



光学角规在透镜中心偏测量仪校准中的应用

韩颖 李新伟 范永春 易磊 刘丽

Application of optical angle gauge in lens center deviation measuring instrument calibration

HAN Ying, LI Xinwei, FAN Yongchun, YI Lei, LIU Li

引用本文:

韩颖,李新伟,范永春,等.光学角规在透镜中心偏测量仪校准中的应用[J].*应用光学*,2024,45(3):637-643. DOI: 10.5768/JAO202445.0303001

HAN Ying, LI Xinwei, FAN Yongchun, et al. Application of optical angle gauge in lens center deviation measuring instrument calibration[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(3): 637-643. DOI: 10.5768/JAO202445.0303001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0303001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于无衍射光莫尔条纹的轴锥透镜锥角测量方法](#)

Measurement method of axicon cone angle based on moire fringes of non-diffracting beam

应用光学. 2020, 41(3): 559-564 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0303003>

[90° 视向角内窥远心测量仪的光学设计](#)

Optical design of endoscope telecentric measuring instrument with 90° visual angle

应用光学. 2017, 38(6): 890-895 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0601006>

[太赫兹源发散角测量技术研究](#)

Research on divergence angle measurement technique of terahertz sources

应用光学. 2021, 42(3): 499-503 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0303001>

[光学镜头轴线精确定心校准技术](#)

Precise axis centering calibration technology for optical lens

应用光学. 2018, 39(2): 252-256 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0205003>

[多波长广角f-theta透镜光学设计](#)

Optical design of wide-angle multi-wavelength f-theta lens

应用光学. 2017, 38(4): 533-537 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0401003>

[激光三角法中工作角对系统灵敏度的影响](#)

Effect of working angle on system sensitivity in laser triangulation

应用光学. 2017, 38(5): 826-830 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0507001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2024) 03-0637-07

光学角规在透镜中心偏测量仪校准中的应用

韩 颖, 李新伟, 范永春, 易 磊, 刘 丽

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471000)

摘要:介绍了透镜中心偏测量仪的校准现状,设计使用光学角规对透镜中心偏测量仪自准直光管的示值误差进行校准。通过分析光学角规的基本原理,偏向角的定义,偏向角和楔角的转换关系,详细说明如何选择光学角规以及如何使用光学角规实现透镜中心偏测量仪自准直光管示值误差的校准与溯源。选用标称值分别为 $2'$ 与 $5'$,并经过国家计量院溯源的一等光学角规,对1台单光路设备和1台双光路设备进行校准,测量重复性均优于 $0.1''$,不确定度达到 $0.11''$ 。结果表明,光学角规可以有效解决高精度透镜中心偏测量仪自准直光管示值误差的校准溯源问题。

关键词:透镜中心偏;自准直光管;光学角规;偏向角;楔角

中图分类号:TN216

文献标志码:A

DOI: [10.5768/JAO202445.0303001](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0303001)

Application of optical angle gauge in lens center deviation measuring instrument calibration

HAN Ying, LI Xinwei, FAN Yongchun, YI Lei, LIU Li

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471000, China)

Abstract: The current calibration status of the lens center deviation measuring instrument was introduced, and the optical angle gauge was designed and used to calibrate the indication errors of the auto-collimated light tube of lens center deviation measuring instrument. By analyzing the basic principles of optical angle gauges, the definition of deviation angle, and the conversion relationship between deviation angle and wedge angle, a detailed explanation of how to select and use an optical angle gauge to calibrate and trace the indication errors of the auto-collimated light tube of lens center deviation measuring instrument was provided. The first-class optical angle gauges with nominal values of $2'$ and $5'$ and traced by the National Institute of Metrology were selected to calibrate a single optical path device and a dual optical path device. The measurement repeatability is better than $0.1''$, and the uncertainty reaches $0.11''$. The results show that the optical angle gauge can effectively solve the calibration and traceability problems of the auto-collimated light tube indication errors of high-precision lens center deviation measuring instruments.

Key words: lens center deviation; auto-collimated light tube; optical angle gauge; angle of deviation; angle of wedge

引言

对于球面、非球面等组合型多镜片构成的成像系统,由于各镜片光轴与系统光轴的中心偏差的存在,会破坏整个光学系统的共轴性,产生彗差、像散、不对称畸变等一系列像差^[1-3],使光学系统最终的传递函数变差。将高精度透镜中心偏测

量仪用于多镜片成像系统的装调过程中^[4,5],可以减少传统手工分片测量装配造成的累计误差,使整个光学系统的成像质量得到明显提高^[6]。透镜中心偏测量仪属于准直成像式中心偏差测量装置^[7],是一种较为先进的新型高精度的测试设备。近年来,如何解决透镜中心偏测量仪自准直光管

收稿日期:2023-02-03; 修回日期:2023-08-08

基金项目:中国空空导弹研究院科技创新基金 (CKJ0000-2021JLS01)

作者简介:韩颖 (1988—),女,硕士,高级工程师,主要从事红外导引系统测试及光学计量研究。

E-mail: hyloveconan@163.com

的示值误差的校准与溯源问题, 成为各大计量研究机构的研究热点。

高精度的自准直光管是透镜中心偏测量仪的主要组成部件, 该部件垂直安装在升降导轨上, 无法按照 JJG 202-2007 自准直仪检定规程^[8]开展检定校准工作。进口的透镜中心偏测量仪在出厂时, 配有一块自带调整机构的专用的校准光楔, 精度很高^[9], 且无法拆卸, 目前国内没有溯源方法与溯源渠道。经调研, 大多数生产单位将透镜中心偏测量仪按照非标设备进行管理。少数计量校准技术研究机构, 每年通过比对的方式, 来保证透镜中心偏设备的测量准确性。但是计量比对会在数据分析、实施方法等方面存在一些问题^[10]。近期, 有研究机构提出可以使用光学角规对透镜中心偏测量仪自准直光管示值误差进行量传, 光学角规的选型和具体校准方法没有详细说明。本文将通过分析光学角规的基本原理、偏向角的定义、偏向角和楔角的转换关系, 详细说明如何选择光学角规以及如何使用光学角规实现透镜中心偏测量仪自准直光管示值误差的校准与溯源。

1 光学角规介绍

1.1 基本原理

光学角规如图 1 所示^[11], 是一种高精度标准小角度计量和传递的标准器具。主要由楔形镜和镜座构成, 折射角 α 很小, 可以近似地认为是平行平板的折射棱镜称为楔形镜^[12], 也叫光楔。在航天、航空、兵器、船舶领域和中国计量科学研究院等对小角度测量要求较高的测角系统检定的各级部门中, 已有将光学角规使用在太赫兹源发散角^[13]的测量、车载机载光电吊舱和各种光电瞄具多光轴平行性中的研究报道^[14]。

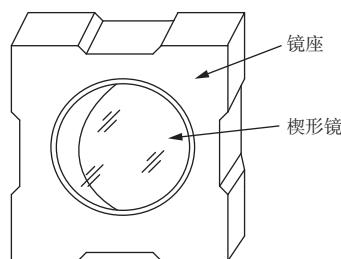


图 1 光学角规示意图^[11]

Fig. 1 Schematic diagram of optical angle gauge^[11]

1.2 偏向角的定义

光学角规名义值为偏向角, 如图 2 所示。入射

光线垂直入射垂直于光学角规前表面, 经过楔形镜在主截面内产生偏折后的出射光线与入射光线之间形成的夹角即为偏向角 δ ^[12]。

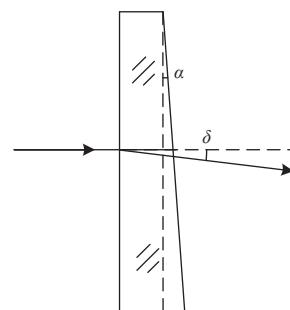


图 2 偏向角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of angle of deviation

根据透镜中心偏测量仪的校准原理, 若要将光学角规应用在透镜中心偏测量仪中, 需进行楔角 α 与偏向角 δ 之间的换算。折射棱镜的公式用于楔形镜时, 可以简化为(1)式^[15]:

$$\delta = \alpha(n-1) \quad (1)$$

式中: δ 为偏向角; α 为楔形镜的楔角; n 为楔形镜材料的折射率。

2 自准直光管示值误差的校准方法

2.1 校准光路

经前期试验, 将透镜中心偏测量仪自带的校准光楔放置在不同的测试位置, 显示器上均可以清晰地显示校准光楔上表面与下表面返回的 2 个“十”字像, 如图 3 所示, 其中 d 为 2 个像点之间的探测距离。

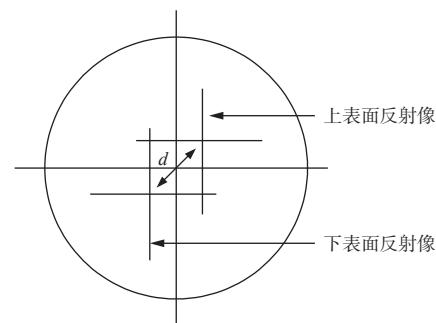


图 3 上、下表面反射像

Fig. 3 Upper and lower surface reflections

根据透镜中心偏测量仪的这一特点, 设计校准光路如图 4 所示。在图 4 中, 反射角 θ 与楔角 α 有如下关系:

$$\theta = 2n\alpha \quad (2)$$

又有:

$$\theta = \frac{d}{f} \quad (3)$$

式中: f 为自准直光管的焦距; d 为 2 个像点之间的探测距离。

因此, 仪器 CCD 探测系统能够根据 2 个“十”字像的位置, 按照式(4)自动计算出校准光楔 2 个工作面的夹角, 即楔角 α 。

$$\alpha = \frac{d}{2nf} \quad (4)$$

式中: α 为光学角规的楔角; n 为楔形镜材料的折射率。

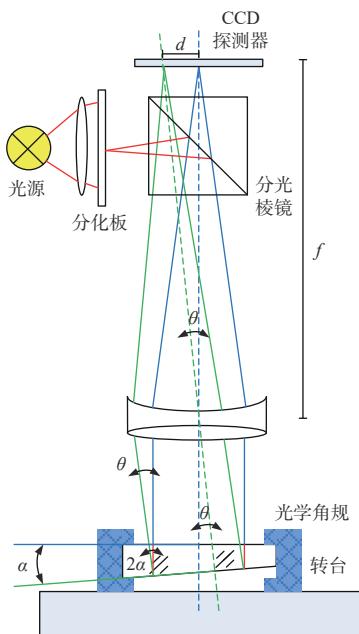


图 4 光路设计图

Fig. 4 Diagram of optical path design

由式(2)~式(4)可以确定, 这 2 个像点之间的距离 d 与校准光楔上下 2 个表面的楔角有关, 与放置的位置与姿态无关。因此, 进一步说明, 研制有固定楔角值的光学角规作为校准设备, 放置在透镜中心偏测量仪的工作台上对自准直光管示值误差进行校准, 理论上是可行的。

2.2 校准设备

2.2.1 光学角规的选型

在本方案中, 作为被校设备的 2 台透镜中心偏测量仪测量楔角 α 的范围均约为 $200'' \sim 800''$, 光源分别使用卤素灯和 LED 光源。光学角规楔形镜的材质为 N-BK7, 在 2 种光源下的折射率 n 分别为 1.518 72 和 1.519 584, 可以近似看为 1.52。

按照式(1)可计算得出, 用于校准的光学角规偏向角 δ 的设计值范围应为 $416'' \sim 104''$, 即 $6'56'' \sim$

$1'44''$ 。

检定规程中规定光学角规分为 3 个等级, 规格一般为 $2'', 4'', 6'', 8'', 10'', 20'', 1', 2', 5', 10'$, 光学角规的偏向角偏差及测量不确定度要求如表 1 所示。

表 1 偏向角偏差及测量不确定度要求

Table 1 Requirements of deflection angle deviation and measurement uncertainty

等级	偏向角	偏向角偏差/''	测量不确定度($k=2$)/''
一等	$2'' \sim 10''$	± 1	0.1
	$20'' \sim 1'$	± 2	
	$2' \sim 10'$	± 3	
二等	$2'' \sim 10''$	± 1.5	0.2
	$20'' \sim 1'$	± 3	
	$2' \sim 10'$	± 4	
三等	$2'' \sim 10''$	± 2	0.5
	$20'' \sim 1'$	± 4	
	$2' \sim 10'$	± 5	

综上所述, 光学角规应从以下 2 个方面进行选择:

1) 透镜中心偏测量仪说明书指标中指出, 自准直光管的精度为 $\pm 2''$, 与校准设备不确定度应满足 4 倍关系, 即 $U \leq 0.5'' (k=2)$;

2) 测量范围应该尽量覆盖透镜中心偏测量仪自准直光管示值量程上限和下限。

因此, 为满足测试需求并保证测试精度, 在本方案中选择使用 $2'$ 和 $5'$ 这 2 块一等光学角规, 来作为透镜中心偏测量仪中自准直光管示值误差校准设备。

2.2.2 N-BK7 光学角规波长与名义值的对应关系

在确定使用 $2'$ 和 $5'$ 的光学角规校准设备后, 需要根据上级机构给出的 660 nm 处光学角规的检定证书值, 以及波长和折射率的对应关系, 计算出不同光源下光学角规准确的名义值 δ_0 , 为 OptiCentric 透镜中心偏测量仪自准直光管的瞄准误差校准提供更准确的校准数据。几种典型波长下, N-BK7 光学角规名义值参考数据如表 2 所示。

表 2 N-BK7 光学角规名义值参考数据

Table 2 Reference data for nominal values of N-BK7 optical angle gauge

折射率	波长/nm					
	850	660	632.8	546.1	530	518
$2'$	1.509 84	1.514 21	1.515 09	1.518 72	1.519 58	1.520 28
$5'$	117.920	118.93	119.134	119.974	120.174	120.334
	297.244	299.79	300.304	302.422	302.925	303.330

2.3 校准方法

使用 $2'$ 和 $5'$ 这 2 块光学角规分别对自准直光管上下限的示值误差进行校准, 将其中 1 个光学角规放置在光洁无障碍物的气浮旋转工作台上。打开光源, 打开设备测量软件, 找到像点, 并调整焦距, 使光学角规 2 个反射面返回的“十”字像呈现在视场中。通过微调工作台俯仰倾斜旋钮, 使“十”字像移动到视场中心位置。手动轻微旋转光学角规, 使测量软件中显示出的上下表面返回的“十”字像呈清晰的正方形“#”字状, 如图 5 所示。

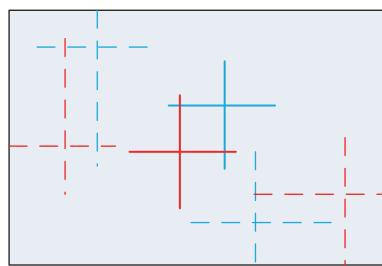


图 5 调整“十”字像

Fig. 5 Adjustment of cross image

点击测试按钮, 软件根据 CCD 采集到 2 个像点之间的 d 值, 按照(4)式自动计算出楔角 α , 并多次测量计算出平均值。再根据(1)式计算出偏向角 δ , 与光学角规在相应波长下的名义值 δ_0 相减, 即为自准直光管的示值误差。

对于双光路的透镜中心偏测量仪, 可以使用同样的方法分别对上下光路进行校准, 下光路测试方法如图 6 所示。

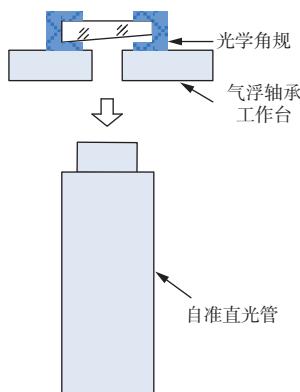


图 6 下光路测试方法

Fig. 6 Test method of lower optical path

值得注意的是, 在测试上下光路时, 只需分别开启上下光源, 不必改变光学角规的放置方向。因为在使用光学角规进行校准时, 只与光学角规楔形镜上下 2 个表面的平行度有关, 与放置的位置

与姿态无关。

3 校准过程及校准数据

在室温为 21.6°C , 相对湿度为 49% 的超净间, 分别对 2 台 OptiCentric 透镜中心偏测量仪进行校准, 其中 1 台为单光路测试设备, 另外 1 台为双光路测试设备, 具体校准步骤如下:

- 1) 将被校透镜中心偏测试仪与光学角规置于同一操作环境 4 h 以上;
- 2) 打开设备电源总开关、气源, 然后打开电机驱动器、转台控制器及计算机的电源;
- 3) 双击计算机上的应用程序图标, 出现程序主窗口;
- 4) 先将标称值为 $2'$ 的光学角规放置在表面光洁的转台中心, 如图 7 所示;

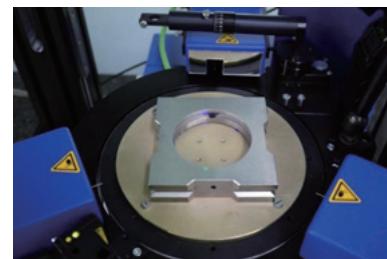


图 7 光学角规放置图

Fig. 7 Placement diagram of optical angle gauge

- 5) 点击“Programs/check calibration”, 激活需要测试的自准直仪对应的窗口, 窗口出现“#”字线, 要确保“#”字线在 CCD 有效视场内;
- 6) 轻微转动光学角规, 调整“#”字线到最佳位置;
- 7) 点击“Measure”, 测得光学角规的第 1 个实测值;
- 8) 移动光学角规使激活窗口的“#”字线适量移动, 再点击“Measure”, 测得第 2 个实测值;
- 9) 重复步骤 8, 将校准结果填入表 2 中;
- 10) 将标称值为 $5'$ 的光学角规放置在转台上, 重复步骤 5~步骤 9, 并记录校准数据;
- 11) 对于双光路透镜中心偏测量仪, 将上光路光源关闭, 打开下光路光源, 重复步骤 4~步骤 10, 得到下光路上下限的校准结果填入表 3 中, 并计算出示值误差;
- 12) 测试结束将光学角规取下, 关闭应用程序, 关闭计算机;
- 13) 关闭设备电源总开关, 关闭气源。

表 3 单光路设备测量结果

Table 3 Measurement results of single optical path device

参数	2	5
光学角规标称值/(')	2	5
光学角规名义值/(")	120.032	302.925
实测值/(")	231.338 6	582.806 8
	231.261 6	582.872 6
	231.257 6	582.840 1
	231.301 6	582.861 4
	231.310 2	582.856 3
	231.332 8	582.830 1
	231.258 3	582.851 8
	231.292 6	582.843 9
	231.260 6	582.888 9
	231.280 4	582.811 4
平均值/(")	231.289 4	582.846 3
偏向角/(")	120.17	302.84
示值误差/(")	0.14	-0.09
重复性/(")	0.031	0.026

表 3 为单光路设备测量结果, 双光路设备测量结果如表 4 所示。

表 4 双光路设备测量结果

Table 4 Measurement results of double optical path device

参数	光路方向			
	上光路		下光路	
光学角规标称值/(')	2	5	2	5
光学角规名义值/(")	120.032	302.925	120.032	302.925
实测值/(")	231.41	582.63	231.93	582.41
	231.38	582.56	231.70	582.44
	231.34	582.60	231.83	582.48
	231.37	582.58	231.68	582.41
	231.32	582.51	231.79	582.38
	231.29	582.57	231.83	582.37
	231.33	582.63	231.92	582.43
	231.39	582.56	231.75	582.48
	231.36	582.64	231.8	582.42
	231.29	582.53	231.66	582.37
平均值/(")	231.35	582.58	231.79	582.42
偏向角/(")	120.00	302.20	120.24	302.11
示值误差/(")	-0.03	-0.73	0.20	-0.81
重复性/(")	0.041	0.044	0.093	0.040

软件中采集到的反射像如图 8 所示。在本次校准测试中, 选择的 2 台测试对象使用的光源不同, 波长分别为 546.1 nm 和 530 nm, 折射率分别对

应 1.518 72 和 1.519 584。注意需要根据表 2 中 N-BK7 光学角规名义值与波长的对应关系, 分别确定其名义值后再使用。



图 8 采集到的反射像

Fig. 8 Collected reflections

4 量值溯源与不确定度

4.1 溯源方法

光学角规具有计量特性, 可以通过 JJG 850-2005 光学角规检定规程, 使用多激光小角度标准装置进行检定。使用经过检定的标准光学角规, 对透镜中心偏测量仪自准直光管的示值误差进行量传, 可以形成完整的溯源关系。

4.2 不确定度

4.2.1 数学模型

透镜中心偏测量仪自准直光管的示值误差数学模型表达式为

$$\Delta_{\delta} = \bar{\delta} - \delta_0 \quad (5)$$

式中: Δ_{δ} 为被校自准直光管的示值误差; $\bar{\delta}$ 为被校自准直光管测得的平均值; δ_0 为光学角规在相应光源下的名义值。

4.2.2 测量不确定度来源

在校准过程中分析表明, 使用光学角规校准自准直光管示值误差时, 影响其测量结果的不确定度分量主要包括:

- 1) 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_A ;
- 2) 标准光学角规溯源引入的标准不确定度分量 u_{B1} ;
- 3) 环境振动引入的不确定度分量 u_{B2} 。

4.2.3 测量不确定度分量评定

具体对不确定度分量分析如下:

- 1) 由自准直光管测量重复性引入的标准不确定度, 采用 A 类评定方法进行评定;

自准直光管测量重复性由贝赛尔(Bessel)公式计算得到的样本方差 S 进行评价, 根据校准结果, 分别计算出 2' 与 5' 光学角规校准透镜中心偏测量

仪的重复性为

$$S_1 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.031''$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.026''$$

因为校准结果用平均值 \bar{x} 表示, 因此, 校准结果的重复性使用样本均值的标准差来评价。由此可得, 由 2' 和 5' 这 2 块光学角规测得结果的重复性分别为

$$u_{A1} = S_1(\bar{x}) = \frac{S_1}{\sqrt{n}} = \frac{0.031''}{\sqrt{10}} = 0.0098''$$

$$u_{A2} = S_2(\bar{x}) = \frac{S_2}{\sqrt{n}} = \frac{0.026''}{\sqrt{10}} = 0.0082''$$

2) 由光学角规溯源引入的标准不确定度, 采用 B 类评定方法进行评定;

根据光学角规检定规程, 一等光学角规不确定度 $U = 0.1 \mu\text{m}$ ($k = 2$), 因此由标准光学角规引入的不确定度为

$$u_{B1} = \frac{0.1''}{2} = 0.05''$$

3) 校准时放置在防震动气浮工作台上, 因此由环境振动带来的测量不确定度分量 u_{B2} 可忽略不计。

4.2.4 合成标准不确定度

由于各分量不相关, 所以有:

$$u_{C1} = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{B1}^2} = 0.0510''$$

$$u_{C2} = \sqrt{u_{A2}^2 + u_{B1}^2} = 0.0507''$$

4.2.5 扩展不确定度

要求置信水平 95%, 取 $k = 2$, 可得扩展不确定度为

$$U = 2u_C = 0.11''$$

另外, 对于双光路的测试设备, 根据表 4 测试数据分别对上下 2 个光路进行不确定度分析。结果表明, 对于测量重复性较好的透镜中心偏测量设备, 其自准直光管示值误差的扩展不确定度均为 $U = 0.11''$ ($k = 2$)

5 结论

文中介绍了在使用光学角规作为透镜中心偏测量仪自准直光管示值误差的校准设备时, 按照仪器测试量程选择光学角规规格的方法, 以及对

不同光源的透镜中心偏测量仪, 根据波长与折射率的关系, 给出光学角规名义值的计算方法。文中设计校准方法, 通过对光学角规测量原理的分析, 最终选用 2' 与 5' 这 2 块一等光学角规, 分别对 1 台单光路设备和 1 台双光路设备进行校准。结果表明, 光学角规具有良好的测试精度, 可以满足透镜中心偏测量仪自准直光管示值误差的校准需求。且光学角规具有计量特性, 可以对透镜中心偏测量仪自准直光管示值误差的进行量值传递。综上所述, 使用光学角规可以解决高精度透镜中心偏测量仪自准直光管的示值误差校准与溯源问题。

参考文献:

- [1] 闫思思. 透镜中心偏测量技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2012.
YAN Sisi. Research on measuring technology of optical lens decentration[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012.
- [2] 祁锰, 李宏, 郭忠达, 等. 中心偏误差对非球面透射式光学系统像差的影响[J]. 光学与光电技术, 2022, 20(2): 134-139.
QI Meng, LI Hong, GUO Zhongda, et al. Center offset error of aspheric transmission type optical system aberration[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2022, 20(2): 134-139.
- [3] 张成群, 白涛, 王明慧, 等. 低硬度透镜中心偏改善工艺研究[J]. 新技术新工艺, 2017(4): 81-83.
ZHANG Chengqun, BAI Tao, WANG Minghui, et al. Improved craft study for center errors of low hardness lens[J]. New Technology & New Process, 2017(4): 81-83.
- [4] 韩颖, 项建胜. 基于 OptiCentric 中心偏测量仪的红外光学镜组装调方法[J]. 应用光学, 2022, 43(4): 726-731.
HAN Ying, XIANG Jiansheng. Assembly and adjustment method of infrared optical lens group based on OptiCentric center-deviation measuring instrument[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(4): 726-731.
- [5] 王洪君. 基于数字图像处理的透镜中心偏测量研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
WANG Hongjun. Research on measurement of centering errors based on digital image processing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [6] 贾春蕾. 红外光学镜组中心偏测量技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.

- JIA Chunlei. Research on measurement technology of center deviation of infrared optical lens group[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.
- [7] 杨国锋. 光学系统中心偏误差分析方法研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2015.
- YANG Guofeng. Research on analysis method of optical system center deviation error[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2015.
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. 自准直仪检定规程: JJG 202—2007[S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Autocollimators: JJG 202—2007[S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2007.
- [9] Triopics GmbH. OptiCentric, inspection, alignment, cementing and assembly of optics[G]. Germany: Triopics GmbH, 2012.
- [10] 曹盛华. 计量比对中存在的问题[J]. *上海计量测试*, 2019, 46(2): 21-23.
- CAO Shenghua. Probe into the problems in measurement comparison[J]. *Shanghai Measurement and Testing*, 2019, 46(2): 21-23.
- [11] 顾耀宗. 长度计量基础知识讲座(四十七)[J]. 上海计量测试, 2014, 41(4): 61-62.
- GU Yaozong. Lecture on basic knowledge of length measurement (47)[J]. *Shanghai Measurement and Testing*, 2014, 41(4): 61-62.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. 光学角规检定规程: JJG 850—2005[S]. 北京: 中国计量出版社, 2006.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Verification regulation of optical angle gauge: JJG 850 —2005[S]. China Metrology Publishing House, 2006.
- [13] 俞兵, 王宝龙, 李宏光, 等. 太赫兹源发散角测量技术研究[J]. *应用光学*, 2021, 42(3): 499-503.
- YU Bing, WANG Baolong, LI Hongguang, et al. Research on divergence angle measurement technique of terahertz sources[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(3): 499-503.
- [14] 李雅灿, 邱丽荣, 张鹏嵩, 等. 便携式多光轴平行性检校系统的研制[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 149-153.
- LI Yacan, QIU Lirong, ZHANG Pengsong, et al. Development of portable multi-optical axes parallelism calibration system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(10): 149-153.
- [15] 张以谋. 应用光学[M]. 5版. 北京: 电子工业出版社, 2021: 73-74.
- ZHANG Yimo. Applied optics[M]. 5th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2021: 73-74.