A photograph of a classical building with a red-tiled roof and stone columns, identified by the text as Tsinghua University. The building features a prominent entrance with a pediment and columns. The text '清華大學' is visible on the upper part of the facade.

# 第四章 集成运算放大电路



# 第四章 集成运算放大电路

§ 4.1 概述

§ 4.2 集成运放中的电流源

§ 4.3 集成运放的电路分析及其性能指标



## § 4.1 概述

- 一、集成运放的特点
- 二、集成运放电路的组成
- 三、集成运放的电压传输特性





# 一、集成运放的特点

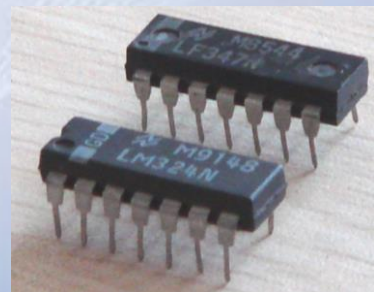
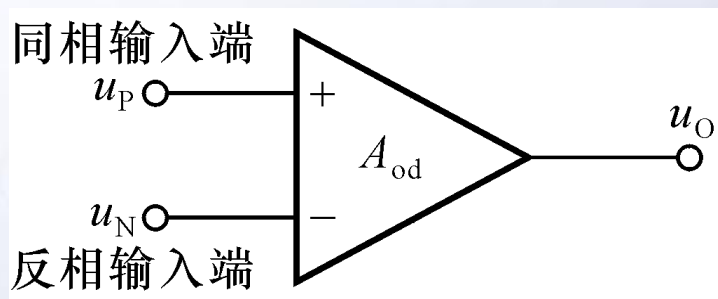
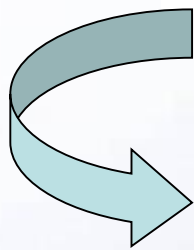
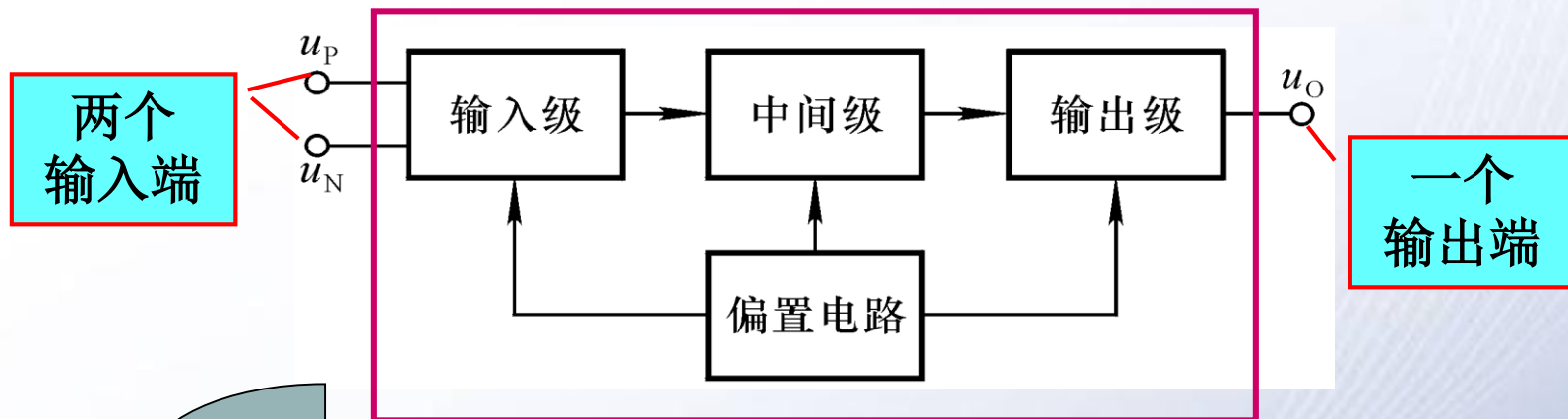
集成运算放大电路，简称集成运放，是一个高性能的直接耦合多级放大电路。因首先用于信号的运算，故而得名。

- (1) 直接耦合方式，充分利用管子性能良好的一致性采用差分放大电路和电流源电路。
- (2) 用复杂电路实现高性能的放大电路，因为电路的复杂化并不带来工艺的复杂性。
- (3) 用有源元件替代无源元件，如用晶体管取代难于制作的大电阻。
- (4) 采用复合管。





## 二、集成运放电路的组成



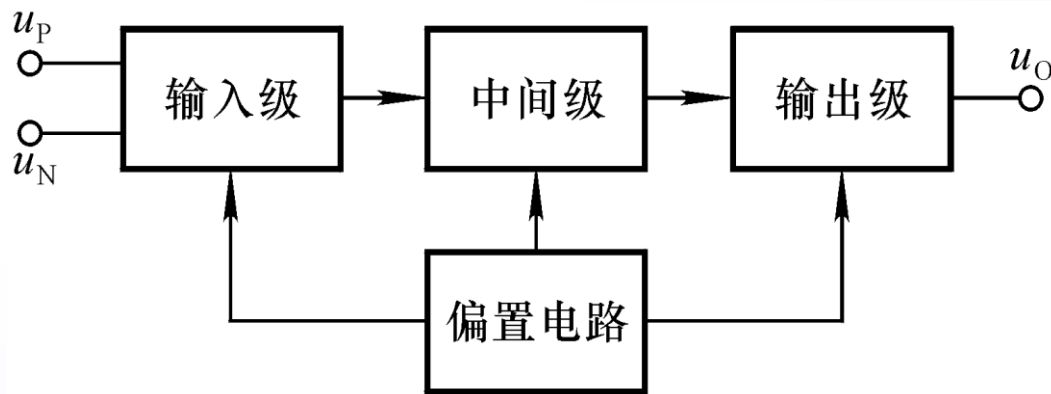
若将集成运放看成为一个“黑盒子”，则可等效为一个双端输入、单端输出的差分放大电路。







## 集成运放电路四个组成部分的作用



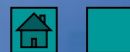
**偏置电路：**为各级放大电路设置合适的静态工作点。采用电流源电路。

**输入级：**前置级，多采用差分放大电路。要求 $R_i$ 大， $A_d$ 大， $A_c$ 小，输入端耐压高。

**中间级：**主放大级，多采用共射放大电路。要求有足够的放大能力。

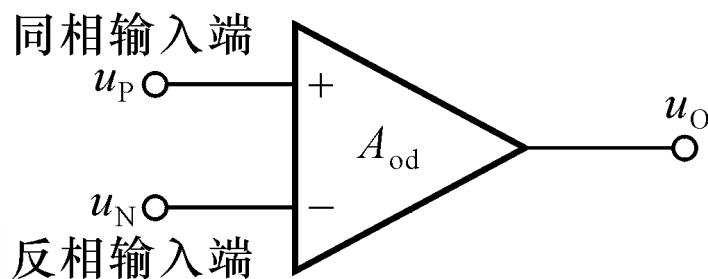
**输出级：**功率级，多采用准互补输出级。要求 $R_o$ 小，最大不失真输出电压尽可能大。

几代产品中输入级的变化最大！

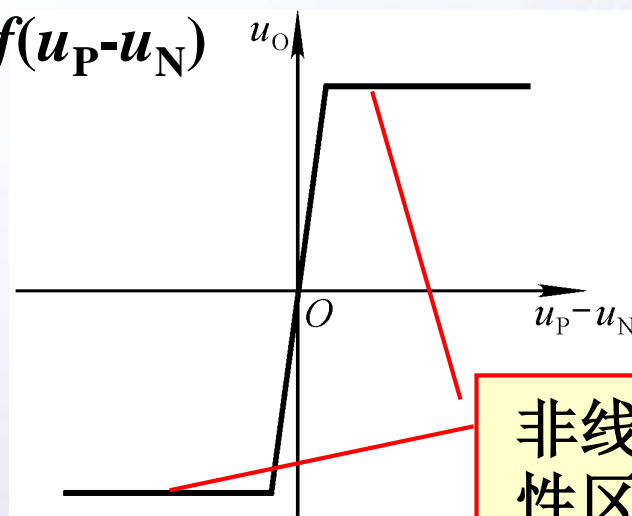




### 三、集成运放的电压传输特性



$$u_O = f(u_P - u_N)$$



在线性区：

$$u_O = A_{od}(u_P - u_N)$$

$A_{od}$  是开环差模放大倍数。

非线性区

由于  $A_{od}$  高达几十万倍，所以集成运放工作在线性区时的最大输入电压  $(u_P - u_N)$  的数值仅为几十~一百多微伏。

$(u_P - u_N)$  的数值大于一定值时，集成运放的输出不是  $+U_{OM}$ ，就是  $-U_{OM}$ ，即集成运放工作在非线性区。



## § 4.2 集成运放中的电流源

- 一、镜像电流源
- 二、微电流源
- 三、多路电流源
- 四、有源负载

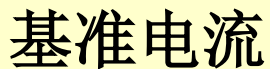






在电流源电路中充分利用集成运放中晶体管性能的一致性。

**T<sub>0</sub> 和 T<sub>1</sub> 特性完全相同。**



$$I_R = (V_{CC} - U_{BE}) / R$$

$$U_{\text{BE1}} = U_{\text{BE0}}, \quad I_{\text{B1}} = I_{\text{B0}}$$

$$I_{C1} = I_{C0} = I_C$$

$$I_R = I_{C0} + I_{B0} + I_{B1} = I_C + \frac{2I_C}{\beta}$$

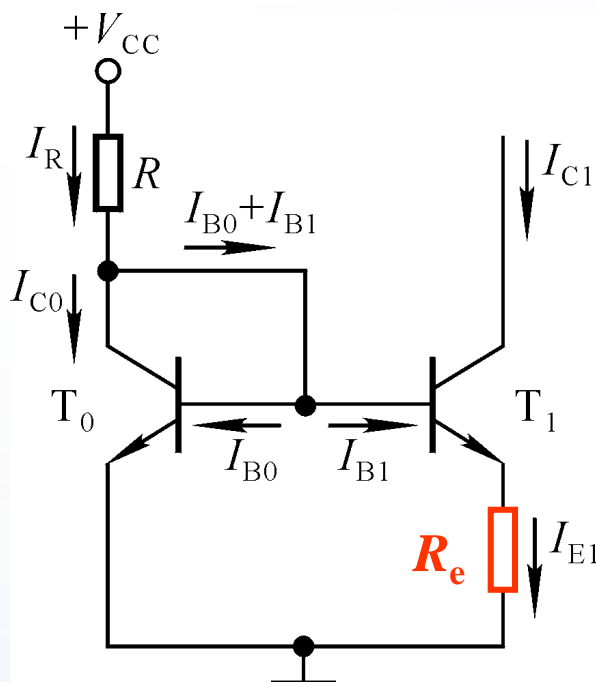
$$I_C = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot I_R$$

# 电路中有负反馈吗？

若 $\beta \gg 2$ , 则 $I_C \approx I_B$

## 二、微电流源

要求提供很小的静态电流，又不能用大电阻。



$$I_{E1} = (U_{BE0} - U_{BE1}) / R_e$$

$$I_E \approx I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}, \quad \frac{I_{E0}}{I_{E1}} \approx e^{\frac{(U_{BE0} - U_{BE1})}{U_T}}$$

$$U_{BE0} - U_{BE1} = U_T \ln \frac{I_{E0}}{I_{E1}} = I_{E1} R_e$$

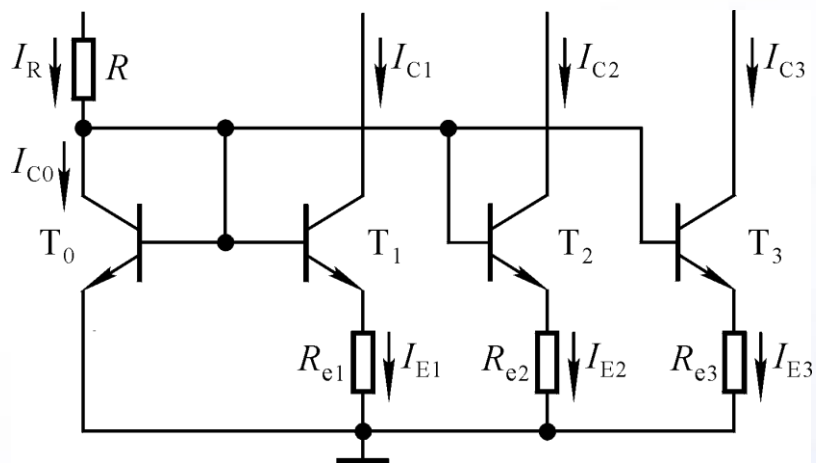
$$I_{E1} \approx I_{C1}$$

$$I_{E0} \approx I_{C0} \approx I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE0}}{R}$$

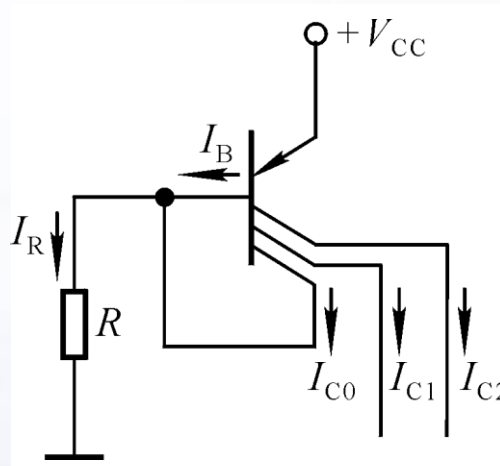
超越  
方程

设计过程很简单，首先确定 $I_{E0}$ 和 $I_{E1}$ ，然后选定 $R$ 和 $R_e$ 。

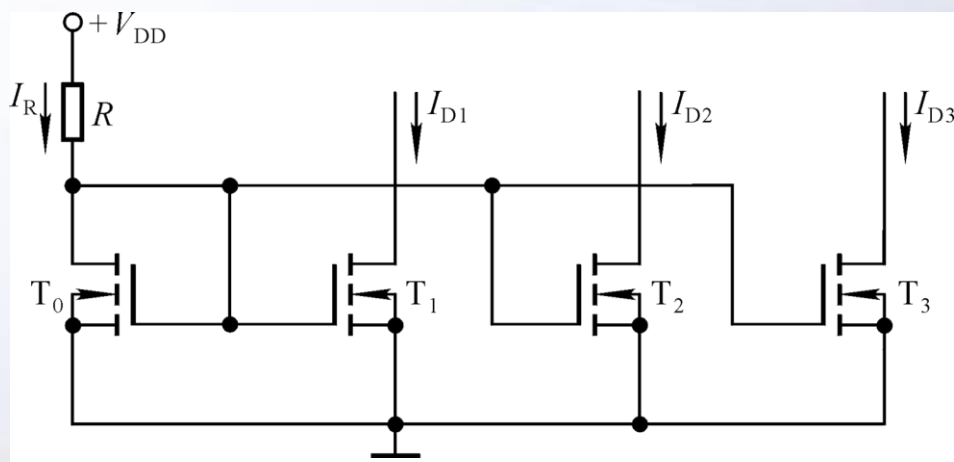
### 三、多路电流源



根据所需静态电流，来  
选取发射极电阻的数值。



根据所需静态电流，来  
确定集电结面积。

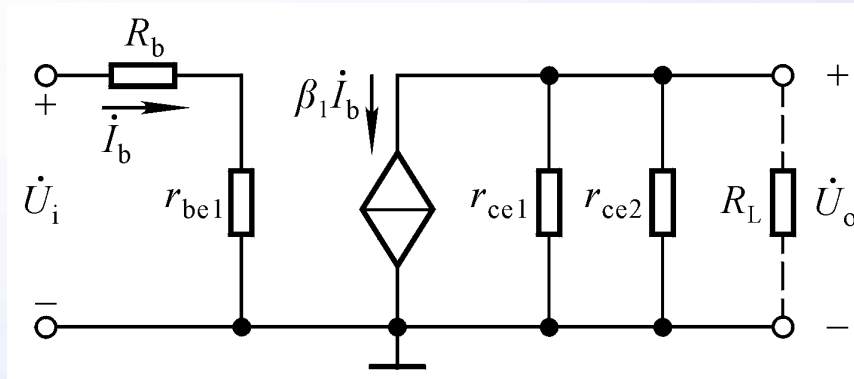
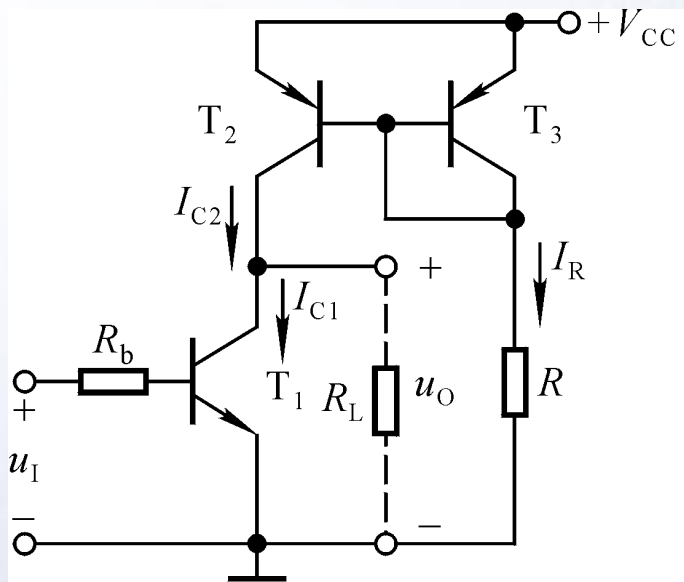


根据所需静态电流，  
来确定沟道尺寸。

## 四、有源负载

### 1. 用于共射放大电路

- ①哪只管子为放大管？
- ②其集电结静态电流约为多少？
- ③静态时 $U_{IQ}$ 为多少？

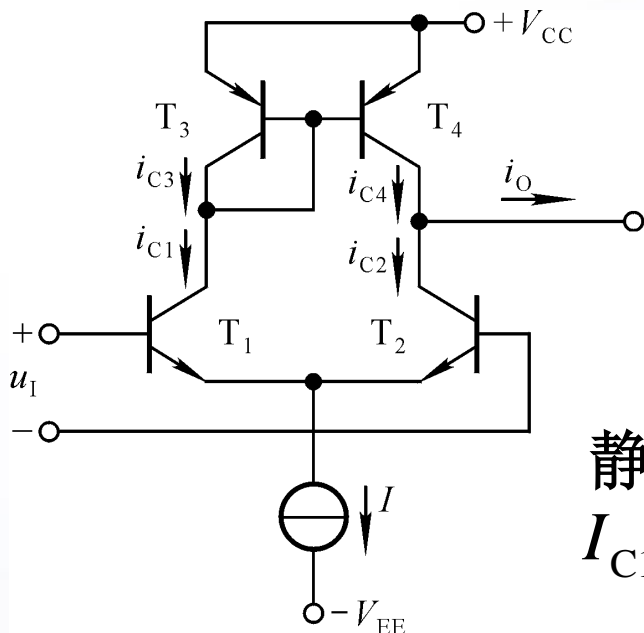


- ④为什么要考虑  $h_{22}$ ?

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta_1 (r_{ce1} // r_{ce2} // R_L)}{R_b + r_{be1}}$$



## 2. 用于差分放大电路



使单端输出电路  
的差模放大倍数近  
似等于双端输出时  
的差模放大倍数。

①电路的输入、输出方式？

②如何设置静态电流？

③静态时 $i_O$ 约为多少？

④动态时 $\Delta i_O$ 约为多少？

静态：

$$I_{C1} = I_{C2}, \quad I_{C3} \approx I_{C1}, \quad I_{C4} = I_{C3}, \quad I_{C4} \approx I_{C2}$$

$$i_O = i_{C4} - i_{C2} \approx 0$$

动态：  $\Delta i_{C1} = -\Delta i_{C2}, \quad \Delta i_{C4} = \Delta i_{C3} \approx \Delta i_{C1},$

$$\Delta i_O = \Delta i_{C4} - \Delta i_{C2} \approx 2\Delta i_{C1}$$







## § 4.3 集成运放的电路分析及其性能指标

一、读图方法

二、读图举例

三、集成运放的性能指标





# 一、读图方法

已知电路图，分析其原理和功能、性能。

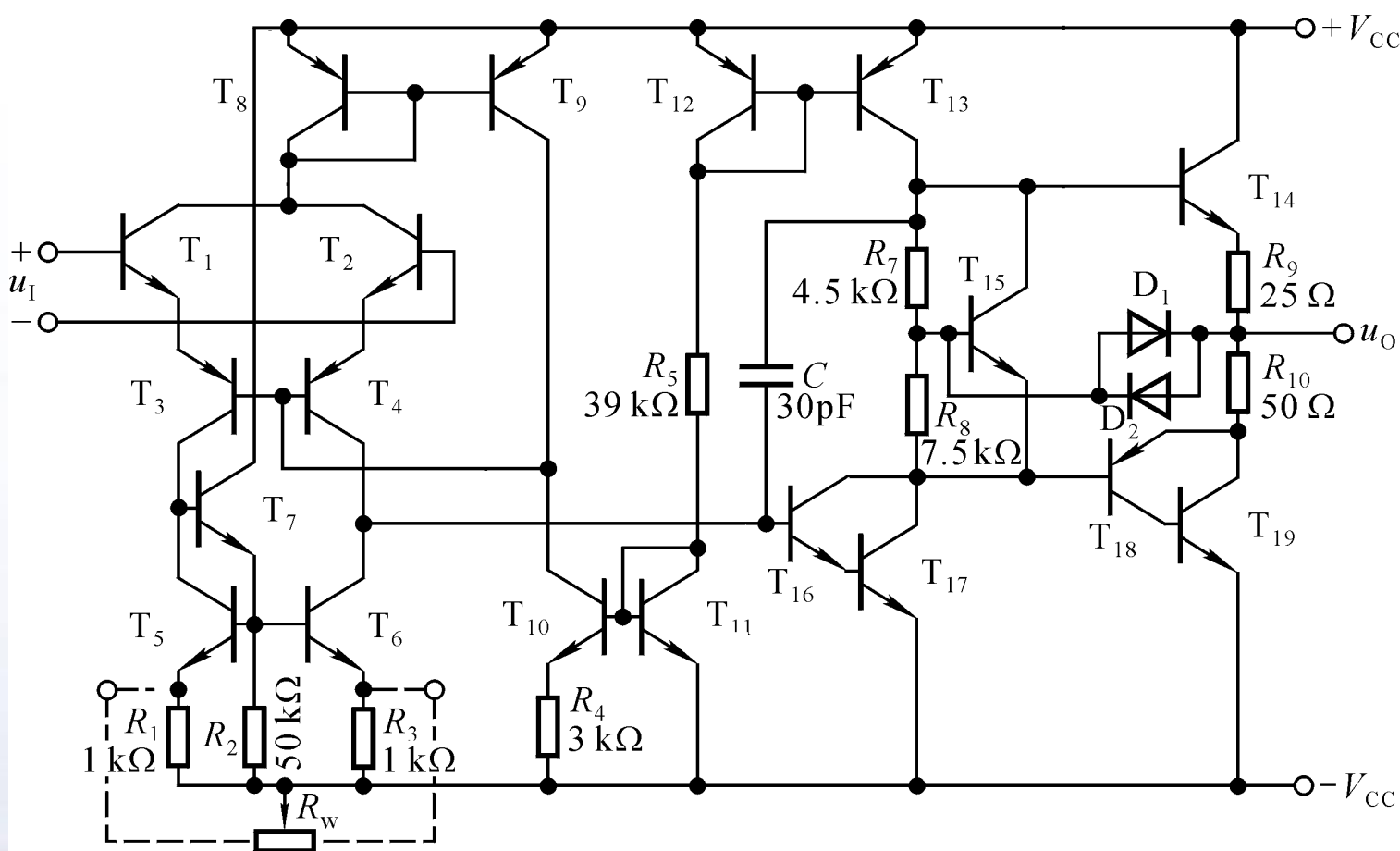
- (1) **了解用途：** 了解要分析的电路的应用场合、用途和技术指标。
- (2) **化整为零：** 将整个电路图分为各自具有一定功能的基本电路。
- (3) **分析功能：** 定性分析每一部分电路的基本功能和性能。
- (4) **统观整体：** 电路相互连接关系以及连接后电路实现的功能和性能。
- (5) **定量计算：** 必要时可估算或利用计算机计算电路的主要参数。





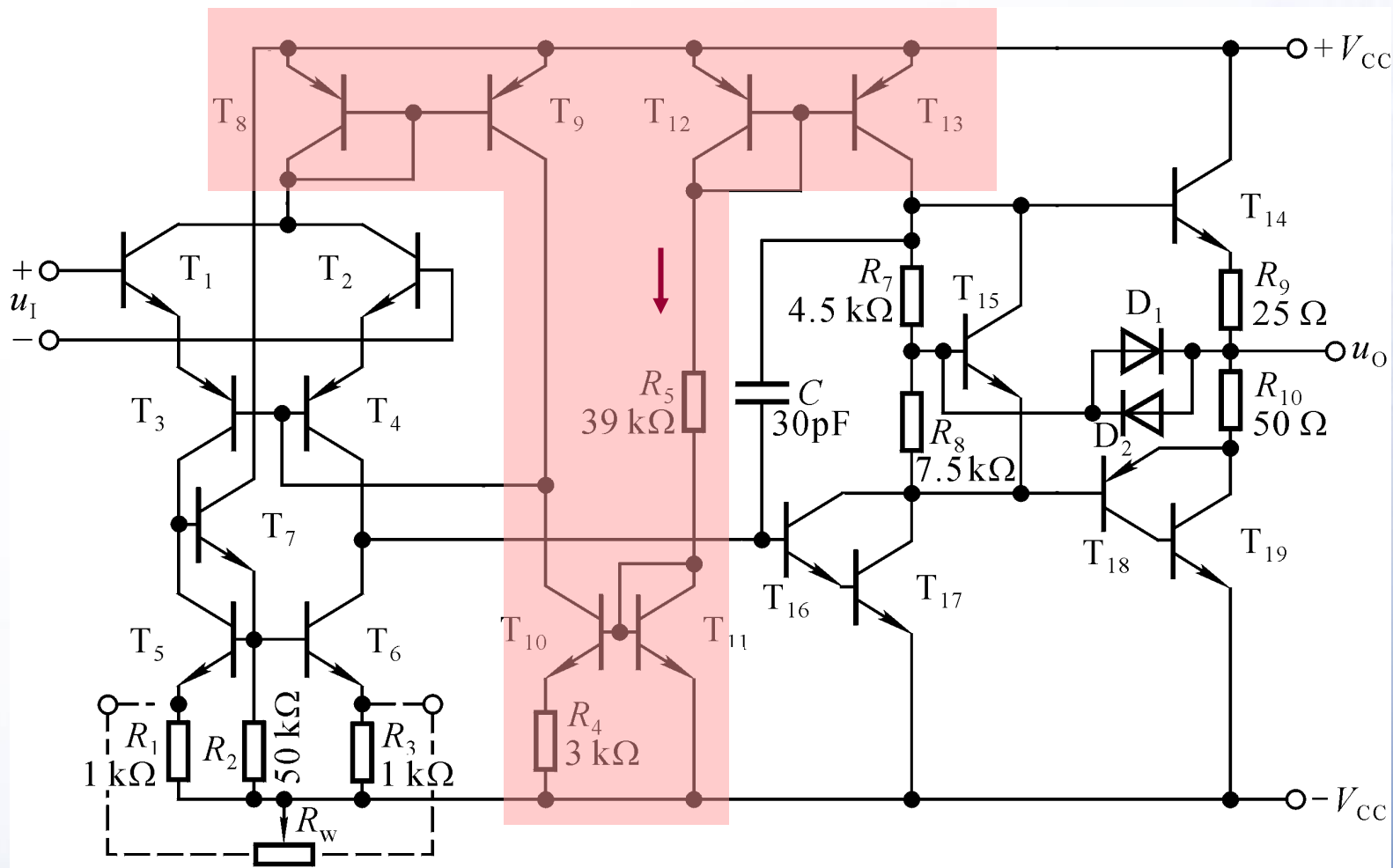
## 二、 举例： F007——通用型集成运放

对于集成运放电路，应首先找出偏置电路，然后根据信号流通顺序，将其分为输入级、中间级和输出级电路。

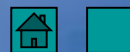




# 找出偏置电路

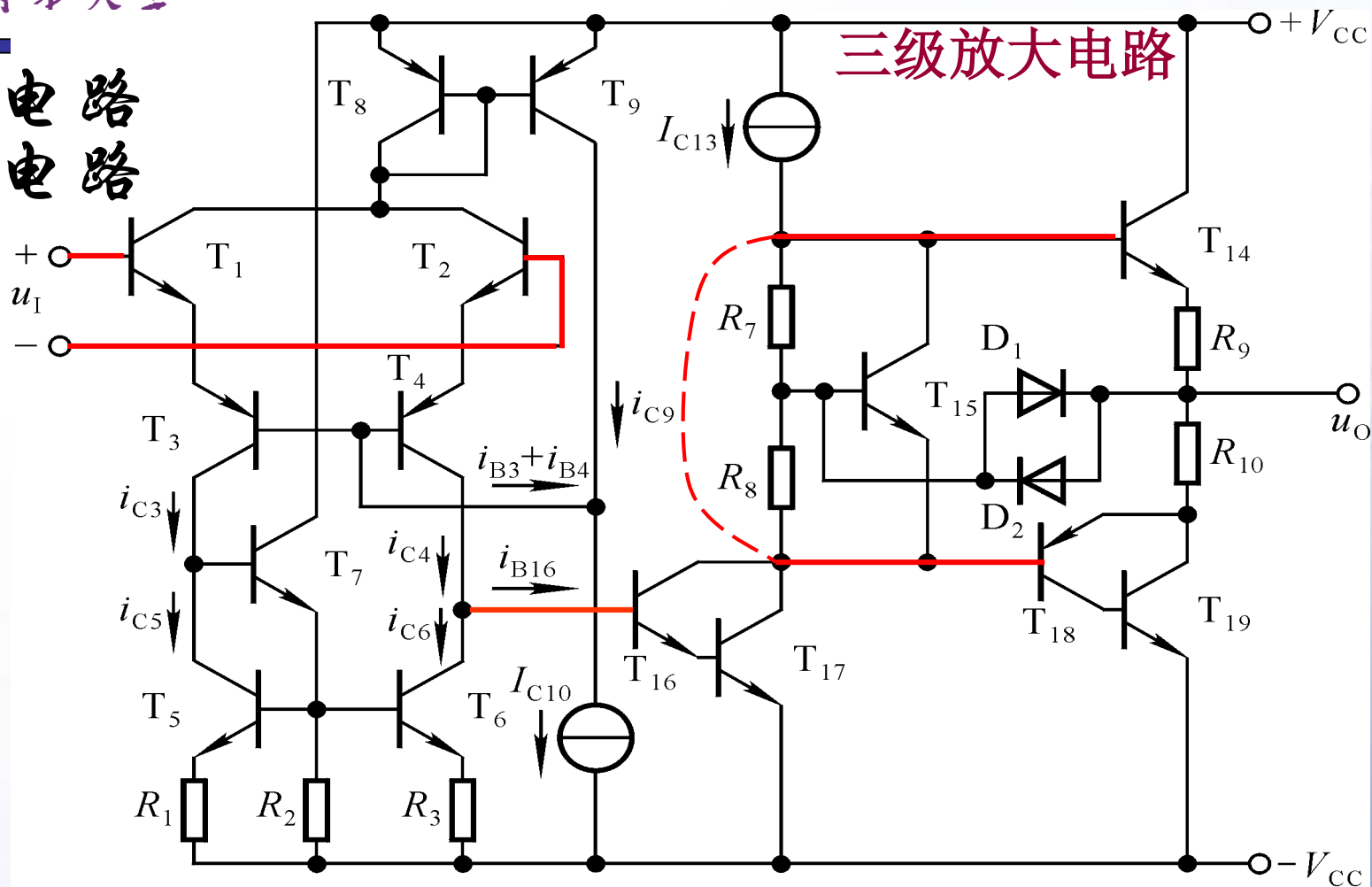


若在集成运放电路中能够估算出某一支路的电流，则这个电流往往是偏置电路中的基准电流。





# 简化电路分解电路



双端输入、单端输出差分放大电路

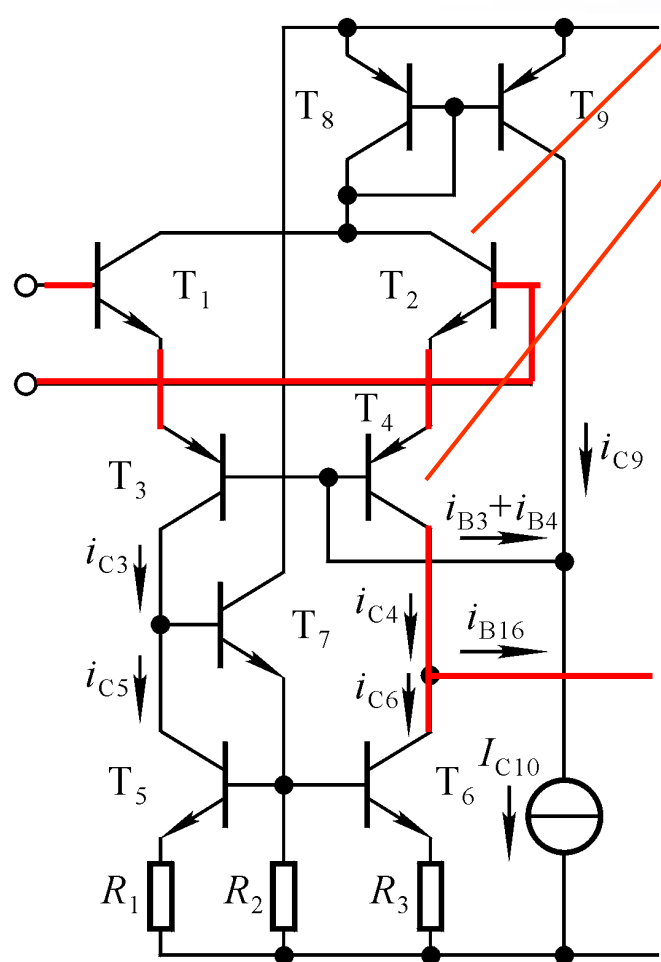
以复合管为放大管、恒流源作负载的共射放大电路

用 $U_{BE}$ 倍增电路消除交越失真的准互补输出级





## 输入级的分析



共集-共基形式

$T_1$ 和 $T_2$ 从基极输入、射极输出

$T_3$ 和 $T_4$ 从射极输入、集电极输出

$T_3$ 、 $T_4$ 为横向PNP型管，输入端耐压高。共集形式，输入电阻大，允许的共模输入电压幅值大。共基形式频带宽。

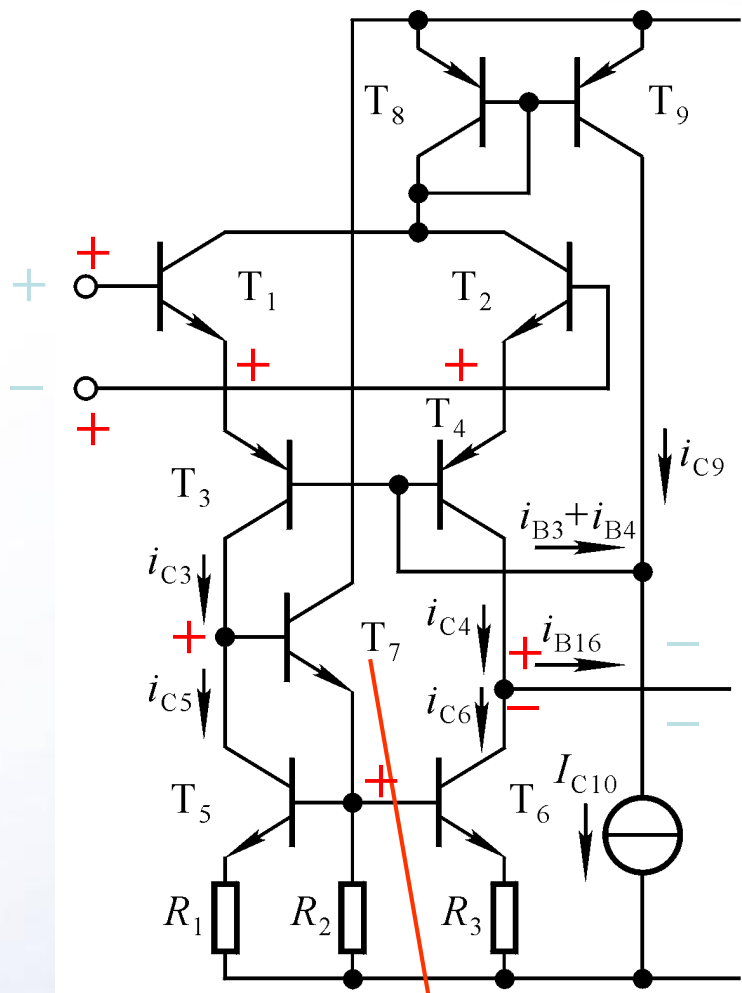
**Q点的稳定:**

$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_{C1} \uparrow I_{C2} \uparrow \rightarrow I_{C8} \uparrow$   
 $I_{C9}$ 与 $I_{C8}$ 为镜像关系  $\rightarrow I_{C9} \uparrow$ , 因  
 $I_{C10}$ 不变  $\rightarrow I_{B3} \downarrow I_{B4} \downarrow \rightarrow I_{C3} \downarrow$   
 $I_{C4} \downarrow \rightarrow I_{C1} \downarrow I_{C2} \downarrow$





## 输入级的分析



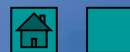
作用?

$T_7$ 的作用：抑制共模信号  
放大差模信号

$T_5$ 、 $T_6$ 分别是 $T_3$ 、 $T_4$ 的有源负载，而 $T_4$ 又是 $T_6$ 的有源负载，增大电压放大倍数。

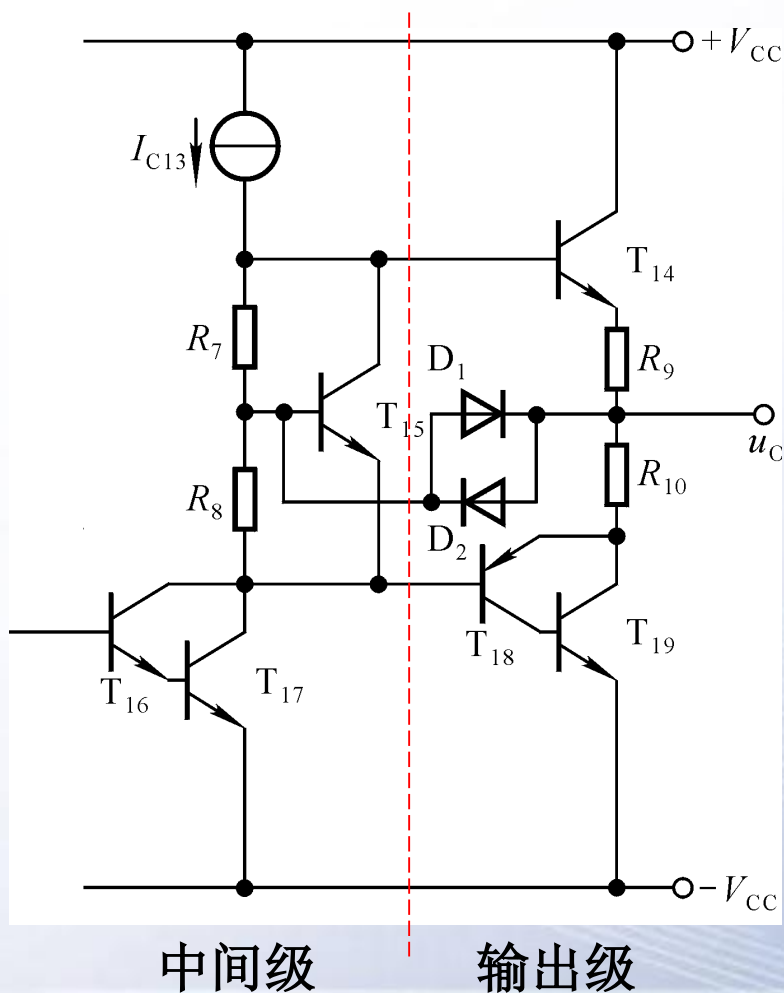
特点：

输入电阻大、差模放大倍数大、  
共模放大倍数小、输入端耐压高，  
并完成电平转换（即对“地”输出）。





## 中间级的分析



中间级是主放大器，它所采取的一切措施都是为了增大放大倍数。

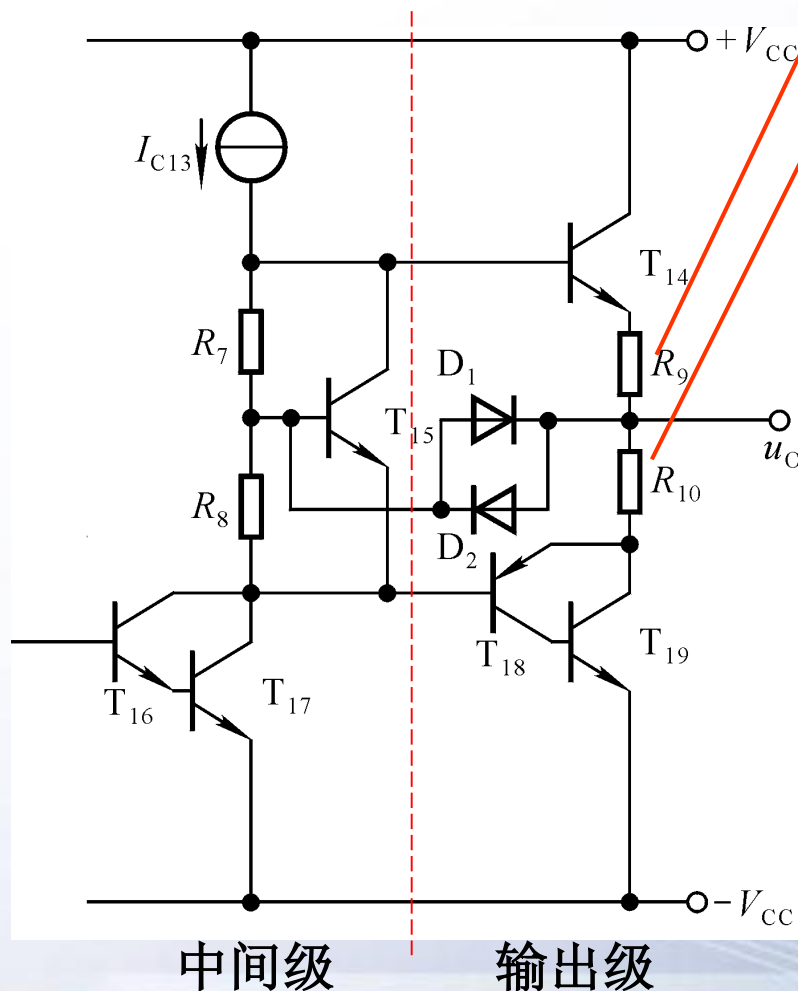
F007的中间级是以复合管为放大管、采用有源负载的共射放大电路。由于等效的集电极电阻趋于无穷大，故动态电流几乎全部流入输出级。





## 输出级的分析

准互补输出级， $U_{BE}$  倍增电路消除交越失真。



电流采样电阻

$D_1$ 和 $D_2$ 起过流保护作用，未过流时，两只二极管均截止。

$$U_{D1} = U_{BE14} + i_O R_9 - U_{R7}$$

$i_O$ 增大到一定程度， $D_1$ 导通，为 $T_{14}$ 基极分流，从而保护了 $T_{14}$ 。

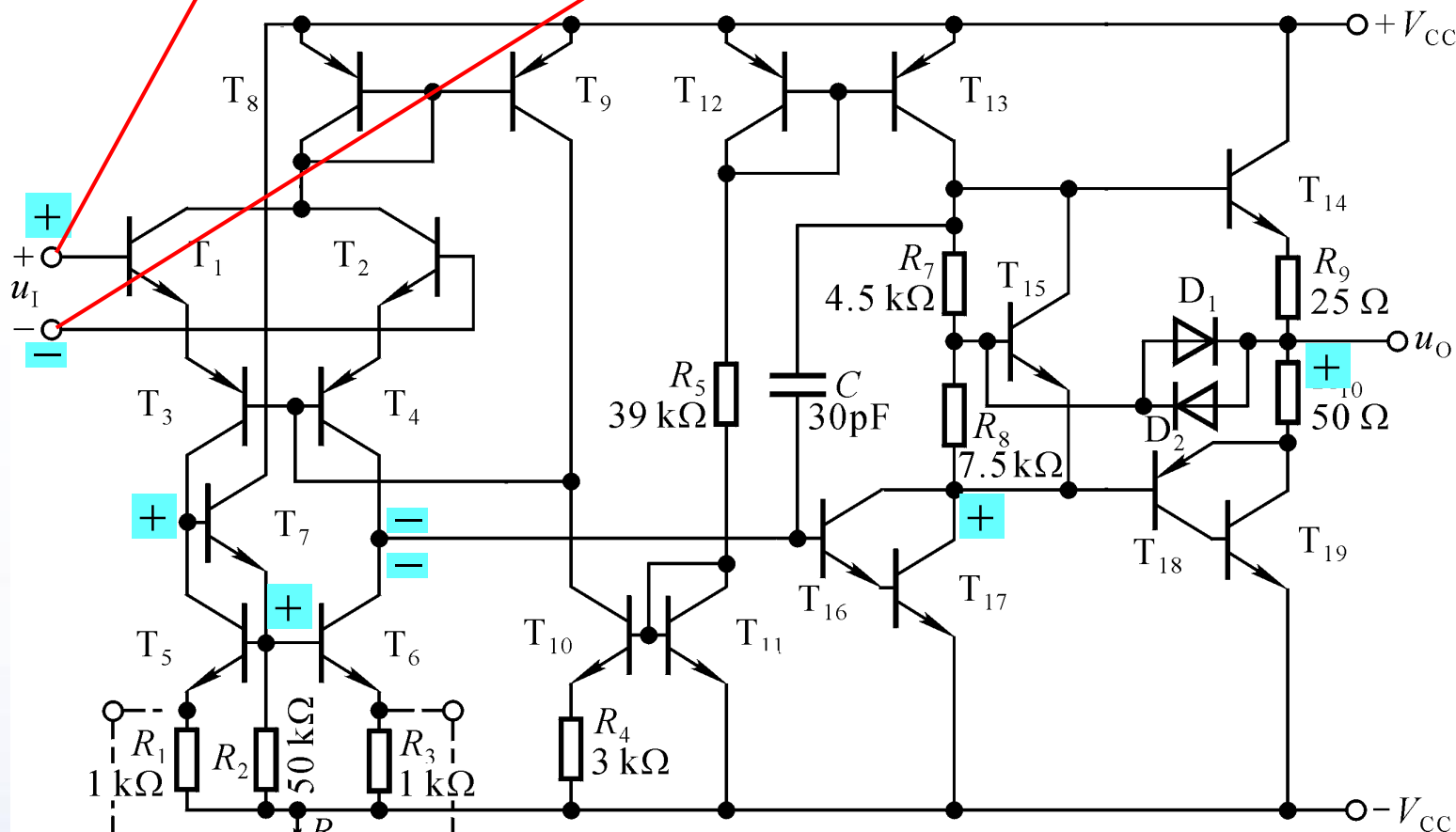
特点：

输出电阻小

最大不失真输出电压高



## 判断同相输入端和反相输入端



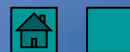
输入电阻大、差模增益大、输出电阻小、共模抑制能力强、允许的共模输入电压高、输入端耐压高等。





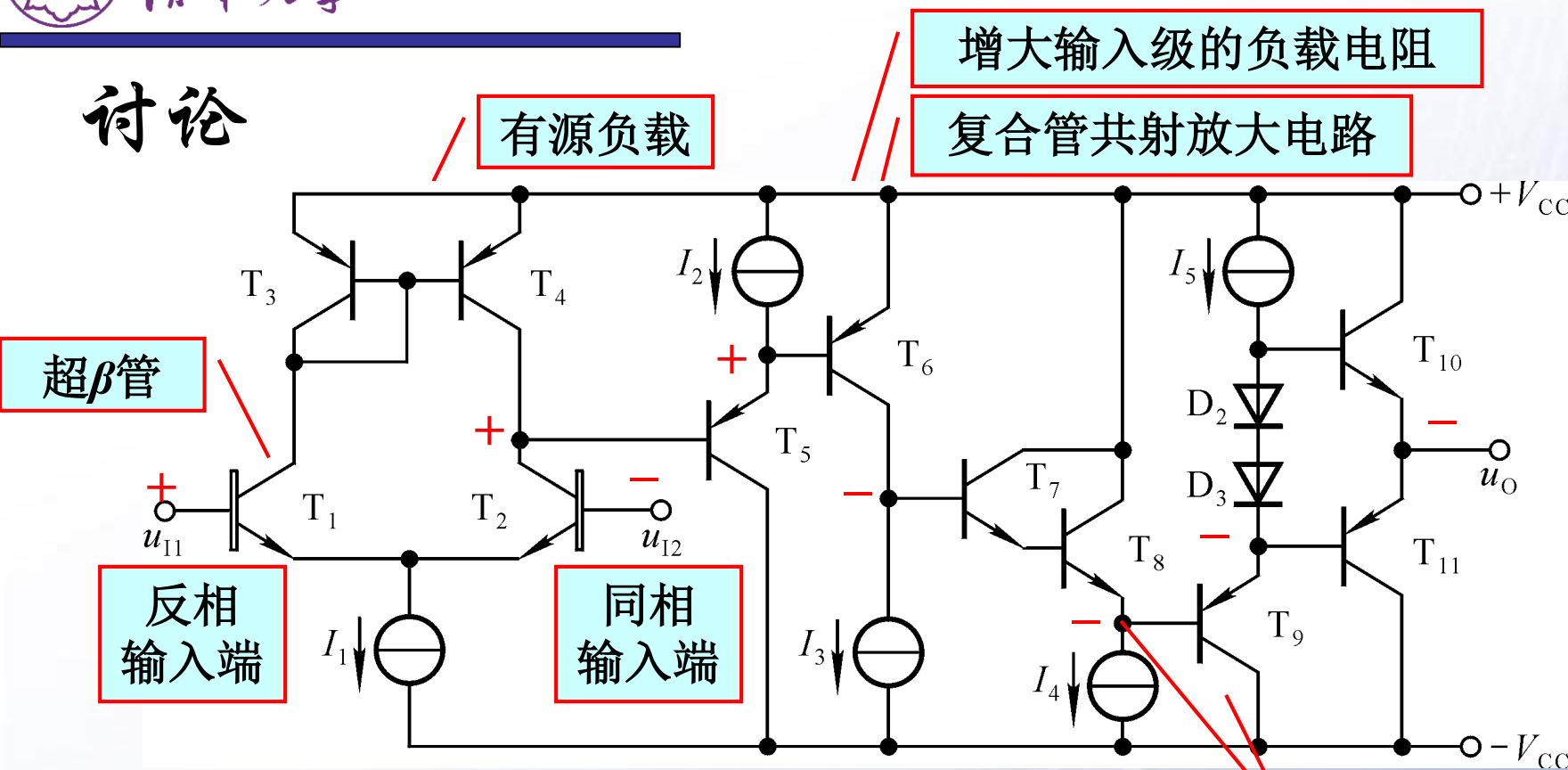
### 三、集成运放的主要性能指标

指标参数	$20\lg  A_{od} $	F007典型值	理想值
• 开环差模增益 $A_{od}$		106dB	$\infty$
• 差模输入电阻 $r_{id}$	使 $u_O$ 为0在输入端所加的补偿电压		
• 共模抑制比 $K_{CMR}$		90dB	$\infty$
• 输入失调电压 $U_{IO}$		1mV	0
• $U_{IO}$ 的温漂 $dU_{IO}/dT(^{\circ}C)$		几 $\mu V/^{\circ}C$	0
• 输入失调电流 $I_{IO} ( I_{B1} - I_{B2} )$	超过此值不能正常放大差模信号		
• $U_{IO}$ 的温漂 $dU_{IO}/dT(^{\circ}C)$			
• 最大共模输入电压 $U_{Icmax}$	超过此值输入级放大管击穿		
• 最大差模输入电压 $U_{Idmax}$		$\pm 30V$	
• -3dB带宽 $f_H$		10Hz	$\infty$
• 转换速率 $SR(=du_O/dt _{max})$		0.5V/ $\mu S$	$\infty$





# 讨论



增大输入级的负载电阻

复合管共射放大电路

有源负载

超 $\beta$ 管

反相  
输入端

同相  
输入端

积累电流放大  
系数

1. 输入级采用什么措施增大放大倍数？
2. 中间级采用什么措施增大电压放大倍数？
3. 如何消除交越失真？
4.  $u_{I1}$ 、 $u_{I2}$  哪个是同相输入端？哪个是反相输入端？

