

光学信息处理和全息术

——辻内顺平教授讲课记录

辻内顺平教授于1980年11月3日到11月10日在我所进行讲学。主要内容分四部分：模糊图象的光学信息处理、全息显示、全息干涉和声全息。本文是根据听课记录材料整理的。

一 模糊图像的光学和混合处理方法

摄影时，由于光学系统的像差，离焦，空气的抖动，相机本身的移动等因素都会造成图像模糊。这种情况是常常遇到的，因此必须进行图像修改，改善照片的质量。

到目前为止，消模糊的研究已经有二十几年的历史了。试验了各种各样方法，目前认为计算机方法最好，也可以用光学或光学与其它技术混合使用的方法，得到较好的结果。

模糊图像（见图1）可以表示成

$$i(x', y') = \iint o(x, y)h(x' - x, y' - y)dx dy \quad (1)$$

此处 $o(x, y)$ 表示物函数， h 表示点扩散函数， $i(x', y')$ 表示模糊像函数。将（1）式两边作付里叶变换，就得到

$$\begin{aligned} I(\omega_x, \omega_y) &= O(\omega_x, \omega_y)H(\omega_x, \omega_y) \\ O(\omega_x, \omega_y) &= I(\omega_x, \omega_y) \cdot F(\omega_x, \omega_y) \end{aligned} \quad (2)$$

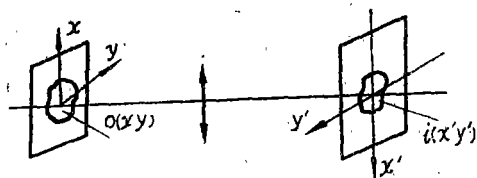


图 1

其中 $F(\omega_x, \omega_y) = 1/H(\omega_x, \omega_y)$

$I(\omega_x, \omega_y)$ 、 $O(\omega_x, \omega_y)$ 和 $H(\omega_x, \omega_y)$ 分别为模糊图像、物函数和点扩散函数的付里叶变换。

将（2）式再作一次付里叶逆变换就得到恢复好的原像。实现这种运算用计算机最简单，当然用其它方法也可以实现这种运算。

$F(\omega_x, \omega_y)$ 表示滤波器，它可以取下面三种形式：

1. 没有噪音时的逆滤波器

当物体为 $[g = o * h]$ 时，*号表示卷积符号，滤波器可以写成 $F(\omega_x, \omega_y) = 1/H(\omega_x, \omega_y)$ 的形式。

2. 消去噪音的滤波器

当有噪音存在时，物体可以写成 $g = o(x, y) + n(x, y)$ ， $n(x, y)$ 表示噪音函数。消去噪音的滤波器可以写成

$$F(\omega_x, \omega_y) = \frac{|O(\omega_x, \omega_y)|^2}{|O(\omega_x, \omega_y)|^2 + |N(\omega_x, \omega_y)|^2}$$

$N(\omega_x, \omega_y)$ 表示噪音的频谱。

3. 有噪音时恢复图像

当有噪声存在时, 恢复图像的滤波器为

$$F(\omega_x, \omega_y) = \frac{H^*(\omega_x, \omega_y) |O(\omega_x, \omega_y)|^2}{|H(\omega_x, \omega_y)|^2 [|O(\omega_x, \omega_y)|^2 + |N(\omega_x, \omega_y)|^2]}$$

同一种滤波器可以通过不同的手段来实现。下面仅就逆滤波器这种形式进行简单介绍。逆滤波器可以改写成

$$F(\omega_x, \omega_y) = 1/H(\omega_x, \omega_y) = \frac{H^*(\omega_x, \omega_y)}{|H(\omega_x, \omega_y)|^2}$$

我们可以用全息照相的方法获得 H^* , 而用照相法获得 $1/|H|^2$, 二者合起来使用, 就达到了滤波的目的。

一般来说滤波器可以分成两类, 一类是振幅滤波器, 另一类是位相滤波器, 振幅滤波器可以用照相法制作, 而位相滤波器可以用镀膜法制作, 也可以用全息法制作。

下面简单介绍一种相干光学处理装置, 如图 2 所示。镜头 L_0 将点源 S 准直成平面波(即

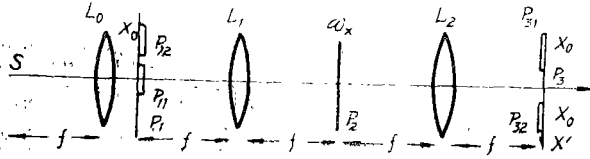


图 2 相干光学处理装置示意图

空间相干光), L_1 和 L_2 为付里叶镜头。在 P_{11} 处放置透过率为 $g_1(x, y)$ 的照片, 在 P_{12} 处放置透过率为 $g_2(x - x_0, y)$ 的照片, 在平面 P_2 上用 $r = -2$ 的干板记录全息图, 它的透过率为

$$T_H(\omega_x, \omega_y) = |G_1|^2 + |G_2|^2 + G_1^* G_2 e^{-i 2 \pi \omega_x x_0} + G_1 G_2^* e^{i 2 \pi \omega_x x_0} \quad (3)$$

其中 $G_1(\omega_x, \omega_y)$ 和 $G_2(\omega_x, \omega_y)$ 分别表示 $g_1(x, y)$ 和 $g_2(x, y)$ 的频谱。然后遮住 P_{12} , 将振幅分布为 $g_3(x, y)$ 的照片放在 P_{11} 处, 将全息图 T_H 放回频谱面 (P_2) 上, 这时频谱面上的振幅分布为 $G_3(\omega_x, \omega_y) T_H$, 在 P_3 上得到

$$g'(x', y') = F^{-1}[G_3(|G_1|^2 + |G_2|^2)] + F^{-1}[G_1^* G_2 G_3 e^{-i 2 \pi \omega_x x_0}] + F^{-1}[G_1 G_2^* G_3 e^{i 2 \pi \omega_x x_0}] \quad (4)$$

我们只对 (4) 式右端第二、三项感兴趣, 在 P_{32} 处得到

$$g'_2(x', y') = g_2(x', y') * [g_1(x', y') \star g_3(x', y')] * \delta(x' - x_0, y') = g_3(x', y') * [g_1(x', y') \star g_2(x', y')] * \delta(x' - x_0, y') \quad (5)$$

★号表示相关符号, (5) 式由 (4) 式第二项得到。在 P_{31} 处得到

$$g'_1(x', y') = g_1(x', y') * [g_2(x', y') \star g_3(x', y')] * \delta(x' + x_0, y') = g_3(x', y') * [g_2(x', y') \star g_1(x', y')] * \delta(x' + x_0, y') \quad (6)$$

(6) 式对应 (4) 式第三项。适当地选择 g_1 、 g_2 和 g_3 可以作相关、匹配滤波、编码变换等二维处理。自然可以用上述装置完成消模糊运算, 此时将 g_1 作为摄影系统的点扩散函数 $h(x, y)$, 而 g_2 作为狄拉克 δ 函数 $\delta(x - x_0, y)$, 在 P_2 面上获得摄影系统的 PSF 付里叶全息图, 并将它与它的功率谱并用, g_3 作为模糊图像, 在 P_{32} 处就得到了恢复后的图像。

滤波器中最困难的是实现 PSF 中负的部分。用相干方法可以实现。用电子学方法也可

以实现。实际装置如图3所示， S 是飞点扫描管， E 是起偏振器， F 是环形半波片， P 是散焦的透明片，检偏器 A_1 与 E 平行，检偏器 A_2 与 E 正交， M 是半反半透镜。这样光电倍增管 I_1 只能探测中心光束，而光电倍增管 I_2 只能探测边缘部分光束（即经过环形半波片的部分），于是在监视器上可以看到光电流之差 $I_1 - I_2$ 。

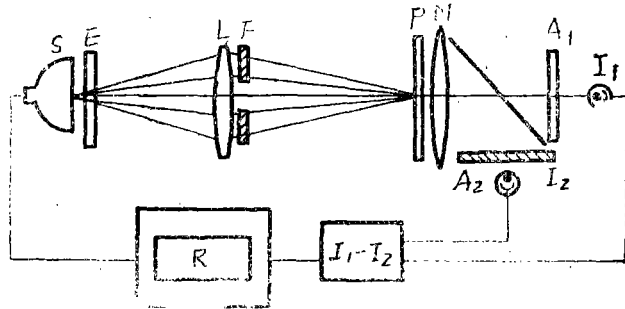


图3 用光学和电子学方法实现滤波的装置

由于摄影机的像面的轴移动，使图像变模糊，恢复离焦图像可以采用各种方法，最有效的方法之一是光学—电子学模拟方法。它是一个发展了的像扫描方法，采用一个离散的多重孔径光检流器阵列来实现的，在这个阵列中的每个检波单元有它自己的权因子。

扫描孔径是圆形的，它的弥散应小于离焦点扩散函数的二倍，而且分成十个等间隔的同心环。最后用数字计算机处理系统来进行卷积运算。离焦图像是由空间不变光学系统在非相干照明条件下拍摄的离焦照片。在这个运算过程中由于进行模拟处理，所以误差是不可避免的。

关键的问题是确定孔径函数，如果成像系统中离焦量影响大于其它因素的影响时，离焦光学系统中点扩散函数的形状与物镜光瞳函数相类似。光学系统通常采用圆孔径，离焦像盘是圆盘，若离焦半径为 d ，则点扩散函数与传递函数如图4所示。

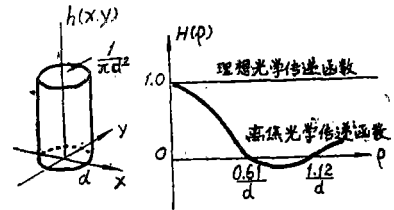


图4 点扩散函数与光学系统传递函数

要决定权重因子分布，必须对光瞳函数进行必要的限制，首先需要限定下面三个条件：

- (1) 光瞳函数应该是圆对称的，用 $g(r)$ 表示，
- (2) $g(r)$ 弥散小于 PSF 的2倍，
- (3) 扫描孔径直径 $2d$ 由十个等间距同心环组成，在每个带中 $g(r)$ 值为常数。

设各个带的权重因子分别为 W_1, W_2, \dots, W_{10} ，光瞳函数用下式表示

$$g(r) = \sum_{n=1}^{10} W_n g_n(r)$$

$$= W_1 \times \text{Circ}\left(\frac{5}{d}r\right) + \sum_{n=2}^{10} W_n \left[\text{Circ}\left(\frac{5}{nd}r\right) - \text{Circ}\left(\frac{5}{(n-1)d}r\right) \right] \quad (7)$$

其中

$$\text{Circ}(r) = \begin{cases} 1 & r \leq 1 \\ 0 & \text{别处} \end{cases} \quad (8)$$

将 $g(r)$ 作付里叶变换，得到光瞳函数的付里叶谱，

$$G(\rho) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} g(r) \exp\{i2\pi\rho r \cos\theta\} r dr d\theta$$

$$= W_1 \frac{dJ_1(0.4\pi d\rho)}{5\rho} + \sum_{n=2}^{10} W_n \left[\frac{ndJ_1(0.4\pi nd\rho)}{5\rho} - \frac{(n-1)dJ_1[0.4(n-1)d\rho]}{5\rho} \right] \quad (9)$$

选择权重因子 $W_1 \cdots W_{10}$, 使得 K 尽可能的大, K 由下式给出:

$$K = \frac{1}{P_0} \int_0^{1.12/d} P(\rho) d\rho \quad (10)$$

$$P(\rho) = G(\rho)H(\rho) \quad (11)$$

$P(\rho)$ 表示处理后的 OTF , P_0 表示 $P(\rho)$ 在 0 到 $\frac{1.12}{d}$ 频率间隔的最大值。 K 值表示处理后的 OTF 与理想 OTF 的相似程度。但是权重因子 $W_1 \cdots W_{10}$ 只能近似选择, 可以分四步进行:

1. $W_5 = +5$
2. W_n 为整数
3. $-10 \leq W_n \leq +\infty$
4. $\rho_0 = 1.12/d$

对于每一种 $W_1 \cdots W_{10}$ 的组合都计算 K 值, 找出最好的一组, 得到尽可能大的 K 值。上述的计算和选择都是由计算机完成的。另一种决定权重因子的方法是解析方法,

$$g(r) = \sum_{n=1}^N W_n g_n(r) \quad (12)$$

$$G(\rho) = \sum_{n=1}^N W_n G_n(\rho) \quad (13)$$

$$M = \int [S(\rho) - P(\rho)]^2 \rho d\rho \quad (14)$$

$P(\rho)$ 为处理后的 OTF , 而 $S(\rho)$ 为目标值, 它由下式给出

$$\begin{pmatrix} P_{11} & \cdots & P_{N1} \\ P_{12} & & P_{N2} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{1N} & \cdots & P_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_N \end{pmatrix} \quad (15)$$

其中 $P_n(\rho) = H(\rho)G_n(\rho)$ (16)

寻找出一组使 M 最小的 S 值, 然后由 (15) 式计算权重因子。经过实验证实, 二者效果相同。

一个理想物体的图样的强度数据阵列可以经飞点管输入到计算机中, 一个理想离焦像的数据用程序得到, 二组数据存在一个磁带上, 然后用计算机进行卷积运算来恢复图像, 恢复了的图像存在磁带上, 最终记录在照相底片上, 其装置见图 5。

最后介绍一下恢复图像的标准, 恢复程度用 R 表示。

$$R = \left(1 - \frac{\theta}{\theta_0} \right) \times 100\%$$

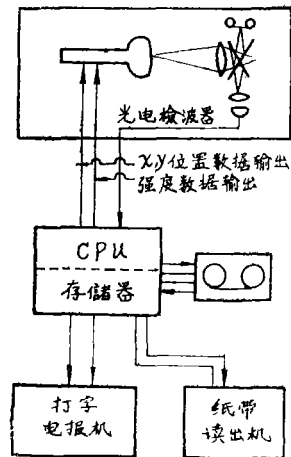


图 5 消除图像离焦模糊的光学—电子学模拟计算机处理装置方框图

其中

$$\theta = \frac{1}{4x_0 y_0} \iint [O(x, y) - O'(x, y)]^2 dx dy$$

$$\theta_0 = \frac{1}{4x_0 y_0} \iint [\theta(x, y) - i(x, y)]^2 dx dy$$

$O(x, y)$ 、 $i(x, y)$ 和 $O'(x, y)$ 分别是理想的，离焦的和恢复好了的强度。

二 全 息 干 涉

图6泰曼干涉仪的原理图。S是光源，C是准光物镜，M是半透板，E是投射物镜， O_1 、 O_2 是平面反射镜， Σ_1 、 Σ_2 分别是经 O_1 、 O_2 反射的波面。通过 O_1 、 O_2 反射的光相干涉。如果 O_1 或者 O_2 不是镜子，而是一般的物体也可以。但是，如果这两个物体不完全一样，就看不到干涉条纹。假如 O_1 和 O_2 都是粗糙的表面，这两个物体就不太一样，所以相干性也就没有了。

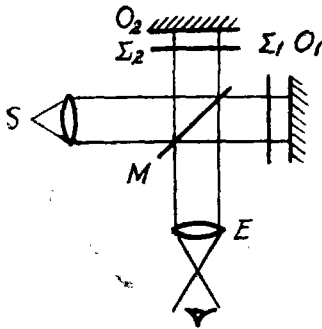


图6 泰曼干涉仪原理

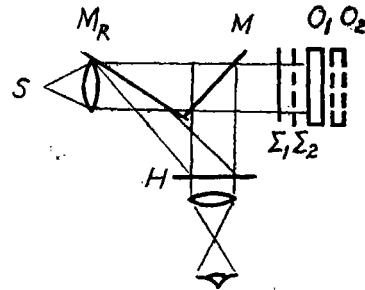


图7 全息干涉仪原理

全息干涉有各种各样的光路。也有一种象图7所示的光路。 H 是全息干板， M_R 是半透板， O_1 是物体。如图7所示，从 O_1 反射的光和从 M_R 反射的光相干涉产生全息图。然后拿掉 O_1 物体，换上 O_2 物体（编注：即 O_1 有微小变形的情况）。这时用 O_2 物体再做一次全息，和原来的全息图重叠曝光。这种方法叫二次曝光。如果第二次只用 O_2 光照原来第一次由 O_1 产生的全息图，不曝光，只观察，这种方法叫实时全息。

在实时全息中，从 O_1 过来的波面记录在全息干板上，经显影定影等处理后复位，然后换成 O_2 。这时用参考光照全息图再现出 O_1 的波面 Σ_1 ，从 O_2 反射回来的光直接透过全息图的波面为 Σ_2 。 Σ_1 和 Σ_2 直接干涉形成莫尔条纹。这时如果 O_2 形状有变化的话能实时地观察到。困难的是全息干板的复位精度要求高，复位精度必须不大于0.01毫米数量级，才能看到清楚的实时干涉条纹。另一个影响是干板乳剂的变形，它影响光程差的变化，引起干涉条纹的变化。

二次曝光得到的全息图，用共轭参考光一照，同时再现出波面 Σ_1 和 Σ_2 。因此可以观察到两者产生的莫尔条纹。但是，由于有干板处理问题，所以不能实时地观察变形。其优点是没有实时全息中干板乳剂影响和操作麻烦的问题，并且由于二次曝光中再现时，两次物体波面同时透过全息图，所以干板质量差一些也没有关系。但有时间间隔问题。因为两个物体不同时存在，时间上有先后，很容易得到时间延迟干涉。除这种延迟外，全息干涉和一般干涉没有本质上的区别。全息干涉能做到物波有一个先后时间差，这种原理可用来研究物体变形。其原理如图8所示。

物体从 O_1 位置移动到 O_2 位置，假设 O_1 处物体上 A_1 点移到 O_2 处 A_2 点。此时物体是粗糙面，可以从各个方向看到这个物体，所观察到的干涉条纹是 A_1 附近反射光和 A_2 附近反射光相干涉的结果。如果不是这两点反射的光，别的光是不相干的。因此粗糙面的干涉是同一点移动前后两处光的干涉。干涉条纹的光程差为

$$D = \vec{d} \cdot \vec{I}' - \vec{d} \cdot \vec{I} = \vec{d} \cdot (\vec{I}' - \vec{I}) = \vec{d} \cdot \vec{M}$$

式中 D 表示光程差， \vec{d} 表示物体本身移动矢量， I' 和 I 分别为入射光和观察光的矢量。 \vec{M} 为入射光和反射光角分线方向上物体移动矢量在该方向上投影矢量，这个投影即表示观察到干涉条纹。如图9所示。

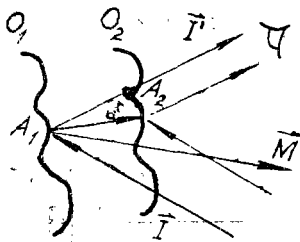


图8 用全息干涉法研究物体变形的原理图

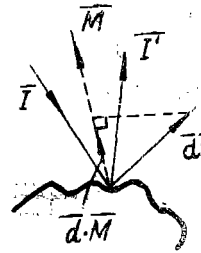


图9 粗糙表面时，干涉条纹光程差矢量图

如果我们希望垂直方向移动，最好的方法是利用一半透板，让入射光和反射光在垂直方向照明物体，这样物体在垂直方向上的变形就可以被观察到。(见图10)。物体沿垂直于光线方向的移动所产生的变形是观察不到的。即使有水平方向的移动，对干涉条纹有影响，但投影也观察不到。因此测出一个点的三维移动量需要一个麻烦的机构。

另一方面，如图11所示。设 O_1 物体移至 O_2 。 O_1 物体上 A 点移动到下面的 A 点， A 点发出的 Σ_1 和 Σ_2 是相干的。从 A 点反射的光和从 B 点反射的光即 Σ_1 或 Σ_2 与 Σ_3 是非相干的。

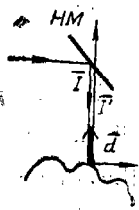


图10 光线垂直照射物体可测得物体沿光线方向变形

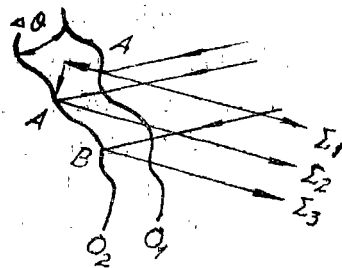


图11 物体倾斜时同点反射相干，不同点反射不相干

测物体移动有两种：1是物体倾斜，设倾斜角为 θ 。此时干涉条纹是等厚条纹。干涉条纹定位在物体表面上。和斐索干涉仪相同。2是平移，物体不倾斜，此时干涉条纹是等倾条纹；即 Haidinger 条纹。干涉条纹定位在无穷远。垂直方向移动的是 Brower 条纹。它定位在无穷远。复杂的是既有倾斜又有平移，条纹较难分析，干涉条纹位置既不在物体上，也不在无穷远。观察条纹要在物体与无穷远之间观察，这是很麻烦的。所以先要弄清楚干涉条纹的定位，不然观察很困难。一般只有倾斜而没有平移的情况是很少的。这时观察用

的光瞳应尽量小，使景深大，干涉条纹离开物体表面也能看到。另一个问题是物体是粗糙面时有一个斑点图样。光瞳太小时，斑点影响增大，因此当干涉条纹定位不在物体表面上，离开物体，使光瞳开小，结果斑点影响变大。

全息干涉问题及解决方法

全息干涉可测范围很窄，普通干涉仪也是1个波长到几十个波长。即被测物体正好在测试范围中间，要找到这种测试对象是不太容易的。但是，在泰曼干涉仪上就没有这个问题。它是静止的。在全息干涉仪中，不是镜面移动，而是粗糙面的移动，所以测试范围为十几个波长。用电子系统接收时，灵敏度是可调的。但在全息干涉仪中灵敏度的调节是困难的。主要是灵敏度不好控制。现在研究的解决办法有：提高灵敏度，降低灵敏度和相衬三种。

在应用于很窄的测试范围时，要定量地测出各种变形比较困难。为了定量测出变形，刚才所说的物体变形被干涉条纹所显示出来的是物体移动对入射光和反射光等分线上的投影量。所以我们采用沿入射光方向这种变形来做干涉系统。这样水平方向的移动不表现在干涉条纹里，使定量处理简化了。设计干涉仪的光学系统时要注意，使干涉条纹不需麻烦的计算处理，也能测出物体变形。

完全采用计算机处理来定量地测量变形时，装置的制作较困难。全息干涉的特点是，干涉仪的组合方式可以是多种多样的，怎么组合都行，泰曼干涉也好，马赫—曾特尔干涉仪也好，有现成的干涉仪也可直接用。但全息干涉仪要作商品卖，要做成一个通用的仪器是比较难的。目前全息干涉只能装备专门仪器。

在全息干涉的测量过程中，有显影等处理，非常烦杂，而且会带来误差，故希望全息干涉要采用信息能随机写擦，处理简便的记录介质。

全息干涉的特殊优点

1. 时间平均全息干涉法：可测振动，解释振动。
2. 时间调制全息法：振动物体的振动频率和参考光的频率同步，用于解释振动。
3. 双波长全息干涉法：可测物体形状和降低灵敏度。
4. 偏振光全息法：偏振光作全息图，不用偏振片，参考光起偏振片的作用。用于光弹性测试。这是用全息在物体表面产生干涉条纹，可提高灵敏度并可测物体形状。

辻内顺平教授又谈到全息干涉和普通干涉的一些区别，详见表 I

表 I

全息干涉	1. 两干涉波面可同时存在或有延迟。	2. 实时干涉需用实时记录介质。	3. 可测等厚和等倾条纹。	4. 参考波面是物体本身，标准波面或计算机全息图。	5. 物体表面是镜面或粗糙面均可。	6. 对光学零件要求低。	7. 干涉条纹测量和扫描较难。
普通干涉	1. 两干涉波面必须同时存在。	2. 不用干板。	3. 测等厚条纹。	4. 参考波面是平面，棱镜或球面镜。	5. 物体表面必须是镜面。	6. 对光学零件要求高。	7. 干涉条纹测量和扫描较易。

辻内介绍了一个很有趣的干涉现象。

如图12所示。平板弯曲后测得的干涉条纹。该条纹呈双曲线形状，它用于材料的泊松比测试。角度正切平方刚好是材料的系数。即 $\sigma = \text{tg}^2 \alpha$ 。实验中可看到清晰的干涉条纹，是二次曝光法得到的。一个是物体不加力照一个全息图，另一个是加力照一个全息图。渐近线能够很准确地测出来。

木耳生长速度的全息照相也是很有意思的。即相隔几秒得两次曝光全息图。实验证明，木耳在25秒钟里长了1微米。(用He—Ne激光照)。

用125微秒的双脉冲红宝石激光器，照得人体象，腹部呼吸时的变形可以看到。可用来测腹部凸起的速度，以诊断癌症的病变。若有癌等病变，干涉条纹就不连续。生物生长，人体变形等只能用全息干涉法获得，别的方法不行。

美国有测自行车车胎的全息干涉仪，它可用于检查气泡，变形。测一个车胎只花三分钟。

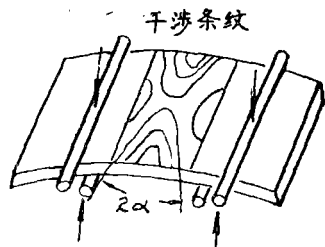


图12 平板弯曲后测量得到的干涉条纹

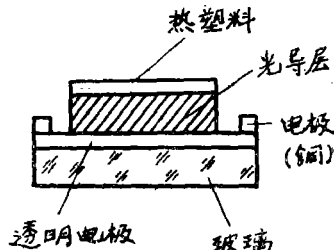


图13 热塑料记录介质结构图

辻内顺平研究室在热塑料实时记录介质的研制和使用方面取得了较好的结果。

如图13所示。热塑料记录介质是由下面几种物质组成。玻璃基底，其上镀有 In_2O_3 导电膜，电阻为(80欧—120欧)/厘米²的透明电极。第二层是光导层PVK，是一种天然树脂(*polyvinyl carbazolc*)最上层是热塑料，也是一种天然树脂(*staybelite*)制成。厚为0.3微米，导电层厚1微米，其工作原理及操作步骤如下：

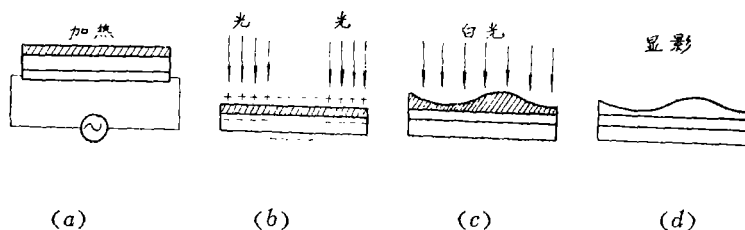


图14 热塑料记录介质的工作原理图

图14(a)是透明电极通过脉冲电流时，使电阻发热，导至热塑料变热后变软。

图14(b)是充电(5千伏)和曝光同时进行。由于热塑料是绝缘的不导电，热塑料上面出现正电荷，下面的透明电极上出现负电荷，这时就形成正负电极，其两端电压是3千伏。光照处光导层导通，负电荷转移到热塑料层下面。无光处维持原样。

图14(c)是用很强的白光照明曝光以后的热塑料。由于热效应使曝光处的电荷聚集在一起，在静电力的作用下，在电荷聚集的地方出现变形，这样就形成与干涉条纹相应的起伏变化的图形。

图14(d)是自然冷却定形。

如需擦掉图形重复记录，则只需再加光照或加热至热塑料的软化温度，即可消除应力恢复平整。

热塑料这种记录介质不用取走和进行湿处理，不存在放置精度和介质变形问题。但也有一个缺点，即加热时玻璃会产生变形，实验用普通玻璃不行，派立司玻璃也不好，最好用陶瓷玻璃。这种玻璃热膨胀系数小，据辻内顺平说，英国人认为热塑料厚的好，因变形小。现

让内用2毫米厚的，英国人用10毫米厚的。

三 全 息 显 示

让内教授在全息显示上讲述了一般情况以及他的研究室近期所做的工作，现综述如下：所谓《全息显示》就是把三维物体用全息的方法立体地显示出来。

我们知道，拍摄一张全息照片比拍摄普通的照片要难一些，制作全息片时，要使用激光，并使一束光照明物体、一束光当参考光，这两束光在干板上相干涉而得。全息干板要记录下微细的波长量级的干涉条纹，必须有很高的分辨率，相形之下，灵敏度就较低，曝光时间就要比一般照相长得多。并且，在曝光过程中，若物体稍有移动，干涉条纹就要变模糊，若移动量大于0.0002毫米的话，就得不到好的全息照片。另外，观看全息图仍然要使用激光，这是极不方便的。加之，激光重现全息图时还要带进讨厌的散斑噪声。因此，要想制取活动目标的有意思的全息照片，并要简化其观看方法，这就是近年来全息显示工作的研究动向。

拍摄全息图时采用脉冲、固体红宝石激光器、激光输出脉宽为30毫微秒，由于其峰值功率高，曝光时间短，所以可用来制取活动目标的全息照片。先用电影摄影机拍摄活动目标，然后把一帧一帧影片综合成全息片，合成可在实验室里进行，再现时使用普通白炽灯，大大地带来了方便。

用于全息显示的全息方法有三种：

1. 李普曼全息图

物光和参考光分别在干板两侧射入，干涉条纹面几乎和干板面平行，所以需要采用厚感光乳剂的干板。用白光重现时，按布喇格衍射原理将合适的波长选择衍射出来，它是一种反射型全息图。现在，很多人都用重铬酸盐明胶板作记录介质，衍射效率极高，噪声较低。李普曼全息图是白光再现全息图中最简单的一种。

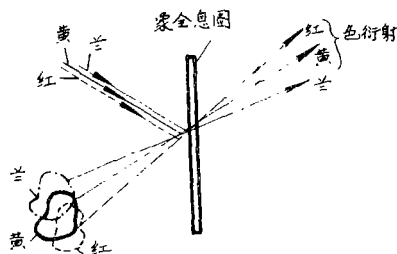


图15 象全息图的再现

2. 象全息图

被拍摄的物体通过光学透镜成象在干板上（这一步和普通照相一样），加一参考光就得象全息图。再现时，全息象在干板上出现，若原先用黄光来拍摄此全息图，再现时也用黄光，则全息象落在原先的位置上（见图15）；若用蓝光来重现，则象就往短波方向移动，根据衍射原理，不同波长的光照明此象全息图时，在干

板面上不同的位置获得不同波长的再现现象。因此，用白光照明此象全息图时，各种颜色的象重叠在一起，就使象变模糊。而且，照相时，物体的象离干板越远，再现现象就越模糊；若恰好在干板上，则模糊量最小。此方法另一缺点是，再现时，眼睛必须放在镜头的光瞳成象处（图16的孔径角 α 的范围内），要想各个方向均能看到再现现象，则要求镜头的相对孔径很大，这就比较昂贵甚至很难做到。

3. 彩虹全息图

原始的彩虹全息图是由美国人S. A. Benton发明的，即两步法；第一步用普通方法做离轴漫射全息图，然后原参考光逆光路照射此全息图，其衍射重现现象使之刚好成在干板附近，第一个全息图前紧挨地放一水平狭缝，从上向下加上参考光与再现现象在干板上相干涉获得第二

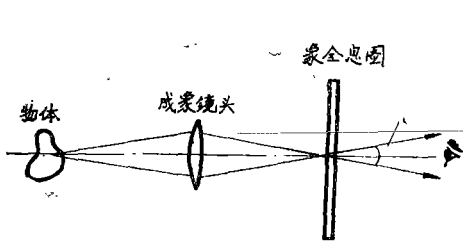


图16 象全息图再现时的观看范围

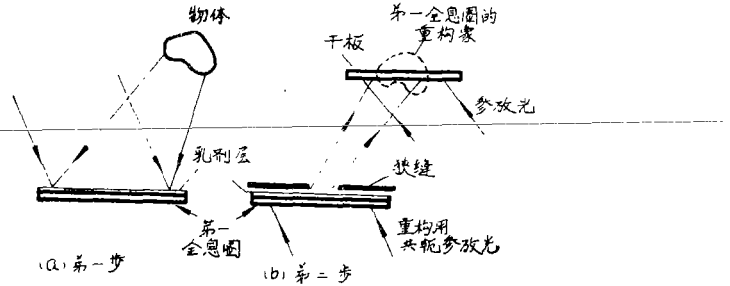


图17 两步绘制彩虹全息图

张全息图即彩虹全息图,如图17所示。当逆原参考光方向照明此彩虹全息图时,就在再现象的同时再现出狭缝的实象来,用不同颜色的光照就在不同的位置再现出相应颜色的狭缝象来,犹如一个带状光谱,由于人眼的瞳孔才 $2\sim 3$ 毫米(在观看亮全息图时,瞳孔缩小),所以放在不同颜色的狭缝处看到不一样颜色的狭缝,若眼睛在光谱面上作上下移动,则可以连续地看到各种颜色的象,如同彩虹一样,彩虹全息因此而得名。所以用白光就可以观看彩虹似的再现象,但再现的颜色是假彩色,和物体的自然色不同。若第二步照相时,使第一全息图的衍射象成在干板前后,则彩虹全息图的重现也表现出同样的体视感。

辻内教授谈到全息术的今昔时说,全息术已进入了它的第三代;人们把激光出现之前,即 *Gabor*→*Leith* 这一阶段称为第一代萌发时期,当时,没有很好的相干光源,是用汞灯来做实验,故全息象质量不高;第二代为 *Leith* 之后,激光的出现,使全息图及其再现象制取容易,成象清晰,质量大大提高,但观看仍要用激光器,既昂贵且不方便;当大量出现用激光照相而用白光再现的各种全息方法出现后,全息术进入了第三代。从此,全息照相才表现出它显著的优越性而真正的用在全息显示上。目前,在文物、档案、艺术品的保存、显示和展览以及各类广告等方面均已广泛采用这种全息立体显示技术。

在辻内的研究室内曾做过多重全息工作,原理已在1970年发表过,真正实现是在 $2\sim 3$ 年前的事。当时 *Benton* 和 *Cross* 合作做成了圆筒型的多重彩虹全息图,这是一种直径为40厘米的圆筒壁上放置有密密码码的、窄条状的,宽为 $2\sim 3$ 毫米,高为30厘米的几千个全息图的合成。沿圆筒轴的下方放有白炽灯光源,从外面看,圆筒里重现出彩虹颜色的全息象。圆筒一旋转、或人绕着圆筒一边走一边看时,就可以看到一些立体的活动的象,犹如电影一样。在此以前的圆筒型合成全息是用激光再现。目前这两种全息图只能作演示原理用,辻内教授及其同事们正在设法把此原理用于医学上,使医师能够容易地观察到患者病变部位的体视情况。为了应用,辻内认为必须搞清几个问题:

① 象质问题

讨论多重照相两种再现情况下象质的问题,关于激光再现的多重全息图、原理如图18所

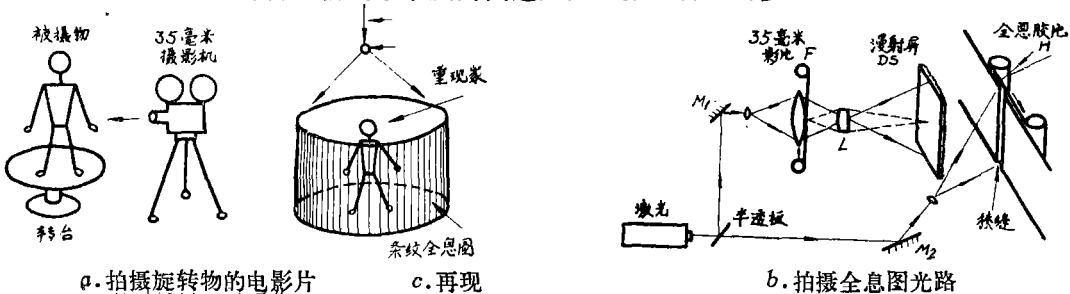


图18 激光再现多重照相摄影及重现原理图

示,图中镜头 L 把影片 F 放大到漫射投影屏 DS 上,离 DS 为20厘米处放置拍摄全息图的全息胶片,并且,在胶片前放垂直狭缝,从上面斜射一束参考光,于是,屏上的投影象就以窄条的形式在全息胶片上记录下来。缝宽为0.5~1毫米、高30厘米、照一条全息图对应于一帧影片,胶片步进距离等于缝宽,重现时,把胶片卷成圆筒状,筒轴上方或下方(与照相时相共轭的方位)置一发散的激光。实际上,进入两个眼睛的各为好多窄条全息图的重现象的重叠,其间有一个视差(水平方向),所以显示出立体来,图19所示即两眼离开圆筒不同距离时观察的情况。当摄取全息象时,成象物镜离物体的垂直距离和再现时圆筒的半径一样,角度也一样时,眼睛在水平方向不管如何移动(图20 P 和 Q 箭头所示的方向), P 点的再现象 Q 点位置

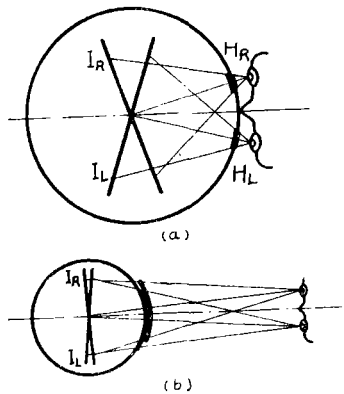


图19 观察合成全息图的再现象

始终保持不变;若两者半径不一样,则有一个放大率的问题,并遵循 $m = a' / a$,即照相时的距离 a 与再现时的距离 a' 之比。对于垂直的情况,从图11中可见,只有把眼睛放在全息图 H 的位置,才不发生大小变化,当眼睛远离圆筒时,物体的象高增大,所以产生畸变。为了消除畸变、要把眼睛放在将要观察的位置上,但此时不可能做到 a 和 a' 相等,故避免了垂直畸变而水平畸变却增大。为此,只有眼睛放在紧挨着全息片之后,垂直和水平畸变才可望有所折衷。

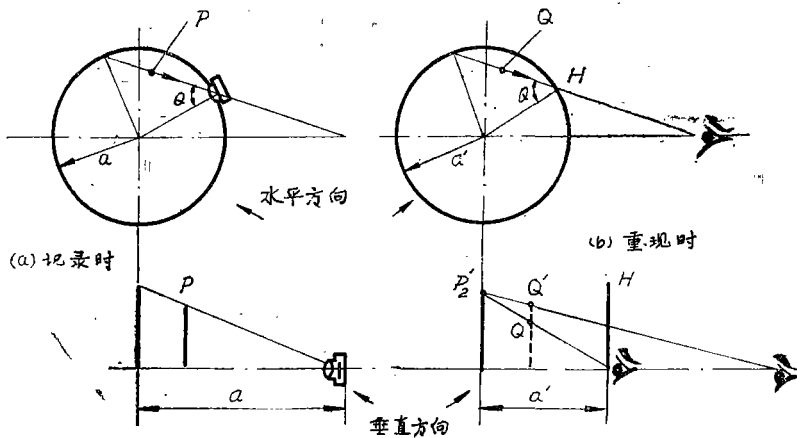


图20 多重全息图中重构象的畸变示意图

让内教授使用计算机来计算畸变量,并用一个边长为12厘米的立方体作物体,以25厘米直径的圆筒重现多重全息为例,物体与象每隔1厘米来计算一个畸变量。实际和计算都证明,照全息图时照相机与物的距离正好是圆筒的直径时畸变量较小。

关于白光再现的多重全息图,其制作方法与激光再现的多重全息大同小异,如图21所示,以透镜(场镜)和柱透镜的组合来取代透射型漫射屏。影片成象在透镜上,柱透镜 CL 焦距较短,把光聚焦成一条线进入狭缝,紧挨狭缝的也是全息胶片,缝宽大于0.5毫米,可为2毫米。缝宽大,对镜头的象差要求较低,照每一帧影片后,全息片移动量稍小于缝宽,使亮度不均匀的影响减小,但造成每一幅全息图之间的重叠,一般来说,重叠量较小时是无

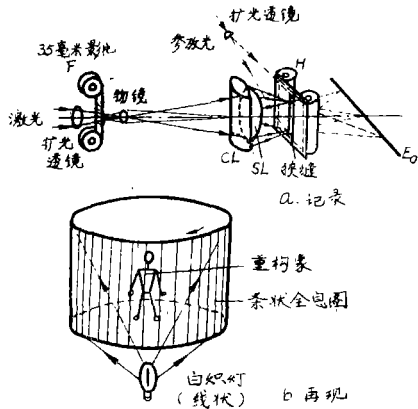


图21 白光再现多重全息图的记录与再现原理图

妨重现象的观察的。由于用了柱透镜压象，所以就成虹全息，可用白光重现，结果是明亮且没有散斑噪声。在时变问题上，不象激光再现的多重全息图，它采用漫射屏。所以，全息片记录的是物体的全部信息。白光再现多重全息图是一种虹全息、影片上一点只能与全息片上某一定点相对应。所以，眼睛放在全息图紧挨着的地方，只能看到一部分象，眼睛必须离远一些。于是，它的畸变一定要比激光再现的多重全息图来得大。计算和实验证实，眼睛放在球面透镜（场镜）的焦面位置时畸变量为最小，

此时，各种颜色的重现现象一样，可以在焦面上看到其中某一种颜色的重现现象，小于焦距时，垂直方向的再现现象变高，除中间的颜色不变外，上、下的色彩都变了，象彩虹一样，眼睛过远或过近时看到上下物象的颜色都不一样，由于波长不一样，衍射的放大率也不同，故重现的象不同颜色处的放大率不一，造成象的畸变，按前述的实例表明，眼睛在远处（小于62.5厘米），象的上部短波部分变小，下边长波部分变粗，就成三角形，若眼睛在远处（大于62.5厘米）就正好相反，成倒三角形，但畸变量要比移近时要小得多。若没有场镜、就没有整个重现为一种颜色的情况，畸变极小的位置也找不着。图22即上述情况计算所得的曲线。

② 分辨率问题

用激光再现，由于散斑噪声的影响，尽管原先分辨率很高，因为看起来不舒服而无多大意义，所以，让内教授认为没有必要去计算它的分辨率，而只考虑白光再现的分辨情况。

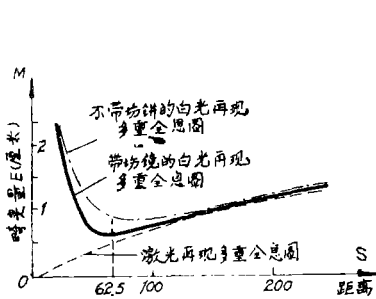


图22 白光或激光再现多重全息图重现时眼睛位置与重现现象的畸变量 ϵ 的关系

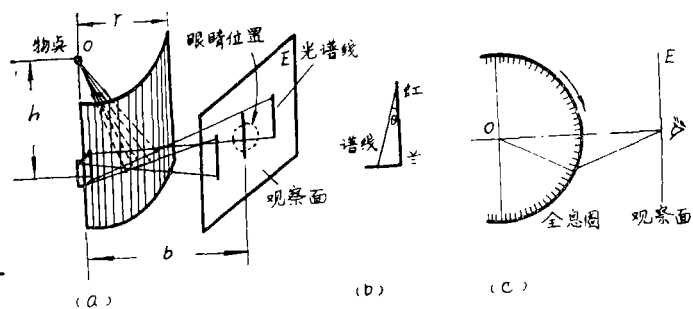


图23 点物体的再现及其变模糊

假设记录的是点物体的情况，得到的全息图和衍射光栅一样，但这种衍射光栅的衍射角度和光栅常数随位置不同而异。用白炽灯再现时，每个全息图各自产生自己的光谱，如图235所示， E 是放眼睛的观察面，全息图在圆筒上到处都有，通过中间一个全息图成一垂直的、上红下蓝的再现现象，其光谱线倾斜 θ 角（图23(b)），这里放眼睛，受眼瞳大小限制，只能取其中一条谱线的一部分（图23(c)），所以，再现现象也缩小，因此说，点的再现现象为一条变模糊的线。若用 B_v 表示垂直方向变宽的量， B_{HE} 为水平方向变宽的量， B_{HE} 大小由圆筒大小来决定。若灯丝为一垂直的线光源，则象是一个一个点挨着连成一条线，所以，横向变宽了 B_{HL} ，而垂直方向的象没有变宽，其结果 B_v 不变， $B_H = B_{HE} + B_{HL}$ ，这种现象有意思的是，光源垂直变长，象在横向变宽。让内教授认为白炽灯高度以2~3毫米长为宜，并且要用细

丝，以免光源变宽时造成的象模糊。彩虹全息图中，光源放远些，象质好一些（对每个全息的照明角度变化小，故变形小）但受装置所限，唯一的办法就是使光源短而细。

辻内的研究室用半径为20厘米、高为30厘米、白炽灯在离圆筒中心往下30厘米处，高1厘米，宽1毫米，按眼瞳为4毫米，距圆筒为60厘米的情况做一实验、观察到点物体变成平行四边形的象，象是用照相机（其光圈开得和瞳孔等大并置于眼睛位置的情况下）照得的。该圆筒上全息图2400个，每个宽0.5毫米，为防止照全息图时换影片引起的振动，每帧影片曝光0.5秒外，静止5秒，由电子快门控制，这样共花四个多小时完成该多重全息图。采用柱透镜加场镜，不同于美国的用有机玻璃弯成形后

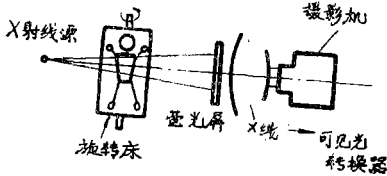


图24 照取 X 相片的转换影片系统

内注硅油的方式，他的柱透镜是四片式的。

辻内已经开始考虑和试图把这种全息技术用于医学上作 X 射线立体诊断。并且初步对一个死者的心脏等作了一些实验尝试，有一定效果，可以看到心血管的分布等。实验时，可让实验对象横卧在床上，用 X 线脉冲源发出软 X

射线透过人的患处，然后通过 X 射线——可见光的转换器，其后是一个摄影机，如图 24 所示，床可以旋转、X 线每脉冲输出一次，就拍摄得患体不同角度的照片，这一系列照片拍摄成多重全息照片、就可以收到立体观察的效果；但是，实验上的难处是，要照数百张 X 相片，对患者势必将造成更大的危害，医师认为有 60° 角度患处的 X 照片就有可能帮助诊断。这样，每隔 2° 一个间隔的拍摄一张 X 照片，立体重现较为清晰，而 4° 一个间隔要显得模糊些。实际上照 30 张 X 相还是过多，故用 4° 一个间隔。其中所缺少的部分，辻内教授认为可以通过计算机处理来补偿，补偿一个约需几分钟，据辻内教授看法，这种计算机补偿法几年内就可望得到改进，处理时间则可大大缩短。另一个是对比度不足的问题，医学上要求黑白微差清楚，目前计算机处理尚无能为力。正在做用相干光空间滤波的办法来提高对比度。

辻内教授另一种考虑是多重照相在测量三维物体上的工作，用计算机处理和计算数据，实验证明，可以正确地对三维物体进行计量，这就对今后正确地确定患者病变的立体位置极为有利。

总之，辻内教授认为，全息显示的原理、方法的研究已趋完善，把这些原理、方法用于实践是当前全息工作者必须着重考虑的重要问题。

四 声 全 息

一个声源成像的新方法是以全息技术发展起来的，这个方法是以互强度的传播定律为基础的。可用于相干、非相干和部分相干源，见图 25。设物平面 Σ 上的点 x_1 和 x_2 的互强度为 $J_0(x_1, x_2)$ ，在离开物平面距离为 R 处的观察平面上的互强度为 $J_1(u_1, u_2)$ ，则：

$$J_1(u_1, u_2) = \iint_{\Sigma} J_0(x_1, x_2) \exp \left\{ ik \frac{(u_1 - x_1)^2 + (u_2 - x_2)^2}{2R} \right\} dx_1 dx_2 \quad (1)$$

在一般情况下 $J_1(u_1, u_2)$ 为复数，在观察平面上， $J_1(u_1, u_2)$ 的实部分布即为干涉图。将 $J_1(u, u_2)$ 进行逆菲涅耳变换，得

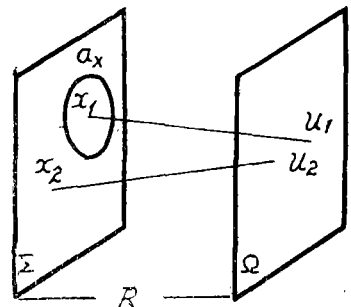


图25 互强度的传播

到下式

$$J'_0(x, u_{20}) = \int_{\Omega} J_1(u_1, u_{20}) \exp\left\{-ik \frac{(x-u_1)^2}{2R}\right\} du_1 \quad (2)$$

如果平面 Ω 非常大,以致于

$$\int_{\Omega} \exp\left\{ik \frac{(x-x_1)u_1}{R}\right\} du_1 = \delta(x-x_1) \quad (3)$$

那么(2)式变成

$$J'_0(x, u_{20}) = \int_{\Sigma} J_0(x, x_2) \exp\left\{-ik \frac{(x_2-u_{20})^2}{2R}\right\} dx_2 \quad (4)$$

这个等式就是由全息图得来的物体的再现像。如果声源的相关度为 $\gamma(x_1-x_2)$,等式

$$J'_0(x, u_{20}) = A(x) A'(x, u_{20}) \quad (5)$$

$$A'(x, u_{20}) = \int_{\Sigma} A(x_2) \gamma(x-x_2) \exp\left\{-ik \frac{(x_2-u_{20})^2}{2R}\right\} dx_2 \quad (6)$$

$A(x)$ 是点 x 处的源的振幅。 $A'(x, u_{20})$ 为离开面积 σ 处 u_{20} 点的振幅分布。注意 σ 面是空间相干的。考虑下面两种情况:

1. 相干物体

对于相干物体 $A'(x, u_{20}) = \text{常数}$, 由此可见 $J'_0(x, u_{20}) \propto A(x)$, 这就是物体的再现, $J'_0(x, u^2)$ 对应于振幅分布。

2. 非相干物体

对于非相干物体来说相关度

$$\gamma(x-x_2) = \delta(x-x_2) \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式中,积分后得到

$$A'(x, u_{20}) = A(x) \exp\left\{-ik \frac{(x-u_{20})^2}{2R}\right\} \quad (8)$$

可见 $A'(x, u_{20})$ 的调制正比于振幅 $A(x)$, $J'_0(x, u_{20})$ 正比于 $|A(x)|^2$, 它给出物体的强度分布。

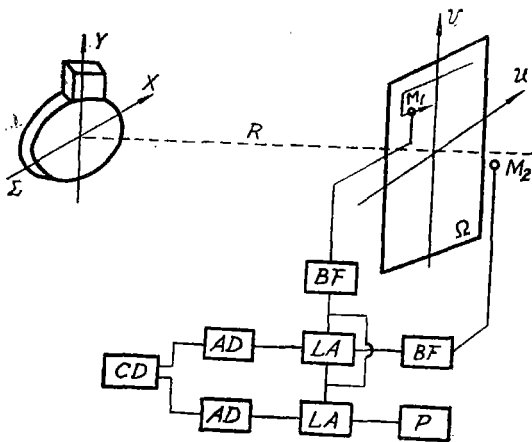


图26 测量声互强度装置的方框图

对于部分相关物体,重要的是计算物体的强度分布,实际上大多数声源是作为近似相关的,如果频率不十分高,在相关特性不清楚的情况下,所测得的声源强度分布可近似用 $J'_0(x, u_{20})$ 表示。

一个测量声互强度的装置如图26所示, M_1 和 M_2 分别为二个扬声器, M_1 扫描, M_2 不动, M_1M_2 根据取样定理执行, M_1 和 M_2 接收到信号后分别送到锁定放大器中作为物信号和参考信号,干涉图的频率用一窄带滤波器或外差滤波限制物信号

和参考信号。所得干涉信号是一时间平均值。

若获得虚部只将参考信号变化 $\pi/2$ 位相,然后同物信号在另一个锁定放大器中相乘。再送到计算机中进行计算。由互强度进行像的再现是用计算机作离散菲涅耳变换。再现像用一适当方法显示,可以通过线打印机的重复印刷或在等线 $x-y$ 记录仪上双眼观察的方法来显示。

扬声器 M_1 的扫描也可以用 N 个扬声器的列阵来实现，这样扫描时间可以缩短 $1/N$ ，但必须有 N 个带通滤波器和 N 个锁定放大器以及一个乘法器。

系统分辨率可以作为评价一个成像系统质量的标准，孔径为 D ，焦距为 R 的分辨率根据瑞利判据可以写成：

$$\Delta x = \frac{\lambda}{D} R \quad (9)$$

λ 是声波波长， Δx 是分辨极限。

用上述理论测量了两个转动着齿轮的声源分布情况，齿轮直径为 316 毫米，厚度为 50 毫米，用每分钟转速为 3450 转的电机带动，作干涉图的频率为 9.9 千赫，所得瑞利分辨极限为 58 毫米。声源的再现像用重复打印机打出。同样，用此种方法也测得摩托车发动机的声源分布。声全息适用于工业现场，尤其可用在汽车工业上。

周学海 董玉芝 唐祝洲 整理