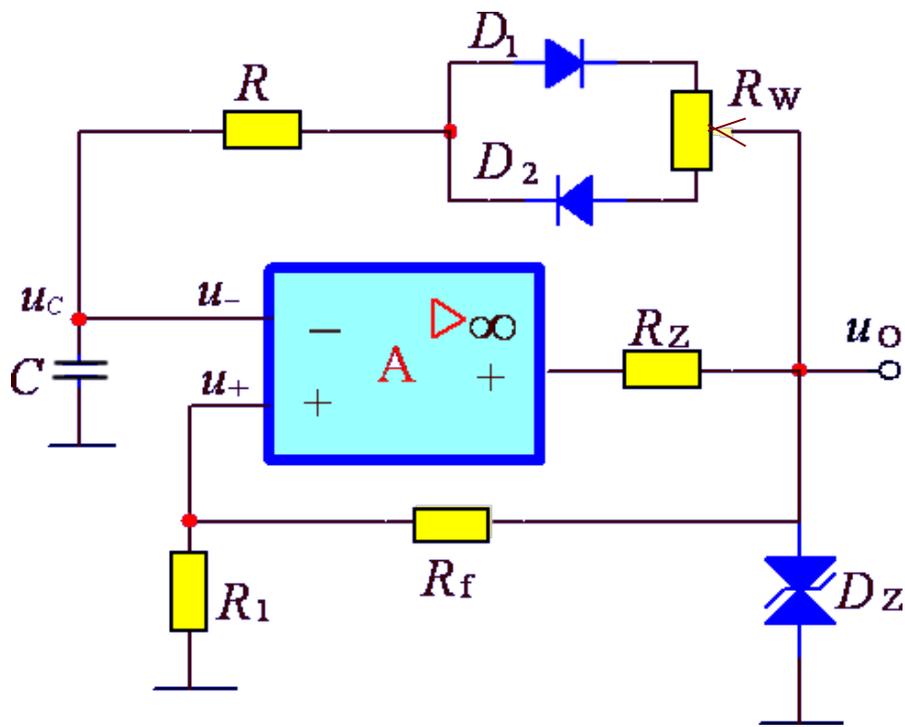
T2 阶段 $u_c(t)$ 的过渡过程方程为:



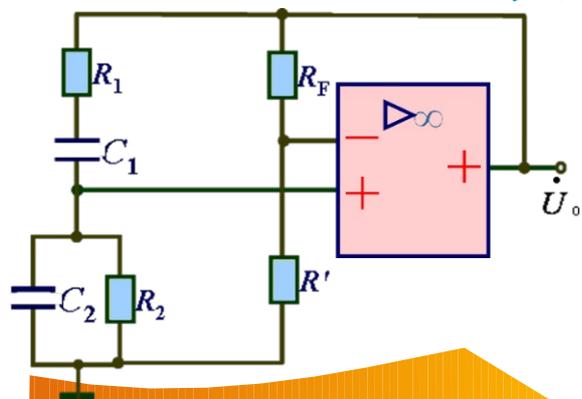
可推出：
$$T = 2RC \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_f}\right) \quad f = 1/T$$

占空比可调的方波发生器

改变电位器 R_W 的滑动端，就改变了充放电的时间，从而使方波的占空比可调。



5. 文氏桥正弦波振荡器



性能要求

显然，文氏桥正弦波振荡器首先应满足自激振荡的条件

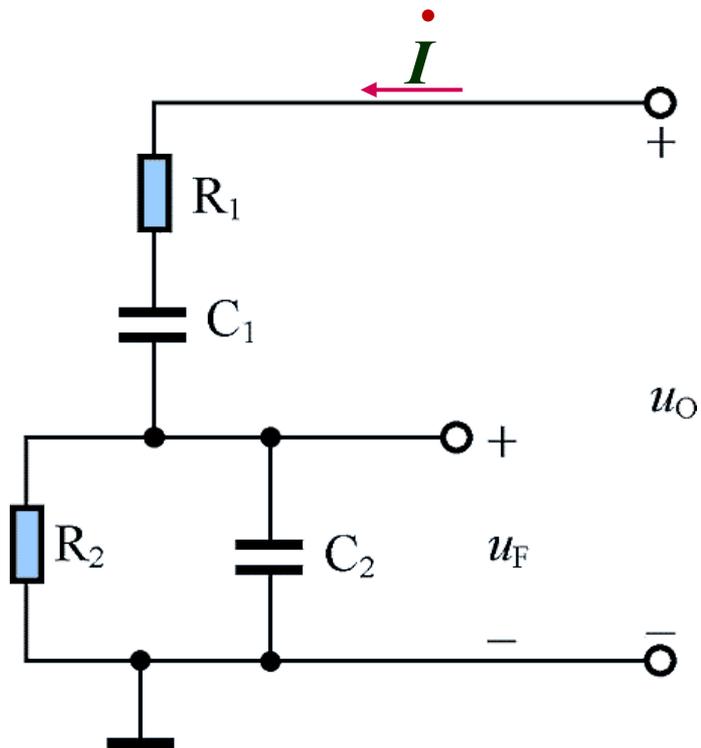
01 保证振荡器接通电源后，能够从无到有建立起具有某一固定频率的正弦波输出

02 振荡器在进入稳态后能维持一个等幅连续的振荡。

03 当外界因素发生变化时，电路的稳定状态不受到破坏。

在放大器的输入端不加任何输入信号，其输出端仍有一定的幅值和频率的输出信号，这种现象称为自激振荡。

文氏桥正弦波振荡器——RC 选频网络



RC 选频网络的作用是使文氏桥获得单一频率的正弦波输出。

则反馈系数：

$$\begin{aligned} \dot{F}_u &= \frac{\dot{U}_F}{\dot{U}_O} = \frac{\dot{I}(R // \frac{1}{j\omega C})}{\dot{I}(R + \frac{1}{j\omega C} + R // \frac{1}{j\omega C})} \\ &= \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})} \end{aligned}$$

设置：

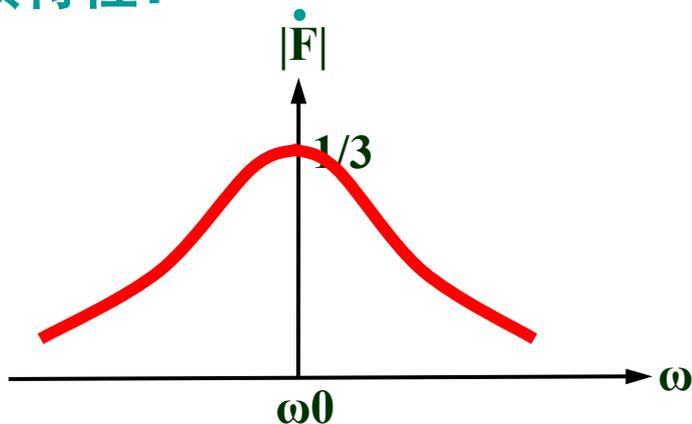
$$R_1=R_2=R, \quad C_1=C_2=C$$



足 如果文氏桥正弦波振荡器的选频网络满足 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ 的条件，

电路传输系数 $\dot{F}_u = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})} = \frac{1}{3 + j(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})}$

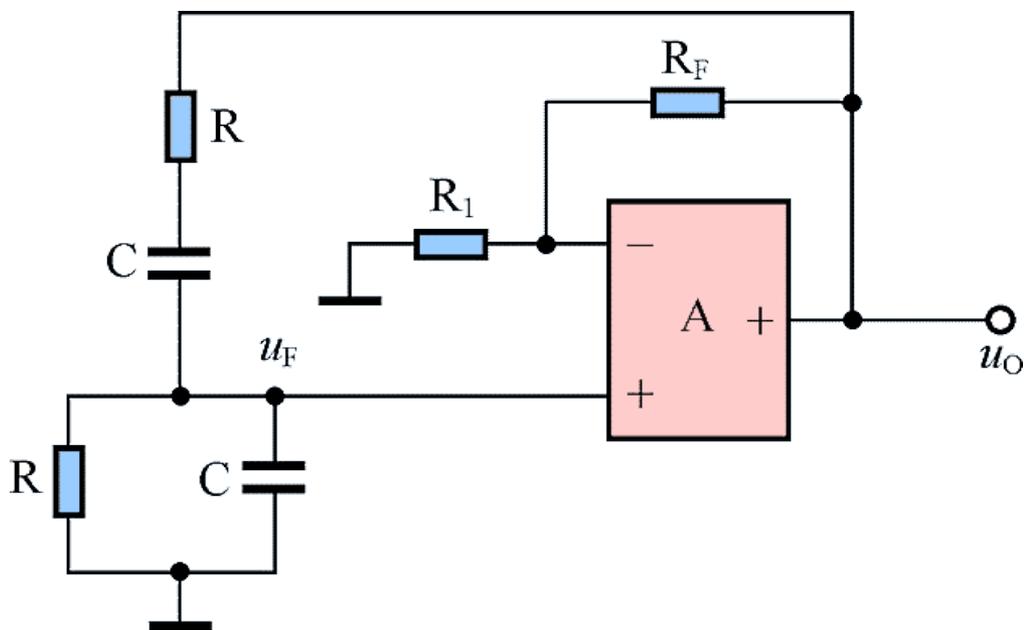
幅频特性：



显然，为使反馈量足够大，要求反馈系数的模值最大化，即：

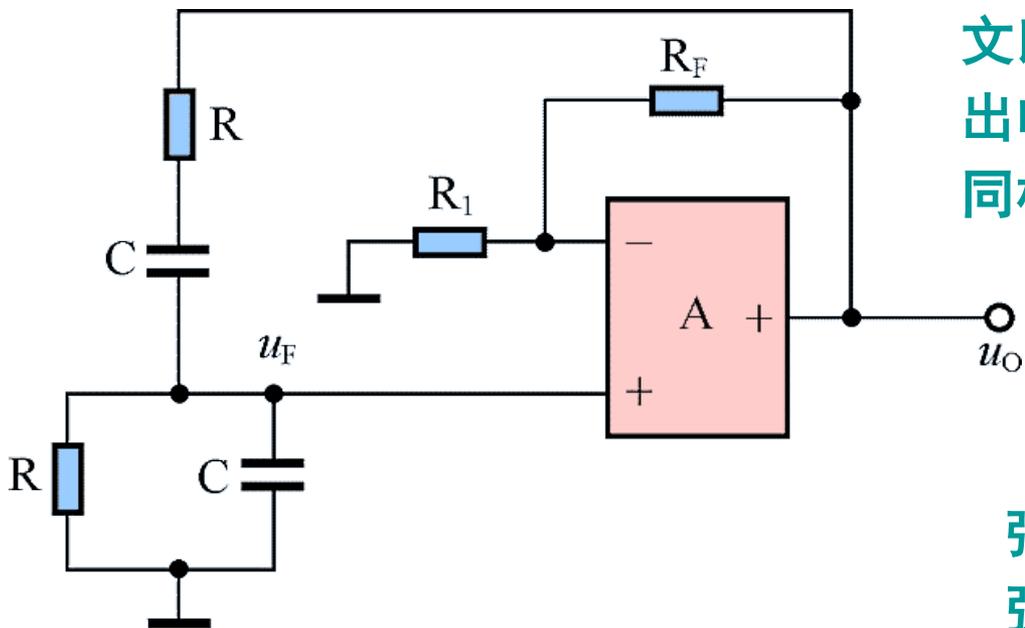
$$\dot{F}_u = \frac{1}{3 + j(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})} = \frac{1}{3}$$

调节选频网络的 R、C 值，可使反馈系数的模值等于 $1/3$ 。



当文氏桥与电源接通瞬间，电路中会产生冲击电压和冲击电流，使得在运放 A 的输出端产生一个微小的输出电压信号——起始信号，起始信号通常是非正弦波。

若设置负反馈电阻 $R_F \cong 2R_1$ 、同相放大器的环路电压放大倍数 $A_{uP} > 3$ 时，可满足自激起振条件。在满足自激起振条件下，文氏桥 RC 选频网络中的正反馈量与输出量同相位，该电路产生自激振荡，输出 u_O 是选频网络选出的频率为 f_0 的正弦波。



文氏桥正弦波振荡器起振时，输出电压 u_O 微弱，但是，由于此时同相输入的运放电压放大倍数：

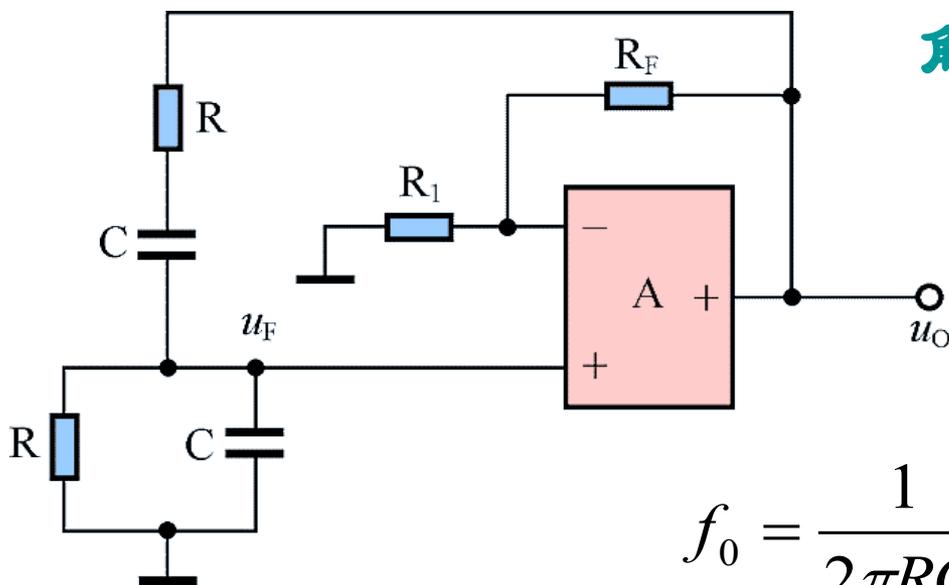
$$A_{up} = 1 + \frac{R_F}{R_1} > 3$$

运放对选频网络输出为 f_0 的正弦波信号频率放大能力较强， u_O 不断增大；

随着输出电压 u_O 的增大，运放 R_F 负反馈作用增强，负反馈的作用又会削弱环路电压放大倍数 A_{up} ，由于正弦波振荡器通常设置负反馈电阻 $R_F=2R_1$ 、环路电压放大倍数 $A_{up}=3$ 为电路的稳幅条件，因此当 A_{up} 下降至 3 时，输出 u_O 的幅度将不再发生变化而趋于稳定。

文氏桥正弦波振荡器——电路举例

例 图示电路中， $R=1\text{k}\Omega$ ， $C=0.1\mu\text{F}$ ， $R_1=10\text{k}\Omega$ 。问 R_F 为多大时电路才能起振？振荡频率 $f_0=?$



解 根据文氏电桥振荡电路的起振条件



即 $R_F > 2 \times 10 = 20\text{k}\Omega$

振荡频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{10^3}{6.28 \times 1 \times 0.1} \approx 1592\text{Hz}$$

即文氏电桥振荡电路在 R_F 大于 $20\text{k}\Omega$ ，电路才能起振；电路的振荡频率等于 1592Hz 。



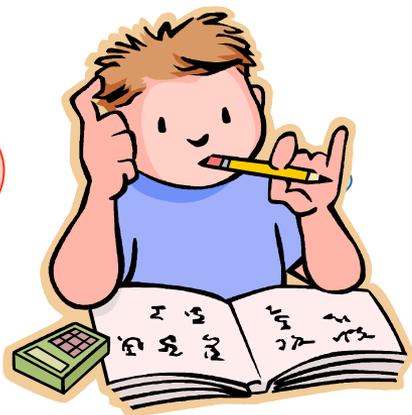


思考与问题

集成运放的线性应用于主要有哪些特点？

集成运放的非线性应用于主要有哪些特点？

“虚地”现象只存在于线性应用运放的哪种运放电路中？



画出滞回电压比较器的电压传输特性，说明其工作原理？

上述问题希望课后认真归纳总结



拓展阅读

“任何一个人或组织，来到这个世界上，都有自己的使命。集成电路不仅是我的专业和兴趣，还代表着一种庄严的使命，因为集成电路是一个国家的工业食粮。在 IT 和移动互联网时代，它就是互联网背后的基础性行业技术。”紫光集团董事长赵伟国曾这样阐述自己的“集成电路”使命感。

集成电路产业发展之路的基石，就是一批批有着将使命感融进自己事业中的各个时代的英雄们所铺就的。

“科学研究真正需要的是发展思维、发展远见和始终如一的发展勇气。”被尊称为“中国半导体之母”的谢希德曾这样说。

多年以后，紫光集团董事长赵伟国这样评价中国半导体领域的先驱们，“他们都是很优秀的科学家，为中国半导体科研工作做了大量的贡献。”请同学们扫课本上的二维码，看中国集成电路的发展历程



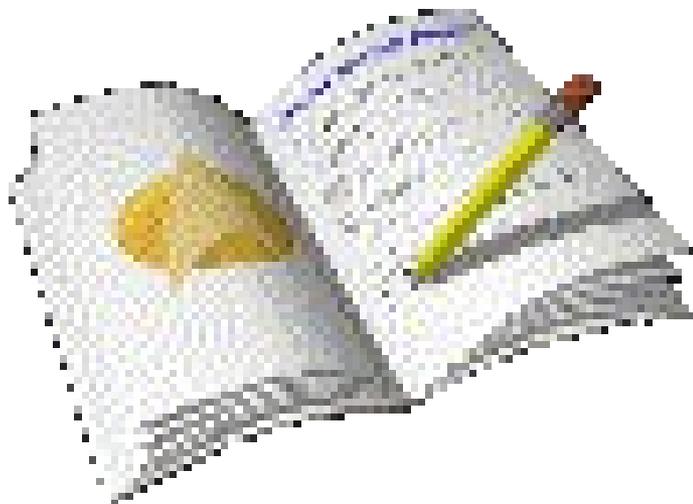


思考与问题

工作在线性区的集成运放，为什么要引入负反馈？而且反馈电路为什么要接到反相输入端？

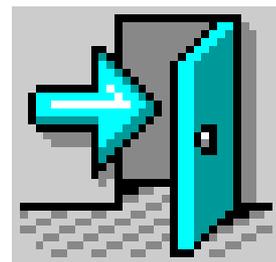
举例说明理想集成运放两条重要结论在运放电路分析中的作用？





认真复习，加强练习，

巩固成果，学以致用！



Goodbye!

