

干涉法表面形貌测量使用的 扩展深度测量范围的方法

周明宝

(中科院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室 成都 610209)

摘要 系统归纳了在干涉法表面形貌测量中使用的用来扩展深度测量范围的各种方法,分析了这些方法的原理、特性及性能指标,比较了这些方法的优越性。

关键词 干涉 表面形貌 测量

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

1 引言

在众多的表面形貌测量方法中,利用光波干涉的干涉型测量方法由于具有较高的测量精度和较好的空间分辨率并且由于是一种非接触测量而被广泛使用着。在通常情况下,干涉法是通过测量被测表面引起的位相来测量表面形貌的。由于光波振动的周期性,干涉光强中被位相调制的干涉项是被测位相的周期性函数,因此在一般情况下只能得到被测位相关于 π 的模。由于这个限制,被测位相的测量范围被限制在 π 范围内,与此对应的,表面形貌测量范围被限制在 $\lambda/2(n-1)$ (透射式测量)或 $\lambda/4$ (反射式测量)范围内。相移干涉法^[1]可将位相测量范围扩大一倍,相应地表面形貌深度测量范围也扩大了一倍,但深度测量范围仍然是相当狭窄的。

为了扩大深度测量范围,一系列方法被开发出来,如多波长法、白光干涉法。如果已知待测表面是连续光滑的或通过其它途径已经知道了待测表面形貌的大概范围,也可以通过间接的方法扩大深度测量范围。本文在实际工作的基础上,对扩展深度测量范围的各种方法进行系统的归纳、分析和比较,可为各种表面形貌测量系统的研制提供参考。下面分门别类地介绍这些方法。

2 多波长法

根据干涉理论,对于任意结构的表面,如果用波长为 λ 的光波进行测量,被测表面上任一点的深度 h 与测出的位相 φ 之间的关系为(对反射式测量)

$$2h = m\lambda + \frac{\lambda}{2\pi}\varphi \quad (1)$$

式中, m 是干涉条纹级次, φ 是测得的位相且 $\varphi \in [-\pi, \pi]$ 。

如果 h 较小,干涉级次 $m < 1$,那么可以直接用单波长测得的位相 φ 求出被测表面深度 h ;但是如果深度较大,干涉级次 m 等于或超过 1,那么就无法仅用单波长的测量结果确定真实的深度 h 。双波长或多波长测量方法的实质就是利用双波长或多波长测量结果的差异求出干涉级次 m ,从而得到被测点的真实深度,达到扩展深度测量范围的目的。

2.1 双波长测量方法

双波长测量法^[2-4]是由 J. C. Wyant 首先提出的,并被用于测量变形非球面。当采用干涉法测量非球面时,如果非球面曲率半径很大,干涉条纹将很密。当条纹密集到一定程度时,干涉条纹的测量变得非常困难甚至不可能。为减少干涉条纹,在非球面测量中,常采用 Null 镜头。由于 Null 镜昂贵且本身也需要测量,因此配备 Null 镜头测量非球面既麻烦又缺乏灵活性。

减少干涉条纹的另一个办法是使用波长较长的光源。波长增大,干涉条纹间距变大。但是使用长波测量时,测量光路调整困难,图像采集系统缺乏,更为遗憾的是长波不能用于透射测量,这大大限制了它的使用范围。

双波长测量法克服了长波测量的缺陷,它采用两个较短波长的测量结果间接有效地达到长波测量的效果。其基本思想是,首先采用波长为 λ_1 的光束(这通过更换照明系统中的滤光片来实现)进行测量,然后换用波长为 λ_2 的光束再测量一次,利用两次测量得到的 φ_1 和 φ_2 便可计算出被测表面的形貌,其计算公式为^[5]

$$h = \begin{cases} \frac{\lambda_{eq}}{2} \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} + \frac{\lambda_{eq}}{2} & \text{if } \varphi_2 - \varphi_1 \in [-2\pi, -\pi] \\ \frac{\lambda_{eq}}{2} \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} & \text{if } \varphi_2 - \varphi_1 \in [-\pi, \pi] \\ \frac{\lambda_{eq}}{2} \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} - \frac{\lambda_{eq}}{2} & \text{if } \varphi_2 - \varphi_1 \in [\pi, 2\pi] \end{cases} \quad (2)$$

式中, λ_{eq} 被称为等效波长,且 $\lambda_{eq} = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$ 。

如果在双波长测量中采用的双波长为 $\lambda_1 = 0.6\mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.5\mu\text{m}$,那么深度测量范围可以从单波长测量的 $0.3\mu\text{m}$ 或 $0.25\mu\text{m}$ 扩大到 $1.5\mu\text{m}$ 。

双波长测量方法虽扩大了深度测量范围,但不能提高测量精度。这是由于双波长测量在扩大测量范围的同时也放大了测量误差。幸运的是,这种放大的测量误差可通过用双波长测量结果校正单波长测量结果来减小,其思想是,将双波长测量结果 h 和单波长测量得到的位相 φ 代入(1)式算出干涉级数 m ,然后将 m 和 φ 再代入(1)式算出新的高度。由于计算新高度时使用的是单波长计算公式,测量误差没有放大,因此这个结果要较双波长测量结果精确。

可见,用双波长测量结果校正单波长测量结果,既扩大了深度测量范围,又保持了单波长测量的精度,从效果上看,提高了双波长测量方法的测量精度。

2.2 多波长测量方法

双波长测量方法扩大了深度测量范围,但是随着被测表面越来越深,等效波长要求越来越长。当等效波长很大时,由于误差放大效应,用双波长测量结果校正单波长测量结果将变得越来越困难。为了解决这个问题,可采用三波长或多波长测量方法^[6],其基本思想是,用单波长如 λ_a 、 λ_b 、 λ_c 的位相测量数据计算出相应于最长和最短等效波长 λ_{eq1} 、 λ_{eqs} 的位相数据,然后用这些数据相互校正各等效波长或单波长的测量结果。对于三波长测量方法, λ_a 、 λ_b 和 λ_c (设 $\lambda_a < \lambda_b < \lambda_c$) 较好的组合是使 $\lambda_{eq1}/\lambda_{eqs}$ 和 λ_{eqs}/λ_b 等于 3 或 4。数据校正分两步运行:首先用 λ_{eq1} 的测量结果校正 λ_{eqs} 的数据,再用 λ_{eqs} 的数据校正 λ_a 、 λ_b 或 λ_c 的测量结果。对于更多波长的测量,可采用更多的校正步骤。

2.3 可变倾斜因子法

使用显微镜倾斜因子扩展深度测量范围的思想建立在白光显微干涉的干涉条纹间距大于半波长这种倾斜效应的基础上。

在干涉仪中光波波长起着长度标准的作用。如果参加干涉的两束光波是平行的,一个干涉条纹对应的间距等于半个波长,但在干涉显微中,由于发生干涉的光波是会聚的,一个干涉条纹对应的间距已不再精确地等于半个波长,这就是所谓的倾斜效应^[7-8],其影响可等效为一个倾斜因子 OF 。为消除倾斜效应对测量的影响,数据处理光波波长 λ 应采用倾斜因子校正的有效波长 λ_{ff} 。 λ_{ff} 和 λ 之间的关系为

$$\lambda_{ff} = \lambda \cdot OF \quad (3)$$

倾斜因子 OF 是一个综合参数,与光源相干性、照明条件、显微物镜孔径以及被测面的状态等多种因素有关。对于一个实际存在的显微系统,可通过改变孔径光阑的口径来改变倾斜因子的大小,从而达到改变有效波长大小的目的。改变倾斜因子扩展深度测量范围的方法^[9]就是仿照双波长测量方法通过在两次测量之间改变显微物镜的倾斜因子达到双波长测量的效果。其高度计算公式为

$$h = \frac{\lambda_{eq}}{4\pi} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (4)$$

式中, φ_1 是第一次测出的位相,对应的倾斜因子为 OF_1 ; φ_2 是第二次测出的位相,对应的倾斜因子为 OF_2 ; λ_{eq} 是等效波长,由两次测量的有效波长 λ_{ff1} 、 λ_{ff2} 决定,且

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_{ff1} \cdot \lambda_{ff2}}{\lambda_{ff1} - \lambda_{ff2}} = \lambda \cdot \frac{OF_1 \cdot OF_2}{OF_1 - OF_2} \quad (5)$$

可以看出,可变倾斜因子法等效于双波长测量法:双波长测量法的两个波长是实际存在的;可变倾斜因子法的两个波长是通过改变倾斜因子模拟得到的。但这两种方法的测量过程及数据处理方法几乎是一样的。

3 白光干涉法

在白光干涉中,光谱中各色光都有可能参加干涉,并将干涉光强叠加到最后形成的干涉图

像上,因此在表面形貌测量中白光干涉形成的干涉条纹是由各色光干涉图像叠加形成的。被测表面的深度不同,两束光的干涉光强不同,干涉条纹的对比度不同,组成干涉条纹的光谱成分也不同。可见,在白光干涉表面形貌测量中,被测表面的深度信息被编码到干涉图像的强度、对比度及光谱成分等信息中,因此可利用干涉图像的强度、对比度以及光谱成分信息扩展深度测量范围。

3.1 干涉条纹扫描法

干涉条纹扫描法^[10]扩展深度测量范围的理论根据是被测表面上各点深度不同所形成的干涉光强不同。在双光束干涉显微镜中,如果从分束器到被测表面上某一点的距离等于从分束器到参考面的距离,那么对应的两束干涉光的光程差为0,所形成的干涉光强最小(或最大)。如果用压电陶瓷等微位移驱动器沿光轴方向移动样品台或参考镜进行扫描,那么干涉图像上每一点的强度将随着变化,如图1所示。

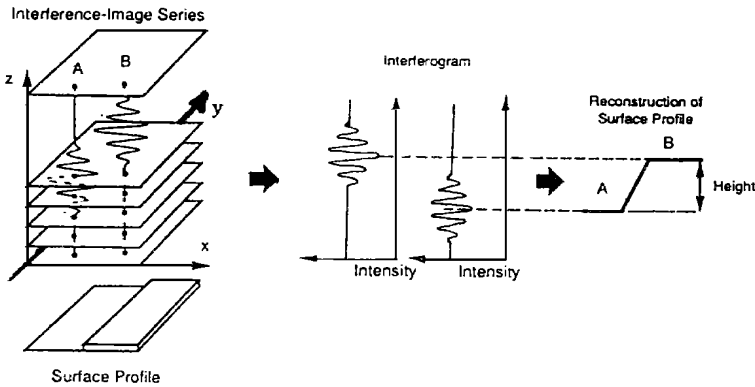


Fig. 1 A series of white light interference images of a surface detected by a double beam interference microscope, and the interferogram at two selected points A and B in the image plane

在扫描时,如果记录下或计算出被测面上每一点对应的干涉光强达到最小(或最大)时微位移驱动器的位置,那么在完成扫描后整个被测区域的表面形貌就能计算出来。在图中,A,B两点的高度差就是两点对应的干涉光强依次达到最大值期间微位移驱动器移动的距离。

对于一个具体的干涉显微系统,用干涉条纹扫描法测量形貌,其深度测量范围与干涉光频谱成分有关,大小与干涉长度的一半相当;深度测量分辨率与干涉图像测量系统的分辨率有关,取决于A/D转换器的位数,可达纳米量级;而测量精度则取决于微位移驱动器。恰当的数据处理方法也可以提高分辨率以及测量精度。

3.2 干涉条纹对比度法

在白光干涉中,两束相干光形成的干涉光强可表达成一般的形式

$$I = R + S + 2\sqrt{R \cdot S} \cdot m(\varphi) \cos \varphi \quad (6)$$

式中,R和S是两束相干光的光强, φ 是与被测表面深度有关的位相; m 可看作是对比度,它与位相 φ 及干涉光频谱成分有关。

如果干涉图像没有剪切并且干涉光频谱曲线是平滑的,那么 m 与位相之间或与被测表面深度之间存在着——对应的关系。当分束器到被测表面上某一点的距离等于分束器到参考面的距离时, m 值最大且近似等于1;当距离之差超过干涉光相干长度时, m 值最小,等于0。

图 2 显示了干涉光强及条纹对比度 m 与位相之间的关系。如果参加干涉的光束是宽带的且功率密度呈高斯分布, 那么对比度 m 与位相之间的关系曲线也呈高斯分布。

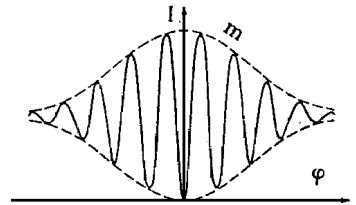


Fig. 2 Relation between the interference intensity or fringe contrast and the measured phase

由于在一定条件下条纹对比度 m 与被测表面深度之间存在着——对应的关系, 因此如果通过某种方法测出 m , 便可测出被测表面的形貌。90° 相移法^[11] 便是其中一种典型的测量方法。其原理是, 首先测出一幅干涉图像, 然后相移 90°, 测出另一幅干涉图像, 从干涉图像中去掉直流成分量, 算出 $m(\varphi) \cos \varphi$ 和 $m(\varphi + \pi/2) \sin \varphi$, 再根据 $m(\varphi) \cos \varphi$ 和 $m(\varphi + \pi/2) \sin \varphi$ 与位相的关系求出被测表面的形貌。

$m(\varphi) \cos \varphi$ 和 $m(\varphi + \pi/2) \sin \varphi$ 与位相的关系如图 3 所示, 如果将 $m(\varphi) \cos \varphi$ 和 $m(\varphi + \pi/2) \sin \varphi$ 看作是笛卡尔坐标系中的 x 和 y 坐标, 那么由 $m(\varphi) \cos \varphi$ 和 $m(\varphi + \pi/2) \sin \varphi$ 确定的点与位相是一一对应的。如果测出 $m(\varphi) \cos \varphi$ 和 $m(\varphi + \pi/2) \sin \varphi$, 就可以间接地得到被测表面的形貌。对于一个特定的测量系统, 计算所需的图 3 所示的螺旋状曲线是通过计算或定标测量得到的。

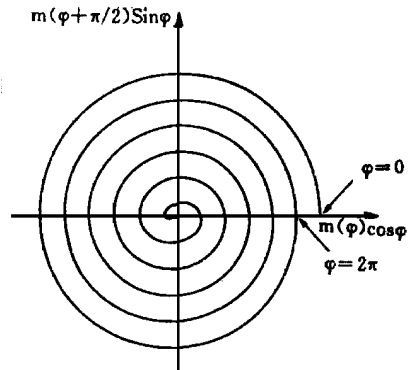


Fig. 3 The points given by [$m(\varphi) \cos \varphi, m(\varphi + \pi/2) \sin \varphi$] trace out a spiral as the phase φ goes from 0

对于宽带干涉光, 90° 相移法的深度测量范围由对比度曲线的陡度和数据采集与处理系统的能力决定的。如果对比度曲线近似线性的, 那么深度测量范围粗略地等于 $\lambda^2 / \Delta\lambda$ 。由于 90° 相移法不能分辨位相的正负, 因此这个范围只有一半是有用的。

3.3 干涉条纹频谱展开法

在白光干涉中, 干涉图像是由各色光形成的单色干涉图像形成的。被测表面上各点的深度不同, 所对应的干涉光强中各频谱成分的强度不同, 各色光的干涉级次不同。图 4^[12] 可以形象地说明这个原理。

图中水平轴表示深度, 垂直轴表示从紫色 ($\lambda = 0.4\mu\text{m}$) 到红色 ($\lambda = 0.7\mu\text{m}$) 之间所有可见光谱段的波长。通过某一深度作平行于波长轴线的垂线, 就可以确定在干涉图像中所选的点上的光强的光谱成分, 这条直线与诸斜线的交点就定出了各色光的干涉级次, 因而也就定出了不同波长在干涉图像规定点的强度。可以很清楚的看出, 深度不同, 各色光的干涉级次和强度不同。干涉条纹频谱展开法就是根据这个原理通过频谱分析仪将干涉条纹展开并进行成分分析来测量表面形貌的。

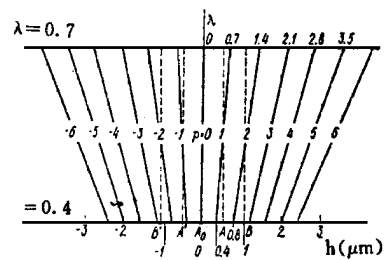


Fig. 4 Relation between the white light interference image and the measured depth

图 5 就是一种基于这种原理的表面形貌测量系统^[13], 专用于测量二元光学元件的表面形貌。它由 Mirau 型干涉显微系统和光栅分光系统组成。测量时微细结构形成的白光干涉条纹投射到狭缝上, 狭缝的作用是在干涉图像中取出一条细长

的干涉图像供后续的光栅光谱仪展开,展开的干涉条纹通过 CCD 图像采集系统测量,经过数据分析和处理最终得到被测表面上狭缝所对应的细长区域内的表面的形貌。

与条纹扫描法和对比度法一样,干涉条纹频谱分析法的深度测量范围也取决于干涉光频谱成分,大小与干涉光相干长度的一半相当;其测量分辨率和测量精度与 CCD 图像测量系统的分辨率、精度以及图像识别与处理能力有关。

4 用于特定表面的深度测量范围扩展方法

前面介绍的用来扩大深度测量范围的各种方法是直接用光学手段实现的,对于一些特定的表面,也可采用一些非光学方法来间接地扩展深度测量范围,其基本思想是,首先用其它方法得到初步的结果,然后用干涉法对结果进行修正。对于坡度较大的连续光滑表面,可以将干涉法同数据分析的方法结合起来,通过对测量数据的综合分析和处理,给出被测表面的真实形貌;对于台阶面,可以将台阶的初步测量结果和干涉法结合起来,用干涉测量的结果精确修正台阶面的初步测量数据,从而达到扩大深度测量范围的目的。下面分别介绍这两种方法。

4.1 陡峭连续面的测量

相移干涉法位相测量范围被限制在 2π 范围内,但对于连续表面,如果相邻两个采样点的位相差小于 π ,那么就可以采用被称为位相展开的递归算法^[14]重建被测的连续表面的形貌,具体做法是,通过加减整数个 2π 对位相测量数据进行修正,使相邻采样点的位相差落在 $(-\pi, \pi)$ 范围内。但是如果被测表面更陡,以致于相邻两个采样点的位相差超过 π ,那么位相展开方法失效,此时就会出现 2π 位相不确定的问题,造成测量结果的不可信。

但是如果这种表面具有连续的导数,甚至具有更高阶的连续导数,那么即使被测表面相邻两个采样点的位相差超过 π ,也能依据相移干涉的测量数据正确重建出被测表面,方法^[14]是,将相移干涉的测量结果作为初始解,然后依据一阶导数连续的事实校正初始解,接着依据二阶导数连续的事实校正一阶导数值和初始解,依次类推,直到得出最后的解。这种方法完全是一种数据分析的方法,不需要任何硬件上的改动。它克服了相移干涉法对表面起伏程度的限制,在保持相移干涉法的测量精度和不增加数据量的情况下,大大扩展了深度测量范围。在一些特定的情况下,深度测量范围可扩展两个数量级。

4.2 台阶面的测量

对于深度超过 $1/4$ 波长的不连续表面或台阶面而言,干涉法表面测量方法并不是一个好方法。如果干涉光是单色的,并假设干涉条纹与台阶交界线平行,那么在上下台阶表面上的干涉条纹具有相同的空间频率,干涉条纹看上去是一样的,因此精确测量台阶高度是不可能的。但是如果已通过某种方法知道了台阶高度的大概范围(如根据加工手段推测或已用其它仪器

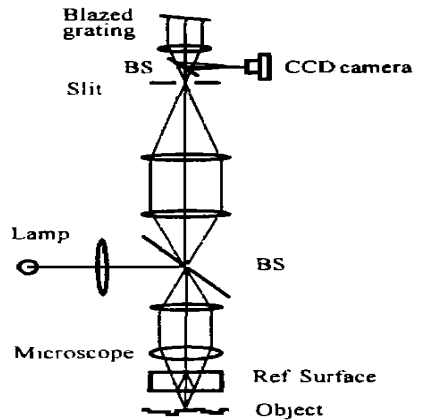


Fig. 5 Schematic of the dispersive interferometric profilometer

得到初步结果),那么就可以通过干涉测量的方法精确测出台阶表面的形貌,其方法是,首先用干涉法测量台阶面,如果测出的高度为 $h_m(x, y)$,那么台阶的实际高度应是^[15]

$$h_c(x, y) = h_m(x, y) + m \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (7)$$

然后将用其它方法得到的台阶高度 $h(x, y)$ 和干涉法测得的高度 $h_m(x, y)$ 代入上式,求出不确定量 m ;最后再将 $h_m(x, y)$ 和 m 代入上式,此时计算出的高度 $h_c(x, y)$ 便是台阶的实际高度。

这种方法建立在被测表面已有初步结果的基础上,缺乏通用性,但在单色测量系统中,它是扩展深度测量范围较易实现的方法。

5 各种方法的比较

本文介绍了三种扩展深度测量范围的方法。这些方法各有千秋,可满足不同的需要。多波长测量方法测量精度高,但扩展范围有限;白光干涉测量方法,扩展范围大,但测量精度相对较低;如果对被测表面有所了解,也可采用一些特定的方法来扩展深度测量范围,但这些方法具有一定的局限性,实际上它并不是一种严格意义上的深度测量扩展方法。多波长和白光干涉测量方法则不同,它是通过光学手段来扩展深度测量范围的,具有一定的通用性。

参 考 文 献

- 1 Bruning J H, Herriott D R, et al. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses. *Appl Opt*, 1974, 13(11): 26932703
- 2 Wyant J C. Testing aspherics using two wavelength holography. *Appl Opt*, 1971, 10(9): 21132118
- 3 Creath K, Cheng Y, Wyant J C. Contouring aspheric surface using two wavelength phase shifting interferometry. *Optica Acta*, 1985, 32(12): 14551464
- 4 Cheng Y, Wyant J C. Two wavelength phase shifting interferometry. *Appl Opt*, 1984, 23(24): 45394543
- 5 周明宝. 衍射光学元件表面形貌三维测量方法研究:[博士学位论文]. 成都: 四川联合大学, 1998
- 6 Cheng Y, Wyant J C. Multiple wavelength phase shifting interferometry. *Appl Opt*, 1985, 24(6): 804807
- 7 Biegen J E. Calibration requirements for Mirau and Linnik microscope interferometers. *Appl Opt*, 1989, 28(11): 19721974
- 8 Creath K. Calibration of surface heights in an interferometric optical profiler. *Proc SPIE, Surface Characterization and Testing II*, 1989, 1164: 9198
- 9 Biegen J F. Step height measurement range extended for an interference microscope utilizing the obliquity effect. *Proc SPIE, Surface Characterization and Testing II*, 1989, 1164: 8590
- 10 Matsui K, Kawata S. Fringe scanning white light microscope for surface profile measurement and material identification. *Proc SPIE*, 1992, 1720: 124132
- 11 Strand T C, Katzir Y. Extended unambiguous range interferometry. *Appl Opt*, 1987, 26(19): 42744281
- 12 考洛米佐夫. 干涉仪的理论基础及应用. 北京: 技术标准出版社, 1982
- 13 Schwider J, Zhou L. Dispersive interferometric profilometer. *Opt Lett*, 1994, 19(13): 995997

- 14 Greivenkamp J E. Sub Nyquist interferometry. *Appl Opt*, 1987, 26(24) : 52455258
- 15 Greivenkamp J E, et al. Resolving interferometric step height measurement ambiguities using a priori information. *Proc SPIE, Surface Characterization and Testing II*, 1989, 1164: 7984

Method for Expanding the Depth Measuring Range in the Surface Topography Measurement by Interferometry

ZHOU Ming-Bao

(State Lab. of Optical Technologies on Microfabrication, Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

Abstract

The existing various methods used to expand the depth measuring range for measurement of the surface topography with interferometry were described, their principle and property were analyzed, and their superiority was compared.

Key words: Interferometry, Topography, Measurement

周明宝 男, 1965年12月出生, 1986年毕业于浙江大学。博士, 副研究员。现工作于中国科学院光电技术研究所, 目前主要从事微机械、微光学、微电子等微细加工领域的单元技术研究。