

今天我们继续聊聊运放的测试，首先我们来复习一下上一期的内容：

- 第一，测试运放最重要的参数就是输入失调电压  $V_{os}$ ，应首先测试输入失调电压，并确保测试数据是真实的，再进行其他闭环参数的测试。
- 第二，如果运放输入失调电压都没有测试，或者测试数据不正确，讨论其他闭环参数都是没有意义的。
- 第三，如果第一和第二都不能理解或者不能接受，今天我们所讲述的话题就没有任何意义了，因为我们今天将介绍运放的另外一个重要的闭环参数——输入偏置电流—— $I_B$ 。

如果大家对大学《模电》中运放部分还能有一些记忆的话，那么请尝试唤醒它们：找一找是否有这样的概念：“流入运放两个输入的电流为零”

很可惜，在现实世界里，运放的两个输入端是有电流的，这个电流大到  $\mu A$ ，小到  $pA$  甚至更小，我们需要测试这个电流。

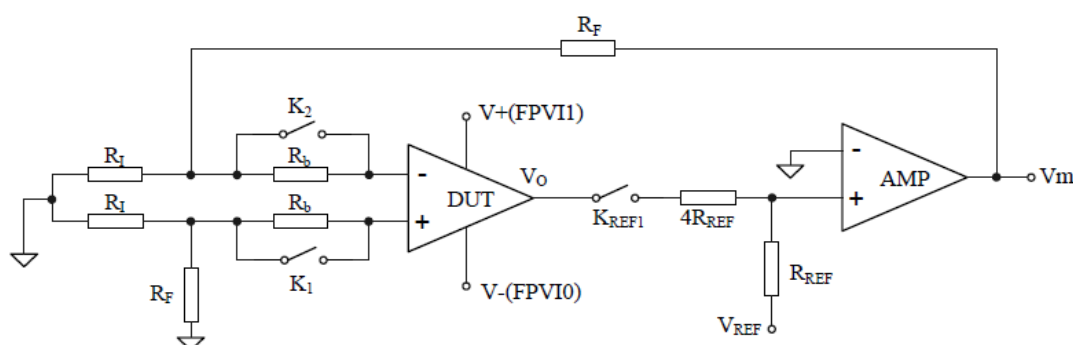
$I_{B+}$ ：流入（出）运算放大器同相输入端的电流

$I_{B-}$ ：流入（出）运算放大器反相输入端的电流

这里没有规定电流一定是流入器件或者是流出器件的，因为这两种情况都是正确的，如果参数手册上写着运放  $I_B$  的判据为最大值  $1nA$ ，那么意味着  $I_B$  的测试结果应该在  $-1nA$  和  $1nA$  之间。如果测试值为负数，意思是  $I_B$  流出器件，如果测试值为正数，意思是  $I_B$  流入器件，都是正确的。

讲到这里突然意识到输入失调电压  $V_{os}$  的正负问题在上一期没有讲到，这里做个补充，和  $I_B$  一样， $V_{os}$  的判据如果是  $1mV$  最大值，意味着测试结果应该在  $-1mV$  和  $1mV$  之间， $V_{os}$  的正负仅仅表示同相输入端和反相输入端哪个电压更高，两种情况都是正确的。

测试这样的两个电流，我们无法将“电流表”串联到运放的输入端测试，而是使用了电阻采样法：

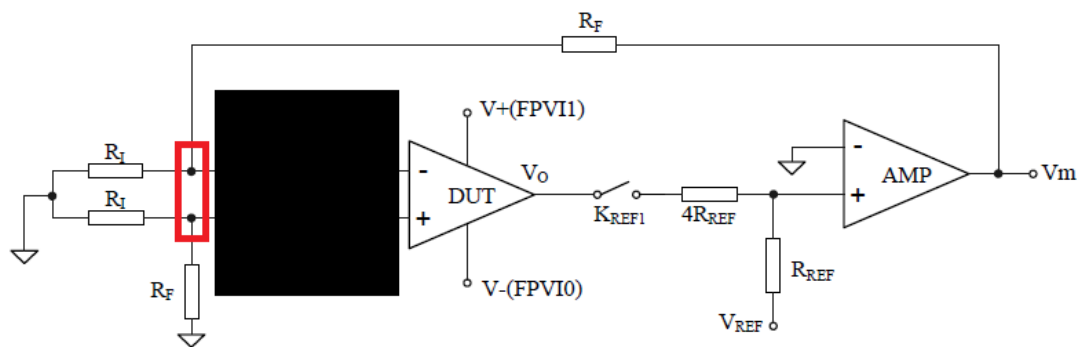


在输入失调电压的线路图上，做了小小的更改，加入了两个采样电阻  $R_b$ 。

如果上图的继电器 K1 和 K2 都闭合，也就是把两个  $R_b$  短路，那么上图就是测试输入失调电压的电路。

为了测试  $I_{B+}$ ，我们保持 K2 闭合，断开 K1，这样  $I_{B+}$  就会流过  $R_b$  从而产生一个压降，我们将这个压降叫做  $\Delta V_{B+}$ 。

假设不知道产生了这样一个  $\Delta V_{B+}$ ，就像下面的这个图一样，黑色部分看不到，那么从  $V_m$  测试到的电压除以环路增益就会被我们认为是输入失调电压  $V_{os}$ ，也就是红框中两个点的电压之差。



所以此时测试到的失调电压 ( $V_m$  除以环路增益) 应该等于：器件真正的  $V_{os}$  加上  $R_b$  上产生的压降  $\Delta V_{B+}$ 。

闭合 K1 和不闭合 K1，测试两次  $V_{os}$ ，之差就是  $\Delta V_{B+}$ ，除以  $R_b$ ，就是  $I_{B+}$ 。

如果看到这里完全理解了，请继续，如果没有，不要继续，返回前文再看一遍。

器件  $I_{B+}$  和  $I_{B-}$  之间的差值，为失调电压  $I_{os}$ 。器件  $I_{B+}$  和  $I_{B-}$  的平均值，为参数  $I_B$ 。在器件手册上，往往只能找到  $I_B$  和  $I_{os}$  的判据， $I_B$  的判据就代表  $I_{B+}$  和  $I_{B-}$  的判据，而且这里再次强调，务必理解判据的真实意义，注意判据的正负号。

下面我们介绍一下 STS8207S 运放环路是如何测试  $I_B$  的：

在  $I_B$  函数中，一共有四个参数，分别是  $I_{B+}$ 、 $I_{B-}$ 、 $I_B$  和  $I_{os}$ 。这四个参数是一体的，一次测试输出四个测试结果，四个参数共用一套编程条件，编程条件在  $I_B$  这个参数下面，编程条件只比输入失调电压多了一个选项，就是“ $I_B$  采样电阻  $r_b$ ”。这个电阻有三个选项可以选择：20K、200K 和 2M。

(1)IB	<input checked="" type="checkbox"/>							
	<input checked="" type="checkbox"/>	T1	+	(1.0)IB2	IB+	-12	12	nA
	<input checked="" type="checkbox"/>	T2	+	(1.1)IB1	IB-	-12	12	nA
	<input checked="" type="checkbox"/>	T3	+	(1.2)IB	IB	-12	12	nA
	<input checked="" type="checkbox"/>	T4	+	(1.3)IOS	IOS	-6	6	nA
(2)AVO	<input checked="" type="checkbox"/>							
	<input checked="" type="checkbox"/>	T5	+	(2.0)AVO	AVO	120		V/V

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)
VO	0	V	被测运放输出电压
g_loop	×10000	倍	环路增益
loop_adjust	1000pF		环路增益补偿电容 (默认选 "无" ...
opl adjust	1000pF		辅助运放调节 (默认选 "1000pF...
rb	20K		IB采样电阻
rload	none		负载电阻
delay_time	20	ms	测量延时

下面开始画重点：如果选择 Rb？

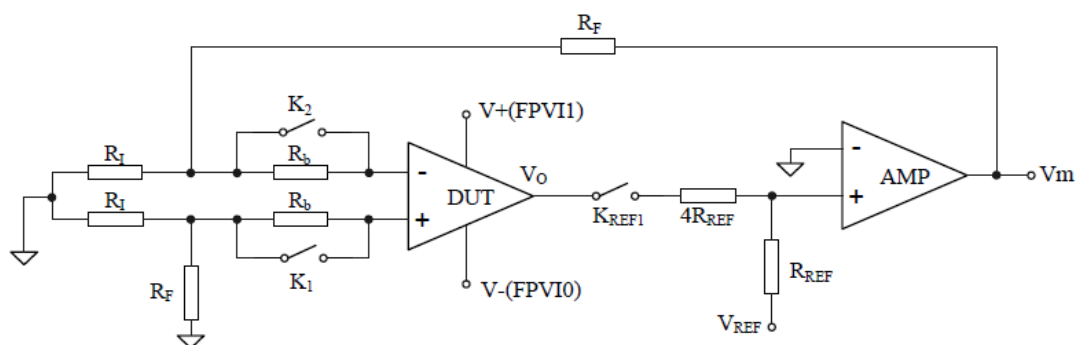
因为大家一般都喜欢只记住结论，所以我们就先把三个经验值告诉大家：

- 1、对于  $\mu\text{A}$  级别的 IB，选择 20K 电阻和 100 倍增益；
- 2、对于 nA 级别的 IB，一般选择 20K 电阻和 1000 倍增益；
- 3、对于 pA 级别的 IB，可以选择 2M 电阻和 10000 倍增益，并适当增加测量延时时间；

这三条大约能解决 70%到 80%运放 IB 的测试，但如果想融会贯通，还得继续看下去。当然您也可以只把上面的结论记住，实际测试一下手里的器件，遇到问题时再看下面的内容，也不失为一种方法。

以一只 OP07 为例子，这个器件  $V_{os}=37.4\text{mV}$ ， $I_{B+}$ 和  $I_{B-}$ 分别约为 10nA。

测试 IB 时，我们会测试三次  $V_{os}$ ，参考 IB 测试原理图，过程如下：



第一次：K1 和 K2 都闭合，RB 被短路，我们选择 10000 倍增益，Vm 测试值 374mV，计算  $V_{os}$  为 37.4 $\mu\text{V}$ ，这也是器件真实的  $V_{os}$ ；

第二次：断开 K1，K2 继续闭合，此时同相输入端的 Rb 接入电路，我们选择了 20K 的 Rb，还是 10000 倍增益，测试  $V_m=2.512V$ ，计算此时的  $V_{os}$  为 251uV；

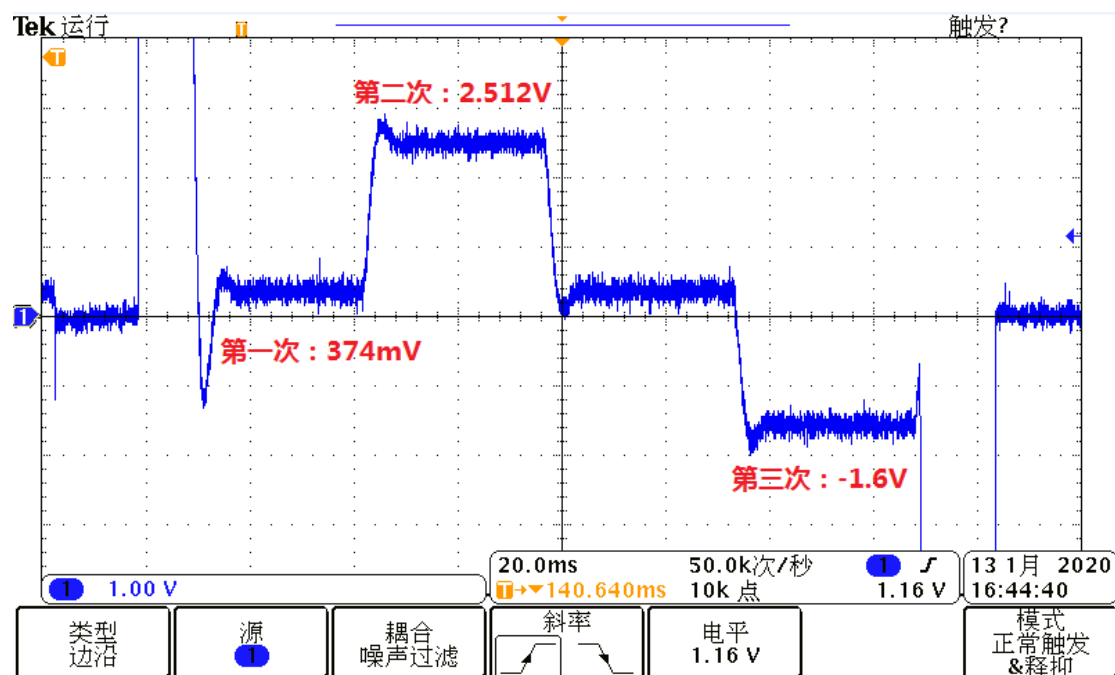
$V_{os}$  由 37.4uV 变为 251uV，变化了 213.6uV，由于选择了 20K 的电阻，所以  $I_{B+}=213.6uV \div 20K=10.68nA$ ；

第三次：闭合 K1，断开 K2，此时反相输入端的 Rb 接入电路，我们仍旧使用 20K 的 Rb 和 10000 倍增益，测试  $V_m=-1.6V$ ，计算此时的  $V_{os}$  为 -160uV；

$V_{os}$  有第一次的 37.4uV 变为 -160uV，变化了 197.4uV，计算  $I_{B-}=197.4uV \div 20K=9.87nA$ ；

这三次  $V_{os}$  的测试，都是以  $V_m$  的测试计算的，因此可以通过软件示波器观看波形。同时由于软件示波器只能看到最后一次读书的波形，如果想看到三次  $V_m$  的读数，需要在 C 语言的底层程序中停断点看波形。

如果觉得这种方法麻烦或者根本不会，也可以用示波器直接在硬件上测量辅助运放输出的波形：



如果不会用示波器看辅助运放的波形，通过器件的  $V_{os}$  测试值、 $I_B$  测试值和  $I_B$  软件示波器最后的一个波形，也可以把这个过程想清楚。

但问题来了：如果我们选择了 200K 的 RB，会怎么样？

200K $\times$ 10nA 的  $I_B$ ，输入失调的变化大约是 2mV，如果还是选择了 10000 倍的增益，那么  $V_m$  的测试值会是  $(V_{os} \pm 2mV) \times 10000$  倍，在本例中将会是超过 20V 的一个  $V_m$ 。

在上一期内容中，我们说过辅助运放的输出是有一定限制的，所以我们一般不建议  $V_m$  电压超过 10V，因此如果本例中选择 200K 电阻，就只能选择 1000 倍或者更小的增益。我们选择  $R_b$  的原则就是从这里得到的，在说明书中我们也有明确描述：

**“需要注意：( $I_b(I_{b+}, I_{b-}) \times R_b \times g_{loop}$ ) 应在  $\pm 12V$  电压范围内。”**

在本文中，我们建议这个电压最好不要超过 10V，并且务必注意高级条件中：“辅助运放输出测量源电压量程”这个选项，选择能够测试到  $V_m$  的合适量程。

V_Clamp2	-100	mA	VSS电流下限档位
VO	0	V	被测运放输出电压
measure_irng	$\pm 10mA$		辅助运放输出测量源电流量程
measure_vrng	$\pm 10V$		辅助运放输出测量源电压量程
g_loop	$\times 10000$	倍	环路增益
loop_adjust	1000pF		环路增益补偿电容（默认选“无” ...

讲到这里可能有些人觉得选择  $R_b$  好复杂，不必担心，除了前面说的三个经验：

- 1、对于  $\mu A$  级别的  $I_B$ ，选择 20K 电阻和 100 倍增益；
- 2、对于  $nA$  级别的  $I_B$ ，一般选择 20K 电阻和 1000 倍增益；
- 3、对于  $pA$  级别的  $I_B$ ，可以选择 2M 电阻和 10000 倍增益，并适当增加测量延时时间；

系统还会根据  $I_B$  的判据、编程人员选择的  $R_b$  和增益进行计算，如果超出了电压范围，测试时会出现相应的提醒。

同时测试人员也要注意，如果  $I_B$  的测试数值为 0，或者为某个固定值，并且多次测试不发生变化，都应该思考一下是否编程有误，并且通过软件示波器判断数据是否真实可靠。

就像我们在上一篇输入失调电压所讲，满足判据的数据并不一定是真实的，编程人员应该根据实际情况判定测试数据是否真实有效。

一不小心，又写了不少。什么？ $I_B$  的测试好复杂？其实我们还留了两个问题没有讲：两个  $I_B$  进阶问题，算是个作业，欢迎各位用自己手里的运放环路真刀真枪的操作一下，达到进阶的目的：

进阶问题 1： $I_B$  测试时，除了选择  $R_b$ ，还能选择电容档位（0.01 $\mu F$ ），关于电容档位的测试是否有兴趣根据编程手册和软件示波器的波形尝试一下？

进阶问题 2： $I_B$  编程高级条件中，有  $V_{os}$  补偿和不补偿的选项，在  $I_B$  前先测试  $V_{os}$  参数，然后试一试补偿和不补偿的差异在哪里？