

doi:10.3788/gzxb20154402.0211001

基于像清晰化函数最优化的高速机载 相机动态像质补偿技术

李岩,胡斌,庄绪霞

(北京空间机电研究所,北京 100094)

摘要:为满足高速飞行器对目标快速识别和打击的需求,针对大观测场高速机载光电探测系统像质退化严重、像质补偿元件机构复杂、像差校正实时性较差的问题,提出采用可变形反射镜作为动态像质补偿器对传统高速动态成像光学系统像质进行补偿和改进.利用基于像清晰化函数最优化的自适应光学动态像质补偿技术的优化算法对系统动态像差进行闭环实时校正,通过仿真对所提出的方法进行可行性分析和验证.仿真结果表明:与校正前相比,该校正方法使光学系统在 60° 大角度观测场内泽尼克动态像差变化量的峰谷值最大下降17.5%,点列图弥散斑均方根半径降低至10.61%,校正后的系统残余像差小,在整个观测场内,像质均接近光学衍射极限.

关键词:动态成像光学;像质补偿;像清晰化函数;高速飞行器;动态像差

中图分类号:O435.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)02-0211001-5

Technique of Adaptive Dynamic Imaging Quality Compensation for Dynamic Optics Working for High-speed Aircraft

LI Yan, HU Bin, ZHUANG Xu-xia

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: Confronted with the requirement of the high resolution earth-observation system of high-speed aircraft working in near-space environment, and the imaging system with dynamic optical windows is likely to suffer from extreme dynamic aberration, complex imaging quality compensators and bad real-time character, the traditional imaging quality compensation was improved and the adaptive optical (AO) technique was explored as a novel way of solving the problems. The image sharpening function optimization closed-loop adaptive wavefront correction algorithm was used. Simulations results indicate that the correction method can make the PV (peak to valley) waves of the Zernike aberration term in reduce to about 17.5% and the RMS spot radius to about 10.61% less than before correction the system which has 60° FOR (field of regard). By correction with this method, the residual aberration is much less than the baseline system and the imaging performance can be almost diffraction limited.

Key words: Dynamic optics; Dynamic aberration correction; Image sharpening function; High-speed aircraft; Dynamic aberration

OCIS Codes: 110.2970; 110.3080; 280.4788

0 引言

高速机载相机工作于高空或者临近空间环境中,可用于对地侦查或者对敌方目标进行快速精准打击.

由于高速飞行平台的飞行高度比卫星轨道低,因此对目标探测时观测分辨率通常比卫星要高,但其缺点是视野小,难以实现大范围覆盖,因此需在满足观测分辨率的条件下尽量扩大其观测场^[1-2].

基金项目:国家自然科学基金(No. 11304012)资助

第一作者:李岩(1982-),女,工程师,博士,主要研究方向为高速机载传感器设计、空间光学传感器设计与仿真分析、杂散辐射分析与抑制等. Email: liyan_bit@163.com

收稿日期:2014-05-19;录用日期:2014-08-27

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

高速机载相机由于飞行速度较快,其载荷成像时既要保证载体高速运动时的环境适应性和力学性能良好,此时机载相机选用的光学元件在大视场动态成像过程中一般会造成光学成像质量的退化,选择合理的动态像差校正方法保证相机成像质量成为光学系统设计所面临的最大挑战。

目前国内外采用的像差校正方法主要有静态像差校正方法和动态像差校正方法^[3-4]。传统校正方法面临校正像差不完善、校正器结构或机构复杂等问题,严重制约了高速飞行器载荷的探测能力。本文对传统的像差校正模式进行改进,采用基于像清晰化函数最优化的自适应波前校正方法,该方法校正像差实时性较强,并可有效简化系统结构,最后通过实例证明了该动态像差校正方法的合理性和有效性。

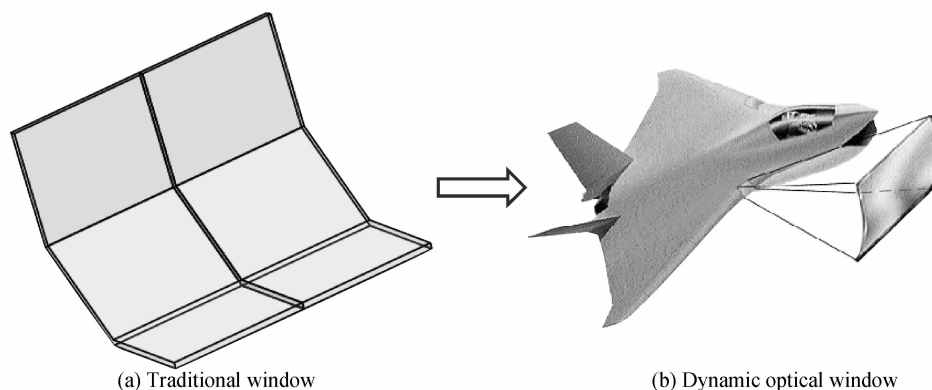


图1 平面光学窗口的拼接与飞行器的高速动态成像光学窗口

Fig. 1 Splicing of the flat windows and dynamic optical window of the high-speed aircraft

台周围的空气扰动场,减小雷达散射截面的面积,并且增大高速飞行器吊舱内光学系统的安装空间。

1.2 像清晰化函数最优化的自适应光学动态像质补偿方式

自适应光学像质补偿方式利用光电子技术实时测量波前误差,用快速电子系统计算和控制,用波前校正器件进行实时波前校正,是改善成像系统的分辨能力的有力保证^[6]。本文采用基于像清晰化函数最优化的自适应光学闭环校正模式,主要由波前控制器、波前校正器和性能指标分析模块组成,该工作模式不使用波前传感器成像,可使系统复杂性大大降低^[7-8]。像清晰化自适应光学系统常采用随机并行梯度下降(Stochastic Parallel Gradient Descent, SPGD)优化算法及超大规模集成电路,为像清晰化自适应光学的应用提供高效的信号处理架构^[9]。

像清晰化自适应光学波前校正的思想是:不利用波前传感器进行波前测量,而是认为波前畸变的影响集中体现在一个标量的系统性能评价函数 J 上。 J 是施加在变形镜所有校正单元上的控制电压信号 $u = [u_1, \dots, u_j, \dots, u_N]$ 的函数,即

1 高速动态成像光学系统自适应动态像质补偿技术

1.1 高速动态成像光学窗口对高速飞行器平台的影响

为满足大的探测视场,传统的高速飞行器通常利用如图 1(a)所示拼接的平面光学窗口。但是平面拼接式光学窗口在接缝处会产生大量的光学衍射,使系统的光学传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 大为降低;另外,拼接间隙易产生热梯度,接缝处易损坏,且接缝及与窗口的连接处易发生射频分散^[5]。在光学窗口设计时采用流线形的非球面面形,可使上述缺陷明显改善,窗口设计符合空气动力学原理,能够有效减小机身受到的空气阻力,还可减少飞行平

$$J = J(u) = J(u_1, \dots, u_j, \dots, u_N) = \iint I^2(x, y) dx dy \quad (1)$$

式中 N 代表可变形反射镜 N 个电极的控制电压, $I(x, y)$ 为成像探测器上探测得到的性能指标分析函数,即光强分布函数。与一般光学设计优化时的评价函数类似,评价函数 $J(u)$ 的值可以反映光学系统成像质量的优劣,当迭代完成时,评价函数达到极值,那么成像质量就达到最优,其中极致解 u 就在最后一次迭代中得到^[10]。

基于像清晰化自适应光学的理论,采用可变形反射镜作为高速动态成像光学系统的动态像差补偿元件,可变形反射镜各致动器影响函数满足高斯函数形式,即

$$Z(r) = \exp(-\beta r^2) \quad (2)$$

式中 β 为常数, r 是变形镜薄膜的某一点到电极之间的距离。

变形镜的表面矢高量 $S(x, y)$ 可以用每一个致动器导致的变形矢高量的线性叠加来表示,即

$$S(x, y) = \sum_{i=1}^N A_i Z_i(x, y) \quad (3)$$

式中 A_i 是致动器的峰值位移, N 是致动器的个数。所

有致动器按六边形分布,图 2 给出了多个制动器运动时,变形镜的表面面形。

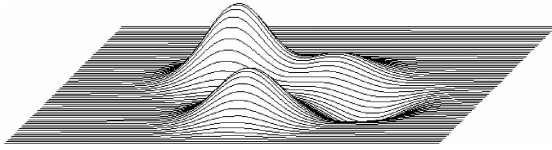


图 2 多个制动器同时作用时的变形镜的表面形状
Fig. 2 The surface type of the deformable mirror when multi-actuator act

设整个变形镜表面形状的表达式为 $F(x, y, z) = 0$, 其中 z 表示变形镜的表面矢高值. 在加载用户自定义面形后, 通过不断计算光线与变形镜的交点 (x, y, z) . 这些交点由折合距离 D 来决定, 即

$$\begin{cases} x = x_0 + L * D \\ y = y_0 + M * D \\ z = z_0 + N * D \end{cases} \quad (4)$$

D 是交点 (x, y, z) 到光线与前一面的交点 (x_0, y_0, z_0) 的距离除以两表面之间介质的折射率, 其中 L, M, N 是光线的方向余弦. 用迭代的方法搜索满足关系式 $F(x, y, z; D) = 0$ 中的 D . 在计算得到光线与变形镜的

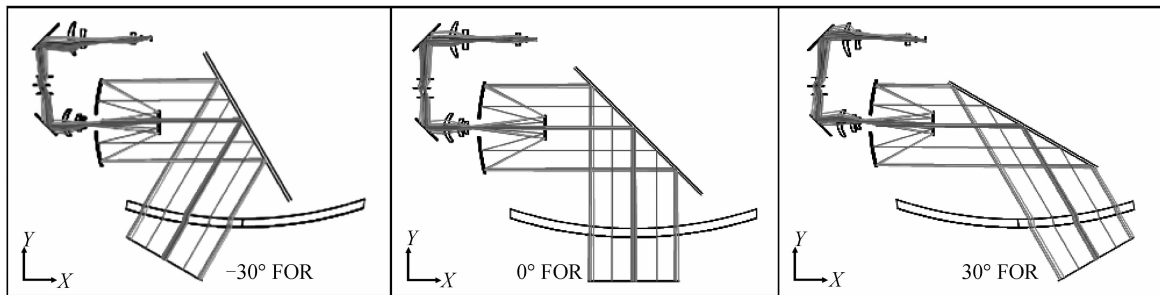


图 3 高速机载遥感器高速动态成像光学系统

Fig. 3 Layout of a baseline system at three zoom positions working in high-speed aircraft

2.2 系统的工作模式

高速机载动态成像光学系统的动态像质补偿工作模式如图 4, 光线通过成像光学窗口后入射到摆镜上, 光束经过摆镜反射后经主镜、次镜和中继成像透镜组之后入射至成像探测器上, 整个光学系统为一个折反射式成像光学系统, 它通过光机扫描机构控制摆镜的运动达到所需要的扫描视场. 成像探测器将探测到的图像信息传送到成像处理器中, 经过信号处理得到不同 FOR 时系统成像性能指标分析数据——斯特列尔比能量分布矩阵, 并将性能指标分析数据送入计算机或者智能控制芯片, 控制芯片采用像清晰化自适应光学校正算法进行实时的闭环控制运算后得到变形镜的驱动电压信号, 并将驱动信号输入可变形反射镜的面形驱动器, 驱动变形镜的致动器, 使变形镜产生相应的形变, 以校正高速动态成像光学窗口引入的动态像差. 控制芯片的另一个作用是产生目标方位的指令输入自动化机械装置, 以驱动摆镜进行步进扫描运动, 从而完

成整个视场的光机扫描成像.

2 高速机载高速动态成像光学的自适应光学像质补偿仿真分析

2.1 光学系统初始结构

图 3 为某高速机载光电探测系统在 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 观测场下的成像光路图. 为满足该光电探测系统所在飞行器的空气动力学性能, 其高速动态成像光学窗口采用面形为符合空气动力学的流线型表面. 光学窗口材料采用 ZnS, 后置成像光学系统为折反射式光学系统结构, 其中次镜采用基底为曲面的压电陶瓷式可变形反射镜, 通过放在窗口后面的摆镜进行 $\pm 15^\circ$ 角的摆动, 以实现光电探测系统对外部目标以 $\pm 30^\circ$ 扫描视场 (Field Of Regard, FOR) 进行观测, 其工作谱段为 $7.7 \sim 10.3 \mu\text{m}$, 中心波长为 $9 \mu\text{m}$, 光学系统入瞳直径为 200 mm , 工作 F 数为 2.75 , 每个扫描视场下的瞬时视场角 (Field Of View, FOV) 为 0.8° .

成整个视场的光机扫描成像.

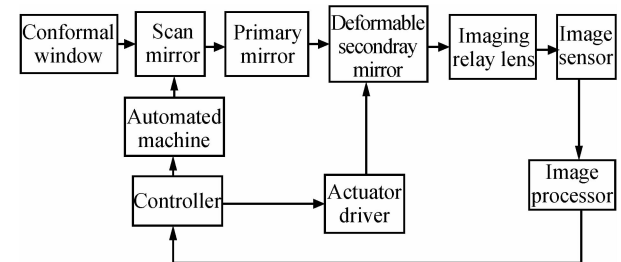


图 4 自适应光学系统的闭环工作模式

Fig. 4 Block diagram of the working mode for the dynamic optics based AO technique

像清晰化波前控制优化算法采用程序设计软件编制, 光学系统的模型由光学设计软件构建. 基于 Windows COM 构筑的 ActiveX 自动化接口技术, 光学设计软件中的应用程序接口与程序设计软件之间可以进行数据通信, 如图 5. 在每个迭代周期中, 程序设计软件都要读取由光学设计软件分析得到的斯特列尔比分布矩阵, 通过迭代算法计算出控制电压, 并将其传

递给光学设计软件的应用程序接口,程序将控制电压矩阵的每一个元素分别赋值给变形镜的对应序号的面形系数,此时变形镜的面形得以改变,也同时改变了光学系统的成像面上的能量分布,从而可以将新的斯特列尔比分布矩阵传递给程序设计软件进行迭代运算,如此反复地进行“数据传递—迭代运算—数据传递”这一过程,直至满足终止条件,像清晰化像质评价函数达到极值,光学系统同时达到最优的成像质量,算法的速度越快,这种反复的闭环工作就会使整个系统成像质量补偿的动态性和实时性达到越好的效果。

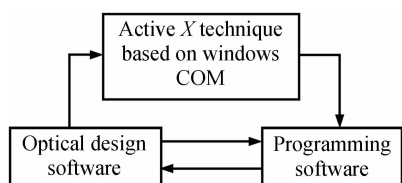


图5 软件接口之间数据传递过程示意图

Fig. 5 Communications between optical design software and programming software

表1 泽尼克径向边缘多项式的前9项及所对应的像差含义

Table 1 The aberration meanings expressed by first 9 terms of the Zernike fringe polynomial

Term	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈
Aberration	Piston	Y Tilt	X Tilt	Focus	Astigmatism	Astigmatism	Coma	Coma

软件分析的数据,拟合了较严重的几项泽尼克边缘多项式系数所代表的像差随着FOR变化的曲线如图6所示,其中图6(a)为校正前光学系统的像差曲线,参照表1,最严重的像差包括:倾斜、离焦、像散和彗差,其中所有像差中动态变化范围的最大PV值约8个波

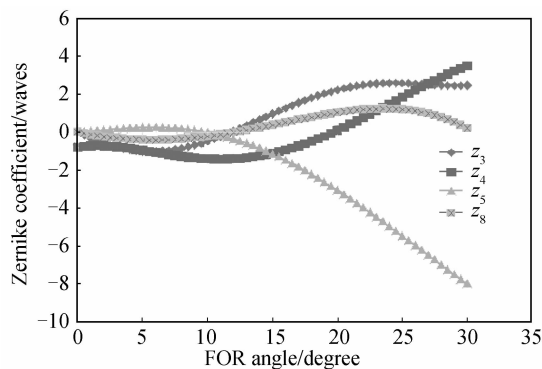
2.3 自适应光学技术像质补偿效果分析

在不同观测场下,将通过对象面畸变波前进行泽尼克多项式进行分解,与像质评价中的低阶像差有相互对应关系,如表1。

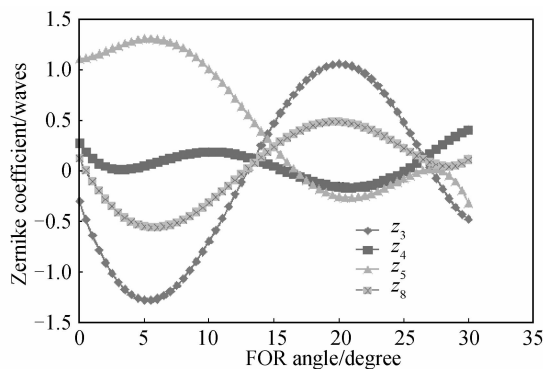
高速动态成像光学系统的动态像差以及像差的变化情况主要通过对象面出瞳处的波前像差进行Zernike多项式拟合,从而得到各项的系数,其中系数比较大那几项所对应的像差即为主要像差。

为了达到高速机载相机的对目标视场进行大视场跟踪扫描的目的,本系统扫描视场的范围是-30°~30°,以0.5°为间隔进行分析。由于本系统在-30°~0°FOR和0°~30°FOR的像差情况相同,因此以下给出0°~30°FOR的动态像差分析结果,其中次镜为普通反射镜时的光学系统即校正前系统,次镜作为反射镜起到动态像差校正作用后的光学系统即校正后系统。

当系统进行大视场动态扫描成像时,光学系统的像差也随着FOR的变化呈动态变化的特性,根据光学



(a) The aberrations curves before aberration correction



(b) The aberrations curves after aberration correction

图6 系统校正前后的泽尼克像差系数PV值随FOR变化曲线图

Fig. 6 The PV wave of Zernike aberration term Vs. FOR

图7给出了光学系统在采用像清晰化自适应像质校正技术前后,系统动态像差的变化情况。图中每个黑色圆圈均代表光学系统的艾里斑,图7(a)为校正前后光学系统在不同扫描视场下各个瞬时视场下成像点列图,其中该图从左到右为光学系统扫描视场在0°~30°之间的变化,从上到下为系统瞬时视场角度的变化。从该图可明显看出,采用像清晰化函数最优化的方法校正后与校正前相比,弥散斑的弥散最大范围已明显降低至与艾里斑直径范围相当。图7(b)给出了像差校正前后所有视场中弥散范围最大的点列图,本系统艾里

斑半径为31.1 μm。从该图可知,校正前成像点列斑均方根(Root Mean Square, RMS)半径最大值约为艾里斑半径的3.31倍,校正后最大RMS点列斑半径为10.923 μm,为校正前的10.61%;校正前成像最大几何(geometry, GEO)点列斑半径为艾里斑半径的6.63倍,校正后降低为30.799 μm。因此,经过基于像清晰化函数最优化的动态像差校正后,光学系统在所有视场下最大GEO点列斑尺寸已经与艾里斑尺寸相当,最大RMS点列斑半径小于艾里斑半径,成像质量接近衍射极限。

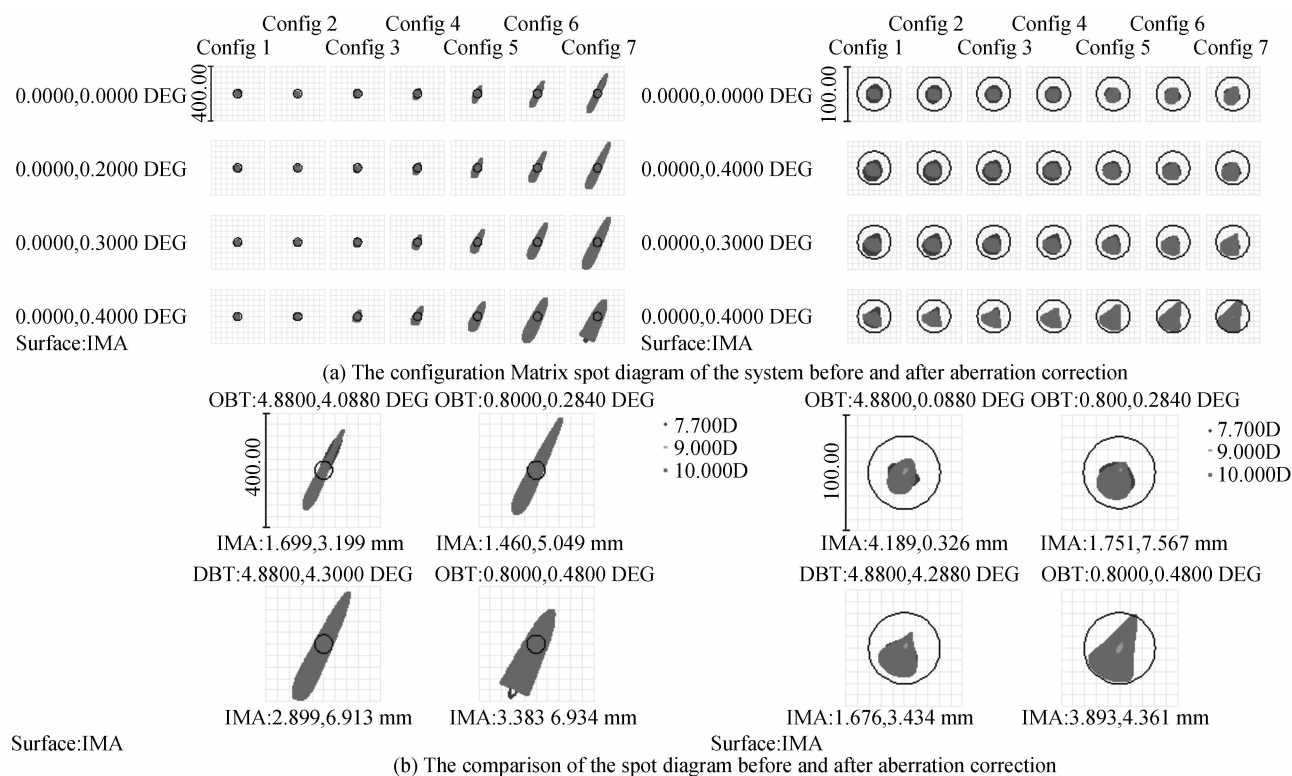


图7 系统动态像质补偿前后的点列图对比

Fig. 7 The comparison of the spot diagram before and after aberration correction

3 结论

本文以临近空间高速飞行器大视场光电扫描成像需求为应用背景,光学系统采用环形面作为外表面的高速动态成像光学窗口,提出采用基于像清晰化自适应光学像质补偿技术的动态像质补偿方法,来校正该高速动态成像光学系统在大FOR范围的动态像差。仿真结果表明,动态像差校正后系统所有像差中最严重的动态像差PV值约降低至像差校正前的17.5%,在整个视场内点列图最大RMS弥散半径也已校正到艾里斑半径 $31.1\ \mu\text{m}$ 范围以内,校正后系统成像质量接近衍射极限。基于像清晰化函数最优化的动态像质补偿技术无需额外添加校正器件,只需在光学系统次镜位置处放置动态像质补偿元件——可变形反射镜,在保证像差校正效果的同时降低系统的复杂度,并可有效提高动态像质补偿的动态性和实时性,在临近空间高速飞行器载荷对地或者对环境目标的探测方面具有广阔的应用前景,在提高武器装备系统的打击和防御能力方面具有重要的研究价值。

参考文献

- [1] SUN Jin-xia, LIU Jian-zhuo, SUN Qiang. Application of the aberration correction criteria in conformal optical system design [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(02): 223-226.
孙金霞,刘建卓,孙强. 消像差条件在共形光学系统中的应用 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(02): 223-226.
- [2] JIANG Yang, SUN Qiang, LIU Ying, *et al.* Athermal design

for IR optical seeker system with wide FOV [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(04): 462-466.

姜洋,孙强,刘英,等. 大视场红外导引头光学系统消热差设计 [J]. *光子学报*, 2013, **42**(04): 462-466.

- [3] LI Lin, LI Yan, HUANG Yi-Fan, *et al.* The research of conformal optical design [C]. SPIE, 2009, 7383: M-1~M-8.
- [4] SUN Jin-xia, PAN Guo-qing, SUN Qiang. Micro zoomed conformal optical design using free-form surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(07): 757-761.
孙金霞,潘国庆,孙强. 利用自由曲面进行微变焦共形光学系统设计 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(07): 757-761.
- [5] SCOTT W S. Arch corrector for dynamic optical systems. window and dome technologies and materials VII [C]. SPIE 3705, 1999: 146-153.
- [6] JOHN W H. Adaptive optics: a progress review [C]. SPIE, 1991, **1542**: 2-17.
- [7] ZHANG Li-qin, FEI Jin-dong. Photoelectric correction methods applied to aero-optical effects [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(06): 580-583.
张丽琴,费锦东. 气动光学效应光电校正方法研究 [J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(06): 580-583.
- [8] SPALL J C. Multivariate stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation [C]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1992: 332-341.
- [9] CAUWENBERGHS G. Analog VLSI stochastic perturbative learning architectures [J]. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 1997, **13**: 195-209.
- [10] VORONTSOV M A, CARHART G W, COHEN M, *et al.* Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration [J]. *Journal of Optical Society of America A*, 2000, **17**(8): 1440-1453.