

引用格式: ZHANG Kun, ZHONG Xing, MENG Yao, *et al.* Tolerance Sensitivity Research of Nano-star Sensor Optical System with Large Field[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(5):0522001

张坤, 钟兴, 孟遥, 等. 大视场纳型星敏光学系统公差灵敏度研究[J]. 光子学报, 2019, 48(5):0522001

## 大视场纳型星敏光学系统公差灵敏度研究

张坤<sup>1,2,3</sup>, 钟兴<sup>1,2,3</sup>, 孟遥<sup>3</sup>, 刘江<sup>3</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 长光卫星技术有限公司, 长春 130102)

**摘 要:**通过分析光学系统结构参数变化对像差的影响, 提出通过优化各光学表面的曲率进行光焦度合理分配来减小各表面产生的初级像差, 从而实现降低各加工装调公差灵敏度的方法. 利用该方法优化了一个小像差相互补偿的焦距为 25 mm, 全视场角为 26°, 入瞳孔径为 18 mm, 光谱范围为 500 ~ 800 nm 的大视场纳型星敏传感器光学系统, 系统全长 40 mm, 光学系统成像质量满足指标要求. 与所设计的大像差相互补偿光学系统进行了公差灵敏度对比分析, 结果表明: 光焦度合理分配后的光学系统, 第 5 片透镜的厚度公差对均方根弥散斑半径的影响从 3.75  $\mu\text{m}$  降低到 0.17  $\mu\text{m}$ ; 第 5 和第 6 元件间隔公差对均方根弥散斑半径的影响也分别从 4.36  $\mu\text{m}$  和 4.74  $\mu\text{m}$  降低到 0.25  $\mu\text{m}$  和 0.18  $\mu\text{m}$ . 蒙特卡罗分析表明, 均方根弥散斑半径小于 7.59  $\mu\text{m}$  的概率从 23% 增加到了 80%. 实验测试结果表明, 星敏传感器在全视场范围内, 能量集中度在  $\Phi 17 \mu\text{m}$  范围内优于 80%, 满足星敏传感器的指标要求.

**关键词:**纳型星敏传感器; 公差灵敏度; 光焦度分配; 曲率; 小像差相互补偿; 大视场; 公差分析

中图分类号: TH74

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194805.0522001

## Tolerance Sensitivity Research of Nano-star Sensor Optical System with Large Field

ZHANG Kun<sup>1,2,3</sup>, ZHONG Xing<sup>1,2,3</sup>, MENG Yao<sup>3</sup>, LIU Jiang<sup>3</sup>

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd, Changchun 130102, China)

**Abstract:** By analyzing the influence of the optical system structural parameters on aberrations, a method was proposed to reduce the primary aberrations of each optical surface by optimizing the curvature to make a reasonable power distribution, which could reduce the processing and adjustment tolerance sensitivities. Using this method, a nano-star sensor optical system with a focal length of 25 mm, a full field of view of 26°, entrance pupil diameter of 18 mm and spectrum range of 500~800 nm was designed, which was a small aberration compensation system. The whole length of the system was 40 mm. The imaging quality of the optical system met the requirements. Tolerance sensitivity analysis was carried out for two optical systems. The results show that the influence of the thickness tolerance of the fifth lens on the Root Mean Square (RMS) spot radius decreases from 3.75  $\mu\text{m}$  to 0.17  $\mu\text{m}$  in the reasonable power distribution optical system; and the influence of the fifth and sixth element spacing tolerances on the RMS

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(No. 61505203), 中科院青促会专项基金

第一作者: 张坤(1993-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光学系统设计. Email: zhangkciomp@163.com

导师(通讯作者): 钟兴(1982-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光学系统设计和光学遥感. Email: ciomper@163.com

收稿日期: 2018-12-03; 录用日期: 2019-01-18

<http://www.photon.ac.cn>

0522001-1

spot radius decreases from 4.36  $\mu\text{m}$  and 4.74  $\mu\text{m}$  to 0.25  $\mu\text{m}$  and 0.18  $\mu\text{m}$ , respectively. Monte Carlo analysis shows that the probability of the RMS spot radius of less than 7.59  $\mu\text{m}$  is increased from 23% to 80%. The experimental results show that in the full field of view the energy concentration of the star sensor is better than 80% in the range of  $\Phi 17 \mu\text{m}$ , which meets the requirements.

**Key words:** Nano-star sensor; Tolerance sensitivity; Focal power distribution; Curvature; Small aberration compensation; Large field of view; Tolerance analysis

**OCIS Codes:** 220.1000;220.2740;080.3620

## 0 引言

星传感器以星空为工作对象,将天球中的恒星成像在星传感器光学系统的焦平面上,经过星点质心提取、星图匹配和姿态解算等步骤后,可直接获得飞行器的三轴姿态信息<sup>[1-3]</sup>.大视场星传感器是指全视场角在 $20^\circ$ 左右的星传感器<sup>[4-6]</sup>.目前,星传感器已成为卫星、航天飞机、导弹等必备的高精度姿态敏感部件.随着现代航天技术的迅猛发展,轻小型、低功耗的星传感器在空间飞行器姿态确定方面的应用已得到世界各国的强烈关注<sup>[7-9]</sup>,纳型星传感器的研制将成为未来星传感器的发展趋势<sup>[10-11]</sup>.

星传感器光学系统属于高成像质量光学系统,在光学系统设计阶段不仅要分析光学系统的成像质量,还需严格分析各加工装调公差对光学系统成像质量带来的影响,从而合理的分配公差,以满足成像质量的指标要求<sup>[12-13]</sup>.低像差光学系统为了满足指标要求,光学系统的公差分配往往很严格,这便增加了加工装调难度,延长了研制周期,有时严格的公差甚至会导致设计的光学系统无法加工生产<sup>[14-15]</sup>.因此,在光学系统设计的同时,优化各加工装调公差的灵敏度将极其重要,这能极大的放松公差,缩短研制周期.而国内外有关光学系统公差灵敏度的研究资料较少<sup>[16-17]</sup>,提出的方法比较复杂并且对公差灵敏度的优化存在盲目性<sup>[18-20]</sup>,如邓桦湖等提出通过编写特殊的光线追迹程序来分析公差的灵敏度<sup>[14]</sup>;文献[20]把透镜形状参数  $W$  和  $S$  作为自动控制公差灵敏度的评价函数,但并没分析提出该优化方法的理论依据.

本文提出通过优化光学系统中各光学表面曲率的方法,来合理分配光学系统的光焦度,实现小像差相互补偿以降低公差的灵敏度.针对某纳型星传感器光学系统的设计指标要求,分别设计了大像差互补和小像差互补的光学系统,并对两个光学系统进行了公差灵敏度分析和蒙特卡罗分析.分析结果表明,对光焦度进行合理分配后的光学系统,极大地降低了敏感公差的灵敏度,从而放松了公差,降低了加工装调成本.

## 1 公差灵敏度优化方法

高级像差属于高次小量,与初级像差相比要小许多,其随光学系统结构微小变动而变化的量常可忽略不计,因此公差的制定可以根据初级像差的大小而定.但对于大像差相互补偿的高像质光学系统,每个光学表面的像差产生量与光学系统的残余量相比相差很大,此时某些因素的微小变动便足以破坏光学系统的性能,因此公差往往很严苛.为了降低公差的灵敏度,本文对几何像差理论进行了分析.

光学系统像差随系统结构参数变化而变化的量由两部分组成<sup>[21]</sup>:第一部分是直接的影响,被称为本征的;第二部分是由于本征变化而使后组所接收光束的高斯光学特性发生了变化,从而衍生的间接影响,被称为衍生的.本征改变量与衍生改变量的和为总像差改变量.

### 1.1 本征变化

当某透镜的厚度增大  $\Delta d$  时,其后组的  $l$  变化为  $l - \Delta d$ ,  $l_p$  变为  $l_p - \Delta d$ ,即物体和光阑均发生移动,这对像差的影响是间接的,本征变化为零.

以轴上光线为例,可求出光学系统中各透镜表面半径变化引起各初级像差的本征变化量.

$$\Delta S_{\text{I}} = S_{\text{I}} \left( 2 \frac{\Delta i}{i} + \frac{\Delta i'}{i' - u} \right) \quad (1)$$

$$\Delta S_{\text{II}} = S_{\text{II}} \left( \frac{\Delta i}{i} + \frac{\Delta i'}{i' - u} + \frac{\Delta i_p}{i_p} \right) \quad (2)$$

$$\Delta S_{\text{III}} = S_{\text{III}} \left( \frac{\Delta i'}{i' - u} + 2 \frac{\Delta i_p}{i_p} \right) \quad (3)$$

$$\Delta S_{\text{IV}} = S_{\text{IV}} \times \Delta c \quad (4)$$

$$\Delta S_V = S_V \left( \frac{\Delta S_{III} + \Delta S_{IV}}{S_{III} + S_{IV}} + \frac{\Delta i_p}{i_p} \times \frac{\Delta i}{i} \right) \quad (5)$$

$$\Delta C_I = C_I \frac{\Delta i}{i} \quad (6)$$

$$\Delta C_{II} = C_{II} \frac{\Delta i_p}{i} \quad (7)$$

式中,  $S_n$  ( $n = I, II, III, IV, V$ ) 分别表示初级球差系数、初级彗差系数、初级像散系数、初级场曲系数、初级畸变系数,  $C_n$  ( $n = I, II$ ) 分别表示初级位置色差系数、初级倍率色差系数,  $\Delta S_n$  ( $n = I, II, III, IV, V$ ) 为半径变化后初级像差系数的改变量,  $\Delta C_n$  ( $n = I, II$ ) 分别为半径变化后初级位置色差系数和初级倍率色差系数的改变量,  $i, i', u, u', i_p$  分别表示光线的入射角、出射角、入射光线与光轴的夹角、出射光线与光轴的夹角、主光线入射角,  $\Delta i, \Delta i', \Delta i_p$  为半径变化后  $i, i', i_p$  的改变量,  $\Delta c$  为曲率的改变量。

## 1.2 衍生变化

光学系统后组接收的改变过的光束总可看作是下列四种变动的结果:物高变更、物体移动、光阑移动、光阑直径变更. 光学系统后组(第  $i$  面到第  $k$  面)总像差衍生变化量为

$$\Delta S_I = B[4S_{II} + J(u_k'^2 - u_i^2)] + 4S_I \left( \frac{\Delta u - Bu_p}{u} \right) \quad (8)$$

$$\Delta S_{II} = B[3S_{III} + S_{IV} + J(u_k' u_{pk}' - u_i u_{pi})] + 2S_{II} \left( \frac{\Delta u - Bu_p}{u} \right) + AS_I \quad (9)$$

$$\Delta S_{III} = B[S_V + J(u_{pk}'^2 - u_{pi}^2)] + 2AS_{II} \quad (10)$$

$$\Delta S_{IV} = 0 \quad (11)$$

$$\Delta S_V = BS_{Ip} - 2 \left( \frac{\Delta u - Bu_p}{u} \right) S_V + A(3S_{III} + S_{IV}) \quad (12)$$

$$\Delta C_I = B[2C_{II} - J \left( \frac{\delta n_k'}{n_k} - \frac{\delta n_i}{n_i} \right)] + 2 \left( \frac{\Delta u - Bu_p}{u} \right) C_I \quad (13)$$

$$\Delta C_{II} = BC_{Ip} + AC_I \quad (14)$$

$$\begin{cases} A = -\frac{nu_p^2 \Delta l_p}{J} \\ B = \frac{nu^2 \Delta l}{J} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $J$  为拉赫不变量;  $\Delta l_p$  是光阑移动量;  $\Delta l$  是物体移动量;  $S_n$  ( $n = I, II, III, IV, V, I_p$ ) 分别表示第  $i$  面到第  $k$  面的初级球差系数和、初级彗差系数和、初级像散系数和、初级场曲系数和、初级畸变系数和、光阑球差系数和,  $C_n$  ( $n = I, II, I_p$ ) 分别表示第  $i$  面到第  $k$  面的初级位置色差系数和、初级倍率色差系数和、光阑色差系数和。

把式(16)带入衍生像差表达式(8)~(15)中,即可得透镜厚度改变时相应像差的衍生变化量。

$$\begin{cases} nu^2 \Delta l = -nu^2 \Delta d \\ nu_p^2 \Delta l_p = -nu_p^2 \Delta d \\ \Delta u = 0 \end{cases} \quad (16)$$

把式(17)带入衍生像差表达式(8)~(15)中,即可得曲率半径改变时相应像差的衍生变化量。

$$\begin{cases} nu^2 \Delta l = (n - n') h^2 \Delta c \\ nu_p^2 \Delta l_p = (n - n') h_p^2 \Delta c \\ \Delta u = \left( 1 - \frac{n}{n'} \right) h \Delta c \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $h$  为入射光线的入射高度,  $h_p$  为主光线入射高度。

## 1.3 降低公差灵敏度的方法

在光学系统中,当系统中各项公差为  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$  时,假设各参数之间相互独立,则系统的灵敏度定义为<sup>[22]</sup>

$$M = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (18)$$

式中,  $x_i$  为光学系统设计参数, 如透镜厚度、曲率半径等;  $\Phi$  为系统优化函数, 如光学系统调制传递函数、弥散斑均方根半径等; 参数灵敏度  $\partial \Phi / \partial x$  表示目标函数随单一参数微量变化的变化率。

从透镜的厚度和半径变化对光学系统像差的本征和衍生影响的表达式可知, 若要减小光学系统的像差变化量, 降低加工装调公差灵敏度, 需要满足两个条件: 一是减小光学系统各光学表面的初级像差, 各光学表面都产生较小的初级像差, 通过各表面产生的小像差来平衡光学系统的总像差, 即小像差互补; 二是减小光线入射到各光学表面的角度, 来减小折射光线与入射光线的偏折角。这两种方法对降低光学系统的其他加工装调公差的灵敏度同样适用。

为了降低光学系统各光学表面产生的初级像差, 本文从初级像差理论出发进行分析。设一组薄透镜由  $N$  个折射面组成, 则薄透镜组的初级像差表达式为<sup>[23]</sup>

$$\sum S_I = \sum_1^N hP \quad (19)$$

$$\sum S_{II} = \sum_1^N h_z P + J \sum_1^N W \quad (20)$$

$$\sum S_{III} = \sum_1^N \frac{h_z^2}{h} P + 2J \sum_1^N \frac{h_z}{h} W + J^2 \sum_1^N \Phi \quad (21)$$

$$\sum S_{IV} = J^2 \sum_1^N \mu \Phi \quad (22)$$

$$\sum S_V = \sum_1^N \frac{h_z^3}{h^2} P + 3J \sum_1^N \frac{h_z^2}{h^2} W + J^2 \sum_1^N \frac{h_z}{h} (3 + \mu) \Phi \quad (23)$$

式中,  $\Phi$  为薄透镜组的光焦度,  $h$  和  $h_z$  分别为第一近轴光线和第二近轴光线在各薄透镜组上的高度, 其中  $P$ 、 $W$ 、 $\mu$  的定义如式(24)所示,  $u$  为第一近轴光线的孔径角,  $i$ 、 $i'$  分别表示光线的入射角、出射角,  $\varphi$  和  $n$  分别为该薄透镜组中单个薄透镜的光焦度和折射率。

$$\begin{cases} P = m i (i - i') (i' - u) \\ W = (i - i') (i' - u) \\ \mu = \sum \frac{\varphi}{n \Phi} \end{cases} \quad (24)$$

从式(19)~(23)可知, 通过减小  $P$ 、 $W$ 、 $\mu$  的值可减小各表面产生的初级像差, 再结合  $P$ 、 $W$ 、 $\mu$  的表达式(24)可知, 减小各透镜的光焦度和各光学表面的光线偏折角度, 能达到减小各表面产生的初级像差的目的。由单个折射球面近轴区光路计算公式可知, 对于相同的光学透镜材料而言, 一般情况下表面曲率的绝对值越大则光线偏折越大。因此, 可以通过增大光学表面的曲率半径来减小光线的偏折角。式(25)为折射球面的光焦度公式, 由光焦度公式可知, 光焦度的大小与折射表面的曲率也相关。因此, 可以通过优化透镜曲率来控制各光学表面的光焦度和光线偏折角度。

$$\varphi = \frac{n' - n}{r} \quad (25)$$

把式(19)~(24)分别带入式(1)~(5), 即可得到光学系统某一表面曲率发生微小变化时, 光学系统透镜表面的光焦度与初级像差本征改变量的关系表达式。

$$\Delta S_I = hP \left( 2 \frac{\Delta i}{i} + \frac{\Delta i'}{i' - u} \right) \quad (26)$$

$$\Delta S_{II} = (h_z P + JW) \left( \frac{\Delta i}{i} + \frac{\Delta i'}{i' - u} + \frac{\Delta i_p}{i_p} \right) \quad (27)$$

$$\Delta S_{III} = \left( \frac{h_z^2}{h} P + 2J \frac{h_z}{h} W + J^2 \varphi \right) \left( \frac{\Delta i'}{i' - u} + 2 \frac{\Delta i_p}{i_p} \right) \quad (28)$$

$$\Delta S_{IV} = \left( J^2 \frac{\varphi}{n} \right) \times \Delta c \quad (29)$$

$$\Delta S_V = \left[ \frac{h_z^3}{h^2} P + 3J \frac{h_z^2}{h^2} W + J^2 \frac{h_z}{h} \left( 3 + \frac{1}{n} \right) \varphi \right] \left[ \frac{\Delta S_{III} + \Delta S_{IV}}{\left( \frac{h_z^2}{h} P + 2J \frac{h_z}{h} W + J^2 \varphi \right) + \left( J^2 \frac{\varphi}{n} \right)} + \frac{\Delta i_p}{i_p} \times \frac{\Delta i}{i} \right] \quad (30)$$

把式(19)~(24)分别带入式(8)~(12),即可得到光学系统某一表面的曲率发生微小变化时,光学系统透镜表面的光焦度与初级像差衍生改变量的关系表达式。

$$\Delta S_I = B \left[ 4 \left( \sum_i^k h_z P + J \sum_i^k W \right) + J (u_k'^2 - u_i^2) \right] + 4 \left( \sum_i^k h P \right) \left( \frac{\Delta u - B u_p}{u} \right) \quad (31)$$

$$\Delta S_{II} = B \left[ 3 \left( \sum_i^k \frac{h_z^2}{h} P + 2J \sum_i^k \frac{h_z}{h} W + J^2 \sum_i^k \Phi \right) + J^2 \sum_i^k \left( \sum_i^k \frac{\varphi}{n} \right) + J (u_k' u_{pk}' - u_i u_{pi}) \right] + 2 \left( \sum_i^k h_z P + J \sum_i^k W \right) \left( \frac{\Delta u - B u_p}{u} \right) + A \sum_i^k h P \quad (32)$$

$$\Delta S_{III} = B \left\{ \left[ \sum_i^k \frac{h_z^3}{h^2} P + 3J \sum_i^k \frac{h_z^2}{h^2} W + J^2 \sum_i^k \frac{h_z}{h} \left( 3\Phi + \sum_i^k \frac{\varphi}{n} \right) \right] + J (u_{pk}'^2 - u_{pi}^2) \right\} + 2A \left( \sum_i^k h_z P + J \sum_i^k W \right) \quad (33)$$

$$\Delta S_{IV} = 0 \quad (34)$$

$$\Delta S_V = B S_{I_p} - 2 \left( \frac{\Delta u - B u_p}{u} \right) \left[ \sum_i^k \frac{h_z^3}{h^2} P + 3J \sum_i^k \frac{h_z^2}{h^2} W + J^2 \sum_i^k \frac{h_z}{h} \left( 3\Phi + \sum_i^k \frac{\varphi}{n} \right) \right] + A \left[ 3 \left( \sum_i^k \frac{h_z^2}{h} P + 2J \sum_i^k \frac{h_z}{h} W + J^2 \sum_i^k \Phi \right) + J^2 \sum_i^k \left( \sum_i^k \frac{\varphi}{n} \right) \right] \quad (35)$$

初级像差的本征改变量与衍生改变量的和为总的像差改变量。把式(25)带入式(26)~(35)中,即可得到光学系统某一表面曲率发生微小变化时,光学系统透镜表面的半径与初级像差改变量的关系表达式。

综上所述可知,减小光学系统各光学表面的曲率(取绝对值),来控制光焦度的合理分配可降各光学表面产生的初级像差,从而降低各加工装调公差的灵敏度。因此,本文通过优化光学系统中各光学表面的曲率和光焦度,来降低各加工装调公差的灵敏度,并验证了该方法的可行性。

## 2 星敏设计实例分析

### 2.1 光学系统参数选择

星敏传感器光学系统的设计指标是由光电探测器的几何尺寸、光谱响应范围、所探测的目标星等、目标恒星的光谱范围以及姿态的解算算法等决定的。本文的宽光谱、大视场、大相对孔径的某纳型星敏的设计指标如表 1。

表 1 光学设计指标  
Table 1 Indices of optical system

Parameters	Index requirements
Focal length/mm	25
Aperture/mm	18
Full field of view/(°)	26
Spectral range/ $\mu\text{m}$	0.50~0.80
Primary wavelength/ $\mu\text{m}$	0.65
$\Phi 17 \mu\text{m}$ encircled energy	$\geq 80\%$
Absolute Distortion/ $\mu\text{m}$	$\leq 3.0$
Lateral color/ $\mu\text{m}$	$\leq 3.0$
Back working length/mm	2.5~4
Total length/mm	$\leq 40$

### 2.2 光学系统设计

针对提出的光学系统设计指标要求,通过传统设计方法利用光学设计软件 Zemax 进行优化设计,设计了一个大视场、大相对孔径、宽光谱的纳型星敏传感器光学系统,其二维结构如图 1。光学系统的赛得像差如图

2,从图 2 可知,光学系统中第 11 和第 12 表面产生了很大的球差,各光学表面的其他初级像差起伏变化也普遍偏大。

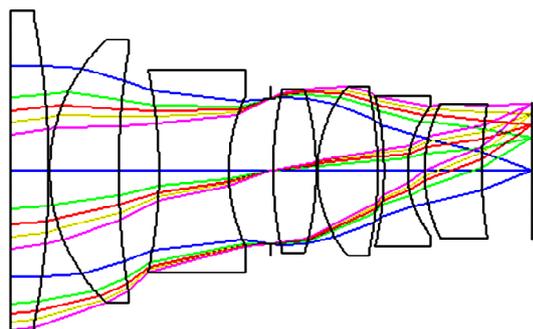


图 1 星传感器光学系统

Fig. 1 Optical system of the star sensor

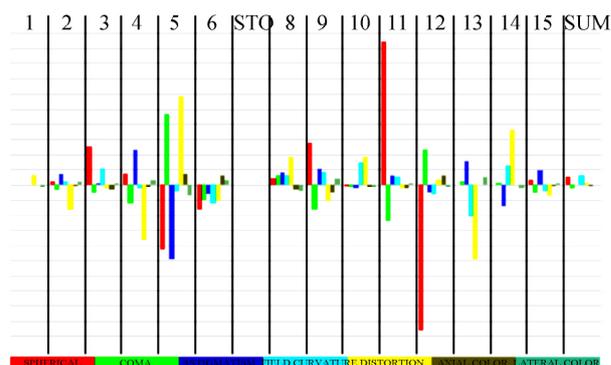


图 2 赛得像差图

Fig. 2 Seidel diagram

光学系统中各光学表面的曲率如图 3 中红折线所示,各光学表面的光焦度如图 4 中红折线所示.对比分析图 3 和图 4 可知,光学表面的光焦度与曲率变化趋势几乎完全相同,因此可对光学表面的曲率进行优化,来分配各光学表面的光焦度.由图 2 可知,第 11 和 12 面产生了很大的球差,而第 11 和 12 面的光焦度并不大,这是因为第 11 和 12 表面的光线偏折角较大,由式(19)和(24)可知,初级球差与光焦度无关,而与光线的入射角和出射角度有关.结合图 1、图 2 和图 4 可知,第 11 和第 12 表面之所以偏折角较大,是由于第 4 和第 5 片正透镜的光焦度过大,第 6 片透镜需要承担较大的负光焦度来平衡光学系统总光焦度,这也是引起图 4 中第 13 表面承担很大光焦度的原因。

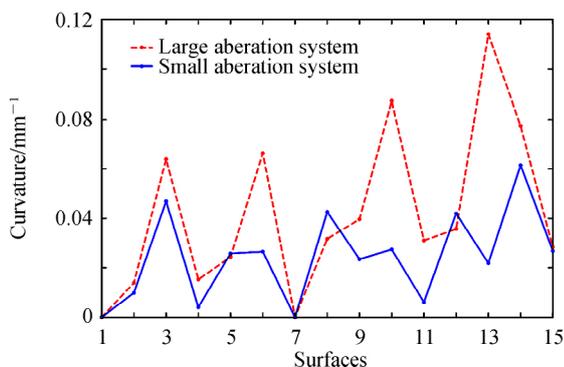


图 3 光学表面的曲率

Fig. 3 Surface curvature

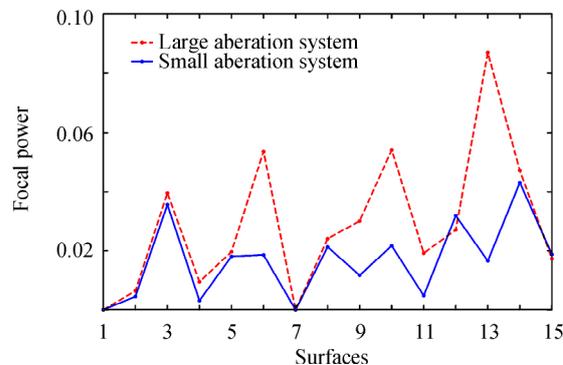


图 4 光学表面的光焦度

Fig. 4 Focal power of the surface

为了降低光学系统中各光学表面产生的初级像差,采用本文提出的方法对所设计的光学系统进行进一步的优化.由图 4 可知,第 6、第 10 和第 13 光学表面的光焦度过大,又由于光学表面的曲率与光焦度变化趋势相同,因此对所设计的光学系统的第 6、第 10 和第 13 光学表面的曲率进行进一步优化,来平衡各光学表面的光焦度。

光焦度重新分配后的纳型星传感器光学系统的二维结构如图 5.所设计的光学系统总长为 40 mm,后截距为 3.7 mm,采用七片全球面透镜.由于所设计的纳型星传感器是在卫星上使用,其工作环境比较恶劣,因此第 1 片透镜采用物理化学性质稳定的熔石英材料且第 1 面为平面。

图 3 和图 4 中的蓝折线分别为优化后光学系统中各光学表面的曲率和光焦度.通过对比图 3 中的两条折线可知,第 6、第 10 和第 13 表面的曲率得到了较好的控制,其对应表面的光焦度降低非常明显.相比优化前的光学系统,优化后的光学系统各光学表面的光焦度分配均匀且起伏较小。

优化后的光学系统各表面产生的初级像差如图 6.各表面光焦度的分配与各初级像差的对应关系如图 2 和图 6 所示,对比图 2 和图 6 可知,光焦度合理分配后第 11 和第 12 面的球差降低非常显著,各表面产生的初级像差都很小且分布较为均匀,实现了光学系统的小像差互补。

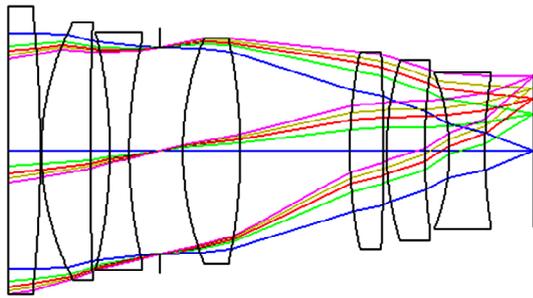


图 5 星敏传感器光学系统

Fig. 5 Optical system of the star sensor

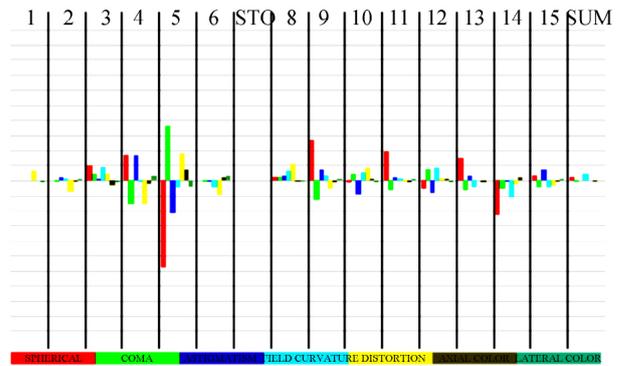


图 6 赛得像差图

Fig. 6 Seidel diagram

### 2.3 像质评价

星敏传感器在进行姿态解算时,需要准确提取星点像的位置坐标,位置坐标的误差将直接影响到星敏传感器的测姿精度,因此对恒星成像点的位置提取准确度有极高的要求.这将对星敏传感器光学系统的性能提出要求,其性能评价主要包括点列图、能量集中度、色差、畸变等,而对传递函数没有较高的要求.

纳型星敏传感器光学系统各视场的点列图如图 7,在全视场范围内弥散斑大小均匀且对称性较好,满足设计指标要求.

纳型星敏传感器光学系统各视场的能量集中度如图 8,在  $8.5 \mu\text{m}$  的半径范围内,全视场范围内的能量集中度优于 82.5%,满足能量集中度大于 80%的要求,为加工装调留有余量.

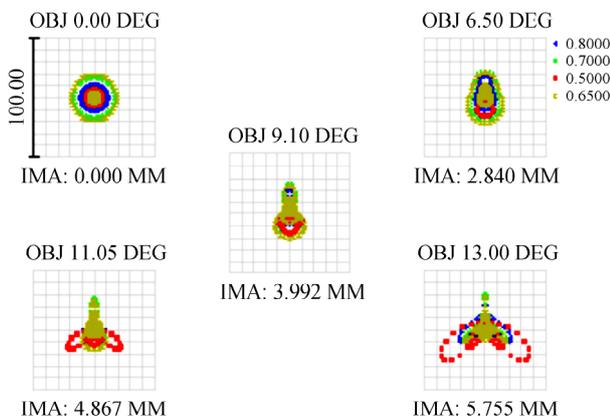


图 7 点列图

Fig. 7 Spot diagram

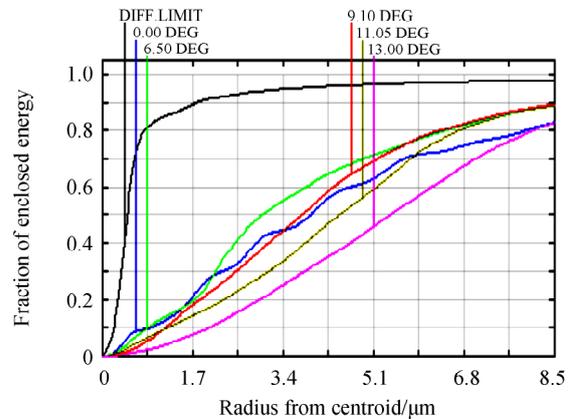


图 8 能量集中度曲线图

Fig. 8 Diffraction encircled energy

光学系统的色差引起的弥散斑质心偏移是星敏传感器测姿精度的重要误差源之一,因此必须严格校正光学系统的倍率色差.图 9 为光学系统的倍率色差曲线图,全视场内各波长相对中心波长的倍率色差小于  $1.6 \mu\text{m}$ ,满足倍率色差小于  $3 \mu\text{m}$  的要求.

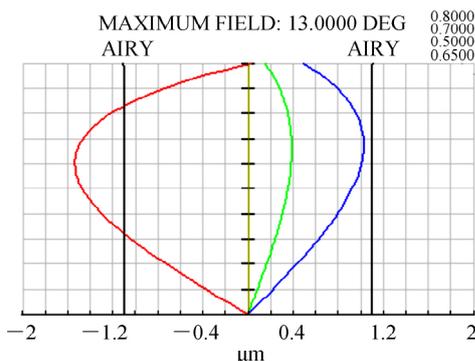


图 9 倍率色差曲线图

Fig. 9 Lateral color

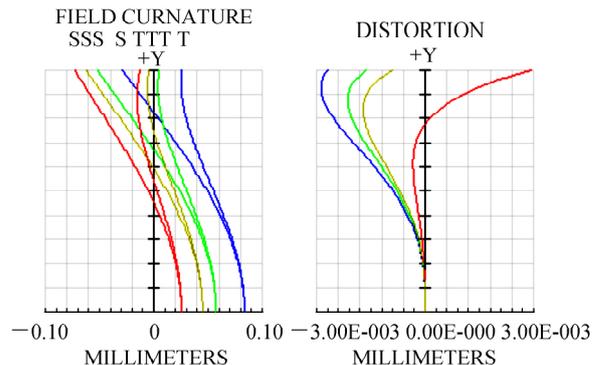


图 10 场曲和畸变曲线图

Fig. 10 Field curve and distortion

图 10 为光学系统的场曲和畸变曲线图,光学系统全视场范围内的畸变小于  $3 \mu\text{m}$ ,即相对畸变小于  $0.06\%$ ,满足绝对畸变小于  $3 \mu\text{m}$  的指标要求。

### 3 公差分析

公差分析的目的在于定义误差的类型及大小,并将之引入光学系统中,分析性能是否符合需求.公差有三种分析方法:第一种是灵敏度分析,对于给定的一批公差,计算出各评价标准的变化,也可单独对各视场和结构进行计算;第二种是反转灵敏度分析,分别对每个公差在性能方面的一个给定的最小允许减小量来计算公差;第三种是蒙特卡罗模拟,是评估公差的总体影响,模拟过程中它会产生一系列的随机 lens,它们满足指定的公差,然后再按标准评估。

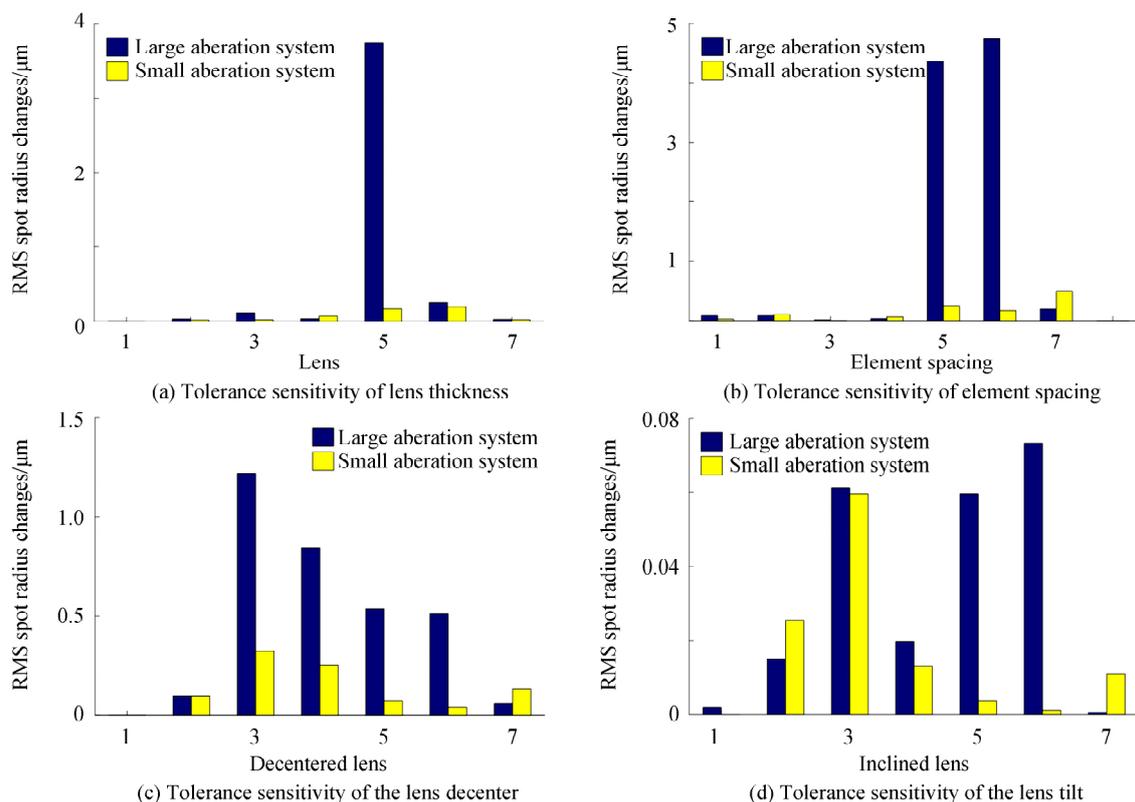
首先对光学系统进行反转灵敏度分析,分析后分别制定出合理的加工装调公差范围,然后再对本文设计的两个纳型星敏感器光学系统分配相同的公差,分别进行公差灵敏度分析和蒙特卡罗分析.纳型星敏感器光学系统的公差分配:半径公差 1 个光圈,元件厚度和元件间隔公差  $0.02 \text{ mm}$ ,表面倾斜公差  $0.02^\circ$ ,表面不规则度公差 0.1 个光圈,元件偏心公差  $0.02 \text{ mm}$ ,元件倾斜公差  $0.02^\circ$ ,折射率公差 0.001,阿贝数公差  $0.5\%$ 。

#### 3.1 公差灵敏度分析

星敏感器光学系统对成像点弥散斑的大小和形状有一定要求,因此在对光学系统的公差进行灵敏度分析时,采用均方根弥散斑半径作为评价函数,分别计算出所给公差对均方根弥散斑半径的改变量。

对优化前的大像差相互补偿的光学系统进行公差灵敏度分析,图 11 中分别为元件厚度公差的灵敏度、元件间隔公差的灵敏度、元件偏心公差的灵敏度、元件倾斜公差的灵敏度和半径公差的灵敏度图.从图 11 可知,大像差互补光学系统中的第 5 片透镜的厚度公差、第 5 和第 6 元件间隔公差对均方根弥散斑非常敏感,元件偏心公差对均方根弥散斑半径的影响也达到了微米量级,造成这一影响的主要原因是,第 4 和第 5 透镜承担的正光焦度过大。

对光焦度合理分配后的光学系统进行了相同的公差灵敏度分析,其各公差的敏感度如图 11.对比图 11 中两个系统的公差灵敏度可知,第 5 片透镜的厚度公差对均方根弥散斑半径的影响,从  $3.75 \mu\text{m}$  降低到  $0.17 \mu\text{m}$ ;第 5 和第 6 元件间隔公差对均方根弥散斑半径的影响,分别从  $4.36 \mu\text{m}$  和  $4.74 \mu\text{m}$  降低到  $0.25 \mu\text{m}$  和  $0.18 \mu\text{m}$ ;元件偏心公差的灵敏度也大幅降低.元件表面半径公差的灵敏度,相对于透镜偏心等其它公差的灵敏度要小两个数量级,因此两个系统的灵敏度变化不大。



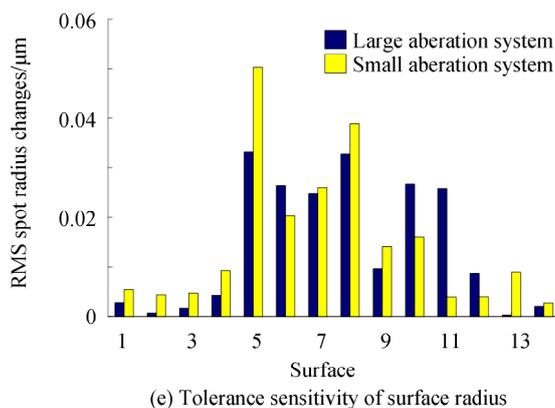


图 11 大像差互补和小像差互补光学系统公差灵敏度图

Fig. 11 Tolerance sensitivity diagram of large aberration compensation system and small aberration compensation system

对大像差互补的光学系统和小像差互补的光学系统进行公差灵敏度分析表明,通过优化光学系统中各折射表面的曲率,来合理分配光学系统的光焦度,所得的小像差互补的光学系统降低了加工装调公差的灵敏度且效果非常显著.

### 3.2 蒙特卡罗分析

对所设计的大像差互补的纳型星敏传感器光学系统进行公差分配后,采用均方根弥散斑半径作为评价函数,其评价函数标准值为  $6.710 \mu\text{m}$ ,把光学系统的后截距作为补偿量,经过 500 次蒙特卡罗分析后,可得均方根弥散斑半径的蒙特卡罗概率,如图 12 所示.从图 12 可知,均方根弥散斑半径小于  $10.35 \mu\text{m}$  的概率为 80%,模拟出装调后最劣质的镜头的均方根弥散斑半径大于  $15 \mu\text{m}$ .通过蒙特卡罗分析后可知,此光学系统经过加工装调后的能量集中度很难满足指标要求,若进一步收紧公差以满足应用需求,则会加大加工装调难度,增加镜头的研制成本.

对小像差互补的纳型星敏传感器光学系统进行相同的蒙特卡罗分析后,可得均方根弥散斑半径的蒙特卡罗概率,如图 13 所示.从图 13 可知,均方根弥散斑半径小于  $7.59 \mu\text{m}$  的概率为 80%,而大像差互补光学系统对应的蒙特卡罗概率仅约为 23%.当蒙特卡罗概率为 90%时,光焦度经过合理分配后的光学系统的均方根弥散斑半径为  $8.5 \mu\text{m}$ ,远远小于优化前的  $15.3 \mu\text{m}$ .通常镜头经过加工装调后能控制在 50%的蒙特卡罗概率范围内,经过蒙特卡罗分析后可知,此星敏传感器镜头的均方根弥散斑半径小于  $7.2 \mu\text{m}$  的概率约为 50%,满足能量集中度的要求.

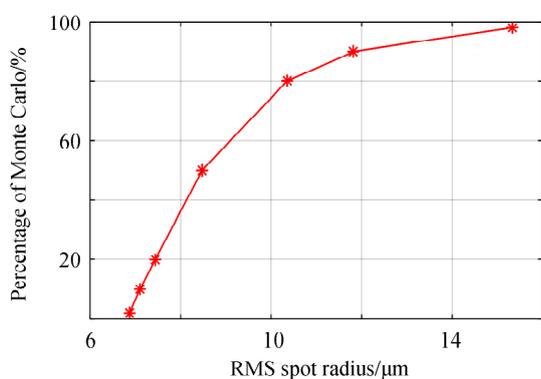


图 12 大像差互补光学系统的蒙特卡罗概率

Fig. 12 Monte Carlo percentage of large aberration compensation system

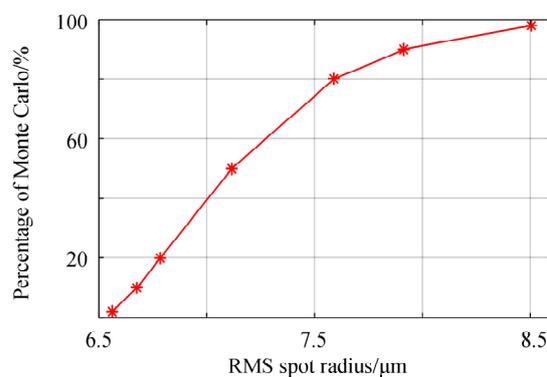


图 13 小像差互补光学系统的蒙特卡罗概率

Fig. 13 Monte Carlo percentage of small aberration compensation system

蒙特卡罗分析表明,光焦度合理分配后的系统均方根弥散斑半径小于  $7.59 \mu\text{m}$  的概率从 23% 增加到了 80%,极大的放松了公差,降低了加工装调的难度,降低了成本.

## 4 能量集中度测试

加工装调后的纳型星敏感器进行能量集中度测试是其研制阶段的重要环节,图 14 为本文搭建的能量集中度测试实验光路图.氦氖激光器发出的激光束经过中性衰减片衰减掉大部分光强,以免星敏感器的探测器上出现饱和现象;三轴空间滤波器对衰减后的激光束进行滤波,以提高激光束的质量;滤波后的激光经过扩束后入射到二维达曼光栅表面,达曼光栅衍射产生的平行光束模拟无穷远处的恒星,最后经过星敏镜头成像到探测器上.

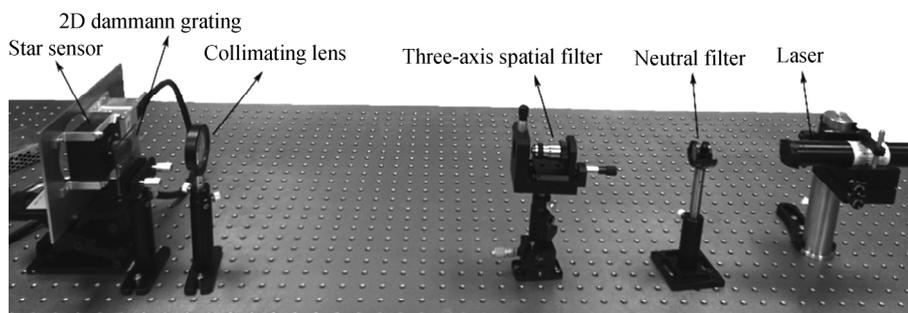


图 14 能量集中度测试实验图

Fig. 14 Experimental chart of energy concentration measurement

对采集到的像点进行质心提取,以确定星点成像的视场大小.本文采用灰度加权质心法进行质心提取,如图 15 所示,再以提取的质心为中心,以直径为  $17\ \mu\text{m}$  画圆,并计算出圆内的能量占整个成像点的能量的百分比,即能量集中度.为了保证能量集中度计算值的准确性,采用传函测试仪对能量集中度进行精确计算.

采集星敏感器全视场范围内的星点,计算出以星点质心为圆心,直径为  $17\ \mu\text{m}$  的圆中的能量占整个星点能量的百分比,如图 16 所示.从图 16 可知,在星敏感器全视场范围内,能量集中度在  $\Phi 17\ \mu\text{m}$  范围内优于  $80\%$ ,满足星敏感器的指标要求.从而验证了通过优化各光学表面的曲率进行光焦度合理分配来减小各表面产生的初级像差,从而实现降低各加工装调公差灵敏度的方法是可行的.

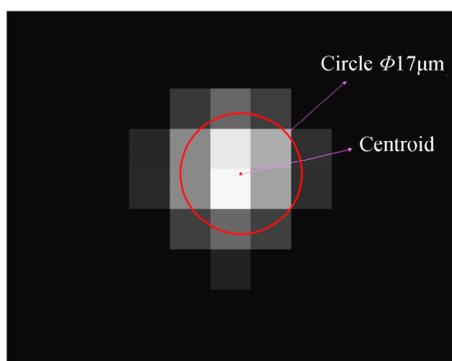


图 15 星敏感器成像点图

Fig. 15 Image point map of the star sensor

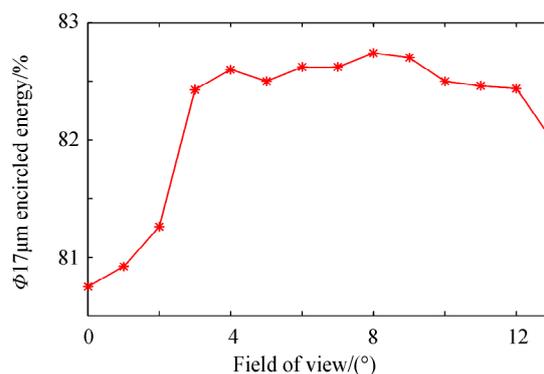


图 16 星敏感器  $\Phi 17\ \mu\text{m}$  范围内的能量集中度图

Fig. 16  $\Phi 17\ \mu\text{m}$  encircled energy of the star sensor

## 5 结论

本文通过优化光学系统各折射表面的曲率,来合理分配光学系统中各表面的光焦度,实现小像差相互补偿以降低公差的灵敏度.经过光学设计实例验证了此方法的可行性,光学系统中各敏感公差的灵敏度都得到了较好的控制,并对加工装调后的纳型星敏镜头的能量集中度进行了测试,测试结果表明星敏感器满足使用要求.本文方法只需通过 Zemax 操作数控制光学系统中各光学表面的曲率来合理分配光焦度,便可达到降低各加工装调公差灵敏度的目的.相比于通过编写特殊的光线追迹程序来追迹高级像差和光线的孔径角等方法,采用本文方法设计光学系统,优化目的性强且容易实现,具有一定的工程参考价值.

## 参考文献

- [1] YANG Hao-ming, WANG Ling-jie, WENG Zhi-cheng, *et al.* Optical system of light star tracker with wide field and large aperture[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2007, **15**(2): 151-154.  
杨皓明, 王灵杰, 翁志成, 等. 大孔径大视场小型星敏传感器光学系统[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(2): 151-154.
- [2] HAN Long, FU Qiang, WANG Chao, *et al.* Design of optical system of star sensor with wide spectrum and large relative aperture[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, **53**(1): 199-202.  
韩龙, 付强, 王超, 等. 大相对孔径宽光谱敏传感器光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, **53**(1): 199-202.
- [3] YAN Pei-pei, FAN Xue-wu. Design of optical system of very high precision star sensor with small F-number[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(9): 116-123.  
闫佩佩, 樊学武. 大相对孔径甚高精度星敏传感器光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(9): 116-123.
- [4] HE Peng-ju, LIANG Bin, ZHANG Tao, *et al.* Calibration method for wide field of view star sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1-7.  
贺鹏举, 梁斌, 张涛, 等. 大视场星敏传感器标定技术研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1-7.
- [5] WU Feng, SHEN Wei-min. Design of a catadioptric system for star sensors with wide field of view[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(2): 142-145.  
吴峰, 沈为民. 折反式大视场星敏传感器光学系统设计[J]. *光学技术*, 2004, **30**(2): 142-145.
- [6] ZHENG Yue-ying, QIAN Wei-de, DU Yan-wei, *et al.* An attitude determination method based on wide field of view star sensors[J]. *Aerospace Control*, 2008, **26**(4): 40-42.  
郑月英, 钱唯德, 杜彦卫, 等. 一种基于大视场星敏传感器的定姿方法[J]. *航天控制*, 2008, **26**(4): 40-42.
- [7] WEI M S, XING F, YOU Z. A real-time detection and positioning method for small and weak targets using a 1D morphology-based approach in 2D images[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, **75**: 18006.
- [8] ZHANG S, XING F, SUN T, *et al.* Novel approach to improve the attitude update rate of a star tracker[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(5): 5164-5181.
- [9] SUN T, XING F, YOU Z. Optical system error analysis and calibration method of high-accuracy star trackers[J]. *Sensors*, 2013, **13**(4): 4598-4623.
- [10] LIU Jian, HAO Yun-cai, CHANG Jun, *et al.* Athermalization of star tracker system[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, **30**(2): 223-225+230.  
刘健, 郝云彩, 常军, 等. 无热化星敏传感器光学系统设计[J]. *北京理工大学学报*, 2010, **30**(2): 223-225+230.
- [11] LV Bo, LIU Wei-qi, ZHANG Da-liang, *et al.* Optical system design of large entrance pupil catadioptric star sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(7): 276-283.  
吕博, 刘伟奇, 张大亮, 等. 折反射式大入瞳星敏传感器光学系统设计[J]. *中国激光*, 2014, **41**(7): 276-283.
- [12] WANG Hong, TIAN Tie-yin. Design of three line array mapping camera and its tolerance analysis[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1444-1450.  
王红, 田铁印. 三线阵测绘相机光学系统的设计和公差分析[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(7): 1444-1450.
- [13] SUN Yuan-yuan, LI Yan-qiu, CAO Zhen. Tolerance analysis of high-numerical aperture extreme ultraviolet lithographic objective[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, **52**(12): 221-227.  
孙圆圆, 李艳秋, 曹振. 超大数值孔径极紫外光刻物镜的公差分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, **52**(12): 221-227.
- [14] DENG Ping-hu, LIN Feng. Method of tolerance sensitivity reduction of optical design[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, **52**(11): 182-189.  
邓桦湖, 林峰. 光学设计中降低公差灵敏度的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, **52**(11): 182-189.
- [15] XU Wei-cai, HUANG Wei, YANG Wang. Magnification tolerancing and compensation for the lithographic projection lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 265-268.  
许伟才, 黄玮, 杨旺. 投影光刻物镜倍率的公差分析与补偿[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 265-268.
- [16] LI Meng-juan, LIAO Zhi-bo, WANG Chun-yu. Analysis and control on assemblage tolerance in small-aperture high-precision refractive optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, **36**(2): 277-281.  
栗孟娟, 廖志波, 王春雨. 小口径高精度折射式光学系统装调公差的分析与控制[J]. *应用光学*, 2015, **36**(2): 277-281.
- [17] ZHANG Yuan-jian, TANG Yong, WANG Peng, *et al.* Method of tolerance sensitivity reduction of optical system design[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(10): 127-133.  
张远健, 唐勇, 王鹏, 等. 光学系统设计中降低公差灵敏度的方法[J]. *光电工程*, 2011, **38**(10): 127-133.
- [18] BATES R. Performance and tolerance sensitivity optimization of highly aspheric miniature camera lenses[C]. *Optical System Alignment, Tolerancing, & Verification IV, Optical System Alignment, Tolerancing, and Verification IV*, 2010.
- [19] ISSHIKI M, SINCLAIR D, KANEKO S. Lens design: global optimization of both performance and tolerance sensitivity [C]. *International Optical Design Conference, International Society for Optics and Photonics*, 2006.

- [20] CHENG Xue-min, WANG Yong-tian, HAO Qun. Study on tolerance sensitivity reduction in lens optimization[C]. SPIE, 2005, 5638: 36-42.
- [21] WANG Zhi-jiang. The theoretical basis of optical design[M]. Beijing: Science Press. 1985.  
王之江. 光学设计理论基础[M]. 北京: 科学出版社. 1985.
- [22] ZHAO Yang, GONG Yan, HU Yi-ning. Method of tolerance sensitivity reduction of zoom optical system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(7): 121-125.  
赵阳, 巩岩, 胡宜宁. 变焦距光学系统降低公差灵敏度的方法[J]. *光电工程*, 2009, **36**(7): 121-125.
- [23] YU Dao-yin, TAN Heng-ying. Engineering optics[M]. Beijing: China Machine Press. 2011.  
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社. 2011.