

干涉技术的实际应用

摘要 本文简要评论了几种型式的干涉仪。介绍和讨论了美国佩肯·爱尔曼(Perkin-Elmer)公司常用来作干涉测试的四种特殊型式的仪器。此外又列举了用各种仪器所得到的一些干涉图例。本文指出了干涉术近代的新发展。

绪 言

干涉仪的许多用途之一是用来测试光学元件和系统的,在个别的应用中,自从激光出现以来,几乎发生了革命性的变化。很难说在光学中更接近于理想的要求是达到它的改进能力的原因还是结果;不管怎样,这两个趋向已相符合(在光学中有一个古老的格言,即:加工能力的极限决定于测量能力的极限)。

应用干涉条纹对照样板来检验光学元件表面,对于球面和平面都算是一个古典的技术,但是,在激光出现以前,干涉技术更完善的应用尚不够普遍。整个的干涉术包括着两束光(最低限度)之间干涉的观察,除非一束光对另一束相干,不可能产生干涉。这种干涉在一定条件下可以用一个非相干性的光源(如用白炽灯作光源)来获得,其中的一个条件就是分离光束必须路程相等。实际上,它是一个强有力的限制条件,同时又严格地规定了可以利用的干涉仪的型式。然而,在激光器中,有一个高度相干的强光光源,并且整个的各种干涉仪的型式都可变成实际应用的了。

理 论

不同种类的干涉仪,最方便和最初步的分类方法就是分为双光束干涉和多光束干涉装置。在所有情况下,一束光为参考光,另

一束或多束光就是测量光束,两者产生干涉。这一点很容易用迈克尔逊(Michelson)干涉仪来说明(如图1所示)。它们由平面波(很容易由激光产生)来照明的;光束分离器将光分解成两个光束每个镜子一束,这些光束被反射,同时在输出光路中被光束分离器重新合起来,这时可以观察到干涉图样。

由两种方式可以产生干涉。假如把反射镜 M_2 从严格的入射波前平行的位置稍微倾斜一下,则在输出部份上的两个波对于另一个来说就倾斜了,如图1中用虚线表示的部份,这样就产生了一组干涉条纹。无论在什么地方波前的分开等于波长的整数倍时,这两束光的振幅就迭加,无论在什么地方,当分开的距离等于波长一半的奇数倍数时就破坏了干涉。同时两个光束相消。暗的条纹描绘产生相消地方的等值线。假如有一个反射镜具有偏离平面的微小偏差,那么它们将以变形的条纹形式显示出来。

假如这两个反射镜是平行于进入波前,那么在整个输出光束中干涉条件是相等的,无论它是干涉迭加还是干涉相消或者是中间状态,都取决于两光束之间程差。当其中的一个反射镜垂直于波前移动时,输出光束就可以变亮或者变暗。更重要的是,假如一个反射镜产生振动(例如由一个压电元件驱动),那么输出光束在振动频率上被调制。如前所述,反射镜离开平面很小的偏差,就会在特定的区域中以偏离平均干涉条件的方式显示出来。这类调制是交流(AC)干涉技术的基础。

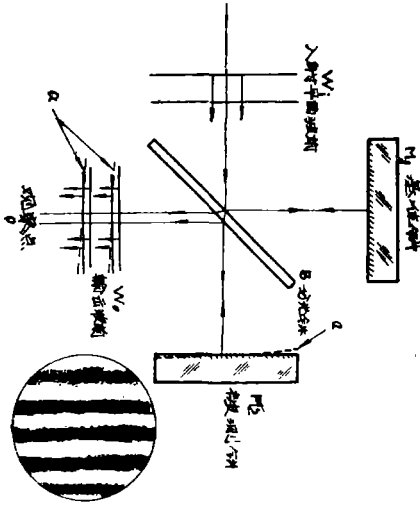


图1 迈克尔逊干涉仪

(a) 虚线所示，当反射镜 M_2 轻微倾斜的情况下，在输出波前之间就产生一个楔并且提供一个直平行条纹

迈克尔逊 (Michelson) 干涉仪一种双光束式仪器。当我们从形成干涉迭加到干涉相消的条件下进行操作时，不管在那种应用的方法中，输出光的强度分布总是正弦形的。虽然胶片的乳胶特性妨碍了真实轮廓的再现，图2却表示了一个典型的实例。



图2 两束光干涉所显示出的正弦强度分布

在多光束条纹的情况下，情况是不相同的，最好的说明这种型式的干涉仪是平行平板(如图3)。为了简化图形，我们采用了一条光线取代波前。然而，一个平面波前是被假定的。多次反射在平板内产生，同时可以很容易设想，即使当进入波前平行于平板时，

这点也是很正确的。当这个平板厚度是在直接透过的波前和另一个两次反射的平面波之间不同光路中产生的光程差为波长的整数倍时，将产生干涉迭加，这些对于连续两次反射的波前同样也适宜。对于一种特定的平板厚度，整个的两次反射光束同另一束构成干涉迭加而产生一个亮的透过光束。整个奇次反射的光束返回并和自第一面反射的光束产生干涉抵消。其振幅大小是由平板的两个表面的反射率来决定的。有一个有趣的也许是意外的结果就是：当反射率足够高的时候，整个平面(对临界厚度)的纯透过接近于100%。对一个任意厚度的平面来说，有一个入射角，其临界光学厚度应满足。

一个重要的事实就是干涉条件对临界厚度是非常灵敏的。这样，当产生干涉条纹(如由平板中的一个小楔所产生)，这个干涉条纹的剖面图形如图3中的插图表示。干涉条纹的半宽和条纹的间距之比叫做“精细度”(两个光束干涉时可以说是精细度为4)，它决定于干涉条纹分开的光束的数目，它是随着反射率增加而增加的。图4所示，当反射率作到实际可能达到的极限时，多光束条纹能作到的情况。

当两个光束干涉时，干涉条纹的产生是由倾斜的干涉波前或改变光程长所致，例如由一个振动的反射平板就为交流的干涉仪提供了必要的条件。在多光束干涉条纹的条件下，若探测器的输出是由一个干涉仪的调制光束完成的，则这个输出如同一个取代正弦波的脉冲系列一样。

干 涉 仪

在此以前，人们已经采用了许多型式的干涉仪器和方法进行了试验，其中只有少数几种成为目前常用的测试仪器。目前阶段差不多所有的测量都采用如下所述的四种型式的仪器：一种是一个紧凑的装置在车间里研制，被称之为等光程的干涉仪(EPI)，

另一种是散射板干涉仪，第三种是斐索 (Fizeau) 干涉仪检验平面用的、第四种

是球面波多光束的干涉仪 (SWIM)。它们每个基本部件和实例分别介绍如下：

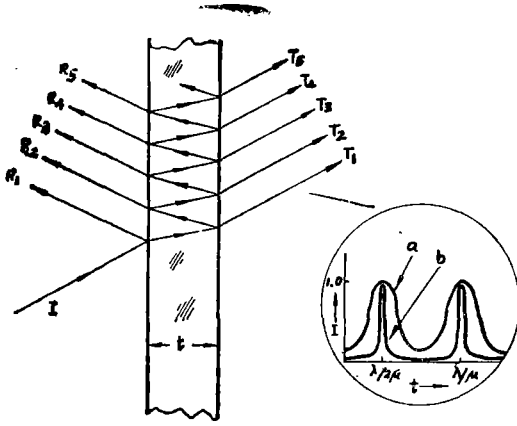


图3 平面干涉板

入射的波前 I (以一束光入射) 在平板中引起多路反射。传导的光束为波前 $T_2, T_2 \dots T_n$ 的迭加, 而反射光束则为波前 $R_1, R_2 \dots R_n$ 的迭加。传导光束的强度分布为平板厚度 (t) 的函数, 如插图所示, 通常的入射反射率为 0.5 (a) 和 0.9 (b)。

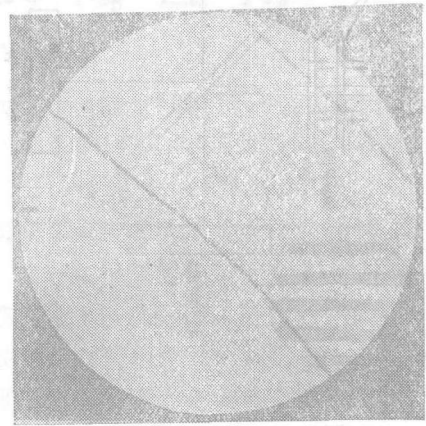


图4 多光束干涉条纹

由于在干涉内腔振荡器中反射率很高 (98.5%), 导致非常精细 (300) 和非常尖锐的条纹。

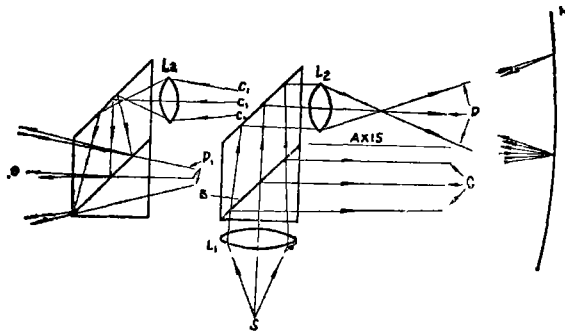


图5 布拉贝尔等光程干涉仪 (PEI)

B: 分光镜 (由一个主体的玻璃组件组成) L_1 透镜使输出光在被检物体中央处聚焦 L_2 透镜: 它提供了一个准确的焦点照明了被检件的窗口。C: 会聚光 (通过透镜 L_2 折回) D: 发散光 (通过对边折回, 使两束相等的发射光在 O 处干涉) S: 光源, M: 被检物体。

等距干涉仪 (EPI)

这种干涉仪是常用的仪器之一, 因为它使用起来方便伶俐 (其原理如图 5 所示)。

这种仪器的具体结构已由美国佩肯·爱尔曼公司根据布洛的设计原理进行研制的, 它说明是一种径向剪切干涉仪的极限情况

(如同散射板那样)。这项技术本来是五十年前柯斯特·泰尔开始的。许多横向剪切干涉仪^[2-9], 几种径向形式和旋转形式的已有文献报导。其中第一个称为等光程干涉仪的是根据杜肖 (Dyson) 的原理制成的, 其光束分离是以偏振方式进行的。

图 6 表示直径为 12 吋的抛物面反射镜式等光程干涉仪所得到的干涉图形。图 7 为对

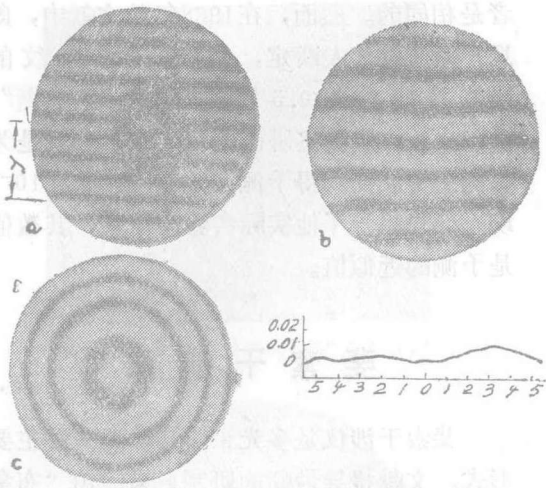


图6 一个直径为15吋的球面反射镜用等距干涉仪(EPI)被测出的干涉条纹

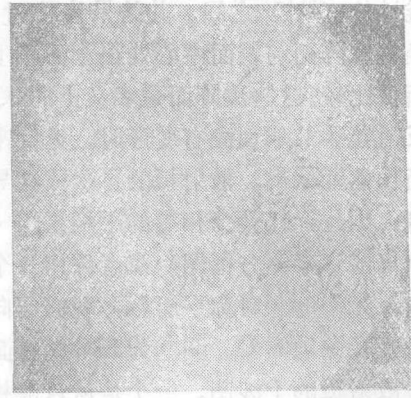


图7 一个精磨后的铍反射镜的干涉图形

一个精磨光的铍反射镜采用氦镭激光为光源的干涉图形，采用这种光源的目的是为了获得足够的能量进行合适地曝光。

散射板干涉仪

散射板干涉仪，最初是由布鲁赫介绍的⁽¹⁷⁾。人们在制造散射板的同时，直接利用了这种仪器研制了直径为36吋 Stratoscop^t II型望远镜的反射镜，这样，由于在干涉仪中采用了散射板技术，使其成为常用的工具

之一。

这种散射板式干涉仪是非常简单的一种仪器（如图8所示），光进入散射板后被分离出两个部分：一个是直接透过，在实验中它把光源成像在反射镜的中心部位上，同时又将这个象反射到散射板上，另一个就是散射部分，这部分充满反射镜的孔径，并且由此在散射板上得到一个返回的像。在实验中这种散射板是安装在曲率中心上。每个返回的光束又分离成两个部分：一个是透射，另一个是散射。被观察到的干涉是产生于先直接透

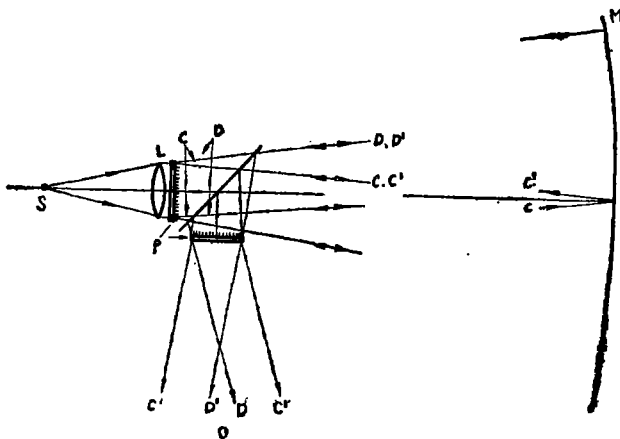


图8 散射板干涉仪

S: 光源 P: 散射板 C: 传输光束 D: 散射光束

过而后散射的光束 (C') 和第一次散射而后透过的 (D') 之间。其结果为通过整个孔径的波阵面与表面中心处很小面积上的采样面被比较。这些波阵面是名义上的球形, 如果反射镜为非球面或有变形时, 返回来的波阵面由此而偏离。散射板的再次成像导致像颠倒; 因此, 任两个相等的平板采用一个光束分离器 (参阅方框图) 或者采用一个对轴上输入光束的双对称平面板, 观察方向和入射光有轻微地倾斜。图 9 为 36 吋抛物面镜的两个散射板的干涉图。一个是自准直检验板产生的另一个是从球心产生的。

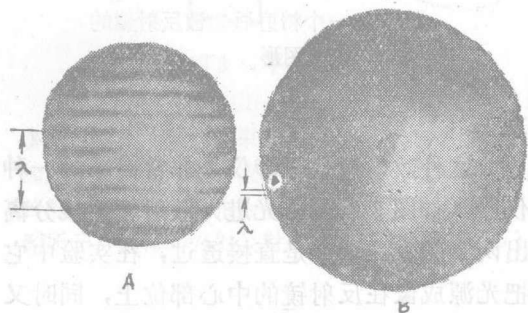


图 9 36 吋抛物镜的两个散射板的干涉图 (最终可获得 $1/50\lambda$ 的有效值)

- A: 来自于被检平面的自准直干涉
- B: 在中心式曲率上直接干涉

多光束干涉仪

多光束干涉是由陶兰斯库在检验平面元件的工作中被发展并做出了突出贡献。随着激光的出现, 多光束干涉技术已成为一项很有前途和广泛应用的技术。考裴尔曼的最新文献里报导了这个方面的新技术^[19]。干涉条纹的锐度是由多光束装置产生的。典型的如图 4 所示。这种装置可以目视检验, 甚至又可直接在干涉图形上测量, 因此, 采用多光束干涉条纹比采用双光束正弦波分布的技术很容易获得高的精度。然而, 在采用光电测量设备时, 尤其是在调制干涉条纹的情况下 (交流干涉), 它就变为虚构的了 (illusory)。的确, 这里有个很强的理论问题, 大体上是在理想的条件下, 误差精度两

者是相同的。然而, 在 1968 年的文献中, 郎恩·斯考特等人断定, 多光束干涉条纹的误差精度约为 0.5 埃, 而在“胡柴斯” (Hughes) 实验室研制的双光束干涉仪是为探测引力波而获得予测误差精度约为 10^{-6} 埃。郎恩报导了他实际实验的结果, 其数值是予测的近似值。

斐索干涉仪

斐索干涉仪是多光束干涉仪的一种主要形式。文献报导最新的研制成果已由“布拿盖尔” (Bunnagel) 发表。美国佩肯·爱尔兰公司已经建造了一个口径为 30 吋的斐索干涉仪 (见图 10), 这种仪器可广泛地用来测量大

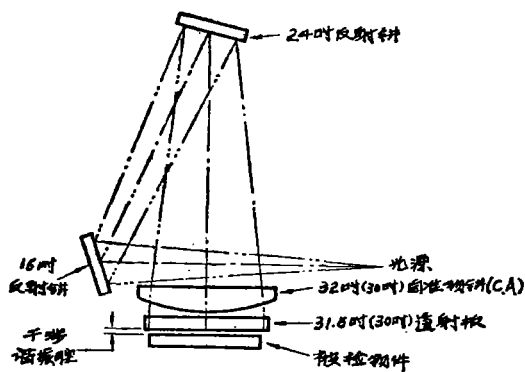


图 10 30 吋斐索 (Fizeau) 干涉仪

型的平面元件的。一个显著的特点就是参考平面和被测面在空气防震垫上浮动并装在抽空的干涉腔中的环形管子上面。图 11 和 12 表示出这种仪器的使用结果。图 11 为一个直径为 30 吋的大平面。图 12 所示, 是为了研究一个镀膜的变质情况而采用斐索干涉仪进行检验膜层平面的结果。图 4 是前面发表过的直径为 2 吋的平板用一个斐索式的干涉仪进行检验的结果, 它是利用高反射率的平板, 从而得到了精度为 300 的结果。

法布里·珀罗干涉仪

这种类型的仪器是由法布里 (Fabry) 和

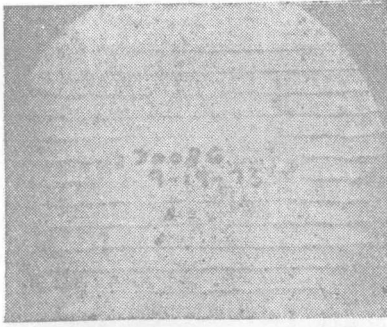


图11 一个直径为30吋的斐索干涉仪

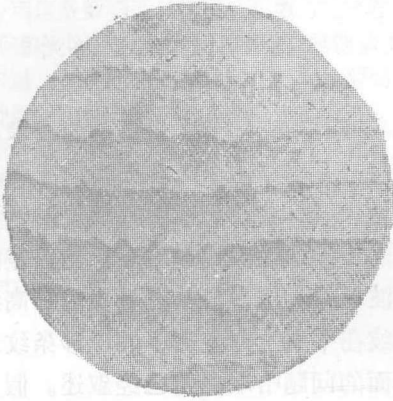


图12 斐索干涉仪所显示出的膜层变质的效果

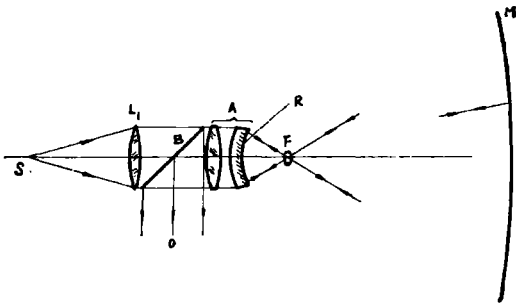


图13 球面波多光束干涉仪

S:光源 L₁:准直镜 B:分光镜 A:消
球差镜组 F:场镜 M:被检验件

珀罗(Perot)发明的,它是以平面平行板(图3)和一个谐振腔为基础而构成的,谐振腔的概念是产生激光的基础。一个光学谐振腔的经典讨论包括末端反射镜所采用的各种形式^{[26][27,28,29,30]}。更实际的干涉仪是由赫端奥特所介绍,这种仪器是最实用的一种,人们称之为球面波多光束干涉仪(SWIM)(见图13)。这种仪器有一个谐振腔,谐振腔的末端的反射镜为一个被测的光学元件,还有一

个球面内反射镜。这类仪器已由哈依特兹等人报导了^[34]。

图14至17为采用球面波多光束的干涉仪(SWIM)试验而获得的干涉图形。图14为一个典型的高质量球面反射镜。图15表示一个激光器强双重模(double-moding)的结果。图16表示干涉条纹的离散,这种情况是去掉场镜的情况下发生的。然而,在没有场镜的情况下,它可以尽量减小(如图14)。图17为一个直径为16吋、相对孔径为0.7的铍抛物镜的干涉条纹图。球面波多光束干涉仪(SWIM)最简单的一种形式就是图18所示的SWIM II的。图19为采用这种干涉仪所得到的干涉条纹。

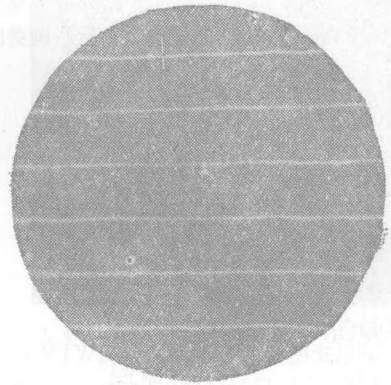


图14 球面波多光束干涉仪(SWIM)球面反射镜的干涉图形

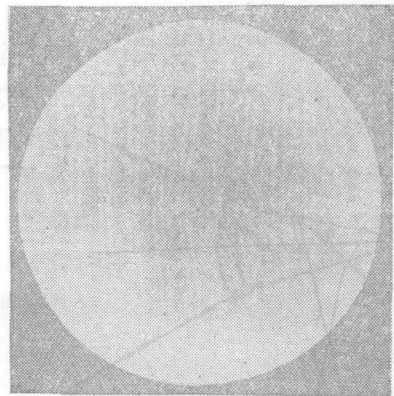


图15 以激光为光源的球面波多光束干涉仪(SWIM)所显示出来的双重模的效应

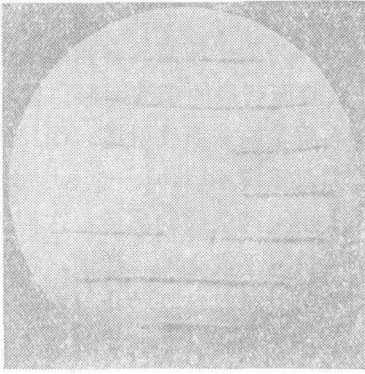


图16 干涉条纹的强光离散效果

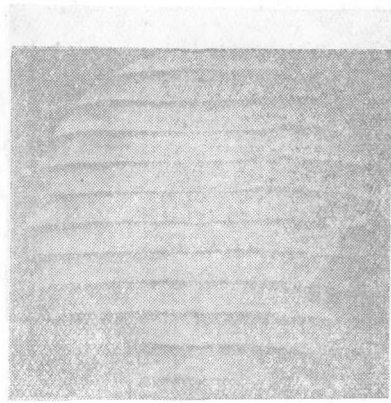


图19 SWIM II型球面波多光束干涉仪的干涉图形

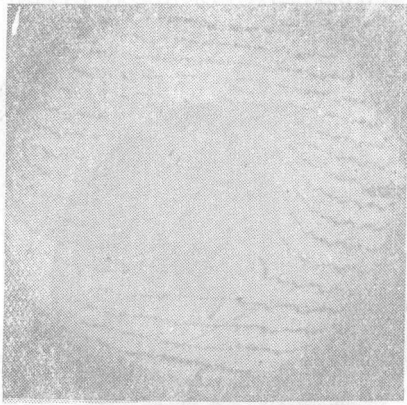


图17 采用球面波多光干涉仪 (SWIM) 对 $f/0.7$ 的物镜显示出来的干涉条纹

- S: 光源
- A:
- B: 分光镜
- R:
- M: 被测元件

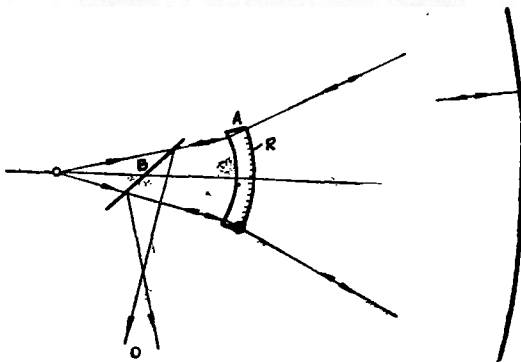


图18 SWIM II型球面波多光束干涉仪的原理图

在多波干涉技术中对特别的技术，多光束干涉可以采用两个或者更多的波长。干涉条纹的间隔与波长成正比，因此，两个不同颜色的干涉条纹的间隔对应于光程差的变化等于波长差。这样，具有更少的等高线间隔的条纹在平面上产生更多的干涉条纹。关于这方面的问题哈瑞奥特已经叙述。假如测量光束在与参考光束干涉之前多次通过被检测的元件，我们就可以得到多重光路的干涉。详细的技术已由哈拉芬、兰根伯克、布比斯、杜包索特和洛斯特专作过介绍。由于被测物体偏差引起的干涉条纹移动被放大，从而增加了条纹的灵敏度。实际上单次通过的情况下，假如有足够大的信噪比的话，多次通过的干涉并不提高精度。

数 据 分 析

目前干涉仪的数据分析方法，有的用照像的方法记录干涉条纹，有的采用一个测量仪器进行描绘，还有的采用光学方法扫描干涉条纹并以数字化形式输入到计算机，以产生一个表面等高图形、波前统计或者是一个光学传递函数。这种扫描可以用一个简单的快速扫描形式或者用干涉条纹的追迹装置。干涉仪扫描干涉图形也是有效的，这时干涉仪内部直接对空间的干涉条纹进行扫描，它

(下转第51页)

IX 结 论

实时数字干涉图形测量装置已应用于泰曼-格林干涉仪。这是具有 $\lambda/100$ 精度的把透镜表面图形快速地按1:1作图显示并误差决定于干涉仪的光学零件误差的干涉仪。应特别指出它的输出形式对光学车间技术人员来说应用最方便。我们自己学学车间人员的实验表明,这是制造精密光学零件的最有价值的必需的工具。没有给技工遗留什么问题,比如抛光冲程的微小改变效果或如何快速地移去材料等问题。不用接触即可获得几ppm的半径测量;设计者可以选择现有样板以外的任意表面曲率。

用一小型计算机控制干涉仪允许使用者

对复杂系统正确地定向并且使用非常灵活。这个软件灵活性改进了数据显示和键控操作,它不能活地作任何事情,但实时系统却能达到。

它用光瞳中光程差图解形式以及点扩散函数或调到和位相传递函数形式输出,检验透镜各视场位置的测量结果。也可显示与同样光瞳边界的衍射极限性能镜头的偏差。

它的高灵敏度和实时数据显示已证明在制造衍射极限光学系统和检验中这是必不可少的工具。进一步说,这是第一次为光学技术人员提供有可能直接反馈实现他要实际做的事情。

译自 "App"lied Optics

Vol.13 No.11, P2693—2704

1974.

(上接第39页)

不仅避免了照像处理工作、同时也消除了这种处理所带来的许多误差。

未 来 的 趋 势

十年期间干涉技术的发展、已经在向使用方便和可靠性好的方向发展着,并在光学制造和装校中获得了很高的精度。然而,将来的发展动向又是怎样呢?

无疑地将要研制很多的新型的干涉仪,其中包括比目前现有的干涉仪更为方便的设备。有兴趣的是最新研制的激光全息衍射光栅很可能要大大促进干涉仪的发展,在这里由光栅产生两个所要求的光束,而且它又

是采用一个非相干的扩展光源。作为一个复杂的光学仪器的永久性组合,如望远镜之类,在不利的外界条件下自动保持其性能是有实际意义的。至少在原理上对光学车间有意义的干涉仪器是能控制一个抛光的半成品阶段的光学元件,使其获得干涉条纹,并且可在计算机上对所得的条纹进行分析。同时还可改进各种抛光零件的控制技术,以校正图形,无需操作者人为的干预。然而,应用这些技术概念全部变成实际应用的装备,那将是今后逐步发展的事情。

译自«Optical Engineering»

Vol.14. No.2. p.124—129,1975.

(王厉译,韩昌元校)