

# 激光与光电子学进展

## 基于光学节点特征的光轴标定方法

高天元<sup>1,2\*</sup>, 张涵<sup>1,2</sup>, 刘智颖<sup>1,2</sup>, 贾桂圆<sup>1,2</sup>, 韩旭<sup>1,2</sup>, 王加科<sup>1,2</sup>, 程显东<sup>3</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>光电测控与信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;

<sup>3</sup>吉林省教育考试院, 吉林 长春 130033

**摘要** 针对透射式光学系统的光轴无法直接寻找的问题, 提出基于光学节点特征的光轴标定方法。采用该方法研究节点与等效节点的性质, 通过观测焦面像点的位移变化来确定节点的位置以标定光学系统的光轴, 依据此方法设计双向互标双自准直平行光管的光轴标定装置, 其中成像接收端的抽插式结构设计可以有效避免波前误差的影响, 最终验证光轴标定方法的可行性。实验结果表明, 该方法具有较高的光轴标定精度以及广泛的适应性, 透镜光学系统的光轴标定精度为 7.7", 为空间光学及国防等领域的透镜光学系统提供一种测试装调辅助手段。

**关键词** 测量; 光轴标定; 等效节点; 微量转动; 标定精度

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1112002

## Method for Calibrating Optical Axis Based on Characteristics of Optical Nodes

Gao Tianyuan<sup>1,2\*</sup>, Zhang Han<sup>1,2</sup>, Liu Zhiying<sup>1,2</sup>, Jia Guiyuan<sup>1,2</sup>, Han Xu<sup>1,2</sup>,  
Wang Jiake<sup>1,2</sup>, Cheng Xiandong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Control and Optical Information Transmission  
Technology Ministry of Education, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>3</sup>Jilin Provincial Education Examination Institute, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** The optical axis of a transmission optical system cannot be found directly. To solve this problem, an optical axis calibration method based on the characteristics of optical nodes is proposed. The method is used to investigate the characteristics of a node and an equivalent node, by observing the focal plane image point displacement change, the location of the node to calibrate the optical axis of the system is determined. Furthermore, based on this method, the bidirectional exchange standard double autocollimation optical axis calibration device of parallel light pipe is designed, including imaging thrusting at the receiving end type structure design, which can effectively avoid the influence of the wavefront error. Finally, the feasibility of the proposed method is verified. Experiment results show that the proposed method has high optical axis calibration accuracy and wide adaptability. The optical axis calibration accuracy of the lens optical system is 7.7", which provides an auxiliary means for testing and adjusting lens optical systems in space optics and national defense fields.

**Key words** measurement; optical axis calibration; equivalent node; microrotation; calibration precision

**OCIS codes** 120.4640; 230.3990; 040.1520; 350.6090

收稿日期: 2020-09-18; 修回日期: 2020-10-22; 录用日期: 2020-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(61705018)

\*E-mail: gty@cust.edu.cn

# 1 引言

光轴是光学设计过程中规定的一条理想的基准轴线,同时也是实际光学系统的重要指标之一。空间角的测量以及光学系统与探测器或者其他仪器的结合使用均以光轴为基准,而微小的光轴偏差都将会严重影响光学系统的成像质量<sup>[1-2]</sup>。光轴的准确性可以为高精度光电系统中焦面组件的调整和定位提供方向基准,为此应用在多种光电系统的装调与测试过程中,并为导弹导引头、大规模集成电路制造所用的微缩镜头、高精度星敏感器<sup>[3]</sup>和光电测量设备<sup>[4]</sup>等提供一种测试装调辅助手段。

现有的光轴标定法主要是基于传统的光轴标定方法。上海精密计量测试研究所针对红外相机光轴的标定,根据三靶球的坐标原理将红外相机的光轴等虚拟参数以空间坐标点的方式标定出来<sup>[5]</sup>;西安电子工程研究所针对望远镜光轴的标定,将悬挂铅垂的细线作为光轴校准的目标<sup>[6]</sup>。上述两种光轴标定法均是通过辅助测量装置来间接标定光学系统的光轴,标定原理也未从光轴的定义出发,为此无法精确标定光学系统的光轴。实验室常用的中心偏测量仪虽能够通过外基准将光学镜头的光轴标定出来,但是通常情况下除了单透镜以外的光学系统,光轴是不存在的,也是无法测量的。光学系统的定心过程都假定以光轴为基准,但实际上不能将全部镜面的球心都调校于这条基准轴上,只能寻求最佳的基准轴,即令系统各面的球心均与该轴线的距离较小,从而近似将最佳的基准轴视为光轴,因此假定并计算出一条最佳的基准轴可使系统各面的球心与该轴线的距离平方和最小,通常称为最小二乘轴<sup>[7-10]</sup>。实际情况下,光学系统在使用过程中无法实现以光轴为基准轴,均以光学系统的最小二乘轴作为基准轴,但这会影响精密仪器的精度与性能<sup>[11-12]</sup>。

为了解决现有技术无法直接寻找光轴、无法实现大口径自准直的基准调试以及光轴基准无法传递再现的问题,本文基于动态光学的光学节点提出光轴标定方法。对于轴上点,当透镜绕等效节点转动时,像点位置不变,即通过观测焦面像点的位移变化来寻找透镜的等效节点以标定光轴。采用双向互标的双自准直平行光管并配合显微物镜及寻心执行结构,可以直接寻找透射式光学系统的光轴。

# 2 光轴标定原理

## 2.1 光学节点

在高斯光学范畴内讨论光学系统及元件的动态成像过程,如图 1 所示,以  $O$  点为原点,建立一个右手直角坐标系  $O_{xyz}$ ,  $x$  为入射光轴的方向,  $yz$  平面为物平面;与其共轭的像空间坐标系为  $O'_{x'y'z'}$ ,  $x'$  为出射光轴的方向,  $y'z'$  为像平面。当物和像均在像坐标系  $O'_{x'y'z'}$  内标定时,动态光学系统中物和像的共轭关系式为

$$\mathbf{A}'_{O'M} = \mathbf{M}'_{O'} - \mathbf{S}_{O'} \mathbf{R}_M \mathbf{S}_{O'}^{-1} \mathbf{M}_O, \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{A}'_{O'M}$  表示动态情况下物空间像点  $A$  的共轭像点空间位置的函数矩阵;  $\mathbf{M}_O$  表示动态情况下物坐标原点  $O$  的位移;  $\mathbf{M}'_{O'}$  表示动态情况下像坐标原点  $O'$  的位移;  $\mathbf{S}_{O'}$  表示标定坐标系为像坐标系  $O'_{x'y'z'}$  的旋转矩阵;  $\mathbf{S}_{O'}^{-1}$  表示  $\mathbf{S}_{O'}$  的共轭矩阵;  $\mathbf{R}_M$  表示动态情况下物、像均在像空间坐标系  $O'_{x'y'z'}$  内标定,光学系统的作用矩阵。

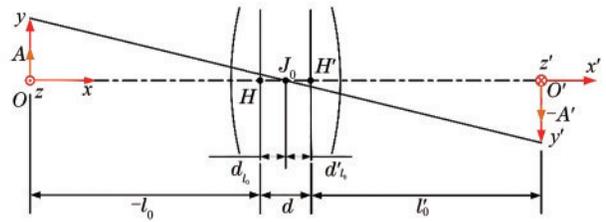


图 1 光学系统的等效节点示意图

Fig. 1 Schematic of equivalent nodes of optical system

为了防止透镜及透镜系统的像质变差,一般不允许其进行大角度转动,为此实验均在微量转动的条件下讨论系统的动态成像特性,微量转动角度均为角秒级。当透镜绕任意轴  $\mathbf{P}$  转动  $\Delta\alpha$  角时,可以得到透镜在动态过程中轴上像点的位移,表达式为

$$\Delta \mathbf{M}'_{O'} = (\mathbf{R}_M \mathbf{O} - \mathbf{O}') \Delta \alpha \mathbf{P}, \quad (2)$$

式中:  $\Delta \mathbf{M}'_{O'}$  表示动态情况下像坐标原点  $O'$  的位移;  $\mathbf{O}$  表示  $O$  点空间位置的函数矩阵;  $\mathbf{O}'$  表示  $O'$  点空间位置的函数矩阵;  $\Delta \alpha \mathbf{P}$  表示微量转角矢量。若(2)式中  $(\mathbf{R}_M \mathbf{O} - \mathbf{O}') = \mathbf{0}$ , 则说明透镜绕任意方向的轴发生旋转,像点均不产生位移<sup>[13-16]</sup>。由于矩阵  $\mathbf{O}$  和  $\mathbf{O}'$  分别为  $O$  点和  $O'$  点的空间位置函数,所以虽然转轴的方向不受限制,但转轴的位置却受到限制,即转轴必定通过某一定点。展开  $(\mathbf{R}_M \mathbf{O} - \mathbf{O}') = \mathbf{0}$  可得

$$\begin{bmatrix} \beta_o^2 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_o & 0 \\ 0 & 0 & \beta_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -O_z & O_y \\ O_z & 0 & -O'_x \\ -O_y & O_x & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -O'_z & O'_y \\ O'_z & 0 & -O'_x \\ -O'_y & O'_x & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

化简可得

$$\begin{bmatrix} 0 & -\beta_o^2 O_z & \beta_o^2 O_y \\ \beta_o O_z & 0 & -\beta_o O_x \\ -\beta_o O_y & \beta_o O_x & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -O'_z & O'_y \\ O'_z & 0 & -O'_x \\ -O'_y & O'_x & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中： $\beta_o$ 表示坐标原点  $O$  处的垂轴放大倍率。当像点均不产生位移时，则

$$O'_y = O_y = O'_z = O_z = 0, \quad (5)$$

$$O'_x = \beta_o O_x. \quad (6)$$

由(5)式和(6)式可见像点必位于光轴上，且  $O_x = l_o, O'_x = l'_o$ ，其中  $l_o$  为物距， $l'_o$  为像距。光学系统的等效节点如图 1 所示，其中  $J_o$  表示透镜系统的等效节点， $H$  表示物方主点， $H'$  表示像方节点； $A$  表示物空间一点， $-A'$  表示物点  $A$  经过透镜系统后的像点。

动态光学中的等效节点与应用光学中的节点

不同，等效节点仅有一个，而节点有两个，节点与等效节点的位置关系如图 1 所示，关系可表示为

$$\begin{cases} d_{l_o} = \frac{1}{\beta_o - 1} d \\ d'_{l'_o} = \frac{\beta_o}{\beta_o - 1} d \end{cases}, \quad (7)$$

式中： $d$  表示物方主点  $H$  与像方节点  $H'$  之间的距离； $d_{l_o}$  表示物方节点  $H$  与等效节点  $J_o$  之间的距离； $d'_{l'_o}$  表示等效节点  $J_o$  与像方节点  $H'$  之间的距离。

当物体位于无限远时，对  $d'_{l'_o}$  取极限可得

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} d'_{l'_o} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{\beta_o}{\beta_o - 1} d = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f'/x}{f'/x - 1} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f'}{f' - x} d = 0, \quad (8)$$

式中： $f'$  表示透镜系统的焦距； $x$  表示以物方节点  $H$  为基点的物距。

由(8)式推导可知，当物体位于有限距离时，绕等效节点  $J_o$  转动的像点，其位置不变；当物体位于无限远时，等效节点  $J_o$  与像方节点  $J'$  重合；当透镜系统绕像方节点  $J'$  转动时，像点位置不变。

### 2.2 光轴标定原理

由 2.1 节的分析可知，通过节点的光线经过物方节点后，出射方向不变；通过等效节点的无限远光线经过光学系统后，等效节点  $J_o$  与像方节点  $J'$  重合；当透镜绕像方节点  $J'$  转动时，像点位置亦不变。

透镜绕像方节点旋转前后，焦平面上的像点变化情况如图 2 和图 3 所示，其中  $J$  为物方节点。以一

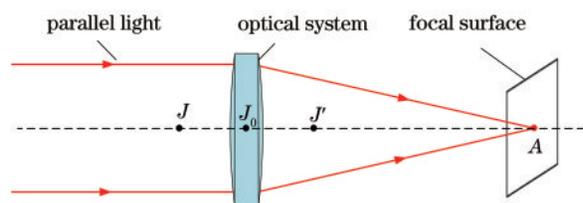


图 2 透镜的等效节点及节点

Fig. 2 Equivalent nodes and nodes of lens

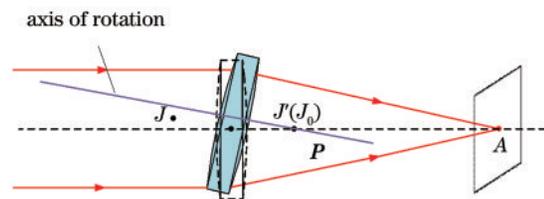


图 3 透镜绕像方节点旋转后焦平面像点的变化情况

Fig. 3 Change of focal plane image point after lens rotates around image square node

束平行光入射，当透镜绕  $J'$  点转动时，等效节点  $J_o$  与像方节点  $J'$  重合，则透镜在焦面上焦点  $A$  处的位置不变。当焦面像点  $A$  不再发生变化时，说明旋转轴  $P$  通过像方节点  $J'$ 。当透镜的旋转轴不通过  $J'$  点时，透镜在焦面上的像会发生平移，如图 4 所示。使旋转轴进行上下左右移动以观察焦面像点  $A$  的变化情况，用来预测旋转轴  $P$  与像方节点  $J'$  之间的距离变化情况。同理，将入射平行光束从透镜的反方向射入，观察绕  $J$  点转动后焦面像点的位置即可找到透镜的物方节点  $J$ 。综上所述，通过标定物方节点  $J$  及像方节点  $J'$  即可标定透射式光学系统的光轴。

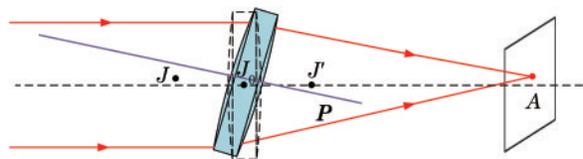


图 4 透镜绕非像方节点旋转后焦平面像点的变化情况  
Fig. 4 Change of focal plane image point after lens rotates around non-image side node

### 2.3 光轴标定系统的总体设计

对提出的光轴标定方法进行总体设计,首先对光学系统进行光路设计,在实现光学指标后,对光轴标定系统进行机械结构设计,最后利用实验室设备来搭建光路并进行验证性实验。光轴标定装置的整体设计过程分为光路、外形尺寸及光学系统结构。

光轴标定模拟设计的过程中,需要实现待测光学系统的角秒级转动以及模拟无限远的目标,结构主要分为发射、姿态调整和接收模块。发射模块由大口径高精度的自准直系统组成;姿态调整模块由三轴转台及待测光学系统的装夹装置组成;接收模

块由 CCD(Charge Coupled Device) 成像接收系统、显微系统和反射镜等组成。通过光线追迹法来标定光路,在成像接收模块中加入显微放大系统,最终设计的光轴标定光路如图 5 所示。

光轴标定系统的整体结构如图 6 所示。实验拟采用左、右两台自准直仪作为主部件,配合二维可移动的显微系统来采集焦面像,通过导轨及滑块可以调整两台自准直平行光管间的距离,从而标定不同尺寸和焦距下待测光学系统的光轴。利用三轴转台可以实现待测光学系统的绕轴转动,为了避免由像散引起的波前误差影响标定精度,将成像接收端设计为抽插送入和送出式的结构。光轴标定系统的构成及功能如下。

1) 自准直平行光管:自准直平行光管位于系统的两侧,其由光源、准直系统和探测器组成,提供光轴标定所需的平行光和测量目标像。

2) 三轴转台:用来实现待测光学系统的装夹、横滚和绕轴作规律转动,以及所需的姿态调整,使其配合成像接收模块寻找和定位待测光学系统的节点。

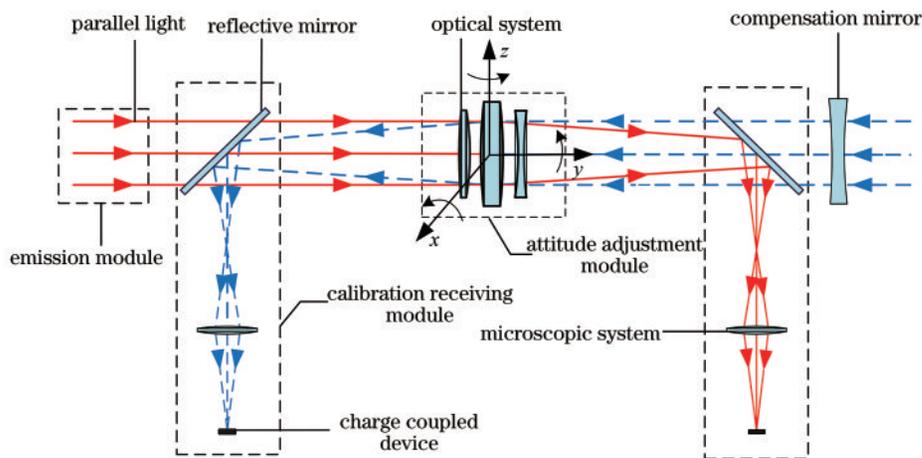


图 5 光轴的标定光路

Fig. 5 Calibrating optical path of optical axis

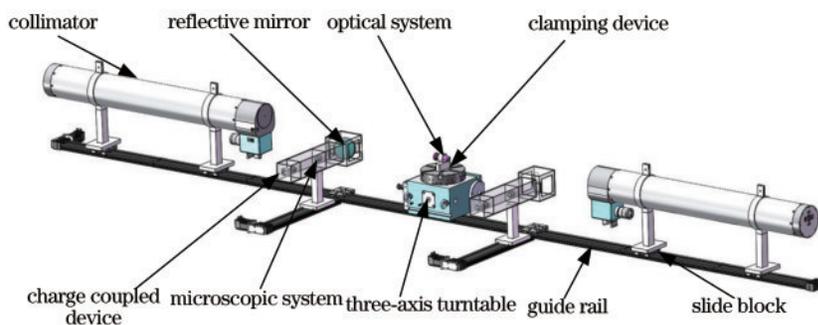


图 6 光轴标定系统的整体结构

Fig. 6 Whole structure of optical axis calibration system

3) 显微系统: 位于 CCD 成像接收系统的正上方, 像点的位置相对于节点发生变化, 显微放大系统是提高标定精度的重要组成部分之一。

4) CCD 成像接收系统: 成像系统的接收端与显微系统的配合使用主要用来寻找被测光学系统对左、右自准直系统所成的像点位置, 依据 CCD 上的像点变化来寻找节点, 进而标定光轴。

5) 补偿镜: 部分光学系统的物方焦点位于光学系统的内部, 则补偿镜用来外移此内部的物方焦点。

6) 垂轴二维扫描导轨: 其为成像接收模块的重要组成部分之一, 可以精准地送入、送出成像接收系统。

#### 2.4 标定步骤

根据 2.3 节设计的双向互标双自准直平行光管, 光轴的标定步骤如下。1) 将待测光学系统装夹于三轴转台, 将右端成像接收端通过垂轴二维扫描导轨推入标定系统中, 调节三轴转台使待测光学系统作绕轴转动; 2) 观测右端成像接收系统所接收到的像点, 通过三轴转台来调节待测光学系统在  $x$  与  $y$  这两个自由度的位移量, 待像点不再发生位移变化停止调整; 3) 将右侧成像接收端送出, 将左侧成像接收端推入, 观测左侧成像接收端所接收到的像点, 调整待测光学系统的两个旋转自由度的旋转量, 待第二个成像接收模块的像点不再发生位移变化; 4) 重复步骤 1)~3), 直至两个成像接收模块的像点均不发生变化, 则待测光学系统的最终旋转轴即为光轴。

### 3 光轴标定实验

为了验证光轴标定方法的可行性, 搭建的验证实验系统如图 7 所示, 实验系统由 CCD 相机、V 型台、双向互标双自准直平行光管及待测光学系统组成。首先, 将待测光学系统置于 V 型台上, 成像 CCD 相机置于待测光学系统的右侧, 使用两个自准直平行光管来模拟无限远的目标, 将待测光学系统与 CCD 相机进行同频率的转动。当 PC (Personal Computer) 显示器上的光斑不随光学系统的转动而发生位移变化时, 则像点在一个像元尺寸内就视为光斑未发生位移变化; 同理, 将成像 CCD 相机移至待测光学系统的左侧, 重复上述操作。当两个 PC 显示器的光斑均不随待测光学系统的转动而发生位移变化时, 则将待测光学系统固定于 V 型台上并移至光学传函仪中以测量待测光学系统的调制传递函数, 如图 8 所示。目前, 光轴的评价方式主要有拟合最小二乘轴和测定调制传递函数 (MTF)。相比于拟合最小二乘轴的方式, 测定调制传递函数的方式更简单。

光学传函仪通过视频成像法在 PC 端上显示待测光学系统的调制传递函数, 由传函仪的数控转台来旋转光斑, 角度旋转范围为  $-0.5^{\circ} \sim 0.5^{\circ}$ , 测量不同角度旋转后的弧矢与子午 MTF 值, 结果如表 1 和表 2 所示, 其中 Sag\_MTF 表示弧矢调制传递函数, Tan\_MTF 表示子午调制传递函数。测量 10 次的弧矢与子午 MTF 平均值与不确定度如表 3 所示。对每组旋转后的角度均测量 10 次, 多次测量结果可以保证实验结果的准确性和科学性。

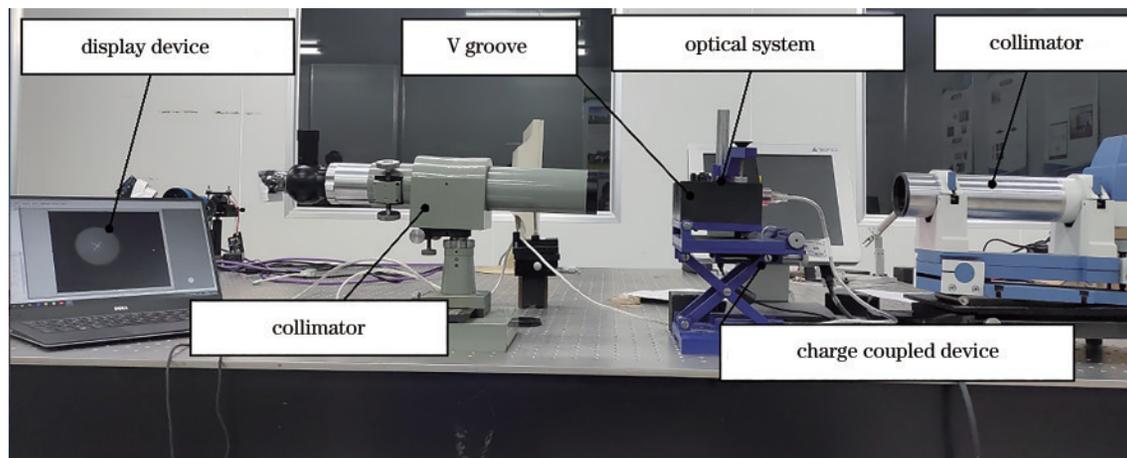


图 7 光轴标定的模拟实验系统

Fig. 7 Simulation experiment system of optical axis calibration

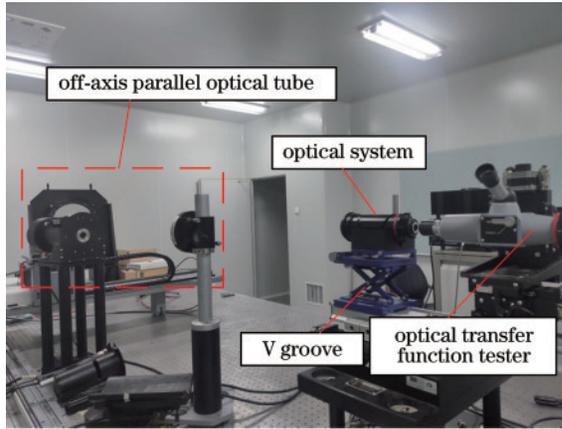


图 8 光轴处的调制传递函数测量实验系统

Fig. 8 Experimental system for measuring modulation transfer function at optical axis

通过调制传递函数来呈现光轴,则光轴两侧的像差基本对称。MTF 具有对称性,视场越大,对称性越明显,所以选择合适的视场就可以应用 MTF 来确定光轴的位置。从表 3 可以看到,使用传函仪来测量最终旋转后像点的调制传递函数,此像点处的调制传递函数值最大,计算得到 0° 的弧矢 MTF 平均值为 55.50,子午 MTF 平均值为 55.04。弧矢及子午 MTF 平均值与旋转角度的关系如图 9 所示。从图 9 可以看到,旋转光斑后的 MTF 值涨幅较小,而且均没有超过 0° 的 MTF 值,则此位置处的像点位于光轴上,这可以验证基于光学节点特征的光轴标定方法的可行性。

表 1 不同角度旋转后的弧矢 MTF 值

Table 1 Sagittal MTF values after rotation at different angles

Angle / (°)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-0.5	54.7	54.8	54.9	54.7	54.8	54.8	54.9	54.9	54.8	54.8
-0.4	54.9	55.0	55.0	54.9	55.0	55.0	55.0	55.0	55.1	55.0
-0.3	55.1	55.1	55.4	55.0	55.1	55.1	55.0	55.1	55.2	55.2
-0.2	55.2	55.3	55.2	55.2	55.3	55.3	55.2	55.3	55.3	55.3
-0.1	55.4	55.4	55.4	55.3	55.5	55.4	55.3	55.3	55.4	55.4
0	55.5	55.5	55.5	55.5	55.6	55.5	55.5	55.4	55.5	55.5
0.1	55.4	55.4	55.5	55.4	55.4	55.4	55.4	55.3	55.4	55.4
0.2	55.3	55.3	55.4	55.2	55.3	55.3	55.2	55.2	55.3	55.3
0.3	55.2	55.1	55.2	55.1	55.1	55.2	55.1	55.1	55.0	55.2
0.4	55.1	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	54.9	55.0	54.9	55.0
0.5	55.0	54.9	54.8	54.9	54.8	54.8	54.8	54.8	54.8	54.9

表 2 不同角度旋转后的子午 MTF 值

Table 2 Meridian MTF values after rotation at different angles

Angle / (°)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-0.5	54.1	54.3	54.4	54.3	54.2	54.3	54.2	54.3	54.2	54.1
-0.4	54.3	54.5	54.6	54.4	54.4	54.4	54.3	54.4	54.4	54.3
-0.3	54.7	54.7	54.8	54.7	54.6	54.6	54.7	54.7	54.6	54.7
-0.2	54.8	54.9	54.9	54.8	54.9	54.9	54.8	54.9	54.8	54.9
-0.1	54.9	55.0	54.9	54.9	55.0	55.0	55.0	55.0	54.9	55.0
0	55.0	55.1	55.0	55.0	55.1	55.1	55.1	55.1	55.0	55.0
0.1	54.9	55.0	55.0	54.9	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	54.9
0.2	54.7	54.9	54.9	54.8	54.9	54.9	54.9	54.8	54.8	54.8
0.3	54.5	54.7	54.8	54.6	54.7	54.7	54.6	54.6	54.6	54.6
0.4	54.3	54.5	54.6	54.4	54.5	54.5	54.5	54.4	54.4	54.4
0.5	54.2	54.3	54.4	54.2	54.3	54.3	54.2	54.1	54.2	54.2

表 3 测量 10 次的弧矢与子午 MTF 平均值与不确定度

Table 3 Average values and uncertainty of sagittal and meridian MTF measured 10 times

Serial number	Angle / (°)	Average		Uncertainty of	
		Sag_MTF /mm	Sag_MTF	Tan_MTF/mm	Tan_MTF
1	-0.5	54.81	±0.07	54.24	±0.09
2	-0.4	54.99	±0.05	54.40	±0.09
3	-0.3	55.10	±0.06	54.68	±0.06
4	-0.2	55.26	±0.05	54.85	±0.05
5	-0.1	55.38	±0.06	54.95	±0.05
6	0	55.50	±0.04	55.04	±0.05
7	0.1	55.40	±0.04	54.96	±0.05
8	0.2	55.28	±0.06	54.83	±0.06
9	0.3	55.13	±0.06	54.64	±0.08
10	0.4	54.99	±0.05	54.44	±0.08
11	0.5	54.86	±0.06	54.24	±0.08

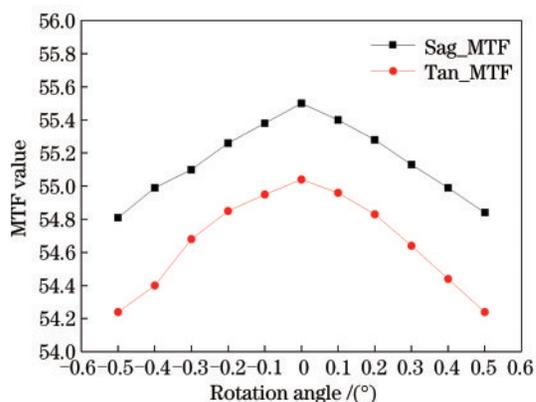


图 9 MTF 平均值与旋转角度的关系

Fig. 9 Relationship between average value of MTF and rotation angle

## 4 光轴标定误差分析

光轴标定系统最重要的指标是系统精度,设计过程中应充分考虑误差来源、误差性质和误差规律,从而寻求误差补偿方法<sup>[17]</sup>。光轴标定的对象是实际光学系统,分析光轴标定误差的过程中均不考虑光学系统的零件定位误差和零件制造误差,即零件加工定位误差、装配过程中引起光学零件对理想位置的偏离以及透镜焦距误差<sup>[18-20]</sup>。

光轴标定误差的光路如图 10 所示,其中  $d_0$  为 CCD 的像元大小,  $\beta$  为放大倍率。当待测系统转动时,则 CCD 上的光斑移动距离能够测量出来。若 CCD 的像元大小  $d_0$  和显微放大系统的放大倍率已知,那么被测系统的像点移动距离就可计算出来,再除以被测系统的焦距就可以得到旋转轴与被测系统光轴的夹角  $\theta_0$ 。

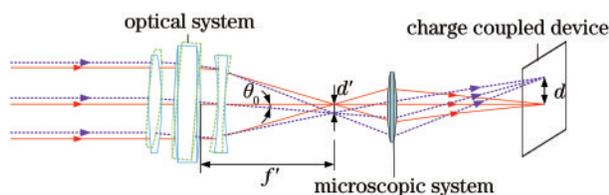


图 10 光轴标定误差的光路

Fig. 10 Optical axis calibration error of optical path

### 4.1 光斑移动距离

光斑位置的精准度是决定检测精度的关键因素之一,当测量光斑的移动距离时,在光斑图像光强分布均匀的情况下,多次调整使光斑收敛于一点,从而选取成像光斑的中心。已知 CCD 的像元尺寸为  $d_0$ ,当被测光学系统发生旋转时,成像光斑中心在 CCD 上移动的像元个数为  $n$ ,则 CCD 光斑移动距离为  $d''$ ,表达式为

$$d'' = nd_0. \quad (9)$$

### 4.2 被测系统像点的移动距离

已知放大系统的放大倍率为  $\beta$ ,则被测系统中的像点移动距离为  $d'$ ,表达式为

$$d' = d''/\beta = nd_0/\beta. \quad (10)$$

### 4.3 旋转轴与被测系统光轴的夹角

已知被测系统的焦距为  $f'$ ,则旋转轴与被测系统光轴夹角为  $\theta_0$ ,表达式为

$$\theta_0 = \arctan(d'/f') = \arctan(nd_0/\beta f'). \quad (11)$$

### 4.4 标定精度

由于光轴标定系统为两侧对称式结构,则光学系统的光轴标定精度为  $\Delta\theta$ ,表达式为

$$\Delta\theta = \sqrt{2} \theta_0 = 1.414 \arctan(nd_0/\beta f'). \quad (12)$$

由(12)式可知,误差源为像元尺寸、显微放大系统的放大倍率和待测光学系统的焦距误差,通过选择放大倍率更大的显微放大系统,则光轴标定装置具有更高的标定精度。

实验采用的成像 CCD 型号为 LBAS-U350-60C,像元尺寸为  $4.8\ \mu\text{m}$ ,待测光学系统的焦距为  $30\ \text{mm}$ ,显微放大系统的倍率拟定为  $6\times$ , $n$  取 1,将数值代入(13)式可计算得到标定精度为  $7.7''$ 。

## 5 结 论

针对现有的标定方法无法直接寻找光轴的问题,基于动态光学中的光学节点进行深入研究并提出一种光轴标定方法。该光轴标定方法从等效节点的定义出发,通过标定透射式光学系统的物方节点和像方节点来标定光轴,实验验证了该方法标定光轴的可行性,从几何角度出发并在合理假设下分析光轴的标定误差,该方法的光轴标定精度达到  $7.7''$ 。同时,通过采取措施来减小标定成像模块误差的方式以进一步提高系统的标定精度,从而提高光学系统像质优良区域的应用,完善光学系统的圆对称性,为高精度光电系统焦面组件的调整和定位提供方向基准。

## 参 考 文 献

- [1] Ge B, Liu Z H, Hou N C. Calculation of the inconsistent optics axis for several optics-measurement instrument[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(21): 5539-5543.  
鬲滨, 刘朝晖, 侯年仓. 多光学测试设备光轴不一致性测量计算的研究[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(21): 5539-5543.
- [2] Liu X W. The technology of the digitalized detecting for optic-axis[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007: 10-15.  
刘晓伟. 光轴误差的数字化检测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007: 10-15.
- [3] Gao J J, Bi Y, Li J P, et al. Research on calibration system of star sensor thermal drift based on error decoupling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1004004.  
高婧婧, 毕勇, 李金鹏, 等. 基于误差解耦的星敏感器热漂移标定系统研究[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1004004.
- [4] Hou M S, Liu J Q, Liu D L, et al. Research on calibration technology of laser scanning projection system based on laser ranging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1004002.  
侯茂盛, 刘继强, 刘大礼, 等. 基于激光测距的激光扫描投影系统标定技术研究[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1004002.
- [5] Chen J G, Zhu Q, Yu F, et al. Study on calibration method of infrared camera optical axis[J]. Optical Instruments, 2017, 39(1): 46-49.  
陈继刚, 祝卿, 俞芳, 等. 红外相机光轴标定研究[J]. 光学仪器, 2017, 39(1): 46-49.
- [6] Fu Q. Alignment and calibration of optical axis of a phased array radar[J]. Fire Control Radar Technology, 2002, 31(2): 63-66.  
傅强. 相控阵雷达光轴的标定与校准[J]. 火控雷达技术, 2002, 31(2): 63-66.
- [7] Guo L Q. Reference axis and optical axis[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 1984, 4(2): 78-82, 95.  
郭乐群. 基准轴与光轴[J]. 西安工业大学学报, 1984, 4(2): 78-82, 95.
- [8] Kong W Q, Liu J N, Da F P, 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.
- [9] Yu J, Chen C, Gao N, et al. Camera calibration based on phase target[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 111203.  
于瑾, 陈超, 高楠, 等. 基于相位标靶的相机标定[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 111203.
- [10] Zhang J L. Nodes and optical centers of optical systems[J]. Journal of Kashgar Teachers College, 1988, 9(6): 52-54.  
张晋鲁. 光学系统的节点和光心[J]. 喀什师范学院学报, 1988, 9(6): 52-54.
- [11] Sha W M, Qin X J. Coaxiality measurement of the optical axis between the horizontal and convex standard lens and the collimating objective lens[J]. Measurement Technique, 1992(8): 27-28, 19.  
沙维敏, 秦晓君. 平凸标准镜头与准直物镜的光轴共轴性测量[J]. 计量技术, 1992(8): 27-28, 19.
- [12] Chen W Y, Wu Y F, Yang H. Optical axis coordinate calibration method based on multi-step phase shift and dual plane[J]. Information Technology, 2020, 44(7): 69-74, 78.  
陈文艺, 伍义峰, 杨辉. 基于多步相移和双平面的光轴坐标标定方法[J]. 信息技术, 2020, 44(7): 69-74, 78.

- [13] Wang Z J, Zheng J P. The object-image conjugate theory of optical systems and optical elements in motion[J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1992, 15(2): 1-13.  
王志坚, 郑建平. 光学系统及元件动态下物象共轭理论[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1992, 15(2): 1-13.
- [14] Wang Z J, Zheng J P. Dynamic imaging characteristics of optical systems and components[J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1992, 15(2): 14-24.  
王志坚, 郑建平. 光学系统及元件动态下成像特性[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1992, 15(2): 14-24.
- [15] Wang Z J, Zheng J P. Object image conjugate theory for dynamic optical systems[J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1992, 15(2): 25-28.  
王志坚, 郑建平. 动态光学系统的物象共轭理论[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1992, 15(2): 25-28.
- [16] Zheng J P, Wang Z J. Dynamic adjustment and error analysis of optical system[J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1992, 15(2): 52-58.  
郑建平, 王志坚. 光学系统动态调整及误差分析[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1992, 15(2): 52-58.
- [17] Li S K. Study of the error of the non-diffracting beam's installment base[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008: 63-66.  
李寿科. 无衍射光光轴安装基础的误差研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008: 63-66.
- [18] Wu J, Li N, Yue C Y, et al. Method for in-orbit optical axis pointing calibration of micro-nano remote sensing camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(9): 0912001.  
吴俊, 李娜, 岳春宇, 等. 微纳遥感相机在轨光轴指向标定方法[J]. 光子学报, 2019, 48(9): 0912001.
- [19] Zhang K D. Research on off-axis distortion correction axis calibration system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019: 12-16.  
张凯迪. 离轴式畸变校正光轴标定系统研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019: 12-16.
- [20] Wang G H, Qian K M. Review on line-scan camera calibration methods[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111011.  
王国琿, 钱克矛. 线阵相机标定方法综述[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111011.