

近代光学与精密计量

鲍良弼

(合肥工业大学)

在机械运动中,我们常将长度、角度、位置、位移、力、速度、加速度、流场等物理量统称为机械量。这些机械量的检测,不仅对科学理论验证与发展有意义,而且对工程技术更为重要,尤其是当今的工程技术越来越向高精尖发展,这就对机械量检测的要求越来越高。反过来,机械量检测技术的提高,又促进了工程技术的发展,它们是相辅相成,相关发展的。

当前机械量检测技术的主要特点与发展趋势,可归纳为如下几点:

(1) 动态检测: 随着工程技术向高速度、高精度、大功率和自动化方向发展,对机械动态特性的要求日益突出,如振动、冲击、噪声、摩擦、疲劳等。对这些动态性能,一般静态测量已不能满足要求,需要进行动态检测。所谓动态检测包括两个含意: 一是被测物体在运动中(如在加工过程中)进行在线测量。二是测量动负荷、冲击波引起的瞬态机械量变化。

(2) 全场分析: 在工程技术机械量测量中,通常采用逐点检测,这样在复杂情况下,往往会把某些奇异点遗漏,造成工程上的失误(如裂纹、砂眼及其它应力集中处),因此需要对被测物体进行全场分析。同时三维全场分析获得的信息更丰富,更便于找出机械量分布及变化的规律,看出其变化趋势。

(3) 测量自动化: 工程技术自动化的发展有赖于检测技术的自动化。检测自动化包括数据采集自动化、误差修正自动化、数据分析及计算机处理,它甚至还要求能够自动反馈控制加工等。这种综合自动化可以大大提高测量速度,提高成品率和生产效率。随着近年来微型计算机的应用,检测自动化又有长足的进步。

为了适应当前计量检测技术发展的这些特

物理

点,许多新的测量原理和新的测量方法不断被引进到精密计量中来,而其中借助近代光学原理,采用新型光电传感器件和应用微型计算机,更是将计量检测技术提高到一个新水平的三大关键。

本文着重介绍频谱分析、全息干涉计量、散斑技术、叠栅技术和光纤测量等近代光学在精密计量中的应用和它们的发展前景。

一、傅里叶光学频谱分析

在相干光学系统中,傅里叶透镜对前焦面光信息的作用,正好是一个傅里叶变换。即透镜后焦面的光波复振幅,正好是前焦面的光波复振幅的傅里叶变换。其表达式为

$$G(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-i2\pi(\mu x + \nu y)} dx dy,$$

其中

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\mu, \nu) e^{i2\pi(\mu x + \nu y)} d\mu d\nu,$$

简记为

$$g(x, y) \xrightarrow{\text{F. T.}} G(\mu, \nu),$$

式中 $g(x, y)$ 是前焦面二维光信息的复振幅分布, $G(\mu, \nu)$ 是后焦面二维光信息的复振幅分布

$$\mu = \frac{x'}{\lambda f}, \nu = \frac{y'}{\lambda f},$$

(F. T. 是 fourier transformation 的简写) λ 是光波波长, f 是透镜焦距。 $G(\mu, \nu)$ 是 $g(x, y)$ 的频谱,后焦面又称为频谱面。

当被测物体放在前焦面,用平面相干光照射,经过透镜后,物信息作傅里叶变换,变为频谱信息。频谱分析就是利用频谱信息的某些特征去分析物信息。例如,欲测量细丝线径(如图

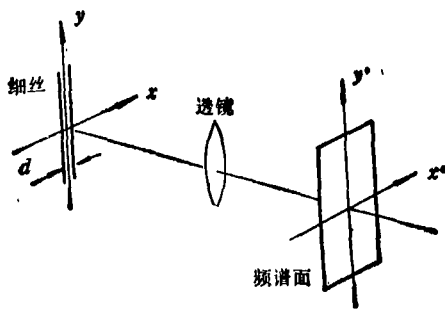


图 1

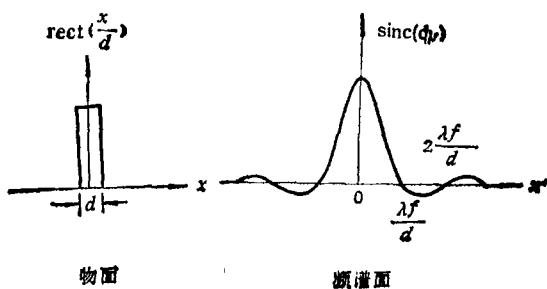


图 2

1), 将细丝放在物面, 细丝可以看作是一个一维矩形函数 $\text{rect}\left(\frac{x}{d}\right)$, d 是线径。那么

$$\text{rect}\left(\frac{x}{d}\right) \xrightarrow{\text{F. T.}} d \text{sinc}(d\mu),$$

其频谱分布如图 2 所示。频谱面上光强分布为

$$I(x') = |d \text{sinc}(d\mu)|^2 = d^2 \text{sinc}^2\left(d \frac{x'}{\lambda f}\right),$$

利用 sinc 函数的特征:

$$d \frac{x'}{\lambda f} = n, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots$$

处, 光强为零, 则得细丝直径

$$d = n \frac{\lambda f}{x'_n}.$$

在频谱面上测出暗点的位置 x'_1, x'_2, \dots 代入上式, 便可求得细丝直径。

这种方法可以对 $5-200 \mu\text{m}$ 的细丝作测量, 对 $10 \mu\text{m}$ 的线径可测到 $1/1000$ 的精度 (静态)。利用频谱分析还可以测量小孔、微粒、螺距、螺线倾角、微小位移、热膨胀等。

频谱分析测量技术的特点是:

(1) 被测物体在前焦面上产生位移时, 在频谱面上产生复振幅的相移, 而在考虑光的强

度时, 位相因子被消除, 所以在被测物体平移时, 频谱的光强分布不变, 化动态为静态测量, 给测量带来极大的方便。如果结合应用 CCD (电荷耦合器件) 全固体化摄像器件, 快速摄取光信息, 输入计算机处理, 则特别适合于在线动态测量。

(2) 物体越是细小, 频谱分布越宽阔, 因此适用于微小尺寸高精度测量。

(3) 为不接触测量, 减少了测量误差。

二、全息 (Holography) 干涉计量

全息干涉计量与普通干涉计量十分相似, 它们的干涉原理从本质上来说是相同的, 测量精度也一样。

全息干涉计量基本原理是: 假如物体发生微小变形, 则由该物体反射的光波就会发生相应的位相变化。因此若将物体变形前曝光一次, 拍一张全息图, 变形后在同一张底片上作第二次曝光, 这样在同一张底片上记录了两张不同时刻的全息图, 那么再现时, 就会同时出现两个可以互相干涉的波面。这两个波面干涉的结果, 产生了与变形相对应的干涉条纹, 变形大处条纹密, 变形小处条纹疏。测量这些干涉条纹, 就能计算物体全场各点的变形量, 这种方法能检测到光波波长的 $1/10$ 的微小变化。根据干涉条纹的疏密, 可以算出变形量及应力分布情况。

全息干涉计量的实现方法很多, 主要包括二次曝光法、单次曝光法、时间平均法、三束光单次曝光法、全息波前错位干涉法、双波长全息干涉法和全息光测弹性方法等。

全息干涉计量的特点:

(1) 可对粗糙表面元件测量到光学干涉精度, 这样对被测元件表面粗糙度要求很低, 对整个光学系统要求也很低, 这一点为精密检测提供了极大方便。

(2) 为三维全场分析, 能够同时了解被测对象各点形变, 并以等位线的形式给出图示的结果。

(3) 测量精度高, 和一般光学干涉法测量

精度相当,约 $0.01 \mu\text{m}$.

(4) 测试对象广泛,不仅可以测量透明物体,也可以测量不透明物体,并且表面可以是散射体。通过窗口可以测量密封空间内的物体,还可以通过表面的变化来检测物体内部的缺陷,即无损检验。

(5) 利用脉冲激光全息,可以测量运动物体、动负荷、流场、激波等情况,这对于现代工程技术与科学研究都有十分重要的意义。这一点是一般干涉计量所不能达到的。

三、散斑 (speckle) 干涉计量

激光自散射体表面漫反射,或者通过一个透明散射体时,在散射体的附近空间产生干涉,形成一种随机分布的明暗斑纹,称为激光散斑。最初散斑现象被认为是缺点,以后通过研究发现它的强度、衬度、大小和分布包含了许多有用的信息,特别是散斑干涉,反映了被检测对象的许多特征,因此激光散斑近年来已发展为光学应用的一个重要分支。从其潜力来看,估计它的应用领域将不亚于全息干涉计量。

利用散斑作计量检测可以分为两类:散斑照相法和散斑干涉法。散斑照相法是测量物体的位移、应变、旋转、倾斜以及振动的一种新技术。测量精度与观察系统有关,一般说低于全息干涉。散斑干涉法是被测物体表面散射光所产生的散斑与另外一束参考光相干涉,当物体表面发生变形时,干涉条纹也发生变化,从而测出物体的变化情况,这种测量方法的测量精度与普通干涉法相同。

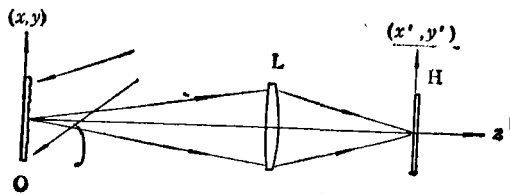


图 3

图 3 是散斑照相的一般光路, O 是物体, L 是成像透镜, H 是干板。用激光照射物体,在曝

物理

光一次以后,将物体移动微小距离 x_0 ;再曝光一次。这样在干板上记录了两个散斑图,但两者有一相对位移 Mx_0 , M 是光学系统的垂直放大率。(x, y) 平面是物面, (x', y') 平面是象面。

在象面上散斑强度分布用随机函数 $\phi(x', y')$ 表示,位移后的强度分布函数则为

$$\phi(x' - Mx_0, y'),$$

那么两次曝光后的总强度分布为

$$I(x', y') = \phi(x', y') + \phi(x' - Mx_0, y') \\ = \phi(x', y') * \{\delta(x', y') + \delta(x' - Mx_0, y')\},$$

* 为卷积运算符号。显影定影处理后的干板即为散斑图。

当用傅里叶变换透镜观察散斑图时(如图 4 所示),用激光照射散斑图,在透镜后焦面看到散斑图透射光场的频谱分布:

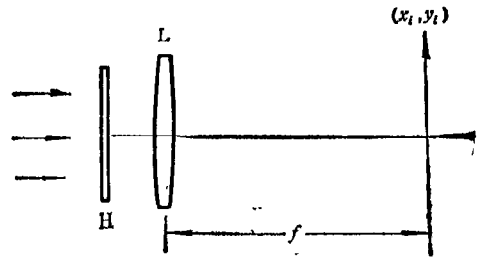


图 4

$$T(\mu, \nu) = \mathcal{F}\{\phi(x', y') * [\delta(x', y') \\ + \delta(x' - Mx_0, y')]\} \\ = \Phi(\mu, \nu)\{1 + e^{i2\pi\mu Mx_0}\},$$

式中 $\Phi(\mu, \nu)$ 为 $\phi(x', y')$ 的频谱。

$$\mu = \frac{x_i}{\lambda f}, \nu = \frac{y_i}{\lambda f}.$$

其光强度则为

$$|T(\mu, \nu)|^2 = |\Phi(\mu, \nu)|^2 \cdot |1 + e^{i2\pi\mu Mx_0}|^2 \\ = |\Phi(\mu, \nu)|^2 \cos^2(\pi\mu Mx_0).$$

由调制因子 $\cos^2(\pi\mu Mx_0)$, 可以导出干涉条纹间距 Δl 和物体位移 x_0 的关系式

$$x_0 = \frac{\lambda f}{M\Delta l}.$$

这样测出条纹间距 Δl , 便可以求得物体的位移或变形,测量散斑条纹的变化速度还可以求得物体的运动速度。

另外利用散斑的尺寸变化,可以测量透镜

的焦距,利用散斑相关法,可以作材料疲劳状态的检测及测量物体的表面粗糙度等。

散斑计量的特点可以归纳为:

(1) 能够对粗糙表面物体进行高精度测量,应用双孔散斑照相法,变形测量精度有可能达 $0.1 \mu\text{m}$ 。

(2) 光路系统简单,对照明光的相干长度要求较低,因此可以应用多模激光,甚至非相干光也不需要精密的防震台。

(3) 散斑计量对表面内位移更敏感,而全息测量对离面位移敏感,将两者同时使用,互相取长补短,可取得良好效果。

散斑计量的缺点是干涉条纹清晰度较差,不过最近研制的散斑剪切干涉方法可以克服这一缺点,获得较好的条纹质量。

近几年研究出了“电子散斑干涉仪”(ESPI)。一般照相散斑干涉需要经过底片感光、显影以后才能进行观察,而电子散斑干涉仪是在散斑干涉光路中用电视摄像机作光电转换,然后经过电子处理线路输入显示器,这样直接把视觉信息变为电信号,直接观察和分析干涉条纹,条纹对比度高,并且可进行实时测量,测量某些动态特性(如瞬时变量、裂纹扩展过程等)。可以预计电子散斑干涉仪的应用潜力是相当大的。

四、叠栅形貌技术 (moire topography)

用两块光栅直接重叠形成叠栅条纹,在一维和二维测量方面已经有许多成果,在工程技术中已被广泛采用,到六十年代末,开始研究利用此方法对三维物体进行测量。该方法是将光栅的象或光栅的映象投射到三维物体上,物体反射的光波是受物体形状调制的光栅,即变形光栅,将变形光栅重叠到基准光栅上,从而产生叠栅条纹,这种方法称为“叠栅形技术”,其原理如图5所示。设光栅G处于基准面上,通过光源S照明,使光栅G的映象投射到物体上,根据物体形状的不同,产生变形的的光栅映象(即受到三维物体调制的光栅)。通过光栅G观察,则光栅

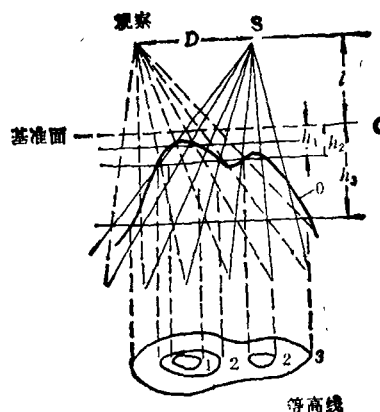


图 5

G和受物体调制的光栅的映象相重叠,其结果就会以等高线的形式产生叠栅条纹。设 N 为条纹级次, d 为光栅常数, l 为光源离基准面的高度, D 为光源与观察点的距离,则在离基准面为 h_N 的距离上形成的 N 级叠栅条纹有下列规律:

$$h_N = \frac{Ndl}{D - Nd}$$

应用此法可以检测物体的形状、平面度及表面缺陷等。这种方法的特点是:

(1) 叠栅条纹是光的强度叠加,可以不用激光,是一种非相干光的测量,因此比较方便。

(2) 为三维测量,并且可以对粗糙表面进行整体非接触测量。

(3) 和全息、散斑技术相比较,灵敏度较低,为微米量级,但容易应用到生产线上。

最近研究出一种叠栅形貌分析装置,实现数字化,已用于数字程序控制加工机床上。它首先从图形(叠栅条纹)中取得三维信息,然后利用这些位置信息(数据)进行计算机处理,导出断面图、断面面积和长度等,当被测物体有变化,又可给出各自的变化量。

五、光纤测量技术

光导纤维过去多用于传递光学图象,作内窥镜用。到七十年代末期,光纤传感测量技术获得较大发展,它不但传光、传象,而且也可作为一个传感元件——光纤传感器,利用改变传

(下转第734页)