

激光与光电子学进展

抛物镜光学补偿器设计的结构寻优

孟文^{1,2}, 马臻^{1,2*}, 沈乐¹

¹中国科学院西安光学精密机械研究所先进光学元件试制中心, 陕西 西安 710119; ²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 抛物镜归一和重整化后的 Offner 补偿器设计可以被认为是在参数空间寻优的确定化问题。通过构建抛物镜 Offner 补偿器优化结构实例, 获得其评价函数在参数空间的分布, 得到 Offner 补偿器设计结果参照图谱, 提出一种对补偿器设计初始结构选择和性能评价的方法, 结果揭示了该问题可以通过数值方法得到较好解决。

关键词 光学设计与制造; 非球面; 零位检验; Offner 补偿器; 样条插值; 结构评价

中图分类号 0439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1322003

Structure Optimization of Optical Compensator Design of Parabolic Lens

Meng Wen^{1,2}, Ma Zhen^{1,2*}, Shen Le¹

¹Advanced Optical Component Trial Production Center, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, Shaanxi, China;

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

Abstract The design of Offner compensator after paraboloid normalization and renormalization can be regarded as a deterministic problem of optimization in parameter space. The evaluation function distribution in the parameter space is obtained by constructing an example of optimizing the structure of the Offner compensator of the parabolic lens, then the reference map of the design results of the Offner compensator is obtained. A method for selecting the initial structure and evaluating the performance of the compensator is proposed, and the results show that the problem can be solved by numerical method.

Key words optical design and manufacturing; aspheric surface; null test; Offner compensator; spline interpolation; structural evaluation

1 引言

非球面零位补偿镜检测技术具有高分辨率、高准确度、高灵敏度等优点, 已成为精密抛光阶段非球面形误差的主要检测方法^[1]。常用的零位补偿镜有 Dall 补偿镜^[2-3]、Offner 补偿镜^[4]及反射镜式补偿器^[5]。Dall 补偿镜是一种平凸型透镜, 结构简单、加工容易, 能够对中等以下相对孔径的非球面提供足够的补偿。Offner 补偿镜由两片或多片透镜组合而成, 包含反射式和折射式两种, 所用的辅助元件口径相对被测面来说小得多, 表面形状基本为平面和球面, 因此其加工精度可以达到很高水平, 虽结构比 Dall 补偿镜复杂, 但能够很好地补偿相对孔径大的非球面。由于反射式检验要引入高精度平面镜或大口径标准球面镜, 且存在中心遮拦、装调困难的问题, 折射式在光路中更容易设计和实现。因此, 国内外广泛使用折射式 Offner 补偿器

或是结构改进的 Offner 补偿器实现对大口径及大相对孔径凹面镜的高精度检测, 精度可达 $\lambda/50$ ^[6-8]。

尽管 Offner 补偿系统被广泛应用, 但由于补偿器与被检非球面是相互对应的, 现有的设计方法多从三级像差理论出发, 针对某一具体形式求解零位补偿系统, 系统性、通用性不足^[9]。系统中各参数间与检验能力的复杂关系不易发现, 考察补偿系统的零检验能力存在困难^[10]。且对于补偿器口径、入射角孔径、出射角孔径以及透镜光焦度、放大倍率与补偿光路参数之间的关系研究较少, 设计者对光路中各个参数对检验效果的影响没有较为直观的认识, 设计存在盲目性^[11], 往往依赖设计者的目标和经验, 对于结果的评价通常并不唯一, 针对某种具体光学参数及结构形式的补偿器所能达到的最优设计结果没有资料可供参考。本文以补偿剩余波像差为评价指标, 通过建立被检非球面与对应几种结构形式的补偿器所能达到的极限优化结果

收稿日期: 2021-08-31; 修回日期: 2021-09-11; 录用日期: 2021-09-23

通信作者: *mazn@opt.ac.cn

数据库,可以为补偿设计指标提供先验设计标准。选取与补偿器的补偿能力成正相关的垂轴放大率和被检非球面的相对孔径为参数空间变量,针对抛物面完成了 3 种结构形式的补偿器优化数据库,给出了设计能力的评价参照图。

2 二次非球面的补偿归一化关系

折射式 Offner 补偿器由场镜和补偿镜组成,补偿镜几乎可以全部补偿非球面产生的球差,场镜则至于非球面曲率中心附近,用于将补偿镜成像在非球面上并承担部分高级像差的消除。根据补偿原理,系统中只存在轴上波像差,即球差。检测光路如图 1 所示。

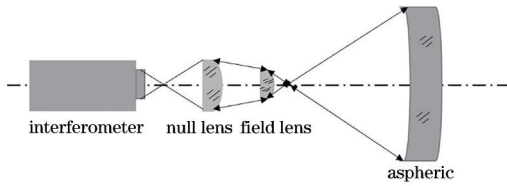


图 1 折射式 Offner 补偿器零位检测光路图

Fig. 1 Optical path of refractive Offner compensator null test

伍凡^[12]将 $S_1^{(1)}$ 、 $S_1^{(2)}$ 和 $S_1^{(M)}$ 分别代表补偿镜、场镜和二次曲面反射镜的球差系数,要求两次通过补偿器的光线在二次曲面曲率中心处的三级球差得到平衡:

$$2(S_1^{(1)} + S_1^{(2)}) + S_1^{(M)} = 0, \quad (1)$$

式中,
$$S_1^{(i)} = \frac{(h_i \phi_i)^4}{4\phi_i} P_i, \quad (2)$$

$$S_1^{(M)} = 2KR U_2'^4, \quad (3)$$

$$P_i = \left(\frac{n_i}{n_i - 1} \right)^2 + \frac{n_i + 2}{n_i(n_i - 1)} \times [B_1 + \frac{2(n_i^2 - 1)(m_i + 1)}{(n_i + 2)(m_i - 1)}]^2 - \frac{n_i(m_i + 1)^2}{(n_i + 2)(m_i - 1)^2}, \quad (4)$$

式中: $i=1, 2$ 表示补偿镜和场镜; h_i 、 ϕ_i 、 n_i 、 m_i 分别表示补偿镜和场镜的半孔径、光焦度、折射率、垂轴放大率; B_1 和 B_2 分别表示补偿镜和场镜的形状参数(对于平凸透镜,当

平面对着光源时 $B=-1$; 当凸面对着光源时 $B=1$); R 为二次曲面近轴曲率半径; U_2' 是像方孔径角; $K=-e^2$ 。其中,相对孔径、垂轴放大率、非球面系数、折射率以及平凸透镜的放置位置等结构参数与设计结果存在连续非线性映射关系,且二次曲面系数和球差量为线性对应关系,高次非球面大部分情况下与最接近二次非球面有较小的偏离量^[13],所以归一化的抛物镜补偿系统可以作为其他二次曲面和高次曲面的初始优化起点,即二次非球面补偿系统均可在相同参数条件下的抛物面补偿系统的基础上进行线性缩放实现局部最优化设计。

3 设计采用的参数限制条件

本研究待检件选取有代表性的曲率半径为 1 m 的抛物面镜,波长 λ 为 632.8 nm,零位结构中各元件材料为 BK7 玻璃(折射率 $n=1.5168$),评价采用被广泛接受的波差图。考虑加工的方便性,采用平凸透镜,设置 3 种不同的结构形式,如图 2 所示,每种结构形式下设置不同的相对孔径并改变垂轴放大率进行优化设计,从而得到大量最优化结构,将每种最优结构形式下的数据及归一化残差值(残差值进行无量纲化处理,计算公式为“残差值/10000×0.0006324×1000000000”)记录作为样本基础数据,共得到 378 组设计结果。

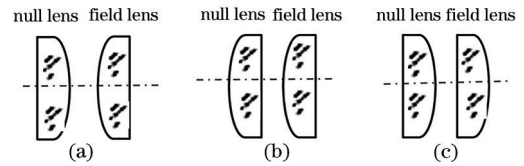


图 2 Offner 补偿器 3 种不同的结构形式。(a) 结构形式 1; (b) 结构形式 2; (c) 结构形式 3

Fig. 2 Three different structural forms of Offner compensator.

(a) Structural form 1; (b) structural form 2; (c) structural form 3

将抛物面补偿系统改变不同参数后的优化设计实例数据进行归类整理,作为基础样本数据,再以相对孔径、垂轴放大率及归一化残差值建立的三维坐标系中表示出来(图 3),其在空间中呈散乱点分布状态。

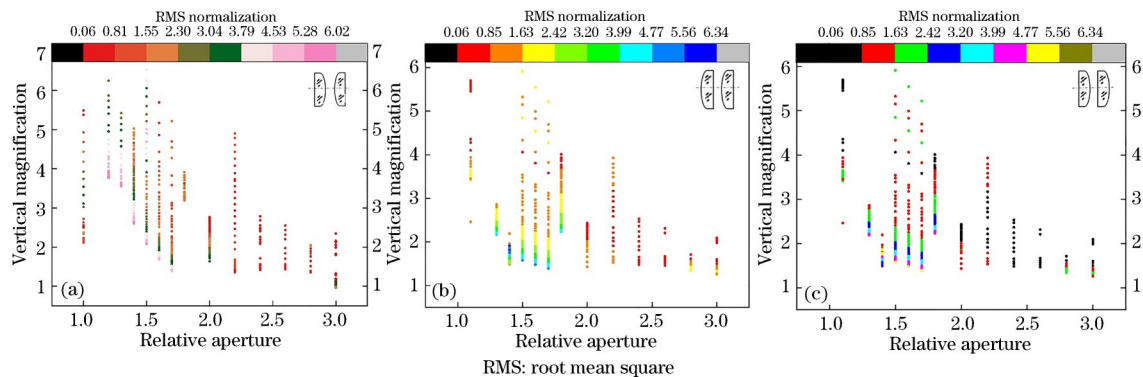


图 3 原始数据点在结构参数坐标系的分布。(a) 结构形式 1 数据点分布图; (b) 结构形式 2 数据点分布图; (c) 结构形式 3 数据点分布图
Fig. 3 Distribution of original data points in structural parameter coordinate system. (a) Data point distribution diagram of structural form 1; (b) data point distribution diagram of structural form 2; (c) data point distribution diagram of structural form 3

4 最优化评价在参数空间的插值结果

Matlab 中的 griddata 函数可以将位于同一空间坐标系下的散点插值为规格网格,其中 V4 是一种较为平滑的插值算法,可以很好地结合邻近离散点的分布特征实现光滑曲面的拟合^[14]。V4 插值算法是针对不规则间隔的空间散乱数据点的双调和样条插值,其插值

曲面是以各样点为中心的格林函数的线性组合,通过调节各点的权重使曲面通过各样点。调用 Matlab 工具 griddata 中的 V4 函数将基础数据中的散乱点进行插值重构,获得抛物面补偿器优化数据结构参数值和归一化残差值的映射关系图,图 4 为每种结构形式下形成的插值曲面。

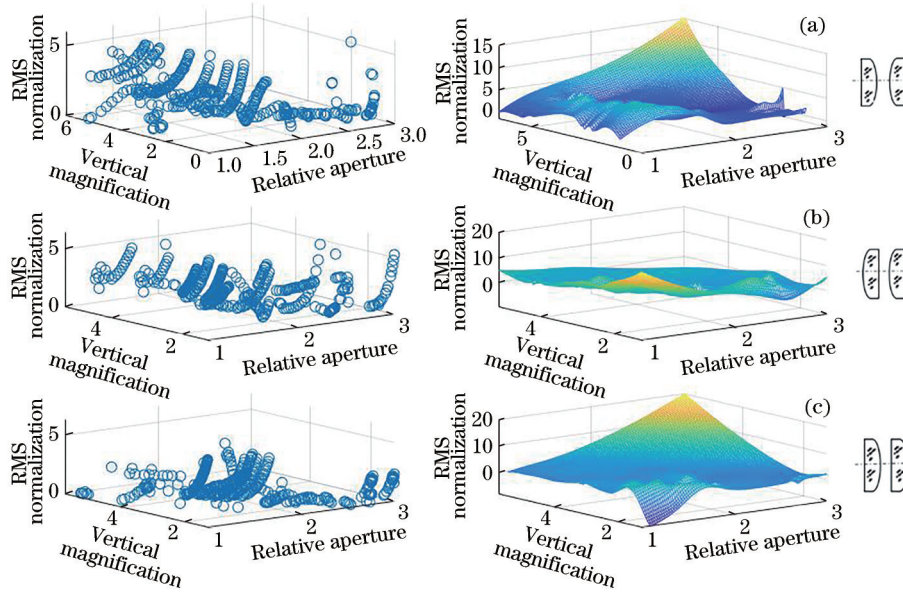


图 4 不同结构形式下的样条插值曲面。(a)结构形式 1 散乱数据点分布图及其插值曲面;(b)结构形式 2 散乱数据点分布图及其插值曲面;(c)结构形式 3 散乱数据点分布图及其插值曲面

Fig. 4 Spline interpolation surfaces with different structural forms. (a) Scattered data point distribution map of structural form 1 and its interpolation surface; (b) scattered data point distribution map of structural form 2 and its interpolation surface; (c) scattered data point distribution map of structural form 3 and its interpolation surface

为了验证本文方法的可靠性,在插值得到的结果中随机选取 12 组结构参数及与之对应的归一化残差数据,如图 5 所示为随机选取的数据在参数空间中的

分布,同时在 Zemax 中以这些结构参数为基础进行建模,得到实际参数条件下的归一化残差结果,并与插值数据进行了误差统计。

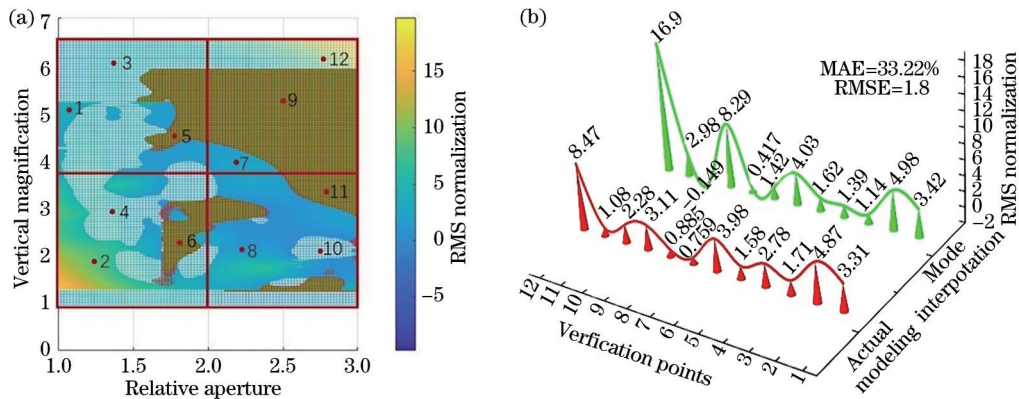


图 5 随机选取的数据点在参数空间中的分布图。(a)仿真验证数据点的选取图;(b)验证点实际与插值残差对比

Fig. 5 Distribution of randomly selected data points in parameter space. (a) Selection diagram of simulation verification data points; (b) comparison between actual verification points and interpolation residuals

由图 5(b)可以看到,12 组验证点由插值得到的归一化残差值与实际建模得到的归一化残差值变化趋势基本一致,平均相对误差(MAE)为 33.22%,均方根误

差(RMSE)为 1.80,准确性与稳定性在合理范围之内。说明本文使用的插值法在一定范围内有很好的外推能力,能达到使用参考的目的。

由以上插值得到的样本数据,找出在某一残差水平下对应的样本数据点得到拟合曲线,如图 6(a)所示为归一化残差水平在 0~1.5 即对应残余波像差为 2/1000 波长下不同结构形式的划分区域范围,称为

“抛物面 Offner 补偿器设计结果参照图 I”;图 6(b)为归一化残差水平在 1.6~2.5 即对应残余波像差小于 4/1000 波长时所得到的区域范围,称为“抛物面 Offner 补偿器设计结果参照图 II”。

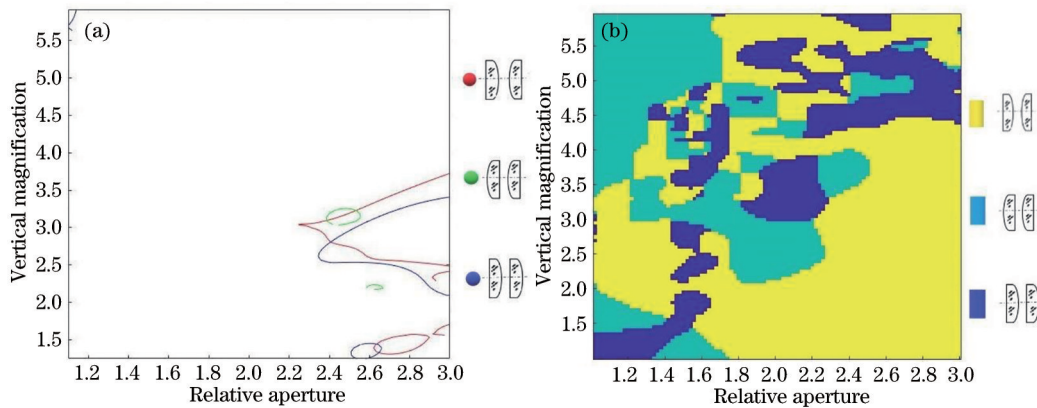


图 6 抛物面 Offner 补偿器设计结果参照图。(a)参照图 I ;(b)参照图 II

Fig. 6 References of design results of parabolic Offner compensator. (a) Reference I ;(b) reference II

5 分析与讨论

1) 从构建的模型图中可以看出,结构参数与设计结果之间存在严重非线性复杂映射关系。相对孔径为 2~3 范围之间,多采用“凸平对凸平”及“平凸对凸平”的结构形式,在补偿镜垂轴放大率增大条件下,补偿镜口径较大,剩余波像差较小。但是由于补偿镜所需玻璃材料对均匀性要求较高,透镜口径过大不利于高品质材料的获取,口径和厚度加大也将引入误差。所以针对曲率半径为 1 m 左右的非球面镜,垂轴放大率在优化时可以适当增加,但不宜过大,可以据此结果在优化过程中调整参数以期达到预期设计。

2) 本文设计结果的基础是最优化设计,残差水平高低是多结构参数共同作用的结果,关于抛物镜补偿器设计结果的最优性评估结果很丰富,在优化过程中只能找到局部的最优点,这也解释了为什么针对同一参数结构会有不同的设计结果。

3) 本研究旨在提出一种从宏观角度进行结构寻优的方法,为补偿器设计提供一定的方向性参考,所以在研究过程中对有些参数进行了简化处理,只保留了最优性评估中比重较要的参数信息,建立了 3 个参数坐标系下的 Offner 补偿系统优化数据库,仍然存在一定的误差。从实验结果可以看出,在相对孔径 > 2.7 及垂轴放大率 > 6 的范围内,得到的插值曲面对应的归一化均方根(RMS)值较大于原始数据;在相对孔径 < 1.2 及垂轴放大率 < 1.8 的范围内,求得的插值曲面对应的归一化 RMS 值较小于原始数据。分析原因一方面由于这些区域内提供的基础样本较少,数据量不足,导致插值结果产生突变,在一定程度上不可避免地增大了拟合误差带来的失真;另一方面由于设计过

程中的结构参数较少,在 Offner 补偿系统的设计中,限定了自准、相对孔径和放大率的条件下,还有四维自由度的变化空间,这些参数之间内蕴的非线性关系还未完全揭示出来。对此解决办法一是扩大参数密集度,二是在研究之中增加参数变量的丰富度,比如折射率、厚度、光焦度等。

6 结论

初步提出了一种用于抛物面 Offner 补偿器设计的结构寻优方法。每种结构形式按不同相对孔径优化出了 378 组设计结果,共 1134 组设计数据用来建立该型抛物面补偿器设计优化数据库,可直观知晓检验中各参数对系统检验能力的影响,在设计检验遇到困难时,能够有针对性地调整各参数优化方向以得到最优结构,并且可以在一定程度上避免试错设计的多次求解过程,大大提高了设计效率,有望能替代传统的以设计者经验预判的方法,为今后设计评价补偿器提供借鉴与参考,具有实际的推广意义。

虽然目前的结构变量较少,只将残差值作为系统的评定指标,在有些情况下缺乏一定的合理性,但是未来可在此方法基础上进行外延,将输入变量及输出变量的维数增加,比如更多地考虑加工、装调中的实际需求,扩展更多的设计实例,增加更多的样本数据,建立一个庞大且实用性强的数据库,以期得到一张更加完善的“非球面补偿器设计结果参照地图”。

参考文献

- [1] 师途, 杨甬英, 张磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 26-46.
Shi T, Yang Y Y, Zhang L, et al. Surface testing methods of aspheric optical elements[J]. Chinese Optics,

- 2014, 7(1): 26-46.
- [2] 程灏波, 王英伟. 非球面零件光学检测技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2004, 40(4): 8-10.
Cheng H B, Wang Y W. Research on testing technology for aspheric[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2004, 40(4): 8-10.
- [3] 伍凡. 非球面零检验的 Dall 补偿器设计[J]. 应用光学, 1993, 14(2): 1-4.
Wu F. Design of Dall compensator for aspherical surface null testing[J]. Journal of Applied Optics, 1993, 14(2): 1-4.
- [4] 伍凡, 陈强. F/1.3 抛物面零检验补偿器设计[J]. 光电工程, 2004, 31(1): 12-15.
Wu F, Chen Q. Design of a null testing compensator for F/1.3 paraboloid mirror[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(1): 12-15.
- [5] 伍凡. 非球面零检验的镜式补偿器设计[J]. 应用光学, 1994, 15(4): 10-13.
Wu F. Design of mirror compensator for asphere null check[J]. Journal of Applied Optics, 1994, 15(4): 10-13.
- [6] 王欣, 刘强, 周浩, 等. 无限远前后零位补偿结合的非球面检验[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1722003.
Wang X, Liu Q, Zhou H, et al. Aspheric test combining front and back null compensation for infinite optical path[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1722003.
- [7] 赵础鑫, 胡明勇, 张少伟, 等. 大口径高次非球面补偿检测方法的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 072203.
Zhao C C, Hu M Y, Zhang S W, et al. Research on compensation testing method for large-aperture and high-order aspheric surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 072203.
- [8] 王聪, 陈佳夷, 栗孟娟, 等. 基于干涉测量的 $\Phi 1.3$ m 非球面反射镜定心[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(1): 0113001.
Wang C, Chen J Y, Li M J, et al. Centering of $\Phi 1.3$ m aspheric reflector based on interferometry[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(1): 0113001.
- [9] 郝沛明. 非球面检验的辅助光学系统设计[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
Hao P M. Design of auxiliary optical system for aspheric testing[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [10] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004.
- [11] 周浩, 王欣, 刘强, 等. 基于平面波 Offner 补偿器检验非球面的光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 190801.
Zhou H, Wang X, Liu Q, et al. Optical system design of Offner compensator with infinity object distance applied on aspheric mirror testing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(19): 190801.
- [12] 伍凡. 非球面零检验的 Offner 补偿器设计[J]. 应用光学, 1993, 14(3): 8-12.
Wu F. Design of reflective Offner compensator for null testing of aspherical surface[J]. Journal of Applied Optics, 1993, 14(3): 8-12.
- [13] 李可新. 非球面零位检验的像差理论研究及应用[D]. 上海: 同济大学, 2010.
Li K X. Aberration analysis and application of aspheric surfaces null test[D]. Shanghai: Tongji University, 2010.
- [14] Sandwell D T. Biharmonic spline interpolation of GEOS-3 and SEASAT altimeter data[J]. Geophysical Research Letters, 1987, 14(2): 139-142.