

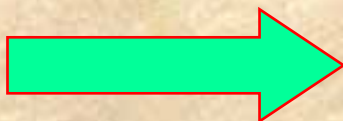
6.3 集成电路运算放大器

6.3.1 简单的集成电路运算放大器

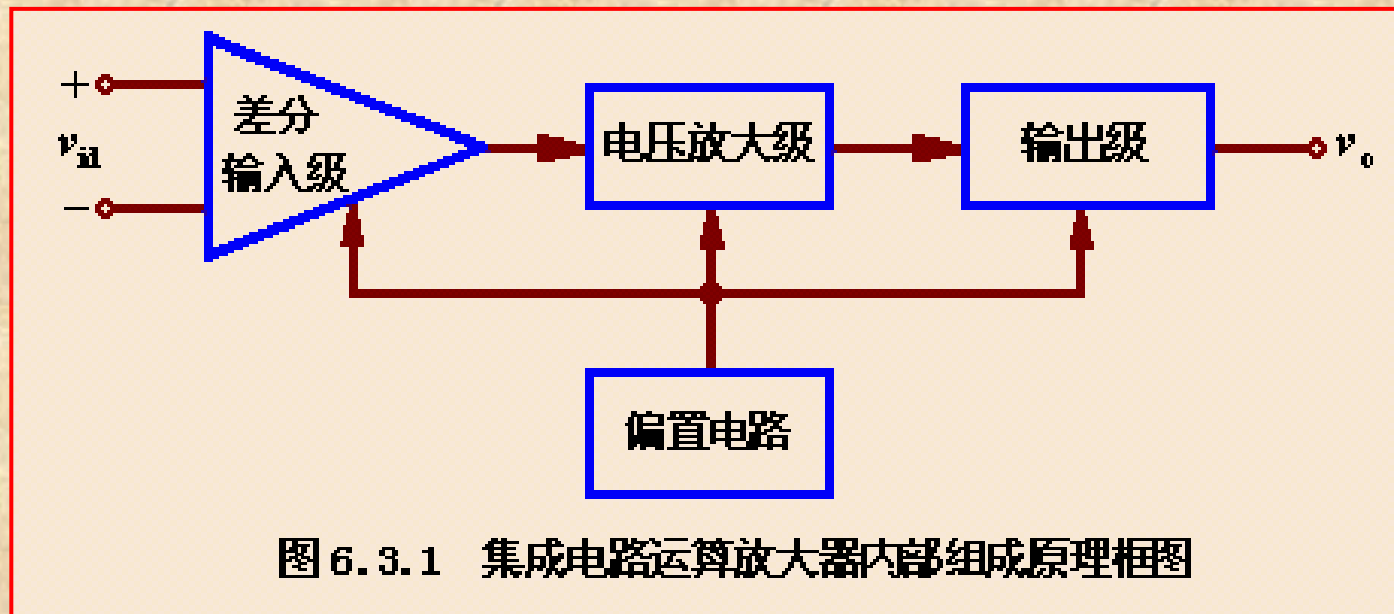
6.3.2 通用型集成电路运算放大器

6.3.1 简单的集成电路运算放大器

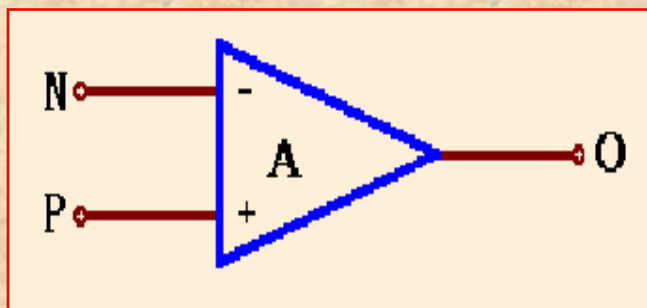
集成电路
运算放大器



直接耦合
多级放大电路



符号：



- 特点：
- 电压增益高（差模）
 - 输入电阻大
 - 输出电阻小

例题

6.3.1 简单的运算放大器

读图

差分输入级
双入单出

中间放大级
复合管共射

输出级
2级共集

反相端

in

同相端

镜像电流源
输入级偏置

直接耦合
多级放大电路

镜像电流源
 T_5 的偏置

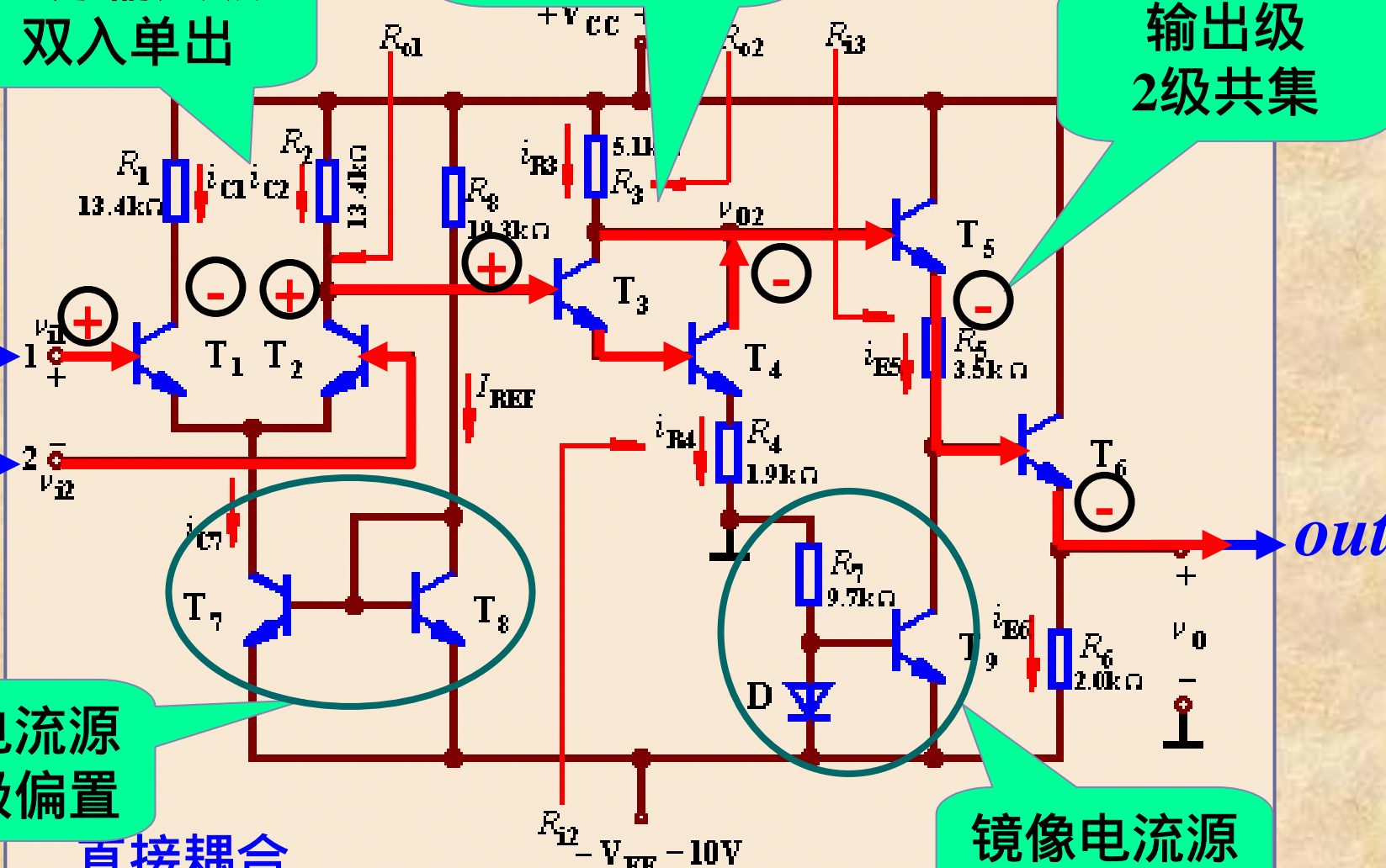


图 6.3.2 简单的运算放大器电路

例6.3.1 (1) 放大电路的直流分析

已知：当 $v_{i1} = v_{i2} = 0$ 时， $v_o = 0$ ； $\beta = 100$ ； $V_{BE} = 0.7V$ 。

• 差分输入级

$$I_{C7} = I_{REF} = \frac{V_{CC} - V_{BE8} - (-V_{EE})}{R_8} = 1\text{mA}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{1}{2} I_{C7} = 0.5\text{mA}$$

$$V_{CE2} \approx (V_{CC} - I_{C2}R_2) - (-0.7V) = 4V$$

• 中间放大级

$$I_{R3} \approx I_{R4} = \frac{(V_{CC} - I_{C2}R_2) - (2V_{BE})}{R_4} = 1\text{mA}$$

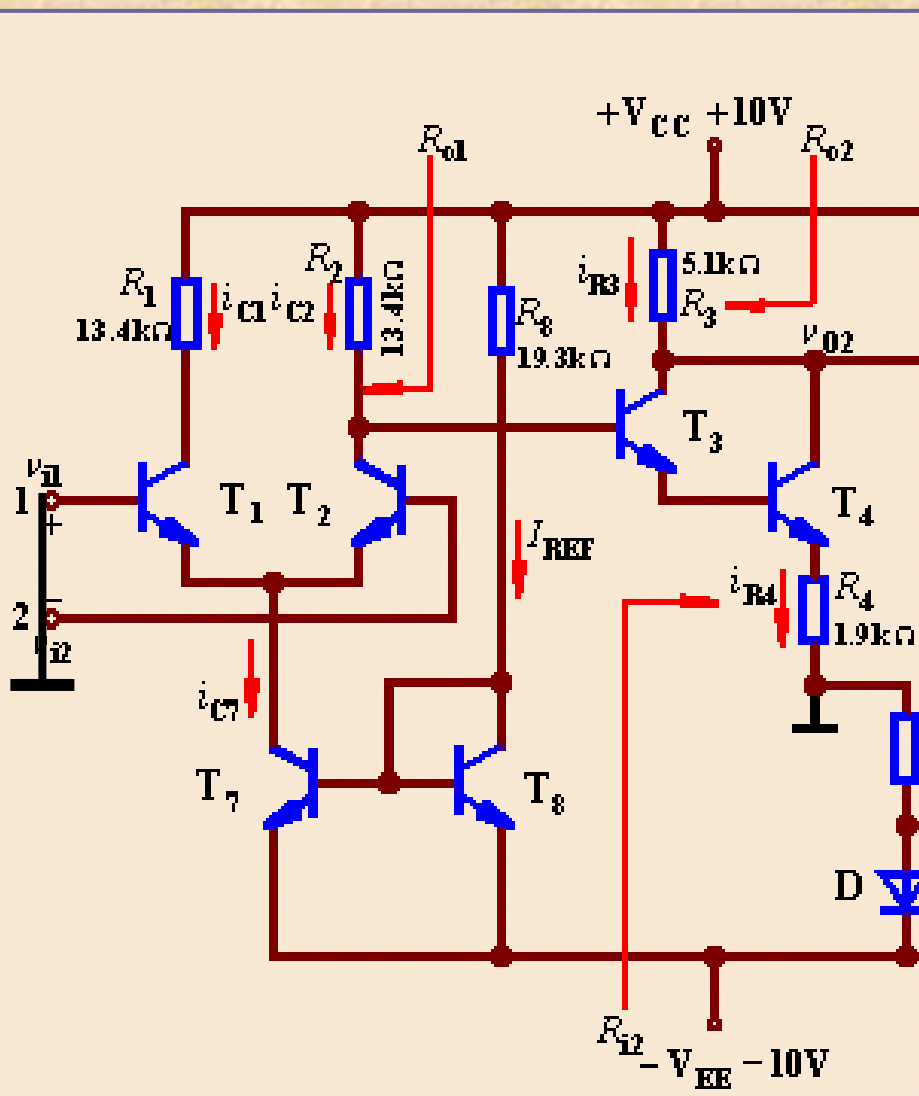
$$I_{R3} = I_{C4} + I_{C3} + I_{B5}$$

$$I_{R4} = I_{C4} + (I_{C3} + I_{B3})$$

$$V_{CE4} = V_{C4} - V_{E4} = 3V$$

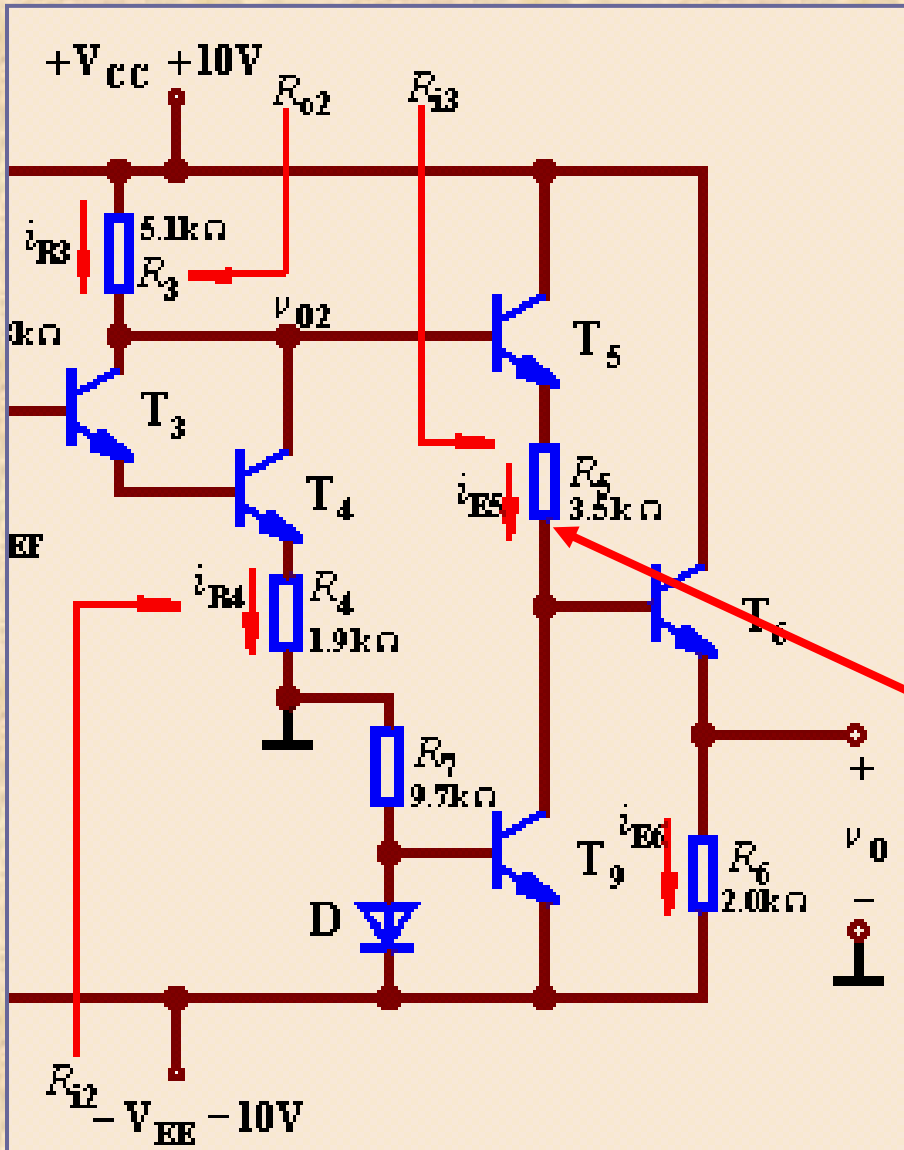
$$= (V_{CC} - I_{R3}R_3) - (V_{CC} - I_{R2}R_2 - 2V_{BE})$$

$$= (V_{CC} - I_{R3}R_3) - I_{R4}R_4$$



例6.3.1 (1) 放大电路的直流分析

已知：当 $v_{i1} = v_{i2} = 0$ 时， $v_o = 0$ ； $\beta = 100$ ； $V_{BE} = 0.7V$ 。



• 输出级

$$I_{E5} = \frac{(V_{CC} - I_{R3}R_3) - V_{BE5} - V_{BE6} - 0}{R_5} = 1\text{mA}$$

$$I_{E5} \approx I_{C9} = I_{R7} = \frac{0 - V_D - (-V_{EE})}{R_7} = 0.96\text{mA}$$

$$I_{E6} = \frac{0 - (-V_{EE})}{R_6} = 5\text{mA}$$

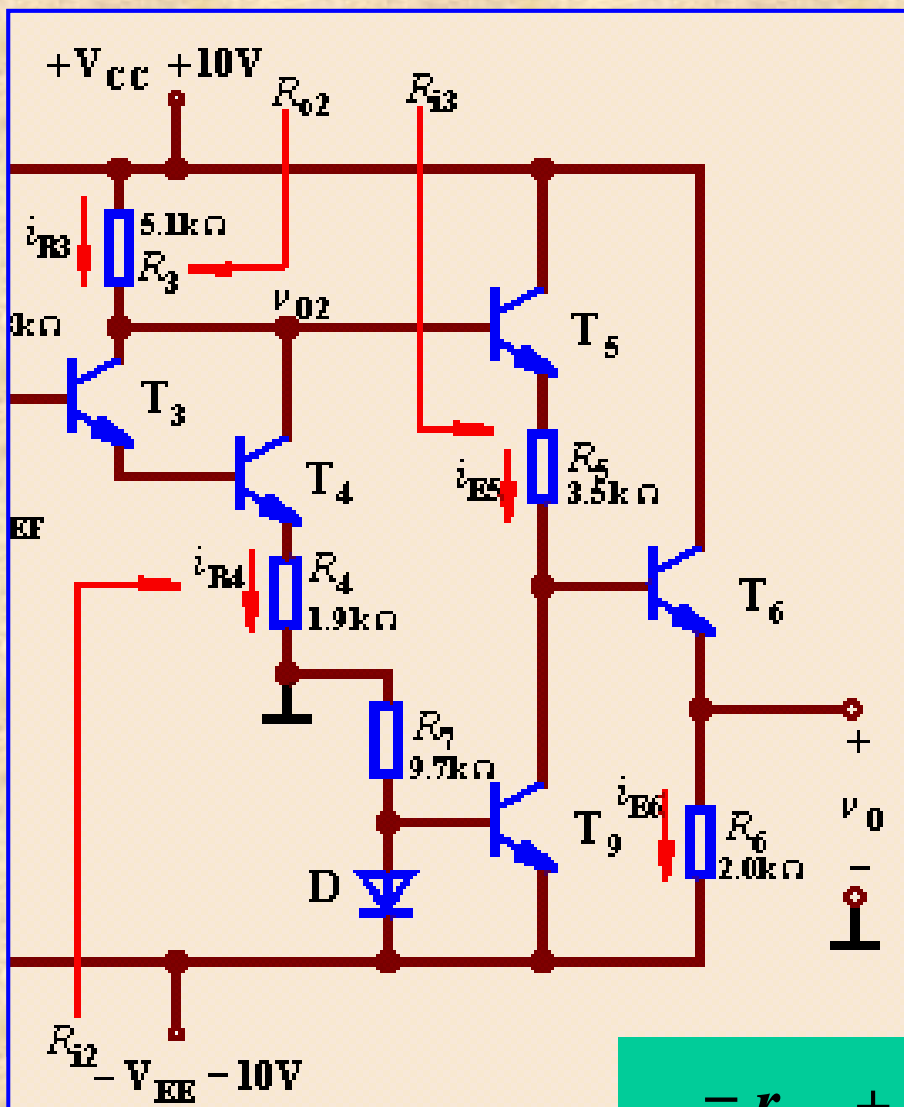
直流电平移动

$$\begin{aligned} V_o &= V_{B5} - V_{BE5} - V_{R5} - V_{BE6} \\ &= V_{B5} - 2V_{BE} - I_{C9}R_5 \end{aligned}$$

例6.3.1 (2) 放大电路的输入、输出电阻

$$r_{be1} = r_{be2} = 5.45\text{k}\Omega, r_{be3} = 262\text{k}\Omega, r_{be4} = r_{be5} = 2.8\text{k}\Omega, r_{be6} = 725\Omega$$

$$r_{ce} = 200\text{k}\Omega \quad \beta = 100$$



$$R_{id} = 2r_{be1} = 10.9\text{k}\Omega$$

$$R_{ic} = 0.5[r_{be1} + (1 + \beta)2r_{ce7}] = 20\text{M}\Omega$$

$$R_{o1} = R_2 = 14.3\text{k}\Omega$$

$$R_{i2} = 19.9\text{M}\Omega$$

$$= r_{be3} + (1 + \beta)[r_{be4} + (1 + \beta)R_4]$$

$$R_{o2} = R_3 = 5.1\text{k}\Omega$$

$$R_{o3} = 0.41\text{k}\Omega$$

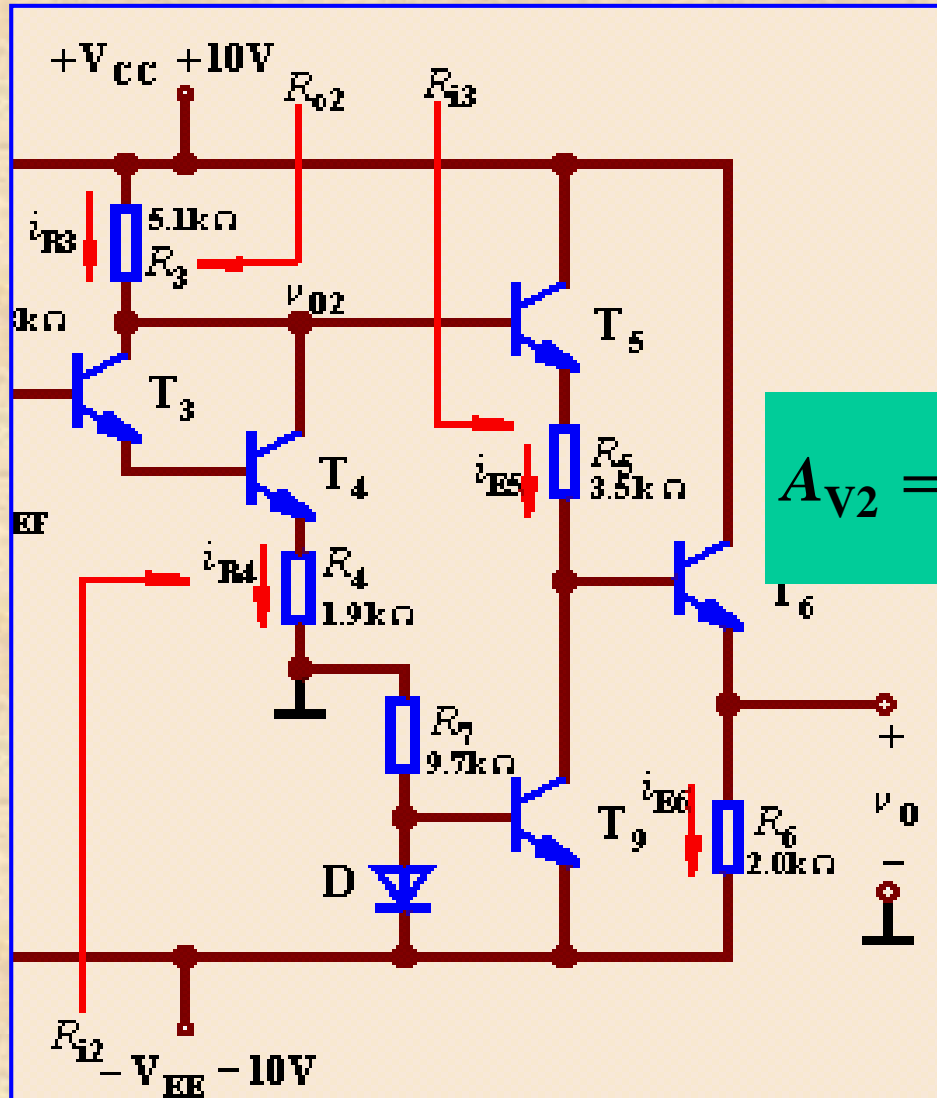
$$= R_6 // \frac{r_{be6} + r_{ce9} // (R_5 + \frac{r_{be5} + R_3}{1 + \beta_6})}{1 + \beta_7}$$

$$R_{i3} = 10.6\text{M}\Omega$$

$$= r_{be5} + (1 + \beta)\{R_5 + r_{ce9} // [r_{be6} + (1 + \beta)R_6]\}$$

例6.3.1 (3) 放大电路的总增益

$$A_V = \frac{v_{c2}}{v_{i1} - v_{i2}} \cdot \frac{v_{c4}}{v_{c2}} \cdot \frac{v_o}{v_{c4}} = A_{VD} \cdot A_{V2} \cdot A_{V3}$$



$$A_{VD} = \frac{v_{c2}}{v_{i1} - v_{i2}} = \frac{v_{c2}}{-2v_{i2}} = -\frac{1}{2} A_{VT2}$$

$$= \frac{\beta(R_2 \parallel R_{i2})}{2r_{be}} = \frac{\beta R_2}{2r_{be}} = 129$$

$R_{i2} = 19.9\text{M}\Omega \gg R_2$

$$A_{V2} = \frac{-[\beta_3 i_{b3} + (1 + \beta_3) i_{b3} \beta_4] R_3 \parallel R_{i3}}{i_{b3} \{r_{be3} + (1 + \beta)[r_{be4} + (1 + \beta) R_4]\}}$$

$$\approx \frac{-\beta_3 \beta_4 R_3}{R_{i2}} = -2.6$$

$R_{i3} = 10.6\text{M}\Omega$

$$A_{V3} \approx 1$$

$$A_V = -335$$

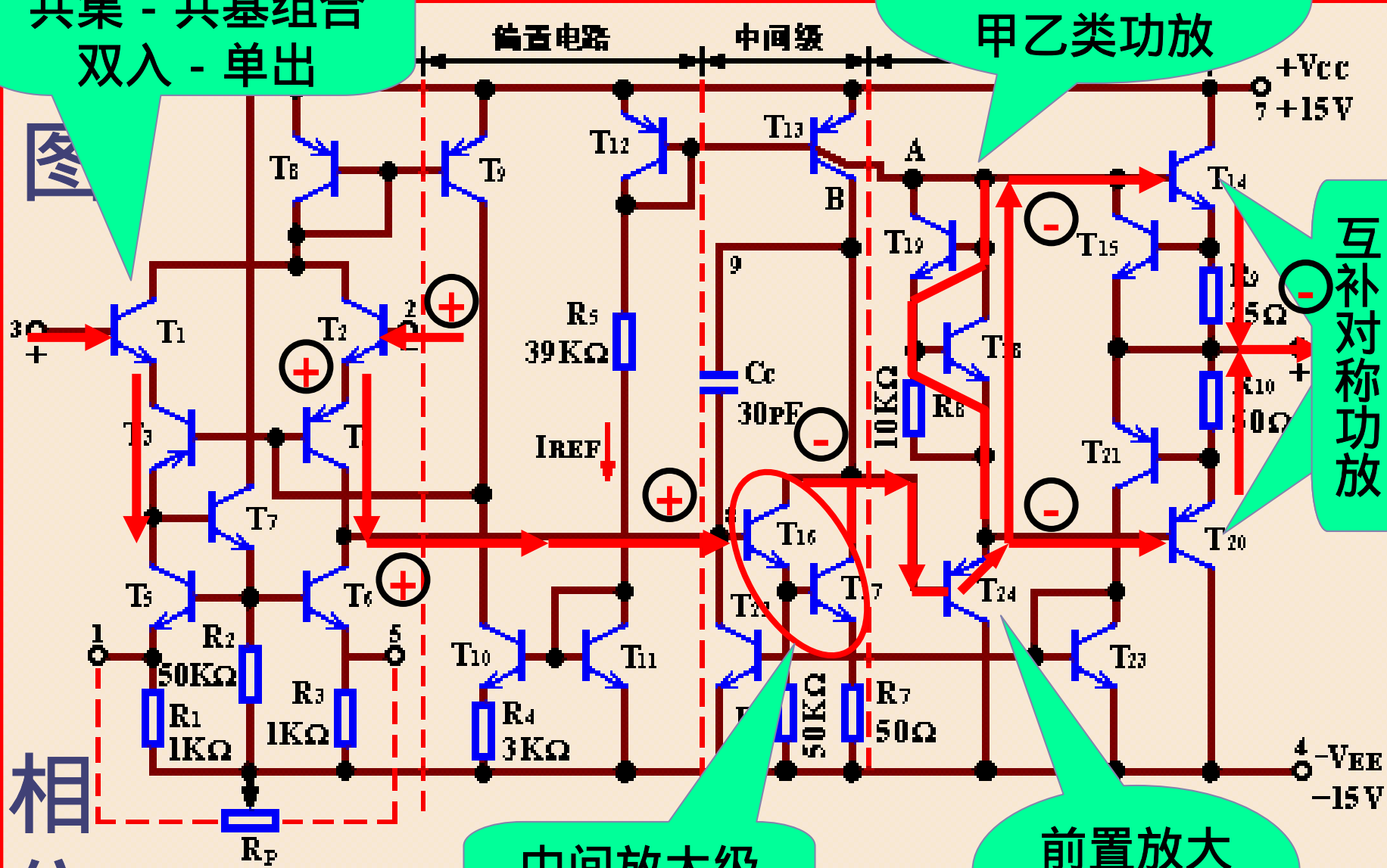
通用型集成电路运算

差分放大输入级
共集 - 共基组合
双入 - 单出

2个二极管
甲乙类功放

互补对称功放

相位



中间放大级
复合管 - 共射

前置放大
共集缓冲

图 6.3.3

(a)

镜像电流源
静态偏置

电流源B
有源负载

镜像电流源
稳定工作

T₁₅导通

$V_{R9} \geq 0.5V$

$i_o \geq I_{omax}$

微电流源
静态偏置

限流保护
T₁₅, T₂₁

带缓冲级的比例电流源
调零、有源负载?

头
图

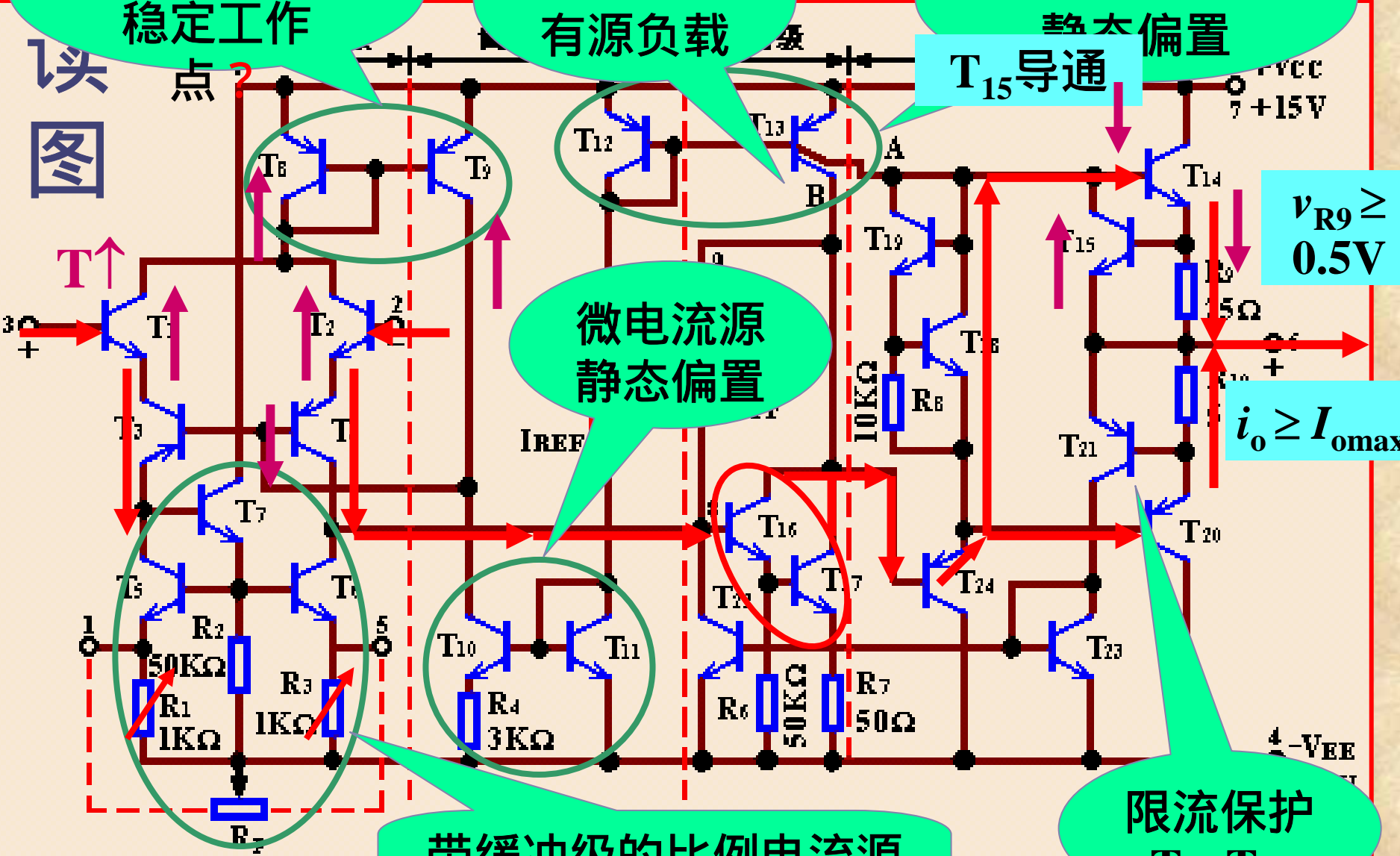


图 6.3

原理电路

LM741集成运放的简化电路

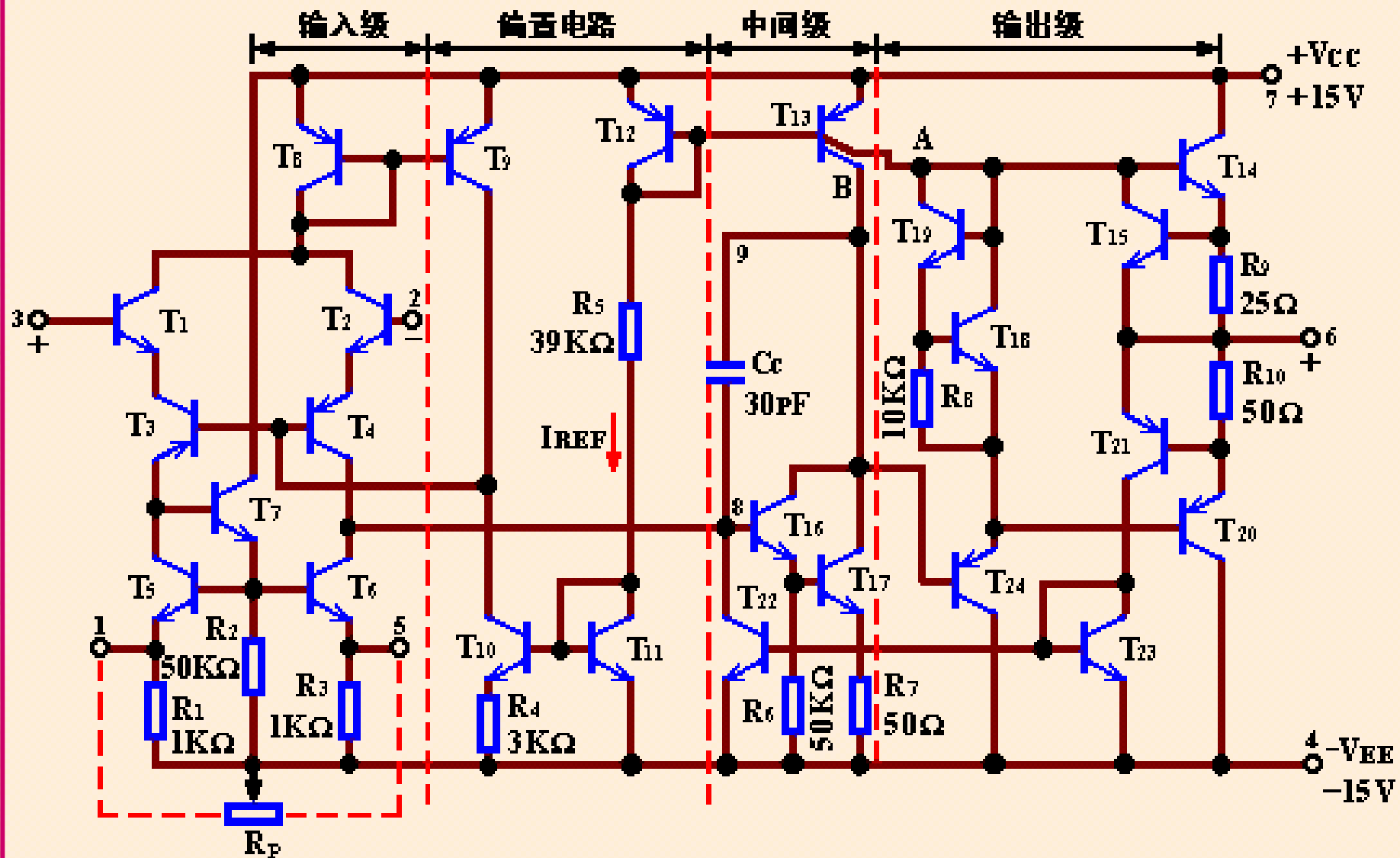


图 6.3.3 741 型集成运算放大器 (a) 原理电路

LM741集成运放的简化电路

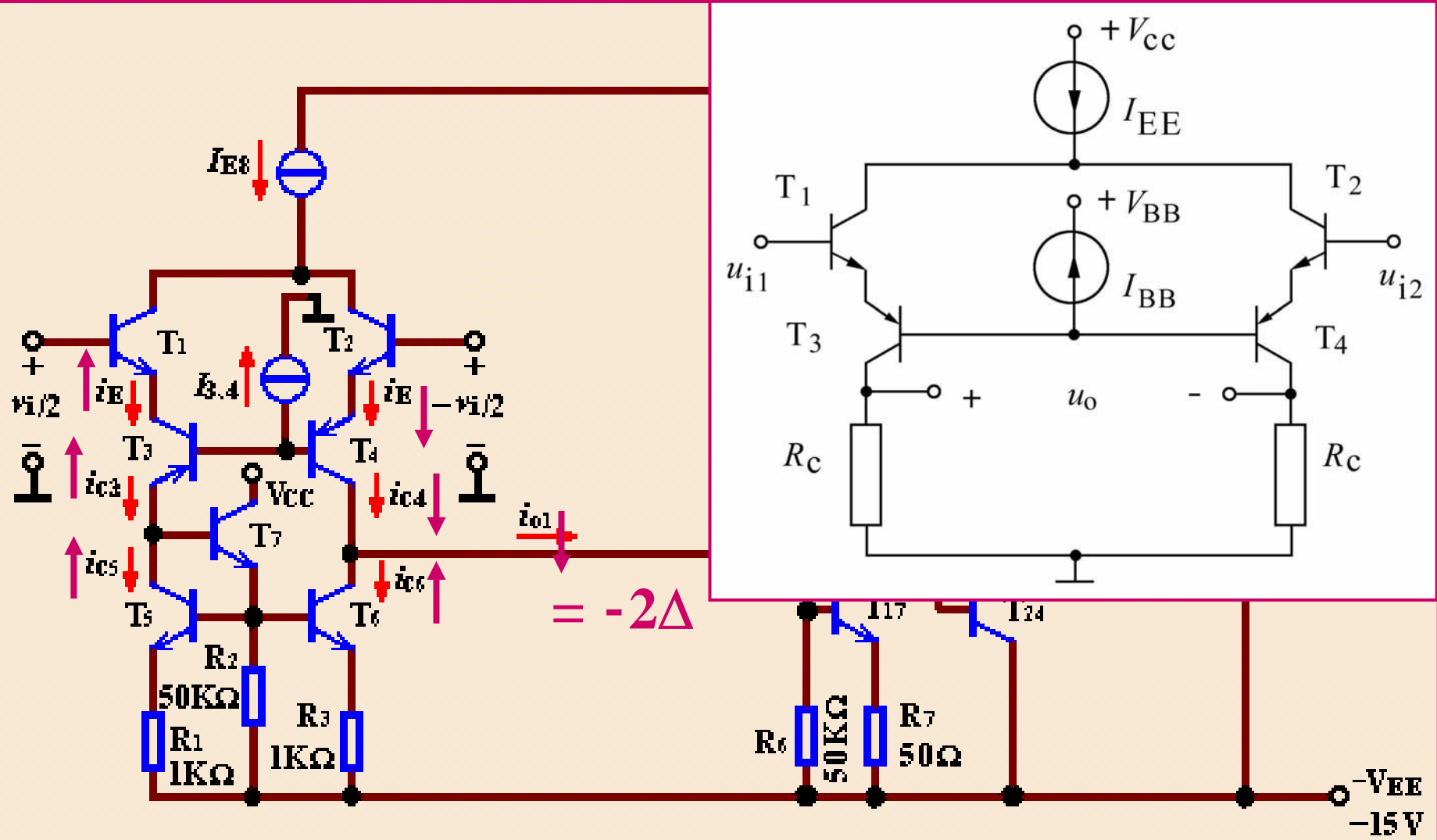
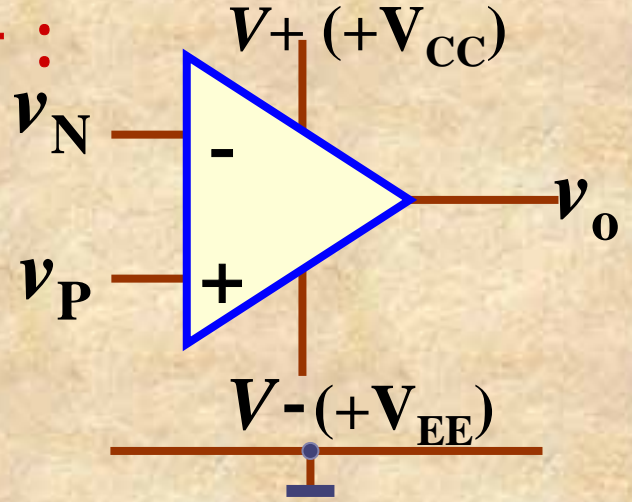


图 6.3.3 741 型集成运算放大器 (b) 简化电路

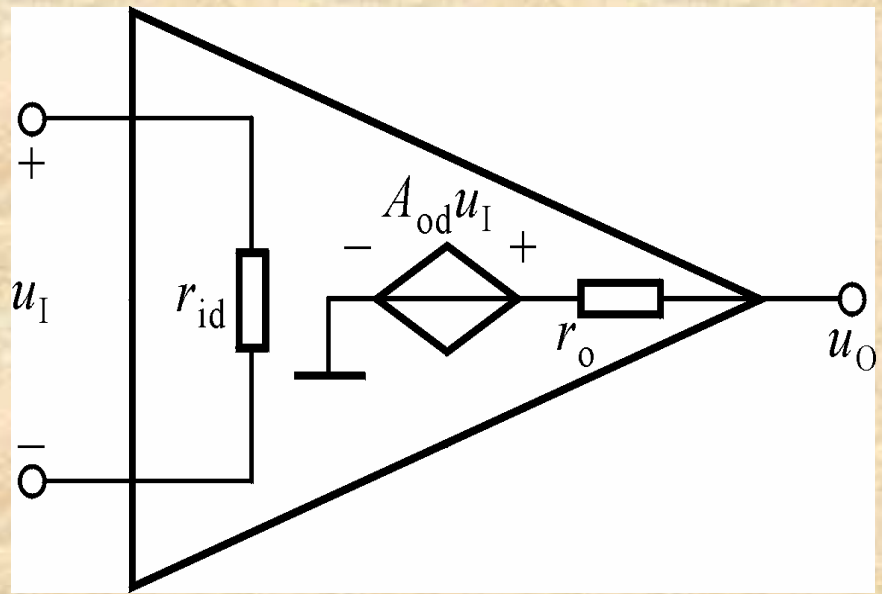
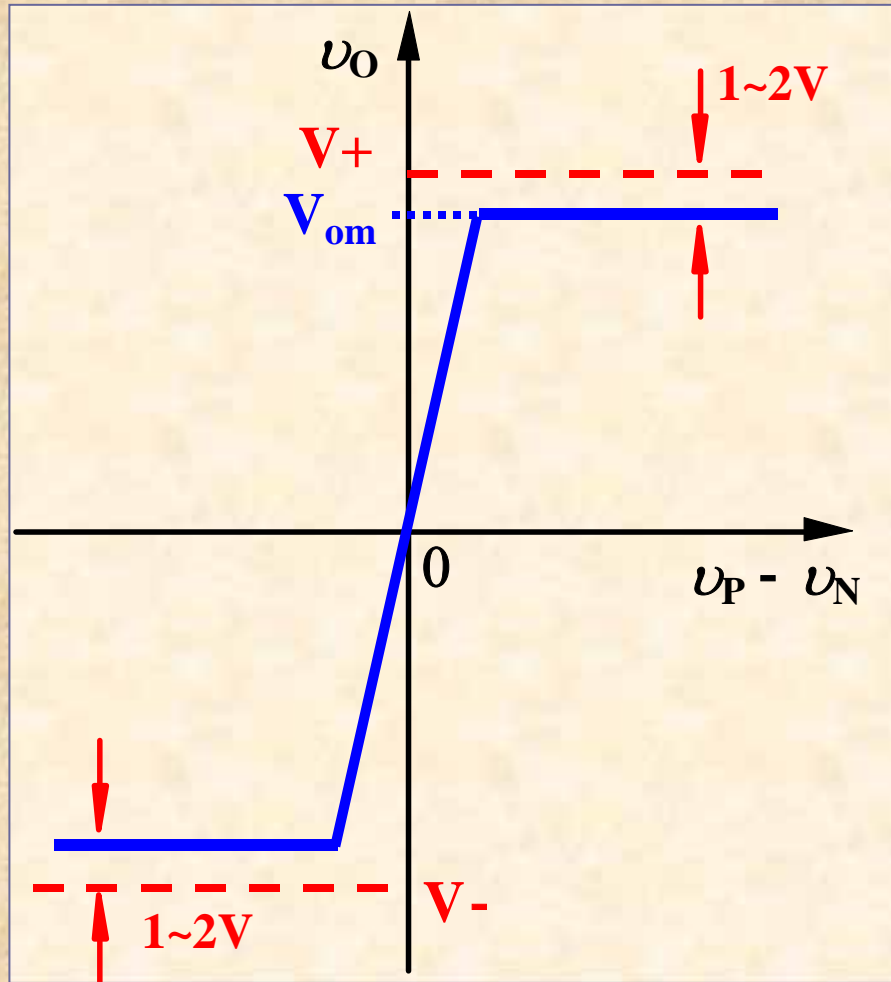
小结：集成电路运算放大器

高增益的直接耦合
多级差分放大电路

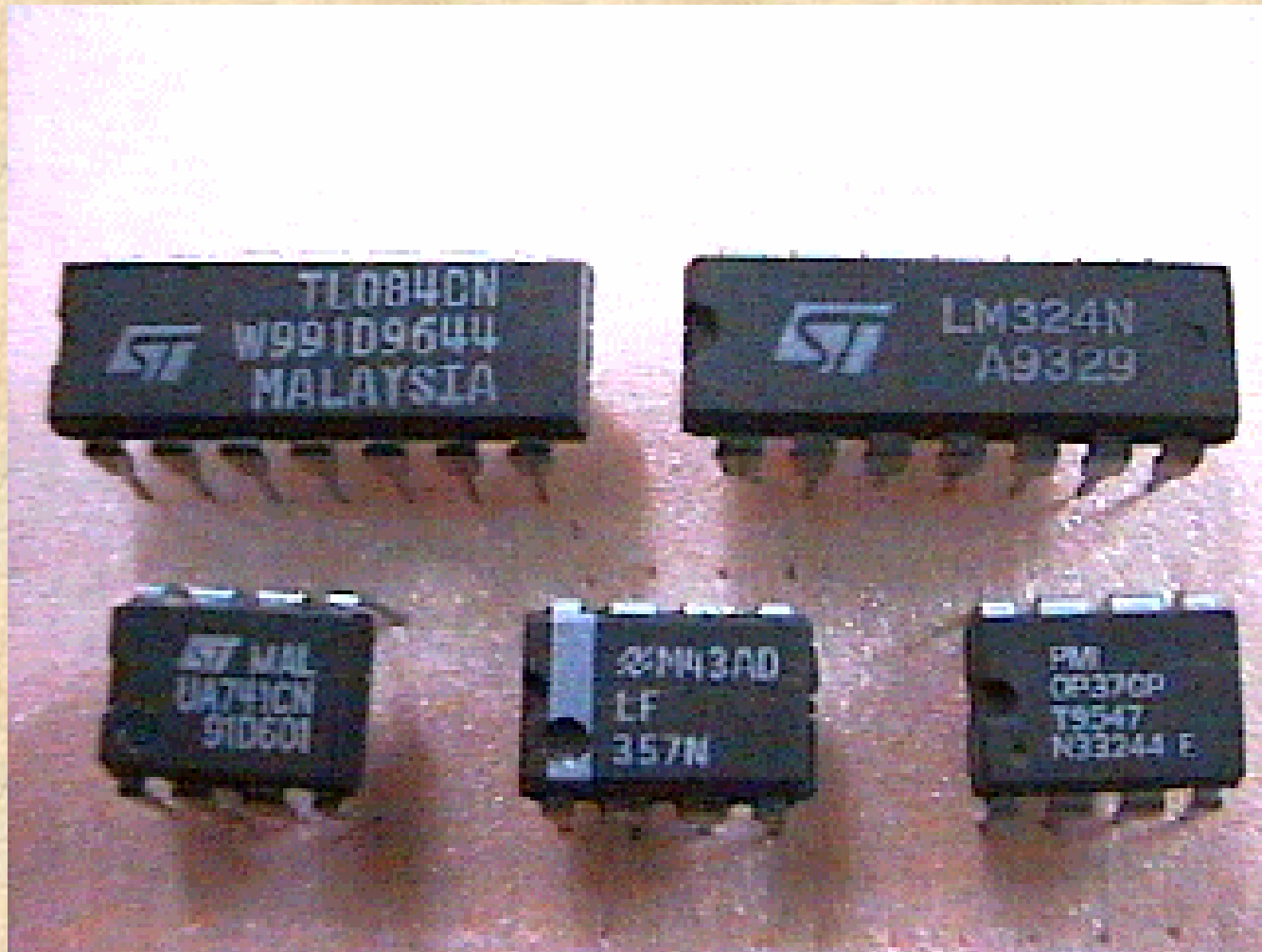
符号：



电压传输特性：



运算放大器外形图



SO8(Plastic Micropackage)

6.4 集成电路运算放大器的主要参数

以 $\mu\text{A}741\text{C}$ 为例

- 极限参数
- 电特性参数 ($T_a=25^\circ\text{C}$)
 - 输入失调参数
 - 差模特性参数
 - 共模特性参数
 - 大信号动态参数
 - 电源特性参数

6.4 集成电路运算放大器的主要参数

极限参数

高压型（特殊）
HA2645 $\pm 80V$
D41 $\pm 150V$

- 电源电压 $\pm 5V \sim \pm 18V$
- 最大允许功耗 $670mW$ (DIP)
- 最大差模输入电压 $V_{idmax} \pm 30V$
- 最大共模输入电压 $V_{icmax} \pm 15V$
- 工作温度范围
军品： $-55^{\circ}C \sim 125^{\circ}C$
通用： $0^{\circ}C \sim 70^{\circ}C$
- 保存温度范围
 $-65^{\circ}C \sim 150^{\circ}C$

6.4 集成电路运算放大器的主要参数

输入失调参数

$\mu\text{A}741\text{C}$

1. 输入失调电压 V_{IO}

2mV

2. 输入偏置电流 I_{IB}

80nA

$$I_{\text{IB}} = \frac{1}{2}(I_{\text{BP}} + I_{\text{BN}})$$

3. 输入失调电流 I_{IO}

20nA

$$I_{\text{IO}} = |I_{\text{BP}} - I_{\text{BN}}|$$

4. 温度漂移

(1) 输入失调电压温漂 $\Delta V_{\text{IO}} / \Delta T$

$20\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

(2) 输入失调电流温漂 $\Delta I_{\text{IO}} / \Delta T$

$0.5\text{nA}/^\circ\text{C}$

高精度(低漂移型)

OP177 $V_{\text{IO}} = 4\mu\text{V}$

$I_{\text{IO}} = 0.3\text{nA}$

精密仪表放大器

$$\frac{dV_{\text{IO}}}{dT} = 0.03\mu\text{V}/^\circ\text{C} \quad \frac{dI_{\text{IO}}}{dT} = 1.5\text{pA}/^\circ\text{C}$$

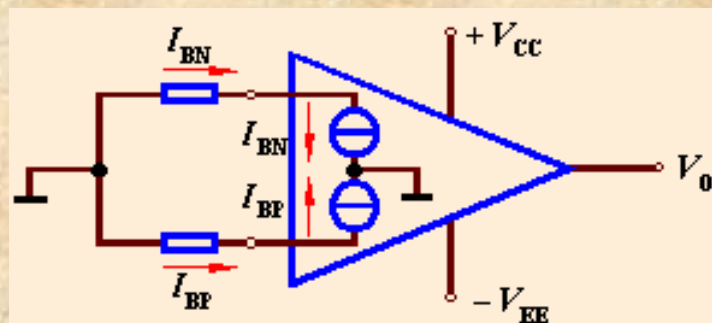
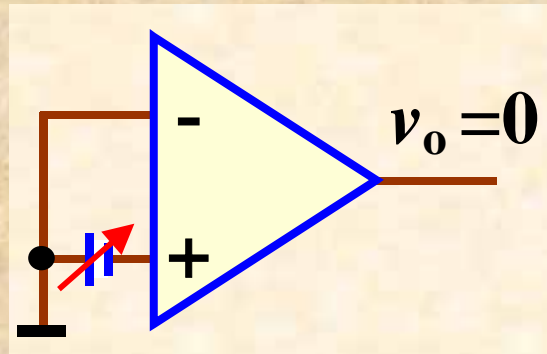


图 6.4.1 输入偏置电流

6.4 集成电路运算放大器的主要参数

差模特性参数

1. **开环差模电压增益** A_{VO}
无反馈 “高增益型”达140~200dB
2. 开环带宽 $BW(f_H)$ - 3dB带宽
3. 单位增益带宽 $BW_G(f_T)$

高速型

OP37

$BWG = 63 \text{ MHz}$

宽带型

AD9618

$f_H = 600 \text{ MHz}$

AD9620

$BWG = 8000 \text{ MHz}$

CF357

$BWG = 20 \text{ MHz}$

4. 差模输入电阻 r_{id} **高输入阻抗型**

BJT $\approx 10^5 \sim 10^6 \Omega$

AD549

$I_{IB} < 0.040 \text{ p A}$ $R_{id} > 10^{13} \Omega$

FET $\approx 10^9 \Omega$ 以上。

CF155/255

$I_{IB} = 30 \text{ p A}$ $R_{id} > 10^{12} \Omega$

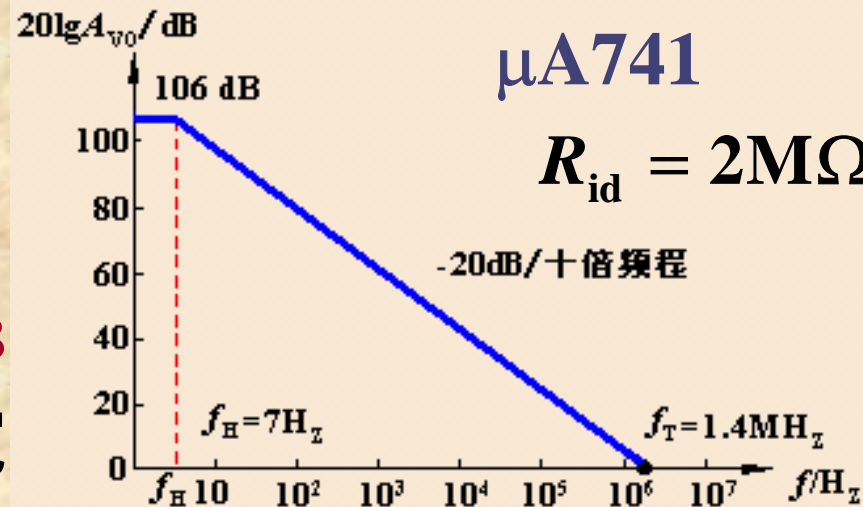


图 6.4.2 741 型运放 A_{VO} 的频率响应

6.4 集成电路运算放大器的主要参数

共模特性参数

1. 共模抑制比 K_{CMR}

$\mu\text{A}741$ 典型值为 90dB，性能好的高达 180dB。

2. 共模输入电阻 r_{ic}

电源特性参数

1. 电源电压抑制比 P_{SVR}

$\mu\text{A}741$ 典型值为 90dB

2. 静态功耗 P_{D}

50mW

3. 电源电流 I_{OC}

1.7mA

低功耗型：

空间技术和生物科学研究
电源电压较低，电流微弱

OP22：静态功耗 $P_{\text{D}} = 36 \mu\text{W}$ 。

OP290： $P_{\text{D}} = 24 \mu\text{W} (\pm 0.8 \text{V})$

CF7612： $P_{\text{D}} = 50 \mu\text{W} (\pm 5 \text{V})$

6.4 集成电路运算放大器的主要参数

大信号动态参数

- 转换速率 S_R （压摆率）

反映运放对于快速变化的输入大信号的响应能力

$\mu A741$ 典型值为 $0.5V/\mu s$

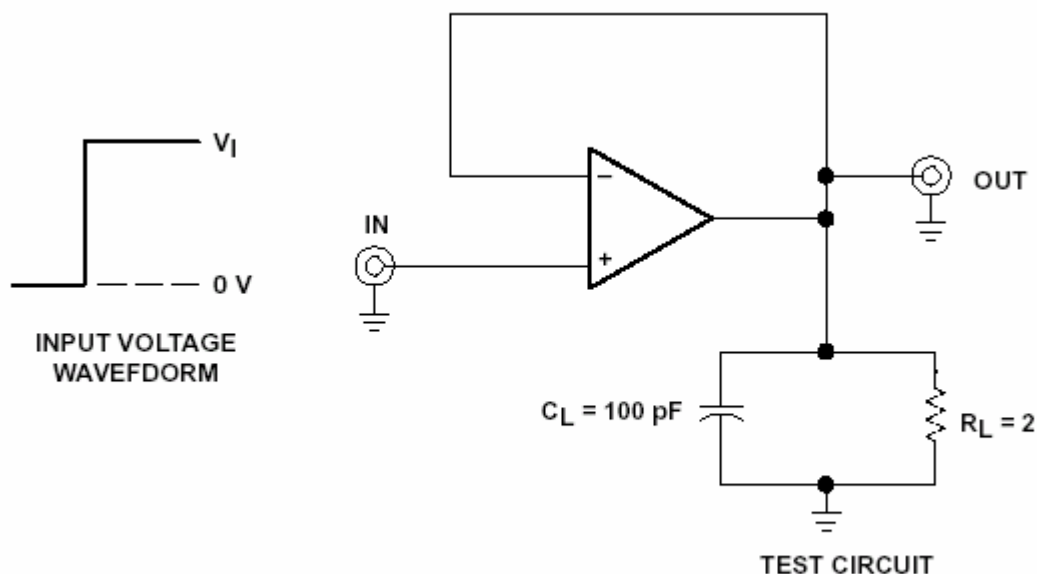
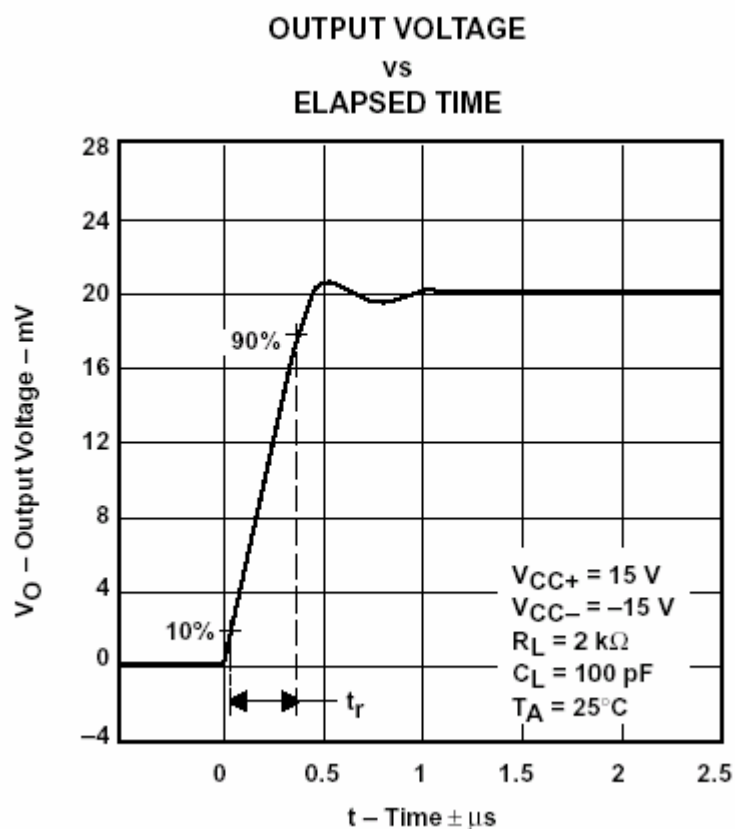


Figure 1. Rise Time, Overshoot, and Slew Rate



6.4 集成电路运算放大器的主要参数

高速型、宽带型

用于宽频带放大器，高速A/D、D/A等高速数据采集测试系统。

用于小信号放大时，可注重 f_H 或 f_T ；

用于高速大信号放大时，同时还应注重 S_R 。

OP37 $S_R = 17 \text{ V}/\mu\text{s}$ $BWG = 63 \text{ MHz}$

AD9618 $S_R = 2200 \text{ V}/\mu\text{s}$ $f_H = 600 \text{ MHz}$

AD9620 $S_R = 1800 \text{ V}/\mu\text{s}$ $BWG = 8000 \text{ MHz}$

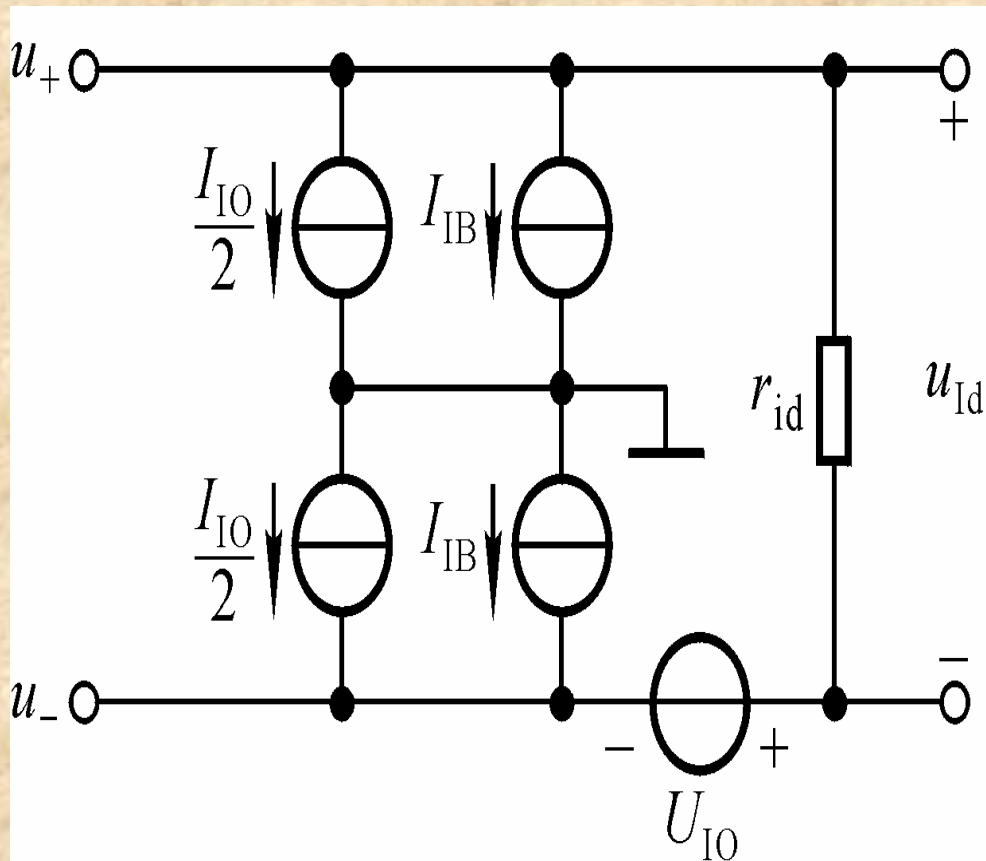
CF357 $S_R = 50 \text{ V}/\mu\text{s}$ $BWG = 20 \text{ MHz}$

其它参数

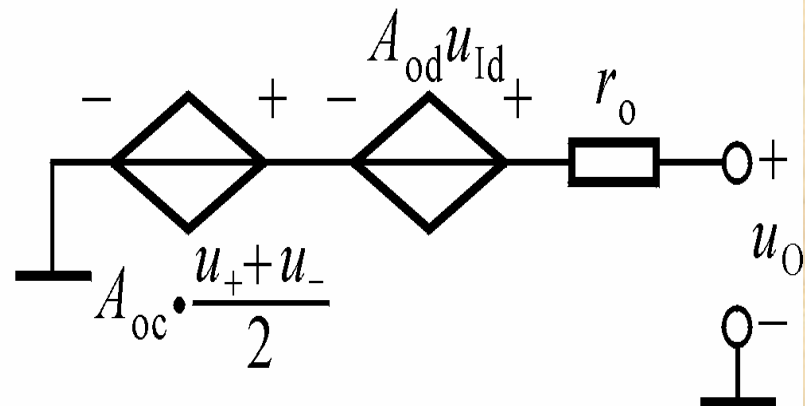
功率型： **LM12**

- 最大输出电流 I_{omax} **25mA** $I_o = 10 \text{ A}$
- 最大输出电压 $\pm V_{\text{OPP}}$ **$\pm 13\text{V} \sim \pm 14\text{V}$**

集成运放低频等效电路



输入端等效电路



输出端等效电路