

硬十用户专享资料

之分立器件

目录

- 电阻
- 电容
- 电感
- 磁珠
- 二极管
- 三极管
- FET管
- 运放
- 保险管
- 驱动器
- 传感器

硬件十万个为什么

电阻的分类

分类	BOM 分类代码	类别名称	安装 方式	常见 功率范围	阻值范围
固定 电阻器	0701	金膜电阻器	插装	1/6~3W	10~10MΩ
	0703	熔断电阻器	插装	1/4~2W	0.47~1KΩ
	0706	绕线电阻器	插装	5~120W	0.15~33kΩ
	0708	集成电阻器	插装	1/8W	10~1MΩ
			贴片	1/16W	10~4.7MΩ
0709	片状厚膜电阻器	贴片	1/16~1W	0.005~22MΩ	
电位器	0707	电位器	插装	0.25~1W	10~2MΩ
			贴片	0.03~0.25W	
敏感 电阻器	0704	热敏电阻器	器件的功能与普通电阻差异较大		
	0705	压敏电阻器			

电阻的基本参数

一般电阻在选型时需要考虑以下几个因素：

1. 阻值：根据电阻在单板上的应用情况，其作用主要为分压、限流、匹配等，阻值的选择需要根据应用电路的需要进行。
2. 额定功率：电阻额定功率为电阻选型中关注的参数之一，对电阻的长期可靠性有着至关重要的影响。根据公司规范，片式厚膜电阻降额应满足60%。
3. 精度：用于电源芯片输出调整，电源电压采样等环境下，应选用较高精度电阻，目前我司通常为1%精度。电流检测回路中使用的Rsense电阻，通常阻值低、功率大，精度通常高于1%。
4. 尺寸：电阻的尺寸越小，单板越易实现高集成度。但电阻尺寸与额定功率呈对应关系，尺寸越大的电阻耐受功率越大。
如：1206 - 1/4W，0805 - 1/8W，0603-0.1W等。
5. 其他有时还需要考虑其工作温度、湿度等因素。

其它特殊电阻的选型原则

- 熔断电阻器

熔断电阻器具有保护功能的电阻器。选用时应考虑其双重性能，根据电路的具体要求选择其阻值和功率等参数。既要保证它在过负荷时能快速熔断，又要保证它在正常条件下能长期稳定的工作。

- 热敏电阻器

正温度系数热敏电阻器（**PTC**）一般用于电冰箱压缩机起动电路、彩色显像管消磁电路。

负温度系数热敏电阻器（**NTC**）一般用于各种电子产品中作微波功率测量、温度检测、温度补偿、温度控制及稳压用，选用时应根据应用电路的需要选择合适的类型及型号。

其它特殊电阻的选型原则

- 压敏电阻器

压敏电阻器主要应用于各种电子产品的过压保护电路中，它有多种型号和规格。所选压敏电阻器的主要参数（包括标称电压、最大连续工作电压、最大限制电压、通流容量等）必须符合应用电路的要求，尤其是标称电压要准确。

- 光敏电阻器

选用光敏电阻器时，应首先确定应用电路中所需光敏电阻器的光谱特性类型。若是用于各种光电自动控制系统、电子照相机和光报警器等电子产品，则应选取用可见光光敏电阻器。

其它特殊电阻的选型原则

- 上拉电阻和下拉电阻

上拉就是将不确定的信号通过一个电阻嵌位在高电平！电阻同时起限流作用。

下拉同理。上拉是对器件注入电流，下拉是输出电流。

选取时需要考虑以下几个因素：

1. 驱动能力与功耗的平衡。上拉电阻越小，驱动能力越强，但功耗越大，设计是应注意两者之间的均衡。
2. 下级电路的驱动需求。当输出高电平时，开关管断开，上拉电阻应适当选择以能够向下级电路提供足够的电流。
3. 高低电平的设定。不同电路的高低电平的门槛电平会有不同，电阻应适当设定以确保能输出正确的电平。
4. 频率特性。上拉电阻和开关管漏源级之间的电容和下级电路之间的输入电容会形成RC延迟，电阻越大，延迟越大。

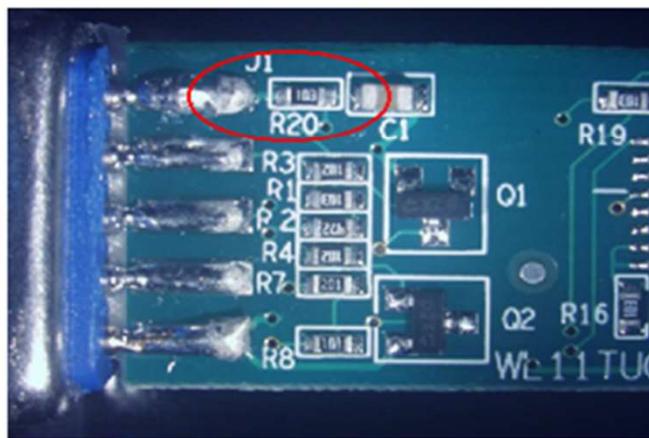
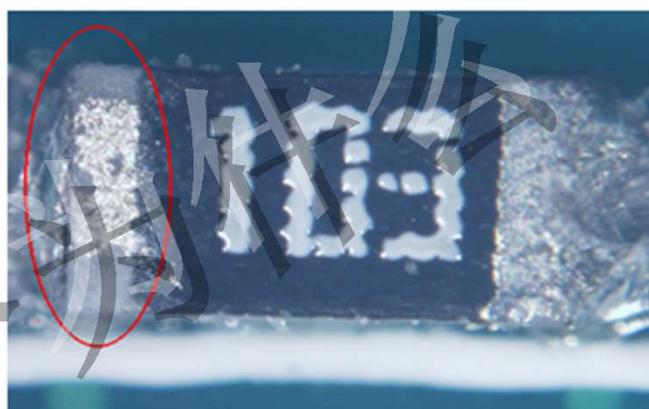
电阻的基本失效模型及案例

电阻器由于结构较为简单，工艺较成熟，通常失效率相对较低。其失效主要表现为以下几种：

1. 阻值漂移：老化以后可能发生；
2. 开路：在受到瞬间过功率冲击时可能会导致开路；
3. 烧毁：长时间工作在额定功率以上时可能会发生烧焦乃至烧毁，一般为开路；
4. 断线开路：线绕电阻器受到机械应力或瞬时过功率冲击时可能发生；
5. 引脚断裂：电阻器引脚不可反复弯曲；
6. 焊接问题：超存储期、引出端氧化、镀层不佳、引出端严重不对称等都可能導致虚焊等焊接问题。

单板上大封装电阻，虚焊故障

分析：对失效样品进行分析，确认贴片电阻距离手焊插针太近，导致手工焊接插针时，手工焊接时，温度高，时间长。电阻端电极受到电烙铁的高温作用，导致电阻面电极被破坏，引起电阻体与端电极开路。



硬件十万个为什么

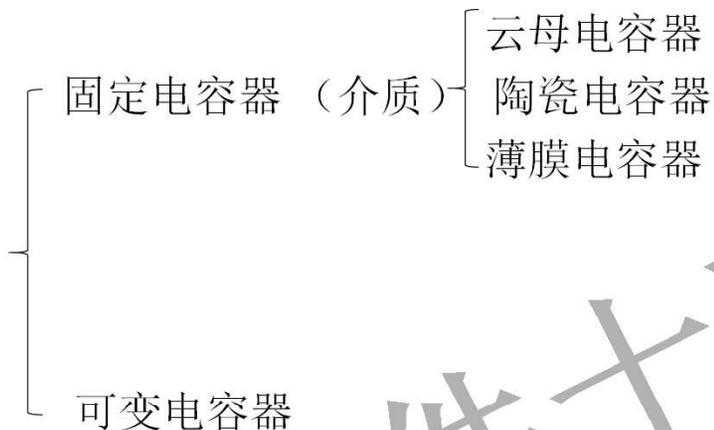
- 电容的分类
- 电容的特性参数
- 电容的用途
- 电容选型中容易出现的四个误区

硬件十万个为什么

电容

- 电容器是一种能储存电荷的容器，它是由两片靠得较近的金属片，中间再隔以绝缘物质而组成的。

- 电容的分类



0801	铝电解电容器(液体电解质)
0802	钽电解电容器(固体烧结型)
0803	金膜电容器(金属化有机薄膜)
0804	独石电容器(多层陶瓷，插装)
0805	瓷介电容器(单层陶瓷，插装)
0806	涤纶电容器(话机专用分类)
0807	片状电容器(SMD，陶瓷)
0808	穿心电容器(陶瓷)
0809	可变电容器

硬件十万个为什么

电容的特性参数

1、标称电容量

电容容量公式： $C = \epsilon\epsilon_0 A/d$, 其中

C	- 电容容量
ϵ_0	- 真空的介电常数
ϵ	- 电介质的相对介电常数
A	- 平面电极的面积
d	- 电介质的厚度.



要增大容量:

- 想办法在相同的容积下增大电极的表面面积A;
- 采用更高介电常数 ϵ_0 的电介质材料;
- 减小电介质的厚度d.

电容的特性参数

- 2、温度特性

电容器设计所确定的能连续工作的环境温度范围。

钽电容的温度特性较好，铝电解电容比较差，陶瓷电容NPO材质的温度特性很好，X7R和Z5U很差。

- 3、ESR

电容器会因其构造、使用环境的不同产生各种阻抗、感抗，比较重要的就是ESR等效串联电阻及ESL等效串联电感。

各电容的ESR比较：铝电解电容 > 钽电容 > 陶瓷电容

ESR对电容的影响：

- (1) 决定了电容允许的纹波电流大小；
- (2) 影响电源滤波效果的主导因素；
- (3) 在LDO电路中，影响系统的稳定性。

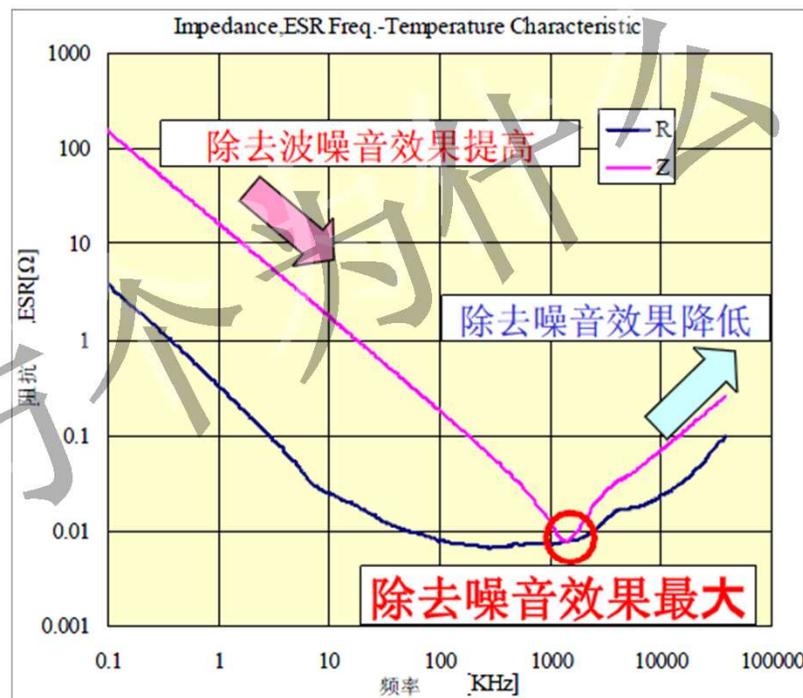
电容的用途

- 电源电路

1、滤波

通高阻低：电源的噪声频率多种多样，根据具体情况来选择容值。

一般常采用大容量的电解电容器，或在电路中同时并联其他类型的小容量电容以滤除高频噪声。



电容的用途

- 2、旁路和去耦

旁路电容为本地器件提供能量，能充放电。布局时尽量靠近供电电源管脚和地管脚，一般是指高频旁路，为高频开关噪声提供一个低阻抗的泄放途径，取值一般较小， $0.01\mu\text{F}$ 、 $0.1\mu\text{F}$ 等。而去耦电容一般较大， $10\mu\text{F}$ 或者更大。

本质区别：旁路是滤除输入信号中的干扰，而去耦是滤去输出信号中的干扰。

- 3、储能

通过整流器收集电荷，并将存储的电量通过变换器传送到电源的输出端。常用额定电压在 $40\sim 450\text{V}/\text{DC}$ ，电容值 $220\sim 150000\mu\text{F}$ 。

电容的用途

- 信号电路

- 1、耦合

在交流信号处理电路中，用于连接信号源和信号处理电路或者作两放大器的级间连接，用以隔断直流，让交流信号或脉冲信号通过，使前后级放大电路的直流工作点互不影响。

- 2、同步/振荡

RC、LC振荡器以及晶体的负载电容

电容选型容易引起的四个误区

- 电容容量越大越好

电容的容值越大，谐振频率越低，电容能有效补偿电流的频率范围也越小。

- 同样容量的电容，并联越多的小电容越好

在板卡设计中采用多个小电容并连多是出于PCB空间的限制，越多的并联小电阻，ESR越低，效果越好。理论是如此，但要考虑到电容接脚焊点的阻抗，多个小电容并联，效果并不一定好。

- ESR越低，效果越好

对于输入电容来说，输入电容的容量要大一点。相对容量的要求，对ESR的要求可以适当的降低。低ESR电容会引起开关电路振荡。

- 好电容代表着高品质

电感的定义和分类

电感的特性

电感的基本参数

电感在电路中的应用

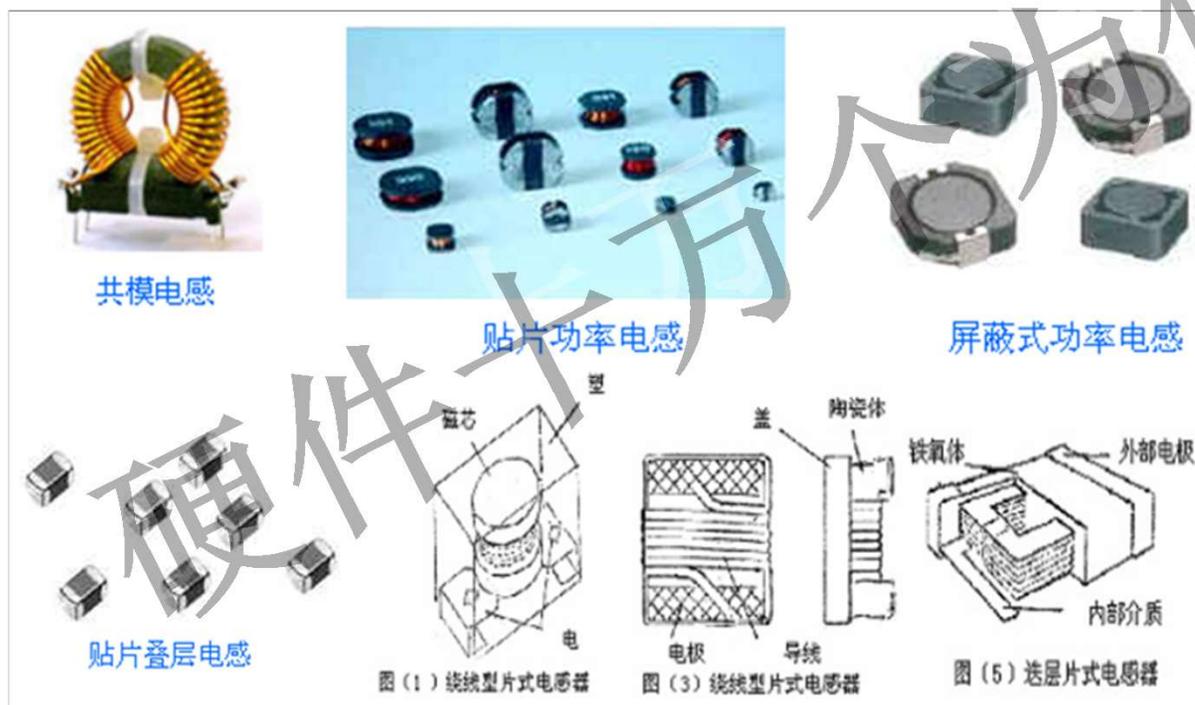
共模电感

磁珠及其应用

硬件十万个为什么

电感的定义和分类

- 定义：导线能通过交流电流时，在导体内部和周围产生交变磁通。导体的磁通量和流过导体的电流之比即为导体的电感，单位亨利。



电感的分类

按用途 →	<ul style="list-style-type: none"> → 电源滤波、去耦 → 工形电感 → 开关电源扼流 → 锰锌、粉芯、合金功率电感 → EMI → 屏蔽电感、高导磁、镍锌类电感 → 低频 → 硅钢片、粉芯、合金、锰锌铁氧体等电感 → 中频 → 锰锌、镍锌铁氧体电感 → 高频 → 高Q值，无磁芯电感
<p>1001 高频插装电感（固定插装）</p> <p>1002 可变电感（感值可变，插装或贴片）</p> <p>1003 片状电感（固定贴片）</p> <p>1004 共模电感（插装或贴片）</p> <p>1005 空心线圈（插装或贴片）</p> <p>1006 工频功率电感（固定插装） （该编码目前已取消。）</p> <p>1007 EMI磁珠（插装或贴片）</p>	

电感的特性

1. 电感具有阻碍电流发生变化的特性。电感量越大，阻碍电流变化的能力越强。电感量与电感的线圈数量、形状、介质有关、温度等有关。
2. 电感存在磁芯饱和问题：当磁场强度达到一定值，电感磁芯进入饱和状态，此时磁通密度不随磁场强度增加而增加，电感阻抗急剧下降，电路设计中应避免出现磁饱和现象。
3. 电感为储能元件，理想电感的电流与电压相位相差 90° ，理论损耗为零，但实际上电感绕线存在铜损和铁损，且损耗与电流密切相关。

电感的频率特性

- 在低频时，电感一般呈现电感特性，即蓄能和滤除高频的特性。
- 在高频时，它的阻抗特性表现的很明显。有耗能发热，感性效应降低等现象。不同的电感的高频特性都不一样。



电感的基本参数

1. 电感量L

电感量L表示阻碍电流突变的能力，L由器件本身固有特性决定，理想电感与电流大小无关。 $L = \mu N^2 A_e / l_e$ ， A_e 为面积， l_e 为有效磁路长度， μ 为磁导率。注意：电感量是在特性频率下测试得到的！

2. 感抗XL

电感对交流阻碍作用的大小称为感抗XL，单位为欧姆（ Ω ）。它与电感量L和交流频率f关系为：

$$X_L = 2\pi f L$$

3. 额定电流

电感允许的最大直流工作电流值。当通过电感的电流超过该电流值时，将出现磁饱和，电感的阻抗迅速降低，电流增大，电路设计中应避免出现磁饱和现象。

电感的基本参数

4. 品质因素Q

Q表征线圈质量的物理量，为XL与其等效电阻的比值， $Q=XL/R_{DC}$ 。Q值愈高，回路损耗愈小。Q值与导线的直流电阻，骨架的介质损耗，屏蔽罩、铁芯损耗，以及高频趋肤效应有关。Q值通常为几十~几百。采用磁芯线圈，多股粗线圈均可提高Q值。

5. 分布电容

线圈的匝与匝间、线圈与屏蔽罩间、线圈与底板间存在的电容成为分布电容。分布电容的存在是线圈Q值减小，稳定性变差，因而线圈的分布电容越小越好。采用分段绕发可减小分布电容。

电感在电路中的应用

- 基本作用：滤波、振荡、延迟、限流、储能
形象说法：“通直流，阻交流”

在电子线路中，电感线圈对交流有限流作用，它与电阻器或电容器能组成高通或低通滤波器、移相电路及谐振电路等；变压器可以进行交流耦合、变压、变流和阻抗变换等。

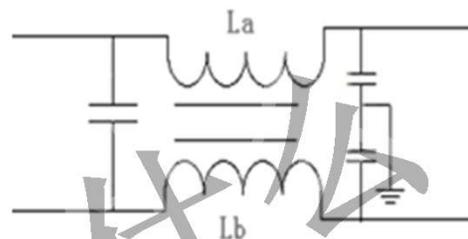
由感抗 $X_L=2\pi fL$ 知,电感 L 越大，频率 f 越高，感抗就越大。该电感器两端电压的大小与电感 L 成正比，还与电流变化速度 $\Delta i/\Delta t$ 成正比，这关系也可用下式表示：

电感线圈也是一个储能元件，它以磁的形式储存电能，储存的电能大小可用下式表示： $W_L=1/2 Li^2$ 。

线圈电感量越大，流过越大，储存的电能也就越多。

共模电感

共模电感：实质上是双向滤波器主要用于滤除电磁干扰，滤除外部输入的共模电磁干扰，同时抑制本身不对外发出电磁干扰，避免影响同一电磁环境下其他电子设备的正常工作。



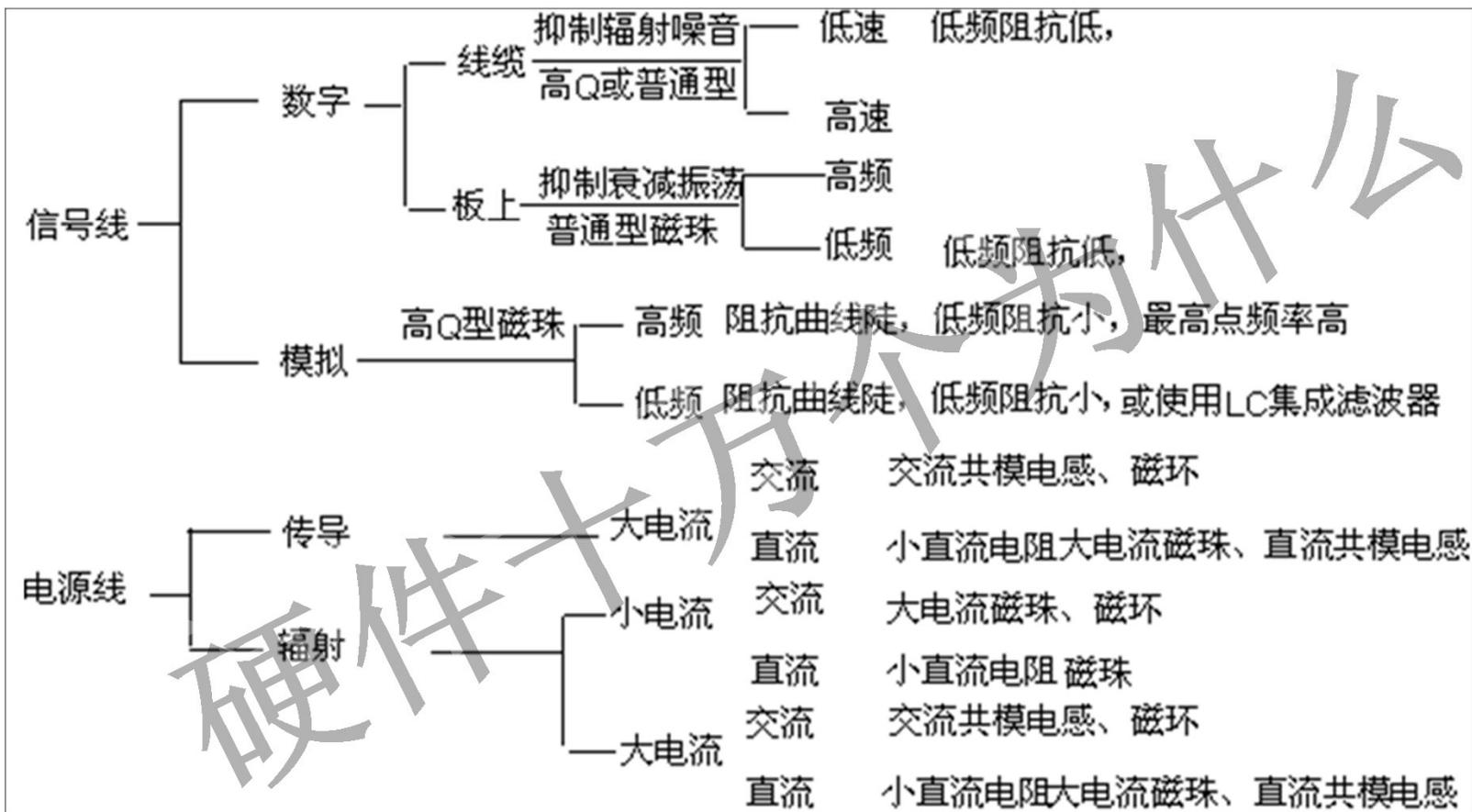
共模电感：包含 L_a 和 L_b 两个共模电感线圈，两线圈绕在同一铁芯上，匝数和相位均相同(绕制反向)。当电路中工作电流流过时，电流在同相位绕制的电感线圈中产生反向的磁场而相互抵消，对电路正常工作几乎不产生影响；当有共模电流流经线圈时，由于共模电流的同向性，会在线圈内产生同向的磁场而增大线圈的感抗，使线圈表现为高阻抗，产生较强的阻尼效果，以此衰减共模电流，达到滤波目的。

磁珠

- 磁珠的主要原料为铁氧体，灰黑色，单位为欧姆。磁环或磁珠专用于抑制信号线、电源线上的高频干扰和尖峰干扰，它也具有吸收静电放电脉冲干扰的能力。
- 磁珠和电感的区别：

电感是储能元件，而磁珠是能量转换（消耗）器件。电感多用于电源滤波回路，侧重于抑止传导性干扰；磁珠多用于信号回路，主要用于**EMI**方面。
- 片式磁珠的功能主要是消除存在于传输线结构（**PCB**电路）中的**RF**噪声，**RF**能量是叠加在直流传输电平上的交流正弦波成分，直流成分是需要有用信号，而射频**RF**能量却是无用的电磁干扰沿着线路传输和辐射（**EMI**）。

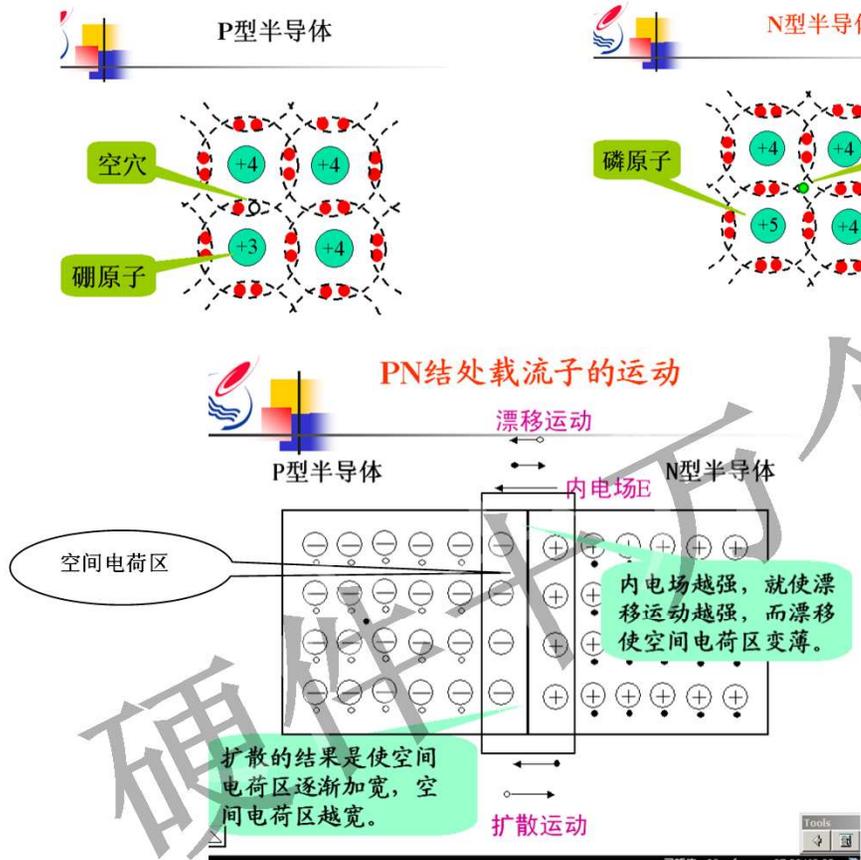
应用场合



应用说明

- 在高频段，阻抗主要由电阻构成，随着频率的升高，磁芯的磁导率降低，导致电感的电感量减小，感抗成分减小，但是，这时磁芯的损耗增加，电阻成分增加，导致总的阻抗增加，当高频信号通过铁氧体时，电磁干扰被吸收并转换成热能的形式消耗掉。
- 在低频段，阻抗主要由电感的感抗构成，低频时 R 很小，磁芯的磁导率较高，因此电感量较大，电感 L 起主要作用，电磁干扰被反射而受到抑制，并且这时磁芯的损耗较小，整个器件是一个低损耗、高品质因素 Q 特性的电感，这种电感容易造成谐振，因此在低频段时可能会出现使用铁氧体磁珠后干扰增强的现象。

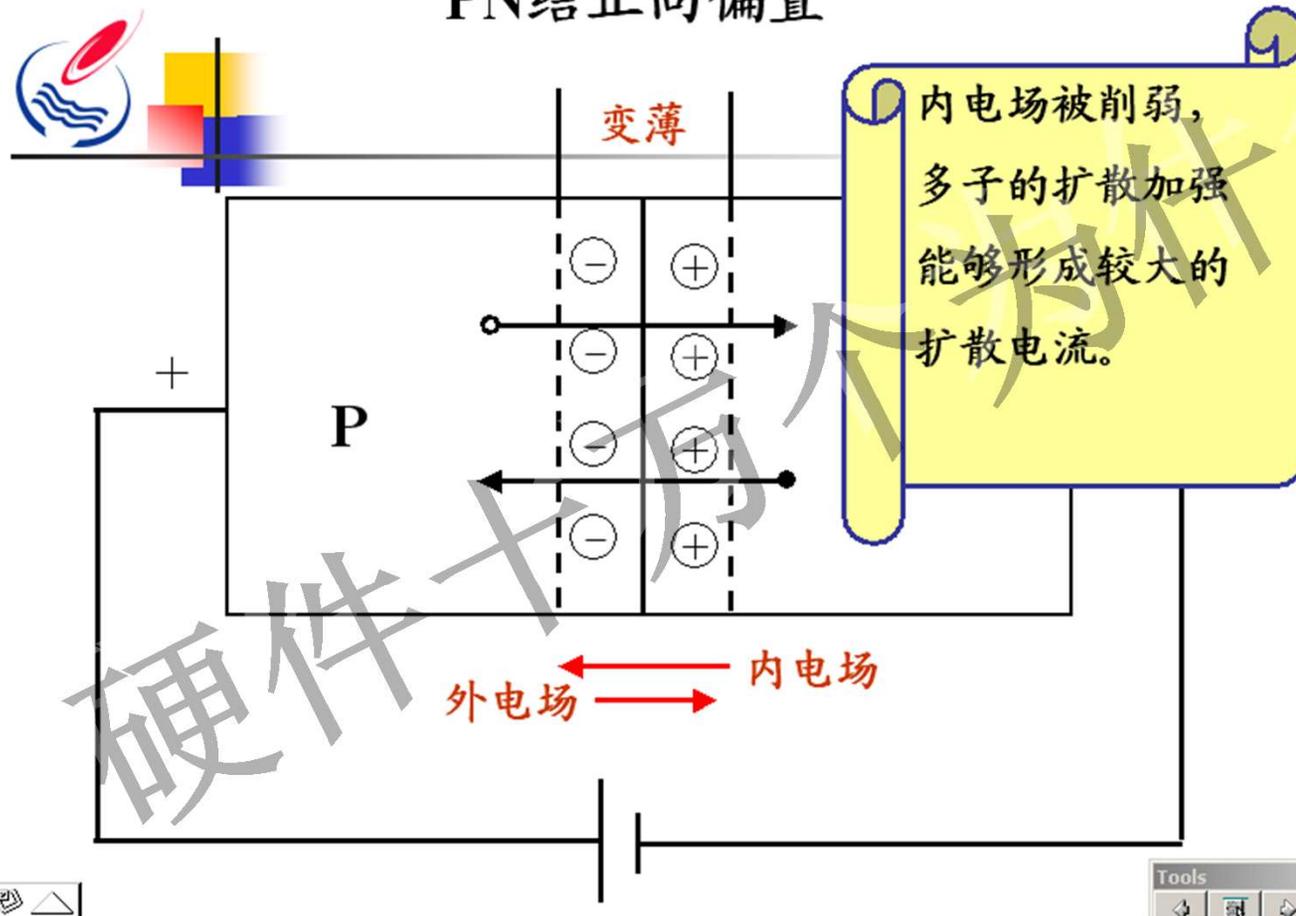
二极管原理——PN节



扩散和漂移达到动态平衡，相对于两个区之内没有电荷运动，空间电荷区的厚度不变。

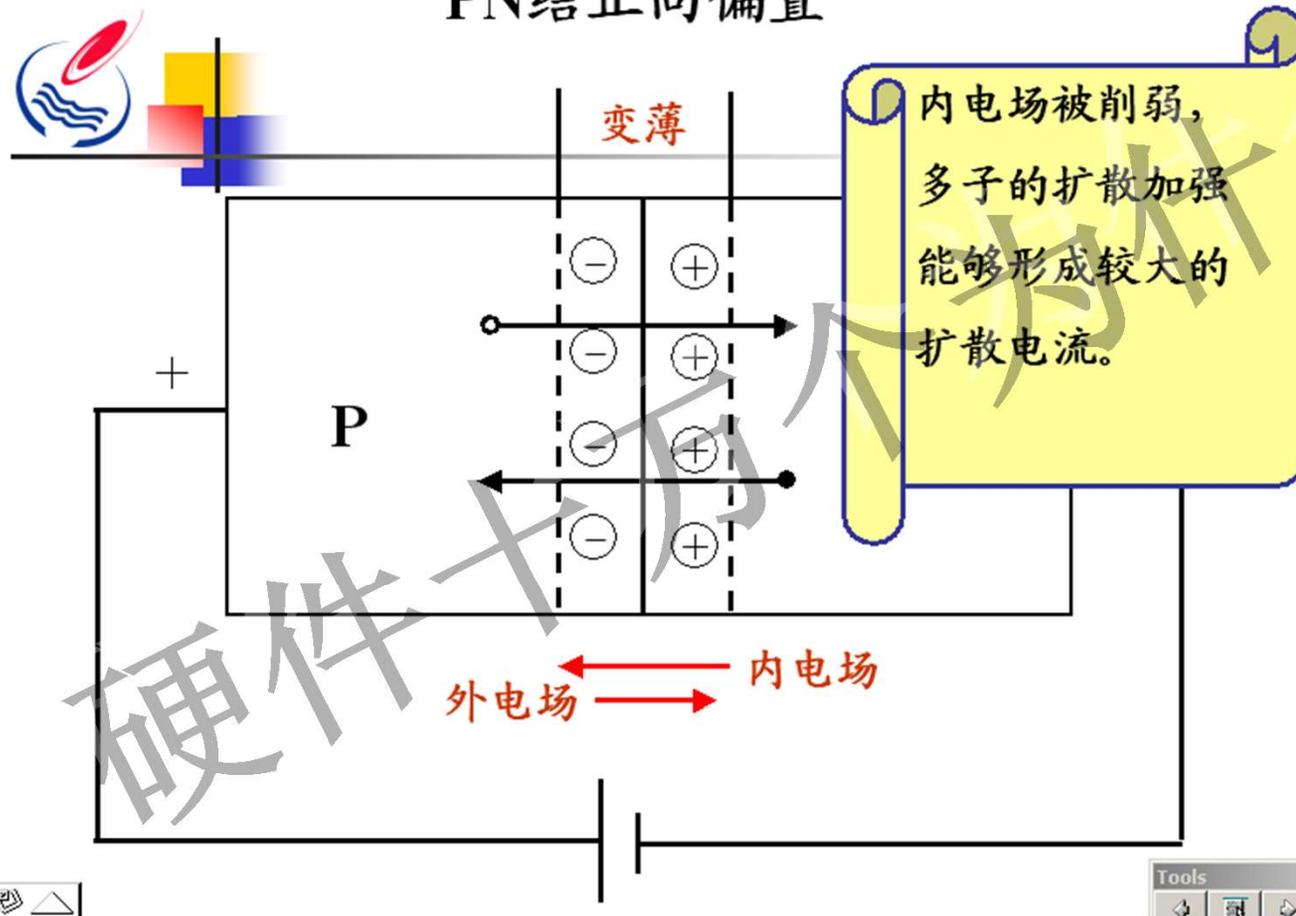
二极管原理——PN节

PN结正向偏置



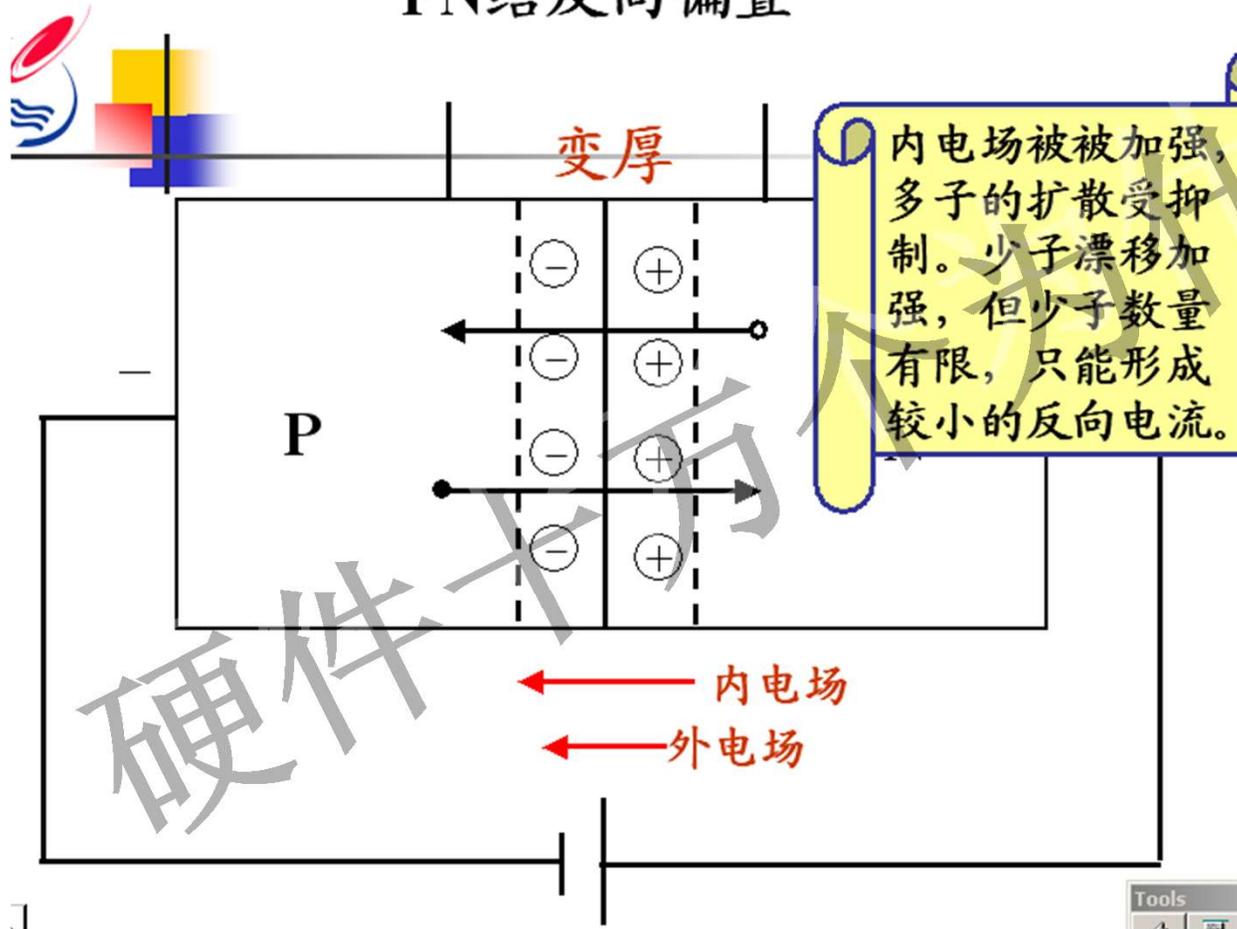
二极管原理——PN节

PN结正向偏置



二极管原理——PN节

PN结反向偏置



二极管原理——单向导电性

• 1: 二极管最重要的特性: 单向导电性

• 二极管的主要参数

• 1) I_F ——最大整流电流: 长期连续工作时, 允许通过的最大正向平均电流

• 2) V_{BR} ——反向击穿电压

• 3) I_R (I_S) —— 反向饱和电流: 硅 (nA) 级; 锗 (μA) 级

• 4) r_d ——动态电阻

• $r_d = \Delta V_F / \Delta I_F$

• 二极管常应用于以下场合:

• 1) 整流——交流电变换成直流电。

• 2) 限幅——限制电压不能超过某个范围。(稳压二极管)

• 3) 钳位——限制在某个电压范围内。

• 4) 检波——检波从调制后的载波中得到原先信号的转换方法。

• 5) 开关——主要起开关作用。

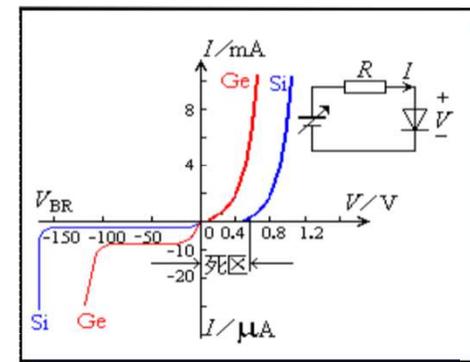


图 二极管的伏安特性曲线

二极管原理——温度特性

温度对二极管的性能有较大的影响，温度升高时，反向电流将呈指数规律增加，如硅二极管温度每增加 8°C ，反向电流将约增加一倍；锗二极管温度每增加 12°C ，反向电流大约增加一倍。

另外，温度升高时，二极管的正向压降将减小，每增加 1°C ，正向压降 $V_F(V_D)$ 大约减小 2mV ，即具有负的温度系数。

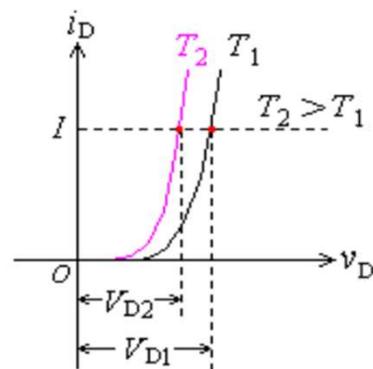
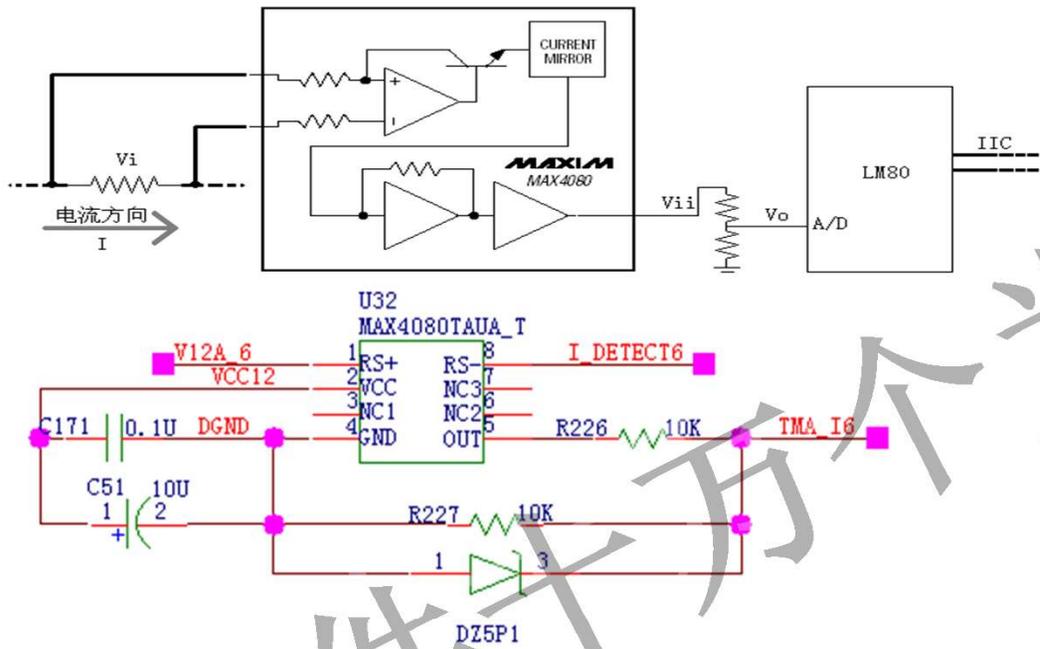


图 温度对二极管伏安特性曲线的影响

二极管案例1——漏电流影响电流检测



待检测电流 (mA)	检测电流 (mA)	偏差 (mA)
349.5	348.8	-0.7
375	374.4	-0.6
400.5	399.6	-0.9
424.5	423.6	-0.9
450	448.8	-1.2
475.5	474	-1.5
499.5	497.6	-1.9
600	595.6	-4.4
700.5	689.6	-10.9
799.5	774.4	-25.1
900	848.8	-51.2
1000.5	910.4	-90.1
1050	936.4	-113.6
1099.5	960	-139.5
1200	1002	-198

电流通路上串入小阻值精密电阻1/4ohm，将电流信号转变为电压信号，通过MAX4080放大20倍之后，经过电阻分压网络分压成一半电压送入A/D芯片LM80检测电流。理论上计算公式为：

$$V_o = V_{ii} * 0.5 = 2.5 * I$$

以待检测电流为1A为例计算，理论上，输入电流1A时，Vo=2.5V，但实际测试Vo=2.5*0.9104=2.276V。

二极管案例1——漏电流影响电流检测

- 稳压二极管编码为15040172， $V_r=1V$ 时，漏电流 $I_r=10\mu A$ 。
- 在待检测电流为1A时，假设漏电流为10 μA ：
 - 可得 $V_o=2.45V$ ，换算成电流值为 $I=V_o/2.5=0.98A$ ，偏差也有20mA，当然这只是理论计算，实际上 V_o 超过1V后，漏电流会急剧增大，实际计算偏差肯定会更大。若漏电流为15 μA 时，可得 $V_o=2.425V$ ，换算成电流值为 $I=V_o/2.5=0.97A$ ，理论偏差也有30mA。



二极管案例1——漏电流影响电流检测

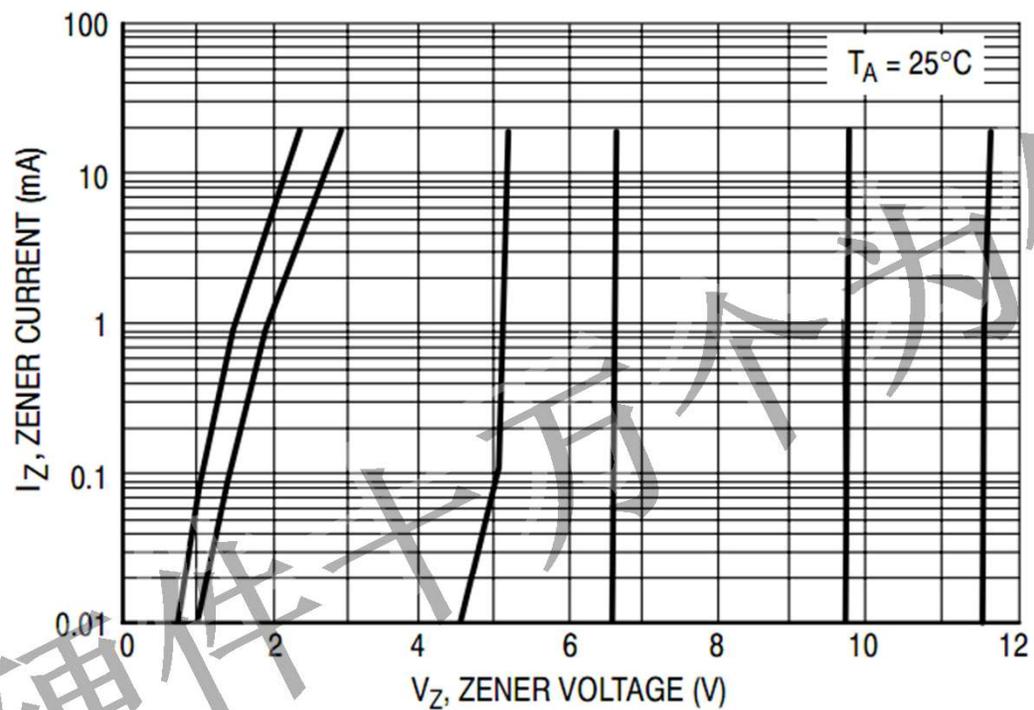
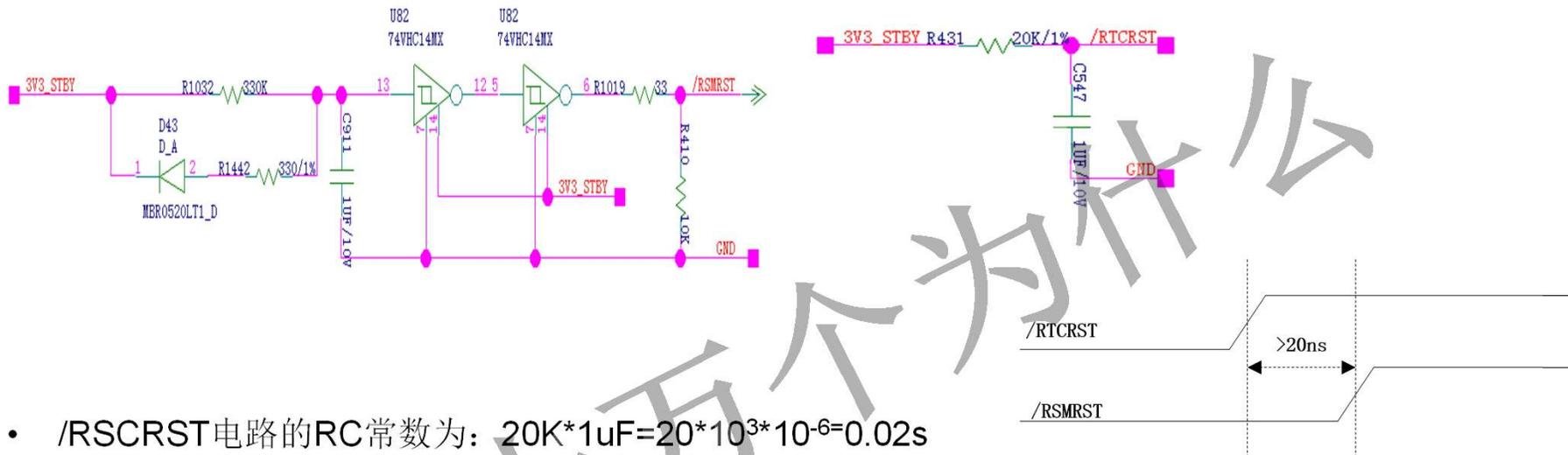


Figure 7. Zener Voltage versus Zener Current (V_Z Up to 12 V)

二极管案例2——漏电流影响上电时序



- /RSCRST电路的RC常数为： $20K \cdot 1\mu F = 20 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} = 0.02s$
 - /RSMRST电路的RC常数为： $330K \cdot 1\mu F = 330 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} = 0.33s$ 。
 - RC充电计算公式： $U_c(t) = U_c(t=0) + [U_s - U_c(t=0)](1 - e^{-\frac{t}{RC}})$
 - 公式1
- U_s 为激励电压， U_c 为电容电压。
- /RSCRST的 V_{IH} 最大值为2.3V， /RSMRST的 V_{IH} 最小值为1.2V

二极管案例2——漏电流影响上电时序

• 由公式1推导得：

$$TCR = 1.1939 * RC$$

$$TMR = 0.4520 * RC$$

设计时间差为30ns 得：

$$R_{mr} > 2.68 R_{cr} = 53.6K$$

$$\frac{330K * (R_{D43} + R_{1442})}{330K + (R_{D43} + R_{1442})} \geq 53.6K$$

保证 $R_{D43} + R_{1442} > 64K$

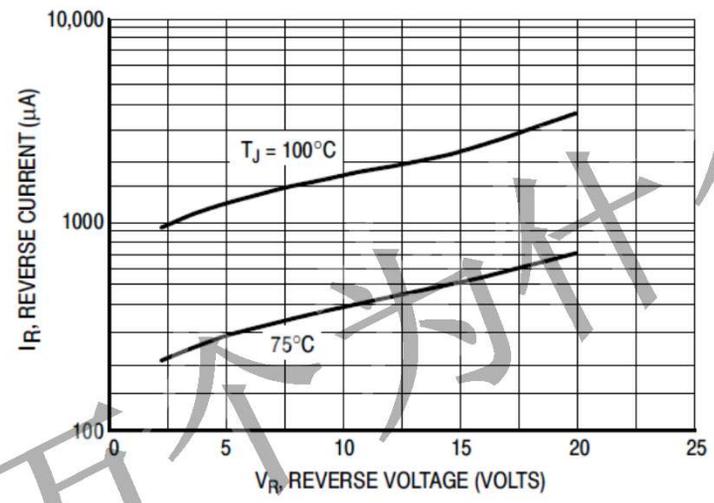
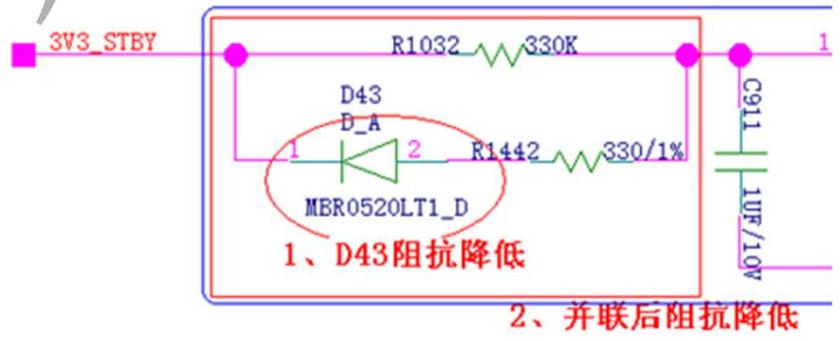


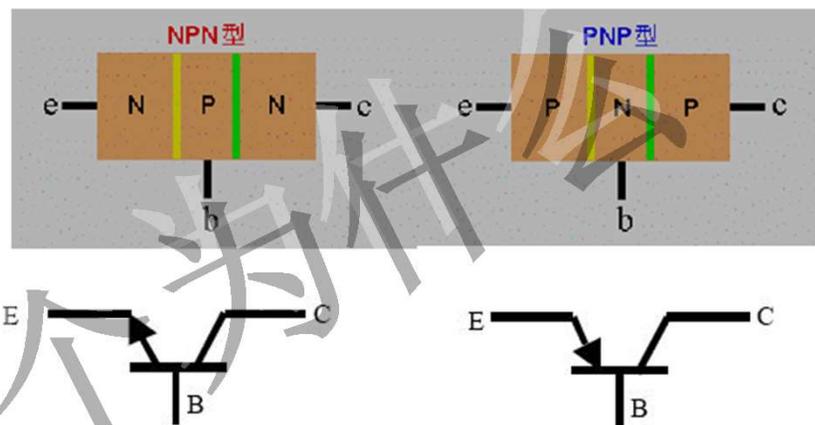
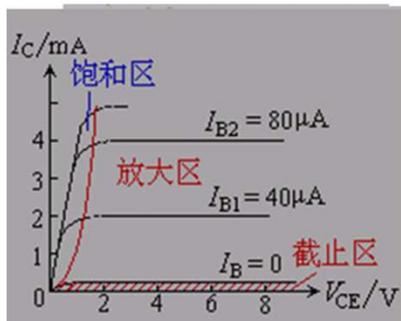
Figure 2. Typical Reverse Current



三极管原理——三极管特性

• 两种类型:NPN和PNP

小问题: e,b,c分别代表哪个极?



1) 放大区: 输出特性曲线的近于水平部分是放大区。在放大区, $I_C = I_B \times \beta$ (放大倍数), 由于在不同 I_B 下电流放大系数近似相等, 所以放大区也称为线性区。三极管要工作在放大区, 发射结必须处于正向偏置, 集电结则应处于反向偏置, 对硅管而言应使 $U_{BE} > 0$, $U_{BC} < 0$ 。

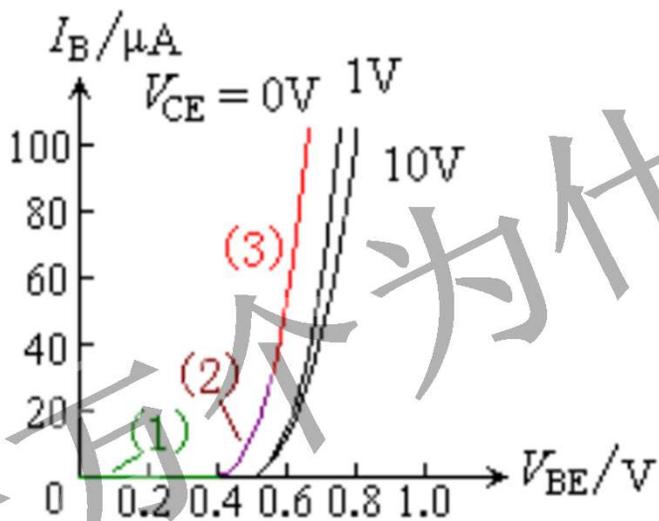
2) 截止区: $I_B = 0$ 的曲线以下的区域称为截止区。实际上, 对NPN硅管而言, 当 $U_{BE} < 0.5V$ 时即已开始截止, 但是为了使三极管可靠截止, 常使 $U_{BE} \leq 0V$, 此时发射结和集电结均处于反向偏置。

3) 饱和区: 输出特性曲线的陡直部分是饱和区, 此时 I_B 的变化对 I_C 的影响较小, 放大区的 β 不再适用于饱和区。在饱和区, $U_{CE} < U_{BE}$, 发射结和集电结均处于正向偏置。

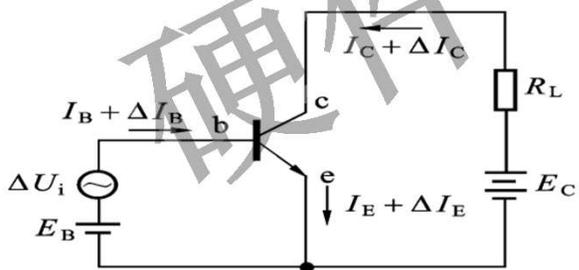
三极管原理——共射极级接法输入特性

- ①死区
- ②非线性区
- ③线性区

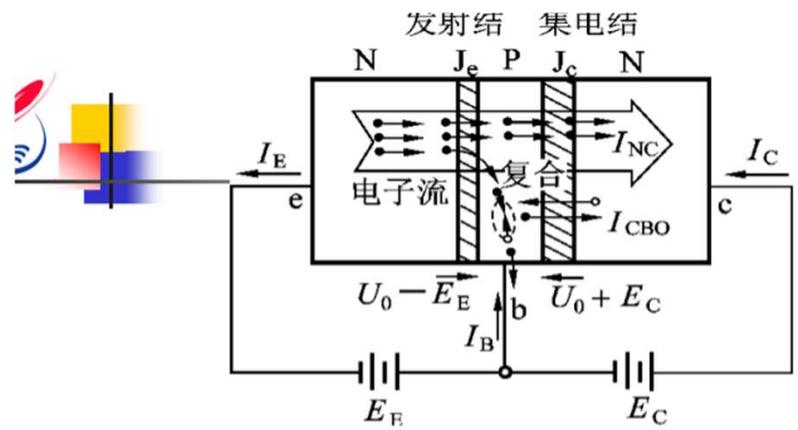
图共射接法输入特性曲线



输入特性曲线 — $i_B = f(u_{BE}) \Big|_{u_{CE} = \text{const}}$
 输出特性曲线 — $i_C = f(u_{CE}) \Big|_{i_B = \text{const}}$



三极管原理——共基极原理分析



$$\alpha = \frac{\text{传输到集电极的电流}}{\text{发射极注入的电流}}$$

$$I_C = I_{nc} + I_{CBO}$$

$$\alpha = \frac{I_{nc}}{I_E}$$

$$\alpha = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E}$$

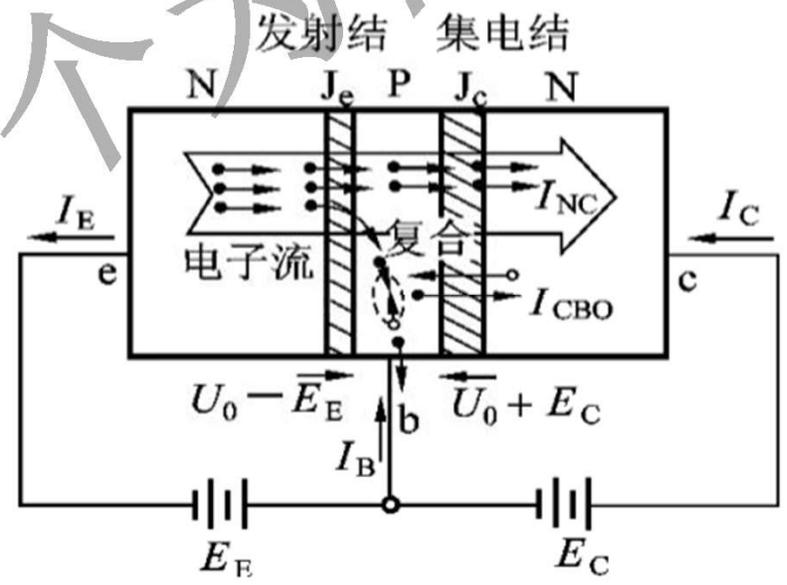
$$\alpha \approx \frac{I_C}{I_E}$$

$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

$$I_B = I_B' - I_{CBO}$$

$$I_B' = (1 - \alpha) I_E$$



三极管原理——共集电极原理分析

对于共射极电路，研究其放大过程主要是分析集电极电流(输出电流)与基极电流(输入电流)之间的关系。

共射极和共基极的接法不同。但它们放大信号的物理本质是相同的。

通过共基极电流放大系数 α 来导出表征三极管在共射极接法时放大能力的电流放大系数(以 β 表示)。

三极管的选型应用规则

- 1、三极管的主要作用是放大，选用时，应在满足降额要求的前提下，考虑输出电流和相应的耗散功率，击穿电压大小，放大倍数等参数。同时，应尽量选用热阻小，允许结温高的器件。
- 2、三极管的放大倍数随使用频率的升高而下降，在高频下使用时，还应考虑：截止频率 特征频率 和最高振荡频率等。
- 3、晶体管的耗散功率决定了其输出功率的大小。晶体管的功率主要受安全工作区的限制。
- 4、晶体管不但可以用于放大，而且还是一个优良的开关器件，与MOSFET相比，晶体管可以提供较小的导通电阻和高的阻断电压，但是，由于是少子器件，其开关速度较慢，且由于存在着电流集中效应问题，存在二次击穿问题，三极管的安全工作区受到二次击穿耐量的限制。
- 5、近年来，随着器件管芯制作工艺及装配工艺的发展，三极管的主要的发展方向是低饱和压降和高速度，特别是饱和压降的进一步降低，为三极管向小封装，高功率容量发展提供了条件。

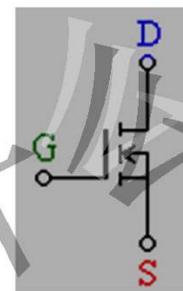
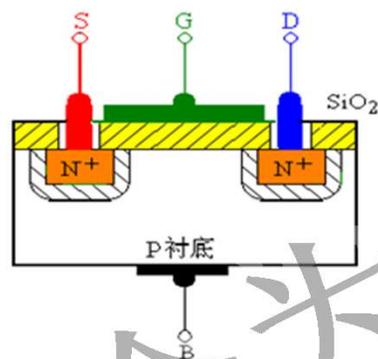
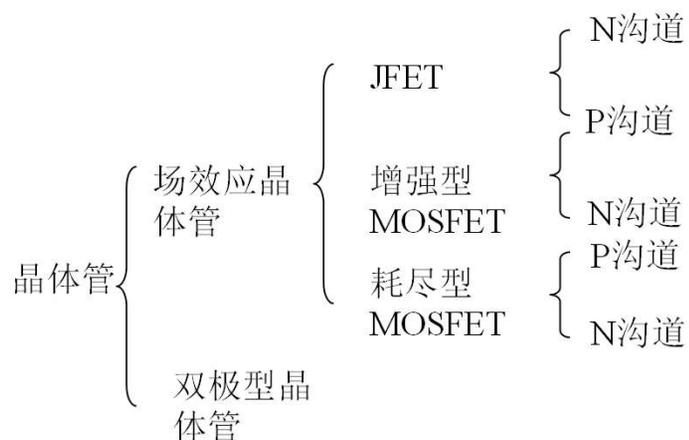
三极管在单板上的应用举例



- Q3 PNP
- Q1 NPN

个为什么

MOS管基础知识简介



MOS管是场效应管的一种，它由于只有多子导电，因此被称为单极型晶体管，同时它是电压控器件，其输出电流决定于栅源极之间的电压，栅极上基本不取电流，因此它的输入阻抗非常高，可达到 $1E+9 \sim 1E+14$ 欧。高输入阻抗是场效应管的突出特点。

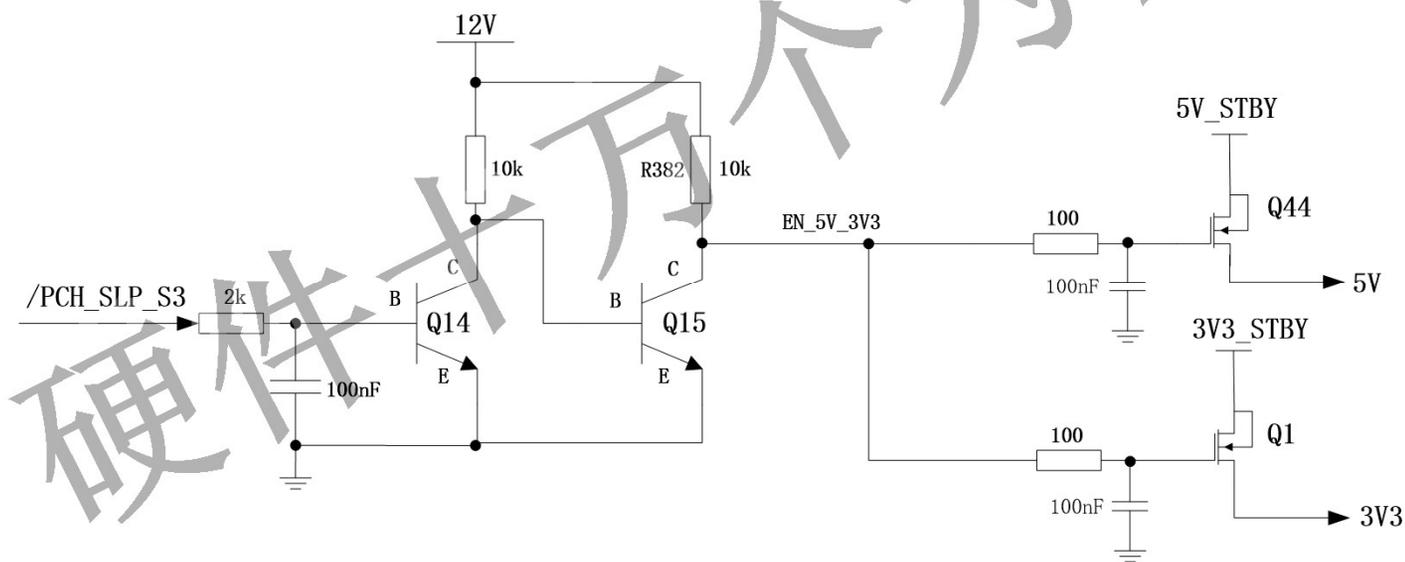
- **MOS**管可分为增强型和耗尽型，每种类型根据沟道内导电多子的不同又可分为**P**沟道和**N**沟道。现在公司在电源电路中使用的基本上都是增强型**MOS**管，既有**N**沟道的也有**P**沟道的。其选择的基准与电路结构有关。所谓增强型就是说需要在栅源之间加上一定的电压器件才会导通。而耗尽型由于在制造时在栅极掺入一定杂质，使得在栅源不外加电压时就可形成导电沟道可以导通。

MOS管的主要特点

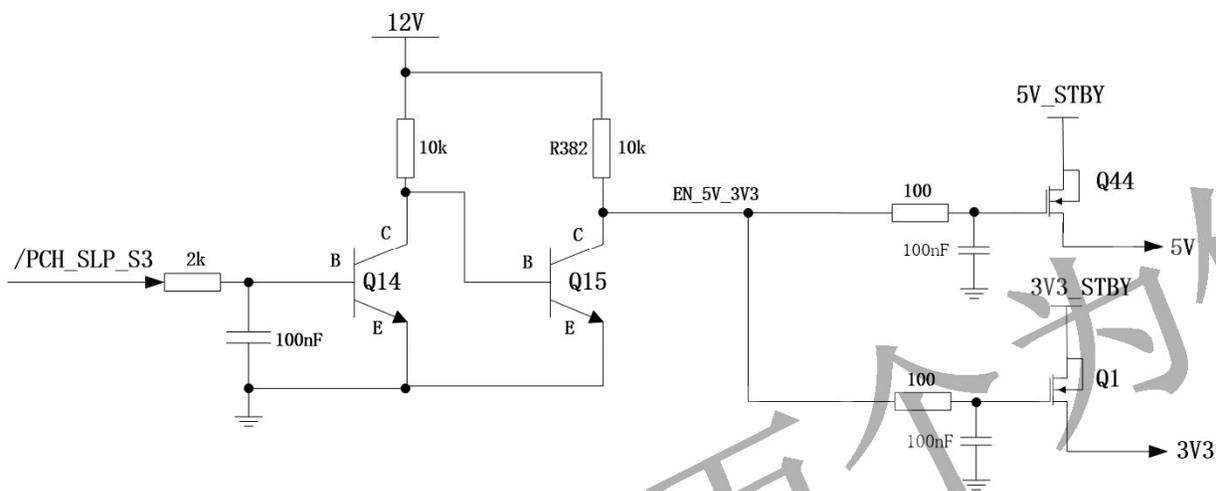
- ①电压控制型器件，输入阻抗高，驱动容易。单极性器件，少子不参与导电，没有少子的反向恢复，因而开关过程中的损耗小，从而应用频率高（在功率半导体器件中是最高的）。
- MOSFET的开关时间短，关断时抑制尖峰电压是很重要的，有如下的一些对策：
 - a尽量减少电路的电感，如DC侧使用螺旋线对等。
 - b在器件上附加吸收电路；
 - c调节栅压的上升下降时间，延迟通断的过渡时间。
- ②无电流集中现象，因此无二次击穿，安全工作范围宽。
- ③由于只有电子（P沟道MOS管为空穴）参与导电，通态电阻 R_{on} 具有正温度系数，使得MOSFET的并联使用比较容易（具有自均流效应）。
- ④也因为通态电阻 R_{on} 具有正温度系数，温度升高，损耗增大。
- ⑤ R_{on} 取决于沟道区及N--漂移区，因此 R_{on} 与漏源电压 V_{DSS} 之间形成矛盾， V_{DSS} 越大，N--漂移区掺杂浓度越低， R_{on} 越大，损耗越大。
- ⑥体内具有反并联的二极管。
- ⑦体内具有寄生的晶体管效应。

三极管案例——SOT封装三极管漏电流导致单板启动异常

- XX单板在环境试验低温存储后（机框下电， -40° 存储24h，恢复到常温 25° ，在 25° 条件下保持2h）上电，发现有4块单板未正常启动。监控单板电源，发现所有问题单板的5V电源异常（测试值为2.6V），而3V3、3V3_STBY、5V_STBY等电压输出正常；过了20分钟后（未对问题单板进行插拔），问题单板都恢复正常。



三极管案例——SOT封装三极管漏电流导致单板启动异常



- 单板故障时，5V_STBY输出正常，而5V输出只有2.6V，MOS管Q44的Vgs小于导通阈值Vgs(th)（查看器件手册，低温下Vgs(th)大概为2.3V），处于未完全导通状态。要使5V输出正常，则Q44的G点电压Vg（即 $V_{EN_5V_3V3}$ ）必须大于7.3V（5V+2.3V）；反之，单板出现故障时， $V_{EN_5V_3V3} < 7.3V$ 。

三极管案例——SOT封装三极管漏电流导致单板启动异常

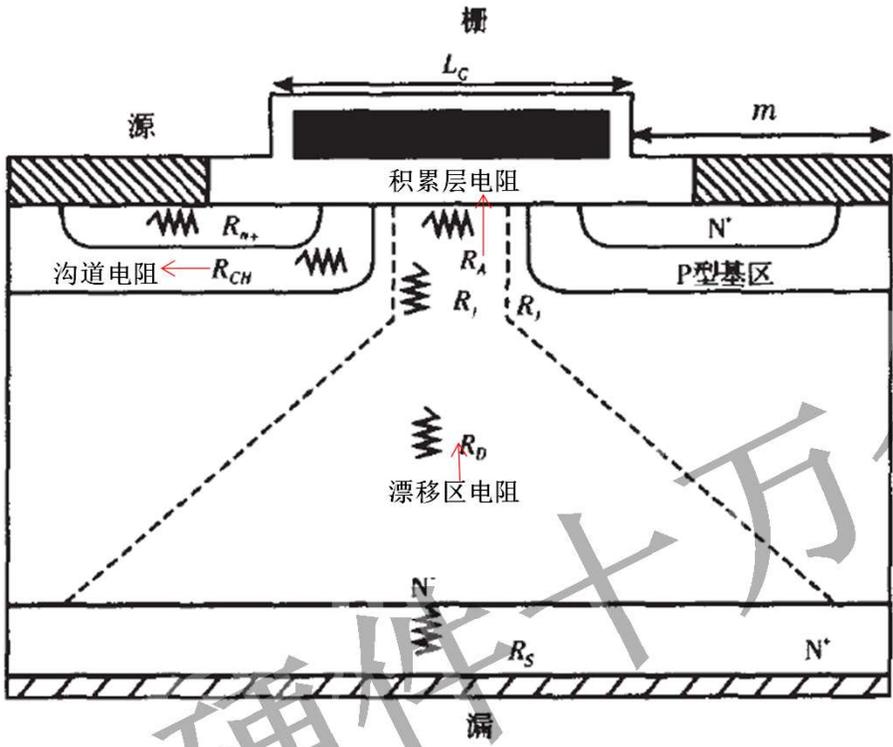


图2 垂直结构功率 MOSFET 内部电阻示意图

$$R_{CH} = \frac{1}{2} \frac{(x_p - x_n)(L_G + 2m)}{\mu_{ns} C_{ox}(V_G - V_T)}$$

$$R_A = \frac{F(L_G - 2x_p)(L_G + 2m)}{\mu_{nA} C_{ox}(V_G - V_T)}$$

$$R_J = \frac{(x_p - x_n)(L_G + 2m)}{\mu_{nB} n q (L_G - 2x_p - 2W_0)}$$

$$R_D = \frac{h(L_G + 2m)}{2q\mu_{nB} n(m + x_p + W_0)} \ln \left[\frac{L_G + 2m}{L_G - 2x_p - 2W_0} \right]$$

这主要是由于在低温环境下，半导体晶格振动减弱，载流子碰撞的平均自由程加长，受晶格散射的几率减小，所以载流子迁移率得到很大程度的提高。

MOS管原理1 (结型场效应管JFET)

结型场效应管有两种类型，一种是N-沟道类型，另一种是P-沟道类型，这两种类型均是通过给栅极（G极）提供电压来控制漏极（D极）到源极（S极）之间电流。如下面图（a）所示，栅极没有施加电压偏值， $U_{GS}=0V$ ，电流 I_d 从漏极流向源极。如下面图（b）所示，当 U_{GS} 的电压开始增加的时候，管子内部的耗尽区域开始慢慢增加，最终导致漏极流向源极的电流 I_d 为0。

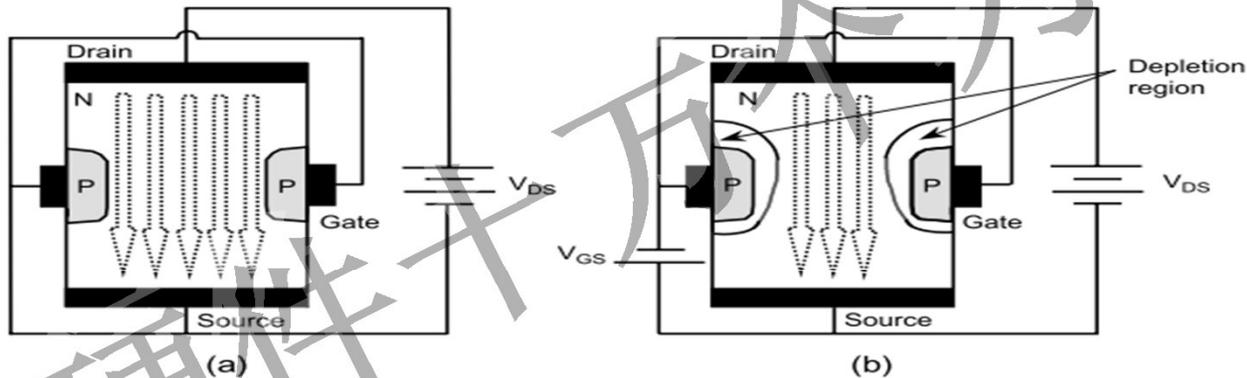


Figure 1: The Structure of a JFET and its Operation

- (a) When V_{GS} (Gate-source voltage) is not supplied
- (b) When V_{GS} (Gate-source voltage) is supplied

MOS管原理2 (金属氧化物半导体场效应管MOSFET)

。金属氧化物半导体场效应管有耗尽型和增强型两种，且每个种类均有N-沟道和P-沟道两种不同沟道类型的管子。耗尽型的管子在 U_{GS} 为0的情况下就是导通状态（如图2），增强型的管子在 U_{GS} 为0的情况下是截止的，漏极到源极之间的电流是随栅极电压的增加而增加（如图3）

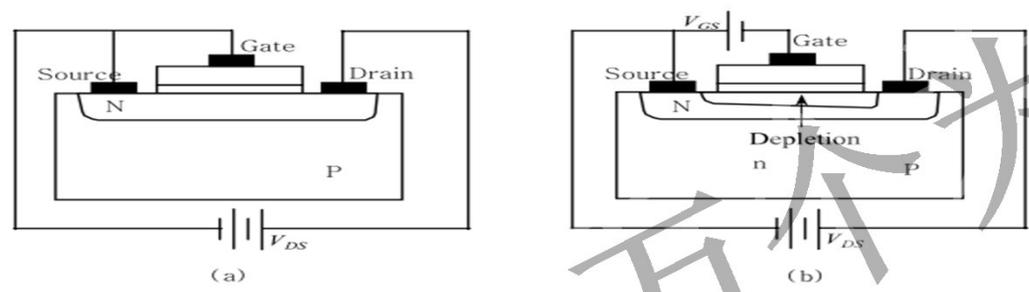


Figure 2: The Structure of a Depletion Type MOSFET and its Operation

- (a) When V_{GS} (Gate-source voltage) is not supplied
- (b) When V_{GS} (Gate-source voltage) is supplied

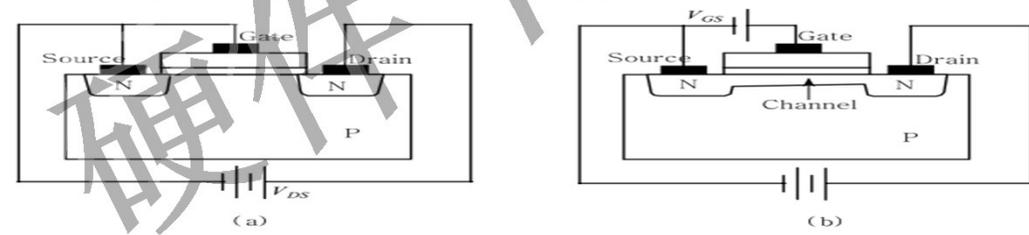


Figure 3: The Structure of an Enhancement Type MOSFET and its Operation

- (a) When V_{GS} (Gate-source voltage) is not supplied
- (b) When V_{GS} (Gate-source voltage) is supplied

MOS管原理3 (MOSFET输出特性)

参数 I_d 主要与 V_{ds} 有关 ($V_{ds}=V_{gs}-V_{gsth}$, 如图6所示)

可变电阻区——当源极与漏极之间的电压为0时，不管 V_{gs} 为多大，漏极电流均为0。这个区域如下图 $[V_{gs}-V_{gs(th)}=V_{ds}]$ 曲线左边，尽管漏极电流很大，由于导通电阻很小，管功耗都会保持很小的。

饱和区——恒流区域， $[V_{gs}-V_{gs(th)}=V_{ds}]$ 曲线右边，这里漏极电流不随 V_{gs} 、 V_{ds} 的电压变化，因此这个区域叫做电流饱和区。

截止区——这个区域之所以叫做截止区，是应为 $V_{gs}<V_{gs(th)}$ 阈值电压，管子没有导通。

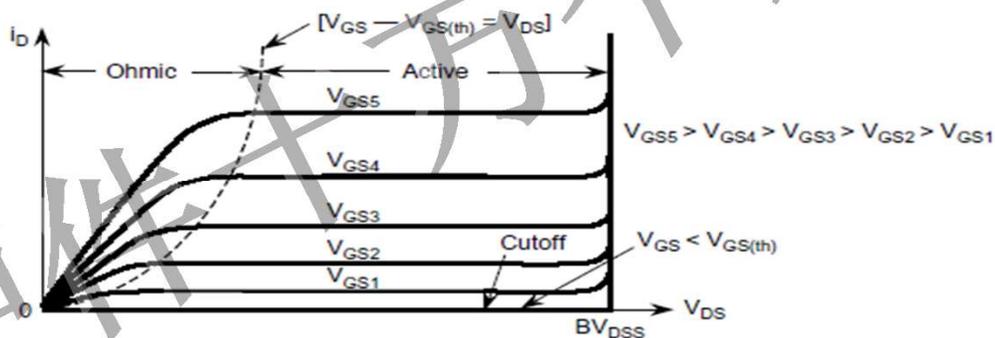
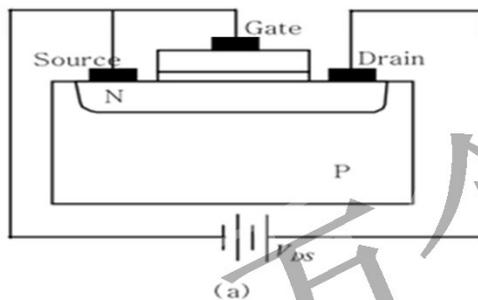


Figure 6: Output Characteristics

MOS管原理4 (金属氧化物半导体场效应管的结构)

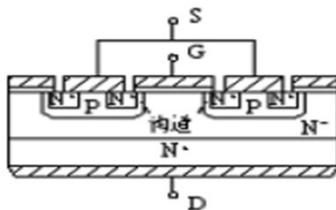
横面沟道设计

漏极、源极、栅极端子被摆放在硅晶片的表面，这种方式很适合集成，但是随着漏极与源极之间的间距越大越不利于功率转换，漏极到源极的电流与长度成反比例关系。一般横向导电的是小功率MOS管。



垂直沟道设计

漏极和源极分别摆放在硅晶片的对立的两边，这种结构很适合功率器件，更多的空间被用来当作源极，导致源极与漏极之间的长度减少，这种结构是有可能提升漏极到源极的电流的。一般垂直导电的是大功率MOS管。



MOS管原理5 (MOS管内部寄生BJT和体二极管)

P结区域类似基极，源极的n+区域类似发射极，漏极的n-区域类似集电极，如下面图5所示。BVcbo与BVceo之间的击穿电压减少，当寄生BJT导通的时候，击穿电压大概为BVcbo的50%~60%，同时漏极施加电压如果超过BVceo就会发生雪崩击穿，如果电流没有限制到外面，MOS管就会发生二次击穿，因此为了防止寄生BJT导通，利用金属镀层让n+区域的源极与p类型的体区域尽可能的短。由于源极和漏极区域接近导致寄生二极管的存在。

寄生BJT关闭状态下，Vds的斜率很高的时候，基极和发射极之间就会有电压跌落，这个样会导致寄生BJT趋向导通。为了防止这个现象发生，可以提高p区域（n+源极下面）的参杂密度。

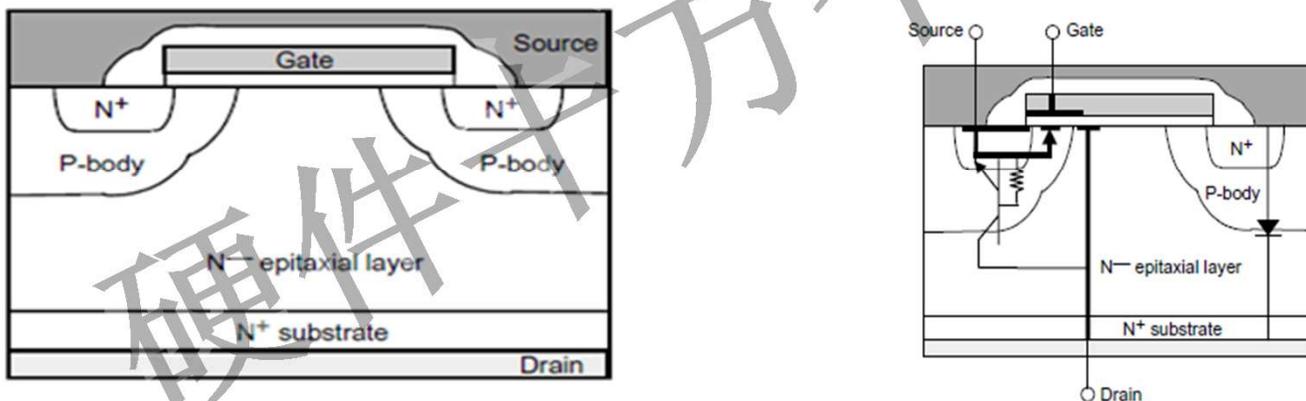


Figure 5: The MOSFET Vertical Structure Showing the Parasitic BJT and Diode

MOS管原理6 (MOS管的电容特性)

输入电容 $C_{iss} = C_{gd} + C_{gs}$ 。
输出电容 $C_{oss} = C_{gd} + C_{ds}$ 。
翻转导通电容 $C_{rss} = C_{gd}$

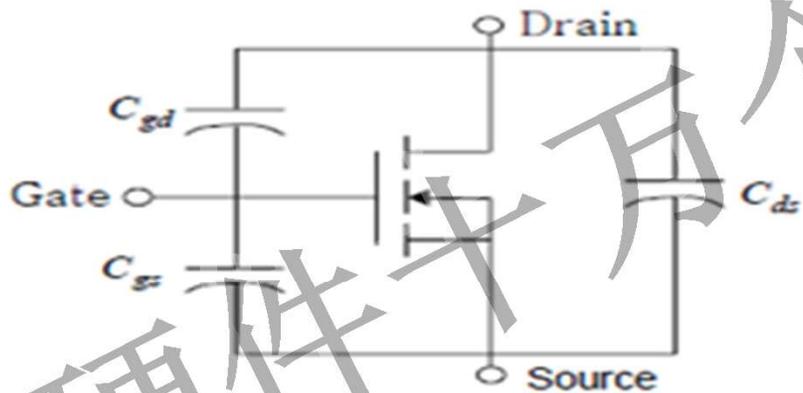


Figure 11: Equivalent Circuit Showing Parasitic Capacitance

MOS管原理7 (MOS管的栅极电荷特性)

栅极总电荷——— Q_g (t0到t4之间充电的电量)
 栅源极之间的电荷——— Q_{gs} (t0到t2之间充电的电量)
 栅漏极之间的电荷——— Q_{gd} (t2到推t3之间充电的电量)

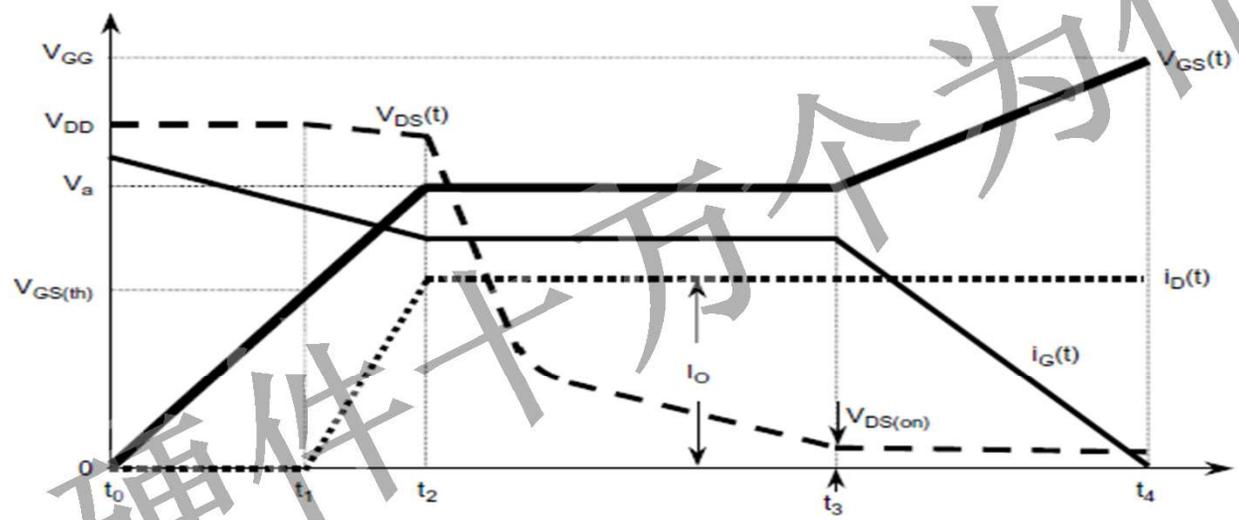


Figure 12: The Graph of $V_{GS}(t)$, $i_G(t)$, $V_{DS}(t)$, $i_D(t)$ when it is turned on

MOS管原理8 (MOS管的导通电阻 $R_{ds(on)}$)

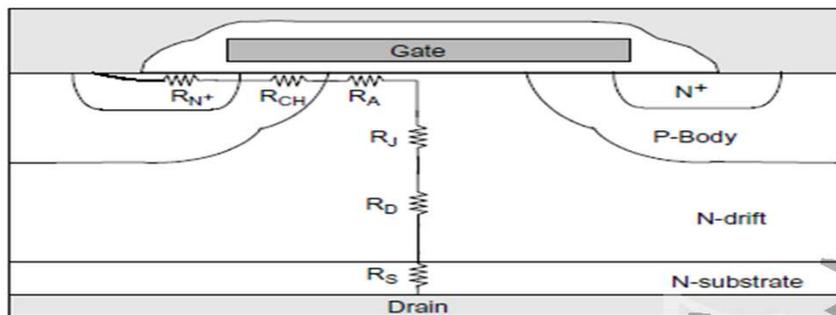


Figure 14: The Vertical Structure of a MOSFET Showing Internal Resistance

$$R_{DS(on)} = R_{N+} + R_{CH} + R_A + R_J + R_D + R_S$$

R_{N+} : 这个是源极与N+扩散层之间的电阻值，与 $R_{ds(on)}$ 相比这个电阻值很小，小到在高电压功率MOS管的环境下可以忽略不计的。

R_{ch} : 这个是沟道等效的电阻，也是MOS管在低压时， $R_{ds(on)}$ 的主要来源，可以通过改变沟道（channel）的长度和宽度，栅极氧化层的厚度，以及栅极驱动电压来控制该阻值的大小。

R_A : 当栅极提供驱动电压时，n-漂移层的尖端表面开始积累电荷（ C_{gd} 下面的金属），沟道与场效应管之间开始形成电流流路径。这个区域聚集的电阻为 R_A 。通过改变累积层的电荷的多少，表面少子的迁移率可以调整 R_A 大小的变化。如果栅极减小了，如同减小了累积层的长度，因此， R_A 随着 R_J 的增加而减少。

R_J : n-尖端与P体区之间的区域（PNP）叫做结型场效应区域， R_J 是该区域等效的电阻。

R_D : p-体区右下端与衬底表面的上层之间的电阻叫做 R_D （漂移层电阻），这个参数在高电压的MOS管是很重要的。

R_S : 衬底区域的电阻，这个阻值在高电压MOS管的时候可以忽略的。但是在低压MOS管，击穿电压又在50V以下的，这个参数又是很重要的。

MOS管原理9 (MOS管的导通斜率 (gfs))

gfs可以通过沟道的宽度和长度来、栅极氧化物的厚度来决定大小

在Vgs提供之后，gfs随着漏电流的增加急剧的增加，当漏电流达到了特定的值后，gfs也随之恒定。如果gfs足够高，栅极电压很低也能获取到高电流，同时也有很高的频率响应。

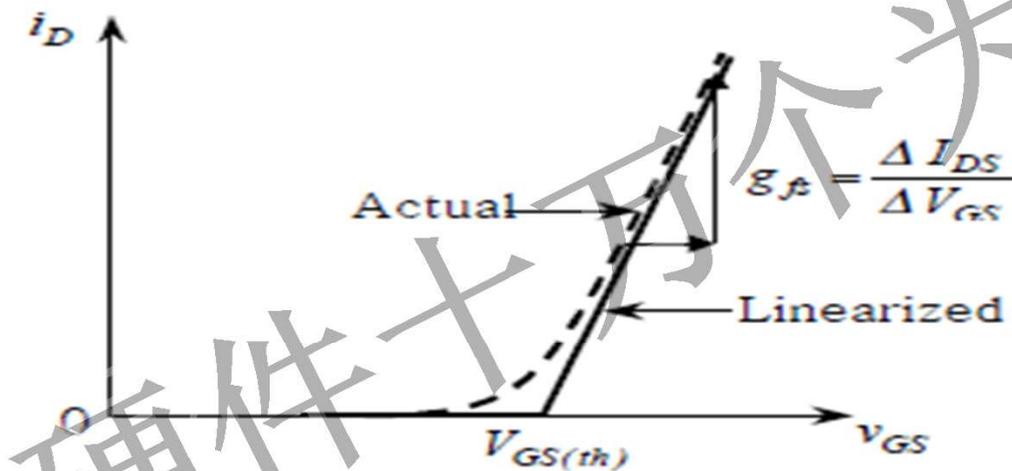


Figure 15: Transfer Curve & gfs

MOS管原理10 (MOS管的温度特性)

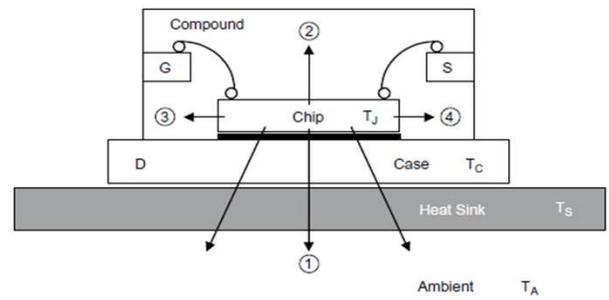


Figure 21: The Path of Thermal Discharge at the Chip Junction

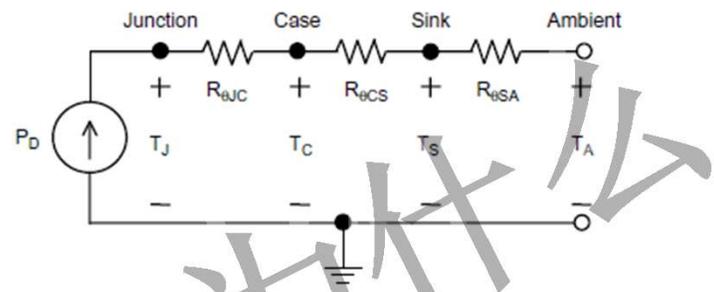


Figure 22: An Equivalent Circuit Based on Thermal Resistance

$R_{\theta JC}$: 晶源到器件表面等效的热阻

$R_{\theta CS}$: 封装表面到散热器之间等效的热阻

$R_{\theta SA}$: 散热器与周围环境等效的热阻

$R_{\theta JA}$: 总热阻

$$R_{\theta JA} = R_{\theta JC} + R_{\theta CS} + R_{\theta SA}$$

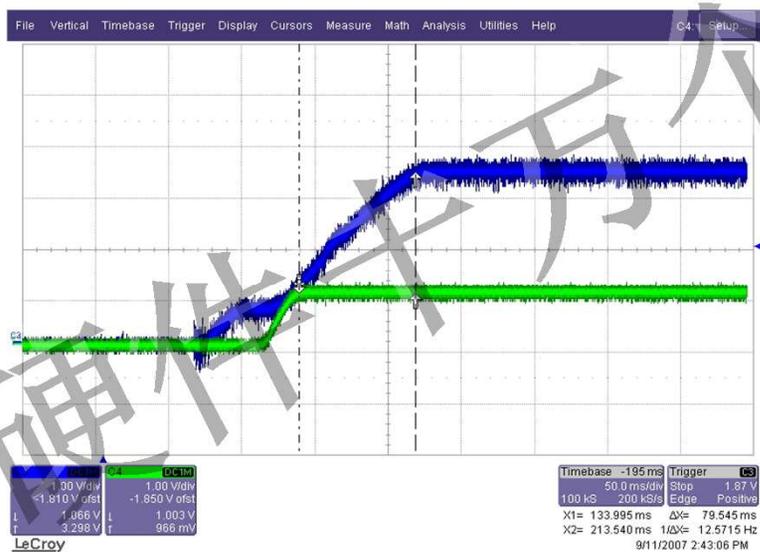
$$P_{dmax} = (T_{chmax} - T_a) / R_{\theta JC}$$

$$R_{DS(on)}(T) = R_{DS(on)}(25^{\circ}C) \left(\frac{T}{300} \right)^{2.3}$$

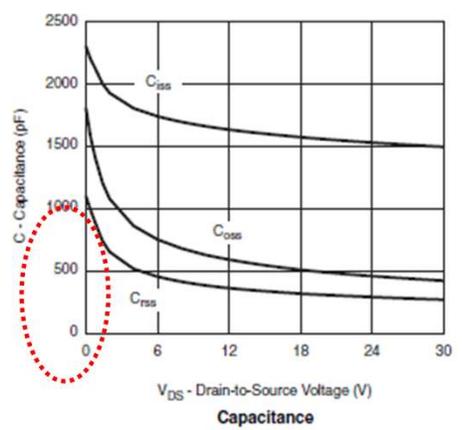
$$g_{fs}(T) = g_{fs}(25^{\circ}C) \left(\frac{T}{300} \right)^{-2.3}$$

MOS管案例1 (MOS管寄生电容)

- 【问题现象】
- 某单板上CPU对内核电压1.0V和I/O电压3.3V之间的上电时序有一定的要求，在单板测试过程中发现1.0V和3.3V不满足芯片要求，会对芯片的可靠性造成一定的影响。

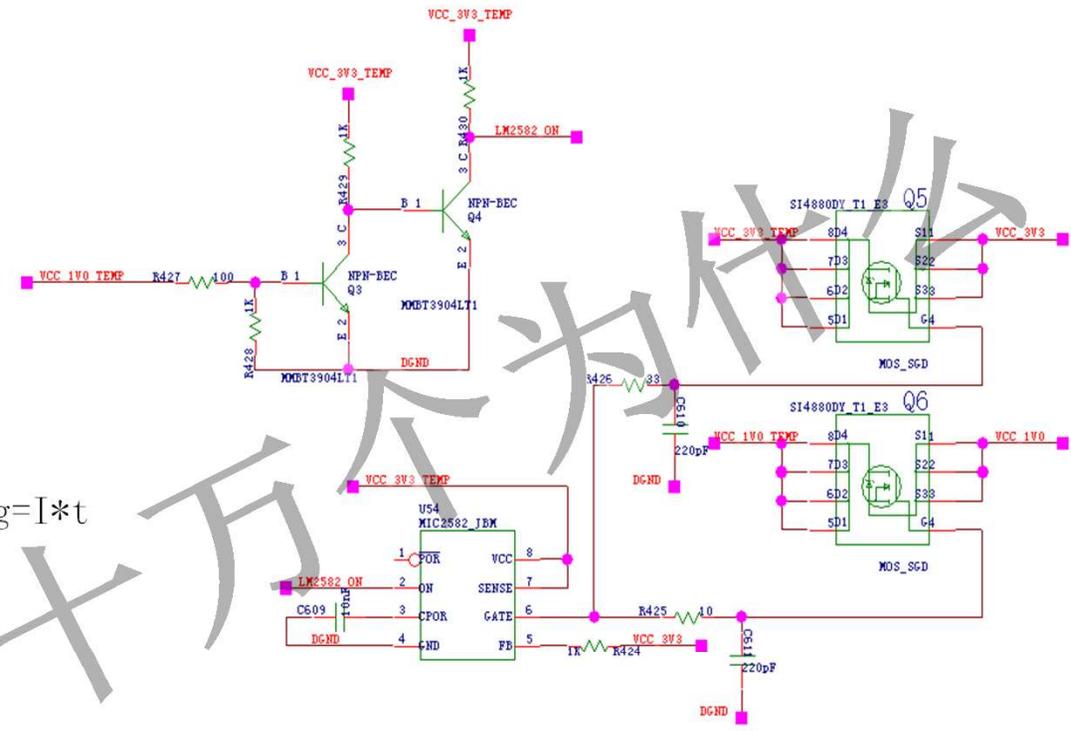


MOS管案例1 (MOS管寄生电容)



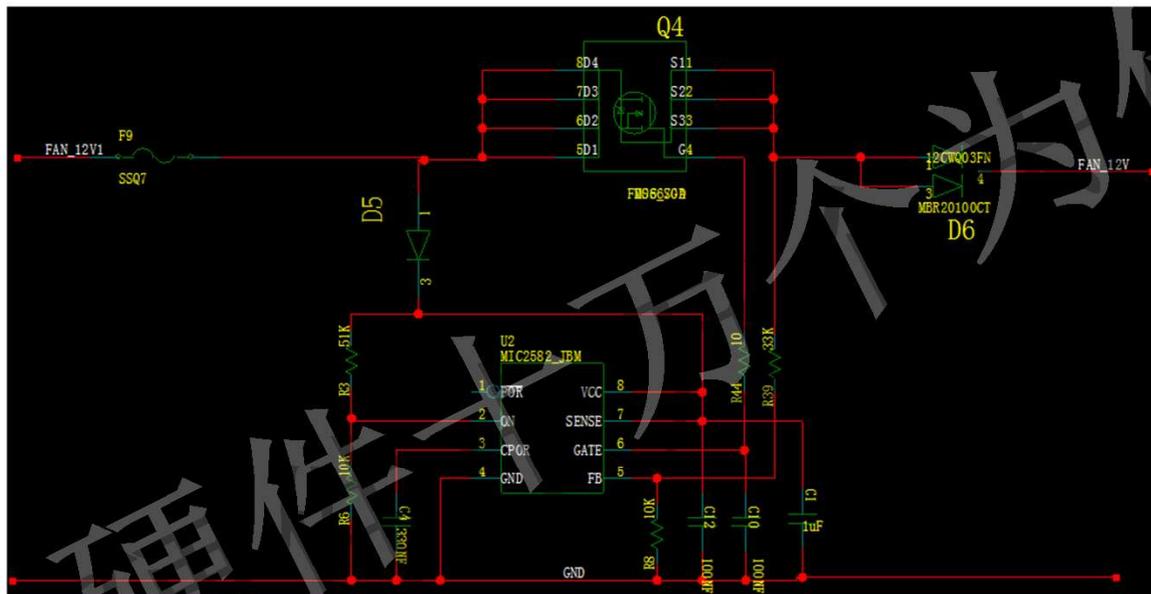
$Q_g(\max) = 25\text{nc}$ $Q_g = C * V$ $Q_g = I * t$
 $dT = [dV \times C] / I$

dT = 导通/ 截止时间
 dV = 栅极电压
 C = 栅极电容 (从栅极电荷值)
 I = 峰值驱动电流 (对于给定电压值)



MOS管案例1 (MOS管寄生电容)

光网络XX产品风扇板在研发调测期间，发现其缓启动电路MOS管经常损坏，导致风扇无法运行



MOS管案例2 (MOS管热失效)

- 首先，缓启动电路的MOS管为什么会短路？MOS管短路失效的原因一般包括：静电击穿，热烧毁，电过应力……。把损坏的MOS管卸下来给器件工程师分析，结论为MOS管短路原因是其G-S间电过应力损坏。

$V_{(BR)DSS}$	$R_{DS(on)}$ TYP	I_D MAX (Note 1)
28 V	7.0 m Ω @ 10 V	14 A
	8.8 m Ω @ 4.5 V	

- 8路风扇的最大电流为 $0.6A \times 8 = 4.8A < 14A$ ； V_{ds} 最大即为 $12V < 28V$ 。MOS管的手册和调测报告MOS管的击穿电压、及过流能力都较大，本板工作电流没有超出MOS管的工作范围。

MOS管案例2 (MOS管热失效)

那么是不是器件选型时忽视了MOS管结温，我们对其进行分析。

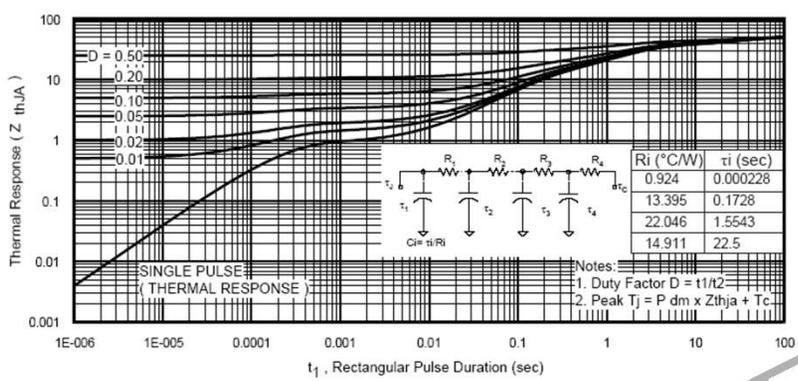


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Ambient

MOS管瞬态热阻，单脉冲
1ms处瞬态热阻为1°C/w

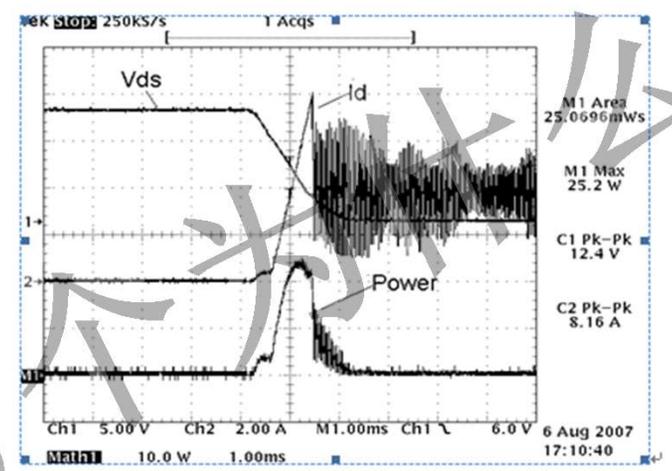
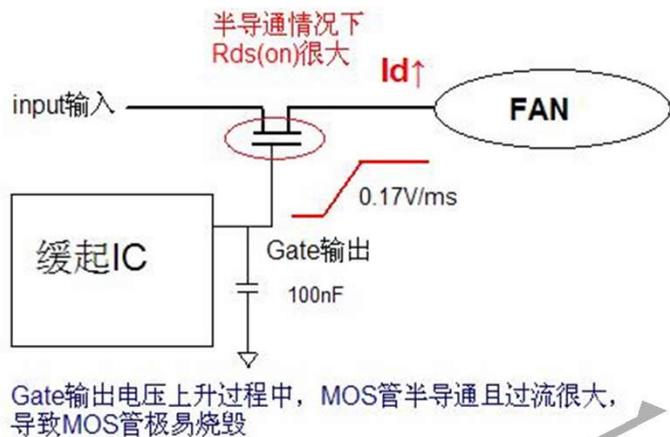


图5 MOS管缓起过冲中最大功率25.2W，持续时间约1ms

T_J	Operating Junction and	-55 to + 150	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		

使用环境最大温度为55°C，MOS管最大结温计算：约为55°C+1°C/W*25.2W≈75°C

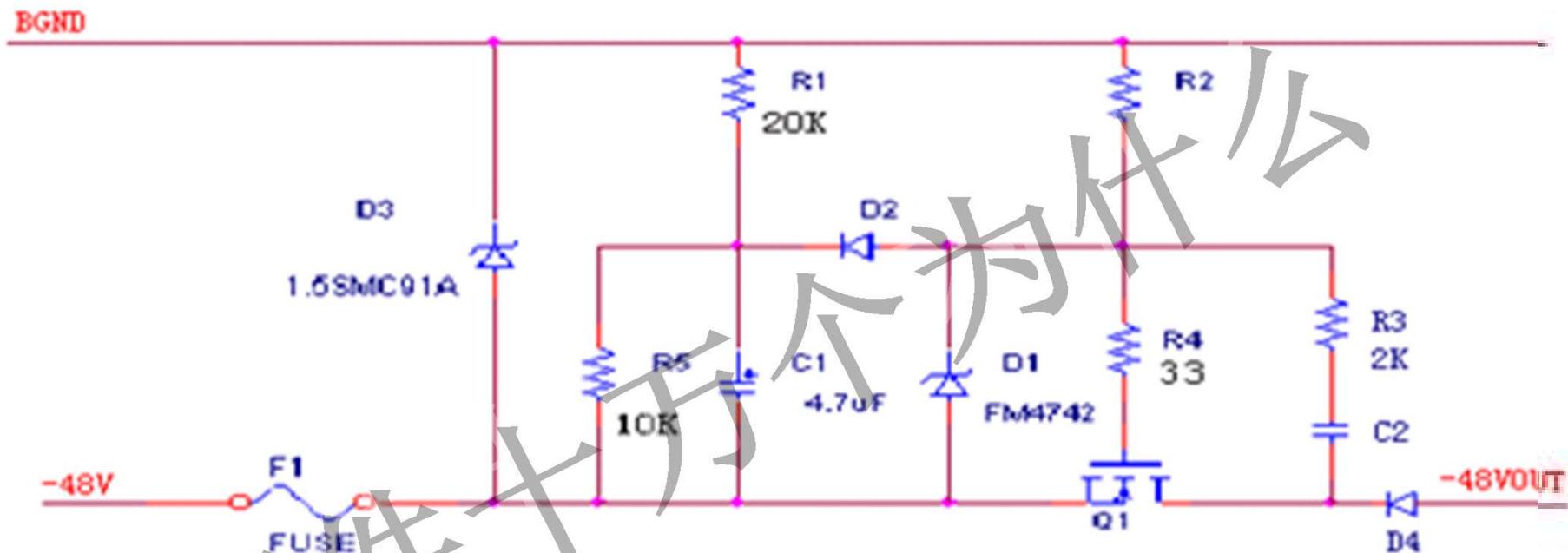
MOS管案例2 (MOS管热失效)



分析发现, 缓起电路的风扇负载在7V左右即起转, 导致MOS管在未完全导通的情况下通过较大电流, 以下需探讨如何解决此问题。

- 1: 本缓起电路主要目的是输出电压延迟于输入, 故缓起斜率可做调整, 缩短缓启动电路的缓起时间。使得MOS管半导通状态很小, 以保证MOS管不被烧毁;
- 2: 减小 C_{gate} 电容, 可减小缓起时间。后续将 C_{gate} 减小为1nF后, MOS管烧毁的概率大为降低;

MOS管案例3 (-48V缓起电路分析)



硬件十万个为什么

MOS管案例3 (-48V缓起电路分析)

选择MOS管时要注意几个参数:

1、最大漏源电压 V_{DSmax} : 栅-源间短路时, 漏-源间的最大允许电压, 即漏源pn结的雪崩击穿电压, 也称漏源击穿电压 $V_{BR}(DSS)$;

2、最大栅源电压 V_{GSmax} : 栅-源间能承受的最高电压, 即栅氧化层的介质击穿电压。如果外加电压超过此值, 会引起器件的永久性损坏;

3、最大漏极工作电流 I_{Dmax} : 在规定的 V_{GS} 下 (通常为10V), 漏极电流的最大允许值。 I_{Dmax} 并不象双极晶体管那样由电参数的大电流特性决定, 而是从工作寿命考虑根据经验规定的。它由一些非MOS工作原理所固有的实际因素决定, 如内引线的熔断电流、压焊点的面积和金属化电极的电迁移等。有的VMOS功率管的 I_{Dmax} 可以很大, 以致它的限制不如功耗对电流的限制苛刻, 使得安全工作区中基本不出现 I_{Dmax} 限制线;

MOS管案例3 (-48V缓起电路分析)

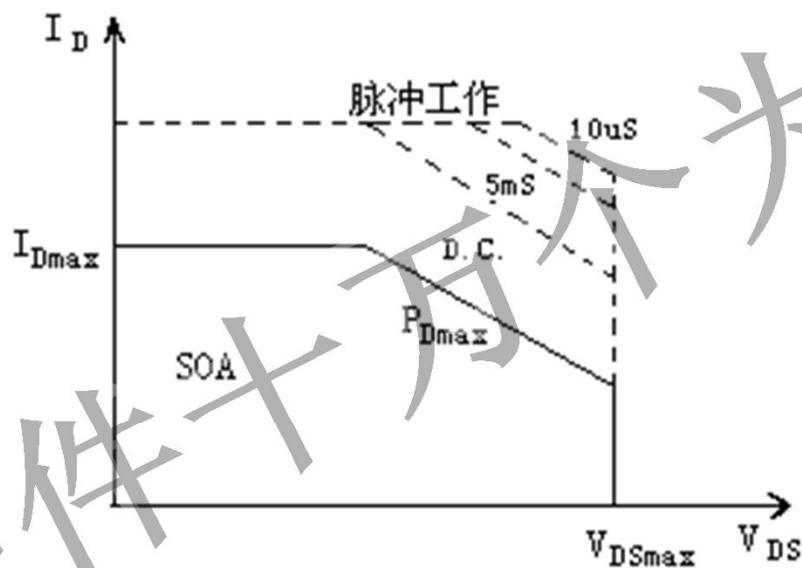
4、温度最大额定值和功率最大额定值：MOS管的温度最大额定值是最高允许沟道温度 T_{chmax} ，功率最大额定值是最大漏极耗散功率 P_{Dmax} 。作为表面器件，与双极型器件相比，MOS管的特性对表面变化比双极型器件更为敏感，而温度对表面变化的加速作用比对体内变化的加速作用更加显著，因此MOS器件的最高允许沟道温度一般低于双极型器件的最高允许结温。当最高沟道温度限定之后，MOS管内部所允许耗散的最大功率 P_{Dmax} 由其内热阻 $R_{\theta JC}$ 决定：

$$P_{Dmax} = \frac{T_{chmax} - T_a}{R_{\theta JC}}$$

T_a 为环境温度。

MOS管案例3 (-48V缓起电路分析)

5、安全工作区SOA：MOS管的安全工作区由 I_{Dmax} 、 P_{Dmax} 、 V_{DSmax} 构成，在MOS应用中，不能超过安全工作区，否则器件会损坏。



MOS管案例3 (-48V缓起电路分析)

6、不加散热器时，TO-220封装的功率MOS管最大耗散功率通常为1W左右（部分功率MOS功耗可以大些）。如果MOS管功耗较大，应给MOS管安装合适的散热器，避免结温超过额定值。

器件总热阻 $R_{\theta Ja}$ 等于内热阻 $R_{\theta Jc}$ 、安装热阻 $R_{\theta cs}$ 和散热器热阻 $R_{\theta sa}$ 之和，即 $R_{\theta Ja} = R_{\theta Jc} + R_{\theta cs} + R_{\theta sa}$ 。对于MOS管，器件手册中都会给出这一参数；安装热阻 $R_{\theta cs}$ 包括管壳与散热器间所加垫片的热阻以及管壳与垫片、散热器与垫片之间的接触热阻；散热器热阻 $R_{\theta sa}$ 除了与散热器材料有关之外，还与散热器的有效面积、散热器与环境之间的温差以及环境通风条件有关，目前还没有精确的数学表达式能够用来计算散热器的热阻，仍然是通过实际测量得到。

$$R_{\theta sa} = \frac{T_{ch\max} - T_a}{P_{D\max}}$$

计算出总热阻，再由 $R_{\theta sa} = R_{\theta Ja} - R_{\theta cs} - R_{\theta Jc}$ 得到。通过计算出的散热器热阻 $R_{\theta sa}$ 查找相应的散热器。

- 在缓启动电路中，MOS管并非用于频繁开关场合，而且导通内阻 $R_{DS(on)}$ 一般都很低（几十毫欧），在-48V缓启动电路中，由于工作电流不是很大、缓启时间短，一般无须加散热器。

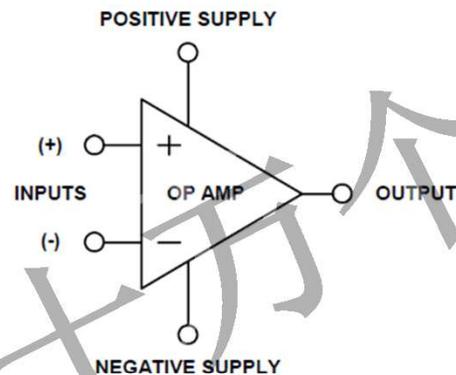
集成运算放大器

集成运放实质上是一种双端输入、单端输出的具有高电压放大倍数，高输入阻抗、低输出阻抗的多级直接耦合放大器。它主要用来实现模拟信号的运算及处理，在模拟电子线路中得到了广泛的应用。

硬件十万个为什么

运放简介

运放 (Operational Amplifier) 最初多用于各种模拟信号的运算 (如比例、加减、积分、微分……) 上, 故被称为运算放大器。



运放的关键特征：**高输入阻抗、高增益**。因而非常适用于信号的运算放大、驱动及有源滤波，以及锁相环、电流源电路、自动控制电路中。

运放简介

2—反相输入端

3—同相输入端

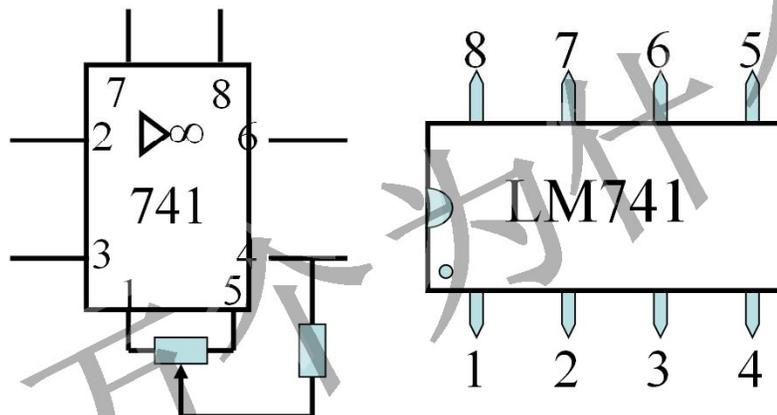
6—输出端

4—正电源端

7—负电源端

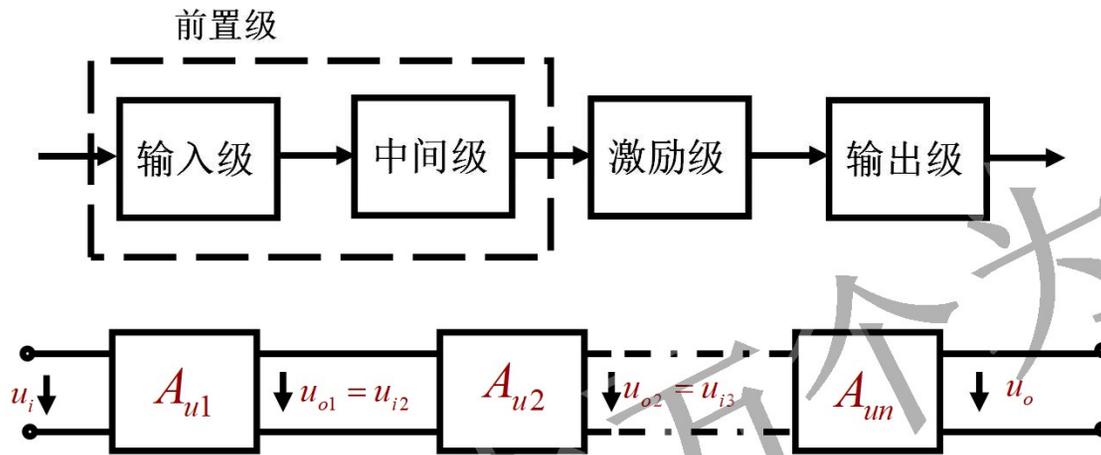
1、5—接调零电位器

8—闲置端 (NC)



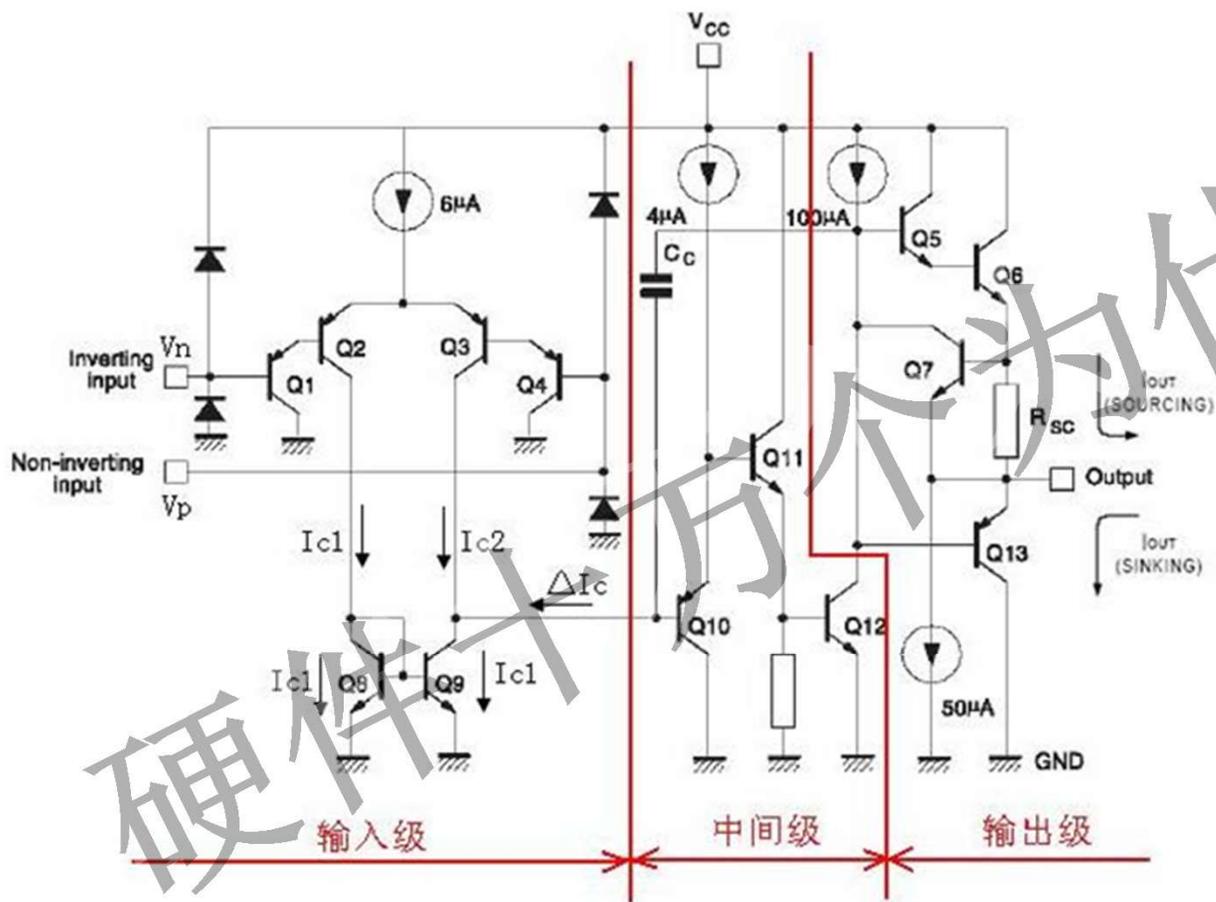
运放举例：LM741

集成运放器的内部电路构成



硬件十万个为什么

运放基本原理

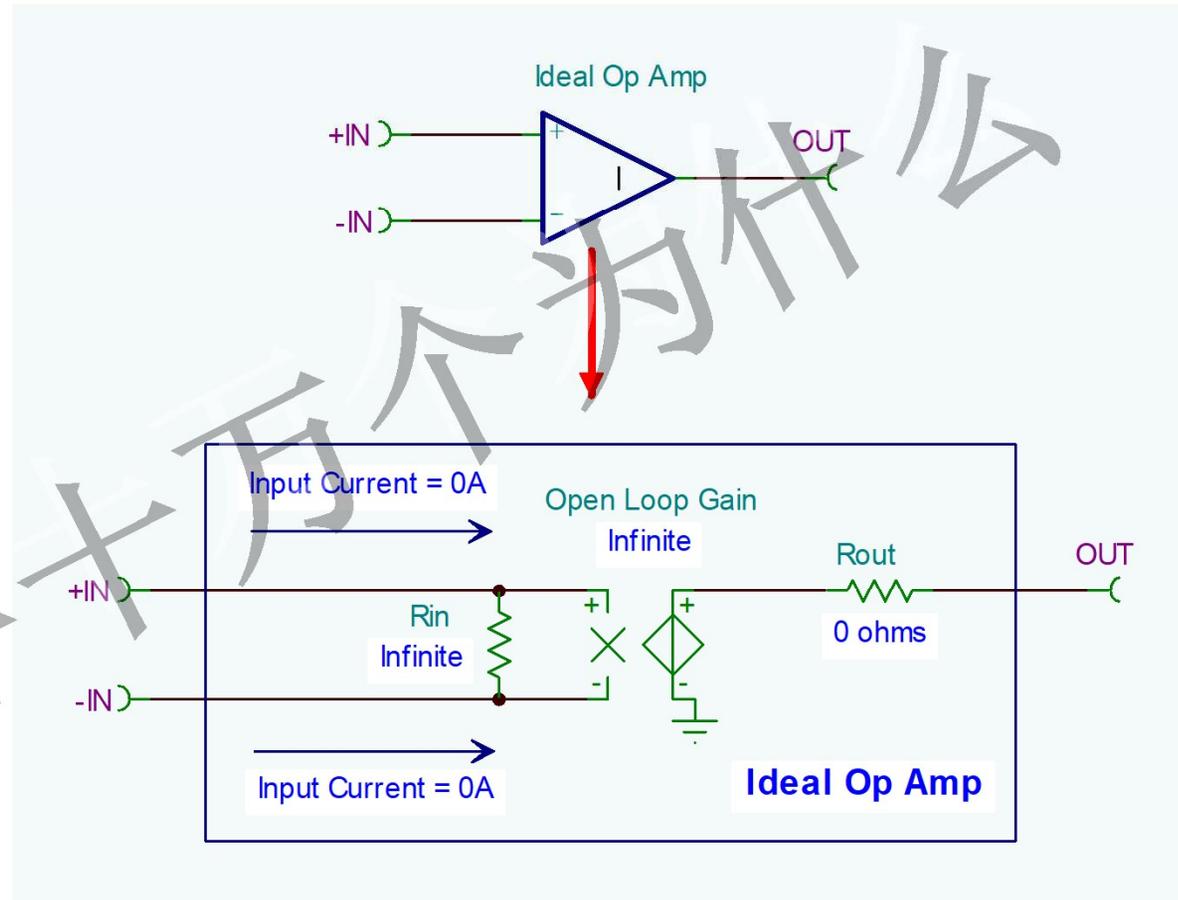


为各级电路提供合适静态工作电流的电流源，就是偏置电路

理想运放

理想运放的特性:

- 输入电流为0
- 输入阻抗无穷大
- 开环增益无穷大
- 输出阻抗为0
- 摆率无穷大
- 无误差、无温漂



集成运算放大器的主要参数

1. 开环差模电压放大倍数 A_{uo}

$$A_{uo} = 20 \lg \frac{U_o}{U_i} \text{ dB}$$

A_{uo} 是决定运放电路稳定性和运算精度的重要因素，希望 A_{uo} 越大越好。

2. 最大输出电压 U_{oPP}

在一定电源电压下，集成运放输出电压和输入电压保持不失真关系的最大输出电压峰值。其值比电源电压小。如电源电压为15V，该值约为12V左右。

3. 最大差模输入电压 U_{idmax}

U_{idmax} 是指集成运放的反相输入端和同相输入端之间所能承受的最大电压。

集成运算放大器的主要参数

U_{icmax} 是指集成运放所能承受的最大共模输入电压，超过这个值，共模抑制比明显下降，甚至造成器件损坏。

5. 差模输入电阻 r_{id}

r_{id} 是指集成运放两个输入端之间的电阻值。 r_{id} 越大越好，它标志集成运放输入端向差模信号源索取信号能力的大小。

6. 输出电阻 r_o

r_o 是指集成运放输出级的输出电阻。它反应了运放带负载的能力。

7. 共模抑制比 K_{CMRR}

K_{CMRR} 是指集成运放的开环差模输入电压放大倍数与共模输入电压放大倍数之比值，用来衡量输入级各参数的对称程度。 K_{CMRR} 越大，运放抑制共模信号的能力就越强。

理想集成运算放大器

- 理想集成运放的电路模型
- 理想集成运放及其分析依据

(1) 开环差模放大倍数: $A_{uo} = \infty$

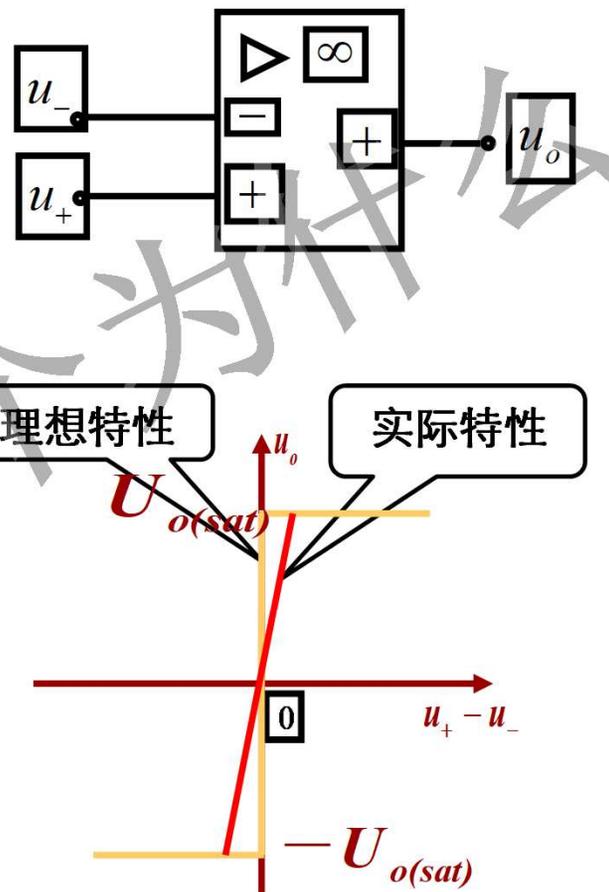
(2) 差模输入电阻: $r_{id} = \infty$

(3) 共模抑制比: $K_{CMRR} = \infty$

(4) 开环输出电阻: $r_o = 0$

- 理想集成运放的传输特性

理想集成运放的传输特性是指输出电压与净输入电压之间关系的特性曲线。如右图所示:



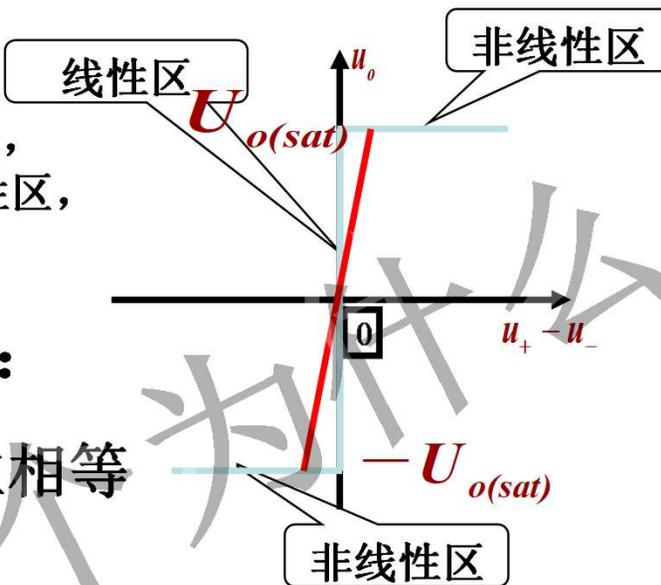
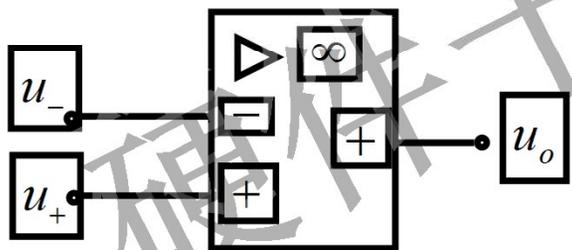
传输特性的特点

传输特性可分为线性区和非线性区。所以，运算放大器可工作在线性区也可工作在非线性区，但是，其分析方法不一样。

当理想运放工作在线性区时：

1. 理想运放的两个输入端的电位相等

$$u_+ = u_- \quad \text{——虚短}$$



$$\because u_o = A_{u0} (u_+ - u_-)$$

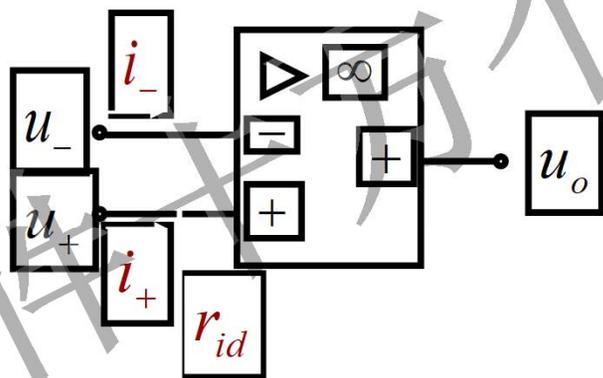
而 $A_{u0} \rightarrow \infty$ 有限值

$$\therefore u_+ - u_- = \frac{u_o}{A_{u0}} = 0$$

传输特性的特点

2.理想运放的两个输入端的输入电流为零。

$$i_+ = i_- = 0 \quad \text{——虚断} \quad \because r_{id} = \infty$$



传输特性的特点

当理想运放工作在线性区时：

1.理想运放的两个输入端的输入电流为零。

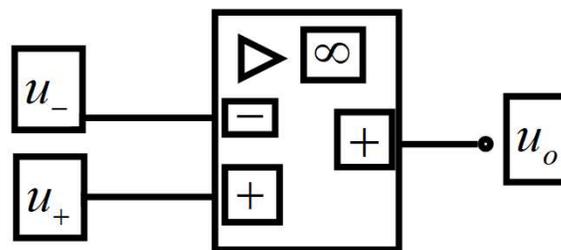
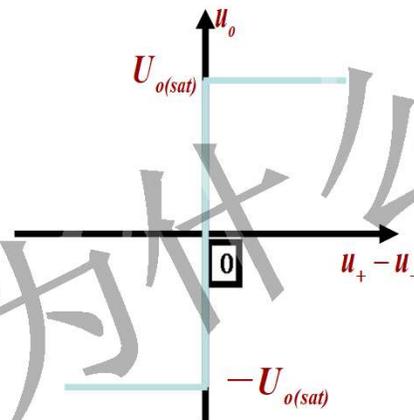
$$i_+ = i_- = 0 \quad \text{——虚断}$$

2.输出电压有两种取值可能

$$\text{当 } u_+ > u_- \quad u_o = +U_{o(sat)} \quad (\text{正饱和值})$$

$$u_+ < u_- \quad u_o = -U_{o(sat)} \quad (\text{负饱和值})$$

$u_+ = u_-$ 只是两种状态的转换点



运放放大器的线性应用

概述： 利用运放器的线性工作区可实现输出、输入信号之间的线性运算关系：如比例、加减、积分与微分等运算，它们都是运放器的线性应用，且都适用于叠加原理。

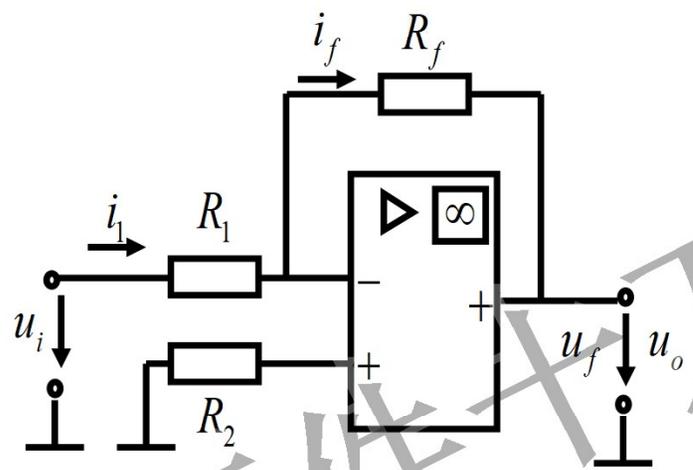
要保证运放器工作在线性区，在运放器构成的各种运算电路中，就必须引入深度负反馈，以降低整个放大电路的放大倍数，从而扩大输入信号的范围。

运放在信号运算方面的应用

比例运算

• 反相比例运算 $i_- = i_+ = 0$

$$u_- = u_+$$



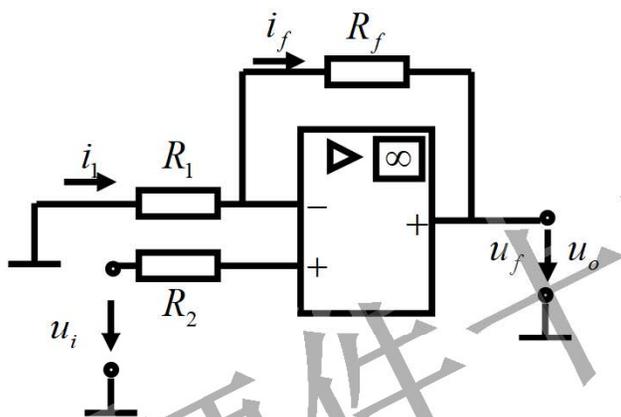
R_f — 反馈电阻
 R_2 — 平衡电阻用于消除静态基极电流对输出电压的影响 $R_2 = R_1 // R_f$

因为输入信号从反相输入端输入，所以，称为反相运算电路。

运放在信号运算方面的应用

反馈类型 电压串联负反馈 输入电阻增高，输出电阻降低。

• 同相比例运算



$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_i$$

$$i_1 = i_f \quad u_+ = u_i$$

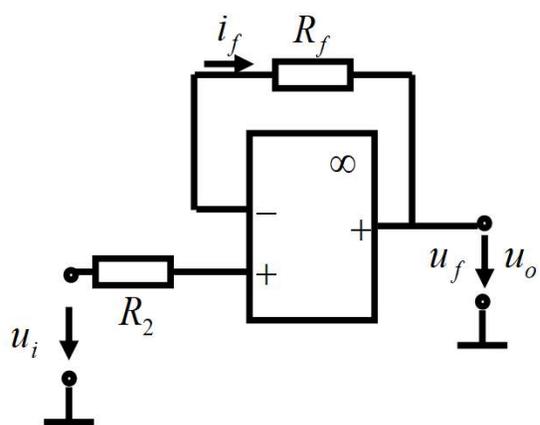
$$u_- = u_+ = u_i$$

$$i_1 = \frac{0 - u_i}{R_1} = -\frac{u_i}{R_1}$$

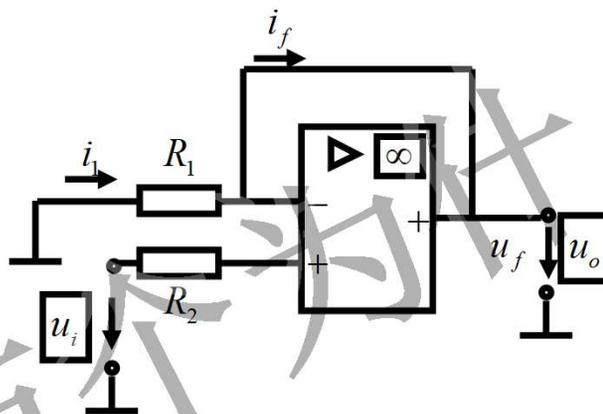
$$i_f = \frac{u_- - u_o}{R_f} = \frac{u_i - u_o}{R_f}$$

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)$$

运放在信号运算方面的应用



$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = \left(1 + \frac{R_f}{\infty}\right) = 1$$



$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = \left(1 + \frac{0}{R_1}\right) = 1$$

电压跟随器

运放在信号运算方面的应用

反相比例加法运算

在反相端输入若干路信号，构成反相加法运算电路

$$i_{11} = \frac{u_{i1}}{R_{11}} \quad i_{12} = \frac{u_{i2}}{R_{12}} \quad i_{13} = \frac{u_{i3}}{R_{13}}$$

$$i_f = i_{11} + i_{12} + i_{13} \quad i_f = -\frac{u_o}{R_f}$$

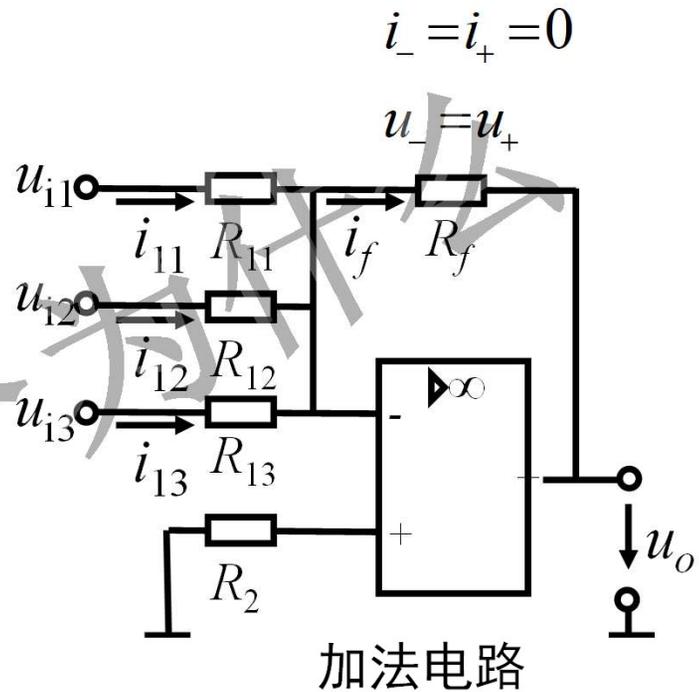
由此得

$$u_o = -\left(\frac{R_f}{R_{11}}u_{i1} + \frac{R_f}{R_{12}}u_{i2} + \frac{R_f}{R_{13}}u_{i3}\right)$$

当 $R_{11} = R_{12} = R_{13} = R_1$ 时，

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1}(u_{i1} + u_{i2} + u_{i3})$$

再若 $R_1 = R_f$ ，则 $u_o = -(u_{i1} + u_{i2} + u_{i3})$

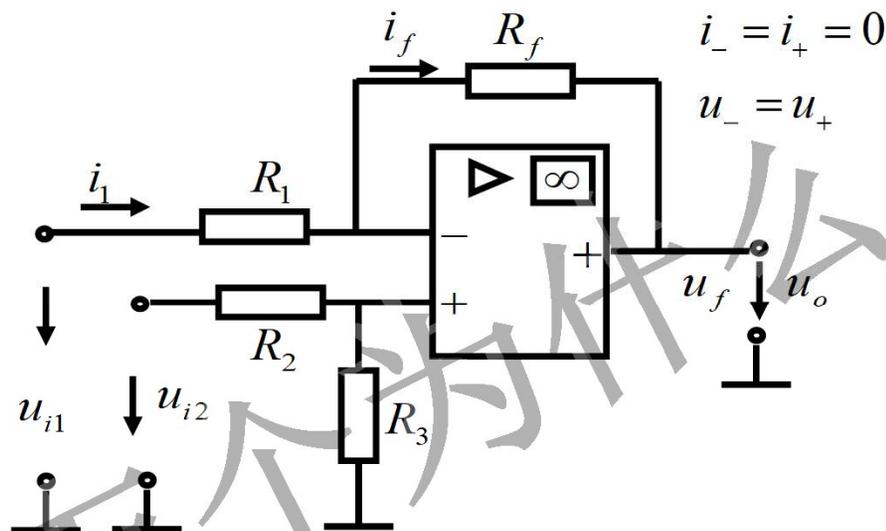


$$i_- = i_+ = 0$$

$$u_- = u_+$$

减法（差动）运算

当运放的两个输入端都加入信号时称为差动输入，如图。



$$u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$$

$$i_1 = \frac{u_{i1} - u_-}{R_1} = \frac{u_{i1} - u_+}{R_1}$$

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_{i1} + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_+$$

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_{i1} + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right) u_{i2}$$

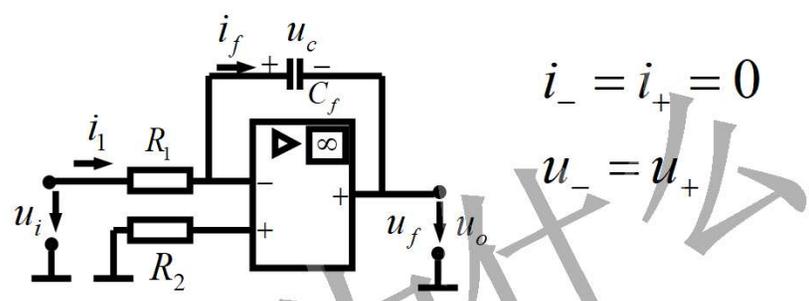
$$i_f = \frac{u_- - u_o}{R_f} = \frac{u_+ - u_o}{R_f}$$

$$R_1 = R_2 \quad R_3 = R_f$$

$$u_o = \frac{R_f}{R_1} (u_{i2} - u_{i1})$$

积分运算

如果将反馈电阻换成电容，
则比例运算电路就变成了
积分电路。如图：



$$i_- = i_+ = 0$$

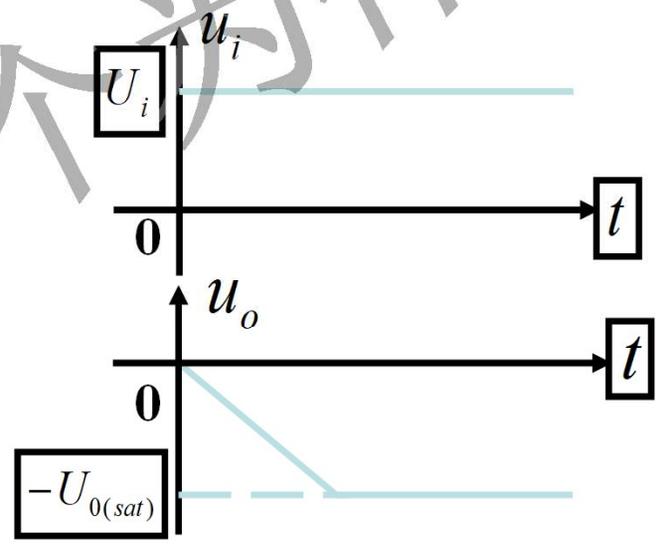
$$u_- = u_+$$

$$u_- = 0 \quad i_1 = i_f = \frac{u_i}{R_1}$$

$$u_o = -u_c = -\frac{1}{C_f} \int i_f dt = -\frac{1}{R_1 C_f} \int u_i dt$$

负号表示输出与输入反相

当 u_i 为阶跃信号时 $u_o = -\frac{U_i}{R_1 C_f} t$



最后达到负的饱和值

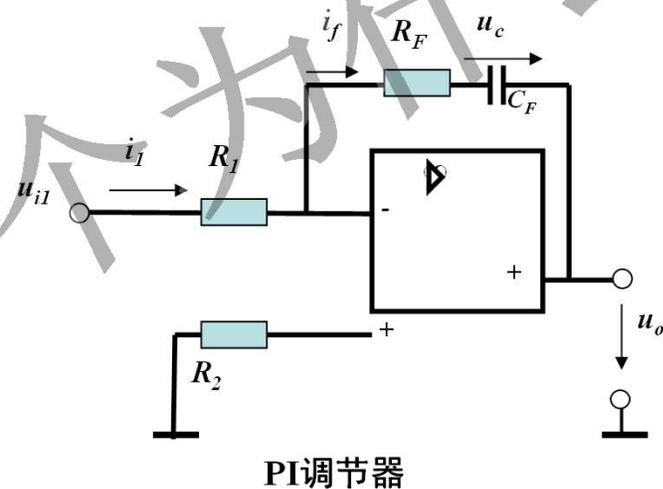
积分运算

与前面学过的RC积分电路相比，运放所构成的有源积分电路其积分曲线的线性度较好。这是因为充电电流基本恒定。

$$i_f \approx i_1 = \frac{U_i}{R_1}$$

右图是在控制和测量系统中常用的比例-积分调节器（PI调节器）：

$$u_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} u_i + \frac{1}{R_1 C_F} \int u_i dt\right)$$



可视为反比例运算和积分运算的叠加。

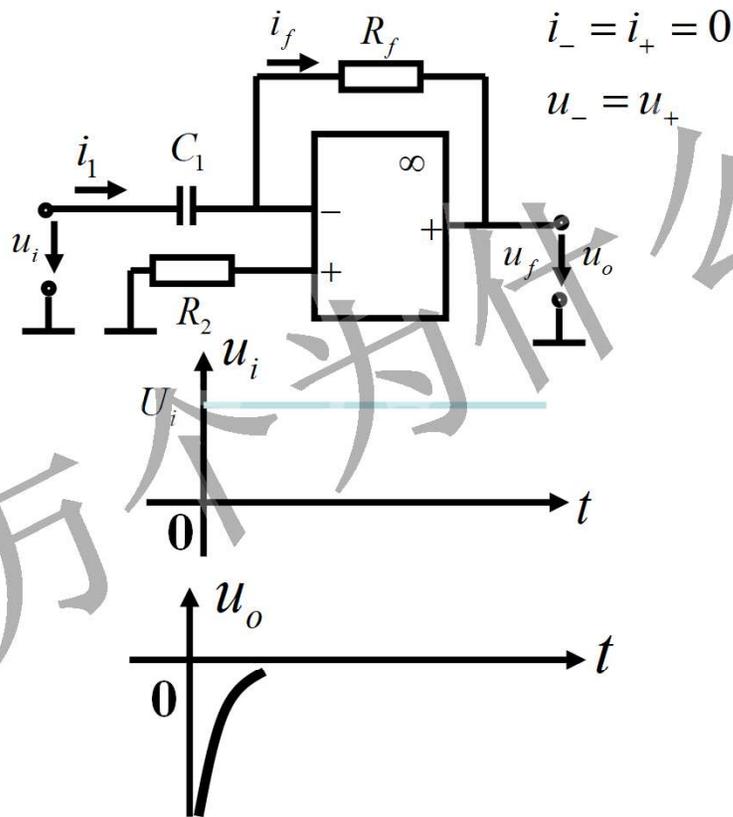
微分运算

微分运算是积分运算的逆运算，所以，如果将输入电阻换成电容，则比例运算电路就变成了微分电路。

$$u_- = u_+ = 0$$

$$i_1 = i_f = C_1 \frac{du_i}{dt}$$

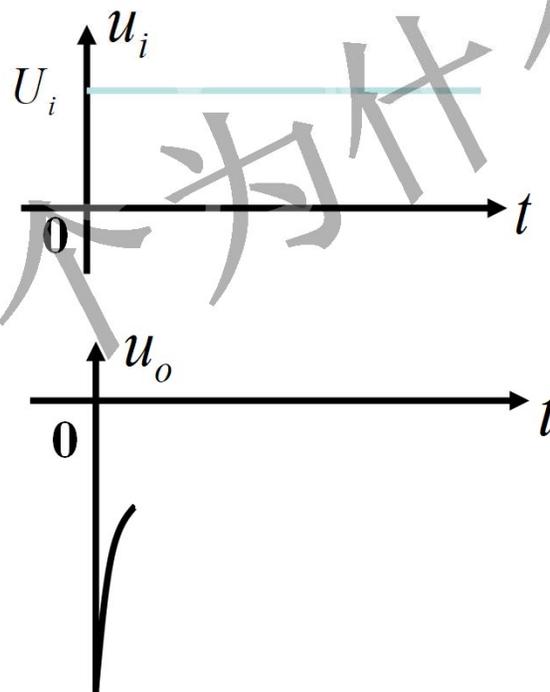
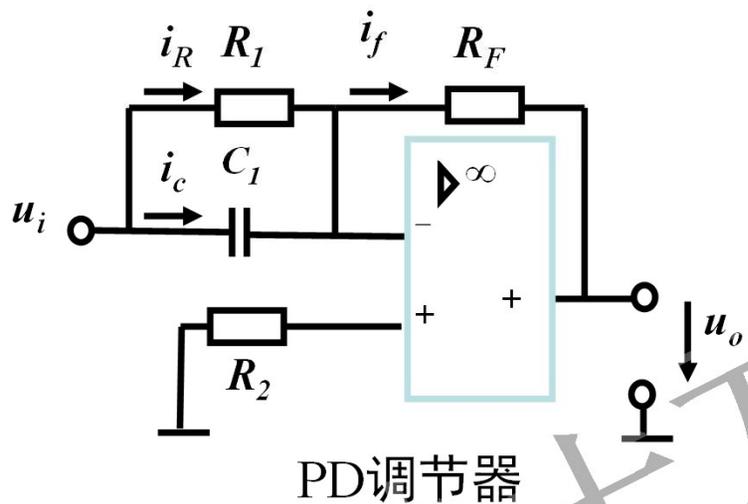
$$u_o = -R_f i_f = -R_f C_1 \frac{du_i}{dt}$$



当 u_i 为阶跃信号时， u_o 为尖脉冲电压——输出电压与输入电压的一次微分成正比。

微分运算

下图是比例—微分调节器（PD调节器）。



$$\begin{aligned}
 u_o &= -R_F i_f = -R_F (i_c + i_R) \\
 &= -R_F C_1 \frac{du_i}{dt} - \frac{R_F}{R_1} u_i
 \end{aligned}$$

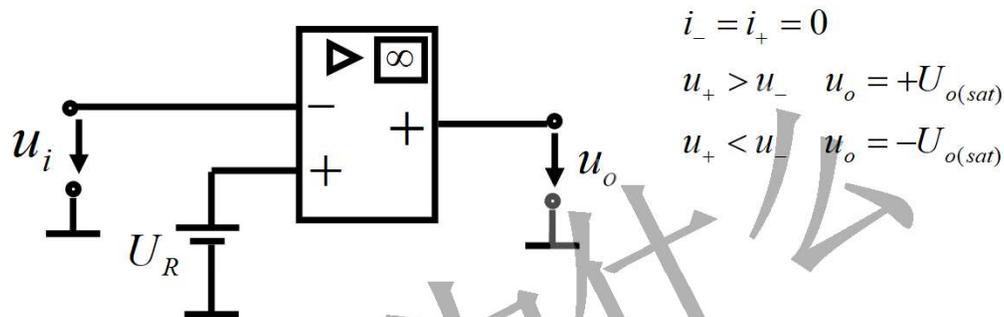


运放在信号处理方面的应用

- 运放器除了能完成信号的运算，还能完成信号比较、信号滤波等处理工作。
- 电压比较器
- 有源滤波器

电压比较器

该电路是对输入电压 u_i 进行比较和鉴别的电路，是集成运放非线性应用的基本电路。集成运放工作在开环或正反馈状态。



$$i_- = i_+ = 0$$

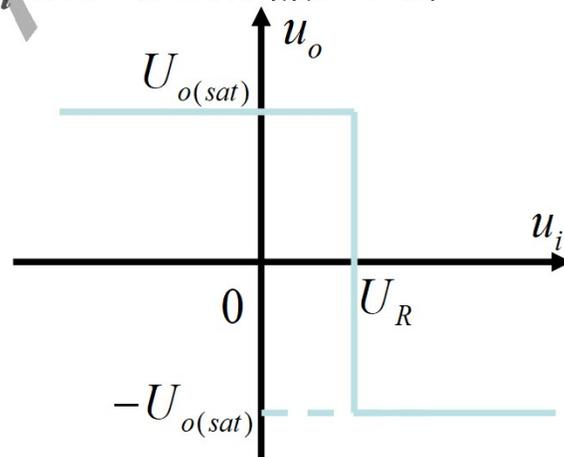
$$u_+ > u_- \quad u_o = +U_{o(sat)}$$

$$u_+ < u_- \quad u_o = -U_{o(sat)}$$

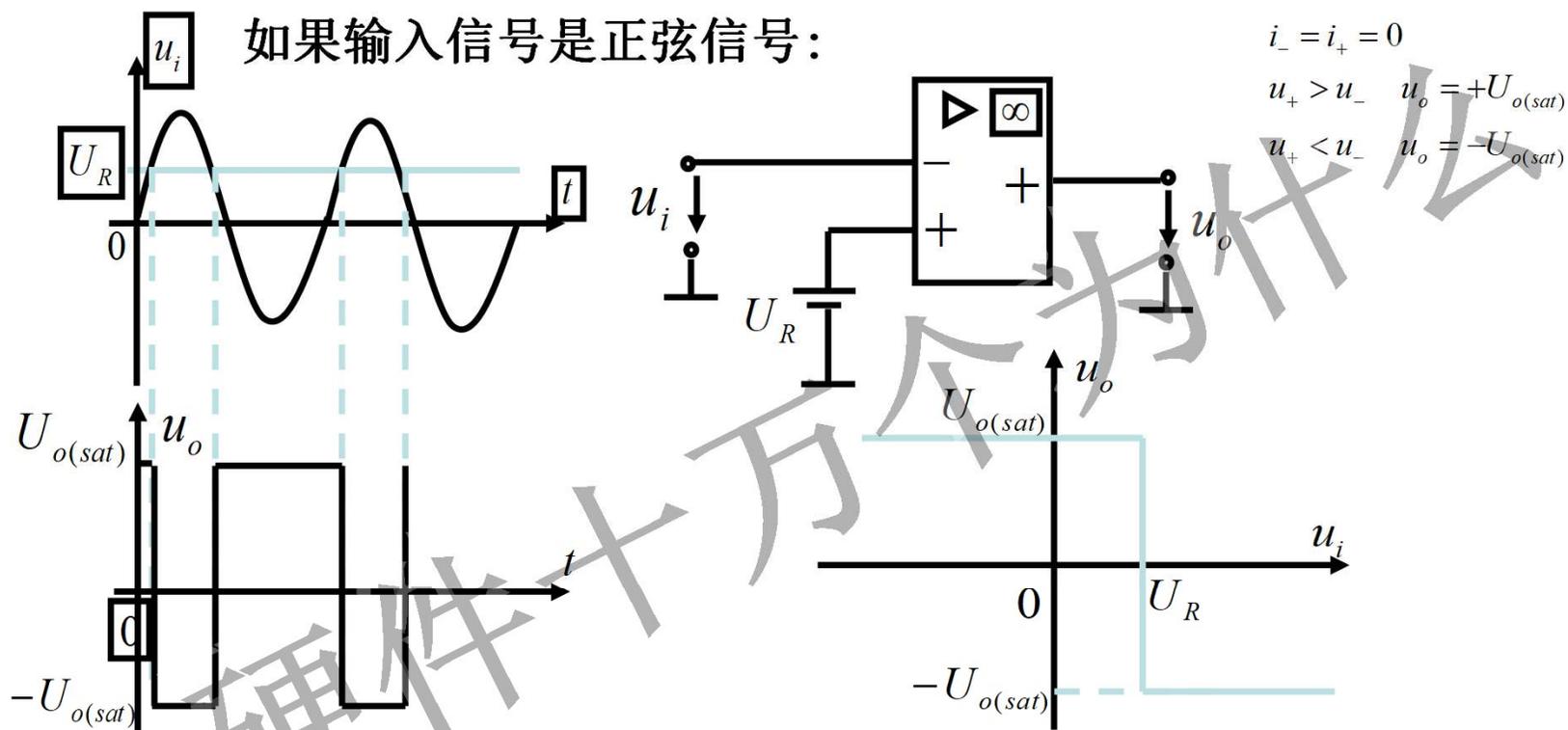
(1) U_R 为参考电压，加在同相输入端。输入电压 u_i 加在反相输入端。

工作原理 (2) 当 $u_i < U_R$ 时，输出电压 $u_o = +U_{(sat)}$ ；当 $u_i > U_R$ 时，输出电压 $u_o = -U_{(sat)}$ 。

(3) 其电压传输特性如图所示：

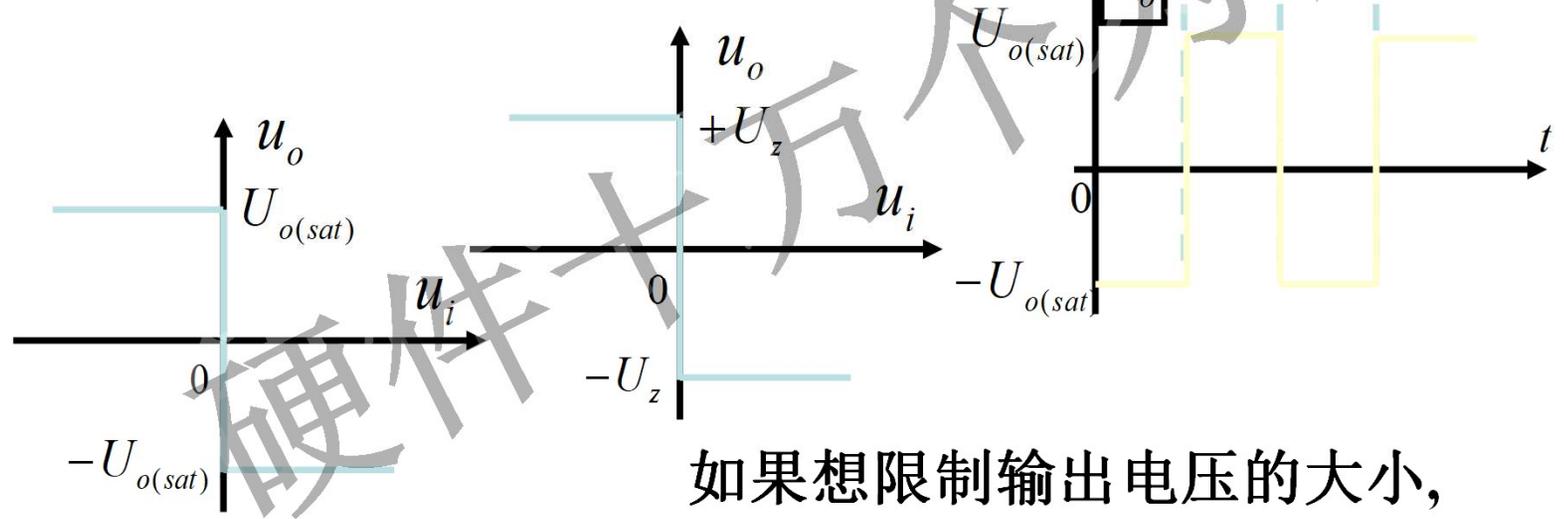
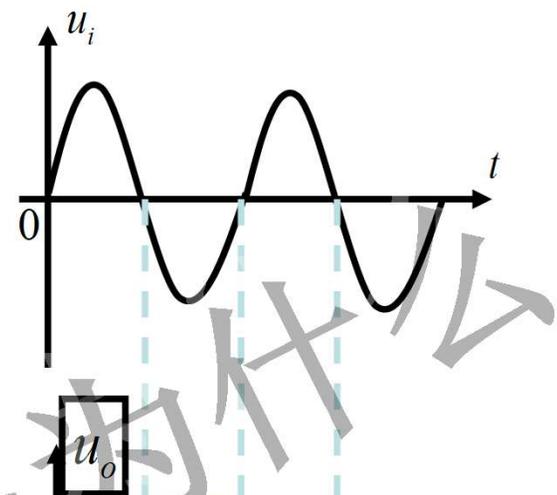
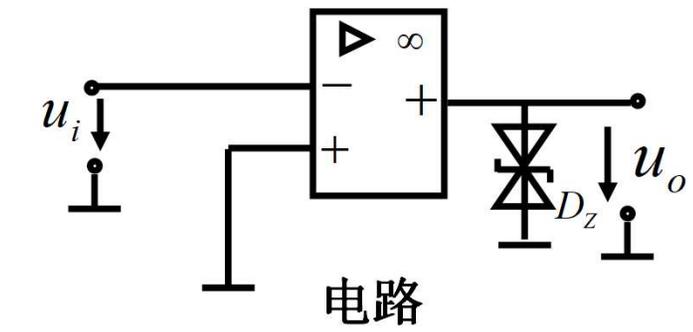


电压比较器



调节 U_R 的大小，可以改变输出波形正负半周的宽度。如果 $U_R=0$ ，则构成过零比较器。

过零比较器



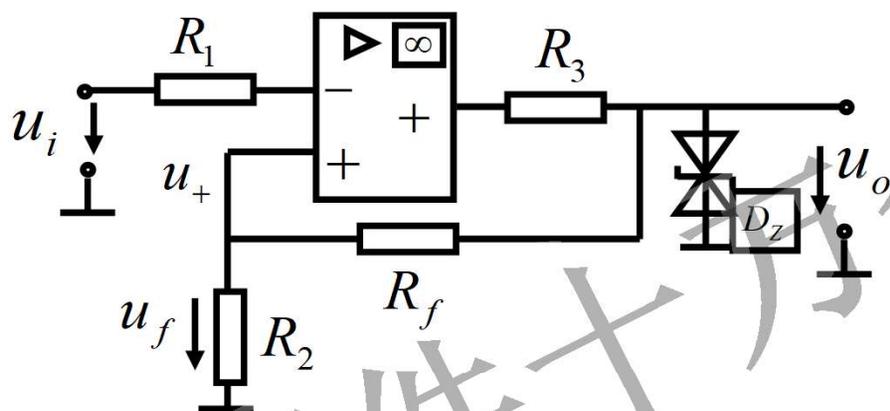
传输特性

如果想限制输出电压的大小，可以在输出端接双向稳压管。

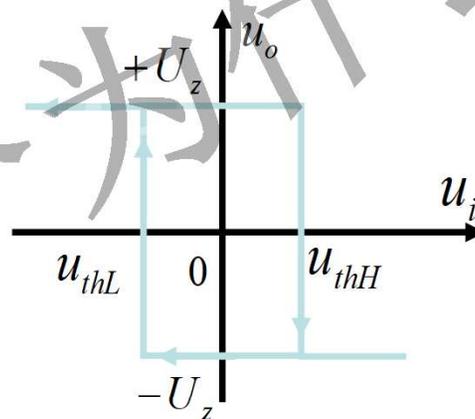
滞回比较器

在许多应用电路中,要求电压比较器的传输特性具有滞回特性。这样,在输入信号为变化缓慢的信号或信号幅值较小时,可以消除干扰对输出电压的影响。

电路的构成



传输特性



电路特点

R_2 和 R_f 组成正反馈电路,输出电压必为高、低两种电平。同时正反馈的引入,也加快了电压比较器状态的翻转。

滞回比较器

工作过程分析

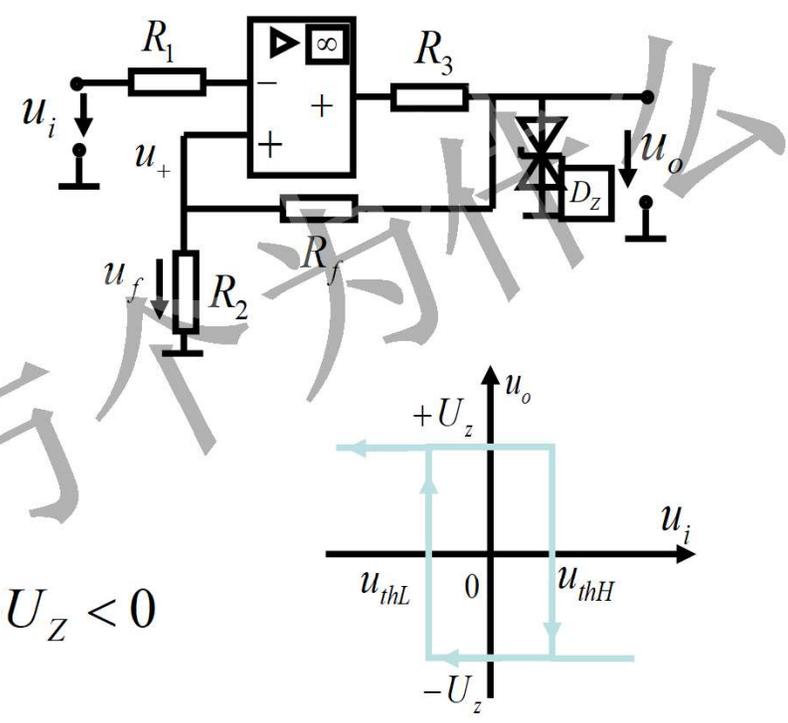
If : $u_i < 0$ $u_o = +U_Z$

$u_i \uparrow \rightarrow u_i > U_{thH} = \frac{R_2}{R_2 + R_f} U_Z$

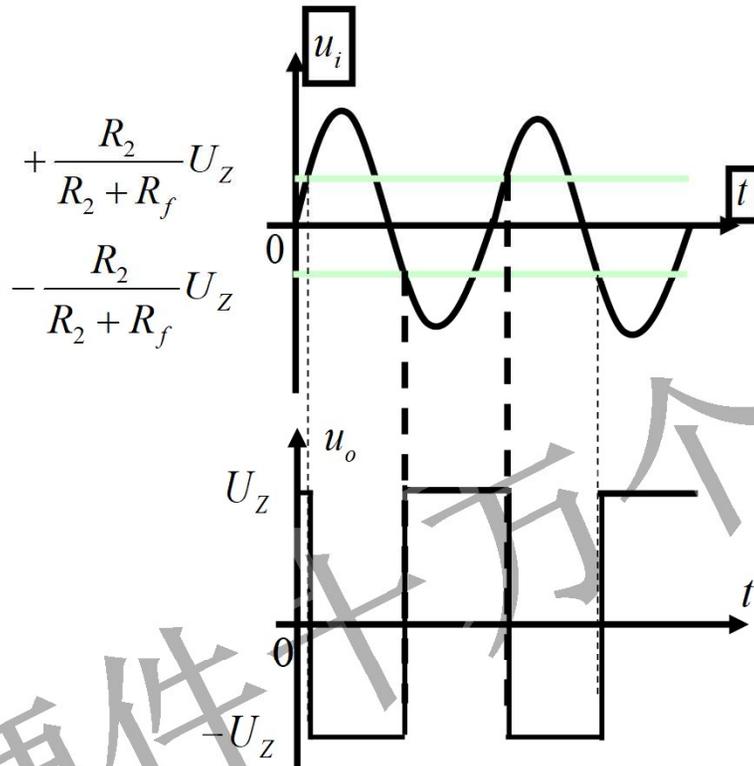
$\rightarrow u_o = -U_Z$

$u_i \downarrow \rightarrow u_i < U_{thL} = -\frac{R_2}{R_2 + R_f} U_Z < 0$

$\rightarrow u_o = +U_Z$



滞回比较器



可见：输出电压的变化总是滞后于输入电压的变化，所以叫滞回比较器。

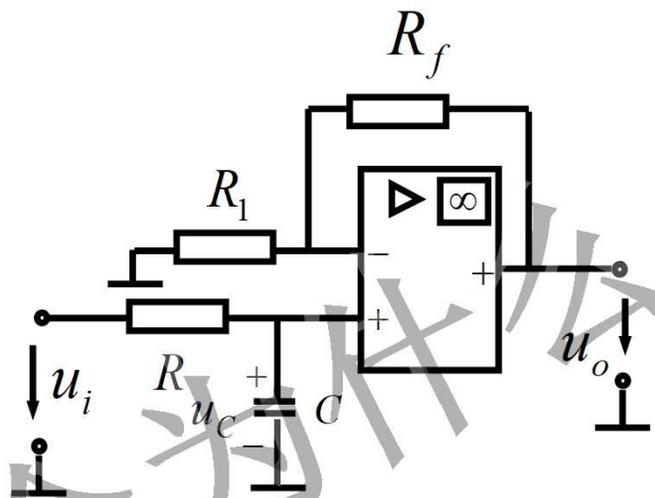
有源滤波器

- 滤波器是一种选频电路。按选择频率范围的不同，滤波器可分为低通、高通、带通和带阻等。
- 将RC组成的无源滤波器再接到运放器的同相输入端而构成有源滤波器（因运放器是有源器件），其性能会得到较大的改善：体积小、效率高、频率特性好等。
- 在此仅介绍有源低通滤波和有源高通滤波器

有源低通滤波器

工作原理

电路的组成



$$\dot{U}_+ = \dot{U}_c = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} \dot{U}_i = \frac{\dot{U}_i}{1 + j\omega RC}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \text{——截止角频率}$$

$$\dot{U}_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \dot{U}_+$$

$$T(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1 + \frac{R_f}{R_1}}{1 + j\omega RC} = \frac{A_{uf0}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$$

$$\therefore \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1 + \frac{R_f}{R_1}}{1 + j\omega RC} = \frac{1 + \frac{R_f}{R_1}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$$

电路的频率特性

有源低通滤波器

画出其幅频、相频特性为：

$$T(j\omega) = \frac{A_{uf0}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$$

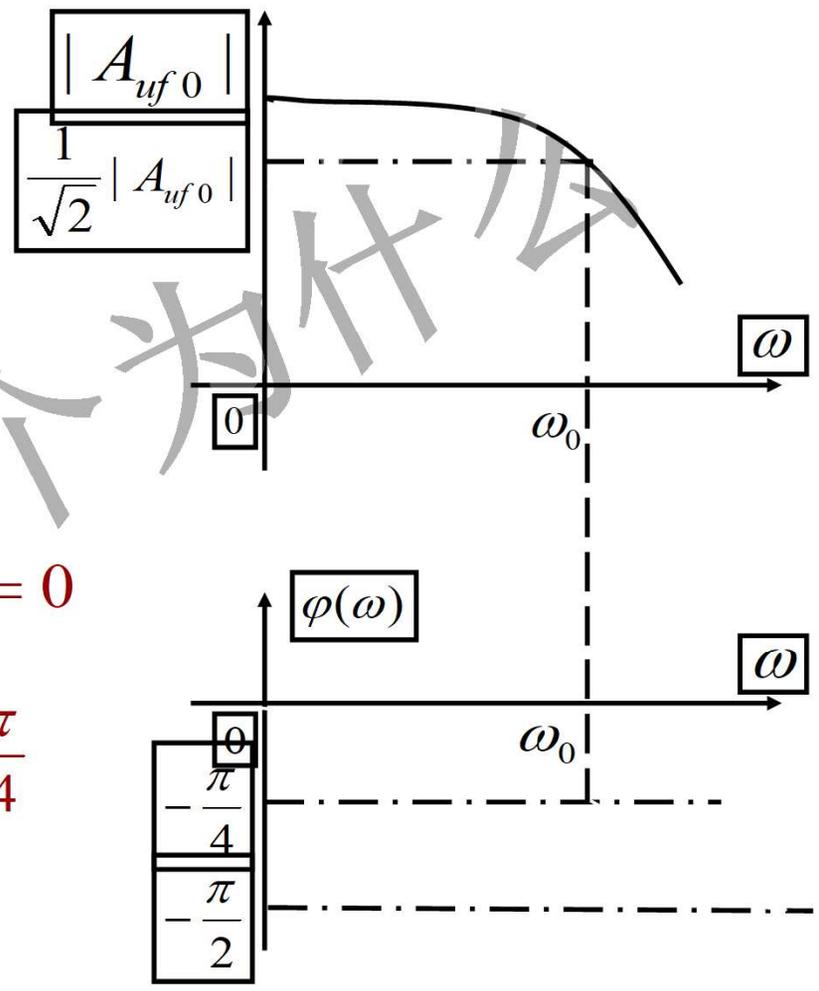
$$A(\omega) = |T(j\omega)| = \frac{A_{uf0}}{\sqrt{1 + (\frac{\omega}{\omega_0})^2}}$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{\omega}{\omega_0}$$

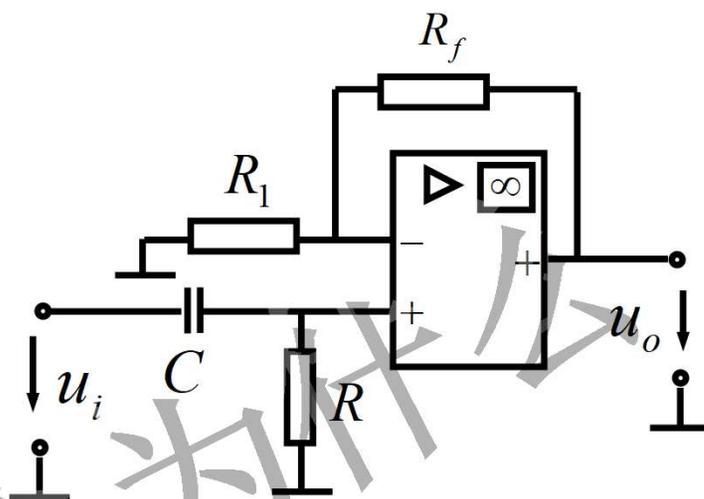
$$\omega = 0 \quad |T(j\omega)| = |A_{uf0}| \quad \varphi(\omega) = 0$$

$$\omega = \omega_0 \quad |T(j\omega_0)| = \frac{|A_{uf0}|}{\sqrt{2}} \quad \varphi(\omega) = -\frac{\pi}{4}$$

$$\omega = \infty \quad |T(j\omega)| = 0 \quad \varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2}$$



有源高通滤波器



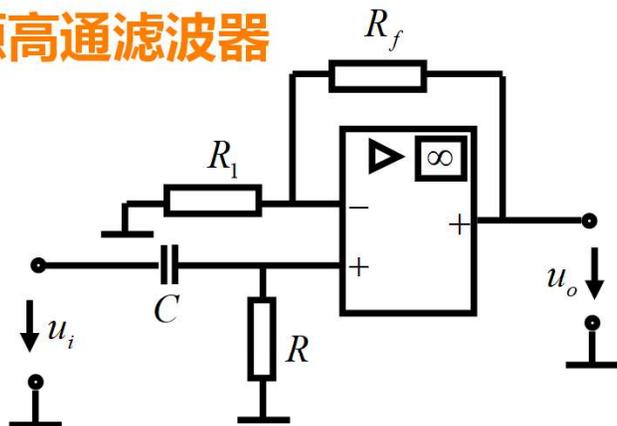
$$\dot{U}_+ = \dot{U}_R = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} \dot{U}_i = \frac{\dot{U}_i}{1 + \frac{1}{j\omega RC}}$$

$$\dot{U}_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \dot{U}_+ \quad \therefore \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1 + \frac{R_f}{R_1}}{1 + \frac{1}{j\omega RC}} = \frac{1 + \frac{R_f}{R_1}}{1 - j \frac{\omega_0}{\omega}}$$

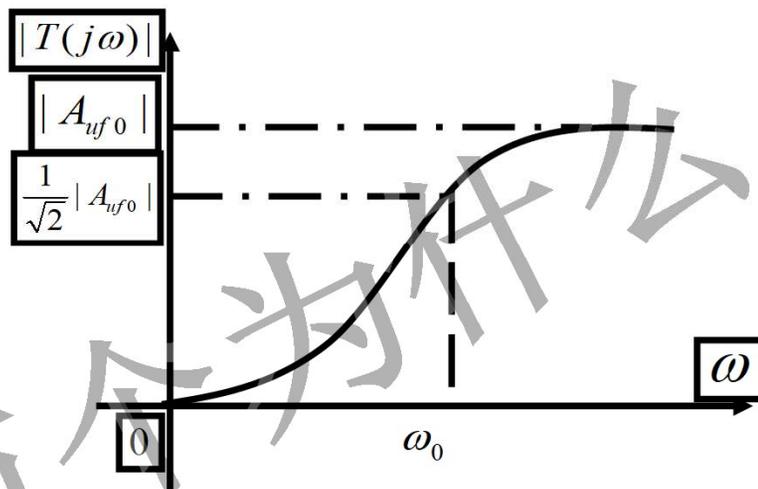
$$T(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1 + \frac{R_f}{R_1}}{1 - j \frac{1}{\omega RC}} = \frac{A_{uf0}}{1 - j \frac{\omega_0}{\omega}} \quad \omega_0 = \frac{1}{RC}$$



有源高通滤波器



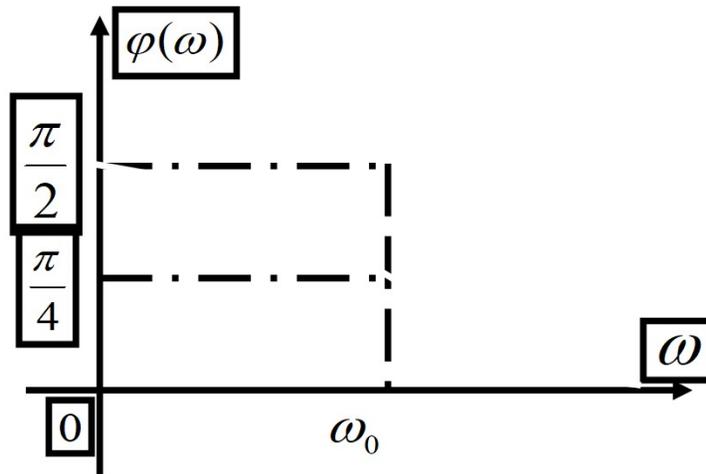
画出其幅频、相频特性如下：



幅频特性和相频特性如下：

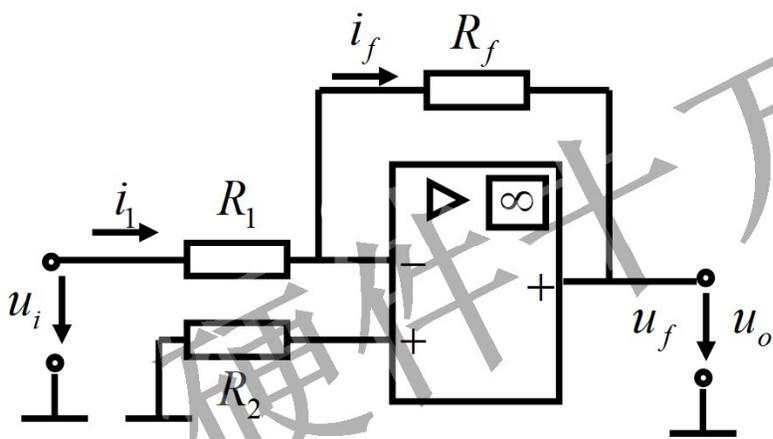
$$A(\omega) = |T(j\omega)| = \frac{|A_{uf0}|}{\sqrt{1 + (\frac{\omega_0}{\omega})^2}}$$

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{\omega_0}{\omega}$$

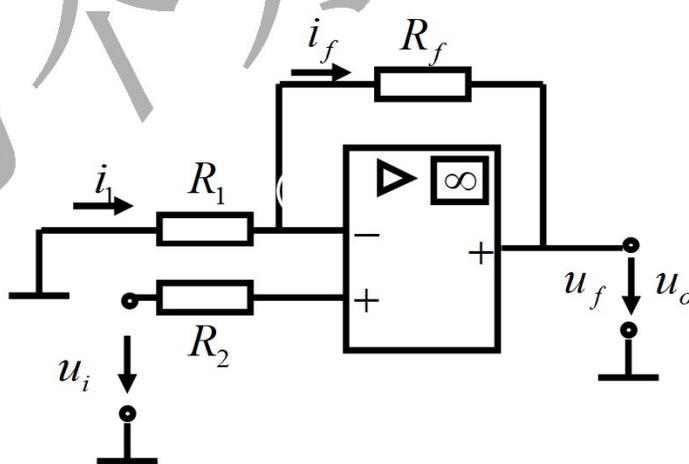


运放中的反馈

- 在集成运放的线性运算电路中，必须加入深度负反馈才能使电路稳定运行。而且，输入与输出间的关系与运放电路本身的参数无关。下面分析运放器电路中的反馈类型。

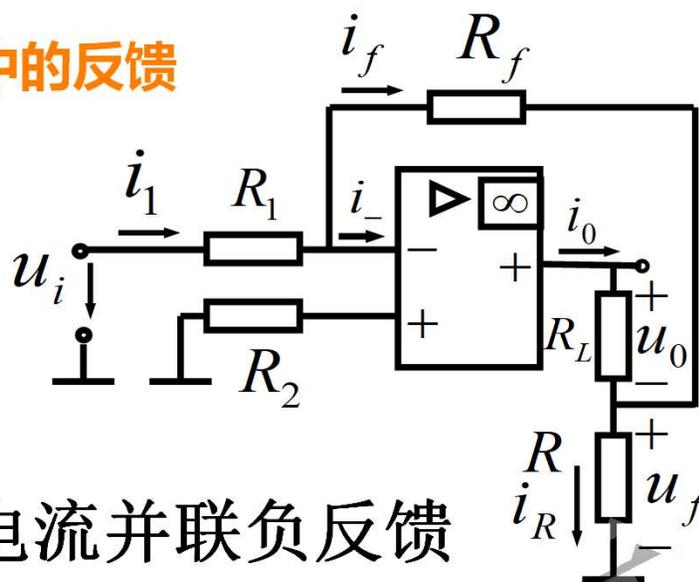


电压并联负反馈



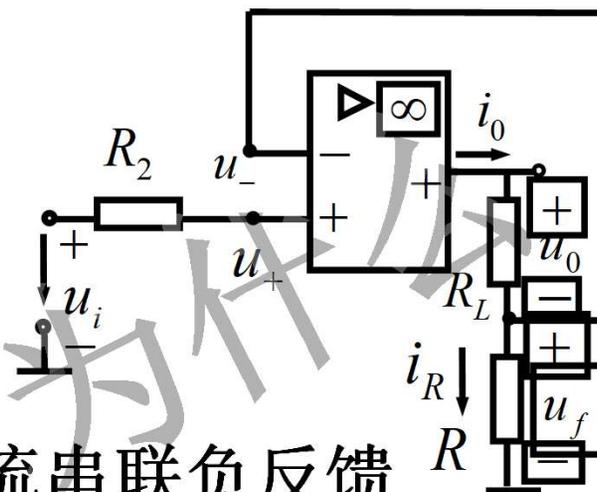
电压串联负反馈

运放中的反馈



电流并联负反馈

$$\begin{aligned} \because i_1 &= \frac{u_i}{R_1} = i_f & u_f &= -R_f i_f \\ \therefore u_f &= -\frac{R_f}{R_1} u_i & i_0 &= i_R - i_f \\ i_0 &= \frac{u_f}{R} - \frac{u_i}{R_1} = -\frac{1}{R_1} \left(\frac{R_f}{R} + 1 \right) u_i \end{aligned}$$



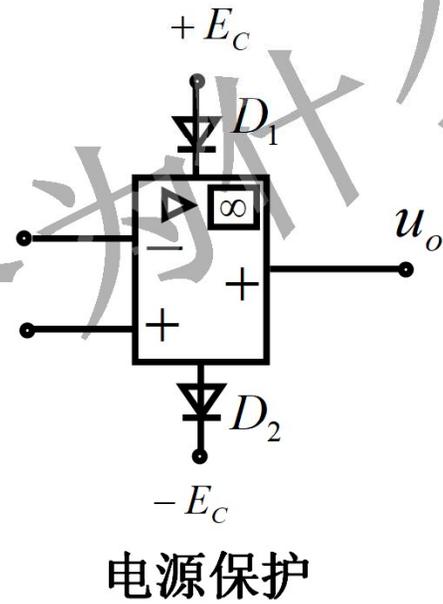
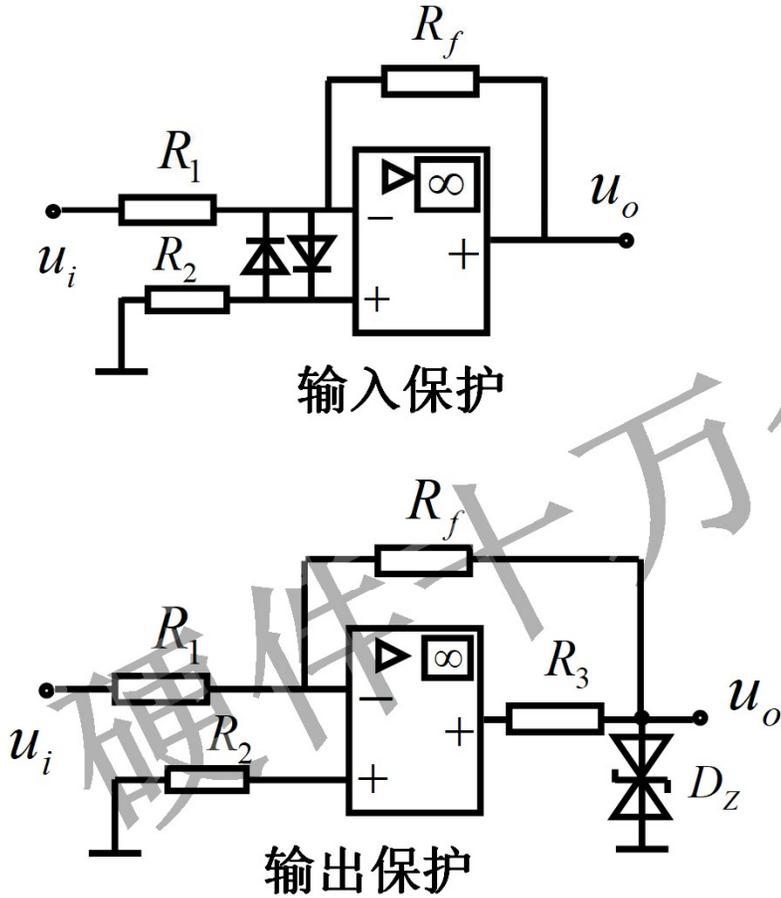
电流串联负反馈

$$\begin{aligned} \because R_f &= 0 & i_- &= i_+ = 0 \\ \therefore u_f &= u_i & i_0 &= \frac{u_i}{R} \end{aligned}$$

输出电流 i_0 不随 R_L 变化，具有恒流输出特性。

1. 反馈电路直接从输出电压端引出，是电压反馈；从非输出电压端引出，是电流反馈。
2. 输入信号和反馈信号分别加在两个输入端，是串联反馈（极性相同，负反馈；极性相异，正反馈）；加在同一个输入端上的，是并联反馈（极性相同，正反馈；极性相异，负反馈）。

集成运放使用注意事项



运放的分类

一、按工艺分类

- ✚ 双极型运放（Bipolar工艺）
- ✚ 单极型运放（CMOS工艺）
- ✚ Bi-FET型运放（组合工艺）

二、按供电方式分类

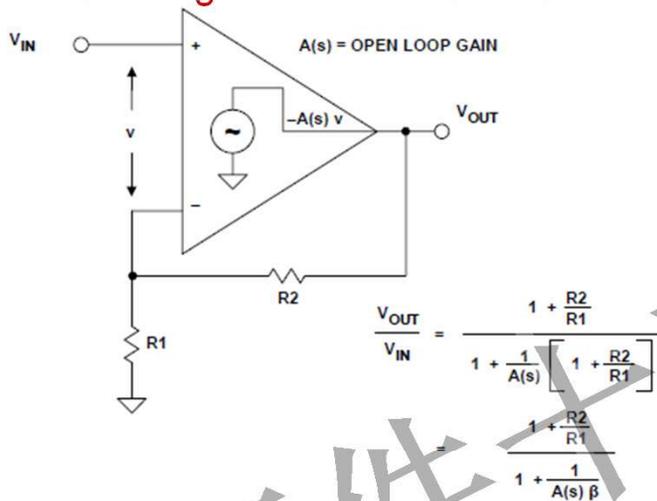
- ✚ 双电源运放
- ✚ 单电源运放

三、按功能分类

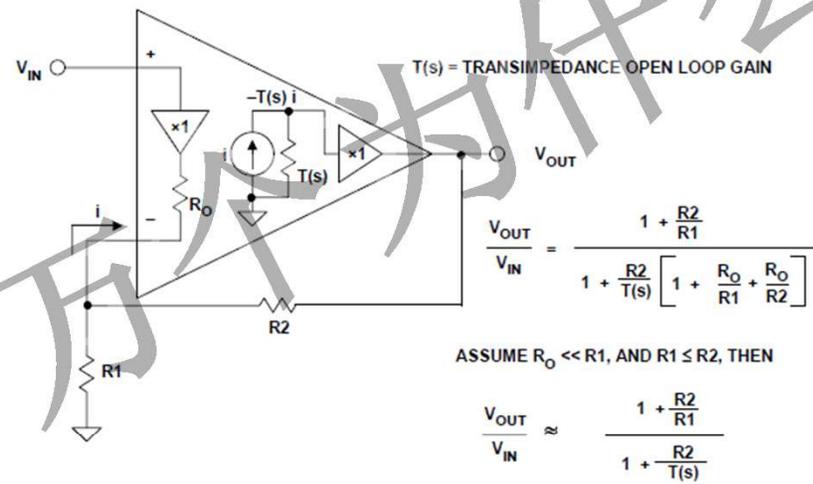
- ✚ 通用运放（二进一出）
- ✚ 专用运放（对数运放、电流监测运放、增益可调运放、TIA跨阻运放、仪表放大器）

四、按工作原理分类

Voltage Feedback (VFB)



Current Feedback (CFB)

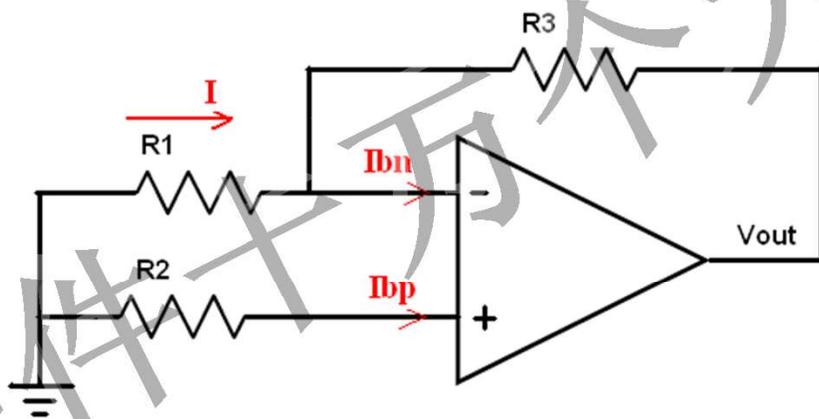


图中所示，CFB运放的放大倍数除了跟外围电阻R2/R1的比例相关外，还跟反馈电阻R2相关。因此，CFB运放的反馈电阻取值是受限制的，反馈电阻的大小必须按照器件资料的建议取值，否则信号的放大倍数达不到要求。

注意：CFB运放只作简单介绍。后面所讲运放均是指VFB运放！！

运放输入参数

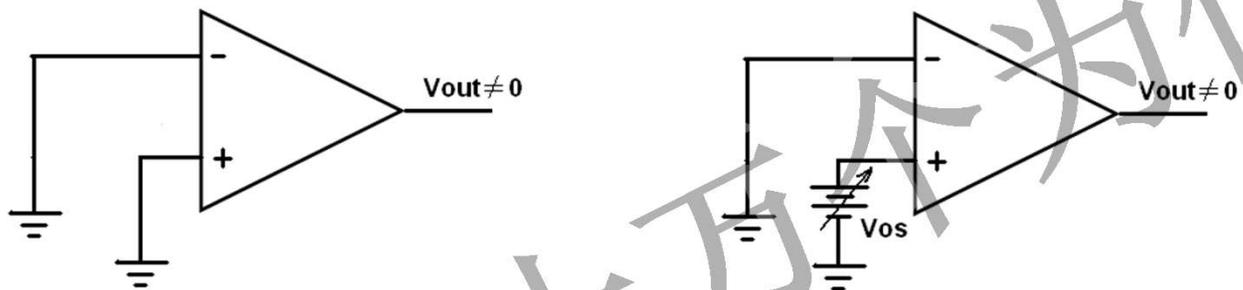
- ◆ I_b (输入偏置电流 *Input Bias Current*) —— 运放输入级工作所需的偏置电流。手册给定的值是流入两输入端电流的平均值, $(I_{bn} + I_{bp}) / 2$
- ◆ I_{io} (输入失调电流 *Input Offset Current*) —— 输入偏置电流之差, 即 $(I_{bp} - I_{bn})$, 对直流输出误差有影响



理想运放的输入电流0是不可能实现的, 但当 $I_b \ll I$ 时, 输入电流 I_b 是可以忽略的, 即可认为输入电流为0

运放输入参数

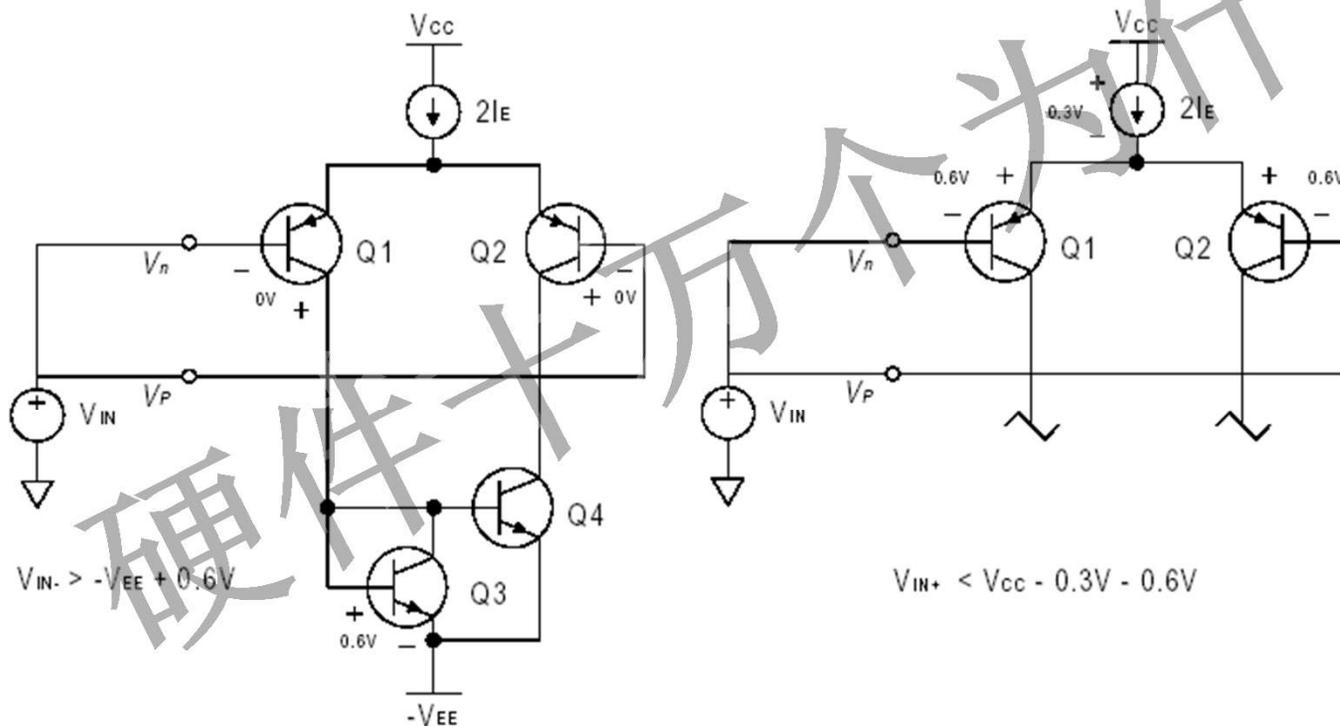
◆ V_{os} (输入失调电压 *Input Offset Voltage*) —— 开环情况下, 使运放输出为0时, 在输入端上所加的补偿电压, 影响直流输出误差。



理论上, 当运放输入都为0时, 输出也应该为0。但实际上, 输出并不为0。这是因为运放两输入端结构的参数不可能完全相同, 微小的差异经放大后, 输出可能是高电平。

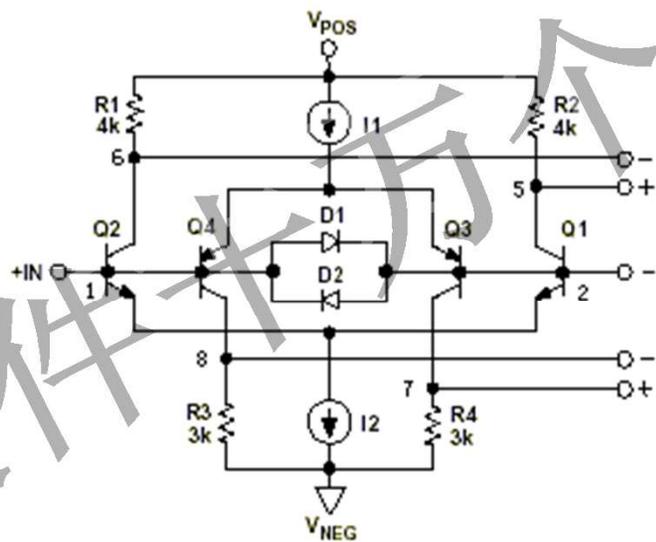
运放输入参数

◆ * V_{icr} (输入共模电压范围 *Input Common-Mode Voltage Range*) ——指运放允许输入的共模电压范围【共模输入电压 $V_{ic} = (V_p + V_n) / 2$ 】，直接影响运放能否正常工作



Rail to Rail Input

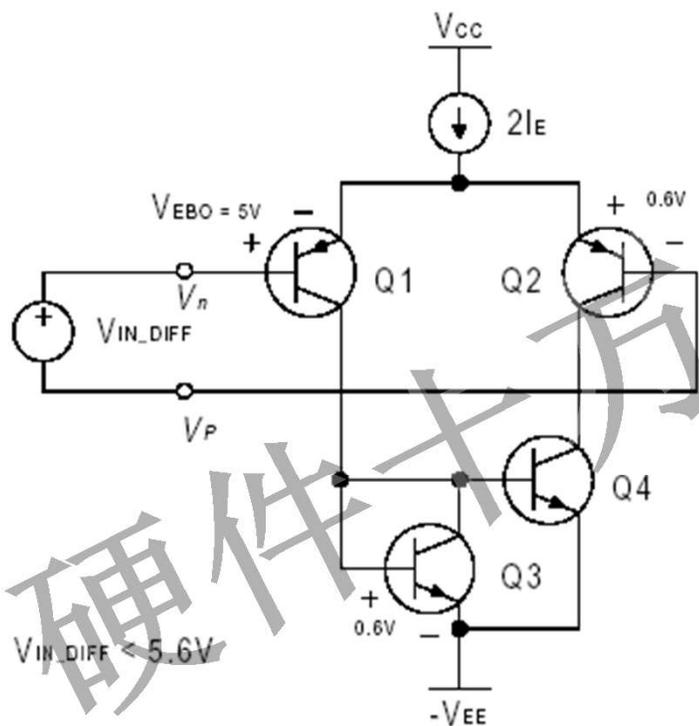
rail to rail, 直译为轨到轨, 这里的轨指正负电源轨。输入轨到轨是指输入共模电压可以达到正、负电源, 即输入在正电源到负电源 (或地) 之间, 运放都能正常工作。输入轨到轨, 都是采用互补的两对差分输入级实现的。



1.

运放输入参数

◆ V_{id} (差模输入电压范围 *Differential Input Voltage*) — 指运放正负输入端允许的最大压差范围



注意：
再大就弄坏啦！

运放放大参数

- ◆ $*A$ (开环增益 *Open-Loop Gain*) —— 开环条件下，运放的放大倍数。
- ◆ $B1$ (单位增益带宽 *Unity Gain*) —— 开环条件下，运放增益等于 0dB 时对应的频率。
- ◆ $*GBP$ (增益带宽积 *Gain-Bandwidth Product*) —— 开环增益与对应频率的乘积。也有手册简写为 **GBW**。
- ◆ -3 dB Bandwidth —— 闭环增益为 1 的条件下， -3 dB 所对应的频率。

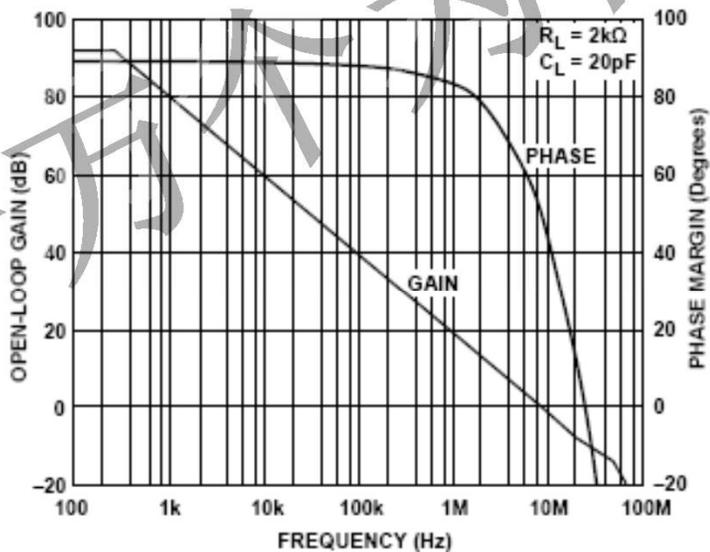
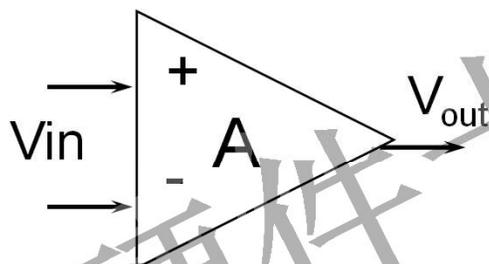


Figure 15. Open-Loop Gain and Phase Margin vs. Frequency

运放输出参数

◆ Z_o （输出阻抗）——运放输出端对地的小信号阻抗。

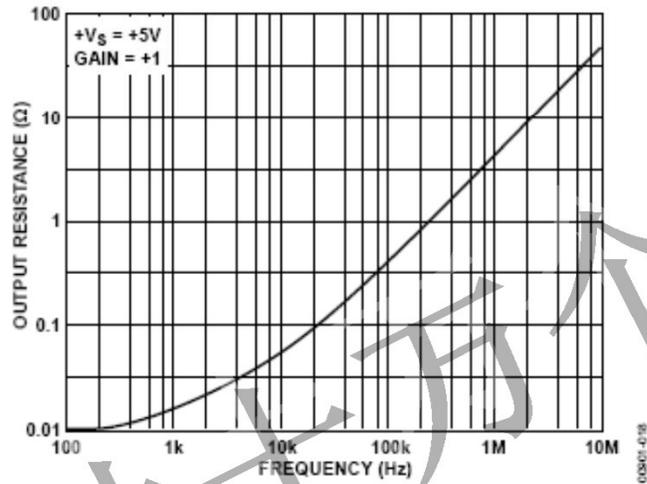
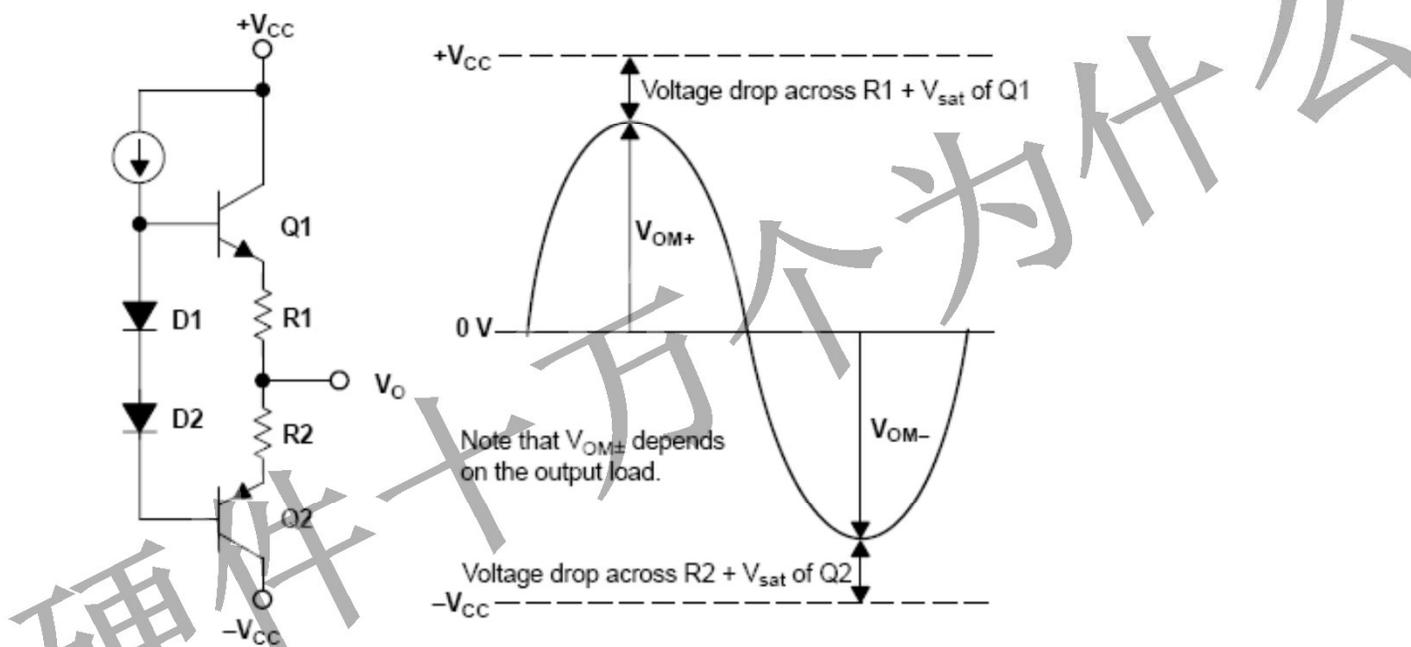


Figure 18: Output Resistance vs. Frequency, +V_S = +5 V, Gain = +1

◆ I_{os} （输出短路电流）——指运放接大电流负载或直接接地时，输出端上所能形成的最大电流。

运放输出参数

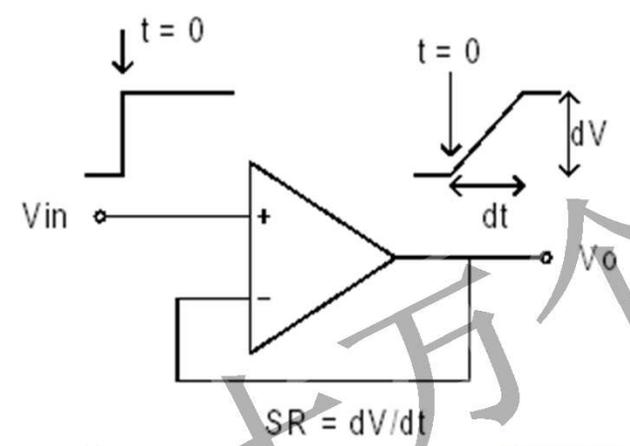
- ◆ $*V_o (pp)$ (输出摆幅) ——在不失真的条件下, 运放能够输出电压最大与最小值之间的范围。



Rail to Rail Output, 轨到轨输出, 就是指输出电压可以接近正、负电源。轨到轨输出, 一般采用共射极或共源极结构, 即上图结构中没有 $R1, R2$ 。

运放输出参数

- ◆ *SR (输出摆率) —— 闭环条件下, 输出电压随时间的变化率。
- ◆ *Bom (大信号带宽) —— 指运放输出大幅度信号时的带宽。主要受限于摆率。



$$\text{SlewRate} = \frac{dV}{dt} \Big|_{\max}$$

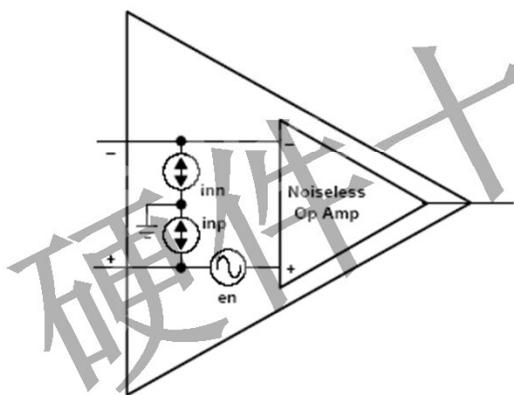
Maximum Change in Voltage

Change in Time

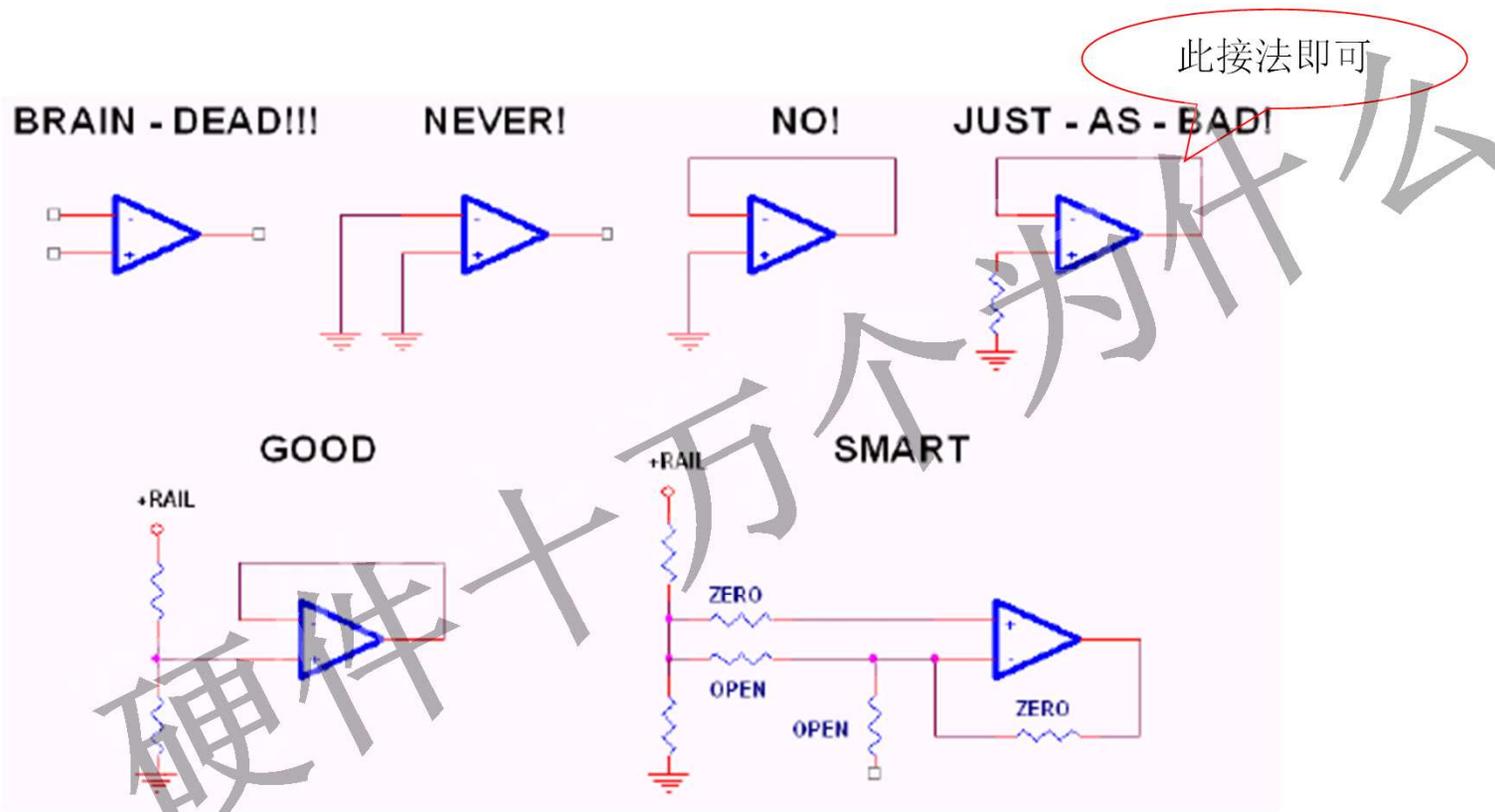
$$Bom = \frac{SR}{2\pi * \text{Amplitude}}$$

运放其它参数

- ◆ A_{com} (共模增益) —— 运放输出与共模信号大小之间的比值。
- ◆ $*CMRR$ (共模抑制比) —— 差模增益与共模增益的比值。表征运放抑制共模信号的能力。
- ◆ $*PSRR$ (电源抑制比) —— 指由电源稳波导致的输入失调电压变化与电源稳波幅度的比值。
- ◆ V_{noise} (等效噪声电压) —— 内部噪声导致的输出对应的等效输入电压值。
- ◆ $*V_{nd}$ (噪声电压密度) —— 等效噪声电压与频率开方之比。



运放未用通道处理





THANK YOU!

