

全息照相 在精密测量中的应用 译文集

沈阳仪器仪表研究所编译小组译

机 械 工 业 出 版 社



71.673
238

全息照相在精密测量中的应用

译 文 集

沈阳仪器仪表研究所编译小组译

36506/15

机械工业出版社

本书介绍了全息照相术的基本原理，全息照相在工业上特别是在干涉测量及在仪器仪表元件测试中的应用。

本书可供从事计量工作及无损检验工作的人员参考。

全息照相在精密测量中的应用

译文集

沈阳仪器仪表研究所编译小组译

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $3\frac{5}{8}$ ·字数 77 千字

1974年11月北京第一版·1974年11月北京第一次印刷

印数 0,001—7,300·定价 0.31 元

*

统一书号: 15033·4244

前 言

全息照相是六十年代发展起来的一种新的照相技术。这种照相技术，最近几年在精密测量、无损检验及仪器仪表元件的制作方面得到了迅速发展和广泛应用。全息照相的特点是能够查知部件的表面层和内部缺陷的立体情况，使人们更准确地判断部件的质量。

为了适应我国激光应用技术和仪器制造工业发展的需要，遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，我们编译了这本译文集。文中介绍了全息照相的基本原理和在精密测量中的应用，重点是全息照相干涉测量技术在仪器仪表元件测试与检验中的应用。

由于我们水平有限，译文中难免有缺点和错误之处，欢迎读者批评指正。

译 者

1974年4月

31341

毛主席语录

独立自主，自力更生。

古为今用，洋为中用。

学习有两种态度。一种是教条主义的态度，不管我国情况，适用的不适用的一起搬来。这种态度不好。另一种态度，学习的时候用脑筋想一下，学那些和我国情况相适合的东西，即吸取对我们有益的经验，我们需要的是这样一种态度。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

毛主席语录

古为今用，洋为中用。

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

目 录

一、全息照相干涉测量的应用	1
1 全息照相术在工程计量中的应用	1
2 全息照相术与全息照相干涉测量技术在工业上的应用	14
3 全息照相术在测量中的应用	27
4 全息照相术是一种测量技术	44
二、全息照相术在光学元件检测中的应用	51
1 测试大块光学玻璃毛坯均匀度的全息照相干涉法	51
2 利用双波长全息照相术测试非球面	61
3 用于测试非球面光学元件的二进合成全息图	76
三、全息照相术在仪表元件测试中的应用	85
1 用全息照相干涉法检验膜片压力变送器	85
2 全息照相术在微型电路掩模制备中的应用	94
3 用全息照相术测量波登管的变形	100

一、全息照相干涉测量的应用

1 全息照相术在工程计量中的应用

〔英〕 A. E. 伊诺斯

全息照相是采用激光器的相干光源来照相的一种方法。其特点是可以记录物体的真实的三维图像，以使人们把工程部件的形状与发生变化后（即在负载时）的形状差异及时而迅速地比较出来。在某些情况下，还可用“标准”部件的全息图作为检验相同部件的高精度样板。

本文讨论了全息照相术、全息照相的效果和这种方法在现阶段的局限性等。

（一）导 言

全息照相这种方法，仅从发明激光器之后才得到了广泛的发展。因为激光器为它提供了必须的高强度的相干光源，所以，从1962年以来，全息照相术在其各种应用中，得到了更迅速的发展。这种照相方法和机械工程之间似乎是毫不相关的，但实践表明，它可把光学干涉术的高精密测量法，扩大到不同形状和表面光洁度不同的物体，而在过去，它只能测量光滑的光学表面。为了评价这一特点，有必要首先了解全息照相的过程。

(二) 全息照相过程

假设我们想记录一个夹有黄铜管的四爪卡盘的全息图像(图 1 a), 为此目的, 用激光束照射物体, 并用透镜把光束适当地扩大, 使之照射全场。此光束从物体表面散射开来, 而另一部分光束则照射到底板上。这样, 物体光束和参考光束互相干涉的结果, 便在空间形成一个干涉图形, 这种图形以二维条纹图形的形式被记录在底板上。经过这一照相过程的底板就是全息图。全息图上的图形与普通透镜所形成的物的

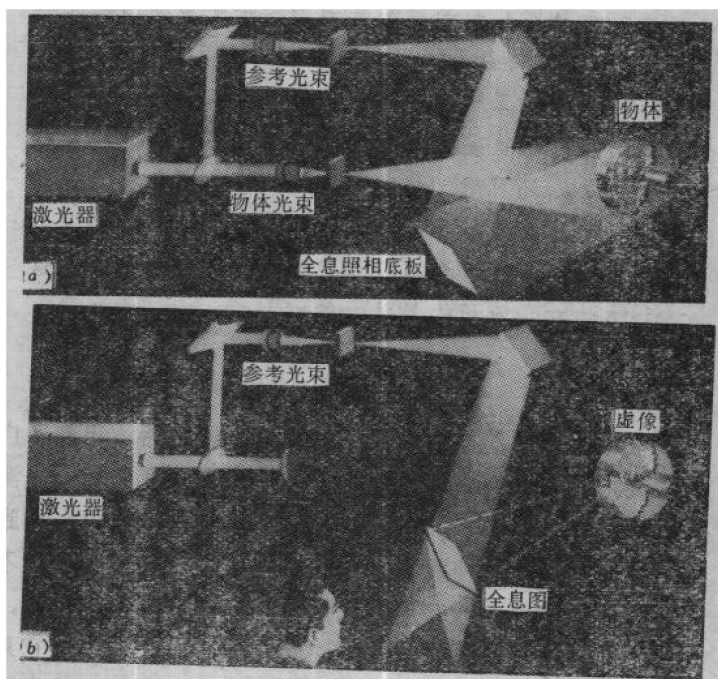


图 1

a—全息图的记录过程; b—全息图上物像的再现

像是不一样的。

为了再现图像，如图1 b 所示，只需用参考光束来照射全息图即可。当参考光束直接透射底板并衰减时，有一部分光束从透射光束的两侧进行衍射，其中一部分衍射光束可看作是来自物体的原来的散射光，实际上，可把它看作再现的“信号”光束。这样，如果人们观察全息图底板时，就好像看玻璃窗似的，在其原来的位置上就能看到物像。在再现图像上会出现具有全部视差效应和立体效应的三维物体的图像，就好像物体真正在那里一样。图像形成过程与普通透镜成像完全不同，它能产生与物体完全相同的三维图像，是记录阶段的干涉现象和再现阶段的衍射现象的综合。

由图中可看出用激光照射的必要性，这是因为参考光束到感光底板上的投射距离与物体光束的投射距离截然不同，当物体表面非常粗糙时，尤其是这样。为了获得能产生可见条纹图形的光学干涉现象，这就要求光束在等于这一光程差的长度内必须是相干的，就是说，实现辐射的各个波在波长范围内的扩展必须是极小的，只有这样这些光波在此距离内才能一致，而激光辐射或多或少能实现这种条件，例如，一个标准的商用氦-氖激光器的相干长度大于1呎。获得良好全息图图形的第二个条件，就是在曝光时干涉仪的组件（系统本身必须是一个真正的干涉仪）相互之间必须保持稳定性，移动误差要小于一个波长的零点几（约5微米），否则图形就要模糊不清。如果采用足够稳定的平台，并且安装是经过仔细设计的，则上述条件在几秒的时间内就可以实现。

所采用的照相乳剂的颗粒必须是极细的，这是因为精细的条纹间距是 λ/α 这个数量级，其中， α 是参考光束和物体光束之间的夹角。按标准来说，对分辨率的要求是每厘米

1000线对，当然，这样的感光底板是相当慢的了。

（三）全息图干涉术

假设记录四爪卡盘的全息图，经过加工以后，仍把它精确地放到原来的位置上，同时把物体也仍旧放回原处。如果物体的位置没有移动的话，则在激光器照射下观看全息图底板时，人们便会看到卡盘的再现图像与卡盘本身精确地叠加在一起了。因为全息图再现像是一个完整的三维图像，它与物体的轮廓完全一致。看到的再现图像和物体的清晰度则直接取决于用来观察的光学系统的分辨能力，也就是人眼或某一光学仪器的分辨力。

假设物体的形状发生了微小的变化（夹紧卡盘的其中一个爪，从而使其所卡住的铜管产生变形），则当把两个形状稍微不同的图形叠加在一起时，便在两个图形之间产生点与点间的干涉效应。如图 2 所示，条纹的图形包含着物体的表面形状。当进一步变形时，这些条纹就要有所增加，而当物体恢复到原来的形状并假设整个卡盘装置的位置保持不变时，这些条纹就要消失。基于这种理由，把这些条纹称为“活”条纹。用来对已经产生的变形进行永久性记录的 第二种技

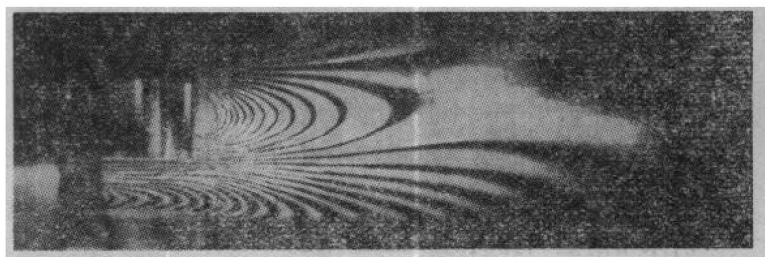


图 2 夹有黄铜管的卡盘由于夹紧卡爪
而产生变形后的干涉条纹图

术,就是记录两次曝光全息图。第一次曝光(普通曝光时间的一半)是当物体在其原来位置上时进行的,第二次曝光是产生变形后进行的。这样,全息图就会再现出互相叠加的两个图像,也就是说变形的干涉条纹图形“加入”了此图像之中。这种图形一般称之为“冻结条纹”图形^[1]。

由此可以看出,全息照相技术提供了一种极其灵敏的表面位移的无接触测试法,因此可用它来分析工程结构在施加负载时的变形图。因为它是检验实际物体的,而不是检验模型的,所以当组成工程结构的各种材料是重要的因素时,便具有极大的价值。与此相反,应力分析的光弹性法,则取决于所构成的透明模型,为此而采用的塑料的弹性特性,可能与实物本身的弹性特性完全不同。对工程结构的表面的要求并不严格,只要它能反射足够的光来记录图像,则干涉条纹的图形就能可见,它们的轮廓与表面的详细形状无关。这种图形指出了在整个表面上两点间产生的相应变形的信息,这是与许多普通采用的探测法不同的,因为普通探测法只指出分离位置的量值。

关于用全息干涉图来测量由于机械负载、热膨胀而产生的变形以及由于水蒸气等的吸收现象而引起的变化的应用是很多的。如用这种技术可以测量热电冷却微型组件在运行中的状态^[2],根据组件的设计,每个热元件是与相邻组件相连的,如当全部或任一个组件变形时,整个结构也产生变形。有人论述了当对真空容器施加压力或施加局部热量时,如何测定其真空容器变形的情况^[3];论述了钢结构产生机械变形时的干涉条纹^[4]及用普通技术所不能测量的运动状况是如何测量的(如透明真空容器的内部运动等);论述了一块粗糙的木板在受潮时的膨胀情况的测量^[5]。当再现两次曝光全

息图（在受潮前后各曝光一次）时，则会在其再现图像上，看到一组能指示出表面膨胀情况的交界面环状条纹。此外，还有人指出把这种技术用于测定材料的长期蠕变特性的情况，如塑料材料在经长期局部变形后的恢复状况^[6]。

能在微观的粗糙表面实现高灵敏度测量的重要因素，就是当整个结构的基本形状产生微量变化时，表面结构本身不应有任何变化。因此，当表面结构发生变化时，不能采用这种技术，例如化学作用就是如此。这就使其在高温蠕变的研究中暂时得不到应用，因为在这个过程中要形成氧化物薄膜。

（四）干涉图形的解析

首先，测量灵敏度为光的波长或大约为半微米这个数量级意味着，在进行实验应力分析时，只有轻负载是必要的。实际上，有很多理由可以说明测量大型变型是不可能的，因为那样要得到极多的条纹。另外，干涉条纹图形并不能全部地指示出每个点的量值和方向，参看图 3 后便可得到很好的说明。此图示出了粗表

面的截面图，它产生了局部变形，即 P 点移至 P' 点，在任意方向上移动的距离为 d 。从 OP 方向向表面照射入射光（或当变形后从 $O'P'$ 方向照射入射光），然后从 PQ （或 $P'Q'$ ）方

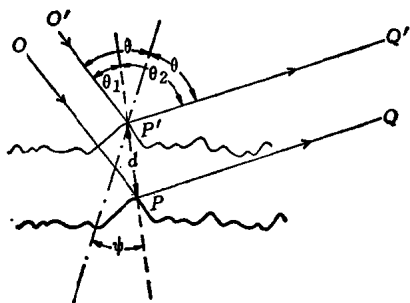


图 3 干涉条纹形成过程的几何图形

向观看。结果表明，在全息图干涉测量技术中，条纹图形主要是由沿 OPQ 和 $O'P'Q'$ 方向传播的光与相似的射线对之

间的干涉而产生的。设路径差为 Δ ，则

$$\Delta = d (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (1)$$

式中 θ_1 和 θ_2 为角 OPP' 和 QPP' 。

这也可以用另外的方法解析。如果角 $O'P'Q'$ 的二等分线与 PP' 的夹角为 ψ ，且 θ 为二等分角，则由方程式 (1) 可得

$$\begin{aligned} \Delta &= 2d \cos \frac{\theta_2 + \theta_1}{2} \cos \frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \\ &= 2d \cos \theta \cos \psi \end{aligned} \quad (2)$$

$d \cos \psi$ 是按二等分线方向移动 PP' 距离的分解部分。由此可知，从表面的任何位移而产生的光程差，与按从照射方向和观察方向的二等分方向位移的分解部分而得到的光程差是相同的。光程差与条纹数 N 、波长 λ 有关，因此，

$$\Delta = N\lambda \quad (3)$$

这样， $d \cos \theta \cos \psi = N(\lambda/2)$ (4)

如果照射光束和观察光束都与表面几乎垂直时，则 $\theta = 0$ ，便可认为条纹图形是位移的分解部分的等值线图，等值线以 $\lambda/2$ 的间隔排列。因为照明和观察表面的最普通的方法，就是采用接近垂直式的入射，所以人们看到的干涉图形与“之”字形的位移有关。例如，在图 2 中，条纹是由于表面的局部膨胀向着观察者的方向而摄制的。如果需要测定任何其他方向的位移，就有必要采取不同的照明和不同的观察方向。总之，为了完全解决位移的量值和方向问题，就要把几个全息图的结果结合起来测定，在这方面已经取得了一定的成果。例如计算某一平滑元件在强力作用下的应变，可通过测量两个不同方向记录的干涉图来进行^[7]。要发展条纹分解的方法，还要进行大量的工作。然而，在目前，上述方法

是复杂的，而且要得到成功是比较困难的。

(五) 工程检验的应用

由于全息图是物体形状的一个非常令人信服的标志，所以就吸引着人们考虑用全息图作为匹配被记录物体“拷贝”的样板。另外，这种测量可以达到干涉计量的精度，从而成为对机械加工部件进行工程检验的一种极其精确的方法。总的来说，这种方法是非常精确的，其简单的原因就是许多加工部件的表面光洁度是非常粗糙的，从干涉计量的角度要把两个“粗糙”的表面匹配在一起是不可能的。理论表明，只有在两个表面的光洁度为光的 $\frac{1}{4}$ 波长或更小 (≤ 5 微米) 时，才有可能得到一个部件的叠加表面和另一个部件的全息图像之间的可见干涉条纹图形。其中不包括许多机械加工和磨光表面的表面光洁度，但包括抛光的表面光洁度（当然，具有抛光光洁度的游标卡尺是经过干涉计量的）。然而，如果以大仰角的方向照明和观察表面时，就有可能使表面看起来是光滑的。如果光线以接近切线入射的形式照射的话，即使粗糙的表面也将象反射镜似的反射光线（即象一个反射镜），这种特性可用来对工程部件进行比较。如果入射角和观察角是 θ 的话，则测量的灵敏度就要降低 $\cos \theta$ 这样的数量级。例如，如果与切线成 6° 的方向入射，则 $\cos \theta \approx \frac{1}{10}$ ，那么每一个干涉条纹在形状上就要有 0.0001 吋的差。

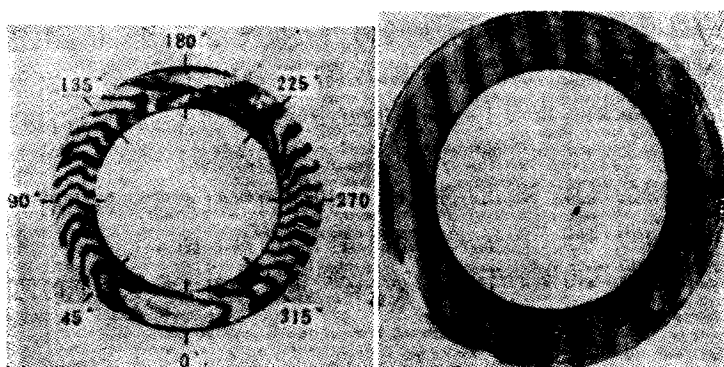
曾用这种原理比较过气缸的形状^[8]。首先，记录气缸内壁的全息图。记录是采用锥形透镜用准直的激光光束以固定的入射角照射气缸内壁获得的（首先将激光束适当地发散开，以便与这个透镜的孔径相适应）。来自原来发散了激光束的中心部分并从气缸壁反射回来的物体光束与参考光束一起会

聚在感光底板上，物体光束与参考光束之间的干涉便构成了全息图。然后，把加工过的全息图重新放到支架上，用参考光束照射时便形成气缸壁的虚像，当用透视收缩法观察时，就象一个环状面。用与上述相同的方法轻轻移动气缸，便可得到全息图像和实际气缸壁之间的“活”干涉条纹。如果是表面很光滑的气缸，则可用形状基本相似的气缸来代替原来的气缸，所得到的干涉条纹便能测出两者的差。图4 a示出了汽车气缸衬筒内壁的干涉条纹。这些条纹是由于形状相似的两个气缸匹配不严而产生的。

当然，在已知位置精确地放置两个气缸是非常重要的，因为这样才能成功地解释干涉条纹。在所采用的装置中，气缸（这里为汽车发动机的湿衬筒）固定在由可膨胀的气袋支撑的木支架上，并抬高到足够的高度，使内气缸壁与四个球头固定螺栓相接触。这四个螺栓与一个端部制动销一起实现轴向固定，从而构成了气缸的运动学的安装。然后用压力计来测量所施加的过量压力，以便防止固定螺栓松弛。在气缸的后部放置了锥形透镜，在其中心位置，放置一个小型的凹球面透镜，以便使中心参考光束发散。

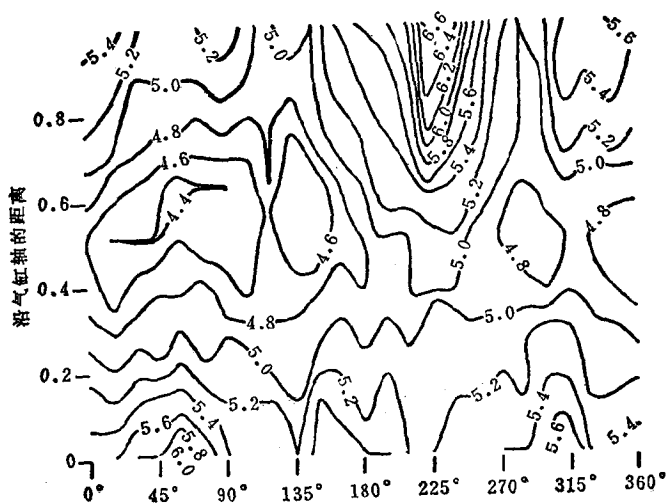
当以垂直光照射平面时，则条纹图形的解析就不是那么简单了。然而，由于气缸固定点必须限定在光程差为零的位置上，所以零级条纹要通过此点，因此，以一定的数量级来区分每个条纹并在气缸表面的各点记下气缸有效半径的差是可能的。然后再通过必要的计算，使一个完善的气缸与另一个气缸相适应，再在气缸壁的各点导出不相适应的值。这样，也就有可能画出这两个气缸半径的差的等值线，等值线的间隔为20微米（图4 b）。

一种测定被测气缸是否在特定的公差范围内的快速比较



a)

b)



b)

图 4