

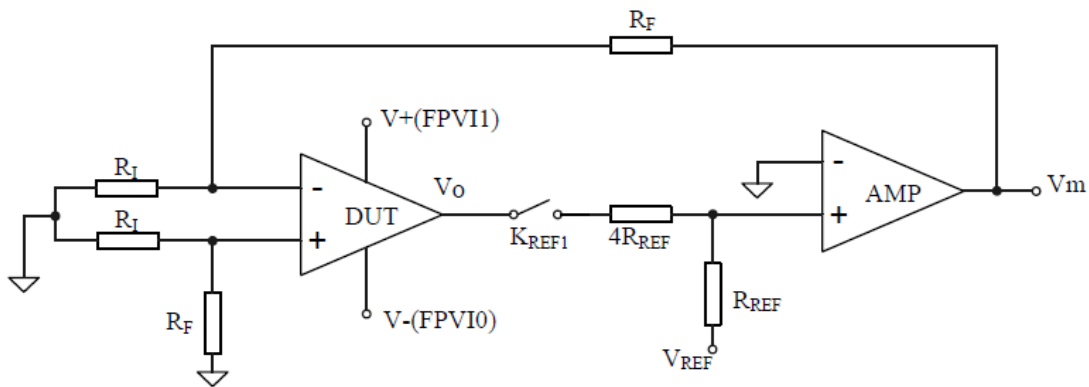
运放测试之 AVO、PSRR、CMRR

在这个没有全面复工的特殊时刻，我们继续今年一月份的话题，讲一讲运算放大器的测试。这两期我们将介绍放大倍数 AVO，电源电压抑制比 PSRR，共模抑制比 CMRR，通过这四期内容，我们就把运放的闭环参数介绍完了。说到这里，先来回顾一下前两期的内容：

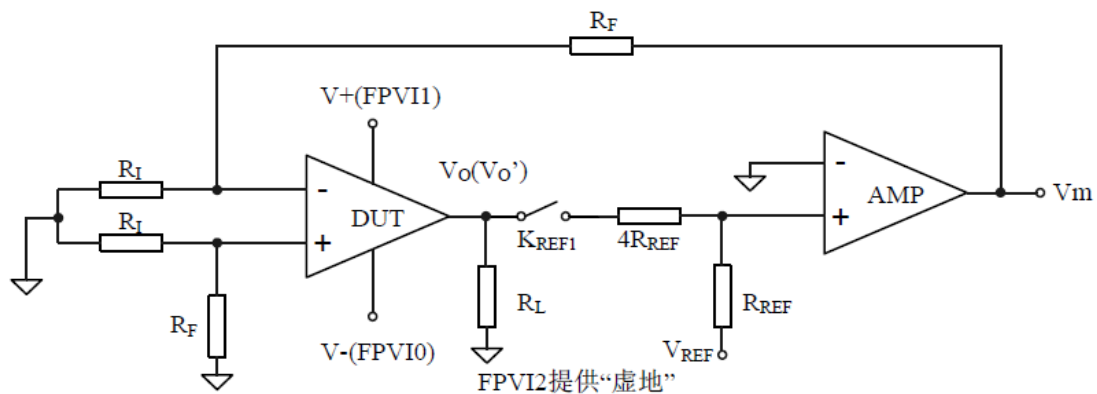
第一期我们介绍了运放最重要的参数——输入失调电压 VOS，明确了测试运放闭环参数应该首先测试 VOS，并通过软件示波器或其他方法确保 VOS 测试数据真实可靠；

第二期我们在 VOS 的基础上，介绍了运放输入端的另外一个参数——输入失调电流，输入失调电流测试需要注意采样电阻的选择，如果遇到 pA 级别的电流，需要选择电容档位测试；

闭环参数基本原理图如下（VOS）：



本期我们讲的第一个参数是放大倍数 AVO，这个参数的测试原理图为：



可以看到，对比 VOS 的原理图，放大倍数 AVO 仅仅在运放的输出端增加了一个 R_L ， R_L 是可以在编程界面选择的，阻值为 620、2K、10K、15K 和 100K，也可以选择 none 断开 R_L 。

从 AVO 参数的说明中，我们可以理解这个参数的测试就是进行了两次 VOS 的测试，只不过测试条件发生了一些改变：

- 1、两次测试 VOS 都加入了 R_L 负载电阻；

2、两次测试 VOS 时，输出不再是 0V 或者固定某个值，而是器件可以输出范围内的两个值。

比如一个±15V 的器件，经常器件手册上会要求 AVO 的测试为±10V，如果 AVO 参数没有输出的条件，我们可以参考器件 Vo+和 Vo-的范围，选择一个合理的数值。

V _{OM}	Peak output voltage	R _L ≥ 10 kΩ	25°C	±12	±13	±12	±13	V
		R _L ≥ 2 kΩ		±11.5	±12.8	±11.5	±12.8	
		R _L ≥ 1 kΩ		±12		±12		
		R _L ≥ 2 kΩ	0°C to 70°C	±11	±12.6	±11	±12.6	
A _{VO}	Large-signal differential voltage amplification	V _{CC} = 15 V, V _O = 1.4 V to 11.4 V, R _L ≥ 500 kΩ	25°C	100	400	400		V/mV
		V _O = ±10, R _L = 2 kΩ	25°C	120	400	120	400	
			0°C to 70°C	100	400	100	400	

就像上面这个 OP07 的参数手册，AVO 要求两个条件下测试：

1、第一个描述为：“Vcc=15V，Vo=1.4 to 11.4V RL>500K 欧姆”。这里的意思是电源为单电源供电，负载电阻很大可以选择 none，器件输出为 1.4V 和 11.4V，编程参考如下：

(2)AVO	<input checked="" type="checkbox"/>		T5	AVO	100		V/mV
(3)CMRR	<input checked="" type="checkbox"/>						
	<input checked="" type="checkbox"/>		T6	CMRR	100		dB

条件标识	条件值	条件单位	描述
V+	15	V	器件正电源电压 (FPVI1)
V-	0	V	器件负电源电压 (FPVI0)
VO1	1.4	V	被测运放输出电压
VO2	11.4	V	被测运放输出电压
g_loop	×10000	倍	环路增益
loop_adjust	无		环路增益补偿电容 (默认选“无”)
rload	none		负载电阻
opl_adjust	1000pF		辅助运放调节 (默认选“1000pF”)
delay_time	50	ms	测量延时

当然，环路增益、两个补偿电容的选择，还有测试延时是需要根据实际情况选择的，原则是尽量和 VOS 参数一致。

2、第二个描述很常见，“Vo=±10V，RL=2K 欧姆”，编程参考如下：

(2)AVO	<input checked="" type="checkbox"/>		T5	AVO	120		V/mV
(3)CMRR	<input checked="" type="checkbox"/>						
	<input checked="" type="checkbox"/>		T6	CMRR	100		dB

条件标识	条件值	条件单位	描述
V+	15	V	器件正电源电压 (FPVI1)
V-	-15	V	器件负电源电压 (FPVI0)
VO1	10	V	被测运放输出电压
VO2	-10	V	被测运放输出电压
g_loop	×10000	倍	环路增益
loop_adjust	无		环路增益补偿电容 (默认选“无”)
rload	2K		负载电阻
opl_adjust	1000pF		辅助运放调节 (默认选“1000pF”)
delay_time	50	ms	测量延时

但如果器件手册没有描述 $V_O = \pm 10V$ ，我们可以在器件合理的输出范围内选择一组输出电压，并确保一定的余量，也就是参考这一部分的内容：

V_{OM}	Peak output voltage	$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	25°C	± 12	± 13	± 12	± 13	V
		$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$		± 11.5	± 12.8	± 11.5	± 12.8	
		$R_L \geq 1\text{ k}\Omega$	0°C to 70°C	± 12		± 12		
		$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$		± 11	± 12.6	± 11	± 12.6	
A_{VO}	Large-signal differential voltage amplification	$V_{CC} = 15\text{ V}$, $V_O = 1.4\text{ V to } 11.4\text{ V}$, $R_L \geq 500\text{ k}\Omega$	25°C	100	400	400		V/mV
		$V_O = \pm 10$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$	25°C	120	400	120	400	
			0°C to 70°C	100	400	100	400	

下面划重点：

上面例子中的 A_{VO} 测试结果，可以通过两次 VOS 的测试进行验证。

第一个 VOS ，输出电压设置为 10V，负载 2K 欧姆：

函数名	<input checked="" type="checkbox"/> 测试	参数序号	参数名	标识	下限	上限	单位
(0)VOS	<input checked="" type="checkbox"/>						
	<input checked="" type="checkbox"/>	T0	(0.0)VOS	VOS	-100	100	μV
(1)VOS	<input checked="" type="checkbox"/>						
	<input checked="" type="checkbox"/>	T1	(1.0)VOS	VOS	-100	100	μV
(2)IB	<input checked="" type="checkbox"/>						
	<input checked="" type="checkbox"/>	T2	(2.0)IB2	IB+	-80	80	nA
	<input checked="" type="checkbox"/>	T3	(3.0)IB1	IB-	-80	80	nA

条件	条件标识	条件值	条件单位	描述
vdd	V+	15	V	器件正电源电压（FPV11）
vss	V-	-15	V	器件负电源电压（FPV10）
VO	VO	10	V	被测运放输出电压
g_loop	g_loop	$\times 10000$	倍	环路增益
loop_adjust	loop_adjust	无		环路增益补偿电容（默认选“无”）
rload	rload	2K		负载电阻
opl_adjust	opl_adjust	1000pF		辅助运放调节（默认选“1000pF”）
delay_time	delay_time	10	ms	测量延时

第二个 VOS ，输出电压设置为 -10V，负载 2K 欧姆：

函数名	<input checked="" type="checkbox"/> 测试	参数序号	参数名	标识	下限	上限	单位
(0)VOS	<input checked="" type="checkbox"/>						
	<input checked="" type="checkbox"/>	T0	(0.0)VOS	VOS	-100	100	μV
(1)VOS	<input checked="" type="checkbox"/>						
	<input checked="" type="checkbox"/>	T1	(1.0)VOS	VOS	-100	100	μV
(2)IB	<input checked="" type="checkbox"/>						
	<input checked="" type="checkbox"/>	T2	(2.0)IB2	IB+	-80	80	nA
	<input checked="" type="checkbox"/>	T3	(3.0)IB1	IB-	-80	80	nA

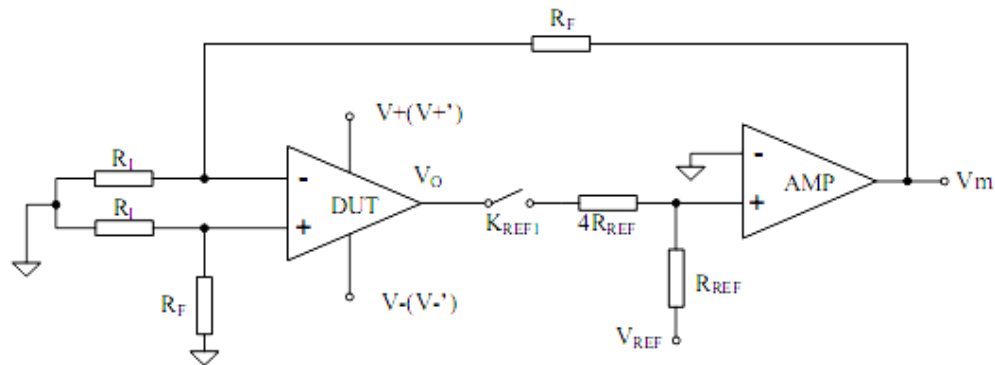
条件	条件标识	条件值	条件单位	描述
vdd	V+	15	V	器件正电源电压（FPV11）
vss	V-	-15	V	器件负电源电压（FPV10）
VO	VO	-10	V	被测运放输出电压
g_loop	g_loop	$\times 10000$	倍	环路增益
loop_adjust	loop_adjust	无		环路增益补偿电容（默认选“无”）
rload	rload	2K		负载电阻
opl_adjust	opl_adjust	1000pF		辅助运放调节（默认选“1000pF”）
delay_time	delay_time	10	ms	测量延时

我们假设，第一个 VOS 测试结果为 25 μV ，第二个 VOS 测试结果为 15 μV ，那么同等条件下的放大倍数 A_{VO} 就应该 $= 20V / 10\mu\text{V} = 2000V/mV$ ，换算单位为 dB 后约等于 126dB。

上面仅仅是一个假设值，在实际测试时，如果不相信 AVO 测试的真实性，如出现了 AVO 测试偏低的情况，我们就可以按照上述方法通过两个 VOS 来验证，结合 8207S 软件示波器功能还能逐一查看两次 VOS 的波形，从而辅助我们判断 AVO 测试的正确性。

所以按照放大倍数 AVO 的测试原理和验证方法，电源电压抑制比也很容易验证了。

PSRR 参数测试原理图如图 3-6-1 所示：



需要注意一下，绝大多数情况，电源电压抑制比已经不再分为正电源电压抑制比和负电源电压抑制比了，直接根据器件手册的条件，测试 PSRR 就可以了：

k_{SVS}	Supply-voltage sensitivity ($\Delta V_{IO}/\Delta V_{CC}$)	$V_{CC+} = \pm 3\text{ V to } \pm 18\text{ V}, R_S = 50\ \Omega$
-----------	---	--

根据 OP07 的器件手册，这个参数就是电源电压抑制比，这里要提醒一下，我们讲述的这些参数英文名称，在各个厂家的器件手册中，可能描述的都不太一样，比如上面这个电源电压抑制比就叫做： K_{SVS} 。我们只能通过参数测试条件： $V_{CC+} = \pm 3\text{V to } \pm 18\text{V}$ ，判断这就是电源电压抑制比。所以仅仅通读编程手册、或者参加了我们的培训或者看了我们的推送是远远不够的，大量的器件手册的阅读和器件编程经验才是最重要的财富。

同时，小编也在这里向各位寻求帮助，条件中的 $R_S=50$ 欧姆这个条件，我确实没有找到任何相关的依据，如果您知道这个 R_S 的意义，并且能够提供相关的依据的话，欢迎您告诉我们，您可以在本文留言或者联系华峰小微或任何一个我们的工作人员，谢谢！

下图就是 OP07 的电源电压抑制比编程界面，去验证 PSRR 是否正确，可以编写两个 VOS，第一个 VOS 使用 $\pm 3\text{V}$ 测试，第二个 VOS 使用 $\pm 18\text{V}$ 测试，要注意计算 PSRR 是应该使用电源电压的整个变化除以 VOS 的变化：

$$\text{电源电压抑制比 PSRR} = ((V_{+}' - V_{+}) + (V_{-} - V_{-}')) / (VOS1 - VOS2)。$$

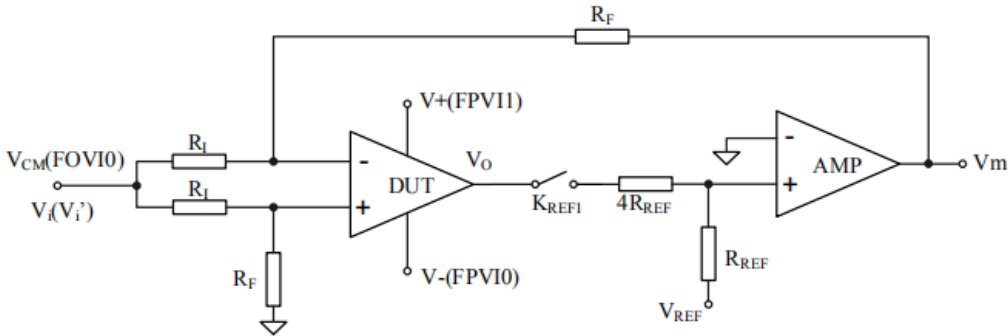
条件	条件标识	条件值	条件单位	描述
vdd1	V+	3	V	器件正电源电压（FPVI1）
vdd2	V+	18	V	器件正电源电压（FPVI1）
vss1	V-	-3	V	器件负电源电压（FPVI0）
vss2	V-	-18	V	器件负电源电压（FPVI0）
VO	VO	0	V	被测运放输出电压
g_loop	g_loop	×10000	倍	环路增益
loop_adjust	loop_adjust	无		环路增益补偿电容（默认选“无”）
rload	rload	none		负载电阻
opl_adjust	opl_adjust	1000pF		辅助运放调节（默认选“1000pF”）
delay_time	delay_time	50	ms	测量延时

放大倍数 AVO，电源电压抑制比 PSRR 先介绍到这里，下期我们介绍最复杂的参数，共模抑制比 CMRR。

继续上期的内容，CMRR 这参数复杂因为它有两个方法：共模输入法和变电源法，我们先讲解更好理解的共模输入法：

共模抑制比的参数定义有点难懂：在规定的电源电压和输出电压范围内，差模电压增益与共模电压增益之比。但是共模输入法的原理图就很好理解了：

CMRR 参数（共模输入法）测试原理图如图 3-5-1 所示：



对比 VOS 的原理图，这里改变的就是输入的部分，由原来输入接地改为了共模电压。

这里有必要解释一下共模电压和差模电压是什么意思，举个简单的例子：

运放的两个输入端，一端给 10V 电压，另一端给 10.1V 电压，可以理解为 10V 是共模电压，0.1V 是差模电压，我们知道运算放大器根据输入两端的差值来进行放大，但同样的 0.1V 差模电压在 0V 的共模电压下（运放输入 0V 和 0.1V）和 10V 的共模电压下，对于器件来说是不一样的，很多器件能够承受的共模电压有一定的限制，手册上往往也可以找到：

V_{ICR}	Common-mode input voltage range	25°C	±13	±14
		0°C to 70°C	±13	±13.5

请格外注意，这个参数不是用来测试的！这是厂家告诉用户器件共模电压的范围，提醒用户不要超过这个范围使用。因此，OP07 这个产品的共模抑制比这个参数使用了 ±13V 的共模电压测试 CMRR：

CMRR	Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = \pm 13\text{ V}, R_S = 50\ \Omega$	25°C	100	120
			0°C to 70°C	97	120

题外话：

我们不是一次被问到或者被要求测试类似电源电压范围这样的参数了，必须说明这样的参数写在手册上的目的就是告诉使用者器件应该施加多大的电压范围，比如运放电源电压范围最小值±3V 至最大值±18V。

1. 这无法测试，因为当你让器件在±18.1V 正常工作了，并不代表实测器件电源电压范围超过了最大值±18V，器件 fail
2. 并且当你这么去做的时候，器件是有可能损坏的。
3. 因此这样的参数为施加的条件，不是需要测试的值。

回到共模抑制比的共模输入法，这个很简单，参数编写时和 VOS 一样，区别是增加了两个输入共模电压：

(4)CMRRi	<input checked="" type="checkbox"/>								
	<input checked="" type="checkbox"/>	T7	CMRRi						dB
(5)PSRR	<input type="checkbox"/>								
条件标识	条件值	条件单位	描述						
V+	15	V	器件正电源电压 (FPV11)						
V-	-15	V	器件负电源电压 (FPV10)						
VCM1	13	V	共模输入电压 (FOV10)						
VCM2	-13	V	共模输入电压 (FOV10)						
VO	0	V	被测运放输出电压						
g_loop	×1000	倍	环路增益						
loop_adjust	无		环路增益补偿电容 (默认选 “无” ...						
rload	none		负载电阻						
opl_adjust	1000pF		辅助运放调节 (默认选 “1000pF...)						
delay_time	10	ms	测量延时						

所以我们仍旧可以使用两次 VOS 的方法验证共模输入法测试的 CMRR 是否正确，使用共模电压的变化除以两次失调电压的变化，我们在 8207S 的新运放环路中增加了可以修改运放环共模电压的部分，当然需要在高级条件下才可以看到，这部分的使用请参考编程手册第 3 页的内容。

VCM	0	V	共模输入电压 (FOV10)
VCM_VRng	±20V		Vcm电压量程
VCM_IRng	±10mA		VCM电流量程
VCM_Clamp1	10	mA	VCM电流上限箝位
VCM_Clamp2	-10	mA	VCM电流下限箝位

下面划重点：

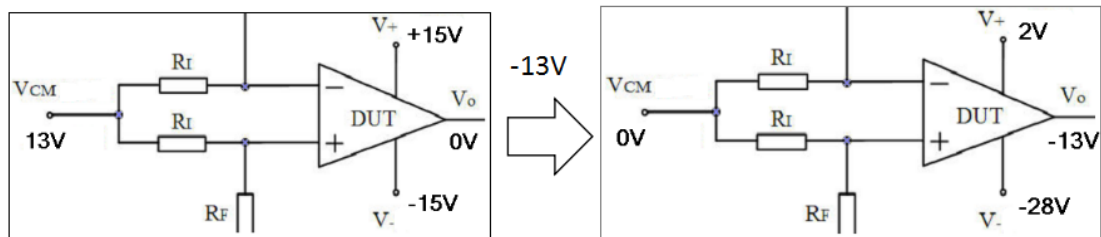
其实我们很少使用共模输入法测试 CMRR，所以也就很少用两次 VOS 的测试验证共模输入法测试的结果。因为 CMRR 更准确和稳定的方法是变电源法。

1. 变电源法不仅仅能够用在共模抑制比的测试，运算放大器能够使用变电源方法工作

是因为运放为 5 端器件：两个输入，两个电源，一个输出——没有 AGND。

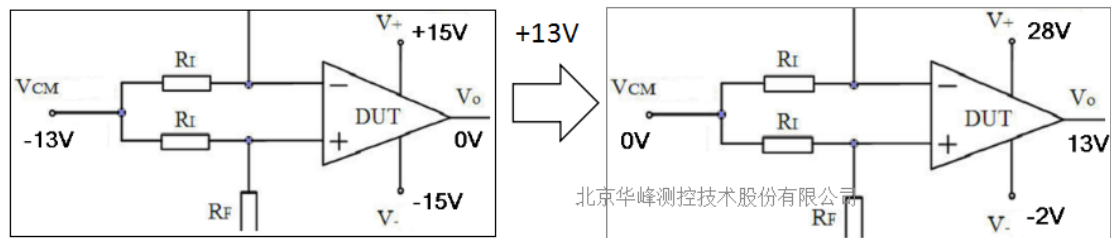
2. 所以当运算放大器满足上述条件时，就可以将器件的整体电平同时增加或者减小相同的电压，而对于运算放大器来讲，什么都没有改变。这就像等式两边同时加减相同的数一样，等式依旧成立。
3. 在测试 CMRR 时，我们通过变电源，将器件的输入端变为 0V，从而变为接地。这样器件的电源电压和输出电压都会随之改变，而这种变化和共模输入法相比，对于器件什么都没有发生，完全等效。

于是我们就有了如下的过程：



做一个形象的比喻，器件从 13 层楼跑到了 0 层楼测试，器件没有发生任何变化，我们可以看一下，改变之后器件的正负电源之间仍旧是 30V（2V 和 -28V），输出仍旧是两个电源中间值（-13V），共模电压和其他几个电压之间的差没有变化。

同样 $V_{CM} = -13V$ 时，也可以做同样的变电源：



下面是重点中的重点，如何正确的使用变电源法测试 CMRR：

- a) 确认器件应该在哪个两个共模电压下测试共模抑制比。
- b) 按照共模法将 V_{CM} 、 V_+ 、 V_- 、 V_o 的两种情况写下来。
- c) 经过两次变电源，将两个 V_{CM} 变为 0，从而得到相应的电源电压和输出电压。
- d) 务必不要口算，用一张草稿纸，计算这个过程，然后填写入 CMRR 变电源法的条件中。
- e) PGS 编程界面中，红色的 2V，-28V，-13V 为第一组，绿色的 28V，-2V，13V 是第二组。

V+	2	V	器件正电源电压 (FPVI1)
V+	28	V	器件正电源电压 (FPVI1)
V+_VRng	±50V		VDD电压量程
V+_IRng	±100mA		VDD电流量程
V+_Clamp1	100	mA	VDD电流上限档位
V+_Clamp2	-100	mA	VDD电流下限档位
V-	-28	V	器件负电源电压 (FPVI0)
V-	-2	V	器件负电源电压 (FPVI0)
V-_VRng	±50V		VSS电压量程
V-_IRng	±100mA		VSS电流量程
V-_Clamp1	100	mA	VSS电流上限档位
V-_Clamp2	-100	mA	VSS电流下限档位
VO1	-13	V	被测运放输出电压
VO2	13	V	被测运放输出电压
measure_irng	±10mA		辅助运放输出测量源电流量程
measure_vrng	±10V		辅助运放输出测量源电压量程
g_loop	×10000	倍	环路增益
loop_adjust	1000pF		环路增益补偿电容 (默认选 "无" ...
rload	none		负载电阻
opl_adjust	1000pF		辅助运放调节 (默认选 "1000pF...
delay_time	30	ms	测量延时
r1/r2	1/4		输出端分压电阻比例

f) 同时要注意 VDD 和 VSS 的量程是否正确，本例中因为出现了 28V，所以选择了 50V 档位。

综上所述，变电源法测试运放的 CMRR 确实需要一定的时间理解和实践，有些人可能觉得这样的编程方法太复杂了，这个可以理解。

谈谈我个人的感受，多数运放是一个五端器件，变电源法是运放测试普遍可以使用的方法，并不局限于共模抑制比，共模抑制比的变电源法仅仅是一个应用。当你熟练地掌握了这种方法，在遇到很多器件手册的特殊要求时，可以通过变电源法游刃有余的解决这些问题，这是最重要的。

比如一个器件的输入失调电压测试要求如下：

$$V+=5V, V-=0V, V_{cm}=V+/2, V_o=V+/2$$

使用 STS2107、STS8105 和 STS8205 的老款 OPL 运放环，无法设置 V_{cm} ，运放环路输入固定接地，此时就可以利用变电源法变为： $V+=2.5V$ ， $V-=2.5V$ ， $V_o=0V$ 测试。

当你熟练地掌握了运放参数的测试，并逐渐加深这些参数的理解，从中可以学习到很多的测试方法，这些测试方法不光可以应用到运算放大器的测试，还可以应用到其他模拟器件的测试中，这是一个逐渐积累的过程。

我们运放闭环参数的内容就告一段落了，如果您能够不止一次的读到这里，并且真的动手去做了，恭喜您，模拟测试的这扇大门已经向您敞开了！