

应用全息位相共轭补偿检测 球面的干涉法

邹振书 顾玉南 廖江红 顾去吾
(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

本文提出了一种新的、应用全息位相共轭补偿的原理、检测球面光学元件面形和曲率半径的干涉测量方法。文中详述了方法的基本原理,给出了实验结果。对该方法的特点进行了讨论。

一、引 言

目前,球面光学元件加工过程中的检测通常是用样板接触工件测量面形误差;用球径仪三点接触法测量表面曲率半径。接触法测量不仅工件易受损,而且对不同曲率的工件要求有不同的样板。为了克服上述缺点,近年来采用了非接触式的干涉方法^[1]。该方法中要求一个高质量的镜组,它的最后一面是标准球面。从标准球面反射回来的波阵面与由待检面反射来的波阵面干涉,通过对干涉条纹的判读,以确定待检面的质量。但是,制造这样的镜组,无论在设计、选料、加工和安装上都是十分困难的,特别是测量大的凸面时,困难尤为突出。文献[2]介绍了干涉图补偿的办法,降低对标准球面的要求,但为制备补偿片,仍需样板。文献[3]提出了应用波前逆转的全息检测凸面面形的方法,去掉了标准镜组,采用了合成全息图。但因第一个全息图的制作与一个特殊面形有关,因此它也只能测量一种特定的凸面面形,仍有其局限性。

本文提出一种应用全息位相共轭补偿的原理检测球面面形及曲率半径的干涉测量法,它既适用于凹面镜又适于大的凸面镜,经实验验证,它是可行的。本方法类似于文献[4]所提出的方法,但本方法调整方便,全息图复位比较容易。

二、基本 原 理

图1为应用全息位相共轭补偿原理。检测球面面形及曲率半径的光路结构示意图。

1. 制作全息图

由激光器发出的光束由分束器 BS 分成两束,一束经反射镜 M_1 反射,由显微物镜 O 和针孔 P 组成的模拟点源产生一标准的发散球面波,通过大透镜 AL 及凹透镜 L_1 转换成平面波(带有大透镜 AL 及凹透镜 L_1 的总像差)到达全息干板 H 上,作为物光束;另一束光通过扩展器 E 形成一束平行光,经反射镜 M_2 、 M_3 反射到达全息干板 H 上,作为参考光束,两束

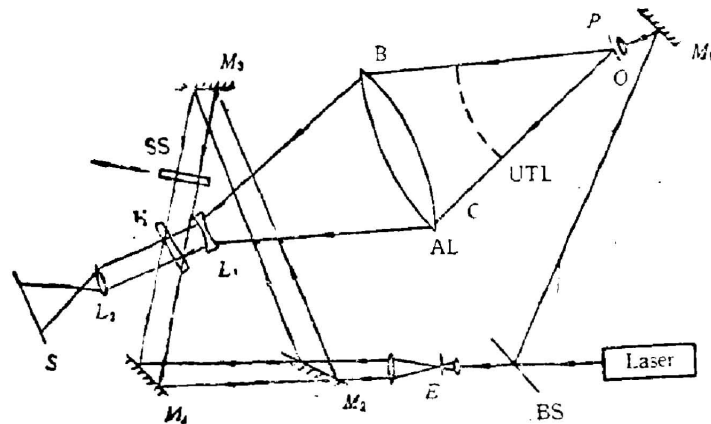


Fig. 1 Schematic of the interferometric measuring system and recording hologram

光在干板 H 上相干, 干板记录下全息图。

2. 测量

全息干板 H 处理后(全息片)必须严格复位, 然后去掉 M_2 , 并插入光学标准面 SS , 便可进行测量; 调整待测件 UTL (以凸面为例), 使其曲率中心与针孔位置重合。这时全息片 H 既是干涉测量系统中的分束元件, 又是波面补偿元件。用与记录全息片时的参考光共轭的光(逆光束)经反射镜 M_4 反射照明全息图, 其透射光是全息图的零级, 经标准面 SS , 沿原路返回再射向全息图, 与记录时的参考光一致。经全息图衍射, 其 $+1$ 级衍射光 $(0, 1)$ 便是记录全息图的物光束, 我们用 W 表示此光束波面。另一方面, 逆光束经全息图衍射, 其 $+1$ 级光束是物光束的共轭光束, 用 W^* 表示物光束的共轭光束的波面。 W^* 经凹透镜 L_1 和大透镜 AL 后形成一会聚于针孔位置的标准球面波, 然后插入其曲率中心与模拟点源针孔重合的待检面形 UTL , 这时射向 UTL 的标准会聚球面波将沿原光路返回。

如果待检面形 UTL 是标准的球面, 那么返回的光束经大透镜 AL 和凹透镜 L_1 后, 又变成与记录全息一致的物光束, 透过全息图便是 $(1, 0)$ 光束, 与 $(0, 1)$ 光束有完全相同的波面 (W 波面), 相干后能产生匀排的直条纹或一片亮视场。

如果待检面形 UTL 不是标准球面, 那么 $(0, 1)$ 光束波面与 W 波面也将有差别, 因此 $(0, 1)$ 光束和 $(1, 0)$ 光束相干, 就不再能出现匀排的直条纹。

根据条纹的状况, 可判断待检面形 UTL 与标准面形的差别。若向点源方向移动待检面形 UTL , 使点源 P 恰落在待检面形 UTL 的球面上(其间移动的距离即是待测面形本身的曲率半径), 此时会聚的标准球面波经球面反射, 不再是按原来光路返回, 而是 BP 光线沿 PC 方向, OP 光线沿 PB 方向返回, 由于是标准的球面波, 所以翻转反射回去的波面仍是标准的发散球面波。这时干涉场仍是匀排的直条纹或一片亮视场。为了以后讨论方便, 称此条纹为顶点条纹。

三、实验结果

实验的光路安排如图 1 所示, 大透镜两表面是对称的非球面, 孔径为 270 mm, 点源由放

大倍率为 40、数值孔径为 0.65 的显微物镜与直径为 $4\mu\text{m}$ 的针孔组合而成, 针孔到大透镜的距离为 1060 mm, 大透镜对点源及其像点这一对共轭点是消像差的, 弥散盘为 0.2 mm,

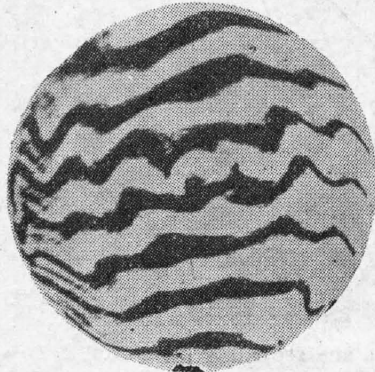


Fig. 2 Ronchi diagram of a large lens AL

图 2 是用朗奇 (Ronchi) 光栅检验大透镜 AL 的朗奇图。标准光学平面面形误差为 $\lambda/20$, 通光口径 18 mm。光源是功率为 2 mW 的 He-Ne 激光器。全息干板是采用天津 I 型的, 夹在两光学平板之间, 用折射率约为 1.5 的液体填充。全息图经显影、定影、漂白处理后, 进行复位, 当物光束和参考光束同时照明全息图时, 一般情况, 在全息图上可观察到直线匀排的莫尔条纹(干涉补偿), 调整全息图位置, 使之出现一片亮视场即可认为全息图复位好。图 3 是系统的顶点干涉图, 由计算机处理结果: 偏离标准面形的误差为峰谷值是 0.09λ , 均方根误差为 0.02λ ;

图 4 是测量一凸面的干涉图, 计算机处理结果为: 峰谷值 0.11λ , 均方根误差为 0.03λ 。实验结果表明半径测量精度 $\pm 2\mu\text{m}$ 。



Fig. 3 Apex interferometric pattern of the system

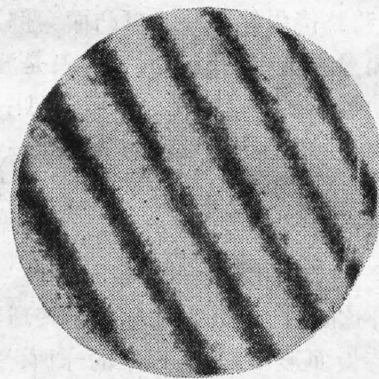


Fig. 4 Interferometric pattern of the measuring shape of the surface

四、特 点

1. 避免了加工困难, 且提高了精度

前面谈到, 通常的球面干涉仪是由多个镜片组成标准透镜组, 其最后一面作为比较面。这样的标准透镜组加工很困难, 口径越大越难, 因此从这样透镜组发出的光束不可能是标准的球面波。所以波面在传播过程中要发生形变, 因而在不同位置处, 其测量结果不一样, 无法对面形进行高精度测量; 因为不可能产生一个很好的会聚点, 这样在测量半径时, 不易精确地确定会聚点的位置, 获得良好的顶点条纹, 从而影响测量半径的精度。本文所述方法不采用标准透镜, 而是选用质量较好的显微物镜和优质的针孔组合而产生标准的球面波, 省掉了标准透镜, 而又提高了测量的精度。

小孔的直径 d 的选择与大透镜 AL 的孔径 D 及点源到大透镜的距离 R 有关, 其关系式为

$$d = 2.44\lambda R/D,$$

对小孔的圆度要求比较高,边缘不能有毛刺(可通过其衍射图形来判别)。针孔质量不好,就不能产生标准的球面波。这样不管在测量面形、还是在测量半径中,由全息图衍射的+1级光束经凹透镜 L 和大透镜 AL 后,不再是会聚于点源的标准球面波,即使待检面形是一标准球面,(0,1)光束和(1,0)光束也不一致,因此不可能得到一组匀排直条纹,测量精度下降。

2. 降低了对系统光学元件质量要求又满足检测大口径面形元件

在本方法中,用全息图作分束和波面补偿元件,全息图受再现光照明后,可产生直接通过的、不发生任何变化的零级光、同时产生被记录光波的共轭波,全息图成为干涉系统的分束元件。另外由于全息图的存在,使得相干的(0,1)光束和(1,0)光束都含有记录全息图时的物光束信息,这就可以补偿了由于大透镜 AL 及凹透镜 L_1 的质量不好造成的波面像差,因而可选择大口径的单片镜子作为系统中的一个主要元件,这样既满足了测量大口径凸面面形的要求,又解决了通常球面干涉仪难以解决的问题,降低了对系统光学元件质量的要求。

3. 干涉条纹清晰,对比度好

干涉测量中,条纹对比度是否清晰是一个很重要的问题。本方法中两相干光束(0,1)和(1,0)光束的强度得到天然的匹配。设照明光的强度为 I_0 ,对(0,1)光束来说,先是透过全息图,而后经标准面 SS 垂直反射,通过全息图衍射。设全息图的透过率为 T ,标准面的反射率为 R ,全息图的衍射效率为 η ,则(0,1)光束的强度 $I_{(0,1)} = I_0 T R \eta$ 。对(1,0)光束来说,照明光先是被全息图衍射,通过凹镜 L_1 及大透镜 AL 经待检面垂直反射,而后通过全息图。可选择标准面 SS 的反射率与待测面的反射率相同,因此(1,0)光束的强度 $I_{(1,0)} = I_0 T R \eta$ (大透镜 AL 及凹镜 L_1 可通过镀高增透膜,获得很高的透过率,忽略光的损失),可见, $I_{(0,1)} = I_{(1,0)}$,两干涉光束强度相同,干涉条纹清晰,对比度好。

4. 光学系统可对其本身质量进行自检

本方法中的光学系统,只有在其质量比较好(主要是指针孔的质量与标准面 SS 的质量)的情况下,才能获得好的顶点干涉条纹,即匀排的直线条纹或一片亮视场。两者任何一个质量不好,都会影响(0,1)光束或(1,0)光束,产生带有一定像差的顶点干涉图。因此,顶点干涉图的好坏是判断系统质量好坏的依据。系统中的标准面 SS 通光孔径很小,尽管对它的质量要求很高,但较易制备。

五、结 论

应用全息位相共轭补偿的原理,检测球面光学元件的面形及曲率半径的干涉方法,采用显微物镜和针孔的相合模拟点源产生标准的球面波,不需要样板,可对球面面形(尤其是大凸面)及曲率半径进行高精度测量。这是通常球干涉仪难以做到的。条纹对比度好是本方法的独特优点。由于干涉系统中的两相干光束不共程,因此测量时,要有稳定的外界条件,测量要在防震平台上进行。

卢振武同志参加了部分工作,李喜增同志提供了干涉图计算机处理数据,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 潘君骅;私人通讯。
[2] 杨力;《激光》,1979,6, No. 5 (May), 51.
[3] A. A. Gorodetskiĭ, N. P. Larionov *et al.*; *Soviet J. Opt. Technol.*, 1983, 50, No. 12 (Dec), 787.
[4] A. B. Zenilov, A. A. Shchetnikov; *Opt. Spectros. (USSR)*, 1984, 56, No. 4 (Apr), 435.

An interferometric method for measuring optical spherical surfaces using holographic phase conjugate compensation

ZOU ZHENSHU, LIAO JIANGHONG, GU YUNAN AND GU QUWU
(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 12 September 1985)

Abstract

This paper proposes a new interferometric method for measuring errors of optical spherical surfaces and their radii. The fundamental principle of the method is described in detail and the experimental results are given. Features of this method are discussed.