

自准直仪光电探测器失调对测角的影响

罗 敬*, 张晓辉, 何 煦, 叶 露, 张天一

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:本文首次提出并构建了自准直仪光电探测器失调的数学模型。基于该模型, 分析了光电探测器相对于理论像面处于空间任意位置和朝向时对自准直仪测角的影响。结果表明, 探测器失调造成的测角误差随准直物镜焦距 f 的增大而减小, 随自准直仪到被测镜面的距离 L 以及待测角度 θ 的增大而增大。计算发现, 当 $f=300$ mm, $L=100$ mm, $\theta=20''$ 时, 因探测器失调引起的测角误差达到 $0.004\ 5''$ 。文章进一步分析了各种探测器失调误差单独作用时对自准直仪测角的影响, 验证了模型的正确性, 并发现探测器离焦对自准直仪的影响最大。根据本文计算结果, 选择长焦距的成像物镜、减小测量距离、提高光电探测器沿轴向的安装精度是减小光电探测器失调对自准直仪影响的关键。基于提出的数学模型, 可以系统地计算探测器失调对自准直仪测角的影响, 进而为构建更加完善的自准直仪误差模型奠定基础。

关 键 词: 自准直仪; 测角精度; 光电探测器失调; 误差分析

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.3788/CO.2019-0207

Effects of a misaligned photodetector in autocollimators on angle measurements

LUO Jing*, ZHANG Xiao-hui, HE Xu, YE Lu, ZHANG Tian-yi

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of
Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: luojingopt@ciomp.ac.cn

Abstract: As one of the key errors in autocollimators, misalignment of the photodetector is analyzed and modeled carefully in this paper. Effect of misalignment of the photodetector on angle measurements is characterized, when the photodetector in any position and orientation in space with respect to the theoretical image plane of autocollimators. It is shown that the angular measurement errors of autocollimators induced by a misaligned photodetector increase with greater measuring range L , larger angle θ and smaller focal length f of the collimating object lens. When $f=300$ mm, $L=100$ mm, $\theta=20''$, the angular measurement error caused by a misaligned photodetector is $0.004\ 5''$. The effects of each photodetector misalignment error on angle measurements in autocollimators are characterized. The model proposed in this paper is validated. Among all

收稿日期: 2019-10-24; 修订日期: 2019-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61875190, No. 61675198)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61875190, No. 61675198)

kinds of photodetector misalignment errors, the defocusing error has the greatest influences on autocollimators. Hence, it is critical to choose an imaging objective with longer focal length, reduce the measurement distance, and improve the installation accuracy of the photodetector along the axis. The model proposed in this paper helps to systematically obtain the angular measurement errors caused by a misaligned photodetector, which will play a key role in building a better error analysis model for autocollimators.

Key words: autocollimator; angular measurement accuracy; misaligned photodetector; error analysis

1 引言

角度精密测量是几何量计量检测的重要组成部分,在光学元件加工与检测、微电子制造、精密加工与装配、航空航天设备瞄准与定位等领域均有广泛应用^[1-8]。随着这些领域的进一步发展,对测角精度的需求已达到 $0.1''$ 甚至 $0.01''$ 级别^[1-3]。因此,实现更高的测角精度对于上述应用具有重要意义。

光电自准直仪是目前实现高精度测角的主要技术手段,它基于光学自准直原理,具有非接触、精度高、使用方便等优点。德国 Moller Wedel 公司生产的 ELCOMAT HR 型自准直仪的分辨力达到 $0.001''$,测量精度达到 $0.01''$,代表目前国际上自准直仪的最高水平^[9-10]。

目前,自准直测角技术正朝着更高测角精度、更高稳定性的方向不断发展^[11]。影响光电自准直仪测角精度的误差源众多,完善自准直仪的误差模型对提高其测角精度具有重要意义。赵玉平^[12]、欧同庚^[13]、张冬^[14]等人针对入射光发散角、透镜像差、准直物镜倾斜、反射镜平面度误差等自准直仪误差源进行了分析。光电探测器失调是一种常见的自准直仪误差源,但针对光电探测器失调的研究,目前只考虑了光电探测器的离焦误差和倾斜误差,且假定它们独自出现^[1,12-14]。光电探测器单个失调参数与自准直仪测角误差之间存在明确而简洁的函数关系^[12]。事实上,相对于自准直仪理论像面,光电探测器可能处于空间任意位置,具有任意朝向,探测器各种失调误差共同作用并影响自准直仪的测角精度。然而,当光电探测器各个失调参数共同存在时,失调参数与自准直仪测角误差之间的函数关系将变得十分复

杂。因此,迫切需要构建更加完善的自准直仪失调误差模型,进而全面分析光电探测器失调对于自准直仪测角的影响。

本文首次提出并构建了自准直仪光电探测器失调数学模型。基于该模型,系统地分析了包括探测器阵面平移、离焦以及倾斜等在内的所有探测器失调误差的共同作用对自准直仪测角的影响。此外,在同等条件下,计算了自准直仪测角误差对各种探测器失调误差的敏感性。这对于构建更加完善的自准直仪误差模型,进一步提高自准直仪测角精度具有重要的指导作用。

2 自准直仪基本原理

光电自准直仪的基本原理如图1所示。

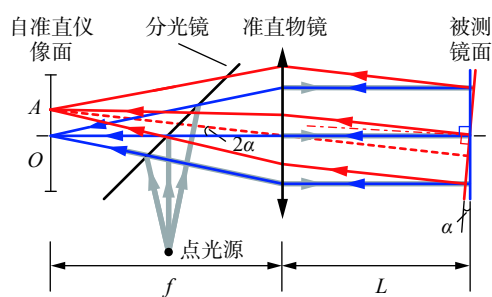


图1 自准直仪原理图

Fig. 1 Principle diagram of autocollimators

由图1可知,点光源与像面关于分光镜共轭,均处于准直物镜的焦平面。点光源发出的光线经过准直物镜后平行出射,然后从被测镜面返回。若被测镜面与自准直仪光轴垂直,光线被反射后成像于像面的中心点O。若被测镜面相对于自准直仪光轴倾斜角度 α ,经被测镜面的反射光由准直物镜汇聚于点A。通过光电探测器测量点O与点A之间的线长 l_{OA} ,可得被测镜面的倾斜角度 α 为:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{l_{OA}}{f}\right), \quad (1)$$

其中 f 是准直物镜的焦距。显然, 通过计算像点 (点 A) 在像面相对于参考像点 (点 O) 的移动距离, 结合准直物镜焦距, 即可得到被测镜面的倾斜角度。

根据自准直仪的测角原理可知, 精确测得像点在像面相对于参考像点的间距是保证自准直仪实现高精度角度测量的关键。CCD 因具备位置分辨率高、响应速度快、稳定性好等优势, 成为目前最常用的自准直仪光电探测器。若无特殊说明, 在后文中用 CCD 阵面代指自准直仪光电探测器。

3 CCD 阵面失调数学模型

3.1 CCD 阵面失调

理想情况下, CCD 阵面的法线与自准直仪光

轴平行, CCD 阵面的中心与准直物镜的焦点重合。然而, 在自准直仪实际装调过程中, 安装误差可能导致 CCD 阵面相对理论像面存在三维旋转和三维平移。为完整真实地表征 CCD 阵面失调误差对自准直仪测角的影响, 需构建相应的数学模型, 定量计算因 CCD 阵面失调导致的自准直仪测角误差。

3.2 CCD 阵面失调数学模型

自准直仪的基本光路如图 2 (彩图见期刊电子版) 所示, 其分别由自准直仪像面、准直物镜和待测镜面组成。以理论像面位置 (无安装误差时 CCD 阵面的位置) 几何中心为原点, 像面法线为 Y 轴, 像素排列方向依次为 X 轴和 Z 轴, 建立符合右手法则的直角坐标系 O_1-XYZ , 如图 2 所示。安装误差导致 CCD 阵面中心 A 与坐标系 O_1-XYZ 的原点不重合, 两者之间存在三维位移矢量 O_1A_1 , 此时, CCD 阵面法线与坐标系的 Y 轴存在空间夹角。

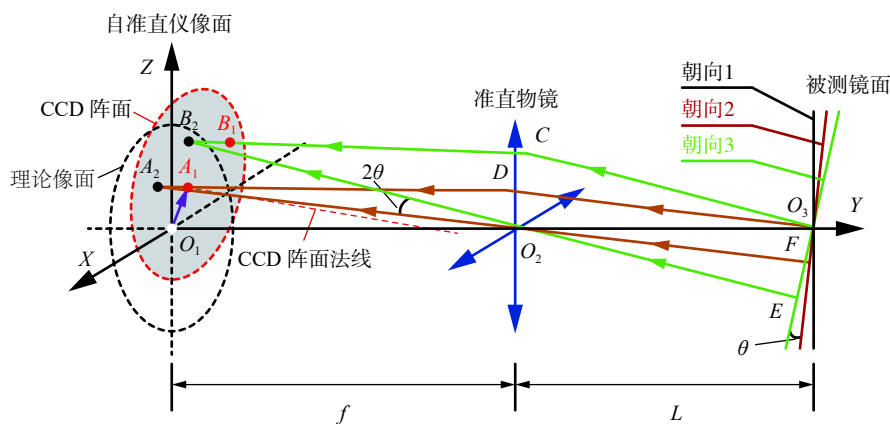


图 2 CCD 阵面失调的自准直仪光路

Fig. 2 Optical path of autocollimator with a misaligned CCD array

3.2.1 CCD 阵面的平面方程

如图 2 所示, CCD 阵面相对于理论像面的所有可能偏差均可由以下操作表征: 先将理论像面依次绕 X 轴、 Y 轴和 Z 轴旋转角度 α , β 和 γ , 再沿空间矢量 O_1A_1 平移。绕 X 轴的旋转矩阵为:

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

绕 Y 轴的旋转矩阵为:

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

绕 Z 轴旋转的旋转矩阵为:

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

CCD 阵面的平移矢量为:

$$\overrightarrow{O_1 A_1} = [a \ b \ c]. \quad (5)$$

依据式(2)~式(5)可以计算得到: CCD 阵面在 O_1-XYZ 坐标系中的平面方程为:

$$\begin{aligned} & \cos\beta\sin\alpha(c-Z) - [\cos\alpha\cos\gamma - \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma] \cdot \\ & (b-Y) - [\cos\alpha\sin\gamma + \cos\gamma\sin\alpha\sin\beta](a-X) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

3.2.2 CCD 阵面的像点坐标

用自准直仪对准一个待测镜面,该镜面法线与自准直仪光轴之间存在夹角,反射光束经过准直物镜后在理论像面汇聚于点 B_2 。然而,因 CCD 阵面失调,使得反射光束在 CCD 阵面上形成一个弥散斑。通常情况下,自准直仪的图像识别算法会将弥散斑的中心作为当前像点,而弥散斑中心由自准直仪主光线 O_2O_3 决定。该光线经待测镜面反射后变为 O_3C ,并汇聚于理论像面 B_2 点。因此,光线 O_3CB_2 与 CCD 阵面的交点 B_1 就是弥散斑的中心,也是 CCD 阵面实际输出的像点。

由图 2 所示几何关系和光路结构,可以通过理论像面像点 B_2 的坐标,计算出存在安装误差时 CCD 阵面实测像点 B_1 的坐标。 B_2 点位于理论像面,即图 2 中的 XZ 平面,假设已知其坐标为 $(x_0, 0, z_0)$,可得直线 O_2B_2 的方向矢量为 $(x_0, -f, z_0)$,其中 f 为准直物镜的焦距。自准直仪主光线 O_2O_3 经待测镜面后变为光线 O_3C ,其中 O_3 点坐标为 $(0, f+L, 0)$, L 为被测镜面到自准直仪准直物镜的间距。根据几何光学基本原理, O_3C 的方向矢量与 O_2B_2 平行,可得 C 点坐标为 $(\frac{L}{f}x_0, f, \frac{L}{f}z_0)$ 。因此,直线 CB_2 的方程为:

$$\frac{X-x_0}{\left(\frac{L}{f}-1\right)x_0} = \frac{Y}{f} = \frac{Z-z_0}{\left(\frac{L}{f}-1\right)z_0}. \quad (7)$$

联立式(6)和式(7),即可得 CCD 阵面上实测像点 B_1 的坐标。

综上所述,可以由无安装误差时光电探测器本该输出的像点坐标,计算出存在安装误差时自准直仪实际获取的像点坐标。

3.2.3 理论像面的像点坐标

在测角之前,通常需先将自准直仪归零,即通过调整自准直仪或者参考反射镜,使得光束返回

的十字叉丝与 CCD 阵面的十字叉丝重合,以此状态作为零位(绝对零位或者相对零位)。需要指出的是,该零位是由 CCD 阵面的中心像元决定的。显然,如果 CCD 阵面自身出现安装误差,那么该零位状态将与自准直仪理论像面不重合。

如图 2 所示,若 CCD 阵面不存在安装误差,被测镜面处于朝向 1 时自准直仪归零。若 CCD 阵面存在安装误差,设其中心像元为 A_1 ,需要将参考镜面调整至朝向 2,此时反射光中心光线 O_3D 恰好与 CCD 阵面相交于中心像元 A_1 点,并与理论像面交于 A_2 点。需要特别指出的是,在自准直仪的实际使用过程中,也可以 CCD 阵面的任意像元(不局限于中心像元)作为参考基准,完成相对测量。这不会对本文构建的数学模型造成影响。

自准直仪归零后,可以开始测角。若待测镜面向朝向 3,如图 2 所示,其与参考镜面向朝向 2 的夹角为 θ 。反射光的中心光线 O_3C 在 CCD 阵面形成的弥散斑中心点为 B_1 ,在理论像面的汇聚点为 B_2 。根据式(1),自准直仪实际测得的夹角由 CCD 阵面上的 A_1B_1 线长 $l_{A_1B_1}$ 以及准直物镜焦距 f 决定,即

$$\theta' = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{l_{A_1B_1}}{f}\right). \quad (8)$$

显然, $\Delta\theta = \theta - \theta'$, 就是由于 CCD 阵面安装误差导致的自准直仪测角误差。

自准直仪的实测角度 θ' 可由 CCD 阵面上的像点(图 2 中 A_1 和 B_1) 长度计算得到,而真实角度 θ 则由理论像面的像点(图 2 中 A_2 和 B_2) 的长度决定。因此,可由已知的 CCD 阵面像点坐标计算出无安装误差时本该得到的像点坐标。

下面以图 2 中 CCD 阵面像点 $B_1(x_{B_1}, y_{B_1}, z_{B_1})$ 为例,推导出其对应的理论像面 B_2 点的坐标。因 B_2 点在 O_1XZ 平面上,故设其坐标为 $(x_{B_2}, 0, z_{B_2})$ 。 B_2 点对应的主光线 O_2O_3 经待测镜面反射后与准直物镜交于点 C ,其坐标为 $(\frac{L}{f}x_{B_2}, f, \frac{L}{f}z_{B_2})$ 。因点 C, B_1 与 B_2 在同一直线上,由此可以得到点 B_1 坐标与点 B_2 坐标之间的函数关系为:

$$\begin{cases} x_{B_2} = \frac{x_{B_1}f^2}{y_{B_1}(L-f)+f^2} \\ z_{B_2} = \frac{z_{B_1}f^2}{y_{B_1}(L-f)+f^2} \end{cases}. \quad (9)$$

式(9)给出了由实际 CCD 阵面上任一像点 B_1 的坐标, 计算出无探测器安装误差时, 本应在理论像面汇聚像点 B_2 的坐标的计算方法。

3.3 自准直仪 CCD 阵面失调导致的测角误差

前面计算了自准直仪理论像面与失调 CCD 阵面之间的空间坐标关系, 在此基础上可建立 CCD 失调与自准直仪测角误差之间的定量关系, 具体流程如图 3 所示。

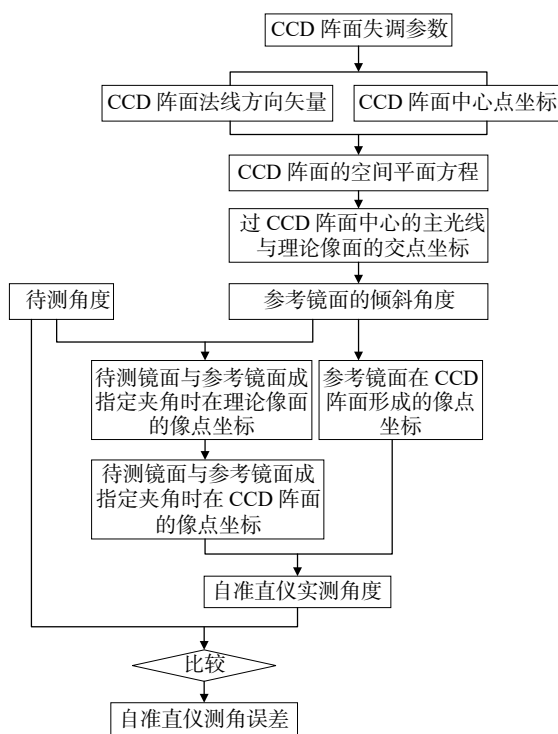


图 3 自准直仪 CCD 阵面失调建模流程图

Fig. 3 Flowchart of CCD misalignment modeling of auto-collimator

如图 2 所示, 若自准直仪以待测镜面向向 2 作为参考基准, 此时反射光在 CCD 阵面形成的像点为 A_1 , 其坐标为 $(x_{A_1}, y_{A_1}, z_{A_1})$, 满足式(6)所示的平面方程。 A_1 对应的理论像面的像点为 A_2 , 其坐标可根据式(9)由像点 A_1 的坐标得到。令待测镜面由朝向 2 旋转至朝向 3, 此时反射光在 CCD 阵面形成的像点为 B_1 , 其坐标为 $(x_{B_1}, y_{B_1}, z_{B_1})$ 。对应的理论像面像点为 B_2 , 其坐标同样可根据式(9)由像点 B_1 的坐标计算得到。

根据理论像面像点 A_2 和 B_2 的坐标, 结合准直物镜中心点 O_2 的坐标, 可以得到:

$$\cos(2\theta) = \frac{\vec{O_2A_2} \cdot \vec{O_2B_2}}{|\vec{O_2A_2}| \cdot |\vec{O_2B_2}|}, \quad (10)$$

其中 θ 为真实待测角度。自准直仪测得的角度 θ 可由 CCD 阵面上像点 A_1 和 B_1 的坐标, 并结合式(8)得到。综上, 结合式(6)、式(8)、式(9)和式(10)可得到因自准直仪光电探测器失调导致的测角误差 $\Delta\theta$ 为

$$\Delta\theta = \Delta\theta(a, b, c, \alpha, \beta, \gamma, f, L, \theta). \quad (11)$$

4 CCD 阵面失调对自准直仪测角的影响

4.1 CCD 阵面的全部失调误差

由以上分析可知, 表征 CCD 阵面失调的参数有: 三维平移矢量 (a, b, c) 以及三维旋转角度 α 、 β 和 γ 。式(11)构建了自准直仪测角误差与 CCD 阵面失调之间的函数关系。此外, 自准直仪系统参数, 即准直物镜焦距 f 和待测镜面与准直物镜主面的间距 L 也会影响自准直仪的测角误差。

在实际情况下, 表征 CCD 阵面失调的 6 个参数往往会同时出现。为综合评价 CCD 阵面失调对自准直仪测角的影响, 将失调参数: a, b, c, α, β 和 γ , 在一定范围内取均匀分布, 如表 1 所示, 共有 11^6 种组合。根据目前国内外主流光电自准直仪参数, 计算了 9 种不同的焦距 f 、距离 L 、待测角度 θ 的组合, 重复上述 11^6 次计算, 结果如图 4 和表 2 所示。

表 1 CCD 阵面失调参数

Tab. 1 Misalignment parameters of CCD

失调参数	最小值	最大值	取样数
a/mm	-0.1	0.1	11
b/mm	-0.1	0.1	11
c/mm	-0.1	0.1	11
$\alpha/(^{\circ})$	-360	360	11
$\beta/(^{\circ})$	-360	360	11
$\gamma/(^{\circ})$	-360	360	11

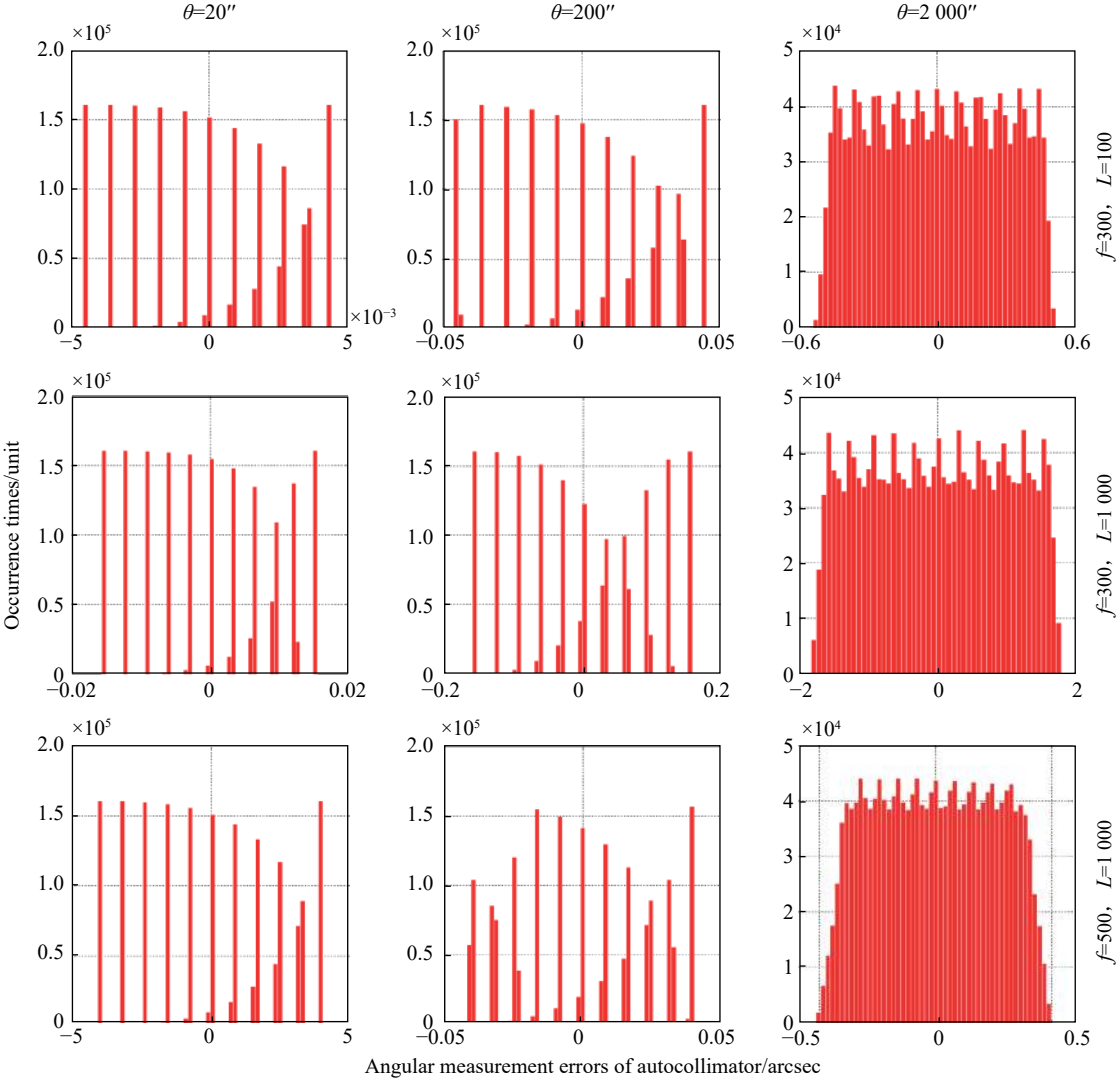


图 4 自准直仪 CCD 阵面失调导致的测角误差

Fig. 4 Angular measurement errors of autocollimators with a misaligned CCD

表 2 CCD 阵面失调导致的测角误差
Tab. 2 Angular measurement errors induced by a misaligned CCD

$f, L/\text{mm}$	$\theta/(\text{'})$		
	20	200	2 000
$f=300, L=100$	0.004 5	0.046	0.53
$f=300, L=1\ 000$	0.016	0.16	1.8
$f=500, L=1\ 000$	0.004 1	0.042	0.51

图 4 给出了在不同测量角度 θ 、物镜焦距 f 、测量距离 L 条件下,所有自准直仪 CCD 阵面失调误差共同作用造成的测角误差的统计结果。在各种条件下,测角误差的最大值如表 2 所示。由分

析结果可知,当 $\theta = 20''$, $f = 300\text{ mm}$, $L = 100\text{ mm}$ 时,在所有 CCD 失调误差共同影响下,测角误差最大可达 $0.004\ 5''$ 。若待测角度增大为 $\theta = 200''$, 测角误差最大可达 $0.046''$ 。显然,对于要实现 $0.01''$ 的超高测角精度自准直仪,CCD 的失调误差不可忽略。

从表 2 的计算结果还可以发现,当待测角度以及 CCD 失调参数确定时,自准直仪测角误差与成像物镜焦距 f 和测量距离 L 有关。为此,设定 CCD 失调参数 a, b, c 均为 0.1 mm , α, β 和 γ 均为 $360''$, 计算结果如图 5 所示。显然, CCD 失调导致的测角误差随成像物镜焦距 f 增大而减小,随测量距离 L 增大而增大。因此,为减小 CCD 失调误

差的影响,自准直仪应该选择长焦距的成像物镜,并尽可能缩短测量距离。

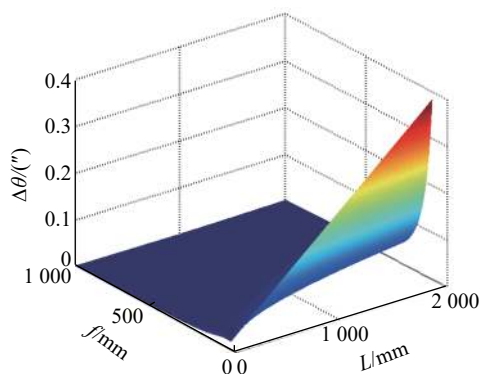


图 5 CCD 失调参数一定时,自准直仪测角误差随焦距 f 和测量距离 L 的变化关系

Fig. 5 The relationship between measurement errors of autocollimators and focal length f , and measuring length L when CCD misalignment parameters are constant

基于上述数学模型,还可以方便地分析每个参数单独出现时造成的测角误差。下面,针对 CCD 阵面依次出现平移、离焦以及倾斜误差时,计算其对自准直仪测角的影响。参考目前主流商用自准直仪参数,在后面的计算中均设定准直物镜的焦距 $f = 300$ mm,测量距离 $L = 100$ mm。

4.2 CCD 阵面平移误差

如图 6(彩图见期刊电子版)所示,理论像面的中心为 O_1 , CCD 阵面的中心为 A , CCD 阵面相对于理论像面出现平移误差。若自准直仪以 CCD 阵面中心作为参考基准进行归零,需要将参考镜面由朝向 1 调整至朝向 2,此时参考镜面法线与自准直仪光轴的夹角为 α 。

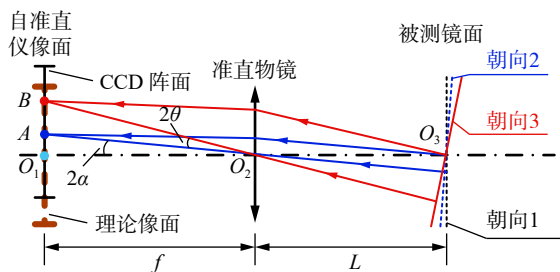


图 6 自准直仪 CCD 阵面平移误差

Fig. 6 Translation error in the CCD array of autocollimators

根据前面提出的 CCD 阵面安装误差数学模型,自准直仪测角误差随 CCD 阵面平移误差的变化曲线如图 7(彩图见期刊电子版)所示。计算了待测角度 θ 分别为 $20''$, $200''$ 以及 $2\,000''$ 三种情况下, CCD 阵面平移误差在 0.001 mm 至 0.1 mm 区间造成的自准直仪测角误差。可以发现,随着待测角度增大, CCD 阵面平移误差造成的测角误差迅速增大。当 $\theta = 200''$ 时, CCD 平移 0.1 mm 造成的测角误差约为 $1.5 \times 10^{-4}''$ 。需要指出的是,计算中假定被测镜面到准直物镜的间距为 $L = 100$ mm。由表 2 的计算结果可知,随着 L 的增大, CCD 阵面平移误差的影响也会随之增大。

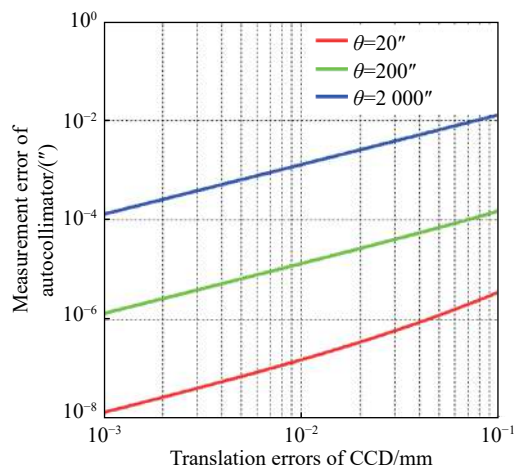


图 7 自准直仪测角误差随 CCD 阵面平移误差的变化曲线

Fig. 7 Angular measurement errors in autocollimator varying with translation error of CCD

事实上,即便 CCD 阵面与理论像面重合,但是如果自准直仪测角时的参考基准没有归零,比如以图 6 中朝向 2 作为参考基准,这对自准直仪造成的影响与 CCD 阵面平移误差一致。由图 7 可知,参考像点离像面中心越远,造成的测角误差越大,因此在实际使用自准直仪的过程中应该优先以自准直仪 CCD 阵面中心作为参考基准。

4.3 CCD 阵面离焦误差

前面计算了 CCD 阵面沿自准直仪光轴垂直方向发生平移对测角精度的影响。此外, CCD 阵面还可能沿自准直仪光轴方向发生平移,即 CCD 阵面出现离焦误差。如图 8 所示,被测镜面与基准镜面夹角为 θ 时,自准直仪本该在理论像面

成像于点 B , 线长 O_1B 为 h 。因存在离焦误差, 导致在 CCD 阵面成像于点 C , 实测的线长 AC 为 h' , 显然 $h \neq h'$, 造成测角误差。

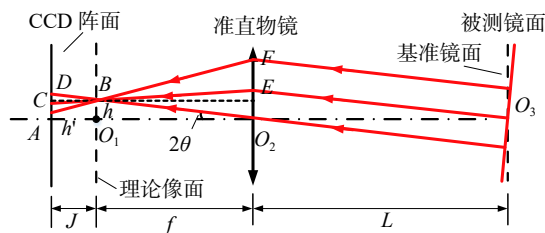


图 8 自准直仪 CCD 阵面出现离焦误差

Fig. 8 Defocusing error occurring in CCD of autocollimator

根据前面提出的 CCD 阵面失调数学模型, 自准直仪测角误差随 CCD 阵面离焦的变化曲线如图 9 所示。随着待测角度 θ 增大, CCD 阵面离焦误差造成的测角误差迅速增大。当 $\theta = 200''$ 时, CCD 离焦 0.1 mm 造成的测角误差约为 $0.044''$, 远大于同等条件下 CCD 阵面平移造成的测角误差。此外, 如表 2 所示, 在 CCD 阵面所有失调误差综合误差作用下, 自准直仪测角误差为 $0.046''$ 。显然, 在 CCD 阵面各种失调误差中, 离焦对自准直仪的影响最大。

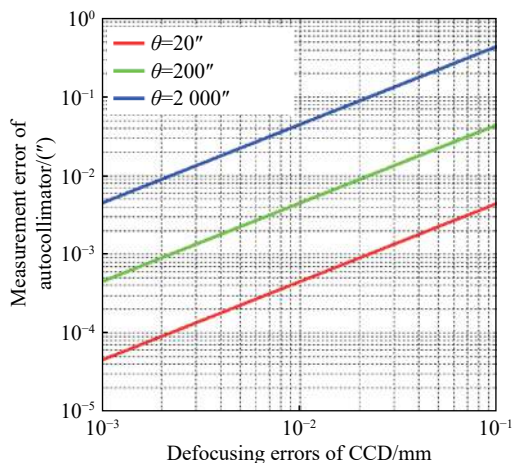


图 9 自准直仪测角误差随 CCD 阵面离焦误差的变化曲线

Fig. 9 Angular measurement errors of autocollimators varying with defocusing errors of CCD

4.4 CCD 阵面倾斜误差

CCD 阵面除了会出现上述两种平移误差外, 还可能相对于自准直仪光轴发生倾斜, 如图 10 所

示。若 CCD 阵面没有倾斜, 待测镜面相对于基准镜面倾斜 θ 时, 理论像面的像点线 AB 长为 h , 发生倾斜后 CCD 阵面的像点线 AC 长为 h' 。

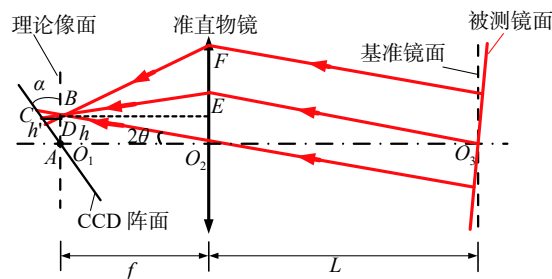


图 10 自准直仪 CCD 阵面出现倾斜误差

Fig. 10 Inclination angle errors occurring in CCD of autocollimator

根据 CCD 阵面失调误差数学模型, 自准直仪测角误差随 CCD 阵面倾斜误差的变化曲线如图 11 所示。随着 CCD 倾斜角度的增大, 造成的测角误差迅速增大。当 $\theta = 200''$ 时, CCD 倾斜 $1000''$ 造成的测角误差约为 $0.0036''$ 。

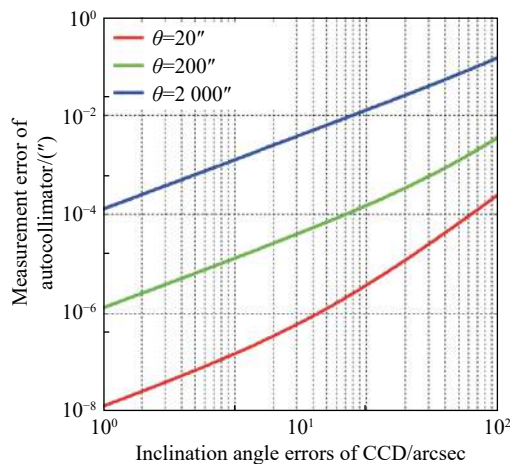


图 11 自准直仪测角误差随 CCD 阵面倾斜误差的变化曲线

Fig. 11 Angular measurement errors in autocollimator varying with inclination angle error of CCD

需要特别指出的是, 自准直仪 CCD 单个失调参数与测角误差之间存在明确而简洁的函数关系^[12], 依据各自的数学表达式也能够得到上述自准直仪测角误差随 CCD 单失调参数的变化曲线。然而, 当 CCD 的 6 个失调参数共同存在时, 其与自准直仪测角误差之间的函数关系将变得非

常复杂,如式(11)所示。本文所述误差模型根据几何光学以及空间立体几何等原理,定量计算 CCD 失调对自准直仪测角的影响。因此,该模型的计算过程与单个失调参数基于显函数的计算过程完全不同。

将基于 CCD 单失调参数引起自准直仪测角误差的显函数表达式与基于本文所述模型计算的 CCD 单失调参数计算结果进行对比,可以验证该模型的正确性。发现,基于本文模型得到的计算结果,如图 7,图 9 和图 11 所示,与理论推导的自准直仪测角误差与 CCD 平移、离焦以及倾斜的显函数表达式的计算结果一致。这表明本文构建的自准直仪探测器失调误差数学模型的正确性。

5 结 论

因安装误差的存在,自准直仪光电探测器相

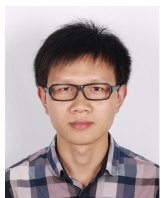
对于理论像面可能存在三维平移和三维旋转。本文首次提出并构建了自准直仪光电探测器失调数学模型。基于该模型,定量分析了所有探测器失调误差对自准直仪测角的综合影响。结果表明,探测器失调造成的自准直仪测角误差随准直物镜焦距 f 增大而减小,随自准直仪到被测镜面的距离 L 以及待测角度 θ 增大而增大。计算发现,当 $f=300\text{ mm}$, $L=100\text{ mm}$, $\theta=20''$ 时,因探测器失调引起的测角误差达到 $0.0045''$ 。显然,对于要实现 $0.01''$ 的超高测角精度自准直仪,探测器失调误差不可忽略。分析结果表明,自准直仪对探测器离焦最为敏感,提高探测器沿光轴方向的装调精度、优先选择长焦距的成像物镜,并尽可能缩短测量距离,是降低探测器失调对自准直仪影响的关键。根据本文提出的数学模型,可以系统地计算探测器失调对自准直仪测角的影响,进而为构建更加完善的自准直仪误差模型奠定基础。

参考文献:

- [1] 朱凡. 基于共光路光束漂移测量与同步补偿的激光自准直技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
ZHU F. Laser autocollimation technology based on common-path beam drift measurement and synchronous compensation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [2] 黄银国. 激光自准直微小角度测量基础技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
HUANG Y G. Study on micro-angle measuring basic technique of laser autocollimation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [3] 田留德, 赵建科, 王涛, 等. 测试设备位姿失调对自准直仪法测量圆分度误差的影响[J]. 光学精密工程, 2017, 25(9): 2267-2276.
TIAN L D, ZHAO J K, WANG T, et al.. Influence of test equipment pose error on dividing error measurement based on autocollimator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(9): 2267-2276. (in Chinese)
- [4] 杨飞, 安其昌, 张静, 等. 大口径光学系统的镜面视宁度检测[J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 2572-2579.
YANG F, AN Q CH, ZHANG J, et al.. Seeing metrology of large aperture mirror of telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(10): 2572-2579. (in Chinese)
- [5] 王国名, 劳达宝, 周维虎. 光电自准直经纬仪光学系统设计与公差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 102203.
WANG G M, LAO D B, ZHOU W H. Optical system design and tolerance analysis of photoelectric self-collimation theodolite[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 102203. (in Chinese)
- [6] 闫钰锋, 吴震, 王洋, 等. 温度变化对自准直仪机械结构的影响[J]. 光学仪器, 2017, 39(1): 41-45.
YAN Y F, WU ZH, WANG Y, et al.. Effect of temperature on mechanical structure of autocollimator[J]. *Optical Instruments*, 2017, 39(1): 41-45. (in Chinese)
- [7] 楼志斌, 赵辉, 刘权, 等. 结合激光准直的二维转角动态测量系统[J]. 光学精密工程, 2019, 27(3): 561-568.
LOU ZH B, ZHAO H, LIU Q, et al.. Two-dimensional rotation angle dynamic measurement system combining laser collimation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(3): 561-568. (in Chinese)
- [8] 何煦, 杨雪, 李颐, 等. 大口径空间光学望远镜重力卸载点布局优化方法[J]. 光学精密工程, 2018, 26(11): 2764-

- 2775.
- HE X, YANG X, LI Y, *et al.*. Gravity compensation optimization algorithm for large aperture spatial optical telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(11): 2764-2775. (in Chinese)
- [9] JUST A, KRAUSE M, PROBST R, *et al.*. Calibration of high-resolution electronic autocollimators against an angle comparator[J]. *Metrologia*, 2003, 40(5): 288-294.
- [10] GECKELER R D, JUST A. Optimized use and calibration of autocollimators in deflectometry[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6704: 670407.
- [11] 陈颖, 张学典, 逯兴莲, 等. 自准直仪的现状与发展趋势[J]. *光机电信息*, 2011, 28(1): 6-9.
- CHEN Y, ZHANG X D, LU X L, *et al.*. Current situation and development trend of autocollimator[J]. *OME Information*, 2011, 28(1): 6-9. (in Chinese)
- [12] 赵玉平, 彭川黔, 王劼. 大口径细光束自准直测量系统的误差源分析[J]. *半导体光电*, 2018, 39(3): 414-419.
- ZHAO Y P, PENG CH Q, WANG J. Analysis of error source for large aperture thin beam auto-collimating measurement system[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2018, 39(3): 414-419. (in Chinese)
- [13] 欧同庚, 陈志高, 杨博雄, 等. CCD光电自准直仪工作原理及误差源分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2007, 27(S1): 98-100.
- OU T G, CHEN ZH G, YANG B X, *et al.*. Operating principle and error source of a new type of CCD photoelectric autocollimator[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(S1): 98-100. (in Chinese)
- [14] 张冬, 王振宏. PSD光电自准直仪工作原理及误差分析[J]. *机械工程师*, 2014(12): 46-47.
- ZHANG D, WANG ZH H. Operation principle and error analysis of PSD photoelectric autocollimator[J]. *Mechanical Engineer*, 2014(12): 46-47. (in Chinese)

作者简介:



罗 敬(1992—), 男, 江西抚州人, 博士, 助理研究员, 2013年于长春理工大学获得学士学位, 2018年于浙江大学获得博士学位, 主要从事光学装调及检测、偏振像差等方面的工作。E-mail: luojingopt@ciomp.ac.cn