



1.6、7、8 集成运算放大器

§ 1.8.1 集成运算放大器概述

§ 1.6 差分放大电路

§ 1.7 互补对称共集电路

§ 1.8.2 集成运算放大器

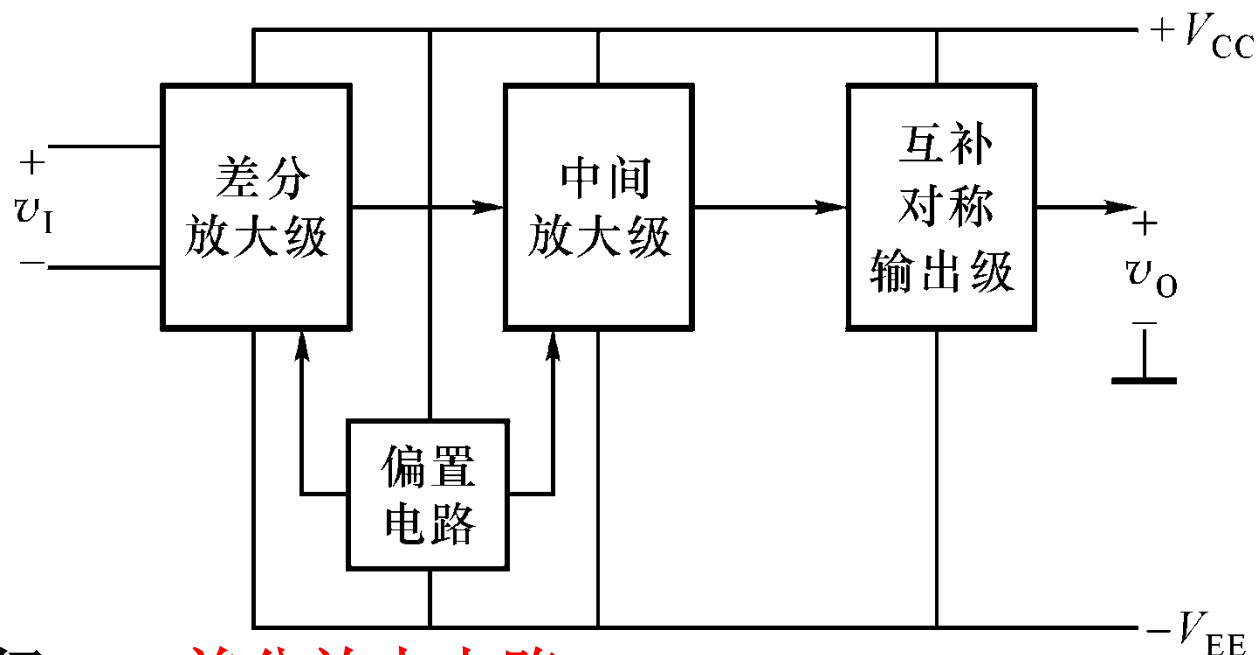
§ 1.8.1 概述

- 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、集成运放大器结构与特点

- ▶ 通过半导体集成工艺，在很小的硅片上制成的一种高增益、直接耦合式、多级放大器。
- ▶ 最早应用于模拟信号的运算。
- ▶ 目前广泛应用于信号测量、信号处理、信号产生和变换中，是现代电子电路中最基本的组成单元。
- ▶ 技术指标有：
电压增益、输入/输出电阻、共模抑制能力、
温度/噪声系数、频率效应等。
- ▶ 在理想条件下，集成运算放大器可以等效成一个电压控制电压源（VCVS）。

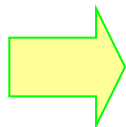
■ 1、集成运放的典型结构



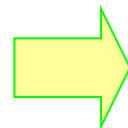
- 输入级：差分放大电路
低温漂、高共模抑制比、高输入电阻
- 中间级：CE（CS）电路
高电压增益
- 输出级：互补对称式射极跟随器结构
低输出电阻、较强带负载能力
- 偏置电路：恒流源电路
静态工作点合适、稳定，功耗低

■ 2、集成运放的主要特点

同一硅片
相同工艺

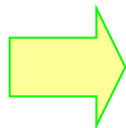


元件参数具有良好的
一致性和同向偏差

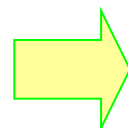


采用**结构对称**
为特征的电路

芯片面积小
功耗很低

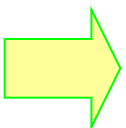


工作电流极小
(如几~几十微安)



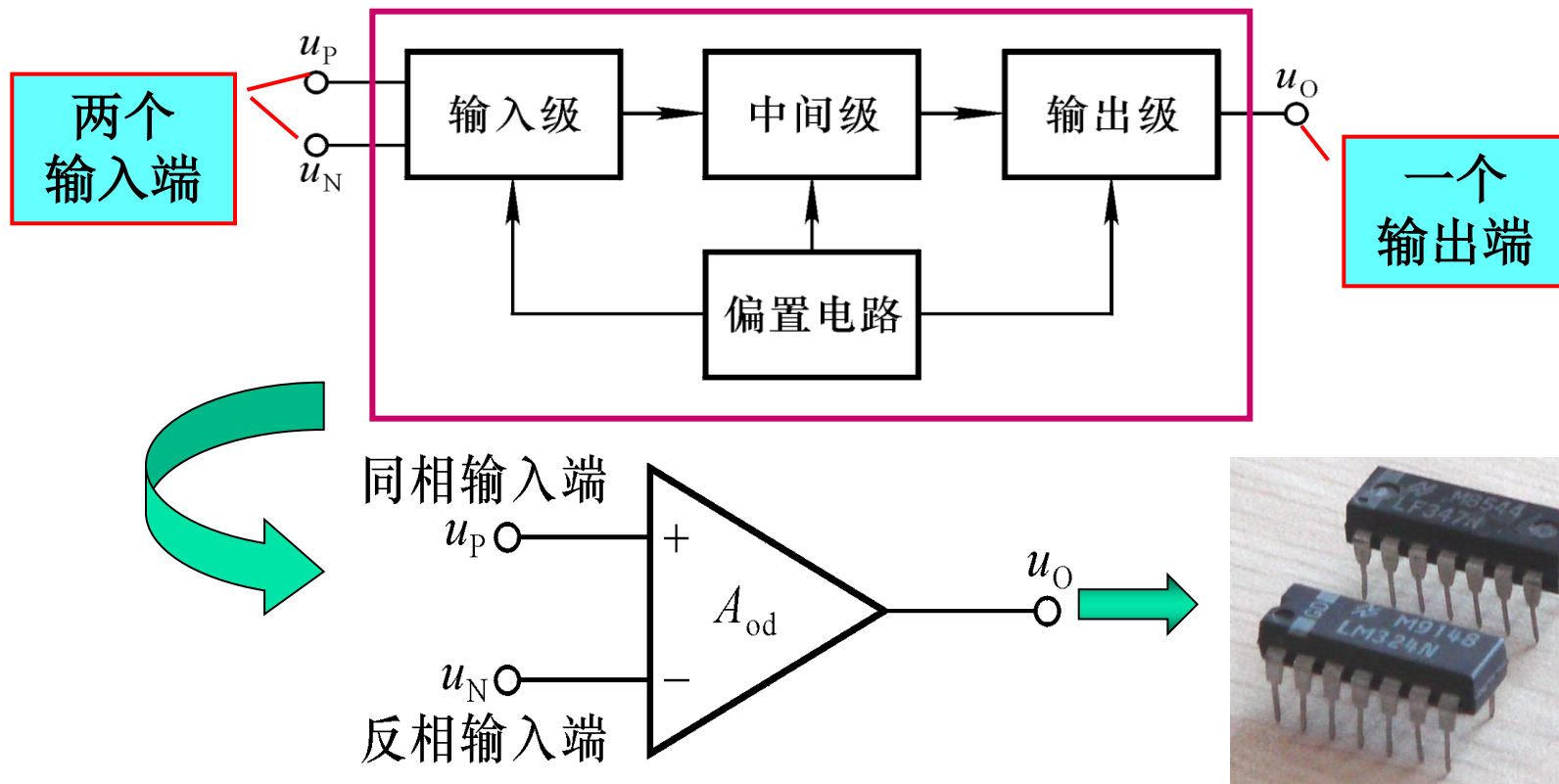
采用**微电流源**作为
偏置及有源负载

无法制造
大容量电
容



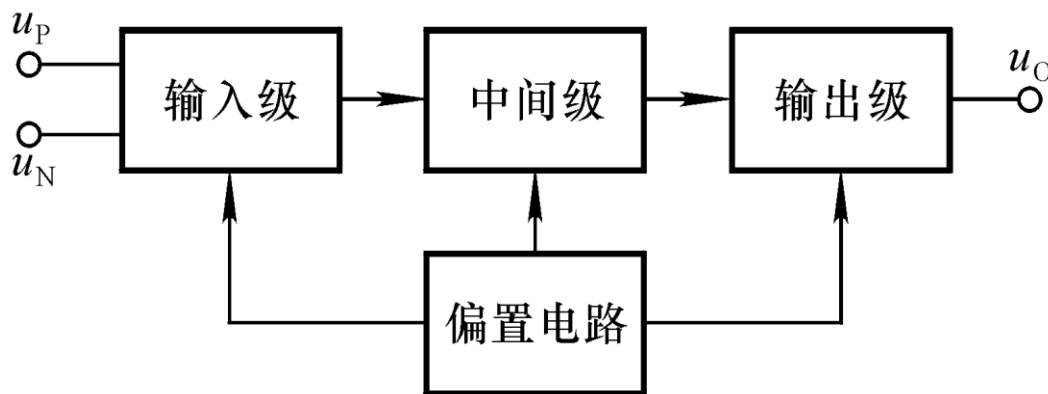
采用**直接耦合**方式

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。

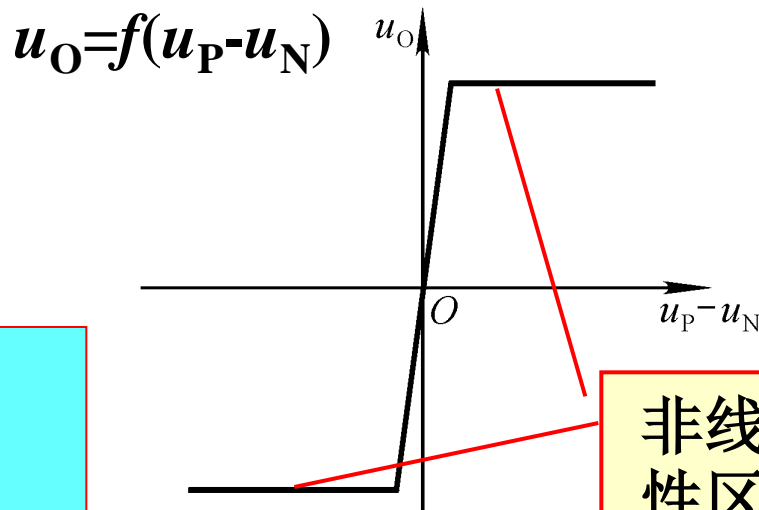
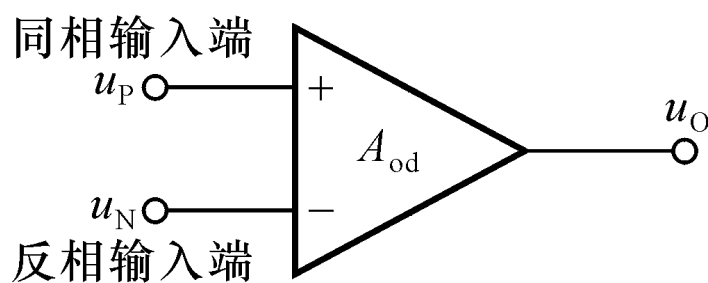
输入级：前置级，多采用差分放大电路。要求 R_i 大， A_d 大， A_c 小，输入端耐压高。

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：

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

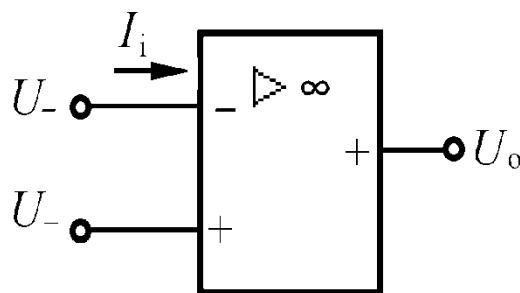
A_{od} 是开环差模放大倍数。

非线性区

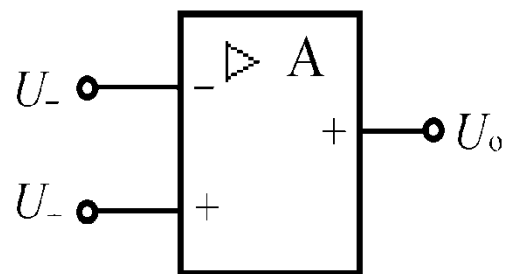
由于 A_{od} 高达几十万倍，所以集成运放工作在线性区时的最大输入电压 $(u_P - u_N)$ 的数值仅为几十~一百多微伏。

$(u_P - u_N)$ 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。

四、集成运放的电路符号



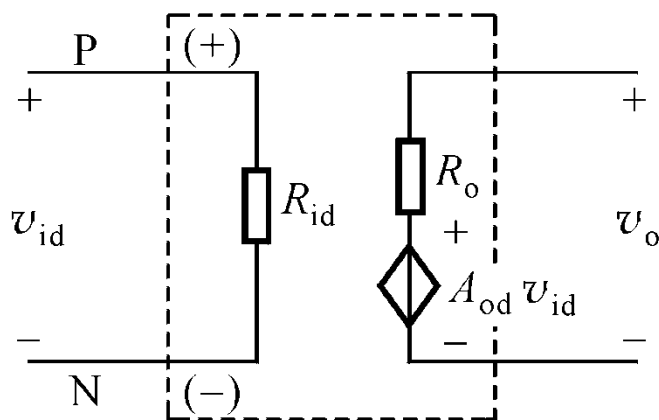
(a) 理想运放



(b) 实际运放

反相输入： 输出信号与该端输入信号反相位；

同相输入： 输出信号与该端输入信号同相位；



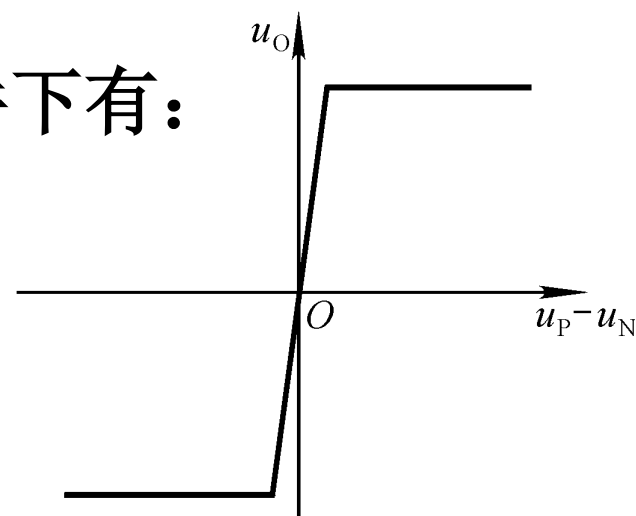
低频小信号模型

在理想条件下有：

$$R_{id} \rightarrow \infty$$

$$R_{od} \rightarrow 0$$

$$A_{od} \rightarrow \infty$$



五、实际集成运放的主要性能指标

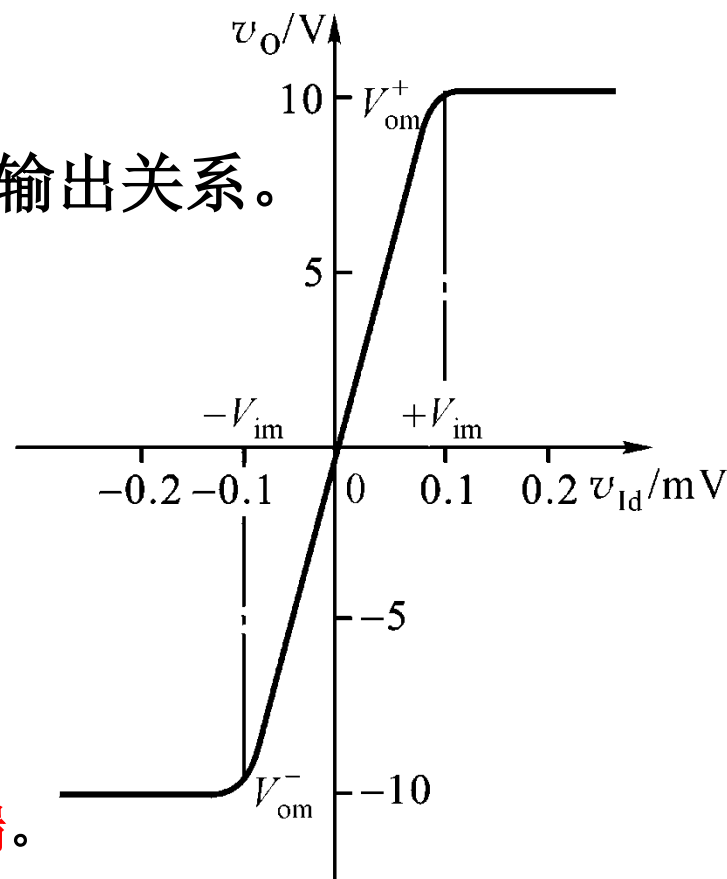
■ 1、集成运放的电压传输特性和三项基本参数

❖ 集成运放的电压传输曲线：

在直流或低频条件下运放的输入、输出关系。

✓ 在理想条件下，集成运放的电压传输特性曲线通过坐标原点。运放的电压既可以用增量（或交流量）表示，也可以用瞬时量表示。

✓ 实际运放的传输特性曲线不通过坐标原点，称为输出失调。为了弥补输出失调电压，通常在运放输入级电路中设置了调零端。



❖ 开环差模电压放大倍数: $A_{od} = \frac{\Delta v_O}{\Delta v_{Id}} = \frac{\Delta v_O}{\Delta v_P - \Delta v_N}$

A_{od} 一般为 $10^4 \sim 10^6$ (即80~120dB)。在手册中 A_{od} 常以/mV作单位, 如100V/mV即为 10^5 。

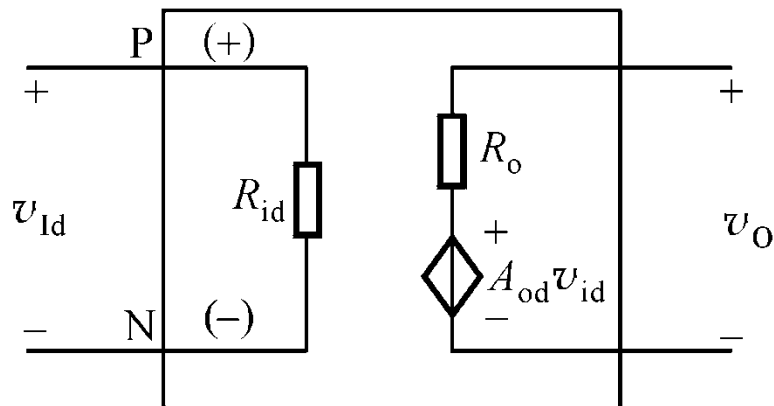
❖ 差模输入电阻: $R_{id} = \frac{\Delta v_{Id}}{\Delta i_{Id}} = \frac{\Delta v_P - \Delta v_N}{\Delta i_{Id}}$

如CF741的 $R_{id} \approx 1\text{M}\Omega$, 高阻型运放的 R_{id} 可达104M Ω 以上。

❖ 输出电阻:

集成运放的 R_o 。通常为100 Ω 至1k Ω 之间。

❖ 集成运放的低频小信号模型:



■ 2、集成运放的失调参数

❖ 输入失调电压 V_{IO} :

集成运放在 $v_{Id} = 0$ 时的输出电压称作**输出失调电压**，记作 V_{OO} 。
为使输出电压回零，需在输入端加**反向补偿电压**，称为**输入失调电压**。

❖ 输入失调电压温漂 dV_{IO}/dT :

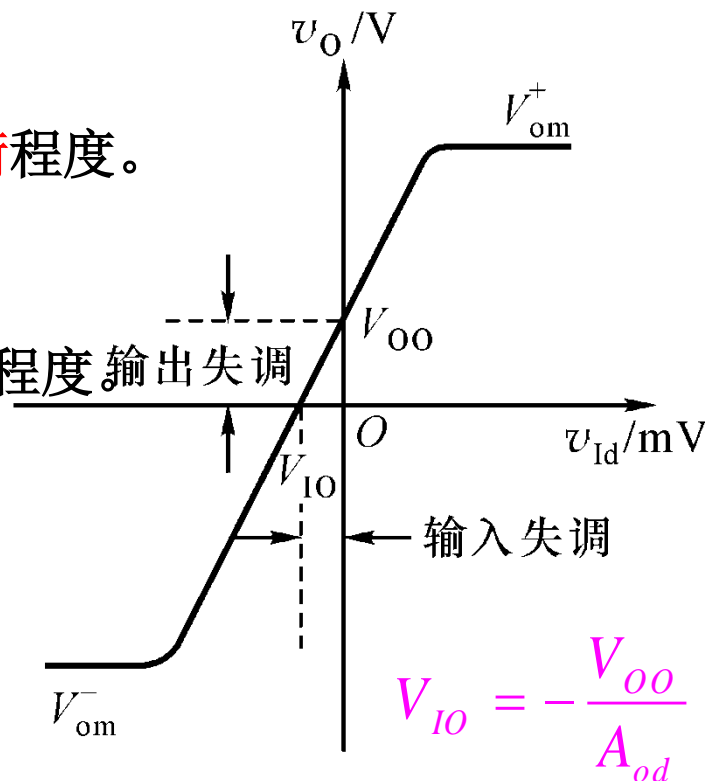
输入失调电压的温度系数，反映输入失调电压随温度而变化的程度。

❖ 输入失调电流 I_{IO} :

反映集成运放**输入端输入电流的不平衡**程度。

❖ 输入失调电流温漂 dI_{IO}/dT :

反映输入失调电流 I_{IO} 随温度而变化的程度



❖ 分析输出失调模型

❖ 输入失调电流

$$I_{IO} = (|I_{BP} - I_{BN}|)$$

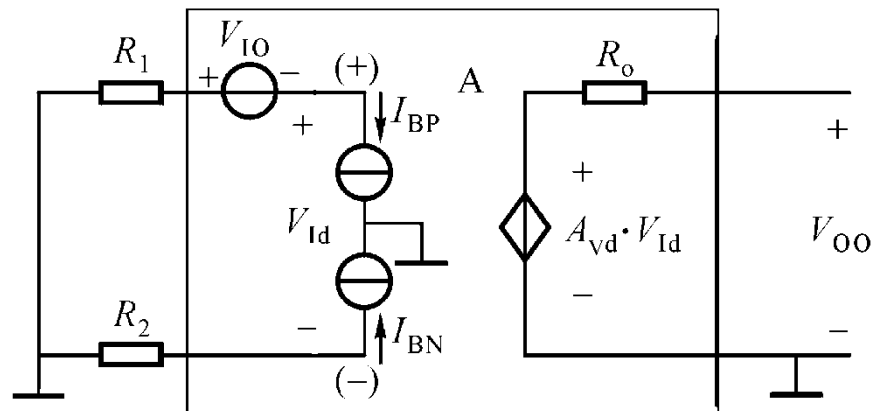
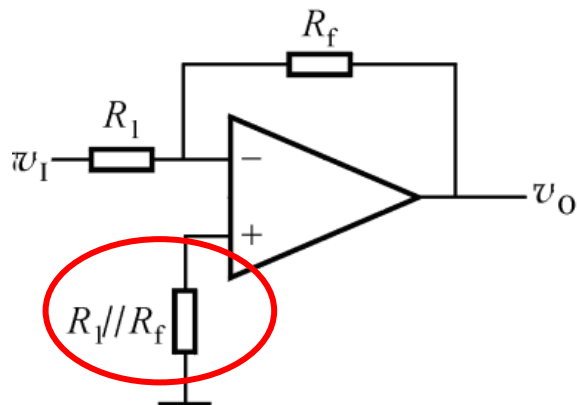
❖ 输入偏置电流

$$I_{IO} = 0.5 (|I_{BP} + I_{BN}|)$$

消除输入偏置电流

$$R_1 = R_2$$

$$V_{OO} = A_{vd} \cdot V_{Id}$$



$$V_{Id} = I_{BN} R_2 + I_{BP} R_1 - V_{IO}$$

$$= -V_{IO} - \left[(R_1 - R_2) I_{IB} + (R_1 + R_2) \frac{I_{IO}}{2} \right]$$

$$= -A_{vd} V_{IO} - A_{vd} \left[(R_1 - R_2) I_{IB} + (R_1 + R_2) \frac{I_{IO}}{2} \right]$$

输入端短路，运放也会工作在饱和

■ 3、集成运放的共模参数

❖ 共模抑制比: $K_{CMR} = \left| \frac{A_{od}}{A_{oc}} \right|$

正常放大差模情况下，
允许的最大共模输入

❖ 最大共模输入电压 V_{Icmax} :

当共模输入电压超出 V_{Icmax} 时，将影响运放电路中相关晶体管的工作状态。
运放失去正常的差模放大能力。

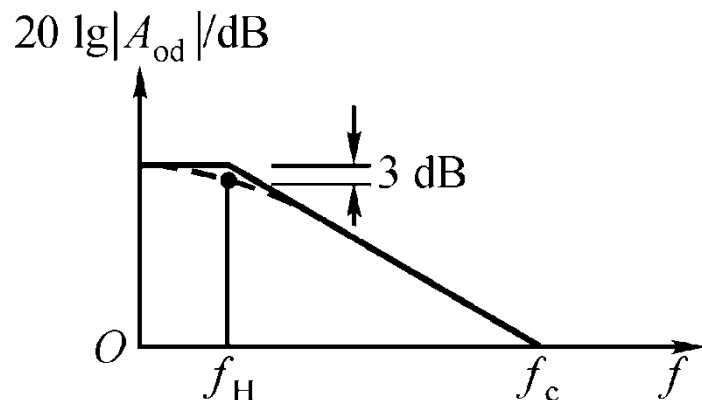
❖ 共模输入电阻: $R_{ic} = \left| \frac{\Delta v_{ic}}{\Delta i_{ic}} \right|$

■ 4、集成运放的频域和时域参数

❖ -3dB带宽 f_H : $BW = f_H - f_L = f_H$

❖ 单位增益带宽 : $f_c \approx A_{od} \cdot f_H$

指运放差模开环电压增益 A_{od} 下降至**0 dB**时的频率。



❖ 转换速率 SR （也称压摆率） : $SR = \left| \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max}$

是衡量运放在大幅度信号作用下**工作速度**的参数。

❖ 全功率带宽 f_p :

表示当运放输出较大幅度电压时，
为保证输出波形不产生因 SR 为有限值而引起的波形失真，
运放所能工作的最高频率。

例：集成运放的主要性能指标

指标参数	20lg A_{od}	741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 $dU_{IO}/dT(^{\circ}C)$		几 $\mu V/^{\circ}C$	0
■ 输入失调电流 $I_{IO} (I_{BP} - I_{BN})$	超过此值不能正常放大差模信号		
■ 输入偏置电流 $I_{IB}=0.5 (I_{BP} + I_{BN})$			
■ 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}			
■ -3dB带宽 f_H		10Hz	∞
■ 转换速率 $SR(=du_O/dt _{max})$		0.5V/ μS	∞

六、集成运放应用时注意事项

❖ 运放类型：

- ① 通用型：其性能指标适合于一般性使用，产品量大面广；
- ② 低功耗型：静态功耗在 1mW 左右，可用于便携设备；
- ③ 高精度型：失调电压温漂在 $1\mu\text{V}$ 以下；
- ④ 高速型：转换速率在 $10\text{V}/\mu\text{s}$ 左右；
- ⑤ 高阻型：输入电阻在 $10^{12}\Omega$ 左右；
- ⑥ 宽带型：单位增益带宽在 10MHz 左右；
- ⑦ 高压型：允许供电电压在 $\pm 30\text{V}$ 以上；
- ⑧ 功率型：允许的供电电压较高可输出电流较大；
- ⑨ 跨导型：输入量为电压，输出为电流；
- ⑩ 差动电流型：输入为差分电流，输出为电压；
- ⑪ 其它：如程控型、电压跟随型等。

❖ 选择集成运放时需要注意的问题：

应根据输入信号的性质、负载的性质、
对运放精度的要求、环境条件等情况选择。

- ✓ 不要盲目追求指标先进；
- ✓ 应尽量选择通用型运放；
- ✓ 应考虑能避免冲击电压和电流的保护措施；
- ✓ 要注意单元之间的输出电平配合问题；
- ✓ 要注意性能指标的测量条件；
- ✓ 在弱信号条件下使用时，应注意噪声系数不能太大。

举例：F007——通用型集成运放内部电路

