



第17章 电子电路中的反馈

17.1 反馈的基本概念

17.2 放大电路中的负反馈

17.2.1 负反馈的类型

17.2.2 负反馈对放大电路工作性能的影响

17.3 振荡电路中的正反馈



第17章 电子电路中的反馈

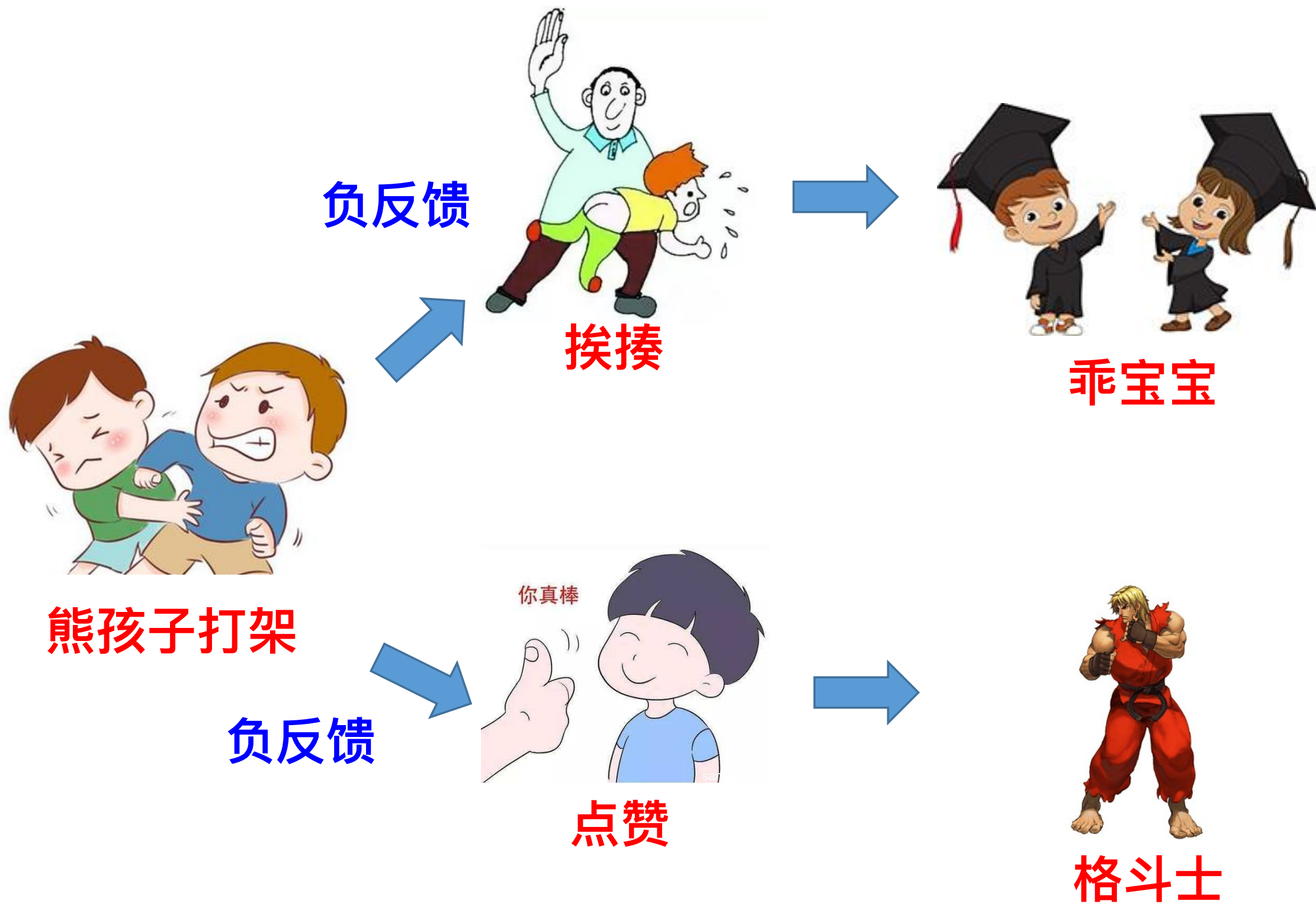
17.1 反馈的基本概念

17.2 放大电路中的负反馈

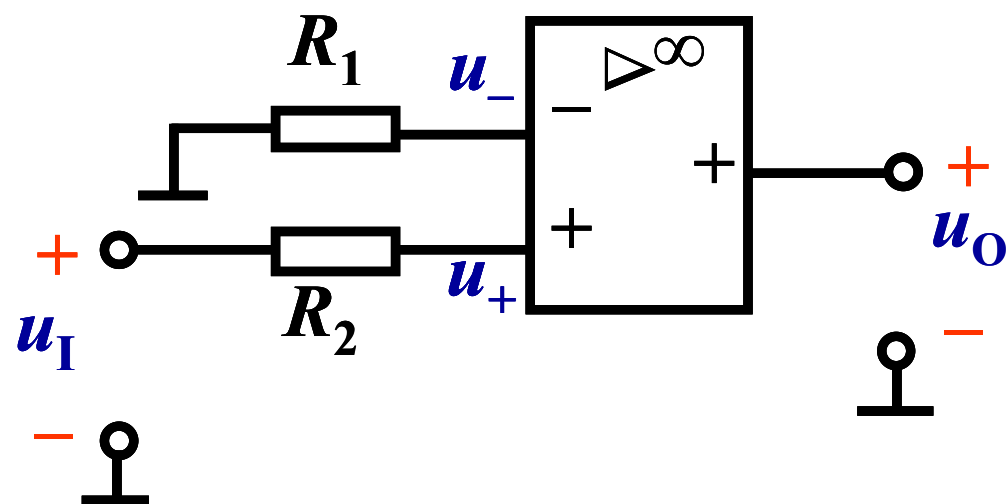
17.2.1 负反馈的类型

17.2.2 负反馈对放大电路工作性能的影响

17.3 振荡电路中的正反馈

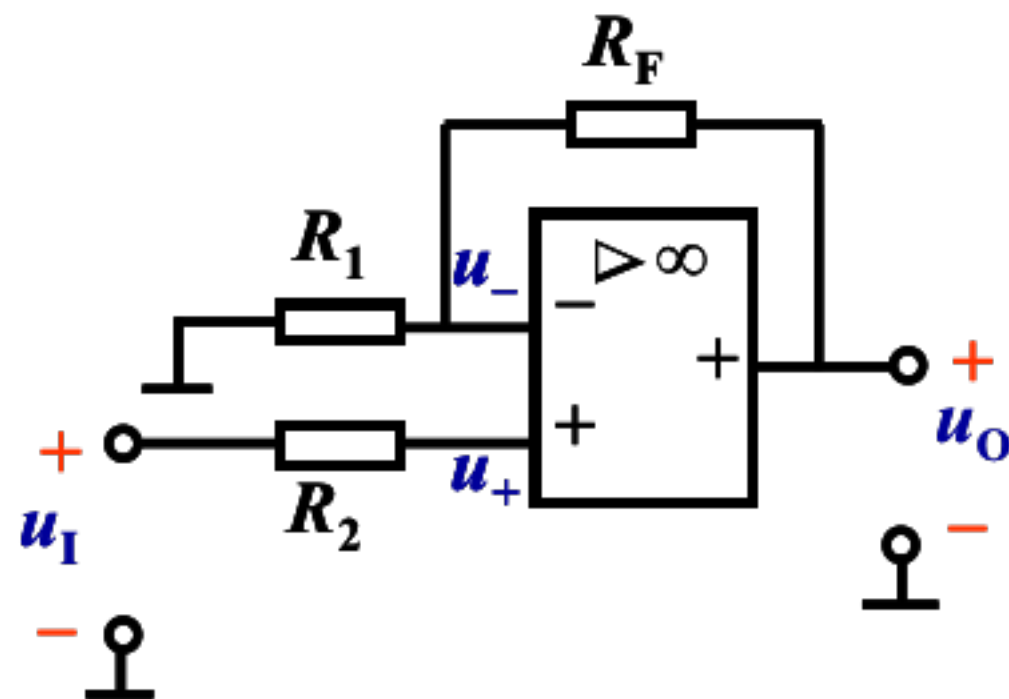


17.1.0 引言



$$u_O = A_{u0}(u_+ - u_-)$$

特征：①受温度影响
②输出不影响输入



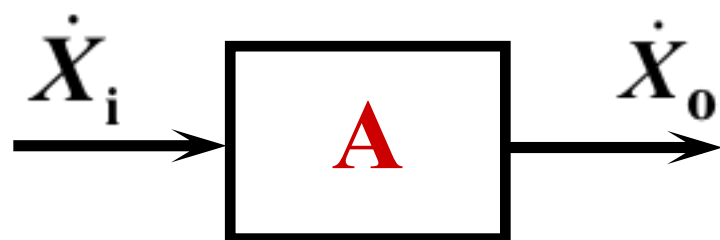
$$u_O = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)u_I$$

特征：①不受温度影响
②输出影响输入

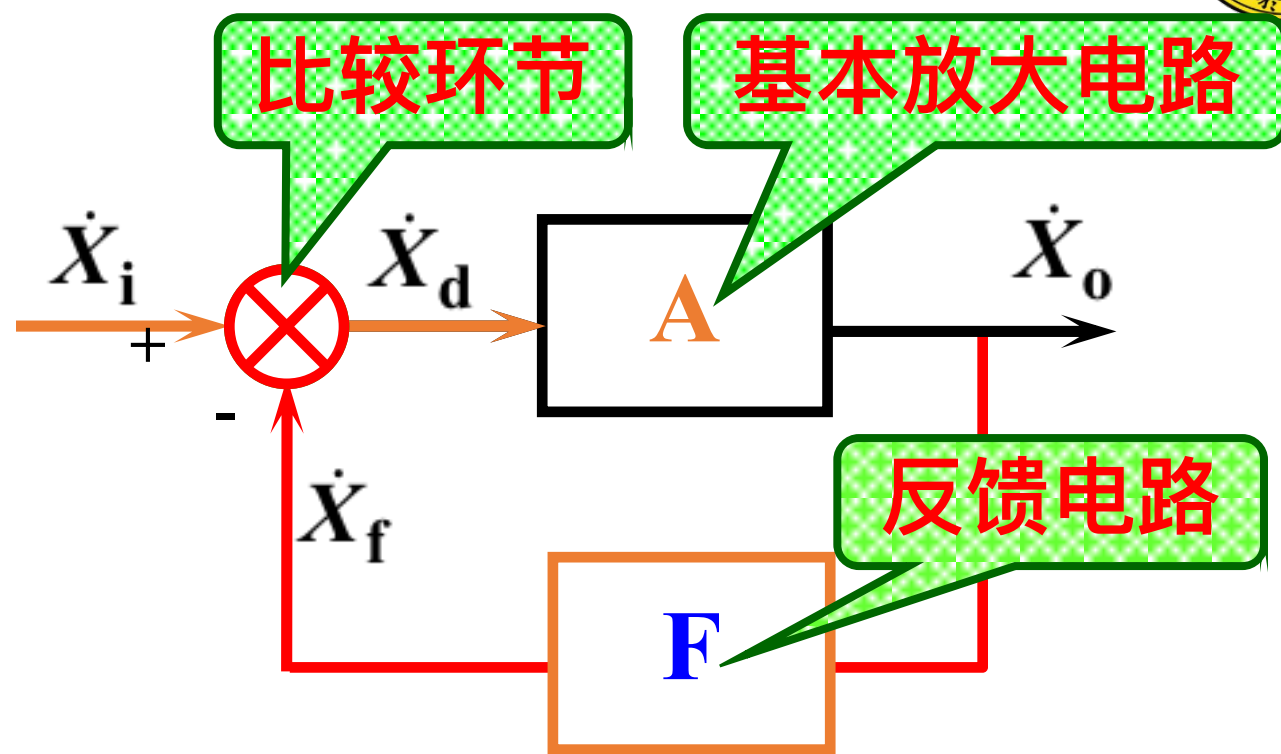
反馈：将放大电路输出端的信号(电压或电流)的一部分或全部通过某种电路引回到输入端。

17.1.1 负反馈与正反馈

电子电路方框图



(a) 无反馈放大电路



(b) 有反馈放大电路

无反馈作用的放大电路，信号单向传递，即只从输入端向输出端传递信息。（**无自我校正功能**）

有反馈作用的放大电路，信号双向传递，既从输入端向输出端传递信息，又从输出端向输入端传递信息。因此，反馈放大电路是一个闭环电路。

17.1.1 负反馈与正反馈

电子电路方框图

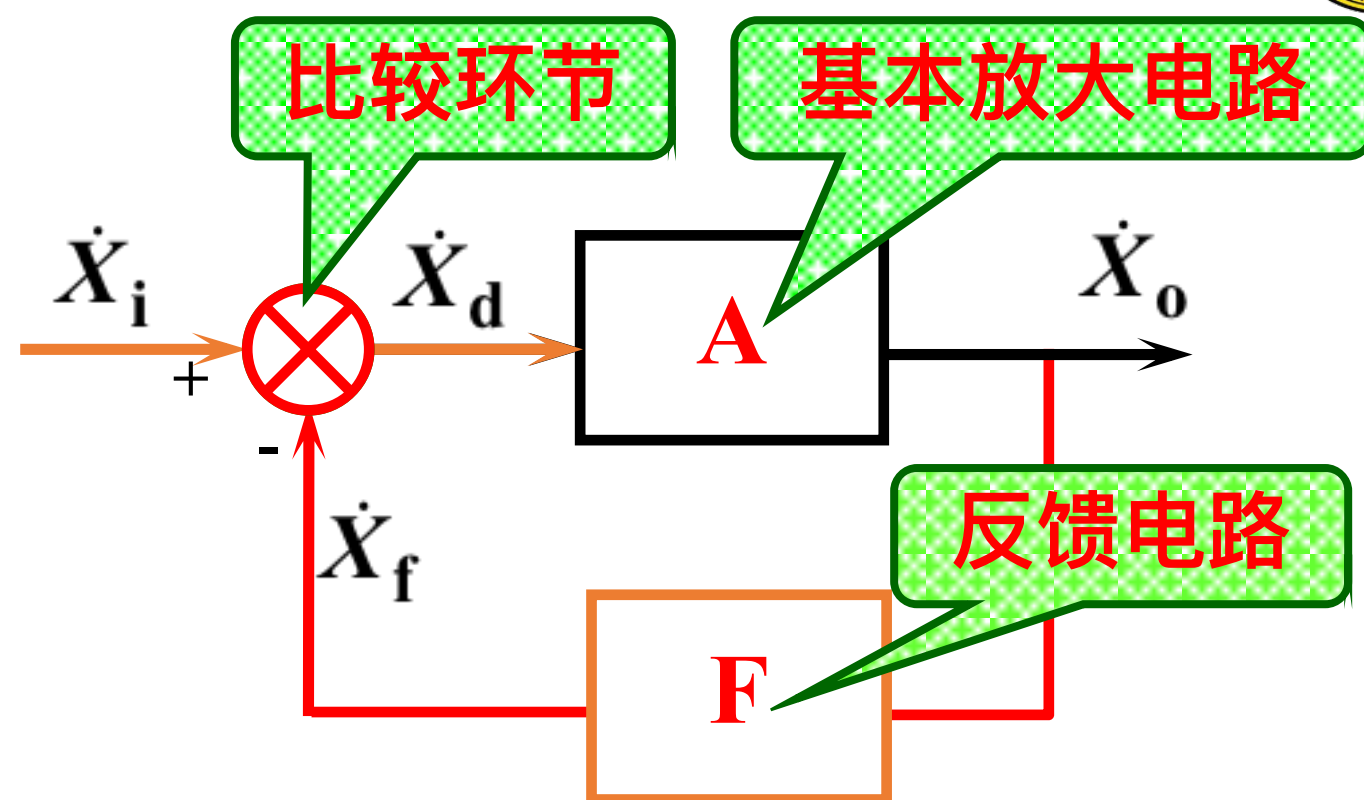
\dot{X}_i — 输入信号

\dot{X}_o — 输出信号

\dot{X}_f — 反馈信号

\dot{X}_d — 净输入信号

净输入信号



(b)有反馈放大电路

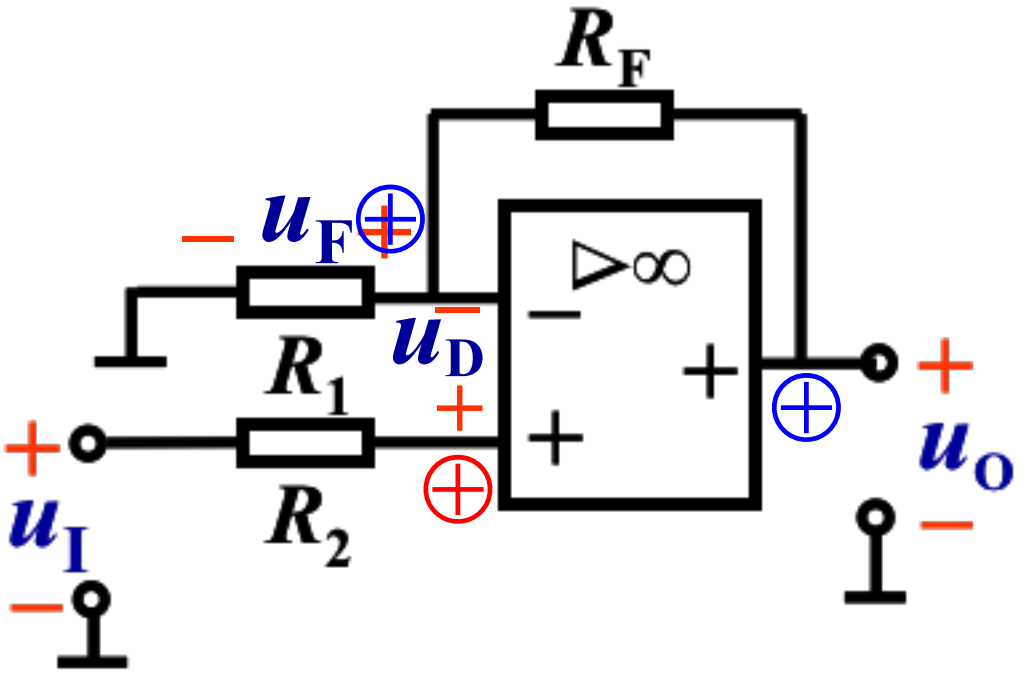
$$\dot{X}_d = \dot{X}_i - \dot{X}_f$$

若三者同相，则 $X_d = X_i - X_f$ ，即 $X_d < X_i$ ，此时，反馈信号削弱了净输入信号，电路为**负反馈**。

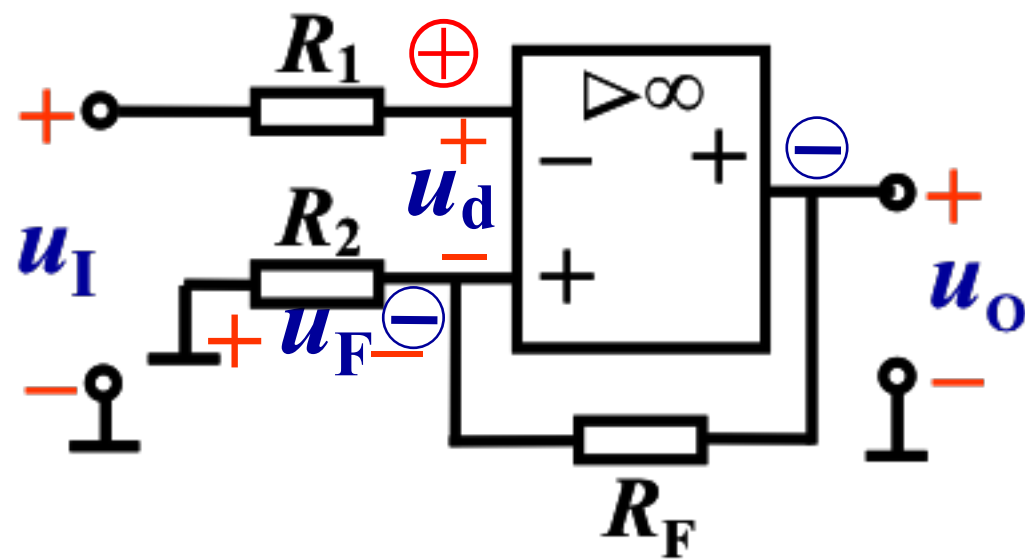
若 $X_d > X_i$ ，即反馈信号起了增强净输入信号的作用，则为**正反馈**。



17.1.2 负反馈与正反馈的判别方法



设输入电压 u_I 为正，
各电压的实际方向如图，
差值电压 $u_D = u_I - u_F$ ，
 u_F 减小了净输入电压(差值电压)——**负反馈**。



设输入电压 u_I 为正，
各电压的实际方向如图，
差值电压 $u_D = u_I + u_F$ ，
 u_F 增大了净输入电压——**正反馈**。



17.1.2 负反馈与正反馈的判别方法

反馈极性的判别—瞬时极性法

- (1) 设定输入信号的极性(或称瞬时极性)。
- (2) 在这样的信号的作用下, 分析电路中各级输出电压和电流是正(用 \oplus 表示)还是负(用 \ominus 表示)。
- (3) 若反馈信号与输入信号加在不同输入端(或两个电极)上, 两者极性相同时, 净输入电压减小, 为负反馈; 反之, 极性相反为正反馈。
- (4) 若反馈信号与输入信号加在同一输入端(或同一电极)上, 两者极性相反时, 净输入电压减小, 为负反馈; 反之, 极性相同为正反馈。

以上分析法是从设定输入信号的瞬时极性开始的, 因此, 称**瞬时极性法**。



第17章 电子电路中的反馈

17.1 反馈的基本概念

17.2 放大电路中的负反馈

17.2.1 负反馈的类型

17.2.2 负反馈对放大电路工作性能的影响

17.3 振荡电路中的正反馈



17.2.1 负反馈的类型

(1)根据反馈所采样的信号不同,可以分为电压反馈和电流反馈。

a.如果反馈信号取自输出电压,叫**电压反馈**。

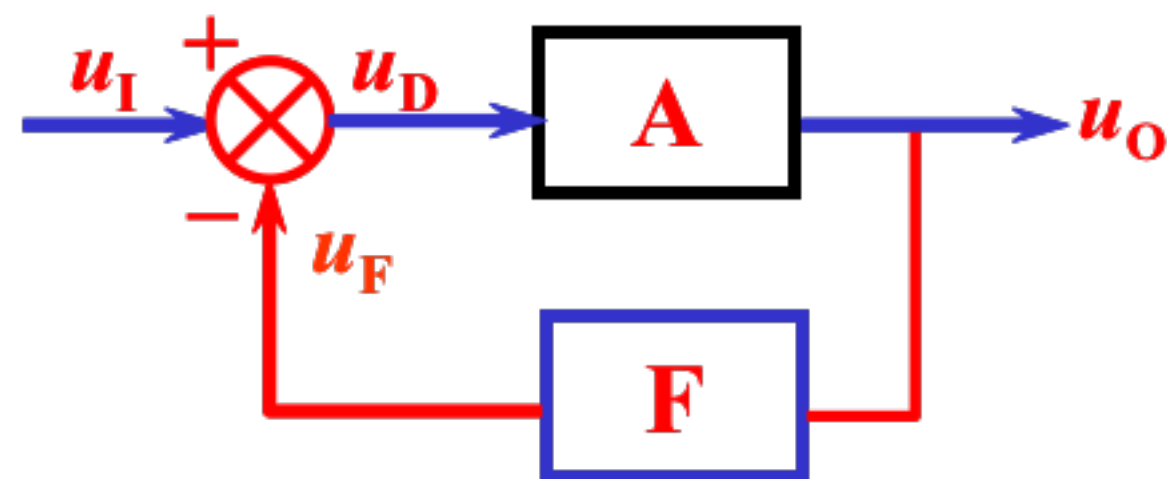
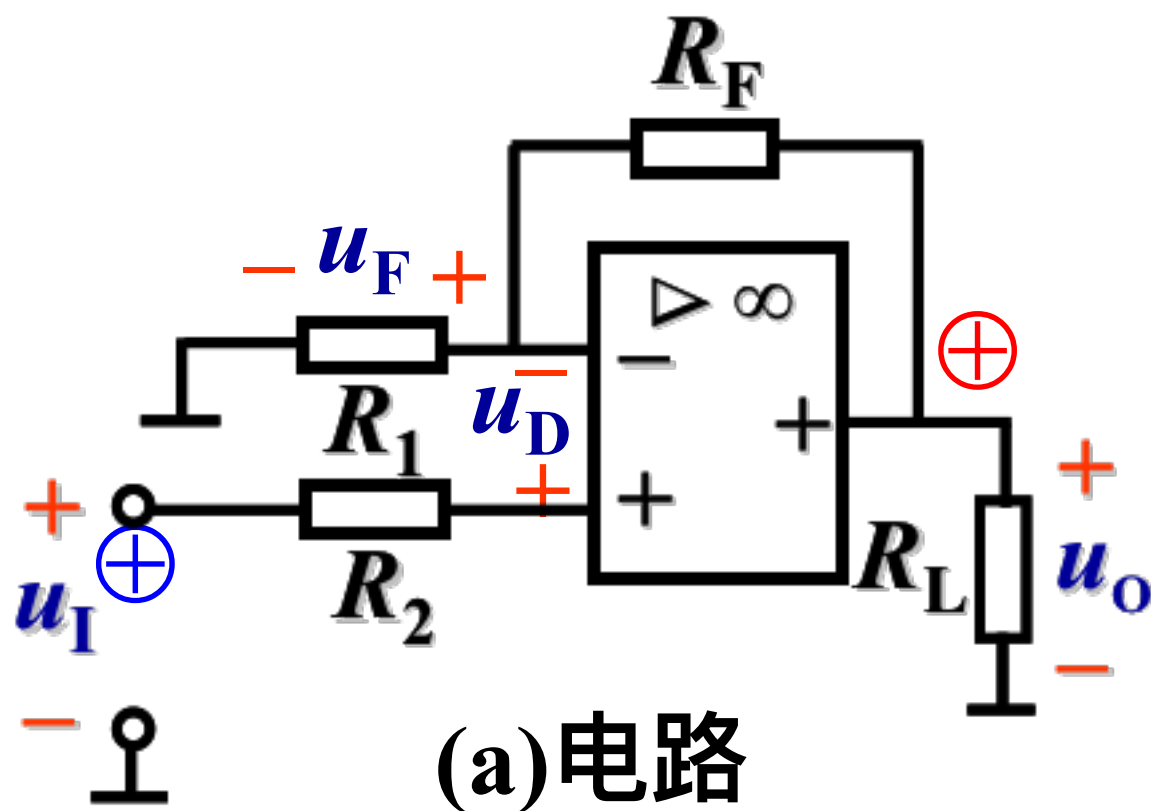
b.如果反馈信号取自输出电流,叫**电流反馈**。

(2)根据反馈信号在输入端与输入信号比较形式的不同,可以分为串联反馈和并联反馈。

a.反馈信号与输入信号串联,即反馈信号与输入信号以电压形式作比较,称为**串联反馈**。

b.反馈信号与输入信号并联,即反馈信号与输入信号以电流形式作比较,称为**并联反馈**。

17.2.1 负反馈的类型-串联电压负反馈



设输入电压 u_I 为正，各电压的实际方向如图所示， u_F 削弱了净输入电压（差值电压）——**负反馈**。

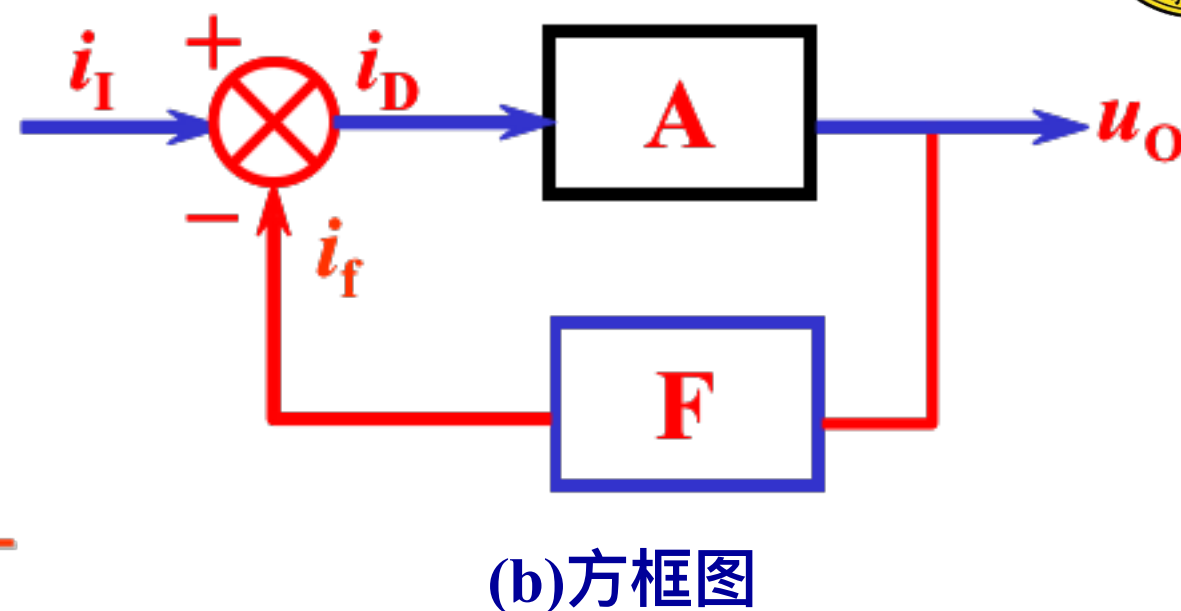
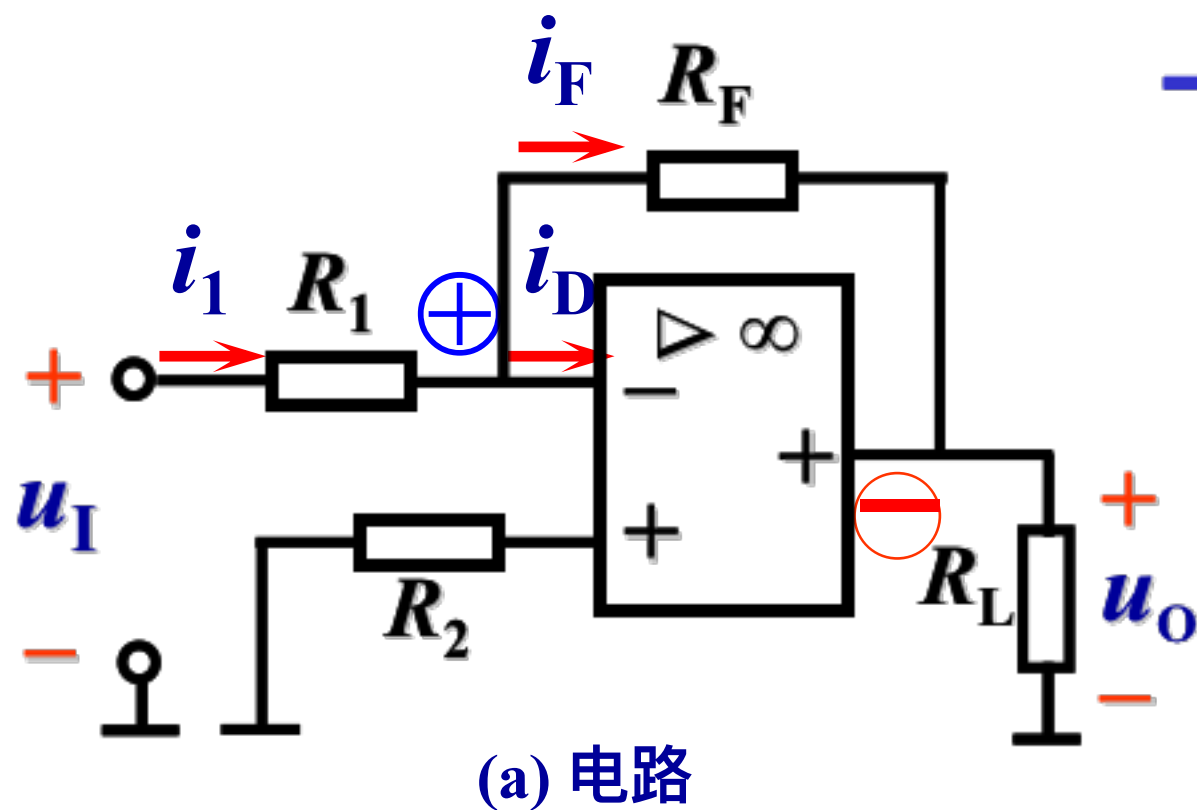
差值电压 $u_D = u_I - u_F$

反馈电压 $u_F = \frac{R_1}{R_1 + R_F} u_O$

取自输出电压——**电压反馈**。

反馈信号与输入信号在输入端以电压的形式作比较
——**串联反馈**

17.2.1 负反馈的类型-并联电压负反馈



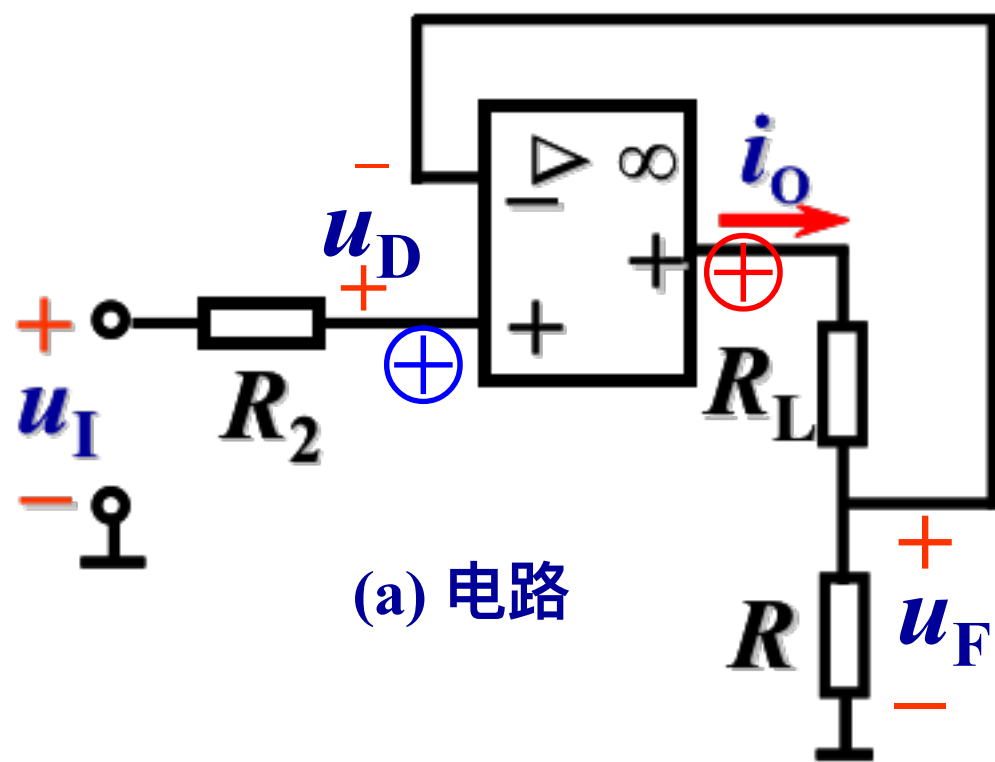
设输入电压 u_I 为正, 各电流实际方向如图所示。

i_F 削弱了净输入电流(差值电流)——**负反馈**。

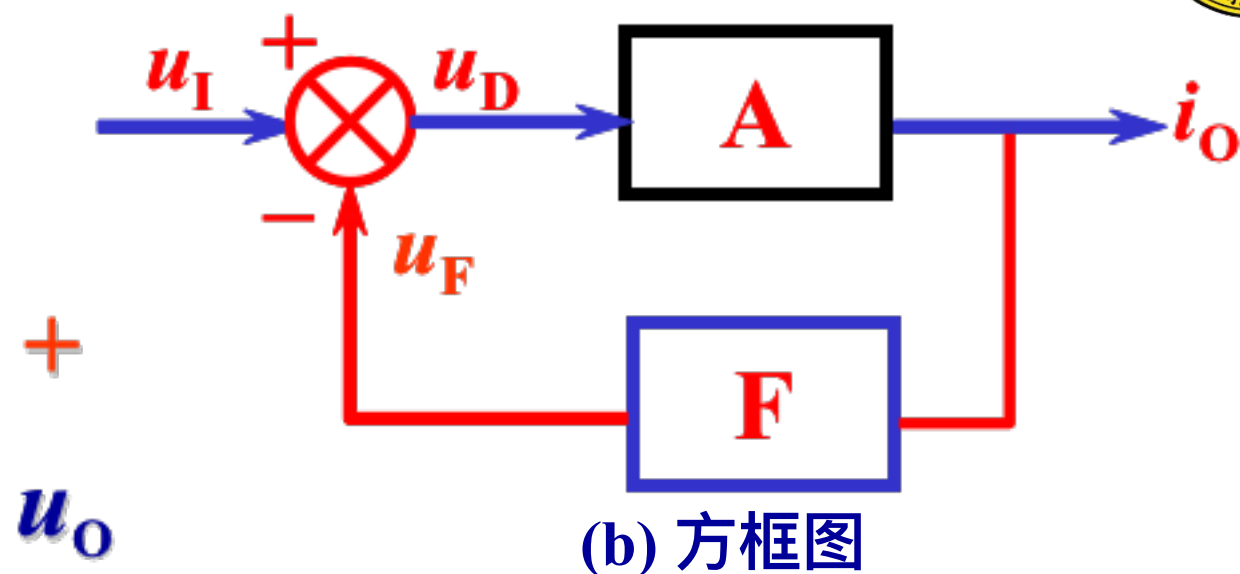
取自输出电压——**电压反馈**

反馈信号与输入信号在输入端以电流的形式作比较——**并联反馈**。

17.2.1 负反馈的类型-串联电流负反馈



(a) 电路



(b) 方框图

差值电压 $u_D = u_I - u_F$

反馈电压 $u_F = Ri_O$

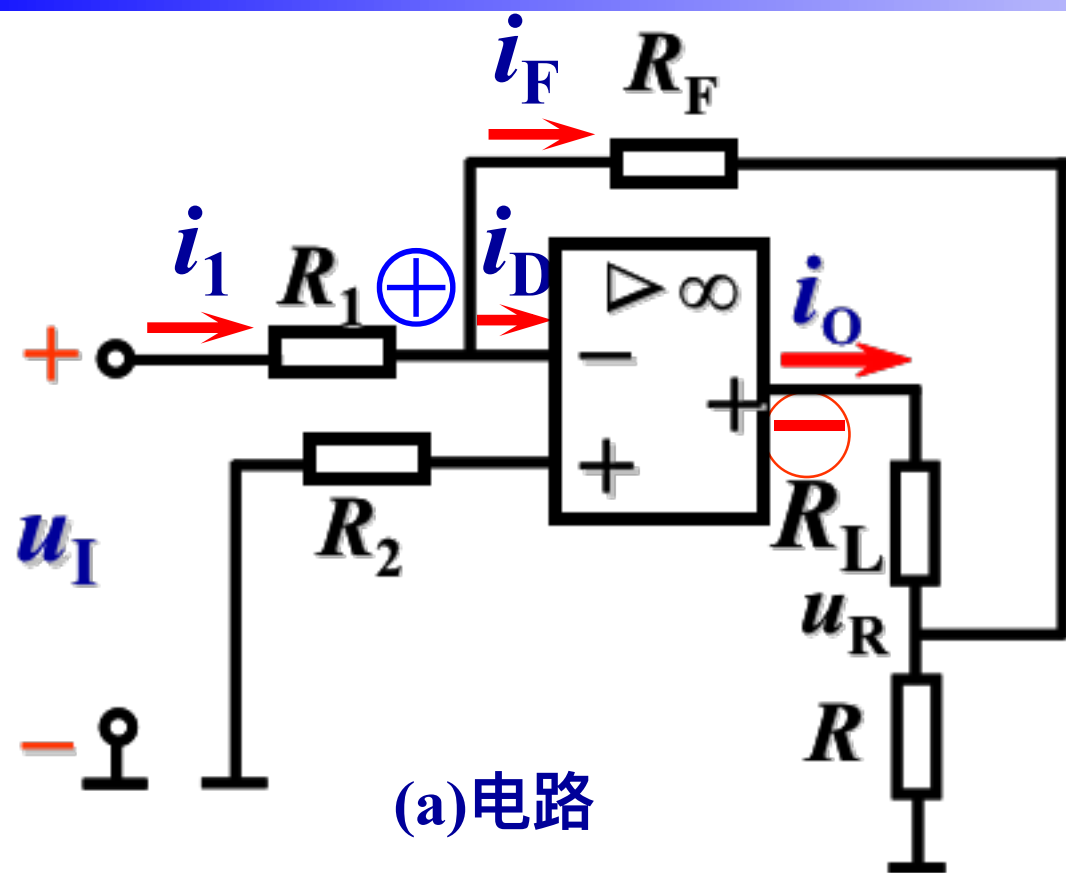
反馈信号与输入信号在输入端以

—串联反馈

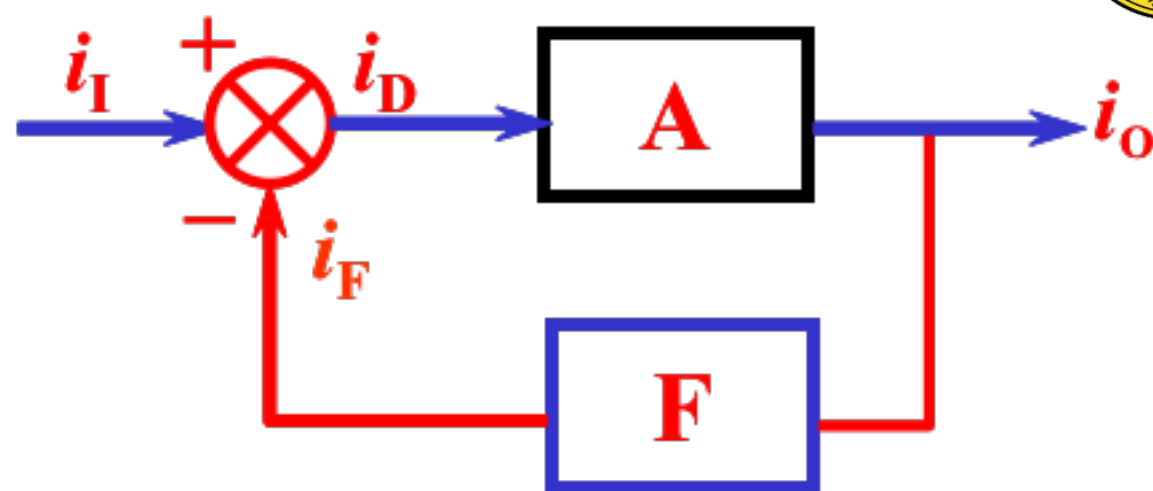
$$i_O = \frac{u_F}{R} = \frac{u_I}{R}$$

特点: 输出电流 i_O 与负载电阻 R_L 无关 — 同相输入恒流源电路或电压—电流变换电路。

17.2.1 负反馈的类型-并联电流负反馈



(a)电路



(b)方框图

设输入电压为 u_I ，
各电阻均为 R 。

差值电流 $i_D = i_1 - i_F$

i_F 削弱了净
(差值电流)

反馈电流 $i_F = -\frac{R}{R + R_F} i_O$

取自输出

特点：输出电
流 i_O 与负载电阻
 R_L 无关 — 反相
输入恒流源电路
或电流—电流变
换电路。

反馈信号与输入信号在输入端以电流的形式作比较
— 并联反馈。



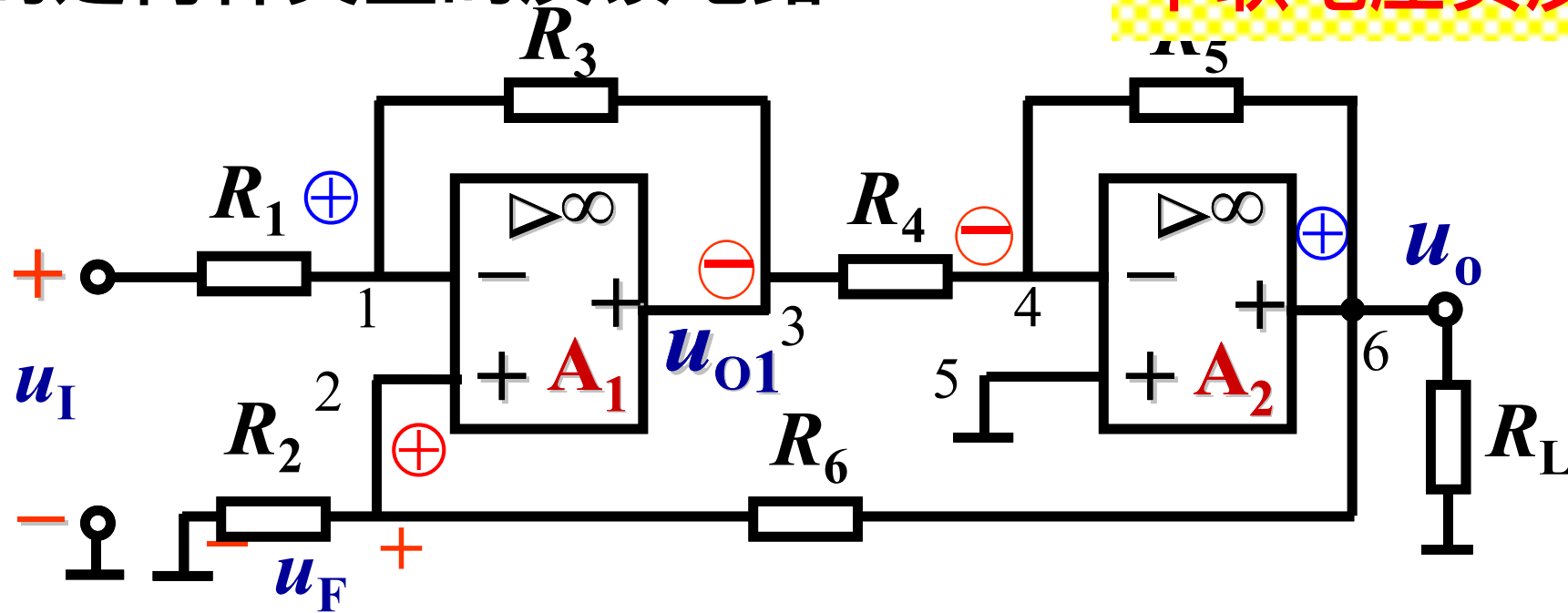
17.2.1 负反馈的类型

运算放大器电路反馈类型的判别方法：

- (1) 反馈电路直接从输出端引出的，是**电压反馈**；
从负载电阻 R_L 的靠近“地”端引出的，是**电流反馈**。
- (2) 输入信号和反馈信号分别加在两个输入端(同相和反相)上的，是**串联反馈**；加在同一个输入端(同相或反相)上的，是**并联反馈**。
- (3) 对串联反馈，输入信号和反馈信号的极性相同时，是**负反馈**；极性相反时，是**正反馈**。
- (4) 对并联反馈，净输入电流等于输入电流和反馈电流之差时，是**负反馈**；否则是**正反馈**。

17.2.1 负反馈的类型

例1：试判别下图放大电路中从运算放大器 A_2 输出端引至 A_1 输入端的是何种类型的反馈电路。



解：先在图中标出各点的瞬时极性及反馈信号。

因反馈电路直接从运算放大器 A_2 的输出端引出, 所以是**电压反馈**。

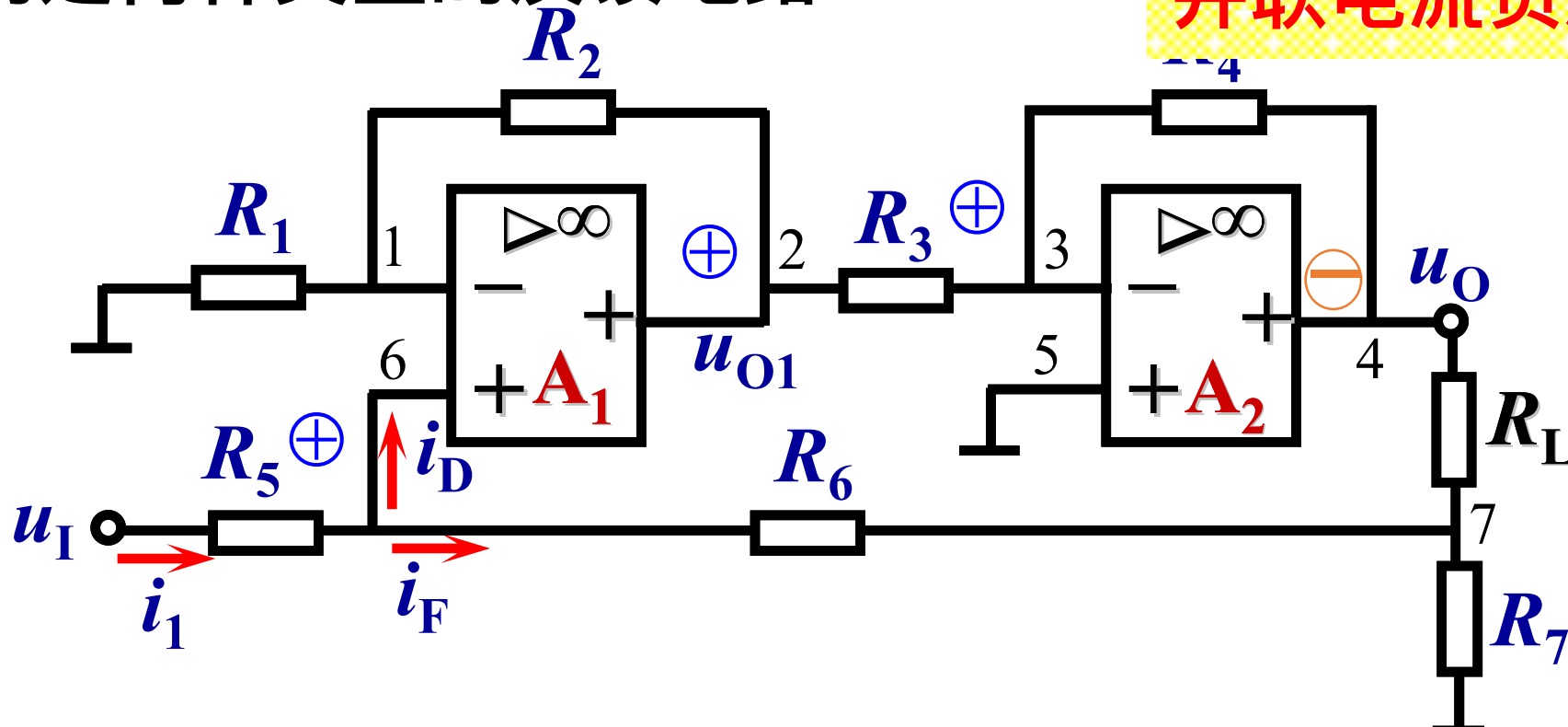
因输入信号和反馈信号分别加在反相输入端和同相输入端上，所以是**串联反馈**。

因输入信号和反馈信号的极性相同, 所以是**负反馈**。

17.2.1 负反馈的类型

例2：试判别下图放大电路中从运算放大器 A_2 输出端引至 A_1 输入端的是何种类型的反馈电路。

并联电流负反馈

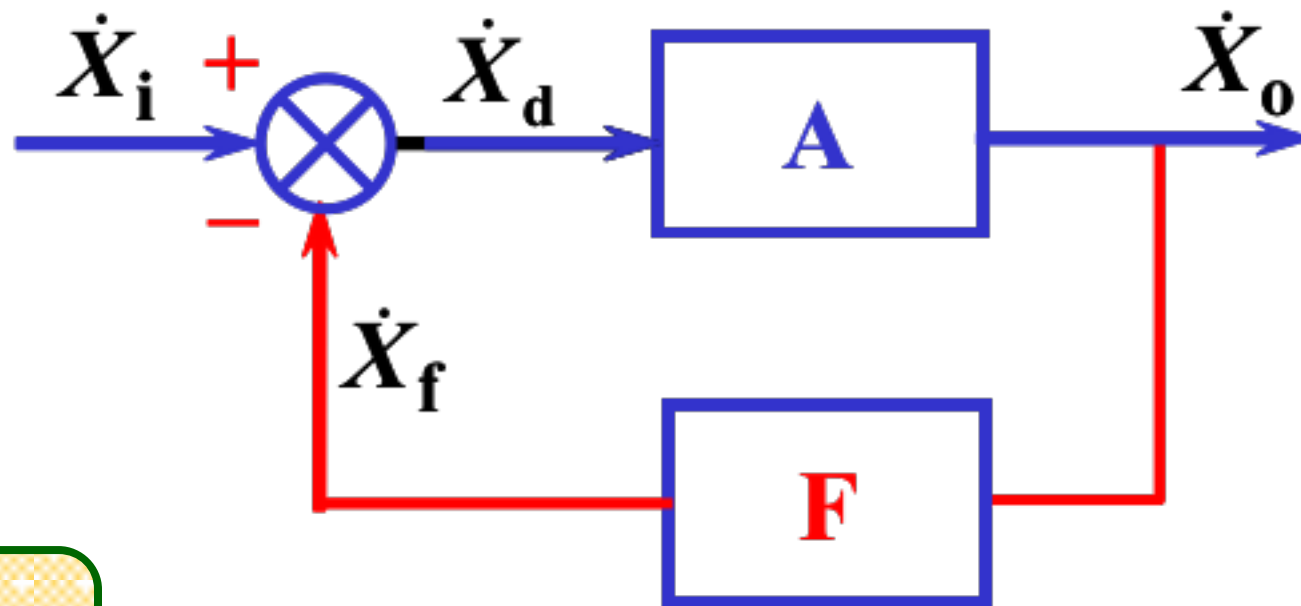


解：因反馈电路是从运算放大器 A_2 的负载电阻 R_L 的靠近“地”端引出的，所以是**电流反馈**。

因输入信号和反馈信号均加在同相输入端上，所以是**并联反馈**。

因净输入电流 i_D 等于输入电流和反馈电流之差，所以是**负反馈**。

17.2.2 负反馈对放大电路工作性能的影响



开环
放大倍数

反馈放大电路的基本方程

闭环
放大倍数

$$A = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_d} \quad F = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} \quad \dot{X}_d = \dot{X}_i - \dot{X}_f \quad A_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{A}{1 + AF}$$

反馈系数

净输入信号

17.2.2 负反馈对放大电路工作性能的影响

(1). 降低放大倍数

在 $A_f = \frac{A}{1 + AF}$ 中 $AF = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_d} \cdot \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_d}$

负反馈时， \dot{X}_f 、 \dot{X}_d 同相，所以 AF 是正实数

则有 $|A_f| < |A|$ ，负反馈使放大倍数下降。

$|1+AF|$ 称为反馈深度，其值愈大，负反馈作用愈强， A_f 也就愈小。

射极输出器、不带旁路电容的共发射极放大电路的电压放大倍数较低就是因为电路中引入了负反馈。



17.2.2 负反馈对放大电路工作性能的影响

(2). 提高放大倍数的稳定性

$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \quad \frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + AF} \cdot \frac{dA}{A}$$

引入负反馈使放大倍数的稳定性提高。

放大倍数下降至 $1/(1+AF)$ 倍, 其稳定性提高 $1+AF$ 倍。

若 $|AF| \gg 1$, 称为深度负反馈, 此时

$$A_f \approx \frac{1}{F}$$

在深度负反馈的情况下, 闭环放大倍数仅与反馈电路的参数有关。



17.2.2 负反馈对放大电路工作性能的影响

(2). 提高放大倍数的稳定性

如 $A=300$, $F=0.01$ 。

$$\text{则 } A_f = \frac{A}{1+AF} = \frac{300}{1+300 \times 0.01} = 75$$

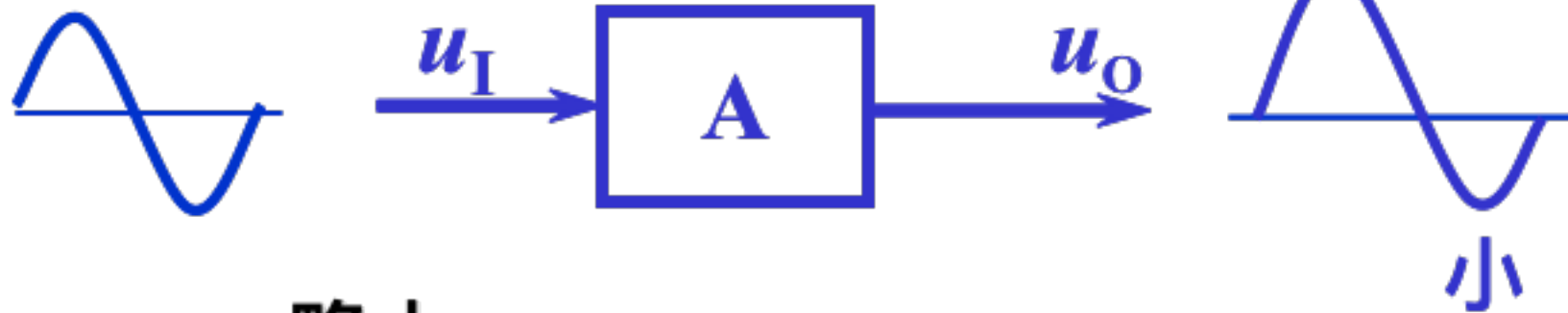
$$\text{如 } \frac{dA}{A} = \pm 6\%$$

$$\begin{aligned} \text{则 } \frac{dA_f}{A_f} &= \frac{1}{1+AF} \frac{dA}{A} \\ &= \frac{1}{1+300 \times 0.01} \times (\pm 6\%) = \pm 1.5\% \end{aligned}$$

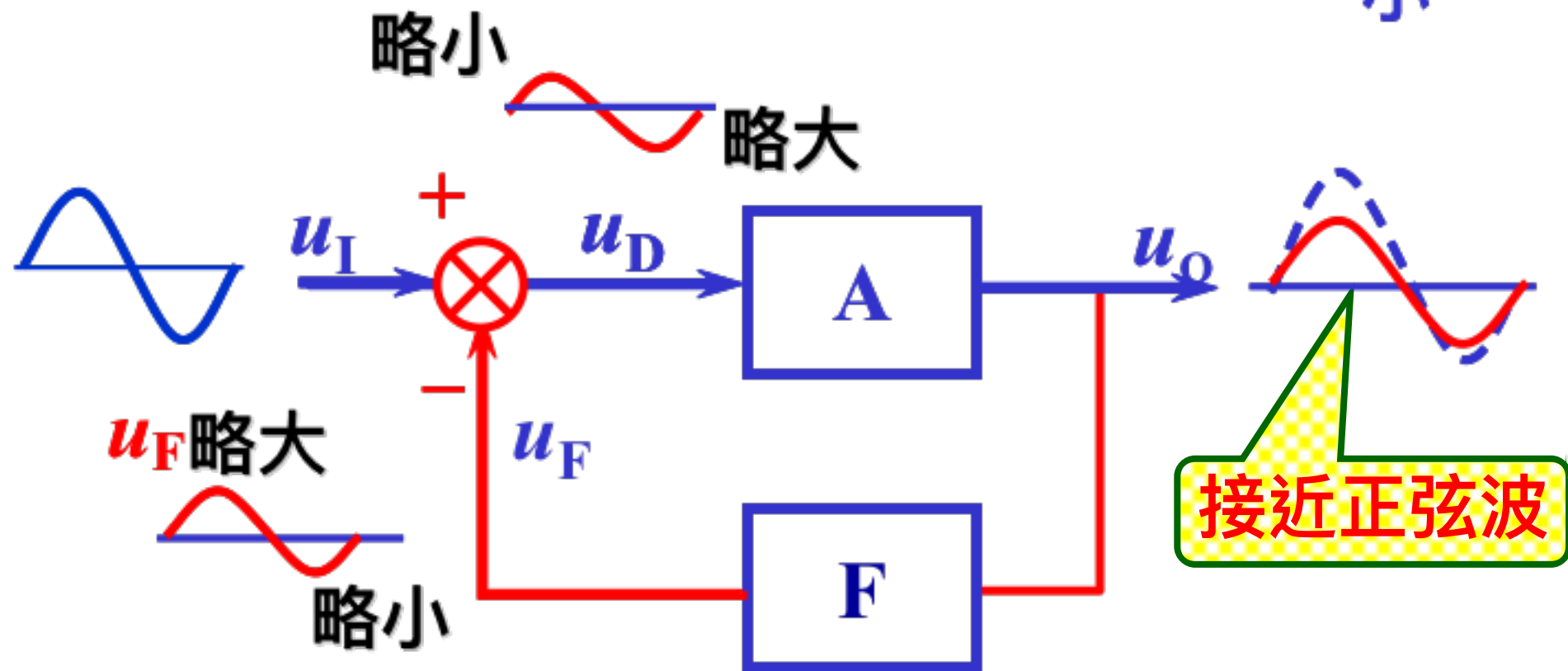
17.2.2 负反馈对放大电路工作性能的影响

(3). 改善波形失真

无负反馈



加入负反馈

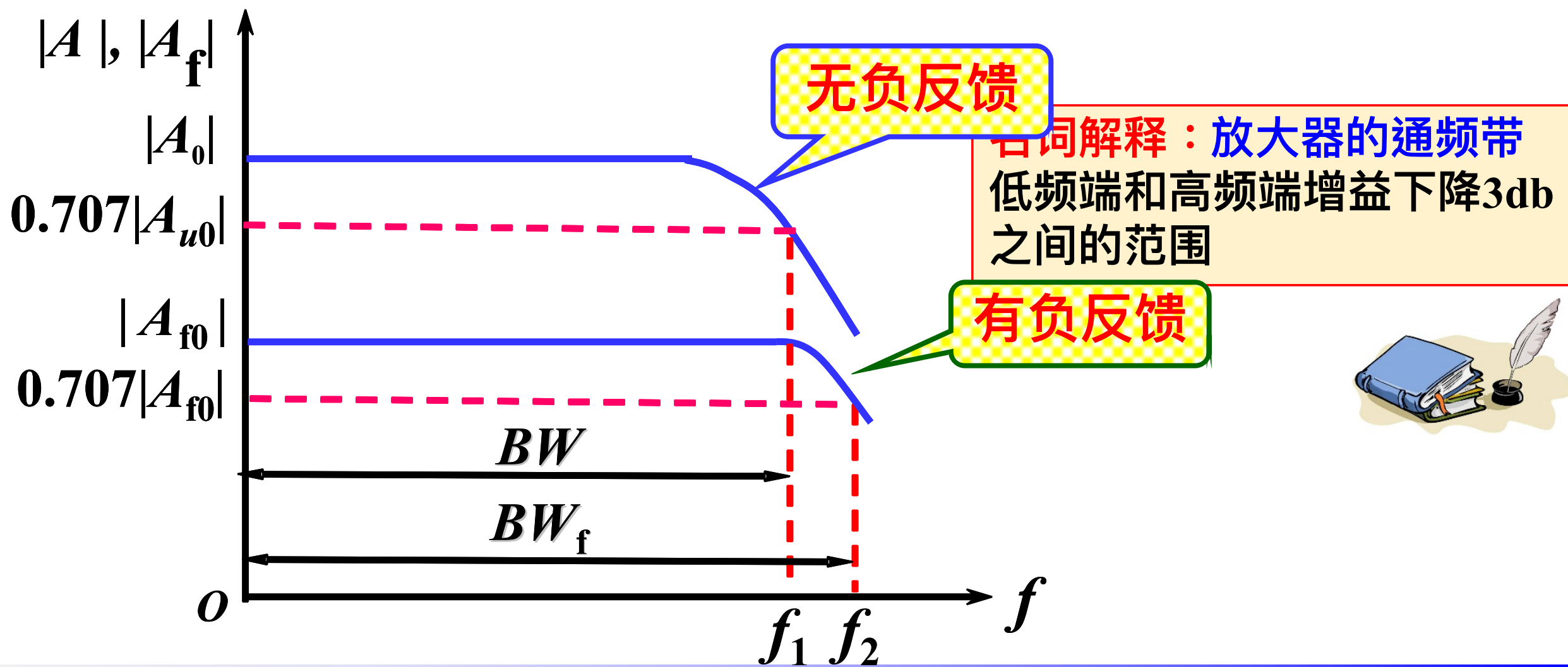


负反馈是利用失真的波形来改善波形的失真，因此只能减小失真，而不能完全消除失真。

17.2.2 负反馈对放大电路工作性能的影响

(4). 展宽通频带

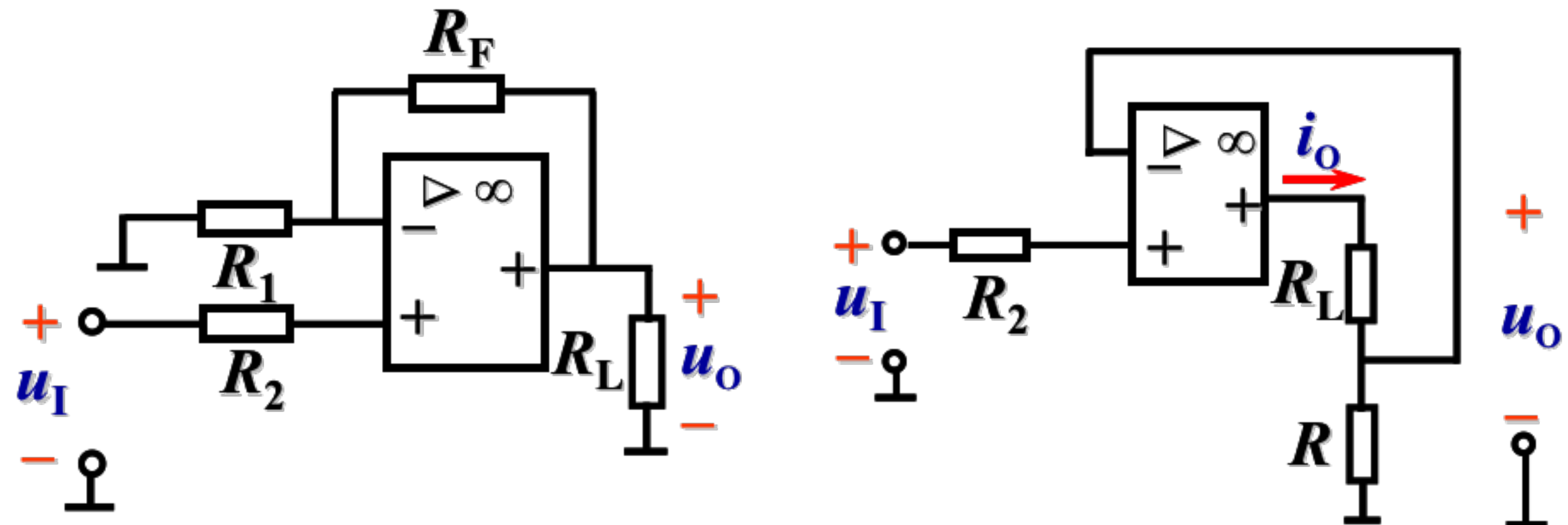
本质：引入负反馈后，放大器的输出增益将被降低，由于放大器的本质的频率特征不变，相对原通频带在低频端和高端被拓宽，其实际就是以牺牲放大器的增益而得到



17.2.2 负反馈对放大电路工作性能的影响

(5). 对放大电路输入电阻的影响

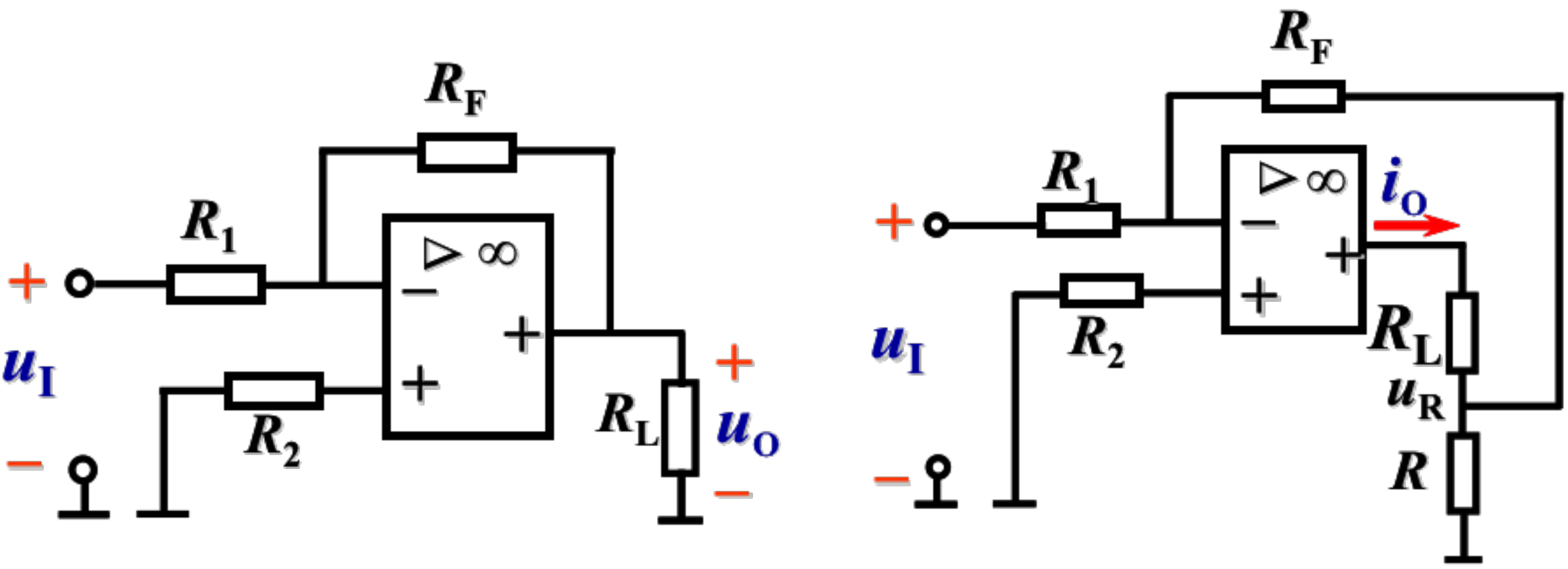
(a) 串联负反馈 使电路的输入电阻提高



17.2.2 负反馈对放大电路工作性能的影响

(5). 对放大电路输入电阻的影响

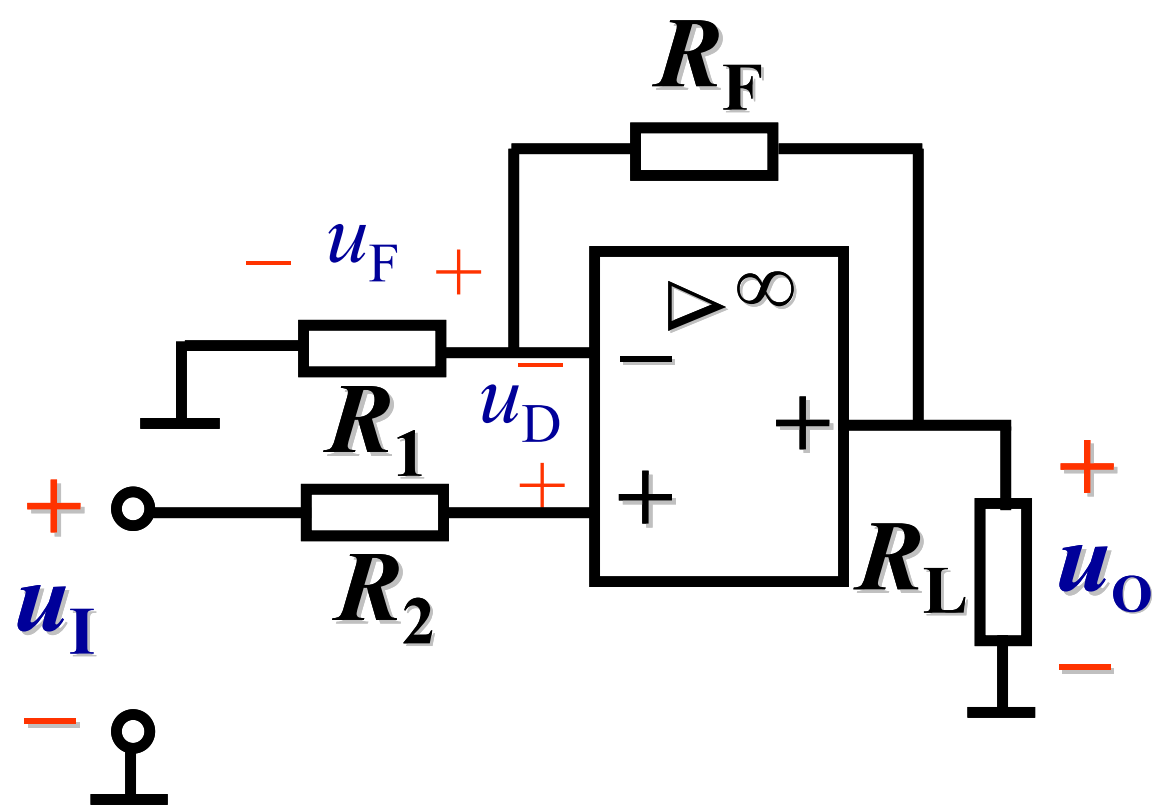
(b) 并联负反馈 使电路的输入电阻降低





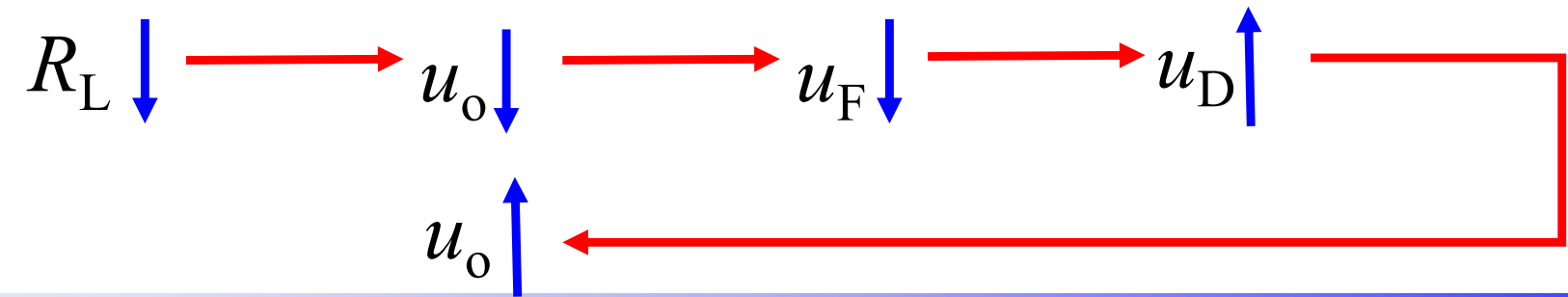
17.2.2 负反馈对放大电路工作性能的影响

(6). 对放大电路输出电阻的影响



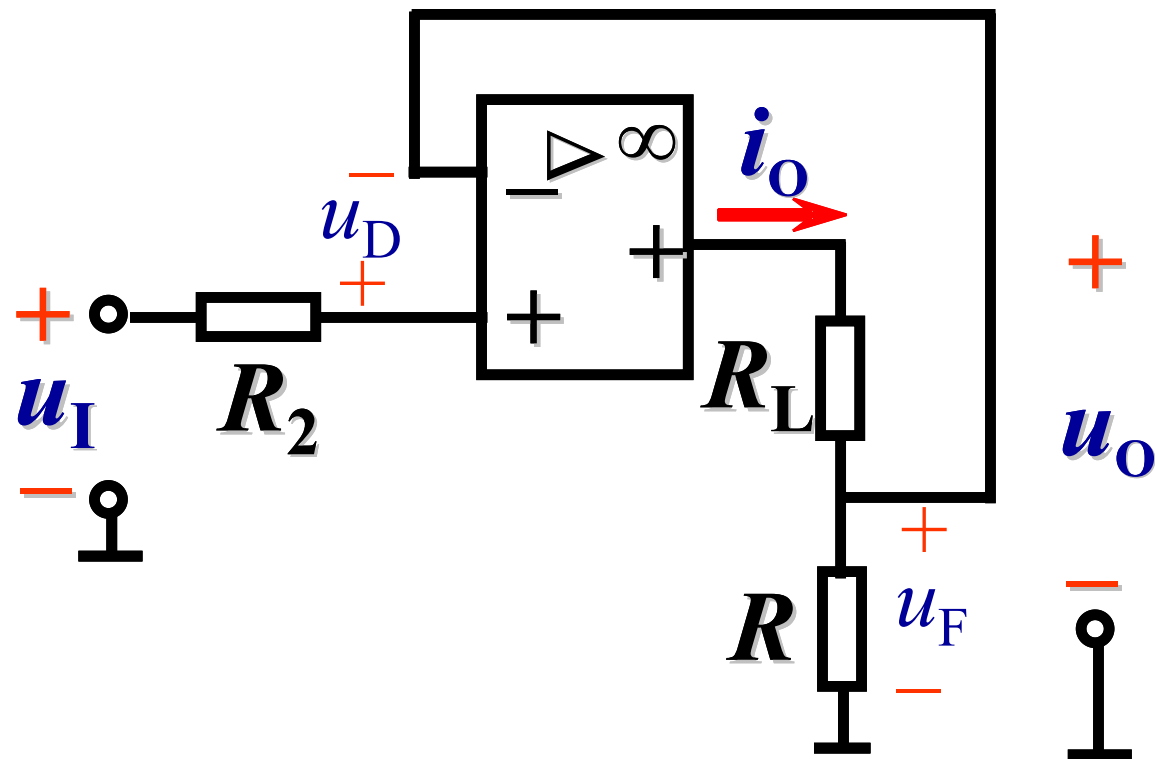
(a) 电压负反馈使电路的输出电阻降低

电压负反馈具有稳定输出电压的作用，即有恒压输出特性，故输出电阻降低。



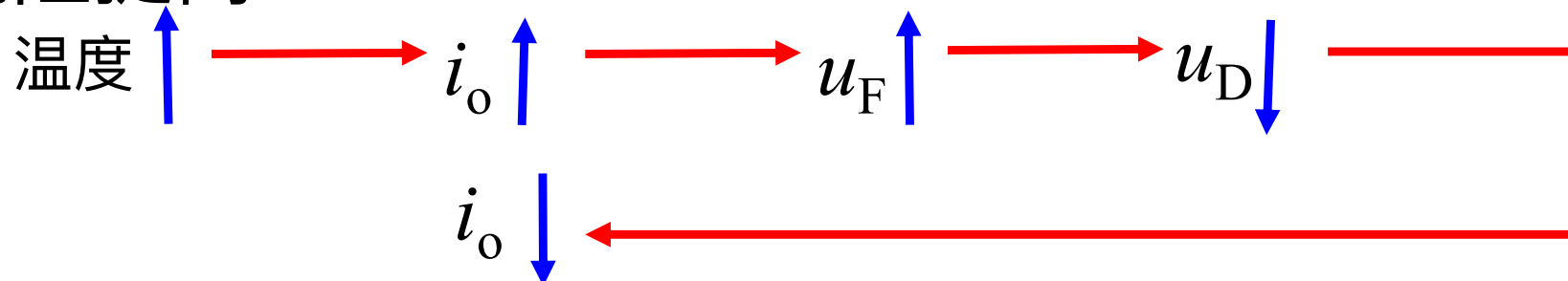
17.2.2 负反馈对放大电路工作性能的影响

(6). 对放大电路输出电阻的影响



(b) 电流负反馈使电路的输出电阻提高

电流负反馈具有稳定输出电流的作用，即有恒流输出特性，故输出电阻提高。



17.2.2 负反馈对放大电路工作性能的影响

四种负反馈对 r_i 和 r_o 的影响

	串联电压	串联电流	并联电压	并联电流
r_i	增高	增高	减低	减低
r_o	减低	增高	减低	增高

思考题：为了分别实现：

- (1) 稳定输出电压；
- (2) 稳定输出电流；
- (3) 提高输入电阻；
- (4) 降低输出电阻。

应引入哪种类型的负反馈？



第17章 电子电路中的反馈

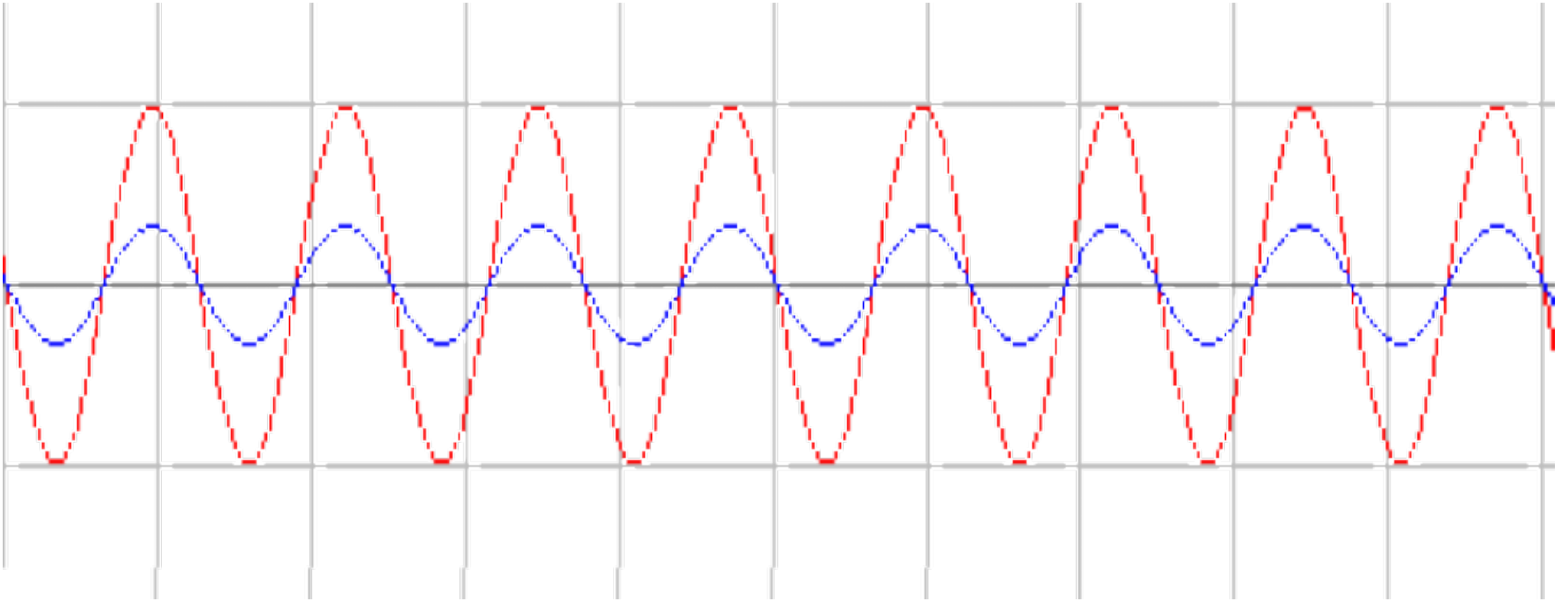
17.1 反馈的基本概念

17.2 放大电路中的负反馈

17.2.1 负反馈的类型

17.2.2 负反馈对放大电路工作性能的影响

17.3 振荡电路中的正反馈

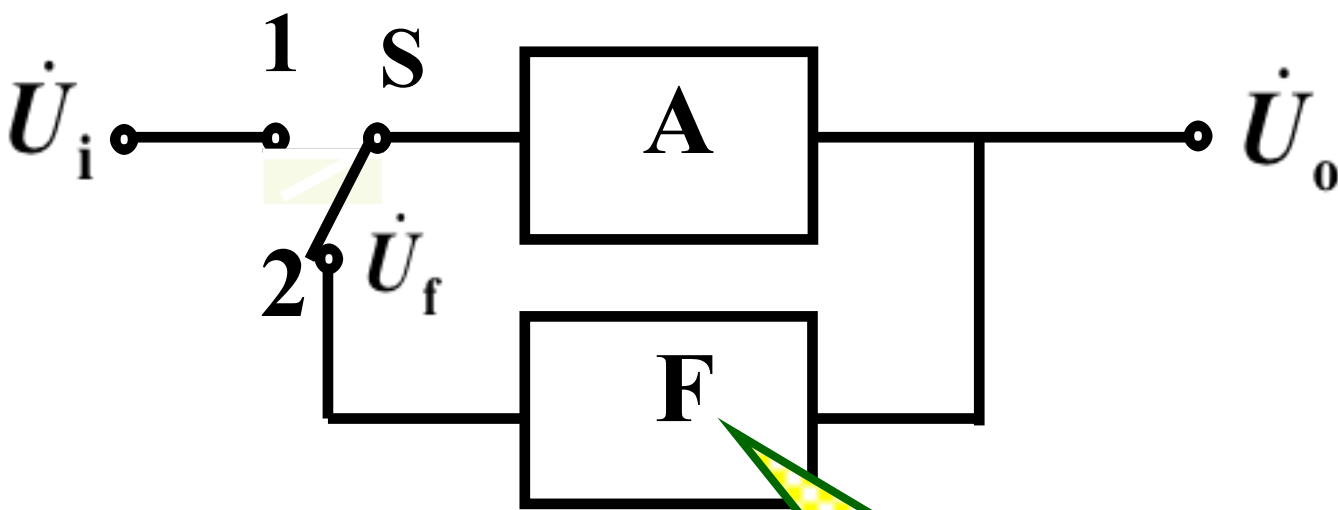


正弦信号如何得到?



17.3.1 自激振荡

自激振荡：放大电路在无输入信号的情况下，就能输出一定频率和幅值的交流信号的现象。



开关合在“1”为
无反馈放大电路

$$\dot{U}_o = A_u \dot{U}_i$$

开关合在“2”为
有反馈放大电路

自激振荡状态

如果 $\dot{U}_f = \dot{U}_i$

$$\dot{U}_o = A_u \dot{U}_f$$

开关合在“2”时, 去掉 \dot{U}_i 仍有稳定的输出。反馈信号代替了放大电路的输入信号。



17.3.1 自激振荡

自激振荡的条件

由 $\dot{U}_o = A_u \dot{U}_f$
 $\dot{U}_f = F \dot{U}_o$
 $\dot{U}_o = A_u F \dot{U}_o$ } \Rightarrow **自激振荡的条件**
 $A_u F = 1$
即 $|A_u| \angle \varphi_A \cdot |F| \angle \varphi_F = 1$

(1) 幅度条件： $|A_u F| = 1$

(2) 相位条件： $\varphi_A + \varphi_F = \pm 2n\pi$ n 是整数

相位条件意味着振荡电路必须是**正反馈**。

幅度条件表明反馈放大器要产生自激振荡，还必须有足够的反馈量(可以通过调整放大倍数 **A** 或反馈系数 **F** 达到)。



17.3.2 正弦波振荡电路

正弦波振荡电路用来产生一定频率和幅值的正弦交流信号。它的频率范围很广，可以从一赫以下到几百兆赫以上；输出功率可以从几毫瓦到几十千瓦；输出的交流电能是从电源的直流电能转换而来的。

常用的正弦波振荡器

- LC 振荡电路:输出功率大、频率高。**
- RC 振荡电路:输出功率小、频率低。**

石英晶体振荡电路：频率稳定度高。

应用：无线电通信、广播电视、工业上的高频感应炉、超声波发生器、正弦波信号发生器、半导体接近开关等。



17.3.2 正弦波振荡电路

正弦波振荡电路的组成

- (1) **放大电路**: 放大信号。
- (2) **反馈网络**: 必须是**正反馈**，反馈信号即是放大电路的输入信号。
- (3) **选频网络**: 保证输出为单一频率的正弦波，即使电路只在某一特定频率下满足自激振荡条件。
- (4) **稳幅环节**: 使电路能从 $|A_u F| > 1$ ，过渡到 $|A_u F| = 1$ ，从而达到稳幅振荡。

17.3.2 正弦波振荡电路

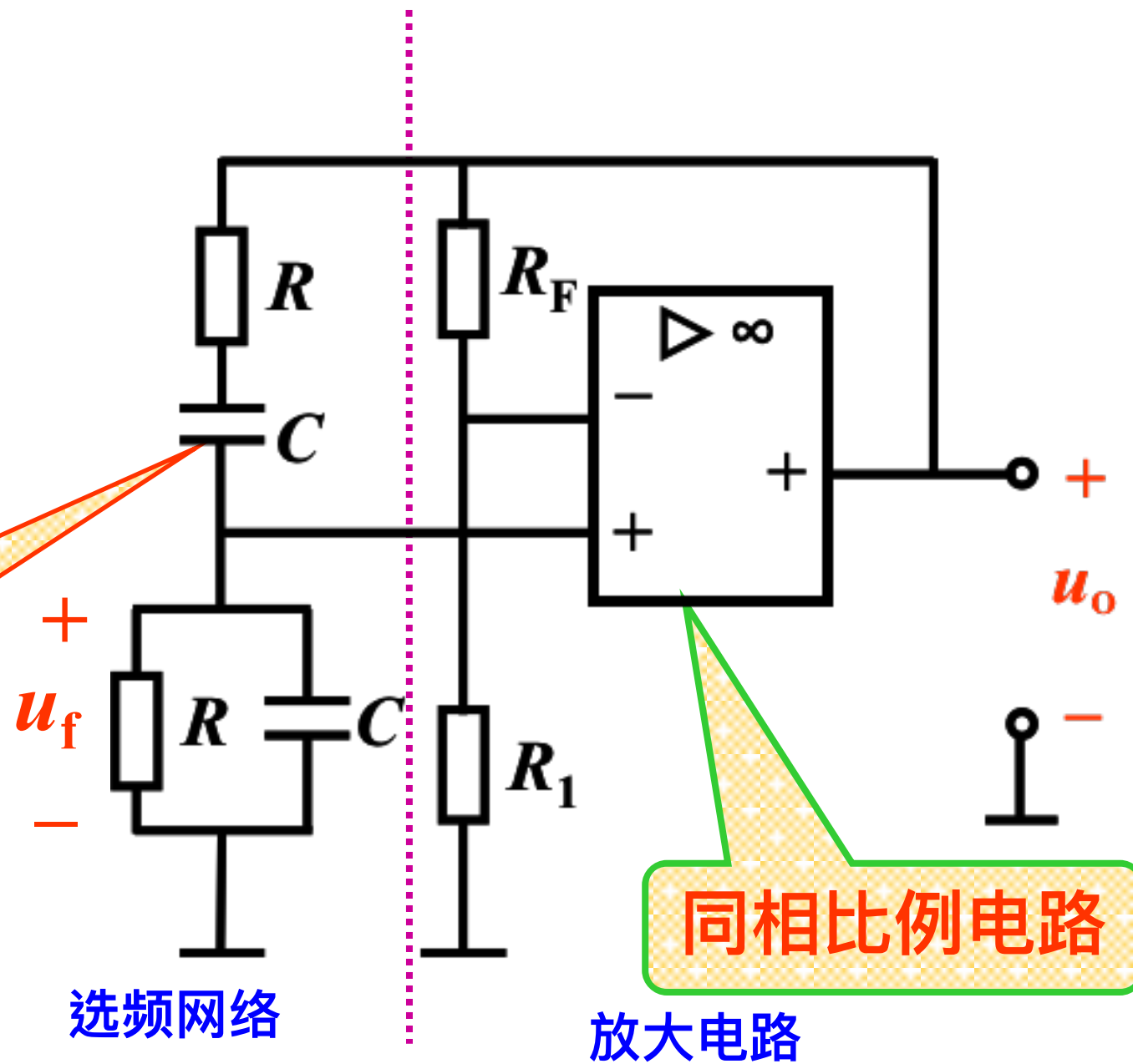
*RC*正弦波振荡电路

(1) 电路结构

选出单一频率
的信号

*RC*选频网络
正反馈网络

用正反馈信号 u_f
作为输入信号



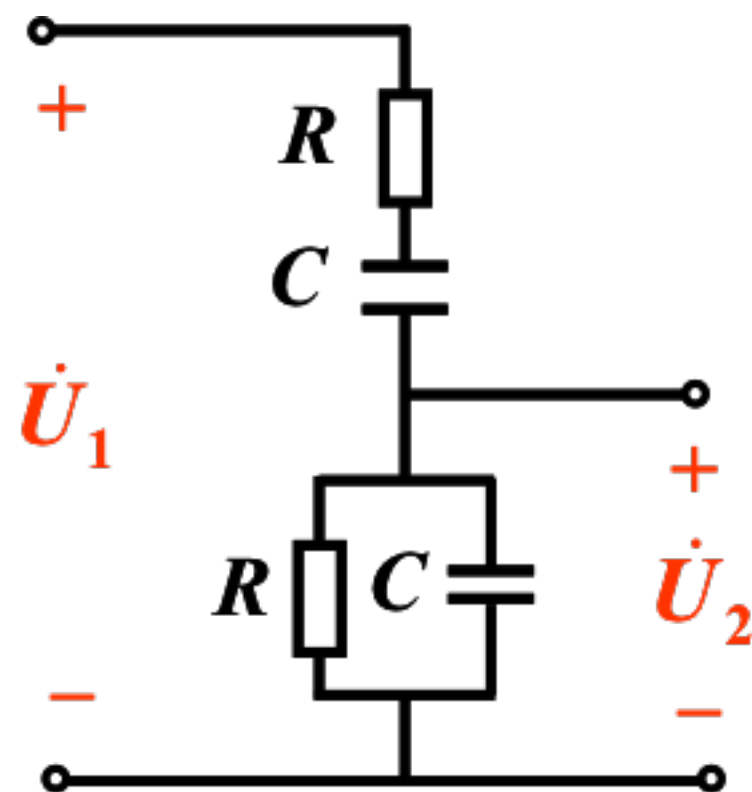
17.3.2 正弦波振荡电路

(2) RC 串并联选频网络的选频特性

反馈系数

$$F = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R // \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C} + R // \frac{1}{j\omega C}}$$

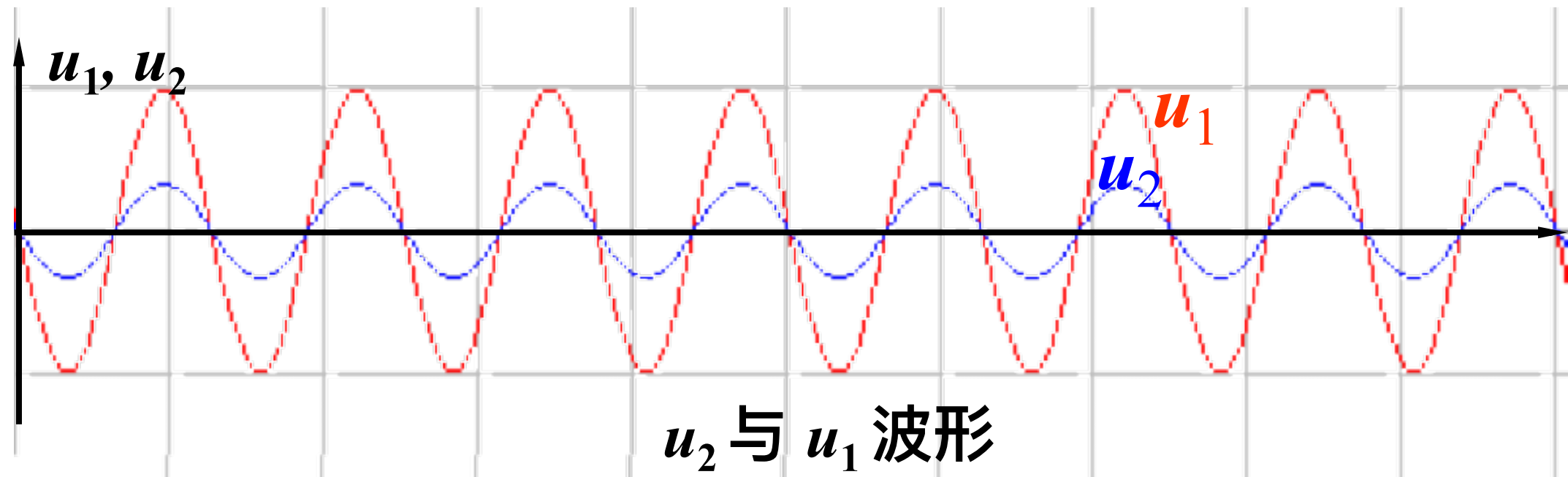
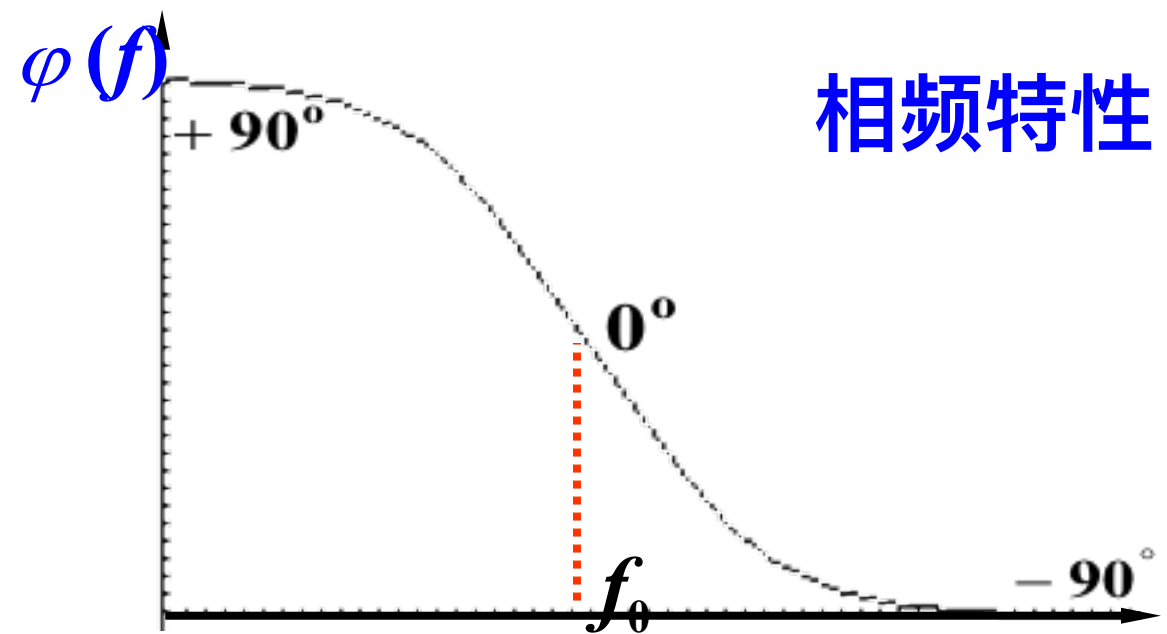
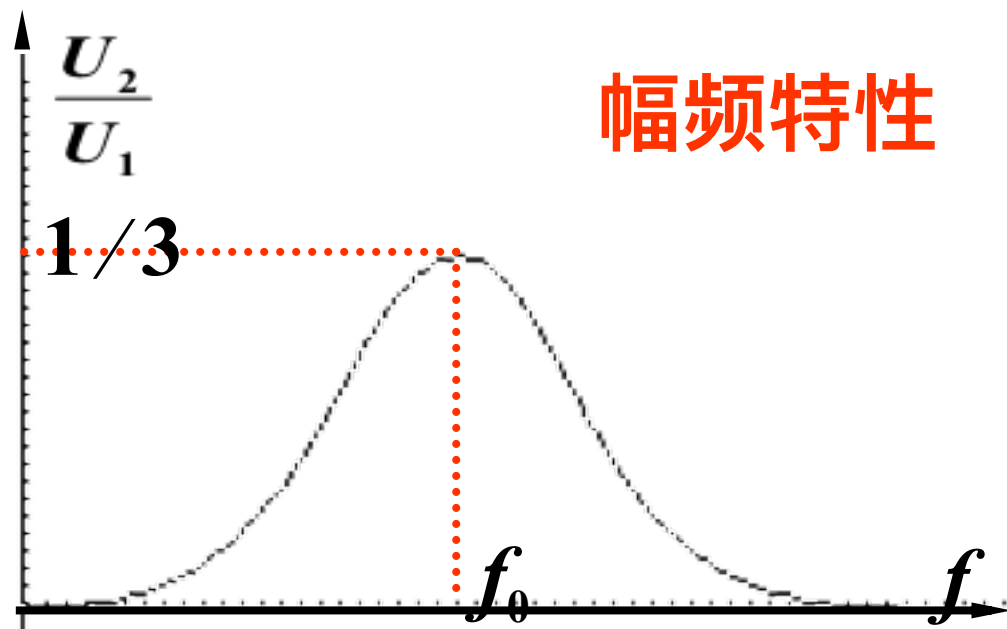
$$= \frac{1}{3 + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$



$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

分析可知：仅当 $\omega = \omega_0$ 时, $U_2/U_1 = 1/3$ 达最大值，
且 u_2 与 u_1 同相，即网络具有选频特性, f_0 决定于 RC 。

17.3.2 正弦波振荡电路

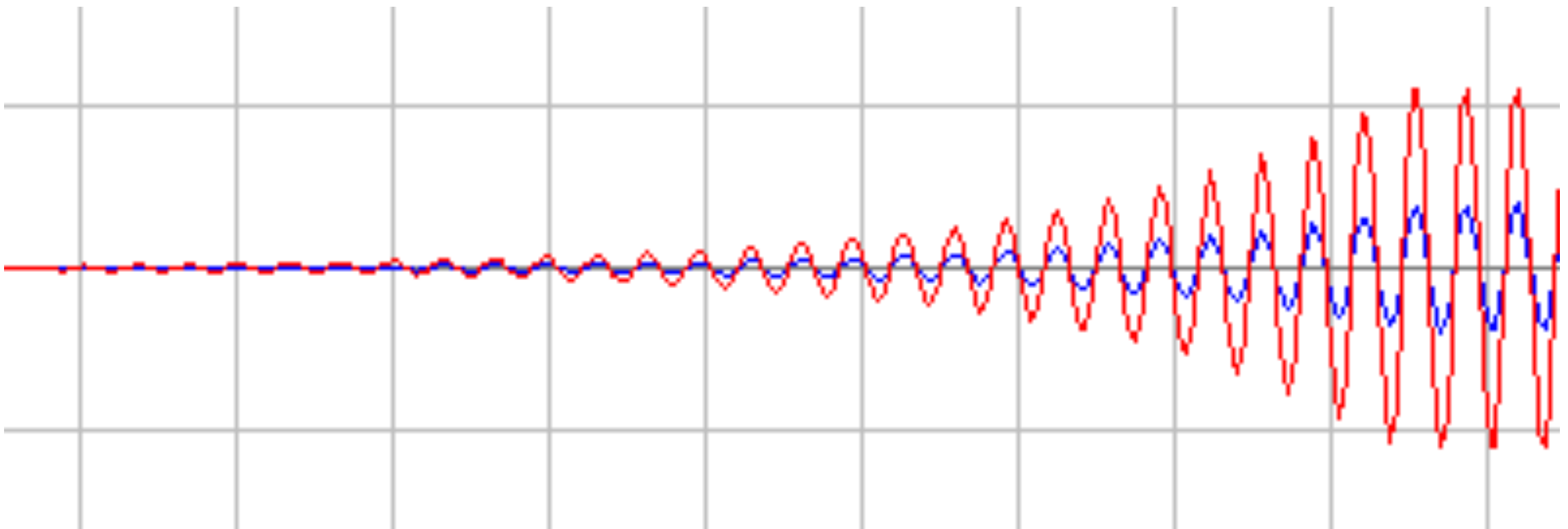


17.3.2 正弦波振荡电路

(3) 工作原理

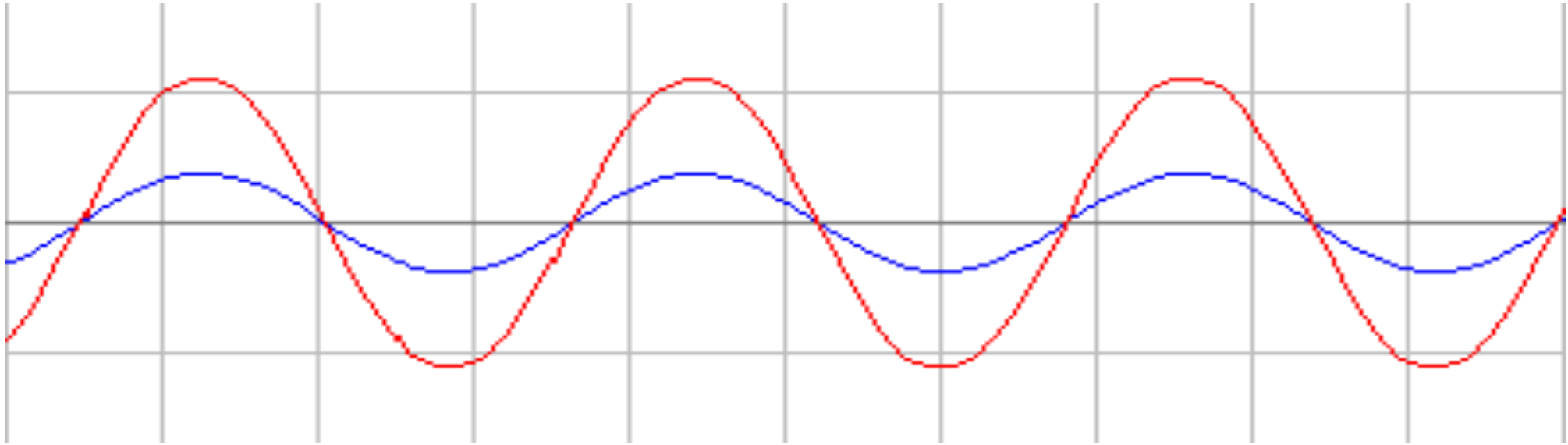
输出电压 u_o 经正反馈(兼选频)网络分压后，取 u_f 作为同相比例电路的输入信号 u_i 。

① 起振过程



17.3.2 正弦波振荡电路

② 稳定振荡



③ 振荡频率

振荡频率由相位平衡条件决定。

$\varphi_A = 0$ ，仅在 f_0 处 $\varphi_F = 0$ ，满足相位平衡条件，

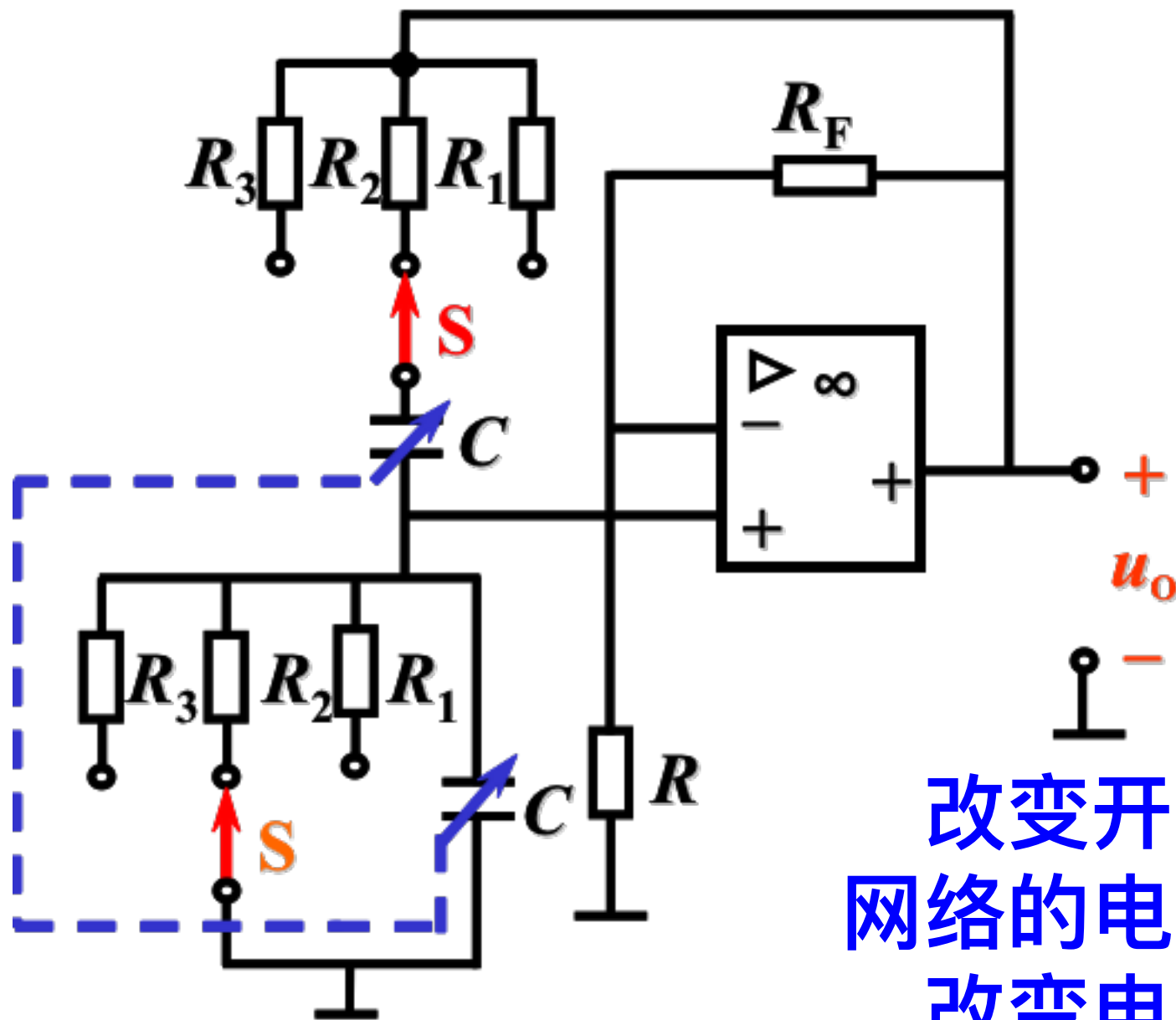
所以振荡频率 $f_0 = 1/(2\pi RC)$ 。

改变 R 、 C 可改变振荡频率。

由运算放大器构成的 RC 振荡电路的振荡频率一般不超过 1MHz 。

17.3.2 正弦波振荡电路

振荡频率的调整



振荡频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

改变开关S的位置可改变选频网络的电阻，实现频率粗调。
改变电容C的大小可实现频率的细调。

17.3.2 正弦波振荡电路

④ 起振及稳定振荡的条件

起振条件 $|A_u F| > 1$ ，因为 $|F| = 1/3$ ，则

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

稳定振荡条件 $|A_u F| = 1$ ， $|F| = 1/3$ ，则

$$A_u = 1 + \frac{R_F}{R_1} = 3$$

考虑到起振条件 $|A_u F| > 1$ ，一般应选取 R_F 略大于 $2R_1$ 。如果这个比值取得过大，会引起振荡波形严重失真。

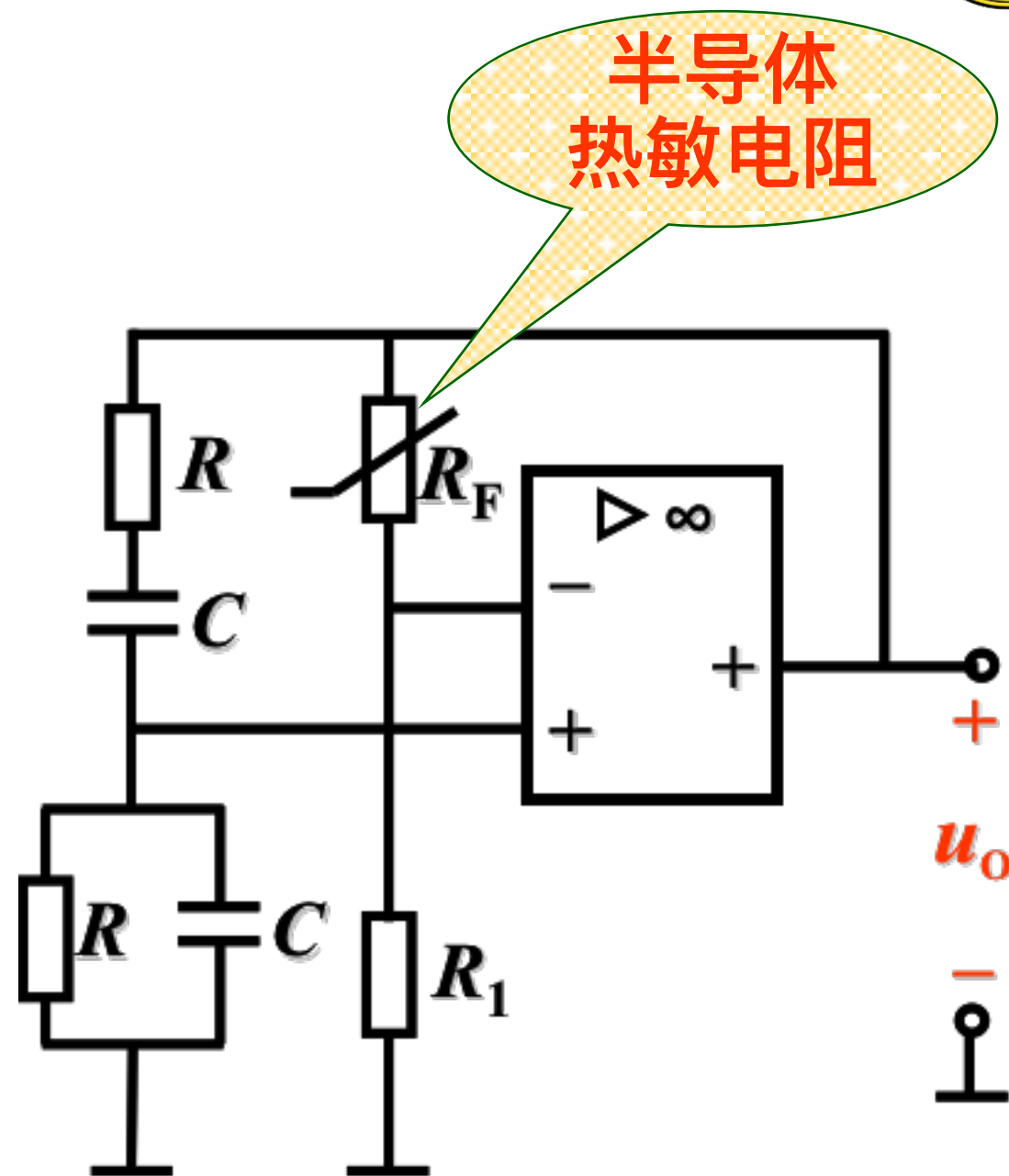
由运放构成的 RC 串并联正弦波振荡电路不是靠运放内部的晶体管进入非线性区稳幅的，而是通过在外部分引入负反馈来达到稳幅的目的。

17.3.2 正弦波振荡电路

带稳幅环节的电路(1)

热敏电阻具有负温度系数，利用它的非线性可以自动稳幅。

在起振时，由于 u_O 很小，流过 R_F 的电流也很小，于是发热少，阻值高，使 $R_F > 2R_1$ ，即 $|A_u F| > 1$ 。随着振荡幅度的不断加强， u_O 增大，流过 R_F 的电流也增大， R_F 受热而降低其阻值，使得 A_u 下降，直到 $R_F = 2R_1$ 时，稳定于 $|A_u F| = 1$ ，振荡稳定。



17.3.2 正弦波振荡电路

带稳幅环节的电路(1)

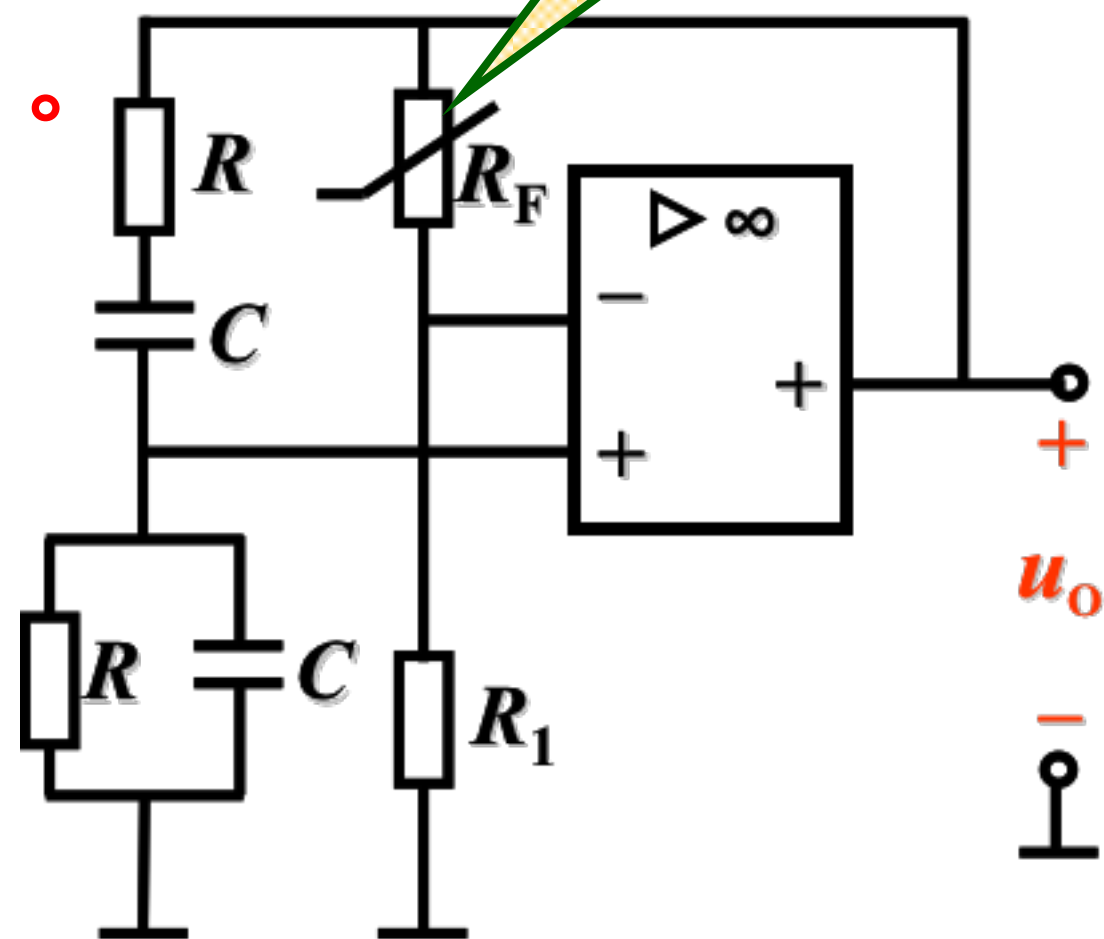
热敏电阻具有负温度系数，
利用它的非线性可以自动稳幅。

稳幅过程：

$$u_o \uparrow \rightarrow T \uparrow \rightarrow R_F \downarrow \rightarrow A_u \downarrow$$

思考：

若热敏电阻具有正温度系数，应接在何处？

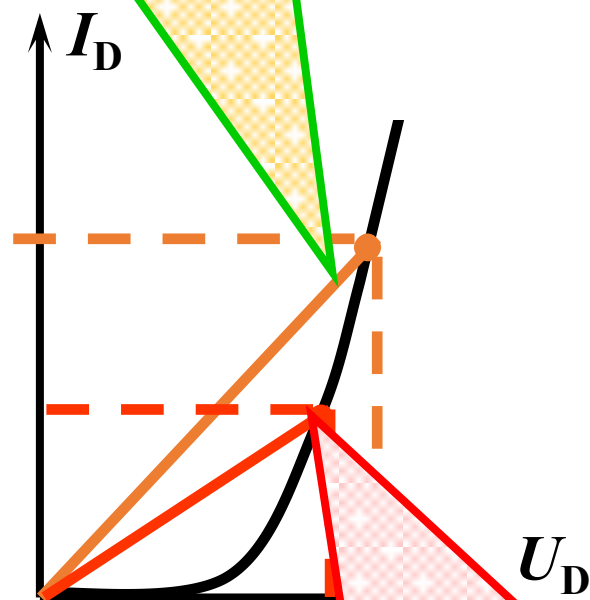


17.3.2 正弦波振荡电路

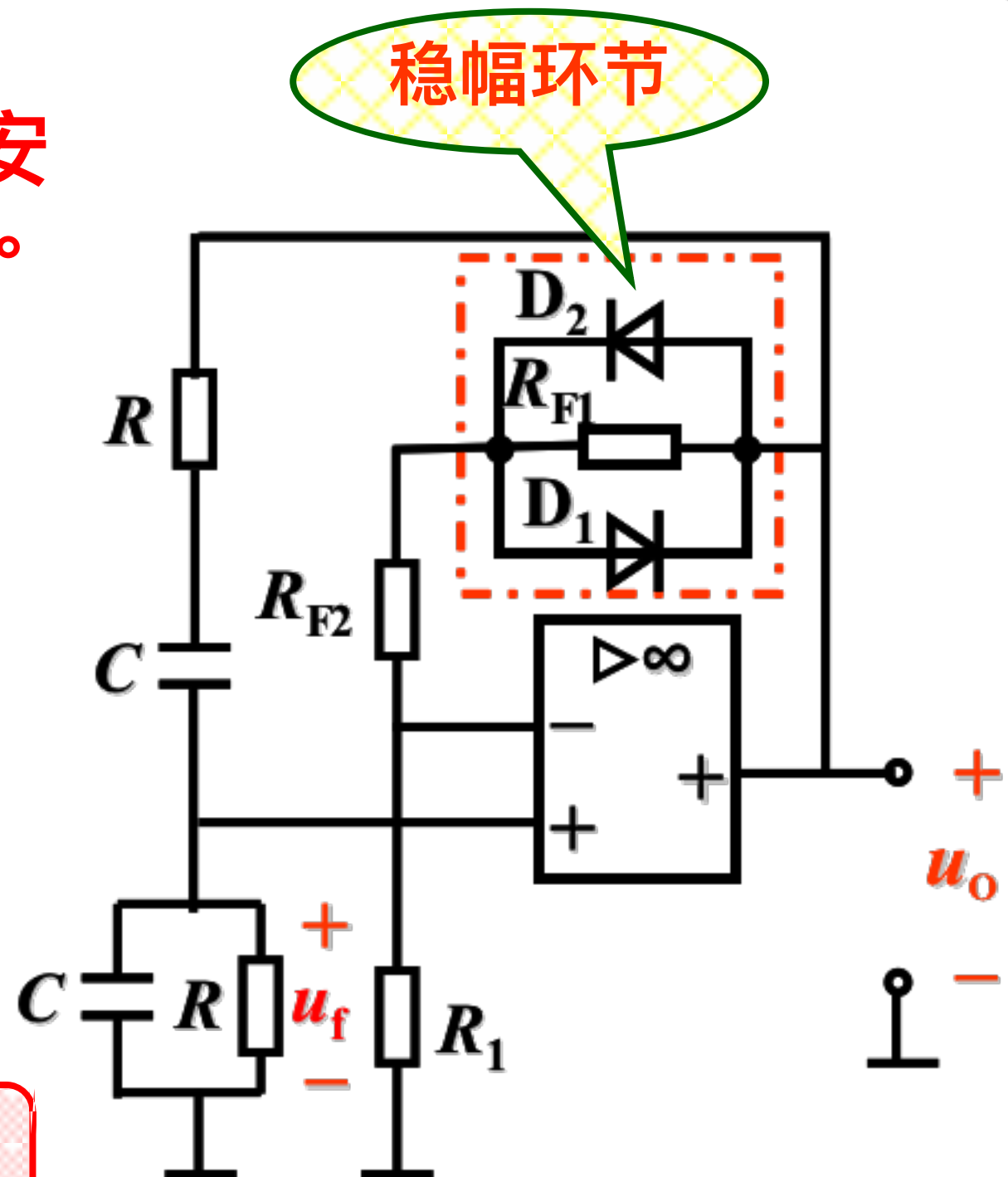
带稳幅环节的电路(2)

利用二极管的正向伏安特性的非线性自动稳幅。

振荡幅度较大时
正向电阻小



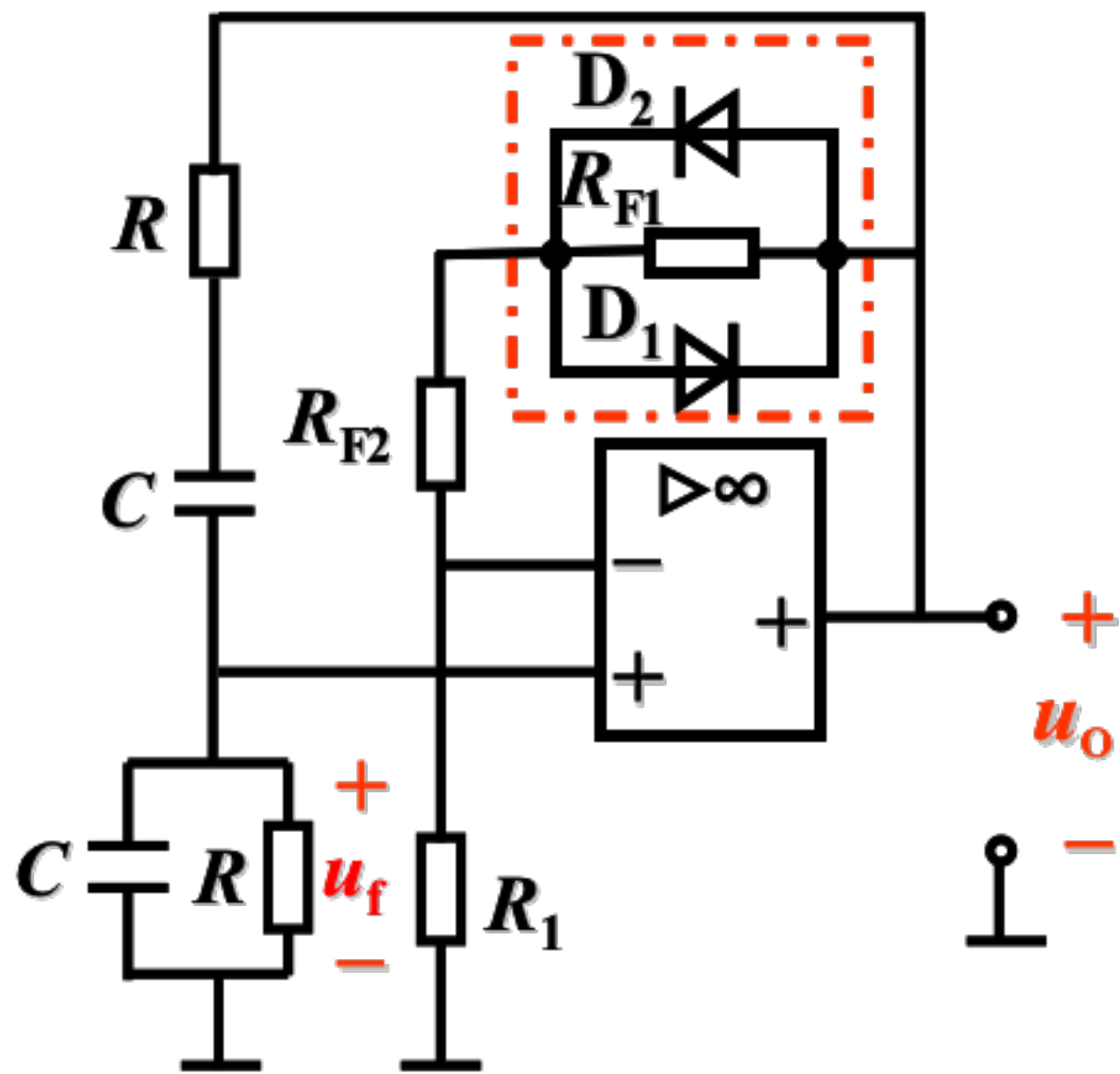
振荡幅度较小时
正向电阻大



17.3.2 正弦波振荡电路

带稳幅环节的电路(2)

图示电路中， R_F 分为两部分。在 R_{F1} 上正反并联两个二极管，它们在输出电压 u_o 的正、负半周内分别导通。在起振之初，由于 u_o 幅值很小，尚不足以使二极管导通，正向二极管近于开路，此时， $R_F > 2R_1$ 。而后，随着振荡幅度的增大，正向二极管导通，其正向电阻逐渐减小，直到 $R_F = 2R_1$ ，振荡稳定。





P150-17.1.1

P151-17.2.1

P152-17.2.7