

基于传函相似度的波前编码系统公差分配研究

闫 锋

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

摘要 波前编码技术(WCT)是一种“光学-数字”一体化的成像技术,其基本特性是可以有效扩大光学系统的焦深,并控制离焦以及与离焦有关的像差。另外一个显著特点是可以扩大系统的误差容限,即放松系统的公差分配。为评价波前编码技术对系统位置公差分配的影响,定义了传函相似度的新概念,并给出了传统系统与波前编码系统、波前编码系统在原位置公差分配和新位置公差分配条件下的传函相似度对比,根据一定的判据定量给出应用波前编码的离轴三反系统的位置公差,定量验证了波前编码技术的应用。

关键词 光学设计;波前编码;公差分配;传函相似度;残余误差

中图分类号 O438.2 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.s116006

Research on Tolerance Distributon of Wavefront Coded System Based on MTF Stmilarity

Yan Feng

(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 Wavefront coding technology (WFC) is a kind of joint optical-digital imaging technology, which can extend the depth of focus (DOF) of optical systems and control the defocus and defocus related aberrations. Another important character of the WCT is to enlarge the error budget of optical systems. The modulation transfer function (MTF) invariance is defined in this paper and the comparison of MTF invariance among original system, wavefront coded system with original tolerance and wavefront coded system with new tolerance is presented. The new tolerance of wavefront coded off-axis three mirror anastigmatic system is presented according to certain criteria and the application of WCT is validated quantitatively.

Key words optical design; wavefront coding; error tolerance; modulation transfer function similarity; residual aberration

OCIS codes 220.3620; 220.1140; 110.7348

1 引 言

波前编码技术(WCT)是一种“光学-数字”一体化的成像技术,可以很好地控制离焦误差及与离焦有关的像散、Petzval 场曲等。其基本思想是在光学系统中插入相位调制板等手段在系统光瞳函数上引入特殊的相位分布,使得系统成像质量对像面位置的敏感程度大大降低,在高斯像面两侧几倍焦深(DOF)范围内任何位置所采得的图像像质几乎完全一致。虽然图像质量有所下降,但由于光瞳函数

上引入的相位分布是完全已知的,因此可以通过后续的图像处理手段很好地实现退化图像的复原。国外的 CDM 公司、Rochester 大学、Heriot Watt 大学,国内的中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所、浙江大学等单位在波前系统的设计理论与方法、波前编码技术的应用等方面开展了大量工作,波前编码技术在虹膜识别、条码扫描、中波红外监视系统等领域得到了广泛应用^[1~7]。波前编码技术的另一个显著特点是可

收稿日期: 2011-08-07; **收到修改稿日期:** 2011-09-08

基金项目: 国家 863 计划(2009AA12Z105)资助课题。

作者简介: 闫 锋(1981—),男,博士,副研究员,主要从事波前编码技术、自由曲面检测和空间光学系统仿真等方面的研究。E-mail: yanfeng@ciomp.ac.cn

以增加系统的误差容限,即可以容忍更大的加工误差和装调误差。加利福尼亚大学的 Tremblay 等^[8]研究了应用波前编码技术的超薄环形折叠成像系统加工与装调公差放松程度;Chang 等^[9]研究了波前编码元件加工误差对系统成像质量的影响。

在以前的研究工作中,本课题组将波前编码技术应用于离轴三反(TMA)光学系统,研究此类系统的设计方法、图像复原技术及波前编码元件加工技术^[10~12]。为定量评价波前编码技术的应用对系统公差的影响,本文定义了“传函(MTF)相似度”的概念,对比了传统系统与应用波前编码技术的新系统在存在正常位置公差下的传函相似度,并以传函相似度为判据定量给出了波前编码系统可以容忍的新位置公差,证明了波前编码技术的应用可以使离轴三反系统各光学表面的位置公差得到较大程度的放松。

2 工作基础

本研究的工作基础是一个离轴三反系统(以下简称原系统),如图 1 所示,基本参数见表 1。应用波前编码技术的系统(以下简称新系统)以次镜为波前编码元件,其波面如图 2 所示。原系统与新系统在离焦量为 $-1.25\lambda \sim 1.25\lambda$ 情况下的传函曲线对比在图 3 中给出,相邻像面间的离焦量偏差为 0.25λ 。从图 3 中可见原系统的传函在该范围内变化极大,而新系统的传函则保持了很好的一致性。

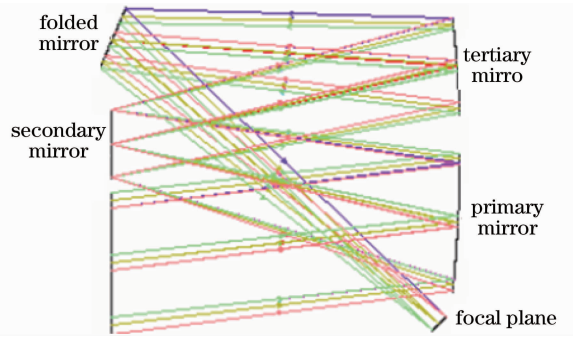


图 1 离轴三反系统示意图

Fig. 1 Layout of the off-axis TMA system

表 1 离轴三反系统基本参数

Table 1 Main technical parameters of the wavefront coded system under research

Focus	$F^\#$	Field of view	Working wavelength	$f_{cut-off}$
2250 mm	9	$0.934^\circ \times 5^\circ$	$0.6328 \mu\text{m}$	57 lp/mm

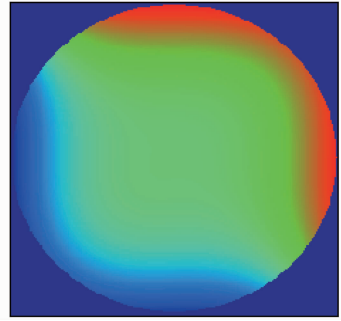


图 2 应用波前编码技术的系统波面

Fig. 2 Wavefront map of wavefront coded system

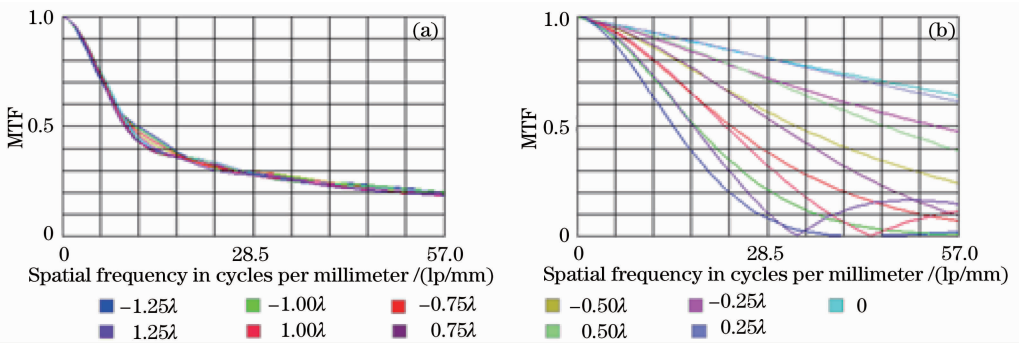


图 3 新系统(a)与原系统(b)在离焦量为 $-1.25\lambda \sim 1.25\lambda$ 情况下的传函对比,相邻像面间的离焦量偏差为 0.25λ
Fig. 3 Comparison of MTF curves between the new system (a) and the original system (b) when the defocus aberration varies from -1.25λ to 1.25λ with increment of 0.25λ defocus

3 传函相似度的定义

传函相似度(MTF similarity)的定义式为

$$\text{MTF similarity} \begin{cases} D_{PV}^{\text{MTF}} = \max(\Delta M_i) \\ D_{RMS}^{\text{MTF}} = \sum_1^k [\overline{\Delta M_i^2} - (\overline{\Delta M_i})^2]^{1/2} \end{cases}, \quad (1)$$

式中各物理量的含义如图 4 所示。 $\Delta M_i = M_i^{\text{est}} - M_i^{\text{ref}}$, M_i^{ref} 是在扩展了的焦深范围内被选作参考像面位置处的传函, 该位置暂定为扩展焦深的中心位置(即传统系统的高斯像面); M_i^{est} 表示的是在扩展了的焦深范围内的任意像面处的传函; $i = 1, 2, \dots, k$, k 是需要计算的传函采样点的数目。所研究的系统截止频率 $f_{\text{cut-off}} = 57 \text{ lp/mm}$, 如果采样间隔是 1 lp/mm , 那么 $k = 58$ 。

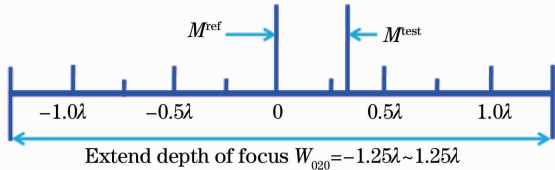


图 4 传函相似度的定义示意图

Fig. 4 Schematic explanation of the definition of MTF invariance

从传函相似度的定义可以看到, $D_{\text{PV}}^{\text{MTF}}$ 表征了 M^{est} 相对于 M^{ref} 的最大偏离程度, 而 $D_{\text{RMS}}^{\text{MTF}}$ 则表征了 M^{est} 相对于 M^{ref} 在整个有效空间频率范围内的平均偏离程度。因此, 相对于 $D_{\text{PV}}^{\text{MTF}}$, $D_{\text{RMS}}^{\text{MTF}}$ 更好地描述了 M^{est} 与 M^{ref} 的相似程度。

4 基于传函相似度的公差分配

为比较相同的公差分配对原系统与新系统的影响, 将表 2 中所示的光学系统各表面面形制造公差与表 3 所示的原系统位置公差分别导入到原系统与

新系统中, 根据以上传函相似度的定义可得到如表 4 所示的传函相似度。在计算中采样间隔为 0.2 lp/mm , 即 k 取值为 286。

表 2 光学表面制造公差

Table 2 Original manufacturing tolerance of the system

Error	Primary mirror	Secondary mirror	Tertiary mirror	
Geometric Parameters	$\Delta R / \text{mm}$	± 3.5	± 1.5	± 1.1
Figure error	ΔK	0.00028	0.002	0.00031
	RMS ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)	$\lambda/50$ $\phi 220 \text{ m}$	$\lambda/50$ $\phi 122 \text{ mm}$	$\lambda/50$ $\phi 180 \text{ mm}$

表 3 原装调公差分配方案

Table 3 Original aligning tolerance of the system

Error	Primary mirror	Secondary mirror	Tertiary mirror
$\Delta X / \text{mm}$	Reference	0.02	0.05
$\Delta Y / \text{mm}$	Reference	0.02	0.05
$\Delta Z / \text{mm}$	Reference	0.04	0.1
$\theta_x / (")$	Reference	10	12
$\theta_y / (")$	Reference	10	12
$\theta_z / (")$	Reference	20	20

从图 5 中可以看到, 在引入面形公差与位置公差后, 原系统截止频率处的传函由优于 0.5 下降到了 0.4; 而从图 6 中可以看到在引入相同公差后新系统的传函变化小于 0.015, 从图 7 中也可以看到, 在扩展较深范围内不同像面位置处的传函曲线仍然保持了很好的一致性, 与理想系统的差别几乎可以忽略不计。

表 4 原系统与新系统在原公差分配方案下的传函相似度对比

Table 4 Comparison of MTF invariance among the original system with tolerance and the new system with and without tolerance

Defocus	Original system (with tolerance)		New system (without tolerance)		New system (with tolerance)	
	$D_{\text{PV}}^{\text{MTF}}$	$D_{\text{RMS}}^{\text{MTF}}$	$D_{\text{PV}}^{\text{MTF}}$	$D_{\text{RMS}}^{\text{MTF}}$	$D_{\text{PV}}^{\text{MTF}}$	$D_{\text{RMS}}^{\text{MTF}}$
-1.25λ	0.6884	0.2213	0.03305	0.01477	0.03319	0.01473
-1.00λ	0.5840	0.2031	0.02450	0.01241	0.02480	0.01237
-0.75λ	0.4292	0.1504	0.01549	0.009482	0.01572	0.009470
-0.50λ	0.2340	0.08085	0.009300	0.005606	0.009460	0.005675
-0.25λ	0.06221	0.02139	0.003310	0.001812	0.003430	0.001906
0	0	0	0	0	0	0
0.25λ	0.08524	0.02976	0.002410	0.001521	0.002230	0.001387
0.50λ	0.2790	0.09833	0.008270	0.005236	0.007930	0.004994
0.75λ	0.4910	0.1765	0.01668	0.009265	0.01617	0.009030
1.00λ	0.6458	0.2202	0.02619	0.01231	0.02562	0.01214
1.25λ	0.7297	0.2197	0.03516	0.01462	0.03461	0.01446

显然, 新系统完全可以容忍更为宽松的公差分配。而新公差的分配应同时考虑两个因素: 1) 传函

允许下降的程度; 2) 传函相似度即 $D_{\text{PV}}^{\text{MTF}}$ 及 $D_{\text{RMS}}^{\text{MTF}}$ 允许下降的程度。一般而言, 能够进行很好图像复原

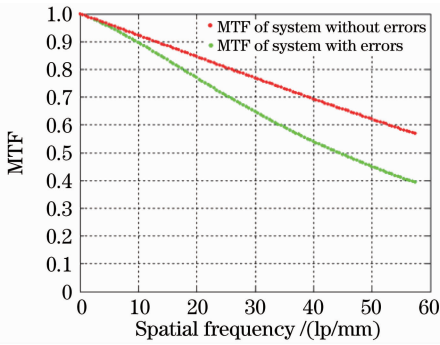


图 5 引入原公差分配方案前后原系统传函对比
Fig. 5 Comparison of MTF between tradition systems with and without the tolerance

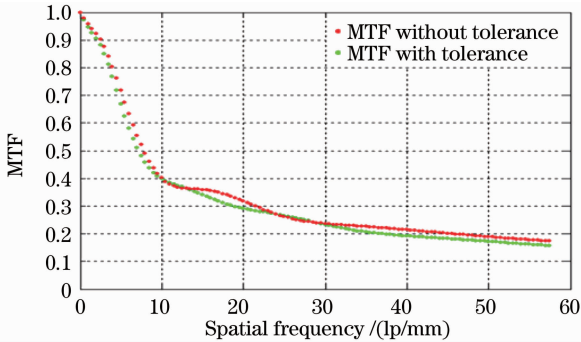


图 6 引入原公差分配方案前后新系统参考像面处传函对比
Fig. 6 Comparison of MTF between the new systems with and without the tolerance

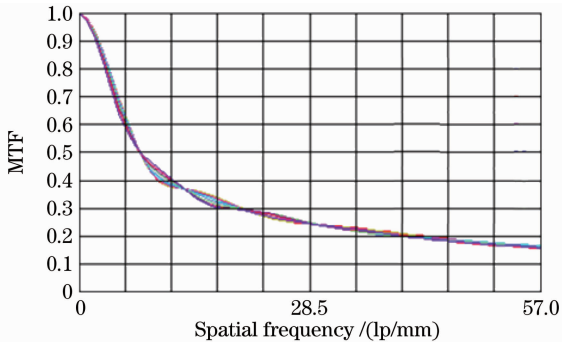


图 7 引入原公差分配方案后新系统扩展焦深范围内传函
Fig. 7 MTF curves of wavefront coded system with tolerance within extended DOF

的空间光学系统其动态传函应不低于 0.03,由系统静态传函到动态传函的传递因子以 0.2 计,因此静态传函应不低于 0.15。而传函相似度的下降则会造成扩展较深范围内图像相似程度的下降,从而给后续图像复原带来困难,因此限制传函相似度的下降 $\Delta D_{RMS}^{MTF} < 0.003$ 。根据以上原则对新系统制定了如表 5 所示新的装调公差方案,而光学表面加工公差暂不做调整。

表 5 新公差分配方案与原公差分配方案对比
Table 5 New aligning tolerance of secondary mirror and tertiary mirror

Error	Secondary mirror		Tertiary mirror	
	Original tolerance	New tolerance	Original tolerance	New tolerance
$\Delta X / \text{mm}$	0.02	0.05	0.05	0.13
$\Delta Y / \text{mm}$	0.02	0.05	0.05	0.13
$\Delta Z / \text{mm}$	0.04	0.15	0.1	0.25
$\theta_x / (")$	10	30	12	25
$\theta_y / (")$	10	30	12	25
$\theta_z / (")$	20	50	20	50

表 6 新系统在原公差分配与新公差分配下的传函相似度对比

Table 6 Comparison of MTF invariance between the new systems with original tolerance and new tolerance

Defocus	New system (original tolerance)		New system (new tolerance)	
	D_{PV}^{MTF}	D_{RMS}^{MTF}	D_{PV}^{MTF}	D_{RMS}^{MTF}
-1.25λ	0.03319	0.01473	0.05112	0.01589
-1.00λ	0.02480	0.01237	0.03907	0.01334
-0.75λ	0.01572	0.009470	0.02772	0.01047
-0.50λ	0.009460	0.005675	0.01729	0.007114
-0.25λ	0.003430	0.001906	0.008680	0.003512
0	0	0	0	0
0.25λ	0.002230	0.001387	0.008330	0.003469
0.50λ	0.007930	0.004994	0.01514	0.006805
0.75λ	0.01617	0.009030	0.01933	0.009276
1.00λ	0.02562	0.01214	0.02018	0.010993
1.25λ	0.03461	0.01446	0.01754	0.012674

从表 6、图 8、图 9 中可以看到,在系统装调公差放松至少 2.5 倍的情况下,系统静态传函优于 0.15 (全视场);传函相似度下降 $\Delta D_{RMS}^{MTF} < 0.002$ 且 $\Delta D_{PV}^{MTF} < 0.02$,满足设定的要求。同时可以看到,装调公差的放松对传函相似度的影响较为轻微,如果

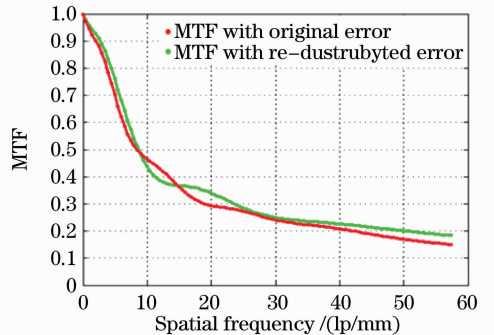


图 8 引入新公差分配方案前后新系统参考像面处传函对比
Fig. 8 Comparison of MTF between the new systems with and without the new tolerance

仅从传函相似度的角度考虑,系统还可以容忍更为宽松的装调公差。但如同传统系统一样,波前编码系统的传函幅值对装调公差较为敏感,公差放松的程度即主要决定于此。

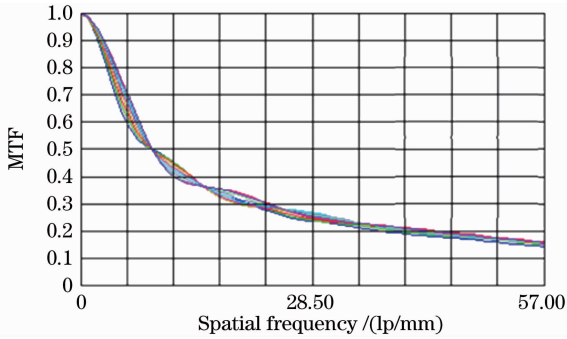


图 9 引入新公差分配方案后新系统扩展焦深范围内传函

Fig.9 MTF curves of the new system with new tolerance within extended DOF

5 结 论

通过定义传函相似度的概念,对比了传统公差分配方案对传统系统及波前编码系统的影响,同时以传函相似度为主要依据,为波前编码系统分配了新的公差方案。在各光学元件位置公差放松至原方案 2.5 倍以上的情况下,波前编码系统的传函下降在允许范围内,且扩展焦深范围内仍然保持了很好的一致性,进一步证明了波前编码技术的应用可以放松系统的公差容限。

参 考 文 献

1 Edward R. Dowski, W. Thomas Cathey. Extended depth of field through wave-front coding[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(11): 1859~1866

2 Edward R. Dowski Jr, Paulo E. X. Silveira, Ramkumar Narayanswamy. Integrated system design for application-specific imaging[C]. Tucson Arizona, 2005; FThU2

3 Sara Bradbum, Wade Thomas Cathey, Edward R. Dowski. Realizations of focus invariance in optical-digital systems with wave-front coding[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(35): 9157~9166

4 Jorge Ojeda-Castañeda, J. E. A. Landgrave, Cristina M. Gómez-Sarabia. Conjugate phase plate use in analysis of the frequency response of imaging systems designed for extended depth of field[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(22): E99~E105

5 Gonzalo Muyo, Andy R. Harvey. Decomposition of the optical transfer function: wavefront coding imaging systems[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(20): 2715~2717

6 Ramkumar Narayanswamy, Alan E. Baron, Vladislav Chumachenko *et al.*. Applications of wavefront coded imaging [C]. *SPIE*, 2004, **5299**: 163~174

7 Zhao Tingyu, Zhang Wenzi, Ye Zi *et al.*. Design of wavefront coding system based on evaluation function of Fisher information [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1096~1101

赵廷玉, 张文字, 叶子等. 应用费希尔信息量评价函数的波前编码系统设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1096~1101

8 Eric J. Tremblay, Joel Rutkowski, Inga Tamayo. Relaxing the alignment and fabrication tolerances of thin annular folded imaging systems using wavefront coding[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(27): 6751~6758

9 Chuanchung Chang, Chengchung Lee. Effect of surface manufacturing error of cubic phase mask in wavefront coding system[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(8): 6245~6251

10 Yan Feng, Zhang Xuejun. Optimization of an off-axis three-mirror anastigmatic system with wavefront coding technology based on MTF invariance[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(19): 16809~16819

11 Yan Feng, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Image restoration of an off-axis three mirror anastigmatic optical system with wavefront coding technology[J]. *Opt. Engng.*, 2008, **47**(1): 017006

12 Feng Yan, Di Fan, Binzhi Zhang *et al.*. Manufacturing and testing of a cubic SiC surface[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(6): 534~536

栏目编辑: 胡 冰