

基于干涉条纹成像的测角系统设计及其离轴测量精度

宋莹 刘玉娟

Design of an angle measurement system based on interferometric fringe imaging and its off-axis measurement accuracy

SONG Ying, LIU Yu-juan

引用本文:

宋莹, 刘玉娟. 基于干涉条纹成像的测角系统设计及其离轴测量精度[J]. *中国光学*, 2024, 17(6): 1397-1407. doi: 10.37188/CO.2024-0049

SONG Ying, LIU Yu-juan. Design of an angle measurement system based on interferometric fringe imaging and its off-axis measurement accuracy[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1397-1407. doi: 10.37188/CO.2024-0049

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0049>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

干涉星敏器测角精度影响因素的研究

Influencing factors of angle measurement accuracy of an interferometer star tracker

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1433 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0232>

基于粒子群算法离轴多反光学系统设计

Design of off-axis multi-reflective optical system based on particle swarm optimization

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1435 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0087>

应用于大视场生物成像分析仪的离轴三反显微物镜设计

Objective lens design with off-axis three-mirror system for large field of view biological imaging analyzer

中国光学 (中英文). 2021, 14(5): 1177 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0020>

静态干涉型高温温度场成像探测方法研究

Imaging and detection method for static interferometric high-temperature temperature field

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 796 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0168>

全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器

Panoramic bispectral infrared imaging interference spectrum measurement inversion instrument

中国光学 (中英文). 2022, 15(5): 1092 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0114>

利用反射式圆光栅的振镜转角测量

Rotational angle measurement of galvanometer using reflective circular grating

中国光学 (中英文). 2021, 14(3): 643 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0179>

文章编号 2097-1842(2024)06-1397-11

基于干涉条纹成像的测角系统设计 及其离轴测量精度

宋莹^{1,2}, 刘玉娟^{2*}

(1. 吉林建筑大学 电气与计算机学院, 吉林 长春 130119;
2. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130061)

摘要: 基于干涉条纹成像的测角系统测量精度随着测量范围的增大而下降, 单纯提高精定位的细分倍数并不能提高测量精度。针对这一问题, 本文围绕非成像系统的参数设计方法及大测量范围下的精度变化情况展开研究。建立了双光栅干涉系统及光楔阵列波前分割的数学模型, 给出了近轴条件下非成像光学系统的参数设计方法。设计了一台一维高精度光学测角系统, 并对该系统在整个测角范围内的测量误差进行了分析和计算。结果显示: 利用本文提出的数学模型和方法, 所设计的测角系统在 $[-5^\circ, 5^\circ]$ 的测量范围内, 近轴区的测角分辨率为 $0.02''$ 。随着测量范围的增大, 干涉条纹相位非线性变化引起的精定位误差成为系统测角误差的主要来源, 最大测量角度下精密轴的测量误差为 $0.42''$ 。上述结果表明采用本文提出的模型和参数设计方法, 可以设计出具有较高测角精度的光学测角系统。

关键词: 测角系统; 干涉条纹成像; 非成像光学设计; 离轴测量精度

中图分类号: TH741 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2024-0049 CSTR: 32171.14.CO.2024-0049

Design of an angle measurement system based on interferometric fringe imaging and its off-axis measurement accuracy

SONG Ying^{1,2}, LIU Yu-juan^{2*}

(1. School of Electronics and Computer, Jilin Jianzhu University, Changchun 130119, China;
2. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China)

* Corresponding author, E-mail: liuyujuan@jlu.edu.cn

Abstract: The accuracy of an angle measurement system based on interferometric fringe imaging decreases as the measurement range increases. Merely increasing the subdivision factor of precise positioning cannot improve the accuracy of the measurement. In this case, this paper primarily focuses on the parameter design method in non-imaging optical systems and accuracy changes under a wide measurement range. The mathematical models for the dual grating interference system and the wavefront segmentation of the optical wedge array were established, and a parameter design method for non-imaging optical systems under paraxial conditions was proposed. A one-dimensional high-precision angle measurement system was designed, and the

收稿日期: 2024-03-13; 修订日期: 2024-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62175236, No. 61905243); 吉林省博士后科研人员择优资助项目(No. 2022)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62175236, No. 61905243); Postdoctoral Merit-Based Support Program of Jilin Province (No. 2022)

measurement error of the system within the measurement range was analyzed and calculated. The results show that the designed angle measurement system achieves a resolution of 0.02" in the paraxial region with a measurement range of $[-5^\circ, 5^\circ]$ based on the mathematical model and method proposed in this paper. As the measurement range expands, the precision positioning errors resulting from nonlinear changes in the phase of interference fringes become the primary source of measurement errors. At the maximum measurement angle, the accuracy of the precision axis reduces to 0.42". The above results demonstrate that the proposed model and parameter design method can be employed to design an optical angle measurement system with high accuracy.

Key words: angle measurement system; interferometric fringe imaging; non-imaging optical design; off-axis measurement accuracy

1 引言

基于光学原理的测角系统广泛应用于面形激光扫描测量、运动平台直线度测量及恒星敏感器等领域。与其他测角原理相比,其具有测量灵敏度高、精度高、对被测物表面无损伤等优点,但同时,光学测角系统也存在测量范围小、大视场与高精度之间难以兼顾、对环境扰动敏感等问题^[1-3]。

2010年, Hutchin R A 研制了一种干涉型光束跟踪器件,其给出了基于干涉条纹成像的光学测角系统的基本组成^[4]。该系统利用双光栅剪切干涉形成干涉条纹,再通过干涉条纹成像,在后像面上形成多个像点,多个像点的明暗变化代表不同的干涉条纹相位信息,利用这一信息进行像点坐标的精密定位,从而实现平行光或无穷远目标入射角或姿态角的测量。与传统的光学测角系统相比,基于干涉条纹成像的光学测角系统具有测量精度高、视场范围大、抗干扰能力强等优点。利用该原理,美国光学物理公司(Optical Physics Company)研制了一种新型的干涉型星敏感器 C-MiST,在 $\pm 10^\circ$ 的视场范围内,信噪比受限的条件下,测量精度可达 $0.0004^\circ(1.44")$,在功率受限模式下,可实现 $0.002^\circ(7.2")$ 的测角精度。由于涉及技术封锁及商业秘密,其系统具体组成结构、参数设计方法、系统校准及误差补偿等相关技术细节尚未公开^[5]。

近年来,国内研究者对基于干涉条纹成像的光学测角系统展开了研究,试图打破技术封锁,推进其国产化进程。2018年,杜娟、白剑等人给出了一种基于二维光栅的双轴干涉型星敏感器,利

用双光栅形成的莫尔条纹成像实现姿态角测量,并给出了成像系统的光学设计方法,其本质上也是基于干涉条纹成像。通过近轴入射角的测量信号进行分析,理论上可以达到0.2"的测角精度。该系统要求两块光栅呈泰伯距离布置,以获得具有较好对比度的莫尔条纹^[6-8]。2021年,张淑芬、董磊等人在近轴菲涅尔衍射条件下,对基于干涉条纹成像的一维高精度光学测角原理进行理论分析,完成了成像光学系统的优化设计,并建立了近轴条件下的测角实验系统。实验结果显示在 $0\sim 0.2^\circ$ 的测量范围内,干涉条纹测量结果与实际入射角变化之间存在良好的线性关系,单光源测量角分辨率达到0.1",同时在实验中还发现,随着视场的增大,存在测量精度下降的问题,但未给出精度下降的原因和数值^[9-11]。2023年,阮宇翔等研究了影响干涉型星敏感器测角系统精度的因素,并分析了光楔阵列不等分、莫尔条纹周期与光楔阵列通光尺寸不匹配、条纹倾斜等因素对测量精度的影响,但以上研究均在近轴范围内展开^[12]。通过多方调研发现国内研究主要关注传统成像光学系统的设计与优化,未给出非成像光学系统的具体设计方法,且均在近轴范围内进行测量精度及误差因素的分析研究^[13-21]。

针对大范围高精度光学测角工程化设计中的问题,本文采用一维朗奇相位光栅作为剪切干涉的器件,沿着光束行进方向建立双光栅剪切干涉场分布及光楔阵列的数学模型。在近轴近似条件下,给出了双光栅干涉系统、像点分布及光楔阵列参数的优化设计方法,完成了实例系统关键参数的设计。利用离轴条件下的数学模型,对大测量范围的基于干涉条纹成像的一维光学测角系统

进行了分析, 给出了 $[-5^\circ, 5^\circ]$ 测量范围内的理论测角误差, 确定了系统的测角精度。

2 测角原理与非成像光学系统建模

2.1 基于干涉条纹成像的光学测角原理

基于干涉条纹成像的一维光束角度测量系统主要由以下几部分组成: 光栅 G_1 、光栅 G_2 、光楔阵列 WA(wedge array), 成像光学系统 IOS(imaging optical system), 焦面阵列探测器 FAD(focal array detector)。根据应用需求 FAD 可选用 CCD、CMOS 等器件。上述光学元件构成的共轴光学系统如图 1 所示。

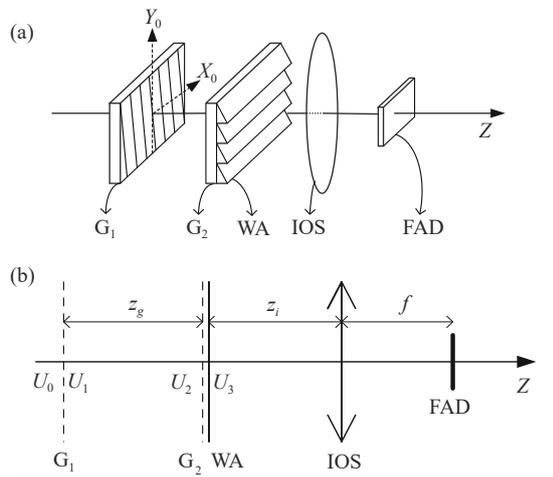


图 1 基于干涉条纹成像的光学测角系统(a)结构示意图及(b)拓扑图

Fig. 1 (a) Structural diagram and (b) topology of optical angle measurement system based on interferometric fringe imaging

图中 z_g 为光栅间距, z_i 为 WA 与 IOS 之间的距离, f 为成像系统焦距^[4]。采用单色平行光入射, 为实现入射平行光的成像, 将 FAD 置于 IOS 的后焦面处, IOS 系统的优化设计已有较为成熟的方案, 具体可参考相关文献 [6, 7, 9-11] 等, 本文将将其视为理想的成像系统。

若不存在双光栅和光楔阵列 WA, 入射光将在 FAD 上将形成一个像点 $S_i(x_i, y_i)$, 称其为目标像点。入射光的角度信息, 可以根据 S_i 的坐标唯一确定, 传统的光学测角系统通过 S_i 的坐标得到角度变化。双光栅使入射光波发生衍射、干涉, 在 G_2 后形成干涉条纹, 光楔阵列对波前的分割进行调制, 形成多个不同传播方向的平面波。经过

成像光学系统后, 在像面上形成多个像点, 称其为子像点 $S_k(x_k, y_k)(k=1, 2, 3 \dots)$ 。利用由子像点坐标直接计算得到的 S_i 坐标实现的测角过程, 称为粗定位。由于子像点强度变化体现了坐标细微变化导致的相位变化, 因此, 可在粗定位的基础上实现像元坐标的精密定位, 该过程被称为精定位^[9, 11]。下面构建双光栅干涉系统及光楔阵列的数学模型。

2.2 光栅干涉系统建模

G_1 和 G_2 的选择首先要考虑干涉条纹的对比度。若选择朗奇振幅光栅等光栅, 容易受到 0 级衍射光的影响。为保证干涉条纹对比度, 要求两块光栅间隔泰伯距离放置, 这就限制了系统的参数设计。为解决该问题, G_1 和 G_2 可采用位相型朗奇光栅, 不考虑光栅口径的限制, 当光栅刻槽方向与 Y 轴平行时, 其复振幅透过率可以表示为:

$$T(x) = t_p(x) \otimes \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - np_g) \quad (1)$$

$$t_p(x) = \begin{cases} \exp(i\psi) & 0 \leq x < p_g/2 \\ 1 & p_g/2 \leq x < p_g \\ 0 & x < 0 \text{ 或 } x \geq p_g \end{cases} \quad (2)$$

式中, $t_p(x)$ 为光栅一个周期内的透过率函数, p_g 为光栅周期, ψ 为相位延迟量。对 $T(x)$ 进行傅立叶变换, 可以得到:

$$F[T(x)] = \frac{2}{n\pi} \exp\left[j\left(\frac{\psi}{2} - n\pi\right)\right] \cos\left(\frac{\psi + n\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta\left(f - \frac{n}{p_g}\right) \quad (3)$$

式中, n 代表光栅的衍射级次。从式 (3) 可知, 当 n 为不为 0 的偶数时, $F[T(x)]=0$ 。在 $\psi=(2m+1)\pi$ ($m=0, \pm 1, \pm 2 \dots$) 的条件下, $F[T(x)]_{n=0}=0$, 不存在包括 0 级在内的所有偶数级次衍射光。当 n 为奇数时, $|F[T(x)]|=2/(n\pi)$, 其中 ± 1 级的衍射效率为 $|F[T(x)]|^2=4/\pi^2=40.5\%$, 其他奇数级次衍射效率按照 $1/n^2$ 衰减, 与 ± 1 级相比可以忽略, 此时式 (3) 可以写为:

$$F[T(x)] = \frac{2j}{\pi} \left[\delta\left(f - \frac{1}{p_g}\right) - \delta\left(f + \frac{1}{p_g}\right) \right] \quad (4)$$

在图 1 所示的测角系统中, G_1 位于 $z=0$ 的平面上, 设 G_1 的刻槽方向沿着 Y 轴逆时针旋转 φ_r 。根据 (4) 式, G_1 复振幅透过率的傅立叶变换可以

表示为:

$$F[T_{G_1}] \approx \frac{2j}{\pi} \left[\delta\left(f_x - \frac{\cos\varphi_r}{p_g}, f_y - \frac{\sin\varphi_r}{p_g}\right) - \delta\left(f_x + \frac{\cos\varphi_r}{p_g}, f_y + \frac{\sin\varphi_r}{p_g}\right) \right]. \quad (5)$$

单位振幅入射平面波的复振幅为 $U_0(x, y) = \exp[j2\pi(f_a x + f_b y)]$ 。式中, $f_a = \sin\gamma_x/\lambda$, $f_b = \sin\gamma_y/\lambda$, 分别为入射光波在 X 及 Y 方向的空间频率。经过 G_1 后, 光场复振幅的傅立叶变换为:

$$F[U_1] = F[U_0] \otimes F[T_{G_1}] = \frac{2j}{\pi} [\delta(f_x - f_{x(+1)}, f_y - f_{y(+1)}) - \delta(f_x - f_{x(-1)}, f_y - f_{y(-1)})], \quad (6)$$

式中, $(f_{x(+1)}, f_{y(+1)})$ 与 $(f_{x(-1)}, f_{y(-1)})$ 为入射光波经过 G_1 后的 +1 级及 -1 级衍射光的空间频率, $f_{x(+1)} = f_a + \cos\varphi_r/p_g$, $f_{y(+1)} = f_b + \sin\varphi_r/p_g$, $f_{x(-1)} = f_a - \cos\varphi_r/p_g$, $f_{y(-1)} = f_b - \sin\varphi_r/p_g$ 。 G_2 位于平面 $z=z_g$ 上, U_1 传播 z_g 的距离, 则入射到 G_2 的光场复振幅 U_2 的傅立叶变换为:

$$F[U_2] = F[U_1] \cdot H(f_x, f_y), \quad (7)$$

式中, $H(f_x, f_y) = jkz_g \sqrt{1 - \lambda^2 f_x^2 - \lambda^2 f_y^2}$ 是光波传播在频域中的传递函数。与 G_1 相似, G_2 的刻槽方向绕 Z 轴顺时针旋转 φ_r 角, 则 G_2 复振幅透过率的傅立叶变换可以表示为:

$$F[T_{G_2}] \approx \frac{2j}{\pi} \left[\delta\left(f_x - \frac{\cos\varphi_r}{p_g}, f_y + \frac{\sin\varphi_r}{p_g}\right) - \delta\left(f_x + \frac{\cos\varphi_r}{p_g}, f_y - \frac{\sin\varphi_r}{p_g}\right) \right]. \quad (8)$$

经过 G_2 后的光波复振幅 U_3 的傅立叶变化表示为:

$$F[U_3] = F[U_2] \otimes F[T_{G_2}] = -\frac{4}{\pi^2} \exp\left(jkz_g \sqrt{1 - \lambda^2 f_{x(+1)}^2 - \lambda^2 f_{y(+1)}^2}\right) [\delta(f_x - f_{x(+1,+1)}, f_y - f_{y(+1,+1)}) - \delta(f_x - f_{x(+1,-1)}, f_y - f_{y(+1,-1)})] + \frac{4}{\pi^2} \exp\left(jkz_g \sqrt{1 - \lambda^2 f_{x(-1)}^2 - \lambda^2 f_{y(-1)}^2}\right) [\delta(f_x - f_{x(-1,+1)}, f_y - f_{y(-1,+1)}) - \delta(f_x - f_{x(-1,-1)}, f_y - f_{y(-1,-1)})], \quad (9)$$

式中, $(f_{x(+1,+1)}, f_{y(+1,+1)})$ 与 $(f_{x(-1,-1)}, f_{y(-1,-1)})$ 为经过

G_1 及 G_2 的 (+1,+1) 及 (-1,-1) 级衍射光的空间频率, 其中 $f_{x(+1,+1)} = f_a + 2\cos\varphi_r/p_g$, $f_{y(+1,+1)} = f_b$, $f_{x(-1,-1)} = f_a - 2\cos\varphi_r/p_g$, $f_{y(-1,-1)} = f_b$ 。 (+1,+1) 及 (-1,-1) 级衍射光经过 ISO 后, 在近轴条件下, 在 FAD 上形成的理想像点坐标分别为 $((f_a + 2\cos\varphi_r/p_g)\lambda f, f_b \lambda f)$ 和 $((f_a - 2\cos\varphi_r/p_g)\lambda f, f_b \lambda f)$, 其中 λ 为入射光的波长。两个像点具有相同的 y 坐标, 当 φ_r 较小时, 两个像点的 x 坐标差近似为 $4\lambda f/p_g$ 。在可见光波段, 该坐标差可达到数个毫米。例如, 当 $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$, $f = 50 \text{ mm}$, $p_g = 20 \mu\text{m}$ 时, 像点 x 坐标差为 5.32 mm 。可见, 经过 ISO 后, (+1,+1) 及 (-1,-1) 级衍射光的像点存在明显的空间分离。在 FAD 尺寸较大时, 这两个像点可能作为像面上的干扰像点存在。通过像点的分布特性, 可通过数据处理剔除干扰像点的影响。 $(f_{x(+1,-1)}, f_{y(+1,-1)})$ 与 $(f_{x(-1,+1)}, f_{y(-1,+1)})$ 为经过 G_1 及 G_2 的 (+1,-1) 及 (-1,+1) 级衍射光的空间频率, 其中 $f_{x(+1,-1)} = f_a$, $f_{y(+1,-1)} = f_b + 2\sin\varphi_r/p_g$, $f_{x(-1,+1)} = f_a$, $f_{y(-1,+1)} = f_b - 2\sin\varphi_r/p_g$ 。当 φ_r 较小时, 认为 (+1,-1) 及 (-1,+1) 级衍射光传播方向一致并产生干涉, 形成的干涉场的傅立叶变换为:

$$F[U_{\text{int}}] = \frac{4}{\pi^2} [\delta(f_x - f_a, f_y - f_b - 2\sin\varphi_r/p_g) \cdot \exp\left(jkz_g \sqrt{1 - \lambda^2 f_{x(+1)}^2 - \lambda^2 f_{y(+1)}^2}\right) + \delta(f_x - f_a, f_y - f_b + 2\sin\varphi_r/p_g) \cdot \exp\left(jkz_g \sqrt{1 - \lambda^2 f_{x(-1)}^2 - \lambda^2 f_{y(-1)}^2}\right)]. \quad (10)$$

进行傅立叶逆变换后求得干涉场强度分布为:

$$I_{\text{int}} = U_{\text{int}} U_{\text{int}}^* = A [1 + \cos(2\pi y/p_f + \Phi_f)], \quad (11)$$

$$p_f = p_g / (4\sin\varphi_r), \quad (12)$$

式中, $A = 32/\pi^4$, p_f 为干涉条纹周期。由式 (12) 可见, p_f 与入射角无关, 仅由光栅周期 p_g 和光栅偏转角 φ_r 决定。 Φ_f 为干涉条纹相位, 当 φ_r 一定时, Φ_f 可以表示为:

$$\Phi_f = 2\pi z_g / \lambda \cdot \left(\sqrt{1 - \lambda^2 f_{x(+1)}^2 - \lambda^2 f_{y(+1)}^2} - \sqrt{1 - \lambda^2 f_{x(-1)}^2 - \lambda^2 f_{y(-1)}^2} \right). \quad (13)$$

以上为位相型朗奇光栅形成的干涉场分布的

数学模型^[13-14]。可见在图 1 所示的测角系统中, 入射光波经过光栅 G_1 和 G_2 的衍射及干涉, 光能将重新分布, 在 G_2 后端形成 Y 轴方向的相位分布 (干涉条纹平行于 X 轴)。干涉条纹对比度与光栅间距 z_g 无关, 不受泰伯距离的限制, 在非泰伯距离处也能产生高对比度的干涉条纹, 为 G_1 和 G_2 的轴向距离设计和装调提供了较为宽松的裕量。另外, 光栅转角 φ_r 越大, 干涉条纹周期越小, 通过调整光栅的转角可以灵活调整干涉条纹的周期, 便于与后面的光学元件配合。

2.3 光楔阵列建模

光楔阵列(WA)可视为多个光楔的组合, 一维光楔如图 2 所示。

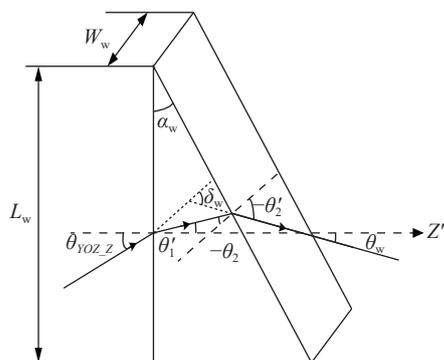


图 2 单光楔对光束角度作用示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the effect of a single optical wedge on the beam angle

图中 Z' 轴平行于 Z 轴, 光栅的楔角位于 YOZ 平面, 楔角为 α_w 。光楔对入射光 X 方向传播分量的影响很小。将入射光投影到 YOZ 平面, 与 Z 轴的夹角为 θ_{YOZ_Z} , 经过光楔后, 光束出射角为 θ_2 。与入射光相比, 其角度变化为 δ_w 。规定顺时针旋转至法线的角度为正, 逆时针旋转至法线的角度为负。根据折射定律和角度关系, 可以得到式 (14):

$$\begin{cases} \sin \theta_{YOZ_Z} = n_w \sin \theta'_1 \\ n_w \sin \theta_2 = \sin \theta'_2 \\ \delta_w = \theta_{YOZ_Z} - \theta'_1 + \theta_2 - \theta'_2 \\ \alpha_w = \theta'_1 - \theta_2 \end{cases}, \quad (14)$$

式中 n_w 为光楔材料折射率^[15]。

通过计算, 可以得到出射光束与 Z' 之间的夹角 θ_w 为:

$$\theta_w = \alpha_w + \arcsin \left[\frac{\sin \theta_{YOZ_Z} \cos \alpha_w - \sqrt{n_w^2 - (\sin \theta_{YOZ_Z})^2} \sin \alpha_w}{n_w} \right]. \quad (15)$$

光楔使光波传播方向发生变化, θ_w 由入射角 θ_{YOZ_Z} 、光楔材料折射率 n_w 和楔顶角 α_w 决定。当入射角 θ_{YOZ_Z} 发生变化时, 出射光的方向将发生变化。若采用多个光楔构成阵列, 且各光楔的楔角不同, 光楔将对入射光波的波前进行分割, 输出多个空间频率的出射光波。从干涉测量的角度看, 可视为对干涉条纹进行光学细分, 细分数量由一个干涉条纹周期内的光楔数量决定。

3 参数设计方法

本节根据建立的非成像光学系统的数学模型, 分析不同参数对系统的影响。在近轴条件下, 给出非成像系统参数的设计方法, 并给出设计实例。

3.1 双光栅系统的设计

双光栅系统的主要参数包括光栅槽型参数、刻线密度 p_g 、光栅间距 z_g 、光栅偏转角 φ_r 。根据式 (2), 朗奇光栅的占空比为 1/2, 当光栅材料的折射率为 n_g 时, 为实现 $\varphi = (2m+1)\pi$ 的相位延迟量, 要求光栅的槽深为:

$$h_g = \frac{\lambda(2m+1)}{2(n_g-1)}. \quad (16)$$

当不存在光楔阵列时, 目标像点 S_i 的坐标为 (x_i, y_i) 。对式 (13) 中的 Φ_f 进行泰勒展开, 在近轴条件下, 仅保留展开多项式第一项 Φ_{f1} 。当 φ_r 较小时, $\cos \varphi_r \approx 1$, $\sin \varphi_r \approx 0$, 且 $f_a = \sin \gamma_x / \lambda \approx x_i / \lambda f$, 则近轴条件下干涉条纹相位变化与 x_i 变化的关系为:

$$\Delta \Phi_{f_paraxial} = \frac{-4\pi z_g \Delta x_i}{p_g f}. \quad (17)$$

可见在近轴条件下, 干涉条纹相位变化与 X 轴的坐标变化 Δx_i 成线性关系。说明干涉条纹经过细分和 IOS 后, Δx_i 不仅体现在各子像点坐标 x_k 的变化, 也体现在子像点的灰度值变化。由式 (17) 可知, p_g 越小, 相同坐标变化引起的相位变化量越大, 测量灵敏度越高。为实现干涉测角, 在有效干涉宽度内, 应至少包含一个完整的干涉条纹周期。根据式 (12) 中 p_f 与 p_g 的关系, p_g 减

小会使 p_f 减小, 这样会增加光栅偏转角的调节及光楔阵列的加工难度。因此 p_g 不能过小, 光栅可选择 20 line/mm~100 line/mm 的低密度光栅。

由式 (17) 可见, 增加 z_g 也可以提高测量灵敏度。在近轴条件下, 双光栅构成剪切干涉, 如图 3 所示。 D_{in} 为输入光束的口径, 干涉场区域的有效宽度为 $D_{inter}=D_{in}-D_s$, 横向剪切量 $D_s=2z_g\lambda/p_g$ ^[22]。由 D_s 的表达式可知, z_g 的增加会造成干涉场宽度的减小, 非干涉区域的光强分布会提升杂散光水平, 降低干涉条纹的对比度。当 $D_s=D_{in}$ 时, $D_{inter}=0$, 此时衍射光完全分开, 不存在重叠区域, 无法形成干涉条纹, 因此 z_g 的最大值为 $z_{g_max}=D_{in}p_g/(2\lambda)$ 。实际上, 当测角系统工作在可见光波段, p_g 相对于波长较大, $z_g \ll z_{g_max}$ 。

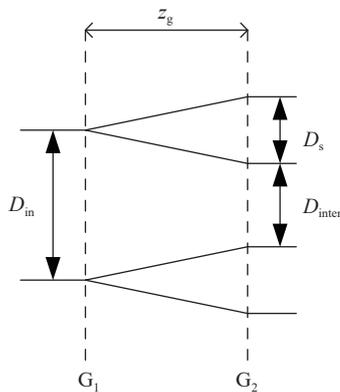


图 3 双光栅剪切干涉示意图

Fig. 3 Schematic diagram of double grating shear interference

随着入射光角度的变化, 干涉场的宽度也将减小。根据几何光学原理, 为保证在最大视场角下能够形成干涉, 要求 G_2 的口径满足以下关系:

$$D_{G_2} \geq D_{in} / \cos \alpha_{max} + 2z_g \tan \beta_{max} \quad (18)$$

式中 α_{max} 是最大入射角, β_{max} 为光栅一级衍射角, α_{max} 与 β_{max} 满足光栅方程。由式 (18) 可见, z_g 越大, 所需要的光栅尺寸越大, 从而导致系统体积及重量增加。综上所述, z_g 需要根据测量灵敏度、口径及体积重量等技术指标综合确定。

在确定了光栅的刻线密度、光栅尺寸后, 再确定干涉条纹周期 p_f 后, 即可由式 (12) 得到光栅偏转角 φ_r 。

3.2 光楔阵列的设计

光楔阵列的主要参数包括光楔个数、光楔的长度、宽度及楔角。根据干涉条纹的光学细分原

理, 若干涉场中包含 $N_f (N_f \geq 1)$ 个完整的干涉条纹周期, 为实现 k 倍光学细分, 此时光楔阵列中的光楔总数为 kN_f 个。它们的楔角各不相同, 在 FAD 上将形成 k 个子像点。每个光楔的长度 L_w 为 p_f/k , 光楔的宽度 W_w 由干涉场尺寸确定。根据干涉测量原理, 四倍细分可以同时实现相位变化量及变化方向的测量。当 $k=4$ 时, 在图 1 所示的系统中, 形成的干涉条纹与 X 轴平行, 光楔楔角均位于 YOZ 平面且楔角不等时, 在像面上会形成 4 个子像点 S_k , 如图 4 (彩图见期刊电子版) 所示。

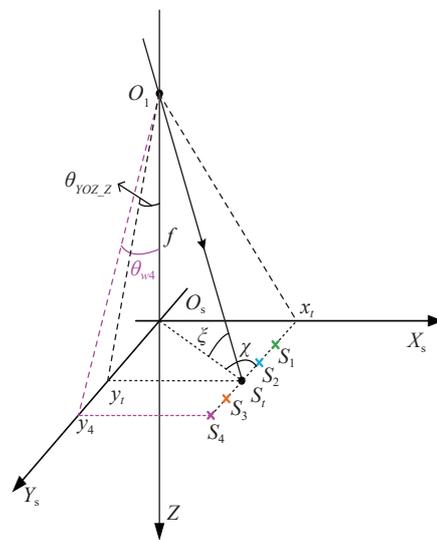


图 4 子像点与目标像点分布

Fig. 4 Distribution of the sub-image spots and the target image spot

一维光楔楔角的变化, 可使 S_k 沿 S_t 的 Y 方向具有多种不同的分布形式。为降低光楔的设计加工难度, 可使光楔楔角对称分布, 则像点将沿着 S_t 的 Y 坐标两侧呈对称分布。某一光楔的楔角为 $\alpha_{wk} (k=1 \cdots 4)$ 。根据式 (15), 在近轴条件下, 入射光楔的角度 $\theta_{YOZ} \approx 0$, 光楔出射角角度 $\theta_{wk} \approx -(n_w - 1)\alpha_{wk}$ 。则根据上式, 可以得到各像点 S_k 与 S_t 在像面上的 Y 向坐标偏移量为:

$$\Delta y_k = -(n_w - 1)\alpha_{wk}f \quad (19)$$

较大的 Δy_k 有利于像点坐标的分离与提取, 但边缘像点会占据探测器有效测量范围, 为保证全部像点位于探测器上, 由像点分离限制的视场角 A_p 为:

$$A_p = 2 \arctan \{ [L_y - 2 \max(\Delta y_k)] / 2f \} \quad (20)$$

式中, $\max(\Delta y_k)$ 为像点的最大分离量, L_y 为探测器沿 Y 方向的尺寸。 Δy_k 越大, 有效视场角越小。由于光楔阵列中的每个光楔都相当于在光路中增加了一个矩形光阑, 像点为光楔矩形孔径的衍射斑, 像点之间的最小间隔应满足瑞利判据。为了保证能够从不同的像元上分别读取两个像点的强度变化, 还应确保像点的最小分离量 $\min(\Delta y_k) \geq d_{\text{pixel}}$, d_{pixel} 为像元尺寸。在一维系统中, 将进行细分测量的方向(X 方向)称为精密轴, 不进行细分测量的方向(Y 方向)称为非精密轴。

当光楔存在二维的楔角变化, 或两个一维光楔阵列通过楔角变化构成不同的组合时, 像点分布可能沿二维分布, 其视场角变化及楔角的设计与上述相似。

3.3 近轴条件下的设计实例

按照 3.1 及 3.2 中给出的方法, 在近轴条件下进行一维光束测角系统的设计, 系统结构如图 1 所示。设计要求为: X 方向与 Y 方向的测量范围为 $[-5^\circ, 5^\circ]$, 入射光口径为 30 mm, 波长 $\lambda=0.532 \mu\text{m}$, 精密轴测角精度小于 $1''$ 。

选择探测器像元尺寸 $d_{\text{pixel}}=3.45 \mu\text{m}$, 探测器像元数为 2048×2048 , 选择光栅周期 $p_g=20 \mu\text{m}$ 。在近轴条件下, 设计如图 4 所示像点分布。其中 $\Delta y_1=-4d_{\text{pixel}}$, $\Delta y_2=-2d_{\text{pixel}}$, $\Delta y_3=2d_{\text{pixel}}$, $\Delta y_4=4d_{\text{pixel}}$ 。根据式 (20), 为满足视场要求, IOS 焦距 $f=40.2 \text{ mm}$ 。选择测量灵敏度为像点 x 坐标变化一个像元 $\Delta x_i=d_{\text{pixel}}$, 干涉条纹相位 $\Delta\Phi_{f,\text{paraxial}}$ 变化一个 2π 周期。根据式 (17), 可计算得到 $z_g=116.6 \text{ mm}$ 。根据式 (18) 可知, 光栅尺寸要求大于 44 mm。计算得到的剪切量 $D_s=6 \text{ mm}$, 则干涉条纹有效区域的宽度约为 24 mm, 选择有效区域内包含一个以上的完整干涉条纹周期, 选择 $p_f=22 \text{ mm}$ 。根据式 (12), 求得光栅偏转角为 0.013° 。采用 $k=4$ 倍光学细分, 光楔阵列中包含 4 个光楔, 光楔阵列的光楔长度 $L_w=p_f/4=5.5 \text{ mm}$ 。根据傅立叶光学原理, 若成像系统是理想的, 则像面上像点的强度分布为光楔孔径的功率谱, 正比于 $C\text{sinc}^2(W_w x/(\lambda f)) \text{sinc}^2(L_w y/(\lambda f))$, 其中, C 为常数。与 W_w 相比, 较小的 L_w 会使像点沿 Y 方向产生较为明显的展宽。根据瑞利判据, 相邻两个像点沿 Y 方向可分辨的最小宽度为 $1.22\lambda f/L_w=4.74 \mu\text{m}$, 相邻像点之间的最小间距为 $2d_{\text{pixel}}=6.9 \mu\text{m}$, 可以分辨两个相邻像点。为了更好地避免衍射光斑对

像点提取的影响, 可增加像点之间的间距。选择光楔材料的折射率 $n_w=1.5163$, 根据式 (19) 可得到光楔楔角的值 $\alpha_{w1}=0.038^\circ$ 、 $\alpha_{w2}=0.019^\circ$ 、 $\alpha_{w3}=-0.019^\circ$ 、 $\alpha_{w4}=-0.038^\circ$ 。

在光楔楔角呈对称分布时, 可以采用求算术平均值的方法通过像点 S_k 的坐标求取 S_t 的坐标的粗定位值 $(x_{t,\text{cal}}, y_{t,\text{cal}})^{[1]}$:

$$\begin{cases} x_{t,\text{cal}} = \sum_{k=1}^4 x_k/4 \\ y_{t,\text{cal}} = \sum_{k=1}^4 y_k/4 \end{cases} \quad (21)$$

在近轴条件下, 随着像点变化, 4 个像点上将获得相位差为 $\pi/2$ 的正弦信号, 若每个 2π 相位周期的电子学细分度均为 N_e , 则根据设计的测量灵敏度 $\Delta x_i/\Delta\Phi_{f,\text{paraxial}}=d_{\text{pixel}}/2\pi$, 干涉条纹相位变化一个 2π 周期。测量过程中, 粗精定位相结合, 粗定位为像元级定位, 精定位为像元内细分定位, 目标像点 x 坐标的精定位分辨率为 $d_{\text{pixel}}/(kN_e)$ 。取 $N_e=256$, 近轴条件下的精密轴的理论测角分辨率可以达到 $0.02''$, 非精密轴仅由粗定位进行像点定位。

4 离轴测量误差分析

上面在近轴条件下完成了测角系统设计, 在光学系统参数保持不变的情况下, 随着测量光入射角的增加, 测量误差也将增加。下面分析大测量范围下的误差精度, 分别从粗-精两级定位考虑。

4.1 粗定位误差

对于上节设计的测角系统, 随着测量范围的增大, 入射光将逐渐偏离光轴, 光楔出射光的角度 θ_{wk} 与楔角之间不再是线性关系, 子像点 S_k 与目标像点 S_t 之间的实际坐标偏移量为 $\Delta y_{k,\text{off-axis}} = [\tan(\theta_{wk}) - \tan(\theta_{YOZ,Z})]$, θ_{wk} 如式 (15) 所示。 $\Delta y_{k,\text{off-axis}}$ 与设计值 Δy_k 之间的误差为 $\zeta_k = \Delta y_{k,\text{off-axis}} - \Delta y_k$ 。将 $\theta_{YOZ,Z}$ 转化为目标像点的像面坐标 y_t 变化, ζ_k 随 y_t 的变化如图 5 所示。可见误差的绝对值 $|\zeta_k|$ 随着 $|y_t|$ 的增大, 即 $|\theta_{YOZ,Z}|$ 的增加而增加, 在探测器边缘时, 达到最大值。 ζ_k 分布在非精密轴 Y 轴, 影响 Y 轴的粗定位精度, 不影响 X 轴的粗定位精度。按照式 (21) 的粗定位算法计算得到离轴条件下的 $y_{t,\text{cal,off-axis}}$ 和近轴坐标计算误差 $E(y_t)=y_{t,\text{cal,off-axis}}-y_{t,\text{cal,paraxial}}$, 如图 6(彩图见期

刊电子版)所示。由图 6 可见,由于各像点的坐标偏移量误差 ξ_k 数值和符号具有对称性,粗定位算法可实现大部分离轴条件下坐标计算误差的抵消。残余坐标计算误差整体展现出线性变化的特征,通过数据拟合去除线性分量后,可以发现离轴坐标计算误差包含非线性分量,但非线性分量的数值极小。由图 6 可见,按照系统的设计参数,离轴坐标计算误差的绝对值小于 $3 \times 10^{-4} d_{\text{pixel}}$ 。即使 Y 轴采用像点离焦的像点质心细分算法,细分精度可以达到 $1/50 d_{\text{pixel}} \sim 1/100 d_{\text{pixel}}$,坐标计算误差对 Y 轴粗定位的影响也可忽略。

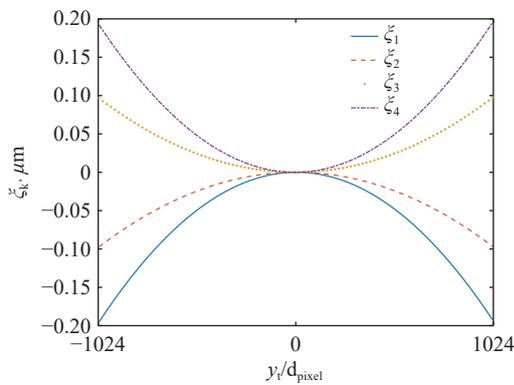


图 5 像点坐标偏移量误差

Fig. 5 Coordinate offsets errors of the image spots

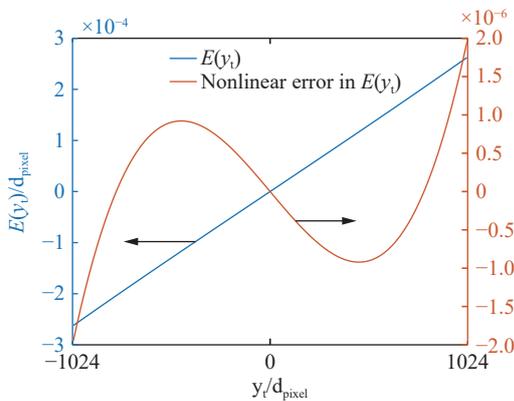


图 6 目标像点坐标误差

Fig. 6 Coordinate error of the target image spot

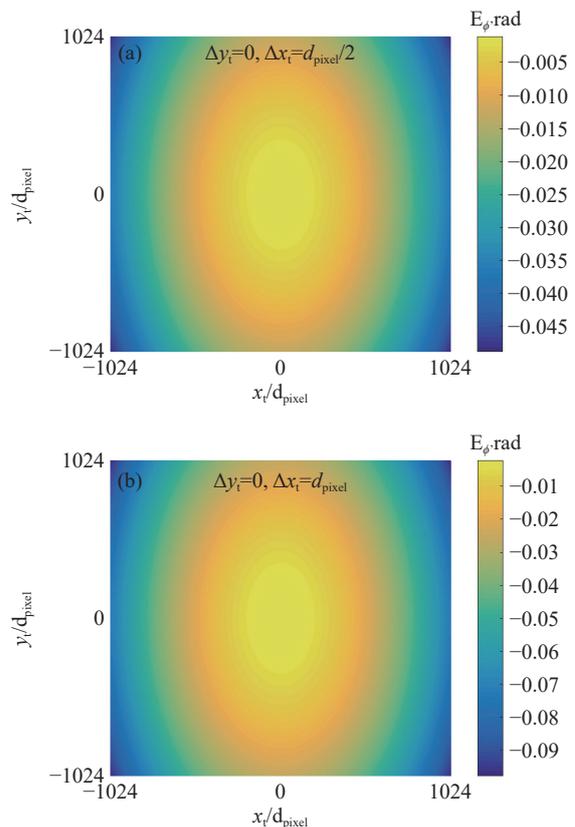
4.2 精定位误差

在近轴条件下,将干涉条纹的相位 Φ_f 进行泰勒展开,并保留展开多项式的第一项 Φ_{f1} ,得到如式 (17) 所示的线性相位变化。这种近似的前提条件是 Φ_f 的一阶泰勒余项 $R_1(f_{x(+1)}, f_{y(+1)})$ 及 $R_1(f_{x(-1)}, f_{y(-1)})$ 远小于 Φ_{f1} 。随着测量范围的增大,以所设计的测角系统为例,在最大测量角 (5° , 5°) 处, Φ_f 展开多项式的第一项 $\Phi_{f1} = -6380.3 \text{ rad}$,

第二项 $\Phi_{f2} = -51 \text{ rad}$, 第三项 $\Phi_{f3} = -0.62 \text{ rad}$, 第四项 $\Phi_{f4} = -0.008 \text{ rad}$ 。可见 $\Phi_{f3}/\Phi_{f1} < 1 \times 10^{-4}$, 3 阶以上的展开项可以忽略,但 Φ_{f2} 对相位测量的影响不能忽略,故保留 Φ_{f1} 和 Φ_{f2} , 则相位变化量与坐标变化量之间的关系为:

$$\begin{cases} \Delta\Phi_{f_off-axis} = \Delta\Phi_{f1} + \Delta\Phi_{f2} \\ \Delta\Phi_{f1} = \frac{-4\pi z_g}{p_g f} \cdot (\cos\varphi \cdot \Delta x_t + \sin\varphi \cdot \Delta y_t) \\ \Delta\Phi_{f2} = \frac{-2\pi z_g \lambda^2}{p_g f} \left\{ \cos\varphi \left[(f_b^2 + 3f_a^2 + 1/d^2) \Delta x_t + 2f_a f_b \Delta y_t \right] + \sin\varphi \left[2f_a f_b \Delta x_t + (f_a^2 + 3f_b^2 + 1/d^2) \Delta y_t \right] \right\} \end{cases} \quad (22)$$

由式 (22) 可知,随着角度的增加,干涉条纹的相位变化与光束角度变化呈非线性关系, $\Delta\Phi_{f_off-axis}$ 同时受到 Δx_t 和 Δy_t 的影响。则按照近轴线性相位变化关系,相同坐标变化产生的相位变化误差 $E_\Phi = \Delta\Phi_{f_off-axis} - \Delta\Phi_{f_paraxial}$ 。精定位为像元内细分定位,因此精定位相位变化误差均在一个像元内部进行分析。 Δy_t 也会造成相位变化误差,给出不同的 Δy_t 条件下,当 Δx_t 产生不同变化时,整个像面上的 E_Φ 分布,如图 7 (彩图见期刊电子版) 所示。



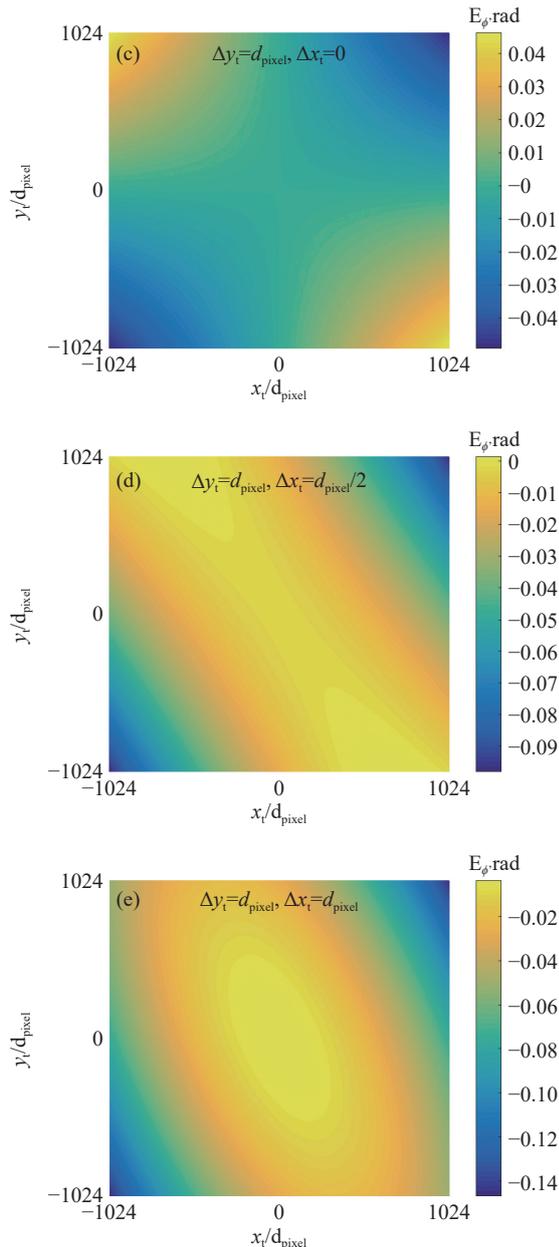


图7 不同坐标变化下的相位偏差

Fig. 7 Phase deviation under different coordinate changes

由图7可以发现,在近轴区域, $E_\phi \approx 0$, $\Delta\Phi_f$ 与 Δx_i 之间符合线性变化关系。当入射测量光逐渐偏离光轴后, E_ϕ 逐渐增大, 从而造成精定位测量误差。在某一目标点 S_i 位置确定时, Δx_i 越大, 相

参考文献:

- [1] 浦昭邦, 陶卫, 张琢. 角度测量的光学方法[J]. 光学技术, 2002, 28(2): 168-171.
PU ZH B, TAO W, ZHANG ZH. Angle measurement with optical methods[J]. *Optical Technique*, 2002, 28(2): 168-171. (in Chinese).
- [2] 张博, 段锦, 景文博. 基于 CCD 的光学测角精度检测方法[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(4): 55-57.
ZHANG B, DUAN J, JING W B. CCD-based optical detection precision of angle measurement[J]. *Journal of*

位变化误差就越大。 Δy_i 的变化也会引入额外的干涉条纹相位误差, 并影响相位误差分布的对称性。当像点 S_i 位于 $\pm 5^\circ$ 的入射角时, 且坐标变化量 Δx_i 与 Δy_i 均达到 d_{pixel} 时, 干涉条纹的相位变化量与设计值的偏差最大, 此时 $E_\phi = -0.147 \text{ rad}$, 按照参数设计中的相位变化灵敏度, 相位误差对应的精定位坐标偏差为 $-0.08 \mu\text{m}$, 相当于每个像元的细分精度达到 $1/42$, 对应的角度误差约为 $0.42''$ 。由此可见, 精定位测角精度主要是由离轴条件下干涉条纹的相位非线性变化引起的, 单纯提高相位测量的电子学细分倍数, 在整个测量范围内并不能提高测量精度。实际上由于存在系统加工装调误差及算法误差, 实际的测角精度将低于该值。为了降低离轴测量误差, 可采用校准及标定方法对误差进行修正。

5 结论

本文给出了干涉条纹成像光学测角系统的测量原理, 建立了双光栅干涉系统及光楔阵列对光波作用的数学模型。根据该数学模型, 建立了近轴条件下双光栅及光楔阵列光学参数的设计方法, 完成了一种测量范围为 10° 的测角系统设计。分析了测量范围增大对测量精度的影响, 给出了非近轴条件下粗精两级定位的理论精度。得到以下的结果: 近轴条件下, 测角分辨率为 $0.02''$; 在 $[-5^\circ, 5^\circ]$ 测量范围内, 粗定位算法可补偿具有对称性的离轴坐标计算误差; 干涉条纹相位变化量误差随着测量角度的增加而增大, 对于文中设计的测角系统, 精定位精度可达到 $1/42$ 个像元, 理论测角精度为 $0.42''$ 。以上结果说明: 利用提出的模型和参数设计方法, 可以设计出具有较高测角精度的光学测角系统。测量精度主要受到离轴条件下的精定位误差的影响, 单纯提高精定位的细分倍数并不能提高测量精度。

- Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 33(4): 55-57. (in Chinese).
- [3] 戴嘉伟, 王海朋, 陈瀑, 等. 多光谱数据融合分析技术的研究和应用进展[J]. *分析化学*, 2022, 50(6): 839-849.
DAI J W, WANG H M, CHEN P, *et al.*. Progress and application of multi-spectral data fusion methods[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2022, 50(6): 839-849.
- [4] 李自力, 徐兴冉, 湛江浩, 等. 先进光刻材料[J]. *应用化学*, 2022, 39(6): 859-870.
LI Z L, XU X R, ZHAN J H, *et al.*. Advanced materials for lithography[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(6): 859-870.
- [5] 陈士恒, 王林涛, 龚明明, 等. 高灵敏度便携式铀分析仪的研制[J]. *分析化学*, 2023, 51(9): 1414-1422.
CHEN SH H, WANG L T, GONG M M, *et al.*. Development of portable trace uranium analyzer with high sensitivity[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(9): 1414-1422.
- [6] 程军杰, 曹智, 杨灿然, 等. 便携式远程激光诱导击穿光谱系统及其定量分析性能[J]. *应用化学*, 2022, 39(9): 1447-1452.
CHENG J J, CAO ZH, YANG C R, *et al.*. Quantitative analysis with a portable remote laser-induced breakdown spectroscopy system[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(9): 1447-1452.
- [7] 刘旭, 李杨可欣, 杜黎, 等. 水凝胶的制备及仿生设计在能源领域应用的研究进展[J]. *应用化学*, 2022, 39(1): 35-54.
LIU X, LI Y K X, DU L, *et al.*. Bio-inspired hydrogels: synthesis, bionic design and applications in the field of energy storage and conversion[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(1): 35-54.
- [8] 王磊, 宦克为, 刘小溪, 等. 基于卷积神经网络的近红外光谱全流程分析模型研究[J]. *分析化学*, 2022, 50(12): 1918-1926.
WANG L, HUAN K W, LIU X X, *et al.*. Full-range analysis model of near infrared spectroscopy based on convolutional neural network[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2022, 50(12): 1918-1926.
- [9] 陈志斌, 肖文健, 马东玺, 等. 大尺寸空间角测量技术进展及其分析[J]. *应用光学*, 2016, 37(3): 407-414.
CHEN ZH B, XIAO W J, MA D X, *et al.*. Technical progress and analysis on large-scale spatial angle measurement[J]. *Chinese Journal of Applied Optics*, 2016, 37(3): 407-414. (in Chinese).
- [10] HUTCHIN R A. Interferometric tracking device: US, 8045178[P]. 2011-10-25.
- [11] Optical Physics Company. Nary Profiles in Success Article, [https://www.opci.com/products/star-tracker/\[EB/OL\]](https://www.opci.com/products/star-tracker/[EB/OL]). 2024.
- [12] DU J, BAI J, HUANG X, *et al.*. High-precision attitude angle measuring system based on Talbot interferometry[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10462: 104623L.
- [13] DU J, BAI J, WANG L, *et al.*. Optical design and accuracy analysis of interferometric star tracker[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10815: 1081504.
- [14] 杜娟, 白剑, 黄潇, 等. 基于二维光栅的双轴干涉星敏传感器装置: 中国, 207600470U[P]. 2017-08-28.
DU J, BAI J, HUANG X, *et al.*. Star sensor device is interfered to biax based on two -dimensional grating: CN, 207600470U[P]. 2017-08-28. (in Chinese).
- [15] 张淑芬. 基于衍射光栅的高精度干涉星敏传感器研究[D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.
ZHANG SH F. *Research on high accuracy interferometric star tracker based on diffraction grating*[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese).
- [16] 董磊, 阮宇翔, 王建立, 等. 基于计算干涉测量的远距离目标高精度角度测量技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(18): 1811016.
DONG L, RUAN Y X, WANG J L, *et al.*. Progress in high accurate angle measurement technology of long-distance target based on computational interferometry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(18): 1811016. (in Chinese).
- [17] 张淑芬, 姜珊, 董磊, 等. 基于衍射光栅的高精度干涉星敏传感器的理论分析[J]. *中国光学*, 2021, 14(6): 1368-1377.
ZHANG SH F, JIANG SH, DONG L, *et al.*. High accuracy interferometric star tracker based on diffraction grating[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1368-1377. (in Chinese).
- [18] 阮宇翔, 董磊. 干涉星敏传感器测角精度影响因素的研究[J]. *中国光学 (中英文)*, 2023, 16(6): 1433-1441.
RUAN Y X, DONG L. Influencing factors of angle measurement accuracy of an interferometer star tracker[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1433-1441. (in Chinese).

- [19] SCHREIBER H, SCHWIDER J. Lateral shearing interferometer based on two Ronchi phase gratings in series[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(22): 5321-5324.
- [20] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
LV N G. *Fourier Optics*[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2016. (in Chinese).
- [21] SMITH W J. *Modern Optical Engineering*[M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [22] 李杰, 唐锋, 王向朝, 等. 光栅横向剪切干涉仪及其系统误差分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0508006.
LI J, TANG F, WANG X ZH, *et al.*. System errors analysis of grating lateral shearing interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(5): 0508006. (in Chinese).

作者简介:



宋莹(1985—),女,黑龙江齐齐哈尔人,博士,副教授,2015年于中国科学院大学光学工程专业获得工学博士学位,主要从事光电系统控制方面的研究。E-mail: songyingtec@126.com



刘玉娟(1984—),女,山东泰安人,副教授,2012年于中国科学院大学光学工程专业获得工学博士学位,主要从事精密光学与光谱测量技术的研究。E-mail: liuyujuan@jlu.edu.cn