

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 15 放大电路中的反馈

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！

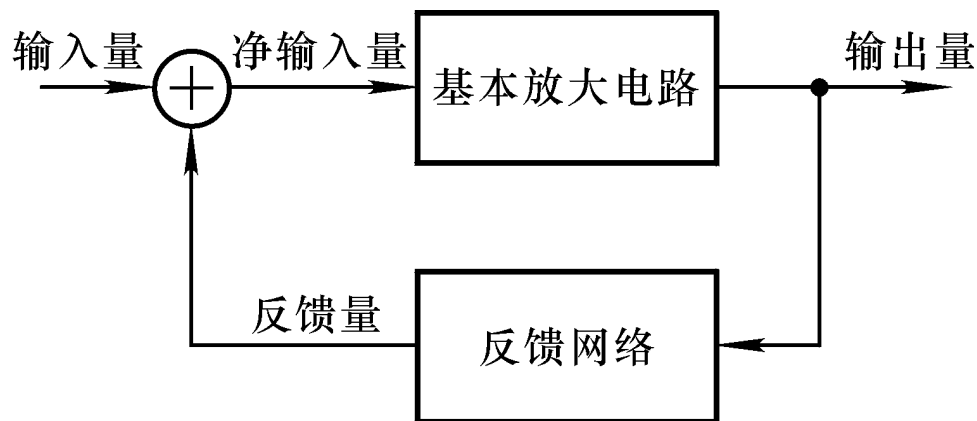
放大电路中的反馈

- 反馈的基本概念与类型判断
- 交流负反馈的四种基本组态
- 负反馈对放大电路性能的影响
- 深度负反馈放大电路放大倍数的分析
- 负反馈放大电路的稳定性 —— 自激振荡

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！

反馈的基本概念

“反馈”与“闭环”的概念



关键词：输出量的变化 \rightarrow 净输入量的变化

能够将输出量的变化反馈到输入端（反馈量的变化），
引起净输入量的变化，最终再影响输出量的变化；

基本概念：

输入量

输出量

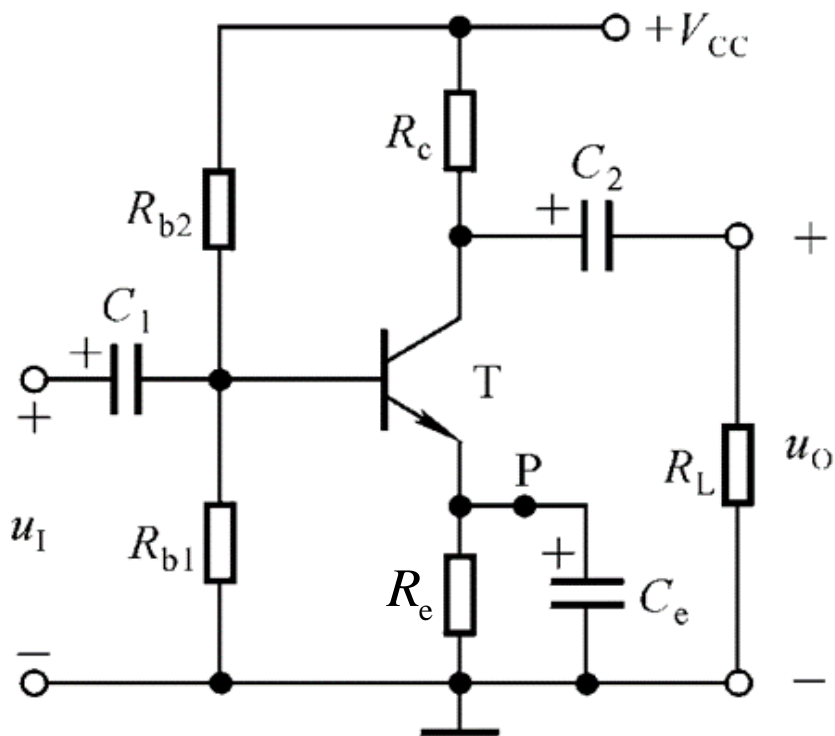
反馈量

净输入量

反馈网络

反馈的基本概念

回顾第二章的静态工作点稳定电路：



晶体管的输入回路： i_B 和 u_{BE}

晶体管的输出回路： i_C 和 u_{CE}

静态时 (C_1 、 C_2 、 C_e 开路)

当温度变化导致晶体管参数变化导致
集电极电流（输出电流）变化时：

集电极电流 $\uparrow \rightarrow$ 发射极电流 $\uparrow \rightarrow$ 发射极电位 \uparrow
 \rightarrow 发射结压降 \downarrow 即净输入电压 \downarrow
 \rightarrow 基极电流 $\downarrow \rightarrow$ 集电极电流 \downarrow

因此发射极电阻 R_e 的作用是引入负反馈效应，
因为在直流通路中存在而交流通路中不存在，因此为
直流负反馈；

反馈的基本概念

○对基本概念の説明

在本章，放大电路既可以是分立元件型放大电路，也可以是由集成运放组成的放大电路；

对于集成运放：

净输入电压即差模电压，即两个输入端口（同相输入端与反相输入端）之间电压差值；

对于分立元件电路：

对于单管基本放大电路，净输入电压指的是发射结压降 u_{BE} （场效应管电路即 u_{GS} ）；

对于差分放大电路，净输入电压指的是差模电压；（集成运放本质上就是差分放大电路）

分立元件电路的输出电流一般默认为集电极电流（共射、共基）或发射极电流（共集）

（场效应管电路即漏极电流/源极电流）；

反馈的类型

○ 正反馈与负反馈

由于反馈的作用，使净输入量减小，抑制输出量变化 —— 负反馈；

由于反馈的作用，使净输入量增大，加剧输出量变化 —— 正反馈；

○ 直流反馈与交流反馈

在直流通路中出现的反馈（反馈量为直流量） —— 直流反馈；

在交流通路中出现的反馈（反馈量为交流量） —— 交流反馈；

○ 局部反馈与级间反馈

只对某一级产生反馈作用的反馈 —— 局部反馈；

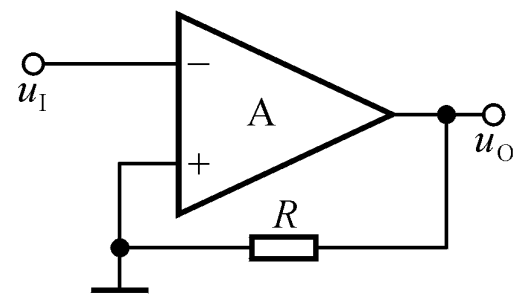
跨接在不同级(一般为末级和前级)之间的反馈 —— 级间反馈；

反馈的类型

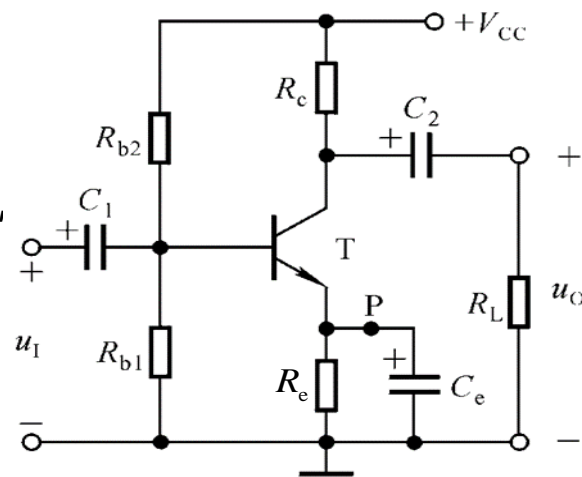
有无反馈的判断

输出回路与输入回路之间有无通路相连，注意不是输出端与输入端之间；
最本质的判断原则是输出量的变化是否传递到输入侧引起净输入量的变化！

常见易错点：



表面上看由输出端引回至同相输入端，
但同相输入端接地，
电阻 R 并不是在输出回路与输入回路间，
输出电压或电流的变化
不会引起净输入量的变化，
无反馈！



表面上看输出端与输入端之间无通路，
但是，对于电阻 R_e ，
既出现在输入回路又出现在输出回路，
输出电流即集电极电流的变化
会引起净输入电压
即发射结压降的变化，
存在反馈！

反馈的类型

具体的判断后面会有示例与小结！

○ 正反馈/负反馈的判断

瞬时极性法 —— 规定电路的输入信号在某一时刻对地的极性，例如一般设为正 (+)，接着逐级判断电路中各相关点电流的流向和电位的极性，得到输出信号的极性，根据输出信号的极性判断出反馈信号的极性，得到反馈量与输入量的叠加关系；

对于集成运放，注意反相输入端与同相输入端和输出端口的极性关系；

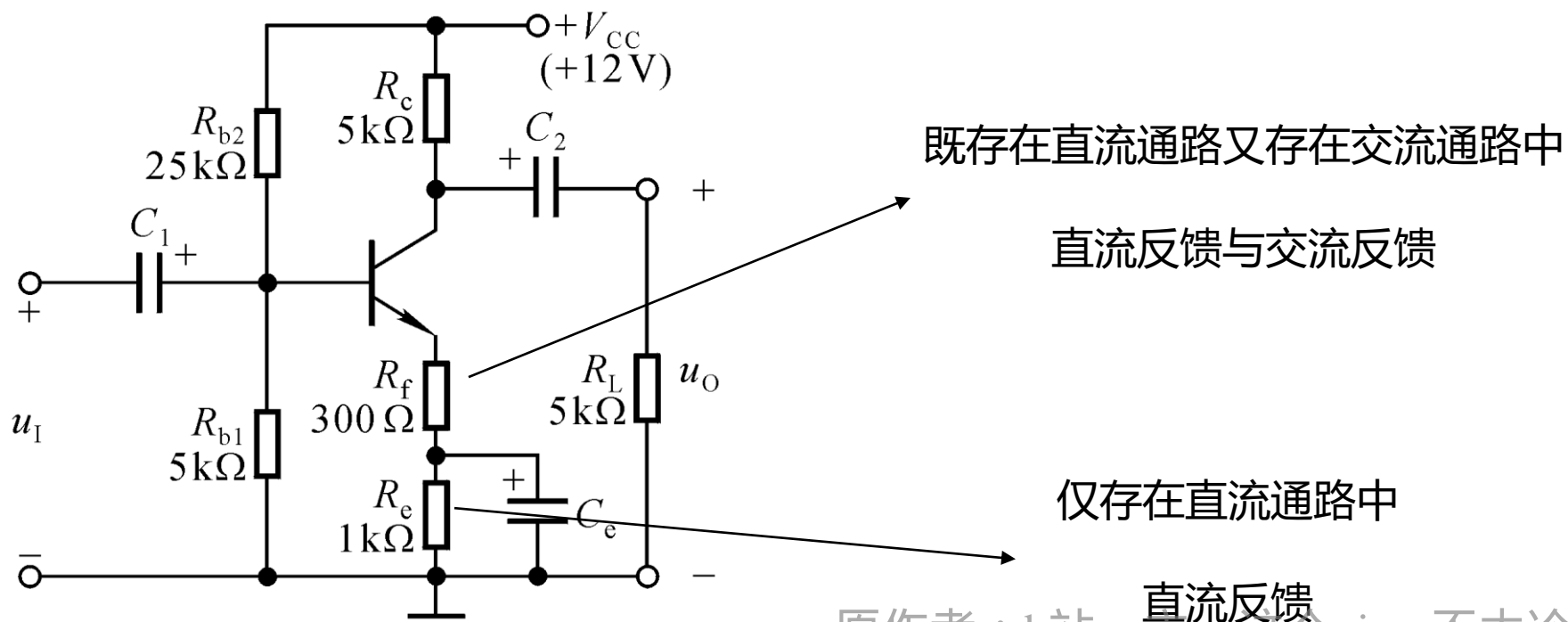
对于分立元件电路，利用瞬时极性法判断时注意共射、共集、共基接法的输入输出极性为同相or反相，注意通过电阻不影响极性，注意电流的流向从高电位到低电位，注意电位指对地的电位；

最本质的判断原则：使净输入量减小的为负反馈，使净输入量增大的为正反馈；

反馈的类型

直流反馈/交流反馈的判断

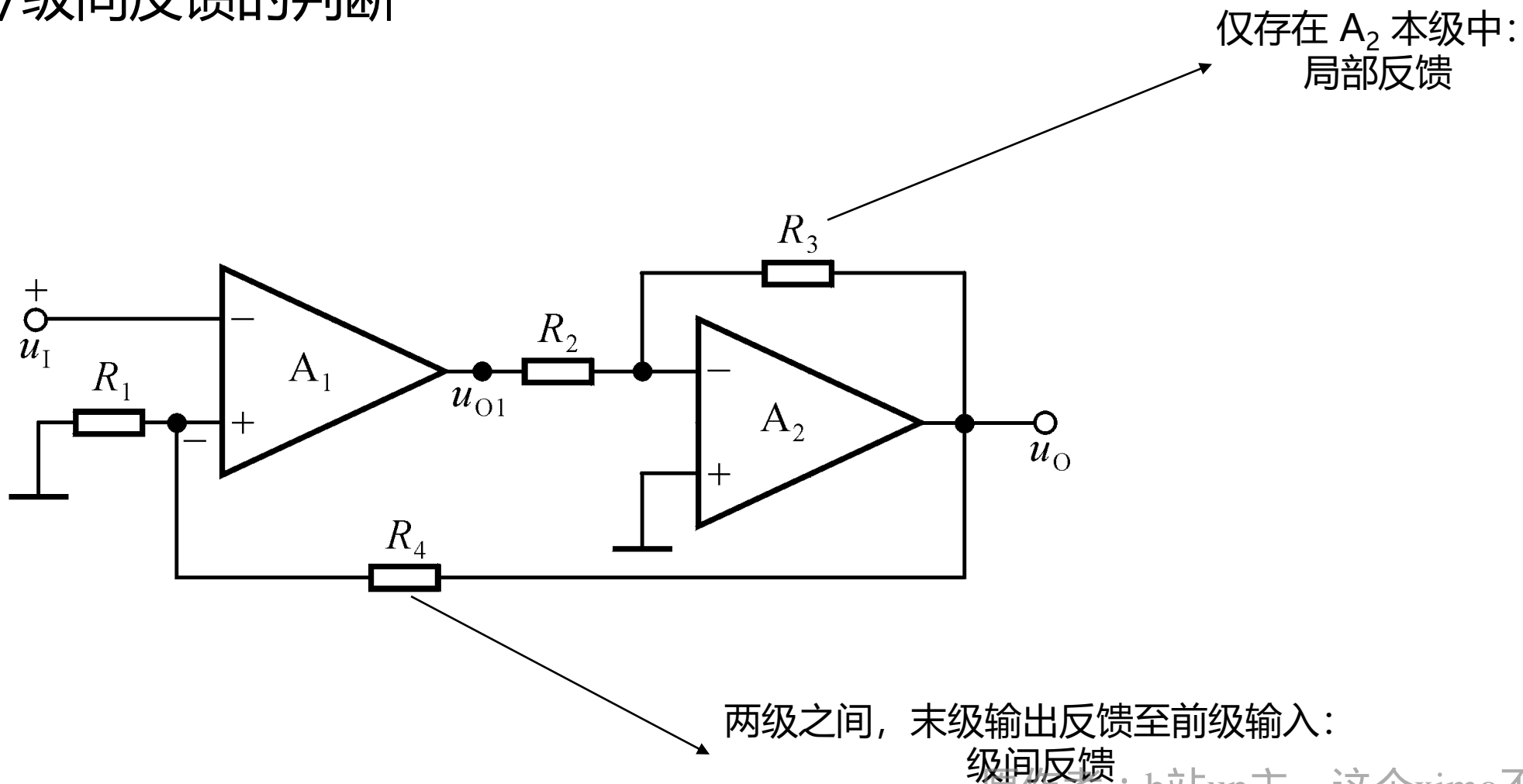
一般常见于含有电容的反馈回路，判断方法即直流通路（电容开路）与交流通路（电容短路）时反馈是否存在；



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！

反馈的类型

局部反馈/级间反馈的判断



交流负反馈的四种基本组态

本章重点研究的反馈是交流负反馈；交流负反馈有四种基本组态 —— 电压串联负反馈、电压并联负反馈、电流串联负反馈、电流并联负反馈；

○ 电压反馈/电流反馈

反馈量取自输出电压 —— 电压反馈；

反馈量取自输出电流 —— 电流反馈；

○ 串联反馈/并联反馈

反馈量与输入量以电压方式叠加，即净输入电压变化 —— 串联反馈

反馈量与输入量以电流方式叠加，即净输入电流变化 —— 并联反馈

交流负反馈的四种基本组态

○ 电压反馈/电流反馈的判断

将输出电压置零（即短路接地），若反馈不存在，则为电压反馈；若反馈仍然存在，则为电流反馈；

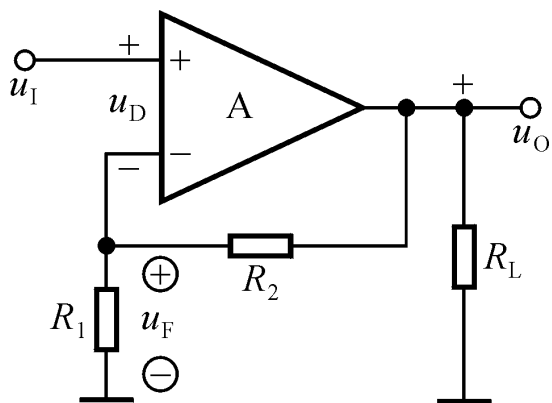
对于分立元件电路来说，输出侧引出反馈的位置与输出端口在同侧即为电压反馈，在异侧即为电流反馈；例如对于共射放大电路（b输入，c输出），从集电极引出的反馈为电压反馈，从发射极引出的反馈为电流反馈；而对于共基放大电路（b输入，e输出），从发射极引出的反馈为电压反馈，从集电极引出的反馈为电流反馈；

判断电压反馈/电流反馈看的是反馈量是对输出电压的采样还是对输出电流的采样，即由输出侧引出反馈的位置决定，而与反馈量的形式为电压还是电流无关；

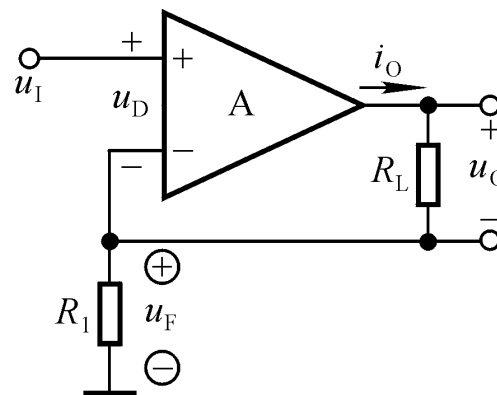
请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

交流负反馈的四种基本组态

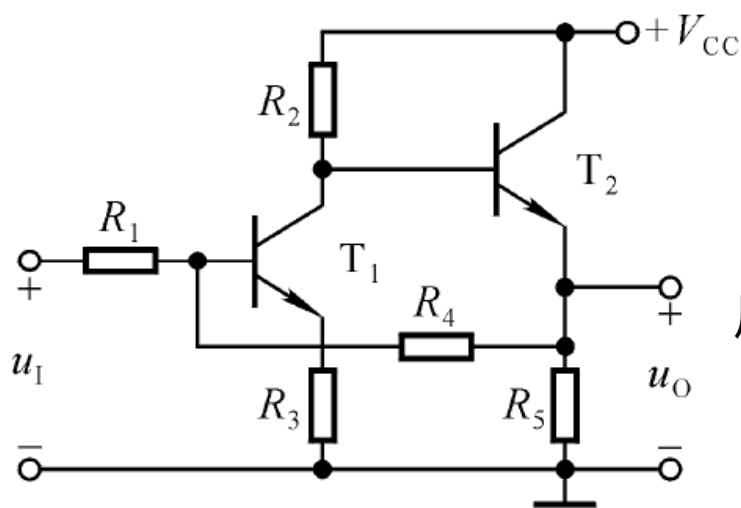
电压反馈/电流反馈的判断示例



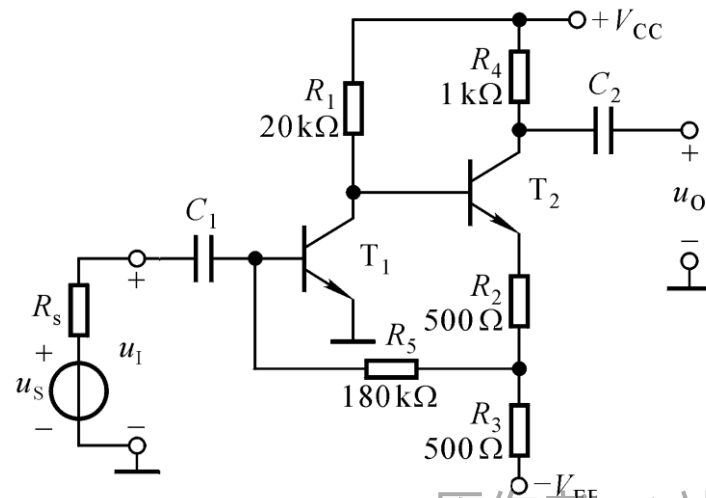
将输出电压短路
反馈不存在
因此为电压反馈



将输出电压短路
反馈仍存在
因此为电流反馈



T2 为 共集接法
输出在发射极
反馈从发射极引回
因此为电压反馈



T2 为 共射接法
输出在集电极
反馈从发射极引回
因此为电流反馈

原作者：b站up主—这个ximo不太冷

交流负反馈的四种基本组态

串联反馈/并联反馈的判断

对于负反馈：

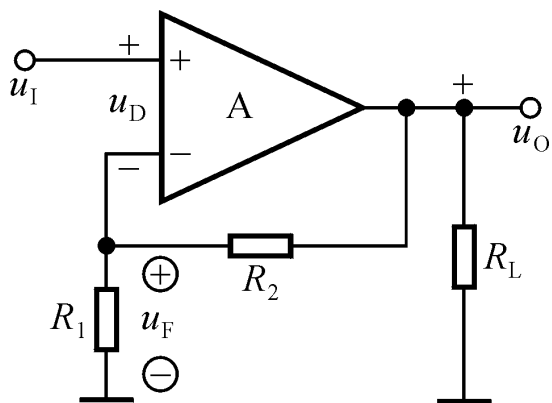
如果反馈量为反馈电压，净输入电压减小，则为串联反馈；

如果反馈量为反馈电流，净输入电流减小，则为并联反馈；

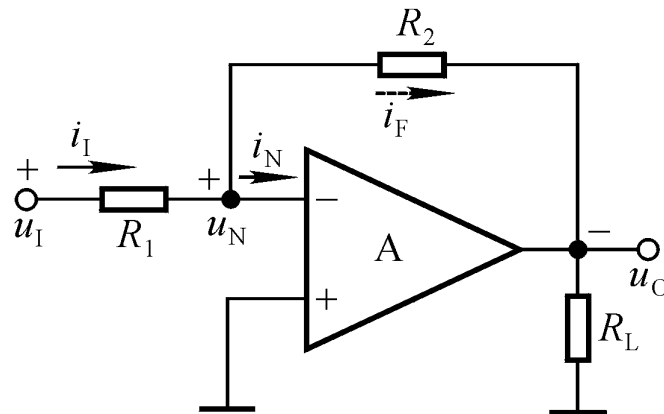
因此，判断串联反馈/并联反馈看的是反馈量与输入量的叠加引起的是净输入电压的变化还是净输入电流的变化；比较简单的判断方法是看反馈引回的位置与输入在“异侧”还是“同侧”；“异侧”即导致净输入电压减小，为串联反馈；“同侧”即导致净输入电流减小，为并联反馈；

交流负反馈的四种基本组态

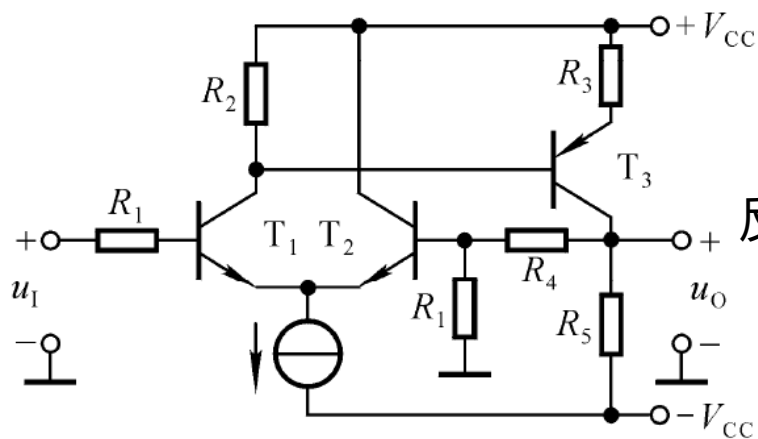
串联反馈/并联反馈的判断示例



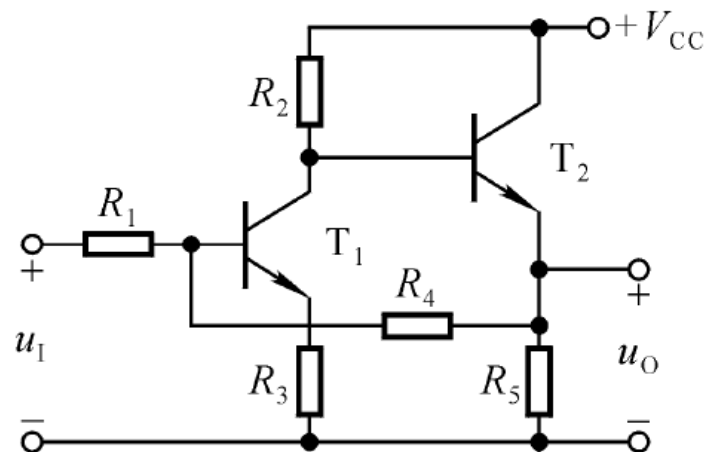
同相输入端输入
反馈引回至反相输入端
“异侧”
因此为串联反馈



反相输入端输入
反馈引回至反相输入端
“同侧”
因此为并联反馈



输入级为差分电路
T1 输入
反馈引回至 T2 输入端
“异侧”
因此为串联反馈

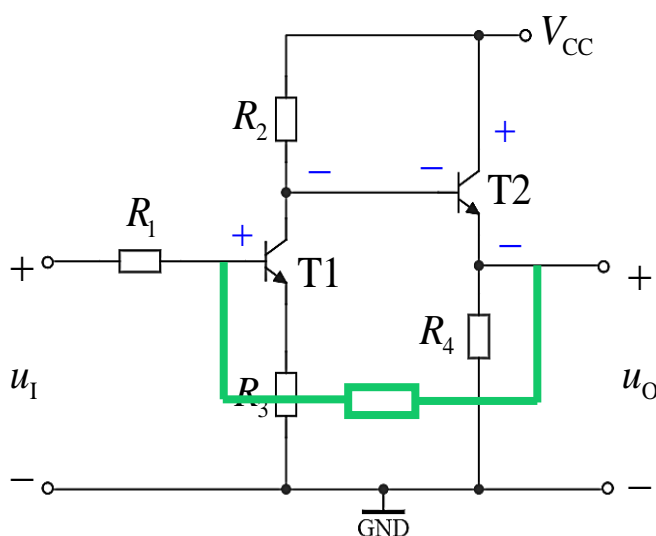


T1 基极输入
反馈引回至基极
“同侧”
因此为并联反馈

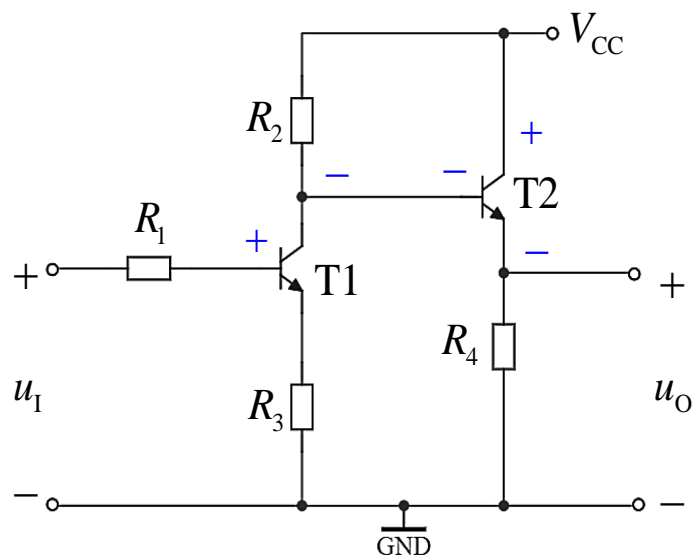
交流负反馈的四种基本组态

需要注意的一个问题

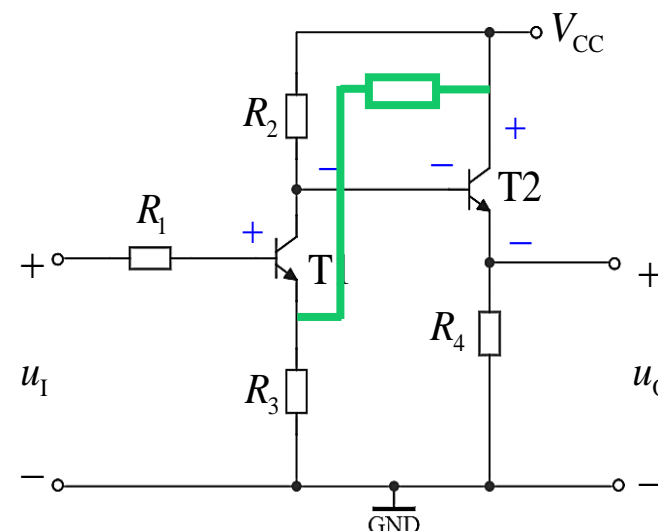
另外一个需要注意的问题是，对于一个电路来说，能够设计组成的交流负反馈的组态并不是任意的，即极性“限制”了能够引入的交流负反馈的组态类型；例如：



反馈从输出端口“同侧”引，
根据极性，想要构成负反馈，
只能引回输入端口“同侧”，
使净输入电流减小



只能构成
电压并联负反馈和电流串联负反馈！



反馈从输出端口“异侧”引，
根据极性，想要构成负反馈，
只能引回输入端口“异侧”，
使净输入电压减小

反馈的类型与组态判断

○ 小结

有无反馈？—— 输出回路与输入回路之间是否有通路相连；

反馈类型？

- 局部反馈 or 级间反馈？—— 反馈通路是存在某一级还是不同级之间；
- 正反馈 or 负反馈？—— 瞬时极性法；
- 交流反馈 or 直流反馈？—— 直流通路与交流通路反馈是否存在；

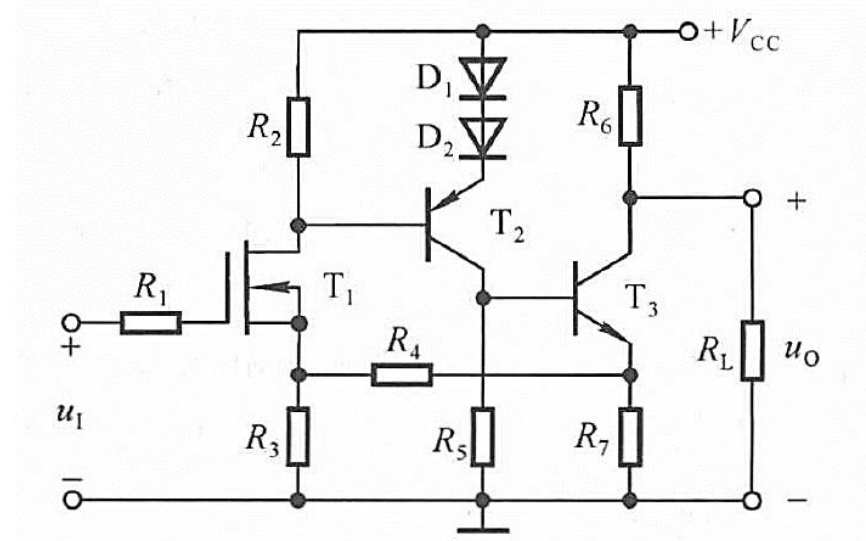
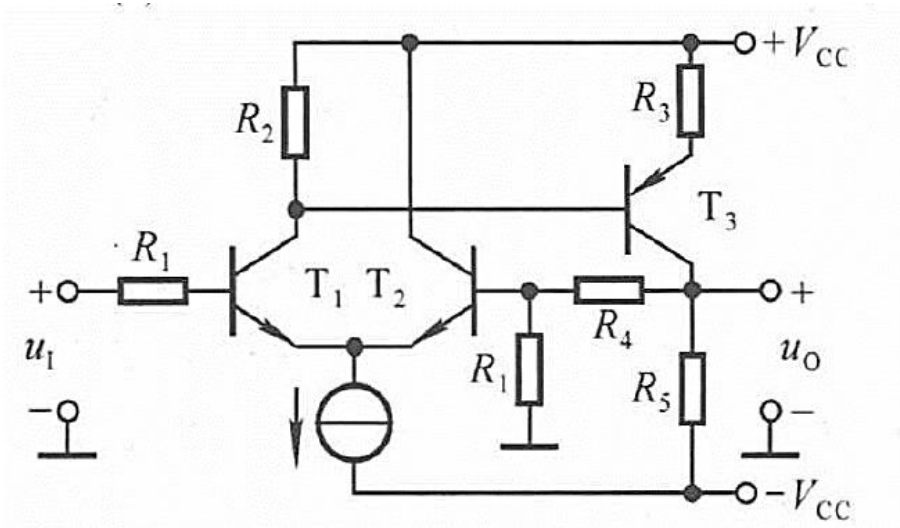
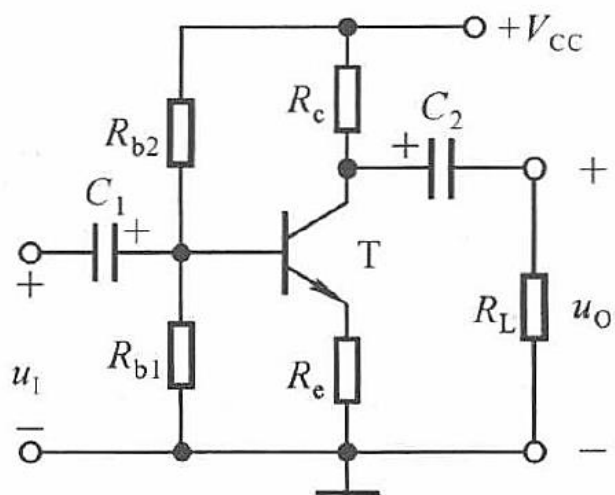
对于交流负反馈——属于哪种组态？

- 电压反馈 or 电流反馈？—— 输出电压短路置零，反馈是否存在；（或者“同侧异侧”）
 - 串联反馈 or 并联反馈？—— 看输入侧“同侧异侧”；
- 原作者：b站up主—这个ximo不太冷

反馈的类型与组态判断

例 1

判断下列电路中是否存在反馈，如果是交流负反馈，请分析说明其组态；

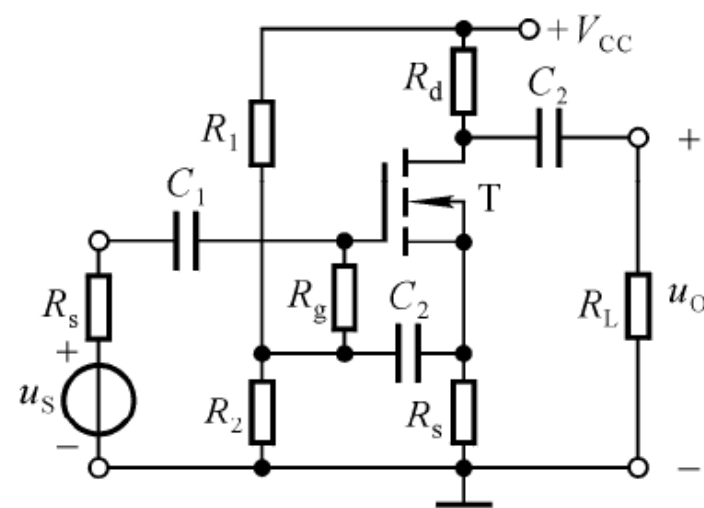
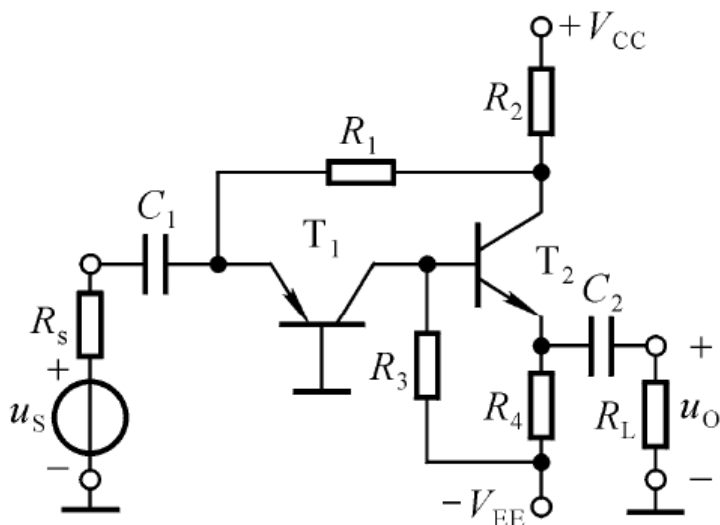
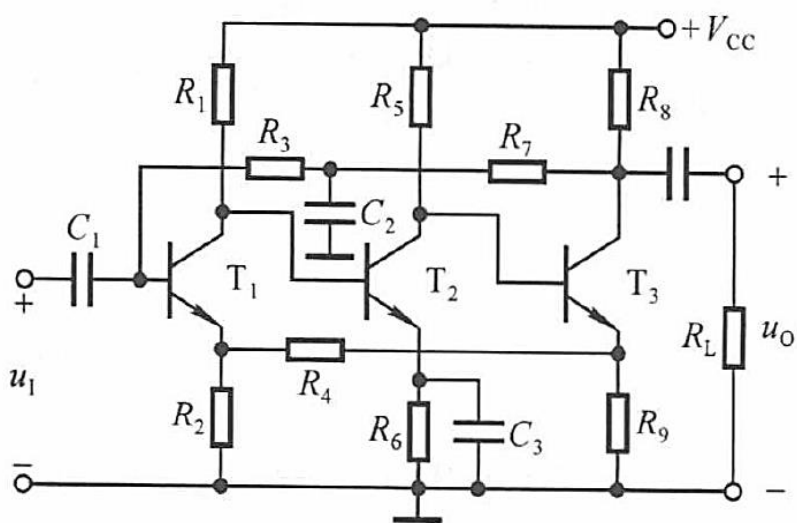


请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

反馈的类型与组态判断

例 1

判断下列电路中是否存在反馈，如果是交流负反馈，请分析说明其组态；

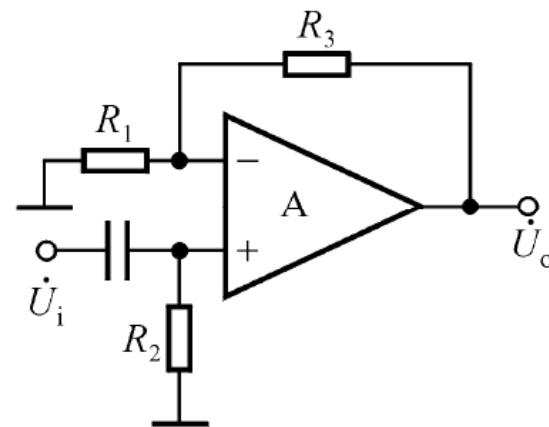
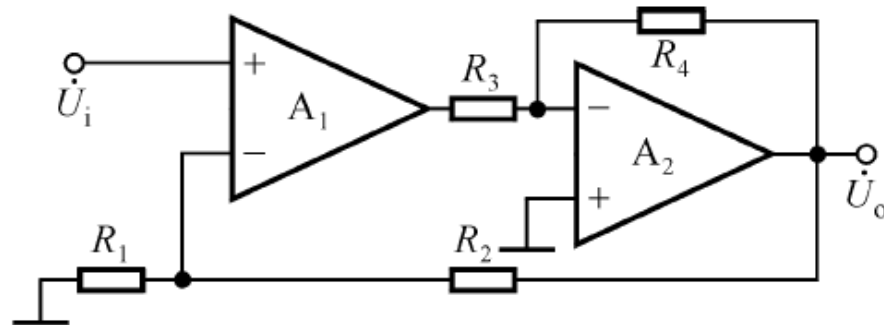
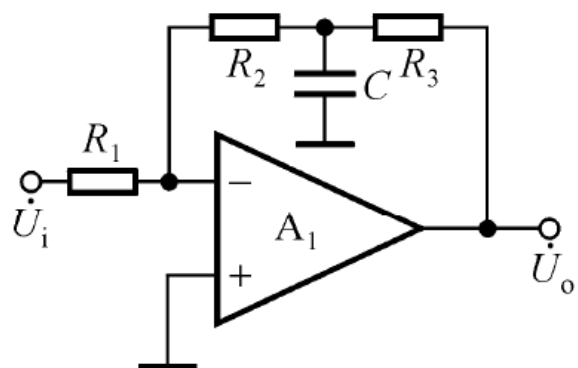


请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

反馈的类型与组态判断

例 2

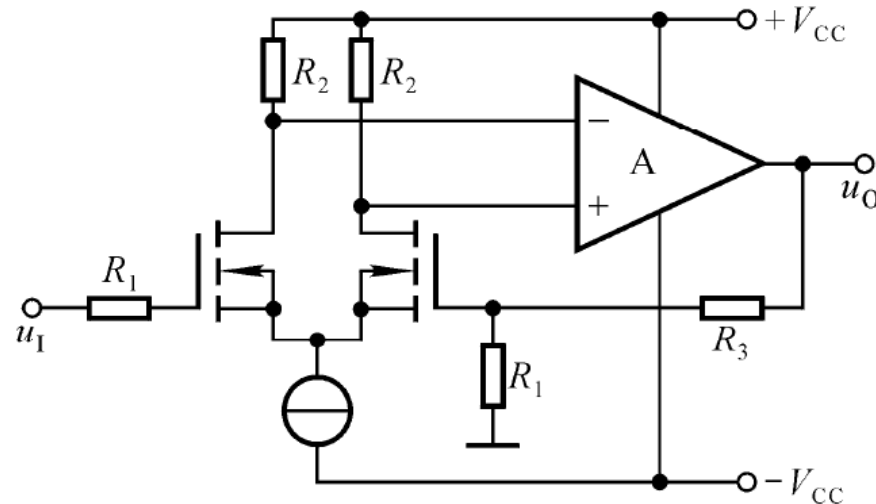
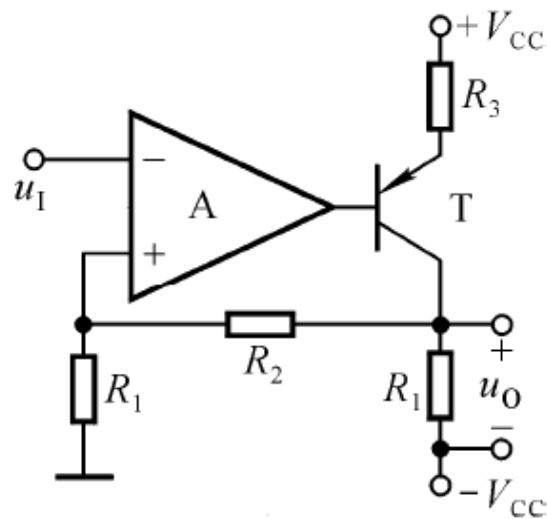
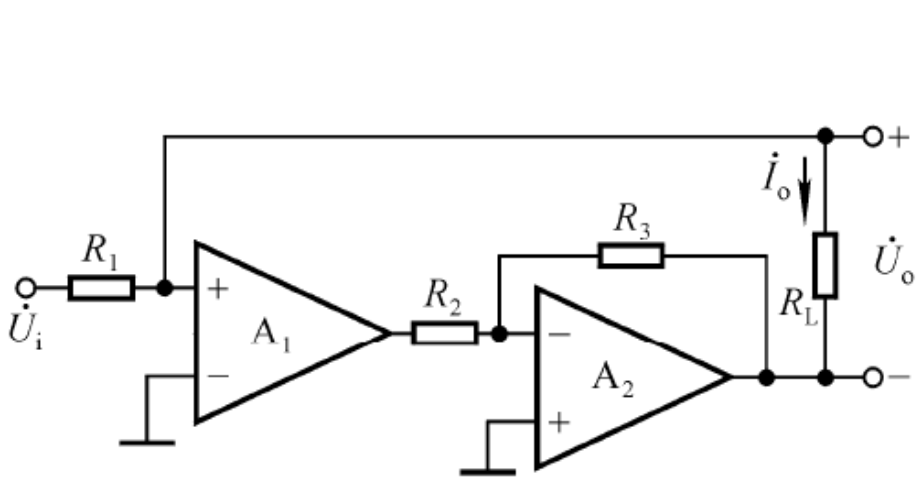
判断下列电路中是否存在反馈，如果是交流负反馈，请分析说明其组态；



反馈的类型与组态判断

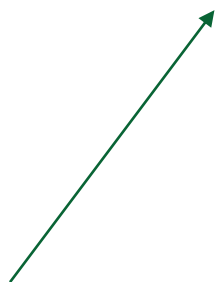
例 2

判断下列电路中是否存在反馈，如果是交流负反馈，请分析说明其组态；



负反馈对放大电路性能的影响

回顾第二章对输入电阻与输出电阻的理解！



引入交流负反馈对放大电路性能的影响

- 稳定放大电路增益（包括电压放大倍数或电流放大倍数）；
- 串联反馈增大输入电阻，稳定输入电压；并联反馈减小输入电阻，稳定输入电流；
- 电压反馈减小输出电阻，稳定输出电压；电流反馈增大输出电阻，稳定输出电流；
- 展宽电路的通频带；
- 减小电路的非线性失真；
- 对于这些性能的影响，是以牺牲电路的增益为代价的；

无需掌握具体的推导过程！
详细原理参考教材！

反馈的设计

例 3

请利用集成运放作为放大电路，引入合适的交流负反馈，设计达到如下目的的电路，绘制电路图；

- (1)实现电流—电压转换；
- (2)实现电压—电流转换；
- (3)减小从信号源索取的电流，提高带负载能力；
- (4)减小输入电阻，稳定输出电流；

反馈的设计

例 4

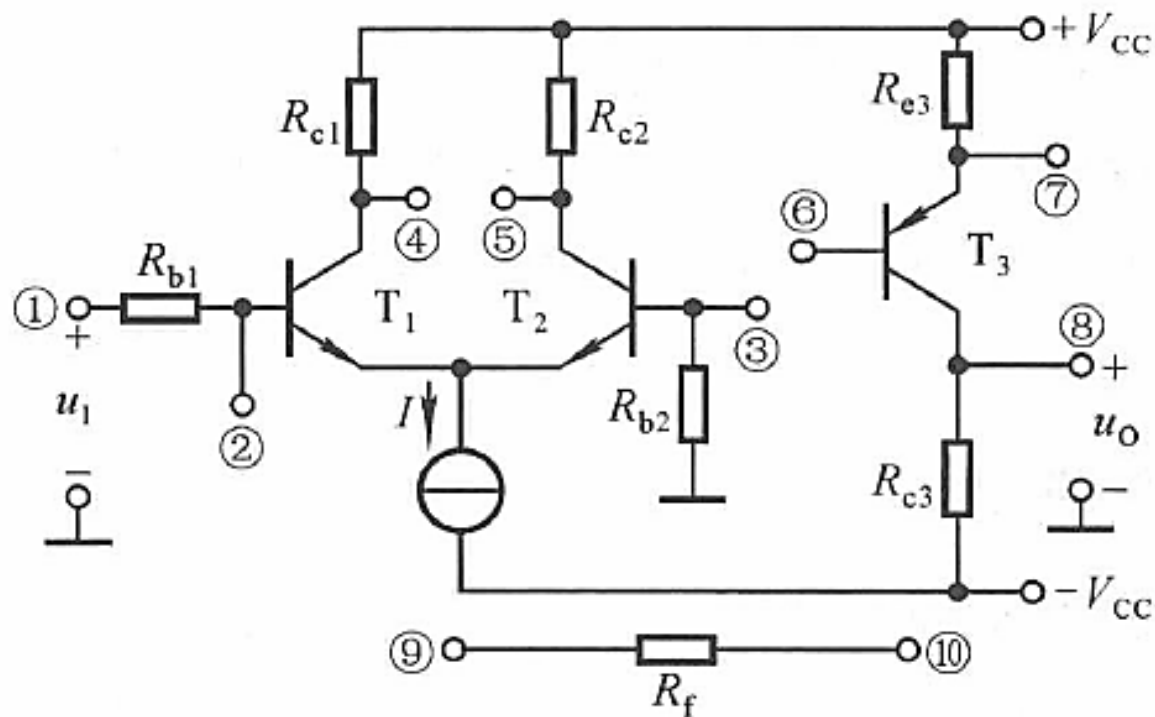
电路如图所示，为了达到以下目的，分别说明应引入哪种组态的负反馈以及电路如何连接。

(1) 将输入电流转换成与之稳定成线性关系的输出电流；

(2) 稳定输入电流，减小输出电阻；

(3) 减小放大电路从信号源索取的电流并提高其带负载能力；

(4) 增大输入电阻，稳定输出电流；



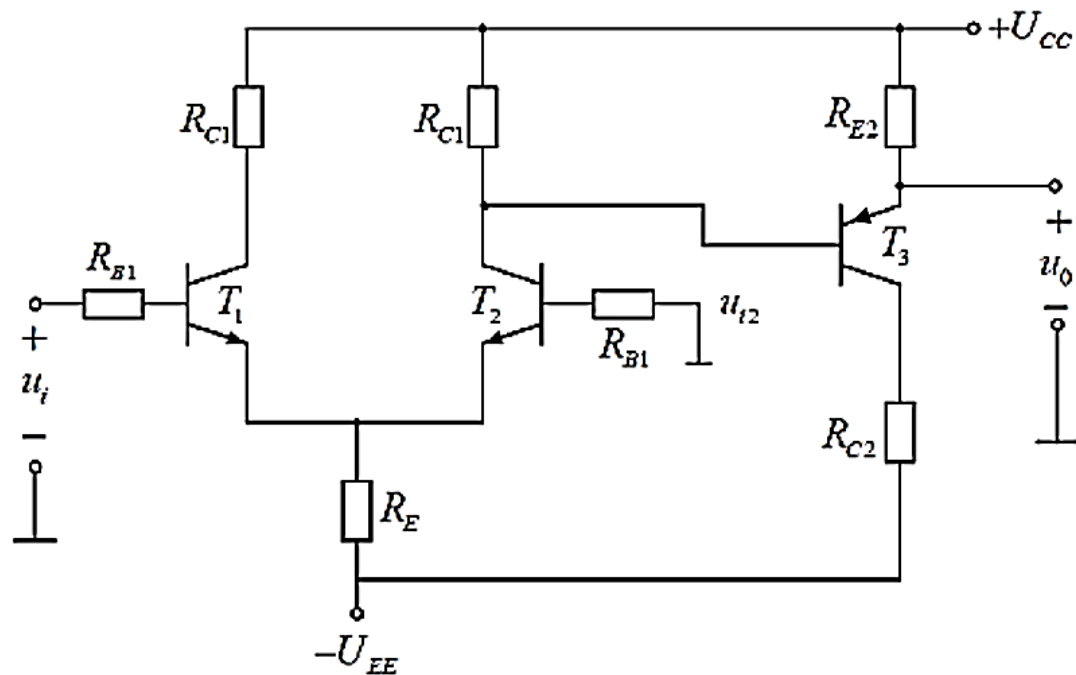
反馈的设计

例 5

电路如图所示，已知晶体管 T_1 和 T_2 参数对称。

(1) 写出该电路的电压放大倍数、输入电阻、输出电阻的表达式；

(2) 若既要获得稳定的输出电压，输入电阻又不能减小，则应在此电路中引入何种类型的反馈？请在图中画出此反馈。

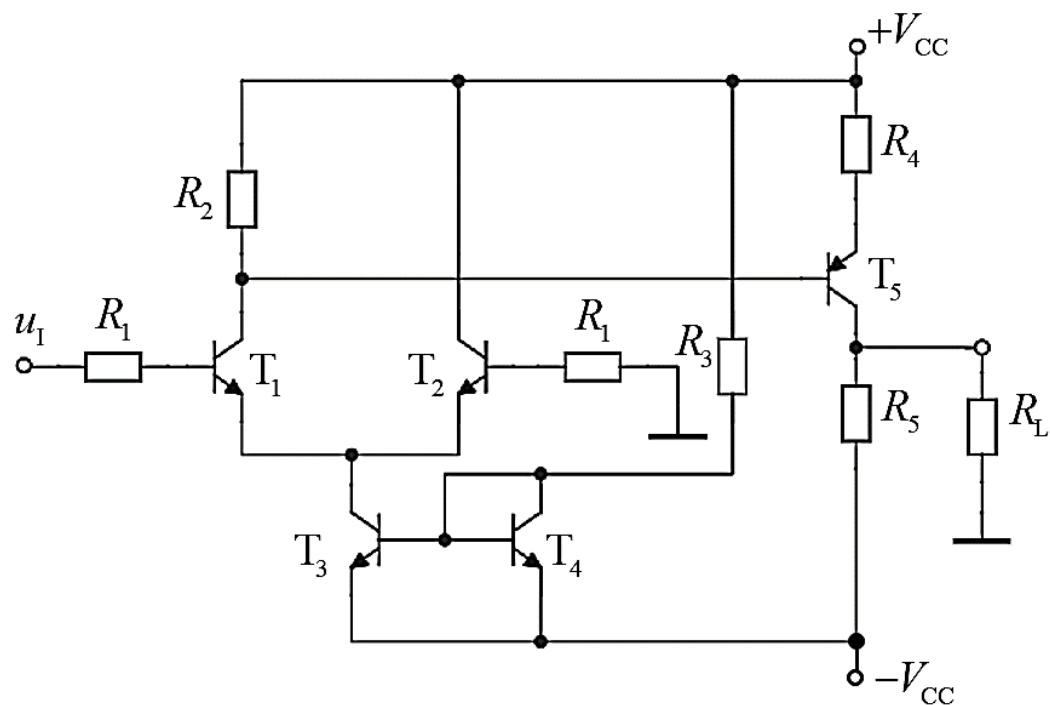


反馈的设计

例 6

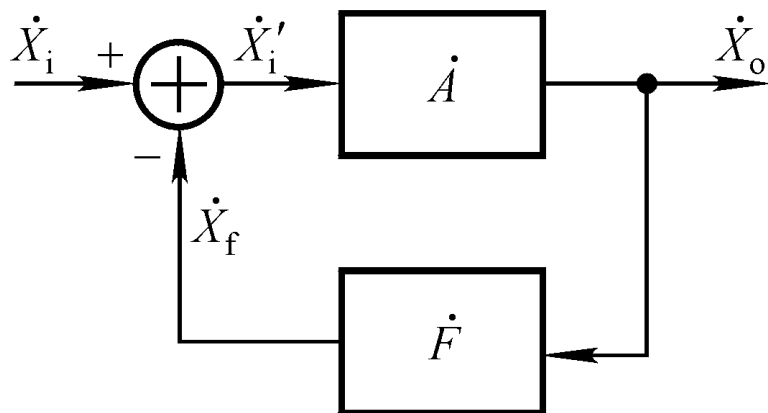
放大电路如图所示；

- (1) 此电路为几级放大电路？ $T_1 \sim T_5$ 哪些为放大管？
- (2) T_3 、 T_4 的作用是什么？
- (3) 为了增大输入电阻，请在电路图中引入合适的交流负反馈；
- (4) 为了稳定输出电流，请在电路图中引入合适的交流负反馈；



深度负反馈放大电路放大倍数的分析

○ 负反馈放大电路的方块图表示



X 既可以是电压，也可以是电流
根据电路设计目标和要求

输入量： \dot{X}_i 输出量： \dot{X}_o 反馈量： \dot{X}_f 净输入量： \dot{X}_i'

放大电路的放大倍数： $A = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i'}$

反馈网络的反馈系数： $\dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$

闭环放大倍数： $\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i}$

环路放大倍数： $\dot{A}\dot{F}$

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！

深度负反馈放大电路放大倍数的分析

不需要去死记硬背这个表格！
要理解电压/电流反馈、
串联/并联反馈的概念
分别是针对输入侧还是输出侧！

放大倍数、反馈系数与闭环放大倍数小结

反馈组态	$[\dot{X}_i, \dot{X}_f, \dot{X}'_i]$	\dot{X}_o	\dot{A}	\dot{F}	\dot{A}_f	功能
电压串联	$[\dot{U}_i, \dot{U}_f, \dot{U}'_i]$	\dot{U}_o	$\dot{A}_{uu} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}'_i}$	$\dot{F}_{uu} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o}$	$\dot{A}_{uuf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$	电压放大
电压并联	$[\dot{I}_i, \dot{I}_f, \dot{I}'_i]$	\dot{U}_o	$\dot{A}_{ui} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}'_i}$	$\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o}$	$\dot{A}_{uif} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i}$	电流—电压转换
电流串联	$[\dot{U}_i, \dot{U}_f, \dot{U}'_i]$	\dot{I}_o	$\dot{A}_{iu} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}'_i}$	$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_o}$	$\dot{A}_{iuf} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i}$	电压—电流转换
电流并联	$[\dot{I}_i, \dot{I}_f, \dot{I}'_i]$	\dot{I}_o	$\dot{A}_{ii} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}'_i}$	$\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o}$	$\dot{A}_{iif} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$	电流放大

原作者：b站up主—这个ximo不太冷

深度负反馈放大电路放大倍数的分析

○ 深度负反馈的概念

根据定义，闭环放大倍数 A_f 与放大电路开环无反馈的放大倍数 A 与反馈系数 F 的关系是：

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

深度负反馈的概念是，反馈系数和放大倍数足够大，满足 $|1 + AF| \gg 1$ ，此时：

$$\dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}} \qquad \dot{X}_i \approx \dot{X}_f$$

因此**深度负反馈的本质是反馈量近似等于输入量，即净输入量近似为零；**

深度负反馈放大电路放大倍数的分析

○ 基于理想运放的放大倍数分析

回顾集成运放的电压传输特性，深度负反馈意味着其环路增益非常大，开环增益被衰减为原来的 $1/(1+AF)$ ，即电路的闭环增益为有限值；另一种理解方式为，深度负反馈的本质是净输入量近似为零，符合集成运放工作在线性区的特点（“虚短”、“虚断”）；
总之，集成运放想要工作在线性区，实现线性放大功能，必须引入深度负反馈；

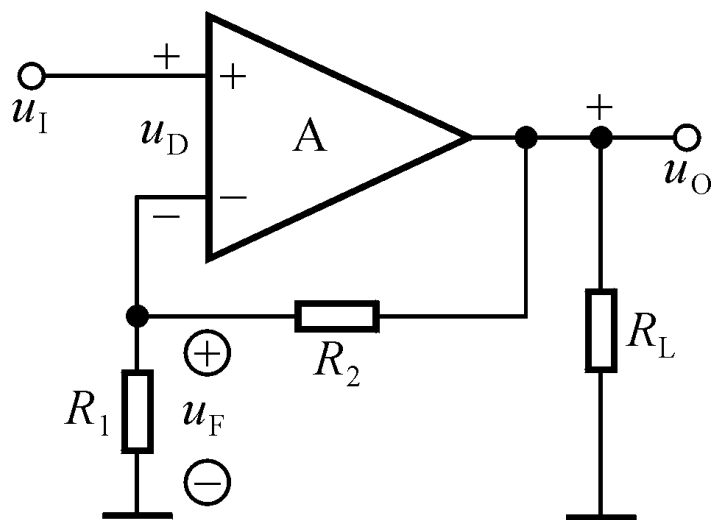
当分析由集成运放组成的负反馈放大电路时，可以利用理想运放工作在线性区的“虚短”、“虚断”特性解决分析问题：

虚短 —— 同相输入端电压等于反相输入端电压 $u_p = u_n$ ；

虚断 —— 两个输入端的电流均为零，即开路， $i_p = i_n = 0$ ；

深度负反馈放大电路放大倍数的分析

基于理想运放的放大倍数计算分析实例



判断组态：电压串联负反馈

根据虚断与KCL，流过 R_2 的电流等于流过 R_1 的电流：
$$\frac{u_O - u_N}{R_2} = \frac{u_N}{R_1}$$

根据虚短： $u_I = u_P = u_N$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

(这实际上就是第六章运算电路中的
同相比例运算器)

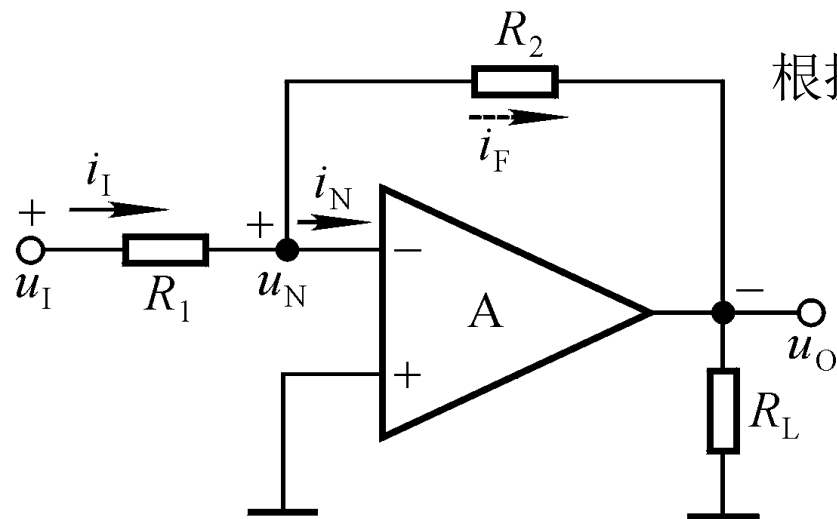
请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

深度负反馈放大电路放大倍数的分析

基于理想运放的放大倍数计算分析实例

判断组态：电压并联负反馈

根据虚断与KCL，流过 R_2 的电流等于流过 R_1 的电流：
$$\frac{u_I - u_N}{R_1} = \frac{u_N - u_O}{R_2}$$



根据虚短： $u_N = u_P = 0$

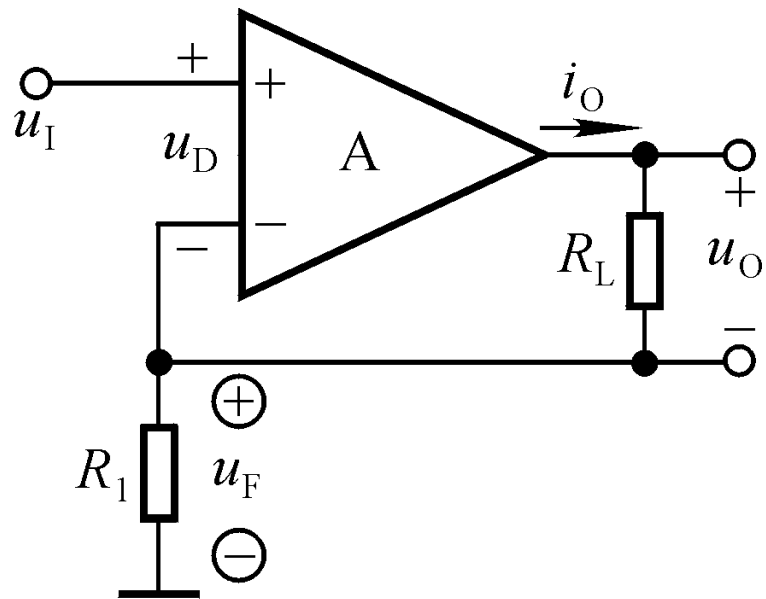
$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

(这实际上就是第六章运算电路中的反相比例运算器)

原作者：b站up主—这个ximo不太冷

深度负反馈放大电路放大倍数的分析

基于理想运放的放大倍数计算分析实例



判断组态：电流串联负反馈

根据虚断与KCL，流过 R_1 的电流等于流过 R_L 的电流：
$$\frac{u_N - 0}{R_1} = \frac{u_O}{R_L}$$

根据虚短： $u_N = u_P = u_I$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R_L}{R_1}$$

深度负反馈放大电路放大倍数的分析

基于理想运放的放大倍数计算分析实例

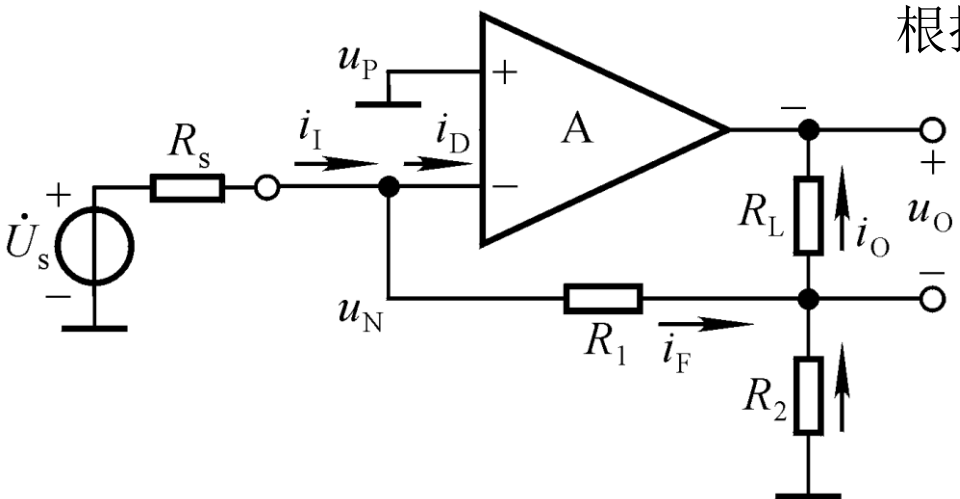
判断组态：电流并联负反馈

根据虚断与KCL，流过 R_s 的电流等于流过 R_1 的电流：
$$\frac{u_s - u_N}{R_s} = i_{R1}$$

根据虚短： $u_N = u_P = 0$

根据并联分流关系：
$$i_{R1} = -\frac{u_O}{R_L} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

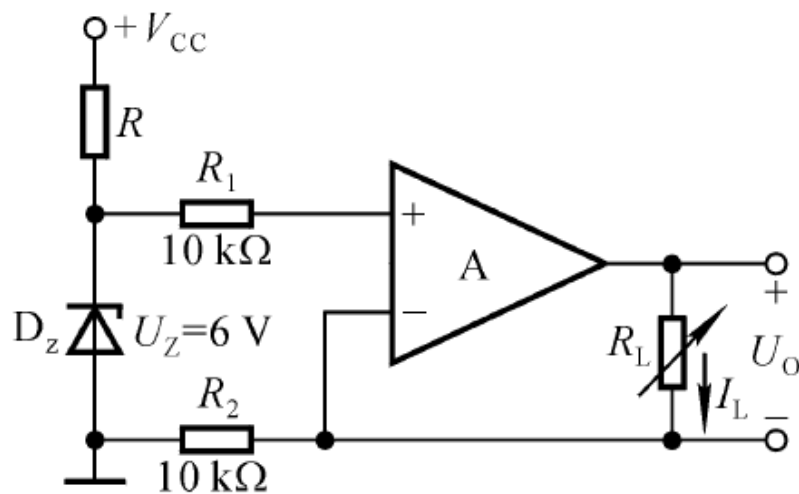
$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{-(R_1 + R_2)R_L}{R_2 R_s}$$



深度负反馈放大电路放大倍数的分析

例 7

如图所示为由集成运放构成的恒流源电路，已知稳压管工作在稳压状态，试求流经负载电阻的电流。

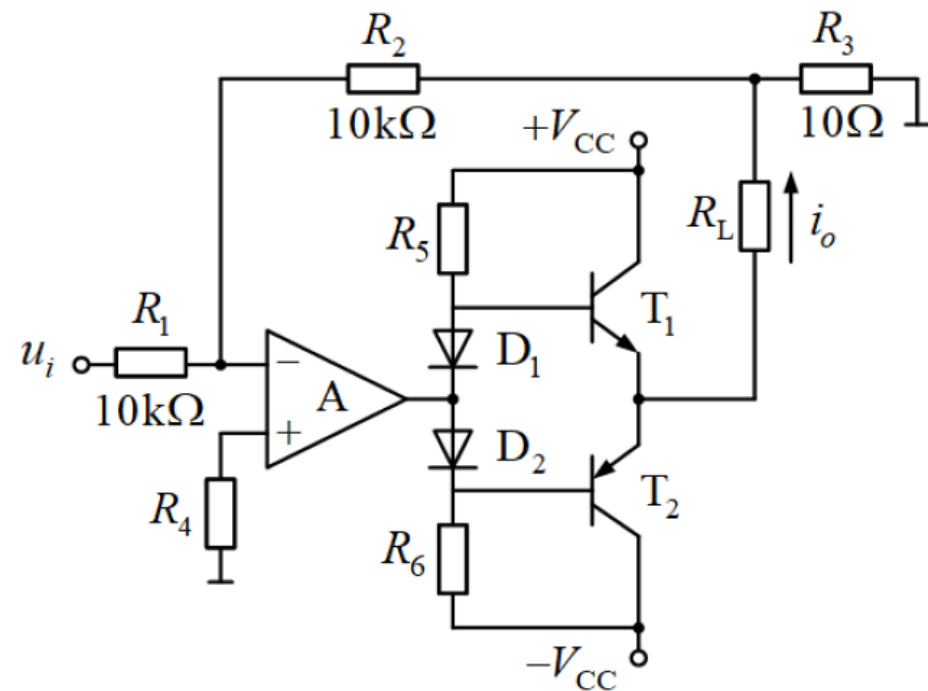


深度负反馈放大电路放大倍数的分析

例 8

放大电路如图所示, 集成运放为理想运放;

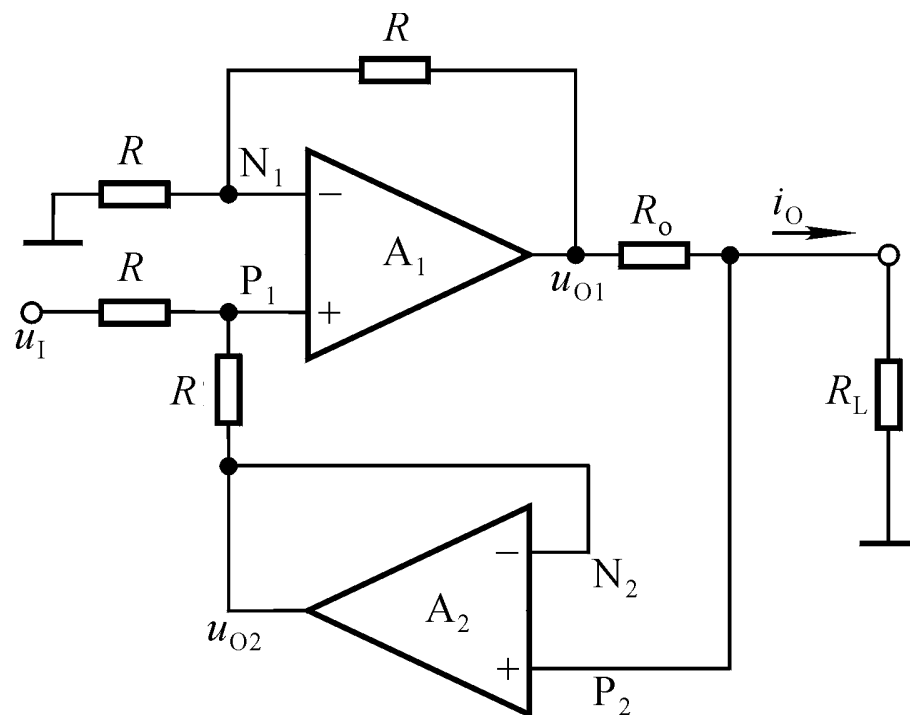
- (1)指出电路中引入的反馈类型;
- (2)说明该电路的功能;
- (3)写出输出电流 i_o 的表达式;



深度负反馈放大电路放大倍数的分析

例 9

电路如图所示，请写出输出电流即负载电流 i_O 的表达式，并分析此电路的功能；



深度负反馈放大电路放大倍数的分析

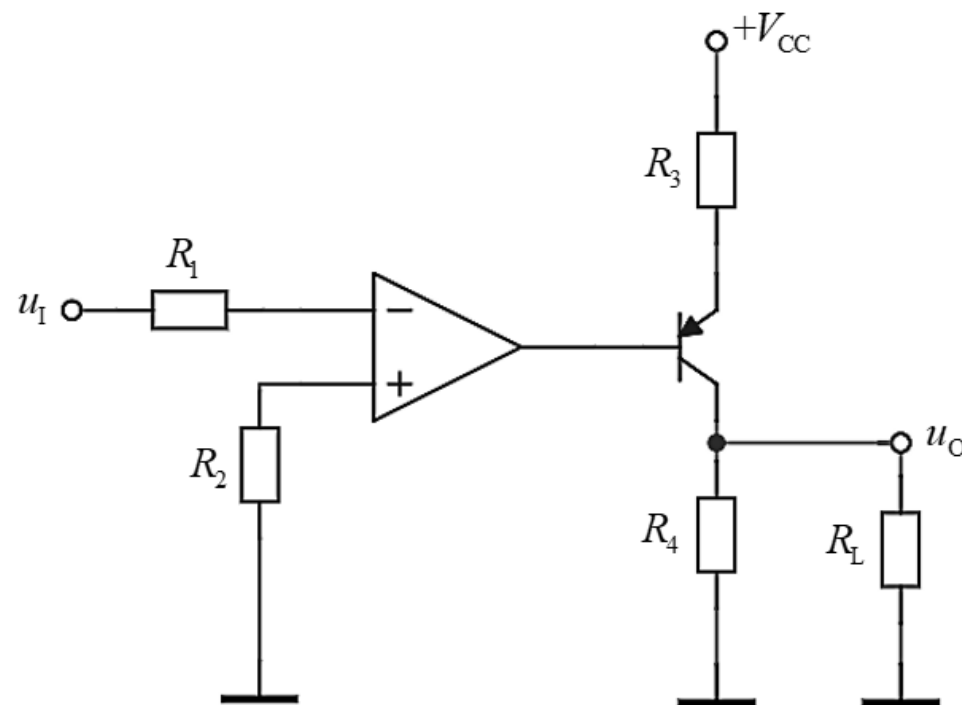
例 10

电路如图所示，集成运放为理想运放；

(1)图中的集成运放工作在什么区？实现什么功能？

(2)为了使电路实现电压运算功能（实现电压-电压的转换），请在电路图中引入合适的交流负反馈，并计算电压放大倍数；

(3)为了稳定此电路的输出电流，请在电路图中引入合适的交流负反馈，并计算电压放大倍数；

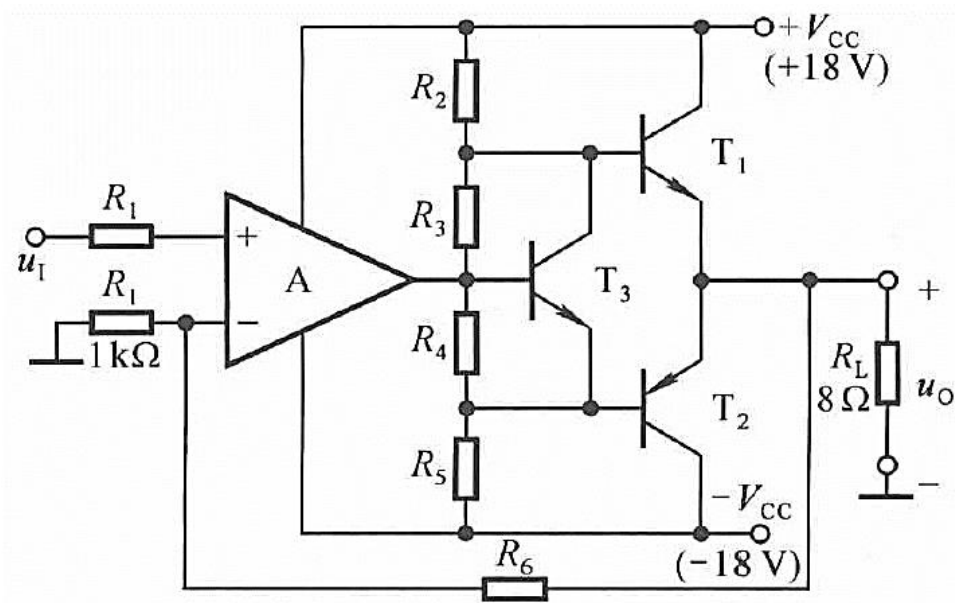


深度负反馈放大电路放大倍数的分析

例 11

已知功率放大电路如图所示， T_1 和 T_2 管的饱和管压降 $U_{CES}=2V$ ；直流功耗忽略不计；集成运放为理想运放；回答下列问题：

- (1) R_3 、 R_4 和 T_3 的作用是什么？
- (2) 负载上可能获得的最大输出功率和效率是多少？
- (3) 设最大输入电压的有效值为1V，为使电路的最大不失真输出电压的峰值达到 16V，电阻 R_6 应该满足什么条件？

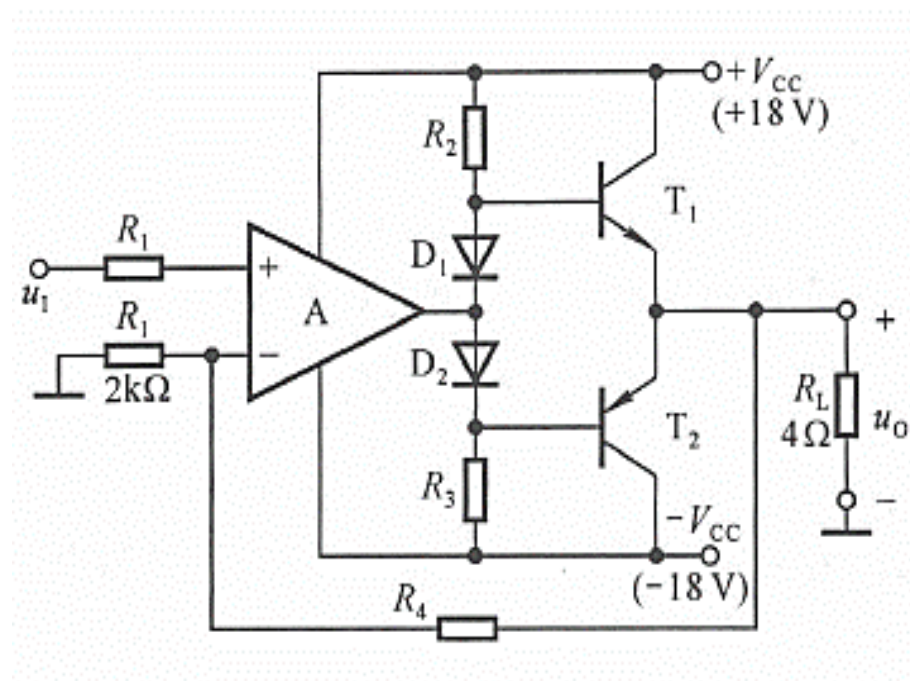


深度负反馈放大电路放大倍数的分析

例 12

已知功率放大电路如图所示， T_1 和 T_2 管的饱和管压降 $U_{CES}=2V$ ；直流功耗忽略不计；集成运放为理想运放；求解：

- (1) 二极管 D_1 和 D_2 的作用是什么？
- (2) 负载上可能获得的最大输出功率和效率是多少？
- (3) T_1 和 T_2 的三个极限参数 I_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 、 P_{CM} 应该如何选取？
- (4) 若输出级电阻 R_2 虚焊（即开路），则会出现什么后果？
- (5) 电路中引入了哪种组态的交流负反馈，作用是什么？
- (6) 若最大输入电压的有效值为 $1V$ ，为使负载获得最大的输出功率，电阻 R_4 应该满足什么条件？



负反馈放大电路的稳定性 —— 自激振荡

○ 自激振荡的概念

在前面的分析中我们没有考虑放大电路的频率响应，即对于集成运放，认为其理想运放特性通频带无穷大，不存在上限频率；对于分立元件电路，仅分析其中频段，反馈系数与放大倍数均为正实数或负实数；

当考虑放大电路与反馈网络的频率响应时，**由于电路的相移，有可能使原本负反馈电路中反馈量与输入量的相减关系变为相加关系，即此时电路为正反馈；此时输出量与反馈量相互维持，无需外部输入即可在特定频率处产生振荡，称为自激振荡；**自激振荡意味着系统失稳，对于本章以及第六章的放大、运算、转换等性质的电路，是不希望发生的；而对于第七章的波形发生电路，要利用其自激振荡在无外部输入时能够自发地产生波形输出，即构成正弦波振荡电路，后续会进一步讨论；

负反馈放大电路的稳定性 —— 自激振荡

○ 自激振荡的起振条件

幅值条件：
$$|\dot{A}\dot{F}| > 1 \Leftrightarrow 20\lg|\dot{A}| + 20\lg|\dot{F}| > 0\text{dB}$$

相位条件：
$$\varphi_A + \varphi_F = (2n+1)\pi \Leftrightarrow \varphi_A + \varphi_F = \pm 180^\circ, \pm 540^\circ, \dots$$

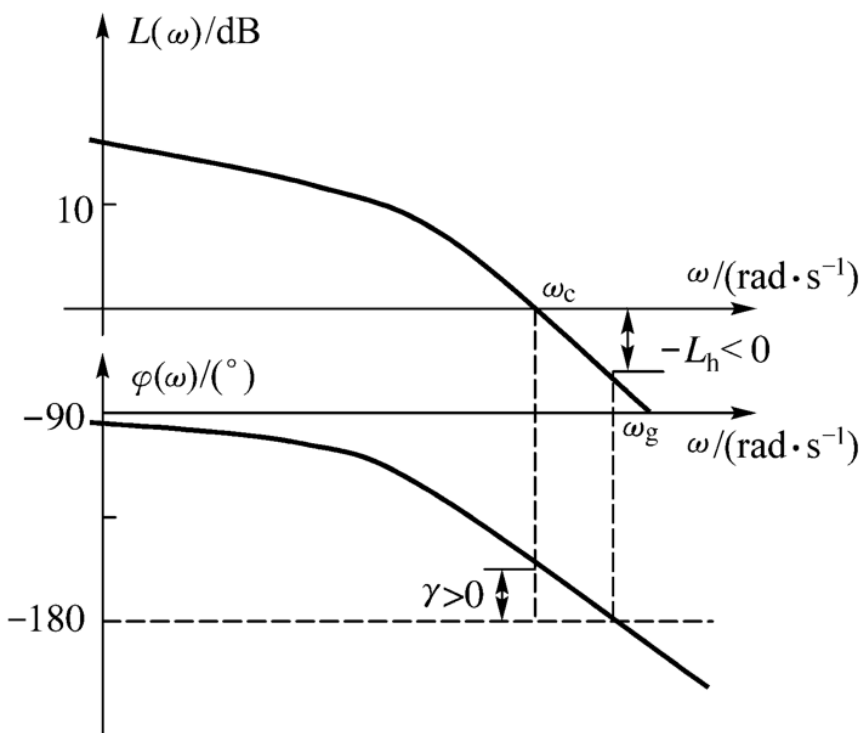
在本章自激振荡的分析中，一般认为反馈网络为纯阻性网络，即附加相移只由放大电路产生；

思考：放大电路中附加相移的来源是什么？

补充知识 —— 稳定裕度

○ 幅值裕度（增益裕度）与相角裕度

反馈（闭环）与系统稳定性是自动控制原理课程的重要内容，在系统稳定性的频域分析法中，有幅值裕度（增益裕度）与相角裕度这样两个非常重要的概念；



对于目前学习的典型最小相位系统（不用去深究什么是最小相位系统什么是最小相位系统，知道目前在模电中学习的这种相频特性曲线单调递减的电路系统属于最小相位系统即可）

增益裕度表示当相位为 -180° 时 0dB线与其增益（单位为dB）的差值（即对应1与实际增益（标准单位）的比值）

增益裕度 > 1 (0dB) 系统稳定，即相角为 -180° 时，幅值低于 0dB 线；

相角裕度表示当幅值为 0dB 时相角与 -180° 的差值

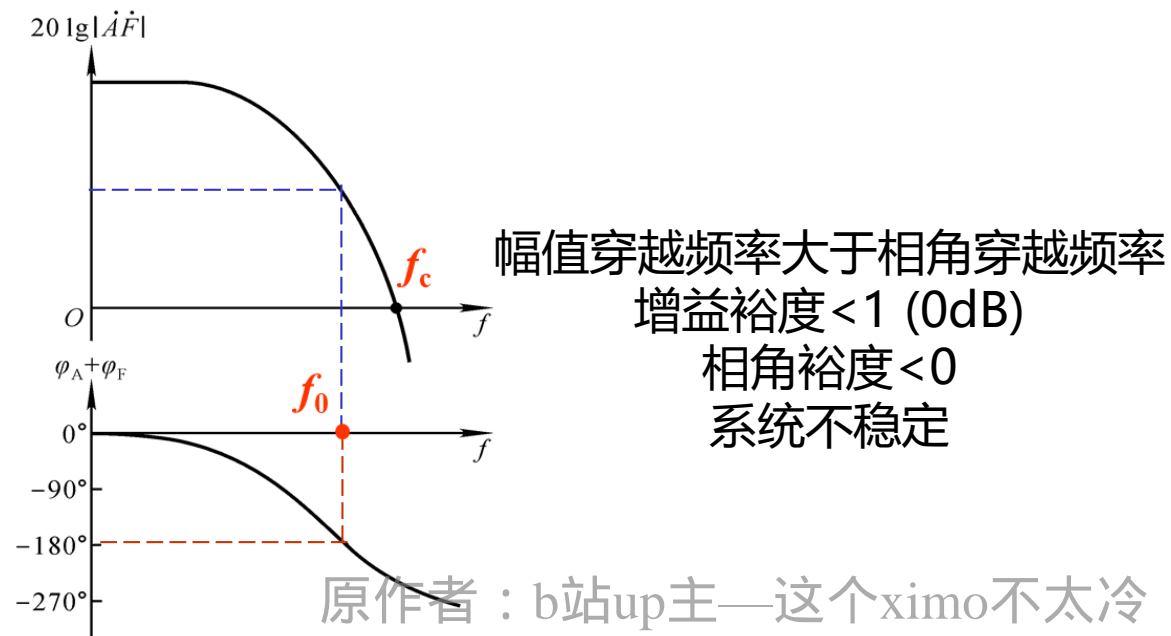
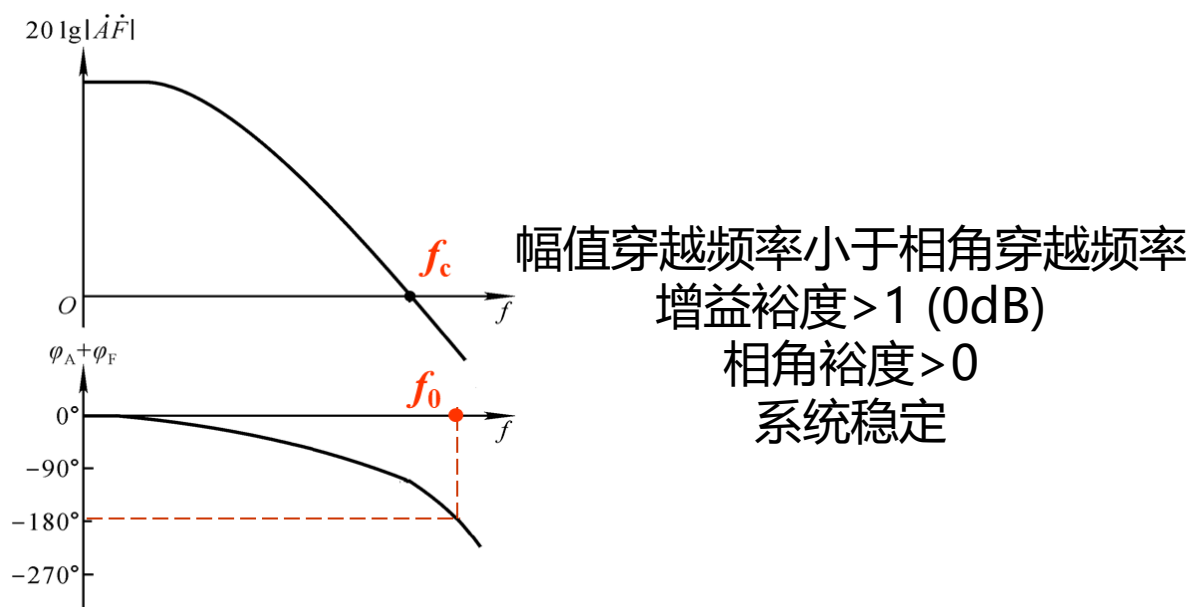
相角裕度 > 0 系统稳定，即幅值为 0dB 时，相角高于 -180° 线；

补充知识 —— 稳定裕度

幅值裕度（增益裕度）与相角裕度

稳定裕度的含义是系统在失稳前幅值（增益）可以再增大多少、相角可以再滞后多少，因此，对于目前学习的模电中的典型最小相移系统，可以简单地记住“增益越大，相角越滞后，越容易失稳”；

定义幅值为 0dB 对应的频率为幅值穿越频率（穿越 0dB 线）；定义相角为 -180° 对应的频率为相角穿越频率（穿越 -180° 线）；可以根据幅值穿越频率与相角穿越频率的相对大小判断稳定性；



负反馈放大电路的稳定性 —— 自激振荡

○ 放大电路稳定性的判断小结

- 负反馈系统失稳、发生自激振荡的判据 ——

当系统的相位为 $\pm 180^\circ$ (或 π 的奇数倍) 时，系统的增益 > 1 (对应Bode图 $> 0\text{dB}$) ；

- 利用稳定裕度来判断系统能够稳定、不产生自激振荡的判断 ——

幅频特性曲线穿过 0dB 时，相位 $> -180^\circ$ 或者相频特性曲线穿过 -180° 时，幅值 $< 0\text{dB}$ ；

(这里 -180° 代表 π 的奇数倍，通常只考虑高频段的相角滞后，一般解题都是与 -180° 比较)

- 等效的稳定条件 —— 幅值穿越频率小于相角穿越频率；

不要弄混失稳（自激振荡）与稳定的判据！记住一个就好！

记住 “增益越大、相角越滞后，越容易失稳”

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！

负反馈放大电路的稳定性 —— 自激振荡

误区：

反馈网络没有附加相移不是指 $\varphi_F = 0$ ；
而是指没有由于电容导致的移相，
而 F 不是正数就是负数，其符号与 A 相同，
因此 $A \cdot F$ 的基准相角必为 0 ；

○ 利用Bode图判断放大电路稳定性时注意：

对于前面分析的有关负反馈电路系统自激振荡/稳定的判据，应用对象均指的是环路 $A \cdot F$

即幅度指的是 $|A \cdot F|$ ，相角指的是 $\deg(A \cdot F)$ 即 $\varphi_A + \varphi_F$ ；

所以解题分析时要注意，现在题目中给出的是 $A \cdot F$ 的Bode图还是没有添加反馈时的 A 的Bode图！

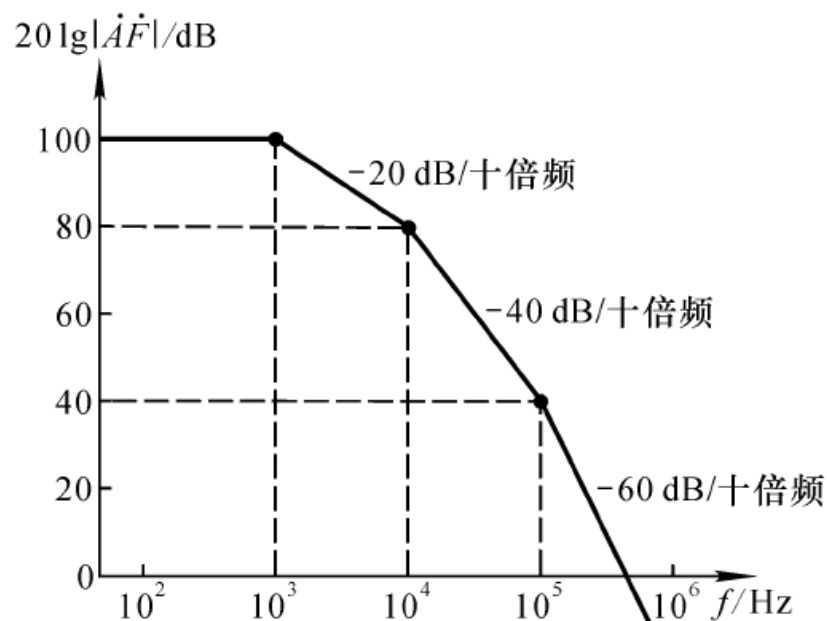
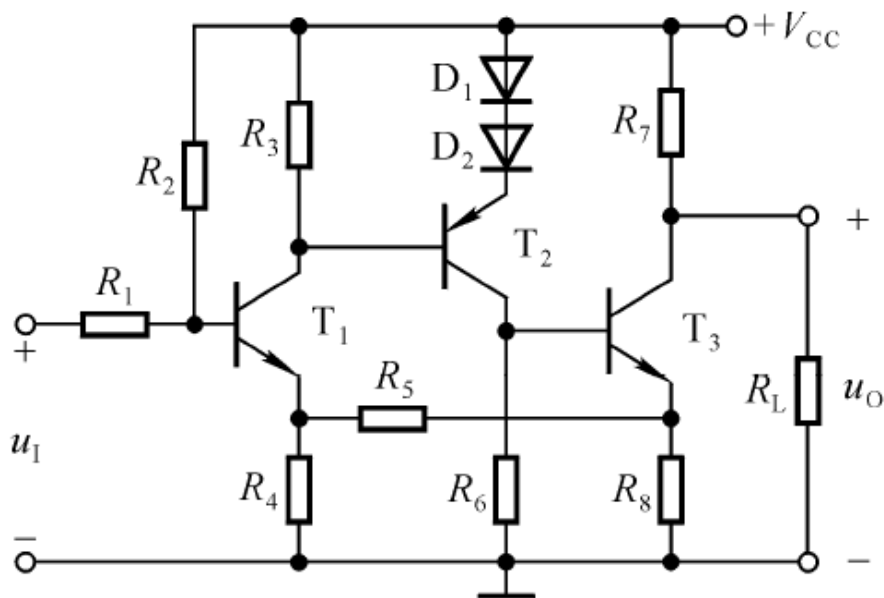
如果是 $|AF|$ 的Bode图，则直接应用判据观察 0dB 线和 -180° 线即可；

如果是 $|A|$ 的Bode图，那么由于我们学习的交流负反馈网络都是纯阻性的网络，所以反馈网络没有附加相移；而 $|A \cdot F| > 1$ 等价于 $20\lg|A| + 20\lg|F| > 0$ ，因此此时整个系统的幅值判断条件对应的不是未加反馈的系统的零分贝线，而是对照其 $-20\lg|F|$ 线，需要确定反馈系数 F ；

负反馈放大电路的稳定性 —— 自激振荡

例 13

已知放大电路如左图所示，其环路增益的波特图如右图所示，判断该电路是否会产生自激振荡？简述理由。

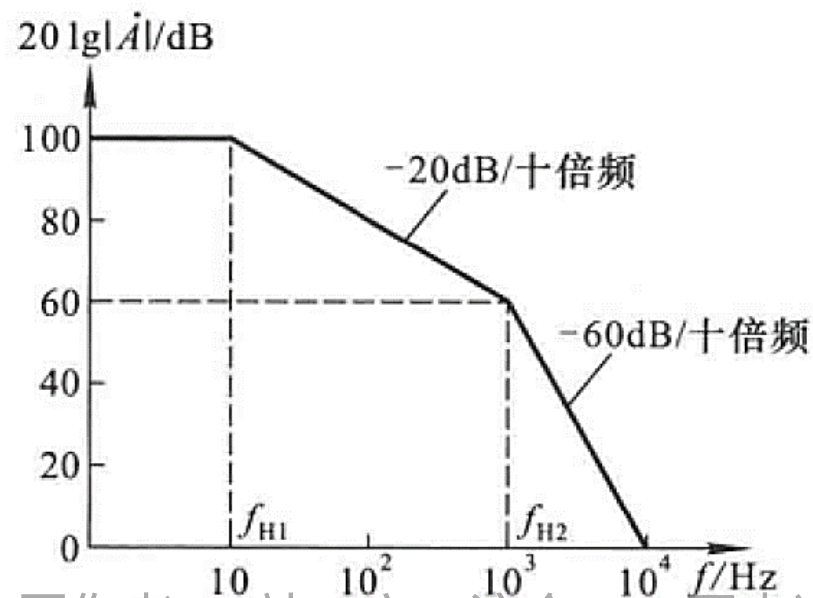


负反馈放大电路的稳定性 —— 自激振荡

例 14

已知某放大电路的幅频特性如图所示，引入负反馈时，反馈网络为纯电阻网络，且其参数的变化对基本放大电路的影响可忽略不计。回答下列问题：

- (1) $f = 10^3 \text{ Hz}$ 时的附加相移；
- (2) 若引入反馈后反馈系数 $|F| = 1$ ，则电路是否会产生自激振荡？
- (3) 若想引入负反馈后电路稳定，则 $|F|$ 的上限值为多少？

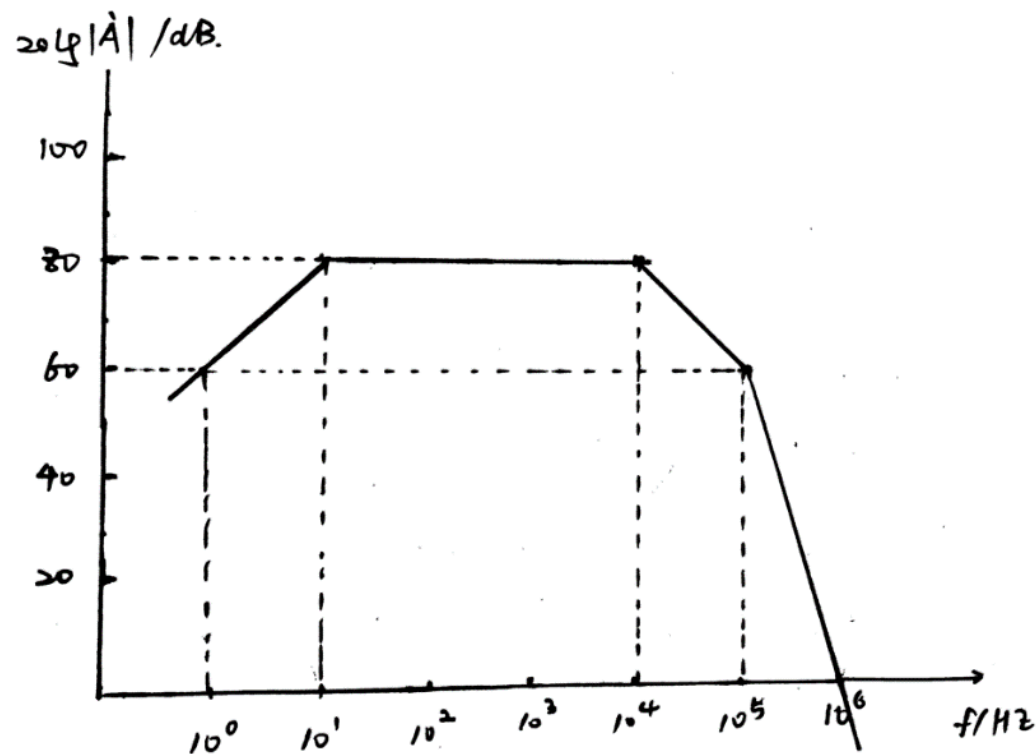


负反馈放大电路的稳定性 —— 自激振荡

例 15

已知某多级放大电路的Bode图幅频特性如图所示，试问：

- (1)该放大器由几级电路组成？是否为直接耦合放大电路？
- (2)该多级放大电路的中频电压放大倍数、下限截止频率 f_L 、上限截止频率 f_H 为多少？
- (3)求解该多级放大电路电压放大倍数的频率响应表达式；
- (4)求解在 10^5 Hz 处的附加相移；
- (5)若在该电路中引入负反馈（反馈网络为纯阻性），反馈系数为0.005，电路是否能保持稳定？若想要保证此电路稳定，反馈系数应满足什么条件？



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！

小结

- 掌握与反馈有关的基本概念
- 反馈类型与组态的判断
- 反馈的设计 —— 根据对放大电路性能的要求引入正确的反馈
- 深度交流负反馈的计算分析 —— 基于理想运放的“虚短”和“虚断”分析
- 负反馈系统的稳定 —— 自激振荡的概念和判据