

文章编号: 1005-5630(2022)06-0073-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.006.011

# 口径自适应光学透镜中心厚度测量 方法及装置

郭江<sup>1</sup>, 杨哲<sup>1</sup>, 张蒙<sup>1</sup>, 潘博<sup>1</sup>, 张鹏飞<sup>1</sup>, 吴迪富<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学精密与特种加工技术教育部重点实验室, 辽宁大连 116024;

2. 江苏宇迪光学股份有限公司, 江苏南通 226404)

**摘要:** 透镜作为光学系统中的核心部件之一, 其加工质量极大影响着光学系统的使用性能。其中, 透镜中心厚度的偏差对整个光学系统成像质量的影响最大。现有的非接触式和接触式测量设备都存在一些缺点, 因此本文提出了一种口径自适应光学透镜中心厚度测量方法, 并基于此方法设计和搭建了一套透镜中心厚度测量装置, 进行了测量精度对比和重复性测量实验。结果表明, 本文所研究的测量装置误差与产线上所使用的测量装置误差相当, 满足对光学透镜的检测要求。本装置具有结构简单可靠、操作方便、测量精度高且可以节省光学透镜生产成本等优点, 已在生产线得到应用。

**关键词:** 光学透镜; 中厚测量; 口径自适应; 装置设计

**中图分类号:** TH 741 **文献标志码:** A

## Diameter-adaptive method and apparatus for center thickness measurement of optical lens

GUO Jiang<sup>1</sup>, YANG Zhe<sup>1</sup>, ZHANG Meng<sup>1</sup>, PAN Bo<sup>1</sup>, ZHANG Pengfei<sup>1</sup>, WU Difu<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of Ministry of Education,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Jiangsu Yudi Optical Co., Ltd., Nantong 226404, China)

**Abstract:** As one of the key components of an optical system, the processing quality of the lens greatly affects the performance of the optical system. The variation of the lens' center thickness has the most significant impact on the overall imaging quality of the optical system. The existing non-contact and contact measurement equipment has some shortcomings. Therefore, this paper proposes a diameter adaptive method for measuring the center thickness of a lens. Based on this method, a set of lens center thickness measurement device was designed and built. The measurement accuracy comparison and the repeatability measurement test are carried out. The results show that the error of

收稿日期: 2022-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(51975096)

作者简介: 郭江(1982—), 男, 教授, 研究方向为精密/超精密加工、光学加工、智能制造。E-mail: guojiang@dlut.edu.cn

通信作者: 张鹏飞(1993—), 男, 博士, 研究方向为精密/超精密加工。E-mail: pfz@mail.dlut.edu.cn

the measurement device studied in this paper is comparable to the error of the measurement device used in the production line, which meets the detection requirements of optical lenses. The device has the advantages of simple and reliable structure, convenient operation, high measurement accuracy, and saving the production cost of optical lenses, and has been used in production lines.

**Keywords:** optical lens; center thickness measurement; diameter adaptation; device design

## 引 言

光学检测作为光学加工领域中至关重要的环节,对光学元件的输出质量起着把控作用,而光学元件的质量决定了整个光学系统的成像质量<sup>[1]</sup>。光学透镜作为最常见的光学元件之一,在光学系统中占据着核心地位<sup>[2]</sup>。光学透镜的三项基本性能参数分别为中心厚度、曲率半径以及折射率<sup>[3-5]</sup>。其中,中心厚度影响着光学透镜的轴向偏移、轴向间隙和光轴偏角等参数,因此整个光学系统的工作效率及成像质量很大程度上取决于光学透镜中心厚度的加工误差<sup>[6-7]</sup>。

现有的光学透镜中心厚度测量方法可以分为非接触式和接触式两种<sup>[8-9]</sup>。非接触式透镜中心厚度测量方法按照其测量原理又可以分为光学干涉法、共面电容法、图像法等。干涉法最为经典的应用是迈克尔孙干涉仪<sup>[10]</sup>,这种测厚方法推动了光学干涉法在检测透镜厚度方面的应用。刘富国等<sup>[11]</sup>利用激光干涉法测量了透镜的厚度,其测量范围为 60 mm,测量精度可达 1  $\mu\text{m}$ 。但是,使用光学干涉法测量透镜中心厚度极易受到环境的干扰,气流、振动等扰动都会对测量结果产生较大的影响,因此,虽然光学干涉法理论上具有很高的精度,但在实际操作中却难以实现。共面电容法是利用两个平行电极板之间的电容变化来获得待测物的厚度。何家祥等<sup>[7]</sup>基于共面电容法研制出了非接触式透镜中心厚度测量仪,但是该仪器的测量范围较小,测量精度也仅为 200  $\mu\text{m}$  左右,无法满足现有光学透镜的使用要求。而且共面电容法还需明确透镜材料才能获得可靠有效的数据,测量过程繁杂。图像法是基于视觉图像技术进行测厚,Goncharov 等<sup>[12]</sup>采用图像法对透镜厚度进行了测量,该方法虽然操作简便,但是测量精度较低,而且受制于系统的成像

质量以及 CCD 相机分辨能力等。综上,非接触式测量方法虽可以达到较高的测量精度,但是往往需要较为精密的设备,且对测量环境要求较高,测量步骤繁琐,不适用于产线全检的情况,而且大大增加了透镜的生产成本。相较于非接触式方法,接触式透镜中心厚度测量通过千分表即可实现,此方法虽有划伤透镜表面的可能性,但是通过规范的操作完全可以避免,而且该方法具有测量精度高、对测量环境要求低、设备简单、操作方便、效率高等优点,因而被广泛应用于光学透镜生产线上。然而,现在的光学透镜种类繁多,导致传统的接触式测量装置需要配备与透镜种类相当的夹具,这不仅增加了夹具设计人员的工作量,而且增加了光学透镜的生产成本。

针对现有光学透镜中心厚度测量方法的不足,本文提出了一种口径自适应光学透镜中心厚度测量方法,并基于该方法设计制造了光学透镜中厚测量设备。该设备具有结构简单可靠、测量精度高、操作方便且成本低的优点。实验结果表明,该设备的测量精度与产线所使用的设备测量精度相当,完全能够满足对光学透镜的检测要求。

## 1 口径自适应中厚测量方法

非接触式透镜中心厚度测量方法往往需要精密的测量设备或对测量环境有着一定的要求,且测量效率低于接触式方法,因此不适合用于需要全检的生产线上。而接触式透镜中厚测量方法往往只需要千分表及相应夹具即可完成测量,且操作简单,测量效率高,适合用于全检的情况。然而由于透镜种类极多,因此所需夹具的种类和数量十分庞大,这不仅增加了设计人员的工作量,也在无形中增加了透镜的生产成本。

口径自适应厚度测量方法的本质是接触式测量,它吸取了接触式透镜中厚测量方法的优点,

并通过设计口径自适应夹具来代替传统的与透镜型号匹配的夹具, 大大节省了透镜的生产成本。

### 1.1 测量原理

采用接触式测量方法测量光学透镜中心厚度主要是利用千分表上下表杆之间的距离变化来读取透镜的中心厚度值。因此, 为了测量结果的准确性, 需要保证千分表的上下表杆和透镜的中心在同一条直线上。本文提出口径自适应光学透镜中厚测量方法, 原理如图1所示。

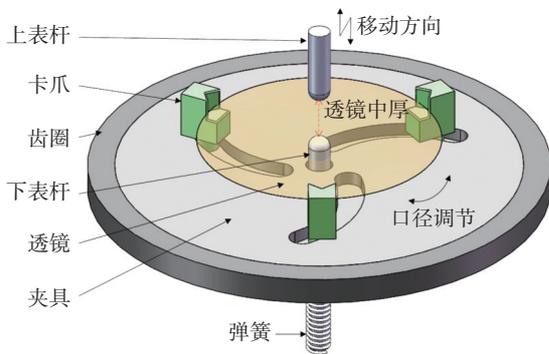


图1 口径自适应中厚测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of diameter adaptive center thickness measurement

本方法中的自适应原理主要体现在对光学透镜的口径自适应, 根据透镜的口径改变三只卡爪的夹持范围从而实现光学透镜的装夹, 通过千分表上下表杆之间的距离变化得到透镜的中心厚度值。在测量前, 通过标准量块校准表杆的同轴度和垂直度, 使得上下表杆与透镜中心在同一条直线上, 从而减小其对测量精度的影响。通过控制步进电机的正反转调节夹具的夹持范围, 并利用三爪夹具对透镜进行装夹。夹具下方通过弹簧进行支撑, 使得夹具在轴向方向上可以进行移动, 因此透镜装夹完毕后, 可以通过控制夹具及透镜整体下移, 使得透镜上下表杆与透镜上下表面中心相接触, 从而得到透镜中心厚度值。

### 1.2 误差分析

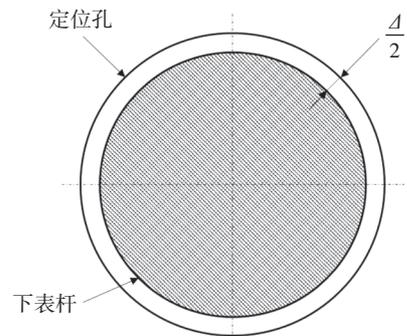
透镜不同位置处的厚度值存在差异, 特别是当透镜的曲率半径较小时, 差异尤为明显。本文提出的口径自适应光学透镜中厚测量方法在进行厚度测量时, 主要会受到同轴度及水平度两个因素的影响。

#### 1.2.1 同轴度误差分析

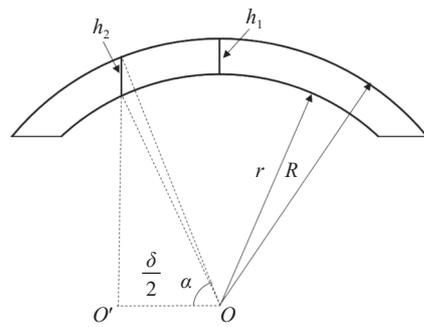
在进行测量时, 透镜通过三爪夹具进行夹紧和定心, 并通过读取上下表杆之间距离的变化得到厚度值。而在测量过程中, 由于下表杆与三爪夹具上的定位孔之间为间隙配合, 因此会产生轴向的测量误差。如图2(a)所示, 表杆和三爪夹具上的定位孔之间为基轴制配合, 定位孔与三爪夹具同心, 下表杆与定位孔之间的最大间隙为

$$\delta = \Delta + \delta_1 + \delta_2 \quad (1)$$

式中:  $\Delta$  为最小间隙;  $\delta_1$  为下表杆的公差;  $\delta_2$  为定位孔的公差。则下表杆与定位孔之间的最大偏差为  $\frac{\delta}{2}$ , 即下表杆与透镜中心处的最大偏差为  $\Delta \cdot \frac{\delta}{2}$ 。



(a) 下表杆与定位孔间隙示意图



(b) 中厚测量偏差示意图

图2 同轴度误差分析示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coaxiality error analysis

如图2(b)所示, 假设所测透镜为球面透镜,  $h_1$ 、 $h_2$  分别为透镜中心厚度的真实值和测量值,  $R$ 、 $r$  分别为透镜两个面的半径, 由此可得

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{2R}{\delta} \\ h_1 = h_2 \sin \alpha \\ h_1 = R - r \end{cases} \quad (2)$$

由同轴度误差引起的透镜中心厚度测量偏差为

$$h_2 - h_1 = (R - r) \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{2R}\right)^2}} - 1 \right) \quad (3)$$

本文中所选用千分表为 Mitutoyo 543-500 型号，其表杆安装部位尺寸为  $\Phi 8_{-0.009}^0$ ，轴偏差等级为 h6；根据基轴制常用配合，选择三爪夹具定位孔的孔偏差等级为 H7，尺寸为  $\Phi 8_0^{+0.015}$ ；根据式(1)计算得出下表杆与定位孔之间的最大间隙  $\delta$  为 0.024 mm。假设透镜厚度  $h_1$  为 2 mm，若在保证由同轴度误差引起的透镜中心厚度测量偏差在 1  $\mu\text{m}$  以内，则由式(3)可得出  $R > 0.38090$  mm，实际应用透镜的曲率半径远大于这一数值，所以该定心装置满足测量精度要求。

### 1.2.2 水平度误差分析

当进行透镜中心厚度测量时，透镜通过三只卡爪进行夹持。由于三只卡爪的承载面在加工时存在着制造误差，因此在测量过程中透镜的位置并不是绝对水平的，透镜相对于水平面会发生倾斜，需要对厚度测量时工件的倾斜角度对厚度测量值产生的影响进行分析。如图 3 所示， $\beta$  为测量时透镜的倾斜角， $d$  为卡爪承载面之间的高度差， $\phi$  为透镜的口径， $h_1$ 、 $h_2$  分别为透镜中心厚度的真实值和测量值，则

$$\begin{cases} \sin\beta = \frac{d}{\phi} \\ h_1 = \frac{h_2}{\cos\beta} \end{cases} \quad (4)$$

透镜中心厚度的测量偏差为

$$h_1 - h_2 = h_2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{\phi}\right)^2}} - 1 \right) \quad (5)$$

当三只卡爪承载面之间的高度差  $d$  为定值时，透镜的倾斜角  $\beta$  以及透镜中心厚度的测量偏差均随着透镜口径  $\phi$  的增加而减小。假设承载面之间的高度差  $d$  为 0.1 mm，透镜口径  $\phi$  为 10 mm，则  $\beta = 0.5730^\circ$ 。若透镜厚度  $h_1$  为 2 mm，则

$h_2$  为 1.99990 mm，所以实际测量偏差为 0.1  $\mu\text{m}$ 。而实际应用透镜的口径大多大于 10 mm，所以由承载面的水平度引入的厚度测量误差在 0.1  $\mu\text{m}$  以内，满足测量精度要求。

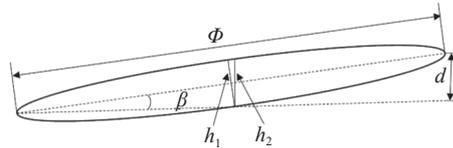
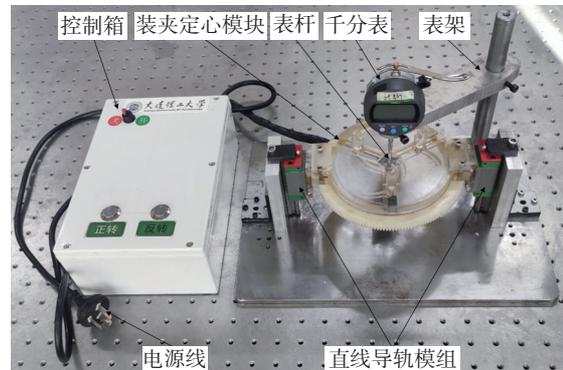


图 3 透镜倾斜状态示意图

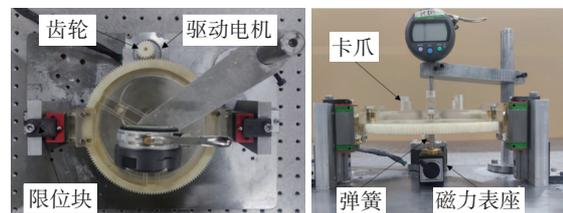
Fig. 3 Schematic diagram of the lens tilt state

## 2 装置设计制造

口径自适应光学透镜中厚测量装置如图 4 所示，其中图 4(b)为整个装置的俯视图，图 4(c)为整个装置的主视图。该装置的设计主要围绕装夹定心模块设计、直线导轨模组的选择、电机及驱动器等来进行。



(a) 装置整体图



(b) 俯视图

(c) 主视图

图 4 口径自适应光学透镜中厚测量装置实物图

Fig. 4 Photograph of the optical lens diameter adaptive center thickness measurement device

### 2.1 装夹定心模块

当采用口径自适应中厚测量方法时，需要保

证透镜中心与千分表上下表杆在同一条直线上,这对上下表杆与透镜中心的同轴度及平行度提出了极高的要求。其中,上下表杆之间的同轴度以及垂直度可以在测量前通过标准量块进行校准。本次设计的装夹定心模块(图5)可夹持范围为 $\phi 30\sim 100\text{ mm}$ 口径的光学透镜,根据1.2.2节中水平度误差计算,在此范围内由水平度误差带来的测量误差小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ,可以满足光学透镜的中心厚度测量要求。同时,夹具中心的定位孔设计加工精度为H7,则表杆与透镜之间产生的同轴度误差在实际应用中小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。选用亚克力材料制作卡爪及三爪夹具主体。相较于金属材料,

亚克力材料密度低且具有耐磨性、稳定性、耐腐蚀性好等特点,在降低装置重量的同时可以保证使用性能。

## 2.2 直线导轨模组

直线导轨在运动中起着引导作用,可以使从动物体按照给定的方向作直线往复运动。为了实现接触式测量过程中透镜及定心模块在轴向上的运动,选择直线导轨作为运动的引导部件。本装置中采用的是上银公司生产的高精度导轨滑块组合件,型号为HGW 15CA,其参数如表1所示。该导轨为方形滚珠式直线导轨,具有精度高、运行噪声小等优点。同时,该导轨的四列式单圆弧牙型接触结构使其具备自动调心功能,可以减小安装过程中的装配误差,同时提升导轨的刚性与负载能力,能够满足高精度测量要求。

## 2.3 电机及驱动器

本装置中驱动电机的作用是为本装置提供动力,实现卡爪的自动靠近和远离动作,并可调节其移动速度。驱动电机的型号选择57两相步进电机,该电机可以精准控制位置及速度,因而被广泛应用于机械控制领域。驱动器选用YF-31驱动控制板,可实现步进电机点动、自锁、限位、速度调节、往复循环、延时控制等多种功能。本装置主要利用其点动及速度调节等功能。电机及驱动控制器的接口电路如图6所示。

## 2.4 其他元件

为了方便直观地观测到透镜的中心厚度,本装置选用三丰数显千分表,该表分辨率为 $1\text{ }\mu\text{m}$ ,并配有数据输出端口和6位LCD显示功能;弹簧的选型通过胡克定律计算得到;磁力表座用于安装下表杆及弹簧。

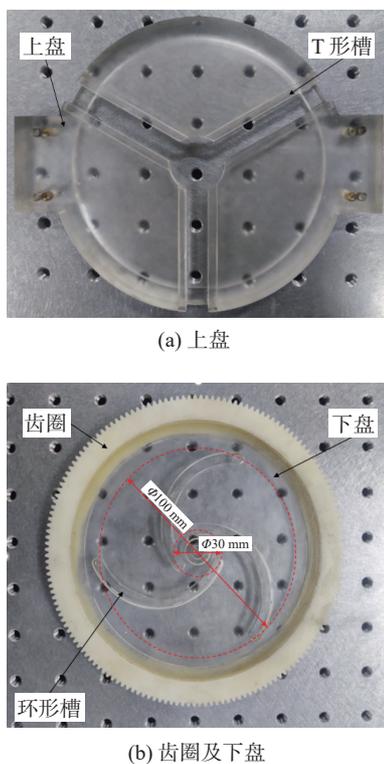


图5 口径自适应装夹定心模块实物图

Fig. 5 Photograph of diameter adaptive clamping and centering module

表1 HGW 15CA 导轨滑块组合件参数

Tab. 1 Parameters of HGW 15CA guide rail slider assembly

型号	滑块长度/ mm	滑轨长度/ mm	基本动额定负荷/ kN	基本静额定负荷/ kN	容许静力矩/(kN·m)			滑块质量/ kg	滑轨质量/ kg
					$M_R$	$M_P$	$M_Y$		
HGW 15CA	30.00	100.00	11.38	16.97	0.12	0.10	0.10	0.17	0.15

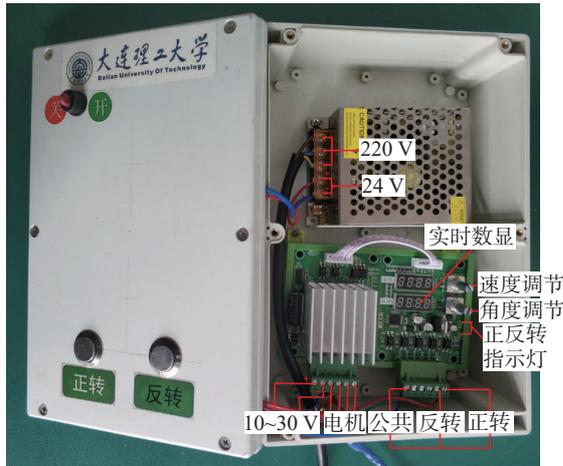


图 6 接口电路示意图

Fig. 6 Schematic diagram of interface circuit

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 测量精度对比

目前光学透镜生产线上大多采用接触式测量装置，这也从一个方面反映了接触式测量装置的可靠性。因此，使用本文所搭建的口径自适应光学透镜中心厚度测量装置与生产线现有测量装置进行测量精度对比。选取一直径为 49.15 mm 的凸透镜，分别测量五次，测量前使用标准量块对表杆的同轴度和垂直度进行校准，测量结果如表 2 所示。经计算，口径自适应测量装置测得的透镜中心厚度平均值为 6.221 mm，标准差为 0.0008；产线现有测量装置测得的透镜中心厚度平均值为 6.220 mm，标准差为 0.00117。两测量

表 2 不同装置测量结果

Tab. 2 Measurement results of different devices

装置	口径自适应测量装置	产线现有装置
中心厚度/mm	6.222	6.218
	6.220	6.220
	6.220	6.221
	6.221	6.221
	6.220	6.219
平均值/mm	6.221	6.220
标准差	0.00080	0.00117

装置之间的测量差值仅为 1 μm。

#### 3.2 重复性测量实验

本实验选用了四种不同型号的光学透镜，包括双凹透镜(直径 32.00 mm)、平凸透镜(直径 51.50 mm)、凹凸透镜(直径 51.95 mm)以及双凸透镜(直径 68.72 mm)，其中，后三者均属于正透镜。每块透镜分别使用口径自适应透镜中心厚度测量装置重复测量五次，测量结果如表 3 所示。由测量结果可以得出，本装置测量结果的标准差在 0.001 左右，标准差很小，说明随机误差对测量结果的影响很小，测试装置具有较好的稳定性和重复性。

表 3 重复性测量结果

Tab. 3 Repeatability measurement results

透镜直径/mm	D=32.00	D=51.50	D=51.95	D=68.72
	5.494	5.357	2.818	11.481
	5.496	5.353	2.818	11.482
中心厚度/mm	5.495	5.355	2.817	11.479
	5.496	5.354	2.817	11.481
平均值/mm	5.496	5.354	2.818	11.480
	5.495	5.355	2.818	11.481
标准差	0.00080	0.00136	0.00049	0.00102

### 4 结 论

本文围绕光学透镜中心厚度测量问题，介绍了现有测量方式的不足，并提出了口径自适应光学透镜中心厚度测量方法，在此基础上设计制造了一种基于口径自适应原理的光学透镜中心厚度测量装置，并将该装置与产线上现有中厚测量装置精度进行了对比，同时进行了重复性测量实验。结果表明，该装置的测量误差与产线上所使用的测量装置误差相当，能够很好地满足光学透镜中心厚度的测量要求。该装置已经在光学透镜实际生产线上得到了应用。

#### 参考文献：

[1] 赵彦龙, 李加福, 朱小平, 等. 基于反向共轴的大口径

- 平面光学元件面形测量 [J]. [计量学报](#), 2021, 42(12): 1571 – 1578.
- [ 2 ] 邹杰, 徐攀, 胥军, 等. 基于 LabVIEW 的透镜多参数自动检测系统开发 [J]. [计算机测量与控制](#), 2021, 29(3): 18 – 22.
- [ 3 ] 徐瑞. 基于三坐标测量的大口径红外光学透镜检测技术研究 [D]. 昆明: 中国兵器科学研究院 (昆明物理研究所), 2018.
- [ 4 ] LAN X R, LI C, YANG C, et al. Optimization of injection molding process parameters and axial surface compensation for producing an aspheric plastic lens with large diameter and center thickness[J]. [Applied Optics](#), 2019, 58(4): 927 – 934.
- [ 5 ] KUNKEL M, SCHULZE J, KOGEL-HOLLACHER M, et al. Non-contact measurement of central lens thickness[J]. *Journal of Laser Applications*, 2005, 2005: 1502.
- [ 6 ] 杨福兴. 光学零件的超精密加工技术 [J]. [航空制造技术](#), 2004(5): 81 – 83.
- [ 7 ] 何家祥, 张大卫, 程荫梧, 等. 光学透镜中心厚度自动检测仪 [J]. [仪器仪表学报](#), 1994, 15(2): 143 – 148.
- [ 8 ] 娄颖. 光学透镜参数现代测量方法研究 [J]. [红外与激光工程](#), 2008, 37(S1): 71 – 74.
- [ 9 ] 尚梦杰. 透镜中心厚度测量系统研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2020.
- [ 10 ] 姚建永, 张森, 王臻, 等. 光纤迈克尔逊干涉仪的理论与应用分析 [J]. [仪表技术与传感器](#), 2007(5): 23 – 25.
- [ 11 ] 刘富国, 查学军, 杨波, 等. 基于光纤低相干干涉技术的透镜中心厚度测量方法研究 [J]. [应用激光](#), 2016, 36(5): 605 – 610.
- [ 12 ] GONCHAROV A V, BAILÓN L L, DEVANEY N M, et al. Optical testing of lens systems with concentric design[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7389: 738912.
- (编辑: 张 磊)