

文章编号: 1673-3851 (2012) 04-0538-05

基于法拉第旋光效应的激光外差干涉测量系统的优化设计

刘燕娜, 严利平, 杨 涛, 钟 挺, 陈本永

(浙江理工大学纳米测量技术实验室, 杭州 310018)

摘 要: 描述了基于法拉第旋光效应的激光外差干涉测量方法及其系统,通过分析测量平面镜顺时针和逆时针转动时光路结构的几何关系确定了该系统实施纳米位移测量应满足的条件,重点讨论了角锥棱镜固定时测量平面镜、波片和角锥棱镜三者之间的位置关系,实现了基于法拉第旋光效应的激光外差干涉测量系统的优化设计,得到了位移测量范围为 $-10\sim 10\text{ mm}$ 时允许被测对象转动范围最大的系统参数,为该系统的研制奠定了技术基础。

关键词: 外差干涉仪; 位移测量; 法拉第效应; 优化设计

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A

0 引 言

纳米测量技术是微电子制造、超精密机械加工和微机电系统研制等领域技术发展的关键。无论是扫描探针显微镜、电容传感器、电感测微仪等非光学纳米测量方法,还是迈克尔逊干涉仪、激光外差干涉仪、法布里-珀罗干涉仪等光学纳米测量方法,都获得了纳米或亚纳米级的测量精度或分辨率,其中,激光干涉仪不仅具有较高的测量精度,而且可以直接溯源到米定义,因此激光干涉纳米位移测量方法成为国内外研究的重点^[1-3]。

激光外差干涉技术具有抗干扰性好和测量范围大等优点,除了可用于测量长度或位移外,还可用于测量角度、直线度和振动等,在精密测量领域有着广泛的应用^[4-7]。激光外差干涉测量的关键是两个不同频率的光波信号能够形成一定频差的拍频信号,但是在实际测量时,由于被测对象不可避免地转动会导致无法形成正确的外差干涉。本文描述了采用法拉第旋光器实现当被测对象存在较大转动角度时仍能保证外差干涉正确实施的方法,对基于法拉第旋光效应的激光外差干涉测量系统进行了详细优化。

1 测量系统

基于法拉第旋光效应的激光外差干涉纳米位移测量系统如图 1 所示,双频激光器输出两个频差约为 1.9MHz 的正交线偏振光,经第一偏振分光镜分成频率不同的两束线偏振光 f_1 和 f_2 ,其中被反射的激光束 f_1 的偏振态平行于纸面,经参考平面镜反射后,由于两次透过第一 $\lambda/4$ 波片,其偏振态改变 90° 后透过第一偏振分光镜,入射至检偏器并与检偏器的透振方向成 45° ;透过第一偏振分光镜的激光束 f_2 的偏振态与纸面垂直,经过法拉第旋光器(旋

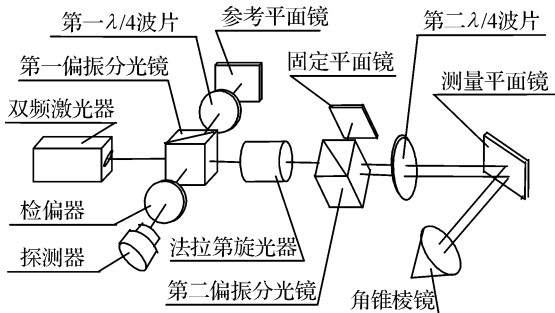


图 1 基于法拉第旋光效应的激光外差干涉测量系统框图

收稿日期: 2011-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(90923026,50827501);浙江省自然科学基金项目(Y1110495)

作者简介: 刘燕娜(1986-),女,浙江宁波人,硕士研究生,研究方向为激光干涉测量技术。

通讯作者: 陈本永,电子邮箱: chenby@zstu.edu.cn

光 45°)、第二偏振分光镜(与纸面呈 45° 放置)、第二 $\lambda/4$ 波片透射后入射到测量平面镜,由测量平面镜反射后经角锥棱镜反射,再次入射至测量平面镜,经测量平面镜、第二 $\lambda/4$ 波片、第二偏振分光镜、固定平面镜反射后,可实现该激光束的原路返回,返回光束再次经过法拉第旋光器,成为振动方向平行于纸面的线偏振光,经第一偏振分光镜反射后入射检偏器,与激光束 f_1 形成拍频信号由探测器检测作为测量信号。

2 测量条件

在图 1 所示的测量系统中,即使被测对象使测量平面镜有较大角度的转动,只要经测量平面镜反射的光束被角锥棱镜捕捉,则可实现测量光束的原路返回,形成正确的外差干涉测量。因此,在该测量系统中,第二 $\lambda/4$ 波片、测量平面镜和角锥棱镜的合理布置,将决定着该系统的正确实施和测量范围的大小。

2.1 数学模型

当测量平面镜 M_1 顺时针或逆时针旋转到可测量位置时,激光束 f_2 在其运动前后的光程变化如图 2、图 3 所示,图中粗实线表示测量平面镜 M_1 的起始位置,细实线则为激光束 f_2 在此时刻该系统中所走的光程;粗虚线表示测量平面镜 M_1' 运动到新的位置,细虚线表示激光束 f_2 在新时刻该系统中所走的光程; x 为测量平面镜 M_1 沿 X 轴的平动位移, θ 为 M_1 旋转的角位移; α 为 M_1 在起始位置时入射激光束

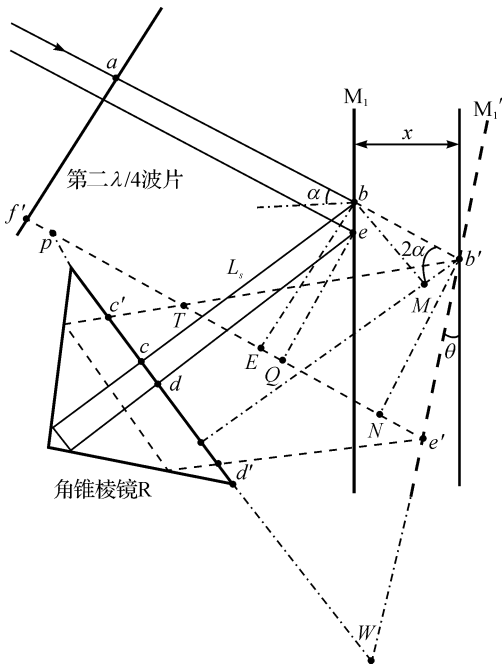


图 2 测量平面镜顺时针旋转

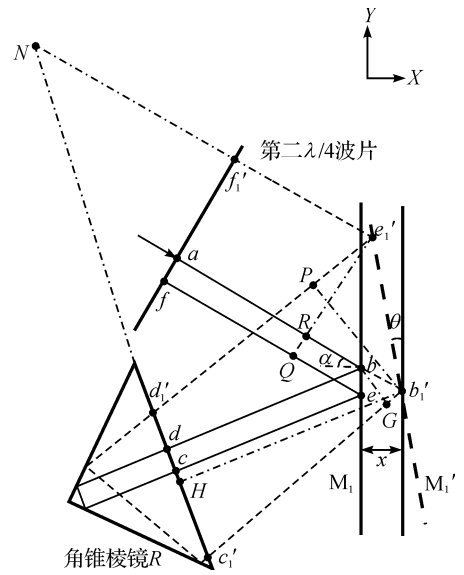


图 3 测量平面镜逆时针旋转

f_2 的入射角; Dr 为角锥棱镜的直径, n 为角锥棱镜的折射率; L_s 为激光束 f_2 在 M_1 的反射点 b 到角锥棱镜 R 的入射面的垂直距离; cd 为 M_1 在起始位置处激光束 f_2 垂直入射到角锥棱镜 R 表面的入射点 c 和经角锥棱镜 R 反射后的出射点 d 之间的距离。

由图 2、图 3 可知,随着测量平面镜 M_1 的平移和转动,激光束在角锥棱镜 R 的入射点从 c 移动到 c' (c_1'),出射点也从 d 移动到 d' (d_1')。当测量平面镜有较大位移或转动时,将导致反射的光束无法入射到角锥棱镜或第二 $\lambda/4$ 波片。因此,合适选择、优化参数(α, L_s)的值,可使该测量系统有最佳的位移测量范围。

当测量平面镜顺时针旋转时,由图 2 可知:

$$cc' = c'H - cH =$$

$$\left(\frac{x}{\cos\alpha} \cdot \cos 2\alpha + L_s\right) \cdot \tan 2\theta - 2x \cdot \sin\alpha \quad (1)$$

激光束经角锥棱镜反射后的出射点由下式^[8]确定:

$$dd' = cc' + \tan\theta_T \cdot \frac{Dr}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

其中, θ_T 为入射光在角锥棱镜 R 上的折射角。

$$c'd' = cc' + cd + dd' \quad (3)$$

$$cp = L_s \cdot \tan 2\alpha - \frac{c'd'}{\cos 2\alpha} \cdot \cos 2\theta \quad (4)$$

$$cH = 2x \cdot \sin\alpha \quad (5)$$

$$HW = \left(\frac{x}{\cos\alpha} \cdot \cos 2\alpha + L_s\right) \cdot \tan(90^\circ - \alpha - \theta) \quad (6)$$

$$b'N = \frac{c'd'}{\cos(\alpha - \theta)} \cdot \cos 2\theta \cdot \cos(\alpha - \theta) \quad (7)$$

当测量镜逆时针旋转时,由图3可得:

$$c_1'c = 2x \cdot \sin\alpha +$$

$$\left(\frac{x}{\cos\alpha} \cdot \cos 2\alpha + Ls\right) \cdot \tan(-2\theta) - cd \quad (8)$$

$$dd_1' = c_1'c + \tan(-\theta_T) \cdot \frac{Dr}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

$$c_1'd_1' = c_1'c + cd + dd_1' \quad (10)$$

$$e_1'd_1' = \frac{\sin(\alpha + \theta)}{\cos(\alpha - \theta)} \cdot c_1'd_1' + \frac{x \cdot \cos 2\alpha}{\cos\alpha \cdot \cos 2\theta} + \frac{Ls}{\cos 2\theta} \quad (11)$$

$$Nd_1' = \frac{e_1'd_1' \cdot \sin(2\alpha - 2\theta)}{\cos 2\alpha} \quad (12)$$

$$dN = Nd_1' + dd_1' + \frac{1}{2}cd \quad (13)$$

$$b_1'e_1' = \frac{c_1'd_1' \cdot \cos 2\theta}{\cos(\alpha - \theta)} \quad (14)$$

$$e_1'R = b_1'e_1' \cdot \cos(\alpha - \theta) \quad (15)$$

2.2 激光束 f_2 从角锥棱镜 R 顺利出射的条件

从图2可知,角锥棱镜 R 的表面要求尽可能地靠近测量镜 M_1 才能捕捉到入射点 c , dd' 是关于 α 、 Ls 、 θ 的函数。当测量平面镜顺时针旋转时,保证激光束 f_2 从角锥棱镜 R 顺利出射需要满足下式:

$$\frac{1}{2}Dr > \frac{cd}{2} + dd' \quad (16)$$

由图3,当测量平面镜逆时针旋转时,应满足:

$$\frac{1}{2}Dr > \frac{cd}{2} + dd_1' \quad (17)$$

2.3 角锥棱镜不阻挡第二次反射光线的条件

为了增加测量平面镜在 X 轴方向最大允许平移量 x_m 和顺时针最大允许旋转角度 θ_m ,要求角锥棱镜 R 尽可能地靠近测量平面镜 M_1 ,但是这也可能阻碍反射光线 $e'f'$ 入射第二 $\lambda/4$ 波片,因此,当测量平面镜顺时针旋转时,角锥棱镜不阻挡第二次反射光线,

$$\frac{1}{2}Dr < cp + \frac{1}{2}cd \quad (18)$$

由图3,当测量平面镜逆时针旋转时,应满足:

$$\frac{1}{2}Dr < dN + \frac{1}{2}cd \quad (19)$$

2.4 测量连续性条件

测量平面镜在 X 轴正向平移量很大,旋转角度为 0° 时,角锥棱镜 R 也有可能接收不到光线而不能实现测量,虽然随着测量平面镜在顺时针方向旋转一定角度 θ 后,角锥棱镜 R 又重新接收到了光线,但是在这整个过程中,测量的连续性遭到了破坏。因

此,当测量平面镜顺时针旋转时,根据图2所示,应满足:

$$\frac{Dr}{2} + \frac{cd}{2} > cH \quad (20)$$

当测量平面镜逆时针旋转时,如图4所示,为了保证测量的连续性,应满足:

$$\frac{Dr}{2} - \frac{cd}{2} > dT \quad (21)$$

$$dT = -2x \cdot \sin\alpha \quad (22)$$

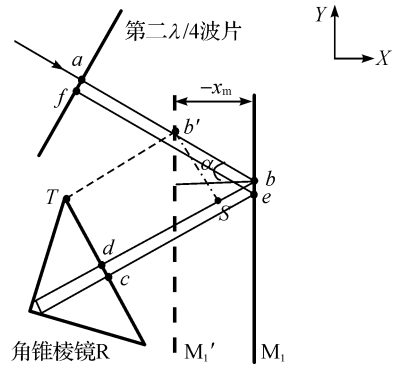


图4 测量镜连续性旋转条件

2.5 测量平面镜旋转不碰到角锥棱镜的条件

当测量平面镜接近于角锥棱镜 R,其顺时针旋转有可能会与角锥棱镜 R 碰撞,如图2所示,为了保证测量平面镜顺时针旋转时不会碰到角锥棱镜 R,必须满足:

$$\frac{1}{2}Dr + \frac{cd}{2} < cH + HW \quad (23)$$

2.6 第二次反射的光线返回第二 $\lambda/4$ 波片的条件

当第二 $\lambda/4$ 波片直径一定时,第二次反射的光线有可能从波片侧边射出。因此,如图2,为了保证第二次反射的光线能顺利入射波片,需满足:

$$\frac{Dr}{2} > b'N \quad (24)$$

当测量平面镜逆时针旋转时,如图3,同理可得

$$\frac{Dr}{2} > e_1'R \quad (25)$$

3 系统优化分析

综合上述保证测量正确实施的条件,根据式(16)~式(21)、式(23)~式(25),当已知 $Dr=25.4$ mm, $cd=6$ mm, $n=1.5163$, $cd=6$ mm 时,令 $Ls=45$ mm, $\alpha=13^\circ$,则可得系统的测量范围如图5所示的阴影部分,当被测位移 $x=-10$ mm 时,转角测量范围为 $\theta=-9.459 \sim -1.38^\circ$,当 $x=10$ mm 时,转角测量范围为 $\theta=-2.329 \sim 3.32^\circ$ 。当被测对象发生顺时针变化($\theta>0^\circ$)或逆时针变化($\theta<0^\circ$)时,位

移测量范围将逐渐变小,而角度的测量范围将逐渐变大。

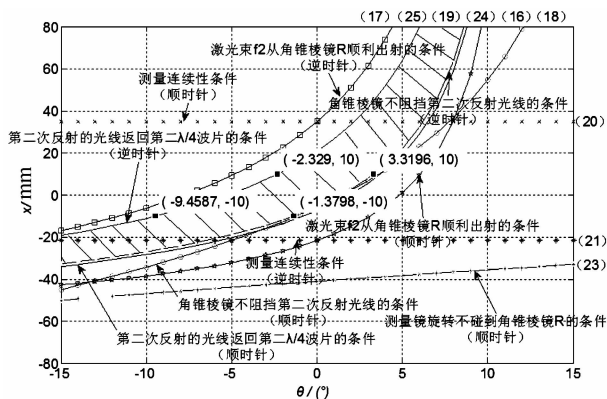


图 5 系统测量范围

3.1 L_s 的优化

根据图 5 所确定的测量范围,为了观察测量范围区域的曲线是如何随着 L_s 的改变而变化的,令 $\alpha = 13^\circ$,分别取 $L_s = 40, 45, 50, 55, 60$ mm,测量范围的变化如图 6 所示,当被测对象不发生转动即 $\theta = 0^\circ$ 时,系统的测量范围为 $-9 \sim 20$ mm,不随 L_s 取值的变化而变化;在顺时针变化区域内,在同一被测位移时,随着 L_s 取值变大,被测对象的转角变小;在逆时针变化区域内,在同一被测位移时,随着 L_s 取值变大,被测对象的转角变大。

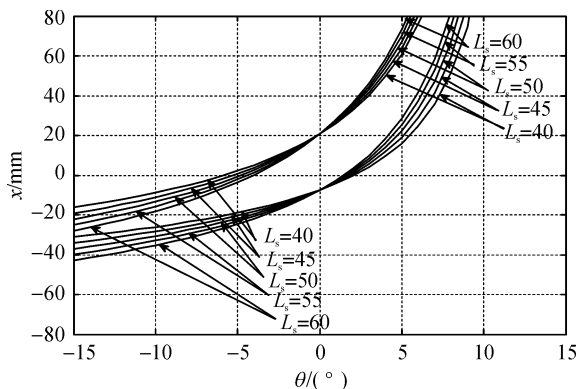


图 6 测量范围随 L_s 取值变化曲线

3.2 α 的优化

根据图 5 所确定的测量范围,为了观察测量范围区域的曲线是如何随着 α 的改变而变化的,令 $L_s = 45$ mm,分别取 $\alpha = 8, 11, 13, 15^\circ$,测量范围的变化如图 7 所示。图 7 可见,在顺时针变化区域内,在同一被测位移时,随着 α 取值变大,被测对象的转角变大;在逆时针变化大于 5° 区域内,在同一被测位移时,随着 α 取值变大,被测对象的转角亦变大,但没有顺时针变化趋势明显。

综上变化规律,该测量系统若要实现位移测量

范围为 $-10 \sim 10$ mm 时允许被测对象的转角范围最大,可取 $L_s = 45$ mm, $\alpha = 13^\circ$ 。

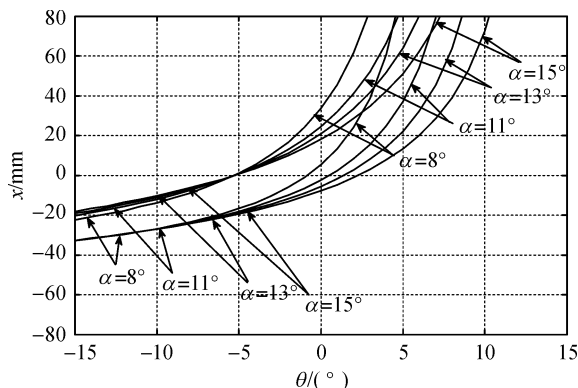


图 7 测量范围随 α 取值变化曲线

4 结 论

采用法拉第旋光器、波片、测量平面镜和角锥棱镜组合实现激光外差干涉测量的系统,在角锥棱镜固定的情况下,研究分析并建立了测量平面镜顺时针和逆时针转动时该系统应满足的测量条件,在此基础上,对测量平面镜、波片和角锥棱镜三者之间的位置关系进行了优化分析,获得了在一定测量范围内实现正确激光外差干涉纳米位移测量的系统参数,完成了基于法拉第旋光效应的激光外差干涉测量系统的优化设计。

参考文献:

- [1] 杨国光. 近代光学测试技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997: 119.
- [2] 陈本永, 李达成. 纳米测量技术的挑战与机遇[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(5): 547-550.
- [3] Chen B Y, Yan L P, Yao X G, et al. Development of a laser synthetic wavelength interferometer for large displacement measurement with nanometer accuracy[J]. Optics Express, 2010, 18(3): 3000-3010.
- [4] 赵思维, 严利平, 杨涛, 等. 基于 DSP 的激光外差干涉信号处理方法[J]. 浙江理工大学学报, 2011, 28(2): 217-220.
- [5] Kim J A, Bae E W, Kim S H, et al. Design methods for six-degree-of-freedom displacement measurement systems using cooperative targets[J]. Precision Engineering, 2002, 26(1): 99-104.
- [6] Zhang J H, Menq C H. A linear/angular interferometer capable of measuring large angular motion[J]. Measurement Science Technology, 1999, 10(12): 1247-1253.
- [7] Chen B Y, Zhang E Z, Yan L P, et al. A laser interferometer for measuring straightness and its position based

on heterodyne interferometry[J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(11): 113-115.

[8] 匡萃方, 冯其波, 刘 斌. 角锥棱镜用于激光直线度测量的特性分析[J]. 光学技术, 2005, 31(2): 282-285.

Optimal Design of Laser Heterodyne Interferometric Measurement System Based on the Faraday Effect

LIU Yan-na, YAN Li-ping, YANG Tao, ZHONG Ting, CHEN Ben-yong

(Nanometer Measurement Laboratory, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The laser heterodyne interferometric measurement system based on the Faraday Effect is described. By analyzing the geometric relationship of the optical configuration of the system when the measurement mirror is rotated in clockwise and counterclockwise, the conditions to ensure the system to realize nanometer displacement measurement are determined. The position relationships of the measurement mirror, the wave plate and the retroreflector are discussed in detail when the retroreflector is fixed. And then the optimization design for the system is implemented. The optimal parameters of the system with the displacement range of $-10 \sim 10$ mm is obtained while the measured object has a capable of maximal rotary angle. This provides a technical support for the development of the system.

Key words: heterodyne interferometer; displacement measurement; faraday effect; optimal design
(责任编辑: 杨元兆)