

预习报告		实验记录		分析讨论		总成绩	
25		30		25		80	

年级、专业：		组号：	
姓名：		学号：	
日期：		教师签名：	

【实验报告注意事项】

1. 实验报告由三部分组成：
- 1) 预习报告：课前认真研读实验讲义，弄清实验原理；实验所需的仪器设备、用具及其使用、完成课前预习思考题；了解实验需要测量的物理量，并根据要求提前准备实验记录表格(可以参考实验报告模板，可以打印)。
- (25 分)
- 2) 实验记录：认真、客观记录实验条件、实验过程中的现象以及数据。实验记录请用珠笔或者钢笔书写并签名(用铅笔记录的被认为无效)。保持原始记录，包括写错删除部分，如因误记需要修改记录，必须按规范修改。(不得手记的值输入到电脑打印)；离开前请实验教师检查记录并签名。(30 分)
- 3) 数据处理及分析讨论：处理实验原始数据(学习仪器使用类型的实验除外)，对数据的可靠性和合理性进行分析；按规范呈现数据和结果(图、表)，包括数据、图表按顺序编号及其引用；分析物理现象(含回答实验思考题，写出问题思考过程，必要时按规范引用数据)；最后得出结论。(25 分)

实验报告就是将预习报告、实验记录、和数据处理与分析讨论合起来，加上本页封面。(80 分)

2. 实验报告下次课交给带实验的老师，最后一次实验，结束一周后交给老师。

3. 实验注意事项: 实验中使用激光, 请注意激光安全, 不可直视激光; 转动激光器时, 可用遮挡物挡住激光, 防止对他人造成伤害。

【实验目的】(5 分)

1. 了解锁相放大器工作原理和特点, 掌握锁相放大器基本参数含义及锁相放大器的基本操作, 学会合理选择或调节参数; 复习示波器的使用;
 2. 掌握用锁相放大器检测弱信号方法, 与示波器比较其检测能力。
-
1. 操作型实验, 必做, 4 学时内独立或 2 人一组完成; 共享数据, 分别完成实验报告。
 2. 把锁相放大器作为测量工具的定位理解其工作原理。
 - 1) 基本概念: 信号、噪声、信噪比; 时域谱、频域谱;
 - 2) 锁相放大器工作原理: 信号的调制、解调 (相敏检波)、滤波的数学表述;
 3. 学习合理地设置锁相放大器参数, 为后面实验应用锁相放大器及时、准确、精密地获得待测微弱信号的之间获得合理的平衡。锁相放大器参数 (频率、相位、灵敏度、时间常数、陡降) 及其对锁相放大器测量的影响;
 4. 锁相放大器操作: 参数设置, 用示波器观察通道 (CH) 输出结果, DISPLAY;
 5. 不要求提前提交实验方案, 实验时注意: 用实验结果回答针对每个知识点所提出的问题, 并写在实验报告中。
 6. (选) 参数设置和操作: 浮地, 差分 (A-B) 输入, 外部输入参考信号, 扫频, TTL 输出, 信号合成。

【仪器用具】(5 分)

编号	仪器用具名称	数量	主要参数(型号, 测量范围, 测量精度等)
1	锁相放大器	1	OE1022
2	示波器	1	RIGOL DS2202A
3	BNC-BNC 信号线	若干	
4	信号发生器	1	RIGOL DG4162

【原理概述】(10 分)(空间不够,可自行加页)

锁相放大器的基本结构如图 D1- 1 (b) 和 (c) 所示的点虚线框内,其中信号通道、参考通道为锁相放大器的输入通道,相敏检测器 (PSD) 和低通滤波器 (LPF) 等。

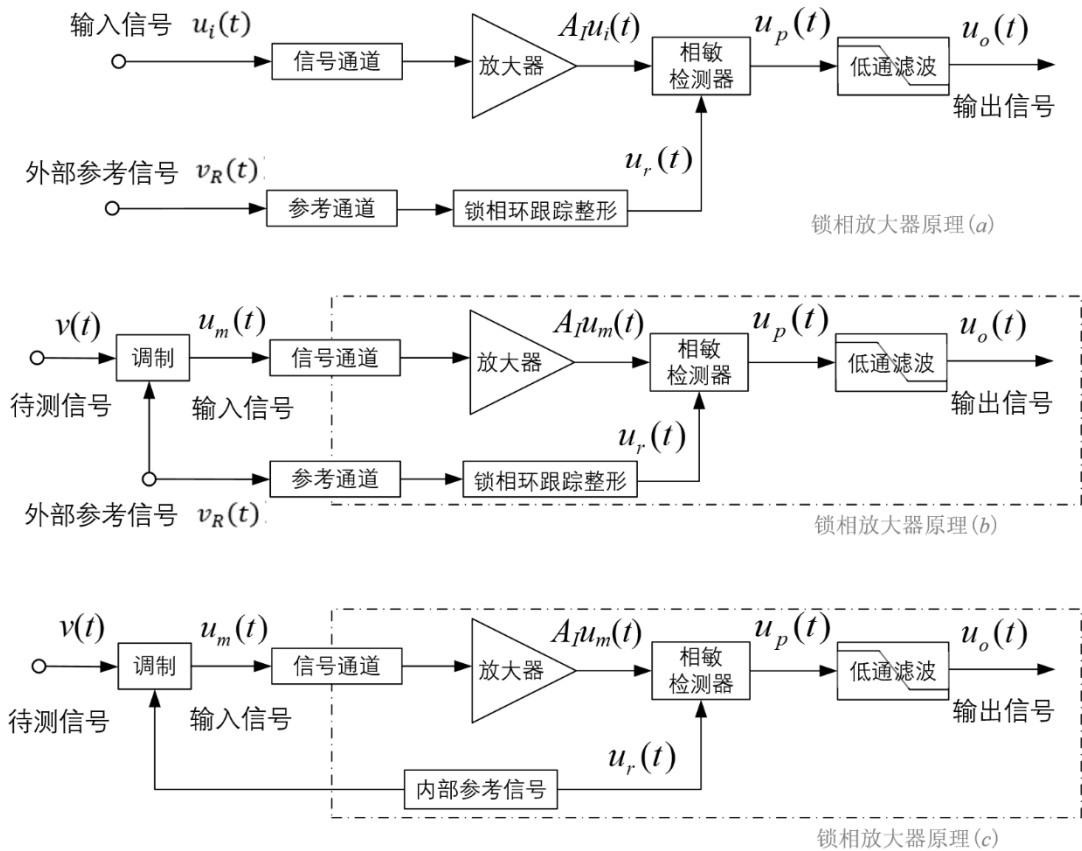


图 D1- 1 锁相放大器工作原理 (点虚线框内表示本实验所用的仪器) ^[5]

对于三角函数信号 $u_i(t) = u_0 \sin(\omega_s t + \varphi)$, 可直接从信号通道输入 (点虚线框内的) 锁相放大器 (图 D1- 1 (a)), 此时待测信号即为锁相放大器的输入信号。对于非三角函数信号或慢变信号 (如直流信号), 它在输入锁相放大器 (如图 D1- 1 (b) 和 (c) 虚线框外部分所示) 前, 需要被与参考信号频率相同的正弦信号所调制。

原则上, 参考信号既可以是外部输入信号 ($v_R(t)$) 经整形后的正弦信号[如图 D1- 1 (b)], 也可以是锁相放大器内部自带参考信号源提供的正弦信号[如图 D1- 1 (c)]。

实际操作上, 因外部输入的参考信号不可避免地受干扰变形, 要求锁相环对所外部信号有很强的整定能力。为改善信号处理效果, 现在的锁相放大器内部都有自带的参考信号, 且使用内部参考信号的效果优于外部参考信号。

三角函数信号可视为一被调制的直流信号。不失一般性, 下面以非三角函数信号为待测信号, 用数学方式阐述锁相放大器的工作原理。

噪声可以叠加在调制前的信号中 ((D1- 1)式所示), 亦可以叠加在调制后的信号中 ((D1- 2)式所示); 锁相放大器信号输入端不能区分这两种情况, 因而, 下面推导中只考虑后者, 即输入信号为三角函数, 输入噪声为 $n(t)$ 。

调制前信号包含待测信号和噪声, 有:

$$v(t) = s(t) + n(t) \quad (D1- 1)$$

经 $\sin(\omega_m t + \theta)$ 信号调制: 由于噪声叠加在调制后的信号上, 故调制后信号直接加上原噪声

$$u_m(t) = v(t) \sin(\omega_m t + \theta) = s(t) \sin(\omega_m t + \theta) + n(t) \quad (D1- 2)$$

对信号与噪声一起被调制的情况 (前者), (D1- 2)式中 $n(t) = v_N \sin(\omega_m t + \theta)$ 。

输入：式(D1- 2)给出了锁相放大器的输入信号 $u_{in}(t)$ 。

放大：输入信号仍然很弱，在经前置放大器后被放大 A_I 倍：

$$u_a(t) = A_I s(t) \sin(\omega_m t + \theta) + A_I n(t) \quad (D1- 3)$$

此时，信号与噪声都被同时放大了。

解调：锁相放大器采用参考信号 $u_r(t) = \sin(\omega_r t)$ 解调：

$$\begin{aligned} u_{px}(t) &= u_r(t)u_s(t) = A_I[s(t) \sin(\omega_m t + \theta) \sin(\omega_r t) + n(t) \sin(\omega_r t)] \\ &= A_I \left\{ \frac{s(t)}{2} [\cos((\omega_m - \omega_r)t + \theta) - \cos((\omega_m + \omega_r)t + \theta)] + n(t) \sin(\omega_r t) \right\} \end{aligned} \quad (D1- 4)$$

对于调制信号是用参考信号通过某种物理机制触发或用参考信号本身情况，参考信号与调制信号频率相同($\omega_m = \omega_r$)、相位差 θ 确定；并经过理想的低通滤波器滤去高频分量，则滤波器输出信号为：

$$u_{ox}(t) = A_I \left[\frac{1}{2} s(t) \cos \theta + n_x(t) \right] \quad (D1- 5)$$

式中， $n_x(t)$ 为未被滤去的、与参考频率相同的“同频噪声”。对高信噪比情况，忽略噪声：

$$u_{ox}(t) = s_{ox}(t) = \frac{1}{2} A_I s(t) \cos \theta \quad (D1- 6)$$

锁相放大器输出信号 $s(t)$ 有效值：

$$X = 2u_{ox}(t)/A_I = R \cos \theta \quad (D1- 7)$$

为了获得完整的输入信号，需采用另一路频率相同、且与参考信号相位相差 $\pi/2$ 的信号 $u_{r1}(t) = \cos(\omega_r t)$ 作为解调信号，则通过相敏检测后此路信号与另一路信号也相差 $\pi/2$ ：

$$s_{py}(t) = \frac{1}{2} A_I s(t) [\sin((\omega_m - \omega_r)t + \theta) + \sin((\omega_m + \omega_r)t + \theta)] \quad (D1- 8)$$

$$s_{oy}(t) = \frac{1}{2} A_I s(t) \sin \theta \quad (D1- 9)$$

$$Y = 2u_{oy}(t)/A_I = 2s_{oy}(t)/A_I = R \sin \theta \quad (D1- 10)$$

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (D1- 11)$$

定义锁相放大器输入信号相对于解调信号（图 D1- 1 的参考信号）的相位差：

$$\theta = \tan^{-1} \frac{u_{oy}(t)}{u_{ox}(t)} \quad (D1- 12)$$

这种可同时测量完整输入信号信息的锁相放大器称**双相锁相放大器**（原理如图 D1- 11 所示）。

然而，一方面实际滤波器并不理想，另一方面，滤波器的性能与锁相放大器参数设置（选择）有关，要用好锁相放大器，就需要对滤波器的工作原理有更深入的了解。

先讨论未被滤波（时间常数很小）时，从式(D1- 4)和式(D1- 8)：

$$R(t) = s(t) |\sin(\omega_m t + \theta)| \quad (D1- 13)$$

即信号项被 $|\sin(\omega_m t + \theta)|$ 所调制，其频率是被调制信号频率 ω_m 的 2 倍。对 $|\sin(\omega_m t + \theta)|$ 做傅里叶变换，可得到该频谱，即 $2\omega_m$ 频率下的幅值和直流分量（平均值）。在信噪比较高时，此式容易被观察到（参见实验内容 1.3）。

低通滤波

X 通道检波后的信号（式(D1- 4)）进入 n 阶 RC 低通滤波器 LPF（频域），从错误!未找到引用源。):

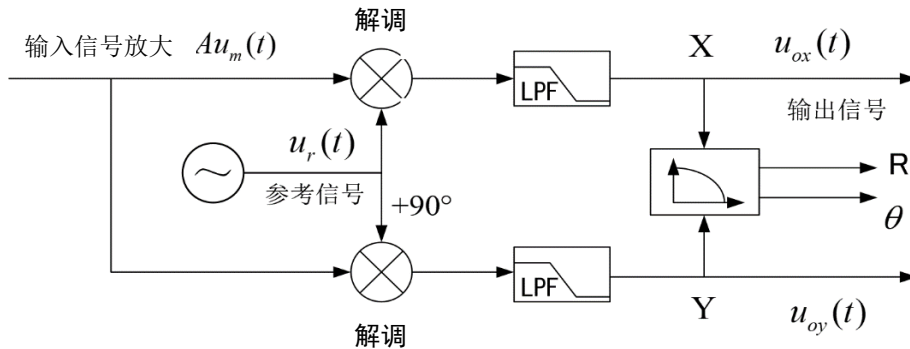


图 D1- 2 双相锁相放大器结构框图^[5]

$$u_{ox}(t) = |H(\omega)|^n u_{px}(t) = A_I \left\{ \frac{s(t)}{2} \left[\frac{\cos((\omega_m - \omega_r)t + \theta)}{(1 + ((\omega_m - \omega_r)RC)^2)^{\frac{n}{2}}} - \frac{\cos((\omega_m + \omega_r)t + \theta)}{(1 + ((\omega_m + \omega_r)RC)^2)^{\frac{n}{2}}} \right] + \sum_{\omega_n = \omega_r - \omega_0}^{\omega_n = \omega_r + \omega_0} \frac{n \omega_n(t) \sin(\omega_r t)}{(1 + (\omega_n RC)^2)^{\frac{n}{2}}} \right\} \quad (D1- 14)$$

结合实验内容，先讨论信号项，即式(D1- 3)和式(D1- 14)右边第一项。

$$s_{px}(t) = \frac{A_I s(t)}{2} \left[\frac{\cos((\omega_m - \omega_r)t + \theta)}{(1 + ((\omega_m - \omega_r)RC)^2)^{\frac{n}{2}}} - \frac{\cos((\omega_m + \omega_r)t + \theta)}{(1 + ((\omega_m + \omega_r)RC)^2)^{\frac{n}{2}}} \right] \quad (D1- 15)$$

对非同频的情况 ($\omega_m \neq \omega_r$)，只有参考频率附近 ($\omega_r \pm \omega_0$) 的信号可以通过低通滤波器， $\omega_0 = 1/RC$ 为低通滤波器的截止频率。当 $|\omega_m - \omega_r| < \omega_0 < \omega_m + \omega_r$ 时，式(D1- 15)中的和频项 $\cos((\omega_m + \omega_r)t + \theta)$ 被滤掉，只留下差频项 $\cos((\omega_m - \omega_r)t + \theta)$ ；也就是说，只有输入信号频率在参考频率附近时才可以通过低通滤波器，这等效于一个带通滤波（可在实验内容错误!未找到引用源。“错误!未找到引用源。”中体验）。当截止频率高 ($\omega_0 \geq \omega_m + \omega_r$)，即时间常数小，同频输入信号会导致输出信号项含参考频率的倍频 $2\omega_r$ ，在信噪比较高时，此倍频的正弦信号分量在滤波不充分时可被观察到（见实验内容 1.3 的 X 或 Y 输出）。【感兴趣的同学可用程序画出式(D1- 15) 的幅频图】

当 ω_0 足够小，即 ωRC （或时间常数足够大）时，相当于窄带滤波器。低通滤波后留下了慢变的待测信号如式(D1- 6)和式(D1- 9)所示。

当频率接近 ($\Delta\omega = \omega_m - \omega_r \approx 0$) 时，且选择适当的时间常数 ($RC \gg 1/\omega_m$) 后，式(D1- 15)和式(D1- 8)中的和频项 ($\omega_m + \omega_r$) 被滤波器滤掉，则：

$$R(t) = \frac{s(t)}{[1 + (\Delta\omega RC)^2]^{\frac{n}{2}}} \quad (D1- 16)$$

此时的 $R(t)$ 稳定，但 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 则因相位随时间变化 ($\theta(t) = \Delta\omega t$) 而不稳定。式(D1- 16)可用于检验低通滤波器的工作原理（参见实验内容错误!未找到引用源。；选做）。式(D1- 16)与式(D1- 13)的差异表明，锁相放大器工作次序是 X，Y 通道分别先滤波，再合成出 R。当 $\Delta\omega = 0$ 时，式(D1- 15)即为式(D1- 6)。

回到低信噪比的情况，从式(D1- 14)和式(D1- 7)得：

$$X(t) = s(t) \cos \theta + 2 \sum_{\omega_n - \omega_r - \omega_0}^{\omega_n - \omega_r + \omega_0} \frac{n_{\omega_n}(t) \sin(\omega_r t)}{(1 + (\omega_n RC)^2)^{\frac{n}{2}}} = s(t) \cos \theta + n_{\omega_r x}(t) \quad (D1-17)$$

其中, n_{ω_n} 视为频率 ω_n 的噪声分量, $n_{\omega_r x}(t)$ 为 X 通道未被低通滤波器滤去的噪声 ($\Delta\omega = \omega_n - \omega_r \approx 0$), 它亦被称为调制频率 ω_r 附近的同频噪声 $n_{\omega_r}(t)$ 。则锁相放大器的输出的 R 值:

$$R(t) = \sqrt{s^2(t) + n_{\omega_r}^2(t) + 2s(t)n_{\omega_r}(t)\sin(\omega_r t + \theta)} \neq s(t) + n_{\omega_r}(t) \quad (D1-18)$$

有关噪声测量的原理, 详见[错误!未找到引用源。](#)。

锁相放大器用相敏检测器实现解调, 并且实现**既检幅又检相**的功能。尽管锁相放大器已滤除了绝大部分噪声, 但对同频噪声 $n_{\omega_r}(t)$ 仍无能为力。并且由于放大后的信号仍包含噪声成分, 等效于其相位差 θ 也受该噪声 $n_{\omega_r}(t)$ 影响, 视为相位噪声。因此, 在实际测量中, 慢变信号的调制频率通常选择于背景噪声最低的频区。

将数学推导中的三角函数替换为带复数的矢量形式 $e^{-i\omega t}$, 两互相垂直的分量分别对应于实部和虚部, 锁相放大器可以实现正交的矢量测量 (包括幅值和相位), 这有助于对被测信号进行矢量分析, 以确定被测系统的动态特性。

【原理思考题】

1. 市频 50Hz 干扰通常通过电源耦合, 影响仪器的测量结果; 对于 997Hz 的待测信号, 50Hz 干扰是噪声吗? 对锁相放大器的测量会有影响吗?

影响较小

2. 如何用锁相放大器检测到待测的直流信号或慢变信号? (图 D1-9 中的 $v(t)$ 为直流或慢变信号)

对于一个直流信号, 我们需要先将其调制为一个高频的或者低频但信噪比高的正弦信号进行调制。如果是一个慢变信号也是同理, 最后解调即可。

3. 如用斩波器调制直流信号 (如光强), 被斩制后的信号 (图 D1-9 中的 $u_m(t)$ 信号) 仍然包含有直流分量 (即平均值不为零), 但该直流分量随交流信号输入锁相放大器后不会被锁相放大器检测, 请从数学推导上说明。

【注, 一个理想的交流信号其平均值为零; 一个平均值不为零的信号, 其平均值可视为直流信号。】

4. 相位以及相位差的含义是什么? 锁相放大器输出的 θ 是待测信号的相位还是待测信号与参考信号之间的相位差?

一个正弦信号的在特定时刻所处的状态。且通常只表示一个周期内的相位。相位差就是超过一个正弦信号的各自的相位之差, 一般是两个。

是相位差

5. (选) 用复数的取代三角函数, 将锁相放大器的工作过程描述一遍;
6. (选) 用傅里叶变换描述滤波过程; 帮助理解图 D1-5 (时域与频域) 背后的数学。【数字示波器 (RIGOL DS2202A) 带快速傅里叶变换 (FFT) 功能: MATH→操作 (选 FFT)】

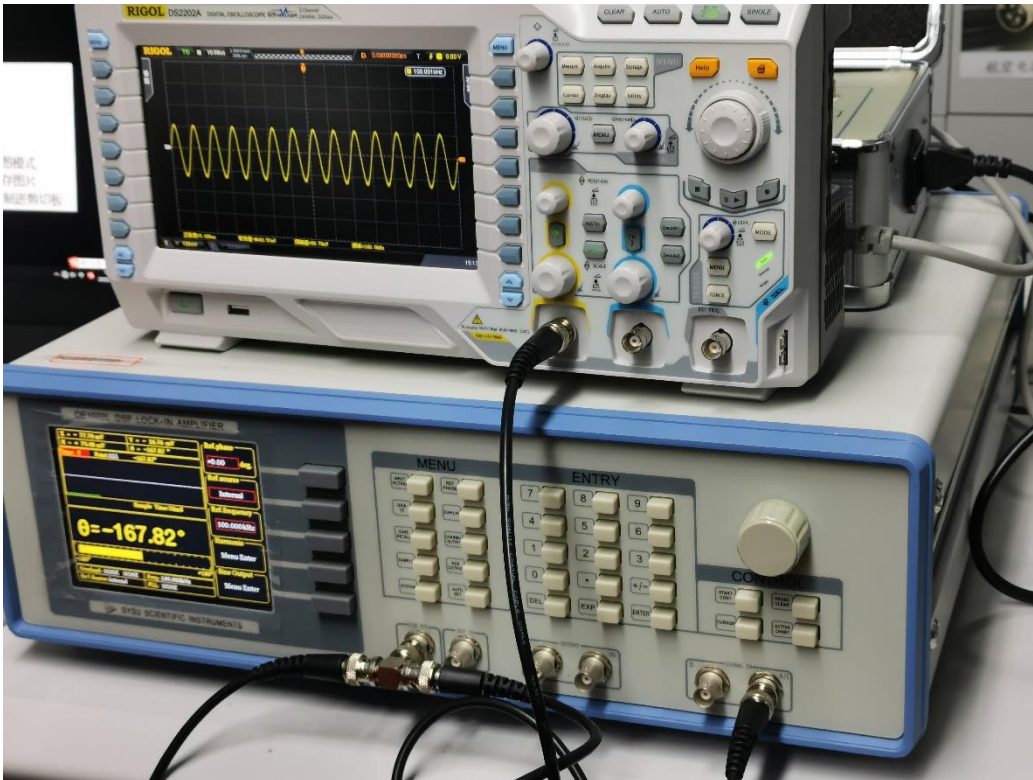
【实验步骤】

1.1 用示波器观察内部信号输出（与参考信号同频同相）

OE1022 的内部振荡器 SINE OUT 相当于函数发生器，输出正弦信号。【可用一个三通把信号分到锁相放大器的输入端“signal in”，就可以将内容 1.1 和内容 1.2 对比着做，如图 D1- 3 示。】

图 D1- 3 锁相放大器实验仪器

通过 OE1022 产生一个幅值为 80mVrms、频率约为 1kHz 的正弦波，并用示波器观察和记录波形。步骤如下：



- 1) 断开所有与机箱连接的信号线，接入电源，打开电源开关，此时系统处于默认设置状态。
若如果系统不是默认设置状态，可以在前面板上选择 SAVE RECALL 菜单，Save&Recall 设置为 recall，此时 Channel 会变成 Default，按下软键 3 (见图 D1- 5)，将 Execute 设置为 YES，即可恢复默认设置状态。
- 2) 若已经恢复默认设置状态，在前面板上选择 REF/PHASE 子菜单，Ref.source 设置为“Internal”；Ref.frequency 为默认值“1.000kHz”；选择进入“Sine Out”下级菜单，扫描类型 Sweep Type 设置为“Fixed”，通过数字键盘在 Voltage 中输入“0.08”，得到幅值为 80mVrms、频率为 1.000kHz 的正弦信号。【双通道锁相放大器的“Sine Out”在后面板】
- 3) 用一条 BNC-BNC 信号线连接 OE1022 前面板 SINE OUT 输出接口和示波器输入，调节示波器参数并记录波形，记录示波器显示的参数。（待测信号的波形参考图 D1- 4）

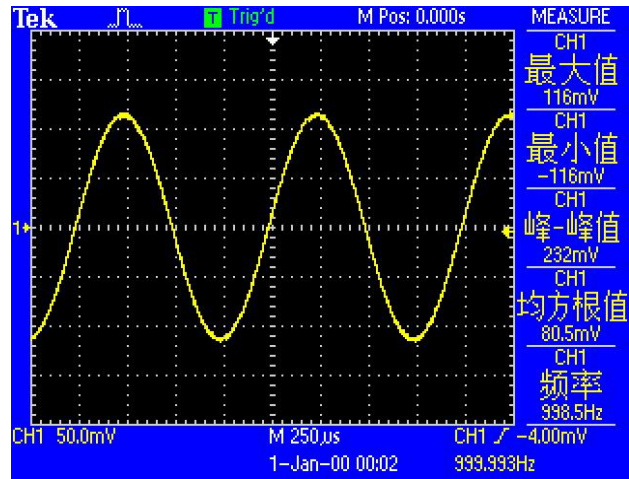


图 D1- 4 OE1022 的内部振荡器 SINE OUT 输出信号波形图

【问题 1】 示波器显示的参数是否与设置参数一致？

1.2 测量信号 R、 θ 、X 以及 Y 值，并验证它们之间的关系

- 1) 用一条 BNC-BNC 信号线连接 OE1022 前面板 SINE OUT 输出接口和 SIGNAL IN 的 A/I 接口，如图 D1- 5 所示：



图 D1- 5 测量信号线连接图，a)单通道前面板；b)双通道锁相放大器后面板

- 2) 观察主界面中监测栏的 Overload 是否提示溢出：
- 3) 若前级输入溢出，则显示 Overload: INPUT NONE；若放大溢出，则显示 Overload: NONE GAIN；若同时溢出，则显示 Overload: INPUT GAIN。

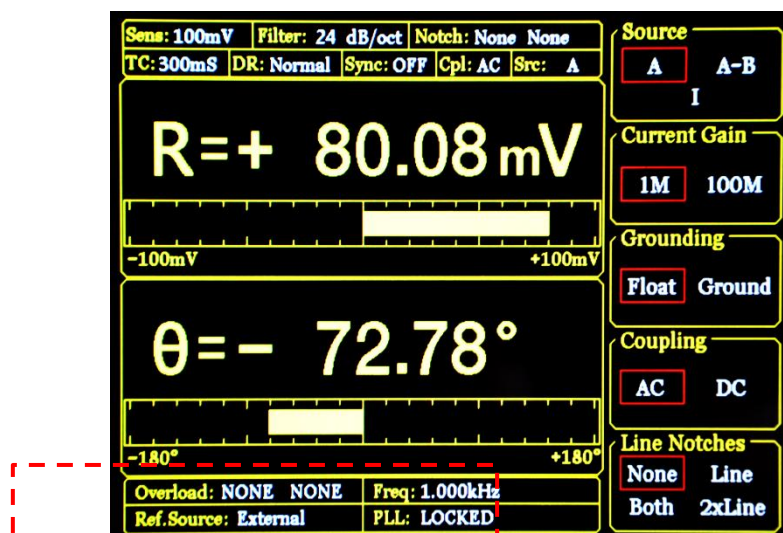


图 D1- 6 锁相放大器显示屏主界面监测栏

- 4) 前级溢出时应立即减小数字信号发生器输出幅值，放大溢出应立即调节灵敏度（sensitivity）¹值（OE1022 输入端峰值高于 1.7V 或谷值低于-1.7V 时发生前级溢出，且默认灵敏度值为 100mV，因此本例中数字信号发生器输出幅值为 80mVrms 的正弦波时不会发生溢出，但是测量其他信号时要注意溢出情况）。调节灵敏度值的方法见下。
- 5) 调节灵敏度值。按下前面板 GAIN/TC 按键进入子菜单（图 D1- 7）。

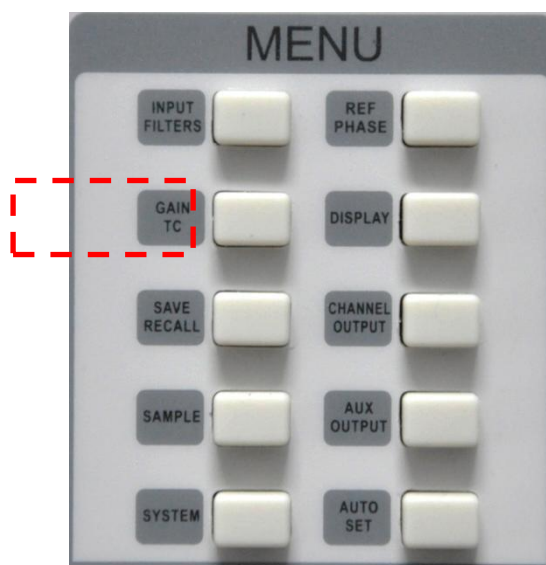


图 D1- 7 GAIN/TC 菜单位置

- 6) GAIN/TC 子菜单界面如图 D1- 8。

¹ 见 3.1 锁相放大器参数——灵敏度。

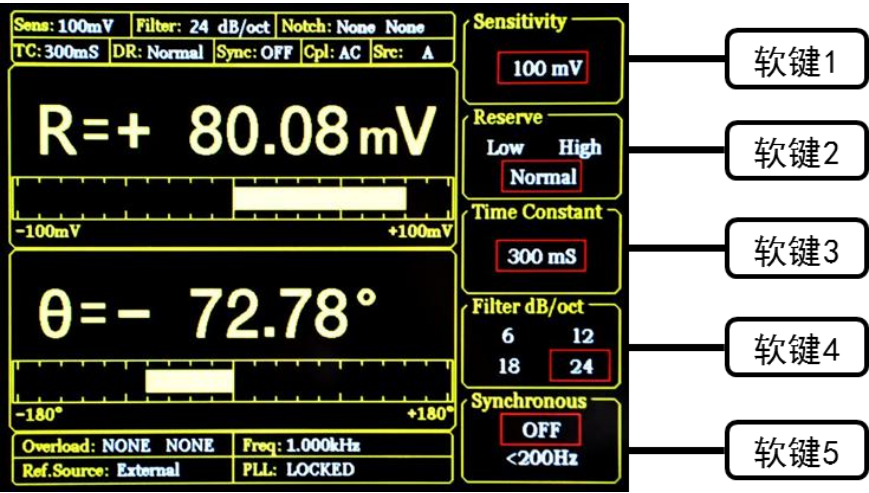


图 D1- 8 GAIN/TC 菜单参数显示

7) 按下软键 1 以选中 Sensitivity 功能，选中区域会有高亮显示，通过旋转旋钮调节 Sensitivity 值，使测量信号值尽量满偏而又不超量程。此处我们调节为 100mV 即可。至此，我们即简单测出了从函数信号发生器输出的正弦波幅值大小以及相位。

【问题 2】 请比较示波器的读数和锁相放大器的 R 值，以理解 R 值的确切含义。

8) 主界面数据栏显示 R、 θ 、X 及 Y 值。按下前面板 DISPLAY 按键进入子菜单（图 D1- 9）。

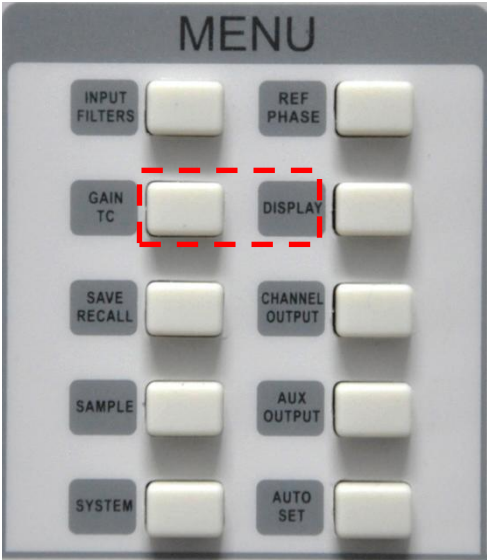


图 D1- 9 DISPLAY 菜单位置

9) DISPLAY 子菜单界面如图 D1- 10。

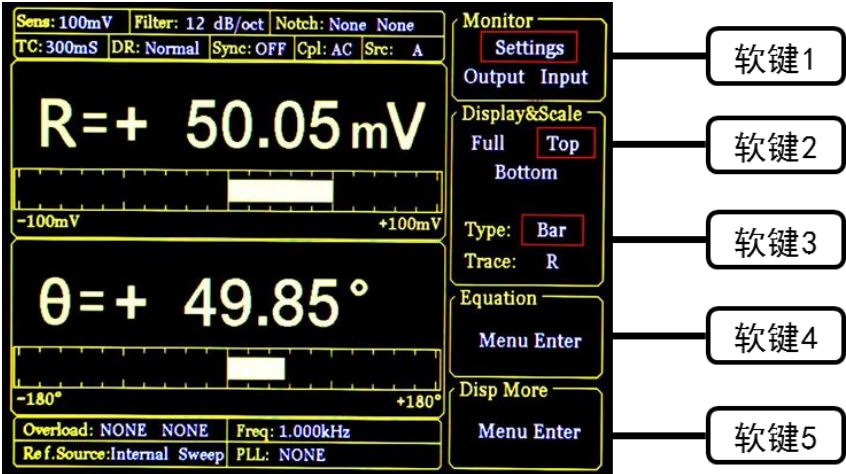


图 D1- 10 DISPLAY 菜单界面

10) 系统默认设置中，数据栏上方显示 R，下方显示 θ 值，通过以下介绍的方法可更改显示的数值。



图 D1- 11 锁相放大器前面板

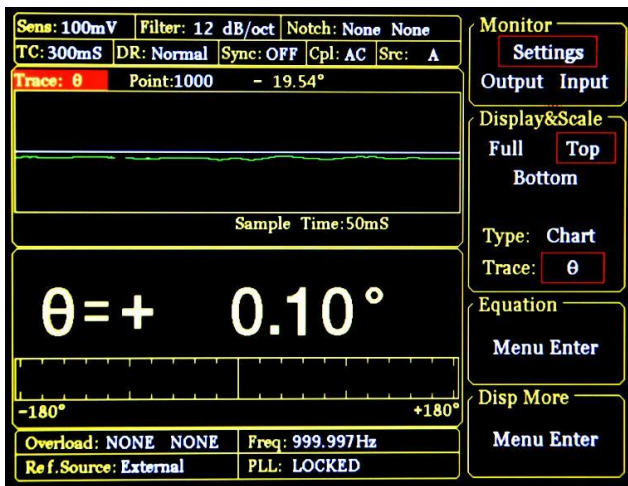


图 D1- 12 XY 坐标图显示 θ 值效果图

11) 例如将上方显示的 R 值更改为采用 XY 坐标来显示 θ 值的方法：首先按软键 2，使其选中 Top；再按软键 3 选中 Type，Type 区域此时高亮显示，通过调节旋钮可选择 Chart(XY 坐标)或 Bar(数字百分比)，我们选择 Chart；再按软键 3 选 Trace，Trace 区域此时高亮显示，通过调节旋钮可选择显示 R、 θ 、X、Y，我们选择 θ 。然后按下前面板右下角处的 START CONT 按键，如图 D1- 12 所示，此时图像开始生成。通过以上设置实现效果如图 D1- 13 所示。**【双通道锁相放大器在 Display 中选 Full，才可以调出 chart】**

12) 主界面监测栏显示 R、 θ 、X、Y 值。

13) 可以更改检测栏的内容使其实时显示 R、 θ 、X、Y 值。方法：按下前面板 DISPLAY 按键进入子菜单，再按软键 1 将 Monitor 设置中从 Setting 切换为 Output，此时监测栏同时显示 R、 θ 、X 和 Y 的值，如图 D1- 13 所示。

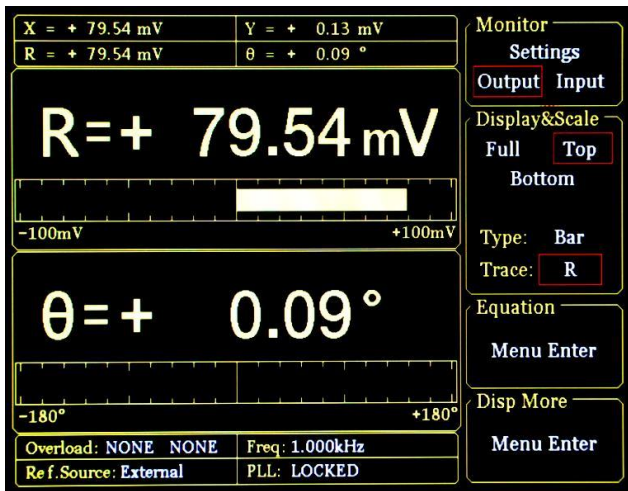


图 D1- 13 监测栏显示效果图

【问题 3】 测量数据反映出 R、X、Y 及 θ 的之间是什么关系？是否与式(D1- 7)、式(D1- 10)和(D1- 11)符合？

【问题 4】 OE1022 是双锁相放大器吗？为什么？

1.3 相敏检波——不同时间常数、陡降下观测滤波器效果

以测量一个幅值为 50mVrms、频率约为 1kHz 的正弦波信号为例，用 OE1022 的 Fast channel out 输出到示波器进行观察，简单演示说明时间常数（TC）、滤波器陡降（Slope）等滤波参数的含义和正确使用。步骤如下：

- 1) 断开所有与机箱连接的信号线，接入电源，打开电源开关，此时系统处于默认设置状态。在前面板上选择 REF/PHASE 子菜单，Ref.source 设置为“Internal”；Ref.frequency 为默认值“1.000kHz”；选择进入“Sine Out”下级菜单，扫描类型 Sweep Type 设置为“Fixed”，通过数字键盘在 Voltage 中输入“0.05”，得到幅值为 50mVrms、频率为 1.000kHz 的正弦信号。
- 2) 用 BNC-BNC 信号线连接 OE1022 前面板 SINE OUT 输出接口和 SIGNAL IN 的 A/I 接口，OE1022 前面板 CH1 接口和示波器输入接口。
- 3) 调节灵敏度值，本例中数字信号发生器输出有效值为 50mVrms 的正弦波，灵敏度设置为 100mV 即可。
- 4) 按下 OE1022 前面板的 GAIN/TC 按键，调节时间常数和陡降，设置时间常数为 30 μ s，陡降为 6dB/oct。
- 5) 按下 OE1022 前面板 CHANNEL OUTPUT 按键，进入子菜单，在 Output 选项中选择 CH1，在 Speed 选项中选择 Fast，Source 选项默认为 R（Fast 模式下输出源可选择 R、X、Y，Slow 模式下输出源可选择 R、X、Y、Rh1、Xh1、Yh1、Rh2、Xh2、Yh2、Noise、 θ 、 θ h1、 θ h2），Offset&Expand 中默认 Offset 为 0，Expand 为 1[见参考文献 5]，如图 D1- 14 所示。【双通道锁相放大器的 CH1 和 CH2 在后面板】

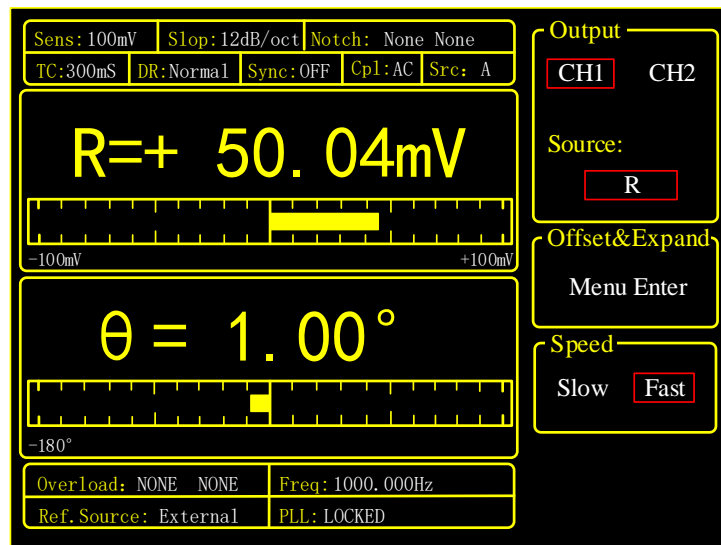


图 D1- 14 Channel out 子菜单设置图（上图 $V_{rms} = 0.05V$ ，陡降=24dB/oct， $T_c=100\mu s$ ）

- 6) 在示波器上调节时基、输入通道设置等，可观测到在 30 μ s 时间常数和 6dB/oct 陡降下 channel out 输出 R 值波形，如图 D1- 15 所示：

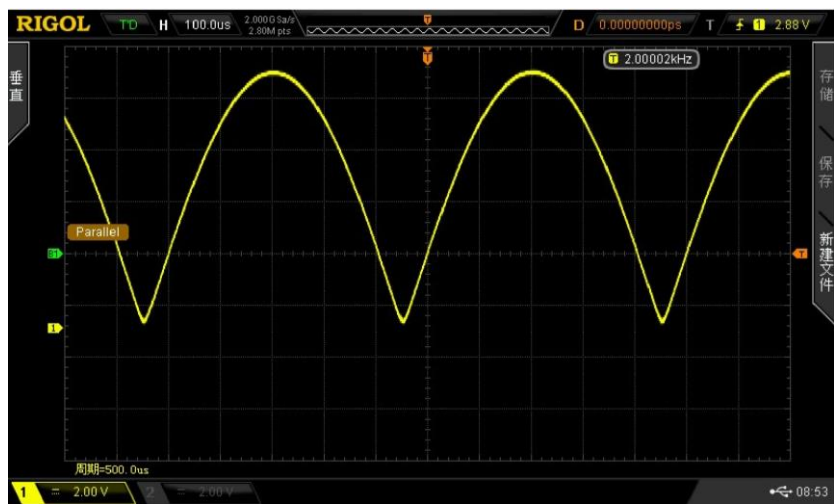


图 D1- 15 Fast 模式下 CH1 输出 R 信号波形 (30 μ s 6dB/oct)

【问题 5】 OE1022 的正弦输出 (SINE OUT) 与通道输出 (CH OUT) 分别输出什么信号？

【问题 6】 分析波形：从示波器波形看到，R 值输出呈现全波整流的正弦信号，示波器显示频率 2kHz，请对比式(D1- 13)讨论此未充分滤波的波形。

7) 在 OE1022 的 Channel out 菜单中设置 Source 为 X、Y，在示波器上观测，如图 D1- 16 和图 D1- 17 所示：

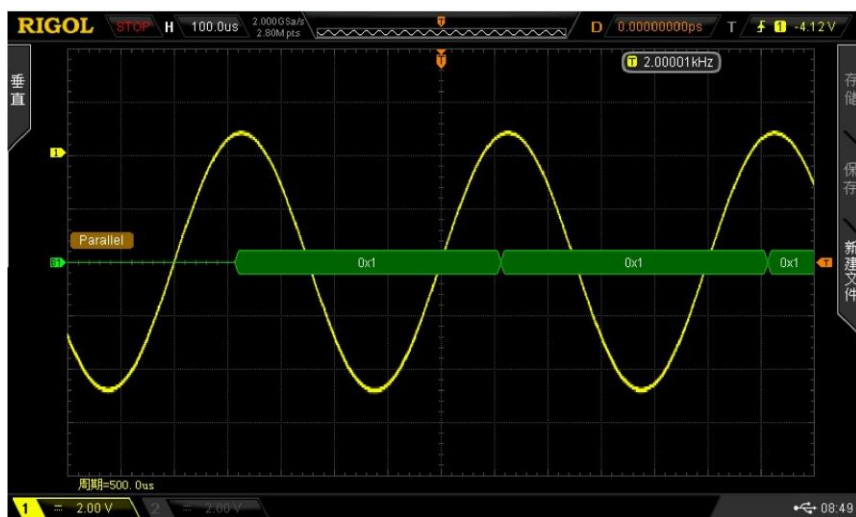


图 D1- 16 Fast 模式下 CH1 输出 X 信号波形 (30 μ s 6dB/oct)

波形分析

X 信号波形为正弦波，频率为 2kHz，倍频于参考信号频率。这是因为锁相放大器的原理中，输入信号和参考信号进入 PSD 模块进行乘法运算，得到结果中包含直流信号、二倍频信号以及噪声信号。输入频率为 1kHz 的信号，当时间常数较低时，二倍频并未滤去，则示波器得到 2kHz 的信号（见式(D1- 15) 中 $\omega_m = \omega_r$ 的情况）。

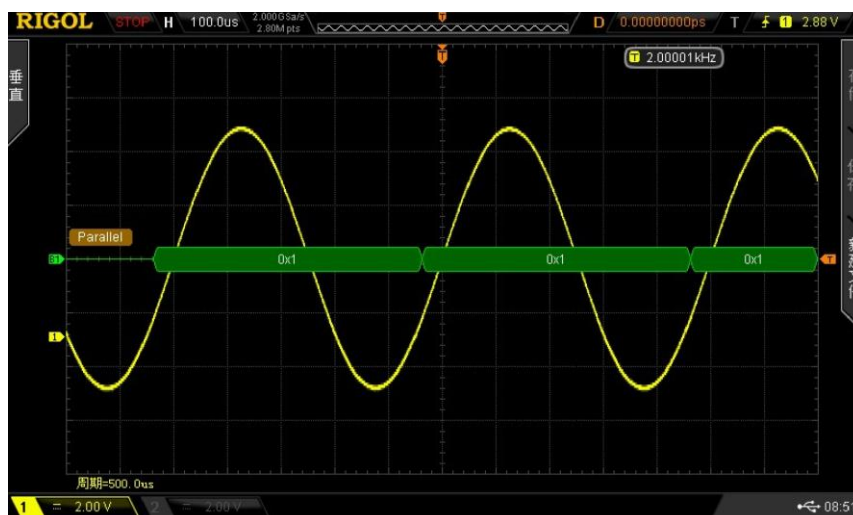


图 D1- 17 Fast 模式下 CH1 输出 Y 信号波形 ($30\mu\text{s}$ 6dB/oct)

- 8) 在 OE1022 的 Gain/TC 菜单中, 对时间常数进行改变, 时间常数可选择 $10\mu\text{s}$ 、 $30\mu\text{s}$ 、 $100\mu\text{s}$ 、 $300\mu\text{s}$ …… 10s 、 30s , 通过增大时间常数的值能够使信号的输出端更稳定, 也能减轻输入端噪声对输出端的影响。时间常数通过决定滤波器带宽[包括 -3 dB 带宽和等效噪声带宽 (ENBW)], 来影响输出信号的稳定性和精度。

【问题 7】 观察示波器波形, 并给出在给定陡降值下, 时间常数为多少个信号周期时, 才能观察到稳定的直流输出? 提示: 注意调节示波器 Y 轴量程以确定振幅降低的幅度, 并结合式(D1- 15)讨论。

随着时间常数增大, 波形幅度慢慢减小, 直流分量占比加大, 直至变为纯直流信号 (即一条直线)。这是因为大的时间常数代表低通滤波器通带变窄, 从波形上可以看到二倍频等高频信号依次被滤去, 最后余下直流分量, 即图 D1- 19 波形中的直线。(为什么?) 对于一个振幅恒定的信号, 锁相放大器的输出电压亦为一恒定值。

在实际应用时, 在 1 阶或 2 阶 RC 滤波器下对信号频率选拔合适的时间常数, 然后进一步调整陡降 (即 RC 滤波器阶数)。

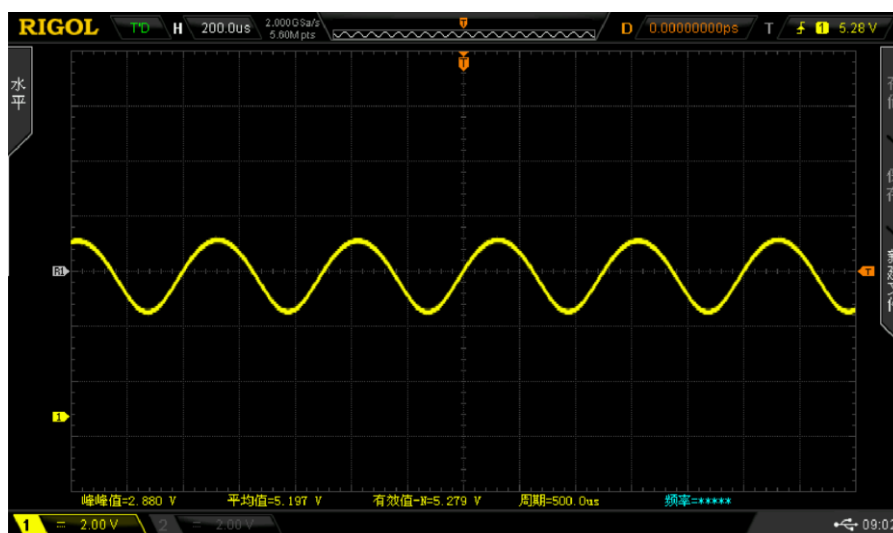


图 D1- 18 Fast 模式下 CH1 输出 R 信号波形 ($300\mu\text{s}$ 6dB/oct)

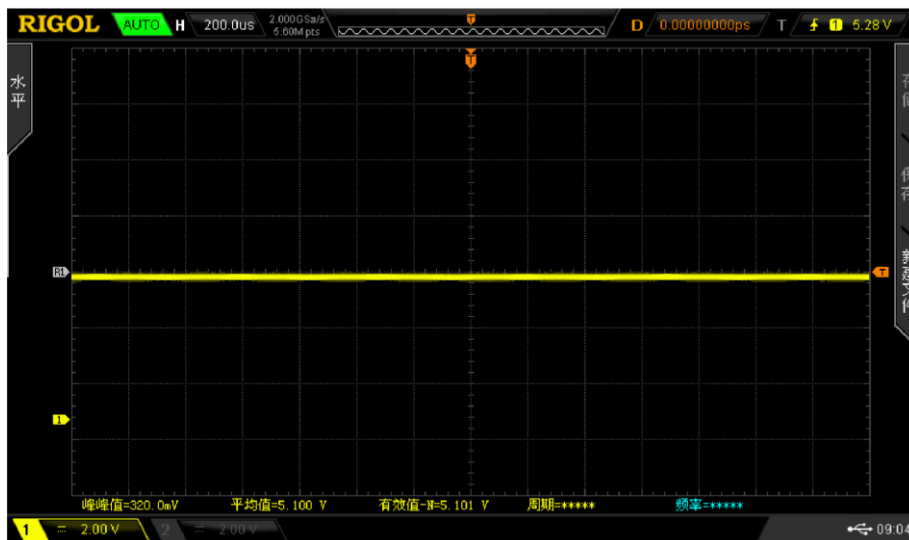


图 D1- 19 Fast 模式下 CH1 输出 R 信号波形（1ms 6dB/oct）

- 9) 在 OE1022 的 Gain/TC 菜单中，对滤波器陡降进行改变。在同样的测量准确度下，请分别选择 6dB/oct、12dB/oct、18dB/oct、24dB/oct 四档，观察示波器波形的变化。
要观察滤波器阶数的影响，得选择合适的时间常数 TC（与信号频率相关，提示，截止频率在倍频于参考信号频率附近。为什么？），即在 1 阶（6dB/oct）时还没怎么起滤波效果，而到 4 阶（24dB/oct）时，则可看见明显的效果。
- 10) 对于 $\omega_m \approx \omega_r$ 的情况，喜欢挑战的同学可以试一试结果是否与式(D1- 15)相符（选）。

1.4 输出信号对输入信号变化的响应。

从上一实验内容可知，只有选择适当的、或足够长的时间常数，锁相放大才能有稳定的输出，且时间常数越大输出越稳定。那么，是否时间常数越长越好呢？

假设一种特殊的情况，待测信号幅值从 V1 瞬间变化到 V2，产生阶跃函数。那么，在不同的时间常数、陡降下，锁相放大器的输出信号是怎么从 R1 变化到 R2 的呢？

制定方案，观测输出信号变化 R(t)对输入信号变化 ($\Delta V=V_2-V_1$) 的响应：1) 在某一陡降、不同时间常数下；2) 在某一时间常数、不同的陡降下。

- 1) 在 OE1022 的 Gain/TC 菜单中，选择不同的时间常数和陡降（组合），
- 2) 改变 sine out 信号幅度的设置，如从 0.1Vrms 至 0.6Vrms；
- 3) 观察在输入信号突变时（按下 enter 键后），输出信号 R 对输入信号变化($\Delta V=0.5V$)的响应（随时间的变化）。

改变 SINE OUT 幅值设定，用“START CONT”激活 chart 图以观察改变前后的曲线来确定其输出响应（参考 1.2 节第 11)步，如图 D1- 20）；也可以用 CH1 输出连接示波器：采用 fast 模式输出 R 至示波器，并记录图形（如图 D1- 21）。

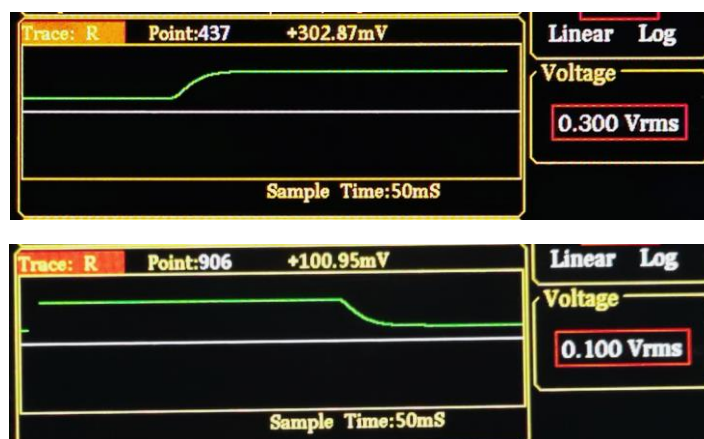


图 D1- 20 参考结果 1，用“START CONT”激活 chart 图（锁相放大器显示）

996Hz, TC:300ms, Filter:12dB/oct, 0.1→0.3Vrms(上), 0.3→0.1Vrms(下)

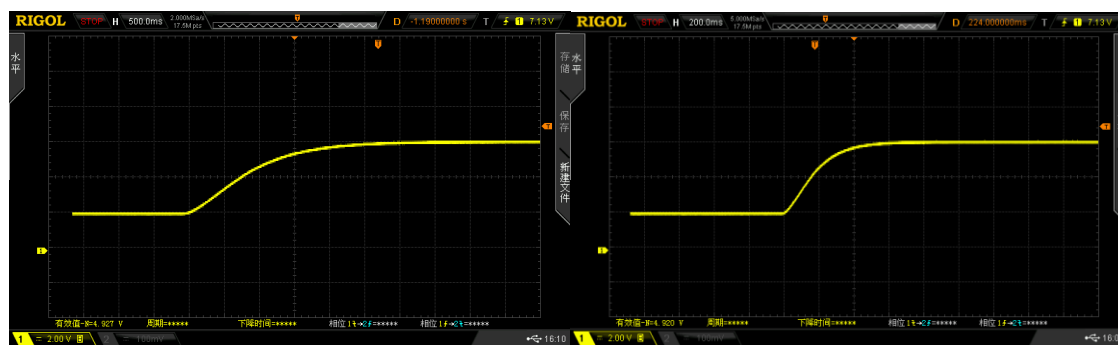


图 D1- 21 参考结果 2, 用 CH1 输出连接示波器, 采用 fast 模式输出 R 至示波器

996Hz, TC:300ms, Filter:12dB/oct, 0.1→0.3Vrms(左), TC:100ms, Filter:12dB/oct, 0.1→0.3Vrms(右)

实验内容 1.3 和 1.4 的**目的**是：学会选择合适的时间常数和陡降值，使得在实际测量时，既可以获得可靠的幅值（R）输出，同时又有足够快的响应能力以捕捉 R（随时间）的变化。具体到自动测量时，它是选择合适的采样间隔的依据。

（选）从阶跃响应曲线中拟合出时间常数，你所（拟合）计算的时间常数是否与**错误!未找到引用源。**中以时间常数为单位的设置时间（setting time in unit of τ ）相符？（提示，只需验证其中一种滤波器参数设置。用 CH1 输出，示波器记录，可以从刻度和图中读出时间，注意图 D1- 21 左右两图的时间尺度不同。）

1.5 外部输入参考信号（选）

用信号发生器产生正弦信号作为外部参考信号（峰值要求在 200mV 以上），并用三通将信号用 BNC 线分别接入 REF IN, 和 signal in 的 A/I, 在锁相放大器参数设置 Ref.source->external; 重复操作（自己设计方案：测什么、测量参数的范围、测量点数、是否截图等）。

【问题 8】对于 0E1022 锁相放大器的信号处理质量，通过本节实验结果回答：用内部参考信号效果好还是外部参考信号效果好？所检测的相位差与频率有何关系？请与数学推导的结果比较。

1.6 强噪声背景下的弱信号检测

强噪声背景检测弱信号是本平台最基本的实验，其目的是进一步展示锁相放大技术的基本原理和抑噪能力，要求学生掌握提取深埋于强噪声中的微弱信号的锁相放大技术，结合实际操作，增强动手能力。本实验要求使用幅值为 μV 级别的正弦波信号模拟待测信号，与幅值可调的白噪声叠加，其噪声幅值达到待测信号的一千倍甚至一万倍，原理图如图 D1- 22 所示。

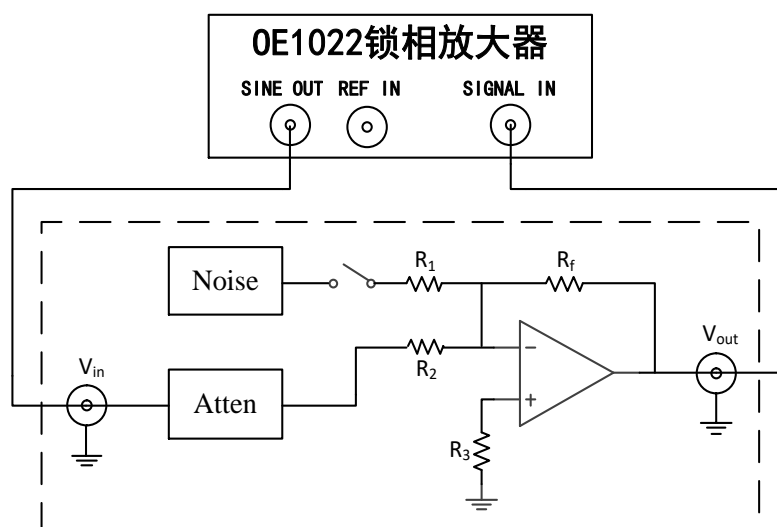


图 D1- 22 强噪声背景检测弱信号实验原理图

教学实验箱自带 100mVrms 的白噪声发生器，其原理是利用双极性晶体管散粒噪声的功率特性来产生白噪声^[10]；通过拨码器选择可以得到 100mVrms、10mVrms、1.0mVrms 的白噪声信号。由锁相放大器 OE1022 的 SINE OUT 以及外部的 80dB（10000 倍）信号衰减器，可以得到 100nVrms 到 5Vrms 的正弦信号。通过运放把信号与

噪声相加得到不同信噪比的待测信号，然后由锁相放大器对此信号进行提取测量。

实验步骤：

1. 用示波器观察教学实验箱噪声发生器输出的噪声是否白噪声？记录时域和频域的图谱来说明。
2. 比较 OE1022 与示波器对不同信号强度和信噪比的测量结果
 - (1) 使用 OE1022 产生非市电倍频的频率（如 986Hz），幅值为 100mVrms (0.282Vpp) 的正弦波信号；
 - (2) 对锁相放大器 OE1022 进行设置，（自己写出）：
 - a. 在 INPUT FILTERS 菜单，设置 Source，
 - b. 在 GAIN TC 菜单，设置 Sensitivity、Reserve、Time Constant、Filter dB/oct 等；
 - c. 进入 REF PHASE 菜单，设置 Ref. source；
 - (3) 使用 BNC-BNC 信号线连接 OE1022 的“SINE OUT”接口与实验箱本实验框图中的“V_{IN}”接口；
 - (4) 通过分线器，使用 BNC-BNC 信号线将实验箱本实验框图中的“V_{OUT}”接口分别连接到 OE1022 的“A/I”接口、和示波器输入端；
 - (5) 读取 OE1022 测得的 R 值，即为被噪声信号淹没的正弦信号有效值，将实验测得 R 值和 θ 值记录在**错误!未找到引用源。**中；
 - (6) 在示波器中通过“Math”选带通滤波器，设置信号频段（通带频率范围），并在滤波后的信号中读取有效值；截录滤波前后的波形图，将该值以及波形图分别记录在**错误!未找到引用源。**中；
 - (7) 改变 OE1022 产生正弦波有效值，在不同信噪比下重复上述测量；仅要求测量 3 种信噪比的情况，其中必须包括信噪比为 -60dB 的情况。
 - (8) 观察滤波效果，分析实验结果。

提示：

1. 慎用示波器的“auto”，因为它只对周期性信号有效；对于噪声，还是练练手动调节吧。
2. 用三通将输出信号分别连接到锁相放大器的输入端（A/I）和示波器的输入端；
3. 在用示波器观察、测量信号有效值（均方值）时，请注意屏幕时间轴范围应达到待观测信号完整周期的整数倍；为什么？
4. 0.1mVrms 的正弦波 Vin 幅值可通过 SINE OUT 设置输出 1.0Vrms，经过 80dB 衰减器获得。

【实验报告思考题】不必单独回答，在数据处理后回答。

1. 描述用教学实验箱配制不同信噪比信号的原理；实验箱生成的噪声是否为白噪声？
2. 随着信噪比的改变，信号 R 和相位差 θ 的测量值会有什么影响？
3. 所有的噪声都可以用锁相放大器消除吗？锁相放大器的理论检测极限是多少？受什么限制？（提示：降低信噪比后，锁相放大器的测量值偏差变大的原因是什么？缩小 LPF 带宽能缩小该偏差吗？为什么？）
4. 请比较锁相放大器与示波器（经过带通滤波后）测量不同信噪比信号的结果，分析两种测量仪器（方法）的优势与劣势。[极限比较（选）应与思考题 3 结合起来：为提高测量值的信噪比，锁相放大器可以选择窄带宽的 LPF 来降低式(D1- 18)中的 n_{ω_r} ，亦可以通过对如式(D1- 17)所描述的 X 值和 Y 值多次采样后求平均]。

【实验前思考题】(5 分)(空间不够,可自行加页)

1. 噪声有哪些类型? 一般测量对象本身的噪声是哪来的? 它有什么特征?
2. 请在预习报告中给出用示波器测量**错误!未找到引用源。**相同配比信号的实验步骤。
3. (选) 请制定测量方案, 在设定输入后, 探索以下仪器参数对锁相放大器测量结果和输出 (output) 的影响:
 - (1) 增益 (10V/灵敏度)
 - (2) 时间常数
4. 学习用示波器带通滤波器过滤噪声的操作。



专业：		年级：	
姓名：		学号：	
室温：		实验地点：	
学生签名：		评分：	
日期：		教师签名：	

实验

【分析与讨论】(按照实验过程依次完成每项实验的“分析和讨论”，共3项实验，每项5分，总计15分)

【实验思考题】(10 分)

1.

2.

3.

4.

