

# 菲佐干涉仪可变波长标准球面镜头设计

王艳<sup>1</sup>, 张齐元<sup>2</sup>, 王全召<sup>3</sup>, 陈秋白<sup>1</sup>, 王芳<sup>1</sup>, 许帅<sup>2,4</sup>, 韩森<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

<sup>2</sup>苏州慧利仪器有限责任公司, 江苏 苏州 215123;

<sup>3</sup>苏州维纳仪器有限责任公司, 江苏 苏州 215123;

<sup>4</sup>苏州科技大学数理学院, 江苏 苏州 215009

**摘要** 菲佐激光干涉仪使用的标准球面镜头通常只能在特定波长下使用。提出了一种通过调整镜头内部透镜间隔来改变其工作波长的方法, 利用该方法设计了两款可变波长标准球面镜头, 口径为 19.05 mm, 镜头光圈系数分别为 5.6 和 8。镜头在各目标波长下的参考波前质量均满足设计要求, 并分析了公差容限以确保镜头具有可实际加工性。根据可变波长标准镜头的装调和工作原理设计了机械结构, 并研制出光圈系数为 8 的实验镜头, 测得其透射波前峰谷值在标准 632.8 nm 激光干涉仪下小于  $\lambda/10$  ( $\lambda$  为入射光的波长), 镜头的实际加工误差在容限范围内。使用多波长激光干涉装置和实验镜头测量了同一球面元件的面形, 在 5 种波长下测量结果基本一致, 实验结果表明, 可变波长标准镜头可以用于实际检测。该类镜头的研发节约了检测成本, 提高了标准镜头在激光干涉测量中的利用率, 该镜头具有较高的工程应用价值。

**关键词** 成像系统; 光学设计; 标准球面镜头; 可变波长; 菲佐干涉仪; 面形测量

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0811004

## Design of Wavelength-Variable Standard Spherical Lens in Fizeau Interferometer

Wang Yan<sup>1</sup>, Zhang Qiyuan<sup>2</sup>, Wang Quanzhao<sup>3</sup>, Chen Qiubai<sup>1</sup>, Wang Fang<sup>1</sup>,  
Xu Shuai<sup>2,4</sup>, Han Sen<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

<sup>2</sup> Suzhou H&L Instruments LLC., Suzhou, Jiangsu 215123, China;

<sup>3</sup> Suzhou W&N Instruments LLC., Suzhou, Jiangsu 215123, China;

<sup>4</sup> School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China

**Abstract** The standard spherical lens mounted in the Fizeau laser interferometer can usually be used only at a specific wavelength. This paper presents a method to change the working length of the standard spherical lens by adjusting the lens interval inside it, and two types of wavelength-variable standard spherical lenses are designed by using this method, in which the caliber is 19.05 mm and the aperture coefficients are 5.6 and 8, respectively. The reference wavefront quality of the standard spherical lens at each target wavelength meets the design requirements. The tolerance is analyzed to ensure that the standard spherical lens possesses practical machinability. The mechanical structure is designed according to the assembly and working principle of the wavelength-variable standard spherical lens and an experimental standard spherical lens with aperture coefficient of 8 is developed. The peak-

收稿日期: 2020-09-02; 修回日期: 2020-09-03; 录用日期: 2020-09-14

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0101903)

\* E-mail: senhanemail@126.com

valley(PV) value of the transmitted wavefront under a standard 632.8 nm laser interferometer is less than  $\lambda/10$  ( $\lambda$ , incident wavelength) and the actual processing error of the lens is within the tolerance range. The multi-wavelength laser interference device and the experimental standard spherical lens are used to measure the surface shape of the same spherical element. The measurement results under five wavelengths are basically the same. The experimental results show that the wavelength-variable standard spherical lens can be used for actual detection. The research and development of this kind of wavelength-variable standard spherical lens can save inspection costs, improve the utilization rate of standard lenses in laser interferometry, and it has high engineering application value.

**Key words** imaging systems; optical design; standard spherical lens; variable wavelength; Fizeau interferometer; surface profile measurement

**OCIS codes** 110.3000; 110.3175; 220.3620; 220.3630; 220.4610

## 1 引言

菲佐干涉仪具有测量精度高、系统误差小等特点,被广泛应用于光学检测中<sup>[1]</sup>。其中,菲佐激光相移干涉仪的参考光和测试光共光路,抗干扰能力强,结构简单,对系统公差允许范围大,易制成大口径干涉仪,是干涉测量时最常用的商业配置。标准镜头是激光干涉仪进行精密测量的基准,用于产生高精度的参考波前。由于菲佐干涉仪的参考波前与测试波前沿共光路传播,因此菲佐干涉仪的测量精度主要取决于标准镜头的质量<sup>[2]</sup>。标准镜头分为平面和球面两种,平面镜头是带有微小楔角的平行平板,球面镜头则是相对复杂的光学镜头。标准镜头最后的表面为参考表面,面形加工精度要求极高。标准球面镜头与常规镜头最大的区别在于参考表面的球心与其焦点重合,这样出射波前将与参考面同心,同时光线与参考表面法线重合时能使光束在参考面反射回干涉系统以形成参考光束,所以标准球面镜头的质量由参考面的加工精度和透射波前共同决定<sup>[3]</sup>。在实际光学检测过程中,需要选择具有合适光圈系数( $F_1$ )的标准球面镜头以测试具有不同口径与半径比的球面元件和具有不同数值孔径的光学系统<sup>[4]</sup>,因此激光干涉仪生产厂家通常会生产一系列口径和型号的标准镜头,以尽可能覆盖较大的测量范围。目前,美国 ZYGO 公司出售的系列标准球面镜头主要包括 25,101.6,152.4 mm 这三种口径,其  $F_1$  范围为 0.58~11。国内南京理工大学、成都太科光电技术有限责任公司和上海乾曜光学科技有限公司等单位同样为其激光干涉仪生产配套的标准球面镜头,本课题组也根据自身需求研发了 4 种口径 9 种  $F_1$  系列标准球面镜头。

随着科技的不断进步,不同高精检测领域出现了多种特殊波长激光干涉仪,激光干涉仪重要部件标准镜头的需求也日益增大。在设计标准球面镜头时,需要满足参考面球心与焦点重合这一条件,因

此常规的标准球面镜头仅能工作在单一波长下。而标准球面镜头的参考面形加工精度高(通常为  $\lambda/10$ ,  $\lambda$  为入射光的波长),且使用了熔石英等材料,故其价格十分昂贵<sup>[5]</sup>。另外,在紫外和近红外等非可见光应用中,标准镜头的装调存在着一定难度,所以目前特殊波长标准镜头的研制极其有限,激光干涉仪厂家目前主要生产 632.8 nm 标准球面镜头。为了提高标准镜头的利用率并使其能在紫外下进行装调,2017 年 Peng 等<sup>[6]</sup>研制出了一种可以在双波长下工作的球面标准镜头,该镜头利用消色差系统,将 363 nm(紫外)与 632.8 nm 波长焦点同时设计在与参考面球心重合的位置,实现可见光下标准镜头的装调,并将其应用于紫外激光干涉仪中。基于这种原理研制的标准球面镜头理论上只能工作在两个波长下。本文在研究多波长透射波前检测技术的同时,基于实际应用需要,提出并设计了一种可以工作于更多波长下的球面标准镜头,该镜头通过简单的变焦原理<sup>[7]</sup>,实现了工作波长的改变,理论上可以在一定波段范围内任意波长下使用。

## 2 设计原理

标准球面镜头的工作原理如图 1 所示,当参考球面的球心与焦点重合时,标准镜头产生与参考面同心的标准透射波前,此时镜头的后截距  $l_F$  与参考球面的半径  $R_{ref}$  相等。当标准球面镜头的工作波长发生改变时,系统的焦距发生变化,常规的光学系统可以通过改变探测器的位置来适应焦距的变化<sup>[8-9]</sup>,

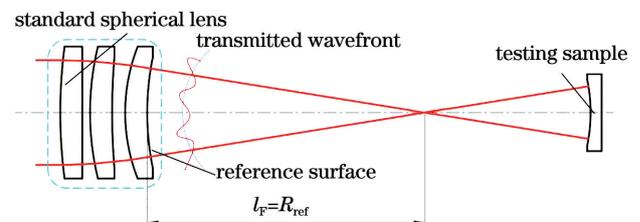


图 1 标准球面镜头的工作原理

Fig. 1 Working principle of standard spherical lens

但由于标准球面镜头参考面的参考半径无法改变,因此就无法满足后截距与参考半径相等这一条件。

假设标准镜头的光学系统由两个薄透镜组  $L_1$  和  $L_2$  组成( $L_2$  是参考镜),如图 2 所示。

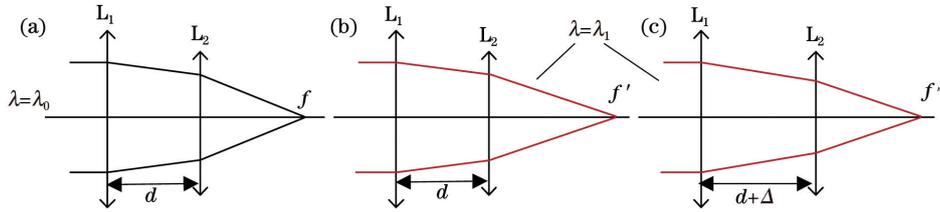


图 2 标准球面镜头改变工作波长的原理。(a)  $l_F = R_{ref}$ ; (b)  $l'_F \neq R_{ref}$ ; (c)  $l''_F = R_{ref}$

Fig. 2 Principle of wavelength-variable standard spherical lens. (a)  $l_F = R_{ref}$ ; (b)  $l'_F \neq R_{ref}$ ; (c)  $l''_F = R_{ref}$

当入射光波长  $\lambda = \lambda_0$  时,两薄透镜的焦距分别为  $f_1$  和  $f_2$ ,间隔为  $d$ ,此时系统的焦距为

$$f = \frac{f_1 + f_2 - d}{f_1 f_2}, \quad (1)$$

系统的后截距表示为

$$l_F = f \left( 1 - \frac{d}{f_1} \right) = R_{ref}. \quad (2)$$

当波长为  $\lambda = \lambda_1$  时,设此时两薄透镜的焦距分别为  $f'_1$  和  $f'_2$ ,则系统的焦距为

$$f' = \frac{f'_1 + f'_2 - d}{f'_1 f'_2}, \quad (3)$$

系统的后截距则为

$$l'_F = f' \left( 1 - \frac{d}{f'_1} \right). \quad (4)$$

由于  $f'_1, f'_2$  均无法改变,因此只能改变两个薄透镜的间隔。假设薄透镜间隔增加  $\Delta$ ,则此时系统的焦距变为

$$f'' = \frac{f'_1 + f'_2 - (d + \Delta)}{f'_1 f'_2}, \quad (5)$$

相应的系统的后截距为

$$l''_F = f'' \left( 1 - \frac{d + \Delta}{f'_1} \right). \quad (6)$$

从(6)式可以看出,当波长发生改变时,只要适当调整两个薄透镜之间的距离就可以使新的后截距与参考半径重新相等,这样镜头可以在任意波长下使用。实际上改变间隔未必能使镜头在新波长下的焦距与原波长下的焦距相等,所以可以将其看作是简单的变焦过程。由于上述分析仅基于薄透镜系统,实际系统受球差等像差的影响,因此每种波长下标准镜头中的透镜间隔可以根据光学设计软件优化得到。

### 3 多波长标准球面镜头的设计

#### 3.1 光学设计

标准球面镜头属于小视场系统,其像差主要以球差为主。根据不同的  $F_1$ ,标准球面镜头需要采用

不同的透镜数量进行设计。通常大  $F_1$  标准球面镜头采用二片透镜设计即可,较小  $F_1$  标准球面镜头则可以在大  $F_1$  标准球面镜头基础上增加透镜重新设计。通过公差分析可知,  $F_1$  越小,公差越严格<sup>[10-11]</sup>,因此口径越小、 $F_1$  越大的标准镜头越容易研制。本文设计了两款 19.05 mm 口径的标准球面镜头,  $F_1$  分别为 5.6 和 8。在实际检测中,标准球面镜头不会工作在连续波段,根据本文多波长透射波前检测需求,选择几个固定波长设计镜头。设计多波长镜头时,首先利用一个波长(以间隔最小的波长为起点)设计标准镜头,然后针对设计好的标准镜头,将需要调整的间隔设为变量,更换波长后重新优化间隔即可。需要调整的间隔通常对应公差分析中最敏感的面。这里将设计波长设定为 532, 561, 632.8, 671, 721, 1064 nm。通常参考球面面形优于  $0.1\lambda$ ,因此设计镜头的透射波前峰谷(PV)值也必须小于  $0.1\lambda$ 。对于多波长应用,在不同波长下镜头的透射波前 PV 值都要小于  $0.1\lambda$ 。如图 1 所示,标准镜头需要与参考面同心的球面透射波前作为测试时的参考波前,标准球面镜头的目标精度为 PV 值应小于  $\lambda/10$ ,因此不仅标准球面镜头的参考面加工精度需要满足 PV 值小于  $\lambda/10$ ,而且其透射波前至少要优于面形的加工精度,因此设计镜头的透射波前 PV 值应小于  $0.1\lambda$ 。

532 nm 下设计的  $F_1$  分别为 5.6 和 8 的标准球面镜头的光学结构和波前如图 3、4 所示,波前像差

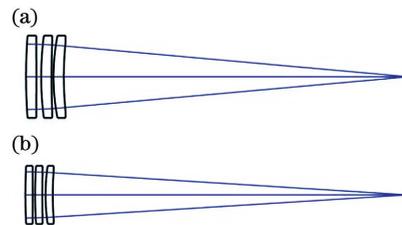


图 3 多波长标准镜头的结构图。(a)  $F_1 = 5.6$ ; (b)  $F_1 = 8$

Fig. 3 Structural diagrams of multi-wavelength standard spherical lens. (a)  $F_1 = 5.6$ ; (b)  $F_1 = 8$

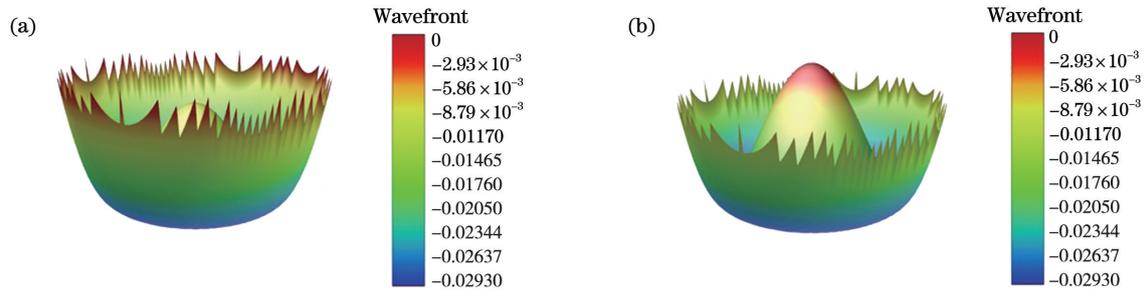


图 4 标准镜头在 532 nm 下的波前图。(a)  $F_1=5.6$ ; (b)  $F_1=8$

Fig. 4 Wavefront maps of standard spherical lens at 532 nm. (a)  $F_1=5.6$ ; (b)  $F_1=8$

PV 值分别为 0.0589λ 和 0.0318λ。

使用公差工具对镜头进行分析,结果显示,通过调整最后一片透镜(参考镜),可以快速改变波前质

量,因此将第二片与第三片透镜的间隔作为变量,分别对不同波长重新进行优化,结果如表 1、2 所示。

表 1  $F_1=5.6$  的标准球面镜头的工作波长与对应的间隔

Table 1 Working wavelengths of standard spherical lens with  $F_1=5.6$  and corresponding intervals

Wavelength /nm	532	561	632.8	671	721	1064
Interval /mm	0.61	1.20	2.37	2.86	3.41	5.84

表 2  $F_1=8$  的标准球面镜头的工作波长与对应的间隔

Table 2 Working wavelengths of standard spherical lens with  $F_1=8$  and corresponding intervals

Wavelength /nm	532	561	632.8	671	721	1064
Interval /mm	1.30	2.39	4.52	5.42	6.43	10.86

图 5 为  $F_1=8$  的标准镜头在其他 5 种波长下的波前,设计结果表明,通过改变透镜间的间隔,两

个镜头在不同波长下均满足设计指标。

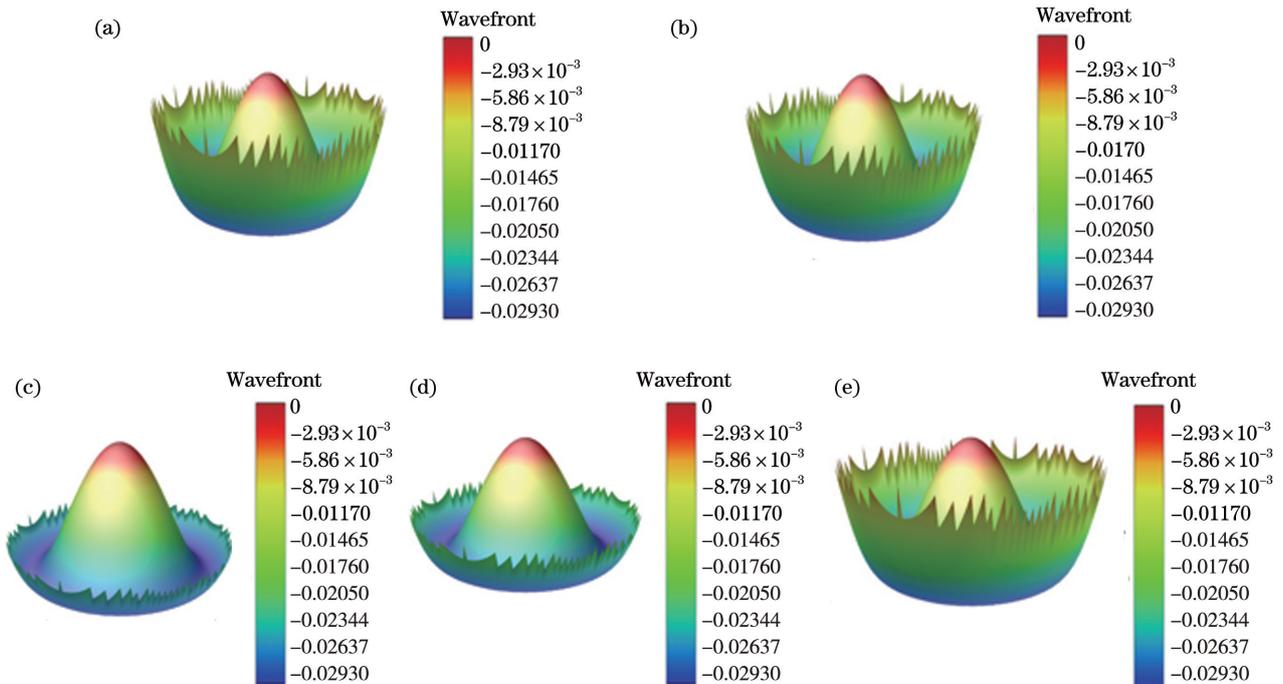


图 5  $F_1=8$  的标准镜头在其他 5 种波长下的波前图。(a) 561 nm; (b) 632.8 nm; (c) 671 nm; (d) 721 nm; (e) 1064 nm

Fig. 5 Wavefront maps of standard spherical lens with  $F_1=8$  at other 5 wavelengths. (a) 561 nm; (b) 632.8 nm; (c) 671 nm; (d) 721 nm; (e) 1064 nm

### 3.2 容限分析

在理论上,通过调整透镜间隔可以改变标准镜头的工作波长,但机械结构在调整过程中必然存在一定误差,不可能保证透镜准确无误地移动到特定位置。机械结构在调整精度内可确保其波前质量,因此在此条件下可实现改变波长的功能。这里需要

表 3  $F_1=5.6$  的标准球面镜头在不同工作波长下的间隔容限分析

Table 3 Interval tolerance analysis at each working wavelength of standard spherical lens with  $F_1=5.6$

Wavelength /nm	532	561	632.8	671	721	1064
Upper limit position /mm	0.579	1.173	2.339	2.831	3.381	5.809
Wavefront aberration /nm	58.89	58.74	59.17	58.91	58.62	59.48
Standard position /mm	0.610	1.200	2.370	2.860	3.410	5.840
Wavefront aberration /nm	31.33	27.04	30.44	28.38	28.41	28.94
Lower limit position /mm	0.632	1.226	2.393	2.885	3.435	5.865
Wavefront aberration /nm	59.64	59.24	59.36	59.25	59.05	59.16
Tolerance / $\mu\text{m}$	53	53	54	54	54	56

表 4  $F_1=8$  的标准球面镜头在不同工作波长下的间隔容限分析

Table 4 Interval tolerance analysis at each working wavelength of standard spherical lens with  $F_1=8$

Wavelength /nm	532	561	632.8	671	721	1064
Upper limit position /mm	1.226	2.314	4.444	5.342	6.345	10.780
Wavefront aberration /nm	59.32	59.91	59.99	59.72	59.99	59.48
Standard position /mm	1.300	2.390	4.520	5.420	6.430	10.860
Wavefront aberration /nm	16.92	16.44	16.39	15.50	15.72	14.47
Lower limit position /mm	1.383	2.473	4.605	5.503	6.507	10.945
Wavefront aberration /nm	59.74	59.91	59.99	59.72	59.55	59.58
Tolerance / $\mu\text{m}$	157	159	161	161	162	165

从表 3 和表 4 可以看出,容限误差与焦深类似<sup>[12]</sup>,与  $F_1$  的平方呈反比, $F_1$  越大,标准镜头允许的调整误差越大。

### 3.3 机械结构的设计

可变波长标准球面镜头相对于常规镜头增加了可移动单元,并且需要保证将透镜准确移动到对应的工作波长位置。普通的成像物镜大部分都是调整成像位置以补偿加工和装调误差带来的性能损失<sup>[13]</sup>,而标准球面镜头由于要满足参考镜半径与后截距相等这一条件,在装调镜头时需要调整公差分析中对像质有明显影响的两个面的间隔,如 3.1 节所述,本文的标准镜头是通过改变参考镜与其相邻透镜的距离来实现的。所以这里移动参考镜不仅作为某一波长装调下的补偿变量,同样也起到改变工作波长的作用。因此在机械设计时,不仅要考虑类

分析透镜移动间隔的容限误差,即不同波长下允许的最大间隔调整误差。由标准镜头的参数可知,标准镜头的波前 PV 值需在  $\lambda/10$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ) 以内,因此将所有波长 PV 值最大允许误差设定为 60 nm,通过手动调整透镜间隔,确定每个波长的容限范围,结果如表 3、4 所示。

似常规标准镜头在特定波长下的装调,还要考虑如何实现改变波长的功能。图 6 为  $F_1=8$  的可变波长标准镜头的机械设计方案<sup>[13]</sup>,图 6(a)为系统结构图,刻度标尺 2 上的刻度和旋转外框 1 上的刻度作为不同波长的标准,刻度的位置根据光学设计的结果确定,当两个刻度重合时,表示镜头工作在对应的波长下。如图 6(b)所示,首先将标准镜头按常规方式在 632.8 nm 下进行装调,此时通过旋转外框 1 与刻度标尺 2,将其固定在 632.8 nm 处;通过改变调整组件 3,对参考镜进行微调,使其满足性能要求,然后利用压圈将调整组件 3 参考镜固定。调整组件 3 与旋转外框 1 是相连的,虽然实际装调后在某一波长下参考镜与其前一片透镜的间隔与设计值不同,但不同波长之间的改变量不会发生大的变化,因此最后只需将外框旋转至对应波长刻度处即可实现波长的改变。

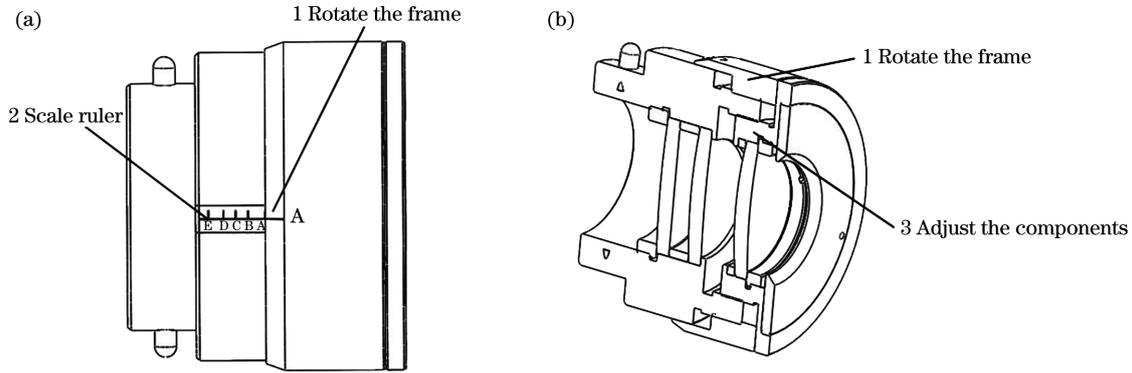


图 6 多波长标准镜头的机械设计方案<sup>[13]</sup>。(a)结构图;(b)剖视图

Fig. 6 Mechanical design scheme of multi-wavelength standard spherical lens. (a) Structural diagram; (b) sectional view

镜头的机械误差  $\xi$  主要包括对准误差  $\xi_1$ , 刻划误差  $\xi_2$  和螺纹的间隙误差  $\xi_3$ 。当将旋转外框的指示刻线与对应波长的刻线对准时, 会存在一定的对准误差。如图 7 所示, 标尺 2 上的刻线线宽  $l = 0.3 \text{ mm}$ , 主镜筒的直径  $d = 50 \text{ mm}$ , 则刻线对应的角值为

$$\rho = \frac{l}{\pi d} \cdot 360^\circ = 0.7^\circ. \quad (7)$$

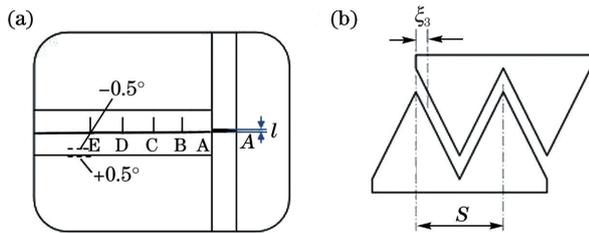


图 7 镜头的机械加工误差分析。(a)刻度标尺;(b)螺纹图  
Fig. 7 Machining error analysis of lens. (a) Scale ruler; (b) thread diagram

旋转外框 1 通过螺纹与主体镜筒相连, 螺距  $s = 0.5 \text{ mm}$ , 这时旋转外框每转  $1^\circ$  的距离  $t$  为

$$t = \frac{s}{360^\circ}. \quad (8)$$

所以刻线的对准误差  $\xi_1$  可以表示为

$$\xi_1 = t \times \rho. \quad (9)$$

将(7)式和(8)式代入(9)式即可得到刻线的对准误差约为  $1 \mu\text{m}$ 。

刻线刻划在指定位置时, 也会存在一定的刻划误差。当加工误差的范围为  $1^\circ$  时, 则刻划误差  $\xi_2$  可以表示为

$$\xi_2 = \frac{1}{360} \times s. \quad (10)$$

将  $s = 0.5 \text{ mm}$  代入(10)式, 可得刻划误差  $\xi_2$  约为  $1.4 \mu\text{m}$ 。如图 7(b)所示, 在目前的机械加工中, 可以将螺纹的间隙误差  $\xi_3$  控制在  $50 \mu\text{m}$  左右, 所以可

变波长镜头整体的机械调整误差为  $\xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 52.4 \mu\text{m}$ 。根据 2.2 节的容限分析可知, 本镜头的机械误差在容限范围之内, 满足实际加工要求。

## 4 实 验

### 4.1 标准镜头装调

图 8 为可变波长标准球面镜头实物, 首先在  $632.8 \text{ nm}$  下对标准镜头进行调试, 根据 3.3 节中介绍的装调方法调整参考镜位置, 将旋转外框的 C-632 与标尺 C 对齐, 同时使用激光干涉仪(口径为  $19.05 \text{ mm}$ )测试标准镜头的精度。图 9、10 为测试标准镜头的原理图和结果, 常规方式下菲佐干涉仪采用的是相对测量法, 当被测元件面形精度超过参考镜的精度时, 测量结果表征的是标准镜头的精度, 而当被测元件面形精度小于参考镜的精度时, 则测量结果表征的是被测元件的面形。其中反射球面镜采用 PV 值小于  $\lambda/20$  且精度较高的标准球面镜, 测量结果如图 10 所示, 波前 PV 值为  $56.545 \text{ nm}$ ,  $PV_{10}$  值(即波前最高的 10 个点的波前均值减去最低的 10 个点的波前均值, 相比 PV 值可以排除一些极值点的影响)为  $50.775 \text{ nm}$ , 均方根(RMS)值为  $9.155 \text{ nm}$ , 达到了设计指标<sup>[14]</sup>。



图 8 可变波长标准镜头实物

Fig. 8 Physical object of wavelength-variable standard spherical lens

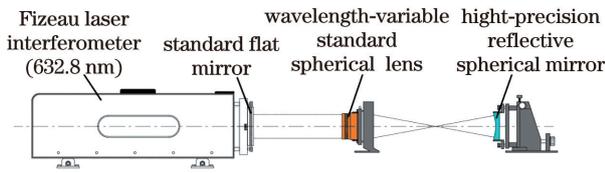


图 9 标准镜头透射波前的测量原理图

Fig. 9 Principle diagram of standard spherical lens transmitted wavefront measurement

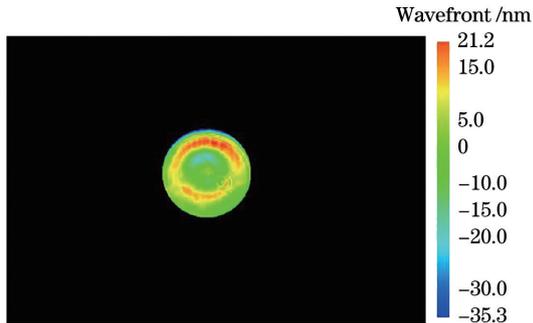


图 10 标准镜头透射波前的测量结果

Fig. 10 Result of standard spherical lens transmitted wavefront measurement

#### 4.2 可变波长标准镜头的检测

对于标准镜头在其他波长下的性能测试,采用检测元件面形的方法。课题组在进行多波长波前检测研究过程中,搭建了多波长激光干涉测量装置,该

装置主体为 19.05 mm 口径模块化激光干涉仪,通过更换光源配置不同波长的激光干涉仪,装置具体配置和搭建可以参考文献[15]。如图 11 所示,测量元件面形本质上是测量反射波前,测量结果与激光干涉仪光源波长没有关系,理论上使用任何波长的结果都应该相同。这里对一个普通精度的平凹透镜的面形进行检测,在实验过程中光源使用 5 种可见光波长(532,561,632.8,671,721 nm)。

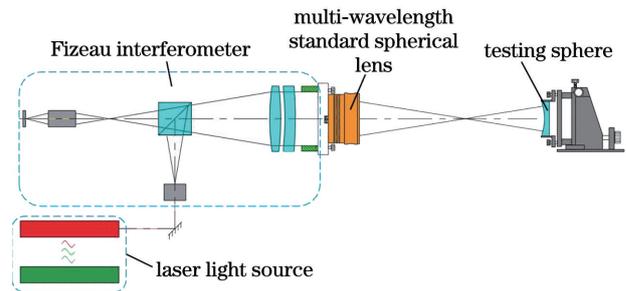


图 11 可变波长标准镜头检测原理图

Fig. 11 Principle diagram of wavelength-variable standard spherical lens detection

5 种波长下可变波长标准镜头对样品的检测结果(使用软件功能去掉倾斜和离焦)如图 12 所示,面形的数值(取 30 次平均值,RMS 值都在 30 nm 左右)和形状基本相同。

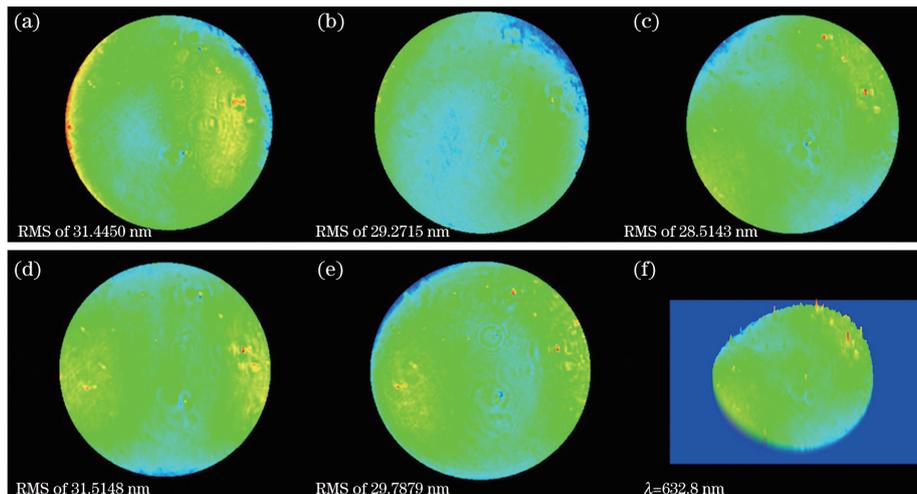


图 12 不同波长下的面形测量结果。(a) 532 nm;(b) 561 nm;(c) 632.8 nm;(d) 671 nm;(e) 721 nm;(f) 3D 图  
Fig. 12 Surface profile measurement results under different wavelengths. (a) 532 nm; (b) 561 nm; (c) 632.8 nm; (d) 671 nm; (e) 721 nm; (f) 3D figure

标准球面镜头的焦点( $F$ )与参考面的曲率中心( $C$ )不重合是影响测量精度的关键因素,如图 13 所示,由于  $F$ 、 $C$  不重合,参考面反射的参考光线与光轴相交,对应的距离  $r$  可以表示为

$$r = \frac{f^* \times f}{\Delta_{FC}}, \quad (11)$$

式中: $f$  为透镜组的焦距; $f^* = f - 2\Delta_{FC}$ ; $\Delta_{FC}$  为  $F$ 、 $C$  的重合误差,如果  $\Delta_{FC} \neq 0$ ,则参考面反射的参考波面  $\Sigma_i$  是一个球面波,被测球面反射并通过标准球面镜头的测试波面  $\Sigma_t$  为一个平面波。

参考波  $\Sigma_i$  与测试平面波  $\Sigma_t$  的最大回程误差  $O_p$  可以表示为

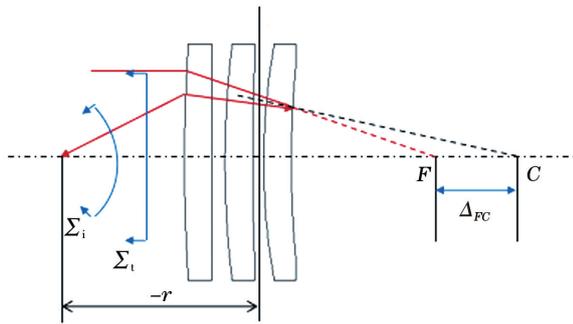


图 13 重合误差示意图

Fig. 13 Schematic of coincidence error

$$O_P = r - \sqrt{r^2 - \frac{D^2}{4}}, \quad (12)$$

式中:  $D$  为标准球面透镜组的入瞳直径。将(11)式代入(12)式可得

$$\Delta_{FC} = \frac{4f^* \times f}{D^2} \times O_P. \quad (13)$$

一般  $\Delta_{FC} \ll f$ , 则(13)式可以表示为

$$\Delta_{FC} = 4 \times O_P \times F_1^2. \quad (14)$$

由文献[16]可知, 通常标准镜头允许的回程误差  $O_P \leq 5\lambda$ 。因此为了进一步验证可变波长标准镜头, 在其存在明显  $F$ 、 $C$  重合误差时进行测量。将标准镜头的工作波长调至 1064 nm, 然后用 632.8 nm 激光对样品再次进行测量。根据(14)式可知, 当  $O_P = 5\lambda$  时, 允许的最大重合误差  $\Delta_{FC} = 0.81$  mm。软件仿真显示, 标准镜头在 1064 nm 配置下, 通过 632.8 nm 波长后参考面半径与焦点位置的理论相差数值为 2.49 mm, 远大于 0.81 mm, 并且在实际测量时也无法将干涉图调至零条纹。对应的样品面形检测结果(调至最少条纹)如图 14 所示, 30 次测量结果平均值的 RMS 为 60 nm, 实验表明, 当  $F$ 、 $C$  重合误差较大时, 测量结果与正常使用情况下的测量结果相差较大。

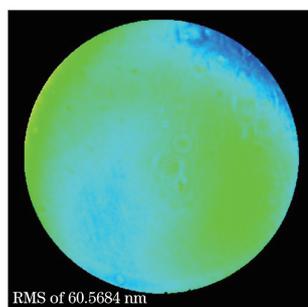


图 14 1064 nm 标准球面镜头在 632.8 nm 下测量的样品面形

Fig. 14 Sample profile measured by 1064 nm standard spherical lens at 632.8 nm

## 5 结 论

基于简单的变焦原理, 提出了可以工作在多个波长下的标准球面镜头的设计方法, 使用 Zemax 设计了两款大  $F_1$  可变波长标准球面镜头, 并分析了镜头内部透镜调整间隔的容限误差。容限分析结果表明, 在目前的机械加工精度下, 该方法仅适用于相对孔径较小的标准镜头。根据标准镜头的装调和检测原理设计了机械结构并加工了实验镜头。使用菲佐激光干涉仪, 对标准镜头透射波前进行了测量, 结果表明标准镜头质量达到了设计要求。配合多波长激光干涉装置对同一块样品面形进行了测量, 对应几种波长的测量精度基本相同, 而非对应波长的测量精度却有所不同, 这表明标准镜头在实际测量中能够改变其工作波长。该镜头的研发可以有效提高标准球面镜头的利用率, 节约高精密检测成本, 并为类似镜头提供了一种新的设计思路。所设计的标准镜头的  $F_1$  较大, 测量范围有限, 因此需要进一步研发具有更小  $F_1$  的可变波长标准球面镜头。另外, 随着多波长激光干涉仪的发展, 可变波长标准镜头可以应用于多波长透射波前的测量中。

## 参 考 文 献

- [1] Wei H M, Xing T W, Li Y, et al. Measurement errors in 632.8 nm high precision phase-shifting Fizeau interferometer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(4): 041202.  
魏豪明, 邢廷文, 李云, 等. 632.8 nm 高精度移相菲佐干涉仪测量误差分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(4): 041202.
- [2] Su D Q, Miao E L, Qu Y, et al. Absolute testing of interferometer wavefront using cat's-eye test [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1208002.  
苏东奇, 苗二龙, 曲艺, 等. 猫眼法绝对测量干涉仪出射波前 [J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1208002.
- [3] Zhang Q, Chen G X, Song F J, et al. Optical design and optimization of multiport wavelength selective switch [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(14): 142201.  
张倩, 陈根祥, 宋菲君, 等. 多端口波长选择开关的光学设计与优化 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 142201.
- [4] Liu Y. Research on high-precision spherical absolute measurement and reference mirror calibration technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 8-17.  
刘勇. 高精度球面绝对测量及参考镜校准技术研究

- [D]. 杭州:浙江大学,2013:8-17.
- [5] Zhou S Z. Research on computer aided adjustment technology of standard spherical lens. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003: 5-8.  
周松钻. 标准球面透镜的计算机辅助装调技术研究 [D]. 南京:南京理工大学,2003:5-8.
- [6] Peng W J, Ho C F, Lin W L, et al. Design, tolerance analysis, fabrication, and testing of a 6-in. dual-wavelength transmission sphere for a Fizeau interferometer[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(3): 035105.
- [7] Ge J Q, Qin Y X, Liu X D, et al. Design of variable spot and zoom optical system for laser cutting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0222001.  
葛佳琪, 秦应雄, 刘晓东, 等. 变斑变焦激光切割光学系统的设计 [J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0222001.
- [8] Yu J, Shen S D, Pan J H, et al. Fabrication of 1.8 m standard spherical mirror [J]. *SPIE*, 2012, 8415: 84151A.
- [9] Song W H, Wu F, Hou X, et al. Simulation analysis on absolute testing of spherical surfaces with shift-rotation method [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(12): 3229-3234.  
宋伟红, 伍凡, 侯溪, 等. 基于平移旋转的球面绝对检测技术仿真分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(12): 3229-3234.
- [10] Qu Y, Su D Q. Design of a high-precision reference spherical lens for Fizeau interferometer [J]. *Optical Instruments*, 2015, 37(6): 522-525.  
曲艺, 苏东奇. 大口径高精度斐索干涉仪球面参考镜设计 [J]. *光学仪器*, 2015, 37(6): 522-525.
- [11] Ye W W, Zhou T F, Huang J X, et al. Design of dual-vision double telecentric optical system based on machine vision [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(1): 012202.  
叶文伟, 周天福, 黄锦媛, 等. 基于机器视觉的双视野双远心光学系统设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(1): 012202.
- [12] Wang B X. Design and analysis of optical and mechanical structure of large-aperture spherical standard lens [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012: 12-20.  
汪宝旭. 大口径球面标准镜头光机结构设计与分析 [D]. 北京:中国科学院大学, 2012:12-20.
- [13] Wang Q Z, Zhang Q Y, Han S. A variable wavelength standard spherical lens: CN210222343U[P]. 2020-03-31.  
王全召, 张齐元, 韩森. 一种可变波长标准球面镜头: CN210222343U[P]. 2020-03-31.
- [14] Wang X K, Zheng L G. A method for testing radius of curvature of optical spheric surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0812010.  
王孝坤, 郑立功. 一种精确测量光学球面曲率半径的方法 [J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0812010.
- [15] Zhang Q Y. Method for multi-wavelength wavefronts testing of typical transmission systems [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019: 82-99.  
张齐元. 典型透射系统多波长波前检测方法研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2019: 82-99.
- [16] Gao Z S, Chen J B. Tolerance analysis and test of focus' coincidence with last surface's curvature center for reference lenses [J]. *SPIE*, 2002, 4927: 186-189.