

引用格式: LIU Zhiying, JIA Guiyuan, QIN Tianxiang, et al. Research on the Method of Determining the Optical Axis Based on Equivalent Nodal Point Theory[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9):0912004

刘智颖,贾桂园,秦天翔,等.基于等效节点理论确定光轴方法的研究[J].光子学报,2021,50(9):0912004

基于等效节点理论确定光轴方法的研究

刘智颖,贾桂园,秦天翔,黄蕴涵,张涵

(长春理工大学 测试分析中心,长春 130022)

摘要:针对目前高精度光学系统光轴标定存在的误差问题,提出了一种基于等效节点理论对系统实际光轴进行标定的方法,通过建立基准坐标系、节点坐标系和探测器坐标系,结合齐次坐标变换的方法构建适用于实际系统光轴标定的数学模型。以焦距为 100 mm,物方节点与像方节点之间的距离为 20 mm 的光学系统为例,基于小旋量理论对其光轴精度影响因素进行了分析与计算,结果表明平行光管、转台、与标定模型三方面引入的标定误差低于 $10''$ 。为不同的光学系统基于等效节点理论进行光轴标定时的精度分析提供了方法与依据。

关键词:光学系统;光轴标定;等效节点;齐次坐标变换;精度分析

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215009.0912004

Research on the Method of Determining the Optical Axis Based on Equivalent Nodal Point Theory

LIU Zhiying, JIA Guiyuan, QIN Tianxiang, HUANG Yunhan, ZHANG Han

(Monitoring and Analysis Center, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the current error problems in the calibration of the optical axis of the high-precision optical system, a method based on the equivalent nodal point theory to calibrate the actual optical axis of the system is proposed. By establishing reference coordinate system, the nodal point coordinate systems and the detector coordinate systems, and combining with homogenous coordinate transformation method, a mathematical model suitable for the optical axis calibration of an actual system is established. The optical system with a 100 mm focal length and a 20 mm distance of optical nodal points is taken as an example to analyze the factors that affect the calibration accuracy, and the result show that the calibration calculation error introduced by collimators, rotary table, and calibration model is less than $10''$. It provides a method and reference for the accuracy analysis of optical axis calibration for different optical systems based on the equivalent nodal point theory.

Key words: Optical system; Optical axis calibration; Equivalent nodal point; Homogeneous coordinate transformation; Accuracy analysis

OCIS Codes: 120.4800; 080.2730; 120.3940; 120.3940

0 引言

共轴光学系统的光轴指组成光学系统的各个光学元件的表面曲率中心所在的直线,可视为光学系统的零值轴,是光学系统与传感器、探测器等光学仪器结合使用的重要依据^[1-2]。在系统装调过程中需要构建光轴位置作为理想的光学系统参考轴线,所以需要确定光轴位置以保证光学系统相对光轴的旋转对称性^[3]。

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.61805025,61705018),吉林省科学技术发展项目(No. 20200401055GX)

第一作者:刘智颖(1981—),女,教授,博士,主要研究方向为先进光学设计与成像。Email: lzccccc@126.com

收稿日期:2021-01-06;录用日期:2021-03-12

<http://www.photon.ac.cn>

随着光电仪器精度需求的不断提升,如何准确地确定光轴位置逐渐成为人们关心的重点。

湖南大学易广威等以定中心基准轴的方式分析光轴倾斜误差,以此来提高系统光轴标定的精度^[4]。华中科技大学徐丹慧等提出了一种基于干涉条纹的光轴平行性校准方法,在平行光管法的基础上对光轴位置进行确定^[5]。南京理工大学杜洋等通过高精度三坐标测量仪对透镜定中心,最终对光轴位置进行拟合^[6]。以上对光轴的标定方式均通过间接方式获取,标定结果并未包含实际的光轴方位坐标。军械工程学院陈志斌等利用惯性传感器提供一个准确的基准坐标系,该方法基于光学自动瞄准原理,最终确定基准坐标系中的光轴单位向量坐标^[7],只能应用在精度要求不高的系统上。

为了确定实际光轴的方位坐标,提高系统光轴的方位精度,本文提出了一种基于等效节点理论的光轴方位坐标标定方法,该方法合理运用了光学系统围绕等效节点转动时像点不动的特点,通过双平行光路对光学系统进行成像,然后结合动态光学理论对像点坐标进行齐次坐标变换,最终确定物方节点与像方节点的位置坐标,连接该两点即对系统光轴实际位置进行标定。

1 基于等效节点理论进行光轴方位标定的原理

1.1 光学系统的等效节点

依据动态光学理论^[8],在光轴上取物点 O 和像点 O' 为原点,最终可以建立物空间坐标系 $O-xyz$ 和像空间坐标系 $O'-x'y'z'$ 。该坐标系可以描述透镜及透镜系统的近轴成像过程中,如图1所示。

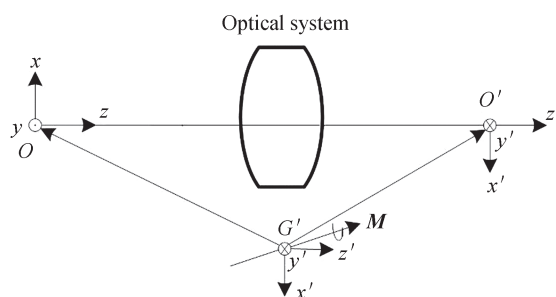


图1 物像空间坐标系

Fig. 1 Object and image coordinate systems

构建像空间坐标系方向相同的坐标系 $G'-x'y'z'$,当系统绕空间任意轴以某一微小角度旋转时,透镜及透镜系统的轴上像点位移可以描述为

$$\Delta O' = (RO - O')\Delta\alpha M \quad (1)$$

式中, $\Delta O'$ 表示像坐标原点 O' 的位移, $\Delta\alpha$ 为微量转角, M 为单位向量。矩阵 O 和 O' 表示物坐标原点 O 及像坐标原点 O' 空间位置, R 为系统的作用矩阵。当式中 $(RO - O') = 0$ 时,可保证透镜及透镜系统绕空间一特殊点任意方向的轴旋转均不产生像点位移。因此可以根据 $(RO - O') = 0$ 对此特殊点进行求解。可以将其展开为

$$\begin{bmatrix} \beta_o^2 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_o & 0 \\ 0 & 0 & \beta_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -O_{z'} & O_{y'} \\ O_{z'} & 0 & -O_{x'} \\ -O_{y'} & O_{x'} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -O_{z'} & O_{y'} \\ O_{z'} & 0 & -O_{x'} \\ -O_{y'} & O_{x'} & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

即

$$\begin{bmatrix} 0 & -\beta_o^2 O_{z'} & \beta_o^2 O_{y'} \\ \beta_o O_{z'} & 0 & -\beta_o O_{x'} \\ -\beta_o O_{y'} & \beta_o O_{x'} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -O_{z'} & O_{y'} \\ O_{z'} & 0 & -O_{x'} \\ -O_{y'} & O_{x'} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

满足式(4)时,透镜及透镜系统绕某轴微小旋转时不产生像点位移。

$$\begin{cases} O_{y'} = O_{y'} = O_{z'} = O_{z'} = 0 \\ O_{x'} = \beta_o O_{x'} \end{cases} \quad (4)$$

基于式(4)可知此点位于系统光轴上,该点即为透镜或透镜系统的等效节点,即透镜或光学系统绕其微小转动时,像点不发生变化的点,表示为 J_0 点。 J_0 与物方节点 J 和像方节点 J' 之间位置关系如图2所示^[9]。

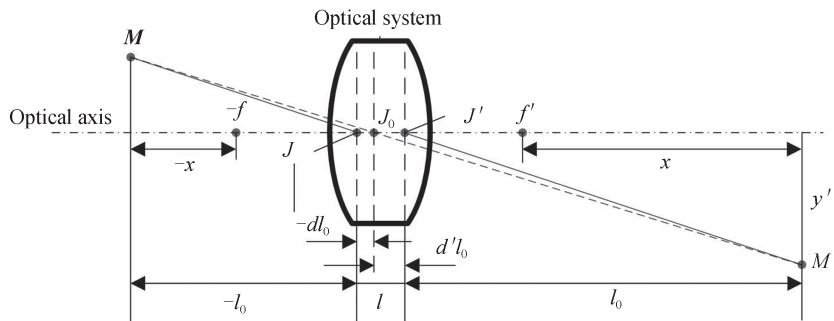


图2 等效节点的概念

Fig. 2 The concept of equivalent nodal point

图2中,基于物方节点 J 和像方节点 J' ,等效节点 J_0 与 J 的间距为 $-dl_0$, J_0 与 J' 间距为 $d'l_0$,这些间距可以表示为

$$\begin{cases} dl_0 = \frac{1}{\beta_0 - 1} l \\ d'l_0 = \frac{\beta_0}{\beta_0 - 1} l \end{cases} \quad (5)$$

式中, l 为物方节点与像方节点之间的距离, β_0 为系统的放大倍率。当物体位于无限远时,对 $d'l_0$ 取极限,可以得到

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} d'l_0 = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{\beta_0}{\beta_0 - 1} l = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f'}{f' - x} l = 0 \quad (6)$$

式中, x 为物距离焦点的长度。可见当物点位于物空间无限远时,等效节点 J_0 和像方节点 J' 重合。

1.2 系统光轴方位坐标标定原理

系统光轴标定工作流程如图3所示。具体标定方法为:将待测系统固定在精密旋转台上,两侧平行光管发出的光通过分光镜入射至待测系统,像点通过显微镜放大后被探测器接收,利用转台对待测系统进行回转,记录待测系统回转时两侧像点位置的变化情况,改变回转轴使成像接收系统两侧像点在回转过程中的位置均不发生改变,以此来确定物方节点与像方节点均在回转轴上,最终可以得到在基准坐标系下的系统光轴方位坐标,系统光轴方位坐标标定结束。

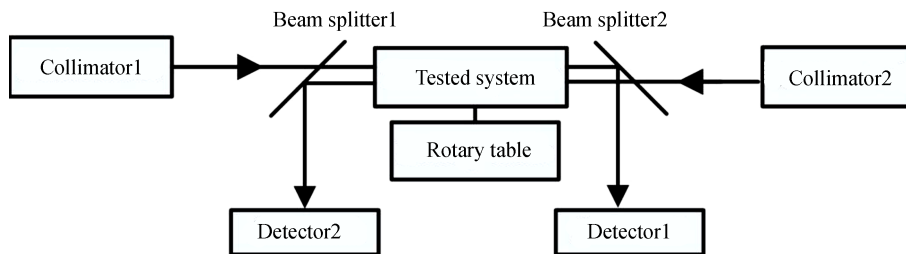


图3 系统光轴标定工作流程

Fig. 3 The flow chart of system optical axis calibration

2 建立系统光轴标定模型

2.1 基准坐标系建立

首先建立基于转台螺旋转点的基准坐标系、两侧节点坐标系和探测器坐标系^[10]。在此基础上可以推导系统光轴标定的数学模型,各个坐标系之间的关系如图4所示。

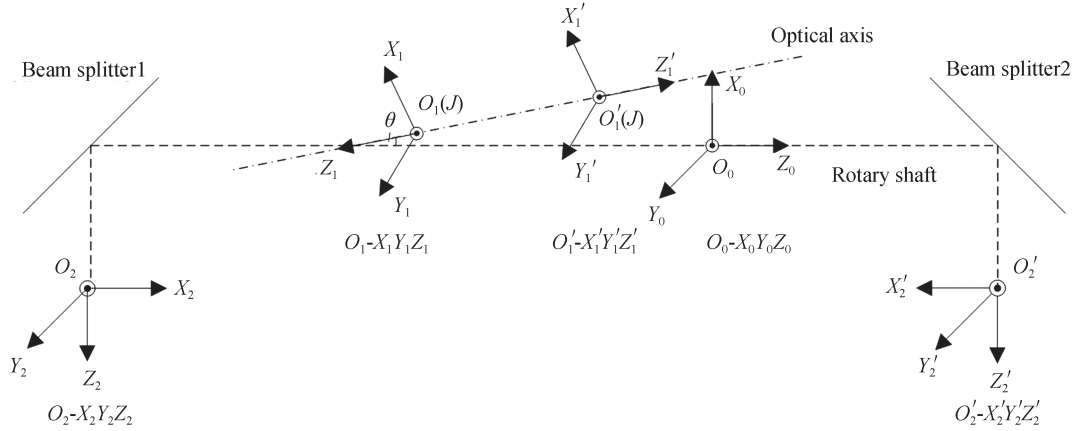


图4 各坐标系之间的关系
Fig. 4 Relationship between the coordinate systems

在图4中,建立直角坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 为基准坐标系,坐标系零点 O_0 位于转台轴线上的陀螺转点, Z_0 轴为基准轴线,光轴与 Z_0 轴的夹角为 θ (偏心角度)。

直角坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 与 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 分别对应光学系统物方节点坐标系和物方探测器坐标系,坐标系零点 O_1 位于物方节点处, Z_1 轴为自右向左的待测系统实际光轴方向。坐标系零点 O_2 位于像空间平行光入射时像点回转的圆心, Z_2 轴为出射光线方向, Y_2 轴的方向与基准坐标系中 Y_0 轴相同。

直角坐标系 $O_1'-X_1'Y_1'Z_1'$ 与 $O_2'-X_2'Y_2'Z_2'$ 分别对应光学系统像方节点坐标系和像方探测器坐标系,坐标系零点 O_1' 位于像方节点处, Z_1' 轴为自左向右的待测系统实际光轴方向。坐标系零点 O_2' 位于物空间平行光入射时像点回转的圆心, Z_2' 轴为出射光线方向, Y_2' 轴的方向与基准坐标系中 Y_0 轴相同。

2.2 回转轴变化过程推导

基于物空间物点无穷远时,等效节点与像方节点重合可知,像空间物点无穷远时等效节点与物方节点重合。将平行光入射到待测系统,分析像点坐标随回转轴变化而变化的过程,可以反推得到待测系统与基准轴之间的中心偏差,进而确定光轴的实际位置。

空间任意的一个坐标系相对于基准坐标系的位置关系均可以通过旋转矩阵来表述。推导坐标系之间的齐次坐标变换矩阵就可以将未知的节点位置转换为可见的像点位置,进而得到基准坐标系中待测系统的光轴位置^[11-12]。系统光轴在其像方节点坐标系 $O_1'-X_1'Y_1'Z_1'$ 的位置坐标可以标定为 $\overline{JJ'}_{[O_1'-X_1'Y_1'Z_1']} = (0, 0, L, 1)$, 其在基准坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 下的投影为 $\overline{JJ'}_{[O_0-X_0Y_0Z_0]} = (a, b, c, 1)$, 像方节点坐标系与基准坐标系零点的距离拟定为 $\overline{O_0O_1'} = (x, y, z, 1)$ 。其中 L 为物方节点与像方节点之间的距离, $L = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$, a, b, c, x, y, z 均未知,通过改变回转轴后物空间与像空间的像点坐标变化确定。

图5为光轴标定前的光线传播过程示意图,其中点划线表示系统光轴;两侧实线分别表示从右往左传播的光线与从左往右传播的光线,这些光线入射至系统前均为平行光, A', B' 为其像点;虚线表示标定过程中的基准轴线,该轴线经过转台的螺旋转点。

通过转台回转待测系统,基于物空间平行光入射后的系统光线传播示意图,可以在基准坐标系下标定像空间的像点位置,通过分光镜改变光束出射的方向,像点位置随之改变。如图5所示, O_2' 为像空间的像点回转中心, A' 为待测系统回转后像空间的像点位置。基于图4中各个坐标系的关系,可以推导出像方探测器坐标系与基准坐标系之间的齐次坐标转换矩阵 R_0 为^[13]

$$R_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于 Z_0 轴误差未知,暂时不考虑 z 的大小。根据图5可知: $O_2'A' = [X_A \ Y_A \ 0 \ 1]$ 为像空间的像点 A'

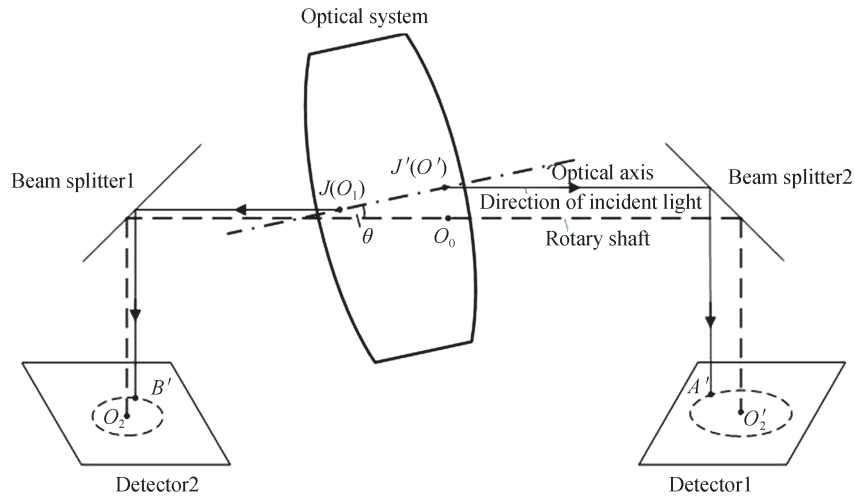


图 5 光轴标定前光线传播过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of light propagation process before optical axis calibration

在 $O_2'-X_2'Y_2'Z_2'$ 下的坐标投影,其中 X_A 为像点 A' 基于回转中心 O_2' 在 X_0 轴方向的位置坐标, Y_A 为像点 A' 基于回转中心 O_2' 在 Y_0 轴方向的位置坐标, O_0O_1' 为像方节点在基准坐标系下的投影坐标。基于以上坐标,系统像方节点坐标系原点与基准坐标系原点之间的距离 $\overline{O_0O_1'}$ 为

$$\overline{O_0O_1'} = R_0 \cdot O_2'A' \quad (8)$$

改变回转轴使像点 A' 与回转中心 O_2' 重合,即待测系统进行回转的过程中,像点位置保持不变。此时可以确定像方节点已经在回转轴上,位移矩阵为

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_A \\ 0 & 1 & 0 & -Y_A \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

此时光线传播示意图如图 6 所示。

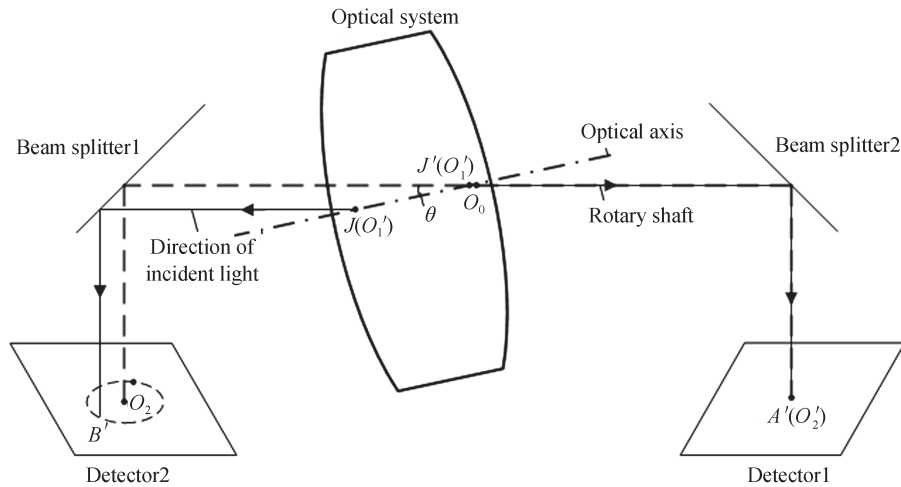


图 6 改变回转轴后光线传播过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of light propagation process after changing rotation axis

改变回转轴后通过转台对待测系统进行回转,由像空间的平行光入射待测系统的光线传播示意图可知,像点在探测器上回转运动,如图 6 所示,像点回转圆心为 O_2 ,回转后像点位置为 B' 。 $O_2B' = [X_B \ Y_B \ 0 \ 1]$ 为物空间的像点 B' 在 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 下的坐标投影,其中 X_B 为像点 B' 基于回转中心 O_2 在 X_0 轴方向的位置坐标, Y_B 为像点 B' 基于回转中心 O_2 在 Y_0 轴方向的位置坐标,根据像空间的像点与像方节点关系可

知, $\overline{O_2B'}$ 即为物方节点与回转轴在 X_0 轴与 Y_0 轴之间的位移误差。因此可以通过 $\overline{O_2B'}$ 计算光轴的偏心程度, 根据物空间像点 B' 的坐标与物方节点之间的关系计算出 θ_x 与 θ_y 的大小为 $\sin\theta_x = \frac{b}{\sqrt{b^2+c^2}}$; $\cos\theta_x =$

$\frac{c}{\sqrt{b^2+c^2}}$; $\cos\theta_y = \frac{\sqrt{b^2+c^2}}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}}$; $\sin\theta_y = \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}}$ 。分别利用转台将待测系统绕基准坐标系 X_0

轴与 Y_0 轴方向对回转轴进行角度 θ_x 与 θ_y 的回转, 空间任意点绕坐标轴 X_0 、 Y_0 的齐次变换矩阵分别为^[14]

$$S_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x & 0 \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$S_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & -\sin\theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

将 θ_x 与 θ_y 的计算结果带入式(10)、(11)中, 有

$$S_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{c}{\sqrt{b^2+c^2}} & -\frac{b}{\sqrt{b^2+c^2}} & 0 \\ 0 & \frac{b}{\sqrt{b^2+c^2}} & \frac{c}{\sqrt{b^2+c^2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$S_y(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{b^2+c^2}}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} & 0 & -\frac{a}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} & 0 & \frac{\sqrt{b^2+c^2}}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据数学关系可知, $a = X_B$, $b = Y_B$, $c = \sqrt{L^2 - X_B^2 - Y_B^2}$ 。

此时待测系统绕回转轴做回转运动时, 两侧探测器上的像点均做圆周运动, 且半径相同。据此可以确定回转轴与待测系统实际光轴方向平行。根据像点回转半径的大小就可以判断此时像方节点相对于基准坐标系的位置, 继续对待测系统进行3个方向的平移运动, 直至待测系统回转时物像方探测器上的像点不动为止。平移距离确定为 X_A' 、 Y_A' 、 Z_A' , 位移矩阵为

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_A' \\ 0 & 1 & 0 & -Y_A' \\ 0 & 0 & 1 & -Z_A' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

最终改变回转轴后, 待测系统绕回转轴回转时两侧像点不动即可保证回转轴已经与待测系统光轴重合, 待测系统光轴的坐标标定结束。对系统光轴坐标标定过程进行整理, 其数学模型为

$$\overline{JJ'}_{[O_0-X_0Y_0Z_0]} = P_2 S_{Y(\theta)} S_{X(\theta)} P_1 \cdot \overline{JJ'}_{[O_1-X_1Y_1Z_1]} \quad (15)$$

将标定过程中探测器读取的物像空间像点坐标带入式(15)中, 就可以确定光轴在基准坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 下的投影 $\overline{JJ'}$, 像方节点坐标系与基准坐标系原点的距离 $\overline{O_0O_1'}$ 。当确定待测系统的中心偏差时, 将系统的理想光轴位置与转台基准轴重合, 则实际光轴相对于基准轴的偏差即为待测系统的中心偏差, $P_2 S_{Y(\theta)} S_{X(\theta)} P_1$ 即为光学系统的中心偏差模型, 基于此可以确定实际光轴在基准坐标系下的方位坐标。

3 系统光轴标定精度影响因素分析

在使用本文提出的数学模型对光轴实际位置进行标定时,辅助元件的精度范围会对标定结果的精度产生直接影响,所以根据辅助元件计算标定后的光轴精度十分必要^[15]。将光轴标定的精度定义为根据该数学模型标定的系统光轴与实际系统光轴之间的偏心程度。对其进行分析时,需要考虑到待测系统焦距与物像方节点之间的距离 L ,以焦距为100 mm、物像方节点之间的距离为20 mm的光学系统为实例,对该标定方法的精度影响因素进行分析。在判断像点位置时,采用了旋转法观测像点,所以对显微系统与探测器的对准精度要求大大降低,故光轴标定的精度主要从平行光管、转台与标定数学模型三方面进行分析。

3.1 平行光管精度分析

平行光管平行光出射方向与基准轴平行度将对系统光轴标定精度产生的影响。本文方法平行光管的平行光出射方向与转台基准轴平行,所以建立的平行光管坐标系与基准坐标轴方向相同。根据小位移旋量理论^[16],分别利用3个转动矢量和3个平移矢量表示平行光管绕3个坐标轴的旋转精度以及位移精度,其中只有平行光管在基准坐标系中的 X_0 轴与 Y_0 轴的旋转角度误差对标定结果产生影响,将其引入的误差通过旋量的形式表示,如式(16)所示,利用机器人运动学坐标变换理论,将其误差旋量转换为齐次坐标转换矩阵,如式(17)所示。

$$D_1 = \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ \beta & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \beta & 0 \\ 0 & 1 & -\alpha & 0 \\ -\beta & \alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中, α 为平行光与 Z_0 轴夹角在 $X_0O_0Z_0$ 面的投影, β 为平行光与 Z_0 轴夹角在 $Y_0O_0Z_0$ 面的投影,其误差大小是随机的,导致像点位置存在误差,对实际光轴位置的标定产生影响。选取大口径的平行光管可以提高该方法的使用范围。以焦距为2 000 mm、口径为200 mm的反射式平行光管计算误差大小,其分辨率大小为 $0.65''$ 。

3.2 转台精度分析

在对回转轴进行回转的过程中,转台的定位精度对系统光轴标定精度产生影响。转台坐标系与基准坐标轴重合,在考虑转台坐标系定位精度时,需要同时考虑两侧定位精度误差。基于小位移旋量理论,3个平移矢量表示转台在3个坐标轴方向的定位精度,分别选择转台在物方节点与像方节点处 X_0 轴、 Y_0 轴方向的定位精度计算对标定结果产生的影响,旋量如式(18)所示,将其转换为齐次坐标转换矩阵,如式(19)所示。

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0 & u_1 \\ 0 & v_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & u_2 \\ 0 & v_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & u_1 + u_2 \\ 0 & 1 & 0 & v_1 + v_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中, u_1 、 v_1 为物方节点距离 X_0 轴方向与 Y_0 轴方向的定位误差, u_2 、 v_2 为像方节点距离 X_0 轴方向与 Y_0 轴方向的误差。以100 nm转台定位精度代入误差计算。

3.3 标定模型精度分析

标定模型的使用基于物像空间探测器上所成的像,在回转轴进行回转的过程中,当像点变化小于1个像元时,变化情况未知。所以在标定过程中探测器像元尺寸大小对系统光轴标定精度产生直接影响,在探测器前放置显微系统可有效提高探测器的精度。基于小位移旋量理论,利用3个平移矢量表示标定模型在3个坐标轴方向的精度,旋量如式(20)所示,将其转换为齐次坐标转换矩阵,如式(21)所示。

$$D_3 = \begin{bmatrix} 0 & \omega_1 \\ 0 & t_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega_2 \\ 0 & t_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \omega_1 + \omega_2 \\ 0 & 1 & 0 & t_1 + t_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中, ω_1, t_1 为物空间像点位置在 X_0 轴方向与 Y_0 轴方向的判断误差, ω_2, t_2 为像空间像点位置在 X_0 轴方向与 Y_0 轴方向的判断误差。以 10 倍显微系统放大倍数代入误差计算。

3.4 光轴坐标标定总精度分析

由于平行光管引入的误差与待测系统自身的焦距有关, 因此可以通过计算将平行光管的角度误差转换为位置误差, 然后通过物像方节点之间的距离计算精度。以上误差分量独立, 通过在其误差域内取随机点^[17], 可以计算系统光轴的标定精度, 选取结果如图 7 所示。

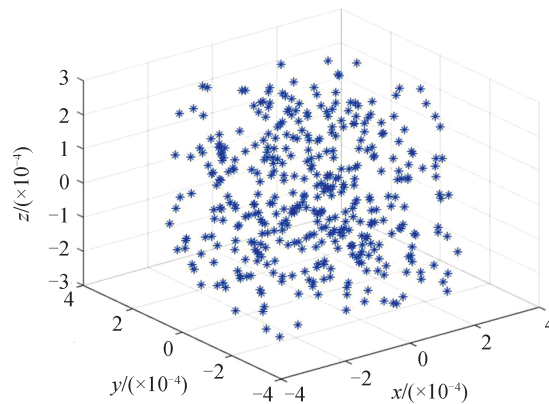


图 7 误差随机点的选取

Fig. 7 Selection of random error points

误差随机点选取后, 通过编程计算可以模拟得到以上因素造成的误差。系统节点位置误差分布直方图如图 8(a) 所示, 累积分布曲线如图 8(b) 所示。

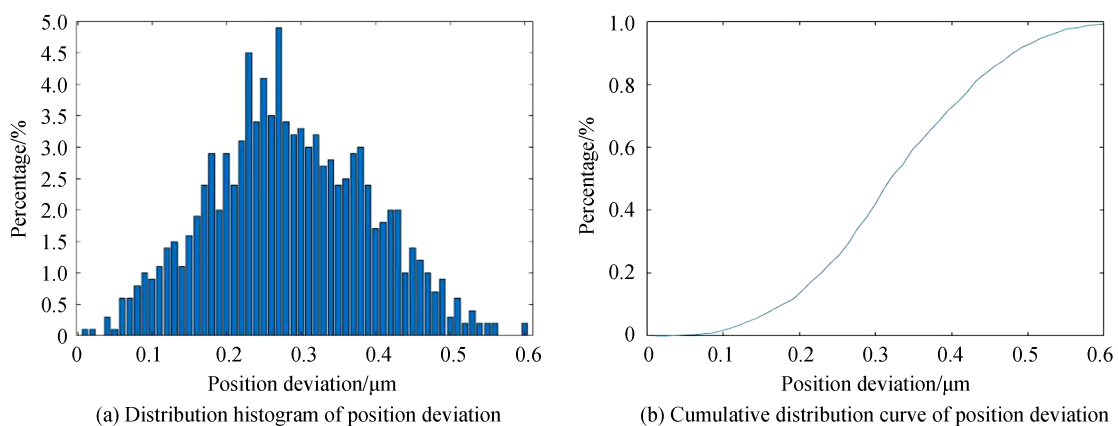


图 8 光轴标定位置误差分析

Fig. 8 Position error analysis of optical axis calibration

将其换算到光轴偏心误差, 光轴的偏心误差分布直方图如图 9(a) 所示, 累积分布曲线如图 9(b) 所示。

以焦距为 100 mm、物像方节点之间的距离为 20 mm 的光学系统为实例进行误差模拟, 可以得出, 基于等效节点理论标定光轴坐标时的累积位置误差优于 0.6 μm , 标定系统光轴与实际系统光轴之间的误差低于 $10''$, 该光轴坐标标定方法满足目前光轴坐标标定需求。

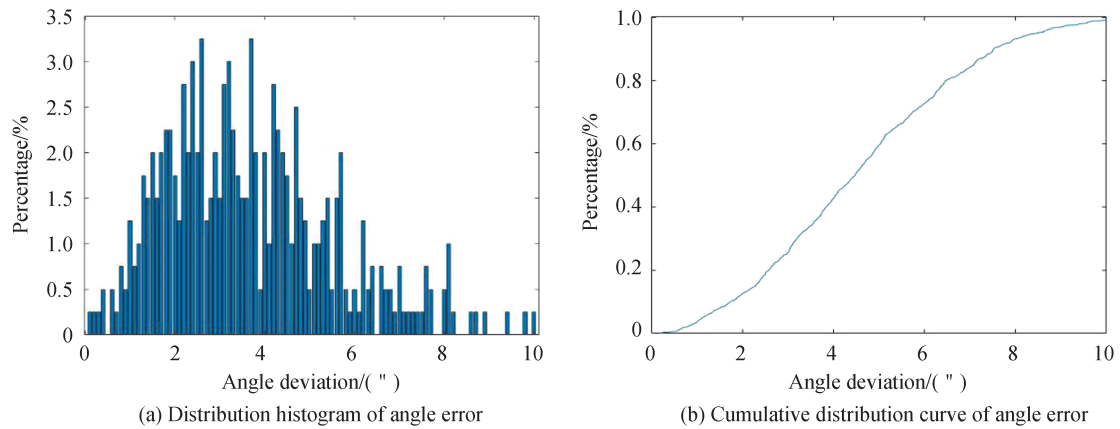


图9 光轴标定偏心误差分析

Fig. 9 Angle error analysis of optical axis calibration

4 结论

本文利用光学系统绕等效节点转动时,像点不动的特点,建立了基准坐标系、节点坐标系和探测器坐标系,在此基础上,利用齐次坐标变换的方法推导了光轴标定过程分析的数学模型,为光学系统光轴方位坐标的标定提供了一种有效手段。以焦距为 100 mm、物像方节点之间的距离为 20 mm 的光学系统为实例,通过小位移旋量的方式对标定精度进行了分析,确定其方位精度优于 10",满足目前对于光轴偏心量的控制要求。该方法可为不同光学系统基于等效节点理论进行光轴标定时的精度分析提供依据,在进行系统像质装调的过程中,可以更好地将光学系统与其他仪器相结合,提高光学装调的效率。

参考文献

- [1] YU Daoyin, TAN Hengying. Engineering optics[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2016: 27.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2016: 27.
- [2] GUO Xiarui, LIAO Zhibo, WANG Chunyu, et al. Aberration and alignment quality investigation of space transmission optical system with centering error of optical axes[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 436-441.
郭夏锐, 廖志波, 王春雨, 等. 光轴一致性误差对空间透射式系统像差和质量的影响[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 436-441.
- [3] PARK H J, LEE S W, LEE D S. Computer aided measurement and compensation system for focal length of lenses in camera manufacture based on the MTF performance using the line CCD sensor[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(10): 1493-1511
- [4] LIU Zijian, YI Guangwei. Research on alignment of coaxial optical system based on global optimization alignment method [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(2): 42-52.
刘子建, 易广威. 基于全局优装法的共轴光学系统装调研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(2): 42-52.
- [5] XU Danhui, TANG Xiahui, FANG Guoming, et al. Method for calibration of optical axis parallelism based on interference fringes[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1712005.
徐丹慧, 唐霞辉, 方国明, 等. 基于干涉条纹的光轴平行性校准方法[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1712005.
- [6] DU Yang, GAO Zhishan. Lens centering using high-precision three coordinate measuring machine[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 639-644.
杜洋, 高志山. 使用高精度三坐标测量仪实现透镜定中心[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 639-644.
- [7] CHEN Zhibin, XIAO Wenjian, MA Dongxi, et al. A method for large distance multi-optical axis parallelism online detection[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0012006.
陈志斌, 肖文健, 马东玺, 等. 大间距多光轴一致性野外在线检测方法[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0012006.
- [8] WANG Zhijian, WANG Peng, LIU Quan. Dynamic optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 19-22.
王志坚, 王鹏, 刘泉. 动态光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 19-22.
- [9] LIU Zhiying, SONG Yulong, FU Yuegang, et al. Tolerance analysis of stitching system based on equivalent nodal point [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(8): 1261-1265.
刘智颖, 宋玉龙, 付跃刚, 等. 基于等效节点的子孔径拼接系统公差分析[J]. 光子学报, 2011, 40(8): 1261-1265.
- [10] TIAN Liude, LIU Zhaohui, ZHAO Jianke, et al. Analysis the influence of pyramidal error on the encoder accuracy test by using coordinate transformation[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0512003.

- 田留德, 刘朝晖, 赵建科, 等. 利用坐标变换分析塔差对编码器测角精度测试的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0512003.
- [11] QIAO Guifang, SUN Dalin, SONG Guangming, et al. A rapid coordinate transformation method for serial robot calibration system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(14): 1-8.
乔贵方, 孙大林, 宋光明, 等. 串联机器人标定系统的坐标系快速转换方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14): 1-8.
- [12] SU Guoying, ZHANG Fumin, HAN Yong, et al. Coaxiality error measurement technology for GNSS antenna connector [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(2): 0215002.
苏国营, 张福民, 韩勇, 等. GNSS天线连接器同轴度误差测量技术[J]. 光子学报, 2020, 49(2): 0215002.
- [13] XU Lizhi, YAN Changxiang, LI yi, et al. Image motion calculation and error distribution for aerial whisk-broom imaging [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(10): 2071-2079.
徐力智, 颜昌翔, 李颐, 等. 航空摆扫成像像移计算与误差分配[J]. 光学精密工程, 2019, 27(10): 2071-2079.
- [14] LU Changming, GAO Xin, LI Xiyu, et al. A method for evaluating medium and high-earth orbit object telescope's precision by Beidou's precise ephemeris [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(10): 1012001.
陆长明, 高昕, 李希宇, 等. 基于北斗卫星精密星历的中高轨望远镜测量精度标定方法[J]. 光子学报, 2020, 49(10): 1012001.
- [15] ZHAO Hengxiang, LI Libo, FENG Yutao, et al. Techniques for on-orbit calibration of space optical imaging systems based on auto-collimation[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(1): 0112003.
赵珩翔, 李立波, 冯玉涛, 等. 基于自准直原理的空间光学成像系统在轨几何定标技术[J]. 光子学报, 2021, 50(1): 0112003.
- [16] MU Xiaokai, SUN Qingchao, SUN Kepeng, et al. Three-dimensional tolerance modeling and precision analysis of flexible body based on the assembly load[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 39-48.
穆晓凯, 孙清超, 孙克鹏, 等. 基于载荷作用的柔性体三维公差建模及精度影响分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 39-48.
- [17] WU Zhaoqiang. Stimulated tolerances modeling based on small displacement torsors and tolerances analysis[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(1): 205-207.
吴兆强. 基于小位移旋量的公差模拟建模及公差分析[J]. 机械设计与制造, 2010(1): 205-207.