

激光传感器光轴垂直度误差标定方法

王祎雯¹, 付鲁华¹, 赵炎¹, 张恒², 曲兴华¹, 刘常杰^{1*}

¹天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

²中国计量科学研究院, 北京 100013

摘要 针对高精度复合式测量机中的激光传感器进行了高精度的标定,提出了利用已知底角的双斜面标定块和正弦定理标定光轴垂直度误差偏角的方法,分析了影响标定精度的因素。该方法避免了传感器光轴与工作台不垂直引入的各个方向的误差,可有效地提高该传感器的测量精度,为更高精度的多传感器复合测量提供了基础。

关键词 传感器; 垂直度误差标定; 拟合平面斜率; 光轴; 高精度复合式测量

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0410002

Calibration Method for Optical Axis Perpendicular Error of Laser Sensor

Wang Yiwen¹, Fu Luhua¹, Zhao Yan¹, Zhang Heng², Qu Xinghua¹, Liu Changjie¹

¹State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

Abstract The high precision calibration of laser sensors in high-precision composite measuring machines is done. The calibration method of the optical axis perpendicular error angle by using the calibration block with double slopes with known base angles and the sine theorem is proposed. This method can avoid the errors from various directions caused by the non-perpendicular orientation between the optical axis of sensors and the worktable, which can effectively improve the measurement accuracy of this sensor and provide a basis for multisensor duplex measurement with higher accuracy.

Key words sensors; calibration of perpendicular error; fitted plane slope; optical axis; high-precision complex measurement

OCIS codes 280.3420; 220.1140; 120.3930; 150.4232

1 引言

随着科技的迅速发展,工业加工能力不断提升,加工制造业对仪器仪表测量精度的要求也持续提高。为了满足精度、适应性和稳定性等方面的要求,复合式测量机应运而生^[1-2]。复合式测量机一般采用接触式、影像、激光等测量方式,将多传感器数据统一到一个坐标空间进行融合。在使用复合式测量机之前,通常会采用预先设计加工的特定标准块对各个传感器进行参数标定,如利用尺寸已知的标准球或方体等标定接触式传感器的球心位置、等效直径等^[3-6];利用棋盘格、直线等特征对影像测头进行内外参数标定^[7-10]。

针对激光传感器的标定与校准问题,国内外研究人员提出了很多不同的方案,常规的测量方案主要利用光电位置敏感探测器(PSD)接收的光点位置随测头沿主轴移动时的变化来测量激光光轴的垂直度误差^[11]。这种方法原理简单、易于操作,但依赖于Z轴位移,无法对Z轴与激光射线的耦合作用进行解耦。卢科青

收稿日期: 2016-11-15; 收到修改稿日期: 2016-11-27

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ17053903)

作者简介: 王祎雯(1993—),女,硕士研究生,主要从事传感器标定、数据融合方面的研究。E-mail: wang_yw@tju.edu.cn

导师简介: 付鲁华(1972—),女,博士,副教授,主要从事工业自动化检测技术、精密测试技术及仪器、精密机械设计等方面的研究。E-mail: fuluhua@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: liuchangjie@tju.edu.cn

等^[12]设计了一种使用标定面可调的标定块进行点激光传感器(PLS)激光束方向标定的方法,采用向坐标测量机溯源的方法,在一定精度要求下获得了满意结果。当精度要求进一步提高时,如Z向测量不确定度达到亚微米量级时,坐标测量机本身的精度已成为制约,并且其标定块的制造工艺也较复杂。周会成等^[13]提出了一种利用V形靶标平面块来标定计算点光源测头光束方向的方法,可以实现激光光束任意方向的标定,但操作不够便利。

以上几种方法都是以标定激光光束方向为目标,研究的对象主要是大量程的激光传感器,可以通过光点或光束变化来求解激光束所在的直线方程或者对应的方向向量。本文针对复合式测量机中的小量程、高精度激光传感器,测量其光轴相对于工作台基准平面的垂直度误差,以此为依据对轴线的偏转方向进行调整或者对测量结果进行补偿,从而减小激光传感器本身的测量误差,提高复合式测量机最终测量结果的精度。

2 测量原理

2.1 激光光轴的垂直度误差

对于激光传感器,在测量过程中,要求其光轴与坐标测量机的Z轴轴线重合,即垂直于工作台基准XOY平面。当光轴与工作台基准平面存在垂直度误差时,测量光线的实际照射点会偏离被测点的理论位置,从而带来测量误差,包括XOY平面采点位置误差和激光传感器一维Z值误差。垂直度误差会在不同程度上影响测量结果的精度和正确度,这取决于被测对象和被测量的种类。

图1(a)、(b)、(c)分别表示激光光轴垂直度误差对单点位置、直线或平面的斜率、表面粗糙度的影响。对于单点测量,垂直度误差导致被测点位置的偏移(由点P移至点P')以及所测Z值准确度的降低;对于直线或平面测量,所测得的斜率会因激光光轴存在偏角误差而变大或变小,这取决于光轴方向与基准平面法向量的夹角;对于表面粗糙度测量,在扫描过程中会由光轴的倾角导致表面特征测量结果的失真。

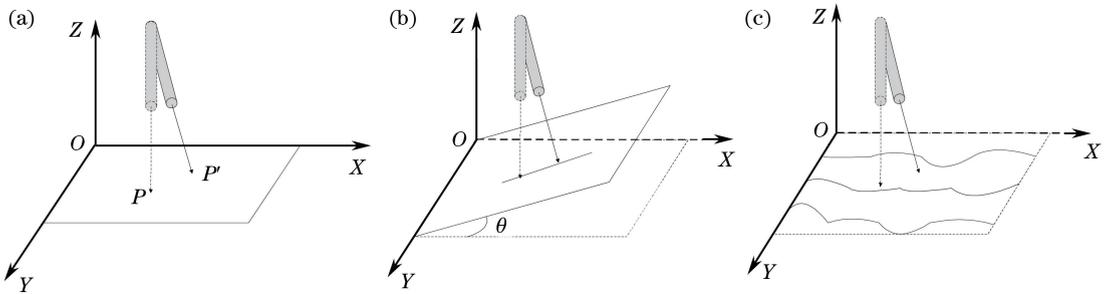


图1 垂直度误差对不同测量对象的影响。(a)单点位置;(b)直线或平面的斜率;(c)表面粗糙度

Fig. 1 Influence of perpendicular error on different measuring objects. (a) Position of single point; (b) slope of line or plane; (c) surface roughness

2.2 测量模型与原理

光轴的垂直度误差偏角如图2所示,设激光光轴的方向为O'P',其在XOZ平面和YOZ平面上的投影分别为激光光轴在X、Y方向上的垂直度误差偏角,记为 $\alpha_x = \angle X'O'Z'$ 和 $\alpha_y = \angle Y'O'Z'$,因此可通过测量 α_x

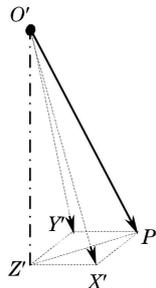


图2 光轴的垂直度误差偏角

Fig. 2 Deviation angles of optical axis perpendicularity error

和 α_y 来标定激光光轴的垂直度误差。

复合式测量机的标定块会根据不同类型传感器的参数和特点进行设计与加工。对于激光光轴的垂直度误差测量,适用图 3(a)所示的具有双斜面的标定块,该标定块的横截面为已知标准角度的三角形。以下模型将采用横截面为两底角已知的等腰三角形角度量块来进行说明,如图 3(b)所示。

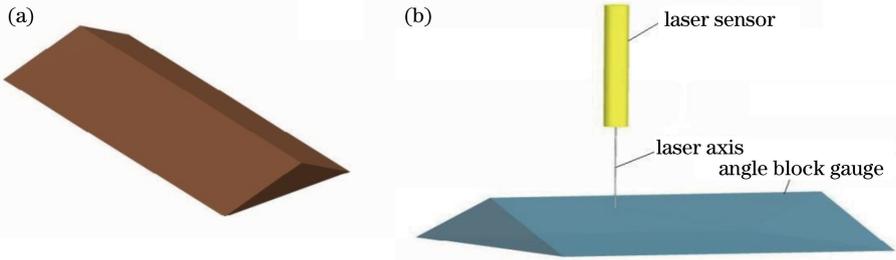


图 3 标定块。(a)双斜面标定块;(b)等腰三角形角度量块

Fig. 3 Calibration blocks. (a) Calibration block with double slopes; (b) angle block gauge with isosceles triangle

当测量光轴在 X 轴方向上的垂直度误差偏角为 α_x 时,将该标定块放置在激光传感器的水平工作台上,并保证标准块的棱线与工作台的 Y 轴平行。此处可利用激光传感器沿 Y 轴方向扫描斜面上具有相同 X 值的点,使其 Z 值保持不变,即可在一定精度范围内保证标准块的棱线与 Y 轴平行。棱线与 Y 轴的平行度误差由传感器的分辨率决定,并影响最终的垂直度误差测量结果。将传感器安装于标定块上方并对标定块表面上的点进行坐标采集,利用测量所得的点阵坐标值拟合出两平面的方程或斜率。

由于激光传感器的光轴存在垂直度误差,因此测量并拟合出的平面斜率与标定块标称角度值存在差异。如图 4(a)所示,假设在 X 方向上,光轴的垂直度误差为 α_0 ,被测块规底角标称值为 θ 。在测量过程中,受光轴垂直度误差的影响,测量得到的被测块规底角值可分别转换为 $\theta + \alpha$ 和 $\theta - \alpha$,如图 4(b)所示,其中 α 为 α_0 的待校正结果。取差分值即可得到 α 。在实际应用过程中,可以将同一角度在两个方位上进行测量,以保证两次拟合的被测角度 θ 相等。

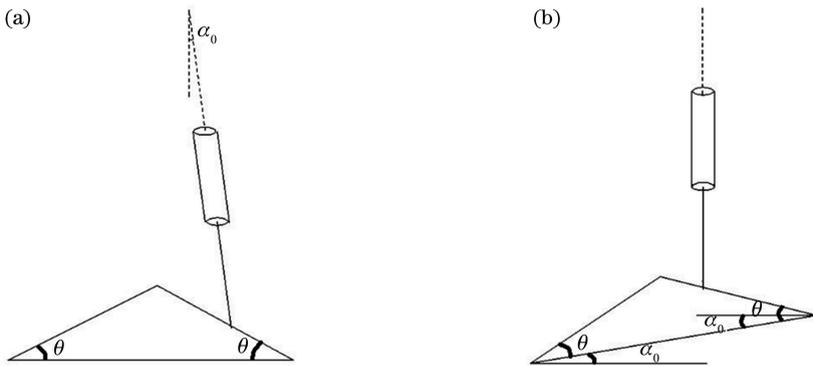


图 4 光轴垂直度误差偏角转换原理。(a)光轴存在垂直度误差偏角;(b)底角转换

Fig. 4 Transfer principle of optical axis perpendicular error angle. (a) Optical axis with perpendicular error angle; (b) conversion of base angle

根据正弦定理校正系统误差,入射光线光轴存在垂直度误差偏角 α_0 ,如图 5(a)所示。因此,如图 5(b)所示,在 $\triangle ABC$ 中,有

$$\angle A = \theta, \tag{1}$$

$$\angle B = 90^\circ - \alpha_0, \tag{2}$$

$$\angle C = 90^\circ + \alpha_0 - \theta, \tag{3}$$

式中 θ 为平面倾角。

根据正弦定理

$$\frac{\Delta x}{\sin \angle C} = \frac{\Delta z}{\sin \angle A}, \tag{4}$$

式中 Δx 为每次采点步进距离, Δz 为传感器一维测量值。因此可得

$$\alpha_0 = \theta - \arccos\left(\frac{\sin \theta \cdot \Delta x}{\Delta z}\right) \quad (5)$$

但是,平面拟合过程依据的是

$$\tan(\theta - \alpha) = k = \frac{\Delta z}{\Delta x}, \quad (6)$$

式中 k 为平面拟合的斜率。根据函数关系可以得到垂直度误差偏角为

$$\alpha_0 = \theta - \arccos\left(\frac{\sin \theta}{k}\right) \quad (7)$$

同理,保持棱块的方位不变,测量并拟合角度量块上另一斜面的斜率。此时,(5)~(7)式改为

$$\alpha'_0 = \arccos\left(\frac{\sin \theta \cdot \Delta x}{\Delta z'}\right) - \theta, \quad (8)$$

$$\tan(\theta + \alpha) = k' = \frac{\Delta z'}{\Delta x}, \quad (9)$$

$$\alpha'_0 = \arccos\left(\frac{\sin \theta}{k'}\right) - \theta. \quad (10)$$

在实际测量中,可通过多次拟合角度量块上的两斜面斜率,对结果取平均值来提高测量结果精度,即

$$\bar{\alpha}_0 = \frac{\alpha_0 + \alpha'_0}{2} = \frac{\arccos\left(\frac{\sin \theta}{k'}\right) - \arccos\left(\frac{\sin \theta}{k}\right)}{2} \quad (11)$$

对于激光光轴分别在 X 、 Y 方向上的垂直度误差偏角,可根据上述原理进行单独测量,结果分别记为 α_{x0} 和 α_{y0} 。根据测量结果 α_{x0} 和 α_{y0} 即可对激光光轴方向进行调整或者对测量结果进行误差补偿,以实现垂直度误差的标定和校准。

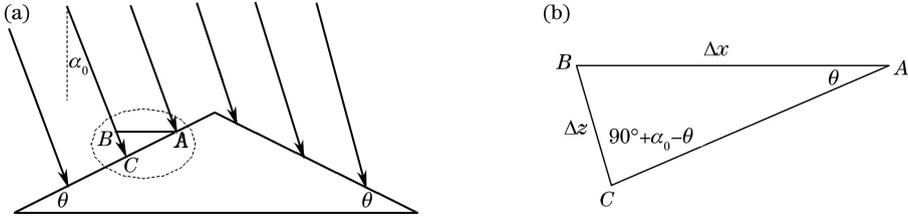


图 5 正弦定理校正原理。(a)测量过程中的尺寸关系;(b) $\triangle ABC$

Fig. 5 Correction principle of sine theorem. (a) Dimension relationship during measurement; (b) $\triangle ABC$

3 实验结果

3.1 测量结果

垂直度误差测量实验过程如图 6 所示,其中使用美国 OGP 公司 SmartScope ZIP 250 型复合式影像测量仪工作平台,角度量块标称值 $\theta = 15^\circ 10'$,待测激光传感器为光谱共焦型传感器,量程为 $400 \mu\text{m}$,精度为 $0.045 \mu\text{m}$,分辨率为 $0.02 \mu\text{m}$,其工作原理主要是通过识别峰值波长来测量传感器与被测物表面的距离值,属于高精度激光传感器。

斜面上的点坐标测量结果如图 7 所示,斜率拟合结果如图 8 所示。

利用最小二乘法拟合平面方程,可得到两斜面的斜率 $k_1 = 0.2689$, $k_2 = -0.2734$,根据正弦定理校准后,可得激光光轴在 X 方向上的垂直度误差偏角 $\alpha_{x1} = 1.8117^\circ$, $\alpha_{x2} = 1.7077^\circ$,取平均值后 $\alpha_{x0} = 1.7597^\circ$ 。由 $|k_1| < |k_2|$,可知 α_{x0} 偏向 X 轴正向,因此取正值。

利用同样的方法可得到激光光轴在 Y 方向上的垂直度误差偏角 $\alpha_{y0} = 0.1566^\circ$,且 α_{y0} 偏向 Y 轴正向,因此取正值。激光光轴的垂直度误差可表示为其在 X 、 Y 两方向的偏角 α_{x0} 和 α_{y0} ,且偏角方向指向第一象限。

在实际实验中,所选激光传感器本身测量精度和分辨率限制、位移台的步进误差等都会影响垂直度误差

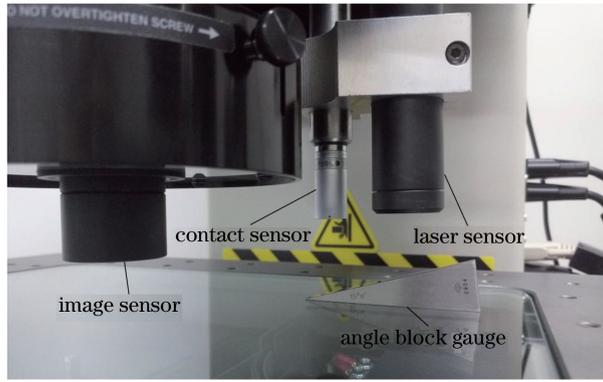


图 6 测量装置

Fig. 6 Measurement setup

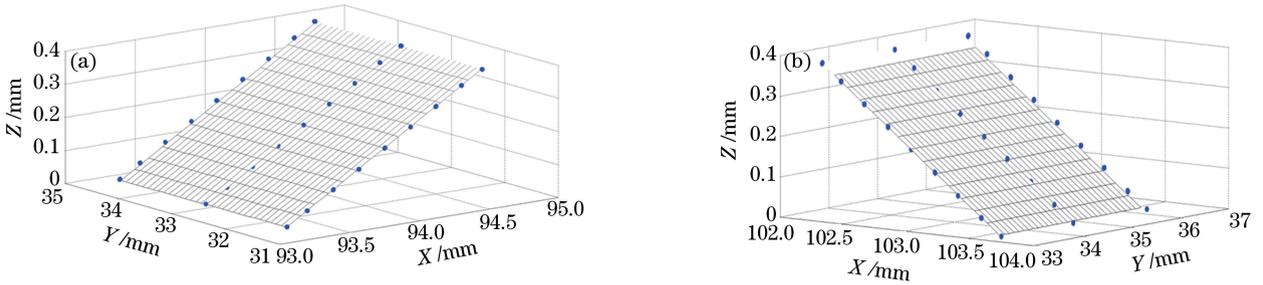


图 7 平面拟合结果。(a) $k > 0$; (b) $k < 0$

Fig. 7 Plane fitting results. (a) $k > 0$; (b) $k < 0$

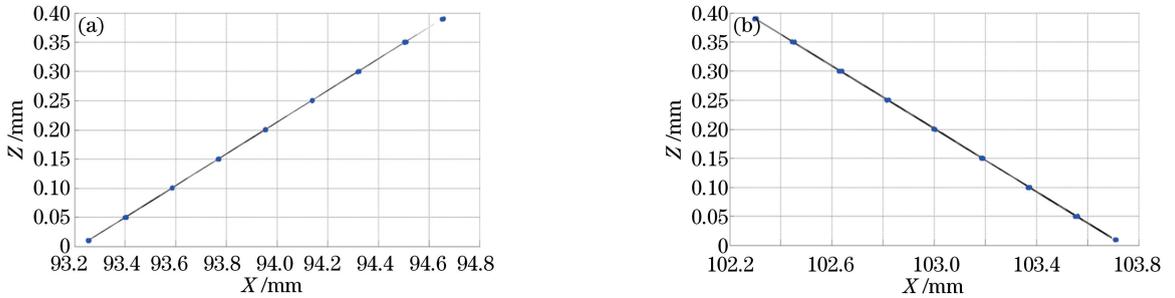


图 8 平面斜率拟合结果。(a) $k > 0$; (b) $k < 0$

Fig. 8 Plane slope fitting results. (a) $k > 0$; (b) $k < 0$

偏角测量结果的精度。在实验中应尽量控制以上误差的范围,减小对测量结果的影响。

3.2 可行性验证

在完成垂直度误差偏角的测量后,利用 OGP 复合式测量仪上附带的接触式传感器测量系统以及圆柱标准块对测量结果进行验证。实验中根据圆柱体中心轴线方向与上表面法向量垂直的原则,对比补偿前后垂直度误差对测量结果的影响,以验证校准效果。利用 Renishaw 探针对圆柱体侧面进行采点测量,拟合得到圆柱体轴心所在直线的方向向量,结果见表 1。

表 1 圆柱轴心拟合结果

Table 1 Cylindrical axis fitting results

No.	Coordinate of cylindrical center point	Axis linear equation	Direction vector
1	(234.77035, 120.34341, 53.14589)		
2	(234.77017, 120.34308, 51.93532)	$\begin{cases} x = -0.0002z + 234.7796 \\ y = 0.0003z + 120.3298 \end{cases}$	$(-0.0002, 0.0003, 1)$
3	(234.77096, 120.34219, 50.62676)		
4	(234.77085, 120.34259, 49.24699)		

用激光传感器测量圆柱体上表面的点,拟合得到其平面法向量 $\mathbf{n} = (-0.00260, 0.00018, 1)$ 。利用 3.1

节中测得的 α_{x0} 和 α_{y0} 对 n 进行补偿,经过垂直度误差的校准后,圆柱体上表面法向向量与其轴线的平行性更佳,证明了该方法对于激光光轴垂直度误差的测量和补偿校准具有可行性。

4 分析与讨论

4.1 精度仿真模拟结果

根据上述测量原理,利用软件仿真模拟测量精度,取斜面底角标称值 θ 为 15° ,位移台每次的单向移动量 Δx 最大误差为 $2 \mu\text{m}$,激光传感器测量结果 Δz 的最大误差为 $0.1 \mu\text{m}$ 。表面采点数对测量结果精度的影响如图 9 所示,对于偏角为 0.5° 的垂直度误差,当表面采点数大于 36 时,该方法的误差在 $\pm 0.001^\circ$ 内,证明该方法具有可行性,可满足多传感器复合式测量的需求。

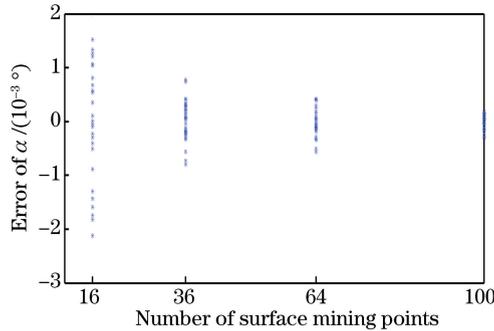


图 9 表面采点数对测量误差的影响

Fig. 9 Influence of number of surface mining points on measurement error

4.2 棱线方位误差

棱线方位误差如图 10 所示,根据 2.2 节所述的测量原理,当测量激光光轴在 X 轴方向上的垂直度误差偏角为 α_x 时,摆放角度量块时应保证其棱线与 Y 轴方向平行,否则将导致被测截面为图 10(b) 所示的 $\triangle A'B'C'$,而非图 10(a) 所示的 $\triangle ABC$,前者的两底角值不等于角度量块的角度标称值 θ ,为后续计算引入了系统误差。在实际实验中,可通过采集同一 X 坐标下不同点的 Z 值,使其保持为同一 Z 值的方法,来调整角度量块的方位。

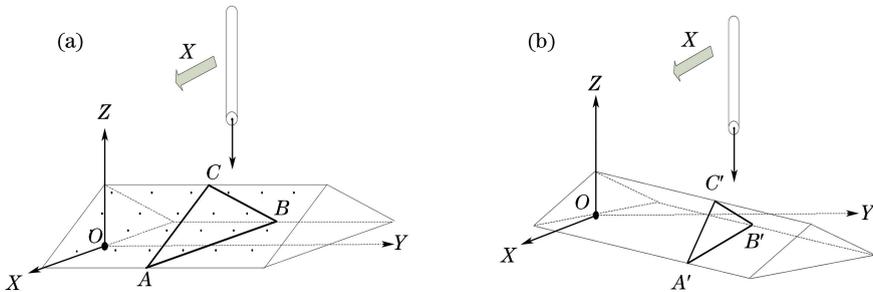


图 10 棱线方位误差。(a)棱线与 Y 轴平行;(b)棱线与 Y 轴不平行

Fig. 10 Ridge orientation error. (a) Ridge parallel to Y axis; (b) ridge unparallel to Y axis

根据测量原理和激光传感器的分辨率,可近似模拟棱线相对于 Y 轴的偏角 γ_y 对光轴在 X 方向上的垂直度误差偏角 α_x 最终测量结果的影响即 $\Delta\alpha_x$ 。设激光传感器的分辨率为 K ,角度量块的底角标称值为 θ ,角度量块表面在同一 X 坐标下的最大有效测量长度为 L ,根据几何关系,可以得到分辨率限制引起的棱线偏角最大误差为

$$\gamma_y = \arctan\left(\frac{K}{\tan \theta \cdot L}\right) \quad (12)$$

棱线方位误差 γ_y 会影响平面斜率的拟合结果。为了分析并量化该误差的具体影响,可进行如下转换:将激光光轴和棱线共同旋转角度 γ_y ,使棱线平行于 Y 轴,将误差 γ_y 转化为旋转后激光光轴的垂直度偏角误

差 $\Delta\alpha_x$ 和 $\Delta\alpha_y$ 。如图 2 所示,设 $\alpha_x = \alpha_y = 0.05^\circ$, 则 $\angle Y'Z'P' = \angle X'Z'P' = 45^\circ$, 激光光轴旋转 γ_y 后, 根据几何关系可以得到棱线方位误差对垂直度误差偏角最终测量结果的影响为

$$\Delta\alpha_x = 45^\circ - \arctan\left[\frac{\cos(45^\circ + \gamma_y)}{\cos 45^\circ}\right], \quad (13)$$

$$\Delta\alpha_y = \arctan\left[\frac{\cos(45^\circ - \gamma_y)}{\cos 45^\circ}\right] - 45^\circ. \quad (14)$$

当激光传感器的分辨率高于 $0.1 \mu\text{m}$ 时, 即可保证棱线偏角小于 0.002° , 对垂直度误差偏角的影响小于 0.001° 。

4.3 α_y 对 α_x 测量结果的影响

激光光轴的垂直度误差偏角 α_x 和 α_y 是同时存在的, 因此在其测量过程中会互相影响。 α_y 对 α_x 测量结果精度的影响如图 11 所示, $\angle PP'Q$ 的大小为角度量块底角标称值 θ , 当测量 α_x 时, 由于光轴在 Y 方向上同时存在垂直度偏角 α_y , 在测量过程中, 激光传感器测得的 Z 轴轴向高度差值为

$$\Delta z = \frac{P_Q}{\cos \alpha_y}, \quad (15)$$

式中 P_Q 为角度量块表面实际 Z 轴轴向差值。在拟合斜率时有

$$\tan(\theta \pm \alpha'_x) = \frac{\tan(\theta \pm \alpha_x)}{\cos \alpha_y}. \quad (16)$$

因此, 激光光轴在 Y 方向上的垂直度误差偏角 α_y 对 X 方向上 α_x 测量结果的影响为

$$\Delta\alpha_x = |\alpha'_x - \alpha_x|. \quad (17)$$

以 $\theta = 15^\circ 10'$ 为例, 假设 $\alpha_x = 0^\circ$, 模拟 α_y 对 α_x 测量结果精度的影响, 如图 12 所示。

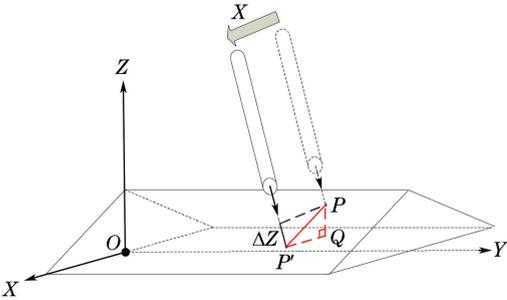


图 11 α_y 对 α_x 测量误差的影响

Fig. 11 Influence of α_y on measurement error of α_x

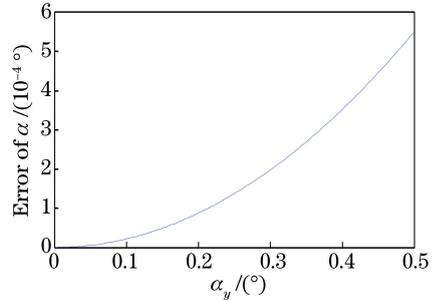


图 12 仿真模拟结果

Fig. 12 Simulation result

从平面拟合结果方程也可以看出, 当测量 α_x 时, 根据阵列点坐标拟合出的平面并不是完全垂直于 XOZ 平面。由于平面拟合法根据平面方程计算得出垂直度误差偏角, 求解 α_x 时可近似剔除 α_y 的影响。同时, 根据平面方程可以看出, 由 Y 分量系数计算得到的 α_y 与测量值基本符合, 这也正说明了平面拟合相对于直线拟合的优越性, 在一定精度范围内可以同时解出 α_x 和 α_y 。

4.4 角度量块底角 θ 标称值的选择

角度量块底角 θ 的选择主要受以下几个方面的影响: 1) 在使用光谱共焦传感器测量斜面时, 被测斜面角度的增大会导致反射光能损失的增加, 为保证测量的有效性, 被测斜面角度一般应小于 30° ^[14]; 2) 受传感器量程的限制, 在采集斜面上点阵的坐标时, 采点的范围由传感器量程和斜面倾角决定, 因此斜面倾角应尽量小, 扩大点坐标采集区域, 可以保证较好的斜率拟合效果, 但是所取平面越大, 拟合结果受角度量块表面平面度误差的影响会变大, 导致结果失去准确度; 3) 根据测量原理评价角度量块底角误差对测量结果精度的影响, 结果证明, 在同一准确度级别下, 底角越大, 测量结果精度越高, 利用软件仿真, 取垂直度误差偏角 $\alpha_0 = 0.5^\circ$, 底角的角度值误差为 0.1° , 结果如图 13 所示。综合上述因素, 角度量块底角选择 $15^\circ \sim 20^\circ$ 较为合适。

4.5 角度量块表面粗糙度

符合表面粗糙度要求的斜面仿真图如图 14 所示。实验中所用角度量块的表面粗糙度会影响平面斜率

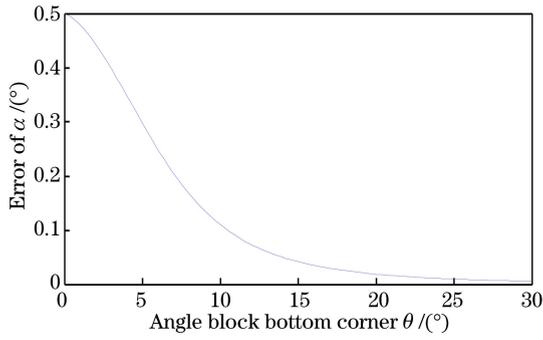


图 13 角度量块底角对测量误差影响

Fig. 13 Influence of base angle of angle gauge on measurement error

的拟合结果,进而影响到垂直度误差偏角的测量结果。根据测量原理,利用软件模拟出符合相应表面粗糙度要求的斜面,以此为基础拟合角度量块表面的斜率,模拟角度量块表面粗糙度 R_a 对垂直度误差偏角测量的影响,结果如图 15 所示,标称值取 $\theta = 15^{\circ}$ 。可以看出,在多次测量中,测量误差随 R_a 的增大而明显增加。根据角度量块国家标准^[15],要求标准角度量块测量面的 $R_a \leq 0.02 \mu\text{m}$,其对最终测量结果的误差影响小于 0.003° 。

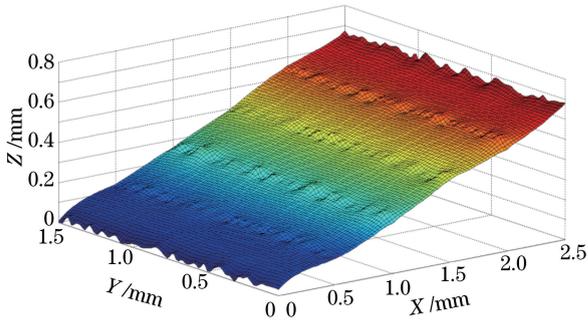


图 14 符合表面粗糙度要求的斜面仿真图

Fig. 14 Simulated image of inclined surface to meet surface roughness requirement

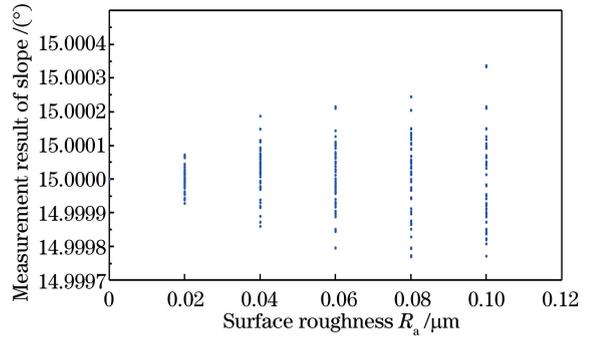


图 15 表面粗糙度对测量结果的影响

Fig. 15 Influence of surface roughness on measurement result

4.6 角度量块的底角误差和平面度误差

实验中所用角度量块存在角度值误差和平面度公差,根据前述测量原理可以推导出底角角度误差 $\Delta\theta$ 和平面度公差 a 对最终垂直度误差偏角测量结果的影响 $\Delta\alpha$ 。利用软件仿真模拟可以得到其函数关系如图 16 所示,其中垂直度误差偏角 $\alpha_0 = 0.5^{\circ}$,底角标称值 $\theta = 15^{\circ}$,传感器量程为 $400 \mu\text{m}$,取随机处于与基准面平行且相距为 a 的两平面间区域内的点进行平面度公差模拟。根据角度量块国家标准^[15],0 级角度量块的工

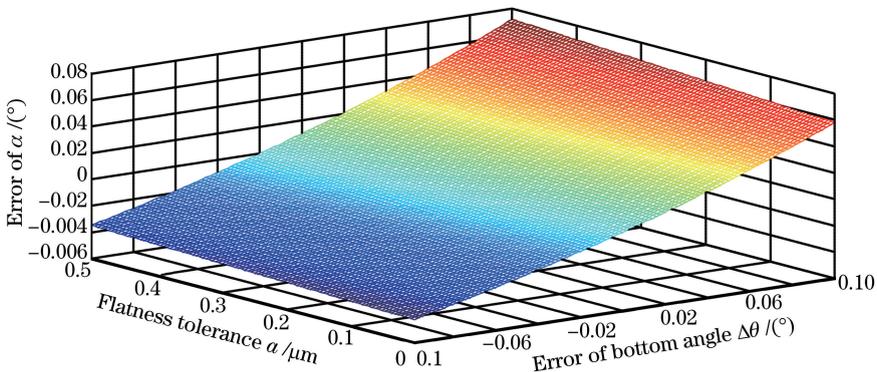


图 16 平面度公差和底角误差对测量结果精度影响

Fig. 16 Influence of flatness tolerance and base angle error on measurement accuracy

作角误差应不超过 $3''$ (约 0.00083°), 且测量面的平面度公差要求 $a \leq 0.1 \mu\text{m}$, 根据模拟结果可以得到, 这两项误差对最终测量结果的误差影响小于 0.001° 。

由以上分析可以看出, 该方法对实验中所用器材以及实验过程都有一定的要求, 所选角度量块的标称值和等级、角度量块的摆放方位等都会增加测量结果的误差, 且实际实验中的最终误差为各项误差的综合结果。因此, 在具体应用中应注意对上述影响因素的控制, 使其误差影响在测量精度要求之内。

5 结 论

在测量过程中, 激光传感器的光轴应与被测对象基准面保持理想垂直状态。这样可以保证测量结果与真值之间不存在由垂直度误差带来的偏角误差, 从而提高测量结果的准确度, 为后续的坐标统一与数据融合奠定基础。软件仿真和实验结果显示, 本文方法可利用现有标准器件, 快速、精准地标定出激光传感器光轴相对于工作台基准面的垂直度误差偏角, 从而对光轴方向进行调整或者对结果进行补偿, 将垂直度矫正到满意的测量精度。

该方法的优势主要体现在以下几个方面: 1) 使用的标准量为标准角度量块, 不需要单独设计或加工, 即所需器材经济易得; 2) 精度高, 该方法的测量精度可以满足复合式测量机对于激光传感器基准姿态的要求, 在实验过程中应注意控制可能影响测量精度的因素, 在分析测量结果时考虑其引入的误差; 3) 操作简单方便, 可在较短时间内实现多次标定, 实现经济、快捷、高精度的垂直度误差测量与校准。

该方法不足之处在于, 仅限于测量激光传感器光轴——一种虚拟轴线相对于基准平面的垂直度误差, 即前提条件是测量仪器 Z 轴已处于理想状态。仪器 Z 轴大范围移动时, 已有诸多垂直度测量方法, 未予赘述。另外, 该方法对实验中所用角度量块以及摆放方位等有具体要求, 在实验过程中应注意控制各项误差的范围, 以减少其对最终结果的影响。

参 考 文 献

- [1] Singh P, Wu Y, Kaucic R, *et al.* Multimodal industrial inspection and analysis[J]. Journal of Computing & Information Science in Engineering, 2007, 7(1): 102-107.
- [2] Waurzyniak P. Multisensor systems ramp up - Faster processors, improved accuracy spur multisensor adoption[J]. Manufacturing Engineering, 2003, 130(6): 61-68.
- [3] Yang Xingang, Huang Yumei, Gao Feng, *et al.* Research on calibration algorithm of analogue touch probe with non-orthogonal coordinate system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(10): 1826-1830.
杨新刚, 黄玉美, 高峰, 等. 非正交模拟接触式测头的标定算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(10): 1826-1830.
- [4] 朱从贵, 黄明强. 坐标测量机上标准球的校准[J]. 上海计量测试, 1995(5): 25-27.
- [5] 罗 政. 三维触发式测头的标定与正确使用[J]. 工具技术, 1992(5): 38-40.
- [6] Zhang Guoxiong, Zhang Defen. The optical plan for measuring center and radius of a ball part by 4-point method[J]. Acta Metrologica Sinica, 1993, 14(4): 247-250.
张国雄, 张德芬. 四点法测量球心和球半径的最优方案[J]. 计量学报, 1993, 14(4): 247-250.
- [7] Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]. Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision, 1999: 6365272.
- [8] Zhang Z. Camera calibration with one-dimensional objects[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2004, 26(7): 892-899.
- [9] Kong Weiqi, Liu Jingnan, Da Feipeng, *et al.* Calibration method based on general imaging model for micro-object measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0912003.
孔玮琦, 刘京南, 达飞鹏, 等. 基于一般成像模型的微小物体测量系统标定方法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0912003.
- [10] Lai Hanxuan, Zhang Zhengyu, Zhu Long, *et al.* Nonlinear distortion correction of camera based on linear characteristic[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 021502.
赖瀚轩, 张征宇, 朱 龙, 等. 基于直线特征的摄像机非线性畸变自校正[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 021502.
- [11] Fang Jiawei, Zhang Guoxiong, Qiu Zurong. Calibration system for surveying axis of non-contact laser probe[J]. Electronic

- Measurement Technology, 2006, 29(3): 160-161.
- 房佳威, 张国雄, 裘祖荣. 非接触激光测头测量轴线标定系统[J]. 电子测量技术, 2006, 29(3): 160-161.
- [12] Lu Keqing, Wang Wen, Chen Zichen. Calibration of laser beam-direction for point laser sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(3): 880-886.
- 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(3): 880-886.
- [13] Zhou Huicheng, Zeng Lizhan, Chen Jihong, *et al.* Calibration of light beam's direction of point light source probe[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(3): 388-391.
- 周会成, 曾理湛, 陈吉红, 等. 点光源测头光束方向的标定[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(3): 388-391.
- [14] Zhang Jianhuan, Tan Jiubin. Theoretical analysis of surface slope measurement with a confocal microscope[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2002, 13(12): 1272-1275.
- 张建寰, 谭久彬. 表面倾斜对共焦显微测量轴向响应的影响[J]. 光电子 • 激光, 2002, 13(12): 1272-1275.
- [15] National standardization technical committee. Angle block gauge GB3/T 22521-2008 [S]. Beijing: China Standard Press, 2009.