

分光镜厚度对双臂 Tolansky 干涉 自准直仪测角准确性的影响*

方振远¹⁾ 张宝武^{1)†} 崔建军^{2)#} 张斌^{1)#} 陈恺^{2)#}
许子杰^{1)#} 朱玲^{1)#} 孙怡^{1)#} 罗贤欢^{1)#}

1) (中国计量大学, 计量测试与仪器学院, 杭州 310018)

2) (中国计量科学研究院, 北京 100013)

(2024 年 8 月 26 日收到; 2025 年 1 月 4 日收到修改稿)

为了解决 Tolansky 干涉微小角度测量过程依赖动镜测量臂臂长的问题, 提出了一种双臂 Tolansky 干涉自准直测角方案, 针对其中分光镜厚度对测角准确性的影响, 利用几何光学的单折射球面公式和过渡公式分析了分光镜厚度影响下的虚拟点光源位置, 建立了包含分光镜厚度和折射率的圆心偏转量与偏转角之间的关系, 通过虚拟仿真和实体实验相结合的方式详细考察了分光镜厚度对测角准确性的影响. 结果显示, 分光镜厚度不同会影响初始圆心的位置; 随着分光镜厚度的增大, 不同角度下, 仿真测量结果与含厚度因素关系式理论值的相对偏差在 $\pm 0.5\%$ 以内; 在同一角度下, 所建立的含厚度因素关系式与不含厚度因素关系式的差值逐渐增大. 在 1 mm 分光镜的厚度下, 以已标定自准直仪所测导轨数据为准, 所建立的含厚度因素关系式与不含厚度因素关系式的相对误差仅为 0.22%. 本文结果为这种新型自准直仪的深度研究和开发提供了重要的指导.

关键词: Tolansky 干涉, 自准直仪, 同心圆环, 微小角度

PACS: 42.15.-i, 42.25.Hz

DOI: 10.7498/aps.74.20241174

CSTR: 32037.14.aps.74.20241174

1 引言

高精度微小角度测量技术在小角度测量应用外, 还可以用于厚度、平面度、直线度的测量^[1,2], 不仅在医疗、军事、航空航天等领域^[3,4]有着极大需求, 在芯片制造^[5]、硅晶圆生产等半导体行业关键性技术领域也日益重要^[6,7]. 采用位置敏感探测器 (PSD)^[8,9]、CCD^[10]等进行光电转换和位置测量, 具有精度更高、动态测量能力和测量分辨力更好, 并融合图像处理算法^[11-14]的微小角度测量技

术成为当前研究的重点^[15-17].

文献^[18]采用 Tolansky 干涉为微小角度测量提供了一种新颖的技术方案, 其利用分光镜的反射与折射形成两路光, 通过两个反射镜形成各自的虚拟相干点光源, 在观察位置产生同心圆环结构的干涉图形. 当任意反射镜偏转时, 所产生的同心圆环的圆心会随之发生偏转, 进而通过干涉圆心的移动情况来反推反射镜转动的微小角度大小与方向. 由于采用了系列同心圆环的定圆心方式, 这种测角方式可以提高定中瞄准精度. 根据两个反射镜的相互动静和位置关系情况, 这种技术可以衍生出前静后动、前动后静、单臂共程、双臂异路等结构类型^[18,19].

* 国家市场监督管理总局科技计划项目 (批准号: 2022MK220) 和国家重点研发计划 (批准号: 2023YFF0616203) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: zhangbaowu@126.com

经研究,这种技术方案不仅能实现微小角度的测量,而且在端面厚度、平行度和直线度的测量方面具有潜在作用^[20].但是文献^[18]中的方案在拓展应用方面存在被测量依赖动镜测量臂长的问题.为了解决此问题,本文提出了一种双臂 Tolansky 干涉自准直仪的方案,巧妙地将这种干涉测角与自准直测角相结合,使之具有自准直测量结果的直观性强、适用范围广和操作便捷等优点,同时兼具光学干涉测量的精度高、测量范围广以及光电自动化等优点.

研究发现,这种新型自准直仪中分光镜厚度及其折射率会影响仪器测角准确度.为此,本文利用文献^[21]中的方法对此进行理论分析,建立包含分光镜厚度和折射率的圆心偏移量与偏转角之间的关系,通过理论、仿真及实体实验相结合的方式,详细考察了分光镜参数的影响,为这种新型自准直仪的深度研究和开发提供了重要的指导.

2 新型自准直仪结构

双臂 Tolansky 干涉测角系统结构如图 1 所示,其中 M1 为参考反射镜,静止不动;M2 为测量反射镜,会产生偏转,其功能类似与传统自准直仪的桥板反射镜.激光器发出的光经过光源会聚透镜 CL1 作用后在分光镜的前表面形成点光源 S ,随后经分光镜的反射及折射分成参考光和测量光,其中参考光垂直入射至参考反射镜 M1,并原路返回;测量光经过测量会聚透镜 CL2 后入射至测量反射镜 M2,并原路返回.两束原路返回的激光束再次通过分光镜融合后共路传播,在空间中相干叠加形成干涉同心圆环,使用 CCD 面阵相机采集干涉图像,如图 2 所示.

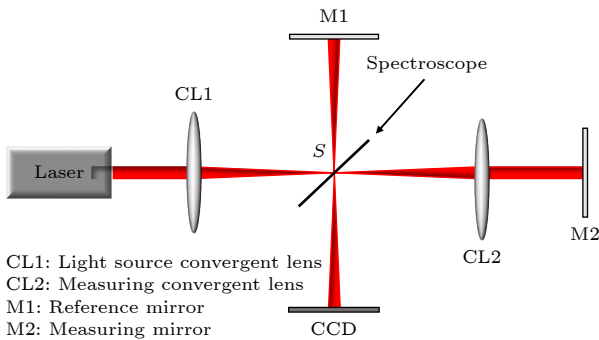


图 1 Tolansky 干涉自准直仪模型

Fig. 1. Tolansky interference autocollimator model.

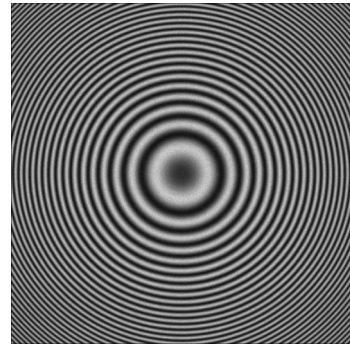


图 2 同心圆环干涉图像

Fig. 2. Concentric ring interference image.

本文的双臂 Tolansky 干涉测角系统是在文献^[16]的系统基础上发展起来的,主要的改进是在测量光路中加入了一个会聚透镜 CL2,点光源 S 正好位于 CL2 的焦点上.这样,经过 CL2 后的光束呈平行状态,平行光束原路返回后会聚点仍在焦点处.当 M2 发生偏转时,这个会聚点始终于 CL2 的焦平面上移动.如此,会聚透镜 CL2 和反射镜 M2 构成了光杠杆结构,这就既保持了 Tolansky 干涉的功能,又融合了光杠杆原理,使 Tolansky 干涉测角不再受限于测量镜的测量臂臂长.

3 相干点光源位置分析

为了详细分析分光镜的影响,将分光镜视为具有一定厚度的平行玻璃板,其局部放大后整个系统光路结构如图 3 所示.参考臂返回的中心光线与光源光束中心光线均以 45° 角入射分光镜;设点光源 S 至 M1 反射面的距离为 D_1 ,至 CCD 面阵相机接收面的距离为 L ,至 CL2 的距离为 D_2 ;测量会聚透镜 CL2 为薄透镜,其中心 O_3 位于 Z 轴上,焦距为 f ;空气折射率为 n_0 ,玻璃板内折射率为 n ,分光镜玻璃厚度为 d ,前表面记为 O_1 ,且镀有一层 50% 的分光膜,后表面记为 O_2 ,镀有一层全透膜,膜层厚度不计.整个系统的符号遵从左负右正、上正下负的原则.

双臂 Tolansky 干涉自准直仪中形成干涉同心圆环的两个虚拟点光源的产生过程如下.

1) 参考点光源 S_2 .如图 3 中红色线所示,点光源 S 依次经过分光镜前表面 O_1 反射,参考反射镜 M1 反射,分光镜前表面折射,分光镜后表面折射后,成像为点光源 S_2 ,期间由像点 S_1 进行过渡,如图 3 红色线所示.参考光束通过参考反射镜 M1

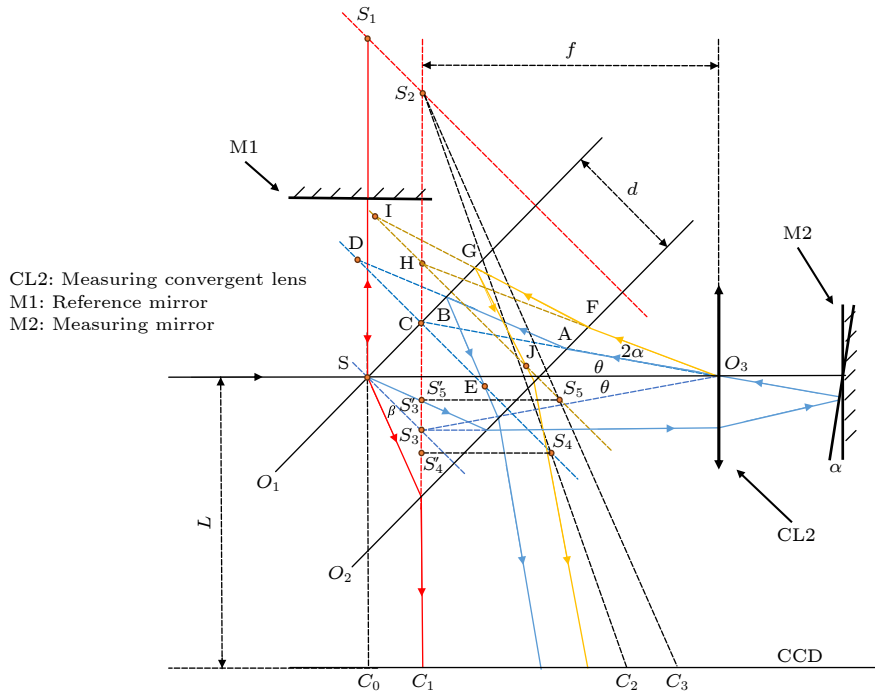


图 3 干涉自准直仪原理图

Fig. 3. Schematic diagram of interference autocollimator.

所形成的虚像为 S_1 ，经 M1 反射后在 S 点入射分光镜，出射后交 CCD 面阵相机接收面于 C_1 点，由平行平板成像原理和单折射球面物像关系可知：虚像 S_1 发出的光经过平行玻璃板折射后，其光轴为过 S_1 点垂直于 O_1 的虚线；反向延长出射光线交光轴于 S_2 点，得到参考点光源 S_2 ，其相对虚像 S_1 的轴向偏移量为 S_1S_2 。

2) 测量反射镜 M2 未偏转时的测量点光源 S_4 。如图 3 中蓝线所示，测量臂光束从 S 点出发，经分光镜面 O_1, O_2 面两次折射后，于 O_2 面水平射出，由平行平板成像原理和单折射球面物像关系可知：点光源 S 发出的光线经过 O_1 面时，光轴为过 S 点垂直于 O_1 面的虚线，此时反向延长出射光线交光轴于 S_3 点，得到出射光线的点光源 S_3 ，其相对点光源 S 的轴向偏移量为 SS_3 。点光源 S 的光线以 45° 角入射 O_1 面，折射角记作 β ，由折射定律可得 (1) 式和 (2) 式：

$$n_0 \cdot \sin(\pi/4) = n \cdot \sin\beta, \quad (1)$$

$$\cos\beta = \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{2n^2}}. \quad (2)$$

光线经过分光镜平行平板效应的轴向位移 $\Delta L'$ 见表达式 (3) 式和 (4) 式：

$$\Delta L' = d \cdot \left(1 - \frac{\tan\beta}{\tan(\pi/4)}\right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta L' &= d \cdot \left(1 - \frac{\sin\beta}{c \cos\beta}\right) \\ &= d \cdot \left(1 - \frac{n_0}{\sqrt{2n^2 - n_0^2}}\right) = C_0C_1. \end{aligned} \quad (4)$$

故上文提到的 SS_3 的长度可表示为 (5) 式，且根据图中几何数学关系可以推得 $S_1S_2 = SS_3$ ；进一步可得 S_2 距点光源 S 的轴向距离也为 $\Delta L'$ 。由于测量会聚透镜 CL2 的透镜中心 O_3 位于主光轴上 (Z 轴)，与入射光轴不重合，所以水平入射的光线经过 CL2 透镜中心后形成的平行光束与主光轴呈 θ 夹角。测量会聚透镜 CL2 的焦平面为过 S_3 点垂直于主光轴的虚线，即虚线 S_2S_3 。测量反射镜 M2 反射回的光线经过 CL2 的透镜中心 O_3 交焦平面于 C 点，得到测量臂返回光束的会聚焦点 C 。在测量反射镜未偏转的时，返回光线经过 CL2 的透镜中心 O_3 且与主光轴呈 θ 夹角，所以 C 点与 S_3 点相对主光轴对称，线段 SC, SS_3 存在 $SC = SS_3$ 的关系，由此可得 (5) 式：

$$\tan\theta = \Delta L' \cdot \cos(\pi/4)/f. \quad (5)$$

单折射球面公式为： $\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$ 。当折射面为平面时，曲率半径 r 取无限大，故等式右边为

零, 得到单折射球面变形公式, 见 (6) 式:

$$n'/l' = n/l. \quad (6)$$

返回光线交分光镜后表面 O_2 于 A 点, 发生折射后光线交 O_1 面于 B 点, 于 B 点反射后再次通过 O_2 面折射后出射. 由平行平板成像原理和单折射球面物像关系可知, 返回光焦点为 C 点时, 其光轴为过 C 点且垂直于 O_2 的虚线. 此时返回光束的焦点 C 为 O_2 面入射的物, 此处 $CO_2 = -d$, 将数据代入单折射球面变形公式 (6) 可得 (7) 式:

$$\frac{n_0}{CO_2} = \frac{n}{DO_2}. \quad (7)$$

计算得到 $DO_2 = -nd/n_0$, 得到光轴上的像点 D , 且 $DO_2 = DC + CO_2$. 光线经 O_1 面反射后得到像点 E , 长度上 $DC = CE = d \cdot (n/n_0 - 1)$. 之后光线从 O_2 面出射, E 点视为出射光线的物, 将数据代入单折射球面变形 (7) 式可得到光线从 O_2 面出射的表达式 (8), 其中 $EO_2 = CO_2 - CE$:

$$\frac{n}{EO_2} = \frac{n_0}{O_2S_4}. \quad (8)$$

计算得到 $O_2S_4 = d \cdot (1 - 2n_0/n)$, 可在光轴上找到出射光线的像点 S_4 . 所以 S_4 点为考虑分光镜厚度且测量反射镜 M2 未偏转时的测量点光源.

3) 测量反射镜 M2 偏转时的测量点光源 S_5 . 如图 3 中黄线所示, 点光源 S 的光线经过分光镜前表面 O_1 以及后表面 O_2 折射后, 出射光线路径与蓝线一致, 此时测量反射镜 M2 存在一个大小为 α 的偏转角, 所以经测量反射镜 M2 反射后, 经过 CL2 透镜中心的返回光线与主光轴呈 $\theta + 2\alpha$ 的夹角; 与上文分析相同, 此时返回光束的焦点位于 H 点, 过 H 点做垂直于 O_2 的虚线, 该虚线为此次折射的光轴. H 点为入射 O_2 面的物点, H 点距 O_2 面的距离 HO_2 可表示为:

$$HO_2 = -\left[d + \frac{\sqrt{2}}{2}f \tan(\theta + 2\alpha) - \frac{\sqrt{2}}{2}\Delta L' \cos \frac{\pi}{4}\right]. \quad (9)$$

I 点为光线入射 O_2 面的像点, I 点位置可将 HO_2 数值代入单折射球面变形 (6) 式计算得到, 像点计算公式为:

$$\frac{n_0}{HO_2} = \frac{n}{IO_2}. \quad (10)$$

计算得到 I 点的位置,

$$IO_2 = -\frac{n}{n_0} \left[d + \frac{\sqrt{2}}{2}f \tan(\theta + 2\alpha) - \frac{\sqrt{2}}{2}\Delta L' \cos \frac{\pi}{4} \right],$$

之后光线经过 O_1 面反射后得到像点 J , 几何关系

可知 $O_1J = IO_2 - (-d)$, 所以 O_1J 可以表示为:

$$O_1J = -\frac{n}{n_0} \left[d + \frac{\sqrt{2}}{2}f \tan(\theta + 2\alpha) - \frac{\sqrt{2}}{2}\Delta L' \cos \frac{\pi}{4} \right] + d. \quad (11)$$

且 $JO_2 = -d - O_1J$, 故

$$JO_2 = -2d + \frac{n}{n_0} \left[d + \frac{\sqrt{2}}{2}f \tan(\theta + 2\alpha) - \frac{\sqrt{2}}{2}\Delta L' \cos \frac{\pi}{4} \right].$$

光线再次从 O_2 面出射, 点 J 为此次折射的物, 由单折射球面变形 (6) 式可以得到得光线由 J 点从 O_2 面出射的表达式:

$$\frac{n}{JO_2} = \frac{n_0}{O_2S_5}. \quad (12)$$

将 JO_2 的数值代入表达式计算, 得到 $O_2S_5 = \left(1 - \frac{2n_0}{n}\right)d + \frac{\sqrt{2}}{2}\Delta L' \cos \frac{\pi}{4} - \frac{\sqrt{2}}{2}f \tan(\theta + 2\alpha)$. 在黄色光线对应的光轴上取距离 O_2 面为 O_2S_5 的点 S_5 , S_5 即为测量反射镜 M2 偏转时的测量点光源.

4 测角关系分析

由文献 [19] 可知, Tolansky 干涉形成的同心圆环的圆心处于两个虚拟点光源的连线上, 因此在上述相干点光源位置分析基础上, 连接参考点光源 S_2 点与测量点光源 S_4 点, 交 CCD 面阵相机接收面于 C_2 点, 得测量反射镜发生偏转前干涉圆环圆心点 C_2 ; 连接 S_2 与 S_5 点, 交 CCD 面阵相机接收面于 C_3 点, 得测量反射镜发生偏转后干涉圆环圆心点 C_3 . 线段 C_2C_3 的值则为测量反射镜 M2 发生偏转角 α 前后干涉同心圆环的圆心偏转量 X . 这个偏转量与 M2 偏角 α 之间的关系式推导如下.

过 S_4 点做水平线交 C_1S_2 线于 S'_4 点, 在 $\Delta S_2C_1C_2$ 中, 由三角形比例关系可得

$$\frac{S_4S'_4}{C_1C_2} = \frac{S_2S'_4}{S_2C_1}, \quad (13)$$

其中

$$S_4S'_4 = CS'_4 = d \cdot \cos \frac{\pi}{4} + O_2S_4 \cos \frac{\pi}{4} = \sqrt{2} \left(1 - \frac{n_0}{n}\right)d,$$

$$S_2S'_4 = CS'_4 + CS_2 = 2D_1 + \sqrt{2}(1 - n_0/n)d - \sqrt{2}\Delta L'$$

C_1C_2 的表达式为

$$C_1C_2 = \sqrt{2}(1 - n_0/n)d \times \frac{2D_1 + L - \Delta L' \cdot \cos(\pi/4)}{2D_1 + \sqrt{2}(1 - n_0/n)d - \sqrt{2}\Delta L'}. \quad (14)$$

同理过 S_5 点做水平线交 C_1S_2 线于 S'_5 点, 在 $\Delta S_2C_1C_3$ 中, 由三角形比例关系可得

$$\frac{S_5S'_5}{C_1C_3} = \frac{S_2S'_5}{S_2C_1}, \quad (15)$$

其中 $S_5S'_5 = \sqrt{2}(1 - n_0/n)d$, $S_2S'_5 = S'_5H + HS_2 = 2D_1 - f \tan(\theta + 2\alpha) + \sqrt{2}(1 - n_0/n)d$, $S_2C_1 = 2D_1 + L - \Delta L' \cdot \cos(\pi/4)$, C_1C_3 表达式为

$$C_1C_3 = \frac{\sqrt{2}\left(1 - \frac{n_0}{n}\right)d \cdot \left(2D_1 + L - \Delta L' \cdot \cos\frac{\pi}{4}\right)}{2D_1 + \sqrt{2}\left(1 - \frac{n_0}{n}\right)d - f \tan(\theta + 2\alpha)}. \quad (16)$$

$$X = \frac{\tan 2\alpha \cdot \left(f + \frac{\Delta L'^2}{2f}\right)}{\frac{2D_1 + \sqrt{2}d\left(1 - \frac{n_0}{n}\right) - \Delta L' \cdot \cos\frac{\pi}{4}}{2D_1 + L - \Delta L' \cdot \cos\frac{\pi}{4}} \cdot \left(1 - \tan 2\alpha \cdot \frac{\Delta L'^2}{2f}\right)}. \quad (18)$$

在不考虑分光镜厚度时, 即 $d = 0$, (18) 式可进一步简化得到不含厚度因素 (19) 式. 其中, 为了与 (18) 式有所区分, 此处将偏移量改为 X_0 :

$$X_0 = \tan 2\alpha \cdot f \cdot \left(1 + \frac{L}{2D_1}\right). \quad (19)$$

(18) 式和 (19) 式非常清晰地显示考虑分光镜厚度与否, 圆心偏移量和偏角之间关系的不同.

5 仿真研究

5.1 仿真建模

对应与图 1 的 Zemax 仿真模型如图 4 所示, 相关仿真参数如表 1 所示. 其中坐标结构如下: 以激光器为起始点和坐标原点, 垂直于纸面向里为 X 轴正方向, 竖直向上为 Y 轴正方向, 水平向右为 Z 轴正方向.

5.2 干涉图形圆心初始位置仿真

上文分析显示, 分光镜厚度的考虑与否会使干涉图形的圆心发生变动, 如图 3 的 C_0 , C_1 , C_2 等点所示. 为此, 通过 3 个对照组仿真实验对圆心受分光镜厚度的影响进行研究: 实验组一验证分光镜玻璃板无厚度时的圆心位置 C_0 点; 实验组二验证考虑分光镜玻璃板厚度且不对测量会聚透镜 CL2 位置进行侧移量调整; 实验组三验证考虑分光镜玻

干涉圆环圆心的偏移量 X 可表示为 $X = C_1C_3 - C_1C_2$, X 的表达式为

$$X = \frac{\sqrt{2}\left(1 - \frac{n_0}{n}\right)d \cdot \left(2D_1 + L - \Delta L' \cdot \cos\frac{\pi}{4}\right)}{2D_1 + \sqrt{2}\left(1 - \frac{n_0}{n}\right)d - f \tan(\theta + 2\alpha)} - \frac{\sqrt{2}\left(1 - \frac{n_0}{n}\right)d \cdot \left(2D_1 + L - \Delta L' \cdot \cos\frac{\pi}{4}\right)}{2D_1 + \sqrt{2}\left(1 - \frac{n_0}{n}\right)d - \sqrt{2}\Delta L'}. \quad (17)$$

将 $\tan(\theta + 2\alpha) = \frac{\tan \theta + \tan 2\alpha}{1 - \tan \theta \cdot \tan 2\alpha}$ 和 $\tan \theta = \Delta L' \cos(\pi/4)/f$ 代入 (17) 式, 可得含厚度因素

璃板厚度且对测量会聚透镜 CL2 位置进行侧移量调整. 3 组对照组均保持测量反射镜 M2 不发生偏转. 3 组实验中, 先提取实验组一干涉圆环圆心 C_0 的位置; 实验组二引入分光镜玻璃板厚度, 提取干涉圆环圆心 C_2 的位置, 圆心偏移量 C_0C_2 的计算公式见 (4) 式和 (14) 式; 实验组三圆心偏移量 C_0C_1 见 (4) 式, 除表 1 之外的其他相关参数如表 2 所示. 3 个对照组各自进行 10 次仿真实验, 数据结果见图 5.

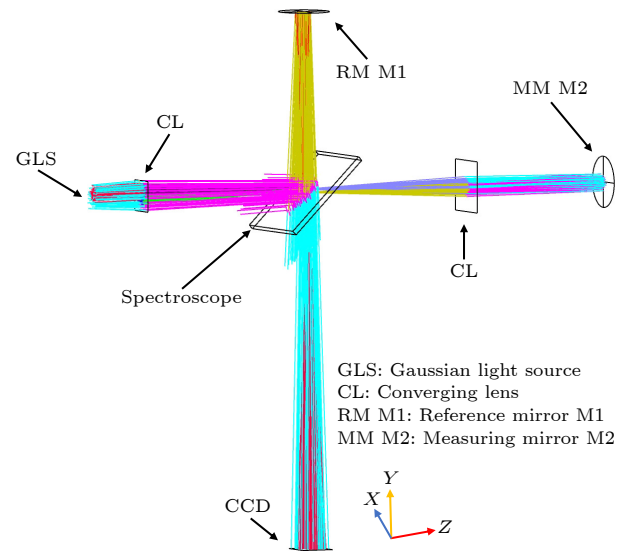


图 4 Tolansky 干涉自准直仪仿真模型

Fig. 4. Simulation model of Tolansky interferometric auto-collimator.

表 1 Zemax 软件参数设置
Table 1. Zemax software parameter settings.

物体类型	参数
激光源	高斯激光, 波长 632 nm, 光源宽度 5 mm.
会聚透镜	镜片直径 12 mm, 厚度 1 mm
分光镜	尺寸 20 mm × 20 mm, 厚度可调节, x 轴倾斜 45°
参考反射镜	直径 10 mm, 厚度不计, x 轴倾斜 -90°
测量反射镜	直径 10 mm, 厚度不计, 无倾斜
CCD	接收面尺寸 12.8 mm × 12.8 mm, x 轴倾斜 90°
参考臂臂长 D_1	初始长度 70 mm, 臂长可调节
测量臂臂长 D_2	初始长度 130 mm, 臂长可调节
相机距离 L	初始长度 140 mm, 距离可调节
空气折射率	$n_0 = 1.00029$
玻璃折射率	$n = 1.5168$

表 2 实验一参数
Table 2. Parameters of Experiment 1.

实验对象	分光镜 厚度/mm	会聚透镜 CL2位置	理论 数值/mm
C_0C_0	0	固定	0
C_0C_2	5	固定	4.822735
C_0C_1	5	下移	1.671882

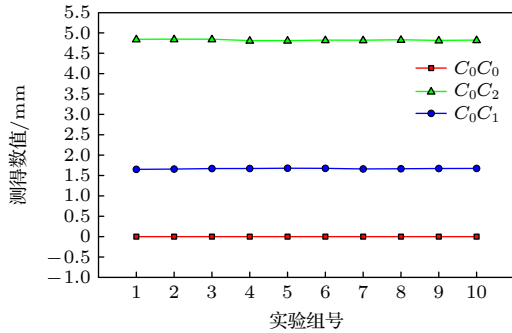


图 5 实验一仿真数据与理论数据

Fig. 5. The simulation data and theoretical data of Experiment 1.

由图 5 可得, 仿真实验测得的干涉圆环圆心 C_1 和 C_2 相对 C_0 点的偏移量与理论圆心偏移量的数值均与图 3 中推导的 C_0, C_1, C_2 的圆环圆心位置相吻合, 验证了理论分析和关系建模的正确性. 由于对仿真实验图片的进行图像圆心识别会存在一定误差, 所以仿真实验测得数值围绕真值略有上下波动.

5.3 不同角度下分光镜厚度的影响

测量反射镜以 X 轴 (正方向) 为轴心顺时针偏转, 偏转角度从 $1''$ 增大至 $100''$, 每隔 $5''$ 取一个测量点. 偏转角度归零时干涉圆环圆心所在坐标位置为 C_2 , 各偏转角度下干涉圆环圆心所在坐标位置为 C_3 , 则仿真实验干涉圆环圆心偏移量大小为

C_2C_3 , 用 X_5 表示. 同理, 测量反射镜以 y 轴 (正方向) 为轴心顺时针偏转实验. 除表 1 之外的其他相关参数如表 3 所示.

表 3 实验二参数设置
Table 3. Parameter setting of Experiment 2.

物体类型	参数
分光镜	尺寸 20 mm × 20 mm, 厚度 5 mm
CCD 相机距离	$L = 140$ mm
参考臂臂长	$D_1 = 70$ mm
会聚透镜焦距	$f = 70$ mm

记录仿真实验各组干涉图像, 利用图像识别算法和软件 [22,23] 提取其中的干涉圆环圆心坐标, 得到仿真实验的圆环圆心偏移量 X_5 . 将偏转角度代入 (18) 式与 (19) 式, 计算干涉圆环圆心的理论偏移量 X_0 与 X . 将仿真实验测得的圆环圆心偏移量与对应角度下所求关系式的理论偏移量做数据对比, 分析结果制成折线图, 测量反射镜两个方向的测量数据结果见图 6 和图 7.

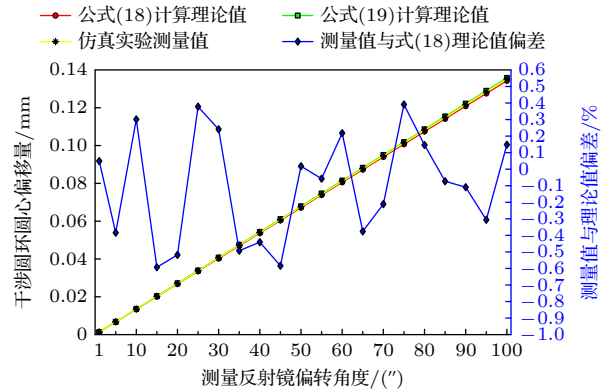


图 6 X 轴偏转仿真数据与理论数据误差

Fig. 6. Simulation data of X -axis deflection and theoretical data error.

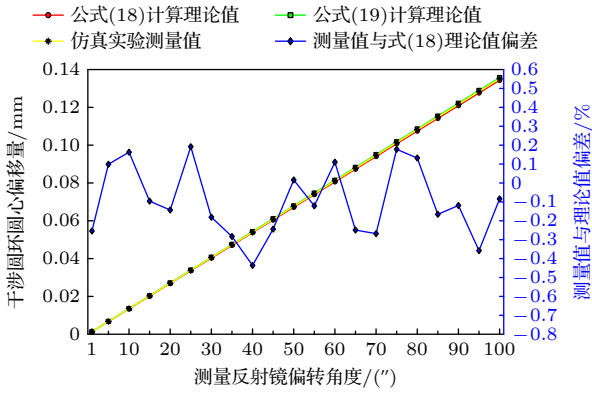


图 7 Y轴偏转仿真数据与理论数据误差

Fig. 7. Simulation data of Y-axis deflection and theoretical data error.

从图 6 和图 7 可看出, 无论测量反射镜以 X 轴或 Y 轴为轴心偏转, 随着分光镜厚度的增大, 含厚度因素的 (18) 式与不含厚度因素的 (19) 式之间的差值会逐渐增大, 而仿真测量数据结果与 (18) 式的理论值相对偏差在 $\pm 0.5\%$ 以内.

5.4 同一角度下分光镜厚度的影响

上文充分论述并验证了推导的含厚度因素 (18) 式比不含厚度因素 (19) 式更能贴合测量真值. 在实体仪器中, 分光镜存在物理厚度是不可避免的, 故需要寻找合适的厚度区间, 使其带来的测量偏差降至最低. 在其他参数条件不变的情况下, 控制测量反射镜偏转角固定为 $100''$, 改变分光镜厚度自 1 mm 增大到 20 mm, 考察含厚度因素 (18) 式 and 不含厚度因素 (19) 式对应的干涉圆环圆心偏移量对比情况, 见图 8.

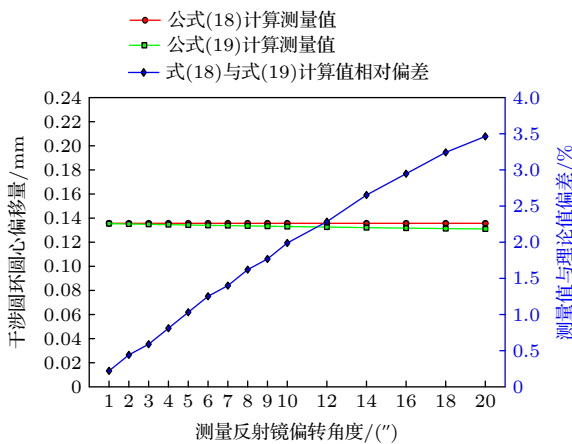


图 8 圆心偏移量随分光镜厚度变化趋势图

Fig. 8. The change trend of center offset with the thickness of the beam splitter.

由图 8 可得, 在同样的角度下, 随着分光镜厚度的增大, 含厚度因素的 (18) 式和不含厚度因素的 (19) 式之间的差值会逐渐增大. 为了减小厚度的影响, 分光镜玻璃厚度应越小越好.

6 实验验证

基于图 1 和虚拟仿真实验搭建了实体仪器, 见图 9 所示.

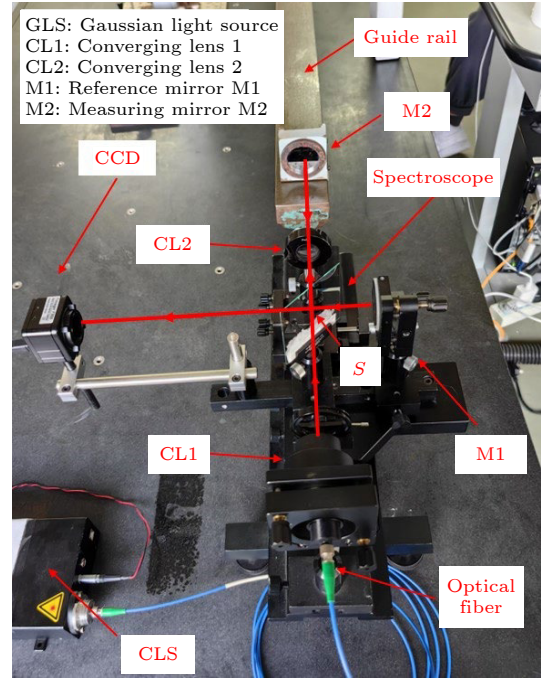


图 9 双臂 Tolansky 干涉实体仪器

Fig. 9. Dual-arm Tolansky interference entity instrument.

双臂 Tolansky 干涉自准直仪的测量反射镜更换为自准直仪的桥板反射镜 (底板长度为 100 mm), 且置于一根平直导轨上. 首先通过已标定的自准直仪完成对平直导轨各测量点多次测量, 获得各测量点处稳定的偏转角, 以此作为双臂 Tolansky 干涉自准直仪反射镜的偏角输入值. 调试完仪器后, 提取各测量点的圆心偏移量, 代入含厚度因素的关系 (18) 式计算各个偏转角并与自准直仪测量结果进行对较, 见图 10.

从图 10 可以看出, 在 1 mm 的分光镜厚度下, 对总量程为 1000 mm 的 10 个测量点进行测量, 双臂 Tolansky 干涉自准直仪的测量数据与已标定自准直仪的测量数据的相对偏差在 $\pm 0.9\%$ 内. 这与图 8 所示现象一致, 即在分光镜厚度为 1 mm 的条件下, 含厚度因素的 (18) 式与不含厚度因素 (19) 式的计算数值相对偏差仅为 0.22%.

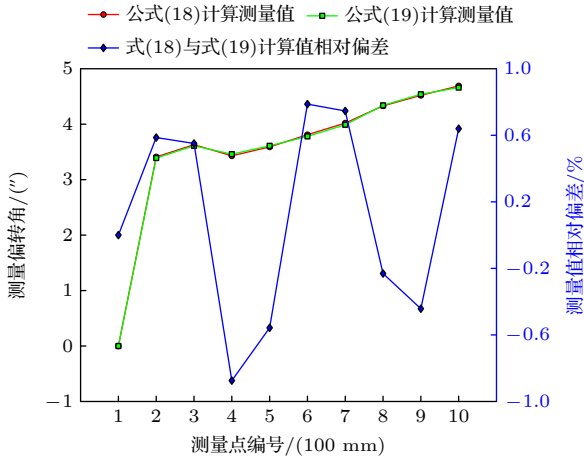


图 10 (18) 式与 (19) 式测量值计算结果比较

Fig. 10. Comparison of calculated results of measured values between Eq. (18) and Eq. (19).

7 结 论

论文分析了一种双臂 Tolansky 干涉自准直测角方案的原理, 通过理论推导、虚拟仿真和实验验证交叉互印的方式分析了其中分光镜厚度对测角准确性的影响, 建立了不用于分光镜厚度近似为零的测角关系式. 结果显示, 分光镜的厚度不仅影响测角准确性, 而且还能影响干涉同心圆环的圆心位置. 因此, 在实际使用时应尽量选用厚度小的分光镜. 这为后续改进 Tolansky 干涉进行微小角度测量提供了理论及实验参考.

参考文献

[1] She C, Xu L, Shan X D, Zhu H, Zhou Y, Wang Q L 2021 *Appl. Opt.* **60** 8016
 [2] Shimizu Y, Matsukuma H, Wei G 2019 *Sensors* **19** 5289
 [3] Zhao Y K, Fan X W, Wang C C, Lu L 2020 *Opt. Lasers Eng.* **126** 105866
 [4] Geckeler R D, Krause M, Just A, Kranz O, Bosse H 2015

Measurement **73** 231
 [5] Zhang M S 2021 *J. Phys. Conf. Ser.* **1952** 022020
 [6] Fu P, Zhang Y C, Zhao T, Zhao Y M, Tang S, Li Y, Han S D 2023 *Chin. J. Lasers* **51** 219 (in Chinese) [付鹏, 张艳春, 赵涛, 赵勇明, 唐松, 李颖, 韩沈丹 2023 *中国激光* **51** 219]
 [7] Wang S X, Kong L B, Wang C J, Cheung C F 2023 *Opt. Express* **31** 2234
 [8] Wu C G, Shen X Y 2023 *Journal of China Jiliang University* **34** 342(in Chinese)[吴晨光, 沈小燕 2023 *中国计量大学学报* **34** 342]
 [9] Wu C G, Shen X Y, Zhou S N 2023 *China Measur. Test (In press)* (in Chinese) [吴晨光, 沈小燕, 周世男 2023 *中国测试 (网络首发)*]
 [10] Chen Q X 2006 *Infrared* **8** 33 (in Chinese) [陈秋霞 2006 *红外* **8** 33]
 [11] Chen Y, Zhang X D, Lu X L, Zhang Z Y, Pan L N 2011 *OME Inf.* **28** 6 (in Chinese) [陈颖, 张学典, 逯兴莲, 张振一, 潘丽娜 2011 *光机电信息* **28** 6]
 [12] Xu W, Xu W H, Bouet N, Zhou J, Yan H F, Huang X J, Huang L, Lu M, Maxim Z, Chu Y S, Nazaretski E 2023 *Opt. Lasers Eng.* **161** 107331
 [13] Lan X H 2020 *M. S. Thesis* (Hangzhou: China Jiliang University) (in Chinese) [蓝旭辉 2020 硕士学位论文 (杭州: 中国计量大学)]
 [14] Guo C Y, Zhou Z J, Wu R, Su Z Y 2024 *Opt. Fiber Technol.* **86** 103841
 [15] Larichev R A, Filatov Y V 2013 *J. Opt. Technol.* **80** 554
 [16] Korolev A N, Gartsuev A I, Polishchuk G S, Tregub V P 2009 *J. Opt. Technol.* **76** 624
 [17] Shen M Z, Liao S T 2005 *KEM* **295-296** 337
 [18] Zhang B W, Cui J J, Ouyang Y F, Chen K, Fang Z Y 2023 *Acta Metrolog. Sin.* **44** 1202 (in Chinese) [张宝武, 崔建军, 欧阳焯锋, 陈恺, 方振远 2023 *计量学报* **44** 1202]
 [19] Ouyang Y F, Xu Z J, Zhang B W, Zhu L, Fang Z Y, Luo X H, Sun Y 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 0526001 (in Chinese) [欧阳焯锋, 许子杰, 张宝武, 朱玲, 方振远, 罗贤欢, 孙怡 2024 *光学学报* **44** 0526001]
 [20] Xu Z J, Zhang B W, Shi J H, Ouyang Y F, Zhu L, Fang Z Y 2024 *Opt. Techn.* **50** 459 (in Chinese) [许子杰, 张宝武, 施江焕, 欧阳焯锋, 朱玲, 方振远 2024 *光学技术* **50** 459]
 [21] Zhang B W, Xu Z J, Shi J H, Zhu L, Fang Z Y, Sun Y, Luo X H 2024 *J. China Jiliang Univ.* **35** 1 (in Chinese) [张宝武, 许子杰, 施江焕, 朱玲, 方振远, 孙怡, 罗贤欢 2024 *中国计量大学学报* **35** 1]
 [22] Ouyang Y F, Li Y B, Zhu L, Fang Z Y, Xue C W 2023 *J. China Jiliang Univ.* **34** 541 (in Chinese) [欧阳焯锋, 张宝武, 李玉彬, 朱玲, 方振远, 薛财文 2023 *中国计量大学学报* **34** 541]
 [23] Ouyang Y F, Cui J J, Zhang B W, Chen K, Yang N, Fang Z Y 2024 *Laser Techn.* **48** 135 (in Chinese) [欧阳焯锋, 崔建军, 张宝武, 陈恺, 杨宁, 方振远 2024 *激光技术* **48** 135]

Effect of beam splitter thickness on angle measurement accuracy of dual-arm Tolansky interferometric autocollimator*

FANG Zhenyuan¹⁾ ZHANG Baowu^{1)†} CUI Jianjun^{2)#} ZHANG Bin^{1)#}
CHEN Kai^{2)#} XU Zijie^{1)#} ZHU Ling^{1)#} SUN Yi^{1)#} LUO Xianhuan^{1)#}

1) (*College of Measurement Testing and Instrumentation, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China*)

2) (*National Institute of Metrology, Beijing 100013, China*)

(Received 26 August 2024; revised manuscript received 4 January 2025)

Abstract

In order to solve the problem that the measurement arm length needs to be obtained in real time when calculating the measurement angle in the process of Tolansky interference small angle measurement, a dual-arm Tolansky interference autocollimation angle measurement scheme is proposed, which not only maintains the function of Tolansky interference, but also integrates the principle of optical leverage. In the simulation study, it is found that the splitter with thickness in the scheme will lead to the lateral offset of the optical axis of the emitted light, which will change the position of the virtual point light source, and finally change the position of the center of the interference circle on the detector. In this work, in order to reduce the influence of the thickness of the beam splitter on the angle measurement accuracy of the angle measurement scheme, the optical path structure of the angle measurement scheme is redrawn, and the relationship between the center offset of the interference ring and the deflection angle, which contains the thickness factor and can accurately describe the optical path, is deduced. Therefore, the corresponding method is adopted as follows. Firstly, the measurement optical path of the splitter with a thickness factor is redrawn, the splitter is partially enlarged, and the original beam is replaced with the center line of the laser beam to draw the optical path. Then, the position of the virtual point light source under the influence of the thickness of the splitter is analyzed by using the single refraction spherical formula and the transition formula of geometric optics, and the relationship between the offset of the interference center and the deflection angle with the thickness of the splitter is established. Secondly, the coordinate information of the center of the interference ring under different thickness parameters of the splitter is obtained by using the virtual simulation experiment, which proves the correctness of the theoretical analysis. Then, simulation experiments such as simulation measurement of multiple sets of setting angles and angle measurement under different splitter thickness conditions are carried out, and the accuracy of the relationship including the splitter thickness factor deduced above is cross-validated. Finally, combined with the actual experiment, measurements are taken on the guide rail and calibrated autocollimator, and the influence of beam splitter thickness on angle measurement accuracy is investigated in detail. The research results are obtained below. Experiments show that the thickness of the splitter will affect the position of the initial center of the circle; with the increase of the thickness of the splitter, the error between the simulation measurement results and the relationship including the thickness factor is within $\pm 0.5\%$ at different angles, and the experimental data and theoretical results are in good agreement. At the same angle, as the thickness of the beam splitter increases, the difference between the established relationship and the approximate relationship gradually increases. With 1-mm-thick beam splitter, the relative error between the established relationship and the calculated value of the approximate relationship is only 0.22% based on the data of the guide rail measured by the calibrated autocollimator. From these results, a conclusion can be drawn below. The utilizing a thinner spectroscopy can effectively reduce the calculation and measurement errors, providing an important guidance for carrying out the in-depth research and development of this new autocollimator.

Keywords: Tolansky interference, autocollimator, concentric rings, micro/small angle

PACS: 42.15.-i, 42.25.Hz

DOI: 10.7498/aps.74.20241174

CSTR: 32037.14.aps.74.20241174

* Project supported by the State Administration of Market Supervision and Administration of Science and Technology Plan Program, China (Grant No. 2022MK220) and the National Key R&D Program of China (Grant No. 2023YFF0616203).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: zhangbaowu@126.com



分光镜厚度对双臂Tolansky干涉自准直仪测角准确性的影响

方振远 张宝武 崔建军 张斌 陈恺 许子杰 朱玲 孙怡 罗贤欢

Effect of beam splitter thickness on angle measurement accuracy of dual-arm Tolansky interferometric autocollimator

FANG Zhenyuan ZHANG Baowu CUI Jianjun ZHANG Bin CHEN Kai XU Zijie ZHU Ling SUN Yi
LUO Xianhuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 054204 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241174

CSTR: 32037.14.aps.74.20241174

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241174>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用海底弹射区角度-距离干涉结构特征实现声源深度估计

Source depth estimation using angle-range interference pattern in deep ocean bottom bounce area

物理学报. 2022, 71(18): 184301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220746>

基于波导-同心环形谐振腔模型的纳米流体荧光颗粒微位移检测

Micro-displacement detection of nanofluidic fluorescent particles based on waveguide-concentric ring resonator model

物理学报. 2022, 71(20): 204702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220771>

基于移动渐近线算法的大角度偏转分束器的智能设计

Intelligent design of large angle deflection beam splitter based on method of moving asymptotes

物理学报. 2021, 70(23): 234102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210117>

基于分段边缘拟合的测风多普勒差分干涉仪成像热漂移监测方法

Thermal imaging drift monitoring of Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy for wind measurement based on segmented edge fitting

物理学报. 2022, 71(8): 084201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212086>

基于长电偶极子和大磁圆环的新型电磁矢量传感器双基地多输入多输出雷达角度和极化参数联合估计

Joint angle and polarization parameter estimation for the new designed bistatic multiple-input multiple-output radar with long dipoles and large loops

物理学报. 2021, 70(4): 044302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201111>

基于银纳米链的马赫-曾德干涉仪结构的生物传感器

Biosensor based on plasmonic Mach-Zehnder interferometer with metallic gratings

物理学报. 2022, 71(1): 017301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211420>