

# 非球面 Null Lens 补偿检测中采用激光跟踪仪测量 几何参数方法研究

陈新东 李锐刚

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

**摘要** 随着非球面反射镜口径和顶点曲率半径的增大,传统的非球面几何参数测量不能满足要求。为实现非球面几何参数的高精度测量,针对广泛应用的补偿器检测非球面光路,开展了几何参数分析和测量方法研究。将二次常数和顶点曲率半径的理论近似误差关系与 Zemax 仿真进行对比验证,确定了测量需求及数据复核方法;阐述了采用激光跟踪仪测量几何参数的基本原理,说明了特征转换过程及建模、数据处理方法。测量实验结果表明,对 2 mm 量级的测量光路,顶点曲率半径的重复性测量精度 $\pm 0.039$  mm,二次常数的重复性精度 $\pm 2.05 \times 10^{-5}$ ,离轴量的重复性精度 $\pm 0.055$  mm。说明采用该方法能够有效实现非球面参数的测量,并具有很高的重复性测量精度,适合大口径、长曲率半径非球面的几何参数测量。该方法绝对检测精度需要进一步分析。

**关键词** 光学制造;非球面检测;几何参数测量;激光跟踪仪

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0508007

## Research on Geometric Parameter Measurement Method Using Laser Tracker in Null Lens Asphere Testing

Chen Xindong Li Ruigang

Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** Traditional measuring methods of geometric parameters of asphere cannot meet the accuracy requirements as the aperture and vertex radius of curvature increase. In order to realize high accuracy measurement of geometric parameters, analysis and measuring methods are studied according to the null lens testing. The theoretical relationship between radius error and conic constant error is compared with the simulation results, then the requirements of measurement and data processing check method are determined. The basic principles of using laser tracker to measure geometric parameters are presented. The feature transformation, modeling and data processing methods are introduced. Experimental results show that the repeating precision of radius, conic constant and off-axis distance are  $\pm 0.039$  mm,  $\pm 2.05 \times 10^{-5}$  and  $\pm 0.055$  mm, respectively. The high repeating accuracy indicates that this method is suitable for geometric parameters measurements, especially for large aperture and long radius aspheres. The absolute accuracy needs to be further analyzed.

**Key words** optical fabrication; aspheric testing; geometric parameter measuring; laser tracker

**OCIS codes** 220.4610; 220.4840; 220.1250

### 1 引 言

在光学系统中应用非球面并优化非球面参数,具有提高系统成像质量、增大视场角、减少光学元件数量等优点。因此,大口径光学非球面在大型望远镜、空间对地遥感等领域有着广泛而重要的应用<sup>[1-8]</sup>。

从非球面制造的角度看,描述非球面元件的参数可以分为两方面:1)非球面的表面质量,一般采用表面的峰谷(PV)值、均方根(RMS)值来表征;2)非球面的几何参数,包括顶点曲率半径、二次常数、偏心(离轴量)

收稿日期:2014-12-31;收到修改稿日期:2015-01-20

基金项目:国家自然科学基金(61036015)

作者简介:陈新东(1982—),男,博士,助理研究员,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: xindongchen@foxmail.com

等。一般的光学系统设计均具有较为宽松的几何参数公差,测量较为容易。然而,随着大型望远镜、空间相机的不断发展,要求制造口径更大、顶点曲率半径更长的非球面,几何参数测量难度不断增大;同时,在分块望远镜中,离轴非球面主镜子镜具有严格的几何参数公差。例如,在巨型麦哲伦(GMT)望远镜中,离轴非球面主镜子镜顶点曲率半径为36 m,测量精度要求为 $\pm 0.5$  mm,相对测量精度为 $1.39 \times 10^{-5}$ ;离轴量为8710 mm,公差目标要求为 $\pm 1$  mm<sup>[9]</sup>。传统的测量方法已经不能满足测量精度要求,甚至不能完成测量。因此,开展更高精度的几何参数测量方法的研究非常必要。

美国詹姆斯韦伯天文望远镜(JWST)项目、GMT项目均对几何参数的测量方法进行了研究<sup>[9-11]</sup>。几何参数的测量与面形检测方案是紧密结合在一起的,在设计面形检测方案时就需要考虑几何量的测量方法和精度。国内方面,2013年,李锐刚等<sup>[12]</sup>提出了采用激光跟踪仪进行离轴量的测量方法,给出了基本测量步骤<sup>[12]</sup>。本文针对非球面检测中零补偿透镜(null lens)零位补偿检测光路,分析了非球面几何参数的测量需求;在忽略高阶非球面偏离量的近似下,给出了顶点曲率半径和二次常数的误差关系;阐述采用激光跟踪仪测量几何参数的原理、模型变换和数据处理方法,并进行测量实验。

## 2 非球面几何参数分析

非球面的几何参数包括顶点曲率半径、二次常数、偏心(离轴量)等几何参数。含有高次项的非球面中,高次项系数也属于几何参数,但是其分析和测量均与上述几何参数不同,在这里暂不讨论。

首先讨论二次常数与顶点曲率半径的关系<sup>[13]</sup>。与球面波传播不同,非球面波传播中面形不断地发生变化<sup>[14]</sup>。考虑检测光的传播过程,在理想设计情况下,检测光经过补偿元件后,经过特定距离的传播,转换为理想的目标非球面面形(设计残差可忽略)。如果传播的距离存在偏差,在造成顶点曲率半径误差的同时,也会使二次常数产生误差。

如图1所示为典型的采用补偿器进行非球面检测的光路,设补偿器与被检测非球面沿光轴方向的间隔为 $d$ ,被检非球面的直径为 $D$ 。设检测中的间隔误差为 $\Delta d$ ,则顶点曲率半径的误差 $\Delta R = \Delta d$ 。根据图中的几何关系,有

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta d}{d} \quad (1)$$

考虑到第四阶的非球面偏离,在小距离传播近似下,可以认为在传播的过程中非球面偏离量保持不变,波前直径 $D$ 和曲率半径 $R$ 同时变化。非球面偏离量 $a_4$ 可以表示为<sup>[15]</sup>

$$a_4 = \frac{KD^4}{128R^3} \quad (2)$$

对(2)式进行微分可以得到

$$\Delta a_4 = \frac{D^4}{128R^3} \Delta K + 4 \frac{KD^3}{128R^3} \Delta D - 3 \frac{KD^4}{128R^4} \Delta R \quad (3)$$

继续推导可得

$$\frac{\Delta a_4}{a_4} = \frac{\Delta K}{K} + 4 \frac{\Delta D}{D} - 3 \frac{\Delta R}{R} \quad (4)$$

在传播距离比较小时(曲率半径偏差一般为毫米量级),可假设 $a_4$ 在传播过程中保持不变,即(4)式为零。将(1)式代入(4)式中,继续推导,有

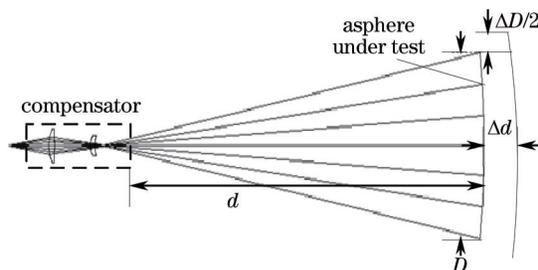


图1 典型补偿器检测非球面光路(存在间隔误差)

Fig.1 Typical asphere testing using null lens (with distance error)

$$\frac{\Delta K}{K} = -\frac{\Delta R}{R} \quad (5)$$

该式给出了在四阶近似下二次常数  $K$  随着顶点曲率半径  $R$  变化而产生的变化。

为验证(5)式的准确性,以某项目中的非球面为例采用 Zemax 光学仿真软件<sup>[16]</sup>进行仿真验证。被检测非球面参数为:顶点曲率半径  $R=3500$  mm,二次常数  $K=-1$ ,有效孔径约为 712 mm,为抛物面。设计的补偿光路参数如表 1 所示,光路及设计残差(RMS 值为  $0.0004\lambda$ ,  $\lambda=632.8$  nm)分布如图 2 所示。

表 1 补偿光路中各元件的参数

Table 1 Parameters of optical elements in null lens testing

Surface	Radius	Thickness	Glass	Semi-diameter	Conic
OBJ	Infinity	376.749070			0
1	142.478122	50	BK7	93	0
2	-683.742406	330.592011		93	0
3	83.115968	40	BK7	55	0
4	129.374058	3597.904157		55	0
5(STO)	-3500	-3597.904157	Mirror	305.778360	-1
6	129.374058	-40	BK7	55	0
7	83.115968	-330.592011		55	0
8	-683.742406	-50	BK7	93	0
9	142.478122	-376.749070		93	0
IMA	Infinity	-		$2.782149 \times 10^{-4}$	0

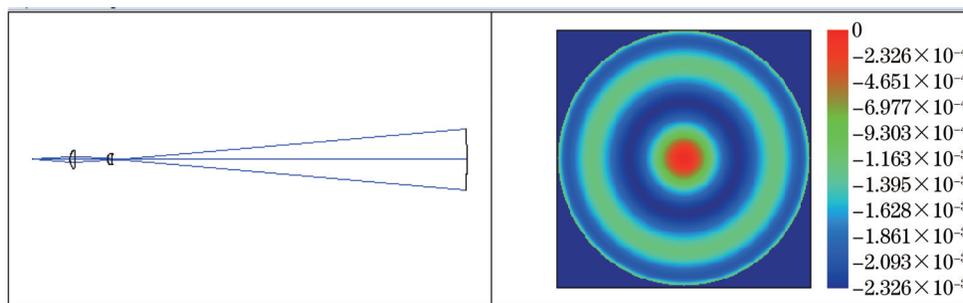


图 2 Zemax 设计光路及残差分布图

Fig.2 Optical path designed by Zemax and residual error

假设在检测中存在间隔误差为  $\Delta d$ ,二次常数变化为  $\Delta k$ ,将理论计算和 Zemax 仿真进行对比,结果如表 2 所示。由于 Zemax 采用多变量优化的结果,不同优化策略会导致不同结果,这里只列出一种优化结果。对于偏差为 10 mm 的情况只是做假设条件,用来分析传播距离的影响。非球面实际加工中曲率半径一般不允许存在 10 mm 的误差。

表 2 理论计算和仿真结果的对比

Table 2 Comparison of theoretical calculation and Zemax simulation

Theoretical calculation			Zemax simulation		
$\Delta d / \text{mm}$	$\Delta k / 10^{-4}$	RMS / $\lambda$	$\Delta d / \text{mm}$	$\Delta k / 10^{-4}$	RMS / $\lambda$
+1	-2.857142857	0.0004	+1	-2.84449688	0.0004
-1	2.857142857	0.0004	-1	2.83680602	0.0004
+10	-28.57142857	0.0006	+10	-28.33465615	0.0004
-10	28.57142857	0.0004	-10	28.48467892	0.0004

由表 2 可以看到,理论推导和仿真结果基本是一致的,二者的偏差随着传播距离的增大而增大。由于在实际的非球面制造中一般不会产生较大的曲率半径偏差,因此,在小距离传播近似下,通过顶点曲率半径的测量,就能够计算得到二次常数的误差。

顶点曲率半径的测量是沿着检测光轴方向的定位测量。在垂直于检测光轴方向上,由干涉检测的原理

和非球面检测过程可知,无论是同轴还是离轴的非球面,只要镜体相对于检测光轴的空间位置是准确的,那么加工出的面形就是正确的。由于补偿元件 null lens 具有绕检测光轴的旋转对称性,因此该几何参数不需要测量。因此,在非球面几何参数测量中,只需要测量非球面在三个平移自由度上与理想位置的偏差即可。

### 3 采用激光跟踪仪测量几何参数的原理

采用激光跟踪仪测量几何参数的原理包含两方面:首先,将检测光轴、镜面几何中心等光学特征转换为可测量的物理实体基准;其次,通过激光跟踪仪基准测量并建模,根据几何参数的基本定义对模型进行变换和计算,求得待测的几何参数。

#### 3.1 特征变换及测量基准

与球面检测不同,非球面 null lens 零位补偿检测中存在唯一的检测光轴。检测光轴是经过补偿镜中心的抽象的直线。在 null lens 零位补偿检测中,采用图 3 所示方法和工艺流程将光学特征转换为可测量实体基准。

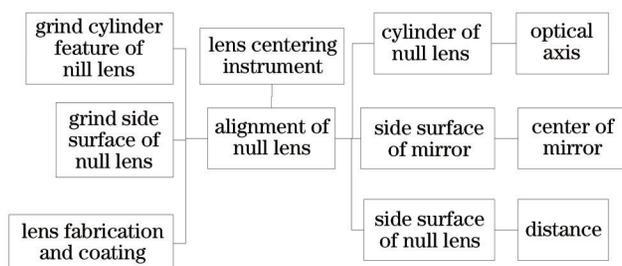


图 3 光学特征转换为可测量基准的方法和流程

Fig.3 Method and transform of optical feature to measurable datum

为了实现激光跟踪仪的可测量性,需要将补偿器工装的圆柱、端面进行精加工和研磨作为测量基准;在补偿器装调阶段,采用定心仪等仪器对补偿器进行装调,使得补偿器各透镜共同的中轴与补偿器圆柱的中轴线重合(一般装调精度不大于 10").这样就建立了实体基准和检测光轴之间的对应关系。

反射镜镜体加工出平面等特征,通过这些特征和镜面的测量并对测量数据进行几何计算,就能够得到镜面几何中心;再结合补偿器端面进行检测光路间隔的测量,就能够计算出顶点曲率半径、离轴量等几何参数。

#### 3.2 建模及数据处理

整个测量的示意图如图 4 所示。采用激光跟踪仪分别测量补偿器和被检非球面的特征,然后进行建模和数据处理。建模和处理的流程如图 5 所示。

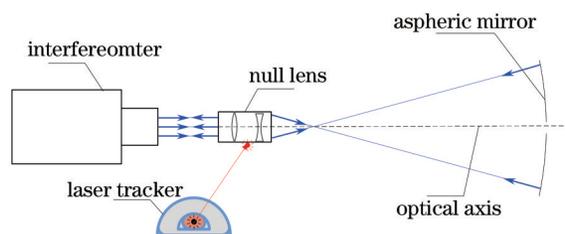


图 4 采用激光跟踪仪测量非球面几何参数示意图

Fig.4 Geometric parameter testing of asphere by laser tracker

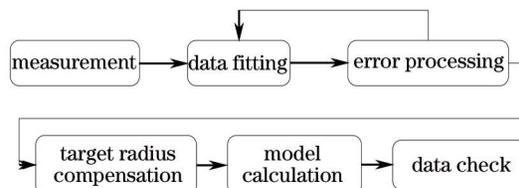


图 5 建模和数据处理流程图

Fig.5 Modelling and data processing method

数据处理的关键是数据拟合算法和误差处理。采用激光跟踪仪对 3.1 节中介绍的基准进行测量后,对测量的空间坐标数据进行数据拟合。以测量圆柱为例,设用于建模的测量点为  $\{X_i\}_{i=1}^n$  (对于圆柱拟合,要求

$n > 6$ )。如图 6 所示,圆柱采用如下方法表征:圆柱轴线上的一点  $C$ ,轴线方向单位矢量  $\{U, V, W\}$ ,圆柱的半径  $r$  ( $r > 0$ )。空间圆柱面的函数可表示为  $F(X_i; r^2, C, W) = 0$ , 其中的  $X_i$  即圆柱面上的任一点。以测量数据  $\{X_i\}_{i=1}^n$  作为输入数据,圆柱偏差  $E$  表达为

$$E(q) = \min_q \sum_{i=1}^n [F(X_i; q)]^2, \quad (6)$$

式中  $q \in (r^2, C, W)$ 。采用最小二乘法<sup>[17]</sup>,有

$$\frac{\partial E}{\partial q} = 2 \sum_{i=1}^n [F(X_i; q)] \frac{\partial F(X_i; q)}{\partial q} = 0. \quad (7)$$

求解(7)式就能够得到表征圆柱的参数  $r$ 、 $C$ 、 $W$ ,完成圆柱的拟合,并得到各数据点与圆柱面之间的投影方向的误差。去除数据点中的粗大误差,并采用最小二乘法重新计算圆柱参数,直至误差满足测量精度要求。这是一个迭代计算和优化的过程。

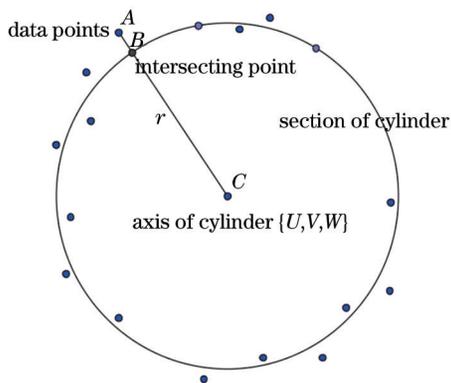


图 6 测量数据的圆柱拟合

Fig.6 Cylinder fitting of measurement data

由于激光跟踪仪采用靶标球进行测量,因此上述计算得到的圆柱要进行半径补偿,得到实际的补偿器圆柱的数字模型。

其他的基准应用相同的数据处理方法,在激光跟踪仪的软件中得到所有需要基准的数字模型。通过对这些模型的平移、相交、垂直、距离计算等模型计算,就得到间隔、离轴量等几何参数。通过重复性测量及其他测量方法的对比完成数据复核,其中顶点曲率半径的误差需要代入到 Zemax 等光学仿真软件中进行复核。

#### 4 测量实验

采用上述方法对某项目中的离轴非球面进行了几何参数测试,如图 7 所示,测试补偿元件为 null lens。被测非球面参数为:顶点曲率半径  $R$  为 1901.53 mm;二次常数  $K$  为 -0.011601;实际尺寸为 660 mm×220 mm;离轴量为 185 mm。

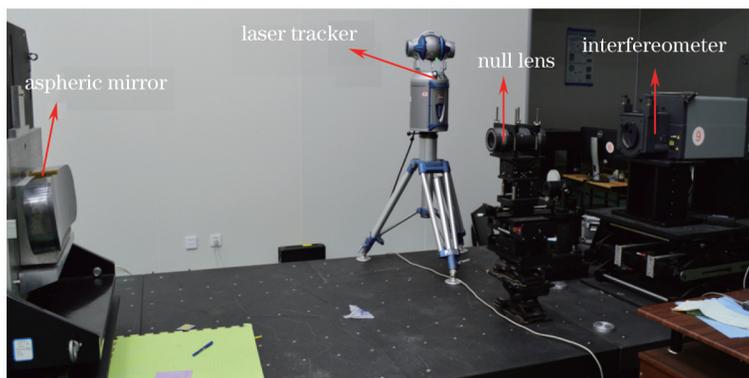


图 7 测量实验图

Fig.7 Measurement experiments

采用激光跟踪仪进行几何参数测量和控制,在面形满足要求后,几何参数重复性测量误差结果如图8所示。顶点曲率半径的测量重复性精度达到了 $\pm 0.039$  mm,计算得到二次常数的重复性精度为 $\pm 2.05 \times 10^{-5}$ ,离轴量的测量重复性精度达到了 $\pm 0.055$  mm。高的重复性测量精度证明采用激光跟踪仪测量几何量的有效性。该方法的绝对测量精度需要进一步分析。

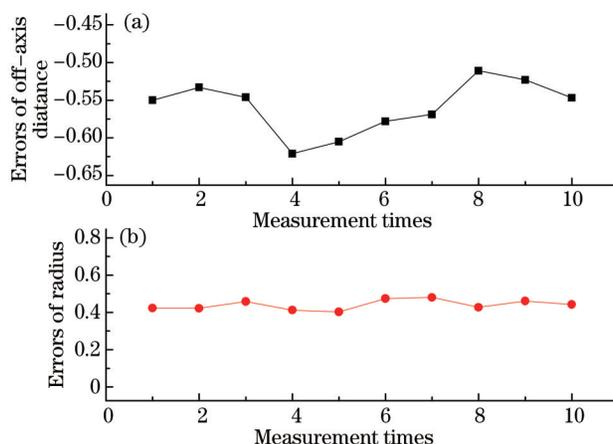


图8 重复性测量实验结果。(a) 离轴量重复性测量误差; (b) 曲率半径重复性测量误差

Fig.8 Repeating error of off-axis (a) distance and (b) radius

## 5 结 论

随着非球面反射镜口径和顶点曲率半径的增大,非球面几何参数的测量面临着较大的困难。针对补偿器检测非球面光路,本文分析了非球面几何参数测量需求,给出了小非球面偏离量近似下的二次常数与顶点曲率半径的误差关系;探讨了采用激光跟踪仪测量的基本原理和流程。测量实验表明,采用该方法能够实现非球面参数的测量,顶点曲率半径、二次常数和离轴量的测量重复性精度分别达到 $\pm 0.39$  mm、 $\pm 2.05 \times 10^{-5}$ 、 $\pm 0.055$  mm,适合大口径、长曲率半径非球面的几何参数测量。下一步需对该方法进行系统的误差分析,确定绝对检测精度。

## 参 考 文 献

- 1 Johns M. The giant magellan telescope (GMT)[C]. SPIE, 2008, 6986: 698603.
- 2 Paul A Lightsey, Charles Atkinson, Mark Clampin, *et al.*. James Webb Space Telescope: large deployable cryogenic telescope in space[J]. Opt Eng, 2012, 51(1): 011003.
- 3 Li Shengyi, Dai Yifan. New Technology for Manufacturing and Measurement of Large and Middle-Scale Aspheric Surfaces[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2011.  
李圣怡,戴一帆.大中型光学非球面镜制造与测量新技术[M].北京:国防工业出版社,2011.
- 4 Song Qiang, Yang Baoxi, Yuan Qiao, *et al.*. Study on large convex aspherical lens testing[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 41(4): 0408003.  
宋强,杨宝喜,袁乔,等.大口径凸非球面面形检测方法研究[J].光学学报,2014,41(4): 0408003.
- 5 Liu Xiaomei, Xiang Yang. Research and design of telecentric off-axis three mirror system with real entrance pupil[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1122002.  
刘晓梅,向阳.具有实入瞳的远心离轴三反系统研究与设计[J].光学学报,2011,31(11): 1122002.
- 6 Xue Donglin. Manufacture and application of large aperture standard transmission spheres[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0616001.  
薛栋林.大口径标准球面镜组研制与应用[J].中国激光,2014,41(6): 0616001.
- 7 Pang Zhihai, Fan Xuewu, Chen Qinfang, *et al.*. Influence of surface - profile error of large mirror on aberrations characteristics of optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422002.  
庞志海,樊学武,陈钦芳,等.大口径反射镜面形误差对光学系统像差特性的影响[J].光学学报,2013,33(4): 0422002.
- 8 Li Zongxuan, Chen Xue, Zhang Lei, *et al.*. Design of Cartwheel flexural support for a large aperture space mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0622003.

- 李宗轩, 陈 雪, 张 雷, 等. 大口径空间反射镜 Cartwheel 型柔性支撑设计[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0622003.
- 9 H M Martina, R G Allena, J H Burge, *et al.*. Fabrication and testing of the first 8.4 m off-axis segment for the Giant Magellan Telescope[C]. SPIE, 2010, 7739: 77390A.
- 10 James B Hadaway, David M Chaney, Larkin B Carey. The optical metrology system for cryogenic testing of the JWST primary mirror segments[C]. SPIE, 2011, 8126: 81260P.
- 11 S C West, J H Burge, B Cuerden, *et al.*. Alignment and use of the optical test for the 8.4 m off-axis primary mirrors of the Giant Magellan Telescope[C]. SPIE, 2010, 7739: 77390N.
- 12 Li Ruigang. Testing method for off-axis of off-axis asphere using laser tracker[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(S): 139-143.
- 李锐钢. 运用激光跟踪仪测量离轴非球面离轴量的方法[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(S): 139-143.
- 13 J H Burge. Advanced Techniques for Measuring Primary Mirrors for Astronomical Telescopes[D]. Arizona: University of Arizona, 1993.
- 14 Malacara D. Optical Shop Testing[M]. 3rd Edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- 15 Pan Junhua. Design, Manufacture and Testing of Optical Aspheres[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检测[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- 16 Zemax. Zemax[OL]. www.zemax.com. [2015-03-05].
- 17 Li Qingyang, Wang Chaoneng, Yi Dayi. Numerical Analysis[M]. Beijing: TsingHua University Press, 2008.
- 李庆杨, 王超能, 易大义. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

栏目编辑: 何卓铭