

干涉测量法的最近展况

—根据斋藤弘义教授讲学记录整理

一、序

干涉测量法是把光的波长做为一把尺子，用来测量长度、厚度、面形误差等的一种测量技术。这种技术在很早以前就已被广泛地利用在测量中。1960年激光的出现给干涉测量技术带来了根本性的变化。激光具有足够的时间相干和空间相干，可提高干涉条纹的对比度，避免用扩展光源给测量中带来的操作上的麻烦，使得一般人都可以利用干涉法进行测量。由于全息术和散斑干涉术可进行粗糙面的测量，因而使干涉测量法得到了更为普及。

随着科学技术和工业的发展，人们对干涉测量法提出了更高的精度要求，为了满足这样的要求，我们提出了差频干涉法和条纹扫描干涉法。日本东京理化研究所的光学计量研究室从1967年开始了全息术的研究，并用于干涉测量中，最近进行了高精度干涉测量的研究。

二、全息干涉法

全息术的特征是同时记录了光波的振幅和位相，是利用干涉技术的一种技术。利用全息术进行干涉测量，被测物体可以是粗糙面，这在精密机械工业中可得到实用。最简单的方法是双光路法，如图1所示，可测量物体的位移及变形。

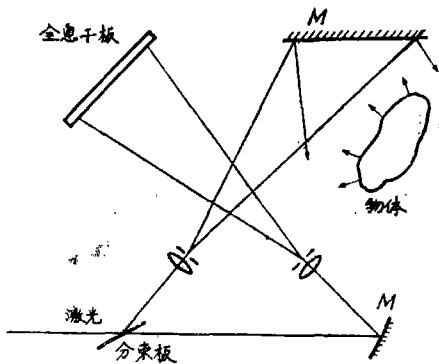


图1 全息双光路法示意图

全息术干涉法还可以进行实时观测；还可进行非破坏性检查物体的内部缺陷；应用贝塞尔函数，进行时间平均全息术，了解和测量振动物体的振动情况及振动量；还可进行光弹性测量。

在利用时间平均全息术，进行振动物体的测量时，对于振幅大的，将不出现干涉条纹，对此可采用频闪法，如图2所示。用光调制器使得从激光器发出的光与物体的振动同步，在振幅最大时照明，这时就可得到两束光的干涉及相同的正弦强度分布的干涉条纹。另外调整参考光的位相可观察到一般观察不到的情况，可进行微小的位相测量。

目前非球面广泛地被应用，这就要求非球面的精度比较高，因而检查非球面面形是很重要的。可利用罗曼提出的方法，用计算机产生全息图，进行非球面面形的检查。检查光路图如图3所示。

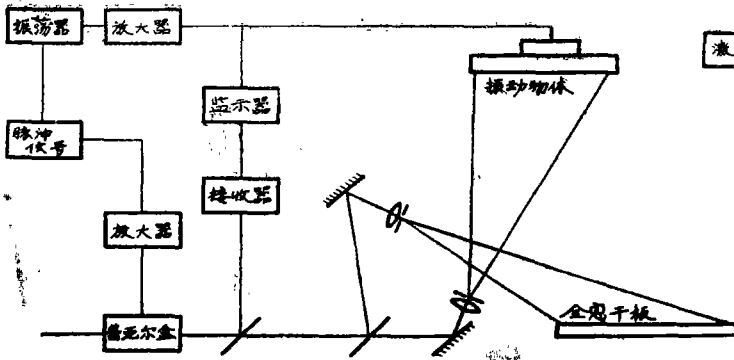


图2 频闪法时间平均全息光路

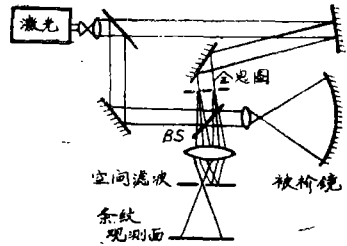
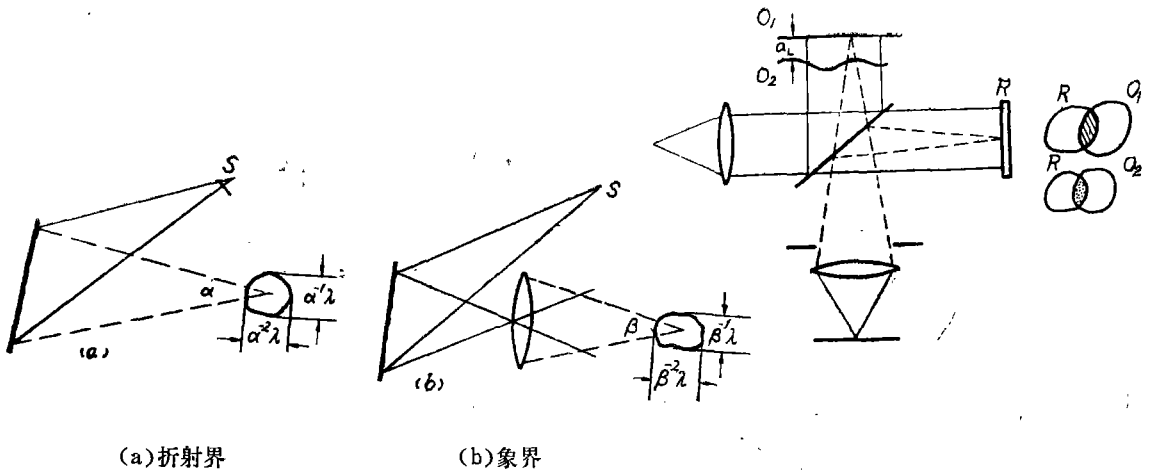


图3 计算机产生全息图测非球面形光路图

三、散斑干涉法

当激光照明漫射物体时，就产生一些不规则的斑点，称为散斑。散斑对图象处理来说是噪音，目前还未找到消除噪音的理想办法。我们主要是把它应用于计量中。散斑干涉法和全息干涉法一样，可以用来测量粗糙面形的位移、形变等，它具有与全息术不同的特点。散斑的大小与表面的粗糙情况无关，下面分两种情况讨论，〔图4(a)、(b)〕。在测量中，知道散斑的平均大小是一个重要的因素。对于折射界，散斑的大小与粗糙面的照明范围对观察点所张的立体角 α 、波长 λ 有关，其横向大小是 λ/α ，纵向大小是 λ/α^2 。对于象界、散斑的大小与成像透镜的象方孔径角 β 有关，其横向大小是 λ/β ，纵向大小是 λ/β^2 。粗糙面移动，散斑也移动，同时形状也发生变化，它们的相互关系，我们进行了详细地研究，这种研究是我们应用散斑进行测量的基础。



(a) 折射界

(b) 象界

图4 形成散斑的大小计算方式

图5 (a) 参照光法 ($\Delta a_L = \lambda/2$)

分三种情况进行考虑：1) 参照光法 (图5a)，观察纵向移动，其条纹间距 $\Delta a_L = \lambda/2$ 。2) 双光束照相机法 (图5b)；3) 双开口法 (图5c)，是用来观察横向移动的。条纹间隔是 $\Delta a_T =$

$\lambda/2\sin\theta$ 。移动量不超过散斑的直径。可使用分辨率比较低的胶卷(200条/mm)进行实验。这是英国人想出的办法,这个方法在日本不象全息术那样得到普遍的应用,因为得不到清晰的象。

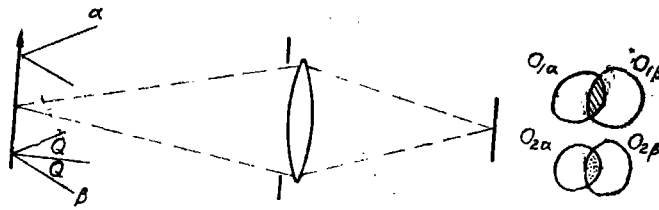


图 5 (b) 双光束照相法 ($\Delta a_T \approx \lambda/2\sin\theta$)

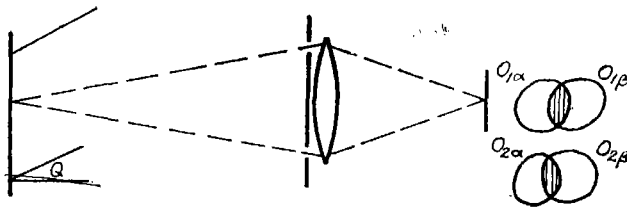


图 5 (c) 双开口法 ($\Delta a_T = \lambda/2\sin\theta$)

四、用计算机进行图象分析

干涉测量是一个两维的信息处理,要转化成数字处理是比较麻烦的。全息术可对复杂的物体进行干涉测量,因此它的条纹也比较复杂,处理的时间也比较长。如果能用计算机进行自动分析就好了,数字图象处理系统就是这个目的做成的。图 6 就是这种数字图象处理系统的方框图。图象输入装置是电视摄象机,输出装置是电视监视器。输入、输出装置简便且具有高速性。由电视摄象机出来的视频信号经 A/D 变换,被存贮到大容量的帧存贮器中,然后由 DMA (Direct, memory access) 接口转送到主存贮器中。将这个图象数据计算处理后,又被送到帧存贮器中,经 D/A 变换由电视监视器显示出来。这个帧存贮器用 8bit、即 256 个灰阶把象素为 512×512 个点进行记录。这个系统备有专用的装置,如进行图象的平均

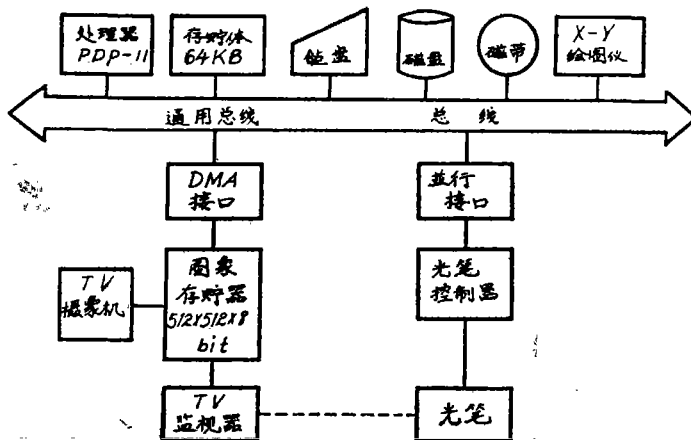


图 6 数字图象处理系统逻辑图

化、加减运算、 r 值修正、电平切割等基本运算。

图象数据分析的核心是小型计算机 (PDP-11/34)、主存贮器 64Kbit、有 2 个磁盘 ($2.4 \text{ Mbit} \times 2$) 和磁带, 被用做这个系统的操作文件和图象文件, 同时用来与大型计算机对接。也可用调制接口, 用电话线连接到大计算机上。图 7 表示了干涉条纹自动分析的流程。在进行输入图象平均化、直方图修正、滤波以后, 进行条纹的骨格化 (SKLT), 粗的条纹进行细化。

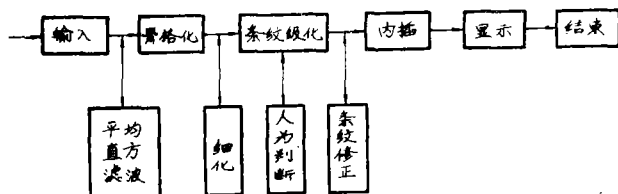


图 7 条纹分析程序图

条纹级数的决定是用机械方法去处理条纹的相对级数。确定某一个基准点, 由此基准点人为判断出相对级数。对错误指示的修正 (FRCOR), 当条纹线断开时, 人为把它接起来 (FRTRAC), 这是人们用光笔以定好的程序进行对话处理。接着是进行条纹的内插计算 (INTP)。由这个干涉条纹图做出测定对象的数值模型, 数值上求出物体各点的位移量, 在电子计算机内做出这个数值模型。完成上述以后, 显示就很容易了, 可按人们意愿的程序进行各种各样的显示。

当处理由波面面形所表示的干涉条纹时, 在条纹输入过程中, 引入一波面倾斜, 这样很容易判断干涉条纹的正负级, 机械的读出也比较容易, 在修正前倾斜好。用软件硬化的方法可提高处理速度。目前用这种系统检查集成电路硅元件制品的质量, 检查一个只用 5 分钟。这种处理系统在日本有产品。

五、用莫尔条纹进行立体形状测定

两个光栅迭合在一起, 产生的条纹就是莫尔条纹。莫尔条纹法也应用在各种测量中, 但它相对于干涉测量, 精度是不高的。对人体测量, 莫尔条纹法是比较适合的, 因为它要求的精度并不是很高的, 特别是对人体形状的非接触测量, 这种技术是很适用的。如用此方法进行早期的脊柱弯曲症的诊断, 根据医生的要求, 定量地求出弯曲量, 这可用机器来实现。同样莫尔条纹法也可用计算机进行自动分析。

由莫尔条纹法, 得出物体形状的等高线是看不出凸凹的, 要想知道凸凹方向, 需要进行人为地判断, 移动一下, 看等高线变动的方向, 即可确定。用莫尔条纹法测定立体形状的计算机自动分析系统已经成为商品化, 可直接用于人体诊断, 实时显示数据。

六、高精度干涉测量法

在干涉测量中, 对于反射物体, 一个条纹是 $\lambda/2$; 对于透射物体, 一个条纹是 λ ; 采用内插法, 最高可达 $\lambda/10$ 。随着加工精度的提高, $\lambda/10$ 的测量精度已不能满足要求了, 为了提高测量精度, 我们采用了外差干涉法、条纹扫描干涉法。

1. 外差干涉法

激光出现后，两个频率稍微有差别的光束也可干涉，这称为 *BEAT* 现象。外差干涉法就是把频率稍有差异的两束光所形成的随时间变化的干涉条纹用光电检测器接收，把干涉条纹的位相信号转变成电信号的位相，然后测出其位相。原理如下：

考虑一个在参考光路中加一频移器的台曼—格林干涉仪，如图 8 所示干涉图形中任一点 x 处的光的复振幅是：

$$V(x,t) = u_0(x) \exp\{i[\omega_0 t + \varphi_0(x)]\} + u_r \exp\{i(\omega_0 + 2\omega)t + \varphi_r\}$$

$u_0(x)$ 、 $\varphi_0(x)$ 是物光的振幅和位相； u_r 、 φ_r 是参考光的振幅和位相。其光强：

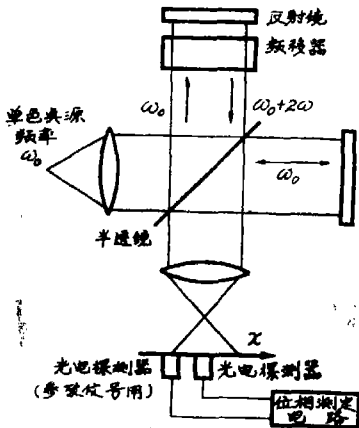


图 8 差频干涉仪

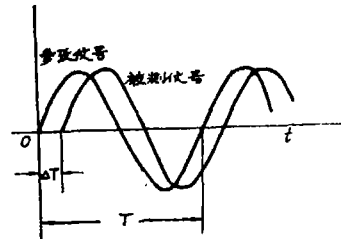


图 9 电信号的位相测定

$$I(x,t) = |V(x,t)|^2 = u_0^2(x) + u_r^2 + 2u_0(x)u_r \cos[2\omega t + \varphi_r - \varphi_0(x)]$$

这是一个频率为物光和参考光的频差 2ω 的正弦状的变化。 $\varphi_r - \varphi_0(x)$ 是不加频移器时，干涉条纹的位相。在 x 点放一光电检测器，得出差频电信号，这样干涉条纹的位相就变成了电信号位相。这相当于在干涉条纹空间变化上的一个点观测的。把光电探测器放在 $x = x_0$ 的基准点上，以参考光的位相 φ_r 为基准，来测定这个电信号的位相。图 9 表示了被测信号相对于参考信号时间延迟 ΔT ，信号周期为 T ，则：

$$\varphi_r - \varphi_0(x) = 2\pi \Delta T / T$$

这样从时间到对参考光的相对位相连同符号在内都能得出。

用光电检测器对干涉图形进行全部扫描，把各点的位相测出，那么物光的位相分布，或者说物体的形状就可求出。也可在短时间内进行测定，而且可用计算机进行控制，自动测量。测定结果以一个透视图表示出来。在这种测量中，组成干涉仪的光学元件本身所造成的误差及光学元件的倾斜所引进的影响都可以消除。

通常测定电信号的位相 $3^\circ \sim 4^\circ$ 是很容易的，转换成光程相当于 $\lambda/100$ 的精度。此方法与一般干涉法不同的是，它不受两束光强度的影响。一般干涉测量是先求出条纹强度，然后再求出位相，这也是精度提不高的原因。另外差频干涉法测量中，不受光强随时间、空间变化的影响。当频移器的特性发生变化，产生差频变化时，两信号的相对位相不变化，因而还能进行正确的测量。在这种测量方法中，空间分辨率依赖于光电检测器的受光面积，得到 100 条/mm 是可能的，它与干涉条纹的空间频率无关。

经过反复地实验，确认该方法测量精度在 $\lambda/80$ 。它同样适用于全息干涉测量中，其测

量精度已达到 $\lambda/40$ 。如果实验条件严格的话,可望得到更高的精度,原则上可达 $\lambda/100$ 。

利用外差干涉法可进行高精度测量,但比较费时间,因为它是一点一点地进行测量。如果采用光导纤维,那么外差干涉法做为一种高精度测量,就更加显示出它的优越性。图10是我们做的光导纤维干涉仪的图,得到一对比度很好的杨氏干涉条纹。实验发现它对外界干扰,如压力、温度、振动等非常敏感,因而可以测出十分微小的振动。

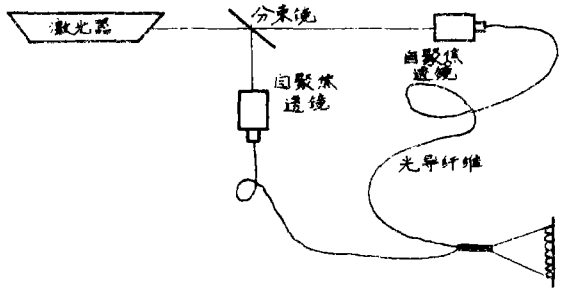


图10 光导纤维干涉仪

2. 条纹扫描干涉法

通常的干涉测量中,只注意到干涉条纹强度峰值的位置,因而测量的灵敏度是在 $1\lambda \sim \frac{1}{2}\lambda$ 之间。如果能有效地利用峰值以外的中间密度分布,那么可期望提高测量精度。美国 Bruning 等人着眼于这一点,提出了一个新的高精度干涉法,称为条纹扫描干涉法。这个方法是在测量中,用改变参考光位相的办法,调制干涉条纹,然后测出其位相,这样以来精度可达 $\lambda/100$ 。

测量原理如下:

图11是一台曼—格林干涉仪,参考波和被检波分别是 $W_r(x, y)$ 、 $W_i(x, y)$ 。

$$W_r(x, y) = a \exp(i2kl) \quad (1)$$

$$W_i(x, y) = b \exp[i2kw(x, y)] \quad (2)$$

a, b 分别是两波的振幅, λ 是波长, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$,

l 是由适当的基准点测得的参考光的光程,

$W(x, y)$ 是测定对象的被检面的形状。两波干涉,其干涉条纹强度是:

$$I(x, y, l) = 1 + r \cos 2k\{W(x, y) - l\} \quad (3)$$

其中 $r = \frac{2ab}{a^2 + b^2}$ 是干涉条纹的对比度。把(3)式对 l 进行付里叶展开:

$$I(x, y, l) = \frac{a_0}{2} + \sum_{r=1}^{\infty} a_r \cos 2krl + \sum_{r=1}^{\infty} b_r \sin 2krl \quad (4)$$

利用三角函数正交关系:

$$\frac{2}{N} \sum_{r=1}^N \cos \frac{2\pi ri}{N} \cos \frac{2\pi rj}{N} = \frac{2}{N} \sum_{r=1}^N \sin \frac{2\pi ri}{N} \sin \frac{2\pi rj}{N} = \delta_{ij} \quad (5)$$

$$\frac{2}{N} \sum_{r=1}^N \cos \frac{2\pi ri}{N} \sin \frac{2\pi rj}{N} = 0 \quad (6)$$

求出:

$$a_r = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N I_j \cos 2rkl_j \quad (7)$$

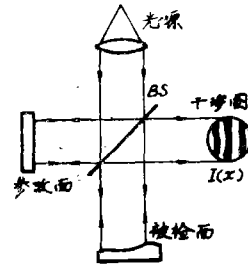


图11 台曼—格林干涉仪

$$b_r = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N I_j \sin 2rkl_j \quad (8)$$

其中:

$$I_j = I(x, y, l_j) \quad (9)$$

$$l_j = j\lambda/2N \quad (j=1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

通常干涉条纹应是正弦变化, 只有 $r = 1$ 才有意义, 高次项是由噪音和系统的非线性所致。在这种情况下:

$$a_0 = 1 \quad (11)$$

$$a_1 = r \cos 2k\omega(x, y) \quad (12)$$

$$b_1 = r \sin 2k\omega(x, y) \quad (13)$$

$$a_r = b_r = 0 \quad r > 1 \quad (14)$$

由(7)、(8)两式求出的条纹形状, 从最小二乘法的意义来说是最佳的近似。由(12)、(13)式, 干涉条纹的位相成份可写成:

$$W(x, y) = \frac{1}{2k} \tan^{-1} \frac{b_1}{a_1} = \frac{1}{2k} \tan^{-1} \frac{\sum_{j=1}^N I_j \sin 2kl_j}{\sum_{j=1}^N I_j \cos 2kl_j} : \text{mod}(2\pi) \quad (15)$$

由此求出位相。参考光路以 $\lambda/2N$ 为步长, 进行 N 次变化, 测出 N 次干涉光强 $I_j(x, y)$, 然后将每次的值代入(15)式中, 计算出 \tan^{-1} 即可。注意(15)式中不含 r , 一般的干涉测量中, 干涉条纹的对比度将由种种原因而发生变化, 这就影响测量精度, 但是条纹扫描法, 自动补偿了 r 的影响, 因而测量精度提高。

此方法的特点是精度高、速度快, 可进行自动测量。经过多次测量, 其精度是 $\lambda/58$, 如果光学系统的各个元件比较理想, 其他条件比较严格的话, 可达到 $\lambda/100$ 。该方法也适用具有倾斜的干涉条纹和莫尔地貌测量中变形光栅图象的分析。