

参 考 文 献

- [1] C. Childs, L. Slifkin, *Bull. Amer. Phys. Soc.*, **6** (1961), 52.
- [2] A. I. Bogdanov et al., *Nuclear Track Detection*, **2-3** (1978), 165.
- [3] G. Haase, E. Schopper, F. Granzer, *Solid State Nuclear Track Detectors*, Proc. 9th Int. Conf., Neuherberg/Munchen, (1976), 199.
- [4] V. D. Dmitriev, N. P. Kocherov, N. R. Novikova, N. A. Perfilov, *Solid State Nuclear Track Detector*, Proc. 9th Int. Conf., Neuherberg/Munchen, (1976), 217.
- [5] J. U. Schott, E. Schopper, F. Granzer, K. Dardat, G. Henig, 8th Int. Conf. Nucl. Photography and Solid State Track Detectors, Bucharest, (1972), 373.
- [6] E. Schopper, F. Granzer, G. Henig, J. U. Schott, K. Dardat, 8th Int. Conf. Nucl. Photography and Solid State Track Detectors, Bucharest, (1972), 350.
- [7] J. U. Schott, E. Schopper, R. Staudte, *Solid State Nuclear Track Detector*, Proc. 9th Int. Conf., Neuherberg/Munchen, (1976), 615.
- [8] F. Zörgiebel, G. Haase, G. Henig, E. Schopper, J. U. Schott, *Z. Angew. Physik*, **30-4** (1970), 316.
- [9] Th. Wendnagel, E. Schopper, F. Granzer, *Solid State Nuclear Track Detectors*, Proc. 10th Int. Conf., Lyon, (1980), 147.
- [10] G. Henig, E. Schopper, F. Granzer, K. Dardat, 8th Int. Conf. Nucl. Photography and Solid State Track Detectors, Bucharest, (1972), 384.
- [11] B. Charles, *Phys. Rev. Lett.*, **9-8** (1962), 354.

如何正确使用锁相放大器

陈 佳 圭

(中国科学院物理研究所)

近二十年来,锁相放大器(Look-In Amplifier,以下简称LIA)得到十分迅速的发展,我国在引进不少国外产品的同时,也研制生产了一些同类产品^[1],而且需求量正在日益增加。为了使这些先进科学仪器能获得更好的应用,有必要将其特点、使用方法和技巧,用实例加以阐述。

LIA的合理使用常常是研究工作的重要环节,巧妙的应用可以得到十分理想的结果。由于LIA本身的改进和发展,类型增多,普遍适用性强,附件繁杂,给使用者带来很多方便,但也产生了如何正确选择的麻烦。

一、使用前须知

1. LIA是对噪声有相当抑制能力的AC电压表,通过相敏检波器(PSD)进行频谱变换,再用低通滤波器(LPF)压缩等效噪声带宽(ENBW),使大量的宽带噪声得到有效的抑制。因此,LIA的输入是交流信号(正弦波、方

波或类方波),输出是直流信号,输出与输入成正比,比例常数是LIA的总增益。若被测信号不是AC信号,则需外加调制,才能使用LIA。

2. LIA的输入端,往往是一个传感器,例如光电倍增管、电子倍增器、温差电偶、压电晶体等。其作用是将微弱的被测非电量转换成电信号加以检测。因为弱信号的转换取决于这一级,所以对传感器的性能和选择必须充分了解。表示传感器性能的参数有:

(1) 灵敏度响应,即

$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta P_{in}} \quad \text{或} \quad \frac{\Delta I_{out}}{\Delta P_{in}},$$

ΔP 表示被测非电量的变化, ΔV_{out} 、 ΔI_{out} 分别表示传感器输出电压和电流的变化量。灵敏度响应直接关系到LIA的灵敏度(即总增益),它提供选择合用的LIA与前置放大器的数据。

(2) 输出阻抗。对LIA而言,即为输入源阻抗。它决定前置放大器的选择。源阻抗不同,匹配方法亦异。例如光电倍增管是高阻,温差电偶为低阻,压电晶体则是高阻电容性阻

抗。

(3) 等效噪声功率。表征传感器本身的固有噪声的量级。对 LIA 而言,则需根据噪声给定动态储备。

(4) 响应时间。它关系到测量的工作频率或调制频率范围的确定。例如光电倍增管的响应时间为 2ns, 调制频率基本上不受限制;但对真空温差电偶而言, 响应时间为 20ms, 调制频率必须小于 50Hz。

3. 前置放大器的正确选择:

传感器首先与前置放大器相联接。为了使前置放大器获得最佳的噪声匹配, 常常有多种前置放大器可供选择, 其各自的噪声因数图(即 NF 图)提供了选择的依据。NF 的定义为

$$NF = 20 \log_{10} \frac{\text{折合到输入端的总噪声电压}}{\text{源热噪声电压}} \text{ dB},$$

逐点测量便可画出每个前置放大器特定的 NF 图。NF 图不仅是源电阻 R_s 的函数, 而且与工作频率 f 有关。在弱信号检测中, 我们总是希望前置放大器具有最小 NF 的源阻抗 R_s 和频率 f 的范围, 以得到最佳测量结果; 或者对于已给定 R_s 值及 f 范围的传感器, 利用 NF 图可选择噪声最小的前置放大器。例如光电倍增管, 其 R_s 很高, f 可任意确定, 因此首先考虑使用高源阻抗的前置放大器, 然后由 NF 图挑选最佳工作频率。但对于真空温差电偶, 它的 f 需小于 50Hz, R_s 约为 10—20 Ω , 适用于光电倍增管的前置放大器就不能用于温差电偶。只能使用低源阻抗、低频率和 NF 较小的前置放大器, 必要时还需附加一阻抗匹配变压器。

4. LIA 对噪声的抑制能力取决于 ENBW 的大小。ENBW 越小, 噪声抑制越大。ENBW 反比于积分器(即 LPF)的时间常数。因此, LIA 的信噪比改善是以牺牲测量时间为代价的。

对连续的、固定的信号测量, 应采用长积分时间常数, 但对诸如俄歇谱、光谱、电子衍射及能量损失谱等进行测量时, 要检测的常常是变化量, 这时积分时间常数的设定必须与被测量的变化速度相适应。积分时间常数过小, 噪声

就大, 过大, 虽然噪声减小, 但有用信号也被积分平滑而严重失真。

5. LIA 是一种相关测量, 它锁定了信号的固有频率和相位。这正是随机噪声所不具备的特性。为了满足这种相关测量的要求, 必须外加与信号相干的参考信号。参考信号可以用多种方式获得。对确实不具备参考信号条件的交流信号, 则可采用闭环 LIA, 这种性能只有少数 LIA 具备, 而且需要一定的捕获时间。

6. 多数 LIA 具有 F 与 $2F$ (也有 $F/2$) 的选择开关, 表示经频率变换后加到 PSD 的参考频率是信号频率的 1 与 2 (也有 1/2) 倍, 可以测量信号的二次谐波和分谐波的分量。但是更多的应用是表示附加调制信号的一次微分 ($F_{\dot{}} = F_{\dot{}}$) 和二次微分 ($F_{\ddot{}} = 2F_{\ddot{}}$)。这是因为当附加调制电压为

$$\Delta E = K \sin \omega t,$$

当 K 比较小时, 对信号电压 $V(E + \Delta E)$ 的泰勒级数展开并简化, 得

$$V(E + \Delta E) \doteq V_0 + V'K \sin \omega t - \frac{V''K^2}{4} \cos 2\omega t.$$

由此可见, 只要检测频率为 ω 的信号, 即 $F_{\dot{}} = F_{\dot{}}$, 相当于检测 $dV(E)/dE$ 的分量; 当检测频率为 2ω 的信号时, 即 $F_{\ddot{}} = 2F_{\ddot{}}$, 相当于检测 d^2V/dE^2 的分量。这在很多谱仪分析中得到广泛的应用。

7. 当被测信号的噪声大时, 需适当减小 AC 增益, 即 PSD 前的放大倍数需减小, 使有足够的动态储备, 避免噪声引起 LIA 过载。当被测信号的噪声较小时, 则可增加 AC 增益, 增加输出动态范围, 使测量更准确。为了使用方便起见, 有的 LIA 设有高储备和高稳定开关, 适合于上述两种情况的选择。

8. 补偿开关和十圈电位器是非常有用的。它使输出最大可达 $\pm 1000\%$ 。在无信号输入时, 可用来校正输出零点漂移和调节记录笔的适当位置; 在有信号输入时, 借以扩大读数范围而使零点漂移影响降至最小。

9. PSD 是对基波及其奇次谐波均有响应

的梳齿状滤波器,由于谐波的响应幅度按谐波数递减,所以对一般测量影响不大。但若要检测很大噪声掩盖下的弱正弦信号,需避免奇次谐波频率处的 ENBW 所通过的噪声,便可选择具有脉宽调制的唯基 (Sinetrac) 测量的 LIA。

10. 不要以为 LIA 有显著的噪声抑制能力,而忽视了应有的屏蔽和良好的接地,因为它可能是实验工作成败的关键。必要时可采用浮地工作状态。

以上所述是良好使用的一些基本原则,若需进一步了解,可参阅有关文章^[1-5]。

二、交流 (AC) 桥

由于篇幅所限, LIA 大量常规的、简单的应用不再赘述,而重点介绍普遍应用的 AC 电桥的技巧。这一方面是适宜于 LIA 的 AC 检测要求,另一方面是 AC 桥比 DC 桥具有更多的优点。以热敏电阻桥为例, AC 桥的功耗比 DC 桥小 10 倍,随机涨落小 50 倍, AC 桥有明显的优点。同时, LIA 是作为 AC 桥的零检测器使用,检测灵敏度高,抑制噪声能力强,因此,测量结果更为理想。例如进行温差测量时, AC 桥的灵敏度至少可提高 10 倍。

AC 桥电路如图 1 所示, Z 表示阻抗, E 为振荡器电压, AC 桥电路平衡臂处的剩余电压 E_n 为

$$E_n = \left(\frac{Z_4}{Z_1 + Z_4} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_2} \right) E$$

$$= E(\text{Re} + j\text{Im}),$$

式中 $Z = R + jx$, 当 $E_n = 0$ 时, $Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$, 由实数部分相等, 即 $\text{Re}(Z_1 Z_3) = \text{Re}(Z_2 Z_4)$, 可得

$$R_1 R_3 - x_1 x_3 = R_2 R_4 - x_2 x_4,$$

由虚数部分相等, 即 $\text{Im}(Z_1 Z_3) = \text{Im}(Z_2 Z_4)$, 可得

$$x_1 R_3 + x_3 R_1 = x_2 R_4 + x_4 R_2.$$

具体说来, 如图 2 所示的桥臂中包含待测阻抗元件 R_x 和感抗元件 L_x 。如果 LIA 具有正交

物理

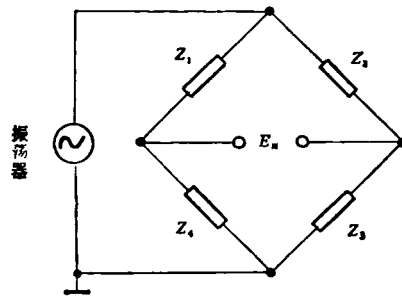


图 1 AC 桥电路

输出指示的话, 则可根据实数部分或虚数部分为零(调节相移器的相位), 分别求得待测量

$$R_x = \left(\frac{R_1}{R_2} \right) R_3,$$

$$L_x = \left(\frac{R_1}{R_2} \right) L_3.$$

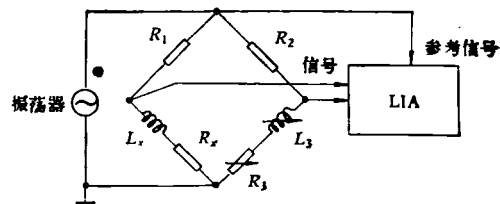


图 2 AC 桥测量实例

LIA 非常容易实现这种正交测量。实部与虚部对 LIA 而言, 只不过是参考通道的相位差为 $\pi/2$ 而已。有时为了同时测量两个正交分量, 可以采用两台 LIA。为了消除增益的偏差和节省元件, 目前已有能同时显示两个正交分量的 LIA 产品。根据矢量正交工作框图自行安排^[6], 也可达到同时测量两个正交分量的目的。

在 AC 桥的测量中, 桥臂中的电抗元件若是变动的, 则需不断调整移相器的相位, 造成测量困难。只要将上述正交矢量的输出 $A \cos \theta$ 和 $A \sin \theta$, 利用模拟电路(模拟乘法器)或微处理机完成下列运算:

$$\sqrt{(A \cos \theta)^2 + (A \sin \theta)^2} = A,$$

$$\tan^{-1} \frac{A \sin \theta}{A \cos \theta} = \theta,$$

便可测量幅度 A 与相位 θ , 从而不需要不断调

整移相器。

LIA 不仅可作 AC 桥的平衡测量, 还可通过反馈进行控制。图 3 表示 LIA 用作低温测量与温度控制的实例。

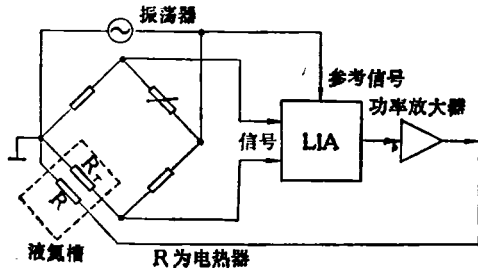


图 3 LIA 用作反馈控制

三、调制方法

调制方法是 LIA 应用的重要部分。所谓调制, 是指如何获得参考信号, 使 LIA 处于相干的工作状态。在一些简单的应用中, 发生器同时提供了调制的参考源。这里进一步介绍应用技巧。

1. 光吸收测量

这里列出了三种不同的调制方法(见图 4)。图 4(a) 是电调制, 调制信号附加在样品的偏压电参数上, 使偏压有一固定频率的微扰, 光吸收参数亦随之变化, 从而完成相干检测。图 4(b), (c) 是在样品不需要外加偏压或光吸收对偏压

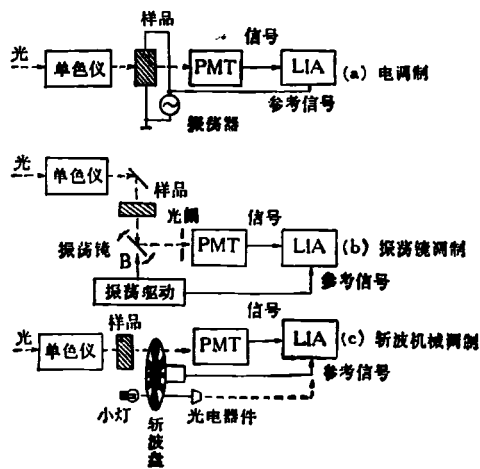


图 4 光吸收的三种测量方法

不敏感的场所所采取的两种机械调制方法。其中图 4(b) 是将反射镜 B 用音叉或振子使其扭振或平振, 从而使被测光间歇地通过限制光阑, 光电倍增管接收的便是与振子同频率的调制光。图 4(c) 是利用斩波盘的光调制。LIA 的参考信号可取自斩波器的附加电路(实线)。若无这种附加电路, 则可在斩波盘的适当位置放一小光源, 另一侧用光电器件接收并放大(虚线)。由于是同一个斩波盘调制, 待测信号与参考信号的频率相同, 相位差不变。

2. 弱光测量

这里主要的目的是介绍两台 LIA 的组合使用。如图 5 所示, A 为被测样品, B 为用作对比的标准样品或衰减器, 这在弱光测量中可以自动补偿源强度的起伏或源的谱密度变化。斩波盘有两种频率的开槽, 分别为 f_1 和 f_2 , 两者没有相同的谐波关系。调整反射镜和半透镜的位置, 使光路通过内外调制槽。不同斩波的光程相同的两束光混合通过光电倍增管, 然后由两台 LIA 分别检测, 用比例计加以比较。

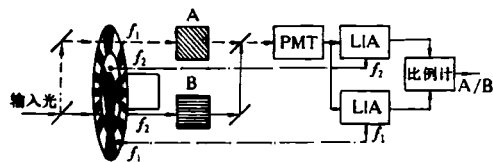


图 5 弱光测量

(A 为样品, B 为标准样品或衰减器)

3. 分析仪器的应用

LIA 在表面分析仪器中得到广泛的应用, 例如俄歇谱 (AES)、扫描高能电子衍射 (SHEED)、低能电子衍射 (LEED)、化学分析电子能谱 (ESCA)、电子损失谱 (ELS)、二次离子质谱 (SIMS)、离子散射能谱 (ISS)、核磁共振谱 (NMR)、电子自旋共振 (ESR) 等等, 均需使用 LIA。图 6 是一个便于说明的综合框图, 在实际应用中可根据需要而增减电路。调制发生器是用来调制电子束的, 它可直接用于电子显微镜, 尤其是当样品需要加热时, 可消除热电子发射所引起的图象模糊。图 6 中所标的 A, B, C, D, E, F 各点, 都是可以加调制的位

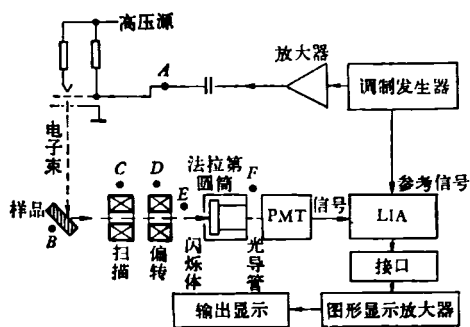


图6 LIA 在分析仪器中的应用

置。A点是电调制加于电子枪的位置。B点是在样品上加一调制电压的位置，周期地调制样品的发射电子。C和D也是加电调制的位置，加在扫描线圈和偏转线圈上。E和F点只能用斩波盘的机械调制。当然也可在能量分析器上，这在图中未标出，因为调制方法相同。既然至少可在A至F六个位置加以调制，至于选择何处为好，则要取决于测量要求。例如，若要得到清晰的衍射照片，就不能在电子枪A点调制；

若由于样品荷电而引起灵敏度降低或样品电流不能用作信息处理，则不能在B点调制，等等。另一方面，调制位置也取决于设备的空间结构，例如E点往往是在真空系统中，加入斩波器将带来漏气与密封的矛盾；F点则是在真空室外。所以需要根据实际情况而定。但一般来说，调制位置在系统中的较前端为好，例如E点优于F点，因为积累噪声较小，有利于检测。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院物理研究所微弱信号检测小组、江西庐山电子仪器厂，物理，6(1977)，206。
- [2] 中国科学院物理研究所微弱信号检测小组，物理，6(1977)，335；7(1978)，45。
- [3] 中国科学院物理研究所微弱信号检测小组，物理，9(1980)，236。
- [4] J. C. L. van Peppen, Modern Electronic Measuring Systems, Delft University Press, (1978), 119.
- [5] D. P. Blair and P. H. Sydenham, J. Phys. E, 8(1975), 621.
- [6] 陈佳圭，仪器仪表学报，1(1980)，108。

如何获得高分辨高质量的 X 射线形貌图

麦 振 洪

(中国科学院物理研究所)

X射线形貌术是研究晶体材料缺陷的重要工具之一。目前，它被广泛地用来研究晶体材料的生长缺陷、加工缺陷以及使用缺陷。

本刊已发表了若干文章，介绍了X射线形貌术的基本原理、实验方法、主要应用和发展方向^[1-3]。本文仅就如何获得高分辨、高质量的形貌图这个X射线形貌工作者最关心的问题，结合我们的工作，以Lang透射形貌术为例谈我们的体会，着重讨论影响形貌图质量的几个主要因素。

一、X射线源大小和波长发散度的影响

Lang相机的分辨率直接与X射线源的大物理

小和波长有关。有关分辨率的分析已有文章叙述^[4]，这里只从实验的角度来讨论。

1. 形貌图的垂直分辨率

这是影响形貌图分辨率最重要的参数，其值为 $\Delta X_{\perp} = h_{\perp} \cdot \frac{b}{a}$ ，其中a为光源到样品的距离，b为样品到底片的距离， h_{\perp} 为X射线源投影焦点的垂直高度。可见，使用小焦点光源，减少b和增大a是提高分辨率的措施。目前，国外一些形貌相机准直光阑长达1.5m，而且，对某些高分辨实验，b甚至只有2mm左右。应指出，采用小焦点X射线源对提高垂直分辨率尤为重要，如对高分辨形貌图 $\Delta X_{\perp} \sim 1\mu\text{m}$ ，若 $b = 5\text{mm}$ ，对 $h_{\perp} = 1\text{mm}$ ，即 $a = 500\text{cm}$ ；而对