

第4章 集成运算放大器

东北大学 机械电子工程研究所

2025/3/24

东北大学 机械工程与自动化学院

1

第4章 集成运算放大器



- 概述
- 基本差放电路
- 共模抑制比
- 集成运算放大器

2025/3/24

东北大学 机械工程与自动化学院

2



➤ 集成电路简介

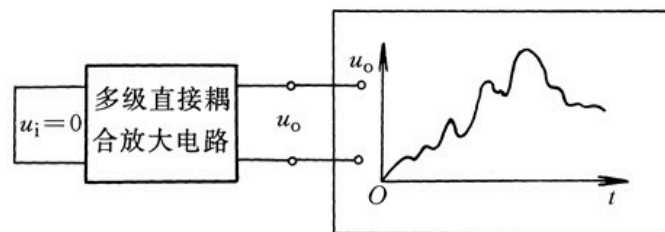
- **集成电路** (Integrated Circuit, IC) 是应用半导体制造工艺把晶体管、场效应管、电阻、小容量电容等许多元器件以及它们之间的连线都做在同一硅片上，然后封装在管壳里。这样制成的具有特定功能的电子电路称为集成电路。
- 特点是体积小，重量轻，性能好，功耗低，可靠性高。

➤ 集成运算放大器简介

- 在模拟集成电路中，发展最早、应用最广的是集成运算放大器，简称集成运放。
- 集成运放具有**高放大倍数**、**高输入电阻**、**低输出电阻**。
- 集成运算放大器是一种高放大倍数的直接耦合多级放大器。
- 由四部分组成，包括输入级，中间级，输出级和偏置电路。

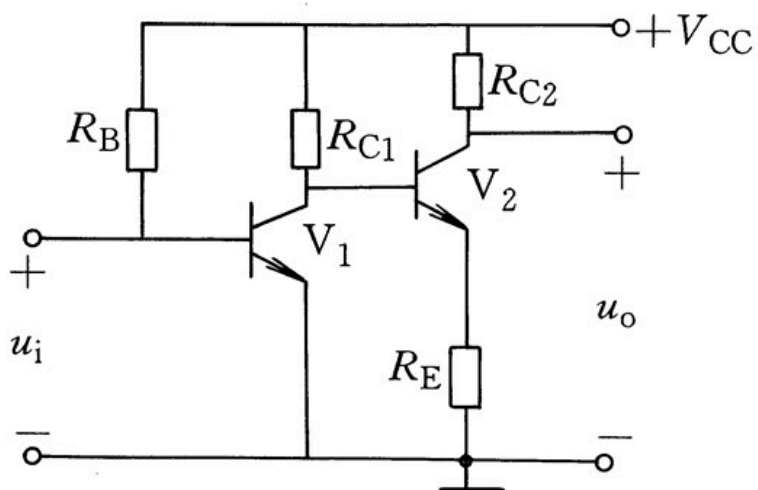


- 集成运算放大器是一种高放大倍数的直接耦合多级放大器。
- 直接耦合方式的放大电路存在着**温漂问题**，在多级放大器中，第一级的温漂影响尤其严重，因此必须采取措施有效地抑制温漂。
- 输入级大多采用差动式放大电路。





- 直接耦合放大电路存在的问题
- 各级静态工作点之间互相影响，互相牵制。



直接耦合两级放大电路

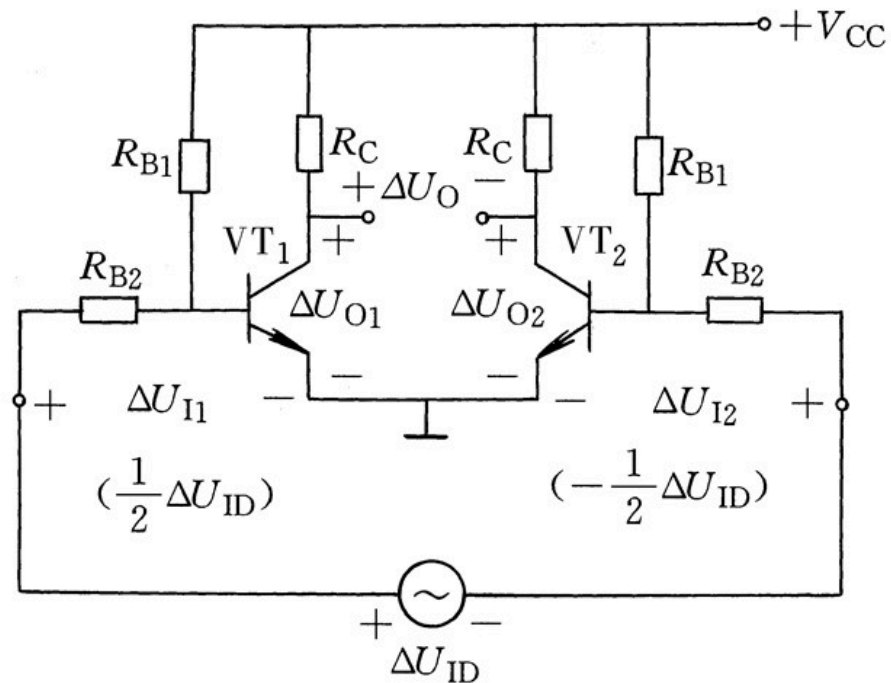
$$U_{CE1} = U_{BE2} + I_{E2} R_E$$

$$U_{B2} = U_{C1} > U_{B1}, \quad U_{C2} > U_{C1}$$

各级的基极和发射极电位逐渐抬高。



➤ 基本差动放大电路



由两个相同的共发射极放大电路组成。

输入：从两个晶体管的基极，称为双端输入。

输出：从两个晶体管的集电极之间输出，称为双端输出。

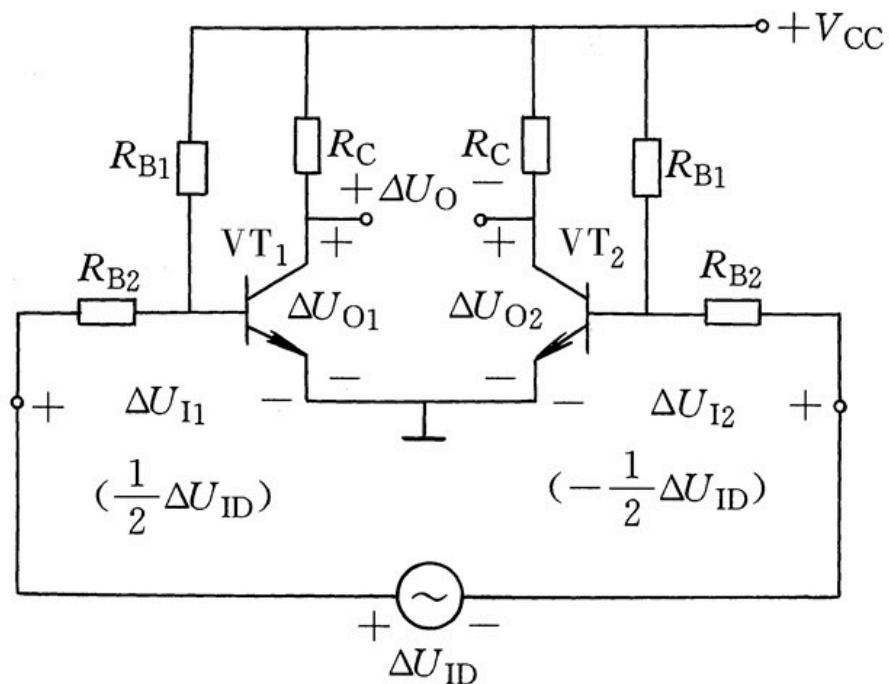
$$\Delta U_o = U_{c1} - U_{c2}$$

两个晶体管VT1和VT2特性完全一致。

两边电路是完全对称的。



➤基本差动放大电路—静态分析



如果 $\Delta U_{I1} = \Delta U_{I2} = 0$

两个晶体管的集电极电压为

$$\Delta U_{O1} = \Delta U_{O2}$$

输出电压表示为

$$\Delta U_O = \Delta U_{O1} - \Delta U_{O2} = 0$$

当温度升高时, β 增大, 则 $I_{c1} \uparrow$ $I_{c2} \uparrow$

ΔU_{O1} 和 ΔU_{O2} 下降相同的数值, 电路对称

因此 $\Delta U_{O1} = \Delta U_{O2}$

$$\Delta U_O = \Delta U_{O1} - \Delta U_{O2} = 0$$

输出电压没有温漂。

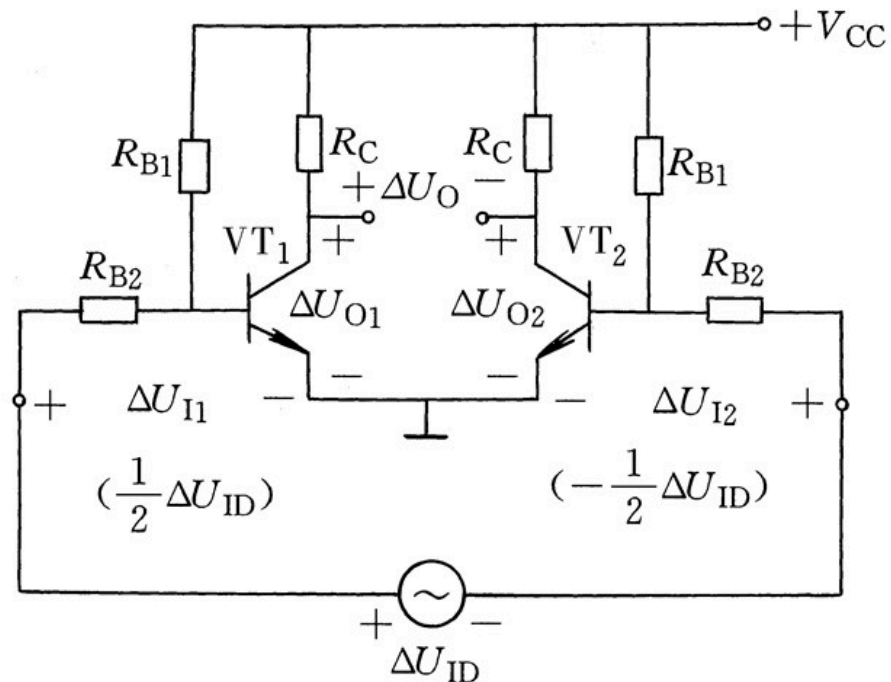
2025/3/24

东北大学 机械工程与自动化学院

7



➤ 基本差动放大电路—共模信号



输入大小相等，极性相同的信号，表示为

$$\Delta U_{I1} = \Delta U_{I2}$$

共模信号表示为

$$\Delta U_{IC} = \Delta U_{I1} = \Delta U_{I2}$$

ΔU_{O1} 和 ΔU_{O2} 的变化相同，因此输出电压

$$\Delta U_{OC} = 0$$

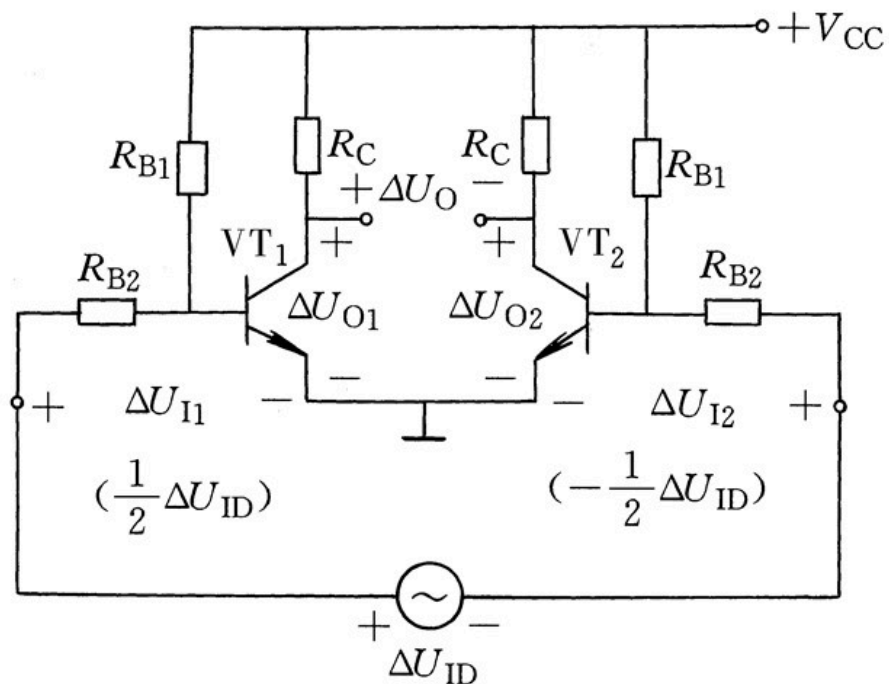
共模电压放大倍数：当输入共模信号时，共模输出电压与输入电压之比，表示为

$$A_{uc} = \frac{\Delta U_{OC}}{\Delta U_{IC}}$$

电路在理想对称情况下，双端输出时， $A_{uc} = 0$ 可以抑制共模信号。



► 基本差动放大电路—差模信号



输入信号的大小相等，极性相反，表示为

$$\Delta U_{I1} = -\Delta U_{I2}$$

输入信号相当于在两边电路的输入端均分，

$$\Delta U_{I1} = \frac{1}{2} \Delta U_{ID} \quad \Delta U_{I2} = -\frac{1}{2} \Delta U_{ID}$$

差模信号表示为

$$\Delta U_{ID} = \Delta U_{I1} - \Delta U_{I2}$$

在差模信号作用下，晶体管的基极电流和集电极电位变化相反，表示为

$$\text{当 } \Delta U_{ID} > 0 \text{ 时 } \quad \Delta U_{I1} > 0 \quad \Delta U_{O1} < 0$$

$$\Delta U_{I2} < 0 \quad \Delta U_{O2} > 0$$

在电路完全对称的情况下，表示为

$$\Delta U_{O1} = -\Delta U_{O2} \quad \Delta U_O = 2\Delta U_{O1} = -2\Delta U_{O2}$$

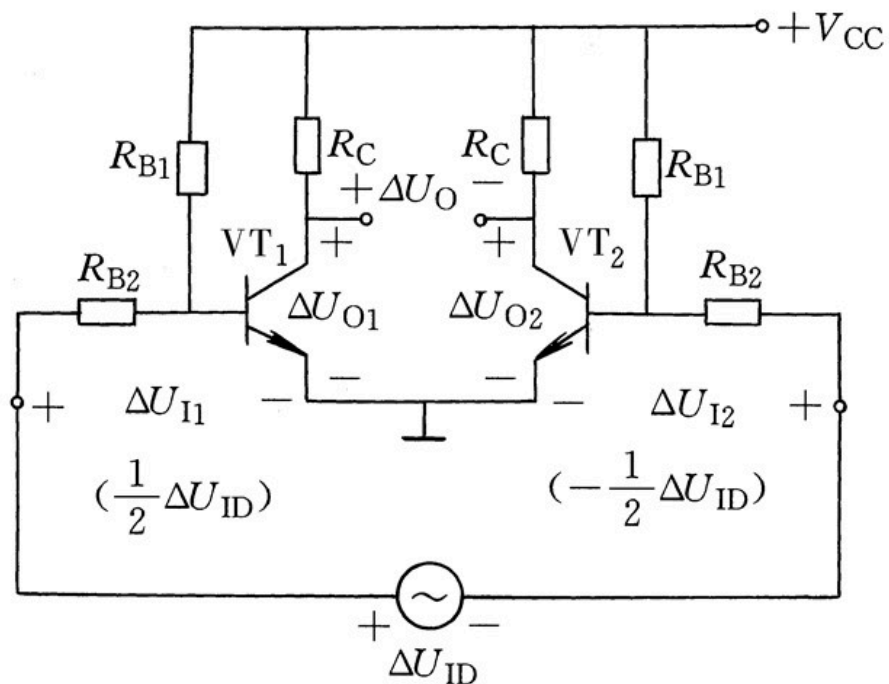
2025/3/24

东北大学 机械工程与自动化学院

9



➤ 基本差动放大电路—差模信号



输入为差模信号，输出表示为

$$\Delta U_{O1} = \Delta U_{I1} A_{U1} = \frac{1}{2} \Delta U_{ID} A_{U1}$$

$$\Delta U_{O2} = \Delta U_{I2} A_{U2} = -\frac{1}{2} \Delta U_{ID} A_{U2}$$

由于电路对称，则 $A_{U1} = A_{U2}$

总的输出电压，表示为

$$\begin{aligned} \Delta U_{OD} &= \Delta U_{O1} - \Delta U_{O2} = \frac{1}{2} \Delta U_{ID} A_{U1} + \frac{1}{2} \Delta U_{ID} A_{U2} \\ &= \Delta U_{ID} A_{U1} = \Delta U_{ID} A_{U2} \end{aligned}$$

差模信号的放大倍数，表示为

$$A_{UD} = \frac{\Delta U_{OD}}{\Delta U_{ID}} = A_{U1} = A_{U2}$$

2025/3/24

东北大学 机械工程与自动化学院

10



➤ 共模抑制比

- 衡量差动放大电路抑制共模信号的能力用共模抑制比来表示，共模抑制比等于差动放大电路的差模放大倍数和共模放大倍数的比值。
- 共模抑制比越大，性能越好，抑制共模信号（零点漂移）的能力越强。

- 差动放大电路抑制共模信号的能力，常用共模抑制比来衡量。共模抑制比表示为

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{uD}}{A_{uC}} \right|$$

- 用分贝为单位表示为

$$K_{CMR}(\text{dB}) = 20 \lg \left| \frac{A_{uD}}{A_{uC}} \right|$$

- 差动放大电路具有共模抑制作用，能够在很强的共模干扰中放大微小的差模信号。



- 差动放大电路放大的是差模输入信号。共模信号是外界客观存在的。实际上差动放大电路的输入信号既有差模信号，又有共模信号。
- 当差动放大电路两个输入端的实际输入信号分别为 ΔU_{I1} 和 ΔU_{I2} 时，可以认为同时有差模信号和共模信号输入。

差模信号为 $\Delta U_{ID} = \Delta U_{I1} - \Delta U_{I2}$

共模信号为 $\Delta U_{IC} = \frac{\Delta U_{I1} + \Delta U_{I2}}{2}$

实际信号是差模信号和共模信号的叠加。

$$\Delta U_{I1} = \frac{\Delta U_{ID}}{2} + \Delta U_{IC} = \frac{\Delta U_{I1} - \Delta U_{I2}}{2} + \frac{\Delta U_{I1} + \Delta U_{I2}}{2} = \Delta U_{I1}$$

$$\Delta U_{I2} = -\frac{\Delta U_{ID}}{2} + \Delta U_{IC} = -\frac{\Delta U_{I1} - \Delta U_{I2}}{2} + \frac{\Delta U_{I1} + \Delta U_{I2}}{2} = \Delta U_{I2}$$



➤ 差模电压放大倍数为 A_{uD} ，则差模输出电压为

$$\Delta U_{oD} = A_{uD} \cdot \Delta U_{iD}$$

➤ 共模电压放大倍数为 A_{uC} ，则共模输出电压为

$$\Delta U_{oC} = A_{uC} \cdot \Delta U_{iC}$$

➤ A_{uD} 越大，表示对差模信号的放大能力越大。

➤ A_{uC} 越大，表示对共模信号的抑制能力越弱。

➤ 共模抑制比为差模电压放大倍数与共模电压放大倍数之比，表示为

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{uD}}{A_{uC}} \right|$$

$$\Delta U_o = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{差模输出电压}}}{\Delta U_{oD}} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{共模输出电压}}}{\Delta U_{oC}} = A_{uD} \cdot \Delta U_{iD} + A_{uC} \cdot \Delta U_{iC}$$



- 差动放大电路两输入端如果同时加有信号，则其差值就是其差模成分，平均值就是其共模成分。
- 理想情况下，共模放大倍数等于零，所以其输出只有差模成分，等于差模输入乘以差模放大倍数。
- 因为双端输入（将输入信号加在差动放大电路两输入端之间）和单端输入（输入信号加在一个输入端，另一端接地）的差模成分是一样的，所以二者是等效的，输出电压相等，但单端输入有共模成分。
- 性能良好的差动放大电路，共模放大倍数应非常低，能够有效抑制共模信号。
- 衡量差动放大电路抑制共模信号的能力——共模抑制比。



- 例题1，集成运算放大器是一种采用（ ）的放大电路。
- 例题2，差动放大电路有（ ）个信号输入端和（ ）个信号输出端。因此有（ ）种不同的连接方式。
- 例题3，差模输入信号是两个输入信号的（ ）。
- 例题4，共模信号是两个输入信号的（ ）。
- 例题5，差动放大电路的两个输入端电压分别为2.0mV和1.98mV，则该电路的差模输入电压为（ ）mV，共模输入电压为（ ）mV。
- 直接耦合， 2， 2， 4， 差， 平均值， 0.02， 1.99



►例题6

►某差动放大电路，参数为 $U_{I1} = 2V, U_{I2} = 2.001V, A_{uD} = 60dB, K_{CMR} = 100dB$
求输出电压中的差模部分 U_{OD} 和共模部分 U_{OC} 。

$$K_{CMR}(dB) = 20 \lg \left| \frac{A_{uD}}{A_{uC}} \right| = 100dB = 10^5 \quad A_{uD} = 60dB = 10^3$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{uD}}{A_{uC}} \right| \rightarrow A_{uC} = \left| \frac{A_{uD}}{K_{CMR}} \right| = 0.01$$

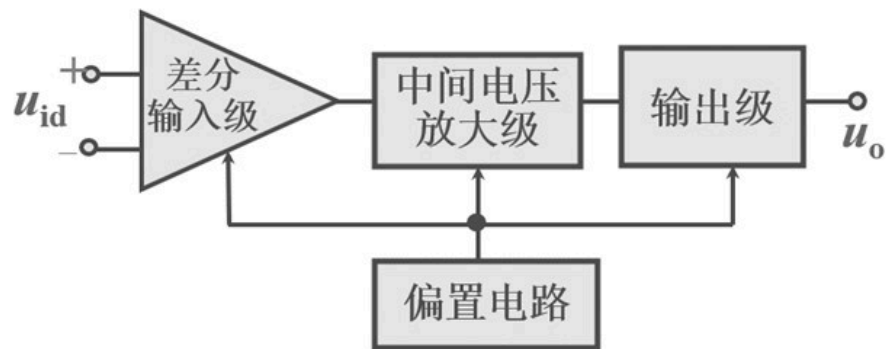
►差模输入电压为 $U_{ID} = U_{I1} - U_{I2} = 2 - 2.001 = -0.001V$

►共模输入电压为 $U_{OD} = \frac{U_{I1} + U_{I2}}{2} = \frac{2 + 2.001}{2} = 2.0005V$

$$U_{OD} = |A_{uD} \cdot U_{ID}| = |10^3 \cdot (-0.001)| = 1V \quad U_{OC} = |A_{uC} \cdot U_{IC}| = |0.01 \times 2.0005| \approx 0.02V$$



➤集成运算放大器

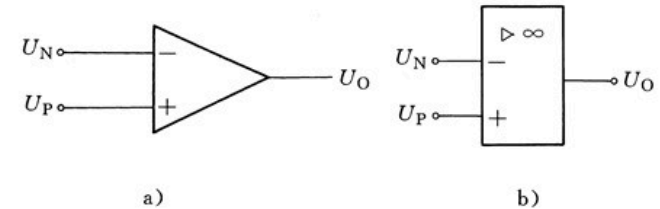
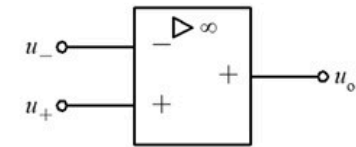


输入级：差分电路，大大减少温漂。低电流状态获高输入阻抗。

中间电压放大级：采用有源负载的共发射极电路，增益大。

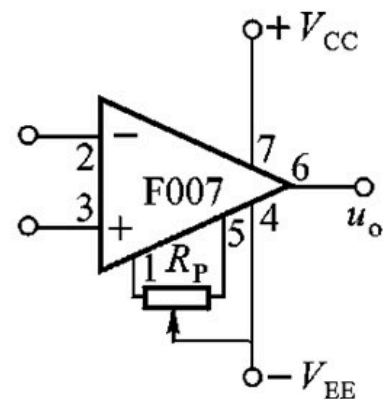
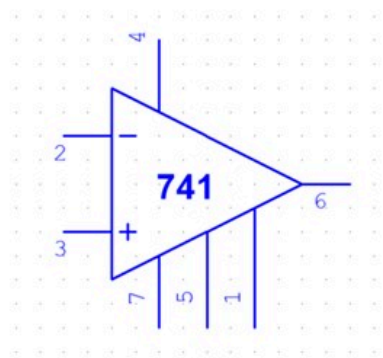
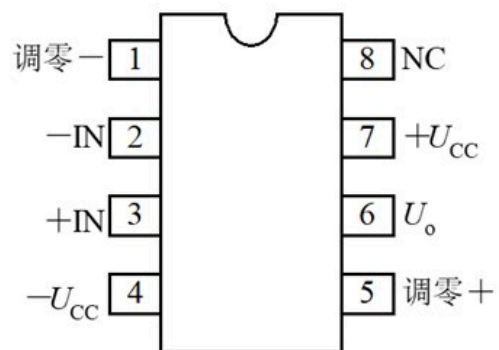
输出级：准互补对称电路，输出功率大、输出电阻小。

偏置电路：各种电流源给各级电路提供合适的静态电流。

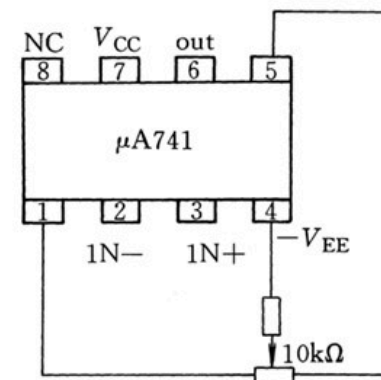




► 集成运算放大器



调零电路



调零电路

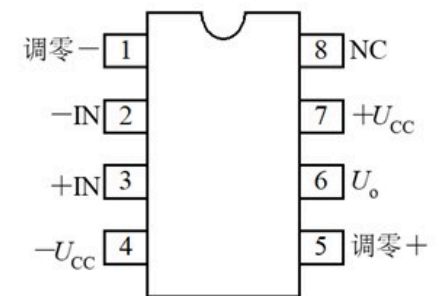
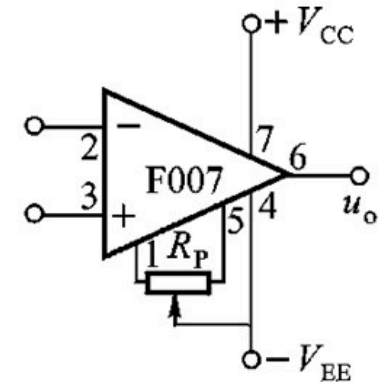
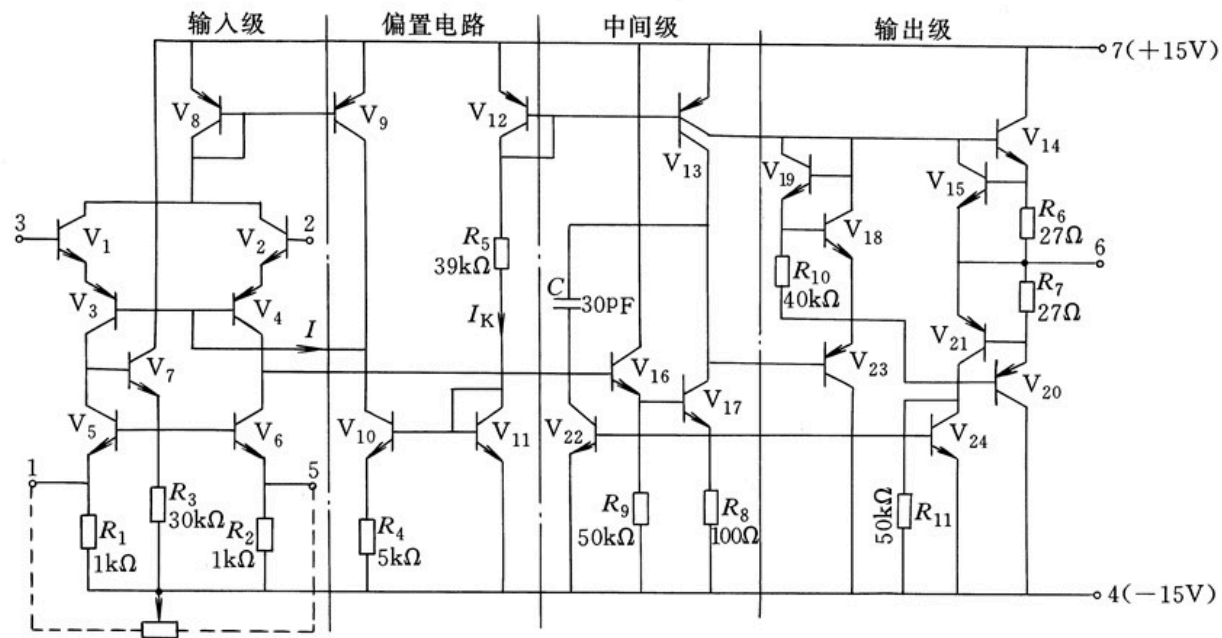
2025/3/24

东北大学 机械工程与自动化学院

18



► 集成运算放大器--内部电路 $\mu A741$ (了解)



2025/3/24

东北大学 机械工程与自动化学院

19



➤理想集成运算放大器的参数

- 开环差模电压放大倍数 $A_{Od} = \left| \frac{\Delta U_o}{\Delta U_{Id}} \right| \rightarrow \infty$
- 开环输入电阻 $R_{id} \rightarrow \infty$
- 开环输出电阻 $R_o \rightarrow 0$
- 共模抑制比 $K_{CMR} \rightarrow \infty$

➤实际集成运算放大器的参数

- 开环差模电压放大倍数，通用型集成运放通常在 10^5 左右。
- 开环输入电阻，通用性集成运放的 R_{id} 通常为 $M\Omega$ 数量级。
- 开环输出电阻，代表了集成运放带负载的能力，通常为几十到几百 Ω ，一般小于 $200\ \Omega$ 。
- 共模抑制比，一般很大，可达 $10^6 - 10^8$ (120-160dB)。



- 例题7，差动放大电路的主要作用是抑制（ ）。
- 例题8，理想运算放大器的开环差模电压放大倍数为（ ），输入电阻为（ ），输出电阻为（ ）。
- 例题9，电路的共模抑制比越大，表明电路抑制（ ）的能力越强。

- 零点漂移，无穷大，无穷大，零，共模信号



➤理想运放工作在线性区（负反馈）

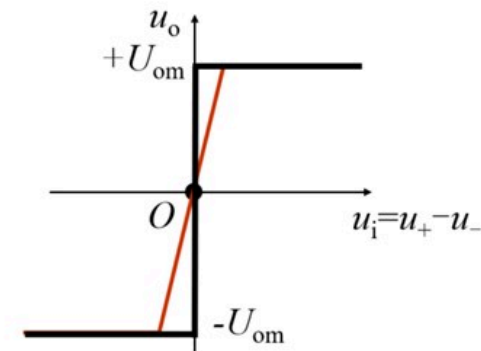
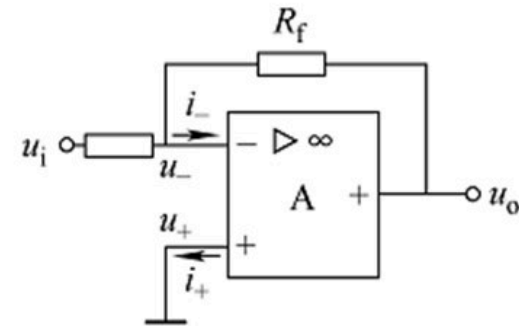
➤“虚短” $A_{Od} = \frac{u_o}{u_+ - u_-}$

$$u_+ - u_- = \frac{u_o}{A_{Od}} = \frac{u_o}{\infty} \approx 0 \quad u_+ \approx u_-$$

➤“虚断”

$$i_+ = i_- = \frac{u_+ - u_-}{R_{id}} = \frac{0}{\infty} \approx 0$$

$$u_+ \approx u_-, \quad i_+ = i_- \approx 0$$





➤电压传输特性

如果集成运放的输出电压的最大值为

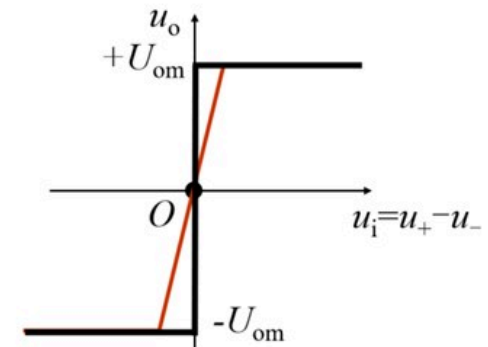
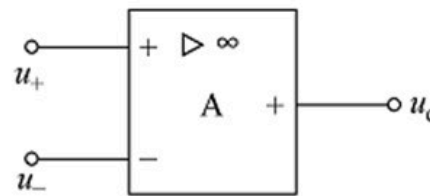
$$\pm U_{om} = \pm 14V$$

$$A_{od} = 5 \times 10^5 \quad \frac{14}{5 \times 10^5} = 28\mu V$$

$|u_+ - u_-| < 28\mu V$ 运放工作在线性区, $u_o = A_{od}(u_+ - u_-)$

$|u_+ - u_-| > 28\mu V$ 运放工作在非线性区

运放工作在非线性区, 输出电压为+14V或-14V。



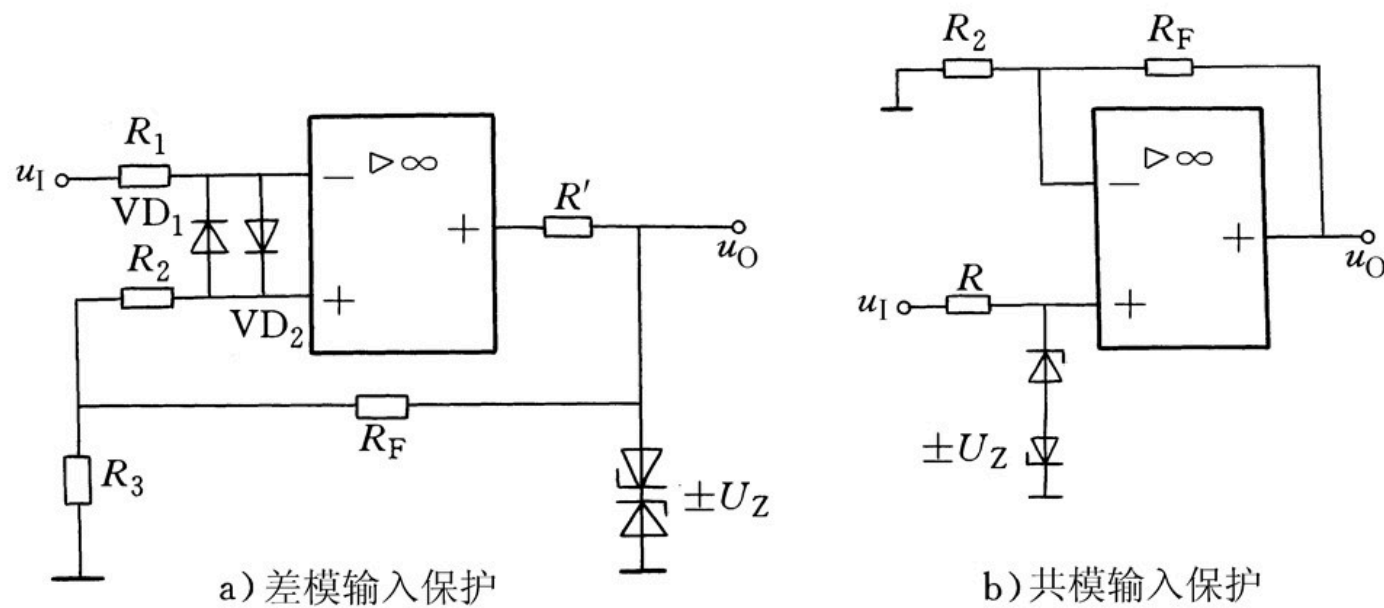
对于理想运放:

$$u_+ > u_-, \quad u_o = +U_{om}$$

$$u_+ < u_-, \quad u_o = -U_{om}$$



►集成运放的保护（了解）



2025/3/24

东北大学 机械工程与自动化学院

24



- 直接耦合放大电路的应用越来越普遍，但存在着零点漂移问题（主要是温度漂移），差动放大电路可以减小零点漂移。
- 差动放大电路有两个输入端，如果两个输入端输入大小相等、极性相反的信号，称为**差模输入信号**。如果两个输入端输入大小相等、极性相同的信号，称为**共模输入信号**。理想情况下，差动放大电路对差模信号有放大作用，对共模信号没有放大作用，即共模电压放大倍数等于零。引起零点漂移的因素，相当于在差动放大电路的输入端引入了共模信号，所以，差动放大电路可以抑制零点漂移。
- 加在差动放大电路两个输入端之间的信号是差模信号，双端输出时的差模电压放大倍数和单管放大电路的电压放大倍数相同，单端输出时的差模电压放大倍数等于双端输出时的二分之一



- 衡量差动放大电路抑制共模信号的能力用**共模抑制比**来表示，共模抑制比等于差动放大电路的差模放大倍数和共模放大倍数的比值。共模抑制比越大，性能越好，抑制共模信号（零点漂移）的能力越强。
- 集成运放是用集成电路工艺制成的具有高电压增益的**直接耦合**放大器。它一般由输入级、中间级、输出级和偏置电路四个基本部分组成。分析集成运放时，可以把它看成是理想运放，理想条件是开环电压放大倍数为无穷大，开环输入电阻为无穷大，开环输出电阻为零，共模抑制比为无穷大。
- 集成运放除通用型以外，还有某项性能比较突出的专用型运放，如高速、高阻、高压、大功率、低功耗和低漂移型等，应根据使用时的具体情况合理选择。



总结

➤例题共9个。