

The image shows the facade of a classical building, likely a part of Tsinghua University. The building features a prominent portico with columns and a pediment. The Chinese characters '清華學堂' (Qinghua University) are inscribed on the pediment. The building is surrounded by trees, and the overall scene is bathed in a warm, golden light, suggesting a sunset or sunrise.

清華學堂

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

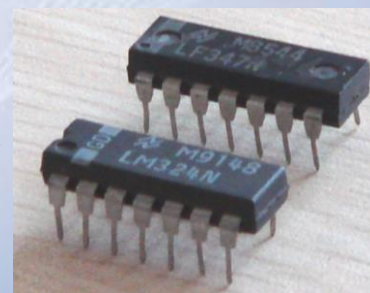
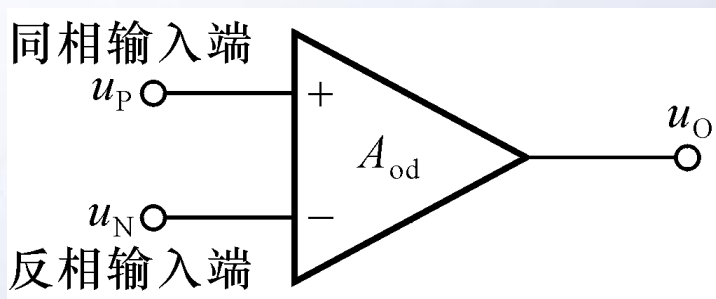
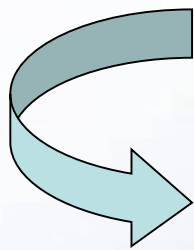
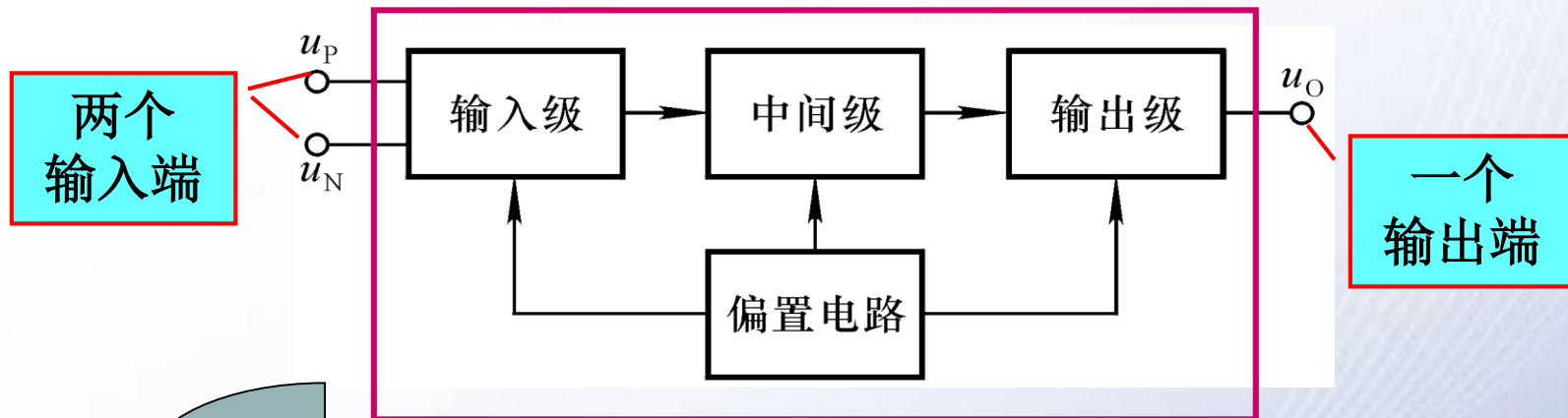
集成运算放大电路，简称集成运放，是一个高性能的直接耦合多级放大电路。因首先用于信号的运算，故而得名。

- (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。

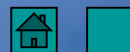




二、集成运放电路的组成

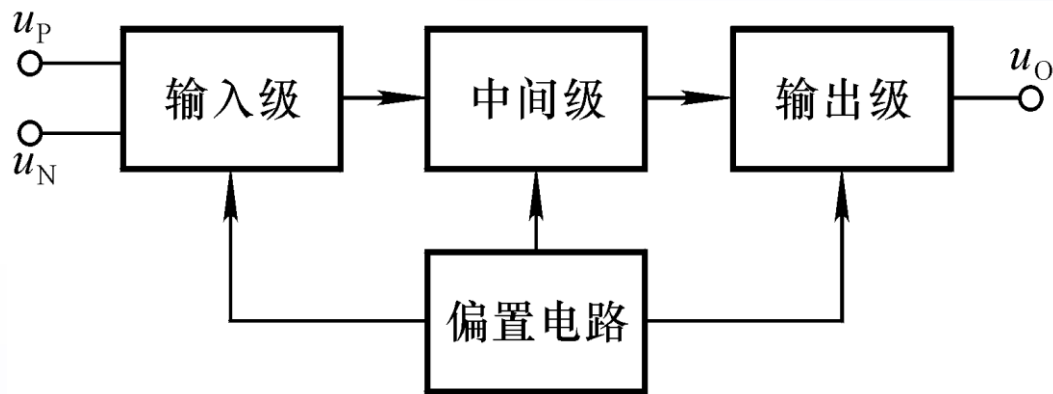


若将集成运放看成为一个“黑盒子”，则可等效为一个双端输入、单端输出的差分放大电路。





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。

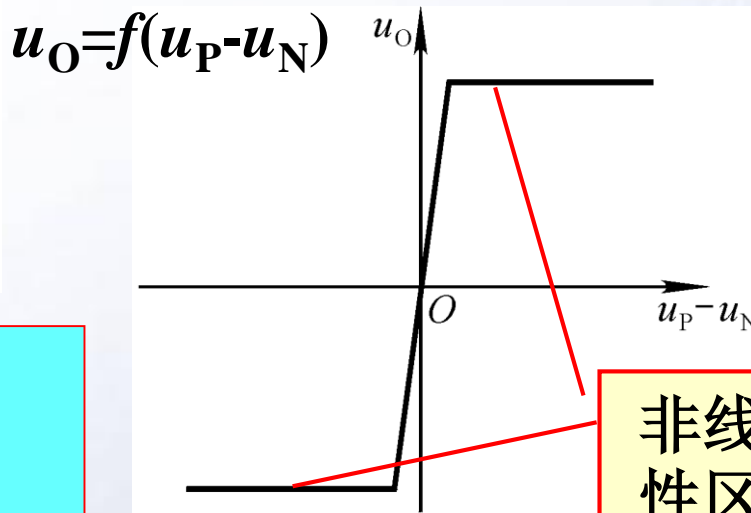
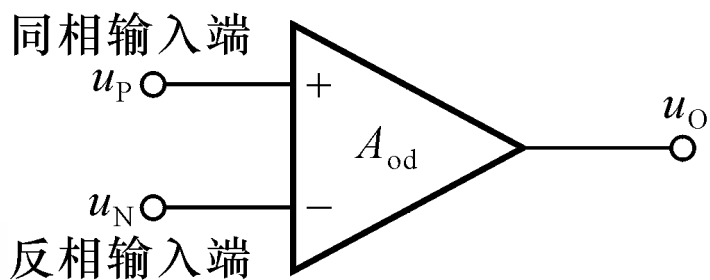
输出级：功率级，多采用准互补输出级。要求 R_o 小，最大不失真输出电压尽可能大。

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



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

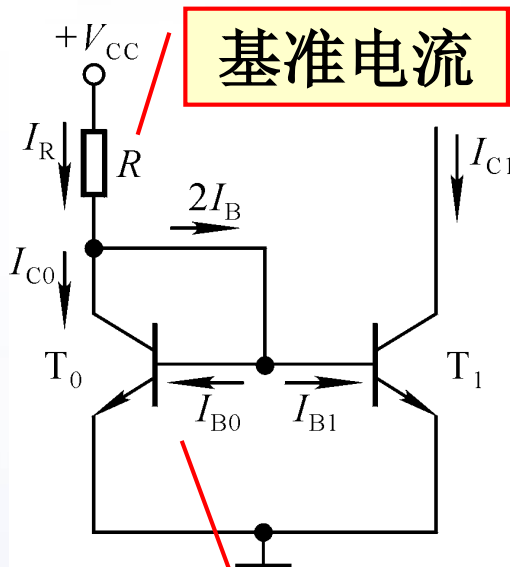




一、镜像电流源

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_0 和 T_1 特性完全相同。



基准电流

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

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

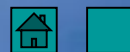
$$I_{C1} = I_{C0} = I_C$$

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

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

电路中有负反馈吗?

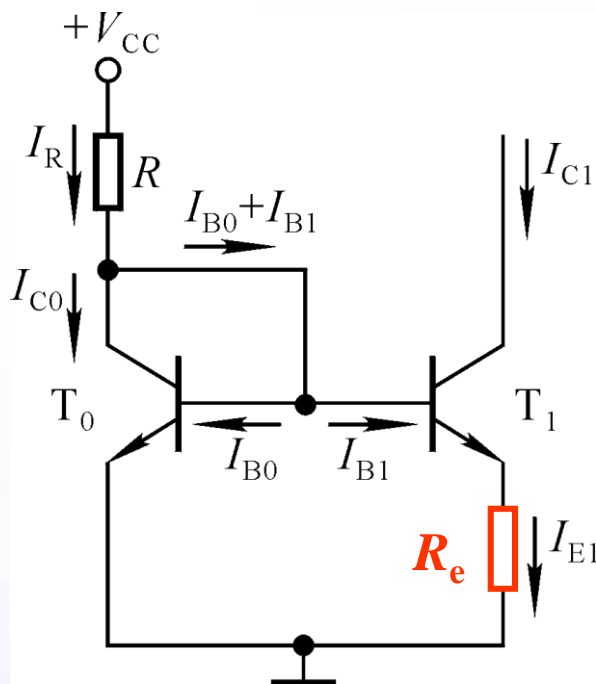
若 $\beta \gg 2$, 则 $I_C \approx I_R$





二、微电流源

要求提供很小的静态电流，又不能用电阻。



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

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

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

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

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

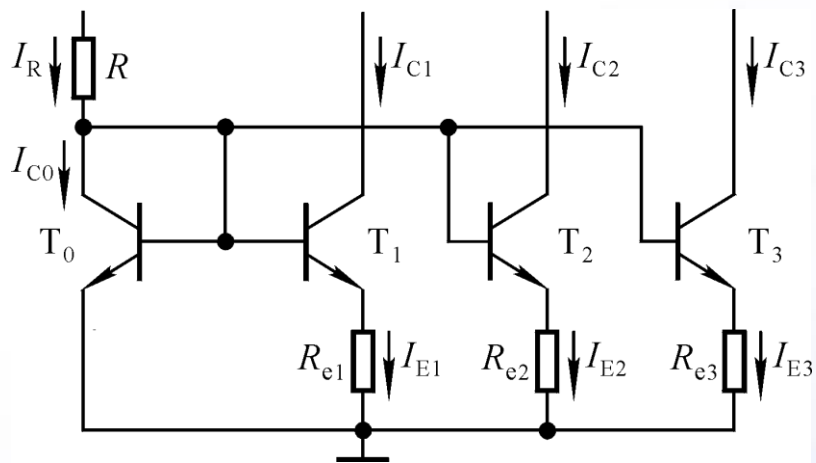
超越方程

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

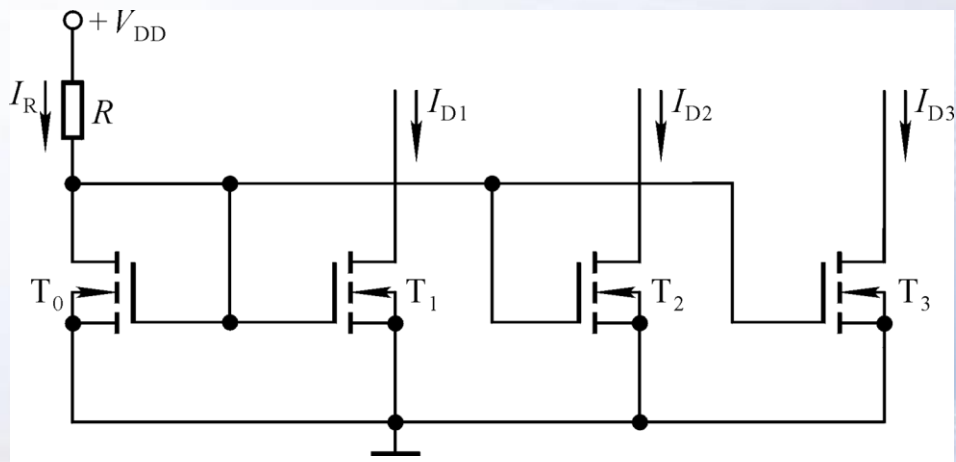




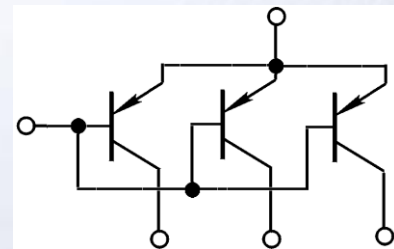
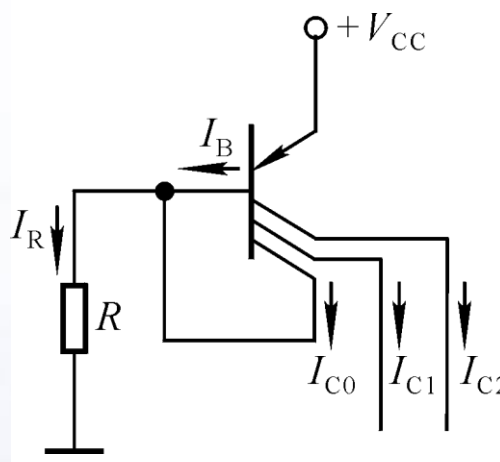
三、多路电流源



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，来确定沟道尺寸。



根据所需静态电流，来确定集电结面积。

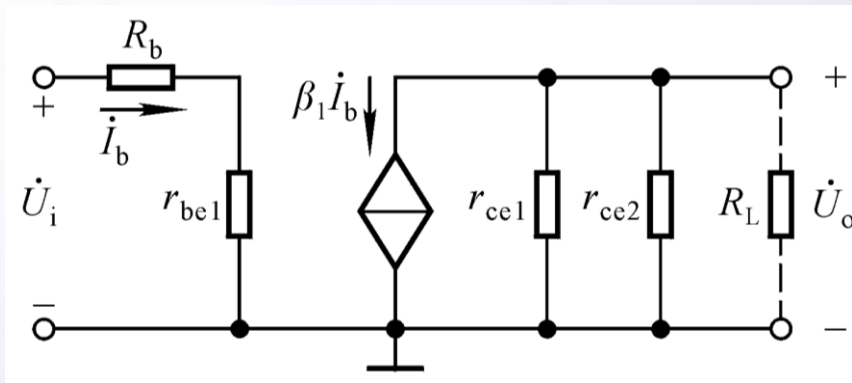
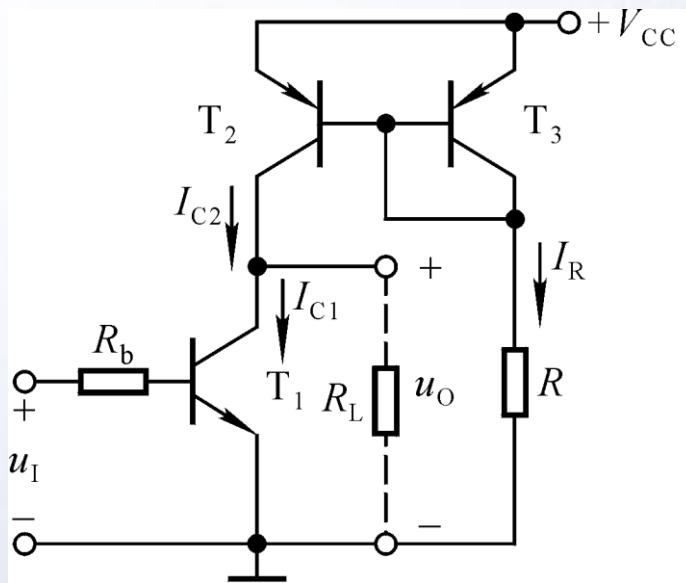




四、有源负载

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？



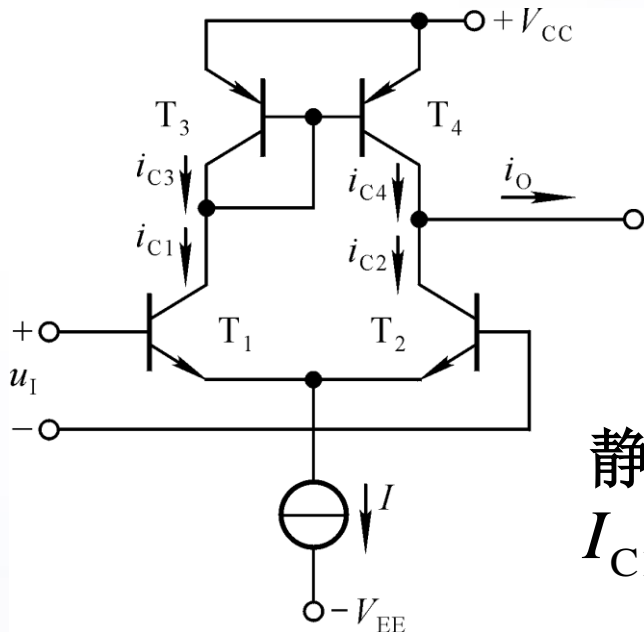
④为什么要考虑 h_{22} ?

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





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 Δi_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。

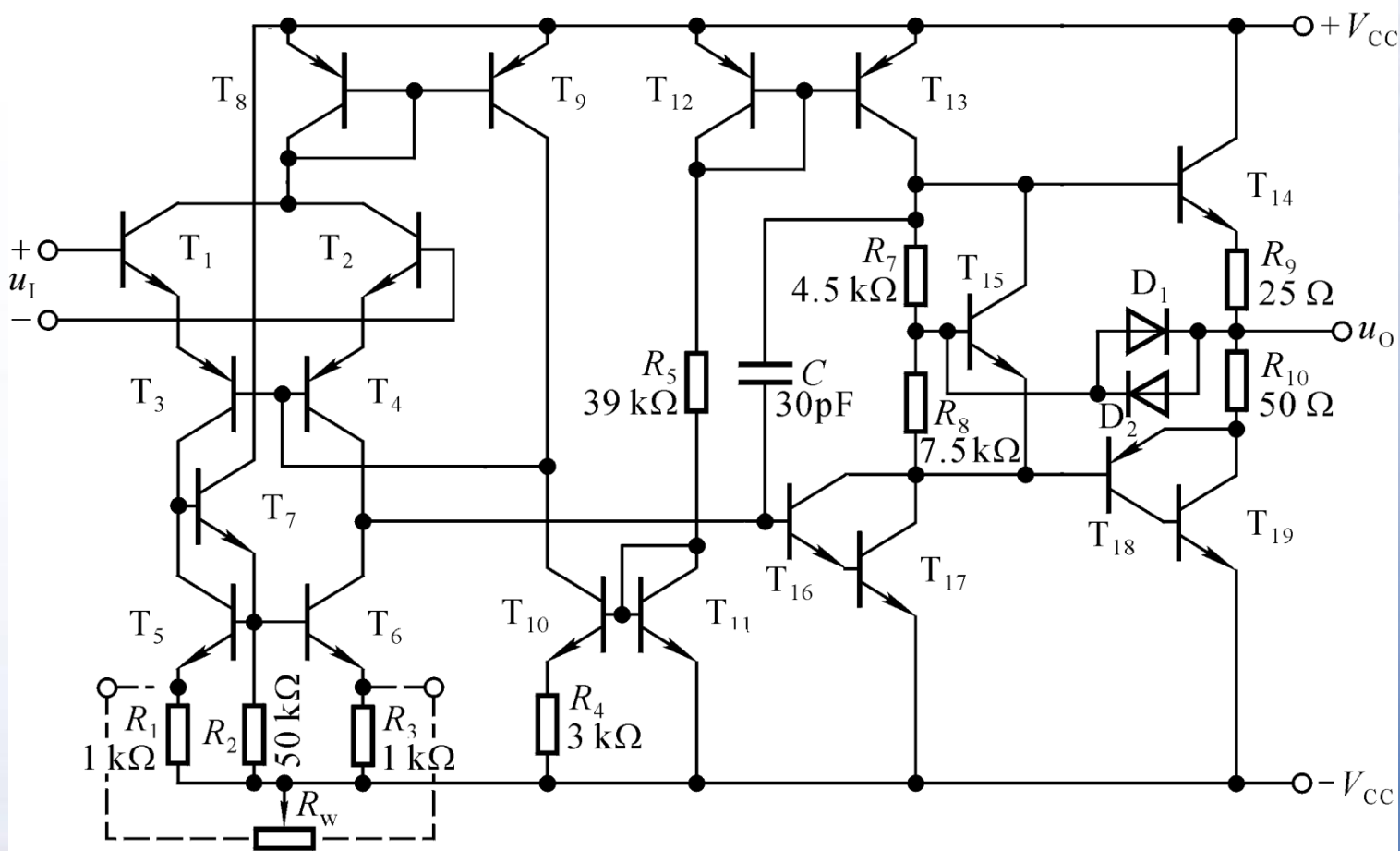
- (1) **了解用途：** 了解要分析的电路的应用场合、用途和技术指标。
- (2) **化整为零：** 将整个电路图分为各自具有一定功能的基本电路。
- (3) **分析功能：** 定性分析每一部分电路的基本功能和性能。
- (4) **统观整体：** 电路相互连接关系以及连接后电路实现的功能和性能。
- (5) **定量计算：** 必要时可估算或利用计算机计算电路的主要参数。





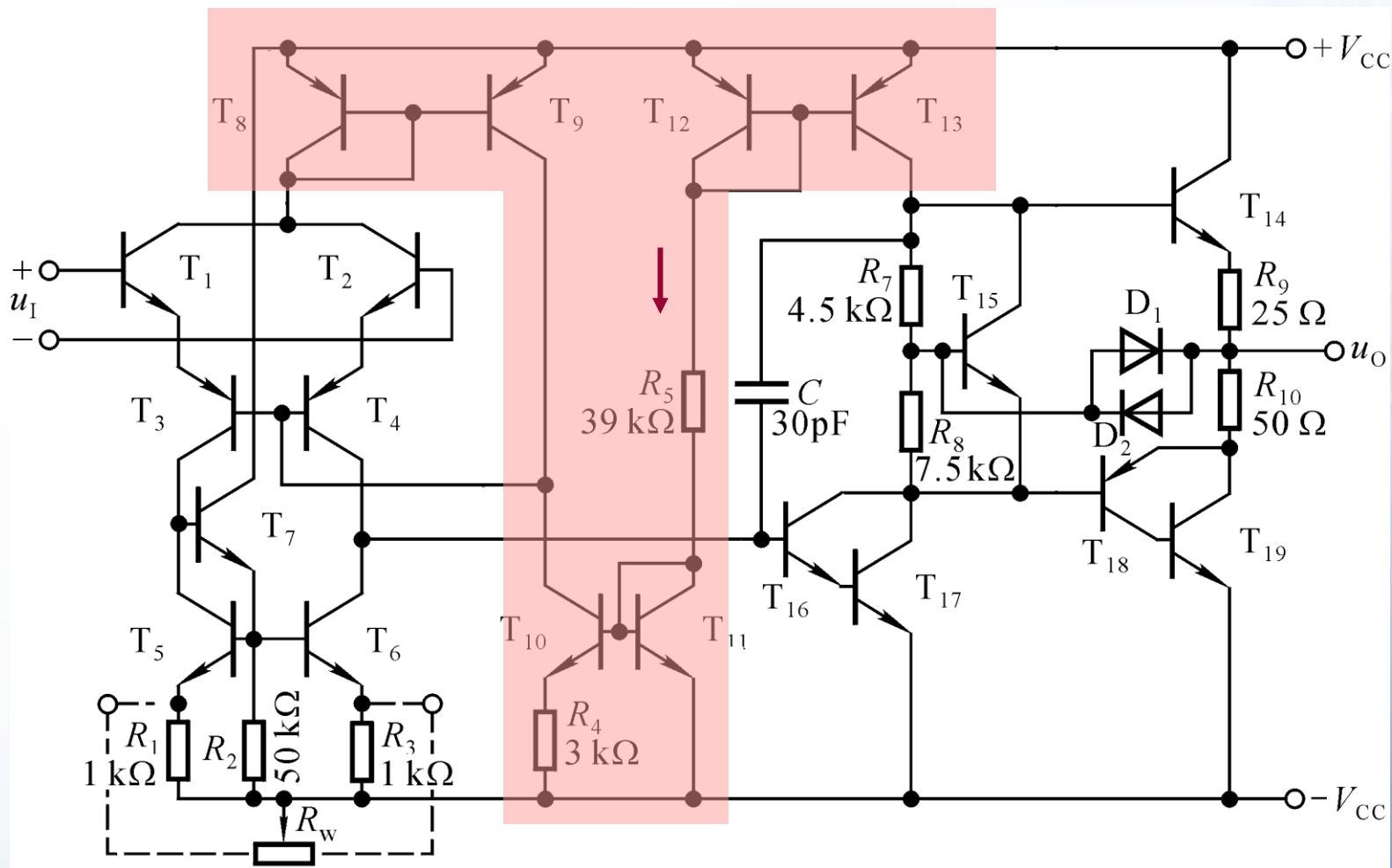
二、 举例： F007——通用型集成运放

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。

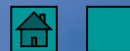




找出偏置电路

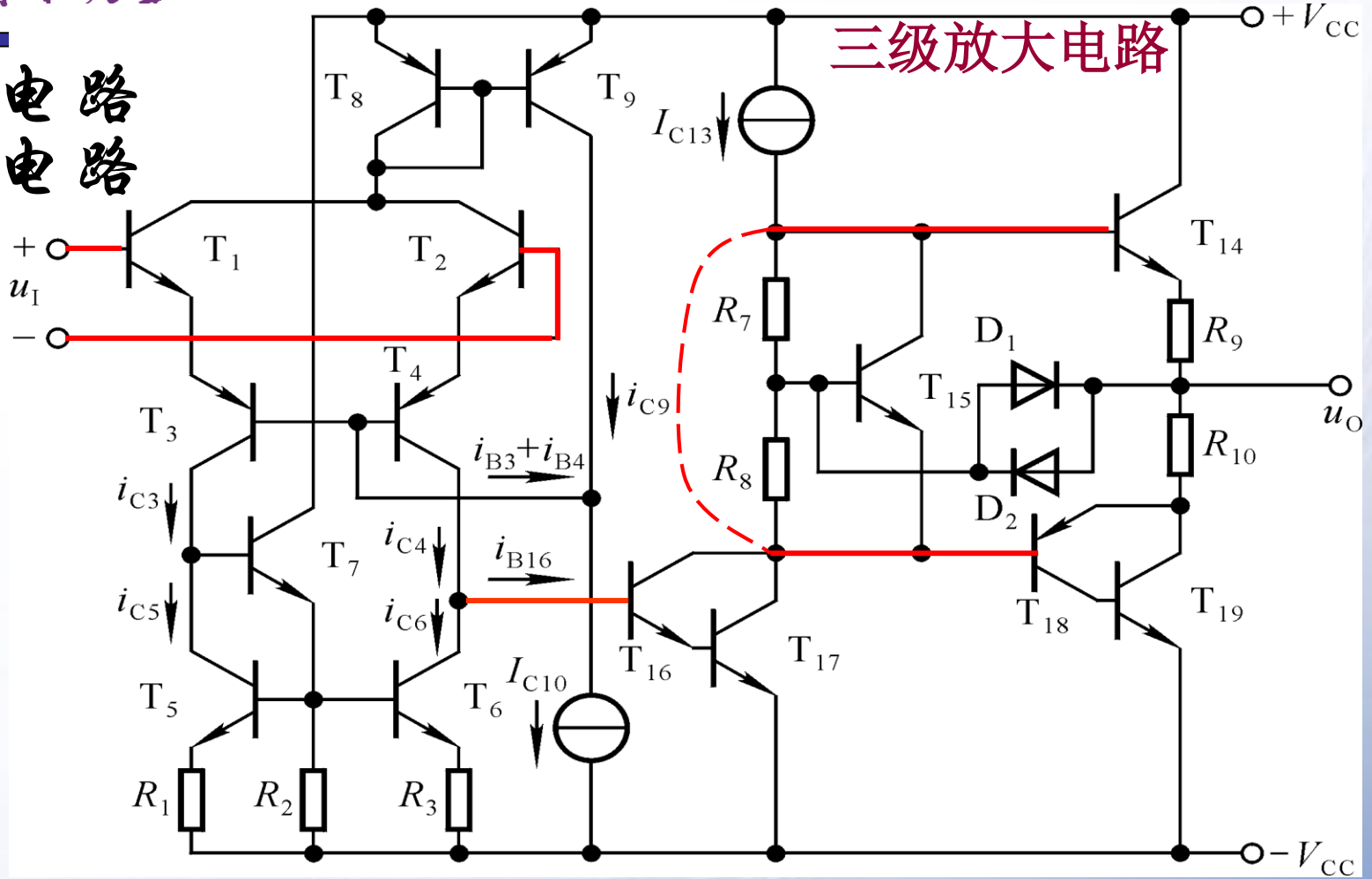


若在集成运放电路中能够估算出某一支路的电流，则这个电流往往是偏置电路中的基准电流。





简化电路分解



三级放大电路

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

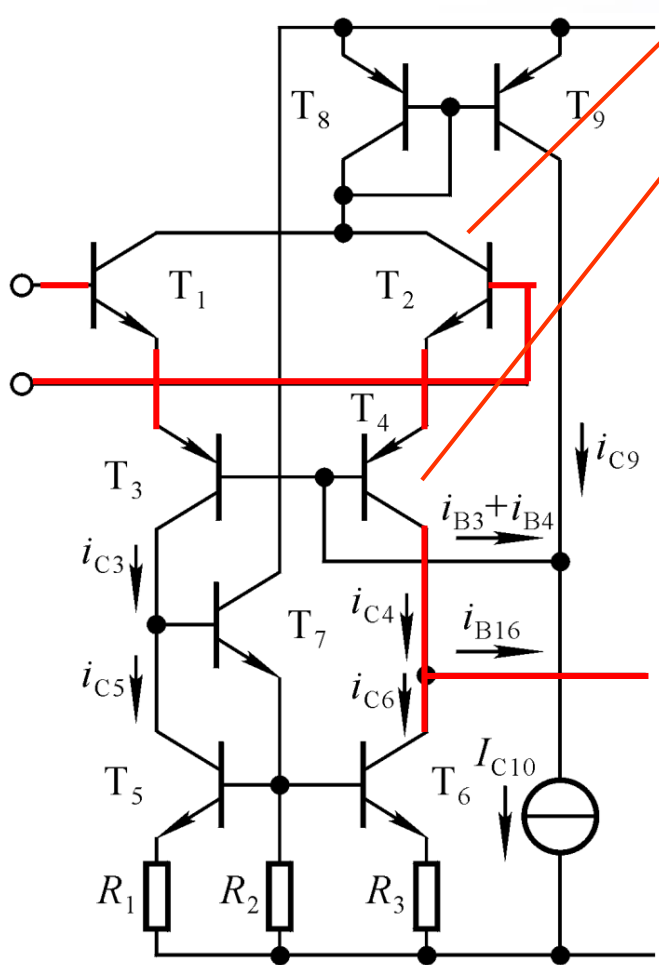


输入级的分析

共集-共基形式

T₁和T₂从基极输入、射极输出

T₃和T₄从射极输入、集电极输出



T₃、T₄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。

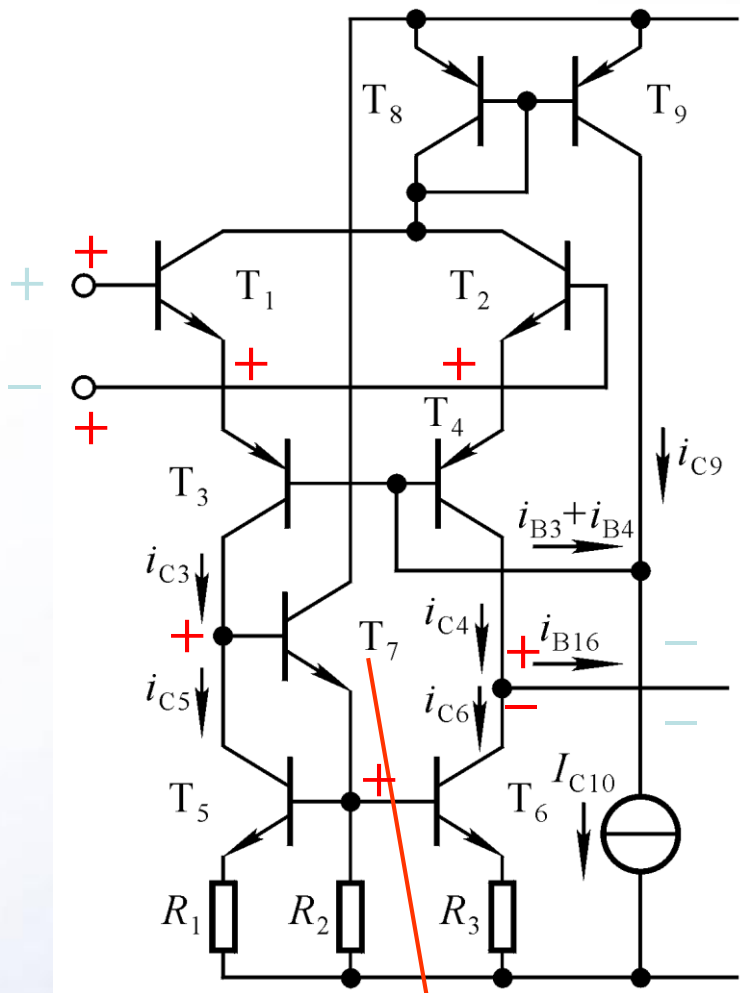
Q点的稳定:

$T (\text{°C}) \uparrow \rightarrow I_{C1} \uparrow I_{C2} \uparrow \rightarrow I_{C8} \uparrow$
 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?

T₇的作用：抑制共模信号
放大差模信号

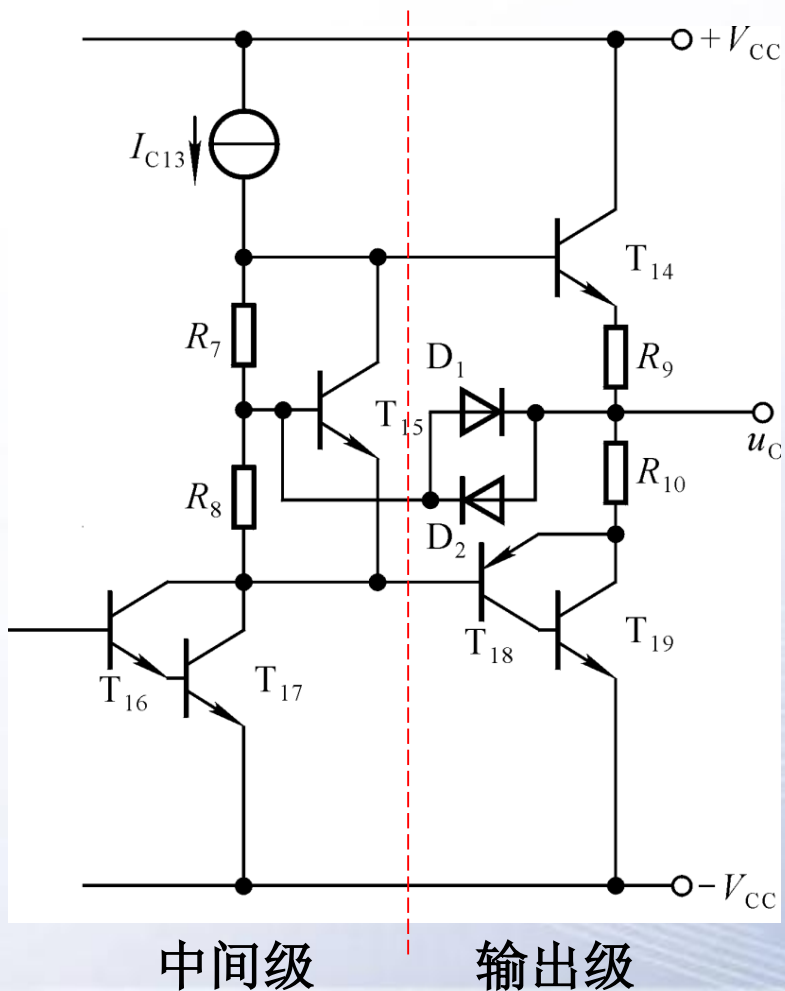
T₅、T₆分别是T₃、T₄的有源负载，而T₄又是T₆的有源负载，增大电压放大倍数。

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。

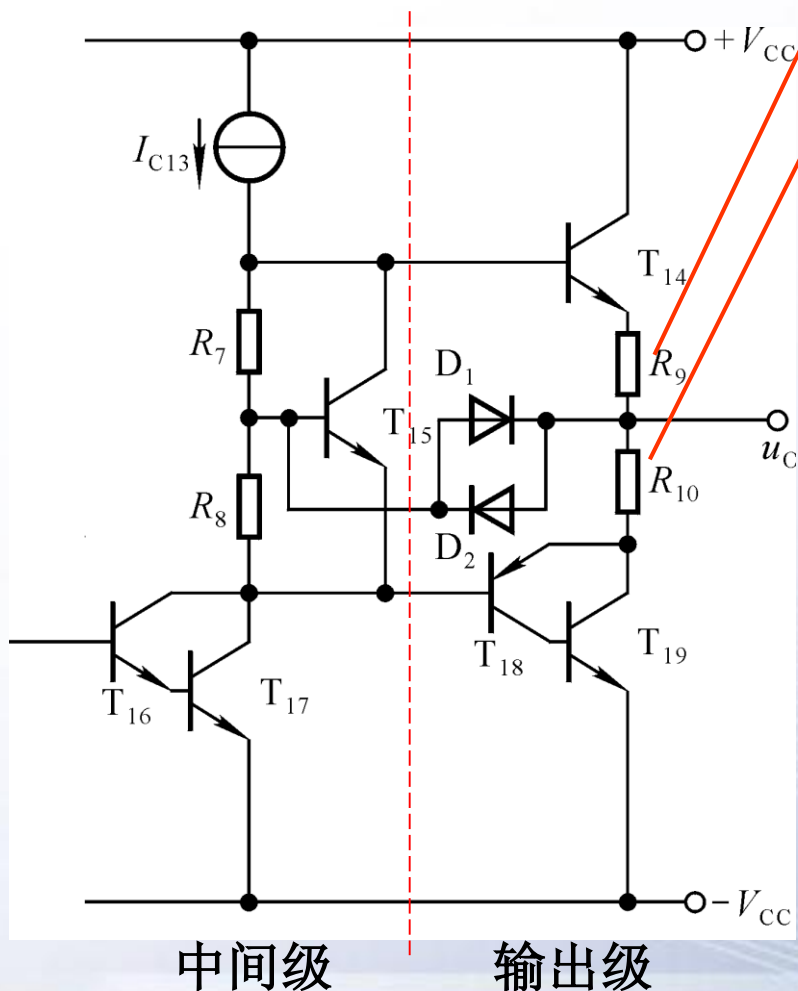
F007的中间级是以复合管为放大管、采用有源负载的共射放大电路。由于等效的集电极电阻趋于无穷大，故动态电流几乎全部流入输出级。





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。

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

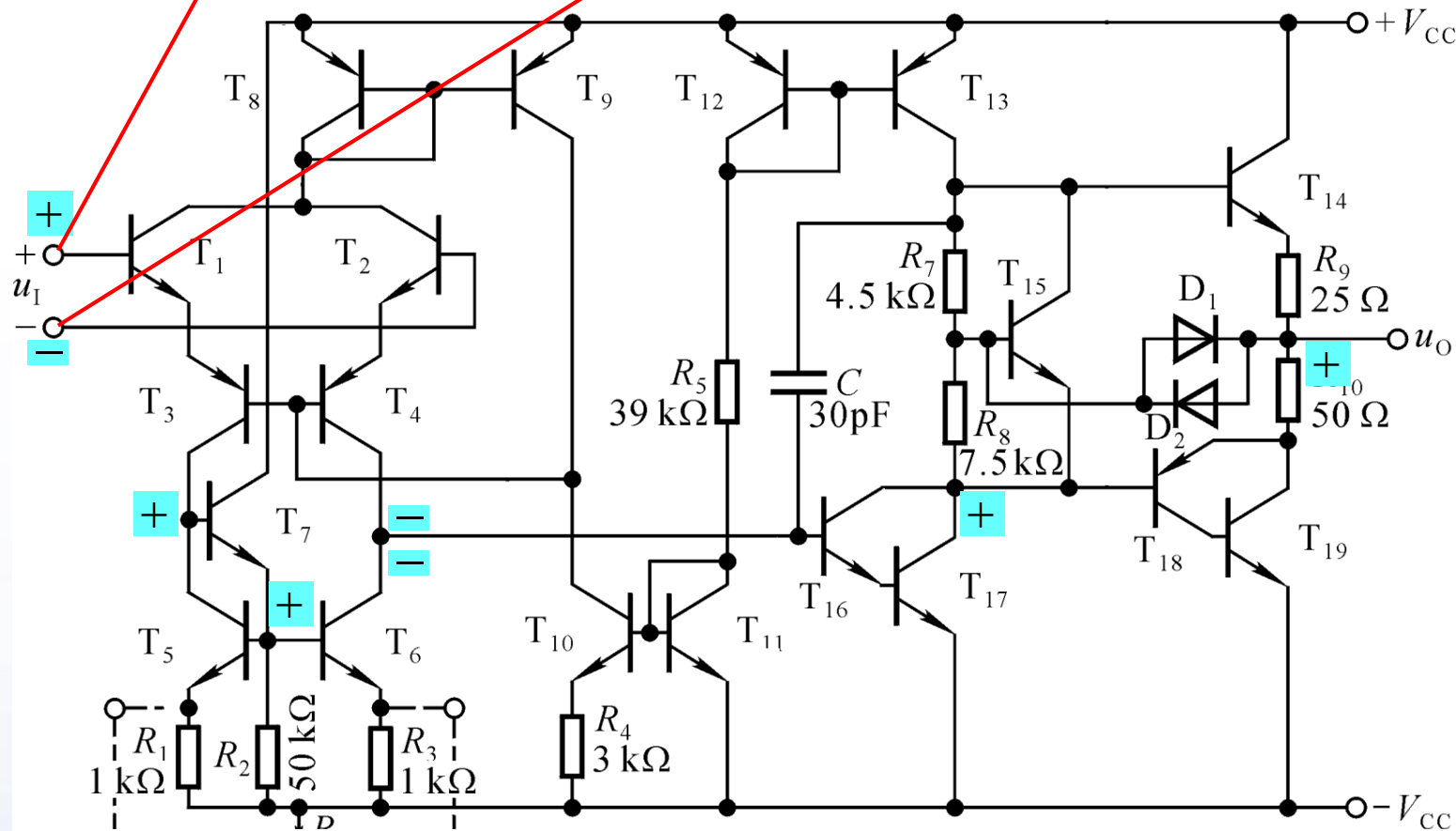
i_O 增大到一定程度， D_1 导通，为 T_{14} 基极分流，从而保护了 T_{14} 。

- 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。





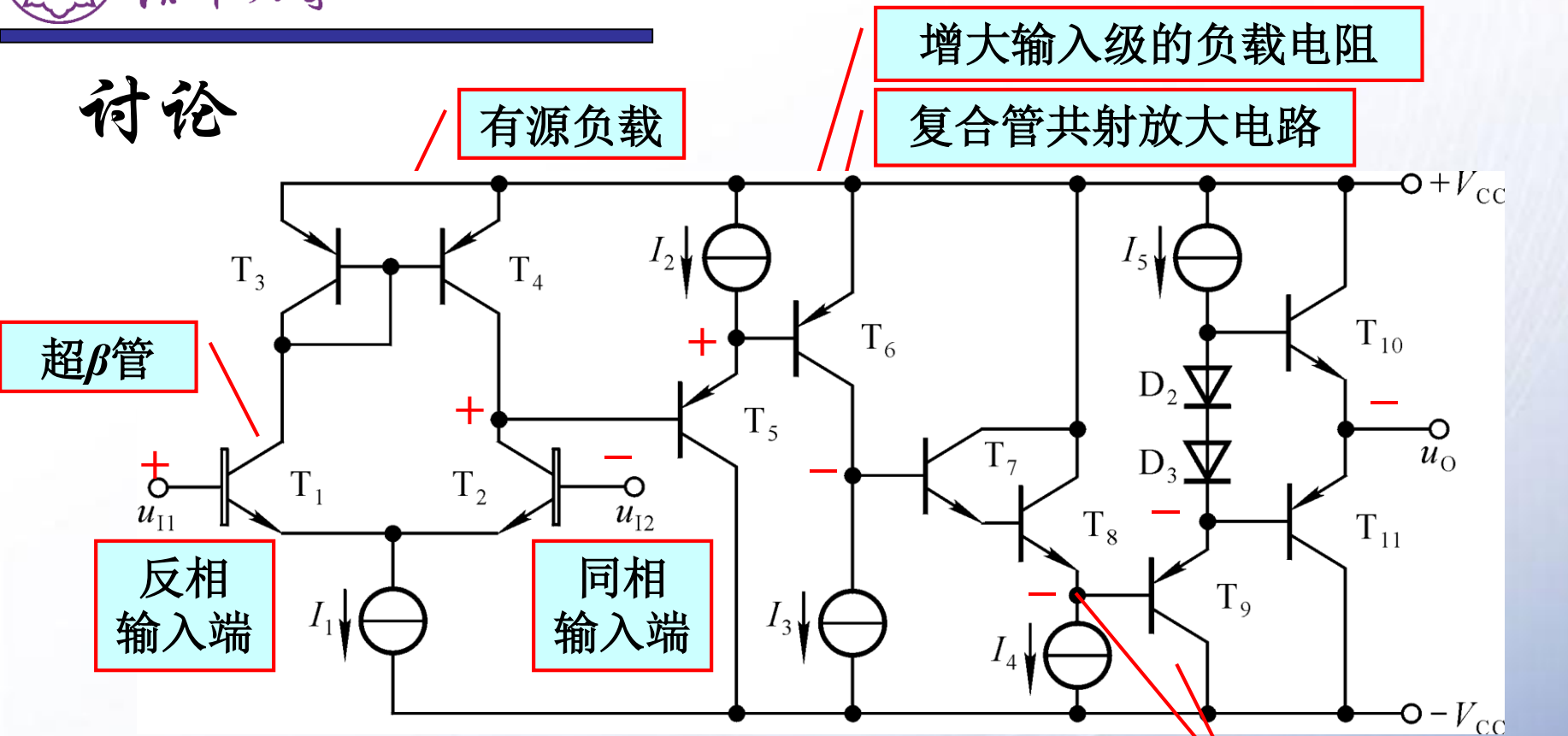
三、集成运放的主要性能指标

指标参数	$20\lg A_{od} $	F007典型值	理想值
• 开环差模增益 A_{od}		106dB	∞
• 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	∞
• 输入失调电压 U_{IO}		1mV	0
• U_{IO} 的温漂 $d U_{IO}/dT(^{\circ}C)$		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 $d U_{IO}/dT(^{\circ}C)$			
• 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	∞
• 转换速率 $SR(=du_O/dt _{max})$		0.5V/ μS	∞





讨论



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_{I3} 哪个是同相输入端? 哪个是反相输入端?

积累电流放大系数

