

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.08

激光干涉仪在纳米测量中的典型应用

李强, 任冬梅, 朱振宇, 李华丰, 王霖, 段小艳

(航空工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095)

摘 要: 激光干涉仪具有测量分辨力高、测量结果可溯源等优点, 在纳米测量中的应用日益广泛。介绍纳米测量机和低膨胀材料线膨胀系数测量装置中应用的迈克尔逊型激光干涉仪以及在高准确度位移测量装置中应用的法布里-珀罗型激光干涉仪, 并结合这些实例对激光干涉仪光学系统设计、测量环境控制、迈克尔逊干涉仪非线性误差补偿以及法布里-珀罗干涉仪量程扩展等方面的关键问题进行分析 and 总结。所述原则和方法对实现纳米级测量准确度具有重要意义, 可为高准确度激光干涉仪的研制及其在纳米测量中的更广泛应用提供技术参考。

关键词: 纳米测量; 激光干涉仪; 位移测量; 纳米测量机; 线膨胀系数

中图分类号: TB9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2023)01-0091-11

Typical applications of laser interferometer in nanometer measurement

LI Qiang, REN Dongmei, ZHU Zhenyu, LI Huafeng, WANG Ji, DUAN Xiaoyan

(National Key Laboratory of Science and Technology on Metrology & Calibration, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Laser interferometer has the advantages of high measurement resolution and traceability of measurement results, and is increasingly widely used in nanometer measurement. The Michelson laser interferometers used in nano-measuring machine and linear expansion coefficient measuring device for low expansion materials, and the Fabry-Perot laser interferometer used in high-precision displacement measuring device are introduced in this paper. Combined with these typical applications, key problems in the interferometer optical system design, measurement environment control, the nonlinear error compensation of Michelson interferometer and the measurement range expansion of Fabry-Perot interferometer are analyzed and summarized. The principles and methods described in this paper are of great significance for the laser interferometer to achieve nanometer measurement accuracy, which can provide technical reference for the development of high-precision laser interferometer and wider applications of laser interferometers in nanometer measurements.

Key words: nanometer measurement; laser interferometer; displacement measurement; nano measuring machine; coefficient of linear thermal expansion

0 引言

随着纳米科学技术的发展及其在航空、航天、微电子和精密仪器等领域的广泛应用, 纳米测量

技术亦逐步发展成为一个重要基础学科。与广义的测量技术相比, 纳米测量的主要特点是被测量的尺度小、测量准确度要求高且以非接触测量手段为主。在宏观领域中广泛应用的传统测量方法

收稿日期: 2023-01-12; 修回日期: 2023-02-07

基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2016205C003)

引用格式: 李强, 任冬梅, 朱振宇, 等. 激光干涉仪在纳米测量中的典型应用[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 91-101.

Citation: LI Q, REN D M, ZHU Z Y, et al. Typical applications of laser interferometer in nanometer measurement[J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43(1):91-101.



和测量仪器在纳米测量中已不再适用,研究新的测量技术并进一步提高测量准确度是纳米测量领域面临的严峻挑战。1982年,Binnig和Rohrer在IBM苏黎世实验室成功研制了世界上第一台扫描隧道显微镜,并于1986年获得诺贝尔物理学奖^[1]。此后,原子力显微镜和扫描近场光学显微镜等纳米测量仪器相继出现,观察单个原子在物质表面的排列状态成为现实,然而若要对所观察到的现象进行准确的几何描述,还需要发展纳米尺度测量和量值溯源技术。国内外一些计量机构研建了具有计量意义的纳米、亚纳米精度测量系统,力求完善纳米量值计量传递能力^[2-4]。自从1983年第17届国际计量大会上将“米”定义为“(1/299792458) s的时间内光在真空中所传播的距离”,用稳频激光器和激光干涉仪进行几何量量值溯源就成为了几何量计量领域的研究热点。虽然也有使用原子晶格常数作为纳米量值溯源方法的研究^[5-6],但使用高准确度的激光干涉仪将测量结果直接溯源至国际单位“米”定义上一直是研究最多和应用最广泛的方法。随着稳频激光技术的发展,商用碘饱和吸收稳频氦氖激光器的频率稳定度已达到 2.5×10^{-11} ,因此消除和减小激光干涉仪的各种误差,充分发挥其测量性能,成为提高量值溯源准确性和可靠性的关键。

激光干涉仪在微纳米测量等领域应用日益广泛,国内外都有不少文献报道^[7-9],也有一些关于激光干涉仪在精密测量中应用的综述性文献^[10-12],这里不再赘述。本文以纳米测量领域中应用较为典型的迈克尔逊干涉仪和法布里-珀罗干涉仪为例,对这两种干涉仪设计和使用中的关键问题进行分析讨论,为促进其测量准确度的进一步提高提供借鉴。

1 激光干涉仪的基本原理

在讨论激光干涉仪在纳米测量中的应用之前,首先简要回顾激光干涉仪的基本原理。当两束光满足频率相同、振动方向相同以及初相位差恒定的条件时,它们就会发生干涉现象,产生亮暗交替的干涉条纹^[11]。干涉场中任一点的合成光强为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \frac{2\pi}{\lambda} \Delta \quad (1)$$

式中: λ 为光波长; I_1, I_2 分别为两束光的光强; Δ

为两束光的光程差,且

$$\Delta = \sum_i n_i l_i - \sum_j n_j l_j \quad (2)$$

式中: n_i, n_j 分别为两束光经过的介质的折射率; l_i, l_j 分别为两束光经过介质的几何路程。

由于两束光到达干涉场中各点的光程不同,会形成亮暗变化的干涉条纹。当光程差为波长的整数倍时,两束光相互增强,在干涉场中显示为亮条纹。当光程差为半波长的奇数倍时,两束光相互抵消,在干涉场中显示为暗条纹。

激光干涉仪就是基于上述干涉原理制成的测量仪器,它以稳频激光器作为光源,把被测量引入干涉仪的一支光路中,通过测量由于两支光路光程差变化引起的干涉条纹变化,可以获得与几何路程和介质折射率相关的信息,实现以激光波长作为标尺对被测长度的测量。

迈克尔逊型激光干涉仪是纳米测量中最为常用的激光干涉仪,它是一种双光束干涉仪,基本原理如图1所示。

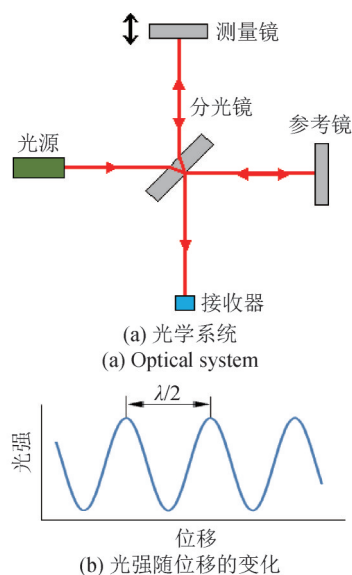


图1 迈克尔逊干涉仪原理图

Fig.1 Schematic diagram of Michelson interferometer

从稳频激光器发出的光被分光镜分成测量光束和参考光束,它们分别被可移动的测量镜和固定的参考镜反射回来后,在分光镜处相遇并产生干涉,干涉信号的光强随着测量光束和参考光束之间光程差的变化呈周期性变化(周期为激光波长的一半)。通过对干涉信号进行分析处理,即可

得到测量镜的位移信息。

与迈克尔逊干涉仪不同,法布里-珀罗干涉仪是一种多光束干涉仪,由于其在测量分辨力方面独具优势,在纳米测量中也有一些应用。法布里-珀罗干涉仪的基本原理如图2所示,当一束光进入由两块相互平行、具有很高反射率的反射镜组成的法布里-珀罗腔时,光线在两个反射镜之间多次反射,每次反射时均有一部分光透过反射镜,用透镜将法布里-珀罗腔两边的透射光汇聚,在其焦平面上即可观察到多光束干涉条纹。干涉信号的光强可以表示为

$$I_T = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2 \cdot \frac{1}{1 + \frac{4R \sin^2(\delta/2)}{(1-R)^2}} I_0 \quad (3)$$

式中: δ 为由相邻光束的光程差引起的相位差; R 为反射镜的反射率; A 为反射镜的光强吸收率。为了显示光束的传播路径,图2(a)中入射光有一定的角度,当激光垂直射入法布里-珀罗腔时,干涉信号的光强随反射镜位移的变化周期也为二分之一波长,如图2(b)所示,但是干涉条纹要比迈克尔逊干涉仪细得多。

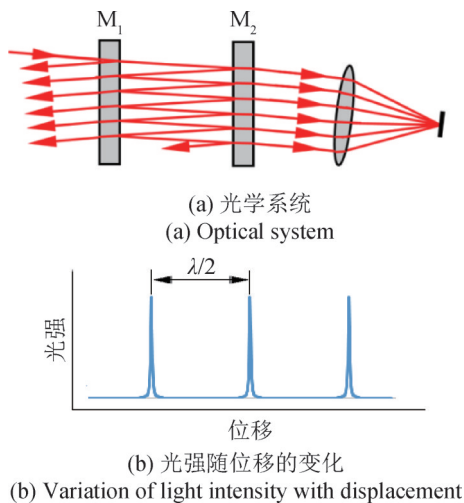


图2 法布里-珀罗干涉仪原理图

Fig.2 Schematic diagram of Fabry-Perot interferometer

2 迈克尔逊干涉仪在纳米测量中的应用

迈克尔逊型激光干涉仪是长度测量中应用最广泛的一类激光干涉仪,在纳米几何参数和材料特性等测量领域中备受关注。

2.1 基于迈克尔逊干涉仪的测量方法

根据所使用的光源和干涉信号处理方式不同,

迈克尔逊型激光干涉仪可分为单频激光干涉仪(也称为零差激光干涉仪)和双频激光干涉仪(也称为外差激光干涉仪)。用迈克尔逊型激光干涉仪测量位移的基本原理如图3所示^[13-14]。

图3(a)所示为零差激光干涉仪,它采用单频稳频激光器作为光源,是一种直流测量系统,其干涉信号是在最亮和最暗之间变化的信号。由于测量准确度会受到电平零漂的影响,零差激光干涉仪主要应用于温度等条件控制较好的实验室环境。图3(b)所示为外差激光干涉仪,它采用稳频的双频激光器作为光源,是在零差激光干涉仪基础上发展的一种干涉仪。由稳频 He-Ne 激光器发出的两束偏振方向正交、频率略有差异的线偏振光,一部分被分光镜反射,经过偏振片到达探测器 A,形成被差频调制的信号;另一部分透过分光镜,被偏振分光镜分开,形成测量光束和参考光束,与零差激光干涉仪类似,测量光束和参考光束分别被测量镜和参考镜反射后,在偏振分光镜处相遇,然后经过偏振片到达探测器 B。当测量镜固定不动时,探测器 B 输出以两束光的差频振荡的拍频信号;当测量镜沿轴线方向移动时,由于多普勒效应,测量光束的频率将发生变化,探测器 B 的输出信号上叠加了一个测量光束频率变化。比较两个探测器接收的光的相位变化,即可得出测量镜移动的距离,即

$$\Delta x = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi \quad (4)$$

式中: $\Delta\phi$ 为探测器处的相位变化; λ 为测量光的波长。

从上述工作过程可以看出,外差激光干涉仪是一个交流测量系统,干涉信号可用交流放大器进行放大,即使在光强较弱的情况下,仍可通过高放大倍数得到较好的电信号,因此比零差激光干涉仪更适用于工程现场应用。外差激光干涉仪的主要局限性是由于频率混合而存在非线性测量误差。

迈克尔逊干涉仪在纳米测量领域中应用广泛。为了解决用于原子力显微镜、轮廓仪、台阶仪、扫描电子显微镜等纳米测量仪器校准的各类纳米级表面形貌样板的校准问题,许多国家研制了纳米准确度测量系统,如美国 NIST 研制的测量范围为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$,点对点测量不确定度

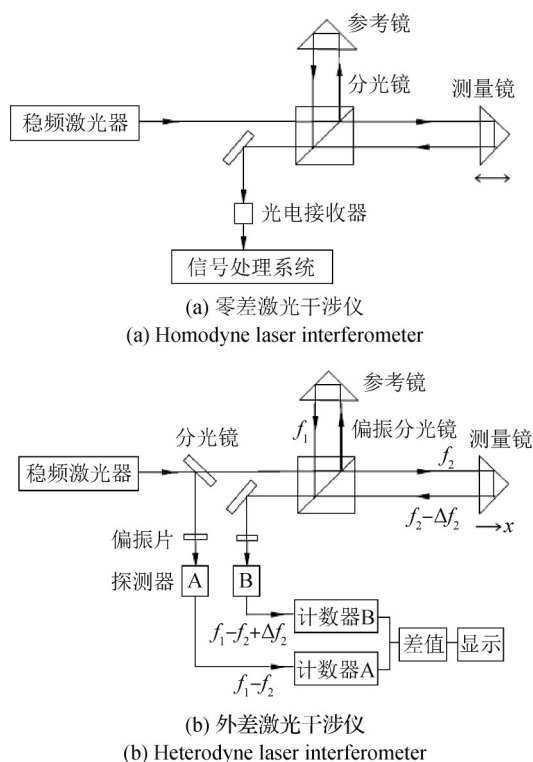


图3 基于迈克尔逊干涉仪的位移测量系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of displacement measurement system based on Michelson interferometer

不高于 1 nm 的分子测量机^[2]和德国 Ilmenau 技术大学研制的测量范围为 25 mm × 25 mm × 5 mm, 测量分辨力为 1.24 nm 的纳米测量机等^[1], 在这些装置中都采用激光干涉仪来实现位移测量。迈克尔逊干涉仪在纳米力学测试系统校准和高精度线膨胀系数测量等方面也有广泛应用^[15-17]。

2.2 激光干涉仪在纳米测量机中的应用

为了研究微纳米表面形貌测量与校准技术, 解决节距和台阶高度等纳米级实物标准的校准问题, 航空工业计量所研制了纳米测量机, 采用 3 台基于迈克尔逊干涉原理的外差激光干涉仪实现了 X, Y, Z 方向位移的可溯源测量^[18]。纳米测量机采用测头固定不动而被测对象移动的方式完成扫描测量, 为此, 特制了一个由 3 块相互垂直的平面反射镜组成的屋角形反射镜, 它与运动系统刚性连接, 其 3 个相互垂直的面分别作为 X, Y, Z 方向 3 台激光干涉仪的测量镜。3 台激光干涉仪的测量光束分别垂直于屋角反射镜的 3 个反射面, 且与测量机运动系统的 X, Y, Z 轴运动轴线平行并重合, 它们的轴线正交于测头测量点, 从而形成具有零

阿贝偏置特点的三维激光干涉测量系统。

纳米测量机中所用外差激光干涉仪以波长为 633 nm 的稳频氦氖激光器作为光源, 其工作原理如图 4 所示。稳频激光器发出的光束被消偏振分光棱镜 BS₁ 分成测量光和参考光。测量光和参考光分别经过声光调制器 AOM₁ 和 AOM₂, 经声光调制后取两束光的一级衍射光, 得到两束具有相同偏振态和一定频率差的光。这两束光分别经过光纤耦合器、单模保偏光纤、光纤准直器形成两束光斑直径为 2 mm 的光。然后测量光经过 λ/2 波片, 到达偏振分光镜 PBS₁, 一小部分光被反射, 大部分光透过 PBS₁, 然后经过 λ/4 波片, 垂直射向屋角反射镜并被反射, 反向通过 λ/4 波片后返回偏振分光镜 PBS₁ 并被反射, 然后被偏振分光镜 PBS₃ 反射, 经过 λ/4 波片, 再次垂直射向屋角反射镜并被反射, 通过 λ/4 波片和偏振分光镜 PBS₃, 到达分光镜 BS₂。同时, 参考光经过 λ/2 波片, 到达偏振分光镜 PBS₂, 一小部分光被反射, 大部分光透过 PBS₂, 经过 λ/4 波片, 被角锥棱镜反射, 然后反向通过 λ/4 波片, 被偏振分光镜 PBS₂ 和 PBS₄ 反射, 经过 λ/4 波片, 被另一块角锥棱镜反射, 然后通过 λ/4 波片和偏振分光镜 PBS₄, 经直角棱镜反射后, 到达分光镜 BS₂。测量光与参考光在分光镜 BS₂ 处相遇, 产生干涉, 干涉信号由光电探测器 PD₁ 接收, 输出一个包含测量光束频率变化的信号。被偏振分光镜 PBS₁ 和 PBS₂ 反射的光束在分光镜 BS₃ 处相遇, 干涉信号由光电探测器 PD₂ 接收, 输出被差频调制的信号。根据 PD₁ 和 PD₂ 输出的信号, 可以计算出屋角反射镜移动的距离。

由图 4 可以看出, 该外差激光干涉仪的特点是通过声光调制器用单频激光器产生两束完全分开的有一定频差的激光, 分别作为测量光和参考光

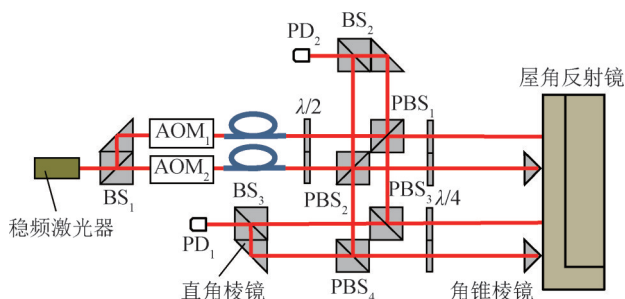


图4 用于纳米测量机的激光干涉仪

Fig.4 Laser interferometer used in nano measuring machine

来实现外差干涉,从而避免了频率混叠。该激光干涉仪采用双光程光学系统,将测量分辨力提高了一倍,同时采用测量光路和参考光路对称式分布的结构,有效减小了测量中环境变化造成的影响。为了减小激光器发热对测量系统的影响,通过单模保偏光纤将激光引入干涉仪的光学系统。该激光干涉仪在设计上遵循了等光程、共光路、无频率混叠等原则,克服了普通外差干涉仪的缺点,提高了测量准确度。

航空工业计量所研制的纳米三维测量机如图5所示,由测量系统、运动系统、控制系统以及保温和减振系统组成。上述3台光轴相互正交的激光外差干涉仪与2台干涉测角仪及测头共同组成测量系统,激光外差干涉仪用于三维位移测量,测角仪用于监测测量过程中运动系统的姿态变化,纳米测量机可以采用光学和原子力等测头对被测样品进行瞄准^[19],整个测量系统建立在零膨胀玻璃基础框架之上。由X、Y、Z运动平台和六维微位移工作台组合构成的运动系统可以实现毫米级范围纳米级精确定位。由上位机和以DSP为核心的嵌入式系统组成的控制系统实现测量数据同步采集以及运动系统的运动控制等功能。纳米测量机的测量范围($X \times Y \times Z$)达到 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,在 $0 \sim 25 \text{ mm}$ 范围内,X向和Y向测量不确定度优于 30 nm ,在 $0 \sim 0.1 \text{ mm}$ 范围内,Z向测量不确定度达到 4 nm 。

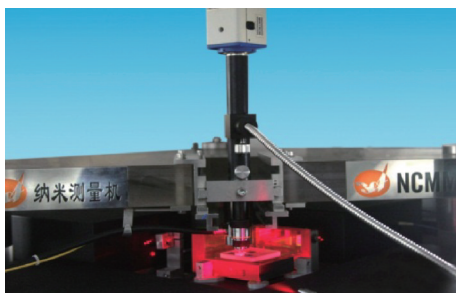


图5 纳米测量机

Fig.5 Nano measuring machine

2.3 激光干涉仪在线膨胀系数测量装置中的应用

为了解决在精密工程领域中广泛应用的低膨胀材料线膨胀系数的精确测量问题,航空工业计量所研究了基于激光干涉测量技术的纳米级线膨胀系数的测量方法^[20]。

材料的线膨胀系数体现了由单位温度变化所引起的单位长度材料的长度变化。根据测量不确定度分析,试样长度变化的测量不确定度是低膨胀材料线膨胀系数测量不确定度的主要来源。为了精确识别微小的试样长度变化,在线膨胀系数测量装置中,采用高稳定性迈克尔逊激光干涉仪对材料长度随温度的变化进行测量,测量不确定度达到纳米量级。

低膨胀材料线膨胀系数测量装置中采用的激光干涉仪如图6所示。由稳频He-Ne激光器发出的光束被小偏振分光镜 PBS_1 分为两束,其中透过 PBS_1 的为测量光束,被 PBS_1 反射的为参考光束。测量光束透过大偏振分光镜 PBS_2 和 $\lambda/4$ 波片,在试样左端面反射,然后回到 PBS_2 并被反射,经平面反射镜 M_1 , M_2 转折后,到达大偏振分光镜 PBS_3 并被反射,然后通过 $\lambda/4$ 波片,在试样右端面反射,通过 $\lambda/4$ 波片和 PBS_3 ,到达角锥棱镜。然后反向通过上述光路,经过 $\lambda/2$ 波片和直角棱镜,回到 PBS_1 。参考光束经过直角棱镜和 $\lambda/2$ 波片后,通过 PBS_2 和2个 $\lambda/4$ 波片,被 PBS_3 , M_2 , M_1 , PBS_2 反射,然后通过2个 $\lambda/4$ 波片和 PBS_3 ,到达角锥棱镜。然后反向通过上述光路,回到 PBS_1 。最后,测量光束与参考光束在小偏振分光镜 PBS_1 处相遇,产生的干涉信号由光电探测器PD接收。

由图6可以看出,用于线膨胀系数测量装置的激光干涉仪也是一个双光程干涉仪,测量光束在

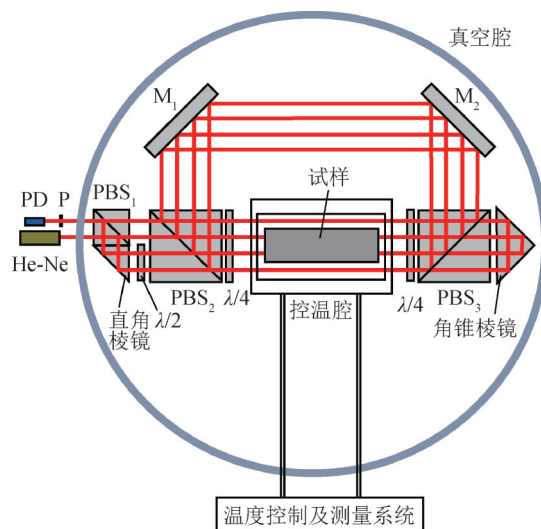


图6 用于线膨胀系数测量的激光干涉仪

Fig.6 Laser interferometer used in measurement of linear thermal expansion coefficient

试样的左、右端面各反射两次。同时,除试样本身长度所引起的光程差外,测量光束与参考光束具有相等的光程长度和相似的传播路径。这种准平衡式光学系统结构有利于减小环境温度变化等外界干扰对干涉测量结果的影响,提高激光干涉仪的稳定性,从原理上保证了测量系统具有较强的抗干扰能力和较高的测量分辨力,并且以单一干涉系统实现了对被测试样长度变化的双端直接测量。

基于上述激光干涉测量原理研制的低膨胀材料线膨胀系数测量装置如图7所示。该装置采用恒温液体循环方式建立均匀稳定的控温腔环境,通过热辐射传导方式在20~100℃范围内实现对试样温度的调控,控温腔的外部加有屏蔽层以减小对干涉仪的影响,采用精密Pt100铂电阻温度计对被测试样的温度进行测量。激光干涉测量系统的核心部分安装在一块低膨胀微晶玻璃底板上,并置于真空腔内,激光器和光电接收器置于真空腔外部,以进一步提高干涉系统的稳定性。该装置的测量不确定度可达到 $2 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$,适用于各种材料特别是低膨胀材料的线膨胀系数测量。

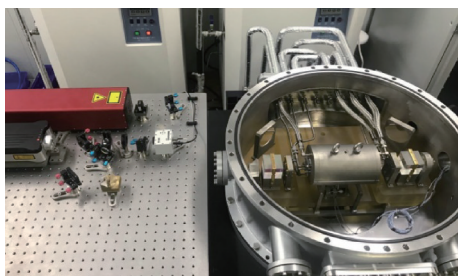


图7 低膨胀材料线膨胀系数测量装置

Fig.7 Measurement device of linear thermal expansion coefficient of low expansion material

3 法布里-珀罗干涉仪在纳米测量中的应用

相比于迈克尔逊干涉仪,法布里-珀罗干涉仪的高分辨力特点使其在高分辨力微位移传感器校准等应用场景中更具优势,基于法布里-珀罗干涉仪的位移测量方法引起了纳米测量技术研究者的关注^[21-22]。

3.1 基于法布里-珀罗干涉仪的测量方法

利用法布里-珀罗干涉仪测量位移时,通常采用频率追踪测量方法,基本原理如图8所示^[23]。

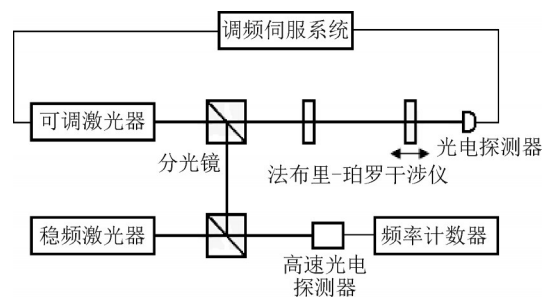


图8 法布里-珀罗干涉仪位移测量原理图^[23]

Fig.8 Schematic diagram of displacement measurement by Fabry-Perot interferometer^[23]

可调激光器发出的光束垂直进入法布里-珀罗腔后产生多光束干涉,干涉信号由光电探测器接收。如果一块腔镜沿光轴方向移动,干涉信号的光强会随之发生变化,当法布里-珀罗腔的长度与入射光的频率满足谐振条件时,光强会出现很高且尖锐的峰值。此时腔长与激光频率的关系可以表示为

$$L = N \cdot \frac{c}{2nf} \quad (5)$$

式中: L 为法布里-珀罗腔的长度; c 为真空光速; f 为法布里-珀罗腔的谐振频率; N 为谐振频率 f 所对应的模数; n 为腔内介质的折射率。在测量过程中,将可调激光器的波长锁定在法布里-珀罗腔的光强极大值上,当测量镜移动时,法布里-珀罗腔光强极大值处的频率随着腔长的改变而发生变化,可调激光器的波长也随之发生变化。可调激光器的频率及其变化可以通过与稳频激光器进行拍频来测量,故可以通过法布里-珀罗干涉腔长度与频率的关系,计算出测量镜的位移,即

$$\delta L = -\frac{\delta f}{f} L \quad (6)$$

式中: δL 为测量镜的位移; δf 为可调激光器频率的变化。

上述位移测量方法,通过跟踪测量法布里-珀罗腔谐振频率的变化,将位移测量转化为可调激光器频率的测量,避免了外差激光干涉仪的非线性误差,在提高位移测量分辨力方面具有明显优势。然而,由于受到可调激光器的波长调节范围和光电接收器的频率响应范围等限制,该方法的测量范围一般只能达到微米量级。这使得其主要应用于小范围高分辨力位移测量中,在工业测量中的应用远不如迈克尔逊干涉仪广泛。

扩大法布里-珀罗干涉仪的测量范围是推广其应用的关键,引起了不少研究者的兴趣^[24-26]。航空工业计量所研究了一种通过测量位移开始和结束时法布里-珀罗腔的长度来扩大位移测量范围的方法^[27],在图8所示的法布里-珀罗干涉仪中增加了一套干涉光路,构成了如图9所示的位移测量系统。该系统采用两台可调激光器来产生两束偏振方向互相垂直、频率有一定差异的可调激光,将这两束光同时引入法布里-珀罗腔中,形成两个干涉系统。在测量过程中,首先将两束可调激光的频率分别锁定在法布里-珀罗腔的两个相邻谐振峰上,然后利用拍频方法测量出两束可调激光的频率,即可得到这两个谐振峰的频率,并计算出对应的模数。根据式(5)可以计算出此时法布里-珀罗腔的长度,通过测量位移开始和位移结束时法布里-珀罗腔的长度,并计算其差值,即可确定测量镜的位移,即

$$\Delta L = L_2 - L_1 = \frac{c}{2n} \left(\frac{N_2}{f_2} - \frac{N_1}{f_1} \right) \quad (7)$$

式中: L_1 和 L_2 分别为测量开始和结束时法布里-珀罗腔的长度; f_1 和 f_2 分别为两个被测谐振峰的频率; N_1 和 N_2 分别为两个被测谐振峰的模数。

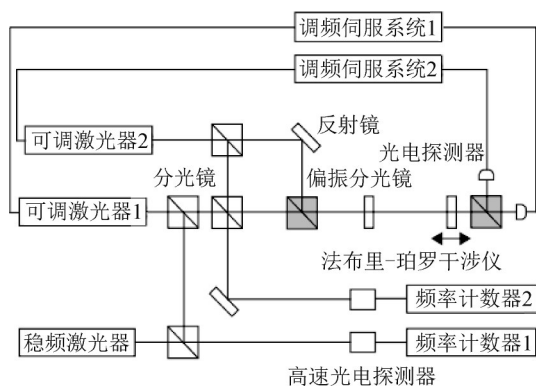


图9 大范围法布里-珀罗干涉仪位移测量原理图^[27]

Fig.9 Schematic diagram of large range displacement measurement by Fabry-Perot interferometer^[27]

由于这种方法并不要求在位移过程中对干涉信号进行连续监测,因此,可以得到较大的位移测量范围,可用于精密位移传感器的校准。

3.2 激光干涉仪在高准确度位移测量装置中的应用

以 Lawall 提出的一种基于法布里-珀罗干涉仪的位移测量装置为例,介绍法布里-珀罗干涉仪在纳米测量中的应用。该装置利用温度调谐的氦氖

激光器和两个独立可调声光调制器产生两束不同频率的光,用于对法布里-珀罗腔的两个相邻模进行测量^[26]。

所用法布里-珀罗干涉仪的光学系统如图10所示。图10(a)为用于产生两束不同频率光的装置,由温度调谐氦氖激光器发出的频率为 ν_1 的单模线偏振光,通过扩束器和法拉第隔离器(OI-1)后,经声光调制器(“BS” AOM)分为与入射光偏振方向相同的零级光束和频率红移40 MHz、偏振正交的1级光束。零级光束通过偏振分光镜,聚焦到以频率 ν_{red} 工作的声光调制器(“red” AOM)中,经过该AOM的1级衍射光被平面镜反射回来后再次通过AOM,产生频率为 $\nu_1 - 2\nu_{\text{red}}$ 的垂直偏振光,然后该光束通过电光相位调制器(“red” EOM)。来自“BS” AOM的1级光束聚焦到以频率 ν_{blue} 工作的声光调制器(“blue” AOM)中,经平面镜反射回来后通过AOM,成为频率为 $\nu_1 - 40 \text{ MHz} + 2\nu_{\text{blue}}$ 的水平偏振光,然后通过另一个EOM(“blue” EOM)。两束光经偏振分光镜后会合,通过光学隔离器(OI-2),形成与水平方向成45°的线偏振光,然后进入单模保偏光纤。图10(b)所示为法布里-珀罗腔及相关光学元件。从单模保偏光纤射出的光通过准直器、模式匹配透镜和光学隔离器后,通过偏振分光棱镜和四分之一波片,进入一个由固定的凹球面反射镜和可移动的平面反射镜组成的法布里-珀罗腔,经过多次反射的光被偏振分光镜反射,进入光电探测器。光信号中包含“red”和“blue”两个通道的信息。两束光可以通过AOM独立地调谐,并且通过它们的偏振方向和相位调制频率来区分。从“red” AOM射出的零级光束与来自碘稳频激光器的光进行拍频,以获得光学频率的绝对值。

通过控制驱动AOM的振荡器的频率,可以调整红移和蓝移光束之间的频率差,使其对应于所需腔长范围的自由光谱范围。用红移和蓝移两束光的频率分别跟踪法布里-珀罗腔的两个相邻模的谐振频率,根据单个谐振光学频率和两个谐振频率差的信息,即可计算出法布里腔-珀罗腔长度的变化。Lawall用该装置实现了25 mm位移测量,测量不确定度主要受限于光学标准。

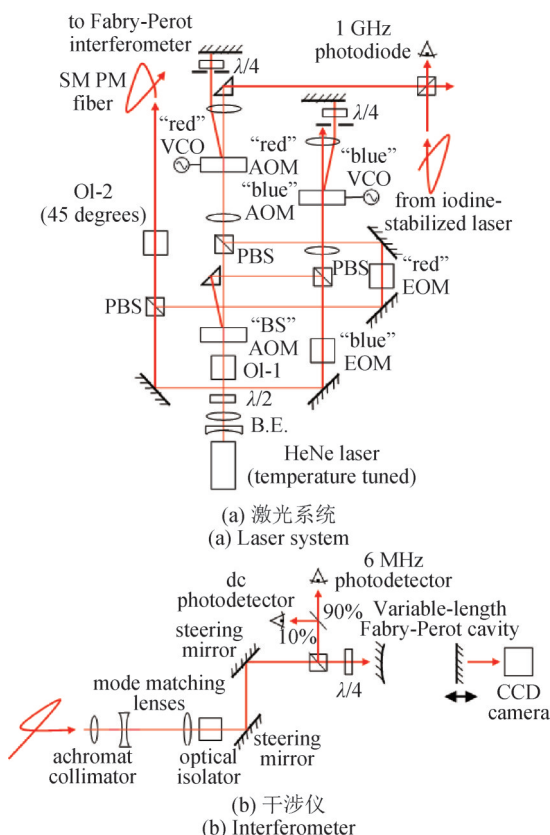


图10 用于位移测量的法布里-珀罗干涉仪光学系统原理图^[26]
Fig.10 Schematic diagram of optical system of Fabry-Perot interferometer for displacement measurement^[26]

4 激光干涉仪设计和使用中的关键问题

通过实例对在纳米测量中应用的迈克尔逊干涉仪和法布里-珀罗干涉仪进行了介绍。迈克尔逊干涉仪结构比较简单,使用方便,根据具体测量对象和测量要求,可以进行相应改进,以进一步提高其测量准确性。法布里-珀罗激光干涉仪使用较为复杂,但它可以获得更高的测量分辨力。无论哪种激光干涉仪,要实现纳米级测量准确度,在激光干涉仪的设计和使用中,必须注意一些实际问题,如阿贝误差、环境影响、测量分辨力,以及外差激光干涉仪的非线性误差和法布里-珀罗干涉仪的测量范围限制等。

4.1 符合阿贝原则的结构布局

在高准确度测量系统中,激光干涉仪的结构布局必须符合阿贝原则,这是长度计量的最基本原则。根据阿贝原则,被测量轴线只有与标准量的测量轴线重合或在其延长线上时,才会避免因导轨误差引起的一次测量误差,得到精确的测量

结果。在2.2节中所述的纳米测量机中,采用屋角反射镜的3个相互垂直反射面分别作为3台激光干涉仪的测量镜来测量X,Y,Z方向的位移,3台激光干涉仪的测量光束中心线均应通过纳米测量机测头的瞄准点,否则,当工作台运动过程中出现姿态变化时,就会在测量结果中引入阿贝误差。为了方便实现3台激光干涉仪测量光束的调整,在每台干涉仪前端设计了石英平片阿贝误差消除装置,可使激光束平移,而保持方向不变,将3束光投影重心调整重合,从而将残余阿贝臂控制在 ± 0.5 mm范围内,建立“零”阿贝误差的测量系统。在2.3节所述的线膨胀系数测量装置中,激光干涉仪的测量轴线也与被测试样的轴线重合,符合阿贝原则。对于法布里-珀罗激光干涉仪,如3.2节所述测量系统,也要注意保证测量轴线与被测位移轴线相一致。

4.2 光学系统稳定性的提高

激光干涉仪具有很高的测量灵敏度,但这也使它容易受到测量环境变化的干扰。为了减小环境变化对测量结果的影响,在激光干涉仪光学系统的结构设计中应尽量遵循共光路、等光程原则,即激光干涉仪测量光束与参考光束的传播路径和光程长度尽量接近,使两束光处于相同的工作环境,从而减小温度、气压和湿度等变化对测量结果的影响。迈克尔逊干涉仪测量光路与参考光路分离,设计中尤其要注意这一点,如在图4所示激光干涉仪光学系统中,参考光束与测量光束平行且相互靠近,在图6所示干涉仪光学系统中,测量光束与参考光束的光程差主要是被测试样的长度。等光程不仅意味着要使干涉仪的测量臂与参考臂光路长度相等,还要使两光路中的光学元件的设置也尽量一致。采用这种设计方法可以显著地提高激光干涉仪的测量准确度。对于准确度要求高的测量场合,可以通过建立真空测量环境,消除空气折射率误差的影响,如图6和图10(b)所示的干涉仪光学系统均置于真空腔内。

4.3 非线性误差的消除和补偿

用外差激光干涉仪测量位移时,由于偏振光学元件性能不完善和光源偏振态不理想等原因,测量结果中会存在非线性误差^[28]。对纳米级准确度测量来说,这种非线性误差是主要误差来源之

一。为了消除非线性误差,一些研究者在干涉系统设计中采用单频激光器和声光调制器来代替双频激光器产生差频光束,使两个不同频率和偏振态的光束完全分开^[29],如图4所示的外差激光干涉仪就是采用单频激光器和声光调制器组合的方式产生外差光源,避免了频率混叠。同时,可以通过各种非线性误差修正方法来减小外差激光干涉仪的测量不确定度,如Heydemann提出的利用最小二乘法对信号进行非线性拟合的误差修正法^[30]和Hou等人提出的通过计算双频激光干涉仪两路测量信号的相位和来补偿非线性误差的方法^[31]等。通过现有的非线性误差修正方法,能够将非线性误差的影响控制到亚纳米量级,可以在一定程度上提高外差激光干涉仪的测量准确性。要进一步提高激光干涉仪的测量准确性,还需继续探索能够从原理上消除此类误差的测量方法。

4.4 光学分辨力的提升

迈克尔逊激光干涉仪采用电子细分方法,通常可以获得亚纳米级测量分辨力。为了进一步提高干涉系统的测量分辨力,在迈克尔逊干涉仪光学系统设计中,可以通过设计多倍光程光路,使测量光在测量镜上多次反射,提高光学分辨力。如在图4所示的激光干涉系统中,测量光在屋角反射镜表面反射两次,形成一个双光程干涉系统,在图6所示的激光干涉仪中,测量光在被测试样的两端各反射了两次,同样也构成了一个双光程干涉系统,使激光干涉仪的测量分辨力较普通单光程干涉仪的测量分辨力提高了一倍。Pisani通过让测量光束在两个近似平行的反射镜之间多次反射,用零差迈克尔逊干涉仪实现了亚皮米级分辨力^[32]。

法布里-珀罗干涉仪在原理上可以实现很高的测量分辨力,但实际分辨力也会受到光学元件质量、系统调整精度和频率锁定误差等限制。法布里-珀罗腔反射镜应具有良好的面形质量和足够高的反射率,同时应精确调整干涉系统,以保证足够高的条纹精细度。提高法布里-珀罗干涉仪的信号峰值锁定精度,充分发挥其测量分辨力优势,是法布里-珀罗干涉仪应用研究的一个重点。

4.5 法布里-珀罗干涉仪量程的扩展

多数纳米测量场合中,在保证纳米级测量准确度的情况下,要求测量范围能够达到几十至几

百毫米。一般情况下,法布里-珀罗干涉仪的测量范围较小,无法满足这种测量需求,因此,其在较大位移测量中的应用远不如迈克尔逊干涉仪广泛。但是从3.2节中的介绍可以看出,法布里-珀罗干涉仪并不限于测量非常小的位移,通过适当的方法,在保持测量分辨力优势的同时,可以实现测量范围的扩展。在采用频率追踪法的测量系统中,通过换模锁定激光频率的方法,能够将法布里-珀罗干涉仪的测量范围扩大^[22],但测量速度比较慢。相比之下,通过对测量镜在不同位置时法布里-珀罗腔的长度进行测量来确定位移的方法,能够更快地完成大范围测量^[24]。由3.2节所述的例子可以看出,激光干涉系统需要分别定位到两个不同长度的法布里-珀罗腔,这是一个非连续测量过程,与基于迈克尔逊干涉仪的位移测量方法存在显著不同。扩大测量范围是推广用法布里-珀罗干涉仪的关键,也是目前面临的主要技术难点,研究探索高效、实用的大范围测量方法是下一步需要解决的问题。

5 结束语

在介绍纳米测量机、低膨胀材料线膨胀系数测量装置和纳米准确度位移测量装置中应用的激光干涉仪的基础上,总结并分析了用于纳米测量的激光干涉仪在设计和使用中应注意的关键问题,为高准确度激光干涉仪的设计及其在纳米测量领域中的应用提供了重要参考。伴随着几十年来激光、光学元件制造、信号处理和相关测量技术的不断发展,激光干涉测量已发展成为一项比较成熟的高准确度测量技术,激光干涉仪在当前和未来一段时间内仍将是几何量高精度测量和量值溯源的主要途径之一。从纳米测量的特点和需求来看,纳米测量中使用的激光干涉仪未来将向测量准确度更高和结构尺寸更小的方向发展。目前,激光干涉仪的测量准确度主要受到光学元件质量等原因导致的非线性误差以及由于光源波动和电噪声干扰等引起的误差的制约,随着光源和光学器件性能的提高、干涉信号检测和处理技术的发展以及新的测量原理和技术的应用,激光干涉仪的性能和测量准确度将进一步提高,从而实现亚纳米级甚至皮米级测量准确度。现有高准确度激

光干涉仪体积相对较大、结构较为复杂,未来随着新型光学和电子元器件的研制和集成度的提高,激光干涉仪的结构将更加小型化,从而更方便地集成到各种测量设备和系统中,更好地满足纳米级以及更高准确度测量的需求。

参考文献

- [1] 陈津平, 张宝峰, 胡晓东, 等. 微型激光干涉仪应用于纳米测量机[J]. 计量技术, 2002 (4): 6-8.
CHEN J P, ZHANG B F, HU X D, et al. Application of micro laser interferometer in nano measuring machine[J]. Measurement technique, 2002(4): 6-8. (in Chinese)
- [2] DREXLER K E. Building molecular machine systems [J]. Trends in biotechnology, 1999, 17(1): 5-7.
- [3] MANSKE E, HAUSOTTE T, MASTYLO R, et al. Nanopositioning and nanomeasuring machine for high accuracy measuring procedures of small features in large areas[J]. Proceedings of SPIE—the international society for optical engineering, 2005, 5965: 596509-596511.
- [4] FAN K C, LI R J, PENG X. Design and verification of micro/nano-probes for coordinate measuring machines[J]. Nanomanufacturing and metrology, 2019, 2(1): 1-15.
- [5] 王芳, 施玉书, 张树, 等. 基于硅晶格常数的纳米线宽计量技术[J]. 计量科学与技术, 2022, 66 (4): 13-18, 47.
WANG F, SHI Y S, ZHANG S, et al. Nanowire width metrology technology based on lattice constant of silicon [J]. Metrology science and technology, 2022, 66 (4): 13-18, 47. (in Chinese)
- [6] MASSA E, MANA G, KUETGENS U, et al. Measurement of the {220} lattice-plane spacing of a ^{28}Si X-ray interferometer[J]. Metrologia, 2011, 48: S37-S43.
- [7] 谈宜东, 徐欣, 张书练. 激光干涉精密测量与应用[J]. 中国激光, 2021, 48 (15): 1504001.
TAN Y D, XU X, ZHANG S L. Precision measurement and applications of laser interferometry[J]. Chinese journal of lasers, 2021, 48(15): 1504001. (in Chinese)
- [8] 贺寅竹, 赵世杰, 尉昊赞, 等. 跨尺度亚纳米分辨的可溯源外差干涉仪技术[J]. 物理学报, 2017, 66 (6): 60601.
HE Y Z, ZHAO S J, WEI H Y, et al. Traceable trans-scale heterodyne interferometer with subnanometer resolution[J]. Acta physica sinica, 2017, 66(6): 60601. (in Chinese)
- [9] WEICHERT C, KOECHERT P, KOENING R, et al. A heterodyne interferometer with periodic nonlinearities smaller than ± 10 pm[J]. Measurement science and technology, 2012, 23(9): 94005.
- [10] 黎永前, 朱名铨. 光干涉技术在纳米精度测量中的应用及发展[J]. 航空精密制造技术, 2002, 38 (2): 32-36.
LI Y Q, ZHU M Q. Optical interferometry technology and its development in nanometric accuracy measurement [J]. Aviation precision manufacturing technology, 2002, 38 (2): 32-36. (in Chinese)
- [11] 王冬, 崔建军, 张福民, 等. 用于微位移测量的迈克尔逊激光干涉仪综述[J]. 计量学报, 2021, 42 (1): 1-8.
WANG D, CUI J J, ZHANG F M, et al. Review of Michelson laser interferometer for micro displacement measurement [J]. Acta metrologica sinica, 2021, 42(1): 1-8. (in Chinese)
- [12] 段小艳, 任冬梅. 激光干涉法微位移测量技术综述[J]. 计测技术, 2012, 32 (6): 1-6.
DUAN X Y, REN D M. Review of micro-displacement measurement technology based on interferometry [J]. Metrology and measurement technology, 2012, 32(6): 1-6. (in Chinese)
- [13] 阿克塞尔多涅斯, 瑞合诺尔. 激光测量技术原理与应用[M]. 张书练, 译. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016.
DONGES A, NOLL R. Laser measurement technology [M]. Translated by ZHANG S L. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2016. (in Chinese)
- [14] 冯其波, 谢芳, 张斌. 光学测量技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
FENG Q B, XIE F, ZHANG B. Optical measurement technology and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [15] 任冬梅, 朱振宇, 万宇, 等. 纳米力学测试系统位移传感器校准装置[J]. 计测技术, 2011, 31 (5): 3-5, 26.
REN D M, ZHU Z Y, WAN Y, et al. Device for calibration of displacement transducer of nanoindentation instrument [J]. Metrology and measurement technology, 2011, 31(5): 3-5, 26. (in Chinese)
- [16] SCHODEL R. Ultra-high accuracy thermal expansion measurements with PTB's precision interferometer [J]. Measurement science and technology, 2008, 19: 84003.

- [17] CORDERO J, HEINRICH T, SCHULDT T, et al. Interferometry based high-precision dilatometry for dimensional characterization of highly stable materials[J]. Measurement science and technology, 2009, 20: 95301.
- [18] 王霖, 朱振宇, 李华丰. 一种应用于纳米测量机的高精度干涉仪[J]. 微纳电子技术, 2011, 48 (7): 464-468.
WANG J, ZHU Z Y, LI H F. High precision heterodyne interferometer for nanometer measuring machine [J]. Micronanoelectronic technology, 2011, 48 (7): 464-468. (in Chinese)
- [19] 李强, 任冬梅, 兰一兵, 等. 用于纳米级表面形貌测量的光学显微测头[J]. 计测技术, 2022, 42 (2): 91-96.
LI Q, REN D M, LAN Y B, et al. Optical microscope probe for measurement of nano-scale topography [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(2): 91-96. (in Chinese)
- [20] 任冬梅, 兰一兵, 段小艳, 等. 一种用于线膨胀系数测量的高稳定性激光干涉系统[J]. 计测技术, 2019, 39 (5): 37-39.
REN D M, LAN Y B, DUAN X Y, et al. A high stability laser interferometer for measurement of coefficient of linear thermal expansion [J]. Metrology and measurement technology, 2019, 39(5): 37-39. (in Chinese)
- [21] HOWARD L, STONE J, FU J. Real-time displacement measurements with a Fabry-Perot cavity and a diode laser [J]. Precision engineering, 2001, 25: 321-325.
- [22] 马骥驰, 李岩, 孙文科, 等. 可调波长半导体激光法布里-珀罗干涉仪[J]. 光学学报, 2008, 28 (7): 1296-1300.
MA J C, LI Y, SUN W K. Fabry-Perot interferometer using tunable diode laser [J]. Acta optica sinica, 2008, 28 (7): 1296-1300. (in Chinese)
- [23] 段小艳, 任冬梅, 朱振宇, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪的微位移测量方法研究[J]. 计测技术, 2013, 33 (1): 23-25.
DUAN X Y, REN D M, ZHU Z Y, et al. Research on micro-displacement measurement method based on Fabry-Perot interferometer [J]. Metrology and measurement technology, 2013, 33(1): 23-25. (in Chinese)
- [24] 余载泉, 徐毓娴, 徐毅, 等. 大范围高分辨率法-珀干涉仪[J]. 光学技术, 2000, 26 (3): 199-201.
YU Z Q, XU Y X, XU Y, et al. Fabry-Perot interferometer with large range and high resolution [J]. Optical technique, 2000, 26(3): 199-201. (in Chinese)
- [25] HAITJEMA H, SCHELLEKENS P, WETZELS S. Calibration of displacement sensors up to 300 μm with nanometre accuracy and direct traceability to a primary standard of length [J]. Metrologia, 2000, 37: 25-33.
- [26] LAWALL J R. Fabry-Perot metrology for displacements up to 50 mm [J]. Optical society of america, 2005, 12 (22): 2786-2798.
- [27] 任冬梅, 朱振宇, 段小艳, 等. 一种基于法布里-珀罗干涉仪的位移测量方法 [J]. 计测技术, 2018, 38 (4): 26-29.
REN D M, ZHU Z Y, DUAN X Y, et al. A displacement measurement method based on Fabry-Perot interferometry [J]. Metrology and measurement technology, 2018, 38 (4): 26-29. (in Chinese)
- [28] ZHU Z, FU X, REN D, et al. A method for measurement of nonlinearity of laser interferometer based on optical frequency tuning [J]. Sensors, 2017, 17: 2721.
- [29] WU C M, LAWALL J, DESLATTES R D. Heterodyne interferometer with subatomic periodic nonlinearity [J]. Optical society of america, 1999, 19(38): 4089-4094.
- [30] HEYDEMANN P L. Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers [J]. Applied optics, 1981, 20(19): 3382-3384.
- [31] HOU W, WILKENING G. Investigation and compensation of the nonlinearity of heterodyne interferometers [J]. Precision engineering, 1992, 14(2): 91-98.
- [32] PISANI M. A homodyne Michelson interferometer with sub-picometer resolution [J]. Measurement science and technology, 2009, 20.

(本文编辑:刘圣晨)



第一作者:李强(1976—),男,高级工程师,主要从事纳米测量技术研究,在微纳米表面形貌参数测量与校准、微纳尺度材料力学特征参数测量与校准、复杂微结构测量与评价等领域具有丰富经验。先后主持技术基础、创新基金、仪器研制等项目6项,参与完成国家仪器专项等项目10余项,先后获省部级科技进步奖3项,授权发明专利10余项,参与起草纳米专业领域计量技术规范5项。