

激光全息球面干涉仪*

杨 力

(中国科学院光电技术研究所)

提 要

介绍一台采用全息象差补偿板的激光全息球面干涉仪。叙述了仪器结构及应用,并对全息象差补偿原理和实时干涉法中全息图的复位等问题做了简要讨论。

1974年以来,我们研制了一种激光球面干涉仪,在此基础上,开展了全息象差补偿的研究实验工作,并将这台试验仪器改造成为激光全息球面干涉仪。其它实验室也利用这台仪器,开展了全息法检验玻璃均匀性的实验工作,亦得到较好的结果。

一、仪器的光学结构

该仪器的光学结构见图1。

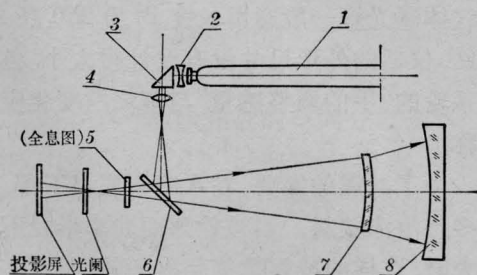


图1 仪器光学系统示意图

从氦-氟气体激光管1射出的激光,由负透镜2稍加扩束,经直角棱镜3,显微物镜4,聚焦在O点,该点位于物镜7的凹球面的球心上,由分光板6反射至物镜7。其中,由物镜7的凹球面(做为参考面)自准返回的会聚光束,即作为干涉仪的参考光束,它聚焦在

O'点。经物镜7出射的光束即为工作光束,射向被检凹球面8(拍摄全息图时用标准球面镜),由8自准循原路返回系统内,并在O'点附近会聚成另外一个象点。调整仪器,使这两象点重合,则在重合区内即可看到干涉条纹。

很明显,在图1所示的光学系统中,与通常的两光束重合的非索型球面干涉仪不同之处有两点:一是在系统焦点前采用了全息象差补偿板(图1中序号5),二是把参考面(标准面)破例地选在第一个表面,而不是选在最靠近被测面那个最外边的表面。

显然,在参考球面和被检球面的干涉场中,引入了物镜7的波象差。如果按传统干涉仪的概念来看,这是不合理的,但这却是我们开展全息象差补偿实验的一个必要条件,关于这样安排的意义,将在后面详述。

物镜7的结构见图2。

经计算,该物镜全口径为 $\phi 60$ 毫米时,球差相当于两个波长($\lambda=6328$ 埃),在口径 $\phi 20$ 毫米内,球差小于 $\lambda/20$ 。

未经全息象差校正时,物镜全口径的球面干涉图形见图3。该图实际上是物镜波象差的干涉检验。

* 收稿日期:1977年12月22日。

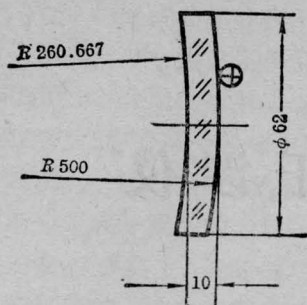


图2 物镜简图

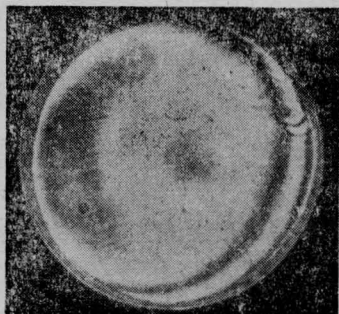


图3 没加象差补偿板时物镜全口径干涉图

为了补偿这样大的象差，我们在系统的焦点前，分光板后，安装一全息象差补偿板。在图1中被测件8的位置上放一标准球面镜，同物镜7的凹球面构成共心干涉腔，将其干涉图形调成细光栅状，记录（拍摄）在全息照相干板上，经化学处理后，即制成这种全息象差补偿板。全息板复位后，同干涉仪构成一个不可分割的整体。关于全息图的制作详见文献[1]。

装有全息象差补偿板的激光球面干涉仪，可称为激光全息球面干涉仪，可以看做是一种无波象差的，能满足所谓零检验条件的干涉仪。

二、仪器的整体结构

仪器的外形见图4（未装遮光罩）。

仪器全部光学系统装在上部箱体内，该箱体装在一个万能调整座上。图1所示的被检球面8装在另一支架上。仪器和被检件支架，共同装在一沉重的水磨石底座上。

由图4可见，仪器备有升降粗调，纵向浮动，锁紧后可以纵向微调，横向微调，以及俯仰角和水平角微调等。仪器下部三脚支座上的三个微调螺钉，也可以很方便地用于仪器的调整。上述调整机构，保证了图1所示仪器本体光学系统，做为一个整体相对于被检球面8，调整相互间的位置。使干涉仪对两个相干波面相互位置的选择（即干涉条纹形状、方向、宽度的选择）变得方便和可靠。这在拍摄全息图和以后的实际使用中，都是十分必要的。



图4 激光全息球面干涉仪外形

在图4的左端可以看到装有全息象差补偿板的全息照相组件外形。全息图复位后，成为干涉仪的重要元件。全息干涉图形，因亮度很强，可以在投影屏上观测。

根据干涉仪的操作习惯，以及全息干涉计量的稳定性要求，并考虑到国产内腔式氦-氟气体激光管一般通用长度均为250毫米，因此，仪器的外形尺寸没有设计得太小。各调整手轮的“手的调整感量”与条纹的变化应该相称。

为了减震的需要，在水磨石底座下部，垫有多层泡沫塑料，当被检球面曲率半径不是太大时，这样的减震措施是有效的，甚至在相邻房间有机床工作的情况下，仍可在投影屏上看到对比度较好的全息干涉条纹。

三、全息象差补偿原理

1. 全息照相术

在讨论全息象差补偿原理之前，先简单讨论一下全息照相的一般原理。

如图5(a)所示,物光与参考光同时在全息照相干板上曝光,此干板上形成的图象就叫全息图象,也称全息图。它是这两束相干在全息照相干板上形成的复杂的干涉图样,实际上为一复杂的衍射光栅。如图5(b)所示,只要用参考光照明全息图,经衍射会再现出物光。反之,如图5(c)所示,由物光照明亦可再现参考光。

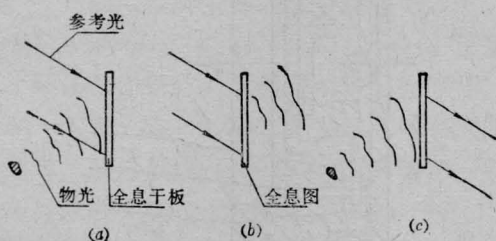


图5 全息图原理

上述即为全息照相的一般原理。

2. 实时干涉法

根据图5的原理,很容易了解图6。

使图6的全息板曝光,物体A和参考光都保持原位不动,全息图复位后,人的眼睛透过全息图将同时看到物体A(即物光的波前)和再现的物体象A'(再现的物光波前),它们重叠在一起产生干涉。则这种干涉图形,可称为全息干涉图形,这种全息干涉方法称为实时干涉法。

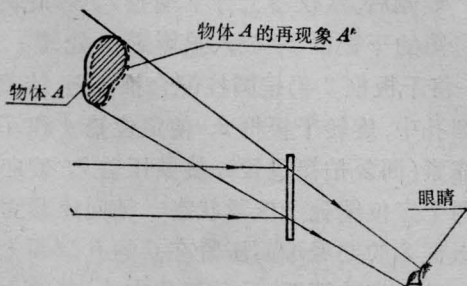


图6 实时干涉法原理图

实时法属一次曝光法,显然,这种方法适于测量同一物体在不同时态的微小的形位偏差。作为光学零件的全息干涉检验,则适于把被检验表面同标准面形进行比较。

3. 全息象差补偿原理

让我们用本仪器的具体光路加以说明。

图7中,由球面I自准回来的光束做为参考光束,其波面用 I' 表示(可看做是理想球面波)。由球面II自准回来的光束经过透镜I后,其波面为 $2'$ 。显然,波面 $2'$ 包括球面II的面形偏差和透镜I的波象差,当选定球面II为一标准球面时,则波面 $2'$ 仅包括系统的波象差。

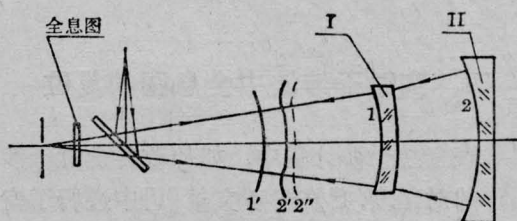


图7 全息象差补偿原理示意图

拍摄波面 I' 和 $2'$ 的全息图,复位后,经参考光波面 I' 的照明,将衍射出波面 $2'$ 的再现象 $2''$,这里 $2''$ 具有与 $2'$ 完全一一对应的相同的波面形状。这时,是波面 $2'$ 与 $2''$ 之间产生全息干涉,并非与参考光波面 I' 的干涉。也可以理解为球面 2 与其再现象之间的干涉,其干涉图形必然是一组平行等距直条纹,也就是说,透镜I的波象差被补偿掉了,实现了通常所说的零检验条件。

图3所示系统的波象差,经过全息象差补偿后,其全息干涉图形如图8所示。

拍摄全息图时,通常使参考面和标准球面反射镜的波面之间构成一定倾角,产生一组很细的干涉图形,经曝光、化学处理后,即



图8 标准球面镜的全息干涉条纹

成为用标准球面拍摄下来的全息图。我们把这种方法,称为标准镜拍摄法。

如果用电子计算机绘制全息图,则原理是一样的。其制作的大体程序为,根据计算的带有波象差的波面,同参考波面在指定位置按预选的波面夹角,计算出其干涉图形。再用计算机控制绘图机,一条一条地绘出干涉条纹(放大指定倍数),之后用缩微镜头精缩、复印,制成全息图,并需按计算时选定的位置安装。

四、实时干涉法中全息图的复位

在全息干涉计量中,如何改善全息干涉图形的对比度,已在参考文献[1]中进行了专题讨论。

全息图的复位,在实时干涉法中,是一个很重要的问题。所谓“复位”,就是把制成的全息图,装回到原来拍摄(曝光)时的位置上。从理论上说,不允许使全息板在三维直角坐标系内发生任何坐标变化。

目前,解决复位问题,大体可分两种方案。

1. 原位处理法

全息图曝光后,在原位置不动,进行显影、定影、漂白等处理。显然,这种方法的复位精度好,仅有的误差是感光乳胶层的变形。

但是,除了在实验室条件下的实验模型上有可能采用之外,在把全息板做为仪器的一个重要元件的场合下,具体应用有很多局限性。在结构紧凑的干涉仪本体上,如果专为全息图的原位处理留出一定空间,并考虑冲洗时与机体的隔绝密封等,对于仪器结构设计确有一定困难。

为了更有效地解决这个问题,国外目前在全息照相材料上正进行新的探索,除了研究普通照相乳剂外,还对其它光敏材料开展很多研究工作,以便求得在原位能够迅速处理的方法^[2]。

2. 机械式复位法

在我们的工作中,设计了一种全息图拍摄和复位机构,我们称之为机械式复位法。具体方案见示意图9。

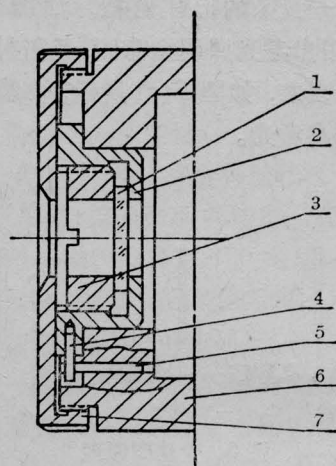


图9 全息图复位结构示意图

图9中,1为划切下来的全息照相干板片(并不一定要用圆片),2为不锈钢制的全息干板框,3为不锈钢制的螺纹压圈,4和5为定位销,6为干涉仪连结套,7为端面压紧盖,靠螺纹拧在6上。

在实际工作中,应多备用几个全息干板框,以便在拍摄前备好数片带框的全息干板,供选择合适的曝光量,以及选用不同的全息图。

曝光后,从仪器上拧下端盖7,抽出装有全息图的干板框2,放入显影罐中处理。之后,将干板框2仍按圆柱配合推入连结套6的圆孔中,旋转干板框2,使定位销4和5接触靠紧(回复拍摄位置),旋紧压盖7,旋向恰使两个定位销处于压紧状态,轴向压紧力使干板框2的凸缘端面压紧在6的孔端面上。

多次实验证明,这种复位方法,基本上能够提供良好的全息干涉图形,参看图8。

判断其是否可靠,只要看标准球面镜的全息干涉图形,能否实现零检验条件。这如同鉴别台曼干涉仪那样,就看本机的两块标准平面的干涉图形,是否为一组平行等距直

条纹是一样的。

从精度分析的观点看,上述机械式复位法,必然存在一定的复位误差,这是由于配合间隙,端面不垂直度及定位销接触状态前后不一致等等因素引起的。为什么仍能保证干涉检验所必要的零检验条件呢?对此我们还没有做过定量的理论上的计算。不妨从两个方面进行粗略的分析。

一是在光学检验的场合,所用的相干波面都是光滑连续的球面或曲面(有波象差的)。二是在通常干涉仪的具体结构上,两光束总是要重迭起来,两相干波面不会有大的倾角,实验采用的全息图,其条纹间隔约为 $0.05\sim 0.1$ 毫米,并不同于 3000 行/毫米的全息照相的复位要求,因此,估计机械复位的偏差,大约为全息图上光栅间隔的 $1/10$ 左右。多次实验证明,这种复位方法是可靠的。

关于复位的稳定性问题,不单纯取决于全息图的位置稳定,当系统其它光学零件的位置有变化时,全息干涉图形也会有变化。因此,一个全息图在干涉仪上的有效寿命还是有限的,但只要掌握了它的制作方法,及时更换新的全息图并不困难。

五、应用

激光全息球面干涉仪的应用方法,与通常激光球面干涉仪大体相同。因为是球面波的共心干涉,其全息干涉图形的解释与普通双光束等厚干涉图形的解释一样。所以,不存在一般全息干涉计量中解释三维图形的困难。

全息干涉检验的灵敏度,与选取衍射波前的衍射级次有关。参考光照明全息板,按一般的黑白负片处理后,衍射波(即再现的物

波前)的能量很低,以至于仅能产生很微弱的 ± 1 级衍射波前。但经过漂白处理后,使各衍射级的能量得到重新分布,在我们的实验中,得到了 ± 3 级衍射波前,在干涉仪焦点处可以看到以零级亮点为中心,两侧对称分布各三个象点,参看[1]。其中, $+1$ 级衍射波前称为记录波前,当用 $+1$ 级与物光的 0 级重迭时得到的干涉图形,与普通双光束干涉条纹一样。

这台仪器曾用于大口径电影经纬仪主系统凹球面面形的检验。做为全息检验的一例,在图10中给出了其中一次检验的结果。

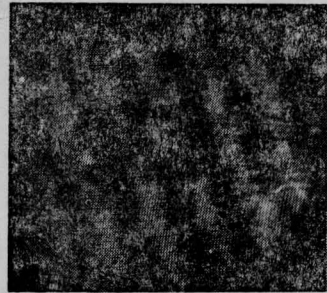


图10 凹球面面形的全息干涉检验实例
(该零件外径 $\phi 226$ 毫米,内孔直径 $\phi 52$ 毫米,凹球面曲率半径 R 为 1132.4 毫米。取 $+1$ 级与 0 级衍射波相干)

检验工作是在全息图复位后,能得到零检验条件时进行的,操作方法与普通球面干涉仪相同。所显示的面形与刀口检验结果相符。

做为普通激光球面干涉仪的应用,国内已有若干篇较详尽的工作报告发表,本文不再重复。

参 考 文 献

- [1] 宋从武,“菲索型全息球面干涉条纹的对比度”,《激光》,1978,5, No 4, 26~29。
- [2] “全息照相术的趋向”,《国外激光》,1977, No 1, 30。