

光学测试中的干涉技术

韩 昌 元

在精密计量工作中干涉技术一直占重要地位。自从六十年代出现激光以及计算机得到广泛应用，干涉技术在工业计量和科学研究的各个领域中得到广泛的应用。

在光学测试工作中干涉技术的应用也是非常重要的。下面举几个例子。

在光谱光度的测试方面，把法布里—珀罗标准具作为干涉滤光片用于标定光谱仪的波长位置。利用干涉光谱仪进行红外辐射测量，由于它具有灵敏度高、重量轻、体积小、功耗低等优点，适于作为卫星上的辐射计使用。

在光学玻璃的测试方面，用干涉折射计进行光学玻璃折射率的绝对测量，精度达到 10^{-6} ，可作为测量折射率的基准。利用干涉仪进行玻璃均匀性的测量，对折射率变化的测量精度达到 10^{-7} 量级，而一般玻璃一级均匀性要求测到 1×10^{-6} 量级就够了。

在光学另件的测试方面，利用激光球面干涉仪测量透镜的曲率半径和局部光圈，可以代替球面样板和球径仪，曲率半径的测量精度达到一个微米，测量面形的精度达到百分之一波长。用干涉方法测平面的面形，精

度达到千分之一波长。利用球面干涉仪还可以在加工另件过程中不下盘测量透镜的中心厚度。利用干涉显微镜可以测量光学另件表面疵病的深度和宽度。在平板窗口玻璃和棱镜的加工检验方面，利用干涉测角仪测角的精度达到0.05秒以上，测量厚度变化的精度达到千分之一波长量级。

在光学薄膜的测试方面，利用等色序多光束干涉条纹测量膜层厚度的精度达到一个埃。

在光学系统的检验方面，利用干涉方法测定光学系统的波像差，并通过计算可以算出光学系统的点扩散函数和光学传递函数。

为了满足各种不同要求的光学测试工作的需要，研究和发展各种形式的干涉检验方法和设备，并发展干涉图形的接收和数据处理技术。这可进一步提高测量精度，能检验大尺寸另件并使用方便，能定量测试并客观显示，能实时处理并指挥控制系统实现自动研磨等。

在原则上测量精度决定加工精度，目前对平面的加工能达到的水平列在表1中。^{[1],[2],[3],[4],[5]}

表 1

平板直径 (毫米)	1000	500	300	200	150	100	70
加工精度 (波长)	1/4	1/8	1/20	1/100	1/150	1/200	1/270

下面介绍几种干涉仪的近代发展。

1. 斐索干涉仪

斐索干涉仪常用于检验平板玻璃和平面

表面，由于大的平面标准样板不好制备，一般口径作到 $\phi 150$ 毫米 $\sim \phi 200$ 毫米^[6]，但也有作到 $\phi 750$ 毫米的斐索干涉仪^[2]。斐索干涉仪对于镀有反射膜的平面采用多光束条纹提高条纹的定位精度，目前条纹间隔和条纹

半宽度的比值（叫做精细度）作到300以上^[2]。另外为了提高干涉仪灵敏度希望条纹间隔拉大，这时要失去两个条纹中间部分的面形的信息，为此采用多波长内插的方法。这种方法可以利用可调谐激光器或利用可变程差的法布里—珀罗标准具产生的不同波长的单色光，如果内插 N 个等间隔的波长，则一个条纹间隔代表 $1/2N$ 波长的表面误差。图1表示了可调谐激光斐索干涉仪^[7]，利用四个波长产生双光束条纹，干涉条纹被照相记录并用显微密度计扫描得到准确的定位，把条纹的定位信息送到计算机处理面形。利用伺服机构和压电陶瓷调整被检样品和参考平板之间的距离。载物台可以旋转，能装12个 $\phi 100$ 毫米的被检样品或者4个 $\phi 250$ 毫米的被检样品。这个干涉仪用于检验没有镀反射膜的平面，其面形检验精度达到 0.0035 波长。提高干涉条纹灵敏度的另一个途径是用多重光路方法放大位相误差，把标准平面和被检面之间多次反射的波面和参考波面干涉产生双光束条纹，如果用 N 次反射，则一个条纹间隔代表 $1/2N$ 波长的表面误差^[8]。这种干涉条纹不用显微密度计和计算机处理，直接判读可达 $1/100$ 波长面形测量精度。当然这时要求被检面镀反射膜，并且标准平面的要求是相当严的。

为了实现尺寸大的标准平面，可以采用液表面作为平面的基准。如用水，油，水银，医用石蜡等，这时要解决的问题是震动，灰尘颗粒，毛细管现象，蒸发，温度差，静电电荷，磁场的影响和对于被检平板的重力变形和温度变化等干扰^[9]。

为了实现平面的绝对测量，三块平板或更多的平板平面互检的方法是普遍采用的方法。如用三块熔石英平板互检，采用多波长多光束条纹以及等密度照相处理等手段，不用显微密度计和计算机处理，就能达到 $1/500 \sim 1/1000$ 波长的平面检验精度^[10]。

斐索干涉仪的新发展之一是球面斐索干涉仪，利用参考球面检验被测球面的面形。

再用激光作光源实现激光球面斐索干涉仪，不仅可以测面形而且可以测曲率半径。对于镀有反射膜的球面，还可以采用多光束球面斐索干涉仪，这种干涉仪用小的参考球面检验任意大的球面反射镜的面形。图2表示了多光束球面斐索干涉仪^[11]，场镜的作用是使多次反射的光束不跑出干涉腔外以便保证条纹的对称性，从而提高条纹的定位精度。参考同心球面的反射率为 $70\% \sim 80\%$ 。整个系统装在 18×22 英寸板上，高度为6英寸。

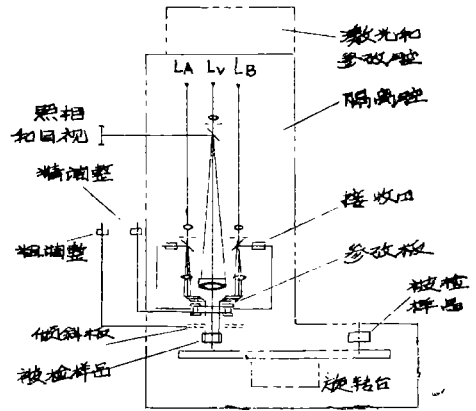


图1 可调谐激光斐索干涉仪

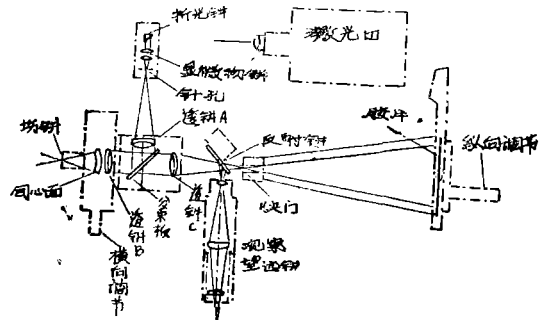


图2 多光束球面干涉仪

2. 泰曼干涉仪

在工厂中最常用的是斐索干涉仪，其次是泰曼干涉仪。泰曼干涉仪使用范围很广，可用于光学平板表面、窗口平板、未加工的玻璃（用液体槽）、会聚和发散的镜面、透镜、棱镜、显微镜、望远镜、照相物镜、光学晶体等的检验。一般泰曼干涉仪的口径不

超过 $\phi 150$ 毫米，而且不能产生多光束干涉，所以在平板和窗口的检验方面不如斐索干涉仪。

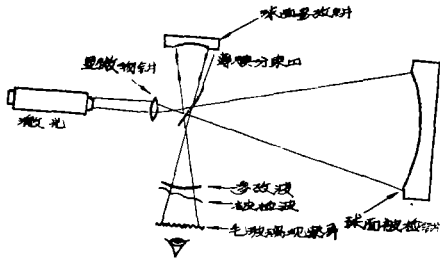


图3 简单的不等光程检验大镜面的干涉仪

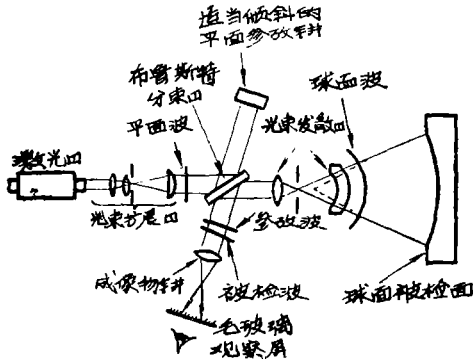


图4 激光不等光程泰曼干涉仪

激光出现后泰曼干涉仪也发展成激光不等光程干涉仪^[11]，图3表示了简单的不等光程检验大镜面的干涉仪，使用小的参考球面镜检验大口径的球面镜。图4表示利用参考平面镜和光束发散器的激光不等光程泰曼干涉仪。图5和图6是用激光不等光程干涉仪检验非球面和平板表面的系统。这种干涉仪可以采用调整参考面到分束板之间的距离使得参考和被检光路的光程差等于激光器腔长的整数倍的方法得到最好的条纹对比。

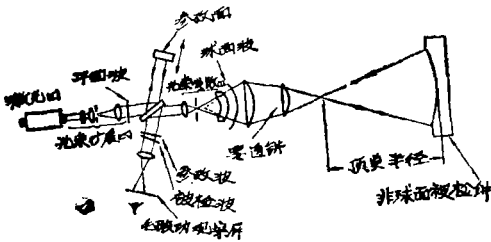


图5 联合光束发散器和零透镜的检验非球面用不等光程干涉仪

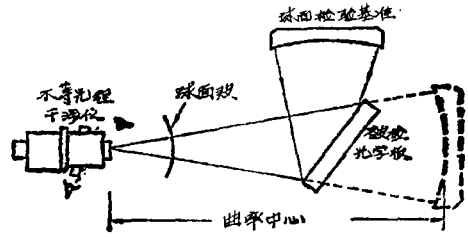


图6 用不等光程干涉仪检验平面

激光不等光程泰曼干涉仪也可以作成能测半径和面形的球面干涉仪^[12]。图7表示了这种系统。利用聚焦物镜的滑动距离来测半径，故条纹对比和被测镜的曲率无关，始终保持最好的条纹对比。分束板摆成布鲁斯特角，而后一面镀半反半透膜，这样利用偏振光可以消除分束板两个面之间产生的不必要的条纹。

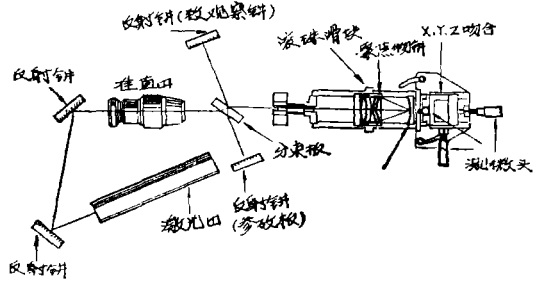


图7 球面干涉仪

为了精密测量面形，这种干涉仪产生的双光束条纹一般用照相记录并利用显微密度计扫描得到准确的条纹定位，显微密度计对双光束条纹的定位精度达到 $1/500 \sim 1/1000$ 条纹，把显微密度计得到的条纹信息送到计算机处理面形，并自动画出面形等高图。这种数据处理利用双光束条纹完全可以达到多光束条纹的条纹定位精度，这样对未镀膜的表面的面形检验提供方便的测试手段。利用这种方便，激光不等光程泰曼干涉仪还可以测量光学系统的点扩散函数和光学传递函数。图8表示了检验 $\phi 600$ 毫米抛物面镜的系统^[13]。这个系统同时测量光程差（光瞳函数）和点扩散函数，利用显微密度计和计算机处理得到光学传递函数。

3. 波前剪切干涉仪

波前剪切干涉仪把被检波前重迭在它自己的剪切像上产生干涉，这种波前剪切的方法有横向的，旋转的，反转的，径向的。由于被检波面和自己的剪切波面干涉不用参考基准面，这就避免了前述的斐索干涉仪和泰曼干涉仪由于参考基准面的精度决定干涉仪的精度限制。另外产生干涉的两个波光程相同，因此对空气抖动和震动的影响不敏感，而且对光源的单色性的要求不高，甚至可以用白光光源。正如将下面介绍的例

子，这种干涉仪由于不用参考基准面，干涉仪的结构特别简单。它的缺点是对于干涉图的定量判读较麻烦。这个问题由于近代数据处理技术的发展利用计算机很好地完成，所以近年来波前剪切干涉仪有很多新发展。尤其是对大口径光学零件和光学系统的像质评价方面用途很大。

图10表示了简单的径向剪切干涉仪^[16]，这种径向剪切干涉仪的特点是干涉图的判断和一般的泰曼干涉仪一样，所以容易直接判读。另外结构形式简单，可以装在目镜筒里使用，而用这种干涉仪直接观察波前误差时对空气抖动和震动的影响很不敏感。

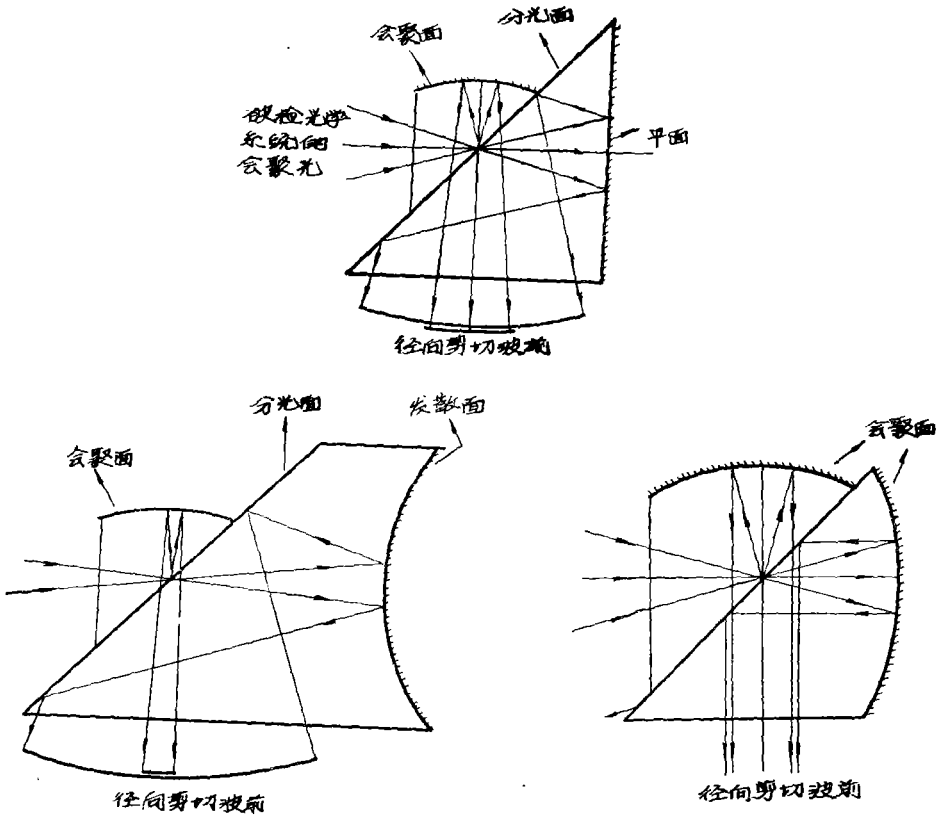


图10 径向剪切干涉仪（具有三种不同的剪切量）的构成

图11表示了简单的横向剪切干涉仪的构成^[17]。用两块 $45^\circ-90^\circ-45^\circ$ 棱镜，当胶合时沿垂直于对角面的轴旋转一个角度，使零级条纹位置刚好落在立方体中心，完成等光程分束，这样可以利用光谱范围较宽的光源。图12表示用这个干涉仪检验有限共轭距

和无限共轭距的镜头的光学系统。图13表示了用这个波前剪切干涉仪测量 OTF 标准镜头的结果。用自动扫描的显微密度计和快速电子计算机完成数据处理。这种测量光学传递函数的方法装置特别简单，精度和一般光学传递函数测量装置相同。

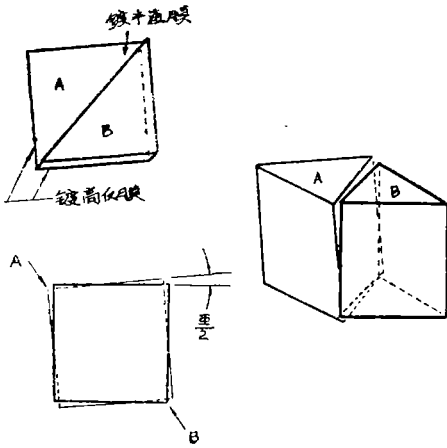


图11 波前剪切干涉仪立方体的构成

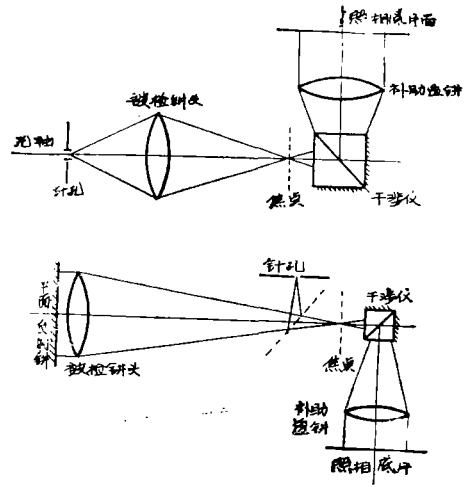


图12 波前剪切干涉仪检验透镜系统

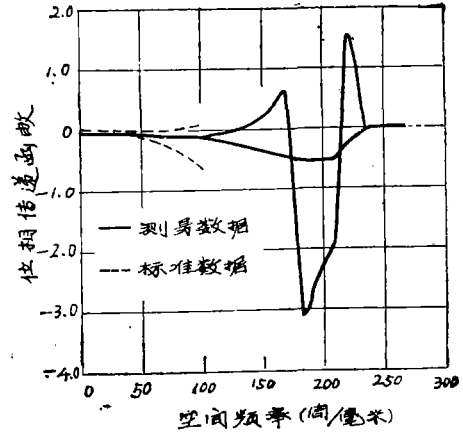
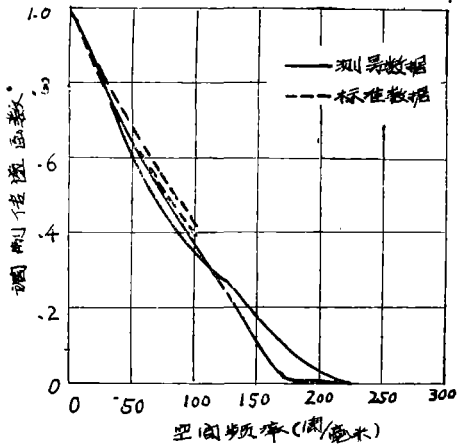
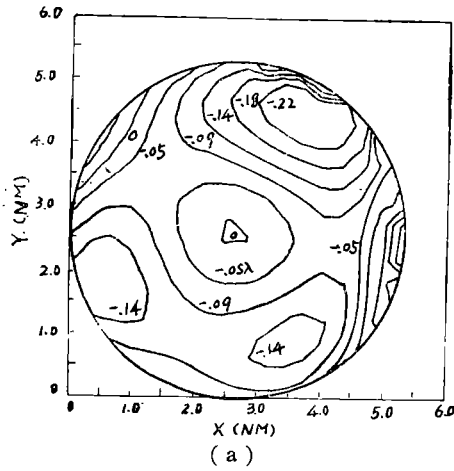


图13 用波前剪切干涉仪测量 $f/8$ 的OTF标准镜头的结果

(a) 光瞳函数波前等高图 (b) 子午和弧矢的MTF (c) 子午和弧矢的PTF

注: 图13 (a) 上X (NM) 改为X (MM)

图14表示了利用双频光栅的横向剪切干涉仪^[17]。光栅放在被检镜头的焦点附近，光栅具有两种空间频率，因此光栅产生不同衍射角的两个光锥，衍射角选择为使零级和一级不干扰，用一个成像透镜把被测系统的出

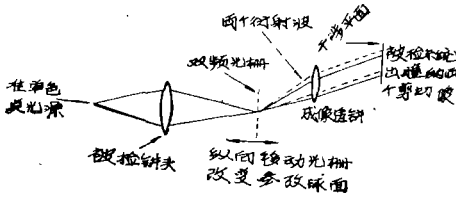


图14 双频光栅横向剪切干涉仪

射光瞳成像在底片平面。这个双频光栅是利用全息照相方法产生，在两次曝光之间改变两个平行光之间的夹角，在一个底板上曝光两次而成。根据选择这两个空间频率的差来控制不同的剪切量。把光栅纵向移动，可以改变参考球面。这种干涉仪对光源的单色性要求不高，甚至可以用白光光源^[18]。图15表示了利用两个交叉光栅的横向剪切干涉仪^[19]。交叉光栅是用全息照相方法制成的，在两次曝光之间把照相底板旋转 90° 方向来实现交叉光栅。图15表示的是泰曼型激光不等光

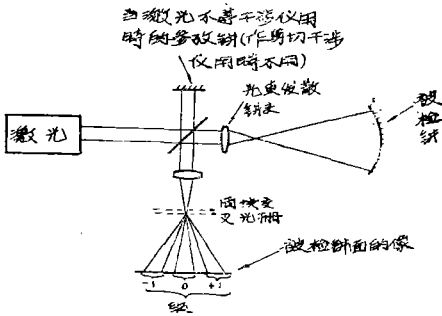


图15 作剪切干涉仪的激光不等光程干涉仪系统

程干涉仪，作为交叉光栅波前剪切干涉仪用时挡住参考平面，把交叉光栅放在成像透镜的焦点附近，这时被检镜头的像处得到剪切干涉图。波前的剪切量是根据两块光栅相对旋转的角度来控制，而根据改变两块光栅之间的间距来控制剪切波前的倾斜量。由于交叉光栅把互相垂直方向的剪切干涉图同时显示

出来，对非对称系统的检验是很有利的。这个干涉仪可以测量泰曼干涉仪测不出来的大像差量的非对称波前（可以对具有100个波长的像差的波前进行测量）并测量精度达到百分之一以上。全息光栅的空间频率采用了200对线/毫米，经过漂白处理在每一个剪切图中进入入射光的百分之十以上的光。干涉图的分析处理是利用计算机进行，自动画出面形等高图。

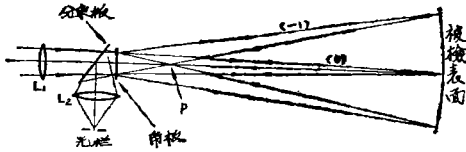
4. 同路干涉仪

同路干涉仪实质上是径向波前剪切干涉仪的极端情况。它把被检镜面中很小的区域作为基准面来检验整个镜面的面形。和径向剪切干涉仪一样对空气抖动和震动的影响不敏感，干涉仪由于避免参考基准面，其精度不受这种基准面精度的限制。同路干涉仪检验大口直径镜面的精度达到 $1/100$ 波长以上。

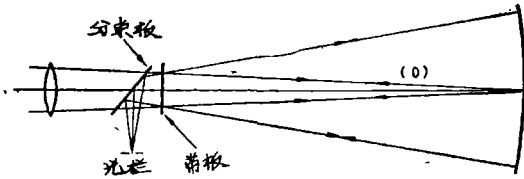
散射板干涉仪^[21]和伏拉贝尔(Vrabel)干涉仪^{[21], [20]}都是属于这种类型的同路干涉仪，精度都可以达到 $1/100$ 波长以上。(详见本期译文“干涉测量的实际应用”)

带板干涉仪是利用加柏(Gabor)带板实现的同路干涉仪^[21]。图16表示三种带板同路干涉仪的形式。在第一种形式中，透镜 L_1 把光源的像成在被检镜面中心，这个光束通过带板时取零级光束，经被检镜面小区域返回带板并通过带板时取负一级衍射光束，把这个光束作为参考基准光束。另一方面，第一次通过带板时取负一级衍射的被发散的光束照明整个被检镜表面，这个光经过被检镜面返回并第二次通过带板时取零级光束。这两个返回并通过带板的光束产生干涉，产生同路干涉（或叫等光程干涉）。在这种形式中，带板放在被检镜面的曲率中心处。干涉图的判读方法和泰曼干涉仪相同。在第二种形式中，带板的虚焦点放在曲率中心，干涉是在 $(0, +1)$ 和 $(-1, 0)$ 级光束之间进行。在第三种形式中，带板的实焦点放在曲率中

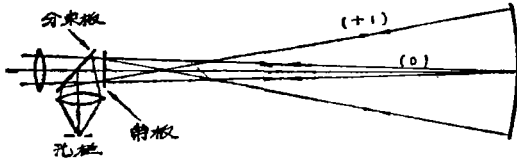
心, 干涉是在 $(0, -1)$ 和 $(+1, 0)$ 级光束之间进行。这里 $0, +1$, 分别表示直接通过, 会聚, 发散的光束。图17表示了制备带板的光学系统。带板实际上是一个加柏全息照片。同路干涉仪的干涉条纹是双光束条纹, 所以为了精密测量, 一般采用显微密度计对干涉图照片进行扫描给出准确的条纹定位信息, 并由计算机处理画出面形等高图。



(a) 带板干涉仪的第一种形式



(b) 带板干涉仪的第二种形式



(c) 带板干涉仪的第三种形式

图16 带板同路干涉仪的三种形式

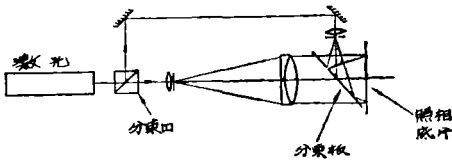


图17 用于产生带板的光学结构

5. 全息干涉计量术

全息干涉计量术是近年来发展较快的一种干涉技术, 主要用于材料的无损检验, 微小位移和变形的测量, 振动的分析等方面。

在光学检验中全息干涉技术是很有前途的一种手段。如对毛面的面形测量, 装校过程中对透镜面的变形的测量以及普通的干涉仪无法实现的补偿干涉仪等方面全息干涉技术的潜力是很大的。

在大尺寸玻璃均匀性的测量方面利用全息照相方法可以补偿干涉仪的误差和被检验玻璃平板的面形误差, 从而准确地获得玻璃折射率分布不均匀性误差^[22]。(详见本期译文“玻璃不均匀性”)

在非球面的面形测量方面, 因为非球面的样板不容易制备, 利用全息照相板作补偿片实现非球面检验的零透镜是方便的。同样的原理也可以用来作特大尺寸干涉仪的误差补偿片, 这样使大尺寸干涉仪的制造容易得多。

图18表示了全息照相补偿测量的基本原理^[23], 用平行光束和标准设计的波面制作全息照片 H , 当利用实际加工出来的透镜产生的波面照射这个全息照片时如果加工完全没有误差则再现出平面波, 而如果加工有误差, 则再现的平面波也相应地产生误差, 根据这个误差检验被检透镜的加工误差。当然这时检验的结果是包括面形误差和玻璃均匀性误差在内的透镜的总误差, 这比单纯的面形检验更有效地说明该透镜的质量。图19表示了检验非球面透镜的光学系统。其中全息照片是用计算机全息照相方法制备的, 计算机根据非球面的设计数据画出放大十倍的该非球面透镜所对应的全息图, 利用精缩镜头缩小十倍, 在很好的标准平板玻璃上涂上负片型的光致抗蚀剂, 被曝光的部分透光而其他部分镀铬不让透光, 这就成为全息照相补偿元件。其一级衍射光的效率为百分之十几, 这在透镜检验上是足够的。已经制成的这种利用计算机全息照相补偿片的非球面检验干涉仪精度达到了十分之一条纹。图20表示了检验非球面反射镜用的光学系统^[24]。这种利用计算机产生的二元全息照相方法制备补偿元件的干涉仪的精度决定于全息照相用

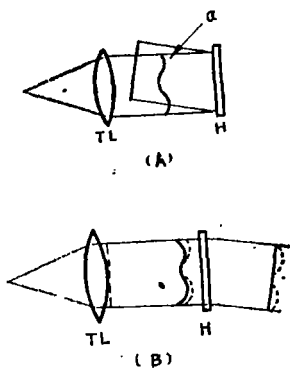


图18 测量原理

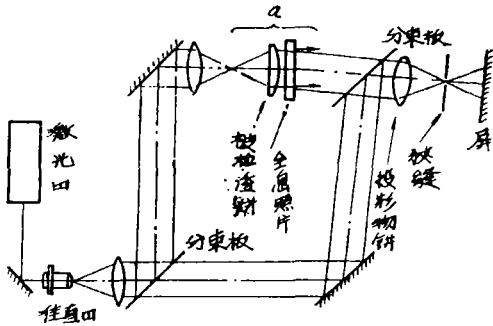


图19 检验非球面透镜的光学系统

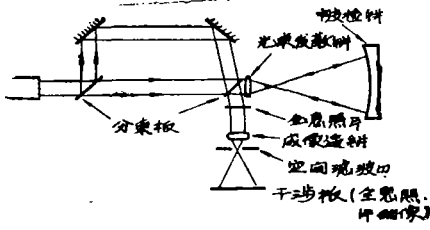


图20 检验非球面反射镜的光学系统

感光乳剂的稳定性，绘图仪产生的畸变，量子化误差，全息照相的缩小倍率的误差，缩小时精缩物镜的畸变，把全息照片安装在干涉仪时的位置误差等。因此利用计算机全息照相的主要缺点是不能高速地制备高分辨率的全息照片并要作高精度的全息照片则价格也相当高，另外全息照片的安装也较麻烦。但是计算机全息照相可以实现任意形状的非球面样板，从这一点来看意义是很重要的。

全息技术用到精密面形检验方面，利用非线性全息照相方法可以产生多光束干涉以及位相差放大，对未镀膜的面作精密面形检验。图21表示全息多光束干涉原理^[25]。把普通

双光束干涉条纹用 γ 值大于2地照相记录，则产生非线性全息照相板，这个全息照相板再现时产生0级 \pm 1级 \pm 2等衍射波，通过光栅把各个方向衍射的不同级次衍射波在某一固定方向上重迭，利用准直物镜把这个方向的所有衍射波会聚到焦点，利用光栏挡住不必要的衍射波，只取这个固定方向的衍射光，则通过光栏孔观察或照相记录得到多光束干涉条纹，使原来的双光束条纹的定位精度提高。

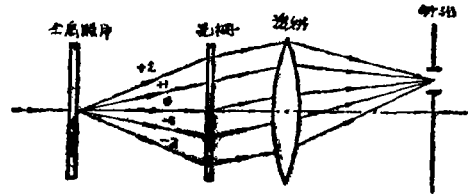


图21 全息多光束干涉

利用非线性记录的全息照片可以实现位相差放大，类似于多重光路干涉得到的条纹，放大干涉条纹的弯曲，提高干涉测量的灵敏度。图22表示了记录和位相差放大的系

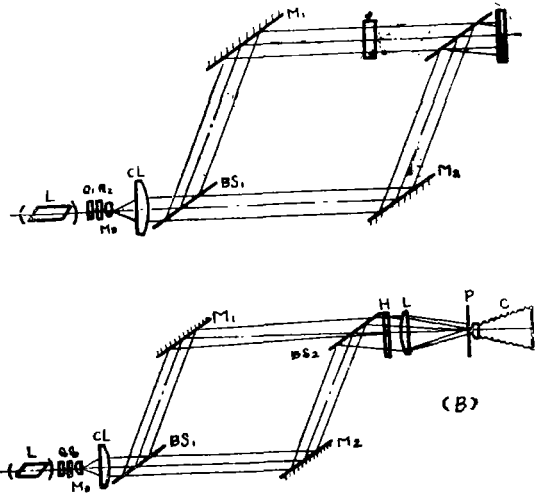


图22 全息位相差放大

(A) 全息照相板的制备 (B) 全息位相差放大
L: Le-Ne激光器 Q₁和Q₂: 固定和调整的 $\lambda/4$ 片 M₀: 显微物镜 M₁、M₂: 反射镜 BS₁、BS₂: 分束板 S: 被检样品 CL: 准直镜 L: 透镜 H: 全息照片 P: 滤波用的针孔 C: 照相机
统^[25]。当记录时被检样品放入干涉仪的一路中，而再现时拿掉样品，由于记录时取 γ 大

于2，产生非线性全息照片，因此再现时有0级，±1级，±2级等衍射波，当适当调整反射镜 M_1 和分束板 BS_2 时可以通过针孔P选取所需要的衍射级。当取0级和+1级时位相差没有放大，而取±1级时位相差放大两倍，当取±7级时位相差放大14倍。这时希望被检波面误差被放大而不希望整个光学系统本身的不完善引起的误差被放大，为此目的采用两个全息照片，消除光学组元像差的误差，作到在八倍位相差放大中得出很好的效果^[26]。

利用两次曝光全息干涉方法还可以实现多重光路干涉，这时干涉仪本身的误差自动被消除而被检件的位相差被放大，提高位相差干涉测量的灵敏度^[27]。图23表示了检测大尺寸光学板的微小误差的多重光路干涉仪的光学系统。图中分束板B平分光强， P_1 和 P_2 针孔提高相干性，透镜 L_2 把小孔成像在透镜 L_3 的焦点F处，在被检区中产生平行光

束，反射镜 M_5 是全反射镜，被反射的平行光由 L_3 重新会聚，一个直角棱镜插入到焦点前面，借助于小反射镜 M_4 。再一次返回到透镜 L_3 形成平行光束，这样重复多次实现多重光路干涉。参考光束经过反射镜 M_1, M_2, M_3, M_4 拉长光程，并经过透镜 L_4, L_5 在全息板上形成参考光束。当记录全息照片时，预先安排好光学系统使多次传播的次数选择好，通过偏振片的光被引到全息照相板上。偏振片的作用是校正多次反射引起的偏振方向的旋转，通过显微镜观察调整到干涉条纹的能见度最大。两次曝光是一次放入被检样品，而另一次不放被检样品进行。根据两次曝光全息照相原理，再现时条纹反映被检样品产生的位相差而干涉仪本身的误差自动消除，因此对干涉仪的加工要求可以放宽。用这种干涉仪可以检验气体室的密度分布，作到7次通过气体室，结果比单次通过的马赫—珍德干涉仪提高14倍的灵敏度。

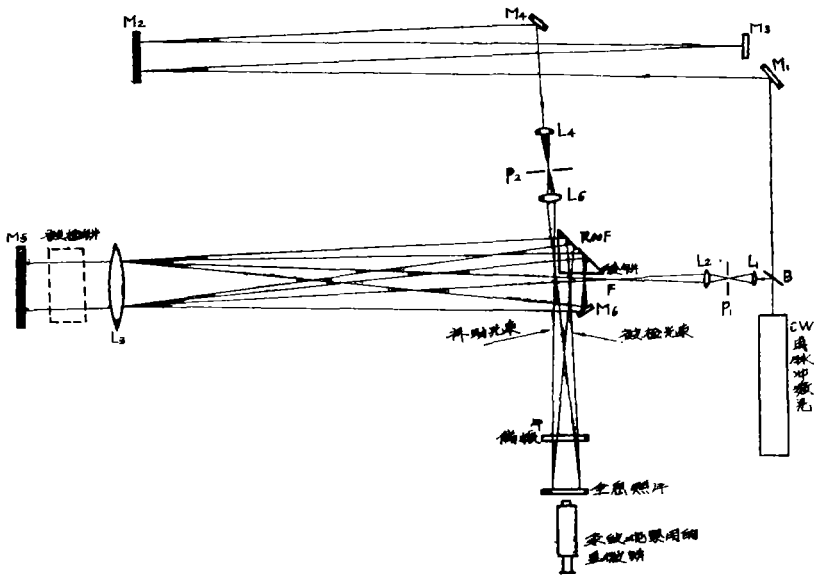


图23 全息多重光路干涉仪

利用全息照相剪切干涉仪还可以方便地测量光学系统的传递函数^[28]。图24表示在两块全息照相板上记录光瞳函数，被检镜头的光瞳函数记录在乳胶面相互接触的两块全息板上。参考波倾斜 θ 角，这两块全息照相板

在 $\gamma = -2$ 的条件下被处理。在再现时，这两块全息板错开一定距离，这个错开的量相当于自相关积分时的光瞳错开的量，也就是代表某一空间频率，利用参考光束照明这两块全息照片，则从 $+\theta$ 方向衍射的光中得到光

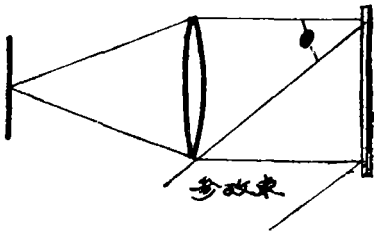


图24 记录全息图

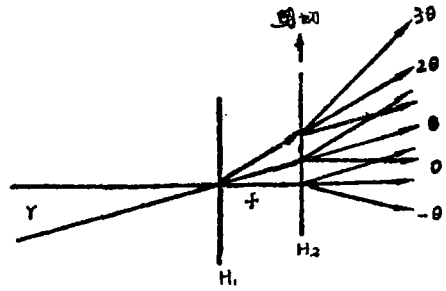


图25 再现全息图

瞳函数的自相关,如图25所示。改变两块全息板的错开量来控制空间频率,用光电接收自相关,则光学系统的调制传递函数和位相传递函数分别从示波器的振幅和位相中得到。

6. 斑点图样干涉计量术

斑点图样 (*Speckle Pattern*) 干涉计量术是近年来发展起来的新方法,用于物体的微小变形和位移的测量以及振动的分析等方面^[29],它可以实现全息干涉计量作到的各种测量,并具有装置简单使用方便的突出优点。比如在斑点图样干涉计量中可以用普通的照相机和普通的照相感光材料达到足够的目的,其精度接近全息干涉计量的精度,也有可能代替全息干涉计量而使用^[30]。

斑点图样干涉计量术也可以用在光学检验方面,如利用毛玻璃的微分干涉仪^{[31],[32]}。以前的普通横向剪切干涉仪也可以得到波前的微分,但光学系统复杂,对准困难,如果用毛玻璃的斑点图样干涉仪,则非常简单地得到波前的微分。图26表示了利用毛玻璃的微分干涉仪。用单色平行光照明毛玻璃,在毛玻璃之后相隔 d 处放照相干板,毛玻璃板和照相板相互平行。记录时在一个照相干板上连续曝光两次,一次是不放被检位相的透明物体,另一次是放入透明物体 A ,把它放在毛玻璃前面,如图26(a),(b)。显影之后照相板放在图26(c)的系统中,用平行光照明(可以用白光),具有开口 T 的挡板放在透镜 O 的后焦平面上,挡板上的开口 T 不在光轴上,与光源的像 F 错开一个距离。通

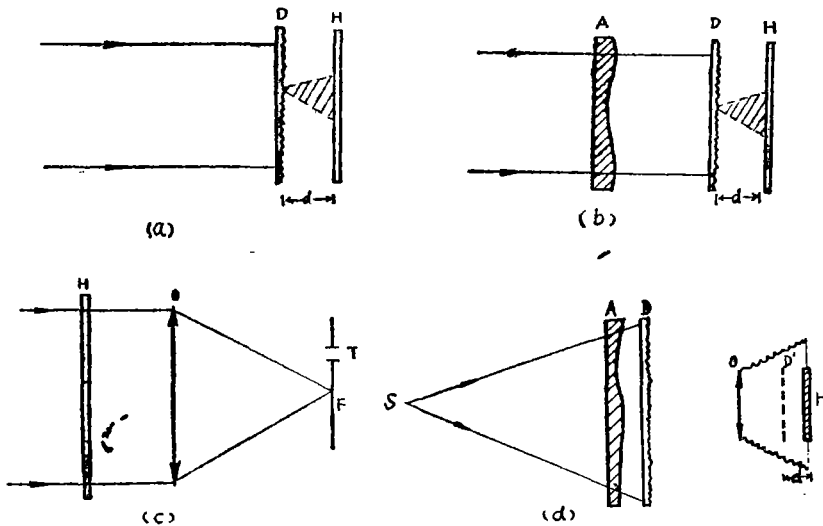


图26 毛玻璃微分干涉仪

过开口 T 观察, 则眼睛看到照相板 H 上的光强或颜色的变化。在照相板 H 上的每一点的光强或颜色的变化代表该区域中通过透明物体的光波位相变化的斜率。为了实现大尺寸位相物体的检验, 采用如图 26 (d) 的系统, 这时代替照相干板, 利用照相机, 把毛玻璃板成像在离焦面一定距离 d 的 D' 处, 进行上述的两次曝光, 显影后的底片还是在图 26 (c) 的系统中, 和前述方法一样观察。

利用斑点图样干涉术还可以检验照相物镜^[33], 可以测量各种像差量并且可以测量光学系统的传递函数。这种测量的特点是设备很简单并使用方便。

参 考 文 献

1. 画像技术, Vol. 6, No. 5, P. 23 (1975).
2. Optical Engineering, Vol. 14, No. 2, p. 124, 1975.
3. Optical Engineering, Vol. 14, No. 2, p. 145, 1975.
4. Appl. Opt., Vol. 14, No. 9, p. 2283, 1975.
5. マシニスト, Vol. 18., No. 1, p. 30, 1974.
6. Optics and Laser Technology, Vol. 4, No. 1, p. 28, 1972.
7. Appl. Opt., Vol. 8, No. 3, p. 553, 1969.
8. Appl. Opt., Vol. 8, No. 3, p. 543, 1969.
9. Appl. Opt., Vol. 6, No. 6, p. 1077, 1967.
10. Appl. Opt., Vol. 10, No. 4, p. 929, 1971.
11. S. P. I. E. Proceedings of the photo-optical systems evaluation seminar, 1967, 第一篇和第十篇文章.
12. Optical Engineering, Vol. 11, No. 2, p. 38, 1972.
13. Optical Engineering, Vol. 12, No. 3, p. 113, 1973.
14. Appl. Opt., Vol. 8, No. 3, p. 538, 1969.
15. Appl. Opt., Vol. 13, No. 11, p. 2693, 1974.
16. Appl. Opt., Vol. 12, No. 11, p. 2765, 1973.
17. Appl. Opt., Vol. 12, No. 9, p. 2057, p. 2061, 1973.
18. Appl. Opt., Vol. 13, No. 1, p. 200, 1974.
19. Appl. Opt., Vol. 14, No. 1, p. 142, 1975.
20. Optical Engineering, Vol. 12, No. 5, p. 180, 1973.
21. Appl. Opt., Vol. 13, No. 5, p. 1093, 1974.
22. Appl. Opt., Vol. 14, No. 8, p. 1761, 1975.
23. Nikon Technical Journal, 1975, No. 9, p. 34.
24. 光学技术 コンタクト, Vol. 11, No. 6, p. 11, 1973 和 Vol. 12, No. 7, p. 15, 1974.
25. "Applications of holography" Proceedings of US-Japan Seminar on Information Processing by Holography, p. 169-193, 1969.
26. Appl. Opt., Vol. 13, No. 9, p. 2014, 1974.
27. "Applications of Holography" Proceedings of the International Symposium of Holography, 1970.
28. "Applications of Holography" Proceedings of the US-Japan Seminar on Information Processing by Holography, p. 69-77, 1969.
29. Appl. Opt., Vol. 14, No. 4, p. 878, 1975.
30. 光学, 1974年6月 P. 166.
31. Appl. Opt., Vol. 11, No. 4, p. 853, 1972.
32. Optica Acta, Vol. 20, No. 1, p. 1973.
33. Appl. Opt., Vol. 13, No. 9, p. 2026, 1974.