

文章编号 2097-1842(2022)05-0863-15

## 光学系统降敏设计方法综述

孟庆宇<sup>1\*</sup>, 秦子长<sup>1,2</sup>, 任成明<sup>1,2</sup>, 戚允升<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 光学系统性能的有效实现不仅依靠成像质量的设计结果, 还受制于光学加工公差、装配公差、环境公差等多种公差的可实现性。具备低误差敏感度特征的光学系统, 公差精度要求宽松, 可以更好地抵抗误差引起的像质退化, 在降低制造成本的同时, 有效地提高了光学系统的可实现性, 因此降低误差敏感度是光学系统设计应考虑的重要环节。本文分析了光学系统误差敏感度研究现状, 总结了典型的光学系统降敏方法, 并对这些方法在光学系统设计中的应用进行概述。最后, 对光学系统低误差敏感度设计方法的未来发展进行了展望。

**关键词:** 误差敏感度; 降敏设计方法; 光学系统设计

中图分类号: O439 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0096

## Review of optical systems' desensitization design methods

MENG Qing-yu<sup>1\*</sup>, QIN Zi-chang<sup>1,2</sup>, REN Cheng-ming<sup>1,2</sup>, QI Yun-sheng<sup>1,2</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)*

*\* Corresponding author, E-mail: mengqy@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** The effective realization of desired optical system performances depends not only on the design results of imaging quality, but also on the realizability of various tolerances such as optical manufacturing tolerances, assembly tolerances, and environmental tolerances. An optical system with low error sensitivity relaxes tolerance requirements, which can better resist image quality degradation disturbed by errors. While reducing manufacturing costs, it effectively improves the realizability of an optical system, thereby reducing error sensitivity. It is an important link that should be considered in optical system design. This paper analyzes and summarizes the research status of optical system error sensitivity, summarizes typical optical system desensitization methods, and summarizes the application of these methods in optical system design. Finally, potential future development directions for low error sensitivity design methods for optical systems are provided.

**Key words:** error sensitivity; desensitization design method; optical system design

收稿日期: 2022-05-10; 修订日期: 2022-06-14

基金项目: 中国科学院青年创新促进会(No. 2019219); 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划(No. YSBR-066); 国家自然科学基金(No. 61705220)

Supported by the Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences (No. 2019219); CAS Project for Young Scientists in Basic Research, Grant (No. YSBR-066); National Natural Science Foundation of China (No. 61705220)

## 1 引言

获得更高的技术指标、实现更好的成像性能是光学系统发展不变的追求。面向应用需求的不断提升,光学系统向着大尺度、高精度、复杂化等方向发展,由此给光学系统带来了本征像差校正难度大、失调衍生像差量级大、系统集成装调复杂度高等相应问题。光学系统误差敏感度变高,使误差分配越发严苛,给光学系统的实现带来了较高的制造成本与时间消耗<sup>[1]</sup>。

反射式光学系统作为大尺度光学系统的代表,虽然构型相对简单,光学元件数量少,但像差随着焦距与口径的增大呈幂指数增长,导致微小的误差扰动即会引起像质的大幅退化。以光刻物镜为代表的一些应用复杂光学曲面、采用离轴或非共轴方案的光学系统,虽然尺度不大,但是由于极限像质要求,光学元件的初始装调误差要求即小于  $1\ \mu\text{m}$  和  $1''$ 。高精度的误差要求,给先进光学仪器的制造带来了巨大挑战,也带来了巨大的消耗<sup>[1-4]</sup>。

无论反射式光学系统还是透射式光学系统,光学系统的设计与优化,都不能单一追求对像差的完美校正,应该同步兼顾良好的工程可实现性。误差敏感度作为表征光学系统对误差或失调扰动的敏感程度,是衡量光学性能能否从设计到实现的重要指标。具备低误差敏感度特征的光学系统不仅可以更好地抵抗由光学元件直接误差或间接误差引起的像质退化,而且可以在光学系统实现过程中有效节约时间和经济成本<sup>[5,6]</sup>。因此,开展对光学系统低误差敏感度设计(降敏设计)方法的研究,对光学系统设计与实现具有重要的理论和现实意义。

本文介绍了光学系统低误差敏感度设计方法的研究现状与进展,对直接优化法、参数控制法、像差控制法等 5 大类数 10 种典型的设计方法进行了分类与总结,并对一些设计方法的应用情况进行了概述。最后,对光学系统低误差敏感度设计的未来发展进行讨论与展望。

## 2 直接优化法

直接优化法是光学系统降敏设计方法中一类

最为简明的设计方法。该类方法属于定性设计方法,设计过程中并不探寻、关注与误差敏感度具有深层数学机理关系的光学系统特征参数,只需要寻找与光学系统误差敏感度具有高相关趋势的条件因素,通过对条件因素的控制,获得低误差敏感度的光学系统。

### 2.1 全局优化法

全局优化法是被较早提出的光学系统低误差敏感度设计方法。全局优化法采用大样本优化迭代,从大量的设计样本中选取公差鲁棒性较好的系统,直接获得低误差敏感度光学系统。由于该方法缺少误差敏感度理论作为强指导,因此获取设计结果的效率低且具有盲目性。但由于该方法具备一定的实用性,且无需具备较多的误差敏感度理论基础,在工程设计中仍被采用。

20 世纪 80 年代末到 90 年代初, KUPERT, FORBES G, JONES A 等人提出了全局优化法<sup>[7-11]</sup>。全局优化法可以在一定范围内搜索符合条件的光学系统的最优解。2006 年, Optical Research Associates(ORA) 的 McGuire 提出了一种可以降低镜头制造难度的设计方法,方法的核心是全局优化法,但不同的是, McGuire 通过全局搜索优化获得一组光学系统后,将各种误差引起的光学系统波前误差 (Wave Front Error, WFE) 变化量进行排序,并与平均值进行比较,找到对误差敏感度影响最大的误差类型,再针对该误差类型进行光学系统优化,获得敏感度较低的系统。图 1 为全局搜索后的光学系统误差敏感度排序,其中显示对误差敏感度影响最大的误差类型为偏心<sup>[12]</sup>。

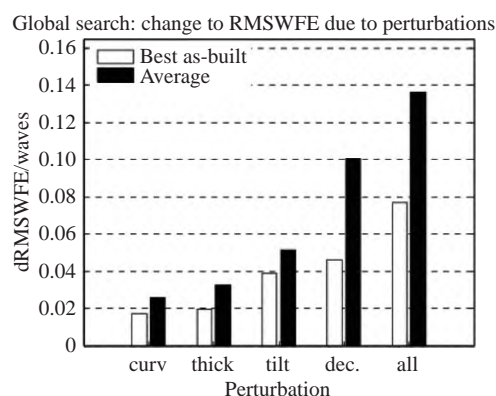


图 1 光学系统不同误差类型的敏感度表现<sup>[12]</sup>

Fig. 1 Sensitivity performance of different error types of optical systems<sup>[12]</sup>

2018 年, 清华大学的刘新宇基于构造-迭代 (Construction-Iteration, CI) 设计方法, 对离轴三反光学系统的初始结构遍历求解并获得若干个像质优化结果, 对光学系统中的每个光学元件单独施加位置误差扰动, 并对扰动引起的波像差变化量进行计算, 获得光学系统的误差敏感

度。通过对比分析, 对光学元件位置误差敏感度高的光学系统进行剔除, 位置误差敏感度低的光学系统予以保留, 进而获得了具有低误差敏感度的离轴三反光学系统, 该方法的设计流程如图 2 所示<sup>[13]</sup>。

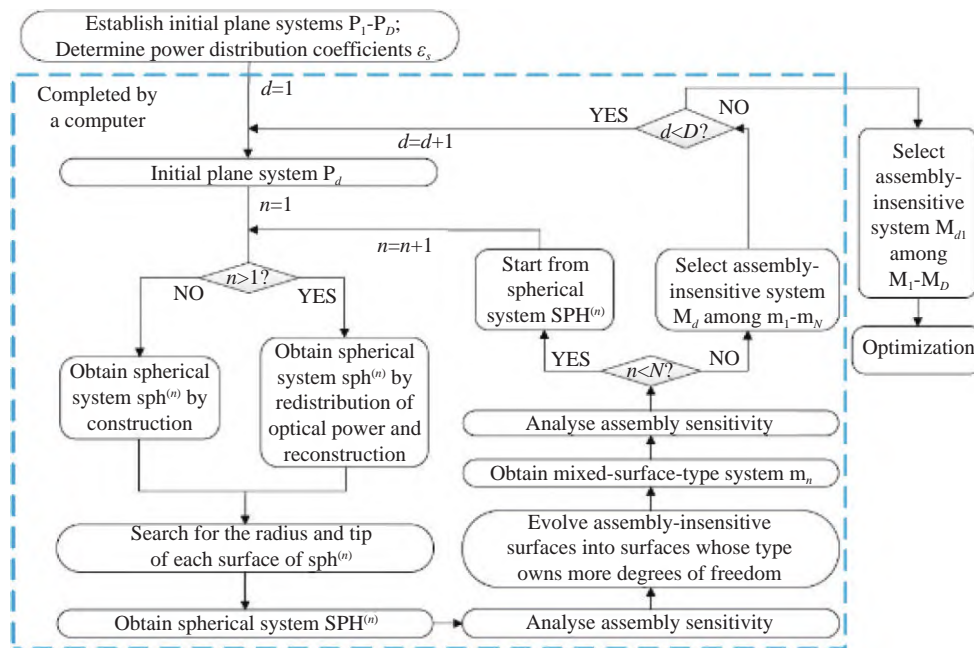


图 2 搜索低误差敏感度离轴三反光学系统初始结构的设计流程图<sup>[13]</sup>

Fig. 2 Design flow chart for searching the initial structure of an off-axis three-mirror optical system with low error sensitivity<sup>[13]</sup>

## 2.2 多重结构法

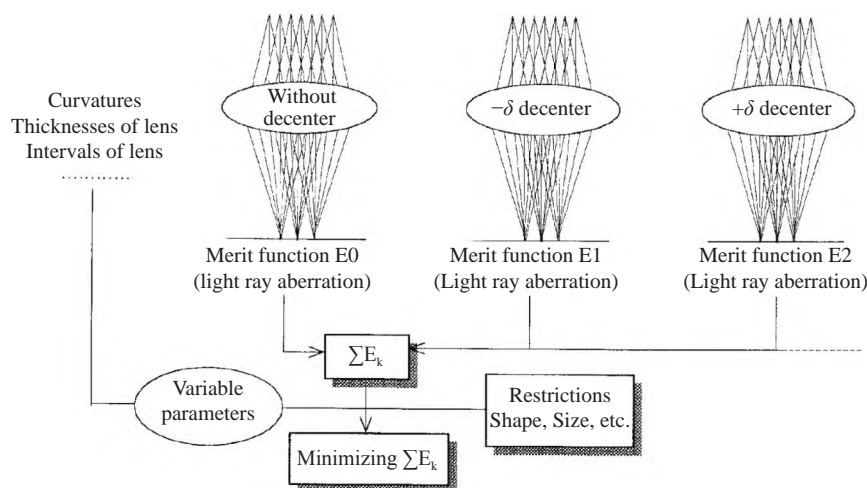
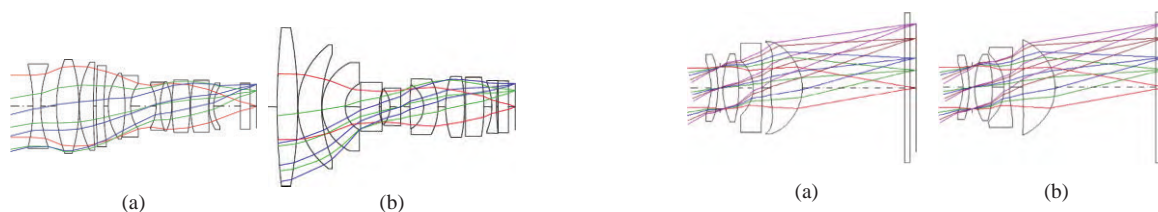
多重结构法是在原始光学系统结构的基础上, 建立以多种目标误差类型、误差量级为扰动特征的多重结构, 模拟生产加工过程中光学系统期望容忍的误差类型与误差量级, 对原始光学系统结构与具有误差扰动的多重结构进行同步优化, 使所有结构的成像质量均在可接受的范围之内, 即可获得能够容忍一定误差的光学系统。

2003 年, 日本住友电气工业株式会社的 Fuse 获得了可用于光学系统降敏设计的通用程序专利。在优化设计过程中, 对一个光学系统建立多重结构, 通过为每个公差值生成正、负扰动, 同时优化光学系统成像质量与敏感度, 可获得在误差扰动范围内具有良好成像质量的光学系统, 有效降低了光学系统的误差敏感度。该方法的设计思想如图 3 所示<sup>[14]</sup>, 将误差  $\pm\delta$  分配到对应参数上,

建立与误差分配状态对应的评价函数, 将光学系统误差分配状态下的评价函数与原始状态下的评价函数加权求和, 生成一个综合评价函数, 应用综合评价函数优化光学系统, 即可获得误差分配范围内误差敏感度低的光学系统。

在实际应用中, 当对曲率、倾斜、厚度和偏心生成误差时, 一个 4 片透镜的系统至少需要 64 种配置, 优化计算量十分巨大。

2006 年, ORA 的 John R. Rogers 开发了比 Fuse 方法计算成本较低版本。Rogers 将多重结构法与全局优化法相结合, 以一个镜头为例进行了优化设计, 使用包含误差的多重结构模型进行全局优化, 在 282 个结果中选出误差表现最优的系统, 对其进行进一步优化, 获得误差敏感度低的最优系统。降敏设计前后的系统结构如图 4 所示, 与初始结构相比, 光学系统的误差敏感度下降了 81%<sup>[15]</sup>。

图 3 多重结构法示意图<sup>[14]</sup>Fig. 3 Schematic diagram of the multiple structure method<sup>[14]</sup>图 4 设计实例: (a)降敏设计前; (b)降敏设计后<sup>[15]</sup>Fig. 4 Design example: (a) before desensitization design; (b) after desensitization design<sup>[15]</sup>

### 2.3 自由曲面面型优化法

得益于计算机性能和加工能力的提升,光学自由曲面逐渐被应用到各种领域光学系统中。在自由曲面的设计与应用中,研究人员发现应用某些类型的自由曲面后,光学系统的误差敏感度将得到不同程度的改善。

2012年,美国Rochester大学的Bin Ma等人应用普通光学非球面与Q-type自由曲面对比设计了手机照相物镜<sup>[16-17]</sup>,分别如图5(a)与图5(b)所示。公差分析表明,在对第4块透镜施加 $30\ \mu\text{m}$ 的偏心误差后,应用Q-type面型的光学系统的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)下降量明显小于应用普通非球面面型的光学系统,如图5(c)与图5(d)所示。在制造过程中透镜元件厚度变化 $10\ \mu\text{m}$ 导致的WFE变化如图5(e)与图5(f)所示,可见,应用Q-type面型时光学系统的波像差变化更小。这些对比表明在该设计中,Q-type面型自由曲面对降低光学系统误差敏感度发挥了重要作用。

2014年, Kevin P. Thompson等人设计了一种

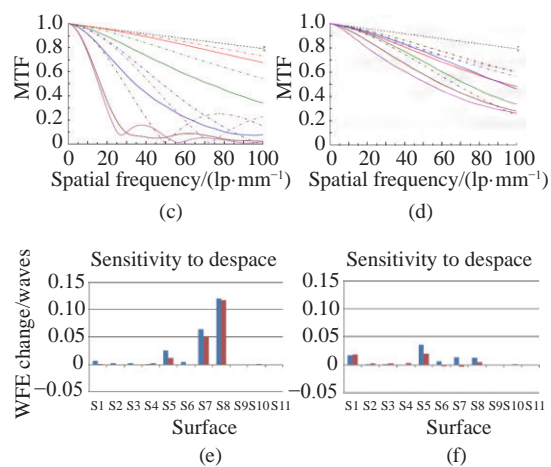


图 5 (a)应用非球面的手机相机设计布局图; (b)应用Q-type自由曲面手机相机设计布局图; (c)应用非球面的镜头元件4偏心 $30\ \mu\text{m}$ 后的MTF表现; (d)应用Q-type自由曲面的镜头元件4偏心 $30\ \mu\text{m}$ 后的MTF表现; (e)应用非球面及(f)应用Q-type自由曲面的镜头元件厚度变化 $10\ \mu\text{m}$ 的WFE<sup>[17]</sup>

Fig. 5 (a) Mobile phone camera design layout with Power Series aspheres; (b) mobile phone camera design layout with Q-type aspheres; (c) MTF of Lens with Power Series aspheres element 4 with decenter of  $30\ \mu\text{m}$ ; (d) MTF of Lens with Q-type aspheres element 4 with decenter of  $30\ \mu\text{m}$ ; WFE of the lenses with (e) Power Series aspheres and (f) Q-type aspheres with a change in element thickness of  $10\ \mu\text{m}$ <sup>[17]</sup>

应用了自由曲面的非共轴三反射镜光学系统, 如图 6 所示。与传统的非球面离轴三反光学系统相比, 该非共轴系统具有更低的装调敏感度<sup>[18-19]</sup>。

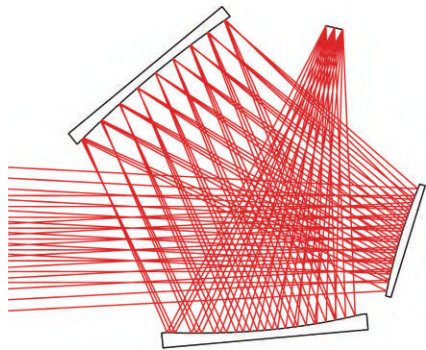


图 6 非共轴自由曲面三反射镜光学系统<sup>[19]</sup>

Fig. 6 Non-coaxial freeform three-mirror reflective optical system<sup>[19]</sup>

在其他应用 Q-type 自由曲面进行光学系统设计并得到降敏收益的方案中, 长春理工大学的李闯等人于 2017 年设计了一款包含 Q-type 自由曲面的电子内窥镜光学系统, 通过与非球面系统的误差敏感度对比分析显示, 包含 Q-type 非球面的系统具有较低的偏心与厚度误差敏感度<sup>[20]</sup>。

### 3 参数控制法

光学系统中的某些参数与误差敏感度高度相关, 且这些参数与误差敏感度具有明显的规律或明确数学关系, 研究人员开展了一系列的光学系统误差敏感度理论研究, 并建立了以参数控制为核心的低误差敏感度设计方法。

#### 3.1 光线角度优化法

2003 年至 2006 年, 日本的 Isshiki 提出了称为“ $\theta$ -segmentation”的光学系统降敏设计方法<sup>[21-22]</sup>。该方法对光线在每一个光学表面的入射角与折射角进行控制, 构建了以入射角平方和为核心的误差敏感度控制函数  $\Phi$ 、入射角与折射角方和根为核心的误差敏感度控制函数  $\theta$ , 在光学系统优化设计中对该函数进行控制, 降低光学系统误差敏感度。函数表达式如下:

$$\Phi = \frac{\sum_{s=1}^k i_s^2}{s}, \quad (1)$$

$$\theta = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^k (i_s^2 + r_s^2)}{2k}}. \quad (2)$$

在优化过程中, Isshiki 还结合高斯逃逸函数的全局优化方法 (GE), 不断扩展优化空间, 探索更为宽泛的  $\theta$  值优化空间, 不断降低  $\theta$  数值, 达到降低误差敏感度的目的。

Isshiki 应用该方法以一个焦距为 50 mm, 相对孔径为 1:1.4 的照相物镜进行降敏设计, 图 7(a)、7(b) 分别为全局优化前后的镜头二维图, 图 7(c) 为全局优化前后各表面的入射角变化情况, 图 7(d) 为误差敏感度分析, 在优化设计后, 光学系统的误差敏感度得到了有效降低。

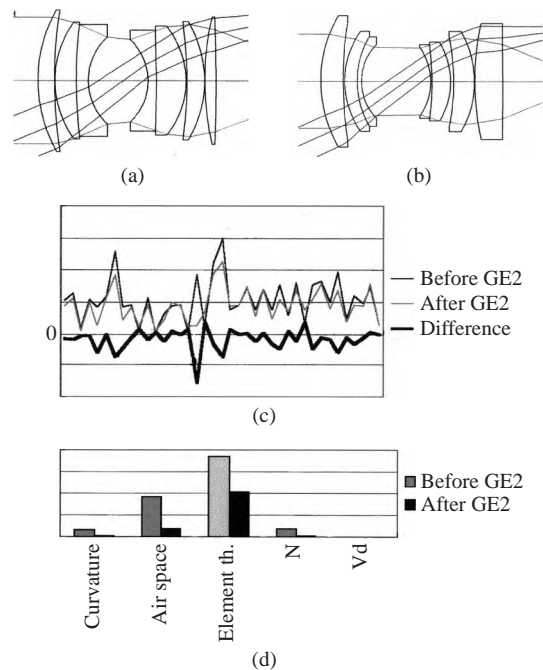


图 7 降敏设计与分析: (a)优化前镜头; (b)优化后镜头; (c)优化前后光线入射角; (d)优化前后误差敏感度统计<sup>[21]</sup>

Fig. 7 Desensitization design and analysis: (a) lens sections before GE2; (b) lens sections after GE2; (c) incident angles before and after GE2 and their differences; (d) statistical sensitivity to errors before and after GE2<sup>[21]</sup>

2002 年, Thales 光学公司的 Jeffs 也采用了类似的光线角度控制方法对光学系统误差敏感度进行控制<sup>[23]</sup>, 在 Jeffs 所构建的优化评价函数中, 直接控制参数是光学表面入射光线与出射光线的余弦值。

2009 年,应用光学国家重点实验室的赵阳等人应用 Isshiki 提出的误差敏感度控制函数  $\theta$  对一个可见光波段连续变焦的光学系统进行了设计<sup>[24]</sup>,分析结果表明,降敏优化前后,光学系统的误差敏感度得到了改善。

2021 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(简称长春光机所)的秦子长等人以反射式光学系统为模型,通过严格的理论推导,获得了光线入射角与倾斜误差所致光程差变化量之间的数学解析关系,提出了关于光学系统倾斜误差敏感度的评价函数,并建立了可降低倾斜误差敏感度的离轴三反射镜光学系统设计方法<sup>[25]</sup>。设计方法中将对光线入射角与反射角的控制转化为对光线与反射镜交点处镜面斜率的控制。为了避免光学系统出现某个反射镜误差敏感度过高、某个反射镜误差敏感度又过低的情况,还提出了均匀分配光学系统误差敏感度的方法。在一个离轴三反光学系统降敏设计示例中,经过 11 次的优化,误差敏感度得到了有效降低。降敏设计过程中系统 WFE 与评价函数  $S$  的变化关系如图 8 所示,设计结果对比如图 9 所示。

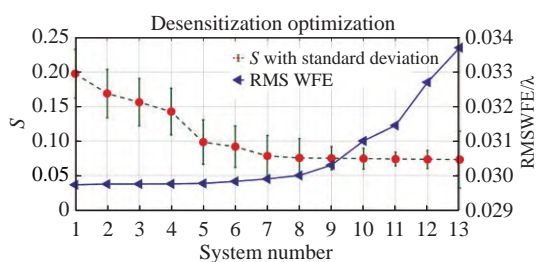


图 8 降敏设计过程 WFE 与误差敏感度评价函数  $S$  的变化情况<sup>[25]</sup>

Fig. 8 Variation of WFE and error sensitivity evaluation function  $S$  in the desensitization design process<sup>[25]</sup>

不同于普遍地为了降低光学元件位置误差敏感度而减小光线入射角的方法,2019 年,清华大学的邓玉婷基于 CI 自由曲面设计方法,提出了通过增大光线入射角来减小光学系统面形误差敏感度的设计方法,并以一个离轴三反光学系统为例进行了设计。结果表明,应用该降敏方法获得的光学系统三面反射镜的面形误差敏感度得到了降低,如图 10 所示<sup>[26]</sup>。

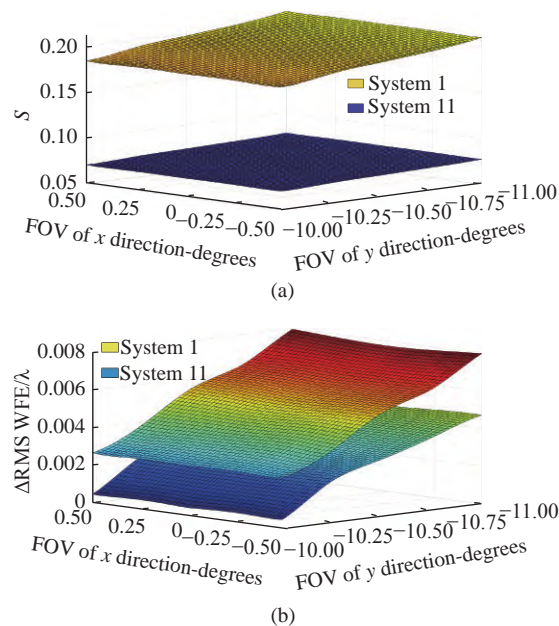


图 9 降敏设计前后变化量对比; (a) $S$ ; (b)WFE<sup>[25]</sup>

Fig. 9  $S$  and  $\Delta$ RMS WFE before and after desensitization

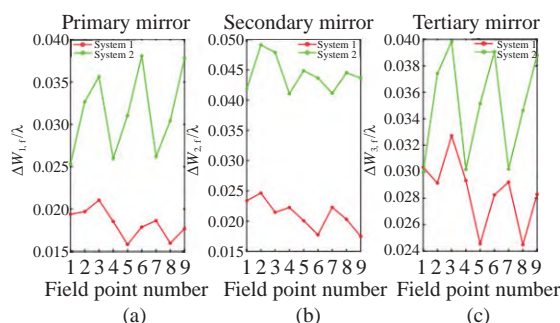


图 10 光学系统面形误差敏感度曲线<sup>[26]</sup>

Fig. 10 Sensitivity curve of the optical systems to surface figure errors<sup>[26]</sup>

### 3.2 离轴量控制法

2018 年,长春光机所的孟庆宇等人对离轴光学系统受到误差扰动后产生的光程变化进行分析,确定了离轴量是影响离轴光学系统误差敏感度的重要因素,基于理论分析提出了面向离轴反射式光学系统的调整-优化-评估(Adjustment-Optimization-Evaluation, AOE)降敏设计方法<sup>[27]</sup>。在设计方法中,以反射镜离轴量为调整量,以光学系统成像质量和误差敏感度为评价标准,通过对离轴量、成像质量和误差敏感度迭代分析与设计,获得像质良好且误差敏感度较低的离轴三反光学系统。采用该设计方法设计了焦距为 3600 mm,相对孔径为 1:15,视场角为  $1^\circ \times 2^\circ$  的离轴三反系统。设计结果分析显示,设计过程中对离轴量数值的不断降低有效降低了系统误差敏感度,如图 11 和图 12 所示。

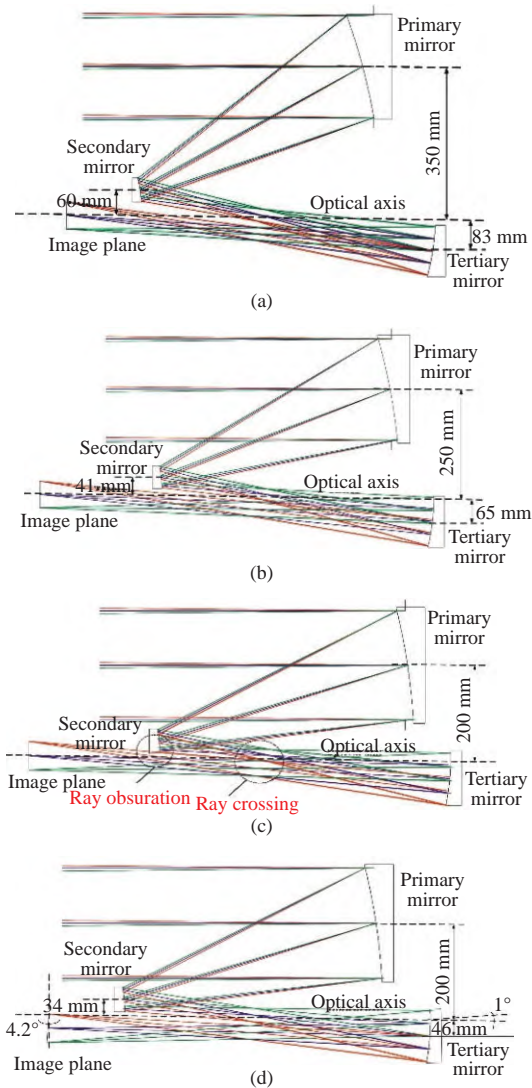


图 11 AOE 降敏设计过程中的光学系统: 离轴量(a)350 mm; (b)250 mm; (c)200 mm; (d)200 mm, 倾斜三镜和像面消除光线遮拦和光线交叉<sup>[27]</sup>

Fig. 11 Optical system in AOE desensitization design process: off-axis magnitude (a) 350 mm; (b) 250 mm; (c) 200 mm; (d) 200 mm, tilt tertiary mirror and image plane to eliminate ray obscuration and ray crossing<sup>[27]</sup>

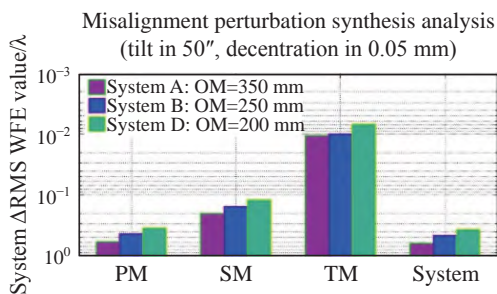


图 12 失调扰动引起的 RMS WFE 改变量<sup>[27]</sup>

Fig. 12 RMS WFE increment caused by misalignment perturbations<sup>[27]</sup>.

### 3.3 光学元件形状参数控制法

1998 年, 美国亚利桑那大学的 Sasian 和 Descour 提出了表征透镜特征的形状参数  $S$  和  $W$ , 其中  $S$  可用来衡量各光学表面是否满足不晕条件或是否与光阑同心, 用于表征各光学表面的对称度。其表征的是各光学表面加权光焦度平方平均数的平方根<sup>[28]</sup>, 一些设计分析表明, 当光学系统的  $S$  和  $W$  值较小时, 光学系统同时具备更好的像差平衡能力和更低的误差敏感度<sup>[29]</sup>。据此北京理工大学的程学敏于 2005 年提出了一种在镜头优化过程通过控制形状参数  $S$  和  $W$  数值, 以降低光学系统误差敏感度的方法<sup>[30]</sup>, 并以一个摄影镜头为例进行了优化与分析, 图 13 为摄影镜头优化前后结构图。优化前镜头  $S$  和  $W$  值分别为 0.47 和 0.95, 优化后  $S$  和  $W$  值分别为 0.47 和 0.72, MTF 公差分析显示优化后的镜头具有更好的误差敏感度表现, 如图 14 所示。

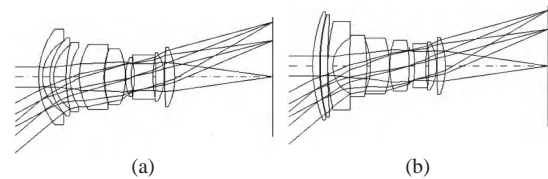


图 13 摄影镜头: (a)降敏优化前; (b)降敏优化后<sup>[30]</sup>

Fig. 13 Photographic lens (a) before and (b) after desensitization optimization<sup>[30]</sup>

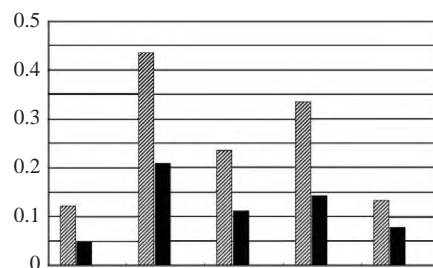


图 14 MTF 下降概率(15 lp/mm); 降敏优化前(阴影条), 降敏优化后(黑条)<sup>[30]</sup>

Fig. 14 Probable decreases of MTF at 15 lp/mm before (shaded bars) and after desensitization optimization (black bars)<sup>[30]</sup>

2013 年, 巴西圣保罗大学圣卡洛斯物理研究所的 Lucimara 对两镜反射式光学系统的误差敏感度理论进行了研究<sup>[31]</sup>, 提出了可以通过适当地选择次镜非球面的面型参数, 以实现在次镜扰动的前提下, 使全视场三阶彗差保持不变, 相应地降

低两镜反射式光学系统对偏心、倾斜的误差敏感度的方法,不同组合的非球面系数与弧矢方向偏

心、倾斜敏感度之间的关系如图 15 所示。

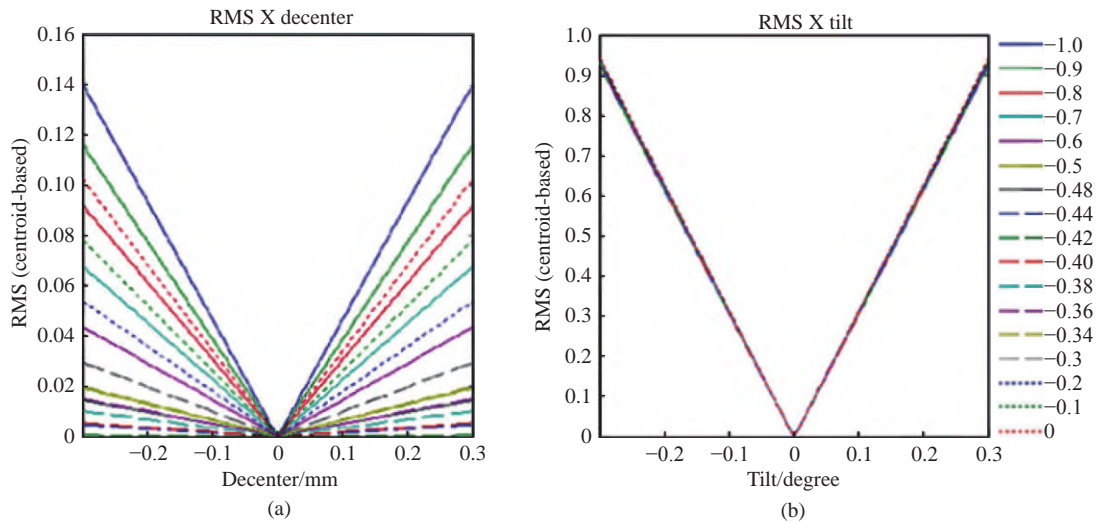


图 15 不同组合的非球面系数与误差敏感度关系。(a)弧矢方向偏心; (b)弧矢方向倾斜<sup>[31]</sup>

Fig. 15 Relationship between aspheric coefficients and error sensitivity of different combinations. (a) Decenter in the  $x$ -direction. (b) Tilt in the  $x$ -direction<sup>[31]</sup>

2022 年, 西班牙 PhotonicSens 公司的 Leticia Carrión-Higueras 提出在优化的过程中, 减少高阶非球面系数的数量有助于减小光学系统的误差敏感度。其将该方法与多重结构法结合, 提出了一种组合降敏设计方法, 并分别与单独采用减少高阶非球面系数的数量法或者多重结构法进行对

比, 将这 3 种降敏设计方法应用于一个具有高阶非球面的透镜组设计中。设计结果如图 16 所示。对 3 种方法获得的透镜组进行误差敏感度分析, 结果显示, 应用组合降敏设计方法获得的透镜组具有更小的波像差, 以及误差干扰下更好的 MTF, 如图 17(彩图见期刊电子版)所示, 图中红色线代

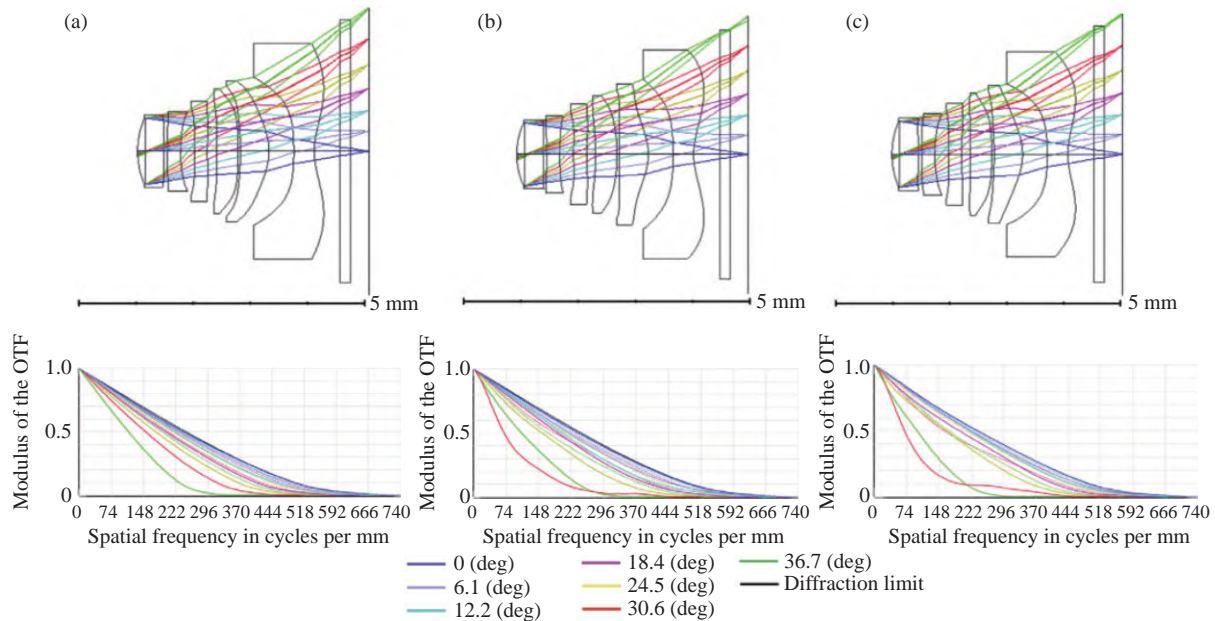


图 16 3 种降敏设计方法设计结果。(a)减少高阶非球面系数的数量法; (b)多重结构法; (c)组合降敏设计方法<sup>[1]</sup>

Fig. 16 Design results of three desensitization design methods. (a) The method of reducing the number of high-order aspheric coefficients. (b) Multiple structure method. (c) Combined desensitization design method<sup>[1]</sup>



表原始系统, 蓝色线代表单独采用减少高阶非球面系数的数量法, 绿色线代表多重结构法, 黑色线代表采用组合降敏设计方法, 实线代表不包含误差的光学系统, 虚线代表包含误差的光学系统<sup>[1]</sup>。

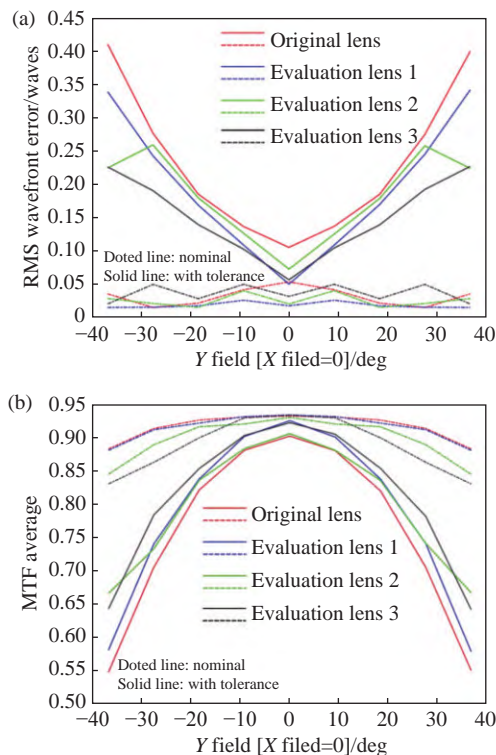


图 17 应用 Leticia Carrión-Higuera 的三种方法降敏设计前后对比图: (a)降敏设计前后透镜组的波像差; (b)降敏设计前后系统的 MTF<sup>[1]</sup>

Fig. 17 Comparison diagrams before and after desensitization design using three methods proposed by Leticia Carrión-Higuera. (a) WFE of lens group before and after desensitization design. (b) MTF of system before and after desensitization design<sup>[1]</sup>

### 3.4 光程控制法

2020 年, 长春光机所的孟庆宇等人以同轴两反光学系统作为研究对象, 提出了以误差引起的光学系统的任意一根光线的光程变化量 (Optical Path Variation, OPV) 作为误差敏感程度的评价标准, 理论推导了由反射镜位置误差引起的光程变化量的数学解析表达式, 并在光学系统中应用光线追迹的计算方法验证了理论推导的正确性, 理论模型如图 18 所示<sup>[32]</sup>。基于理论研究, 提出了同轴反射式光学系统降敏设计方法。以一个焦距为 5 600 mm 的同轴两反系统为例, 通过 15 轮迭代优化, 设计了同时满足 OPV 与波像差指标的光

学系统, 并通过分析 OPV 与波像差变化量的关系, 验证了以光程变化量作为标准来评价误差敏感度的正确性, 也证实了该降敏设计方法的有效性, 如图 19 所示。

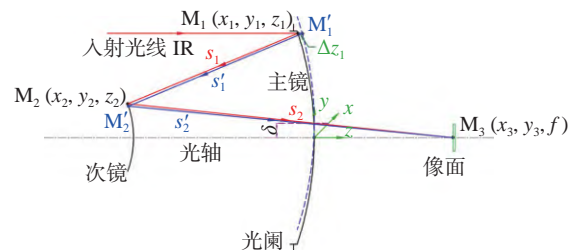


图 18 OPV 推导用光学系统模型<sup>[32]</sup>

Fig. 18 Optical system model for OPV derivation<sup>[32]</sup>

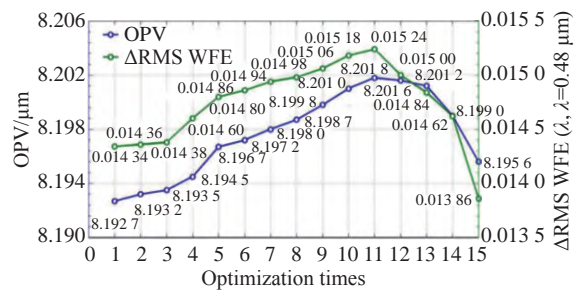


图 19 降敏优化过程中  $\Delta$ RMS WFE 与 OPV 的变化情况<sup>[32]</sup>  
Fig. 19 Variation of OPV and  $\Delta$ RMS WFE in desensitization optimization process<sup>[32]</sup>

### 3.5 波前差分误差控制法

在公差分析能力上, 波前差分算法速度快, 兼有限差分算法和蒙特卡洛算法的优点。基于波前差分方法, CODE V 光学设计软件在 1978 年将 Rimmer 开发的算法用于公差功能, 比其他商业软件早实施了几十年。在波前差分算法下, CODE V 可以运行降低光学系统误差敏感度的 SAB (Sensitivity As Built) 设计功能<sup>[33]</sup>。此外, CODE V 还开发了可以降低单一光学表面误差敏感度的 SN2 功能<sup>[34]</sup>。

2006 年, 日本的 Akira Yabe 认为基函数的线性组合可以用来表示光学元件的表面误差, 将每个基函数的误差敏感度作为优化目标, 以控制光学元件表面不规则度的误差敏感度。图 20 为紧凑变焦镜头在全局优化过程中对非球面表面不规则度进行控制前后的误差评价函数对比图, f1 的值是对基函数 f1 的敏感度, f1、f2、f3 的值是所有非球面的均方根 (Root Mean Square, RMS) 值。由图 20 可以看出, 敏感度控制可以在优化过程中使灵敏度保持在较低水平<sup>[35]</sup>。2010 年, Akira Yabe

构建了一个误差敏感度控制函数,包括偏心控制函数和曲率误差控制函数。该函数以制造误差对光学系统的波前方差增量的期望值为核心,在优化过程中控制该函数,通过对 MTF 的蒙特卡洛模拟验证了该函数对降低光学系统制造误差敏感度的有效性,且该控制函数在使用中无须额外的计算时间,可应用于多数光学系统设计过程中<sup>[36]</sup>。

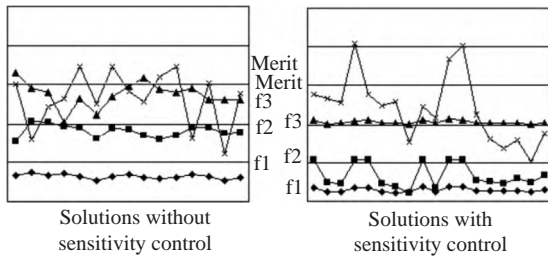


图 20 全局优化过程中对灵敏度进行控制<sup>[35]</sup>

Fig. 20 Control of the sensitivity during global optimization<sup>[35]</sup>

2020 年,美国 FiveFocal LLC 公司的 Rob Bates 对降敏设计方法进行了归纳与对比,针对微型相机非球面镜头提出了改进的波前差分误差降敏设计方法。基于镜头对偏心误差的敏感度特征,构造了一个仅计算偏心所致波前差分误差的操作数,并通过对其进行控制展开光学系统降敏设计,并与其他 5 种降敏设计方法进行了对比设计,如图 21 所示<sup>[37]</sup>。

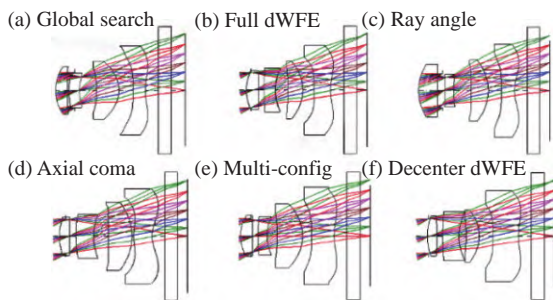


图 21 非球面微型相机镜头降敏设计对比: (a)全局搜索法; (b)全差分波前误差优化法; (c)降低光学入射角; (d)降低倾斜致彗差; (e)多重结构法; (f)降低偏心所致差分波前误差<sup>[37]</sup>

Fig. 21 Comparison using different desensitization design methods for aspheric miniature camera lenses. (a) Global search method. (b) Full differential wavefront error integrated optimization. (c) Reduction of ray angle of incidence. (d) Reduction of tilt-induced axial coma. (e) Zoomed configurations. (f) Reduction of decenter-induced differential wavefront error<sup>[37]</sup>

## 4 像差控制法

光学系统敏感度的高低本质上是误差对光学系统像差平衡的破坏程度,光学系统的误差敏感度与像差之间存在着较强的相关性。研究人员从这一角度提出了许多降敏设计方法,包括通过优化光学系统在误差干扰前后某项像差的大小,降低光学系统误差敏感度,还有研究人员发现某些初级像差之间存在互相补偿、抵消的关系,同样可以降低光学系统的误差敏感度。

1962 年,王之江在所著的《光学设计理论基础》一书中对光学系统参数变化对系统像差的影响做了理论推导,并求得了光学表面偏心误差的允许量<sup>[38]</sup>。1966 年,伦敦帝国理工学院物理系 HOPKINS H H 与 TIZIANI H J 分解了透镜可以产生的误差类型,并用光学表面沿光轴的位移和关于光轴的角倾斜来表征光学元件表面的小量偏心,计算了由光学元件表面倾斜导致的图像横向偏移和彗差,并分析了该彗差对系统波像差的贡献<sup>[39]</sup>。

1994 年,英国爱丁堡皇家天文台的 Gavriel 提出了针对两反光学系统的降敏设计方法<sup>[40]</sup>。该方法应用透镜补偿反射镜位置失调引起的彗差。RC 系统中次镜倾斜、偏心 and 轴向位移产生的像差如图 22 所示,图中横坐标为系统高斯入射高度

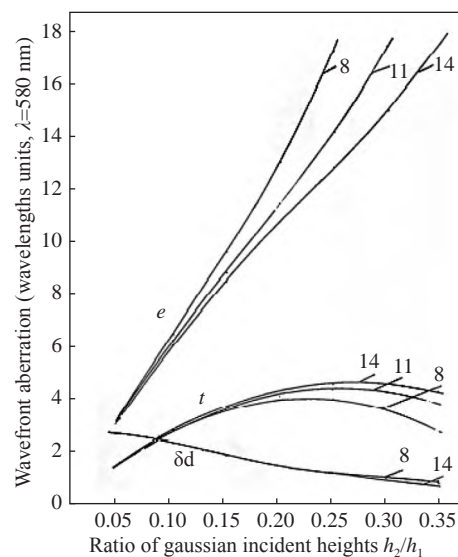


图 22 光学系统中次镜倾斜、偏心和错位产生的像差<sup>[40]</sup>  
Fig. 22 Misalignment aberrations for tilt, decenter and despace of the secondary mirror<sup>[40]</sup>

比  $h_2/h_1$ , 偏心产生的像差  $e$  随着  $h_2/h_1$  增大而增大, 轴向位移产生的像差  $\delta d$  随  $h_2/h_1$  增大而减小, 倾斜产生的像差  $t$  在  $h_2/h_1=0.25$  时达到峰值。Gavriel 通过对平衡系统位置失调后产生的衍生像差进行分析, 通过补偿像差的方法来降低反射式光学系统误差敏感度。

1998 年, 加拿大的 Betensky 在焦距为 10 mm, 相对孔径为 1:4, 视场角为  $25^\circ$  的三片式透镜的设计中应用非球面来校正光学系统像差, 减轻了在传统光焦度“正”“负”“正”球面透镜构型中, 过多地依赖单片负透镜来补偿其他两片正透镜的像差的压力, 降低了单片透镜由于承担补偿像差量过大, 而引起的失调敏感度过高的问题, 提高光学系统对失调扰动的鲁棒性。图 23 为降敏设计前后三片式光学镜头的结构图, 图 24 为三片式光学镜

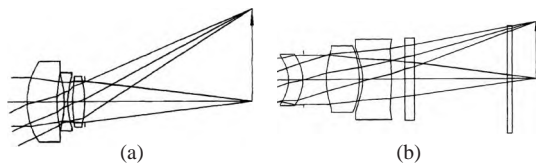


图 23 三片式镜头。(a)降敏设计前;(b)降敏设计后<sup>[41]</sup>

Fig. 23 Triplet lens (a) before and (b) after desensitization design<sup>[41]</sup>

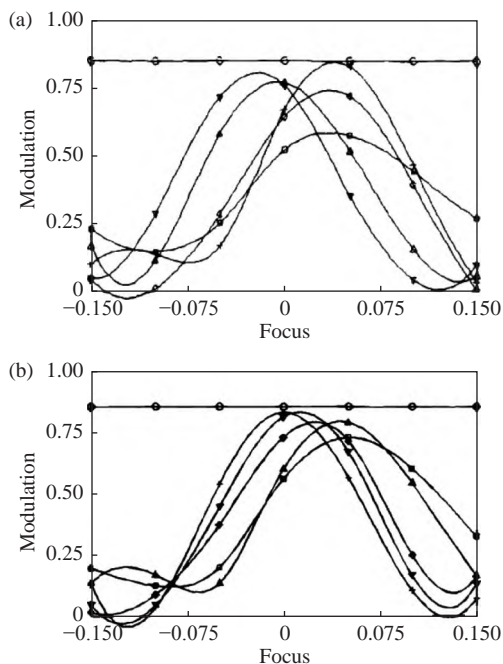


图 24 第二元件偏心  $-0.025$  mm 后的 MTF (50 lp/mm)。(a)降敏设计前;(b)降敏设计后<sup>[41]</sup>

Fig. 24 MTF at 50 lp/mm with second element decentered  $-0.025$  mm (a) before and (b) after desensitization design<sup>[41]</sup>

头在降敏设计前后 MTF 曲线, 对比设计分析表明, 应用非球面的透镜系统在误差敏感度与成像质量两方面的表现均得到了提高<sup>[41]</sup>。

2010 年, 美国亚利桑那大学的 Lirong Wang 提出了 CS 和 AS 评价函数, 分别用于评价光学元件倾斜引起的恒定彗差和线性像散的敏感度<sup>[42]</sup>。Lirong Wang 应用 CS 和 AS 评价函数对 10 个显微镜设计方案进行了敏感度评估, 还应用 CS 和 AS 评价函数对典型的 Petzval 镜头、Cooke 三片式镜头和 Double-Gauss 镜头的误差敏感度进行了分析。结果显示 Petzval 镜头的 CS 和 AS 数值最低, Cooke 三片式镜头的 CS 和 AS 数值最高, 如图 25 所示。结果与两种镜头采用 Zemax 软件分析的误差敏感度相一致, 如图 26 所示。Lirong Wang 指出, Cooke 三片式镜头误差敏感度最高的原因是负透镜占据系统的光焦度过大, 与 Betensky 所述原理一致。

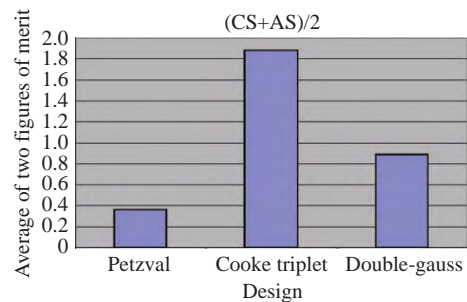


图 25 Petzval、Cooke 和 double-Gauss 镜头评价平均值<sup>[42]</sup>

Fig. 25 Average of two figures of merit for the Petzval, Cooke triplet and double-Gauss lenses<sup>[42]</sup>

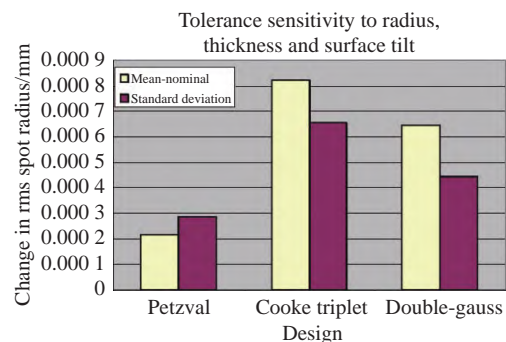


图 26 ZEMAX 分析的 Petzval、Cooke 和 double-Gauss 镜头的半径、厚度、表面倾斜误差敏感度结果<sup>[42]</sup>

Fig. 26 ZEMAX Tolerance sensitivity analysis by ZEMAX for the radius, thickness and surface tilt of Petzval, Cooke triplet and double-Gauss lenses<sup>[42]</sup>

2011 年, 长春理工大学的张远健等人提出控制光学系统中各元件表面的初级像差值, 通过“小

像差互补”达到系统像差平衡的方法,以降低系统误差敏感度,提高光学系统的稳定性<sup>[43]</sup>。2021年,长春理工大学的刘智颖等人应用“小像差互补”的设计方法实现了一个小型红外显微光学系统的设计,降低了光学元件的公差敏感度<sup>[44]</sup>。这些方法与 Betensky 的方法具有相同之处,均是通过降低每个光学元件的像差贡献量,避免产生元件失调后对光学系统像场平衡造成的巨大破坏。

2018年,长春光机所的 Kun Zhang 等人理论分析了初级像差与误差之间的关系,并提出了一种通过优化光学系统初级像差来降低畸变敏感度的方法<sup>[45]</sup>,优化前后光学系统结构图如图 27 所示,优化前后光学系统对偏心和倾斜产生的畸变变化量如图 28 所示,优化过程降低了光学系统畸

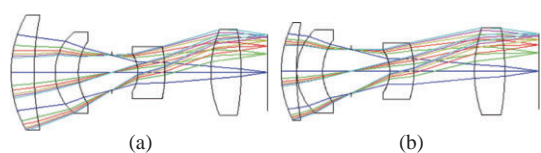


图 27 设计实例: (a)优化前; (b)优化后<sup>[45]</sup>

Fig. 27 Design example. (a) Before optimization. (b) After optimization<sup>[45]</sup>

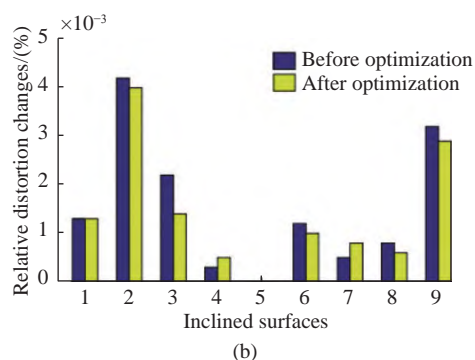
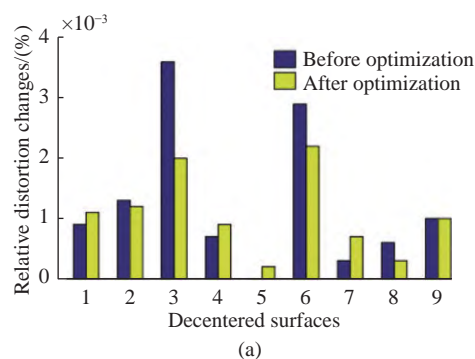


图 28 优化前后的畸变敏感度: (a)表面偏心畸变敏感度; (b)表面倾斜畸变敏感度<sup>[45]</sup>

Fig. 28 Distortion sensitivities before and after optimization. (a) Distortion sensitivity of the surface decenter. (b) Distortion sensitivity of the surface tilt<sup>[45]</sup>

变敏感度。

2022年, Sasian 提出了以控制光学系统均匀像差和线性像散来降低光学系统误差敏感度的方法。该方法的评价标准为光学系统失调后像差量的大小,参与评价的像差有:球差  $\sigma_1$ 、彗差  $\sigma_2$ 、像散  $\sigma_3$  和曲率  $\sigma_4$ 。降敏设计前后光学系统布局图如图 29 所示。降敏设计前后光学系统失调后像差量如图 30(彩图见期刊电子版)所示,图中绿色曲线表示球差  $\sigma_1$ ,蓝色曲线表示彗差  $\sigma_2$ ,红色曲线表示像散  $\sigma_3$ ,品红色曲线表示场曲率  $\sigma_4$ <sup>[6]</sup>。

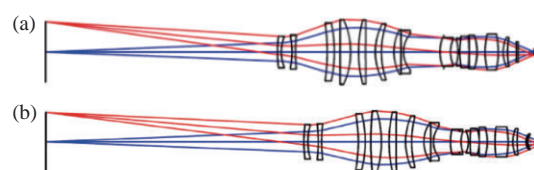


图 29 降敏设计前(a)、后(b)光学系统布局图

Fig. 29 Layout of optical system before (a) and after (b) desensitization design<sup>[6]</sup>

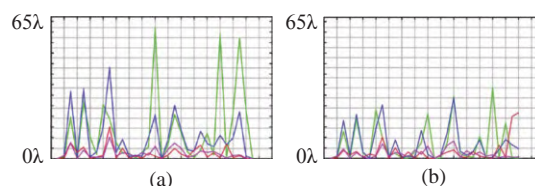


图 30 光学系统失调时产生的均方根像差量。(a)降敏设计前, (b)降敏设计后<sup>[6]</sup>

Fig. 30 RMS aberration caused by misalignment of optical system. (a) Before desensitization design. (b) After desensitization design<sup>[6]</sup>

## 5 其他方法

除了以上归纳的方法,还有一些其他光学系统降敏设计方法,如一些研究人员选择将误差敏感度评价函数与优化算法结合进行降敏设计。2011年,巴西 São José dos Campos 国家空间研究所的 Bráulio 等人,应用兼顾成像质量与误差敏感度的多目标优化算法实现了光学系统降敏设计<sup>[46]</sup>。研究人员应用此方法寻找摄远型光学系统最优解,首先在函数空间绘制了两个函数 F1 和 F2, F1 是像质评价函数,由全视场中每个波长的波像差方和根值表示, F2 是敏感度评价函数, Bráulio 等引用了 Isshiki 提出的以入射角和折射角方和根为核心的评价函数。

$$F1 = \sqrt{\sum_{\lambda=1}^{\omega} \text{RMSWFE}^2(\lambda)} \quad (3)$$

$$F2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (i_s^2 + r_s^2)}{2k}} \quad (4)$$

该方法采用一种变体 NSGA-II 遗传算法找到这两个函数的 Pareto Front 的非支配解, 该非支配解所在区域内的光学系统结构像质与敏感度可以达到平衡。优化过程中找到的非支配解被绘制在评价函数的空间中, 如图 31 所示。图中展示了 4 种不同的结构, 第一种结构 F1 最小, 像质最好; 第 4 种结构 F2 最小, 敏感度最低; 第 2 种和第 3 种结构位于最佳解区间, 即在可以保证像质的同时使系统具有相对较低的敏感度。该算法可以在优化过程中返回多重解, 与其他返回单一解的方法不同。这使设计人员可以更好地在设计光学系统时在成像质量和制造误差敏感度方面取得平衡。

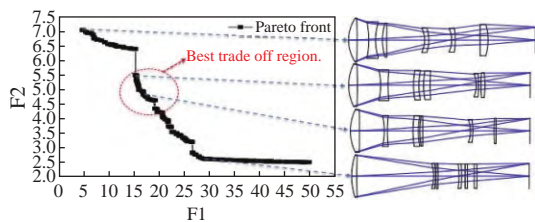


图 31 在函数空间中绘制的通用多目标问题的解决方案<sup>[46]</sup>  
Fig. 31 Solutions for a generic multi-objective problem plotted in the functions space<sup>[46]</sup>

## 6 结束语

本文对光学系统降敏设计方法的发展与研究现状进行了总结。综述了光学系统误差敏感度理

### 参考文献:

- [1] CARRIÓN-HIGUERAS L, CALATAYUD A, SASIAN J M. Improving as-built miniature lenses that use many aspheric surface coefficients with two desensitizing techniques[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(5): 051208.
- [2] VAN BELLE G T, MEINEL A B, MEINEL M P. The scaling relationship between telescope cost and aperture size for very large telescopes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5489: 563-570.
- [3] STAHL H P, HENRICH T. Preliminary multivariable cost model for space telescopes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7731: 773104.
- [4] SHOLL M J, LAMPTON M L, ALDERING G, et al.. SNAP telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5487: 1473-

论、降敏设计方法及典型应用。误差敏感度是影响光学系统最终成像质量的重要因素, 具有低误差敏感度特征的光学系统, 能够降低对光学元件加工精度与光学系统装调精度的要求, 放宽制造公差, 从而降低光学系统的建造成本。几十年来, 研究人员在光学系统降敏设计方法研究领域不断探索, 获得了一系列的成果, 目前还有一些亟待解决的问题以及值得进一步探索的方向, 例如: (1) 近年来, 复杂光学曲面作为光学工程领域的前沿技术之一, 已经在越来越多的光学系统中得到了应用, 实践表明, 一些复杂光学曲面对光学系统误差敏感度的表现具有一定的积极作用, 但是目前尚没有基于复杂光学曲面的误差敏感度理论与降敏设计方法的系统性研究; (2) 已有的光学系统误差研究类型多数以镜面倾斜、偏心为主, 光学系统的误差敏感度除了光学加工、装调的影响, 外部环境如力学、热学特性也会改变光学元件的曲率半径、间隔以及玻璃材料的相关特性。对于高精度复色光系统, 尤其是一些复消色差镜头, 光学材料的属性误差是影响光学系统成像质量的关键, 但目前关于玻璃材料属性的误差敏感度研究较少; (3) 误差敏感度是光学系统能否从设计到实现的重要表征, 目前仍没有一个全面包含像质评价和各种指定类型误差敏感度评价的综合优化程序, 需要探索更全面的设计方法与优化算法, 使降敏设计方法得到更加便捷与广泛的应用。以上只是简要列举了几点未来可能的研究方向, 我们课题组也正在致力于以上几个方面的研究, 但误差敏感度理论的广阔研究方向远不止于此。

光学系统误差敏感度理论与低误差敏感度设计方法仍将是光学设计领域未来的研究热点, 研究成果将一定会有效推动应用光学领域的发展, 对光学系统的性能有效实现与制造经济性提供巨大的帮助。

- 1483.
- [5] 孟庆宇. 反射式光学系统误差敏感度理论及降敏设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
MENG Q Y. *Research on error sensitivity theory and desensitization design method of reflective optical system*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [6] SASIAN J. Lens desensitizing: theory and practice[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(3): A62-A67.
- [7] KUPER T, HARRIS T. A new look at global optimization for optical design[J]. *Photonics Spectra*, 1992, 1: 151-160.
- [8] KUPER T. Global optimization finds alternative lens designs[J]. *Laser Focus World*, 1992, 5: 193-195.
- [9] FORBES G, JONES A. Global optimization in lens design[J]. *Optics and Photonics News*, 1992, 3(3): 22.
- [10] JONES A. *Global optimization in lens design*[D]. Rochester: University of Rochester, 1992.
- [11] STURLES D, O'SHEA D. Global view of optical design space[J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(2): 207-218.
- [12] MCGUIRE J P JR. Designing easily manufactured lenses using a global method[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6342: 634200.
- [13] LIU X Y, GONG T T, JIN G F, *et al.*. Design method for assembly-insensitive freeform reflective optical systems[J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 27798-27811.
- [14] FUSE K. Method for designing a refractive or reflective optical system and method for designing a diffraction optical element: US, 6567226[P]. 2003-05-20.
- [15] ROGERS J R. Using global synthesis to find tolerance-insensitive design forms[C]//*International Optical Design Conference*, Optica Publishing Group, 2006: TuA4.
- [16] MA B, THOMPSON K P, SHARMA K, *et al.*. Applying slope constrained Q-type aspheres to reduce sensitivity of optical systems[C]//*Frontiers in Optics 2012*, Optica Publishing Group, 2012: FTh3E. 3.
- [17] MA B, SHARMA K, THOMPSON K P, *et al.*. Mobile device camera design with Q-type polynomials to achieve higher production yield[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 17454-17463.
- [18] THOMPSON K P, SCHIESSER E, ROLLAND J P. Why are freeform telescopes less alignment sensitive than a traditional unobscured TMA?[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9633: 963317.
- [19] FUERSCHBACH K, DAVIS G E, THOMPSON K P, *et al.*. Assembly of a freeform off-axis optical system employing three  $\phi$ -polynomial Zernike mirrors[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 2896-2899.
- [20] 李闯, 薛常喜, 杨红芳, 等. 基于Q-type非球面的电子内窥镜物镜光学系统设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0622001.  
LI CH, XUE CH X, YANG H F, *et al.*. Optical system design of electronic endoscope objective with Q-type aspheres[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0622001. (in Chinese)
- [21] ISSHIKI M, GARDNER L, GREGORY G G. Automated control of manufacturing sensitivity during optimization[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5249: 343-352.
- [22] ISSHIKI M, SINCLAIR D C, KANEKO S. Lens design: global optimization of both performance and tolerance sensitivity[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6342: 63420N.
- [23] JEFFS M. Reduced manufacturing sensitivity in multi-element lens systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4832: IMC4.
- [24] 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.  
ZHAO Y, GONG Y, HU Y N. Method of tolerance sensitivity reduction of zoom optical system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(7): 121-125. (in Chinese)
- [25] QIN Z CH, WANG X D, REN CH M, *et al.*. Design method for a reflective optical system with low tilt error sensitivity[J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 43464-43479.
- [26] DENG Y T, JIN G F, ZHU J. Design method for freeform reflective-imaging systems with low surface-figure-error sensitivity[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(9): 092201.
- [27] MENG Q Y, WANG H Y, WANG W, *et al.*. Desensitization design method of unobscured three-mirror anastigmatic optical systems with an adjustment-optimization-evaluation process[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(6): 1472-1481.
- [28] SASIAN J M, DESCOUR M R. Power distribution and symmetry in lens systems[J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(3): 1001-1004.
- [29] CHENG X M, WANG Y T, HAO Q, *et al.*. Automatic element addition and deletion in lens optimization[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(7): 1309-1317.
- [30] CHENG X M, WANG Y T, HAO Q. Study on tolerance sensitivity reduction in lens optimization[J]. *Proceedings of*

- SPIE*, 2005, 5638: 36-42.
- [31] SCADUTO L C N, SASIAN J, STEFANI M A, *et al.*. Two-mirror telescope design with third-order coma insensitive to decenter misalignment[J]. *Optics Express*, 2013, 21(6): 6851-6865.
- [32] 孟庆宇, 汪洪源, 王维, 等. 基于光程变化量的反射式光学系统敏感度理论分析与降敏设计方法[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(1): 72-83.  
MENG Q Y, WANG H Y, WANG W, *et al.*. Sensitivity theoretical analysis and desensitization design method for reflective optical system based on optical path variation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(1): 72-83. (in Chinese)
- [33] HASENAUER D. Optical System Tolerancing-A Key to Product Cost Reduction[Z]. Synopsys, Inc., 2018.
- [34] SYNOPSYS. CODE V optimization reference manual[S]. Chapter 4 Error Functions, 2017.
- [35] YABE A. Sensitivity control to surface irregularity[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6342: 634225.
- [36] YABE A. General method of sensitivity control for manufacturing errors[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(27): 5175-5182.
- [37] BATES R. Performance and tolerance sensitivity optimization of highly aspheric miniature camera lenses[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7793: 779302.
- [38] 王之江. 光学设计理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 1965: 304-314.  
WANG ZH J. *Theoretical Basis of Optical Design*[M]. Beijing: Science Press, 1965: 304-314.
- [39] HOPKINS H H, TIZIANI H J. A theoretical and experimental study of lens centring errors and their influence on optical image quality[J]. *British Journal of Applied Physics*, 1966, 17(1): 33-54.
- [40] CATALAN G. Design method of an astronomical telescope with reduced sensitivity to misalignment[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(10): 1907-1915.
- [41] BETENSKY E I. Aberration correction and desensitization of an inverse-triplet object lens[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3482: 264-268.
- [42] WANG L R, SASIAN J M. Merit figures for fast estimating tolerance sensitivity in lens systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7652: 76521P.
- [43] 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.  
ZHANG Y J, TANG Y, WANG P, *et al.*. Method of tolerance sensitivity reduction of optical system design[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(10): 127-133. (in Chinese)
- [44] 刘智颖, 吕知洋, 高柳絮. 红外显微光学系统的小像差互补设计方法[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(2): 20200153.  
LIU ZH Y, LV ZH Y, GAO L X. Design method of infrared microscope optical system with lower aberration compensation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(2): 20200153. (in Chinese)
- [45] ZHANG K, ZHONG X, WANG W, *et al.*. Ultra-low-distortion optical system design based on tolerance sensitivity optimization[J]. *Optics Communications*, 2019, 437: 231-236.
- [46] DE ALBUQUERQUE B F C, LIAO L Y, MONTES A S, *et al.*. A multi-objective approach in the optimization of optical systems taking into account tolerancing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8131: 813105.

#### 作者简介:



孟庆宇(1986—), 男, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事光学系统设计理论与设计方法、空间光学遥感器设计的研究。E-mail: mengqy@ciomp.ac.cn



秦子长(1996—), 辽宁锦州人, 博士研究生, 2018年于吉林大学的获得学士学位, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: qinzichang@ciomp.ac.cn