

模拟电路

第 3 章 集成运算放大电路

- 3.1 多级放大电路
- 3.2 集成运放
- 3.3 单元电路
 - 3.3.1 抑制温度漂移
 - 3.3.2 长尾式差分放大电路
 - 3.3.3 电流源电路
 - 3.3.4 直接耦合互补输出级
- 3.4 集成运放电路
- 3.5 性能指标与低频等效电路
 - 3.5.1 主要性能指标
 - 3.5.2 低频等效电路
- 3.6 种类与选择
 - 3.6.1 集成运放的发展概况
 - 3.6.2 集成运放的种类
 - 3.6.3 集成运放的选择
- 3.7 集成运放的使用
 - 3.7.1 使用时必做的工作
 - 3.7.2 保护措施

使用基本放大电路空载情况下动态参数的数量级:

接法	\dot{A}_u	A_i	R_i	R_o
共射	> 100	β	0.1 - 10 k Ω	0.1 - 10 k Ω
共集	< 1	$1 + \beta$	10 - 100 k Ω	10 - 100 Ω
共基	> 100	α	10 - 30 Ω	0.1 - 10 k Ω
共源	1~100		> 1 M Ω	0.1 - 10 k Ω
共漏	< 1		> 1 M Ω	0.1 - 10 k Ω

注意

- 如果第二级的输入电阻较小, 则会使第一级的电压放大倍数变小, 所以为得到较大的电压放大倍数, 第二级也不能采用共基电路.
e.g. 若输入级为共集-共基接法, 则无法增大输入电阻, 只能展宽频带.

如果第一级管是 NPN 型, 则复合管是 NPN 型.
如果第一级管是 PNP 型, 则复合管是 PNP 型.

第 3 章 集成运算放大电路

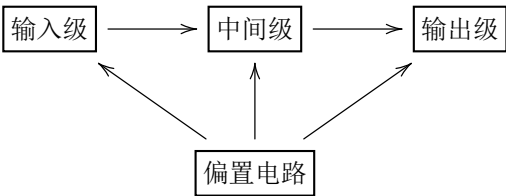
3.1 多级放大电路

耦合方式	优点	缺点
直接耦合	1. 低频特性好. 2. 没有大电容, 易于集成.	1. 零点漂移现象. 2. 静态工作点分析麻烦.
阻容耦合	1. 静态工作点分析简单.	1. 低频特性差. 2. 不易于集成.
变压器耦合	1. 静态工作点分析简单. 2. 可以实现阻抗变换. $R'_L = n^2 R_L = \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 R_L.$	1. 低频特性差. 2. 不易于集成.
光电耦合 (达林顿结构)	1. 抗干扰能力强. 2. 适用于远距离信号传输.	1. 不易于集成.

- 直接耦合的思路 (设置合适静态工作点的方法)
 - 增加 R_{e2} (会降低放大倍数)
 - 使用二极管 (正向, 压降较小)
 - 使用稳压管 (反向, 压降较大)
 - NPN 与 PNP 型管混合使用.
- 光电耦合的传输比 $CTR = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_D} \Big|_{U_{CE}}$ 一般只有 $0.1 \sim 1.5$.
- 动态分析
 - 电压放大倍数: $\dot{A}_u = \prod_{j=1}^N \dot{A}_{uj}$.
 - 输入电阻: $R_i = R_{i1}$.
 - 输出电阻: $R_o = R_{iN}$.

- 注意:
- 当共集放大电路作为输入级时, 输入电阻与电路第二级的输入电阻有关.
 - 当共集放大电路作为输出级时, 输出电阻与倒数第二级的输出电阻有关.

3.2 集成运放



组成部分	输入级 (前置级)	中间级 (主放大级)	输出级 (功率级)	偏置电路
采用电路	差分放大电路	共射放大电路	准互补输出级	多路电流源

组成部分	输入级 (前置级)	中间级 (主放大级)	输出级 (功率级)	偏置电路
性能要求	R_i 大, A_d 大, K_{CMR} 大.	放大能力强	R_o 小, U_{om} 大 (幅值接近电源电压)	温度稳定性好

- **注意:** 即使分立元件组成和集成运放内部完全相同的电路, 由于光速的限制, 高频性能也较差.

3.3 单元电路

3.3.1 抑制温度漂移

零点漂移现象又称温度漂移.

- 引入直流负反馈 R_e .
- 采用温度补偿 (热敏元件).
- 差分 (差动) 放大电路.

差分放大电路的概念

- 共模信号: $u_{Ic} = \frac{u_{I1} + u_{I2}}{2}$.
- 差模信号: $u_{Id} = u_{I1} - u_{I2}$.
- 共模放大倍数: $A_c = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}}$.
- 差模放大倍数: $A_d = \frac{\Delta u_{Od}}{\Delta u_{Id}}$.
- 共模抑制比: $K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$.

3.3.2 长尾式差分放大电路

- 共同点
 - 静态工作点电流: $I_{EQ} \approx \frac{V_{EE} - U_{BEQ}}{2R_e}$.
 - 差模信号: $u_{Id} = u_I$.
 - 输入电阻: $R_i = 2(R_b + r_{be})$.
- 双端输入
 - 共模信号: $u_{Ic} = 0$.
- 单端输入
 - 共模信号: $u_{Ic} = \frac{u_I}{2}$.
- 双端输出
 - 静态工作点: $U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}R_e + U_{BEQ}$.
 - 输出电阻: $R_o = 2R_c$.
 - 差模放大倍数: $A_d = -\beta \frac{R_c // \frac{R_L}{2}}{R_b + r_{be}}$.
 - 共模放大倍数: $A_c = 0$.
 - 共模抑制比: $K_{CMR} = +\infty$.
 - 输出电压: $\Delta u_o = A_d \Delta u_I$.
- 单端输出
 - 静态工作点: $U_{CEQ} \approx V'_{CC} - I_{CQ}R'_L + U_{BEQ}$.

其中 $V'_{CC} = \frac{R_L V_{CC}}{R_L + R_c}$, $R'_L = R_c // R_L$.

- 输出电阻: $R_o = R_c$.
- 差模放大倍数: $A_d = -\frac{\beta R_c // R_L}{2 R_b + r_{be}}$.
- 共模放大倍数: $A_d = -\beta \frac{R_c // R_L}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}$.
- 共模抑制比: $K_{CMR} = \frac{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}{R_c // R_L}$.
- 输出电压: $\Delta u_o = A_d \Delta u_I + A_c \frac{\Delta u_I}{2}$.

注意: 如果单端输出采用有源负载, 即将 R_e 替换为恒流源, 则等效电阻无穷大, 共模放大倍数也为零, 即 $A_d = 0$, $K_{CMR} = +\infty$.

- 改进
 - **恒流源:** 对共模信号等效为无穷大电阻.
 - **调零电位器:** 输入差模信号为零时输出电压为零.
 - **场效应管:** 增大输入电阻.

3.3.3 电流源电路

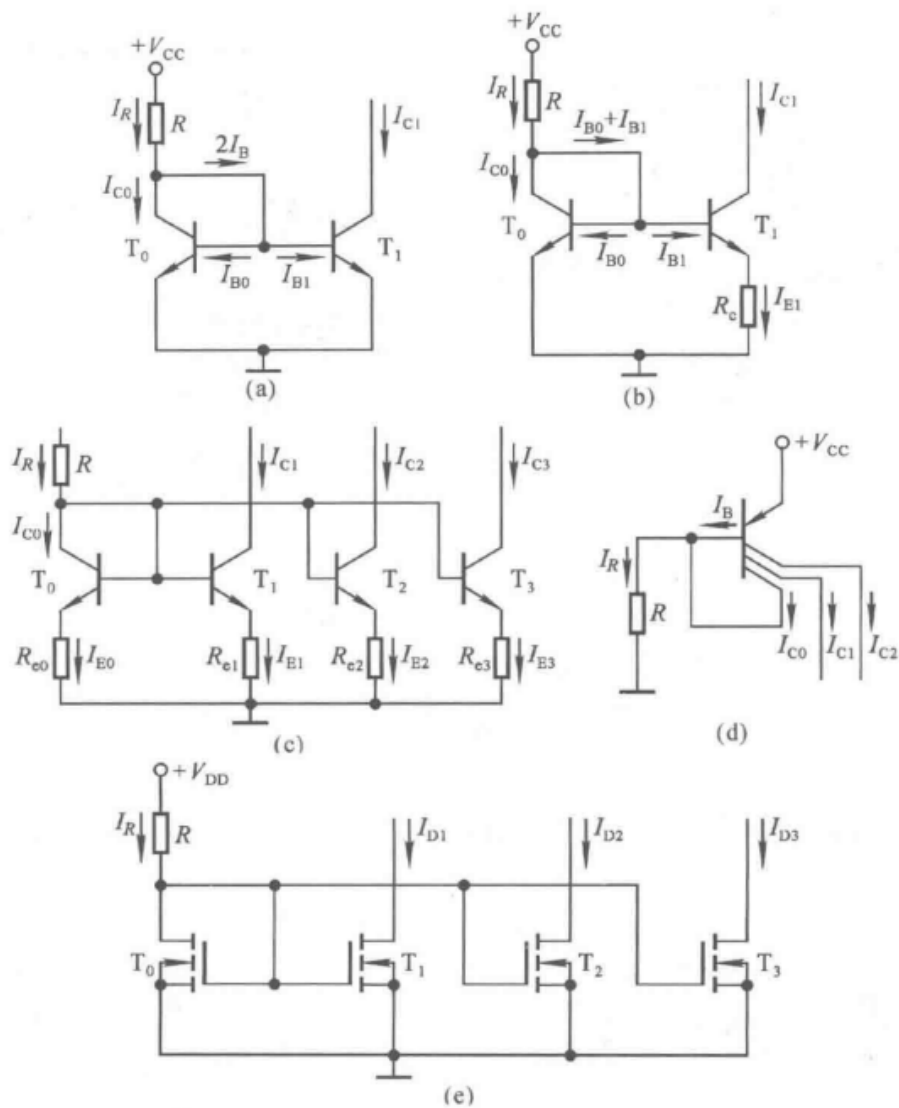


图 3.1.7 集成运放中常见的电流源电路

(a) 镜像电流源 (b) 微电流源 (c) 晶体管组成的多路电流源
(d) 多集电极组成的多路电流源 (e) MOS 管组成的多路电流源

• 基本电流源电路

◦ 镜像电流源

$$\blacksquare I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R}.$$

$$\blacksquare I_C = \frac{\beta}{\beta + 2} I_R.$$

◦ 比例电流源

$$\blacksquare I_R \approx \frac{V_{CC} - U_{BE0}}{R + R_{e0}}.$$

$$\blacksquare I_{C1} \approx \frac{R_{e0}}{R_{e1}} I_R + \frac{U_T}{R_{e1}} \ln \frac{I_R}{I_{C1}} \approx \frac{R_{e0}}{R_{e1}} I_R.$$

注:

$$\blacksquare \text{利用 } I_E \approx I_{Se} \frac{U_{BE}}{U_T} \text{ 进行推导.}$$

■ R_{e1} 较大时方可忽略第二项.

◦ 微电流源

$$\blacksquare I_{E1} \approx \frac{U_{BE0} - U_{BE1}}{R_e}.$$

$$\blacksquare I_R \approx \frac{V_{CC} - U_{BE0}}{R}.$$

$$\blacksquare I_{C1} \approx \frac{U_T}{R_e} \ln \frac{I_R}{I_{C1}}.$$

- **改进型电流源电路**

- 加射极输出器的镜像电流源: $I_{C1} = \frac{I_R}{1 + \frac{2}{(1+\beta)\beta}}$. (实际电力路中可加电阻 R_{e2})
- 威尔逊电流源: $I_{C2} = \left(1 - \frac{2}{\beta^2 + 2\beta + 2}\right) I_R.$

- **多路电流源电路**

- 基于比例电流源: $I_{E0}R_{e0} \approx I_{E1}R_{e1} \approx I_{E2}R_{e2} \approx \dots.$
- 基于多电极管: $\frac{I_{C0}}{S_0} = \frac{I_{C1}}{S_1} = \frac{I_{C2}}{S_2} = \dots.$
- 基于 MOS 管: $\frac{I_{D0}}{S_0} = \frac{I_{D1}}{S_1} = \frac{I_{D2}}{S_2} = \dots.$

- 以电流源为有源负载的放大电路

为了提高电压放大倍数, 可以增大集电极电阻 R_c (或漏极电阻 R_d), 但同时也需要提高电源电压. 于是可以使用电流源电路取代 R_c (或 R_d), 在电压不变的情况下获得合适的静态电流, 且有很大的等效输出电阻.

注意: 有源负载电路中要考虑 $h_{22} = \frac{1}{r_{ce}}.$

- 有源负载共射放大电路

$$\blacksquare I_{CQ1} = I_{C2} - I_L = \frac{\beta}{\beta + 2} I_R - \frac{U_{CEQ}}{R_L}.$$

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

- 有源负载差分放大电路

3.3.4 直接耦合互补输出级

- **基本电路**

- 最大幅值: $\pm(V_{CC} - |U_{CES}|).$
- 交越失真: 由 $U_{on} > 0$ 引起.

- **消除交越失真**

- 使用二极管电路: $U_{B1B2} = U_{D1} + U_{D2}.$
- 使用 U_{BE} 倍增电路: $U_{B1B2} \approx \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) U_{BE}.$ (还可以温度补偿)

- **准互补电路**

即输出管为同一类型管的电路, 常作为功率放大电路 (OCL 电路), 是电压跟随电路.

在消除交越失真的基础上, 可以使用复合管:

- T_1 : NPN, T_2 : NPN.
- T_3 : PNP, T_4 : NPN.

实际应用时, R_1 常用电流源取代 (即内阻为无穷大)

- **CMOS 互补输出级**

3.4 集成运放电路

读图方法

- 1. 找出基准电流, 分析偏置电路.
- 2. 简化电路, 将多路电流用电流源取代.
- 3. 读放大电路, 通常为[三级](#).
- 4. 定量分析电路的性能特点.

集成运放电路实例

- 双极型集成运放电路: F007 (通用型集成运放).
- 单极型集成运放: C14573.
- 双极型与单极型混合结构集成运放
 - Bi-MOS (晶体管 - MOS 管混合)
 - Bi-CMOS (晶体管 - CMOS 管混合)
 - Bi-FET (晶体管 - 结型场效应管混合): LF153.

注意

- [通用型集成运放](#)含有 PN 结, 存在很多结电容和分布电容, 因此高频特性很差, 仅适合放大[低频信号](#).

3.5 性能指标与低频等效电路

3.5.1 主要性能指标

指标	符号	物理意义	F007 典型数值
开环差模增益	A_{od}	$20 \lg \left \frac{u_O}{u_P - u_N} \right $	> 94 dB
共模抑制比	K_{CMR}	$20 \lg \left \frac{A_d}{A_c} \right $	> 80 dB
差模输入电阻	r_{id}	对差模电压信号源的输入电阻	> 2 MΩ
输入失调电压	U_{IO}	使输出电压为零的 输入补偿电压	< 2 mV
U_{IO} 温漂	$\frac{dU_{IO}}{dT}$	U_{IO} 的温度系数	< 20 μV / °C
输入失调电流	I_{IO}	$ I_{B1} - I_{B2} $	
I_{IO} 温漂	$\frac{dI_{IO}}{dT}$	I_{IO} 的温度系数	
输入偏置电流	I_{IB}	$\frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$	
最大共模输入电压	U_{Icmax}	能 正常放大 的最大共模信号	±13 V
最大差模输入电压	U_{Idmax}	输入级不损坏 最大差模信号	±30 V

指标	符号	物理意义	F007 典型数值
-3 dB 带宽频率	f_H	上限截止频率	7 Hz
单位增益带宽	f_C	使差模增益为 0 dB 的频率	
转换速率	SR	$\left \frac{du_o}{dt} \right _{\max}$	

3.5.2 低频等效电路

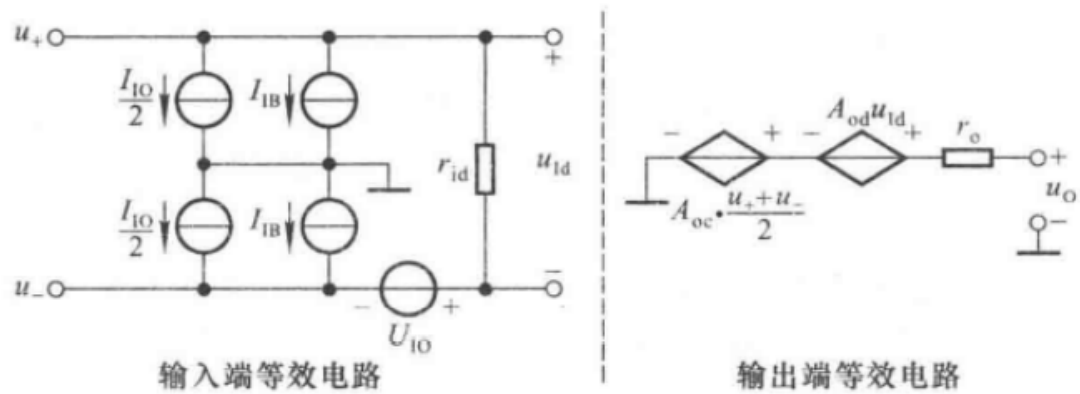


图 3.5.1 集成运放低频等效电路

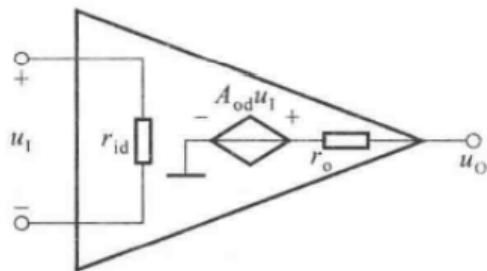


图 3.5.2 简化的集成运放低频等效电路

3.6 种类与选择

3.6.1 集成运放的发展概况

四代产品

- 1. 分立元件放大电路的设计思想, 采用集成数字电路的工艺.
如: μ A709, F003, 5G23 等.
- 2. 采用有源负载, 提高开环增益, 属于通用型运放.
如: μ A741, LM324, F007, F324, 5G24.
- 3. 输入级采用超 β 管 (高达 1000 - 5000), 且考虑热效应, 增大共模抑制比和输入电阻.
如: AD508, MC1556, F1556, F030.
- 4. 采用斩波稳零和动态稳零技术, 无需调零.
如 HA2900, SN62088, 5G7650.

3.6.2 集成运放的种类

1 按工作原理分类

- 1. 电压放大型
- 2. 电流放大型
- 3. 跨导放大型 (电压 -> 电流)
- 4. 互阻放大型 (电流 -> 电压)

2 按可控性分类

- 1. 可变增益运放.
- 2. 选通控制运放.

3 按性能指标分类

类型	性能特点	用途
高阻型	高输入电阻, $r_{id} > 10^9 \Omega$.	作测量放大器
高速型	单位增益带宽和转换速率高	数模和模数转换器, 视频放大器, 锁相环电路
低功耗型	工作电源低, 静态功耗低	空间技术, 遥感遥测电路
高精度型	低失调, 低温漂, 低噪声, 高增益, 共模抑制比高	微弱信号的测量与运算, 高精度仪器
高压型	输出高压	需高电压驱动的负载
大功率型	输出大功率, 大电流	功率放大器, 需大电流驱动的负载

3.6.3 集成运放的选择

- 1. 信号源
- 2. 负载
- 3. 精度
- 4. 环境

3.7 集成运放的使用

3.7.1 使用时必做的工作

- 1. 集成运放的外引线 (管脚)
- 2. 参数测量
- 3. 调零和设置偏置电压
- 4. 消除自激振荡: 增加去耦电容, 即使用一个大容量和一个小容量的电容并联在电源正负极.

3.7.2 保护措施

- 1. 输入保护
- 2. 输出保护
- 3. 电源端保护