超音速共形光学系统动态热差实时校正研究

李衍璋[1],黄长春[2],张运强[3],牛亚军[1],宋大林[1],常 军[1*]

(1. 北京理工大学 光电学院,北京 100081;
2. 河南工业职业技术学院 机电学院,河南 南阳 473000;
3. 中国空空导弹研究院,河南 洛阳 471009)

摘 要: 随着科技的发展,高速度飞行器对成像质量的要求越来越高。研究了含共形整流罩系统在超音速飞行时由于摩擦生热对其产生的光机性能影响,设计了应用长径比为 1 的共形整流罩的共形光学系统,系统采用楔形镜进行视场扫描,瞬时视场 $2\omega=4°$,扫描视场 $2\omega=60°$,完成了速度为 $3Ma$、攻角为 0°共形整流罩空气动力学仿真实验,得到了共形整流罩在超音速飞行情况下的表面温度分布值,通过流固耦合,计算出整流罩在高速飞行时不同时间段的面型变化量。通过拟合,将热形变量以 Zernike 系数的形式施加到共形光学系统中,观察其对成像质量的影响。结果表明:共形整流罩在飞行中所引入的动态像差会对光学系统的成像质量产生影响。为保证系统精度,文中通过采用空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)对不同时刻的像差进行校正,校正后系统成像质量接近衍射极限,实现了对共形光学系统在高速飞行下所产生的动态热像差进行校正,对高精度飞行器有着重要科学意义。

关键词: 共形光学系统; 有限元分析; 实时动态校正热差; 空间光调制器
中图分类号: O435 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0418001

Real-time correction of dynamic thermal differential of supersonic conformal optical system

Li Yanzhang[1], Huang Changchun[2], Zhang Yunqiang[3], Niu Yajun[1], Song Dalin[1], Chang Jun[1*]

(1. School of 0ptoeletronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Electronmechanic College, Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China;
3. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: With the development of science and technology, there are more and more high requirements of imaging quality for high speed aircraft. The effect of friction heating on imaging quality of supersonic speed system with a conformal dome was studied. An conformal optical system with a conformal dome which had a length-to-diameter ratio of 1 was designed. The system had two wedge mirrors for field scanning, which provided a instantaneous FOV of 4° and a scanning FOV of 60°. A conformal fairing aerodynamic simulation experiment with the speed of Mach 3 and attack angle of 0° was finished. The surface temperature distribution of conformal dome in supersonic speed was obtained.

收稿日期: 2016-08-07; **修订日期:** 2016-09-10
基金项目: 预研基金(201511340836);航空基金(20150172002)
作者简介: 李衍璋(1990-),男,硕士生,主要从事共形光学系统设计方面的研究。Email:fisheyesopen@163.com
导师简介: 常军(1973-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事光学系统设计加工检测方面的研究。Email:bitchang@bit.edu.cn

Through the fluid-solid interaction, surface variation of different periods was calculated. The thermal surface variation was fitted into Zernike coefficients and applied to conformal optical system. The analysis results showed that the dynamic aberration introduced by high speed flight affected the imaging quality of optical system. In order to guarantee the system precision, a Spatial Light Modulator (SLM) was used to correct the aberration of different periods. After correction, system imaging quality was close to the diffraction limit, which had realized thermal aberration correction of conformal dome in supersonic speed flight. This study has certain significance to the development of high precision aircraft.

Key words: conformal optical system; finite element analysis; real-time dynamical heat aberration correction; SLM

0 引 言

共形整流罩以其优越的空气动力学性能，广泛应用于各种飞行器中。美国雷声(Raytheon)公司和精密共形光学技术 (Precision Conformal Optic Technology,PCOT)团队对共形整流罩的研究结果进行了总结[1]:(1) 减少了飞行器阻力,确保飞行器获得更远射程和更快速度，缩短飞行器飞行时间;(2)提高了飞行器气动性能，可改善整流罩附近的热流特性;(3)在未来科技发展中扮演重要角色。

一般共形整流罩都是红外材料，所以共形光学系统一般应用在红外波段,近年来,红外光学系统在各种各样的应用中表现出了明显优势[2-4]。由于含共形整流罩的飞行器通常工作条件复杂，环境温度的变化、气动压力的变化以及高速飞行中摩擦所产生的热变形都将对其后光学系统的光机特性产生影响。红外材料受热变形影响较大,传统消热差的方法是进行无热化设计[5-6],但是环境会引入额外像差,如何分析得到并消除这些影响，对于高精度导航有着重要意义。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的姜振海等人研究了高速飞行共形整流罩由于压力而引起的形变[7],初步探索了超音速共形整流罩由于温度而引起的形变[8];在校正像差方面,清华大学的朱钧通过自由曲面对光学系统像差进行校正[9]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所所的孙金霞等人提出通过对校正板蚀刻衍射面的方式对共形整流罩的非对称像差进行校正[10]。随着变形镜(deformable mirrors, DMs)、液晶空间光调制器 (liquid crystal spatial light modulator, LC SLM)等的发展，利用程控主动光学元件进行像差校正也受到了广泛的重视。2015 年，北京理工大学的杜晓宇等人使用 SLM 对一个红外光学系统进行像差校正,实现了特定视场的局部高分辨成像[11]。但是以上研究中并没有对由外界环境条件而引入的动态变化进行较大视场、全范围的动态实时校正。

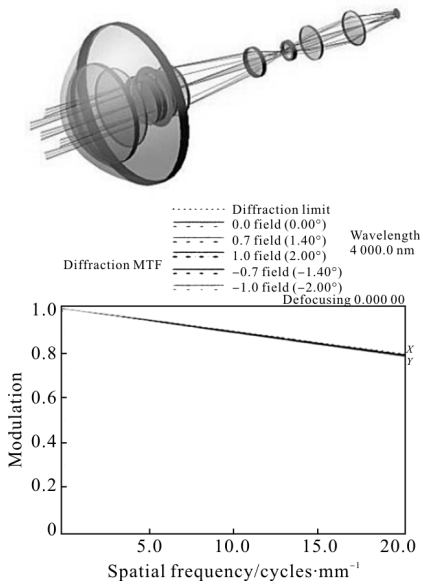
基于前人的研究,提出了一种通过 SLM 校正由于共形整流罩高速飞行过程中空气摩擦热形变所产生动态热差。为了验证方法的有效性,设计了长径比为 1 的共形整流罩的共形光学系统,该光学系统采用楔形镜进行视场扫描，瞬时视场为 $2\omega=4°$,扫描视场 $2\omega=60°$。应用 ANSYS 软件仿真得到超音速飞行共形整流罩由于摩擦热形变而引入的动态形变量,分析了对成像质量的影响,将结果导入光学设计软件 Code V 中,通过 SLM 对产生的动态像差进行校正。结果表明,全视场、动态条件下系统成像质量接近衍射极限，验证了通过 SLM 可以对由于共形整流罩高速飞行摩擦生热而产生的动态像差进行校正。

1 共形光学系统设计

共形光学系统的设计参数为:

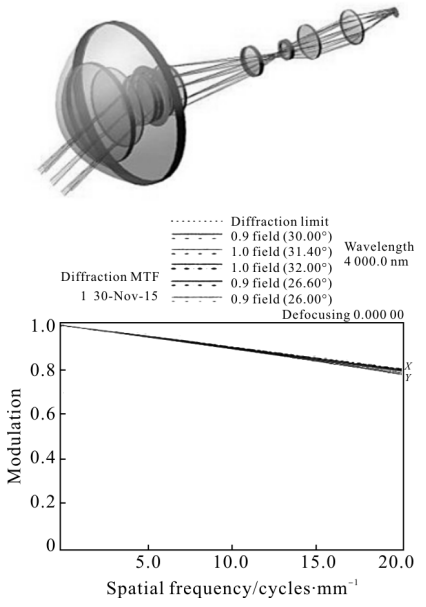
整流罩的长径比为 1,口径 D=200 mm,厚度为 5 mm，材料是热压 MgF_2。光学子系统的瞬时视场 $2\omega=4°$,最大扫描视场 $2\omega=60°$,焦距 f'=80 mm,有效通光孔径为 40 mm,F 数为 2，波长为 4 000 nm,采用中波红外制冷探测器。

引入旋转光楔来对全视场进行扫描，不同中心扫描视场的光学系统图以及成像质量 MTF 图如图 1 所示。从图中可以看出,设计后的系统成像质量良好,在 20 lp/mm 处的 MTF 均接近衍射极限。



(a) 中心视场 X=0°, Y=0°

(a) Central field of view X=0°, Y=0°



(b) 视场 X=0°, Y=30°

(b) Field of view X=0°, Y=30°

图 1 不同中心视场光学系统以及成像质量 MTF 图

Fig.1 Optical system with different central field of view and MTF of imaging quality

2 ANSYS 软件求解热形变量

2.1 热流固耦合理论基础

含共形整流罩的飞行器在大气中高速飞行，为了仿真其在飞行过程中所发生的热形变，选用 Ansys 软件下的 Fluent 模块模拟共形整流罩在真实条件下的飞行状况，并得出影响共形整流罩在光学系统中成像质量的数据，为之后的分析校正得到可靠依据。

整流罩结构热力学计算主要分为两个部分：一是结构内的热传递计算，二是整流罩壁面的对流换热。热流通过整流罩的传递，整个计算过程的控制方程如公式(1)所示：

$$(C)\{T\}+(\lambda)\{T\}=\{Q\} \tag{1}$$

式中：$(C)\{T\}$为热沉积项；λ 为系统导热系数；Q 为系统内能。

由热而引起形变量称为热固耦合，其求解方程式如公式(2)所示：

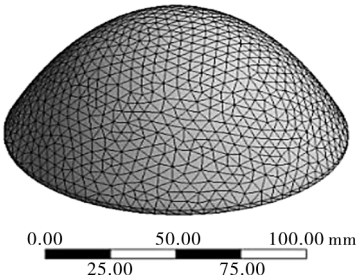
$$[K]\{\sigma\}=\{Q\}_T \tag{2}$$

式中：$[K]$为系统的整体刚度矩阵；$\{\sigma\}$为整体形变量矩阵；$\{Q\}$为整个系统气动热载荷矩阵。

Fluent 以及 Ansys 可以通过上述方法，拟合出共形整流罩在高速飞行时所产生的热形变量，为后续的计算提供理论依据。

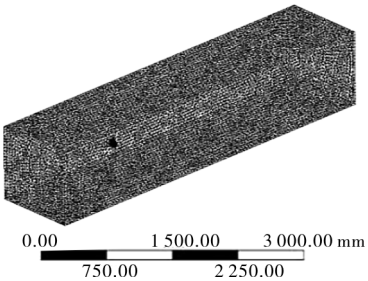
2.2 网格划分

先通过 Solidworks 对要进行分析的共形整流罩进行建模，并在 Fluent 模块中对共形整流罩网格划分。同时对共形整流罩飞行环境中的流域进行网格的划分。共形整流罩以及其工作流体域的划分结果如图 2 所示。



(a) 共形整流罩网格划分

(a) Conformal dome mesh division



(b) 流体域网格划分

(b) Fluid domain mesh division

图 2 共形整流罩划分网格图

Fig.2 Conformal dome mesh division

网格划分后流体域的节点数有 81 945 个,将流体域分为 435 053 块。

2.3 流固耦合

完成网格划分后,需要定义材料属性以及流体属性完成后续的计算,流体域选择的普通大气层气流参数,流体速度取 3 *Ma*。由于整流罩高速飞行,将气体近似为不可压缩气体。整流罩的材料选取热压 MgF_2,弹性模量为 110 310 MPa,泊松比为 0.3。完成参数设置后,对共形整流罩在真实工作环境下的工作状态进行模拟。

流体域场整体速度情况如图 3 所示,单位为 m/s。

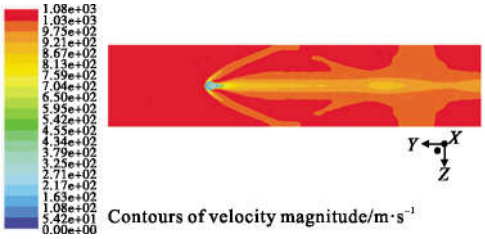


图 3 流体域场速度示意图

Fig.3 Diagram of flow field velocity

由于在超音速下运动,共形整流罩与空气剧烈作用,产生大量的热。产生热的分布示意情况如图 4 所示。

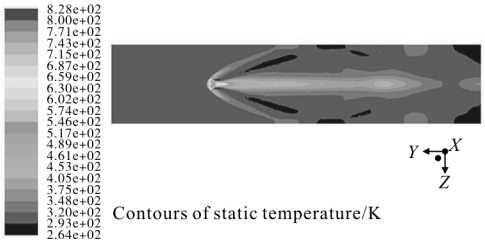


图 4 整流罩周围温度情况

Fig.4 Conformal dome temperature situation

图中的温度单位为开尔文(K),从图 4 中可以看到,共形整流罩工作在 3 *Ma* 速度下的流体域中,计算结果收敛的情况下,四周温度的最高值的部位位于共形整流罩的前端。流体与共形整流罩剧烈的相互作用,前端温度达到 828 K,共形整流罩表面流体层流平均温度值也达到了 630 K,对共形整流罩本身的温度产生较大影响,从而使其面型产生形变,影响其后光学系统的光机性能、探测精度。为了进一步验证高温对共形光学系统产生的影响,需要求解温度引起的热变形值。将 Fluent 软件分析结果导入 Ansys,分析结果如图 5 所示。

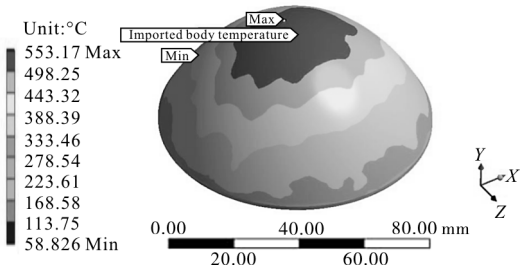


图 5 Ansys 软件中整流罩温度结果图

Fig.5 Doom temprature drawing in Ansys software

共形整流罩飞行环境的高温将会影响到共形整流罩本身的温度。由图 5 可以看到,在 3 *Ma* 的飞行速度下,随着时间的推移,共形整流罩本身的最高温度达到了 553.17℃。为了探究整流罩升温过程中不同时刻对共形光学系统成像质量的影响,随选取了两个时刻 t=0.2 T 以及 t= T(t=T 时刻时,共形整流罩热形变量收敛,T 是计算结果收敛时间)进行分析,如图 6 所示。

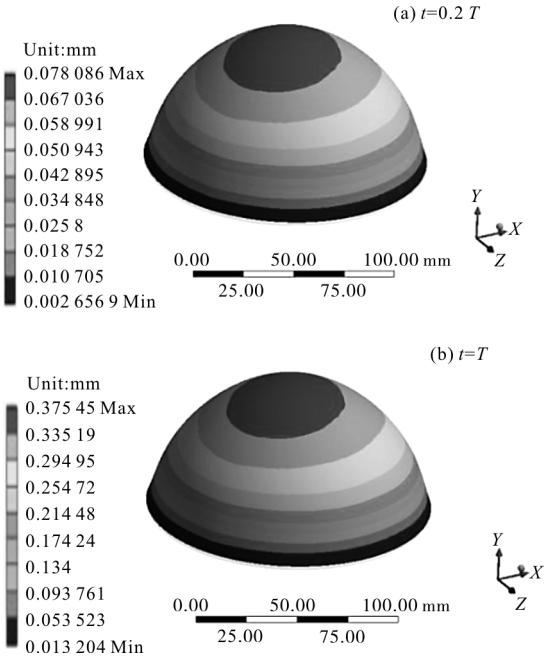


图 6 不同时刻共形整流罩形变图

Fig.6 Deformation map of conformal dome in different time

t=0.2 T 和 t=T时刻的形变量最大值分别为 0.07 mm 与 0.37 mm,位于共形整流罩前端,表面形变量随着坐标点远离轴心而逐渐减小。为了分析形变量对共形光学系统成像质量的影响,需要将形变量以光学参量 Zernike 系数的形式进行表示。

3 动态校正热变形误差

3.1 Zernike 系数拟合

通过前述 Ansys 热流固耦合分析，得出了共形整流罩在不同时刻的面型变化量。为了能将形变量引入共形光学系统中，对其进行拟合，以 Zernike 系数对形变量变量进行描述。拟合方程式如公式(3)所示：

$$\begin{bmatrix} Z_{1,1}(\rho,\theta) & Z_{1,2}(\rho,\theta) & \cdots & Z_{1,37}(\rho,\theta) \\ Z_{2,1}(\rho,\theta) & Z_{2,2}(\rho,\theta) & \cdots & Z_{2,37}(\rho,\theta) \\ \vdots & & & \\ Z_{m,1}(\rho,\theta) & Z_{m,2}(\rho,\theta) & \cdots & Z_{m,37}(\rho,\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_m \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：$Z(\rho,\theta)$ 为 Zernike 多项式的极坐标表达式，不同的 Zernike 多项式代表不同的像差，通过对不同点坐标进行极坐标化后可以求得。$(C_1,C_2,\cdots,C_{37})$是 Zernike 多项式的系数，决定了对应 Zernike 多项式所表示像差的大小，是需要求解的一组。而$(\delta_1,\delta_2,\cdots,\delta_m)$ 是之前通过 Ansys 软件求得的点的位移，m 代表了拟合取值点的个数。

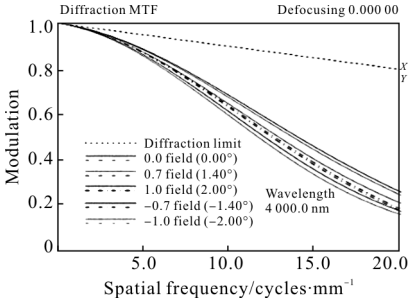
将数据导入 Matlab 软件后，通过最小二乘法可以求得待拟合面型的 Zernike 系数 C，求得结果如表 1 所示，实际仿真中共求得 37 阶 Zernike 系数，表 1 中只列出了 Zernike 系数的前 8 阶值。

表 1 不同时刻整流罩形变量对应的 Zernike 各项系数

Tab.1 Zernike coefficients obtained in different time varible correspongding to shaped dome

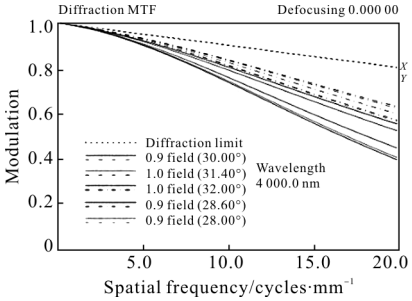
Zernike term	Coefficients of Zernike term		Aberration
	t=0.2 T	t=T	
1	−0.019 6	−0.031	Piston (constant)
2	0.061 3	0.107	Distortion−tilt (x−axis)
3	0.015 7	0.050 5	Distortion−tilt (y−axis)
4	−0.036 5	−0.076 3	Astigmatism, primary
5	−0.051 4	0.092 4	Defocus−field curvature
6	−0.031 2	−0.109	Astigmatism, primary
7	0.058 1	−0.109	Trefoil, primary (x−axis)
8	0.015 1	0.068 1	Coma, primary (y−axis)

将不同时刻的由热产生的像差带入共形光学系统中时，成像质量如图 7、8 所示。



(a) 中心视场 X=0°，Y=0°

(a) Central FOV X=0°，Y=0°

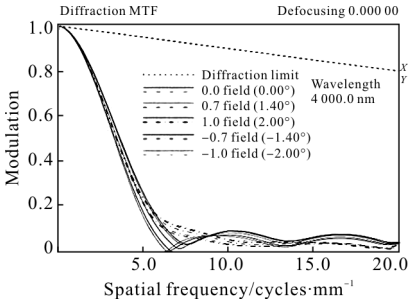


(b) 视场 X=0°，Y=30°

(b) FOV X=0°，Y=30°

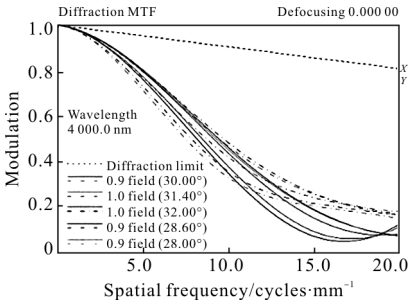
图 7 t=0.2 T 时光学系统不同视场成像质量 MTF 图

Fig.7 Imaging quality MTF of different field of view when t=0.2 T MTF



(a) 中心视场 X=0°，Y=0°

(a) Central FOV X=0°，Y=0°



(b) 视场 X=0°，Y=30°

(b) FOV X=0°，Y=30°

图 8 t=T 时光学系统不同视场成像质量 MTF 图

Fig.8 Imaging quality MTF of different field of view when t=T

由图 8 中可以看出,不同时刻由于热所产生的形变量对光学系统的成像质量有很大的影响,且不尽相同,实时地对这些变化的光学系统像差进行校正有着重要的意义。为了实现实时校正像差的目的,引入 SLM 对动态像差进行校正,提高系统工作精度。

3.2 使用空间光调制器校正动态热差

空间光调制器 (Spatial Light Modulator, SLM) 作为一种主动光学元件, 利用液晶的双折射效应, 通过改变折射率改变光波的光程差 (Optical Path Difference,$OPD=n\Delta z$, 其中 Δz 为介质的物理长度)[12]。SLM 有着像素化的结构, 每个液晶分子都可以进行编程控制。当对 SLM 施加控制电压时,每个像素上的液晶分子在电压的作用下发生偏转,其折射率也发生改变, 从而改变光波的光程差。通过控制 SLM 产生的光程差, 可以对含有像差的波前进行补偿校正[13]。

为了使系统结构紧凑, 设计中使用了透射式 SLM。将 SLM 放置在孔径光阑的位置, 充分利用 SLM 的口径, 并对所有视场均有比较好的校正作用。由于不同扫描视场的 SLM 位置不变,图 9 中以 (15°,15°)视场为例给出了 SLM 的位置示意图。

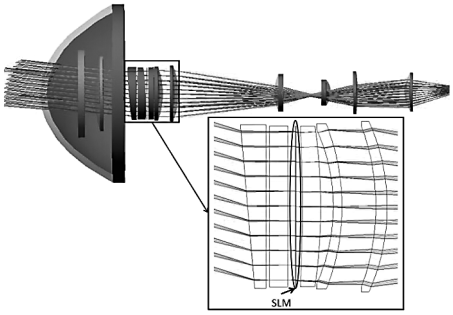
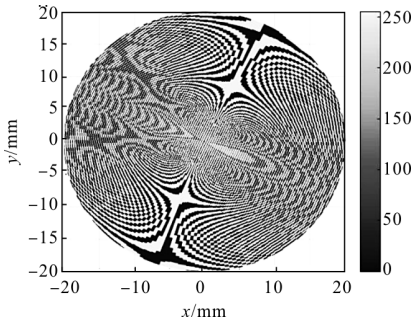


图 9 SLM 位置示意图

Fig.9 Schematic diagram of the position of SLM

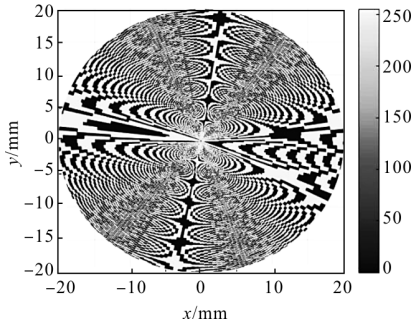
通过在软件中分析不同时刻球罩产生的热差,计算得到 SLM 各像素点对应的相位补偿值, 利用 SLM 可以校正波前,进行动态、实时的相位补偿。为了对不同的时间、不同视场的动态热像差进行校正,需要预先计算出 SLM 的调制相位图。通过对上述热差进行拟合,可以得到出不同时间,不同视场需要的调制相位图,如图 10、11 所示。

图 10 中的横纵坐标代表 SLM 的调制口径为



(a) 中心视场 X=0°,Y=0°

(a) Central FOV X=0°,Y=0°

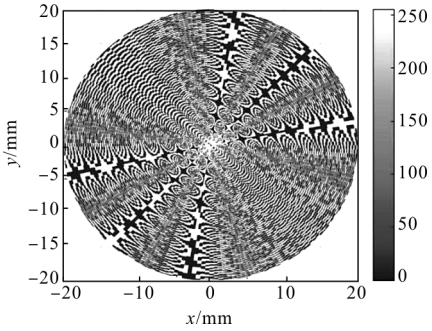


(b) 视场 X=0°,Y=30°

(b) FOV X=0°,Y=30°

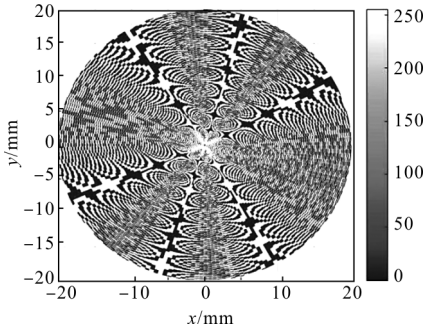
图 10 t=0.2 T 时刻不同视场 SLM 施加相位图

Fig.10 Phase digrams in SLM of different FOV when t=0.2 T



(a) 中心视场 X=0°,Y=0°

(a) Central FOV X=0°,Y=0°



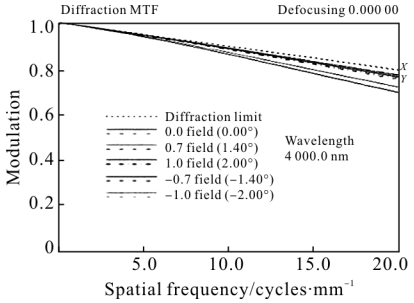
(b) 视场 X=0°,Y=30°

(b) FOV X=0°,Y=30°

图 11 t=T 时刻不同视场 SLM 施加相位图

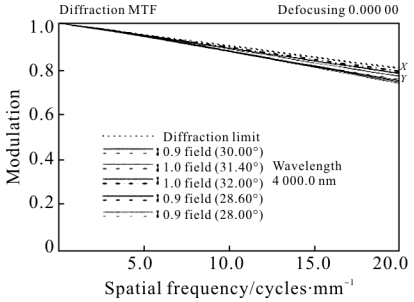
Fig.11 Phase digrams in SLM of different FOV when t=T

40 mm，不同颜色代表了不同位置相位调制的大小，0~255 分别对应的调制相位为 0~2π。根据图10、11 可以看出，在相同时间、不同视场时，由于引入非对称像差，SLM 施加相位调制图不同。不同时间、相同视场，随着时间的增加，引入的热像差增大，SLM 施加的相位调制图调制量增大。根据理论预先计算好校正各时间、视场内热像差所需要的 SLM 调制量并且施加入 SLM 中，可以实现实时动态热像差的校正。施加调制量的光学系统成像质量图如图 12、13 所示。



(a) 中心视场 X=0°，Y=0°

(a) Central FOV X=0°，Y=0°

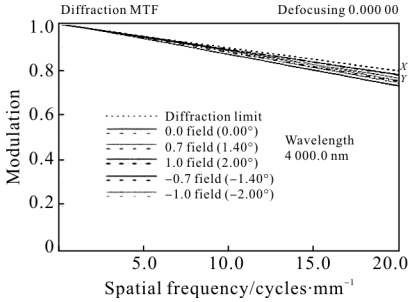


(b) 视场 X=0°，Y=30°

(b) FOV X=0°，Y=30°

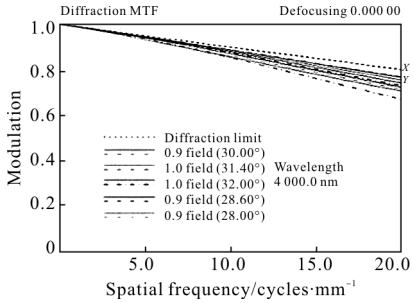
图 12 t=0.2 T 时光学系统不同视场成像质量 MTF 图

Fig.12 Imaging quality MTF of different field of view when t=0.2 T



(a) 中心视场 X=0°，Y=0°

(a) Central FOV X=0°，Y=0°



(b) 视场 X=0°，Y=30°

(b) FOV X=0°，Y=30°

图 13 t=T 时光学系统不同视场成像质量 MTF 图

Fig.13 Imaging quality MTF of different field of view when t=T

从图 7、8 与图 12、13 对比可知，经过 SLM 的校正，两个时刻、不同视场由热变形所引起的像差都得到了很好的校正，校正后系统成像的 MTF 接近衍射极限，成像质量良好。

4 结 论

共形光学系统在飞行中，摩擦引起的热像差是影响成像质量的主要因素，而且不同时刻对光学系统的影响也不尽相同，文中通过仿真软件模拟长径比 1 的共形整流罩在 3 *Ma* 高速飞行的状况下所产生的热变形对光学系统成像质量动态的影响，通过对热流固的仿真，得到了共形整流罩面形形变量，并通过 Zernike 系数的拟合将形变量导入到光学设计软件 CODE V 中，得到了热差对光学系统成像质量影响关系和特性。为了减少动态热差对光学系统的影响，提出在光瞳面加入透射式 SLM 的方法来校正动态像差，通过在光学软件中特定位置加入衍射面来模拟施加空间光调制器。仿真结果发现，动态像差得到了校正，各个视场的成像质量接近衍射极限，为实时校正共形光学像差提供了设计依据。

参考文献：

[1] Partric A T. Precision conformal optics technology program[C]// SPIE, 2001, 4375: 96−107.

[2] Wang Jian, Jing Lei, Guo Banghui, et al. Optical design of catadioptric infrared panoramic sky camera [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(3): 648−652. (in Chinese)
王健, 荆雷, 郭帮辉, 等. 折反式红外全景天空相机光学系

统设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 648-652.

[3] Wang Yanxin, Liu Qi, Li Zhaoyi, et al. Analysis on several issues of infrared imaging guided technolygy [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(1): 26-32. (in Chinese)
王延新, 刘琪, 李兆熠, 等. 红外成像导引技术应用中若干问题的分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 26-32.

[4] Dong Keyan, Wang Jian, Sun Qiang, et al. Design of an airborne dual field-of-view middle wave infrared optical system[J]. ***Chinese Optics***, 2012, 5(6): 596-601. (in Chinese)
董科研, 王健, 孙强, 等. 机载双视场中波红外光学系统优化设计[J]. 中国光学, 2012, 5(6): 596-601.

[5] Mi Shilong, Mou Da, Mou Meng. Athermalization of a compact LWIR optical system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(10): 3032-3036. (in Chinese)
米士隆, 牟达, 牟蒙. 紧凑型长波红外光学系统无热化设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3032-3036.

[6] Qu Hemeng, Zhang Xin. Design of an airborne dual field-of-view middle wave infrared opticasystem [J]. ***Chinese Optics,*** 2014, 7(4): 622-630. (In Chinese).
曲贺盟, 张新. 高速切换紧凑型双视场无热化红外光学系统设计[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 622-630.

[7] Jiang Zhenhai, Wang Chao, Wei Qun, et al. Wind tunnel experiment of supersonic conformal dome and its optical and structure characteristics [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2012, 20(9): 1999-2005. (in Chinese)
姜振海, 王超, 魏群, 等. 超音速共形整流罩风洞试验及其光机特性[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(9): 1999-2005.

[8] Jiang Zhenhai, Ai Xingqiao, Wei Qun, et al. Thermal-structure analysys of supersonic dome based on three materials[C]//International Conference on Electric Information & Control Engineering, 2011: 1868-1871.

[9] Zhu Jun, Yang Tong, Jin Guofan. Design method of surface contour for a freedom lens with wide liner fiel-of-view[J]. ***Optics Express***, 2013, 21(22): 26080-26092.

[10] Sun Jinxia, Sun Qiang, Li Dongxi, et al. Congformal dome aberation correction using diffractive optical element[J]. ***Acta Physica Sinica***, 2007, 56(7): 3900-3905. (in Chinese)
孙金霞, 孙强, 李冬熙, 等. 利用衍射光学元件进行共形整流罩像差校正的研究[J]. 物理学报, 2007, 56(7): 3900-3905.

[11] Du Xiaoyu, Chang Jun, Zhang Yunqiang, et al. Design of a Dynamic Dual-Foveated Imaging System[J]. ***Optics Express***, 2015, 23(20): 26032-26040.

[12] Gordpon D Love. Wave-front correction and production of Zernike modes with a liquid crystal spatial light modulator [J]. ***Applied Optics***, 1997, 36(7): 1517-1524.

[13] Cai Dongmei, Ling Ning, Jiang Wenhan. Performance analysison Zernike aberration of pure phase liguid spatial light modulator fitting[J]. ***Acta Physica Sinica***, 2008, 57(2): 897-903. (in Chinese)
蔡冬梅, 凌宁, 姜文汉. 纯相位液晶空间光调制器拟合泽尼克像差性能分析[J]. 物理学报, 2008, 57(2): 897-903.