

厚度测量中对射激光束共线性视觉检测

李加福, 朱小平, 杜华, 唐文彦

引用本文:

李加福, 朱小平, 杜华, 等. 厚度测量中对射激光束共线性视觉检测[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(8): 1690–1699.

LI Jia-fu, ZHU Xiao-ping, DU Hua, et al. Vision detection for laser beam collinearity in thickness measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(8): 1690–1699.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202808.1690>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

未知相对位置条件下回转体厚度的双激光检测

Thickness measurement of rotary parts with double laser under unknown relative position condition

光学精密工程. 2017, 25(9): 2300–2308 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172509.2300>

基于球形目标的激光位移传感器光束方向标定

Calibration of beam direction of laser displacement sensor based on spherical target

光学精密工程. 2015, 23(3): 678–685 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152303.0678>

激光位移传感器在自由曲面测量中的应用

Application of laser displacement sensor to free-form surface measurement

光学精密工程. 2015, 23(7): 1939–1947 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152307.1939>

坐标缩放激光角谱传输及在激光光学系统中的应用

Angular-spectrum method with scaling factor and its applications to design of laser focus optical system

光学精密工程. 2015, 23(3): 617–625 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152303.0617>

基于激光传感器的滚珠螺母型面测量

Measurement of ball nut profile using laser sensors

光学精密工程. 2020, 28(1): 39–49 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202801.0039>

文章编号 1004-924X(2020)08-1690-10

厚度测量中对射激光束共线性视觉检测

李加福^{1,2}, 朱小平¹, 杜华^{1*}, 唐文彦²

- (1. 中国计量科学研究院, 北京 100029;
2. 哈尔滨工业大学 电气及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对厚度测量中对射激光束共线性的要求, 提出了一种基于双分光棱镜的传感器光轴空间位姿视觉检测方法。在分光镜坐标系下, 分析了单条激光束在组合分光棱镜中的光线传播和光斑变化规律, 建立了两条激光相对位姿与光斑中心点之间的数学模型。借助于棱镜坐标系和图像坐标系之间的转换关系, 可以根据四个拟合光斑中心坐标快速计算出激光束的相对位姿, 进而将激光束的共线测量转换为光斑中心坐标的拟合、对比问题。实验结果表明, 在传感器测量范围内, 该方法可以使两条激光束之间的夹角不大于 0.17° , 距离不大于 0.05 mm ; 同时, 调整前后对量块的测量表明, 厚度测量误差由 $12\ \mu\text{m}$ 减小到 $4\ \mu\text{m}$, 间接验证了共线检测方法的有效性。所提方法实现了光束调整过程的数字化、可视化, 并且使共线性测量结果具有可溯源性, 有助于定量分析因两个激光传感器测量线不重合而引起的厚度测量误差。

关键词: 共线检测; 激光光轴; 厚度测量; 激光位移传感器

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202808.1690

Vision detection for laser beam collinearity in thickness measurement

LI Jia-fu^{1,2}, ZHU Xiao-ping¹, DU Hua^{1*}, TANG Wen-yan²

- (1. *National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;*
2. *Scholl of Electrical Engineering and Automation,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)
** Corresponding author, E-mail: Duh@nim.ac.cn*

Abstract: To meet the requirement of the collinearity of laser beams during thickness measurements, a vision detection method for sensor optical axis position is proposed based on a double-splitting prism. According to the light propagation path and spot variation rules of a single laser beam in two spectroscopic prisms, the mathematical model between the relative positions of the two lasers and the spot centers is constructed according to the spectroscope coordinate system. With the help of the conversion relationship between the prism coordinate system and image coordinate system, the relative positions of the laser beams can be quickly calculated using the four fitting spot center coordinates, which can convert the collinearity measurement of the laser beam into the fitting and provides a comparison of spot center coordinates. The experimental results show that using the proposed method, the maxi-

收稿日期: 2020-01-21; 修订日期: 2020-03-26.

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发项目 (No. YQKFB1803-1); 质量技术监督能力提升专项 (No. ANL1822)

mumangle between the two laser beams is 0.17° , and the maximum distance is 0.05 mm in the measuring range. Under these conditions, the measurement of the gauge block before and after adjustment shows that the thickness measurement error is reduced from $12\ \mu\text{m}$ to $4\ \mu\text{m}$, which indirectly verifies the effectiveness of the collinear detection method. The proposed method realizes digitalization and visualization in the laser beam adjustment process, enables metrological traceability of the measurement results, and helps to quantitatively analyze the thickness measurement errors caused by the non-coincidence of the measuring lines of the two laser sensors.

Key words: collinearity detection; laser axis; thickness measurement; laser displacement sensor

1 引言

基于激光三角法的厚度测量方式,需要利用两个激光位移传感器测量工件的内外两侧,并由传感器间距减去两个示值计算出对应的厚度值^[1-3]。为了使测量结果符合厚度定义,并且保证传感器间距标定结果的准确性,两个传感器的虚轴在测量前必须重合。但在实际中,如果不经过任何的调校措施,传感器的安装很难满足上述约束条件。因此,双激光束共线性的检测成为一个不容忽视的问题。

目前,激光束位姿检测方法已经取得了一定的进展。根据传感器的数量,检测方法可以分为单测头和双测头两种方式。其中,单测头激光束空间矢量的标定方法包括平面标定法^[4]、球步距标定法^[5-6]、等值球点标定法^[7]以及在机视觉标定法^[8]。它们的核心是由三维导轨带动传感器对某已知几何量进行测量,通过对该几何量的拟合计算反推激光束位姿。作为一种在机标定方式,它可以实现激光传感器坐标系与三坐标或机床坐标系的统一,但检测结果与运动轴精度有关。同时,该类方法对基准件、传感器方位旋转的要求,或者对激光束长度的约束,校准过程比较繁琐,不太适用于双传感器激光束共线性/相对位姿的校准。

对于双侧头测量轴线位姿的检测,依据传感器的安装方式,可以分为反向激光束或者对射激光束测量方法。在反向激光束的位姿检测方面, Yang^[9]利用标准内圆对两激光束间的夹角进行了标定。刘新波^[10]提出了基于阶梯状调校板的反向激光束共线性视觉测量方法,用于解决内径、平行平面间距的激光测量问题。其测量原理为沿基准方向平移摄像头,依据获取的光斑位置和平移距离计算出两个传感器光轴的相对位置关系。

该方法需对两个光轴分别进行检测,并且,当使用两个对射安装的激光位移传感器进行厚度测量时,传感器间的有限工作距离也使得上述方法不再适用。

在对射激光束的位姿检测方面,周富强等^[11]提出了基于未知运动平面靶的双传感器线激光视觉测量系统参数标定方法,其原理是利用平面靶标中的正方形顶点对传感器进行分别标定,该方法可不依赖于专门的空间坐标测量设备。为了实现基于双激光的植物叶片厚度检测, Lee 等^[12]提出了基于针孔的双激光束对准方法。将带有针孔的标准件放置在两个传感器之间的不同位置,保证激光束都能够穿过针孔,可以实现两个传感器光轴在测量装置中的对准。显然,这种装配、检测分离的工作方式,不利于激光传感器的安装调整,并且存在精度低,无法数字化、可视化的缺点。

本文在分析激光束共线性最大允差的基础上,利用图像处理可量化光斑中心坐标的优势,并结合棱镜的分光作用,提出了一种基于分光棱镜的对射激光束共线性视觉检测方法,旨在通过计算摄像机获取的激光光斑中心坐标来判断激光束之间的相对位置关系。

2 激光束不共线对厚度测量精度的影响

采用激光位移传感器进行回转壳段、平行平板厚度测量时,激光束不共线对应的4种测量误差模型如图1所示。其中, A 和 B 对应为两个传感器的测量起始点,并且两点之间的距离 AB 已知, A_1 和 B_1 为激光束与截面之间的交点(实际测量点), 曲率截面圆心为 O , 两条激光束之间的夹角为 α 。

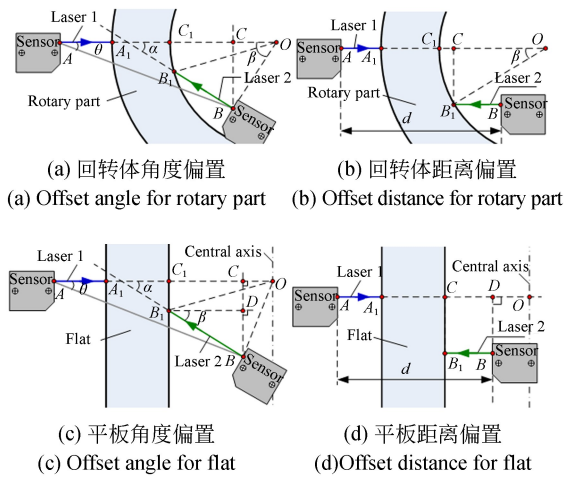


图 1 激光束不共线时厚度测量示意图

Fig. 1 Thickness measurement with non-collinear laser beams

对于回转类壳段而言,其厚度测量误差为:

$$\Delta x = R - \sqrt{R^2 - (AB \times \sin \theta / \cos \alpha - BB_1 \times \sin \alpha)^2} + AB \times (\cos \theta - 1) + BB_1 \times (1 - \cos \alpha). \quad (1)$$

当内径 OC_1 的变化范围为 $100 \sim 1\,100$ mm, 理论厚度 A_1C_1 的变化范围是 $2 \sim 22$ mm 时,激光

束夹角引起的厚度测量误差如图 2(a) 所示。当传感器位置和圆筒状壳段内径不变时,被测件厚度越小、轴线夹角越大,测量误差就越大,且最大值不小于 $45 \mu\text{m}$ 。当激光束测量线夹角不大于 0.25° 时,它引起的厚度测量误差在 $0.25 \mu\text{m}$ 以内。当两条激光束间距的变化范围是 $0.5 \sim 3.0$ mm 时,不同激光束间距引起的厚度测量误差如图 2(b) 所示。壳段内径越小、平行激光束间距越大,测量误差就越大。当激光束测量线间距不大于 0.22 mm 时,它引起的厚度测量误差在 $0.25 \mu\text{m}$ 以内。

对于平行平板而言,厚度测量误差等于 $\Delta x = AB(\cos \theta - 1) + BB_1(1 - \cos \alpha)$ 。假设 $AB = 25$ mm, $\theta = 0.1^\circ$, 两条激光束轴向夹角 α 的变化范围是 $0^\circ \sim 4^\circ$, 理论厚度 A_1C_1 的变化范围是 $2 \sim 22$ mm, 此时激光束不共线引起的厚度测量误差曲线如图 2(c) 所示。当其他参数不变时,被测件厚度越大、轴线夹角越大,测量误差也就越大,且误差不大于 $50 \mu\text{m}$ 。同时,激光束测量线夹角不大于 0.25° 时,它引起的厚度测量误差小于 $0.25 \mu\text{m}$ 。另外,激光束间平行不重合时,测量结果只与平板表面形貌有关。

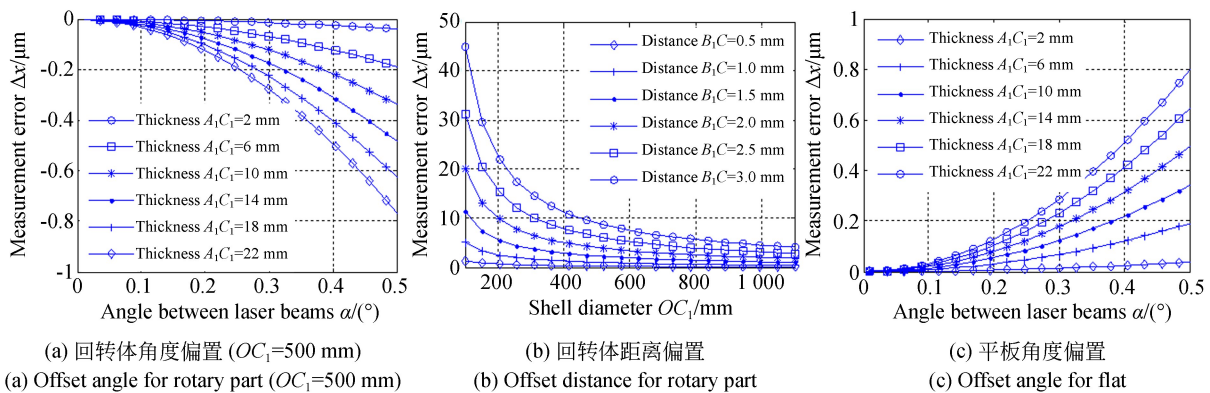


图 2 激光束不共线时厚度测量误差曲线

Fig. 2 Thickness measurement errors caused by non-collinear laser beams

上述分析证明了调校激光光轴的必要性。同时,对于厚度大于 2 mm 的部件而言,为了保证厚度测量误差小于 $1 \mu\text{m}$, 两条激光光轴之间的夹角应小于 0.25° , 传感器测量线之间的距离应小于 0.1 mm。这为厚度测量中激光束的共线调整提供了理论依据。

3 基于分光镜的激光束方向测量原理

3.1 基本原理

激光位移传感器激光束共线测量装置的结构及原理如图 3 所示。该测量装置主要由光学成像系统、支架、两个分光棱镜、反光镜和微动

平台组成。其中,将微动平台的移动方向作为基准方向,并保证分光镜的激光入射面与该基准线垂直。另外,在共线性测量装置中,分光镜 1、分光镜 2、反光镜和接收屏幕都利用支架 3 固定在微动平台上。当微动平台移动时,能够在保证分光镜与接收屏位置关系固定的前提下,改变测量装置与激光器之间的相对位置,进而获取不同位置的激光束光斑中心。

借助于分光镜的半透半反功能,传感器 1 发出的激光束首先进入分光棱镜 1,在经过棱镜 1、棱镜 2 和反光镜之后,会在 CCD 接收屏上产生两个椭圆光斑 A_1, B_1 。根据激光在两个分光棱镜中的传播规律,可以将两个光斑中心的连线作为激光束在分光镜中的传播路线。同理,激光位移传感器 2 发出的激光首先射入分光棱镜 2,光学成像系统也会采集到该光束对应的两个光斑 A_2, B_2 。利用计算机提取光斑中心坐标,便能计算出当前测量位置两条激光束之间相对位置关系。

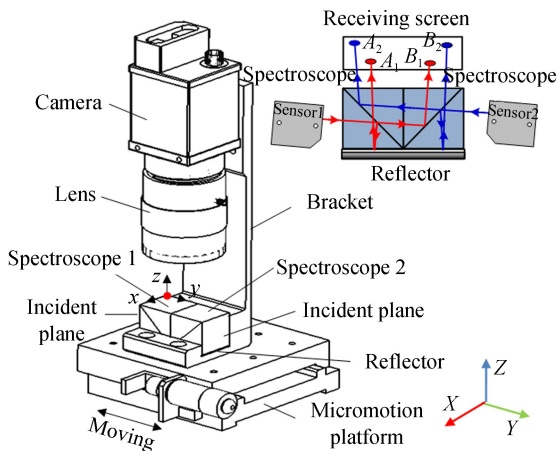


图 3 激光束共线测量装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of laser collinear measuring devices

显然,为了确立光斑中心坐标与激光束空间位姿之间的关系式,需要对激光束在两个分光棱镜中的传播规律进行分析。根据分光镜 1 的顶点及其相邻的垂直边,建立了分光镜坐标系 $o-xyz$ 。为简化分析过程,下一节对激光束在 xoy, yoz 两个平面内的传播规律分别进行讨论。

3.2 xoy 平面内激光束传播规律

当激光束在 xoy 平面内的入射角为 θ_{xy} ,在 yoz 平面内的入射角为 90° ,并且忽略两个分光镜间隙对光路的影响时,激光传感器 1 的传播路径如图 4 所示。其中, $C_1 F_1$ 为理想状态下的激光束传播路线, $C_1 D_1$ 是考虑分光镜折射率时的激光束传播路线。并且,传感器入射光线和出射光线相互平行,两光线之间的距离表达式为:

$$d = \cos(\theta_{xy}) \times 2 \times L \times [\sin \theta_{xy} - \sin \theta'_{xy}], \quad (1)$$

式中: L 为分光镜的边长; θ'_{xy} 为入射光线折射角。

通常,分光镜的材料为 K9,折射率为 1.514,式(1)中的距离表达式可以简化为:

$$d = 0.3395L \times \sin 2\theta_{xy}. \quad (2)$$

因此,只要传感器 2 发射的激光束与激光器 1 的出射光线 $D_1 E_1$ 共线,便能保证两个传感器对应的光斑中心分别重合。这种光斑重合关系不会随着测量装置位置的变化而变化,即光斑重合是保证两条激光束共线的必要条件。

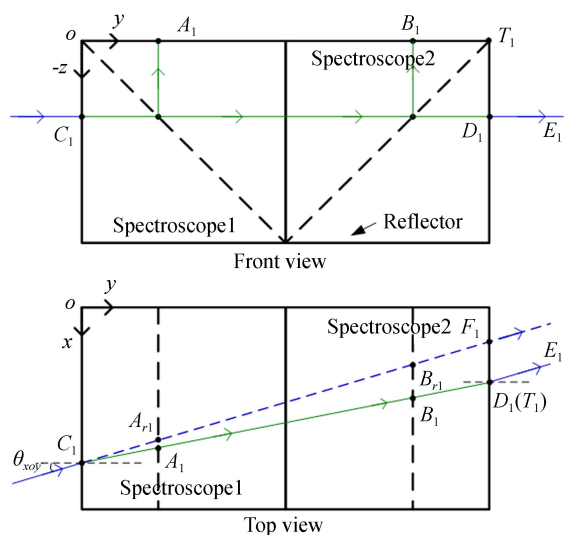


图 4 激光在 xoy 平面内的传播路径

Fig. 4 Laser propagation path in plane xoy

另一方面,假设在 $o-xyz$ 坐标系下激光入射点 C_1 的坐标为 (x_c, y_c, z_c) ,光斑 A_1 的中心点坐标 (x_a, y_a, z_a) 可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\tan(\theta'_{xy}) \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}. \quad (3)$$

光斑 B_1 的中心点坐标 (x_b, y_b, z_b) 可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \tan(\theta'_{xy}) \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2L \times \tan(\theta'_{xy}) \\ 2L \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

根据式(3)和式(4),推导出光斑间距 $|A_1 B_1|$ 的表达式为:

$$|A_1 B_1| = 2(L + z_c) \times \sqrt{1 + \tan^2(\theta'_{xy})}. \quad (5)$$

实际光斑 A_1, B_1 与理论光斑 A_{r1}, B_{r1} 的距离为:

$$\begin{cases} |A_1 A_{r1}| = [\tan(\theta_{xy}) - \tan(\theta'_{xy})] \times z_c \\ |B_1 B_{r1}| = [\tan(\theta_{xy}) - \tan(\theta'_{xy})] \times (2L + z_c) \end{cases}. \quad (6)$$

由式(3)~式(5)可知,当测量装置沿基准方向 y 移动距离 l 时,激光束入射角 θ_{xy} 保持不变,点 A_1, B_1, C_1 的 x 轴坐标发生变化,且大小等于 $\tan(\theta_{xy}) \times l$,距离 $A_1 B_1$ 始终不变。因此,利用几何法对图 4 中激光束在 xoy 平面内的传播规律进行分析可以得出两个主要结论:(1)在进行激光束测量时,两个传感器对应的光斑中心分别重合是保证传感器光轴共线的必要条件;(2)当测量装置沿基准方向移动距离 l 时,光斑中心 x 轴坐标随之改变,且大小等于 $\tan(\theta_{xy}) \times l$,而两个光斑的中心间距保持不变。

3.3 $yo z$ 平面内激光束传播规律

当激光束在 xoy 平面内的入射角为 90° ,在 $yo z$ 平面内的入射角为 θ_{yz} 时,激光传感器 1 的传播路径如图 5 所示。假设在 $oxyz$ 坐标系下激光入射点 C_1 的坐标为 (x_c, y_c, z_c) ,光斑 A_1 的中心点坐标 (x_a, y_a, z_a) 可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2L \tan(\theta'_{yz}) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

光斑 B_1 的中心点坐标 (x_b, y_b, z_b) 可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2L - 2L \tan(\theta'_{yz}) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

根据式(7)和式(8),光斑间距 $|A_1 B_1|$ 的表达式为:

$$|A_1 B_1| = 4L \times \tan(\theta'_{yz}) + 2z_c. \quad (9)$$

因此,当测量装置沿基准方向 y 移动距离 l 时,激光束 1 的入射角 θ_{yz} 保持不变,点 A_1, B_1, C_1 的 y 轴坐标会发生改变,且大小等于 $\tan(\theta_{yz}) \times l$,而距离 $A_1 B_1$ 也会随之增加 $\tan(\theta_{yz}) \times 2l$ 。由于图 3 中激光器 1 的传播路线并不是中心对称,当传感器 2 的光斑 A_2, B_2 与激光器 1 的 A_1, B_1 重合时,传感器 2 的激光束入射角一定不等于激光束 1 的入射角 θ_{yz} 。这也意味着当测量装置沿基准直线移动距离 l 时,点 A_2, B_2 的 y 轴坐标变化量不能等于 $\tan(\theta_{yz}) \times l$,即随着测量装置的改变,两个传感器的光斑位置和光斑间距都会发生变化。

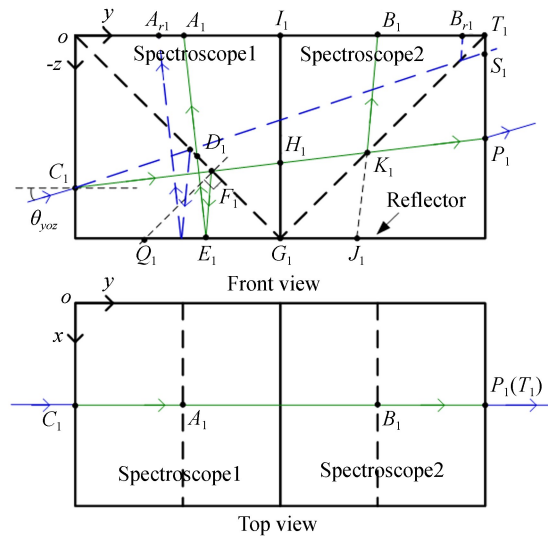


图 5 激光在 $yo z$ 平面内的传播路径

Fig. 5 Laser propagation path in plane $yo z$

另一方面,根据图 5 中的三角几何关系式,可推导出 $I_1 G_1$ 为激光在两个棱镜中形成的反射光线 $E_1 A_1, K_1 B_1$ 的对称线。其证明过程如下:

$$\begin{aligned} &\because \angle E_1 F_1 G_1 = \angle H_1 F_1 G_1, \angle E_1 G_1 F_1 = \angle F_1 G_1 H_1, F_1 G_1 = F_1 G_1 \\ &\therefore \triangle E_1 F_1 G_1 \cong \triangle H_1 F_1 G_1. \end{aligned}$$

$\because \angle H_1 G_1 K_1 = \angle J_1 G_1 K_1, \angle H_1 K_1 G_1 = \angle G_1 K_1 J_1, G_1 K_1 = G_1 K_1。$

$\therefore \triangle H_1 G_1 K_1 \cong \triangle J_1 G_1 K_1, E_1 G_1 = H_1 G_1 = G_1 J_1。$

又 $\because \angle G_1 K_1 J_1 = 45 - \theta'_{yoz}, \angle Q_1 F_1 E_1 = 45 - \theta'_{yoz}, \angle K_1 G_1 J_1 = 45^\circ, \angle F_1 Q_1 E_1 = 45^\circ。$

$\therefore \angle G_1 J_1 K_1 = \angle Q_1 E_1 F_1 = \angle D_1 E_1 G_1 = 90 + \theta'_{yoz}。$

$\because E_1 G_1 = G_1 J_1, \angle D_1 E_1 G_1 = \angle G_1 J_1 K_1, I_1 G_1 = I_1 G_1。$

$\therefore I_1 A_1 = I_1 B_1。$

由于 $B_1 T_1 = T_1 P_1$, 实际光斑 B_1 与理论光斑 B_{r1} 的距离为 $|B_1 B_{r1}|$, 它与光斑 A_1 以及入射角之间的关系为:

$$[y_b \times \tan(\theta'_{yoz}) + |B_1 B_{r1}|] / (y_b + |B_1 B_{r1}|) = \tan(\theta_{yoz}). \quad (10)$$

即 $|B_1 B_{r1}|$ 可以表示为:

$$|B_1 B_{r1}| = (\tan(\theta'_{yoz}) - \tan(\theta_{yoz})) / (\tan(\theta_{yoz}) - 1) \times y_b. \quad (11)$$

同理, 光斑 A_1 与理论光斑 A_{r1} 的距离为:

$$|A_1 A_{r1}| = [\tan(\theta'_{yoz}) - \tan(\theta_{yoz})] / (\tan(\theta_{yoz}) - 1) \times y_a. \quad (12)$$

利用几何法对图 5 中光束在 $yo z$ 平面内的传播规律进行分析可以得出两个主要结论: (1) 当测量装置沿基准方向移动距离 l 时, 光斑中心的 y 轴坐标随之改变, 且大小等于 $\tan(\theta_{yoz}) \times l$, 两个光斑中心点距离增加 $\tan(\theta_{yoz}) \times 2l$; (2) 单条激光束在两个棱镜中对应的出射光线 $E_1 A_1, K_1 B_1$ 关于边 $I_1 G_1$ 对称。

综上所述, 双光轴共线判断的标准是: 在 xoy 平面内保证两条光束共线的条件是两个传感器的光斑分别重合并且光斑中心坐标位置不会随着测量位置的变化而改变; 在 $yo z$ 平面内保证两条光束共线的条件是两个传感器的光斑距离在各个测量位置均相等。

4 图像坐标系下激光束位姿计算

前一节分析了激光束在分光镜三维坐标系 $o-xyz$ 下的传播路线, 但实际光斑中心的处理是在二维图像坐标系 XOY 下完成的。因此, 需要计算图像坐标系下双激光光轴的相对位姿。

假设利用测量装置进行了 m 次等间距测量, 该装置每次沿基准方向移动的距离为 l 。因此, 在图像坐标系 XOY 下, 第 i 次测量 ($i \leq m$) 时激光传感器 1 对应的光斑中心坐标可以表示为 $A_1^i = (X_{a1}^i, Y_{a1}^i), B_1^i = (X_{b1}^i, Y_{b1}^i)$, 激光传感器 2 对应的光斑中心坐标为 $A_2^i = (X_{a2}^i, Y_{a2}^i), B_2^i = (X_{b2}^i, Y_{b2}^i)。$

由于基准方向与分光镜坐标系 $o-xyz$ 的 y 轴平行, 故只需确定图像坐标系与分光镜坐标系之间的旋转角度 ω 。对式(3), 式(4), 式(7)和式(8)的分析可得, 当测量装置移动时, 在分光镜坐标系 $o-xyz$ 下, 单个激光束对应的两个光斑的基准方向坐标分量之和总是等于 $2L$; 在图像坐标系 XOY 下, 该坐标分量之和是常数, 即:

$$\sum_{i=1}^{m-1} [(Y_{a1}^{i+1} - Y_{a1}^i) \times \cos(\omega) + (X_{b1}^{i+1} - X_{b1}^i) \times \sin(\omega)] = 0. \quad (13)$$

据此, 可得图像坐标系与棱镜坐标系之间的转换角度 ω 。同时, 在棱镜坐标系下, 光斑中心坐标 $A_j^i (X_{aj}^i, Y_{aj}^i), B_j^i (X_{bj}^i, Y_{bj}^i)$ 分别为:

$$\begin{cases} X_{aj}^i = X_{aj}^i \cos(\omega) + Y_{aj}^i \sin(\omega) \\ Y_{aj}^i = Y_{aj}^i \cos(\omega) - X_{aj}^i \sin(\omega) \end{cases}, \quad (14)$$

$$\begin{cases} X_{bj}^i = X_{bj}^i \cos(\omega) + Y_{bj}^i \sin(\omega) \\ Y_{bj}^i = Y_{bj}^i \cos(\omega) - X_{bj}^i \sin(\omega) \end{cases}. \quad (15)$$

在此基础之上, 对两激光束在分光镜坐标系 xoy 平面内的相对位姿进行计算。在第 i 次测量位置, 激光传感器 1, 2 的在 xoy 平面内的入射角分别为 $\theta_{1xy}^i, \theta_{2xy}^i$, 其计算公式为:

$$\begin{cases} \theta_{1xy}^i = \text{atan} \left[\frac{(X_{a1}^{i+1} - X_{a1}^i + X_{b1}^{i+1} - X_{b1}^i) \times K_{\text{CCD}}}{2l} \right] \\ \theta_{2xy}^i = \text{atan} \left[\frac{(X_{a2}^{i+1} - X_{a2}^i + X_{b2}^{i+1} - X_{b2}^i) \times K_{\text{CCD}}}{2l} \right] \end{cases}, \quad (16)$$

式中 K_{CCD} 为图像采集系统的放大倍数。

时,4 个光斑中心的 x 轴坐标位置分别为:

根据公式(6),在不考虑折射率对光路的影响

$$\begin{cases} Xr'_{a1} \approx X'_{a1} + \left(\frac{L}{K_{\text{CCD}}} - \frac{Y'_{b1} - Y'_{a1}}{2} \right) \times [\tan(\theta'_{1,xy}) - \tan(\theta^i_{1,xy})] \\ Xr'_{b1} \approx X'_{b1} + \left(\frac{L}{K_{\text{CCD}}} + \frac{Y'_{b1} - Y'_{a1}}{2} \right) \times [\tan(\theta^i_{1,xy}) - \tan(\theta'_{1,xy})] \\ Xr'_{a2} \approx X'_{a2} + \left(\frac{L}{K_{\text{CCD}}} - \frac{Y'_{b2} - Y'_{a2}}{2} \right) \times [\tan(\theta^i_{2,xy}) - \tan(\theta'_{2,xy})] \\ Xr'_{b2} \approx X'_{b2} + \left(\frac{L}{K_{\text{CCD}}} + \frac{Y'_{b2} - Y'_{a2}}{2} \right) \times [\tan(\theta^i_{2,xy}) - \tan(\theta'_{2,xy})] \end{cases} \quad (17)$$

根据式(17),在 xy 平面内两光轴夹角 α_{xy} 的计算公式为:

$$\alpha_{xy} = \theta^i_{1,xy} - \theta^i_{2,xy}. \quad (18)$$

根据式(18),在 xy 平面内两光轴间距 d_{xy} 的计算公式为:

$$d_{xy} = 0.5K_{\text{CCD}} \times (Xr'_{a1} - Xr'_{a2} + Xr'_{b1} - Xr'_{b2}). \quad (19)$$

另一方面,根据激光在分光镜坐标系 yoz 平

面内的传播规律可知,激光传感器 1,2 的折射角 $\theta_{i1,yoz}, \theta_{i2,yoz}$ 分别为:

$$\begin{cases} \theta^i_{1,yoz} = a \tan \left(K_{\text{CCD}} \times \frac{Y'^{i+1}_{a1} - Y'^i_{a1} + Y'^{i+1}_{b1} - Y'^i_{b1}}{2l} \right) \\ \theta^i_{2,yoz} = a \tan \left(K_{\text{CCD}} \times \frac{Y'^{i+1}_{a2} - Y'^i_{a2} + Y'^{i+1}_{b2} - Y'^i_{b2}}{2l} \right) \end{cases} \quad (20)$$

根据式(11)和式(12),在不考虑折射率对光路的影响时,4 个光斑中心的 y 轴坐标分别为:

$$\begin{cases} Yr'_{a1} \approx Y'_{a1} - \left(\frac{L}{K_{\text{CCD}}} - \frac{Y'_{b1} - Y'_{a1}}{2} \right) \times \frac{\tan(\theta^i_{1,yoz}) - \tan(\theta^i_{1,yoz})}{\tan(\theta^i_{1,yoz}) - 1} \\ Yr'_{b1} \approx Y'_{b1} + \left(\frac{L}{K_{\text{CCD}}} + \frac{Y'_{b1} - Y'_{a1}}{2} \right) \times \frac{\tan(\theta^i_{1,yoz}) - \tan(\theta^i_{1,yoz})}{\tan(\theta^i_{1,yoz}) - 1} \\ Yr'_{a2} \approx Y'_{a2} - \left(\frac{L}{K_{\text{CCD}}} - \frac{Y'_{b2} - Y'_{a2}}{2} \right) \times \frac{\tan(\theta^i_{2,yoz}) - \tan(\theta^i_{2,yoz})}{\tan(\theta^i_{2,yoz}) - 1} \\ Yr'_{b2} \approx Y'_{b2} + \left(\frac{L}{K_{\text{CCD}}} + \frac{Y'_{b2} - Y'_{a2}}{2} \right) \times \frac{\tan(\theta^i_{2,yoz}) - \tan(\theta^i_{2,yoz})}{\tan(\theta^i_{2,yoz}) - 1} \end{cases} \quad (21)$$

根据式(21),在 yoz 平面内两光轴夹角 α_{yoz} 为:

$$\alpha_{yoz} = \theta^i_{1,yoz} - \theta^i_{2,yoz}. \quad (22)$$

根据式(22),在 yoz 平面内两光轴间距 d_{yoz} 为:

$$d_{yoz} = (Yr'_{a1} - Yr'_{a2} + Yr'_{b1} - Yr'_{b2}) \times 0.5. \quad (23)$$

5 实 验

5.1 共线性测量实验

激光束共线测量实验装置如图 6 所示,利用该装置对两个激光位移传感器之间的相对位姿进行了调节和测量。传感器型号为德国米铱 ILD1700-10LL,测量范围为 10 mm。摄像机的型号为 MER-500-7UM/UC,通过 USB 将采集到的两条激光束对应光斑传输给计算机,经标定后光斑图像单个像素对应的实际尺寸为 0.02

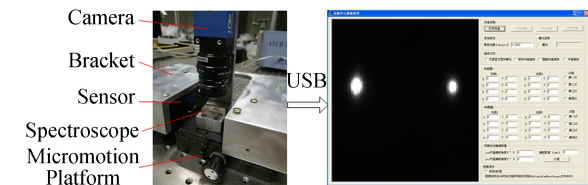


图 6 光轴共线性测量装置

Fig. 6 Measurement device of optical axis collinearity

mm。在实验中,仅需要采集厚度测量范围内的激光光斑,即在微动平台示值为 5,10,15,20 处分别对光斑中心进行测量。在测量前,需要粗调激光位移传感器与测量装置之间的位置,使其中一个传感器的示值在 -5 mm 左右。整个测量过程进行了 3 次重复性测量。对光斑中心的提取采用多阈值加高斯拟合的方法^[13-14],表 1,表 2 分别为在不同测量位置获取的传感器 1 和传感器 2 对应光斑的中心坐标。

表 1 图像坐标系 XOY 下激光束 1 光斑中心的测量结果
Tab.1 Measurement results of spot center of laser 1 in image coordinate XOY (pixel)

光斑	No.	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm
光斑 1	1	1617.12, 537.60	1616.73, 536.85	1616.85, 536.91	1616.73, 537.75
	2	1616.94, 537.91	1616.62, 536.93	1616.33, 537.06	1616.74, 537.78
	3	1616.80, 537.89	1616.62, 536.77	1616.41, 536.95	1616.63, 537.68
光斑 2	1	479.77, 434.23	480.01, 433.28	480.31, 433.68	479.73, 434.93
	2	479.73, 434.37	480.15, 433.70	480.15, 434.46	480.19, 434.84
	3	479.73, 434.37	479.96, 433.53	480.08, 434.45	480.17, 434.88

表 2 图像坐标系 XOY 下激光束 2 光斑中心的测量结果
Tab.2 Measurement results of spot center of laser 2 in image coordinate XOY (pixel)

光斑	No.	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm
光斑 1	1	1617.41, 535.28	1617.26, 534.35	1616.42, 533.74	1616.24, 534.58
	2	1617.46, 533.94	1616.64, 532.57	1617.06, 533.53	1617.04, 534.26
	3	1616.74, 534.82	1617.08, 533.96	1616.42, 533.65	1616.74, 533.98
光斑 2	1	479.69,433.35	480.46, 432.41	479.84, 433.08	480.64, 433.63
	2	480.14, 433.36	479.67, 432.52	479.88, 433.23	480.23, 433.68
	3	479.57, 433.25	479.68, 432.38	480.41, 433.15	480.23, 433.76

根据第 4 节双激光束位姿的计算方法,获取的两个传感器测量线之间的相对位姿关系如表 3 所示。从表 3 可知,两个传感器测量线之间的夹角最大为 0.17°;在有效测量范围内,两条激光束之间的位置差最大为 0.05 mm,满足激光束共线性最大允差的设计要求。从 3 组测量结果中可以发现,该测量方法具有较好的重复性。

表 3 棱镜坐标系 $\sigma\text{-}xyz$ 下激光束相对位姿测量结果
Tab.3 Pose measurement results of laser beams in prism coordinate $\sigma\text{-}xyz$

NO.	xoy 平面		yoz 平面	
	夹角/(°)	距离/mm	夹角/(°)	距离/mm
1	0.17	0.02	0.12	0.04
2	0.11	0.05	0.11	0.01
3	0.15	0.01	0.07	0.05
均值	0.14	0.03	0.10	0.03

5.2 厚度测量实验

两传感器间的初始距离值是进行厚度测量的前提。因此,本文首先利用 10,0.5 mm 的标准 0 级量块(研合后标准距离值为 10.5 mm)对传感器间距进行了标定,5 次测量结果表明传感器间距为 9.908 8 mm,标准差为 0.001 1 mm。

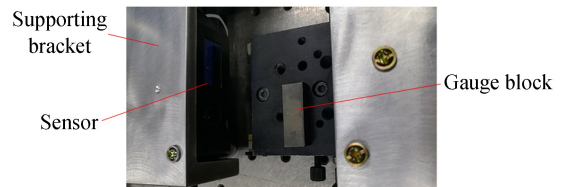


图 7 基于量块的厚度测量实验
Fig.7 Thickness measurement based on gauge block

在此基础上,采用不同尺寸的量块对调节前后的厚度测量结果进行了对比实验,实验结

果如表 4 所示。经过调校后,传感器组合对各种尺寸量块的测量误差明显减小,测量值和量块标称值间的差异小于 $4\ \mu\text{m}$ 。由于第 2 节中关于平板厚度测量理论的推导并未考虑传感器自身精度(测量重复性小于 $3\ \mu\text{m}$)、人为操作等因素的影响,此次实验数据大于理论分析的结果。

表 4 调节前后厚度测量结果对比

Tab. 4 Comparison of thickness measurement results before and after adjusting (mm)

理论值	调节前		调节后	
	测量值	偏差	测量值	偏差
2	1.987 9	-0.012 1	1.997 7	-0.002 3
6	5.992 7	-0.007 3	5.996 9	-0.003 1
10	9.997 5	-0.002 5	9.999 5	-0.000 5
14	14.002 1	0.002 1	13.998 6	-0.001 4

参考文献:

- [1] 郭媛, 王娜. 基于 CCD 的激光非接触式钢板测厚方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2014(12): 68-70.
GUO Y, WANG N. Study on laser non-contact thickness measurement method for cold-roll steel sheets based on linear CCD[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2014(12): 68-70. (in Chinese)
- [2] 陈功, 朱锡芳, 许清泉, 等. 未知噪声频率环境下锂电池极片激光测厚研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1978-1986.
CHENG G, ZHU X F, XU Q Q, *et al.*. Research on electrode film thickness measurement of lithium battery with laser under unknown noise frequency environment[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(9): 1978-1986. (in Chinese)
- [3] 李加福, 唐文彦, 张晓琳, 等. 未知相对位置条件下回转体厚度的双激光检测[J]. 光学精密工程, 2017, 25(9): 2300-2308.
LI J F, TANG W Y, ZHANG X L, *et al.*. Thickness measurement of rotary parts with double laser under unknown relative position condition[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(9): 2300-2308. (in Chinese)
- [4] 刘勇, 毕超, 刘京亮, 等. 光学测头光束方向多种标

6 结 论

本文针对对射激光束共线调节这一基于两个位移传感器厚度测量中的共性核心问题,提出了一种基于双分光棱镜的激光束空间视觉定位方法。本文重点分析了光线在两个分光镜上形成的平面光斑图像及其坐标分布规律,借助于图像坐标系与棱镜坐标系之间的转换关系,建立了 4 个光斑图像中心点坐标与两个传感器测量线相对姿态间的数学模型。对两个传感器共线性的测量实验表明,激光束之间的夹角不大于 0.17° , 距离不大于 $0.05\ \text{mm}$, 满足厚度测量的要求。利用调节后的传感器对多种尺寸的标准量块进行了重复测量,厚度测量误差减小到 $4\ \mu\text{m}$, 间接验证了共线调节方法的有效性。与现有对射激光束共线性测量方法相比,所提方法具有高精度、数字化、可视化可溯源的优势,并且可以辅助激光位移传感器的安装与调节。

定方法的研究与比较[J]. 测控技术, 2014, 33: 552-554.

- LIU Y, BI CH, LIU J L, *et al.*. Study and compare of several methods of beam-direction of optical sensor[J]. *Measurement & Control Technology*, 2014, 33: 552-554. (in Chinese)
- [5] 卢科青, 王文, 陈子辰. 点激光测头激光束方向标定[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 880-886.
LU K Q, WANG W, CHEN Z CH. Calibration of laser beam-direction for point laser sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 880-886. (in Chinese)
- [6] 张丽艳, 夷宏明, 刘胜兰. 在机测量激光测头位姿的线性标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 681-689.
ZHANG L Y, YI H M, LIU SH L. Linear calibration for on-machine measurement of laser probe pose [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 681-689. (in Chinese)
- [7] BI C, LIU Y, FANG J G, *et al.*. Calibration of laser beam direction for optical coordinate measuring system[J]. *Measurement*, 2015, 73: 191-199.
- [8] 彭希锋, 陈爽, 李海星, 等. 基于激光位移传感器的面角度测量技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(11): 2735-2743.

- PENG X F, CHENG SH, LI H X, *et al.*. Study on the plane angle measurement technology based on laser displacement sensors[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(11): 2735-2743. (in Chinese)
- [9] YANG T Y, WANG Z, WU Z G, *et al.*. Calibration of laser beam direction for inner diameter measuring device[J]. *Sensors*, 2017, 17(2): 294-310.
- [10] 刘新波, 付鲁华, 王仲, 等. 双激光位移传感器组合测头的光轴共线调校法[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(7): 1363-1369.
- LIU X B, FU L H, WANG ZH, *et al.*. Optic axis collinear adjustment method for the double laser displacement sensors combination probe [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(7): 1363-1369. (in Chinese)
- [11] 周富强, 陈酉玫, 张广军. 双传感器激光视觉测量系统的校准[J]. *光电子·激光*, 2007, 18(7): 828-831.
- ZHOU F Q, CHEN Y M, ZHANG G J. Calibrating double sensors laser vision measurement system [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, 18(7): 828-831. (in Chinese)
- [12] LEE K C, YANG J S, YU H H. Development and evaluation of a petal thickness measuring device based on the dual laser triangulation method [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 99: 85-92.
- [13] LI J F, TANG W Y, WANG J, *et al.*. Multilevel thresholding selection based on variational mode decomposition for image segmentation[J]. *Signal Processing*, 2018, 147: 80-91.
- [14] 赵琦, 郝士琦, 张岱. 改进阈值分割的光斑中心定位方法[J]. *激光与红外*, 2018, 48(5): 633-637.
- ZHAO Q, HAO SH Q, ZHANG D. Location method of spot center based on improved threshold segmentation[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(5): 633-637. (in Chinese)

作者简介:



李加福(1988—),男,山东德州人,博士,助理研究员,2011年于山东理工大学获得学士学位,2019年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为中国计量科学研究院长度所博士后,主要从事薄膜、大平面几何量精密测量方面的研究。E-mail: lijiafu@nim.ac.cn