

### 三、引入负反馈的原则

---

1. 为了稳定 $Q$ 点，抑制温漂，应引直流负反馈
  2. 为了改善动态性能，应引交流负反馈
- (1) 根据四种不同反馈组态电路的功能，针对不同的信号转换要求选择不同的反馈组态。

要实现电压放大——引电压串联负反馈

要实现电流放大——引电流并联负反馈

要实现互阻放大——引电压并联负反馈

要实现互导放大——引电流串联负反馈

(2) 根据信号源对输入阻抗的要求决定采用串联或并联负反馈

(3) 根据负载对输出信号的要求决定采用电压或电流负反馈

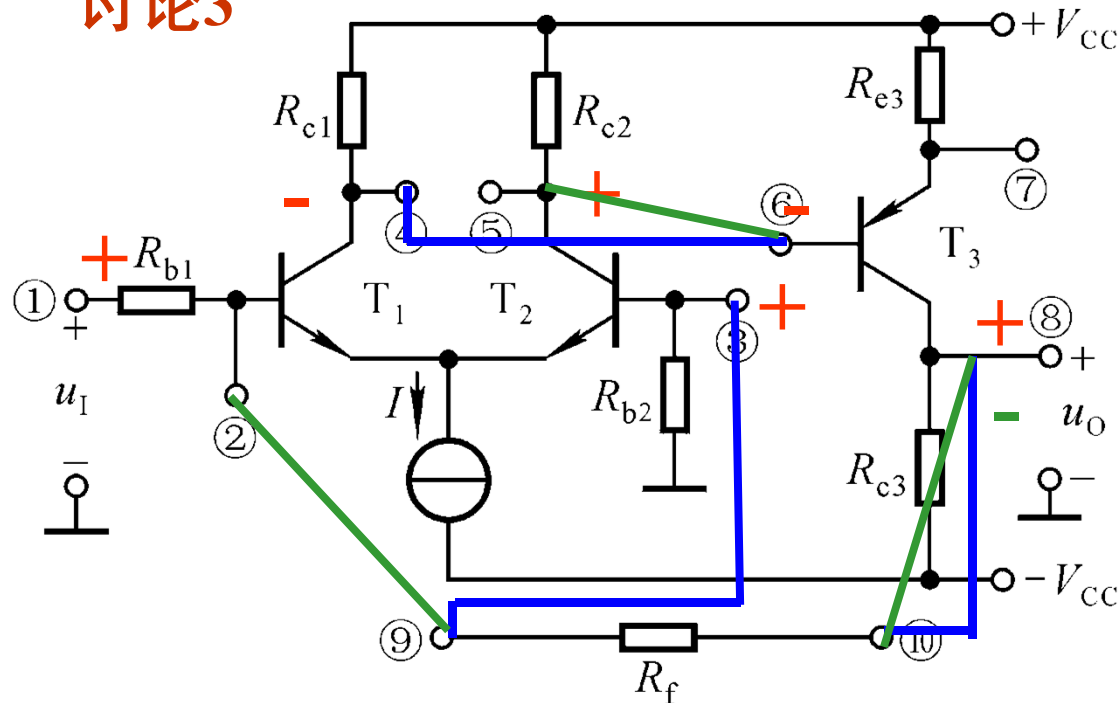
信号源为恒压源或内阻较小的电压源时，需要提高 $R_i$ ——  
应引串联负反馈

信号源为恒流源或内阻较大的电流源时，需要减小 $R_i$ ——  
应引并联负反馈

当负载要求稳定的输出电压，需要减小 $R_o$ ——应引电压负反馈

当负载要求稳定的输出电流，需要增大 $R_o$ ——应引电流负反馈

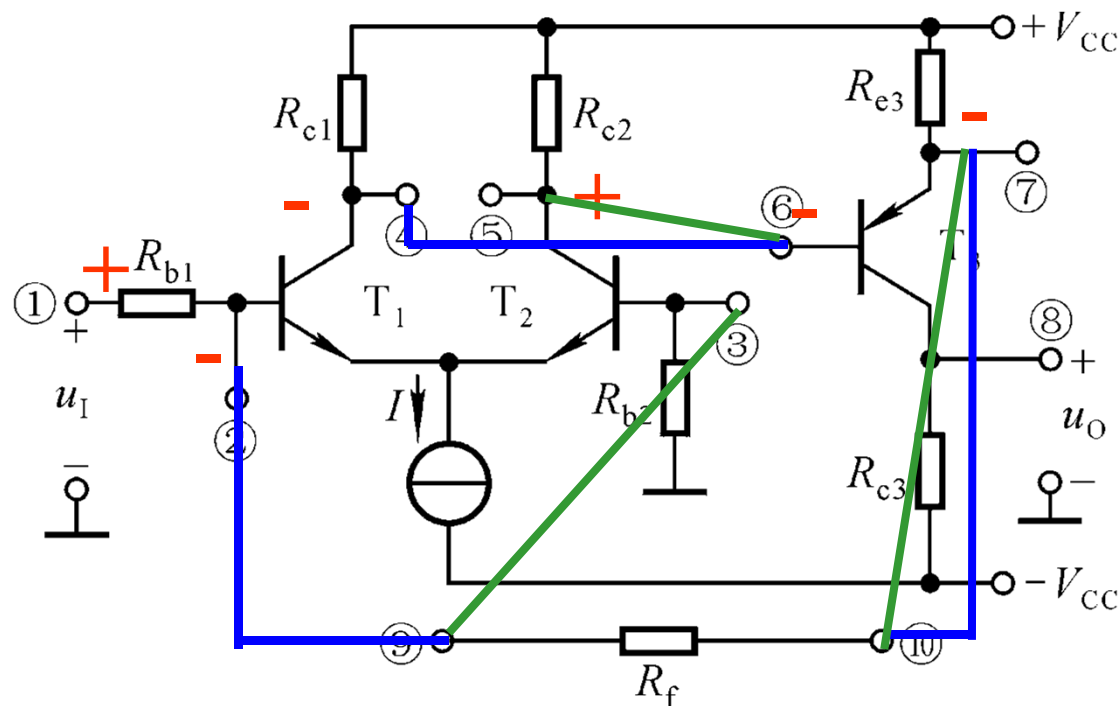
### 讨论3



#### 引入负反馈步骤:

- 根据题意分析待引入反馈的组态
- 根据组态引入反馈
- 保证反馈为负反馈

1. 减小放大电路从信号源索取的电流并增强带负载能力  
增大输入电阻，减小输出电阻，应引入电压串联负反馈
2. 将输入电流 $i_i$ 转换成稳定的输出电压 $u_o$   
应引入电压并联负反馈



3. 将输入电流 $i_I$ 转换成与之成稳定线性关系的输出电流 $i_O$   
 应引入电流并联负反馈

电流串联负反馈如何引入？

**总结：**当电路级间 连接固定时，最多能引入两种组态的负反馈；  
 当电路级间连接不固定时，最多能引入四种组态的负反馈。



## 6.6 负反馈放大电路的稳定性 (Stability)

本节研究的问题：

- 什么是自激振荡
- 为什么会产生自激振荡
- 如何定性判断电路是否会产生自激振荡
- 电路产生自激振荡后如何消除

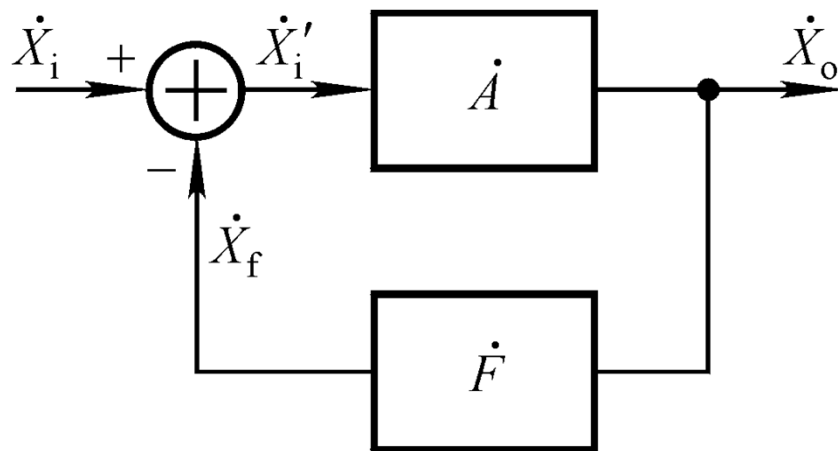
### 一、自激振荡产生的原因和条件

#### 1. 自激振荡现象 (oscillation)

放大电路引入负反馈后，在输入信号为零时，输出产生了具有一定幅值和一定频率的信号。

出现不稳定状态！

## 2. 自激振荡产生的原因



低频时耦合电容和旁路电容将产生超前相移，高频时极间电容将产生滞后相移，这种相移称为**附加相移**。

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

中频时：  $X_i' = X_i - X_f$

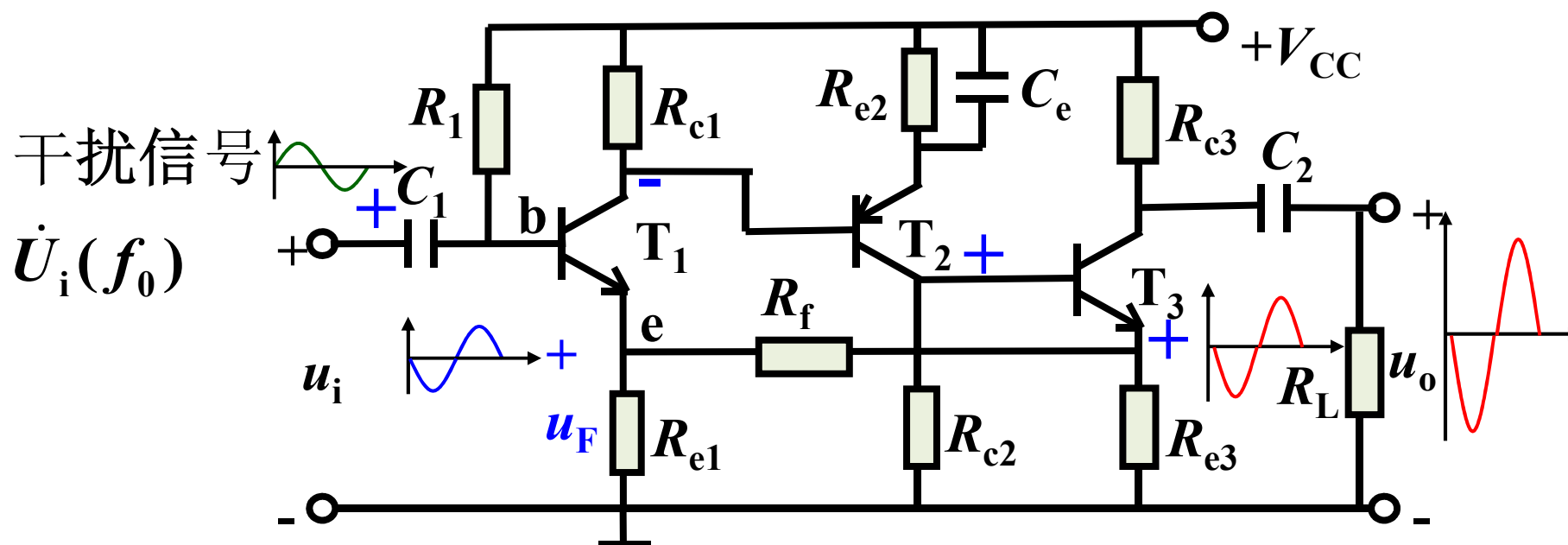
当  $\varphi_A' + \varphi_F' = (2n + 1)\pi$  时

附加相移使  $X_f$  极性产生变化

$$\text{使 } |\dot{X}_i'| = |\dot{X}_i| + |\dot{X}_f|$$

负反馈变成了正反馈

低频时最大附加相移为 $+270^\circ$ ，高频时最大附加相移为 $-270^\circ$

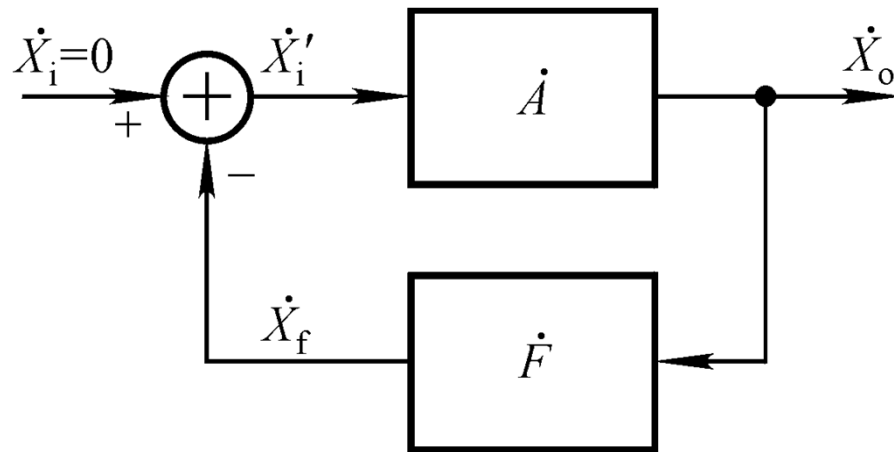


$|\dot{U}_i'| \uparrow \rightarrow |\dot{U}_o| \uparrow \rightarrow |\dot{U}_f| \uparrow \rightarrow |\dot{U}_i'| \uparrow \uparrow \rightarrow |\dot{U}_o| \uparrow \uparrow$  产生自激振荡

$|\dot{U}_i'| \uparrow \rightarrow |\dot{U}_o| \uparrow \rightarrow |\dot{A}| \downarrow \rightarrow |\dot{A}\dot{F}| \downarrow$

电路产生自激振荡后，由于电路的非线性而达到平衡

### 3. 自激振荡的平衡条件



$$\dot{X}_i = 0$$

$$\dot{X}_o = \dot{A}\dot{X}_i' = -\dot{A}\dot{X}_f = -\dot{A}\dot{F}\dot{X}_o$$

$$\dot{A}\dot{F} = -1$$

维持振  
荡条件

$$|\dot{A}\dot{F}| = 1$$

幅值条件

$$\varphi_A' + \varphi_F' = (2n + 1)\pi$$

相位条件

起振条件

$$|\dot{A}\dot{F}| > 1$$

$$\varphi_A' + \varphi_F' = (2n + 1)\pi$$



## 二、放大电路稳定性的分析与判断

1. 定性分析：分析是否可能产生自激振荡，  
即是否可能满足自激振荡的幅值和相位条件。

只存在高频  
附加相移

$$\Phi'_F = 0$$

条件：直接耦合放大电路，纯电阻反馈网络

单管放大电路

$$\varphi'_A = 0 \sim -90^\circ \quad \times$$

两级放大电路

$$\varphi'_A = 0 \sim -180^\circ \quad \times$$

三级放大电路

$$\varphi'_A = 0 \sim -270^\circ \quad \checkmark$$

**结论：**放大电路级数越多，越易满足自激振荡的相位条件，易产生高频振荡；

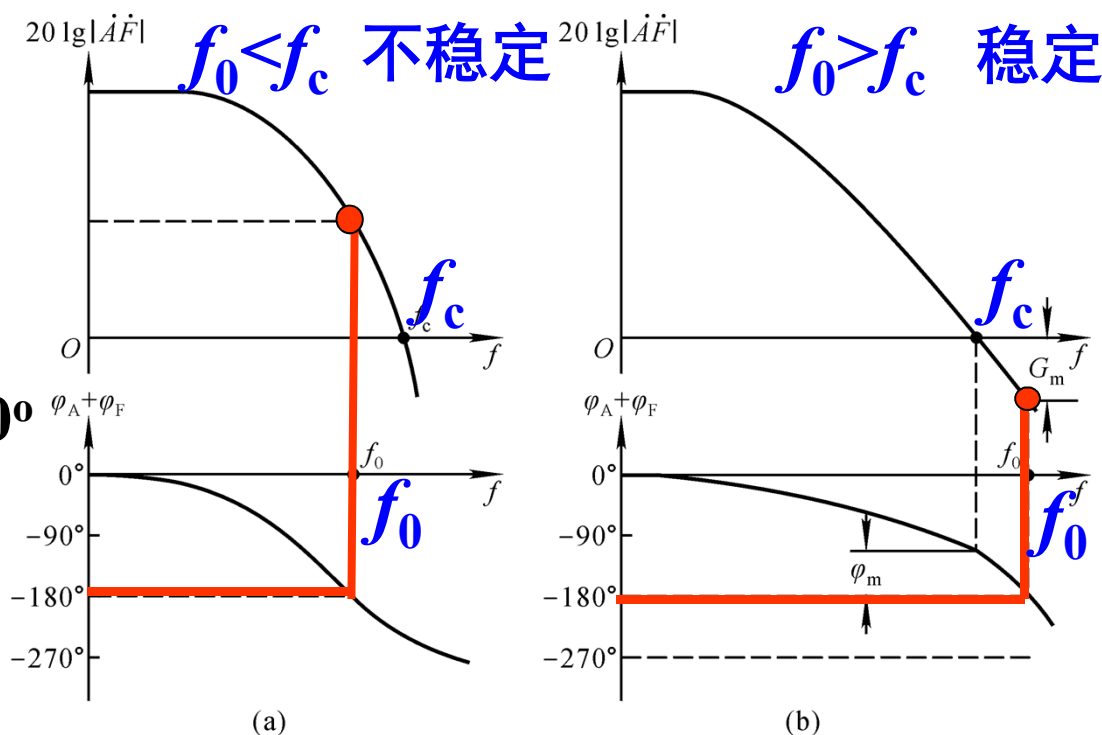
耦合电容和旁路电容越多，越易满足自激振荡的相位条件，易产生低频振荡；

负反馈深度越大，越易满足自激振荡的幅值条件，易产生自激振荡。

2. 稳定性的判断 若 $\varphi'_A + \varphi'_F = -180^\circ$ 时 $|AF| > 1$ , 则电路不稳定

$$f_c: |AF|=1$$

$$f_0: \varphi'_A + \varphi'_F = -180^\circ$$



### • 稳定裕度

幅值裕度

$$G_m = 20 \lg |\dot{A}\dot{F}|_{f=f_0}$$

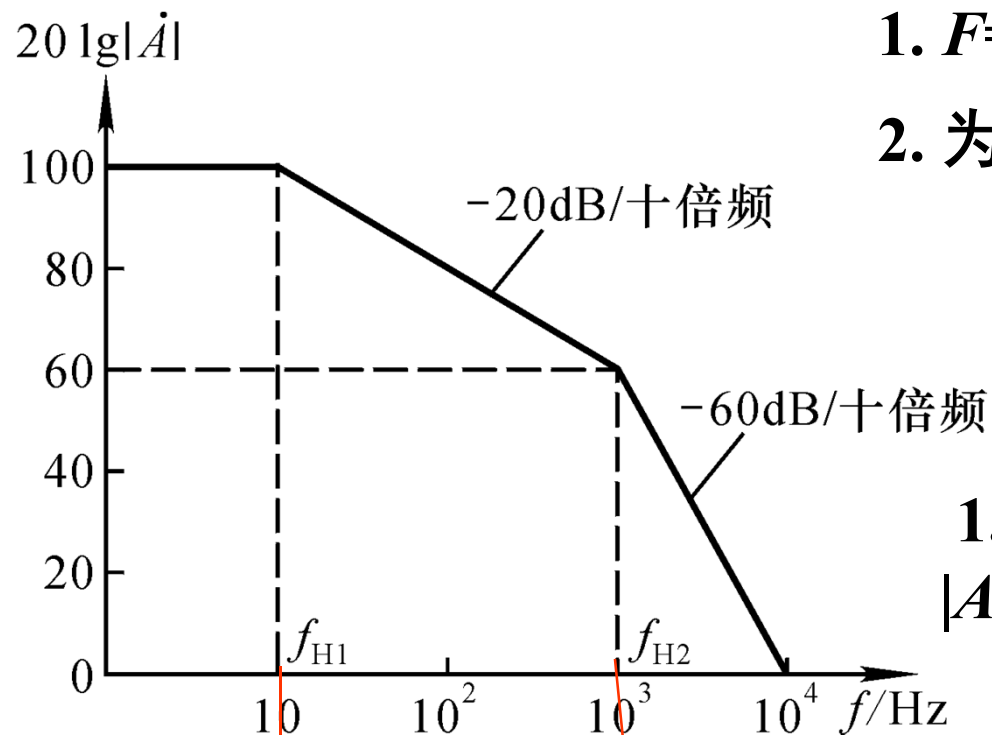
$G_m \leq -10 \text{ dB}$  足够稳定

相位裕度

$$\phi_m = 180^\circ - |\phi'_A + \phi'_F|_{f=f_c}$$

$\phi_m > 45^\circ$  足够稳定

**讨论1:** 放大电路引入了负反馈, 反馈网络为**纯电阻网络**



$$\varphi'_A = -45^\circ$$

$$\varphi'_A = -90^\circ + 2 * (-45^\circ) = -180^\circ$$

1.  $F=1$ 时能否产生自激振荡?

2. 为使电路稳定,  $F$ 的上限值=?

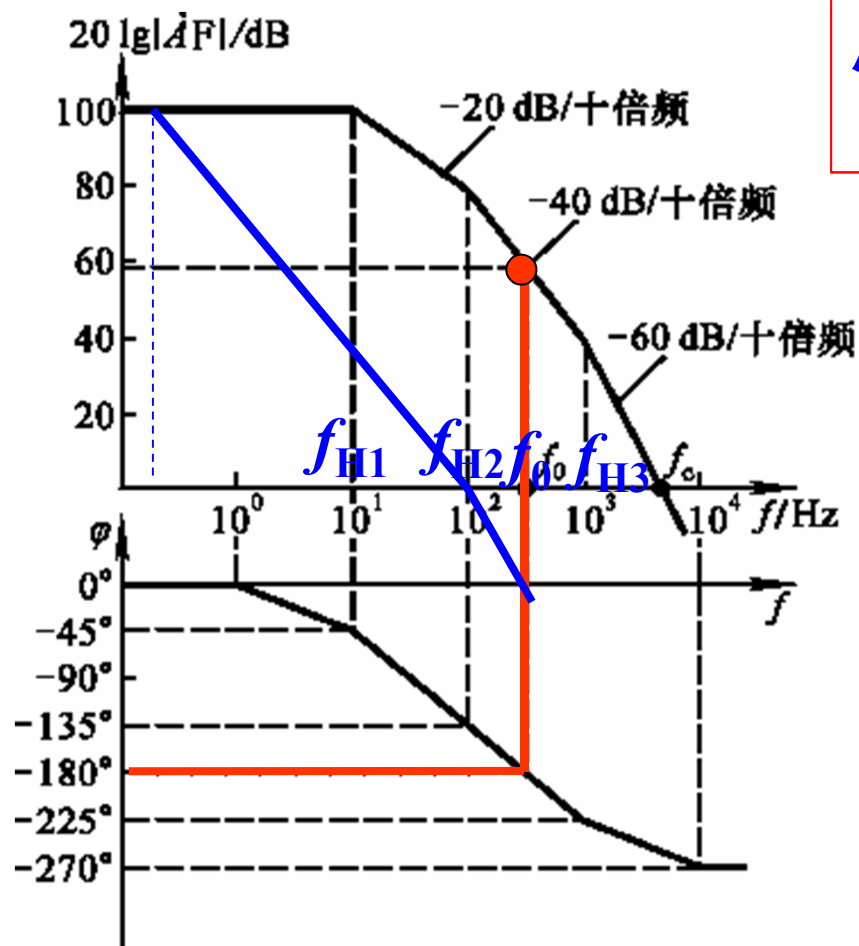
$$\dot{A}_u = \pm 10^5 \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_{H1}}} \cdot \frac{1}{(1 + j \frac{f}{f_{H2}})^2}$$

1.  $F=1$ : 当 $\varphi'_A = -180^\circ$ 时,  
 $|AF| > 1$ , 会产生自激振荡。

2. 当 $\varphi'_A = -180^\circ$ 时, 为使 $|AF| < 1$ , 则 $F < 10^{-3}$

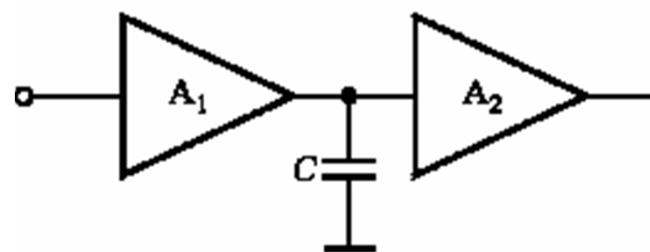
### 三、自激振荡的消除方法

#### • 简单滞后补偿(Compensation)



思路：破坏自激振荡的条件，使  
 $\varphi'_A + \varphi'_F = -180^\circ$  时  $|AF| < 1$

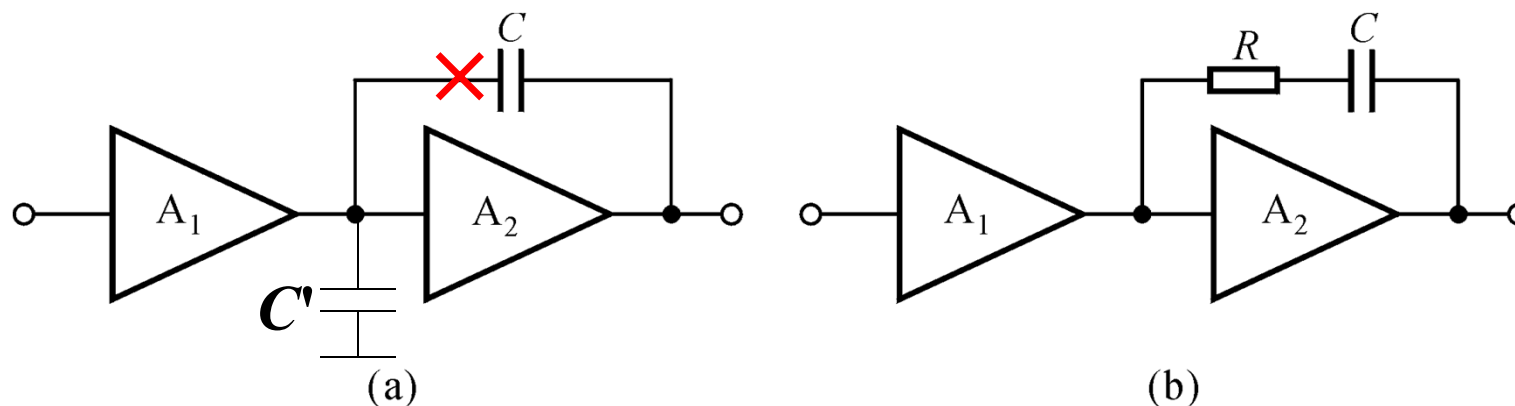
- 将  $f_{H1}$  减小，使  $f_{H2}$  点降为0
- 在电路中找到产生  $f_{H1}$  的那级电路，加电容补偿



$RC_\pi'$  最大，一般  $A$  最大

简单滞后补偿使频带变窄

- 密勒效应补偿

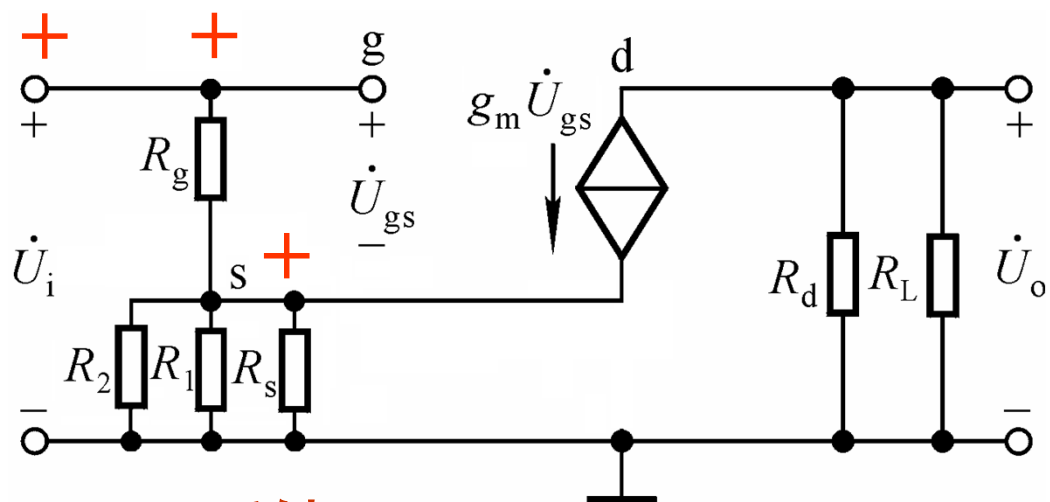
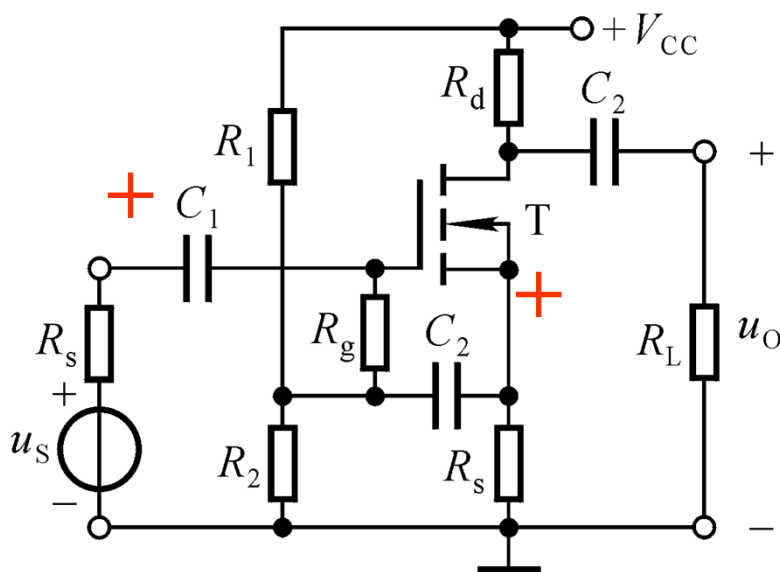


可减小补偿电容容量，便于集成：

$$C' = (1 + |K|) C \approx A_2 * C$$

滞后补偿时应尽量采用小电容以使频带不至于变得太窄

## 讨论2:



正反馈

$R_s$ 引入交、直流负反馈

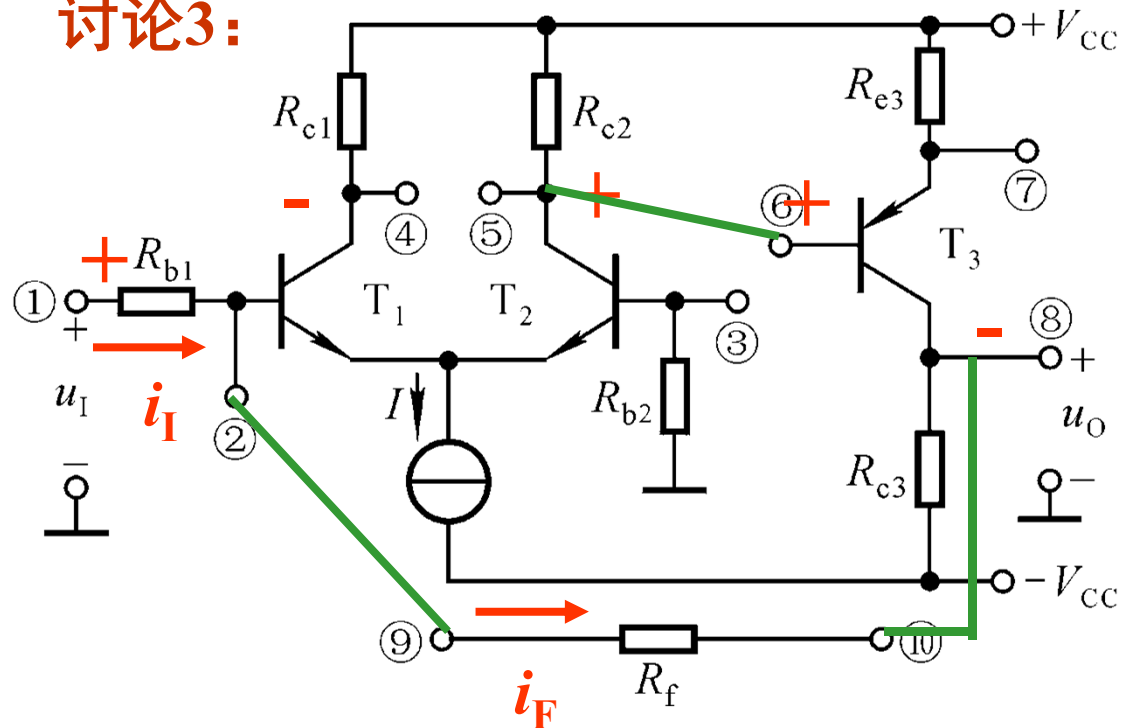
$R_s$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 引入交流负反馈

$R_s$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $C_2$ 、 $R_g$ 引入交流正反馈

$$R_i = R_g + [1 + g_m R_g] * (R_1 // R_2 // R_s)$$

自举电路通过正反馈  
增大了动态输入电阻

讨论3:



1、求反馈系数

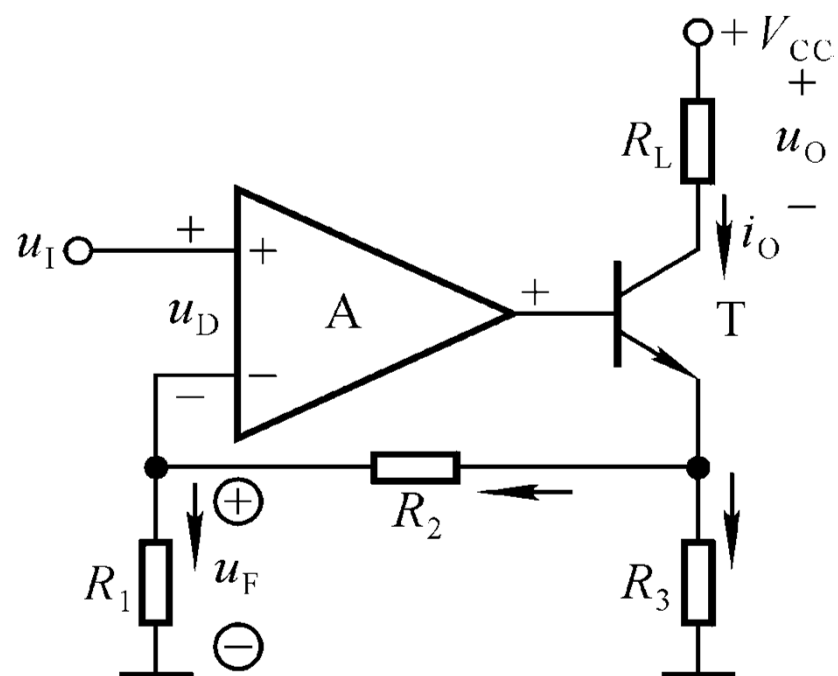
2、求 $A_{uf}$ 、 $R_i$ 、 $R_o$

电压并联负反馈

$$\dot{F}_{ui} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o} = -\frac{1}{R_f} \quad \dot{A}_{iuf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} \approx \frac{1}{\dot{F}_{ui}} = -R_f$$

$$\dot{A}_{uf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i \cdot R_{b1}} = \dot{A}_{iuf} \cdot \frac{1}{R_{b1}} = -\frac{R_f}{R_{b1}} \quad \begin{matrix} R_i = R_{b1} \\ R_o = 0 \end{matrix}$$

## 讨论4:



## 电流串联负反馈

为稳定输出电压，应如何引负反馈？



## 第六章要求

知识掌握要求:

- 1、掌握以下概念：反馈，正、负反馈，交流、直流反馈，局部、级间反馈，反馈组态，反馈深度，虚短、虚断，自激振荡，幅值裕度，相位裕度。
- 2、会判：能够正确判断电路中是否引入了反馈，会找反馈支路；会用瞬时极性法判断正负反馈；会判断引入的反馈是直流反馈还是交流反馈；对于交流负反馈，会判断反馈的组态。

- 3、会算：会求解深度负反馈条件下电压放大倍数。
- 4、会引：了解负反馈对放大电路性能的影响，会根据需求对电路引入合适的交流负反馈。
- 5、会判振消振：正确理解负反馈放大电路产生自激振荡的原因，能够定性判断电路的稳定性，了解消除自激振荡的方法。

## 第六章基本电路、基本分析方法总结

电路总结（请自己将电路特点列表对比细化）：

集成运放组成的四种组态负反馈电路。

方法总结：

- 瞬时极性法判断正负反馈；
- 电压、电流负反馈的判断方法；串联、并联负反馈的判断方法；
- 虚短、虚断分析深度负反馈电路电压放大倍数的方法；
- 根据需求引入合适的负反馈的方法；
- 根据环路增益 $AF$ 的频率特性来判断电路闭环后是否稳定及简单的消振方法。

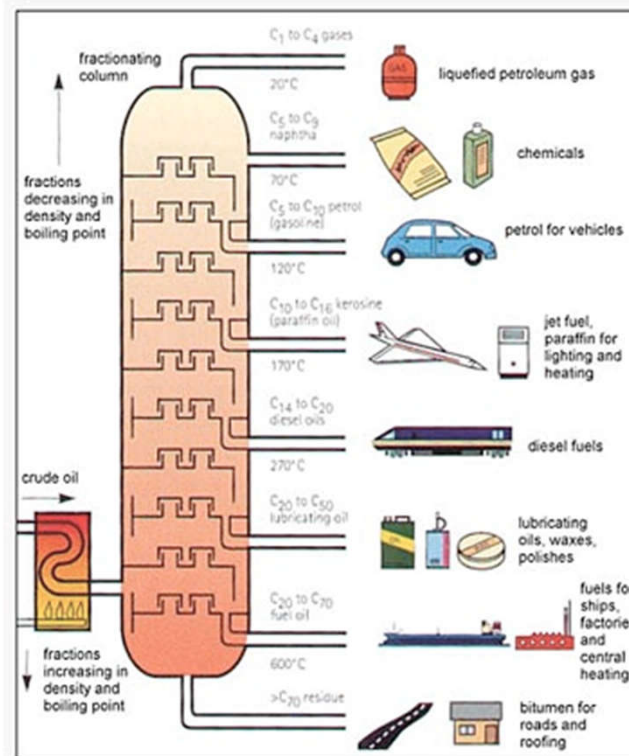
## 第六章常见题型

会判、会算、会引和会判振消振：

- (1) 是否能够正确理解反馈的基本概念。
- (2) 反馈性质的判断方法，有无反馈、直流反馈交流反馈、正反馈负反馈、交流负反馈的四种组态。
- (3) 深度负反馈条件下放大倍数的估算。
- (4) 根据需求引入合适的负反馈。
- (5) 根据环路增益 $AF$ 的频率特性来判断电路闭环后是否稳定及简单的消振。

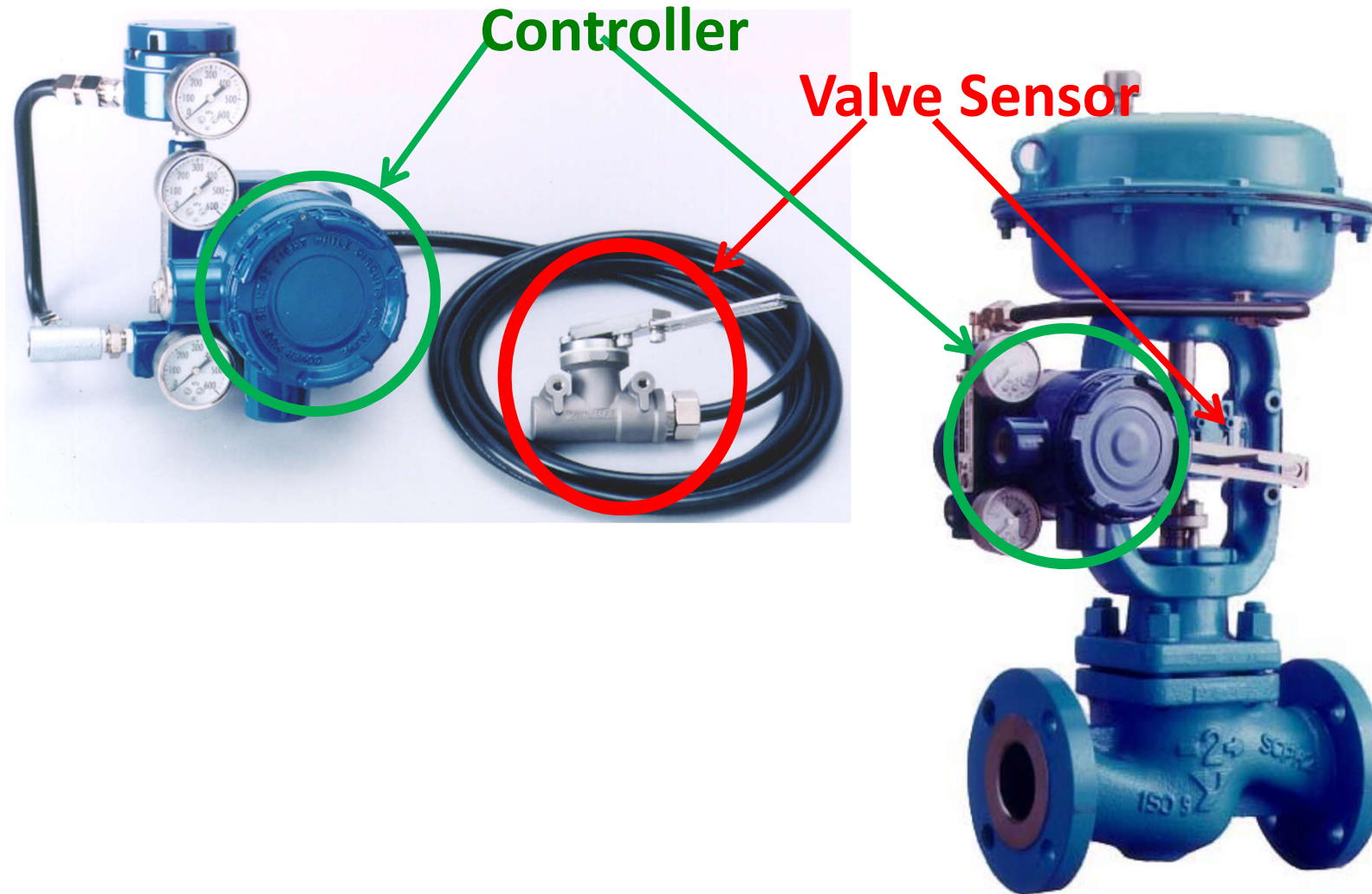


# Electronic System Application Examples





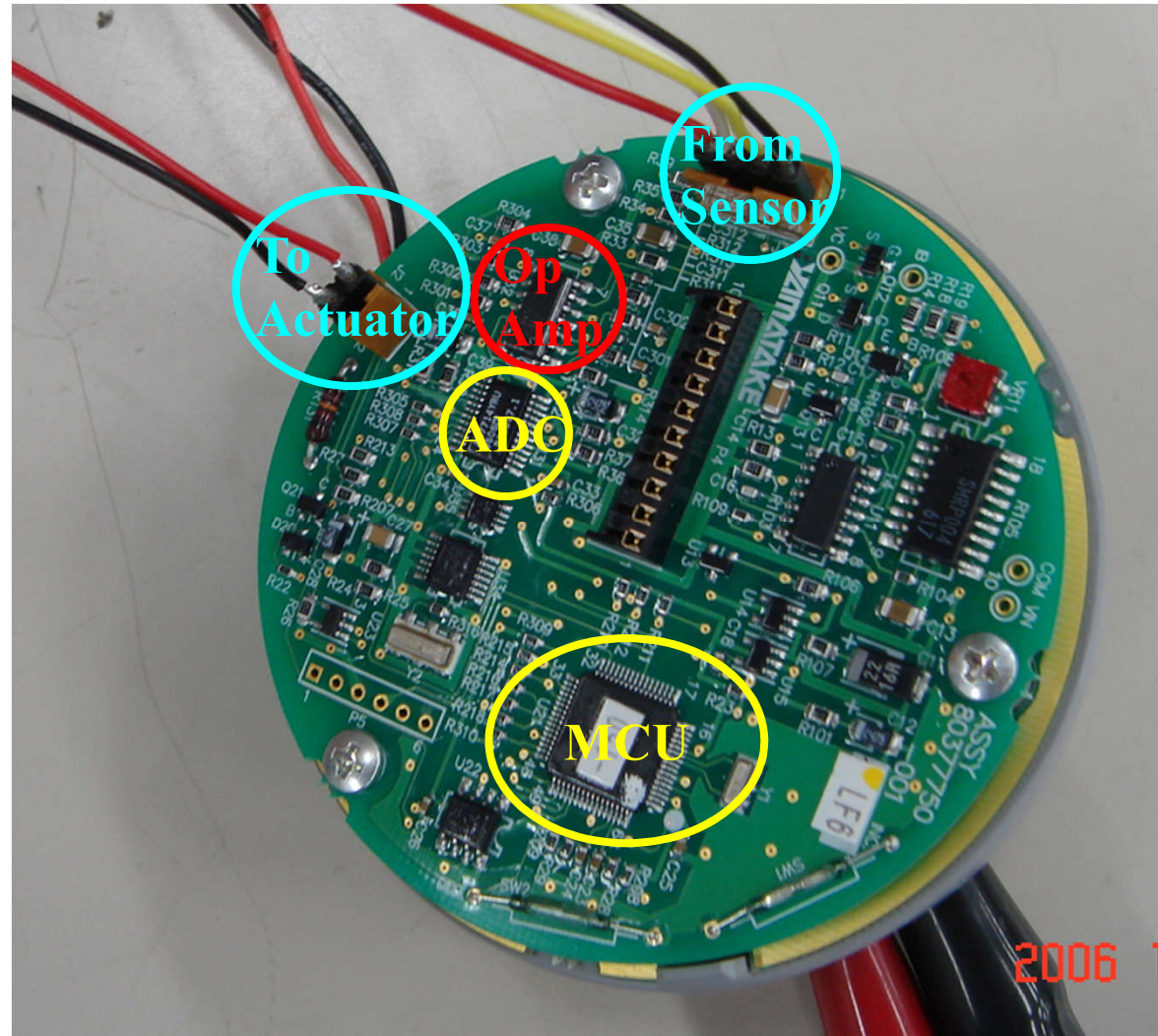
## Electronic System Application Example





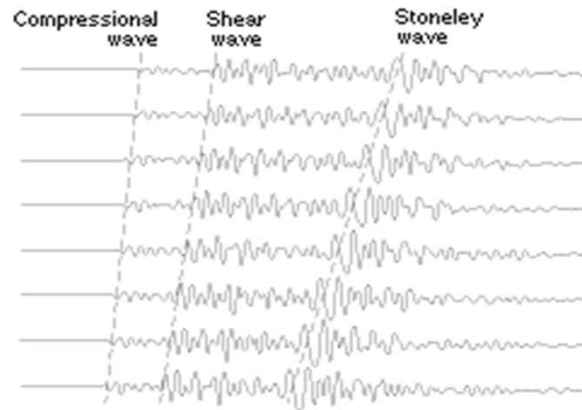
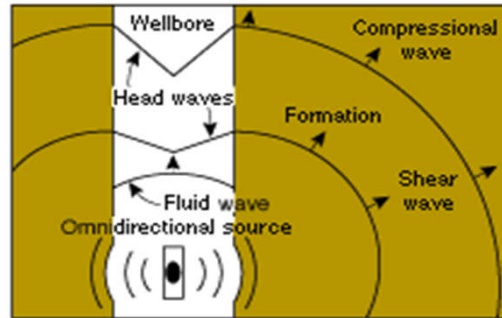


## Electronic System Application Example





## Electronic System Application Example







## Electronic System Application Example



无人机



机器人



## Electronic System Application Example

### Infotainment & Telematics

- Hands Free Telephony
- Navigation
- DAB & IBOC Receivers
- E-Calls, B-Calls, S-Calls
- Automotive Hybrid TV Receiver
- DVD Playback, Radios
- Storage Devices

### Vehicle Bus Communication

- Multimedia Bus Interface like MOST & 1394
- CAN, J1850, LIN, GMLAN, UART, FLOS

### Body Electronics

- Power Windows & Mirror Control
- Remote Keyless Entry
- Smart Junction Box

Automotive Lighting Control

Seating Systems

Rear Seat Entertainment

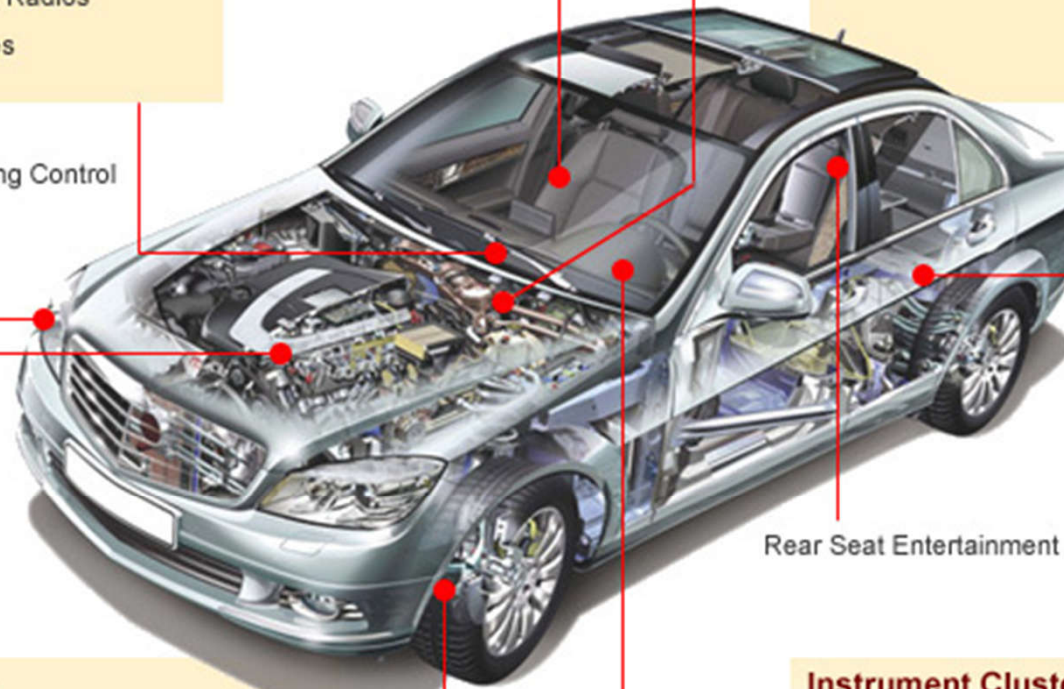
### Power Train & Engine Management

- Diagnostic Tests and Interfaces
- Complex and Simple IO Development
- Model Based Software Development

- The Pressure Monitoring Systems
- Modelling of Suspension Systems

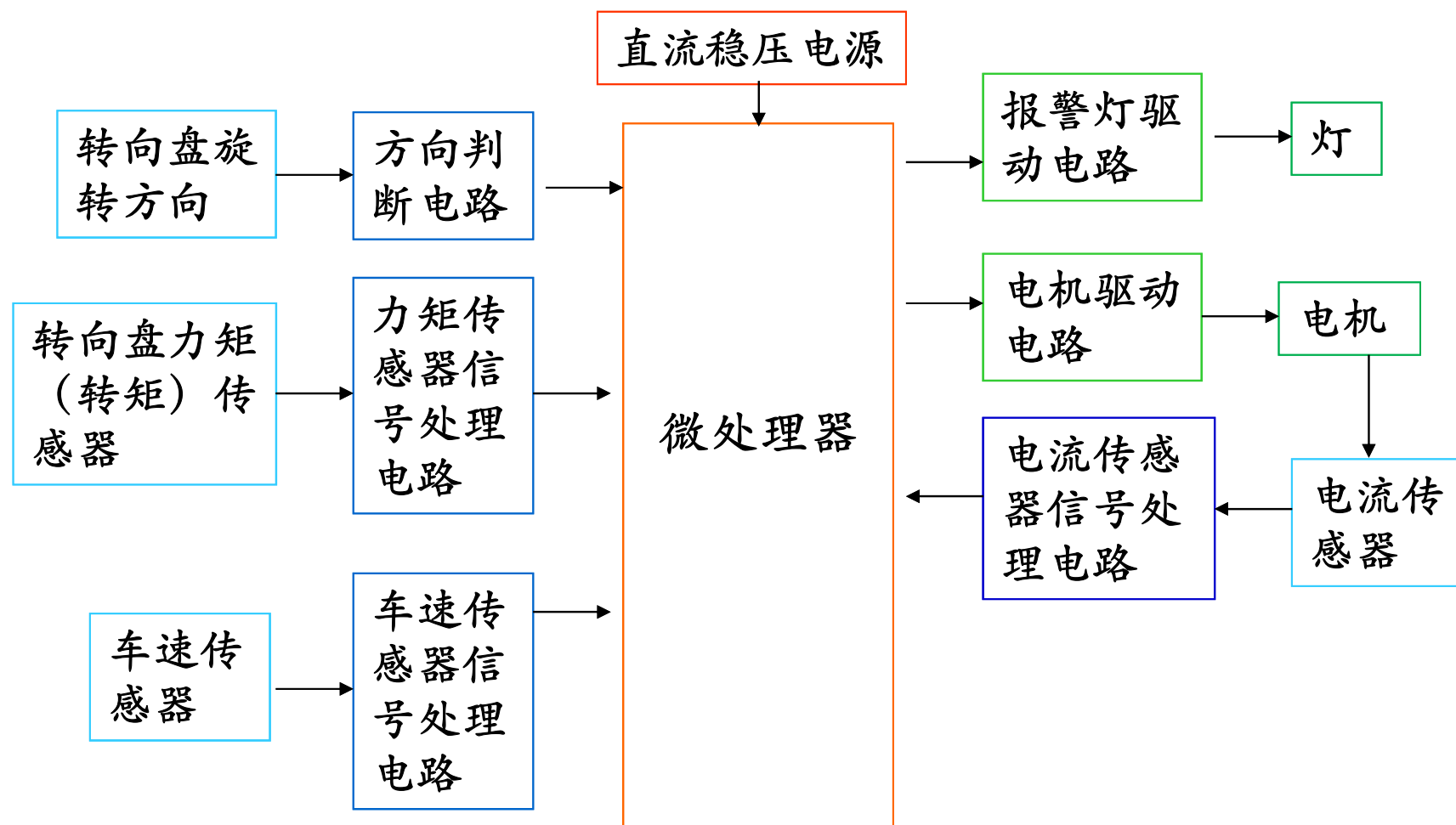
### Instrument Clusters

- Hardware Architecture
- HMI Components
- Reusable Components
- Integration and Validation





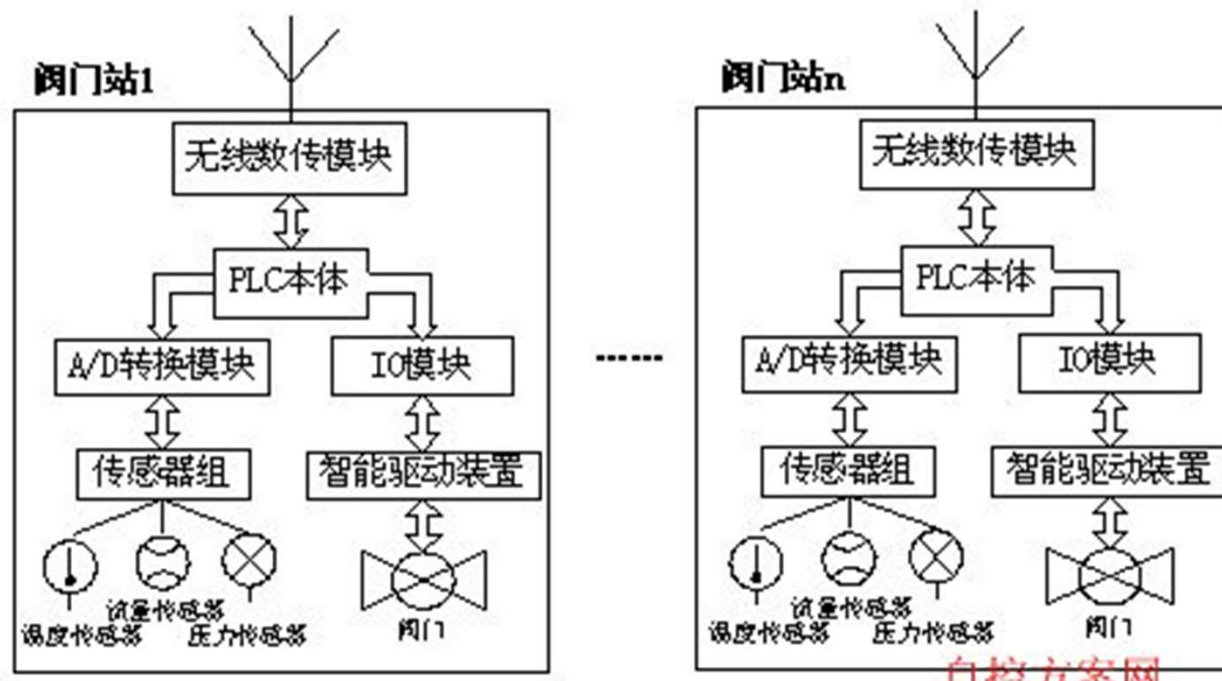
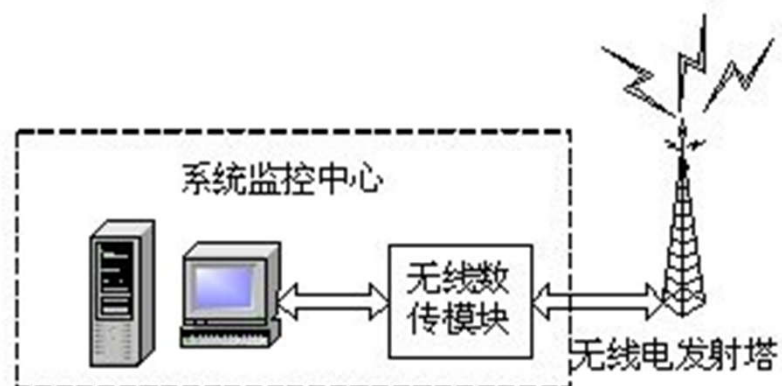
## Electronic System Application Example



汽车电动助力转向电子系统 (EPF)



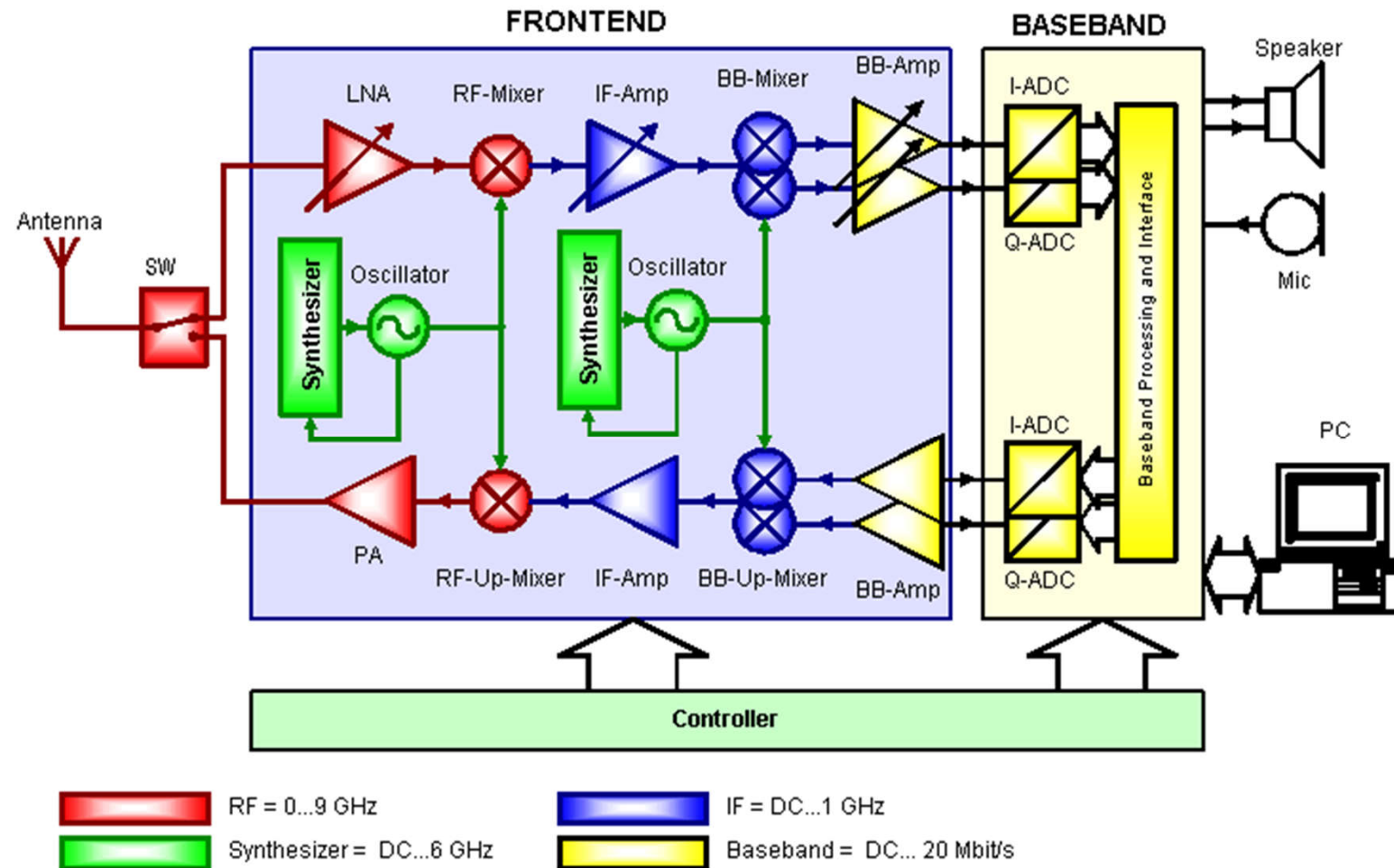
## Electronic System Application Example







## Electronic System Application Example



## Communication System