

测试·试验

高速精密激光干涉测量的研究现状及其关键技术*

天津大学精密仪器及光电子工程学院 李东光 张国雄

[摘要] 总结了高速精密激光干涉测量的研究现状;分析了影响测量精度和提高测量速度的主要因素及解决问题的关键技术,包括激光稳频技术和光学反馈、精度与测速的制约关系、空气折射率的影响及补偿、电子细分技术、光学非线性误差等。

关键词: 激光干涉 稳频 折射率 细分 光学混叠

[Abstract] This paper summarizes the present state of high-speed and high-accuracy laser interference. Then it analyses the main factors affecting measuring accuracy and key techniques that can improve measuring speed including laser frequency stabilization echnology, optical feedback, the restrict relationship between measuring accuracy and measuring speed, the influence and compensation of air refractivity, optical nonlinear error, etc.

Keywords: laser interference frequency stabilization refractivity subdivision optical aliasing

1 激光干涉仪的研究现状

自从 He-Ne 激光器问世以来,激光干涉仪以其特有的大测量范围、高分辨率和高测量精度等优点,在精密和超精密测长领域获得了广泛的应用。伴随着电子学、光学和物理光学的发展并与计算机相匹配,加之丰富的应用软件和各种附件,使激光干涉仪不仅能测量线位移、线速度,还能测量小角度以及各种形位误差等几何量。因此它是精密机械工业不可缺少的测量工具,是全息光栅尺和玻璃线纹尺等长度测量工具所不能取代的。激光干涉仪在超精密加工、光刻机以及三坐标测量机的标定等领域有着广泛的应用前景。

世界上各发达国家对激光干涉仪的发展都给予足够的重视。目前世界上有三种比较典型,也是比

较成熟的激光干涉仪:美国 Hewlett Packard 公司生产的 HP 系列双频激光干涉仪;美国 Zygo 公司研制的用于 DSW 光刻机 X、Y 工作台直线及角位移测量的双频激光干涉测量系统;以及英国 Renishaw 公司的激光校准系统。表 1 给出国外主要激光干涉测量系统厂家的产品和技术指标。

我国于 70 年代开始了激光测量系统的研制,1975 年由中国计量科学研究院与陕西机械学院研制出我国第一台国产双频激光干涉仪样机,量程为 60m,测量精度为 0.5×10^{-6} ,到目前为止,哈尔滨工业大学、清华大学、华中理工大学等也相继开展了对激光干涉仪及相关技术的研究,成都工具研究所已生产出带有测量空气参数装置并进行误差补偿的激光干涉仪,但在高速激光在线测量系统的研

表 1 国外主要激光干涉测量系统厂家的产品和技术指标

序号	型号	激光功率/mW	分辨率/nm	测量精度/ μm	测量速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	厂家	国别
1	SP125	15	0.635	2.54×10^3			美国
2	ML10	<1	1.0	0.1	1	Renishaw	英国
3	AXIOM/20		1.25	0.01	1.8	ZYGO	美国
4	LDDM		10	1	1.4	OPTODYNE	美国
5	HP5527B	1	10	0.1	0.45	HP	美国
6	HP5529	1	10	0.1	0.7	HP	美国
7	L-1M-10A	1	10	0.1	0.4	TSK	日本
8	M1500		1	0.6	0.4	SIOS	德国

究方面还刚刚起步。国产激光干涉仪用于高速精密或超精密长度测量总不能令人满意,还有许多关键技术需要解决。

问题的焦点集中在:①如何进一步提高测量精度,使测量系统能完成高度线性 and 可重复性的测量。②如何处理好提高测量精度与提高测量速度的内在关系,即在保证测量精度的前提下,如何提高测量系统的测量速度,达到仪器的高动态性能指标。此外还需要有效地降低仪器成本。

2 影响激光干涉仪测量精度及测量速度的因素和解决方法

激光干涉测量仪的主要部分有激光头、光学干涉系统、干涉条纹计数和处理测量结果的电子系统以及承担各部分连接和运动的机械系统。被测量的大小是以干涉条纹数的形式表现的,无论是单频激光干涉仪还是外差式激光干涉仪,都有 $L = (N + \Delta N) \cdot (\lambda/2n_a)$ 的基本公式,其中: λ 为激光在真空中的波长; n_a 为空气折射率; N 和 ΔN 分别为干涉级次的整数部分和小数部分。从基本公式中可以这样认为,激光干涉测量是把激光的波长做为“标尺”,用该尺去度量被测量的大小。

为提高激光干涉仪的测试性能,就要仔细分析影响激光干涉测量精度和测量速度的因素。目前,从国内外的研究现状来看,高精度高速度激光干涉测量的关键技术主要有以下几个方面:

2.1 激光光源的稳频技术及光学反馈

做为测量中的“标尺”,要求激光的波长必须具有很好的稳定性及再现性。常用的稳频技术是针对输出激光的增益曲线利用兰姆凹陷法稳频、利用塞曼效应稳频、利用碘饱和吸收及甲烷饱和吸收稳频等。目前利用碘饱和吸收法稳频的激光,其波长稳定度可达 $10^{-12} \sim 10^{-14}$,再现度可达 $10^{-10} \sim 10^{-12}$ 。测量用激光器的波长稳定度应高于测量精度一至两个数量级,对于完成精度为 1×10^{-7} 的测量任务来说,能够满足使用要求。

影响激光器波长稳定性的因素还有光学系统的光学反馈,即干涉回路中的部分光通量“回灌”到激光谐振腔中,使谐振腔中的光子振动不稳定,从而导致激光波长发生变化。这就要求在光学系统的设计中要采用适当的隔离技术,杜绝或最大限度地减少这种光学反馈作用。针对不同类型的干涉仪,常用的隔离技术有利用偏振光特性使用偏振片或法拉第隔离器进行光学隔离的,还有利用声光频移器件产生频移而进行光学隔离的。

2.2 测量精度与测量速度的制约因素

不同的测量任务应选用不同的干涉方法,而不

同的干涉方法具有不同的精度与测速。在干涉测量中常用的干涉方法有单频激光干涉(直流干涉)和外差式激光干涉(交流干涉)。

2.2.1 单频激光干涉

单频激光干涉测量的原理如图1所示。单频激光器输出的激光经扩束器扩束后入射到分光器被分为两束,分别进入测量光路和参考光路。经各自光路中的反射镜反射后重新相遇叠加而产生干涉。光电接收器接收干涉条纹的光信号并将其转换成电信号,该信号的表达式为: $u(t) = A_0 + A \cos \varphi_0$, 其中 A_0 是直流分量,对应背景光; φ_0 是干涉信号的相位,对应被测量大小。测量臂中的靶镜每移动 $\lambda/2$,干涉信号的相位相应变化 2π 。该信号经放大整形电路及辨向电路后形成同频的脉冲进入双向脉冲计数电路。

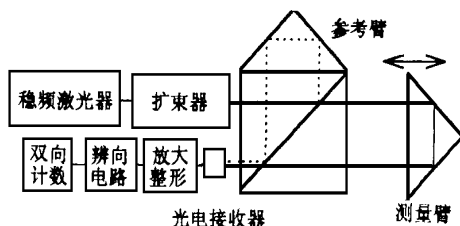


图1 单频激光干涉仪

上述方法的优点是装置相对简单,可实现高速测量。但是光电接收器的光电流放大器的灵敏度漂移及激光器功率、干涉仪测量光束强度的波动会引起信号电平随机变动。这种非稳定因素会改变光电流的直流分量的大小和交流分量的振幅,给干涉条纹的计数带来误差。而当测距增大,光信号减小时,电信号的信号强度低于触发电平,计数装置会停止工作。虽然触发电平可调,但其调整速度跟不上那些干扰因素的变化速度。可用将输出信号分离在4个光接收器上的方法来消除直流分量。转换实质是对每个相移 90° 的信号建立反相信号,即移相 180° 。经过减法放大器,在移相 180° 的信号中将没有直流分量。这个方法在很大程度上受直流放大器的漂移、光电接收器的灵敏度和激光功率的起伏的限制。如果 A_0 不变化,光电接收器的光电特性相同,则能补偿直流分量。当测量距离增大时,信号下降50%,这种情况下得不到完全补偿。同时考虑到光通量分为4个部分,使干涉系统复杂并使信噪比下降。另外4个完全正交的信号也很难获得。总之,这种基于对直流信号进行处理的方法,抗干扰能力不强。

为了消除干涉背景和直流放大器系统的噪声,可将信号的频谱移至高频端,并利用行波干涉进行测量。这有很多优点,依靠抑制低频干扰改善了信噪比,提高了干涉条纹小数部分的读数精度。可用很多方法移动信号的频谱,外差干涉就是其中之一。

2.2.2 外差式激光干涉

外差干涉测量最显著的特点是利用载波技术将被测物理量信息转换成调频或调相信号,因此具有抗干扰能力强、测量速度快、信噪比高、易于实现高测量分辨率等特点,得到了很大的发展。实现外差干涉主要有两种方法:一是利用塞曼分裂 He-Ne 激光器作为光源的双频激光测量系统;另一种是利用光学频移器件实现外差干涉,目前应用最多的光学频移器件是声光调制器。

① 塞曼双频激光干涉测量

He-Ne 激光器在纵向磁场的作用下,其 $0.633\mu\text{m}$ 谱线分裂成频率相差 $1.5\sim 2.0\text{MHz}$,偏振态分别为左右旋的两束偏振光,经 $1/4$ 波片后成为正交的线偏振光。在外差干涉中,线偏振光经偏振分光器后一个频率的光作为测量光,另一个作为参考光,两路光相干后形成拍频信号。当测量反射镜移动时产生多普勒频移 Δf ,其中包含被测位移信息,对其积分可求出被测位移量。原理如图 2 所示, D_1 接收的信号为 f_1-f_2 的拍频信号, D_2 接收的信号为 $(f_1-f_2)\pm\Delta f$ 的拍频信号,两路信号相减得到含有被测位移信息的多普勒频移 Δf 。代表测量长度的累积脉冲数为:

$$N = \int_0^L \Delta f \cdot dt = \int_0^L \frac{2v}{c} f \cdot dt = \int_0^L \frac{2}{\lambda} v \cdot dt = \frac{2}{\lambda} \int_0^L dl = \frac{2}{\lambda} \cdot L$$
$$\therefore L = N \cdot \frac{\lambda}{2}$$

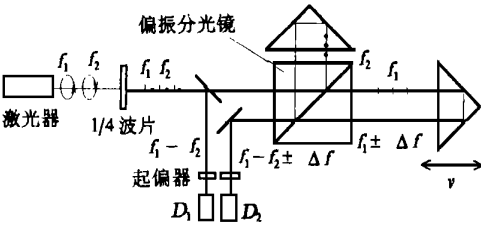


图 2 塞曼分裂双频激光干涉仪

在外差干涉仪中,为了有正确的测量结果,拍频 f_1-f_2 应大于多普勒频移 Δf ,即 $f_1-f_2>\Delta f=(2v/c)f$, $\therefore v_{\text{max}}=c(f_1-f_2)/2f$ 。即测量速度受限于双频频差。

塞曼分裂的双频频差与外加纵向磁场的大小成

正比,增加外加磁场的大小可使双频频差增大。但外加磁场也不能无限增大,频率牵引作用也限制了双频频差的进一步增大。受原理限制,目前基于塞曼分裂的双频激光干涉仪的频差为 $1.5\sim 2.0\text{MHz}$ (如 HP 系列激光干涉仪为 1.8MHz),测量速度为 $0.3\sim 0.4\text{m/s}$ 。当测量速度再提高时,就会出现频率混叠现象而不能正常测量,这就使这种双频干涉仪在高速测量中受到限制。

② 声光调制激光外差测量

声光调制激光外差测量方法突破了双频频差较小的限制。原理如图 3 所示,由超声信号源及功率放大器驱动的超声转换器发出超声波,通过介质(可以是石英、铌酸锂、钼酸铅等)传播,引起介质折射率 n_s 产生正弦形的疏密变化,其变化周期等于超声波的波长 λ_s ,也就是说,此时传播介质已变成折射率以 λ_s 为周期疏密化变的正统光栅。当一束细的平行激光束射入这样的介质时,光栅衍射效应使入射光受到衍射调制,其 0 级光束的频率与入射光的频率 f_0 相同,而 $+1$ 级和 -1 级光束的频率分别为 f_0+f_s 和 f_0-f_s , $+2$ 级和 -2 级光束的频率分别为 f_0+2f_s 和 f_0-2f_s ,其余依此类推。因此通过声光调制器可以把入射光频率变成具有一定频差的一系列光束,并能在空间彼此分开。当入射光以 θ_B 角入射时,将产生布喇格衍射,出射光将只有 0 级和 $+1$ 级光束,且光强相等,0 级和 $+1$ 级以外的光束被限制。若让 0 级和 $+1$ 级两种频率的光射入干涉系统,调整超声信号源的频率,就可得到所需的外差拍频光束。目前,用声光调制器可产生频差为几十兆赫的光束,在这种频差下,测量速度可大大提高。

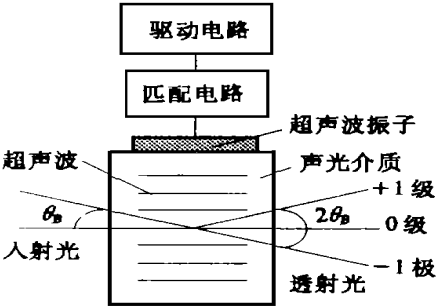


图 3 声光调制器原理

图 4 是实现声光调制激光外差的原理图。经调制器的单频激光产生 0 级和 $+1$ 级的衍射光,两束光之间的频差即为 AOM 输入的超声波频率 f_s 。反射棱镜运动时产生多普勒频移 Δf ,由光电接收器

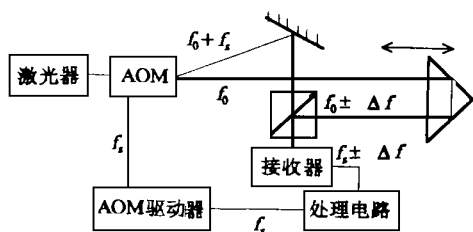


图 4 声光调制式激光外差干涉仪

接收，经处理电路就可以把反映位移信息的 Δf 取出，并转换成所要测量的位移量。

声光器件的质量是决定系统成功与否的关键，作用于声光器件的超声波可能使激光波面发生畸变，故限制了测量系统的分辨率。对声光器件的理论、结构、声光衍射的光强、功率、衍射效率等进行的深入研究、测试及调整，有望使此问题得以解决。

2.3 空气折射率的影响及补偿

应用于实际环境中的激光干涉仪不可能处于真空中，也不可能有实验室条件下的良好稳定的空气环境。当测量环境的某些空气参数如温度、压力、相对湿度、CO₂ 浓度等发生变化及空气中含有其它杂质时，会导致空气折射率的变化。大气温度每变化 0.01℃，气压变化为 3Pa，相对湿度每变化 1% 都会引起折射率产生 10^{-8} 的变化。由于干涉仪测出的光程变化实际上是由靶镜的物理位移和空气折射率变化共同引起的，即使被测量的物理位移为零，空气折射率的变化也可能使干涉条纹数发生变化，从而导致测量误差。因此高精度的测量应使用误差分离或补偿技术将这部分误差从测量结果中剔除。常用的方法有以下几种：

2.3.1 间接测量 n_a

利用布置在光路中的高灵敏度温度、压力、相对湿度传感器实时测量空气的温度、压力、相对湿度，带入 Edlen 经验公式中间接求出空气折射率 n_a 。

$$n_a = 1.00027123 - [929 (T - 20) - 2.68 (P - 101325) + 0.42 (H - 1333.22) \times 10^{-9}]$$

这种方法比较简单，但补偿精度不是很高，适用于测量环境中空气参数偏离标准状态不大的情况。只要传感器的精度足够高，就可以满足对 n_a 测量的精度要求，英国 Renishaw 公司的激光干涉仪就是采用这种方法。

2.3.2 直接测量 n_a

用折射率计直接测量空气折射率是利用激光干涉仪测出一个已知定长的管子由充满空气到真空光程的变化来反算出 n_a 。如图 5 所示，在测量的初始，管内的空气和外部是相同的。然后抽出管内的气体直至真空，若此过程中干涉条纹数变化为 F ，则空气折射率为：

$$n = 1 + F\lambda/2L$$

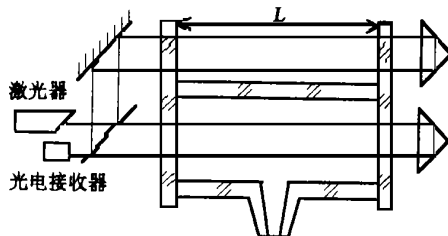


图 5 直接法空气折射率测量

用这种方法测得的空气折射率精度达到 5×10^{-8} ，该方法用于测量环境中空气参数及各种化学物质较严重偏离标准状态的情况。由于大多数测量应用于空气参数相对标准偏离不大且变化缓慢的情况，而且直接法因其测量速度低，占用空间大，且设备昂贵、实时性不好而使应用受到限制。

2.3.3 采用共模抑制和补偿技术

图 6 所示的是带有校正光路的测量干涉仪，在测量光路附近同时布置校正光路，校正光路部分用温度不敏感元件如殷钢或石英等材料制造。测量时 M_0 不动， M_1 随被测量移动。 δ_0 和 δ_1 分别为空气折射率的变化在各光路中引起的附加光程。因校正光路与测量光路布置在同一环境中，具有相同的空气折射率，因此校正光路的 δ_0 与测量光路的 δ_1 有直接的内在联系。通过对光电接收器 C_0 、 D_1 输出的信号进行适当处理即可补偿由空气参数的变化对测量精度的影响。

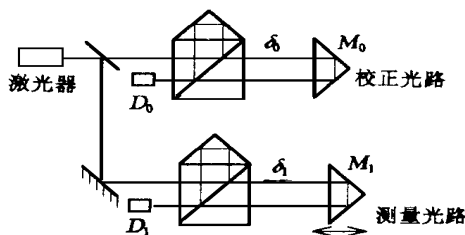


图 6 带有校正光路的干涉仪

这种方法必须使校正光路中的原始光程进行校准并在测量中保持恒定不变，这就限制了其使用条件。

2.4 干涉条纹细分的电子系统

光学倍频可提高激光干涉仪的分辨率，如图 7 所示的光学系统能实现光学七细分，使测量分辨率 为 $\lambda/14$ 。利用光学倍频的干涉系统能用简单的脉冲计数逻辑做精密测量，而且可使仪器结构紧凑，使热、空气以及机械干扰减小。但这种细分方法增加了光在光学元件之中的反射次数，使有效光通量逐渐减少，从而也就影响了干涉条纹的质量。另外，这种干涉光路的布置使测量臂与参考臂的光学路径不对称，当温度变化导致光学元件变形时，造成附加光程。在超精密干涉测量中为提高测量分辨率，利用电子系统的信号处理方法进行条纹细分也是激光干涉仪的关键技术之一。现以外差干涉为例说明几种信号处理方法。

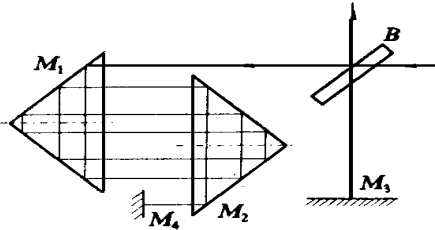


图 7 光学细分

2.4.1 基于频率的信号处理方法

设外差干涉仪靶镜位移的速度为 V ，多普勒频移为 Δf ，那么在 Δt 时间间隔内靶镜的位移为 $x = \lambda/2 \int_{\delta+\Delta t}^{\delta} \Delta f \cdot dt$ 。

因此测量出在时间 Δt 的多普勒频移的总和，即测量出该位移量。从上个公式中知，要提高测量分辨率，必须对式中的 Δf 进行倍频。信号处理原理如图 8 所示，将测量信号 f_m N 倍频，将参考信号 f_r $(N-1)$ 倍频。测量信号与参考信号有 $f_m = f_r \pm \Delta f$ 的关系。倍频后的信号经混频得到的输出为 $f'_m = f_r \pm N\Delta f$ ，该信号与参考信号通过频率相减输出两路分别代表正、负多普勒频移的脉冲信号，进入可逆计数器进和加减计数，并使分辨率较以前提高 N 倍。

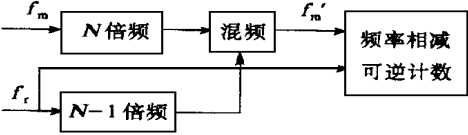


图 8 利用倍频法进行细分

这种方法的优点是在电信号处理过程中以低频信号为主，利用锁相环进行电子细分，提高了测量分辨率。要得到正确的测量结果，必须满足条件 $(f_r - N\Delta f) > 0$ ，允许测量镜的运动速度 V 为：

$V < f_r \cdot \lambda/2N$ 。同时锁相环细分的倍数有限，而且锁相环的性能决定了测量过程只能在静态下进行读数测量。可见利用这种信号处理方法，在提高测量分辨率的同时，测量速度就要受到限制。采用高频响锁相环器件有望解决该问题。

2.4.2 基于相位的信号处理方法

当外差干涉仪的测量靶镜移动时，被测量的大小被调制到外差干涉信号的相位上。相位测量就是将该信号与参考信号进行比相，从而测量出干涉信号的相位变化，即从外差干涉信号的相位中解调出被测量的大小。

相位测量采用数字相位调制法，即将该测量信号与载波（参考信号）间的相位差转换成一个调宽信号。该调宽信号的调制宽度 T 代表这两路信号的相位差的大小。通过对该调宽信号进行解调，剔除信号中的调制信号及其谐波信号，得到一个反映相位差的模拟信号，再通过 A/D 转换，该位移量被动态测量出来。其原理如图 9 所示。

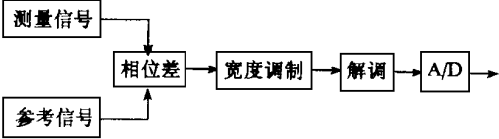


图 9 相位法测量

用这种方法在测量外差干涉信号的相位时，只能局限于一个周期内的相位测量，使测量范围受到限制。为了扩大测量范围，可对外差干涉信号和参考信号进行 N 分频，从而扩大 N 倍量程，但这要以降低 N 倍的测量分辨率为代价。

在相位测量法的基础上，加上相位变化周期数的测量，即整数相位的测量，既可使分辨率达到亚纳米量级，又使测量范围不受限制。整数相位测量是利用了相位调制器输出的调宽信号的特征实现的。当被测相位差从绝对值 2π 变到超过 2π 时，调宽信号的调制宽度总是从调制最深到调制为零。因此，利用调宽信号这一特征，经过数字逻辑电路处理，产生了反映被测相位差周期数变化的信号，从而实现了相位的整数测量。

2.5 光学系统的非线性误差

对于纳米级精度的测量，必须搞清楚干涉仪系统内在的误差源。光学混叠现象会在干涉条纹的相位和靶镜位移之间产生非线性误差。所谓光学混叠是指偏振干涉仪两光臂中光束的偏振态和频率不是完全分离的，从而发生偏振态混叠和频率混叠。

对于偏振干涉仪，理想情况下入射光线到达偏振分光镜 45° 的分光面后，磁矢 TM 发生透射而电

矢TE发生反射。实际上,由于偏振分光镜的泄漏和光臂对偏振态的调制作用,在分光镜上偏振态的分离是不完善的。入射到接收器上的TE光除来自参考光路外,还有一小部分来自测量光路。同样,偏振混叠也发生在TM上。这样接收器接收的TE光和TM光实际上分别是两个合矢量。当测量臂移动一个条纹时,合成TE矢量与合成TM矢量之间的测量相位超前或滞后理想情况,这就引入了一个周期误差。

良好的光学元件多层镀膜设计,波片及角锥反射镜“失向”的仔细调整都有助于对这种偏振混叠现象的减小。

对于双频激光干涉,理想情况下两光臂中各自传输的光线只有一种频率。实际上由于入射激光是呈椭圆偏振态的,偏振分光镜也不是很完善的对准,则在每一光臂中含有一小部分另一频率的光。与同时存在的偏振态混叠不同,频率混叠对每一光臂来说偏振态是正确的。频率混叠使得实际拍频信号是理想矢量与混叠矢量的合成。在靶镜移动一个条纹的过程中,合成矢量的相位超前或滞后理想矢量的相位,这种周期性的相位误差同时还伴随着对拍频信号成比例的振幅调制。

为减小频率混叠现象,应使入射光线正交而干涉仪对称,那么在两个光臂中的混叠部分有同样的大小和相位,则合成TE矢量与合成TM矢量之间的相位关系是不变的,也就没有非线性误差了。也可以利用检测拍频信号的振幅而得出相位误差信号,从而进行误差修正。

除以上几个因素外,影响激光干涉仪测量精度的因素还有:

① 光学热漂移,即温度的变化使光学元件发生变形,当测量臂与参考臂光学不对称时引起两路光束产生附加相移。

② 材料的热膨胀误差。

③ 由机械系统的制造及安装误差造成的阿贝误差和余弦误差等。

这些因素都应在激光干涉测量系统中给予重视,并采用合理的误差补偿技术加以修正。

参考文献

- 1 Norman Bofroff. Recent advance in displacement measuring interferometry. Meas. Sci. Technol. 1993 (4), 907~926
- 2 王文绵. 用于精密和超精密测长的激光干涉仪. 航空精密制造技术, 1995, (2)
- 3 赵洋 等. 激光外差干涉光电信号处理方法及特点. 航空计测技术, 1996, (2)
- 4 Wu Chien-ming, etc. Nonlinearity in measurement of length by optical interferometry. Meas. Sci. Technol. 1996 (7): 62~68
- 5 Steinmetz C R. Sub-micron measurement and control on precision machine tools with laser interferometry. Precision Eng. 1990 (12), 12~24
- 6 Oka K, Tsukada M and Ohtsuka Y. Real-time phase demodulator for optical heterodyne detection processes. Meas. Sci. Technol. 1991 (2), 106~110

(收稿日期 1998-05)