

运算放大器基础知识阅读及练习

一.从晶体管放大电路到集成运算放大器

放大电路起源于真空管,最开始的放大器主要是低频放大器、中频放大器和高频放大器,用于无线电通信系统和音响系统。其中低频放大器电路结构和晶体管放大器基本相同,都是用最简单的电路实现交流放大功能,且这些电路对放大器增益的缓慢变化或漂移并没有很高的要求,只需要简单的直流偏置电路就可以满足要求。

在实际应用中,晶体管放大器也存在较多问题。无法达到最大动态电压范围;由于晶体管 β 值的偏差,导致生产难度的加大和放大电路增益的偏差。由于晶体管自身非线性特性导致的晶体管放大器的非线性失真,对于高保真音频放大器来说是难于接受的,需要有效抑制晶体管自身的非线性,使得非线性失真降低到允许值,这是简单的晶体管放大电路很难做到的。同时,由于晶体管共射电路的电流增益是随温度变化的,简单的交流放大器的增益还是会有随着温度的变化发生变化。交流放大器的隔直功能使得交流放大器无法用于信号缓慢变化的场合,是晶体管交流放大器放大直流或慢变信号及其复杂。

简单的晶体管放大电路对共模干扰没有抑制能力,即使使用差分放大器电路,只要 β 等晶体管参数稍有差异,其共模抑制能力就会降低。晶体管放大电路也很难实现运算电路。综上,为了获得性能优良的放大电路,有必要对其引入负反馈。

负反馈可以有效的抑制因放大器开环增益变化对闭环增益的影响,也可以有效的抑制晶体管参数漂移的影响,还可以有效的抑制晶体管非线性造成的非线性失真,从而获得放大器的稳定性和改善性能。但要想应用负反馈展宽放大器带宽几乎是不可能的,除非引入负反馈后的放大器开环就具有这样的宽度。

集成运算放大器是在分立元件放大器的基础上,将各个晶体管制作在同一芯片内,同时根据集成电路制造工艺的特点,将分立元件的电路单元性能优化。集成运算放大器的性能非常接近于理想运算放大器的特性,很容易实现几乎理想的电路参数气性能。集成运算放大器可以完成几乎所有的模拟电路功能,不管是线性还是非线性的电路。

二.运算放大器的发展及其分类

运算放大器是在 1947 年由 John.R Ragazzini 命名的,简称 op amp。早期的运算放大器是用真空管实现的,笨重、耗电大且昂贵。双极性结型晶体管(BJT)的出现,是运算放大器的第一次显著小型化。上世纪 60 年代,仙童半导体公司研制成第一代集成电路(IC)运算放大器,并在 60 年代末推出第一代集成运放 $\mu A741$;从此各种系列的集成运放迅猛发展。

按照功能/性能分类,模拟运算放大器一般可分为通用运放、低功耗运放、精密运放、高输入阻抗运放、高速运放、宽带运放、高压运放,另外还有一些特殊运放,例如程控运放、电流运放、电压跟随器等等。根据运放的供电方式,也分为单电源供电和双电源供电运放。实际上为了满足应用需要,运放种类极多;随着技术的进步,上述分类的门槛一直在变化。例如以前的 LM108 最初是归入精密运放类,现在只能归入通用运放了。另外,有些运放同时具有低功耗和高输入阻抗,或者与此类似,这样就可能同时归入多个类中。下面对各种类型的运算放大器进行简单说明。

(一)通用型

通用运放实际就是具有最基本功能的最廉价的运放,是运算放大器的第三代产品。其第一代为早期型产品,是运算放大器的雏形;第二代运算放大器除了需要外部补偿外,基本参数与通用型集成运算放大器基本相同,但是其外部补偿电路是一个难点;第三代通用型集成运算放大器的主要特点是外部电路简单,在不考虑输出调零的情况下,完全不需要外部补偿电路。在众多集成运算放大器中,通用型集成运算放大器是目前最便宜的,型号众多,其典型型号有单运算放大器 LM741、双运算放大器 LM1458、四运算放大器 LM324。

（二）高精度或精密型

由于通用型集成运算放大器的增益不是很高，通常为 20000 倍（86dB）最小开环增益；在一些需要精度运算的场合，其性能不能满足要求，因此需要高精度或精密型运算放大器。

而高精度或精密型运算放大器是一种高增益、高共模抑制比、极低失调电压、极低失调电流、极低输入偏置电流、极高输入阻抗、极低温度漂移的集成运算放大器；精密运放主要用于对放大处理精度有要求的地方，例如自控仪表等等。

以早期的高精度或精密运算放大器 OP07 为例（最早的型号为 uA741），与 LM741 相比，最小增益从 LM741 的 20000 倍提高到 200000（106dB）倍，输入阻抗从 LM741 的 $0.3\text{M}\Omega$ 提高到 OP07 的 $20\text{M}\Omega$ ；对输入特性影响最大的输入失调电流、输入失调电压和输入偏置电流分别从 20nA 降到 0.4nA、1mV 降低到 0.03mV、80nA 降低到 1nA。现在的高精度或集成运算放大器，如 OPA177 的最小开环增益可以达到 130dB，最小共模抑制比达到 130dB，差模输入阻抗 $20\text{M}\Omega$ ，共模输入阻抗典型值为 $200\text{G}\Omega$ ，输入失调电流 0.3nA，输入偏置电流 0.5nA，输入失调电压 10uV；采用斩波稳零技术的精密运放的失调电压可以达到 5uV。

（三）高输入阻抗型

双极型晶体管作为输入级的集成运算放大器，输入阻抗不会很高，即使是高精度集成运算放大器的输入阻抗也不过是 $20\text{M}\Omega$ ；如果采用结型场效应管作为输入级，则集成运算放大器的输入阻抗可以提高到 $10^{12}\Omega$ 、相对于双极型晶体管输入级的集成运算放大器的输入阻抗提高了近 5 个数量级；如果选用 MOSFET 作为输入级，则集成运算放大器的输入阻抗可以达到 $10^{15}\Omega$ 甚至更高。搞输入阻抗集成运算放大器不仅输入阻抗高，而且输入偏置电流极低，大约为 20fA（ $20\times 10^{-15}\text{A}$ ），如此低的输入偏置电流对输入信号源的影响是极低的，即使测量微弱电流信号时，一般也可以忽略。高输入阻抗运放用途十分广泛，例如采样保持电路、积分器、对数放大器、测量放大器、带通滤波器等。

（四）高速或宽带型

高速运放是指转换速度较高的运放。一般转换速度在 100V/us 以上。宽带运放是指 -3dB 带宽（BW）比通用运放宽得多的集成运放。很多高速运放都具有较宽的带宽，也可以称作高速宽带运放。这个分类是相对的，同一个运放在不同使用条件下的分类可能有所不同。

通用集成运算放大器的单位增益一般不高于 500kHz，如果闭环增益为 100 倍，则其闭环带宽仅为 5kHz。而且通用集成运算放大器的输出电压摆动速率也仅为 0.5V/us 左右；从 -10V 上升到 +10V 至少需要 40us；如此的带宽和转换速率在对带宽和转换速率有一定要求的应用中将变得无能为力。一个运算放大器的增益带宽积（GBW）是固定的，不可能通过负反馈超过该数值。要想获得更高的带宽和转换速度，最简单的办法就是选用宽带放大器或高速型集成运算放大器。

早期的高速集成型运算放大器，如 LM318 的单位增益带宽积为 15MHz，输出电压摆动速率达到 70V/us；低噪声音频运算放大器 NE5534 的单位增益带宽积为 15MHz，输出电压摆动速率为 13V/us，比较新的 LMH6629 的单位增益带宽积为 900MHz，输出电压摆动速率为 1600V/us。目前最高转换速度已经可以做到 6000V/us。高速运放用于高速 AD/DA 转换器、高速滤波器、高速采样保持、锁相环电路、模拟乘法器、精密比较器、视频电路中。宽带运放主要用于处理输入信号的带宽较宽的电路。

（五）功率型

如果负载需要比较大的电流，通用集成运算放大器的驱动能力不能满足要求，可以采用扩流方法获得集成运算放大器更高的驱动能力。功率集成运算放大器的价格较高；在参数允许的情况下，可以用较为廉价的集成音频功率放大器。集成音频功率放大器是集成运算放大器的特例，除不适合作为跟随器应用外，闭环增益要求 10 倍以上的应用场合，只要工作电压、输出功率满足要求，集成音频功率放大器都可以胜任。

（六）高压型

高压运放是为了解决高输出电压或高输出功率的要求而设计的。在设计中，主要解决电路的耐压、动态范围和功耗的问题。如果输出电压超过 $\pm 15\text{V}$ 或 30V ，通用集成运算放大器就无法满足应用需求了，尽管高压运放可以用通用运放在输出后面外扩晶体管/MOS管来进行电压提升，但是需要付出牺牲放大器性能的代价。选用电高压型集成运算放大器，其最高输出可以达到 $\pm 600\text{V}$ 或 1200V 。

（七）低功耗型/微功耗型

低功耗运放是在通用运放的基础上大降低了功耗，可以用于对功耗有限制的场所，例如手持设备。它具有静态功耗低、工作电压可以低到接近电池电压、在低电压下还能保持良好的电气性能。随着MOS技术的进步，低功耗运放已经不是个别现象。通用型集成运算放大器的静态工作电流约为 10mA 。对于双极型晶体管集成运算放大器，要想降低功耗，需要用低功耗型集成运算放大器，如TL060系列，静态电流 2mA 。如果需要更低的功耗，需要选择MOSFET构成的集成运算放大器。低功耗运放的静态功耗一般低于 1mW 。

在用作电池作为电源，以及要求功耗极低的应用领域，要求电子线路功耗越低越好，微功耗型运算放大器应运而生。现在微功耗型集成运算放大器，如LPV551的静态功耗可以达到 $2.5\mu\text{W}$ 或 800nA 工作电流。

（八）满幅输出型

通用集成运算放大器通常工作在 $\pm 15\text{V}$ 电源电压下，这样即使输出电压幅度低于电源电压幅度 $3\text{--}4\text{V}$ ，也会有 $10\text{--}12\text{V}$ 的输出电压幅度，这对于一般应用来说是足够了。但是在低电源电压下，输出电压幅度与电源电压差值就成为了一个不可忽略的问题，特别当电源电压低于 2.7V 一下的应用场合，尽可能大的输出电压幅度尤为重要。如果输出电压幅度仅比电源电压相差 50mV 时，即使工作在 1V 电源电压下，也会有 0.9V 的输出电压幅度。

（九）极低工作电压型：最低工作电压可达 1V ，如MAX4289，其工作电压仅为 1V ，工作电流 $9\mu\text{A}$ 。

（十）比较器

运算放大器用于比较器电路是比较电路最简单、性能最好的解决方案。与集成运算放大器负反馈闭环应用不同的是，比较器电路要有尽可能陡峭的上升沿/下降沿、尽可能短的信号传播延迟。专用比较器与集成运算放大器的性能相比，集成运算放大器用于负反馈状态下，需要闭环稳定、需要补偿（内补偿或外补偿），牺牲了集成运算放大器的速度、带宽性能。比较器应用中，放大器不工作在负反馈状态，不需要闭环稳定，仅需要开环稳定，因此不需要补偿，也不需要全互补射极跟随器输出级。比较器比较注重上升沿/下降沿和传播延迟时间输出驱动能力等。由于上述应用特性要求，集成运算放大器并不适合用于比较器的场合，因此专用的比较器形式的集成运算放大器与闭环使用的集成运算放大器同时出现。廉价的集成比较器有单比较器LM311、双比较器LM393和四比较器LM339；这些廉价的比较器可以满足大多数比较电路的性能要求；如果需要更快的速度、更短的延迟时间，则可以使用高速、超高速比较器；在低压、低功耗、微功耗应用中还有微功耗比较器。

三 从参数了解运算放大器

当运算放大器工作在恰当的频段和适度的直流增益下的时候，其实际工作特性和基于理想运算放大器模型所预计的特性之间一般都会相当一致。然而，随着频率或增益的增长，特性性能会不断恶化，这是因为各种各样的限制开始其作用了。本节着眼于介绍OPAMP静态和动态的相关参数（有些参考书也写直流指标、交流指标，符号也不一定相同），以便让大家对运算放大器有个基本的认识。

（一）静态 OPAMP

当 OPAMP 的工作频率保持在一个较低的水平的时候, 依然有一些限制会起作用。这些限制在高电流增益场合特别需要注意, 一般通常称为输入参考误差。其中最常用的几种是: 输入偏置电流 I_B 、输入失调电流 I_{os} 、输入失调电压 V_{os} 以及交流噪声密度 e_n 和 i_n 。相关的研究论题是热飘移 $TC(V_{os})$ 、共模抑制比 CMRR、馈电抑制比 PSRR 以及增益非线性度。这些非理想特性一般不会受到负反馈带来的对性能的改善的影响, 必须通过其他方法在一对一的基础上减小它们的影响。同时, 为了让放大器正常工作, 还必须注意某些运行上的限制, 其中包括最大工作温度、最大供电电压和最大功率耗散、输入共模电压范围和输出短路电流。下面简单的对运算放大器的静态(直流)参数进行说明。

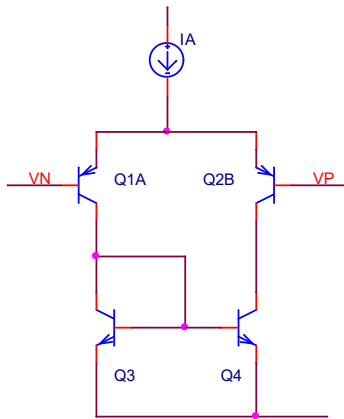
1 输入偏置电流 I_B 和输入失调电流 I_{os}

输入偏置电流 I_B 定义为当运放的输出直流电压为零时, 其两输入端的偏置电流平均值。

输入偏置电流对进行高阻信号放大、积分电路等对输入阻抗有要求的地方有较大的影响。输入偏置电流与制造工艺有一定关系, 其中双极型工艺(即上述的标准硅工艺)的输入偏置电流在 $\pm 10\text{nA} \sim 1\text{ }\mu\text{A}$ 之间; 采用场效应管做输入级的, 输入偏置电流一般低于 1nA 。

输入失调电流 I_{os} 定义为当运放的输出直流电压为零时, 其两输入端偏置电流的差值。

输入失调电流同样反映了运放内部的电路对称性, 对称性越好, 输入失调电流越小。输入失调电流是运放的一个十分重要的指标, 特别是精密运放或是用于直流放大时。输入失调电流大约是输入偏置电流的百分之一到十分之一。输入失调电流对于小信号精密放大或是直流放大有重要影响, 特别是运放外部采用较大的电阻(例如 $10\text{k}\Omega$ 或更大时), 输入失调电流对精度的影响可能超过输入失调电压对精度的影响。输入失调电流越小, 直流放大时中间零点偏移越小, 越容易处理。所以对于精密运放是一个极为重要的指标。



如左图所示的 OPAMP 输入级中, 实际运算放大器的输入管脚都会吸收少量的电流; 对于某些运用, 这些电流可能会产生值得注意的误差。输入级电路表明,

I_P 和 I_N 是在正向有源区对 Q1 和 Q2 进行偏置所需要的电流。Q1 和 Q2 会自动从外部吸取电流。实际上, 对运算放大器来说, 都必须给它各个输入端提供一条串联的直流通路, 以使电流可以通过它流动。在存有电流终端的情况下, 输入电流对电容产生周期性的充、放电过程。

因为在输入级的两个半边之间, 特别是在 Q1 和 Q2 的 β 之间存在不可避免的失配, 那么 I_P 和 I_N 也就不可

图 1. 输入失调电流示意图

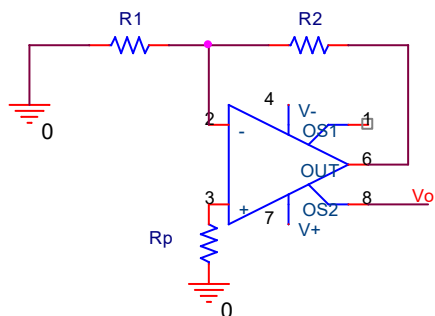
避免的存在失配了。将两电流的均值称为输入偏置电流:

$$I_B = \frac{I_P + I_N}{2}$$

并将它们的差称为输入失调电流:

$$I_{os} = I_P - I_N$$

I_{os} 的幅度量级通常要比 I_B 小。 I_B 的极性取决于输入晶体管的类型, I_{os} 极性则取决于失配的方向。对于不同的 OPAMP, 其 I_B 、 I_{os} 值的范围是不一样的, 具体可参见附录中的表单。



如左图, 通过将各输入端分别置零, 并令 I_P 和 I_N 分别从 + 端和 - 端输入, 求得输出叠加后, 可以知道, 输出为:

$$v_o = E_o = (1 + \frac{R_2}{R_1})[(R_1 // R_2)I_N - R_p I_P]$$

从上面的式子可以看出, 尽管没有任何输入信

图 2. 输入失调电压估算图 (电阻反馈) 号, 电路仍然能够产生输出信号 E_o ; 现把这个不希望得到的输出作为一个误差, 或称之为输出直流噪声。通过引入 R_p , 最终可以得到

$$v_o = E_o = (1 + \frac{R_2}{R_1})(-R_1 // R_2)I_{os}, \text{ 该误差正比于 } I_{os}, \text{ 其幅度和数量级一般都要比 } I_P \text{ 和 } I_N \text{ 小。}$$

通过缩小所有的电阻可以进一步降低 E_o , 然而降低电阻会增加功率耗散, 因此就需要进行某种折衷。

BJT 输入器件的 I_B 倾向于随着温度的增加而降低, 这是应为 β 会随着温度的增加而增加; JFET 输入器件, 其 I_B 会随着温度的增加而呈指数规律增加。FET 输入运算放大器相对于 BJT 输入运算放大器的低电流优点在更高的温度上并不存在。清楚的知道芯片的工作温度是选择器件的一个重要因素。

输入失调电流的温度漂移 (简称输入失调电流温漂) 定义为在给定的温度范围内, 输入失调电流的变化与温度变化的比值。这个参数实际是输入失调电流的补充, 便于计算在给定的工作范围内, 放大电路由于温度变化造成的漂移大小。输入失调电流温漂一般只是在精密运放参数中给出, 而且是在用以直流信号处理或是小信号处理时才需要关注。

2 输入失调电压 V_{os}

将运算放大器的输入短接, 可以得到 $v_o = a(v_P - v_N) = a * 0 = 0$ 。然而, 由于输入级两部分存在固有的失配, 通常实际运算放大器的 $v_o \neq 0$ 。为了使 v_o 为零, 必须在两输入管脚之间加入一个合适的校正电压。该校正电压 (偏移) 称为输入失调电压 V_{os} 。同 I_{os} 类似, V_{os} 的幅度和极性在不同运算放大器中也不相同; 对于不同系列的 OPAMP, 其 V_{os} 的取值可以在 mv 到 μv 的范围上变化。

同前面类似的，可以知道，由输入失调电压（图 2）产生的噪声为： $E_o = (1 + \frac{R_2}{R_1})V_{os}$ ，

实际应用中，这有可能是个很大的误差。同很多其它参数类似， V_{os} 与温度有关，会随着温度飘移。

输入失调电压的温度漂移定义为在给定的温度范围内，输入失调电压的变化与温度变化的比值。这个参数实际是输入失调电压的补充，便于计算在给定的工作范围内，放大电路由于温度变化造成的漂移大小。一般运放的输入失调电压温漂在 $\pm 10 \sim 20 \mu V/^\circ C$ 之间，精密运放的输入失调电压温漂小于 $\pm 1 \mu V/^\circ C$ 。

对于输入失调电流和失调电压同时作用的实际 OPAMP，我们可以外部失调调零和内部失调调零的办法减小输入失调对输出的影响。要注意的一点是，调零只可以对初始失调误差进行补偿，当工作条件发生变化的时候，误差会重新出现。

3 差模开环直流电压增益

差模开环直流电压增益定义为当运放工作于线性区时，运放输出电压与差模电压输入电压的比值。由于差模开环直流电压增益很大，大多数运放的差模开环直流电压增益一般在数万倍或更多，用数值直接表示不方便比较，所以一般采用分贝方式记录和比较。一般运放的差模开环直流电压增益在 $80 \sim 120 dB$ 之间。实际运放的差模开环电压增益是频率的函数，为了便于比较，一般采用差模开环直流电压增益。

4 共模抑制比

共模抑制比定义为当运放工作于线性区时，运放差模增益与共模增益的比值。由于共模抑制比很大，大多数运放的共模抑制比一般在数万倍或更多，用数值直接表示不方便比较，所以一般采用分贝方式记录和比较。一般运放的共模抑制比在 $80 \sim 120 dB$ 之间。

5 电源电压抑制比

电源电压抑制比定义为当运放工作于线性区时，运放输入失调电压随电源电压的变化比值。电源电压抑制比反映了电源变化对运放输出的影响。目前电源电压抑制比只能做到 $80 dB$ 左右。所以用作直流信号处理或是小信号处理模拟放大时，运放的电源需要作认真细致的处理。当然，共模抑制比高的运放，能够补偿一部分电源电压抑制比，另外在使用双电源供电时，正负电源的电源电压抑制比可能不相同。

6 输出峰-峰值电压

输出峰-峰值电压定义为，当运放工作于线性区时，在指定的负载下，运放在当前大电源电压供电时，运放能够输出的最大电压幅度。除低压运放外，一般运放的输出输出峰-峰值电压大于 $\pm 10 V$ 。一般运放的输出峰-峰值电压不能达到电源电压，这是由于输出级设计造成的，现代部分低压运放的输出级做了特殊处理，使得在 $10 k \Omega$ 负载时，输出峰-峰值电压接近到电源电压的 $50 mV$ 以内，所以称为满幅输出运放，又称为轨到轨（rail-to-rail）运放。需要注意的是，运放的输出峰-峰值电压与负载有关，负载不同，输出峰-峰值电压也不同；运放的正负输出电压摆幅不一定相同。对于实际应用，输出峰-峰值电压越接近电源电压越好，这样可以简化电源设计。但是现在的满幅输出运放只能工作在低压，而且成本较高。

7 最大额定值

与所有的电子器件类似，运算放大器要求用户考虑倒某些电气和环境的限制。超过这些限制就会出现故障或导致电路损坏。运算放大器额定值的工作温度范围有**商用范围**

（ $0^\circ \sim +70^\circ$ ）、**工业范围**（ $-25^\circ \sim +85^\circ$ ）和**军用范围**（ $-55^\circ \sim +125^\circ$ ）。最重要的额

定值有最大供电电压、最大差模输入电压和共模输入电压，以及最大内部功率耗散 P_{max} 。

超过这些极限值可能会引起内部反向击穿现象和其它形式的电应力。它们的结果通常都是有害的，例如不可逆转的增益下降、输入偏置电流和输入失调电流、噪声或者对输入级的永久性损坏。为了保护 OPAMP，可以在输入端加入箝位电路，或者在片上集成箝位模块；在输出端加上过载保护电路。

8 最大共模输入电压

最大共模输入电压定义为，当运放工作于线性区时，在运放的共模抑制比特性显著变坏时的共模输入电压。一般定义为当共模抑制比下降 6dB 时所对应的共模输入电压作为最大共模输入电压。在有干扰的情况下，需要在电路设计中注意这个最大共模输入电压问题。

9 最大差模输入电压

最大差模输入电压定义为，运放两输入端允许加的最大输入电压差。当运放两输入端允许加的输入电压差超过最大差模输入电压时，可能造成运放输入级损坏。

(二) 动态 OPAMP 的限制

实际的 OPAMP 只能从直流到某一给定频率的范围内提供高增益，而超出这个范围，增益就会随着频率的增加而下降，而且输出相对于输入来说还有一个延时。这些限制会对电路的闭环特性会有很大的影响，它们会影响电路的频率响应和暂态响应。

1 开环带宽 f_b

开环带宽定义为，将一个恒幅正弦小信号输入到运放的输入端，从运放的输出端测得开环电压增益从运放的直流增益下降 3dB（或是相当于运放的直流增益的 0.707）所对应的信号频率。这用于很小信号处理。

2 单位增益带宽

单位增益带宽定义为，运放的闭环增益为 1 倍条件下，将一个恒幅正弦小信号输入到运放的输入端，从运放的输出端测得闭环电压增益下降 3dB（或是相当于运放输入信号的 0.707）所对应的信号频率。单位增益带宽是一个很重要的指标，对于正弦小信号放大时，单位增益带宽等于输入信号频率与该频率下的最大增益的乘积，换句话说，就是当知道要处理的信号频率和信号需要的增益以后，可以计算出单位增益带宽，用以选择合适的运放。这用于小信号处理中运放选型。

3 转换速率（也称为压摆率）SR

运放转换速率定义为，运放接成闭环条件下，将一个大信号（含阶跃信号）输入到运放的输入端，从运放的输出端测得运放的输出上升速率。由于在转换期间，运放的输入级处于开关状态，所以运放的反馈回路不起作用，也就是转换速率与闭环增益无关。SR 的单位是 $V/\mu s$ 。转换速率对于大信号处理是一个很重要的指标，对于一般运放转换速率 $SR \leq 10 V/\mu s$ ，高速运放的转换速率 $SR > 10 V/\mu s$ 。目前的高速运放最高转换速率 SR 达到 $6000 V/\mu s$ 。转换速率用于大信号处理中运放选型。

4 全功率带宽 BW

全功率带宽定义为，在额定的负载时，运放的闭环增益为 1 倍条件下，将一个恒幅正弦大信号输入到运放的输入端，使运放输出幅度达到最大（允许一定失真）的信号频率。全功率带宽是一个很重要的指标，用于大信号处理中运放选型。

5 建立时间

建立时间定义为，在额定的负载时，运放的闭环增益为 1 倍条件下，将一个阶跃大信号输入到运放的输入端，使运放输出由 0 增加到某一给定值所需要的时间。由于是阶跃大信号输入，输出信号达到给定值后会出现一定抖动，这个抖动时间称为稳定时间。稳定时间+上升时间=建立时间。对于不同的输出精度，稳定时间有较大差别，精度越高，稳定时间越长。建立时间是一个很重要的指标，用于大信号处理中运放选型。

6 等效输入噪声电压

等效输入噪声电压定义为,屏蔽良好、无信号输入的运放,在其输出端产生的任何交流无规则的干扰电压。这个噪声电压折算到运放输入端时,就称为运放输入噪声电压(有时也用噪声电流表示)。对于宽带噪声,普通运放的输入噪声电压有效值约 $10\sim 20\mu\text{V}$ 。

7 差模输入阻抗(也称为输入阻抗)

差模输入阻抗定义为,运放工作在线性区时,两输入端的电压变化量与对应的输入端电流变化量的比值。差模输入阻抗包括输入电阻和输入电容,在低频时仅指输入电阻。一般产品也仅仅给出输入电阻。采用双极型晶体管做输入级的运放的输入电阻不大于 10兆欧 ;场效应管做输入级的运放的输入电阻一般大于 10^9欧 。

8 共模输入阻抗

共模输入阻抗定义为,运放工作在输入信号时(即运放两输入端输入同一个信号),共模输入电压的变化量与对应的输入电流变化量之比。在低频情况下,它表现为共模电阻。通常,运放的共模输入阻抗比差模输入阻抗高很多,典型值在 10^8欧 以上。

9 输出阻抗

输出阻抗定义为,运放工作在线性区时,在运放的输出端加信号电压,这个电压变化量与对应的电流变化量的比值。在低频时仅指运放的输出电阻。这个参数在开环测试。

(三) 动态 OPAMP 部分参数的进一步说明

上面从定义出发,对集成运算放大器的动态参数的定义进行了介绍。为了进一步加深对动态参数的理解,下面从集成运放的响应表达式出发,对单位增益频率 f_t 、增益带宽乘积(GBP)、闭环带宽 f_b 、全功率带宽(FPB)、上升时间 t_R 、转换速率(SR)和建立时间 t_s 等几个主要参数进行进一步的解说。

对于一个内部补偿了的 OPAMP,其开环响应可以表示为: $a(jf) = \frac{a_0}{1 + jf/f_b}$, 这里 a_0

是开环直流增益, f_b 是开环-3dB 频率,也就是开环带宽。该响应的增益在从直流到 f_b 范围内,是高的并且近似为常数;而通过了 f_b 后,增益以约 -20dB/dec 的斜率滚降,一直降到 $f = f_t$ 时候的 0dB ,该频率称为单位增益频率(数值上等于单位增益带宽)。具有主极点补偿的 OPAMP 也称为恒定增益带宽积的 OPAMP。其增益带宽积 $\text{GBP} = f_t$ 。

电压跟随器的小信号带宽是 f_t ,其频率响应可以表示为 $A(jf) = \frac{1}{1 + jf/f_t}$,用 V_m 幅

度足够小的输入电压阶跃激励一个最简单的跟随器,其指数响应为:

$$V_o(t) = V_m(1 - e^{-t/\tau}) \quad \tau = \frac{1}{2\pi f_t}$$

v_o 从 V_m 的 10% 上升到 90% 所用的时间 t_R 称为上升时间;它显示了指数摆动上升速率的快慢;

$t_R = \frac{0.35}{f_t}$ 。在指数变化的起始处， v_o 随时间变化的速率最大。如果增大 V_m ，为了能使得

输出在 t_R 时间内完成从 10% 上升到 90% 的过渡，输出响应速率相应的也会增大。在实际观察中发现，当输入阶跃大于某个阶跃幅度的时候，输出斜率就会在某一常数处饱和，该常数称为转换速率（SR）。由于内部电路对频率补偿和电容的充放电的能力是有限的，转换速率极限是个非线性作用。

无论采取何种措施来超越 OPAMP 的 SR 能力，转换速率极限的作用都会使输出信号出现失真。对于一个正弦信号，如果没有转换速率极限，其输出为 $v_o = V_{om} \sin 2\pi ft$ 。其变化速率为 $dv_o / dt = 2\pi f V_{om} \cos 2\pi ft$ ，最大值为 $2\pi f V_{om}$ 。为了防止出现失真，必须要求 $(dv_o / dt)_{\max} \leq SR$ ，即： $f V_{om} \leq SR / 2\pi$ ；这表明，在幅度和频率之间要有个平衡：要在高频率下工作，就必须将 V_{om} 保持在足够低的水平，以避免转换速率失真；反之，要想得到 $V_{om} > V_{om(crit)}$ 的无失真输出，必须使得 $f \leq SR / 2\pi V_{om}$ 。

全功率带宽（FPB）是 OPAMP 能够产生具有最大可能幅度的无失真交流输出时的最大频率；该幅度值依赖于具体 OPAMP 及其供电电源。假设对称输出饱和值为 $\pm V_{sat}$ ，则有：

$$FPB = \frac{SR}{2\pi V_{sat}}$$

使用 OPAMP 的时候，既要确保不超过它的转换速率 SR，又要不超出它的 -3dB 频率 f_B 。

上升时间 t_R 和转换速率 SR 分别是在小信号和大信号条件下，输出变化的快慢程度。而在许多应用中，最关心的是建立时间 t_S 。该时间的定义是：大输入阶跃响应从原点出发一直到开始稳定并保持在给定的误差范围里面所需要的时间（通常这个误差范围关于其终值对称）。一般规定建立时间要达到 10V 输入阶跃的 0.1% 和 0.01% 的精度。为了充分实现运算放大器建立时间的能力，必须注意器件选择、布局、布线及旁路供电电源等。在高速、高精密度 D-A 转换器、采样保持放大器和多路复用放大器中尤其需要考虑建立时间。

以上是对于 OPAMP 静态、动态参数的简单介绍，大家可以结合后面的芯片资料对照学习；更多的知识，请参见相关书籍。

四 从参数了解运算放大器

每一个型号的运算放大器，都有其数据表。我们可以从芯片生产商的网站下载对应芯片的数据表单，并从数据表单中，查到我们使用该款芯片所需要的各类参数、芯片的典型用法及布局布线等相关知识。下面，我们以 LM324 为例，进行简单的说明，进一步的数据表单的查找，大家可以在使用过程中多阅读、理解并实践。

当拿到 LM324 的芯片手册后，我们注意到该手册对应于

LMx24,LMx24x,LMx24xx,LM2902,LM2902x,LM2902xx,LM2902xxx 等系列芯片, 该系列芯片集成了四个单元的运放。芯片数据表包含了 Features 特性说明、Applications 应用场景、Description 描述、Revision History、Pin Configuration and Functions、Specifications 芯片参数规格、Parameter Measurement Information、Detailed Description、Application and Implementation、Power Supply Recommendations、Layout 布局注意事项、Device and Documentation Support、Mechanical, Packaging, and Orderable Information 等 13 项相关说明。

我们可以结合应用场景, 对芯片的供电、应用、输入输出特性、增益带宽积、应用电路、布局布线等相关知识进行了解, 确定该款芯片的大致情况以确定是否符合使用需求。限于本章篇幅, 请大家阅读注释版的 LM324 数据表单, 了解 LM324 芯片的基本参数、芯片数据表单的格式以及如何从芯片的数据表单中快速查找想要了解的参数、知识。

五 运算放大器应用注意事项

(一) 运算放大器选用注意事项

若无特殊要求, 尽量选用通用型运算放大器, 对一般的信号处理, 检测, 工作频率低(低于 10K), 对失调电压不是很敏感的应用可选一般的运放, 如 LM358, LM324 等运放。当一个电路中含有多个运算放大器时, 建议选用双运放或四运放。对高阻信号源, 应选用与其阻抗相匹配的高输入阻抗运放, 如 TL082, LF353; 对高频信号处理中, 应选用高速、宽频带运放; 对小信号的放大, 检测, 应选用高精度, 低温漂, 和低噪声运放, 如 OP07。

正确认识、对待各种参数, 不要盲目、片面追求指标的先进性。如场效应管输入级的运放, 其输入阻抗虽高, 但失调电压也较大; 低功耗的运放转换速率必然较低等;

当运算放大器做弱信号放大时, 应特别注意选用失调及噪声系数均很小的运算放大器, 如 ICL7650 等; 同时应保持运放同相、反相端对地的等效直流电阻相等;

当运算放大器进行直流放大时, 必须妥善进行调零处理, 如有调零端的运算放大器应按标准推荐的调零电路进行调零; 若没有调零端的运算放大器, 应自行设计电路进行调零。

(二) 电路元器件的选择

1. 通过选择低噪声、高增益的电路, 我们可以获得比较好的低噪声输出。然而, 若不考虑电阻、电容精度、温度稳定性问题的话, 则 OPAMP 的输入并不会如参数表中显示的那样。OP 放大电路的精度、稳定度如何, 最终取决于 OP 放大电路中所用的电阻、电容的精度、温度稳定性情况。

2. 如果要求温度系数在 $25 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 以下, 即使是最好的金属膜电阻也难以达到, 价格昂贵, 交货期长; 精密线绕电阻会稍好点; 对于高频特性没特别要求的话, 可以使用线绕电阻。考虑到实际使用中高精度、极好的温度稳定性电阻的价格昂贵, 极难获得, 在设计电路时候要注意: 尽量减少精密电阻的数量; 并尽量使用电阻值相同的电阻。

3. OPAMP 中使用的电容, 根据其用途可以分为不同的三类: 旁路、相位补偿和时间常量。

(1) 旁路电容是在接地层附近给电源线安装一个 $50 \mu\text{F}$ 以上的电解电容, 再给每个 OPAMP 安装上小的陶瓷电容。旁路电容最要紧的特性是高频阻抗低, 使用时不用注意静电容量的精度和温度特性。但在小容量侧要注意其容量精度。

(2) 相位补偿用的电容的静电容量精度、稳定性如果达不到一定程度, 因为极点的位置而产生差错后会引发故障。聚酯树脂等薄膜电容易于使用; 陶瓷电容也很好, 但有的温度系数非常大, 需确认后再使用。

(3) 对于时间常量用电容(积分电路、有源滤波电路, 或作 A/D 转换取样和同步使用的电路)而言, 静电容量的精度和温度稳定性要求特别高。有源滤波器的稳定性由电阻和电

容共同决定。

以上简单的介绍了电阻、电容选择的要求，具体各种电阻、电容的特性、使用等，请参看有关书籍。

（三）、电路噪声的屏蔽和抑制

精密仪器结构中各种电子元器件和电磁元件往往被安装在一个小空间里面,因而相互之间干扰的可能性很大。在设计低噪声放大电路的时候，如何采取措施来抑制干扰，是个很重要的问题。

1 干扰与噪声

所谓的噪声，是电路中出现的非期望、并被耦合到电路中的电信号。由于噪声造成的电路、仪器的不正常工作就是干扰。

（1）、噪声源

a、放电噪声源

自然界的雷电、电机中电刷和整流子之间周期性的产生的火花，继电器等开关装置通断电流产生的火花、汽车发动机点火装置产生的火花，都是放电现象。在放电过程中向周围辐射出从低频到甚高频的电磁波，成为一种严重的噪声源。

b、电气噪声源

大功率的输电线是工频噪声源，在仪器内部工频感应，电台等大功率射频设备的电磁波辐射等也是种电气噪声源。电子开关的通断产生的冲击电压以及脉冲发生器的电压前沿都含有丰富的高次谐波，都可以激发前后电路的振荡，一次，也是电气噪声源。

c、固有噪声源

它包括热噪声、晶体管的低频噪声、散弹噪声等、接触噪声等。接触噪声是由于两种材料之间的不完全接触导致的电导率起伏产生的，如继电器接点、电子电路印刷板与插座不良接触、电位器的不良接触等。这种噪声具有 $1/f$ 特性，因此，它通常成为低频电路中最严重的噪声之一。

（2）噪声耦合方式

形成噪声的三要素为：噪声源、对噪声敏感的接收电路、噪声源到接收电路之间的耦合通道。从而，消除噪声耦合的方法也有三个：一只噪声源的噪声、使接收电路对噪声不敏感；抑制或切断耦合通道。耦合方式主要有以下几种：

a、静电耦合,噪声经杂散电容耦合到电路中去

静电耦合主要是由于两个电路或两个电子器件之间存在寄生电容，经过寄生电容使得一个电路得电荷影响另一个电路。如：两根平行导线之间存在静电耦合。

b、电磁耦合，噪声经互感作用耦合到电路中去

电磁耦合主要由于两个电路存在互感，使一个电路得电流变化通过磁耦合干扰另一个电路。

c、共阻抗耦合

噪声电流经两个以上的电路之间的共有阻抗耦合到电路中去。这种耦合一般发生在两个电路得电流流经一个公共阻抗，其中一个电路在该阻抗上的压降会影响另一个电路。

d、漏电流耦合

噪声电流经绝缘电阻的漏电流耦合到电路中去。这种耦合主要是由于绝缘不良，由流经绝缘电阻的电流所引起的干扰。

噪声源产生的噪声通过各种方式耦合进仪器，造成干扰。干扰主要分成差模干扰和共模干扰。差模干扰，是指和输入信号相串联的干扰信号。共模干扰是相对于公共的电位基准点，

在仪器的接收电路的两输入端子上同时出现的干扰,当接收器具有较低的共模抑制比的时候,也会影响测量结果。

2 抗干扰办法

在任何包含电子线路的仪器或设备中,接地是抑制噪声和防止干扰的重要方法。接地就是将某点和一个等电位点或面用低电阻导体连接起来,以构成仪器或设备的基准电位。若该点和大地有欧姆连接,则改点电位为大地电位;若不是和大地连接,则它仅是仪器或设备的基准电位,即浮地。接地设计应该注意两个基本要求:1、消除各电路电流流经一个公共地线阻抗时所产生的噪声电压。2、避免形成地环路。

信号接地方式有两种,即一点接地和多点接地。不论采取何种方式,都应该注意:1、所有的导线都具有一定的阻抗,包括电阻和电抗;2、两个分开的接地点难以做到等电位。

在一点接地的串联方式中,各电路的地线是串联的。由于地线本身的电阻,各点的电位其实是不同的。串联接地容易干扰,但比较简单。如果各个电路的电平相近,影响不大;如果高低电平差别很大,强信号的电流流到若信号的电路中去,则形成的干扰危害很大。

在一点接地的并联方式中,各电路的地电阻和地电流决定了各自的地电位,不存在共用阻抗耦合。从防止低频噪声的角度看,并联接地方式比较好,但不适用于高频场合。本实验中,信号频率为工频。

在高频场合,多数使用多点接地。随着频率的升高,地线阻抗中的感抗分量将显著增大;在高频场合,缩短地线长度成了减低地线阻抗的关键。

在精密仪器电子系统中,特别是前置放大电路,若有两个接地点(信号源及后面电路)的话,由于接地电阻不一样,两接地点通常很难获得共同的地电位。通常可以用一个无限大的阻抗把信号源与地隔离。当信号电缆确定一点接地的时候,低频信号线的屏蔽也应该是一点接地;并接到有接地点部分的公共端上实现接地。

除了正确的接地技术,还有屏蔽、平衡、隔离、去耦和滤波等技术,对于抑制干扰也是有效的。具体内容,请参考抗干扰相关书籍。

六 拓展练习

按照本节所述的 OP 静态、动态参数及 OP 数据表单的使用说明,在 LM324、OP07; OPA847、THS3201 这两类芯片中各选一种,认真阅读其表单,说明芯片的特性及使用场景并按顺序以表格的形式列出芯片的各种参数。

对于电压反馈运算放大器和电流反馈运算放大器,其增益带宽积有不同的特性,请查阅资料说明之,并举例说明电流反馈运算放大器的使用电路。