

7 模拟集成电路

7 模拟集成电路

- 7.1 模拟集成电路中的直流偏置技术
- 7.2 差分式放大电路
- 7.5 集成运算放大器
- 7.6 实际集成运算放大器的主要参数和对应用电路的影响

7.1 模拟集成电路中的 直流偏置技术

7.1.2 BJT电流源电路

7.1.2 BJT电流源电路

1. 镜像电流源

T_1 与 T_2 参数完全相同

T_1 对 T_2 具有温度补偿作用

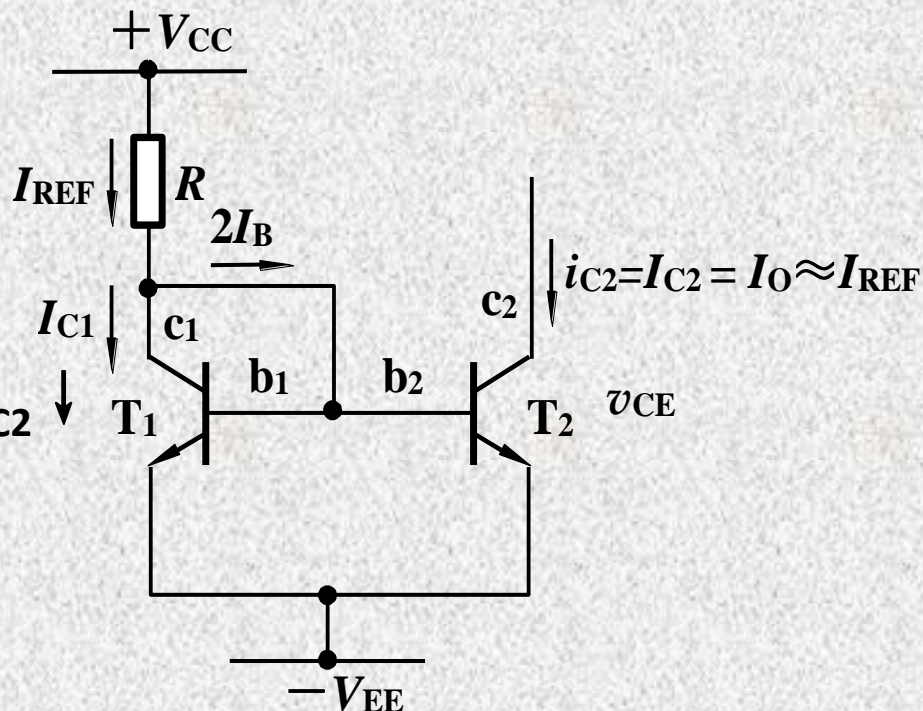
$I_{C2} \uparrow \rightarrow I_{C1} \uparrow \rightarrow R \text{压降} \uparrow \rightarrow V_{BE} \downarrow \rightarrow I_{C2} \downarrow$

$$I_{C1} = \beta I_B = I_{C2}$$

$$I_{REF} = I_{C1} + 2I_B$$

$$\frac{I_{C2}}{I_{REF}} = \frac{\beta}{\beta + 2}$$

$$I_O = I_{C2} \approx I_{REF} = \frac{V_{CC} - V_{BE} + V_{EE}}{R} \approx \frac{V_{CC} + V_{EE}}{R}$$



7.1.2 BJT电流源电路

1. 镜像电流源

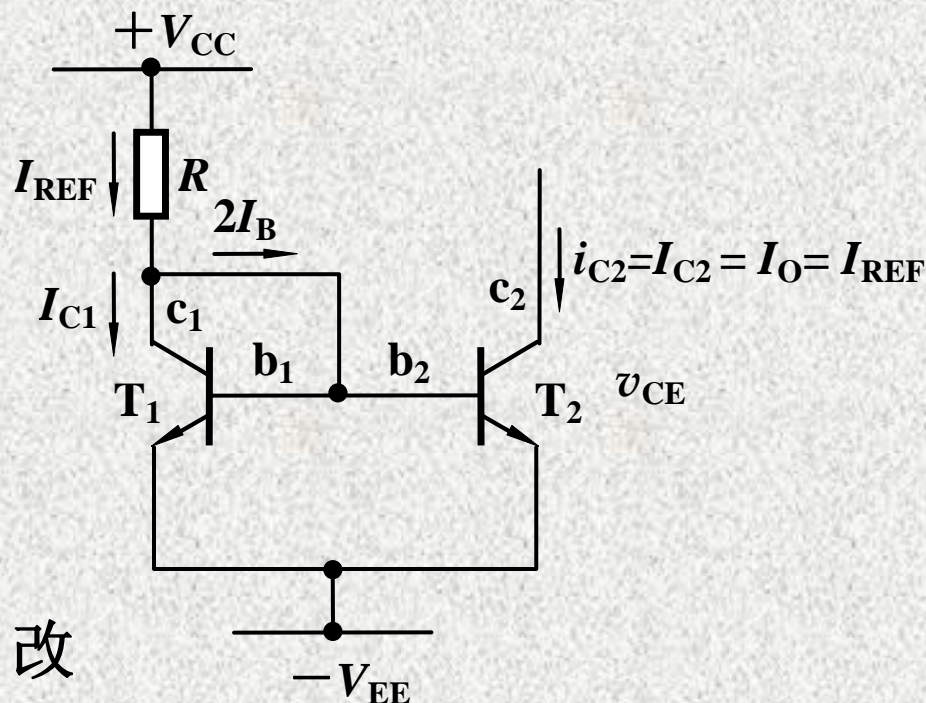
输出电阻

$$r_o = \left(\frac{\partial i_{C2}}{\partial v_{CE2}} \right)^{-1} \Big|_{I_{B2}} = r_{ce}$$

一般 r_o 在几百千欧以上

I_O 与 I_{REF} 相等，构成镜像关系，改变 R 值，可以获得不同的 I_O ，不受 T_2 负载变动的影响

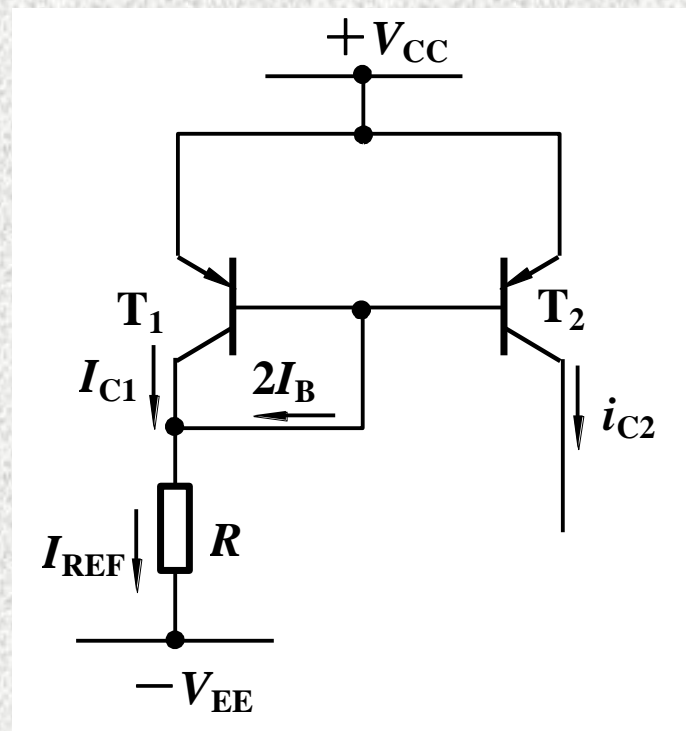
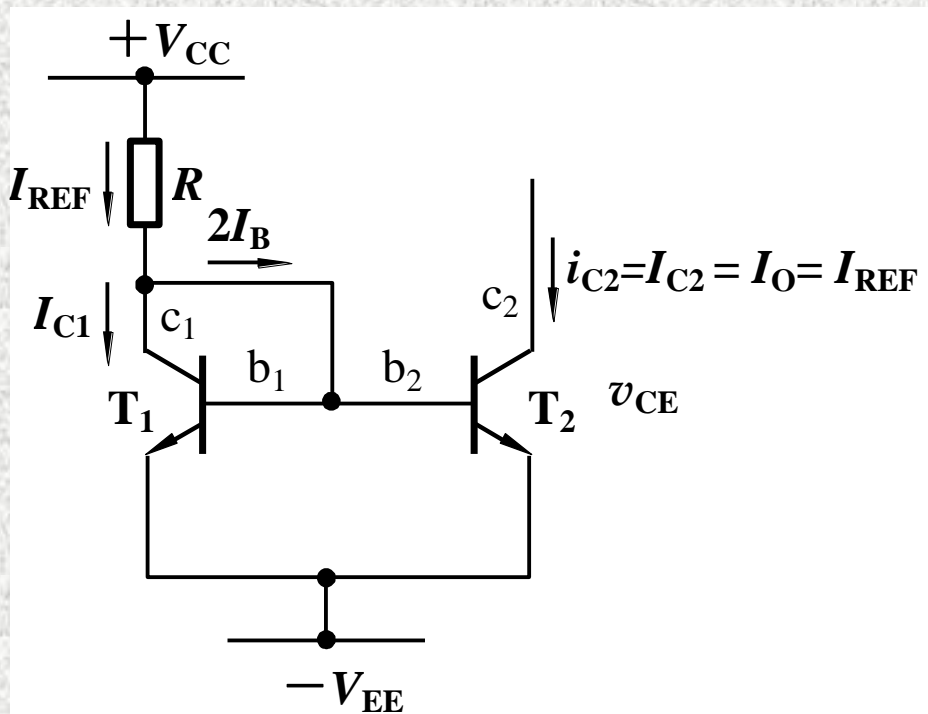
β 较小时， I_B 对 I_{REF} 的分流作用影响镜像对称度。
若需减小输出电流，必要求 R 的值很大



7.1.2 BJT电流源电路

1. 镜像电流源

其他形式



7.1.2 BJT电流源电路

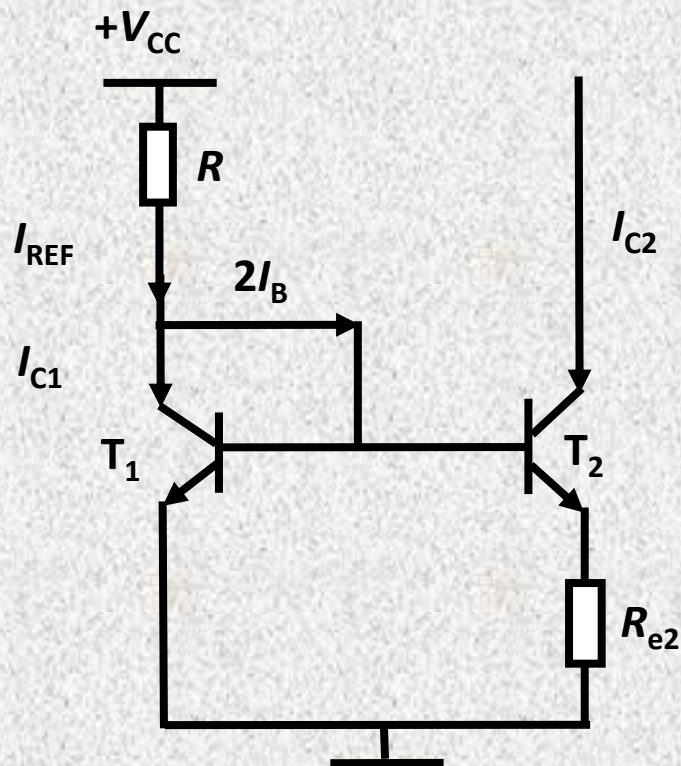
1. 镜像电流源

例： $V_{CC}=30V$ ，现要求 $I_{C2} = 10\mu A$ 。

若采用镜像电流源：

$$I_{C2} \approx I_{REF} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R}$$

$$R = 2.93M\Omega$$



7.1.2 BJT电流源电路

2. 微电流源

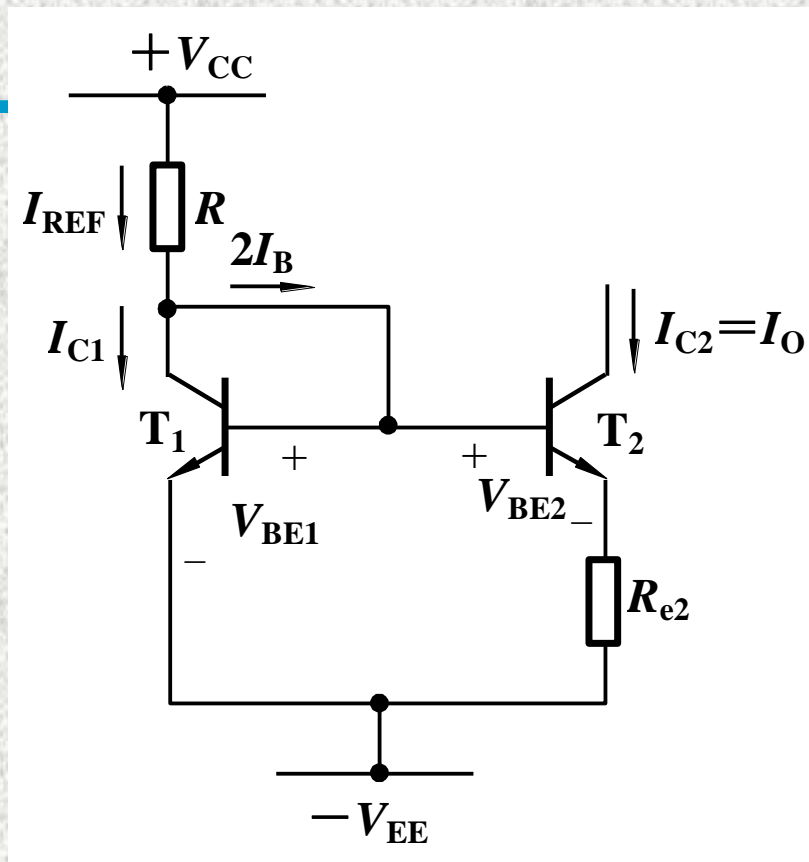
利用发射结电压对集电极电流的影响作用。 T_2 的射极电阻使其发射结电压减小，从而减小其集电极电流 I_{C2}

$$I_O = I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{R_{e2}}$$

$$= \frac{\Delta V_{BE}}{R_{e2}}$$

$$r_o \approx r_{ce2} \left(1 + \frac{\beta R_{e2}}{r_{be2} + R_{e2}} \right)$$

$$I_{REF} \approx \frac{V_{CC} + V_{EE}}{R}$$



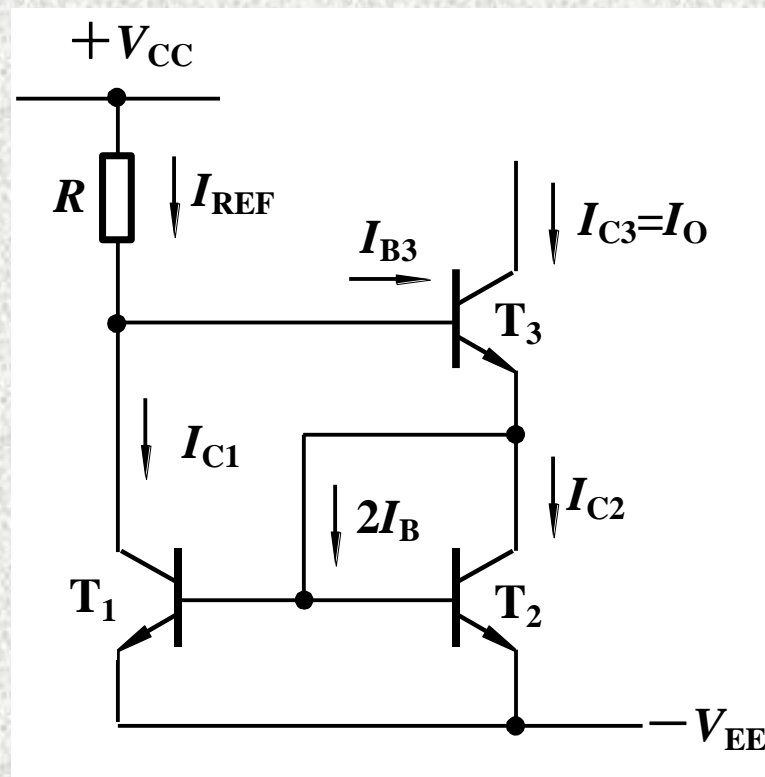
7.1.2 BJT电流源电路

3. 高输出阻抗电流源

$$I_{\text{REF}} = \frac{V_{\text{CC}} - V_{\text{BE3}} - V_{\text{BE2}} + V_{\text{EE}}}{R}$$

$$I_{\text{O}} \approx I_{\text{C2}} = \frac{A_3}{A_1} \cdot I_{\text{REF}}$$

A_1 和 A_3 分别是 T_1 和 T_3 的相对结面积



动态输出电阻 r_o 远比微电流源的动态输出电阻高

7.1.2 BJT电流源电路

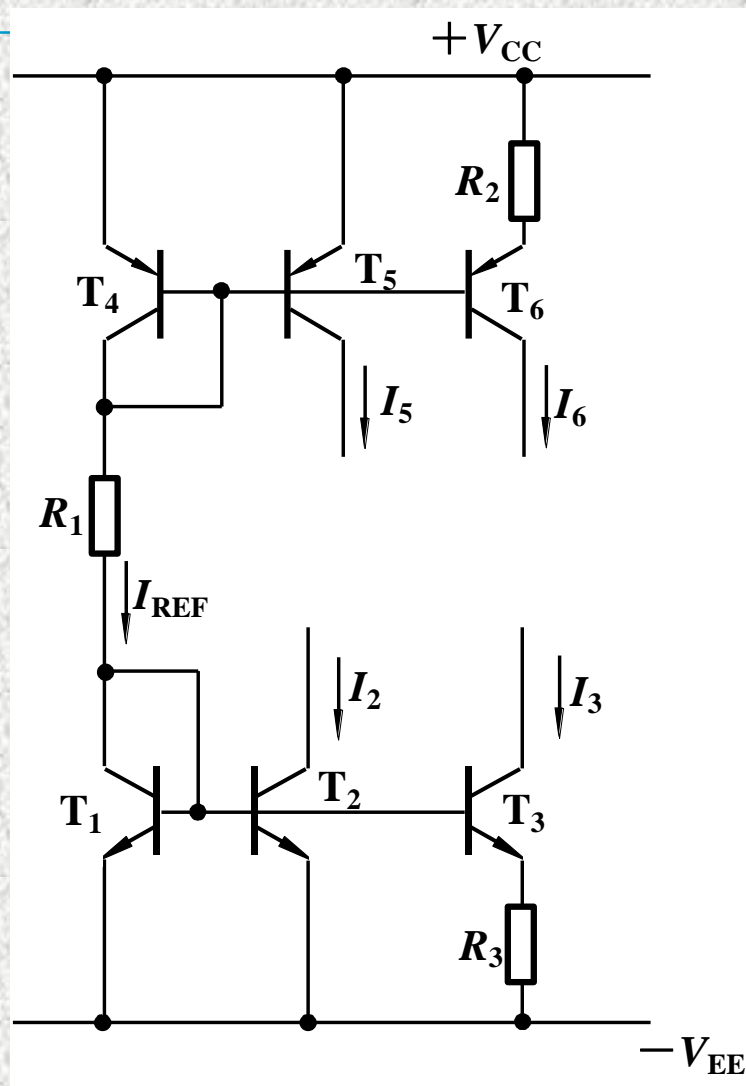
4. 组合电流源

T_1 、 R_1 和 T_4 支路产生基准电流 I_{REF}

T_1 和 T_2 、 T_4 和 T_5 构成镜像电流源

T_1 和 T_3 、 T_4 和 T_6 构成了微电流源

$$I_{\text{REF}} = \frac{V_{\text{CC}} + V_{\text{EE}} - V_{\text{BE1}} - V_{\text{EB4}}}{R_1}$$



7.2 差分式放大电路

7.2.1 差分式放大电路的一般结构

7.2.2 FET差分式放大电路

7.2.3 BJT差分式放大电路

7.2.1 差分式放大电路的一般结构

1. 差模信号和共模信号的概念

$$v_{id} = v_{i1} - v_{i2} \quad \text{差模信号}$$

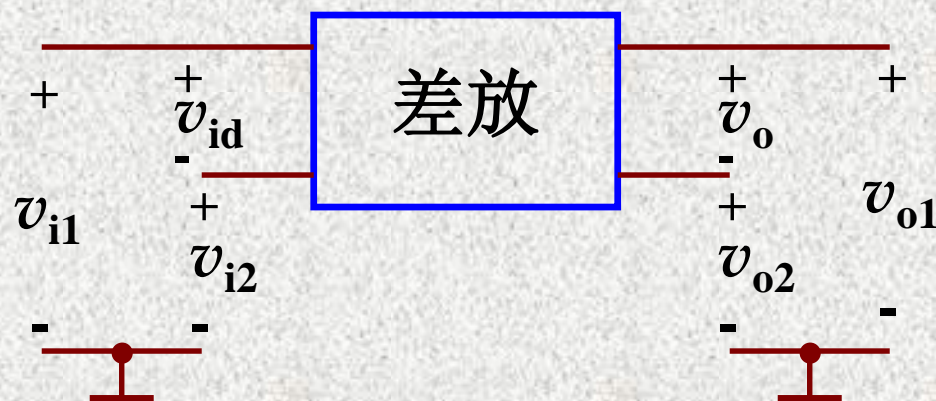
$$v_{ic} = \frac{1}{2}(v_{i1} + v_{i2}) \quad \text{共模信号}$$

$$A_{vd} = \frac{v'_o}{v_{id}} \quad \text{差模电压增益}$$

$$A_{vc} = \frac{v''_o}{v_{ic}} \quad \text{共模电压增益}$$

其中 v'_o —— 差模信号产生的输出

v''_o —— 共模信号产生的输出



差分式放大电路输入输出结构示意图

总输出电压

$$\begin{aligned} v_o &= v'_o + v''_o \\ &= A_{vd}v_{id} + A_{vc}v_{ic} \end{aligned}$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| \quad \text{共模抑制比}$$

反映抑制零漂能力的指标

7.2.1 差分式放大电路的一般结构

1. 差模信号和共模信号的概念

差模(difference-mode)信号：大小相等相位相反的两个信号： v_{id}

共模(common-mode)信号：大小相等相位相同的两个信号： v_{ic}

任意两个信号总可以分解成差模与共模两个分量：

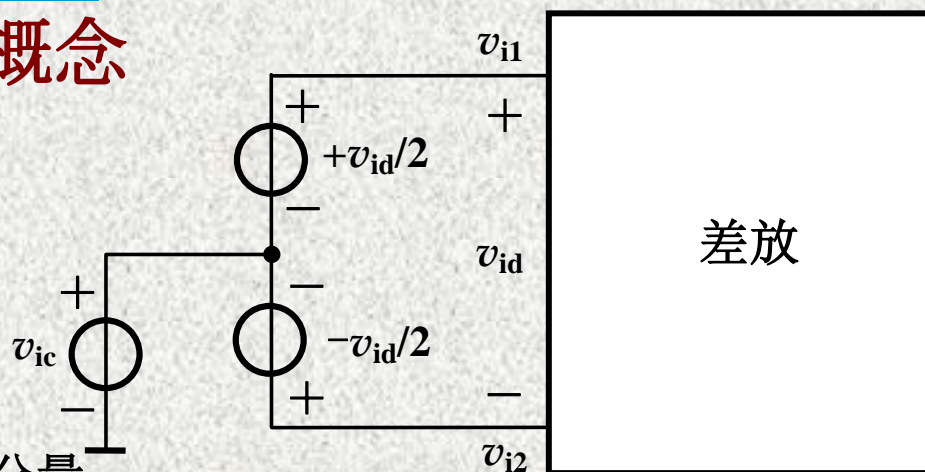
$$v_{ic} = \frac{1}{2}(v_{i1} + v_{i2}) \quad v_{id} = (v_{i1} - v_{i2}) \quad \text{用 } v_{id}、v_{ic} \text{ 表示 } v_{i1} \text{ 和 } v_{i2}$$

$$\therefore v_{i1} = v_{ic} + \frac{1}{2}v_{id} \quad v_{i2} = v_{ic} - \frac{1}{2}v_{id}$$

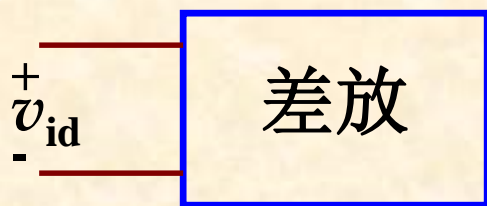
$$v_o = A_{vd}v_{id} + A_{vc}v_{ic}$$

差模电压增益

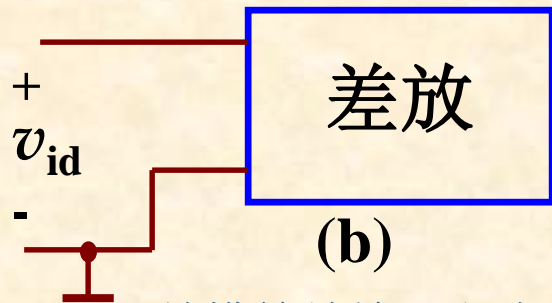
共模电压增益



7.2.1 差分式放大电路的一般结构

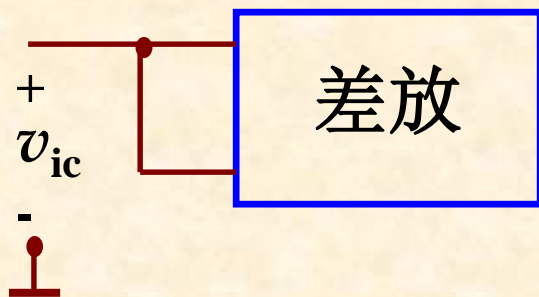


(a)

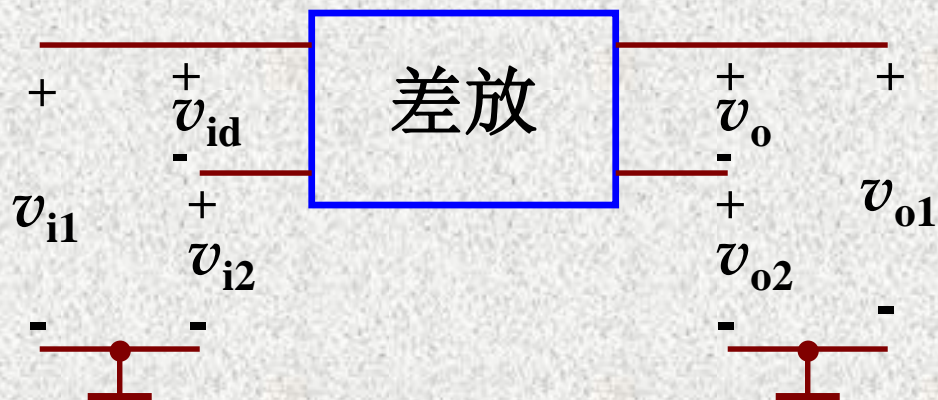


(b)

差模等效输入方式



共模等效输入方式



差分式放大电路输入输出结构示意图

两输入端中的共模信号
大小相等，相位相同；差模信号
大小相等，相位相反。

7.2.1 差分式放大电路的一般结构

2. 零点漂移

输入信号**为零时**，输出**电压不为零**且**缓慢变化**的现象。

产生零漂的主要原因：(1) 温度**变化**引起，也称**温漂**

(2) **电源电压波动**

温漂指标：温度**每**升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，输出**漂移电压**按**电压增益**折算到**输入端**的等效**输入漂移电压值**。

7.2.1 差分式放大电路的一般结构

3. 三端器件组成的差分式放大电路

a. 差分放大电路一般有两个输入端：

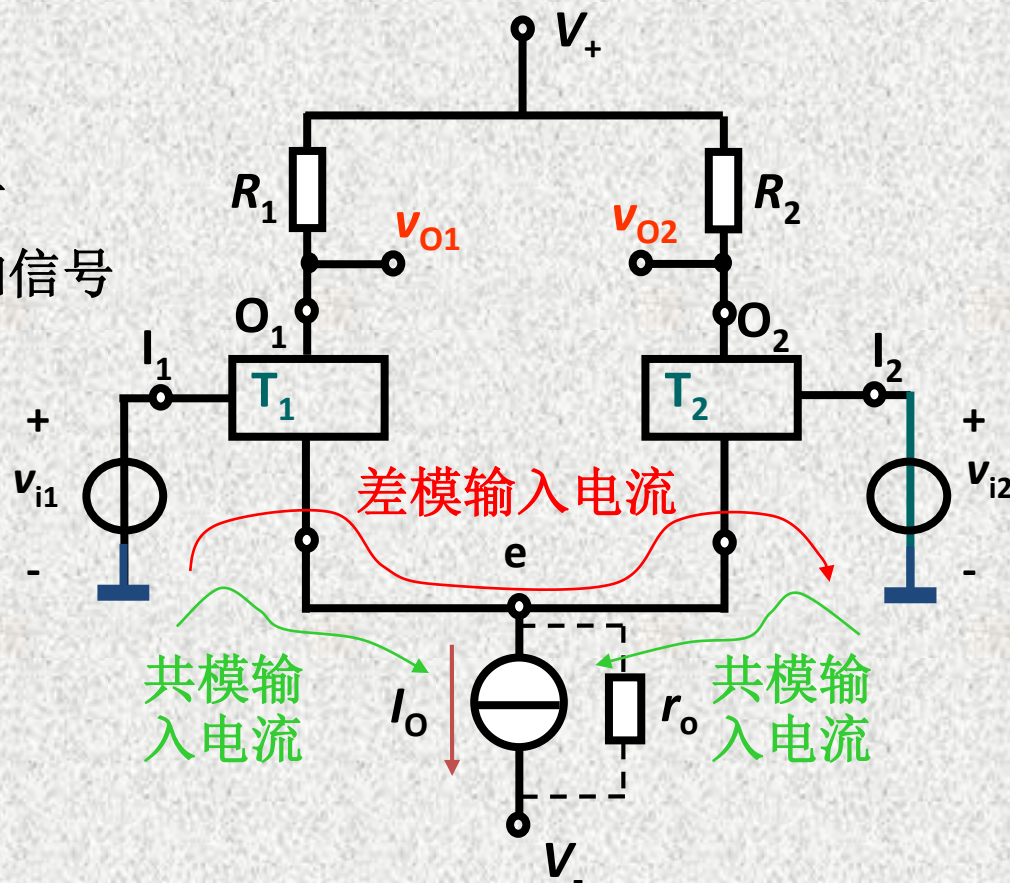
双端输入—从两输入端同时加信号

单端输入—仅从一个输入端对地加信号

b. 差分放大电路可以有两个输出端：

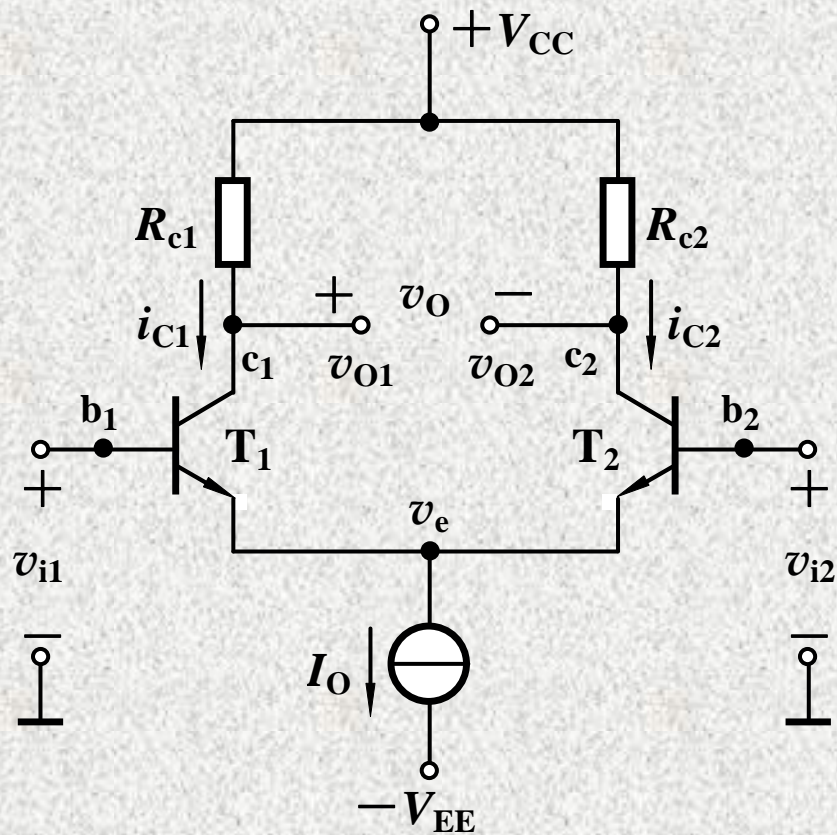
双端输出—从 v_{o1} 和 v_{o2} 输出

单端输出—从 v_{o1} 或 v_{o2} 对地输出



7.2.3 BJT差分式放大电路

1. 电路组成



7.2.3 BJT差分式放大电路

2. 工作原理

静态

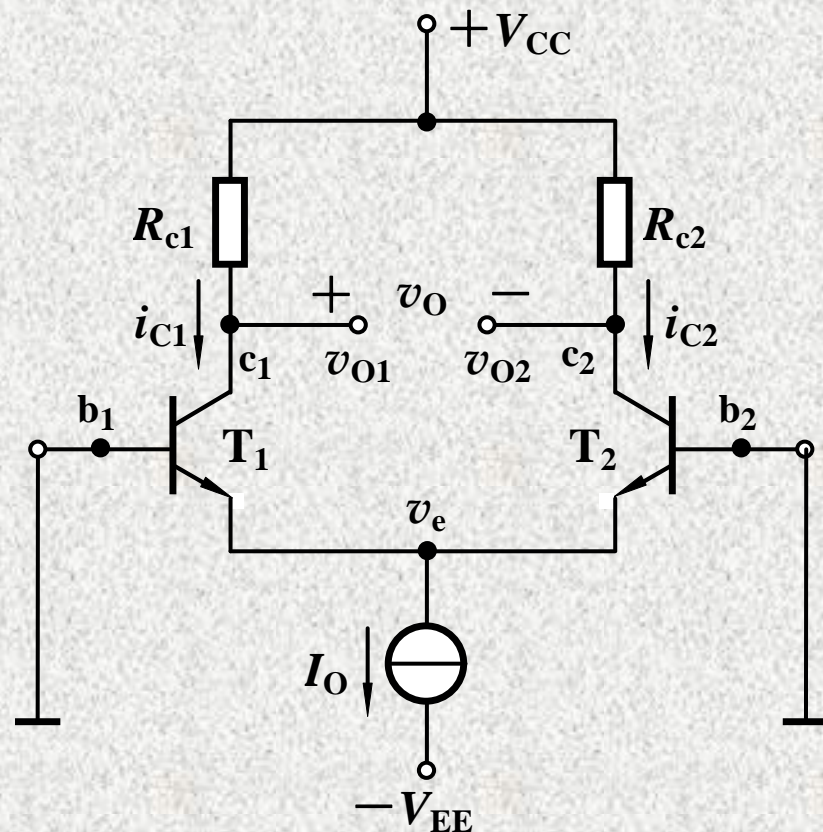
$$I_{C1} = I_{C2} = I_C = \frac{1}{2} I_O$$

$$V_{CE1} = V_{CE2}$$

$$= V_{CC} - I_C R_{c2} + V_{BE}$$

$$= V_{CC} - I_C R_{c2} + 0.7V$$

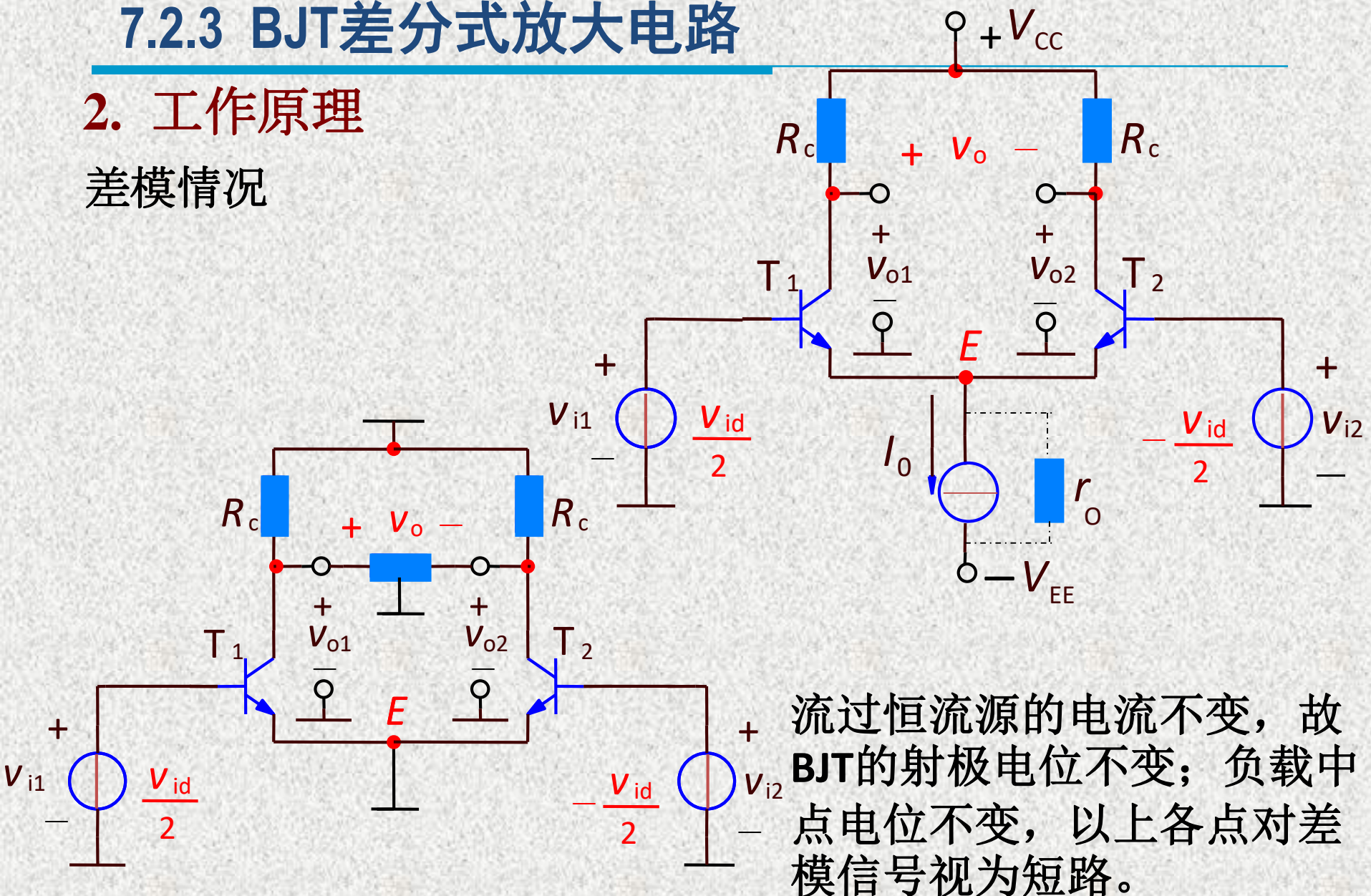
$$I_{B1} = I_{B2} = \frac{I_C}{\beta}$$



7.2.3 BJT差分式放大电路

2. 工作原理

差模情况



7.2.3 BJT差分式放大电路

2. 工作原理

差模情况

无负载时:

$$A_{VD} = \frac{V_o}{V_{id}} = -\frac{\beta R_C}{r_{be}}$$

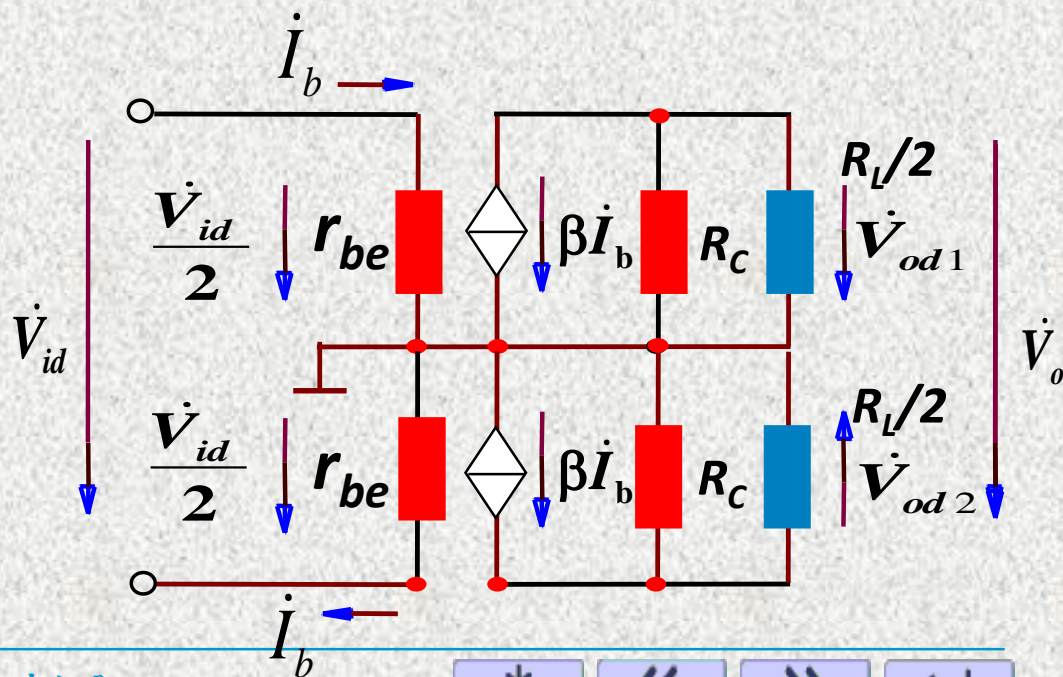
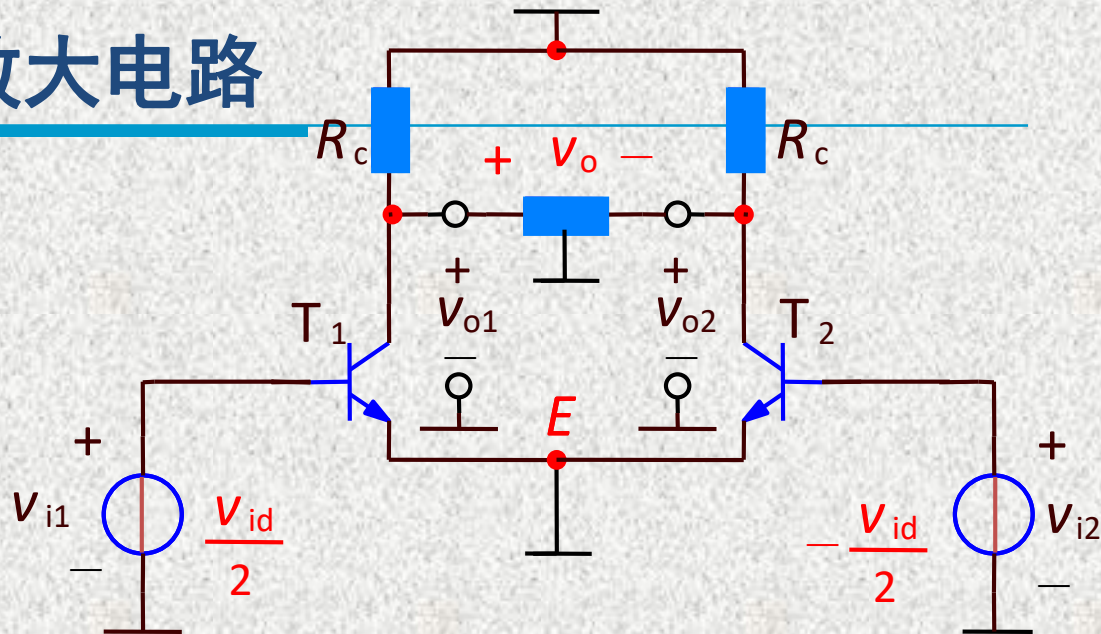
有负载时:

$$A'_{VD} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

$$R'_L = R_C \parallel \frac{R_L}{2}$$

$$R_i = 2r_{be}$$

$$R_o = 2R_C$$



7.2.3 BJT差分式放大电路

2. 工作原理

差模情况

〈A〉 双入、双出

$$A_{vd} = - \frac{\beta(R_c \parallel \frac{1}{2}R_L)}{r_{be}}$$

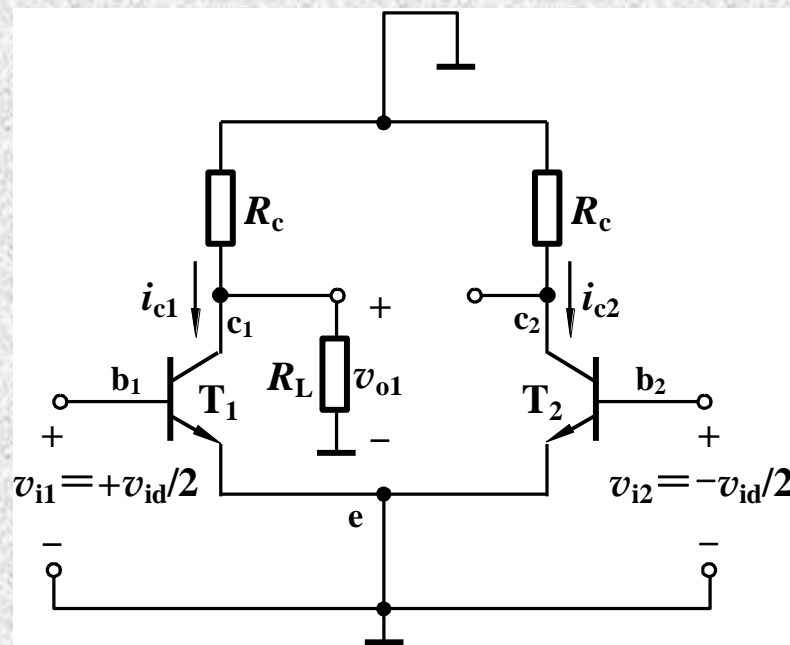
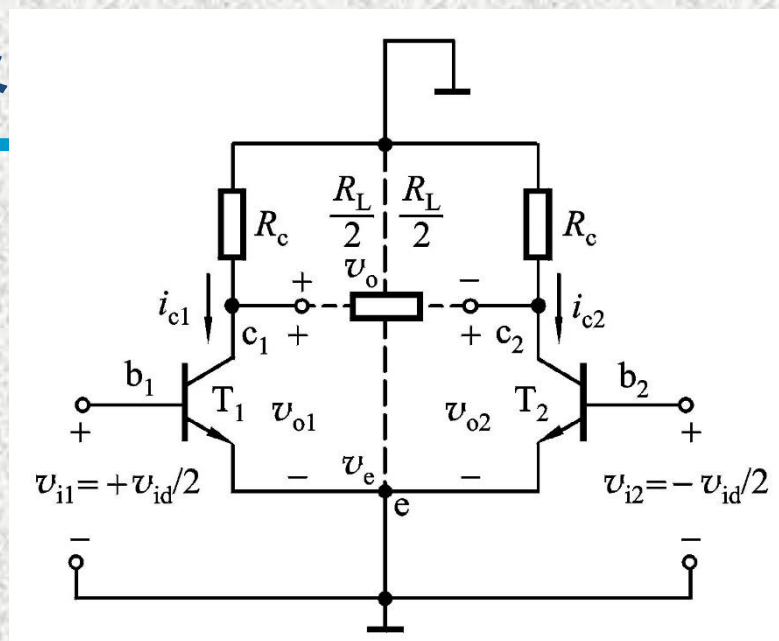
〈B〉 双入、**单出**

$$A_{vd1} = - \frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{2r_{be}}$$

〈C〉 **单端输入**等效于双端输入

〈D〉 **输入电阻**

$$R_{di} = 2r_{be}$$



7.2.3 BJT差分式放大电路

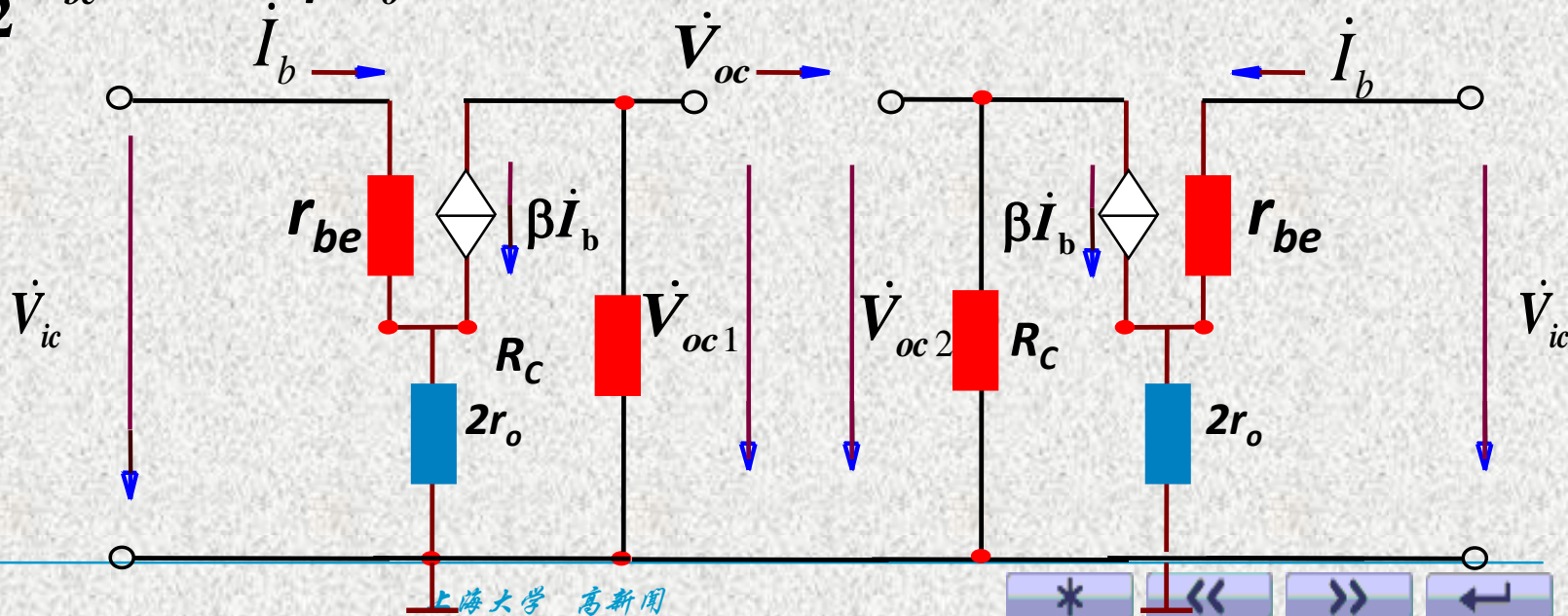
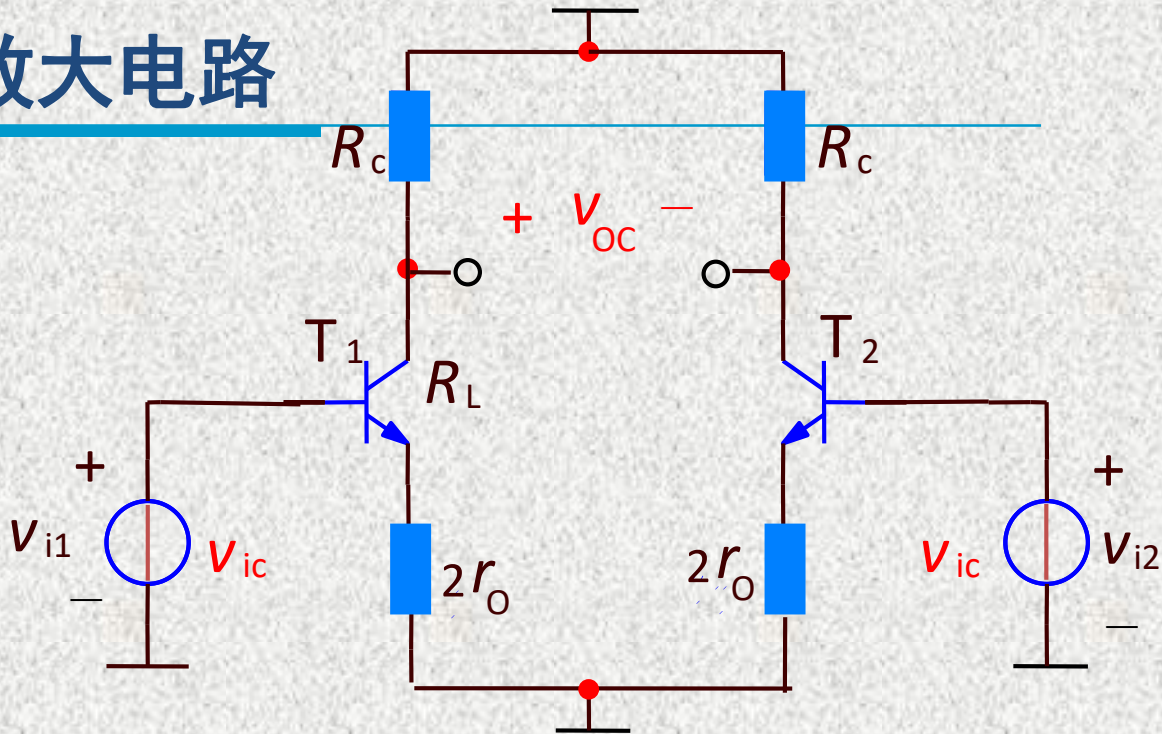
2. 工作原理

共模情况

$$A_{VC} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}}$$

$$= \frac{v_{oc1} - v_{oc2}}{v_{ic}} = 0$$

$$R_i = \frac{1}{2} [r_{be} + 2(1 + \beta)r_o]$$



7.2.3 BJT差分式放大电路

2. 工作原理

共模情况

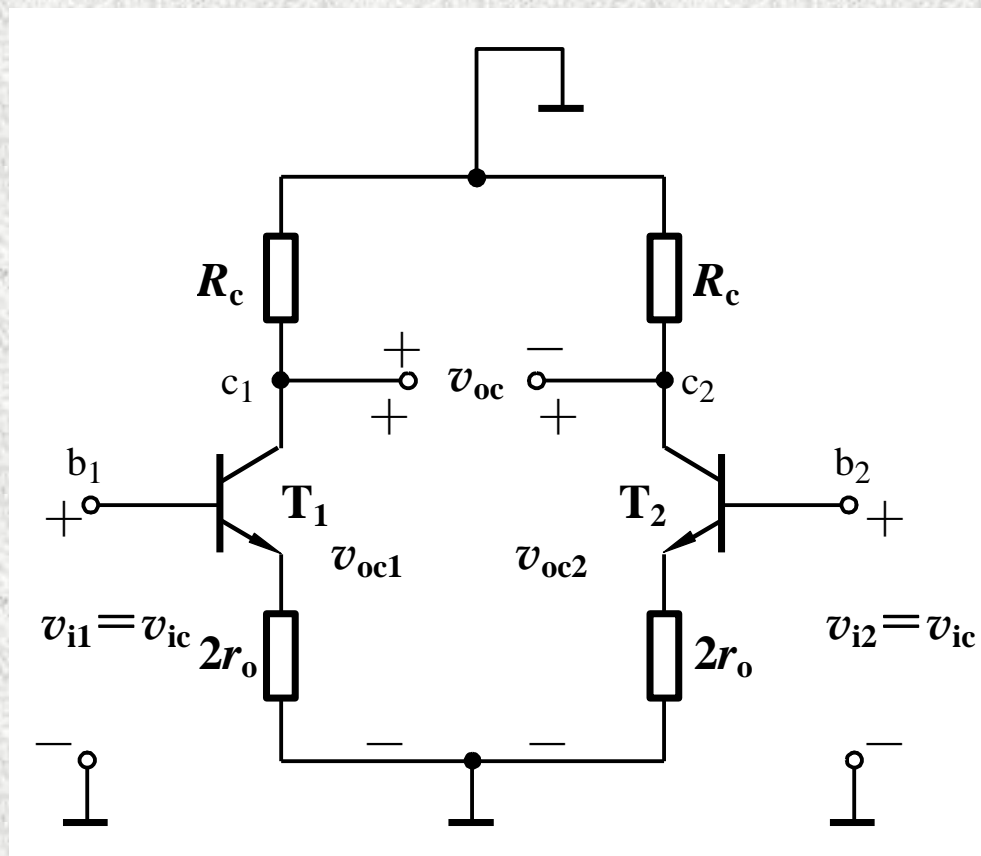
〈A〉 双出 $A_{vc} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} \approx 0$

〈B〉 单出 $A_{vd1} \approx -\frac{R'_L}{2r_o}$

$$R'_L = R_c \parallel R_L$$

〈C〉 输入电阻

$$R_{ic} = \frac{1}{2}[r_{be} + (1 + \beta)(2r_o)]$$



7.2.3 BJT差分式放大电路

3. 共模抑制比

共模情况

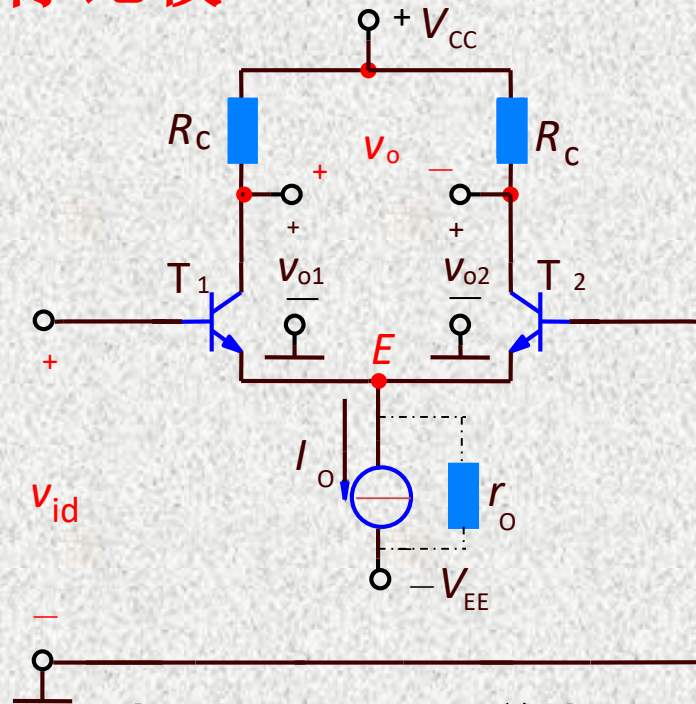
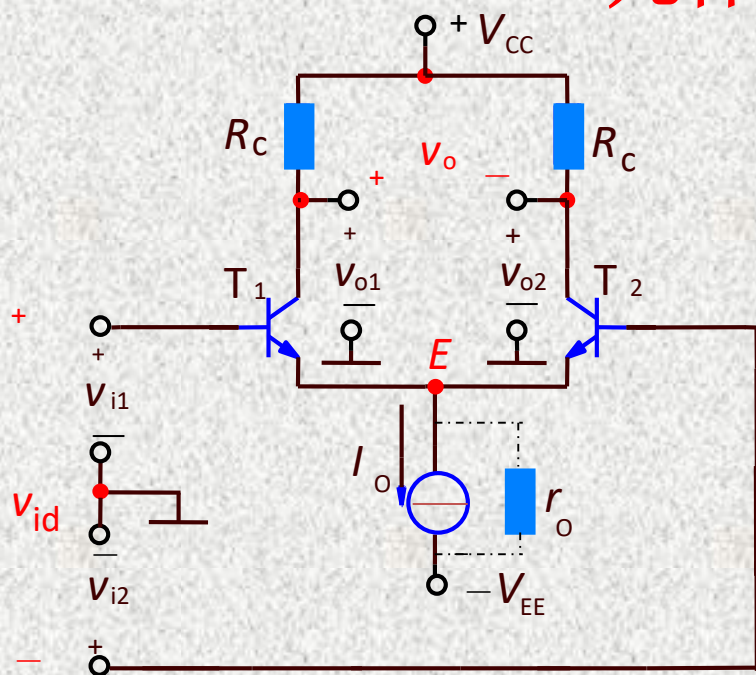
衡量差分式放大电路抑制共模信号的能力。

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{VD}}{A_{VC}} \right| \quad K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{VD}}{A_{VC}} \right| \text{dB}$$

差分式放大电路双端输出时： K_{CMR} 为无穷大；单端输出时：

$$\begin{aligned} K_{CMR} &= \left| \frac{A_{VD}}{A_{VC}} \right| \approx \frac{\beta r_o}{r_{be}} & v_{o1} &= A_{VD1} v_{id} + A_{VC1} v_{ic} \\ & & &= A_{VD1} v_{id} \left(1 + \frac{A_{VC1}}{A_{VD1}} \frac{v_{ic}}{v_{id}} \right) \\ & & &= A_{VD1} v_{id} \left(1 + \frac{1}{K_{CMR}} \frac{v_{ic}}{v_{id}} \right) \end{aligned}$$

几种方式指标比较



输出方式

双出

单出

双出

单出

$$A_{VD} = -\frac{\beta(R_c // \frac{1}{2}R_L)}{r_{be}} \quad -\frac{\beta(R_c // R_L)}{2r_{be}}$$

$$A_{VC} \rightarrow 0 \quad \approx -\frac{R_c // R_L}{2r_o}$$

$$K_{CMR} \rightarrow \infty \quad \approx \frac{\beta \cdot r_o}{r_{be}}$$

$$A_{VD} = -\frac{\beta(R_c // \frac{1}{2}R_L)}{r_{be}}$$

$$\rightarrow 0$$

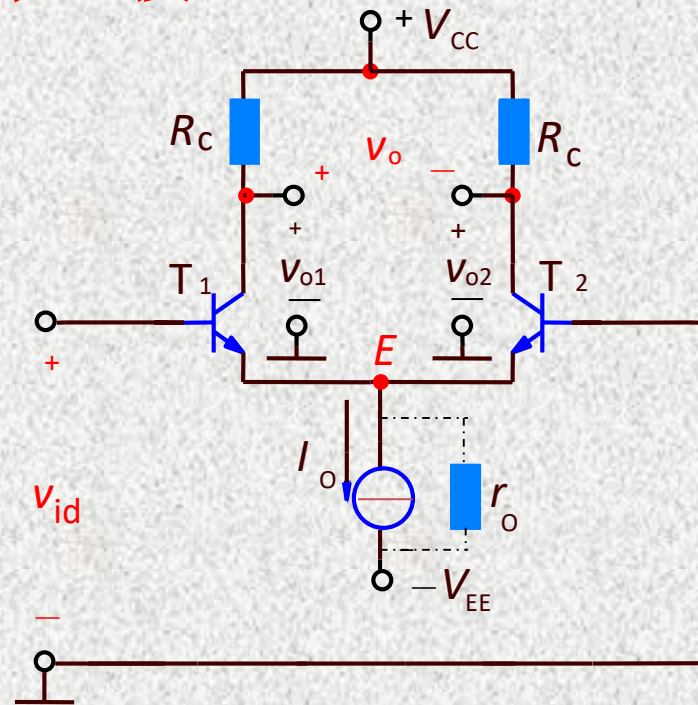
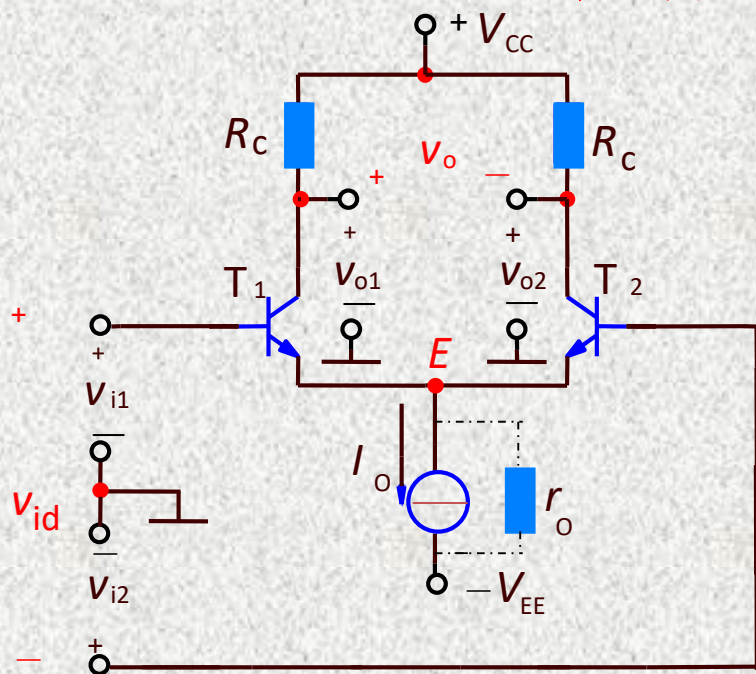
$$\rightarrow \infty$$

$$A_{VD} = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{2r_{be}}$$

$$\approx -\frac{R_c // R_L}{2r_o}$$

$$\approx \frac{\beta \cdot r_o}{r_{be}}$$

几种方式指标比较



输出方式

双出

单出

双出

单出

$$R_{id}$$

$$2r_{be}$$

$$2r_{be}$$

$$R_{ic}$$

$$\frac{1}{2}[r_{be} + (1 + \beta)2r_o]$$

$$\frac{1}{2}[r_{be} + (1 + \beta)2r_o]$$

$$R_o$$

$$2R_c$$

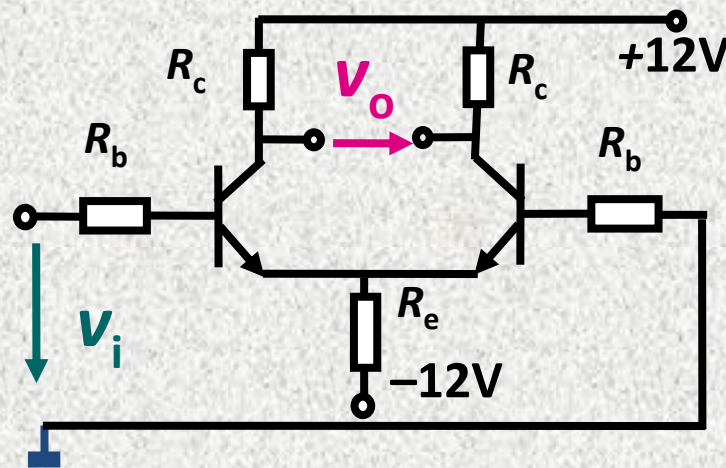
$$R_c$$

$$2R_c$$

$$R_c$$

例1: $\beta=50$, $R_b=20\text{k}\Omega$,
 $R_c=R_L=R_e=20\text{k}\Omega$,
 $r_{bb'}=300\Omega$,
 $V_{BEQ}=0.6\text{V}$

求：静态时 I_{B1} 、 I_{C1} 、 V_{CE1} ；双
 端输出时 A'_{vd} 、 A_{vc} 、 K_{CMR}
 、差模输入输出电阻



解: 静态时，两只BJT的集电极电位相等， R_L 对静态无影
 响； R_e 中电流为 $2I_E$ ，差模信号下， R_e 相当于短路；
 差模交流负载为 R_L 的一半

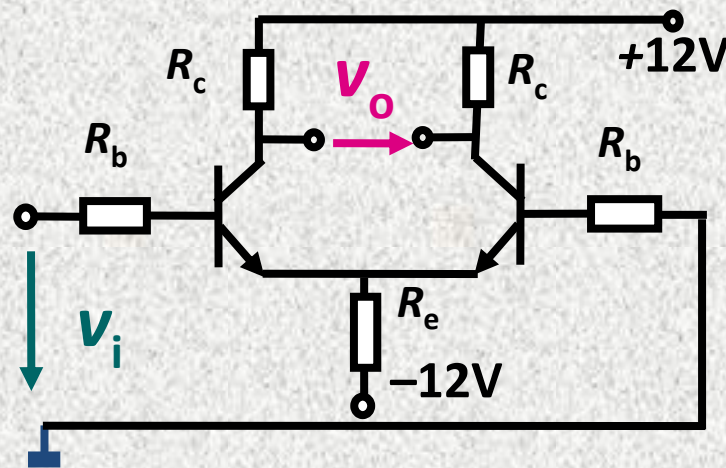
$$I_{B1} = \frac{12 - 0.6}{R_b + 2(1 + \beta)R_e} = 0.0055\text{mA} \quad I_{C1} = \beta I_{B1} = 0.28\text{mA}$$

$$V_{CE1} = 24 - I_{C1}(R_c + 2R_e) = 7.2\text{V} \quad r_{be} = 300 + (1 + \beta)\frac{26}{0.28} = 4.74\text{k}\Omega$$

$$\beta=50, \quad R_b=20\text{k}\Omega,$$

$$R_c=R_L=R_e=20\text{k}\Omega, \quad r_{bb'}=300\Omega$$

$$, \quad V_{BEQ}=0.6\text{V}$$



$$A'_{vd} = -\frac{\beta(R_c \parallel R_L/2)}{r_{be} + R_b} = -1.35 \quad \text{由于对称, } A_{vc} = 0, \quad K_{CMR} = \infty$$

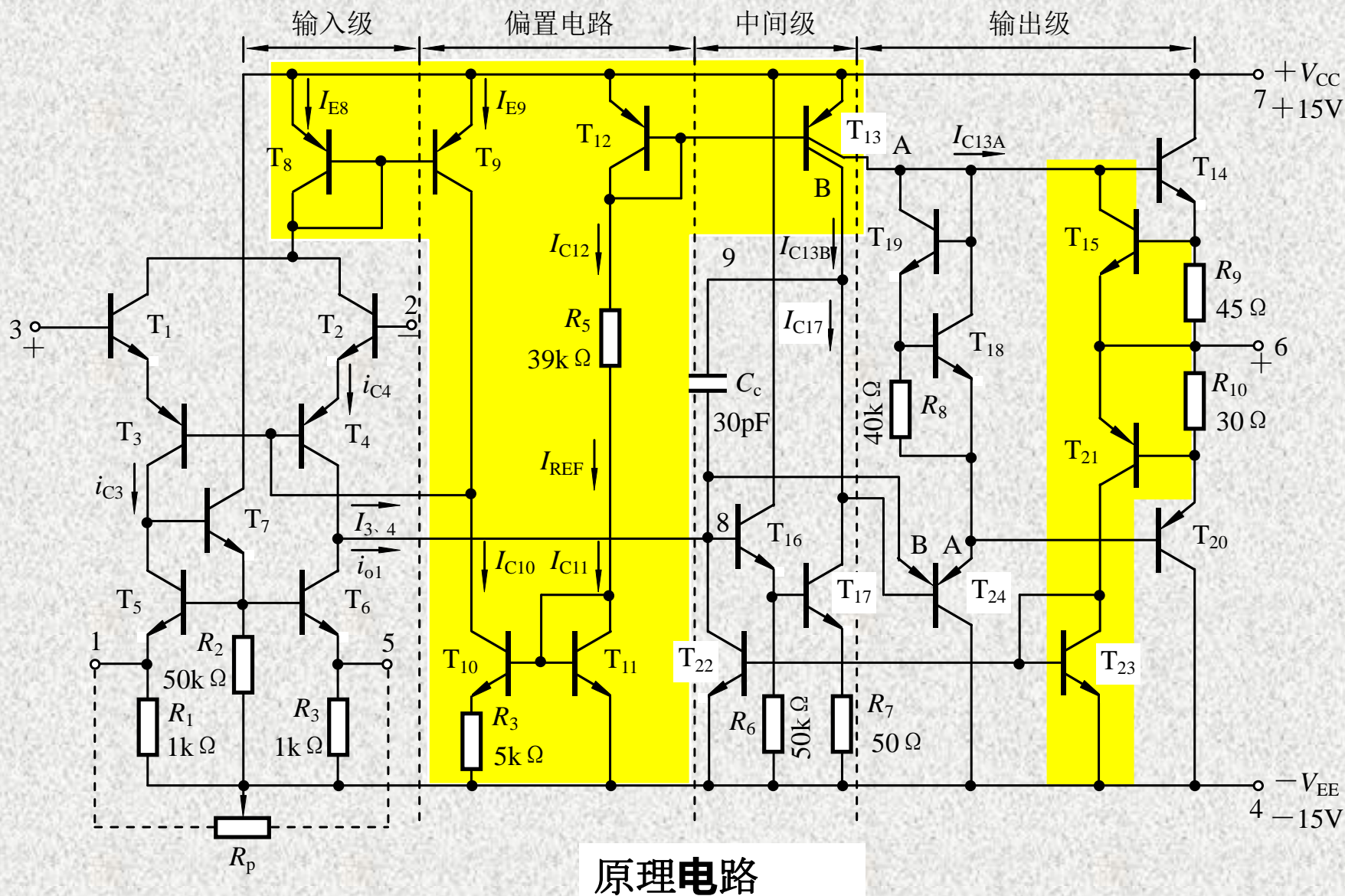
$$R_i = 2(r_{be} + R_b) = 49.48\text{k}\Omega \quad R_o = 2R_c = 40\text{k}\Omega$$

7.5 集成运算放大器

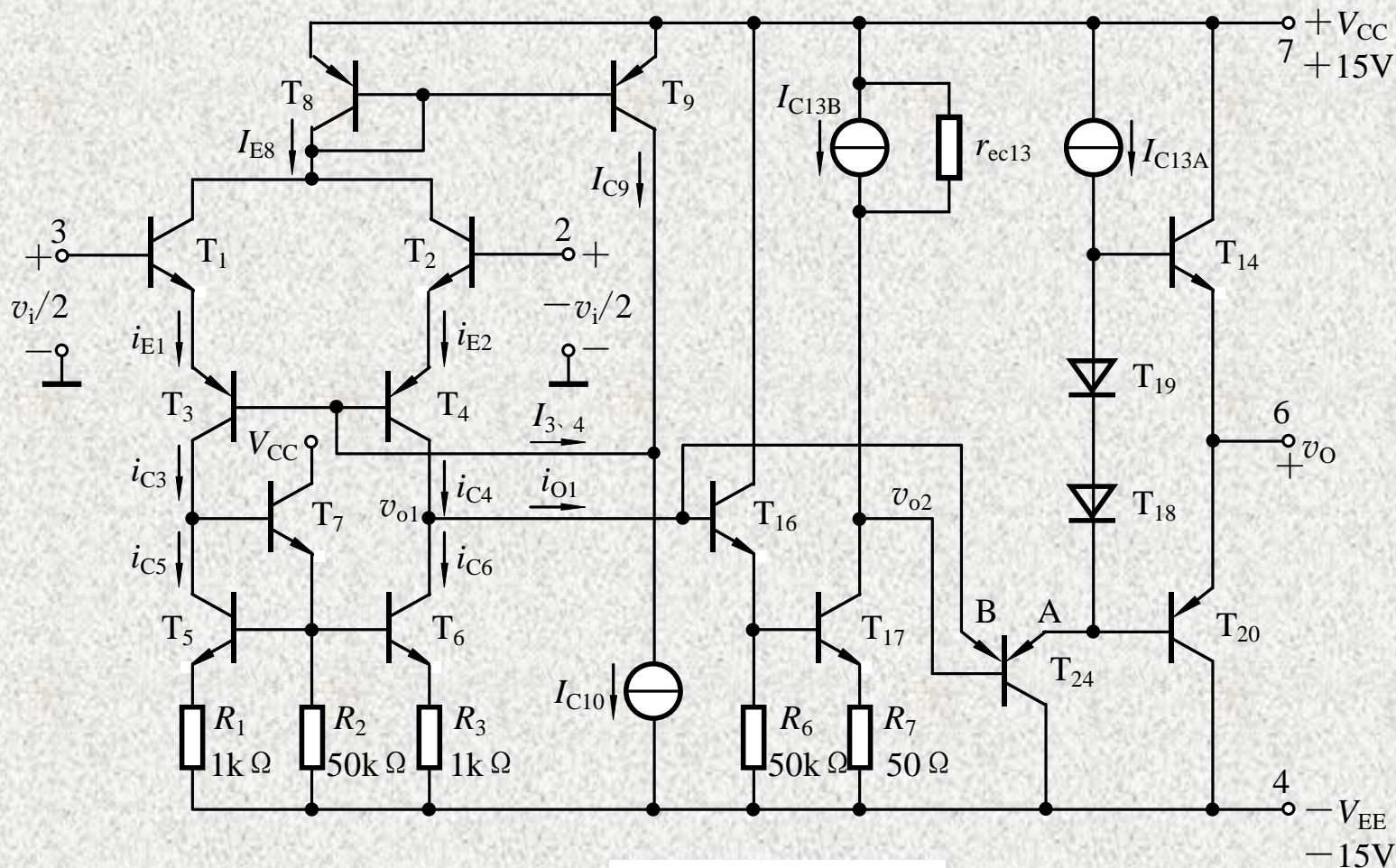
7.5.2 BJT型LM741集成运算放大器

7.5.3 BiJFET型集成运算放大器LF356

7.5.2 BJT型LM741集成运算放大器



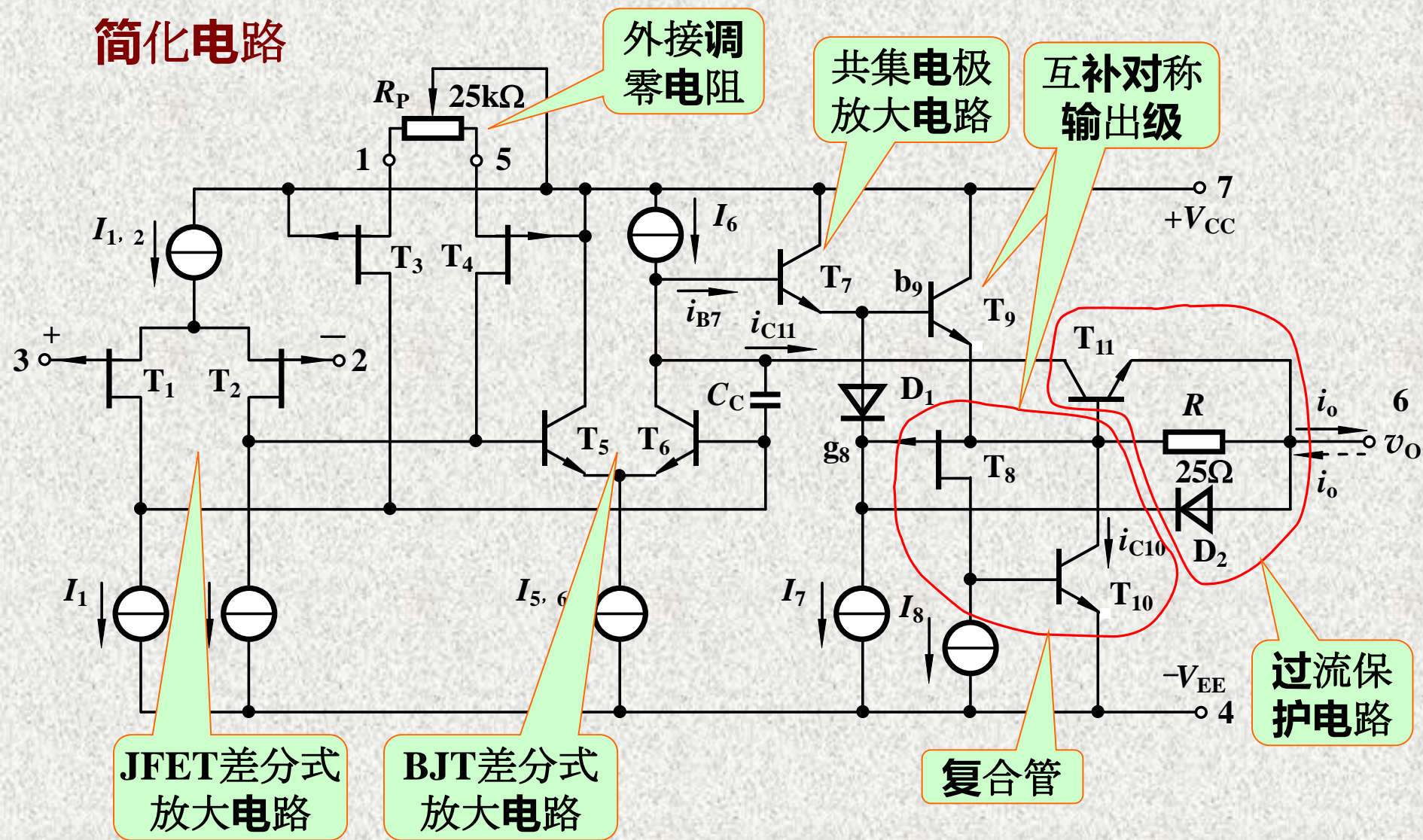
7.5.2 BJT型LM741集成运算放大器



简化电路

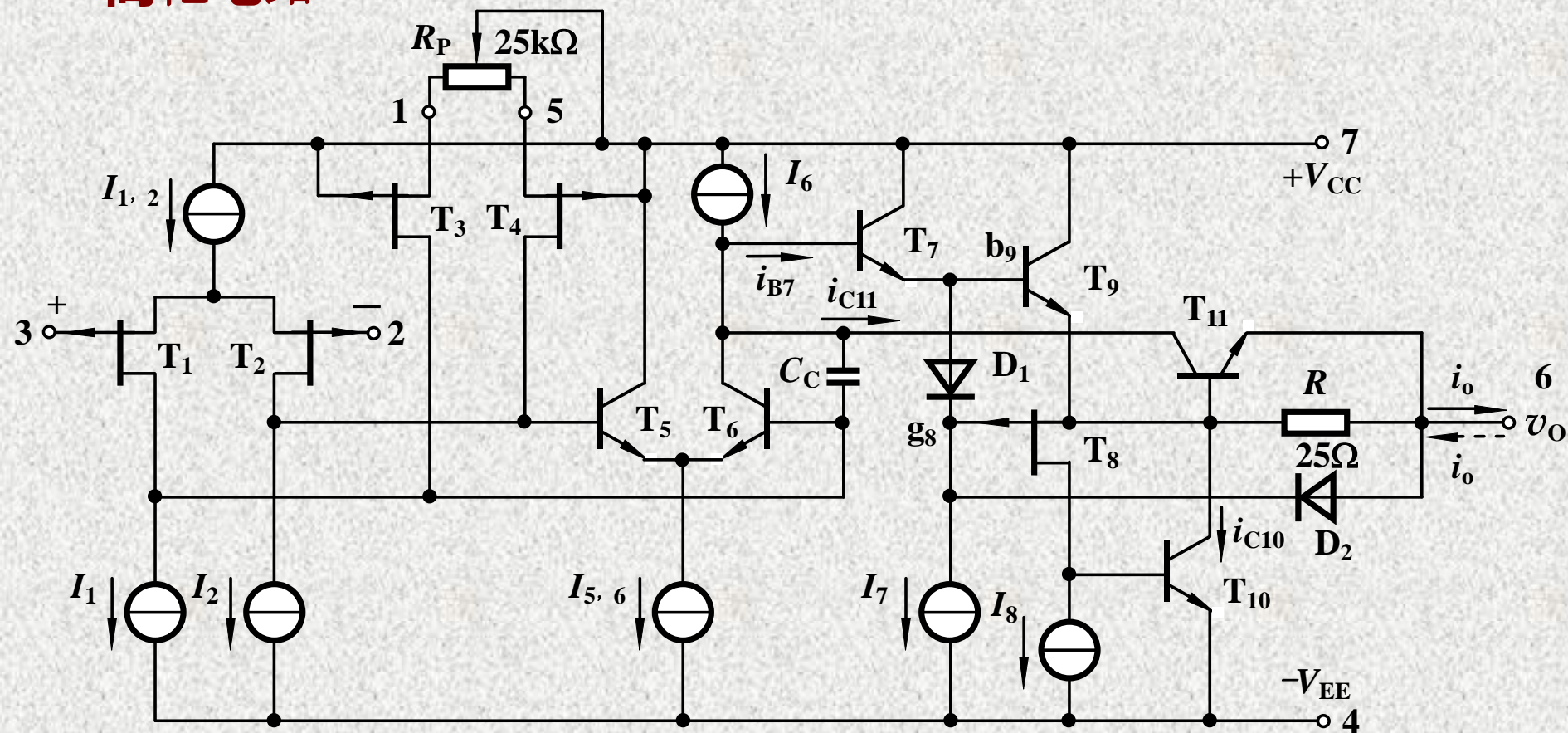
7.5.3 BiJFET型集成运算放大器LF356

简化电路



7.5.3 BiJFET型集成运算放大器LF356

简化电路



很高的**输入电阻**，很低的**输入偏置电流**，高速、**宽带**和低噪声

7.6 实际集成运算放大器的主要参数和对应用电路的影响

7.6.1 实际集成运放的主要参数

7.6.2 集成运放应用中的实际问题

7.6.1 实际集成运放的主要参数

输入直流误差特性（输入失调特性）

1. 输入失调电压 V_{IO}

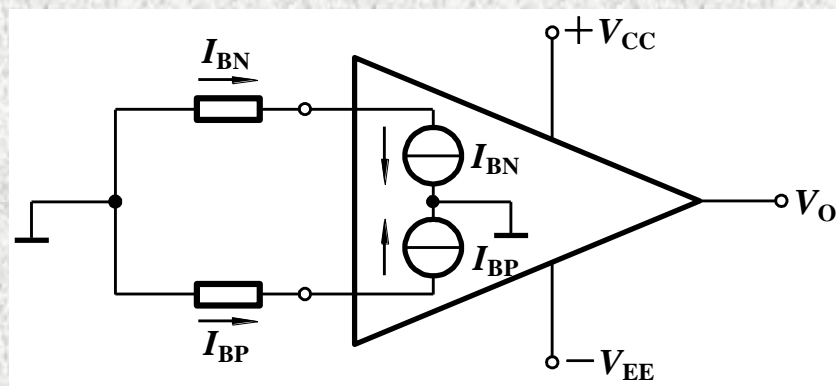
输入电压为零时，为了使输出电压为零，在输入端加的补偿电压。一般约为 $\pm (1 \sim 10) \text{ mV}$ 。超低失调运放为 $(1 \sim 20) \mu\text{V}$ 。高精度运放OP-117 $V_{IO} = 4 \mu\text{V}$ 。MOSFET 达 20 mV 。

2. 输入偏置电流 I_{IB}

集成运放两个输入端静态电流的平均值

$$I_{IB} = (I_{BN} + I_{BP}) / 2$$

BJT为 $10 \text{ nA} \sim 1 \mu\text{A}$ ；MOSFET运放 I_{IB} 在 pA 数量级。



7.6.1 实际集成运放的主要参数

输入直流误差特性（输入失调特性）

3. 输入失调电流 I_{IO}

输入电压为零时流入放大器两输入端的静态基极电流之差，即 $I_{IO} = |I_{BP} - I_{BN}|$ 。一般约为 $1 \text{ nA} \sim 0.1 \mu\text{A}$ 。

4. 温度漂移

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

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

7.6.1 实际集成运放的主要参数

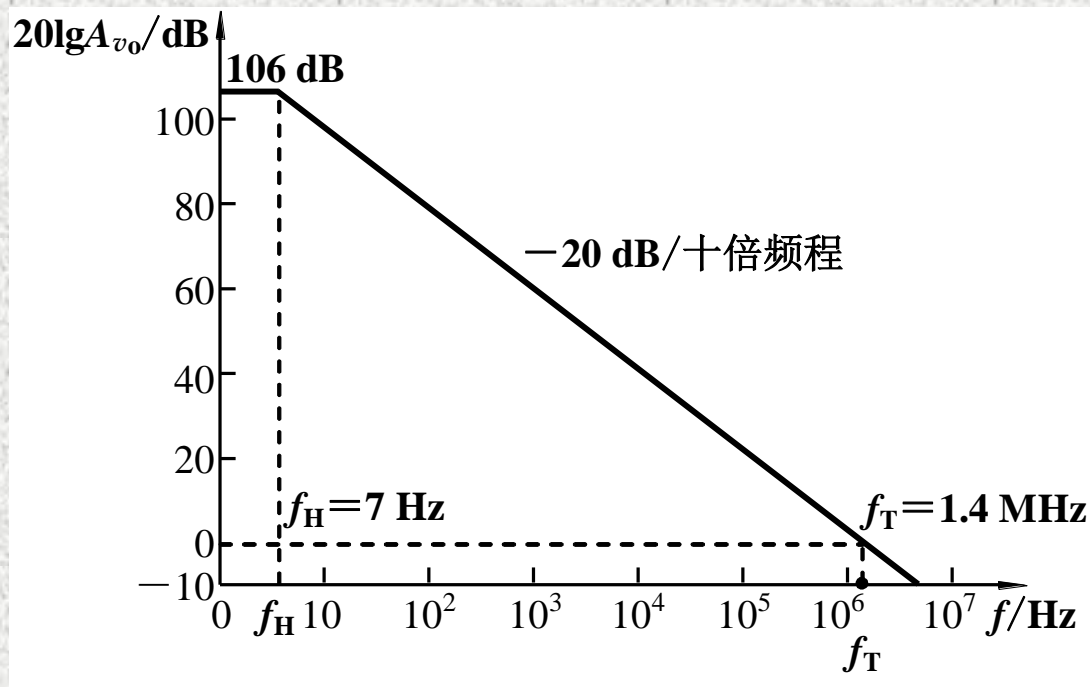
差模特性

1. 开环差模电压增益 A_{vo} 和带宽BW

开环差模电压增益 A_{vo}

开环带宽 $BW(f_H)$

单位增益带宽 $BW_G(f_T)$



741型运放 A_{vo} 的频率响应

7.6.1 实际集成运放的主要参数

差模特性

2. 差模输入电阻 r_{id} 和输出电阻 r_o

- BJT输入级的运放 r_{id} 一般在几百千欧到数兆欧
- MOSFET为输入级的运放 $r_{id} > 10^{12}\Omega$
- 超高输入电阻运放 $r_{id} > 10^{13}\Omega$ 、 $I_{IB} \leq 0.040\text{pA}$
- 一般运放的 $r_o < 200\Omega$ ，而超高速AD9610的 $r_o = 0.05\Omega$ 。

3. 最大差模输入电压 V_{idmax}

7.6.1 实际集成运放的主要参数

共模特性

1. 共模抑制比 K_{CMR} 和共模输入电阻 r_{ic}

一般通用型运放 K_{CMR} 为（80~120）dB，高精度运放可达140dB， $r_{\text{ic}} \geq 100\text{M}\Omega$ 。

2. 最大共模输入电压 V_{icmax}

运放作为电压跟随器时，使输出电压产生1%跟随误差的共模输入电压幅值。高质量的运放可达 $\pm 13\text{V}$ 。

7.6.1 实际集成运放的主要参数

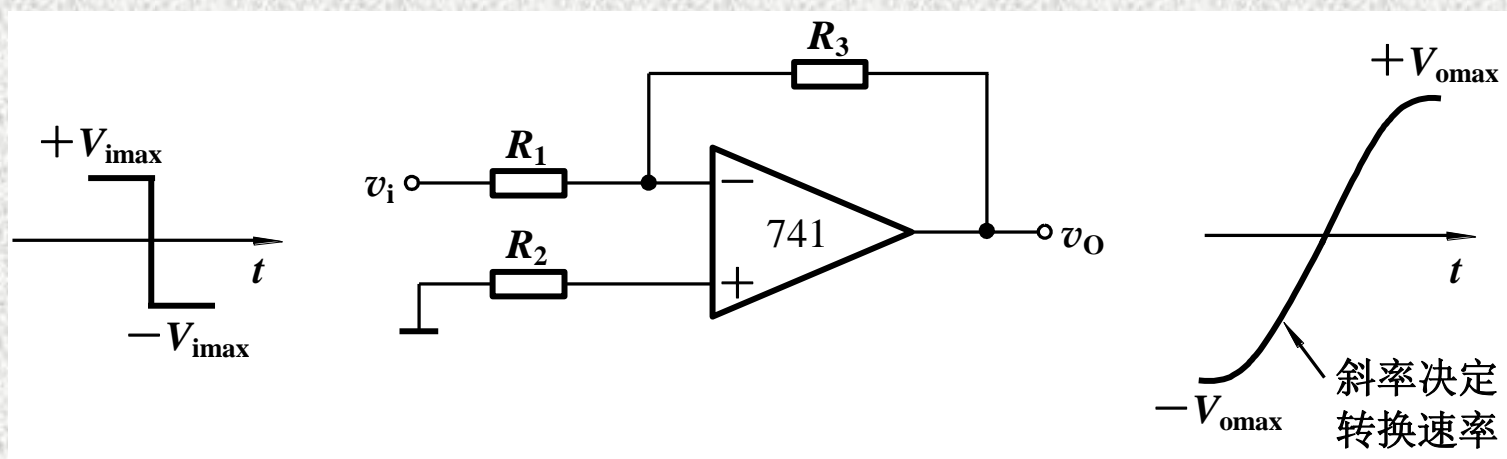
大信号动态特性

1. 转换速率 S_R

放大电路在**闭环状态**下，**输入为大信号**（例如**阶跃信号**）**时**，

输出电压对时间的最大变化速率，即
$$S_R = \left. \frac{dv_o(t)}{dt} \right|_{\max}$$

若信号为 $v_i = V_{im} \sin 2\pi f t$ ，则运放的 S_R 必须满足 $S_R \geq 2\pi f_{\max} V_{om}$



7.6.1 实际集成运放的主要参数

大信号动态特性

2. 全功率带宽 BW_P

运放**输出最大峰值电压时**允许的**最高频率**，即

$$BW_P = f_{\max} = \frac{S_R}{2\pi V_{om}}$$

S_R 和 BW_P 是大信号和高**频**信号工作**时**的重要**指标**

一般通用型运放 S_R 在 $1V/\mu s$ 以下，741的 $S_R=0.5V/\mu s$

高速运放要求 $S_R>30V/\mu s$ 以上。

目前超高速的运放如AD9610的 $S_R > 3500V/\mu s$ 。

7.6.1 实际集成运放的主要参数

电源特性

1. 电源电压抑制比 K_{SVR}

衡量电源电压波动对输出电压的影响

2. 静态功耗 P_V

极限参数

1. 电源电压范围

2. 最大耗散功耗 P_{CO}

3. 最大输出电流 I_{Omax}

7.6.2 集成运放应用中的实际问题

1. 集成运放的**选用**

根据**技术要求应首选**通用型运放，当通用型运放**难以满足要求时**，才**考虑专用型运放**，**这是因为**通用型器件的**各项参数比较均衡**，做到**技术性与经济性的统一**。

虽然专用型运放某项技术参数很突出，但其他参数**则难以兼顾**，例如低噪声运放的**带宽**往往**设计得较窄**，而高速型与高精度常常有矛盾，如此等等。

7.6.2 集成运放应用中的实际问题

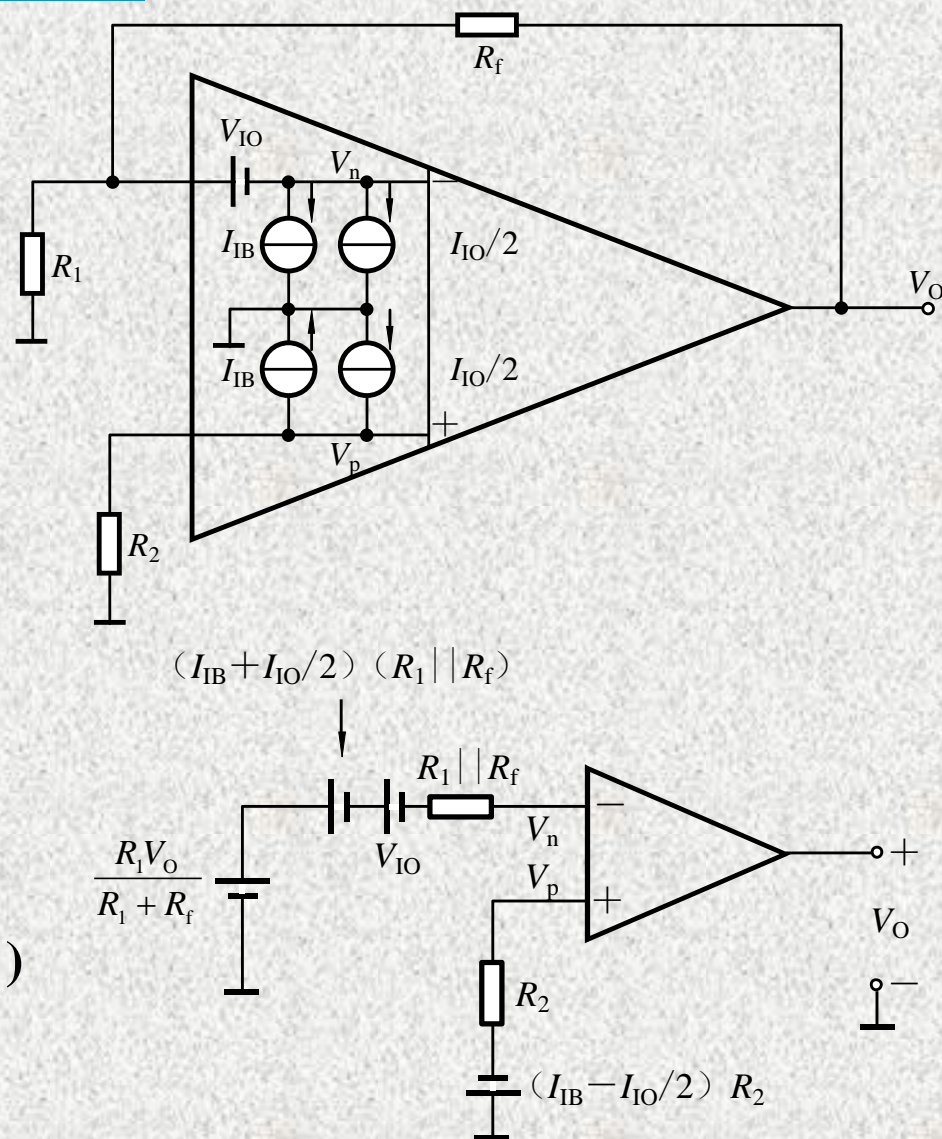
2. 失调电压 V_{IO} 、失调电流 I_{IO} 和偏置电流 I_{IB} 带来的误差

输入为零时的等效电路

$$\begin{cases} V_P = -\left(I_{IB} - \frac{I_{IO}}{2}\right)R_2 \\ V_N = V_O \frac{R_1}{R_1 + R_f} \\ -(I_{IB} + \frac{I_{IO}}{2})(R_1 \parallel R_f) - V_{IO} \\ V_P \approx V_N \end{cases}$$

解得误差电压

$$V_O = (1 + R_f / R_1)[V_{IO} + I_{IB}(R_1 \parallel R_f - R_2) + \frac{1}{2}I_{IO}(R_1 \parallel R_f + R_2)]$$



7.6.2 集成运放应用中的实际问题

$$V_O = (1 + R_f / R_1)[V_{IO} + I_{IB}(R_1 \parallel R_f - R_2) + \frac{1}{2} I_{IO}(R_1 \parallel R_f + R_2)]$$

当 $R_2 = R_1 \parallel R_f$ 时，可以消除偏置电流 I_{IB} 引起的误差，此时

$$V_O = (1 + R_f / R_1)(V_{IO} + I_{IO} R_2)$$

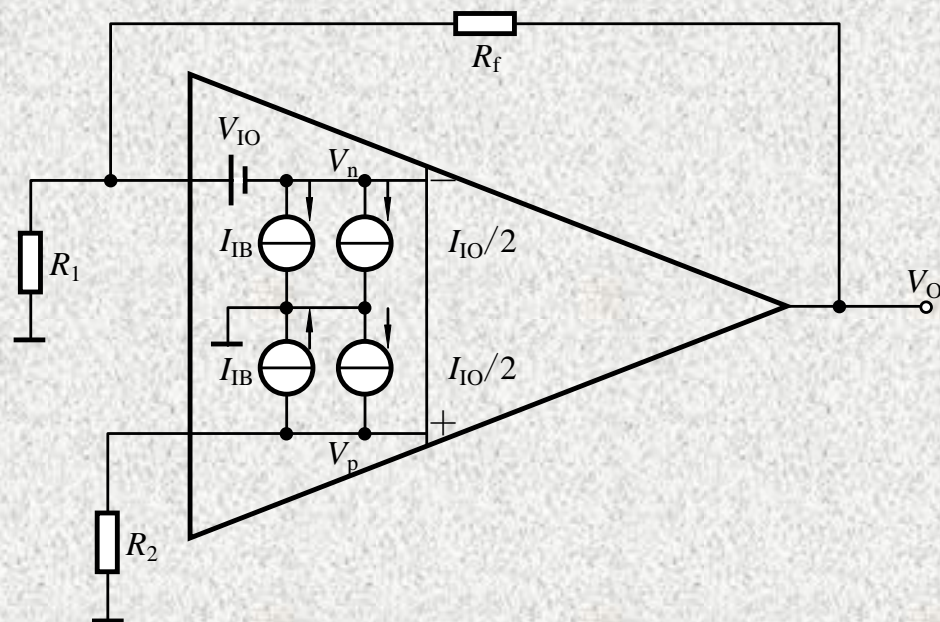
V_{IO} 和 I_{IO} 引起的误差仍存在

当电路为积分运算时，

即 R_f 换成电容 C ，则

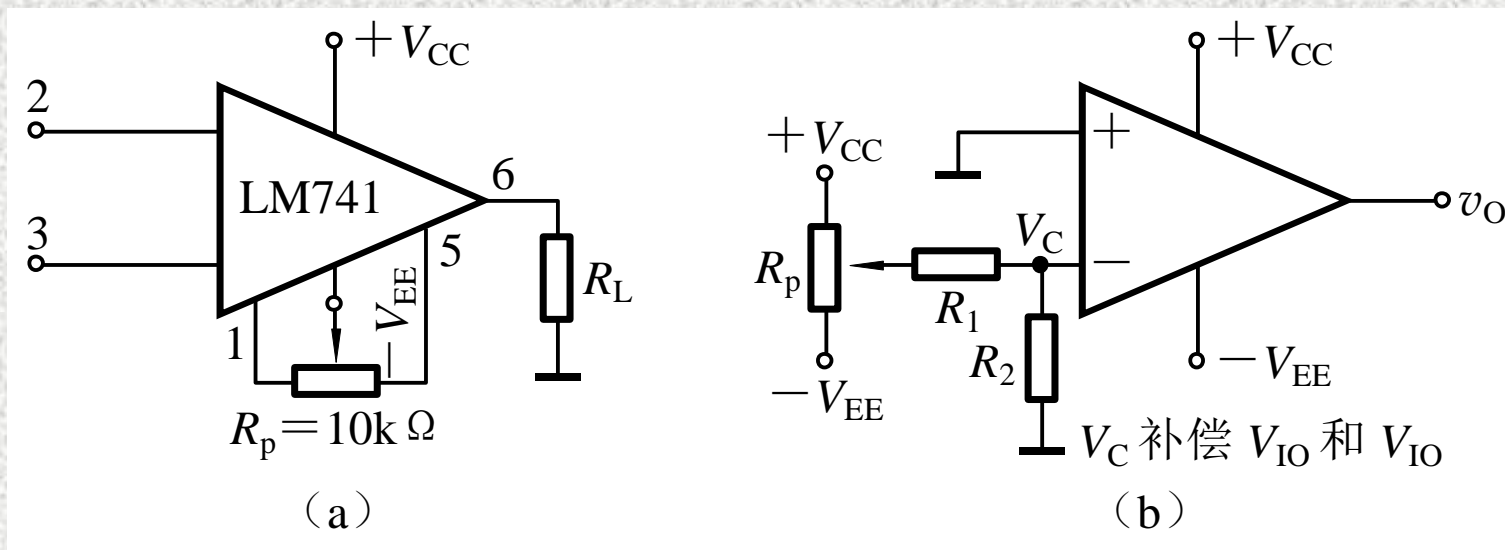
$$v_O(t) = [V_{IO}(t) + I_{IO}(t)R_2] + \frac{1}{R_1 C} \left[\int V_{IO}(t) dt + \int I_{IO}(t) R_2 dt \right]$$

时间越长，误差越大，且易使输出进入饱和状态。



7.6.2 集成运放应用中的实际问题

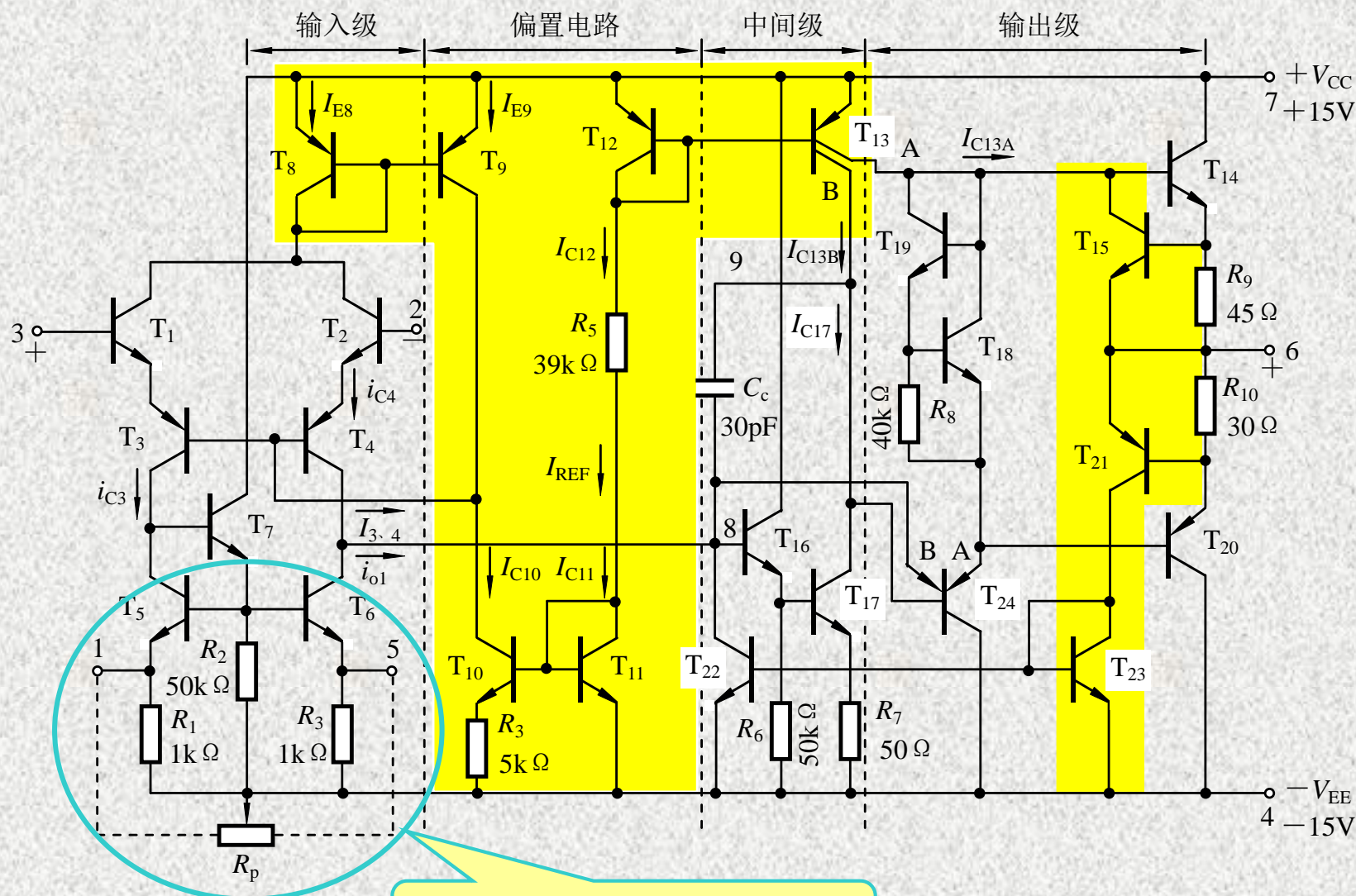
3. 调零补偿



(a) 调零电路

(b) 反相端加入补偿电路

7.6.2 集成运放应用中的实际问题



741中的调零电路

7.6.2 集成运放应用中的实际问题

3. 调零补偿

356中的调零电路

