

# 光学设计中降低公差灵敏度的方法

邓枰湖 林峰

福建师范大学光电与信息工程学院福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350007

**摘要** 在光学设计阶段, 公差的分配直接影响着镜头加工的成本以及镜头的实际成像效果, 因此在设计过程中考虑现有工艺基础, 对镜头的公差灵敏度加以控制是设计过程中的一个重要环节。根据镜头几何像差理论, 结合 Zemax 软件设计了一款大孔径高清工业短焦镜头。通过软件公差分析算法可知, 镜头后组公差灵敏度过高。通过编写的特殊光线追迹程序, 分析得出光学系统中敏感面产生公差较为严格的原因。针对孔径角和高级像差变化的关系, 提出了设置最优化光线孔径角的方法, 有效地控制了公差的灵敏度。

**关键词** 光学设计; 机器视觉; 公差灵敏度; 最优化孔径角

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.112202

## Method of Tolerance Sensitivity Reduction of Optical Design

Deng Pinghu Lin Feng

*Fujian Provincial Key Laboratory of Photonic Technology, College of Photoelectric and Information Engineering,  
Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China*

**Abstract** In the optical design stage, tolerance sensitivity control is undoubtedly a very important link. It determines the processing cost of the lens, and the imaging quality of the final product. Based on the geometric aberrations theory, a large-aperture industrial lens is designed by Zemax. The tolerance analysis shows that some surfaces of the behind group have very high tolerance sensitivity. By writing a special ray tracing program, the reason of why the tolerance of optical system is sensitive have been found. In order to reduce tolerance sensitivity, the method of optimization aperture angle is put forward. According to the relationship between senior aberration and aperture angle, the optimized value of aperture angle is found. The results show that this method can effectively control the tolerance sensitivity.

**Key words** optical design; machine vision; tolerance sensitivity; optimal aperture angle

**OCIS codes** 150.0155; 080.3620; 350.4600; 080.1005

## 1 引言

伴随着社会工业需求的提升, 电子计算机的革新, 越来越多的计算机被运用于光学设计领域, 各种光学设计软件所具备的强大功能更是为镜头的设计增添了意想不到的可能。计算机运算速度的不断突破, 极大地减轻了设计人员的工作强度, 明显地缩短了设计周期。如今工业镜头的设计生产中, 由于相机探测器像元趋于减小, 靶面逐渐增大, 镜头设计人员为了设计出满足探测器性能的高成像质量光学系统, 往往在校正像差的同时, 忽略了镜头后期镜片加工, 调装的工艺因素, 对镜头的量产造成很大的阻碍。有时因为设计公差的要求过分严格, 甚至导致设计的结果无法加工生产和设计周期的延长<sup>[1-7]</sup>。

目前, 在分析光学系统公差敏感的原因, 以及对敏感原因提出具有针对性的解决办法的讨论, 相对来说依然还是很少。在公差严格的情况下, 有的科研人员提出在设计上改变光学系统原始结构, 有的则采用非球面光学零件或者是使用更加复杂的光学结构代替敏感镜片来降低公差的灵敏度。也有相关文献提出通过控制初级像差来改变高级像差残余量, 从而来降低公差灵敏度。在机械机构方面, 也有专业人士提出通

收稿日期: 2015-01-22; 收到修改稿日期: 2015-03-04; 网络出版日期: 2015-09-15

基金项目: 福州市科技计划项目(2014-G-68)、福建省科技厅重点项目(2013H0022)

作者简介: 邓枰湖(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学成像设计方面的研究。E-mail: a143741fa@163.com

导师简介: 林峰(1968—), 男, 高级工程师, 主要从事光学成像设计方面的研究。E-mail: lfeng127@163.com

过改进镜头的机械结构来降低公差带来的影响。但是,采用复杂的光学结构替换原始结构,或者使用非球面,都不可避免地导致生产周期的延长,而且这些方法受加工工艺和设备的影响较高,极大地提高了镜头的成本。对于初级像差的控制,则显得针对性不够强。因此,在保证高成像质量的同时,降低敏感光学组件的公差灵敏度,对于光学设计人员来说也是不可忽视的环节<sup>[8-10]</sup>。

本文通过 Zemax 软件自带的宏编程语言编写了追迹镜头高级像差,以及镜头各面的光线孔径角的程序,通过分析得出导致光学零件的公差敏感的原因,并在限制这些因素的情况下,实现校正像差的同时降低该敏感组件的公差要求。该过程极大程度上的降低了组件的公差要求,极大的降低了加工成本<sup>[10-12]</sup>。

## 2 工业短焦镜头设计

### 2.1 设计参数

根据实际生产要求,8 mm 工业短焦镜头的设计参数如表 1 所示。

表 1 8 mm 工业镜头设计参数

Table 1 Design parameters of 8 mm industrial short-focus lens

Parameters	Number
Spectrum	486-66 nm
Focal length	8 mm
Back focal length	>10 mm
Object size	11 mm
<i>F</i> number	1.5
Distortion	<1%
MTF	120 lp/mm>0.3

### 2.2 系统优化设计和分析

由镜头设计参数可以知镜头的全视场角大于  $60^\circ$ ,后截距大于焦距长度,因此选用反远型结构以获得足够的视场和工作长度。按照上述光学参数要求设计这样一个短焦工业镜头,首先必须确定前后组的焦距以及正负透镜组之间的间隔,根据镜头的外形尺寸计算出的  $f_1' = -26 \text{ mm}$ ,  $f_2' = 12 \text{ mm}$ ,  $d = 25 \text{ mm}$ 。

反远型结构镜头前组的结构决定了镜头的视场大小,后组的复杂程度则限制了镜头所能达到的相对孔径大小。根据镜头成像要求,通过对镜头像差的控制优化,设计出了一个前组由 4 片透镜组成,后组由 5 片透镜组成的 9 片式反远结构,如图 1 所示。

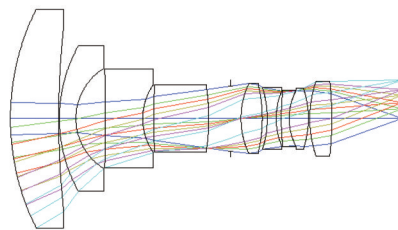


图 1 光学系统图

Fig.1 Diagram of optical system

该镜头调制传递函数(MTF)和畸变情况如图 2、图 3 所示。镜头的视场达到  $70^\circ$ ,4 个视场下的 120 lp/mm

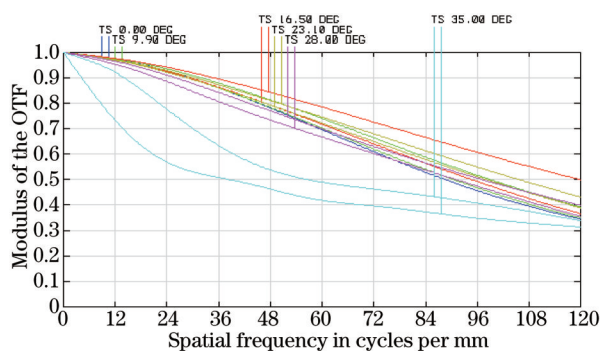


图 2 敏感镜头 MTF 图(120 lp/mm)

Fig.2 MTF of the sensitive lens (120 lp/mm)



图 3 畸变图

Fig.3 Diagram of distortion

处调制传递函数都大于0.3,畸变也控制在1%以内。由软件自带的直观图标可知,该镜头符合上述设计参数要求。

对该镜头进行蒙特卡罗公差,敏感度公差分析,分析采用4个视场在120 lp/mm处传递函数的平均值作为公差评价的参考标准,其标准值为0.30740593。设置光圈变化值为3个,厚度公差为0.03 mm,光学零件中心偏为0.015 mm,折射率公差为0.001,阿贝数公差为1。运行公差分析程序结果如表2、表3所示。

表2 蒙特卡罗公差分析结果(120 lp/mm)

Table 2 Result of Monte Carlo tolerance analysis (120 lp/mm)

Parameter	Value
90%>	0.09589730
80%>	0.11140835
50%>	0.15529749
20%>	0.18444689
10%>	0.19365994

表3 公差最敏感参数

Table 3 Value of most sensitive tolerance

Type	Value	MTF change
TTHI (11-12)	-0.03	-0.14720715
TEDX (10-11)	0.015	-0.14434635
TEDX (10-11)	-0.015	-0.14434635
TTHI (10-12)	-0.03	-0.13587286
TTHI (10-11)	0.03	-0.13486468
TEDX (12-13)	-0.015	-0.12679515

由表2、表3可以看出,虽然镜头的成像质量已经满足初始设计要求,但是却基本不满足在实际生产加工的要求。TTHI表示镜片表面的间距公差,TEDX为零件允许平行偏心公差。直观的分析结果为,镜片在第10、11、12面的厚度和偏心过于敏感,是导致镜头无法满足实际需求的主要因素。

### 3 公差敏感原因分析及公差优化

#### 3.1 敏感透镜面像差分析

##### 3.1.1 像差表示

对于一个符合工业需求的光学系统,其结构参数发生微小变化并不会导致系统成像质量的大幅度变化。在镜头设计的前期,软件根据设计人员设置优化条件,对镜头的像差以及形状尺寸,中心和边缘厚度进行了初步优化,使得最终的像差满足成像要求。镜头最后的像差由各面初级像差与高级像差的和组成,初级像差校正的好坏直接反映了系统成像质量的优劣,而高级像差校正后的残留则很大程度上影响着镜头结构参数在加工工艺上的敏感程度。初级像差的变化关系大致可以由赛得和系数表示,实际像差和赛得和系数变化的不一致,往往是因为高级像差残留不合理所造成的影响。

采用的像差计算思路,用几何光学像差的计算公式表示如下:

球差(SPHA):

$$\delta L' = L' - l. \quad (1)$$

子午彗差:

$$K_T' = \frac{1}{2}(y_a' + y_b') - y_z'. \quad (2)$$

像散:

$$x_{is}' = x_t' - x_s'. \quad (3)$$

畸变:

$$q = \frac{y_z' - y_o'}{y_o'}. \quad (4)$$

轴上色差:

$$\Delta L'_{FC} = L'_F - L'_C. \quad (5)$$

垂轴色差:

$$\Delta y'_{FC} = y'_F - y'_C. \quad (6)$$

高级像差程序编译计算方法如下:

轴上剩余球差:

$$\delta L'_{zy} = \delta L'_{0.7071} - \frac{1}{2} \delta L'_m. \quad (7)$$

子午视场高级球差:

$$\delta L'_{Ty} = \delta L'_T - \delta L'. \quad (8)$$

弧矢视场高级球差:

$$\delta L'_{Sy} = \delta L'_S - \delta L'. \quad (9)$$

全视场 0.7071 口径剩余子午彗差:

$$K'_{Th} = K'_{T0.7071h} - \frac{1}{2} K'_T. \quad (10)$$

全口径 0.7071 视场剩余子午彗差:

$$K'_{Ty} = K'_{T0.7071y} - 0.7071 K'_T. \quad (11)$$

剩余子午场曲:

$$x'_{iy} = x'_{i0.7071} - \frac{1}{2} x'_i. \quad (12)$$

剩余弧矢场曲:

$$x'_{sy} = x'_{s0.7071} - \frac{1}{2} x'_s. \quad (13)$$

### 3.1.2 像差分析和平衡

由 Zemax 软件中 Seidel aberration coefficients in wave(波前 Seidel 系数)可知镜头在像面上的初级像差校正较好,而在 10, 11, 12 面上的球差和彗差与其他面有较大的反差,在这几个面的球差有极大的变化(如表 4 所示)。因此利用 Zemax 软件的宏编程语言,对该敏感部分透镜面进行光线追迹分析。编辑的宏程序通过追迹轴上光线在每个面的实际像差,并根据实际像差值算出每个面的高级像差残留量,将敏感面的像差值返回到软件中,与原有的评价函数一起参与镜头结构参数的优化设计。

表 4 敏感透镜表面 Seidel 系数

Table 4 Seidel coefficients of sensitive surface

Surface	8	STO	10	11	12	13	14
W040	-0.0333	0	44.3066	129.2820	-138.2160	-9.6581	0.2398
W131	1.9842	0	162.8493	-203.9699	167.2656	-69.2656	4.8531

表 5、表 6 是程序追迹光线得到的镜头各面上的球差和彗差的实际值,从数据上可以看出,在实际像差得到校正的情况下,前组透镜各面产生的像差各不相同,但各表面像差变化差距并不明显,这是像差合理校正后的表现。后组第 12 面的球差有非常明显的爬升,这一突增对其后的镜组的像差校正产生了非常大的影响。因此,在此第 11、12 面的光线传播进行分析显得尤为重要。

由球差幂级数公式

$$\delta L' = A_1 u^2 + A_2 u^4 + A_3 u^6 + \cdots + A_n u^{2n}, \quad (14)$$

可知,球差随着孔径角  $u'$  (光轴和光线的夹角)的增大而增大,所以通过对镜组的孔径角对后组的光路进行分析。图 4 为光线在后组前 4 片的光路追迹,当第 11 面孔径角  $u'_{11}$  增大的时候,L1 透镜的光焦距增大,使得光线在 12 面上的入射高度  $h_1$  降低,光线 L2 透镜后偏折也将增大,也就意味着第 12 面的光焦距增大。这种正负透镜光焦距变化,有益于匹兹凡弯曲的校正,但是由于  $u'_{11}$  等于  $u_{12}$  (第 12 面的物方孔径角),所以  $u'_{11}$  的增大也将使得第 12 面球差的球差产生明显的变化。在这一环节上,软件并不能像设计人员一样做出最具实际意义的权衡选择。

表5 镜头光线追迹结果(球差)

Table 5 Result of ray tracing (SPHA)

Surface	SPHA (1 H)	SPHA (0.707 H)	Senior SPHA
1	0.4541067	0.2385564	0.0115030
2	0.1568493	0.0822606	0.0038359
3	-1.3680455	-0.7164383	-0.0324156
4	-2.2208419	-1.1630914	-0.0526704
5	-1.4145106	-0.6996152	0.0076401
6	-3.4486192	-1.7341454	-0.0098358
7	-7.7235387	-4.0848542	-0.2230849
8	-7.4264515	-3.9324474	-0.2192216
9	2.6063858	1.0283561	-0.2748368
10	2.1803975	0.8687812	-0.2214175
11	-0.4322462	-0.2878578	-0.0717347
12	-306.8321658	-234.5914341	-81.1753512
13	-6.7576439	-4.2001517	-0.8213297
14	-18.6258760	-10.2611325	-0.9481945
15	-21.1027693	-8.0739892	2.4773954
16	-1.3577381	-0.5692884	0.1095806
17	-0.0744039	-0.0054064	0.0317955
18	0.0546031	0.0577783	0.0340768

表6 镜头光线追迹结果(彗差)

Table 6 Result of ray tracing (coma)

Surface	Coma (1 W)	Coma (0.707 W)	Senior coma
1	5.8479253	3.1911883	0.2672256
2	3.6699305	2.6041354	0.7691702
3	0.9165810	1.1375709	0.6792804
4	0.2048207	0.1242764	0.0218660
5	-2.0216853	-1.2073289	-0.1964863
6	-2.2933810	-1.4556148	-0.3089243
7	-3.7701589	-2.4258101	-0.5407307
8	-5.1154824	-3.2569822	-0.6992410
9	-5.3951554	-3.5968366	-0.8992589
10	-4.7695144	-3.1780790	-0.7933218
11	-4.5157089	-3.0059174	-0.7480629
12	-4.1738443	-2.7931759	-0.7062537
13	-3.7867093	-2.5515205	-0.6581658
14	-3.4378685	-2.3512440	-0.6323098
15	-2.5656494	-1.7329595	-0.4501348
16	-2.1189031	-1.5984835	-0.5390320
17	-1.7800113	-1.3270639	-0.4370582
18	-0.0016700	0.0017075	0.0025425

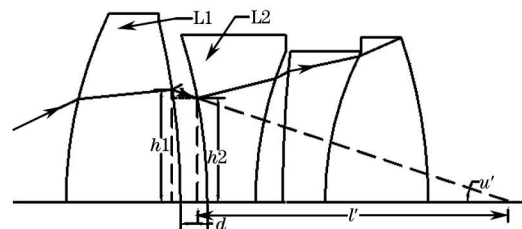


图4 后组局部光线图

Fig.4 Optical path diagram of after group

利用 Zemax 宏语言追迹镜头各面的孔径角变化, 经过统计得出最佳孔径角的大致范围, 然后通过控制孔径角的大小, 来控制敏感面的像差平衡, 直至该面公差满足实际成像要求为止。

3.1.3 公差优化结果

以工业 8 mm 高清短焦镜头的设计为例,采用程序追迹实际光线的方法计算透镜各个面像差和孔径角变化,通过计算返回值控制敏感面的像差及光线角度,对系统敏感面的参数加以优化,从而影响公差的灵敏度。这一阶段优化流程如图 5 所示。

经过公差优化得出 20 组满足公差要求的优化结果,进行曲线拟合,得出第 12 面物方孔径角  $u'$  和高级球差  $\delta L'_{sy}$  的关系图如图 6 所示。

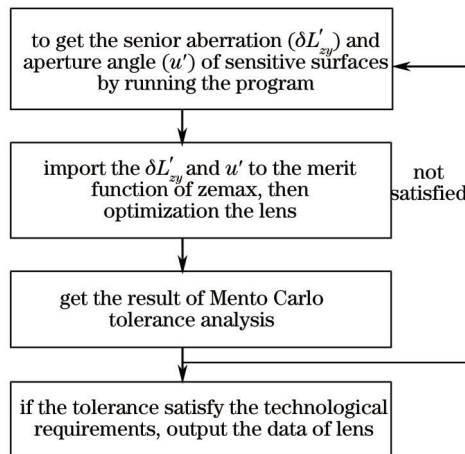


图 5 公差优化程序图

Fig.5 Program map of tolerance optimization

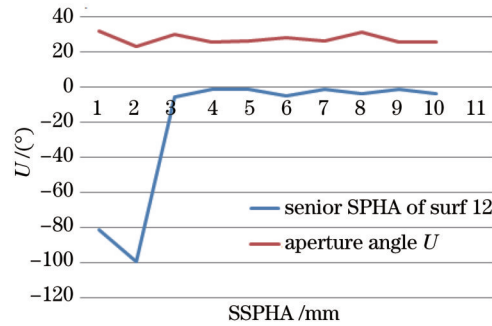


图 6 第 12 面物方孔径角  $u'$  和高级球差  $\delta L'_{sy}$  变化趋势

Fig.6 Trends of aperture angle  $u'$  and sensor spherical aberration  $\delta L'_{sy}$

由图 6 可知,镜头的物方孔径角在  $25.8^\circ$  左右,第 12 面的高级球差较小<sup>[13]</sup>。因此,再将数值返回函数中求最优解,得出优化结果如图 7、图 8 所示。

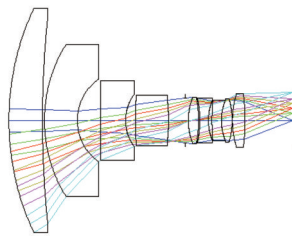


图 7 公差宽松的光学系统图

Fig.7 Optical system with better tolerance

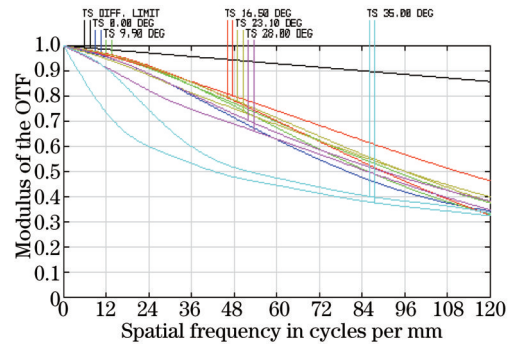


图 8 镜头 MTF 图(120 lp/mm)

Fig.8 MTF of the lens (120 lp/mm)

经过最后的优化控制,透镜后组的像差及该透镜孔径角分布计算结果如表 7、表 8 所示:

表 7 镜头光线追迹结果(球差)

Table 7 Result of ray tracing (SPHA)

Surface	SPHA (1 H)	SPHA (0.707 H)	Senior SPHA
9	2.0485306	0.8365494	-0.1877159
10	1.5725502	0.6643049	-0.1219703
11	-0.5256875	-0.2634741	-0.0006304
12	-33.1763797	-17.9768486	-1.3886588
13	-73.3490786	-27.3904800	9.2840593
14	-12.8925892	-6.5427986	-0.0965040
15	-93.5498541	-24.2234405	22.5514865
16	-2.1872759	-0.8359494	0.2576886
17	-0.1539220	-0.0141325	0.0628285
18	0.0215576	0.0704986	0.0597198

表8 光线追迹的各面角度值

Table 8 Angle of every surface by ray tracing

Surface	$I$	$I'$	$U$	$U''$
9	7.1017	7.1017	-7.1017	-7.1017
10	30.4867	15.6304	-7.7017	7.7547
11	-18.7193	-37.1798	7.7547	26.2151
12	-40.3514	-22.5421	26.2151	8.4059
13	15.0746	26.0561	8.4059	-2.5756
14	7.5626	4.0869	-2.5756	0.9001
15	22.4824	28.1461	0.9001	-4.7636
16	-11.7812	-17.7973	-4.7636	1.2525
17	12.8568	6.7865	1.2525	7.3228
18	-12.8654	-24.7887	7.3228	19.2460

蒙特卡罗公差分析和敏感度公差分析结果满足要求,如表9、表10所示。

表9 蒙特卡罗公差分析结果

Table 9 Result of Monte Carlo tolerance analysis

Parameter	Value
90%>	0.15421117
80%>	0.15987049
50%>	0.19476041
20%>	0.21774499
10%>	0.22441342

表10 公差最敏感参数列表

Table 10 Value of most sensitive tolerance

Type	Value	MTF change
TTHI (11-12)	0.03	-0.06537928
TTHI (10-11)	-0.03	-0.05885178
TTHI (11-12)	-0.03	-0.05706643
TEDX (10-11)	-0.015	-0.05428720
TEDX (10-11)	0.015	-0.05428719
TTHI (10-11)	0.03	-0.05126768

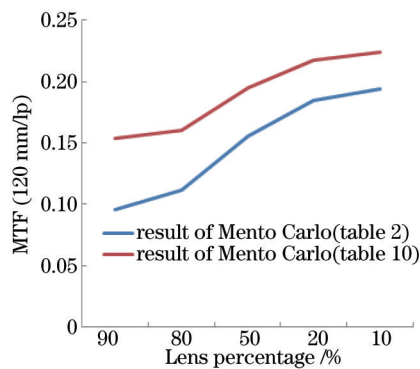


图9 蒙特卡罗公差优化前后对比图(120 lp/mm)

Fig.9 Comparison between the two results of Mento Carlo tolerance analysis (120 lp/mm)

由表1、表4可知,经过优化后,由Zemax蒙特卡罗公差分析保存的随机抽样的镜头数据可得,90%的镜头在120 lp/mm出的调制传函数值由0.09589730变成了0.15421117,增加了将近2/3,也就是说实际生产的镜头有90%能够达到MTF在0.1542以上的较高成像质量。此外,从前后两个镜头的蒙特卡罗公差分析对比图也不难看出,将孔径优化在最佳值附近优化后,镜头考虑公差后的成像质量有显著的提高,该方法在降低公差灵敏度的方面具有较好的效果。

## 4 结 论

实验证明,设计一款成像质量好、公差分配宽松的光学系统是一个复杂的过程,完全依靠软件自身的

性能来设计光学系统是远远不够的。以一款大孔径高清工业短焦光学系统的设计为例,通过光线追迹方法,分析了镜头中导致透镜公差敏感的原因。特别针对公差敏感的原因,提出了通过引入宏程序控制光线在各表面的高级像差和孔径角,并通过统计敏感面的像差和孔径角的关系得出最合理的孔径角取值范围,降低了敏感表面的公差的灵敏度,有效的保证了光学系统在实际生产加工后依然能有较好的成像质量。该思路方法不仅适用于工业短焦镜头,它在其他光学系统也同样有效,使得光学设计人员在设计镜头的同时也能有针对性地够兼顾公差的分析 and 分配。

### 参 考 文 献

- 1 Mark Jeffs. Reduced Manufacturing sensitivity in multi-element lens system[J]. SPIE, 2002, 4832: 104-113.
- 2 Chen Linghua, Zhang Yixin. Aberration analysis of multibeam scanning and imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(1): 127-132.  
陈玲华, 张逸新. 多光束扫描成像系统的像差分析[J]. 光学学报, 2000, 20(1): 127-132.
- 3 Xue Donglin. Manufacture and application of large aperture standard transmission spheres[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0616001.  
薛栋林. 大孔径标准球面镜组研制与应用[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0616001.
- 4 Wang Hong, Tian Tiejun. Design of three line array mapping camera and its tolerance analysis[J]. Opt Precision Eng, 2011, 19(7): 1444-1449.  
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): 1444-1449.
- 5 Wang Zhijiang. The Theoretical Basis of Optical Design: The Second Edition[M]. Beijing: Science Press, 1985: 78-92.  
王之江. 光学设计理论基础: 第二版[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 78-92.
- 6 Xu Jinyong, Sun Peijia. Optical Design[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1989: 100-122.  
徐金镛, 孙培家. 光学设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989: 100-122.
- 7 Yang Lihua, Fan Xuewu, Zou Gangyi. Design of large-aperture camera lens working in wide spectral range[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 925-928.  
杨利华, 樊学武, 邹刚毅. 宽谱段大口径透射式摄影镜头设计[J]. 应用光学, 2009, 30(6): 925-928.
- 8 Yuan Xucang. Optical Design[M]. Beijing: Science Press, 1983: 95-110.  
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 95-110.
- 9 Zhao Yang, Gong Yan, Hu Yining. 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.
- 10 Liu Jianfeng, Wang Huijun, Sun Dewei, *et al.*. On-orbit adjustment and compensation for large aperture optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0322005.  
刘剑锋, 王慧军, 孙德伟, 等. 大口径光学系统在轨调整补偿能力[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0322005.
- 11 Dong Wei, Zhou Jingsong, Nie Yunfeng, *et al.*. Optical design of airborne hyperspectral imaging system with wide field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0511007.  
董 伟, 周锦松, 聂云峰, 等. 机载大视场高光谱成像系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0511007.
- 12 Yang Xinjun, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang, *et al.*. Aberration properties of the decentered and tilted optical systems[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(11): 1658-1662.  
杨新军, 王肇圻, 母国光, 等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性[J]. 光子学报, 2005, 34(11): 1658-1662.
- 13 Zhang Dengchen, Yu Daoyin. The Pragmatic Optical Design Method and Modern Optical System[M]. Beijing: China Machine Press, 1995: 126-139.  
张登臣, 郁道银. 实用光学设计方法与现代光学系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 126-139.

栏目编辑: 韩 峰