

菲索型全息球面干涉条纹的对比度*

宋从武

(中国科学院光电技术研究所)

提 要

本文在实验的基础上,提出了一种改进菲索型全息干涉条纹对比度的新方法,并在全息球面干涉仪上得到了较好的验证,已经取得了若干实际应用。

一、前 言

大家知道,全息术利用两相干光——参考光和物光——的干涉产生干涉条纹。用底板记录下干涉条纹,即为这两光的全息图,它包含两光的振幅和位相的全部信息。用参考光再度照明全息图,物光的波前便重现出来,这称为物光波前的再现。同样,用物光照射全息图,参考光波前也能再现。这些工作在一台通常的双光束干涉仪上是可以完成的,因此,用它可以制作它本身的两光的全息图。如若取再现的物光波前和第二次照射仪器时再出现的实际的物光波前相干,即可以达到检验物光波自身前后两次所产生的光程差的目的。此种干涉称为实时干涉。我们注意到,在这里干涉仪器中的各种光学象差、分光板和玻璃的不均匀性,参考光波前的形状误差,聚光系统的象差等,就不再影响干涉条纹的质量。全息图在此起到了系统象差补偿和校正的作用,所以,全息图也叫全息象差补偿板。用全息干涉方法简化或改造了的常规干涉仪,可称为全息干涉仪。这种仪器也只是近几年来在国内外光学研究单位才开始研究和使用的,如全息非球面干涉检验、全息

光学样板等,都是干涉仪的一种创新和改造。

全息图或称全息板,是制造全息干涉仪的关键课题。有两种方法:一种是利用计算机绘制全息图^[1]。另一种是利用具有特定象差的光学系统插入干涉仪中,直接摄制这有象差的物光的全息图,尔后用此图做为象差补偿器去检验特定象差的镜面或透镜^[2]。

在使用的干涉仪光路结构上,也大致分为两种:一种是采用迈克尔逊干涉仪的变形或马赫-陈德尔干涉仪结构。这种结构是基于美国人利思(E. N. Leith)和乌帕特尼克斯(J. Upatnieks)^[3]改进盖帕^[4]原始全息术方案的思想,即参考光不与物体——底片轴共线。这种结构便于平衡两光束的光强,以提高干涉条纹的对比度,只要在光较强的这路光中加入一个减光板即可。第二种是采用菲索干涉型的光路安排,物光与参考光同路到达全息板,而不再分离开来。这种安排结构简单,但难于提高干涉条纹的对比度,因此这种结构采用的不太广泛。我们在研制球面干涉仪时使用了后一种方案,但针对其对比度的问题作了研究。把振幅全息图改为位相全息图后得到较好的结果,因此为广泛使用菲索型全息干涉仪开辟了一条途径。下面将此方

* 收稿日期: 1977年12月22日。

法作一简要的介绍。

二、干涉系统

试验时所采用的一种菲索型球面干涉系统,其光路的安排如图1所示。至于这仪器的详细结构,在另一篇文章^[4]中有详述。

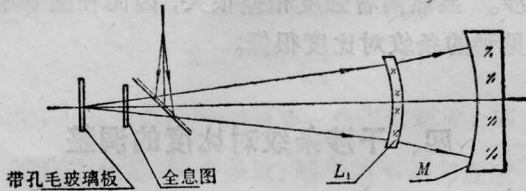


图1 试验用干涉光路图

利用一K₉玻璃的凹凸球面透镜L₁作为干涉仪的主镜。其凹面为参考镜面,点光源在其球心上。透镜的出射光束为物光束,它是发散还是会聚视L₁的聚焦能力。先以发散来考虑,当L₁使用的口径为1/10,出射光束基本上没有球差,因此它可以当做普通的双光束球面干涉仪去检验球面镜M的面形。如若L₁使用口径大于1/10,比如1/4,即主物镜的全口径,出射的光束具有球差2λ,虽然L₁凹面和M镜都是标准的球面,但得到的干涉条纹却不是直线的,而是具有典型球差的干涉图形,见图2。为了消除球差对干涉条纹的影响,一种方法是求助于光学计算,在L₁前增加一些透镜,消去这些球差。另一种方法是利用全息图来消除球差。我们在试验中用的是第二种方法。详细的方法见[4]。

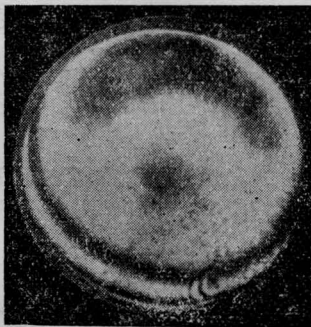


图2 球面干涉仪固有的球差



图3 全息球面干涉条纹图形
(全息板未经漂白)

得到的全息干涉条纹如图3所示。经过象差的补偿,条纹变直了。但是明显地看出,得到的全息干涉条纹对比不好,全息图的透过率也很低。因此,在干涉场中只能看到暗淡不清晰的条纹。

三、全息干涉的光强

为了改善干涉条纹的对比,必须先粗略地研究一下全息照相各有关衍射级的光强分布问题。我们已经知道全息照相包括光波的全息记录和再现两个步骤。在记录时一个基本的思想是利用两相干光在空间产生光的干涉。当两光有位相差时,在干涉场内出现光强度变化,一般称此为干涉条纹或干涉花样,那末用照相底板记录下这些干涉条纹,就把这两光光波前的振幅和位相的互相关系记录下来。前节已经提到,此照相板称为全息板。

两光中一为参考光,一为物光,用时间和空间的两复函数来表示。参考光为 $R(x, y, z, t)$,物光为 $S(x, y, z, t)$,其中时间部分可从函数中分离开来,得

$$R(x, y, z, t) = r(x, y, z) e^{i\omega t}$$

$$S(x, y, z, t) = s(x, y, z) e^{i\omega t}$$

此两光波在全息板上的强度应为

$$I = |R + S|^2 = (r e^{i\omega t} + s e^{i\omega t})$$

$$\times (r^* e^{-i\omega t} + s^* e^{-i\omega t})$$

$$= r r^* + s s^* + r s^* + r^* s \quad (1)$$

此光强在曝光时间 t_E 内的曝光量

$$E = \int_0^{t_E} I dt = \int_0^{t_E} (rr^* + ss^* + rs^* + r^*s) dt \quad (2)$$

若括号内函数与时间无关,意思是在曝光时两光没有任何位相变动,则

$$E = (rr^* + ss^* + rs^* + r^*s)t_E \quad (3)$$

曝光量取在底板的透过率-曝光量 $(t-E)$ 曲线的线性部分,则透射率和曝光量保持下列关系

$$T = 1 - kE \quad (4)$$

式中 k 为一常数,与底板的性质有关。

光波再现时以原参考光 R 照明全息板,透射的光为 RT ,也是一个复函数

$$\begin{aligned} RT &= (1 - kE)R \\ &= R - k[(rr^* + ss^*)R + rr^*R + Rr^*s] \end{aligned} \quad (5)$$

(5) 式中的最后一项 $-kRr^*s = -kre^{i\omega t}r^*s = -krr^*S$ 是再现的光波前。它的强度

$$I_0 = |-krr^*s|^2 = k^2|r|^4|s|^2 \quad (6)$$

(5) 式中第一项 $[1 - k(rr^* + ss^*)]R$ 是参考光直接透过的光波前。在 $k < 1$ 时,它的强度比 I_0 大得多。(5) 式中的第二项为物光波的共轭光波。在(4)式中没有表示出这几项光波的出射方向。如果想使用这再现的物光波作为检验用,就要设法将其分离出来。在球面干涉仪中,我们把仪器相对标准球面镜 M 偏转一个小角度,在干涉场内出现细而直的条纹,它的走向和仪器偏转的方向垂直,拍摄下这干涉条纹即为全息板。实际上这块全息板变成了一块黑白相间的光栅。在参考光照明光栅下,光波发生了衍射分解,于是在仪器的参考镜 L_1 的球心 C 附近见到三个光波的聚焦的光斑。如图 5(a) 中上排三个白点所示,中间零级光点为(5)式中的第一项,是个强光点。两旁的 +1 级和 -1 级的光点是物光再现和其共轭象,表现为弱光点。

全息板在物光的照射下,同样也产生衍射的分解,这三个光点如图 5(a) 中的下排所

示。与前面分析相同,中间零级为物光波直接透射,是个强光点。在参考镜面和被检球面镜两者的反射率相同时,上排三光点的零级和下排三光点的零级的光强度是相同的。在衍射方向上物光直接透射的波前(下排衍射点的零级)与物光再现波前(上排衍射点的 +1 级)相同,因而重迭出现物光的实时干涉。显然两者强度相差很大,因而在图 3 中见到的条纹对比度很低。

四、干涉条纹对比度的调整

为了提高干涉条纹对比度,首先需要提高全息板的透射率。本试验采用了底片漂白的处理^[5],原来全息板上曝光处经过显影定影后,出现黑色银粒。经过漂白处理,银粒从乳胶上分离下来,乳胶出现了空洞。由于乳胶的收缩,原来黑白相间的干涉条纹变成了透明起伏的浮雕条纹,其断面如图 4 所示。此层浮雕保留了原来光波的信息,但透过率却大大提高了。这种全息板称为位相全息板。它除保持原来光栅衍射的效应外,通过浮雕层的深浅对各级衍射光波的振幅也起到调制作用。调整底片的曝光、显影、漂白的的时间,可以使浮雕起伏消失而不起衍射作用,也可以调整使光栅的零级衍射强度为零。在这两个极端的情况之间,可以找到一个适合的条件,使零级衍射的光强度等于 +1 级和 -1 级衍射的光强。达到此种情况时参考光的 +1 级衍射光和物光的零级衍射光强相等,于是得到的实时干涉条纹的对比度为 1。图 5 给出我们调整全息透过率过程中的几种情况。

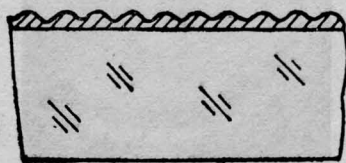


图 4

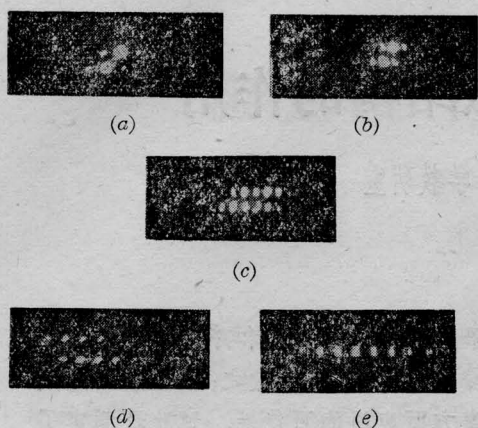


图5 调整全息板的透过率时各级衍射光点的光强变化

(a)—全息板未经漂白时物光与参考光衍射的两排光点；(b)—全息板经漂白后但调整不足的两排衍射光点；(c)—全息板经漂白后但调整过度的两排衍射光点；(d)—全息板经漂白后零级与1级强度相同的两排光点；(e)—d图两排光点重合出现全息干涉时的衍射光点情况

图6给出用位相全息板摄取的标准球面镜M的实时干涉图。

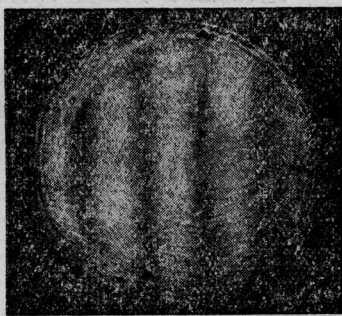


图6

位相全息板对各级衍射光强度起到了重新分布的作用，透射的光强也大大增加。所以不仅有零级和1级出现，而且有2级、3级或更多高级次出现。这时要使参考光的1级与物光的零级重迭，则其它逐级光点也都重

合，它们也相干出现干涉条纹，结果在干涉场内出现许多互相错开的干涉条纹重迭在一起，造成整个干涉场内干涉条纹混乱。为解决这个问题，只要设置一个特殊的光阑，将不需要的光点拦掉就可以了。采用一块毛玻璃屏，其上打一小孔，这屏既可以当作光屏，又可以当作光阑，放在球心C处，垂直于光轴的平面，所有的两组衍射光点都投影在屏上，找认需要的参考光+1级和物光零级，使其重合，并调整，只要这一对光点通过小孔，即得出需要的干涉光场和干涉条纹。经过以上措施后，仪器的干涉条纹对比度得到了解决。

五、结 论

这种提高全息干涉条纹对比度的新方法，已在我们设计的全息球面干涉仪中采用。由于激光光源的光强度很高，可以采用投影屏进行观察和分析条纹的精度；而由于激光本身的特点所产生的杂乱背景可以基本上消除，达到一般用水银灯的双光束干涉条纹的清晰程度，所以认为这个方法可以满足双光束干涉计量的工作。

至于全息板在使用中的稳定性问题，尚需进一步深入研究。

参 考 资 料

- [1] “用计算机全息照相的方法测定非球面的形状”，《光学机械》，1976，No. 1，59~63.
- [2] И. И. Духопед, Н. В. Константиновская и др.; ОМП, 1975, No. 7, 64~74.
- [3] E. N. Leith, J. Upalniaks; JOSA, 1964, 54, 1295; JOSA, 1962, 52, 1123.
- [4] 杨力：“激光全息球面干涉仪”，待发表。
- [5] 采用柯达推荐的漂白方案。见译文“激光及应用”，比斯利著(英)，第206页。