

集成运算放大器应用技巧讲座(二)

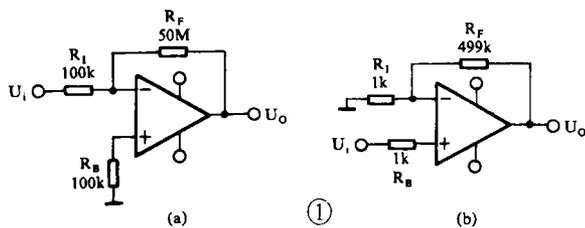
第二讲:运放电路设计技巧

■ 张国华

下面我们通过几个例子来说明运放电路设计中的一些具体技巧问题。

[例1] 假设需设计一交流放大器,要求放大倍数 $A_u=500$ 、输入电阻 $r_i \geq 100\text{k}\Omega$ 。电路设计的第一步是方案选择,可以采用反相输入,也可以采用同相输入。那么,用哪种更好呢?

如采用反相输入形式,电路可如图1(a)所示。为保证输入电阻 $r_i = R_1 \geq 100\text{k}\Omega$,则 R_1 至少取 $100\text{k}\Omega$; 为保证 $A_u=500$,则有 $R_F=500R_1=50\text{M}\Omega$ 。且有 $R_B=R_1//R_F=100\text{k}\Omega//$



$50\text{M}\Omega \approx 100\text{k}\Omega$ 。

如采用同相输入形式,电路可如图1(b)所示。由于同相输入阻抗近似无穷大,因此选多大的 R_1 和 R_B 都可以。例如取 $R_1=1\text{k}\Omega$, 则 $R_F=499\text{k}\Omega$ 即可满足 $A_u=500$, R_B 也近似取 $1\text{k}\Omega$ 即可。

这两种方案有什么优缺点,各适用于什么场合呢?

采用反相输入形式的优点是:运放不管有无输入信号,其两输入端电位始终近似为零。两输入端之间只有 μV 级的差动信号(或称差分信号、差模信号)。而在同相输入形式中,因 $U_{IN+}=U_{IN-}=U_i$, 在 U_i 不为零时运放两输入端间除有极小的差模信号(例如 $U_{IN+}-U_{IN-}=5.00001\text{V}-4.99999\text{V}=20\mu\text{V}$)外,还同时存在较大的共模电压 $(U_{IN+}+U_{IN-})/2=(5.00001\text{V}+4.99999\text{V})/2=5\text{V}$ 。集成运放虽有较高的共模抑制能力,但其共模放大倍数总是大于零的,因此多少总会带来一点误差,这是同相输入的缺点。但本例要求放大器有较高的输入电阻和较大的放大倍数,如采用反相输入形式,则 R_1 和 R_F 至少要取到 $100\text{k}\Omega$ 和 $50\text{M}\Omega$ 。而在运放电路中,通常不希望使用这么大的电阻,因为哪怕是很微小的干扰电流(如随温度而漂移的失调电流)流经大的电阻,也会形成较大的干扰电压,并影响整个电路的工作精度。因此,本例还是以取同相输入形式为好。

第二个常引起初学者困惑的问题是:取 $R_1=1\text{k}\Omega$ 、 $R_F=499\text{k}\Omega$ 。或是 $R_1=1\Omega$ 、 $R_F=499\Omega$ 。 $R_1=100\text{k}\Omega$ 、 $R_F=49.9\text{M}\Omega$ 。都能保证放大倍数 $A_u=500$ 。那么 R_1 和 R_F 是取大一些、还是小一些好呢?前面我们已经分析

了 R_1 、 R_F 过大可能会带来较大的电流漂移干扰,那么, R_1 、 R_F 是不是越小越好呢?答案也是否定的。从减小偏置电流、失调电流及其漂移所造成的误差来看, R_1 、 R_F 取小些好。但在电路中 R_F 、 R_1 同时也是放大器的负载,当输出电压不为零时,运放除向负载提供电流外,也同时向 R_F 支路提供电流。例如,若取 $R_F+R_1=500\Omega$, 则当输出电压 $U_o=10\text{V}$ 时,就将有 20mA 的电流自运放流入 R_F 、 R_1 。而集成运放的最大输出电流通常只有 $\pm 10\text{mA}$ 左右。过重的负载不仅会使运放提前进入饱和、输出动态范围减小,还可能使管耗增大、发热严重,而造成器件的损坏。因此 R_1 和 R_F 的阻值既不宜过大,也不宜过小。在适当的阻值范围内, R_1 、 R_F 取大一些、小一些无所谓,只要其比例关系符合要求,例如取 100Ω 、 $49.9\text{k}\Omega$ 、 $1\text{k}\Omega$ 、 $499\text{k}\Omega$ 等均可。

第三个需要解决的问题是:应如何选取 R_1 、 R_F 、 R_B 的精度等级。在对放大倍数要求不严格的应用场合,如一般音响电路的前置放大级,选取 I 级精度 ($\pm 5\%$) 已足够用,甚至 $49.9\text{k}\Omega$ 的电阻亦可用 $51\text{k}\Omega$ 标称阻值代替。如果对放大倍数要求极严,例如要求 A_u 的精度为 $\pm 1\%$, 则 R_1 、 R_F 至少应选 $\pm 0.5\%$ 的精度才能保证 A_u 的精度要求。而且要查阅 0.5% 精度系列阻值标称值(见本期 40 页附表)是否有你所需的计算阻值、如 100Ω 、 $49.9\text{k}\Omega$ 。如没有,可在保证比例关系的基础上适当增大或减小 R_1 、 R_F 的阻值,直至找出合适的标称系列值;或在相近阻值电阻中用欧姆表挑选合适的阻值使用。

高精度电阻的温度系数也较小,通常在 $100\text{ppm}/^\circ\text{C}$ (ppm 表示某个数值的百万分之一,即 10^{-6}) 以下,这种电阻在温度每变化一度时,其阻值的相对变化量小于其实际值的万分之一 ($100 \times 10^{-6} = 10^{-4}$)。选用低温度系数电阻可以减小放大器因温度变化而产生的输出漂移。

比例器的基本电路虽然只有反相输入、同相输入两种,但只要电路设计上稍加变化,就可以派生出千千万万各具特色的电路来,这也是通用运放应用的巧妙和极具魅力之处。

【例2】 假设需要一个增益为500, 输入电阻 $\geq 100\text{k}\Omega$ 的直流放大器, 且要求输入、输出反相(输入电压为正值时, 输出电压为负)。这里当然应该取反相输入方式。那么, 如何解决反馈电阻高达 $50\text{M}\Omega$ 的问题呢? 大家不妨看看图2电路, 它巧妙地解决了这个难题。

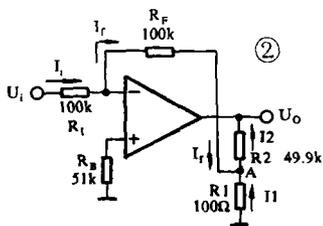
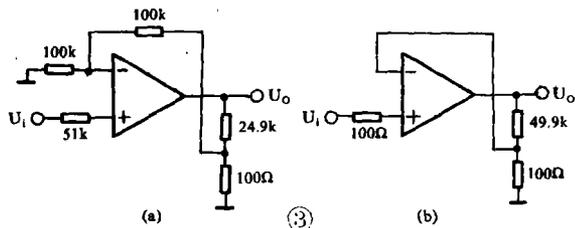


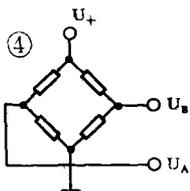
图2电路中反馈电阻 R_F 接至输出端 R_1 、 R_2 分压器中点A。分压比 $R_1 / (R_1 + R_2) = 1 / 500$, 且有 $R_1 \ll R_F$ 。由“虚短”、“虚断”不难分析出 $I_i = U_i / 100\text{k}\Omega = I_r$, 并有 $U_A = -U_i$ 。由A点可列出节点电流方程 $I_1 + I_r = I_2$ 及 $I_1 = (0 - U_A) / R_1 = U_i / 100\Omega$, 故 $I_2 = (U_i / 100\Omega) + (U_i / 100\text{k}\Omega) \approx U_i / 100\Omega$ 。由此可求出:

$U_o = U_A - I_2 R_2 = -U_i - (U_i / 100\Omega) 49.9\text{k}\Omega = -500U_i$ 即图2电路的放大倍数 $A_U \approx - (R_F / R_1) (R_1 + R_2) / R_1$, 在图示参数下 $A_U \approx -500$ 。计算中略去 I_r 虽会造成误差, 但因 $R_F \gg R_1$, I_r 在本例中仅为 I_1 的千分之一, 故这种近似通常是能容许的。若不想略去 I_r , 也可计算出精确的 R_1 、 R_2 分压值, 并通过可变电阻精确调出所需的增益。

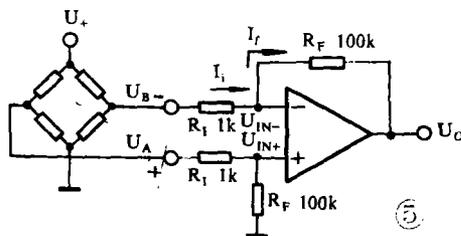
此例中如需输出、输入同相, 可采用同相输入方式如图3所示。读者不妨自行推导其电压放大倍数表达式, 并分析(a)、(b)电路的优缺点。如果你选择的话, 你更喜欢哪一个, 为什么?



前面所举例子中, 输入信号都是单端对地的信号。而实际应用中常常会碰到来自电桥的差动信号, 如各种硅压阻式压力传感器、各种热敏电阻组成的测温电桥等, 示意图如图4所示。这种信号源的特点是: 它



有两个都不接地的输出端, 当电桥平衡、即无信号时, 有 $U_A = U_B \neq 0$; 而当压力或温度变化时, 电桥不平衡, 使 $U_A \neq U_B$ 这里真正有用的信号是 U_A 和 U_B 之间的微小差值, 即 $U_i = U_A - U_B$, 称为差模信号, 我们又常把 U_A 和 U_B 的平均值、即 $U_{CM} = (U_A + U_B) / 2$ 称为共模信号。例如大量使用的硅压阻式压力传感器的共模电压一般为 $3 \sim 5\text{V}$, 而差模信号 U_i 只有 $30 \sim 150\text{mV}$ 。我们希望放大器只放大有用的微弱差模信号、又能抑制很大的无用共模信号。图1、图2电路对



此无能为力, 而图5电路就非常巧妙地解决了这个问题。

【例3】 已知压力传感器在零信号时有 $U_A = U_B = 4\text{V}$ 。在最大压力时有 $U_A - U_B = 100\text{mV}$ 。希望放大器在压力为零时输出 $U_o = 0$; 最大压力时输出 $U_o = +10\text{V}$ 。即要求放大器: 1, 对共模信号 $U_{CM} = (U_A + U_B) / 2 = 4\text{V}$ 不放大, 即共模放大倍数 $A_{UCM} = 0$; 2, 对差模信号放大100倍, 即差模增益 $A_{UD} = U_o / U_i = 10\text{V} / 100\text{mV} = 100$ 。图5电路只要取 $R_F / R_1 = 100$ 即可实现上述要求。

当 $U_A = U_B = 4\text{V}$ 时

由同相端“虚断”, 可求出 $U_{IN+} = U_A R_F / (R_1 + R_F) = 400\text{V} / 101$ 。

由“虚短”, 可得 $U_{IN-} = U_{IN+} = 400\text{V} / 101$ 。

由反相端“虚断”, 可求出 $I_i = (U_B - U_{IN-}) / R_1 = [4\text{V} - (400\text{V} / 101)] / 1\text{K} = 4\text{V} / 101\text{K} = (4 / 101)\text{mA}$ 。

因 $I_i = I_r$, 故有 $U_o = U_{IN-} - I_i R_F = (400 / 101)\text{V} - (4 / 101)\text{mA} \cdot 100\text{K} = 0$ 。说明共模放大倍数 $A_{UCM} = 0 / 4\text{V} = 0$ 。

当压力最大并有 100mV 差模信号时, 有 $U_A = 4.05\text{V}$ 、 $U_B = 3.95\text{V}$ 。它包含 4V 的共模信号和 100mV 的差模信号。同样计算可得:

$$U_{IN+} = \frac{100}{101} 4.05\text{V} = U_{IN-}$$

$$I_i = \frac{3.95\text{V} - \frac{100}{101} 4.05\text{V}}{1\text{K}} = -\frac{6.05}{101}\text{mA} = I_r$$

式中负号说明此时 I_i 、 I_r 的实际流向已与图5所示相

反。

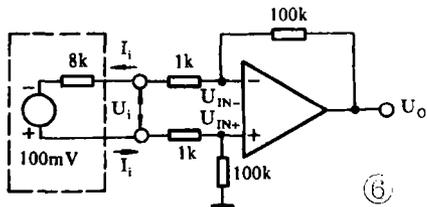
$$U_o = U_{IN-} - I_1 R_F = \frac{100}{101} 4.05 - \left(\frac{-6.05}{101} \right) 100 = \frac{405}{101} + \frac{605}{101} = \frac{1010}{101} = 10V$$

以上计算说明图 5 电路在放大差模信号的同时，抑制了共模信号。上述结论的推出，是在图 5 电路是“理想”的（即两只 R_1 、两只 R_F 都绝对相等；运算放大器也是“理想”器件，具有真正的“虚短”、“虚断”特性）条件下得到的。而通过实际测试就会发现，放大器对共模信号的抑制能力并不是完美无缺的。在差模信号为零、仅仅改变共模信号时，放大器的输出电压并不总是为零，而是随 U_{CM} 的变化而变化。这说明实际放大器对共模信号也有一定的放大能力，即 $A_{UCM} \neq 0$ 。我们通常就将该放大器对有用差模信号的放大倍数 A_{UD} 与对无用共模信号放大倍数 A_{UCM} 的比值，称为共模抑制比 (CMRR)，用来衡量这种放大器的优势。对图 5 电路，若要提高其共模抑制能力，除应选用高共模抑制比的集成运放外，选用严格对称的电阻是非常重要的。通常应选用高精度电阻，必要时可采用挑选配对的办法以提高电阻的匹配精度。

图 5 电路的另一个缺点是它的差模输入电阻 $r_i = 2R_1$ 只有 $2k\Omega$ (增大 R_1 虽能提高输入电阻，但随之增大的 R_F 也是我们所不希望的)，而一般的电桥式传感器均有一定的内阻，且其内阻会随环境温度而变。例如硅压阻式压力传感器的电桥内阻约 $5 \sim 10k\Omega$ ，并有约 $0.22\%/^{\circ}C$ 的温度系数，如果与其接口的放大器内阻过小，对传感器的工作是极为不利的，这是因为：

1. 任何传感器都希望只输出电压信号、而不希望放大器向它索取电流。因为信号电流流过传感器对传感器的工作将造成电、磁、热等的干扰，并影响传感器的线性度、迟滞和温漂，因此都希望与之配接的放大器具有尽可能高的输入电阻。

2. 假定信号源的内阻为 $8k\Omega$ 如图 6 所示。由“虚短”有 $U_{IN+} = U_{IN-}$ ，则信号输入回路总电阻为 $8k\Omega +$



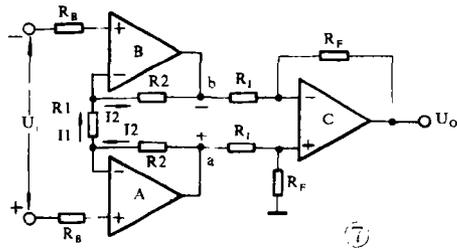
$1k\Omega + 1k\Omega = 10k\Omega$ 。100mV 的信号将产生 $10\mu A$ 信号电流、并在内阻上造成 80mV 的压降，而真正送到放大器输入端的差模信号 U_i 只剩下 20mV，即有 80% 的信号被信号源内阻“吃”掉了。若放大器的内阻趋于无穷大，使信号电流趋于零，不仅对传感器干扰小，且

100mV 信号可全部作为 U_i 送入放大器。

3. 若输入电阻小的影响仅仅是信号被衰减倒不可怕，只要相应提高放大器的增益即可补偿过来。讨厌的是在压力不变、传感器信号源电势 100mV 不变的情况下，仅仅温度变化致使传感器内阻变化时，由图 6 可看出放大器输入端电压 U_i 将随温度变化，并造成电路的温漂而大大降低了系统的精度。

综上所述，具有高输入阻抗的差动放大器才是我们更感兴趣的。图 7 所示由三个集成运放组成的放大器就是具有这种特点的电路。

运放 A、B 组成差动输入、差动输出的第一级放大器。A、B 均采用同相输入方式。由于“虚断”，故有极高的输入电阻（可认为近似等于无穷大）。



由“虚断”及“虚短”可看出 R_1 两端压降即为输入电压 U_i ，并有 $I_1 = U_i / R_1$ 。再由“虚断”及节点电流定律有 $I_2 = I_1$ ，据此可求出第一级差动放大器输出电压 $U_{ab} = I_1 (R_2 + R_1 + R_2) = U_i (R_1 + 2R_2) / R_1$ 及差动放大倍数 $A_{U1} = U_{ab} / U_i = (R_1 + 2R_2) / R_1$ 。

第一级差放输出信号 U_{ab} 再送入与图 5 相同的第二级差放电路，且 $U_o = U_{ab} R_F / R_1$ 。这种由三个运放组成的电路因大量应用于仪表测量系统，故常称之为“仪表放大器”或“仪用放大器”，其增益 $A_U = \left(\frac{R_1 + 2R_2}{R_1} \right) \left(\frac{R_F}{R_1} \right)$ 。这种电路主要靠第二级

差放电路抑制共模信号。因为在差动信号 $U_i = 0$ 而具有共模信号时，由“虚短”、“虚断”可推出第一级差放输出端 a、b 将与输入端等电位，即共模信号将 1:1 地送到 a、b 端。因此设计这种电路时应遵循如下原则：

1. 运放 C 应选用高共模抑制比 (K_{CMR}) 的运放。
2. 运放 A、B 的参数（主要指失调电压 U_{I0} 、失调电流 I_{I0} 及其漂移 α_{UI0} 、 α_{II0}) 应尽可能对称。
3. 所有匹配电阻阻值和温度系数应尽可能相等。
4. 所需的电压增益应尽量由第一级差放承担，以提高仪表放大器的共模抑制比。

掌握了集成运放电路的基本分析和计算方法，再根据应用电路的具体要求，就可以灵活地选择不同输入方式和不同结构的电路，并计算出所需电阻的阻值及精度要求。

附表 常用精度等级电阻标称阻值系列

0.5%	1%	2%	5%	10%	20%	0.5%	1%	2%	5%	10%	20%	0.5%	1%	2%	5%	10%	20%	0.5%	1%	2%	5%	10%	20%	
100	100	100	1.0	1.0	1.0	178	178	178				316	316	316				562	562	562	5.6	5.6		
101						180			1.8	1.8		320						659						
102	102					182	182					324	324					576	576					
104						184						328						583						
105	105	105				187	187	187				332	332	332	3.3	3.3	3.3	590	590	590				
106						189						336						597						
107	107					191	191					340	340					604	604					
109						193						344						612						
110	110	110	1.1			196	196	196				348	348	348				619	619	619	6.2			
111						198						352						626						
113	113					200	200		2.0			357	357					634	634					
114						203						361			3.6			642						
115	115	115				205	205	205				365	365	365				649	649	649				
117						208						370						657						
118	118					210	210					374	374					665	665					
120			1.2	1.2		213						379						673						
121	121	121				215	215	215				383	383	383				681	681	681	6.8	6.8	6.8	
123						218						388						690						
124	124					221	221		2.2	2.2	2.2	392	392		3.9	3.9		698	698					
126						223						397						706						
127	127	127				226	226	226				402	402	402				715	715	715				
129						229						407						723						
130	130		1.3			232	232					412	412					732	732					
132						234						417						741						
133	133	133				237	237	237				422	422	422				750	750	750	7.5			
135						240			2.4			427						759						
137	137					243	243					432	432		4.3			768	768					
138						246						437						777						
140	140	140				249	249	249				442	442	442				787	787	787				
142						252						448						796						
143	143					255	255					453	453					806	806					
145						258						459						816						
147	147	147				261	261	261				464	464	464				825	825	825	8.2	8.2		
149						264						470			4.7	4.7	4.7	835						
150	150		1.5	1.5	1.5	267	267					475	475					845	845					
152						271			2.7	2.7		481						856						
154	154	154				274	274	247				487	487	487				866	866	866				
156						277						493						876						
158	158					280	280					499	499					887	887					
160			1.6			284						505						898						
162	162	162				287	287	287				511	511	511	5.1			909	909	909	9.1			
164						291						517						920						
165	165					294	294					523	523					931	931					
167						298						530						942						
169	169	169				301	301	301	3.0			536	536	536				953	953	953				
172						305						542						965						
174	174					309	309					549	549					976	976					
176						312						556						988						