

6-20-2023

## Opto-mechanical-thermal Coupling Analysis Method and Implementation of High-precision Optical System

Liang Zhao

*AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China, liang.zhao@biam.ac.cn*

Zhigang Zhang

*Shanghai Suochen Information Technology Co., Ltd, Shanghai 201204, China, zachary.zhang@demxs.com*

Yao Sun

*Shanghai Suochen Information Technology Co., Ltd, Shanghai 201204, China, zachary.zhang@demxs.com*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Opto-mechanical-thermal Coupling Analysis Method and Implementation of High-precision Optical System

## Abstract

High-precision optical system is easy to be affected by space environment. Under the condition of high temperature, structural load, etc., the image quality of the optical system becomes poor, and the opto-mechanical-thermal coupling analysis is needed. Due to the independent development of the optical simulation, structure simulation, thermal simulation and others, the simulation data can not be effectively coupled and transferred. *An interdisciplinary coupling analysis method is proposed, in which the integrated analysis idea is adopted and the polynomial fitting is used as the interface to solve the irregular deformation of optical element surface. Through the implement of the best fitting rigid body displacement, the best fitting radius of curvature, polynomial fitting, etc., the coupling analysis between finite element analysis tool and optical analysis tool is realized.* Taking Cassegrain system as the test object, the effectiveness of the method is verified. The method provides a reference to the optical performance evaluation of the optical-mechanical system and the design optimization of the system under extreme conditions.

## Keywords

Cassegrain system, integrated opto-mechanical-thermal analysis, optomechanical systems, surface fitting, Zernike polynomial, optical evaluation

## Recommended Citation

Liang Zhao, Zhigang Zhang, Yao Sun. Opto-mechanical-thermal Coupling Analysis Method and Implementation of High-precision Optical System[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(6): 1381-1394.

# 高精度光学系统光机热耦合分析方法与实现

赵亮<sup>1</sup>, 张志刚<sup>2</sup>, 孙瑶<sup>2</sup>

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 上海索辰信息科技股份有限公司, 上海 201204)

**摘要:** 高精度光学系统容易受到空间环境的影响, 在高温、结构载荷等作用下光学系统像质变差, 需要进行光机热耦合分析。但光学、结构、热学仿真等学科的独立发展, 导致数据不能有效地耦合和传递。提出了一种跨学科耦合分析方法。采用集成分析思想, 以多项式拟合为接口, 解决了光学元件表面的不规则变形问题。通过最佳拟合刚体位移、最佳拟合曲率半径、多项式拟合等过程, 实现了有限元分析工具与光学分析工具的耦合分析。以卡塞格林系统作为测试研究对象, 验证了该方法的有效性。为评估在极端工况下光机系统的光学性能以及系统的设计优化提供了参考。

**关键词:** 卡塞格林系统; 集成分析; 光机系统; 面形拟合; Zernike 多项式; 光学评价

中图分类号: TP317 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)06-1381-14

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0092

**引用格式:** 赵亮, 张志刚, 孙瑶. 高精度光学系统光机热耦合分析方法与实现[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(6): 1381-1394.

**Reference format:** Zhao Liang, Zhang Zhigang, Sun Yao. Opto-mechanical-thermal Coupling Analysis Method and Implementation of High-precision Optical System[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(6): 1381-1394.

## Opto-mechanical-thermal Coupling Analysis Method and Implementation of High-precision Optical System

Zhao Liang<sup>1</sup>, Zhang Zhigang<sup>2</sup>, Sun Yao<sup>2</sup>

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. Shanghai Suochen Information Technology Co., Ltd, Shanghai 201204, China)

**Abstract:** High-precision optical system is easy to be affected by space environment. Under the condition of high temperature, structural load, etc., the image quality of the optical system becomes poor, and the opto-mechanical-thermal coupling analysis is needed. Due to the independent development of the optical simulation, structure simulation, thermal simulation and others, the simulation data can not be effectively coupled and transferred. *An interdisciplinary coupling analysis method is proposed, in which the integrated analysis idea is adopted and the polynomial fitting is used as the interface to solve the irregular deformation of optical element surface. Through the implement of the best fitting rigid body displacement, the best fitting radius of curvature, polynomial fitting, etc., the coupling analysis between finite element analysis tool and optical analysis tool is realized.* Taking Cassegrain system as the test object, the effectiveness of the method is verified. The method provides a reference to the optical performance evaluation of the optical-mechanical system and the design optimization of the system under extreme conditions.

**Keywords:** Cassegrain system; integrated opto-mechanical-thermal analysis; optomechanical systems; surface fitting; Zernike polynomial; optical evaluation

收稿日期: 2023-02-06

修回日期: 2023-02-28

第一作者: 赵亮(1976-), 男, 高工, 博士生, 研究方向为模拟仿真技术、工业机理、数字化智能化技术等。E-mail: liang.zhao@biam.ac.cn

通讯作者: 张志刚(1987-), 男, 高工, 博士, 研究方向为固体力学、光测力学、光机热联合仿真分析等。

E-mail: zachary.zhang@demxs.com

## 0 引言

在实际工程问题中,光机系统光学元件在外载荷的作用下,如重力、温度变化等,会引起支撑结构的变形,产生整体位移,光学面形也随之改变。这些变化会直接影响光学系统的成像质量<sup>[1-3]</sup>。因此,分析不同工况下光机系统的光学性能显得尤为重要。光机系统分析设计过程,实际是完成跨学科的研制工作,通过解决多学科的设计问题,综合考虑不同学科之间的相互影响,获得最优的系统指标<sup>[4]</sup>。为了实现这一功能,通常用有限元分析的方法对光机系统进行热和结构响应分析,但有限元分析的结果并不能直接用到光学分析软件中,需要一个中间过程,将有限元分析结果转换成光学分析软件可接受的方法,从而打通结构分析与光学分析软件之间的壁垒,实现有限元分析与光学设计软件之间的数据交换,因此,光机拟合技术应运而生。在前期系统设计阶段,将工况温度和支撑结构等对镜面变形产生影响的因素考虑在内,通过光机拟合分析,将热力学分析的镜面变形计算结果作为光机系统光学设计过程的输入,并进行成像质量评价,分析不同工况下光学系统的成像质量,指导光学设计和系统优化,并进一步为后续装调提供理论依据。

美国国家宇航局通过光机热集成分析技术,修复了“哈勃”望远镜,改善了其主镜精密度误差引起的图像模糊问题,从此也在学术界和工业界掀起了光机热集成分析的研究热潮<sup>[5]</sup>。多年来,光机热集成分析技术一直是空间光学的研究重点。ModelCenter 是一款集成分析软件,为用户提供流程集成和设计优化等功能,其封装了 Ansys、Catia、Matlab、NXNastran、Pro/E 等专业的结构设计和分析软件,但 Zemax 没有被封装在内,因此无法实现与 Zemax 的通信,需通过第三方插件实现与 Zemax 的连接<sup>[6]</sup>。光机热集成分析涉及了光学、结构、热学等多物理场的耦合分析。COMSOL Multiphysics 作为一款成熟的多物理场

耦合分析软件,可被应用于光学系统仿真设计,通过波动光学模块与结构力学模块、传热模块等耦合分析,研究其他物理场对于光学系统的影响,但 COMSOL 各模块的仿真功能与各学科专业仿真软件的效果仍有一定差距,不但应用场景受限,购买成本也很高,所以,目前大多使用松耦合的思想,分别通过各学科专业软件进行仿真,再将数据结果打通。虽然集成分析软件至今仍不太成熟,但依然是未来的发展方向。

光机热集成分析技术在国外起步较早,有着众多的研究成果。美国 Sigmadyne 公司长期深耕于光机热集成分析领域,其开发的 SigFit 软件是光机热集成分析工具的代表,可实现光程差分析、动态响应分析、系统优化设计等<sup>[7]</sup>。除此之外,许多大型光学分析软件公司也在积极升级软件的集成分析功能,如 CODE V、Zemax 等。将光学设计软件接入到 Ansys Workbench 中,可为用户提供一套光电全链路的综合解决方案。随着光机热耦合分析技术的不断发展,光机热耦合分析软件功能也将越来越丰富和完善<sup>[8]</sup>。

相较于国外,国内光机热耦合分析技术的起步较晚,但仍然取得了一定的进展。长春光学精密机械与物理研究所、长春理工大学、北京理工大学、上海技术物理研究所等单位都在积极研究和推进光机热集成分析工作<sup>[3-6,9-14]</sup>。

李诚良<sup>[3]</sup>通过 Nastran 与 Matlab 自编程序实现与 Zemax 的连接,计算结果与 SigFit 计算结果一致。方振中<sup>[6]</sup>采用 ModelCenter 建立机械结构分析、热分析与光学分析之间的仿真流程,自研开发了辅助软件与接口工具,实现了整个镜片的分析过程,从机械变形、热变形分析到变形结果的拟合,再到光学特性的分析。史建亮等<sup>[11]</sup>提出了一种新型的光机集成建模与仿真工具,开发了一套实用性强的结构-控制接口工具,并引入 Matlab 内置的 LTI Viewer 作为模型评估工具,以望远镜为实验对象,通过数据结构的转换、模型简化和模型评估等过程成功地将有限元软件的分析结果

植入到 Matlab/Simulink 动态仿真平台, 实现了结构控制的集成分析。惠彬等<sup>[12]</sup>以大口径折反射式光学系统为研究对象, 通过光机拟合分析方法, 以 Zernike 多项式作为结构分析与光学像质分析的接口, 从光学像质角度出发, 实现了对系统结构设计合理性的评价, 在区分是由于系统结构支撑还是装调误差导致的像质变化方面提供了有益参考。刘巨等<sup>[13]</sup>对空间相机光机热集成设计分析进行了综述研究, 论述了空间相机光机热集成设计分析的典型流程, 并通过了实验验证, 指出温度场插值技术是热弹性分析过程中温度场作为边界条件向有限元模型加载的有效解决方法, Zernike 多项式拟合技术是光机热集成分析的数据接口方法。刘朋朋等<sup>[14]</sup>针对低轨道遥感相机进行了光机热一体化分析, 提出使用 ThermalDesktop、MSCPatran/Nastran、CODE V 构建热分析模型、结构有限元分析模型、光学分析模型, 获得极端工况下反射镜的平移、倾斜等结构变化, 分析了影响调制传递函数(modulation transfer function, MTF)的主要因素, 并进行了系统优化。在气动光学领域, 气动力热效应也备受关注, 是典型的多学科问题, 刑占等<sup>[15]</sup>对红外气动光学效应做了综述研究。王惠<sup>[16]</sup>针对高速飞行器进行了气动光学效应建模仿真研究。从已有的气动力热效应研究成果可以看出, 西方军事强国起步较早、科研成果显著, 已开发了高温激波辐射计算软件, 可仿真高速飞行器成像性能指标。我国气动光学研究起步较晚, 但也取得了一定的成果, Yang 等<sup>[17]</sup>采用反向光线追迹的方法计算了整个圆顶与探测器单元之间的辐射功率, 并开发了热辐射仿真计算软件。孙喜万等<sup>[18]</sup>指出, 基于计算流体力学的气动光学效应的计算思想: 首先, 计算流场精细结构, 然后, 根据光路传播原理开展光线追迹, 从而实现气动光学效应的仿真计算。基于大涡模拟(large eddy simulation, LES)、隐式大涡(integrated large eddy simulation, ILES)、分离涡算法(detached eddy simulation, DES)等模型的高精度算法是目前

数值模拟方法的重点研究方向。

为了分析评估在不同工况环境下光机系统的性能, 为光机系统设计提供优化指导, 本文提出一种通用场景光机热耦合分析方法, 基于集成分析的思想, 采用多项式拟合作为结构分析与光学分析的接口, 分析了卡塞格林光学系统像质的变化, 为光机系统结构设计和优化提供了参考依据, 即可应用于传统光机热联合分析领域, 也可应用于气动光学领域。

## 1 系统仿真关键技术

### 1.1 学科集成分析技术

光机系统作为典型的跨学科综合系统, 主要涉及光学、热学、力学等多学科知识, 普遍采用集成分析方法, 通过一体化设计, 综合考虑各方面影响因素, 实现光学设计的闭环评价。图1给出了光机热系统集成设计分析流程。

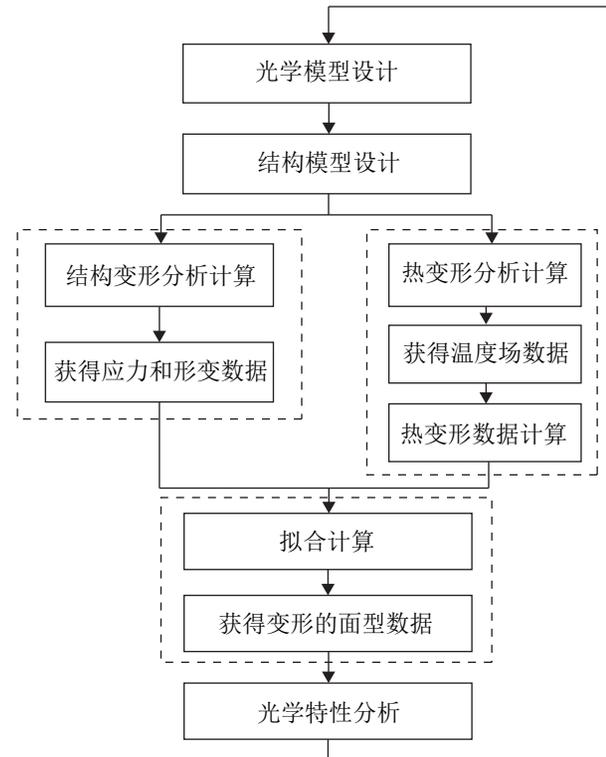


图1 光机热集成设计分析流程  
Fig. 1 Analysis process of opto-mechanical thermal integration design

如图1所示,集成分析流程包括光学模型设计、结构模型设计、结构变形分析、热变形分析、拟合计算、光学特性分析等几个部分。光学模型设计在Zemax、CODE V等光学设计软件中完成;光机系统结构模型设计在CAD中完成;通过有限元分析软件进行结构分析和变形量的计算,以有限元等方法为基础求解重力等外力载荷作用下的光机系统力学变化,主要包括应力应变分析、变形分析及结构稳定性分析等内容;通过热分析软件建立热分析模型进行热分析,获得不同工况下的温度场数据,并根据温度场数据计算温度引起的变形量;在进行拟合计算时,可使用Matlab数值求解工具或SigFit等商业软件进行变形数据的拟合。拟合完成后,将拟合结果导入Zemax或CODE V等光学设计,进行光学特征分析和评价,并将光学设计的评估结果反馈至结构设计,最终形成光机热一体化闭环评价。在计算热载荷导致的热变形数据时,可以将计算获得的温度场数据作为温度载荷,采用插值技术或边界单元技术<sup>[13]</sup>加载于光机系统结构有限元模型中,实现温度分析数据与结构分析数据的耦合,其流程如图2所示。

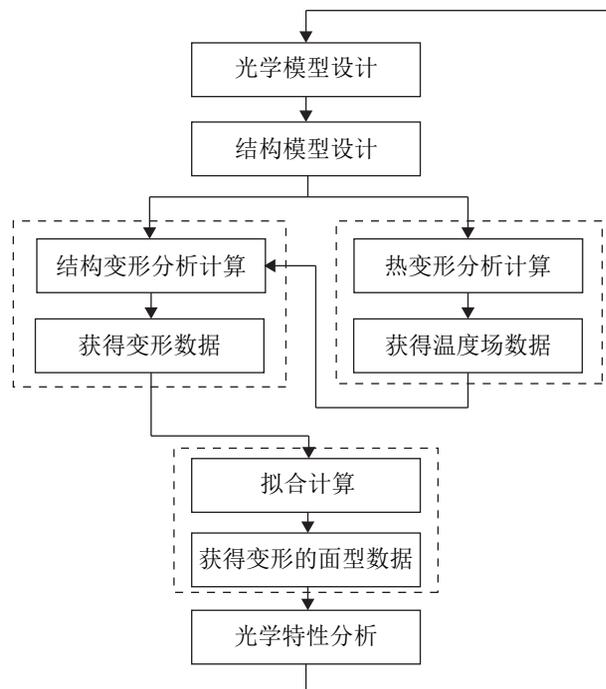


图2 热-结构数据耦合分析流程

Fig. 2 Analysis process of coupled thermo-structural data

## 1.2 光机拟合技术

随着光机热集成分析技术的不断发展,光机拟合技术被越来越广泛地应用于工程领域。光机热集成分析技术的重点与难点在于打通机械结构分析与光学设计分析之间的壁垒。光机拟合作为结构分析与光学分析的中间环节,通过多项式拟合或者插值技术解决光学元件表面的不规则变形问题。将有限元分析获得的离散数据,拟合成连续的曲面,供光学设计软件使用。本文主要以多项式拟合为接口,实现数据的联通与传递。

### 1.2.1 最佳拟合刚体位移

在进行面形拟合之前,需要对镜面进行位移修正,并将镜面作为刚体进行刚体位移的计算,获得变形后的刚体位移和刚体转动量,进而获得镜面变形位移差值数据,供后续的面形拟合功能使用。

最佳拟合刚体位移可通过下式进行求解:

$$\begin{aligned} d\tilde{x}_i &= T_x + z_i R_y - y_i R_z \\ d\tilde{y}_i &= T_y - z_i R_x + x_i R_z \\ d\tilde{z}_i &= T_z + y_i R_x - x_i R_y \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$ 为镜面中第*i*个节点位置坐标;  $T_x$ 、 $T_y$ 、 $T_z$ 为沿*x*、*y*、*z*坐标轴的刚性平动量;  $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$ 为沿*x*、*y*、*z*坐标轴的刚性转动量;  $d\tilde{x}_i$ 、 $d\tilde{y}_i$ 、 $d\tilde{z}_i$ 为第*i*个节点中仅含最佳刚体位移拟合  $T_x$ 、 $T_y$ 、 $T_z$ 、 $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$ 时的位移。

定义误差方程*E*为各节点实际位移与计算的最佳拟合刚体位移量差值的加权平方之和:

$$E = \sum_i [w_i (dx_i - d\tilde{x}_i)^2 + w_i (dy_i - d\tilde{y}_i)^2 + w_i (dz_i - d\tilde{z}_i)^2] \quad (2)$$

式中:  $dx_i$ 、 $dy_i$ 、 $dz_i$ 为节点的实际位移;  $w_i$ 为该面形的第*i*个位移点的权重值。只要使误差函数关于最佳拟合刚体位移系数  $T_x$ 、 $T_y$ 、 $T_z$ 、 $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$ 的偏导数为0,使误差函数趋于最小,就可获得最佳拟合刚体位移系数的求解方程,经过推导可得

$$\sum_i w_i dx_i = \sum_i w_i T_x + \sum_i w_i z_i R_y - \sum_i w_i y_i R_z \quad (3)$$

同理,可获得6组类似于式(3)的方程,即可

求得刚性位移量  $T_x$ 、 $T_y$ 、 $T_z$ 、 $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$ 。

### 1.2.2 最佳拟合曲率半径

在经过镜面位移修正、最佳拟合刚体位移计算后, 初始的镜面曲率不再适用于变化后的面形, 需要针对多项式拟合公式得到新的最佳拟合曲率半径或二次项系数。

光学镜面的通用面形公式为

$$S_j = S(c, k, r_j) = \frac{cr_j^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r_j^2}} + a \quad (4)$$

式中:  $c$  为镜面曲率;  $c^0$  为初始的镜面曲率;  $c^*$  为变形后的曲率;  $[b_x^*, b_y^*, b_z^*]$  为变形后的曲率中心;  $k$  为曲率常数;  $a$  为其他项, 前面给出的是第 1 项。

构造以下误差函数, 可求解拟合后的曲率和曲率中心。误差公式为

$$E = \sum w_j [S(c^0, k, r_j) + dz_j - S(c^*, k, r_j^*) - b_z^*]^2 \quad (5)$$

$$r_j^* = \sqrt{(x_j - b_x^*)^2 + (y_j - b_y^*)^2}$$

与最佳拟合刚体位移不同的是, 曲率的拟合需要经过多次迭代来逼近最佳结果, 本文采用了牛顿迭代法来最小化误差函数。

### 1.2.3 多项式拟合

完成刚体位移计算、曲率半径拟合等, 获得修正后的光学表面节点位移结构, 采用多项式对面形进行拟合, 构造误差函数:

$$E = \sum_{i=1}^N w_i \left( ds'_i - \sum_{j=1}^M C_j p_{ij} \right)^2 \quad (6)$$

式中:  $w_i$  为该面形第  $i$  个位移点的权重值;  $ds'_i$  为第  $i$  个节点经过修正后的位移;  $N$  为节点数量;  $M$  为多项式项数;  $C$  为多项式系数;  $p_{ij}$  为多项式第  $j$  阶的归一化系数。为了使误差函数最小, 令误差函数关于各多项式系数的偏导数为 0, 将偏导数的方程组写为矩阵乘法形式, 得到以下方程组。

$$[H]\{C\} = \{F\}$$

$$H_{jk} = \sum w_i p_{ji} p_{ki} \quad (7)$$

$$F_k = \sum w_i ds'_i p_{ki}$$

式中:  $H$  为多项式项;  $F$  为镜面节点变形。通过最小二乘法求解多项式系数。多项式拟合作为离散

数据与连续曲面的接口, 被广泛应用于面形拟合的计算与分析。由于 Zernike 多项式与光学检测中观测到的像差形式类似, 被广泛用于描述波前特性。采用 Zernike 多项式进行光机耦合, 通过 Zernike 多项式表征镜面的变形、像差<sup>[19]</sup>。

Zernike 的数学表达式为

$$z_n^m(\rho, \theta) = \begin{cases} N_n^m R_n^m(\rho) \cos m\theta, & m \geq 0 \\ -N_n^m R_n^m(\rho) \sin m\theta, & m < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\theta$  为坐标径向与  $z$  轴的夹角;  $R_n^m(\rho)$  为径向系数<sup>[12]</sup>;  $N_n^m$  为归一化系数;  $\rho$  为归一化半径。

$$R_n^m = \sum_{k=0}^{(n-\text{abs}(m))/2} \frac{(-1)^s (n-k)!}{k! \left(\frac{n+\text{abs}(m)}{2} - k\right)! \left(\frac{n-\text{abs}(m)}{2} - k\right)!} \rho^{n-2k} \quad (9)$$

式中:  $n$ 、 $m$  为整数, 分别表示径向函数和角度函数。

$$N_n^m = \sqrt{\frac{2(n+1)}{1 + \delta_{m0}}} \quad (10)$$

当  $m=0$  时,  $\delta_{m0}=1$ ; 当  $m \neq 0$  时,  $\delta_{m0}=0$ ; 一般对于特定的  $n$  来说,  $m$  的值为  $-n, -n+2, \dots, n-2, n$ 。

$$\rho = r/r_{\max} \quad (11)$$

式中:  $r = \sqrt{(x^2 + y^2)}$ , 为采样点的极坐标半径;  $r_{\max}$  样点的最大极坐标半径。

Zernike 多项式具有各项线性无关且相互正交的特点, 在拟合前需要对样本点进行坐标转换, 由直角坐标系转换为极坐标系。采样点的归一化坐标可表示为  $(x_i - x_0)/r_{\max}$ ,  $(y_i - y_0)/r_{\max}$ , 其中,  $(x_0, y_0)$  为采样点的中心坐标。

Zernike 拟合面形公式为

$$z = f(x, y)$$

Zernike(Amplitude):

$$z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - c^2(1+k)(x^2 + y^2)}} + A_{00} + A_{01}\rho \cos \theta + A_{0-1}\rho \sin \theta + A_{20}(2\rho^2 - 1) + \dots,$$

其中,  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}/\text{Norm}R$ 。

Zernike(RMS):

$$z = \frac{c(x^2+y^2)}{1 + \sqrt{1-c^2(1+k)(x^2+y^2)}} + A_{00} + \sqrt{2} A_{01} \rho \cos \theta + \sqrt{2} A_{0-1} \rho \sin \theta + \sqrt{3} A_{20} (2\rho^2 - 1) + \dots,$$

其中,  $\rho = \sqrt{x^2+y^2}/\text{Norm}R$ 。

Fringe Zernike(Amplitude):

$$z = \frac{c(x^2+y^2)}{1 + \sqrt{1-c^2(1+k)(x^2+y^2)}} + A_{00} + A_{11} \rho \cos \theta + A_{1-1} \rho \sin \theta + A_{20} (2\rho^2 - 1) + \dots,$$

其中,  $\rho = \sqrt{x^2+y^2}/\text{Norm}R$ 。

Fringe Zernike(RMS):

$$z = \frac{c(x^2+y^2)}{1 + \sqrt{1-c^2(1+k)(x^2+y^2)}} + A_{00} + \sqrt{2} A_{11} \rho \cos \theta + \sqrt{2} A_{1-1} \rho \sin \theta + \sqrt{3} A_{20} (2\rho^2 - 1) + \dots,$$

其中,  $\rho = \sqrt{x^2+y^2}/\text{Norm}R$ 。

多项式拟合流程如图3所示。

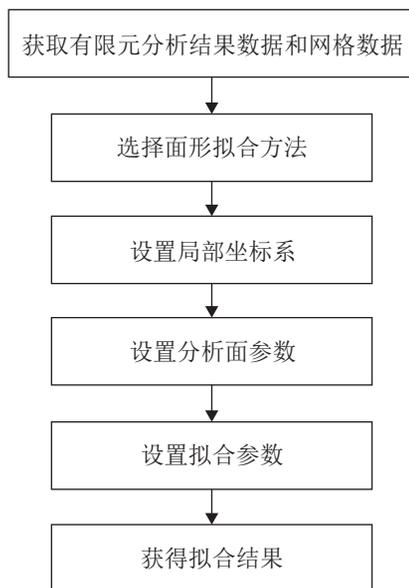


图3 光机拟合计算流程

Fig. 3 Calculation process of photomechanical fitting

具体步骤如下。

step 1: 获取有限元等结构分析的结果数据和网格数据, 包含分析镜面的节点集信息、局部坐标信息等。

step 2: 选择面形拟合方法, 主要为Zernike多项式拟合, 并经过面位移修正。此时, 需要注意保持有限元分析软件的单位与光学设计软件的单位相同, 如二者不同则需要转换。

step 3: 局部坐标系的设置可以在光学设计软件中进行, 也可以在有限元分析软件中完成, 但需保持一致。

step 4: 分析面参数设置主要包括镜面的ID、厚度、孔径, 以及曲率半径和二次曲面系数等光学面形参数。

step 5: 拟合参数设置包括归一化半径、 $m$ 值、 $n$ 值等。通过程序实现, 采用标准Zernike拟合时, Amplitude类型对应产生CODE V宏文件; RMS对应产生Zemax宏文件。

step 6: 在结果输出阶段, 产生文本文件, 包括最佳拟合刚体位移结果、曲率修正结果、多项式系数结果, 以及各阶段的拟合RMS、PV、MAX、Mean值。

## 2 案例分析

### 2.1 案例模型

卡塞格林系统具有大口径、长焦距、多波段等优势, 被广泛应用于各类光电系统<sup>[20]</sup>。因卡塞格林系统主镜镜面口径大, 受工况影响程度相对严重, 其成像质量主要取决于主镜的装调质量和支撑结构件的设计<sup>[21]</sup>。图4为卡塞格林系统的结构示意图。

该模型受自身重力作用, 主镜底面贴合于主镜镜座表面, 且主镜镜座固定, 通过可调节轴向距离和角度的镜筒对次镜进行固定。

系统焦距为1 123 mm, 口径为266 mm, 波长为486.1 nm, 视场半角为0.6°; 主镜曲率半径为-502.905 mm, 主次镜之间距离为193.249 mm, 曲率常数 $k = -1$ ; 次镜曲率半径为-149.981 mm, 次镜与像面之间的距离为260 mm, 曲率常数 $k = -2.486$ ; 工况温度为20°C, 在进行温度场分析

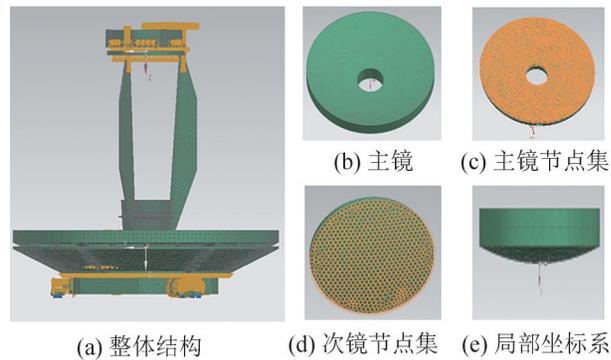


图4 卡塞格林系统模型  
Fig. 4 Model of Cassegrain system

时, 将次镜后方增加一个温度载荷  $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$ , 计算该工况下的拟合结果与拟合残差。

主镜系统结构可分为大口径反射镜、嵌套、柔节和背板等。在材料使用上, 主镜使用碳化硅材料, 具有比刚度大、尺寸稳定、热膨胀系数小、强度高优点。嵌套使用殷钢材料, 其强度较高、热稳定性较好。其余零件材料为钛合金, 具有机械性能强、密度低的特点。

次镜使用 ULE(零膨胀玻璃), 它在极端温度下几乎没有任何尺寸变化。次镜支撑结构采用 SiC 颗粒的体积分数为 55% 配料的碳化硅颗粒增强铝基复合材料(55 vol% AL/SiC), 具有低密度、低热膨胀系数、高的比强度和比刚度、高的弹性模量和良好的耐磨性等性能。

其他零件, 如垫片、隔圈、压圈等使用 Aluminum\_6061 材料。

具体的部件材料信息如表 1 所示。

表1 各部件材料  
Table 1 Material of each component

部件	材料	杨氏模量/GPa	泊松比	质量密度/(g/cm <sup>3</sup> )	热膨胀系数/K
主镜	碳化硅	433.0	0.142	3.040	$2.40 \times 10^{-6}$
衬套	殷钢	514.1	0.360	8.100	$0.90 \times 10^{-6}$
柔节	钛合金	111.7	0.310	4.430	$8.40 \times 10^{-6}$
背板	钛合金	111.7	0.310	4.430	$8.40 \times 10^{-6}$
主镜室	钛合金	111.7	0.310	4.430	$8.40 \times 10^{-6}$
次镜	ULE	26.7	0.180	2.205	$0.03 \times 10^{-6}$
次镜支撑	AL/SiC(55 vol%)	319.0	0.230	2.950	$9.50 \times 10^{-6}$
次镜室	AL/SiC(25 vol%)	711.5	0.300	2.880	$15.00 \times 10^{-6}$

## 2.2 拟合流程

当卡塞格林系统仅受重力影响时, 如图 4 模型所示, 该模型规模为 648 678 个节点, 具体拟合流程如下。

step 1: 获取有限元网格数据和有限元结果数据;

step 2: 采用多项式拟合方法, 面形选择标准 Zernike 或条纹 Zernike;

step 3: 设置局部坐标系, 可以选择在有限元软件中进行局部坐标系的设置, 也可以在光学设计软件中进行局部坐标系的设置, 本模型采用在有限元软件中设置局部坐标系;

step 4: 设置镜面参数, 主镜面形选择 Conic, 曲率半径为  $-502.905 \text{ mm}$ ,  $k = -1$ , 厚度选择  $8 \text{ mm}$ , 次镜面选择 Conic, 曲率半径为  $-149.249 \text{ mm}$ ,  $k = -2.486$ ;

step 5: 设置拟合参数, 选择拟合类型, 通过程序生成拟合 CODE V 或 Zemax 宏文件;

step 6: 生成拟合结果, 并查看拟合云图。

## 2.3 拟合结果与精度对比

### 2.3.1 重力载荷影响分析

对上述卡塞格林系统进行重力载荷和温度载荷作用下的系统仿真。图 5 为卡塞格林系统仅在重力载荷作用下的位移云图, 可以看出光学系统最大形变量在次镜部分, 为  $0.015 29 \text{ mm}$ , 与主镜固定和结构放置相关。

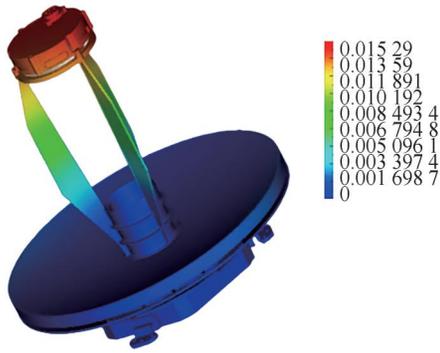


图5 光机系统受重力作用的位移云图  
Fig. 5 Displacement cloud image of optomechanical system under gravity

根据上述标准 Zernike 多项式拟合计算方法进行求解, 设  $n=8$ ,  $m=6$ , 可获得如图 6~7 所示的主镜面形和次镜面形拟合结果。

图6(a)为主镜镜面经过有限元分析后的CAE位移云图, 可以看出主镜镜面最大形变量为0.001 937 mm, 镜面两侧边缘的形变量明显大于镜面中间的形变量。图6(b)为去除刚体位移后的云图, 可以看出, 最大形变量为0.000 026 42 mm, 最大形变量在镜面四边位置。图6(c)为曲率修正后的位移云图, 最大形变量为0.000 026 41 mm, 与去除刚体位移后的形变量基本相当, 可见此模型中曲率变化较小。图6(d)为面形拟合结果云图, 云图形状与去除刚体位移和曲率修正后的云图类似, 最大变形量为镜面边缘, 为0.000 026 33 mm。图6(e)为拟合残差, 残差在镜面中心位置大于镜面边缘, 可见镜面边缘拟合的相对更好, 残差最大值为0.000 001 228 mm, 残差在纳米级别。

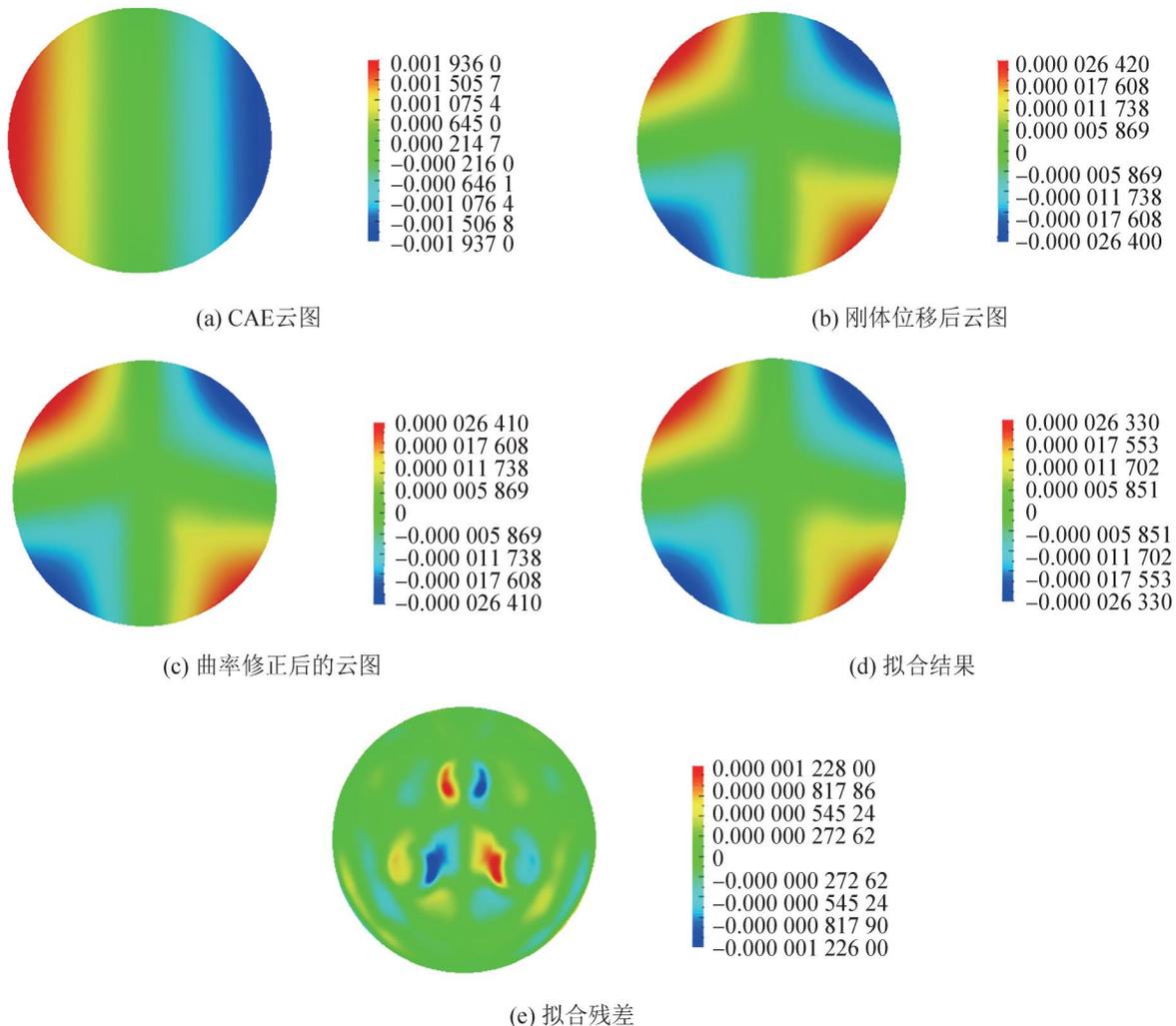


图6 主镜拟合结果(重力载荷)  
Fig. 6 Fitting results of primary mirror (gravity load)

<http://www.china-simulation.com>

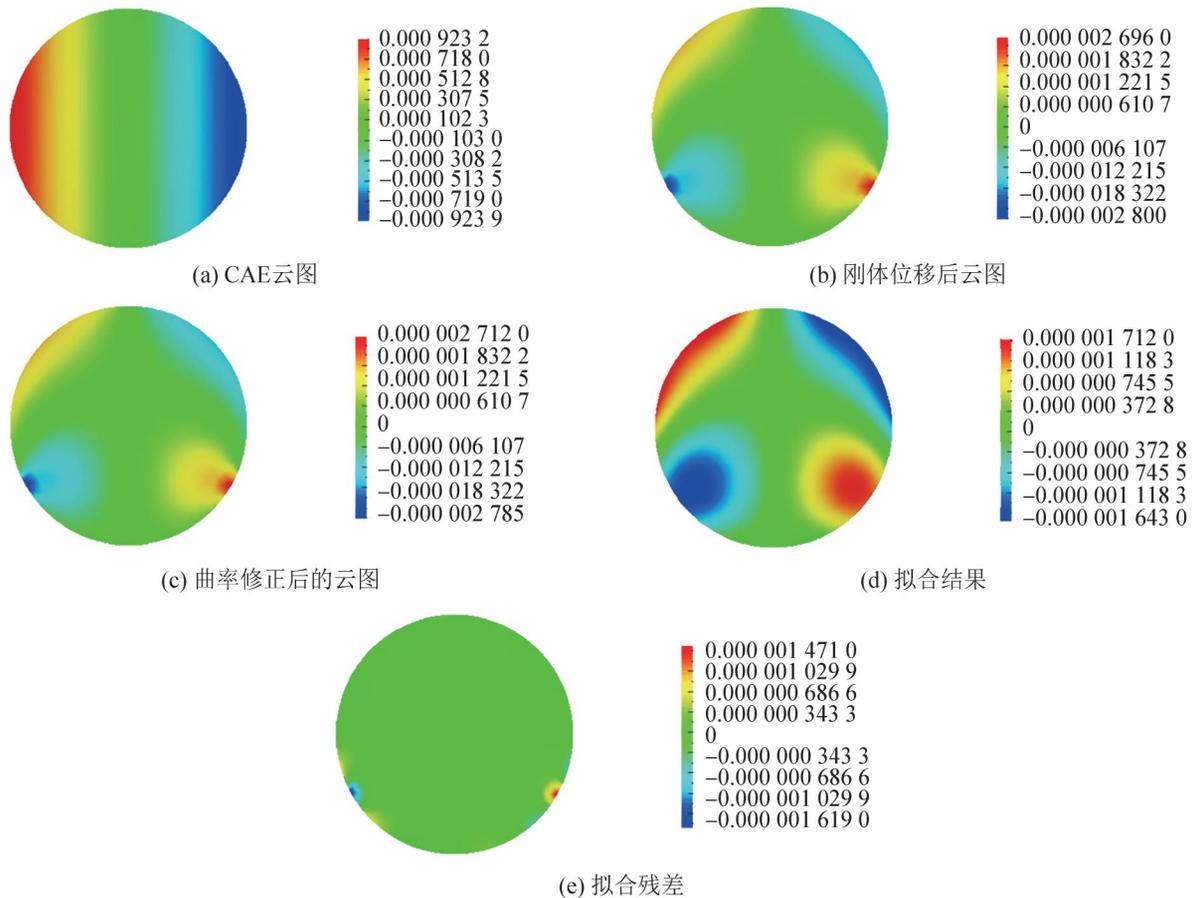


图7 次镜拟合结果(重力载荷)

Fig. 7 Fitting results of secondary mirror (gravity load)

图7(a)为次镜镜面经过有限元分析后的CAE位移云图, 次镜镜面最大形变量为0.000 9239 mm, CAE位移云图与主镜相似, 两侧边缘的形变量大于镜面中间的形变量。图7(b)为次镜镜面去除刚体位移后的云图, 最大形变量为0.000 002 8 mm。图7(c)为次镜镜面曲率修正后的位移云图。图7(d)为次镜面形拟合结果云图, 拟合结果与曲率修正后的位移云图相似, 但是红点和蓝点扩散较大。最大形变量在镜面边缘, 约0.000 001 712 mm。图6(e)为次镜拟合残差, 拟合残差最大值为曲率修正结果的一半。

为提高拟合精度, 将Zernike多项式阶数从 $n=8$ 、 $m=6$ 改为 $n=20$ 、 $m=20$ , 拟合结果如图8所示, 拟合精度有较大提高, 拟合残差明显变小。

Zernike多项式有无穷项, 理论上拟合项数越多拟合结果越精确, 但项数的增加导致计算量加大, 也可能存在系数矩阵不稳定导致的精度下降现象, 因此选择合适的拟合阶数显得尤为重要<sup>[22]</sup>。

### 2.3.2 温度载荷影响分析

在工程上, 将次镜后方增加一个温度载荷, 此时 $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$ , 在有限元软件中以位移场的形式输出温度载荷引起的面形变化, 图9给出了卡塞格林系统在温度影响下的位移云图。次镜距离热源较近, 所受影响最大, 具有最大的位移变化, 见图中红色区域, 主镜距离发热源较远, 受温度载荷影响最小, 见图中蓝色区域, 最大位移量为0.010 07 mm。

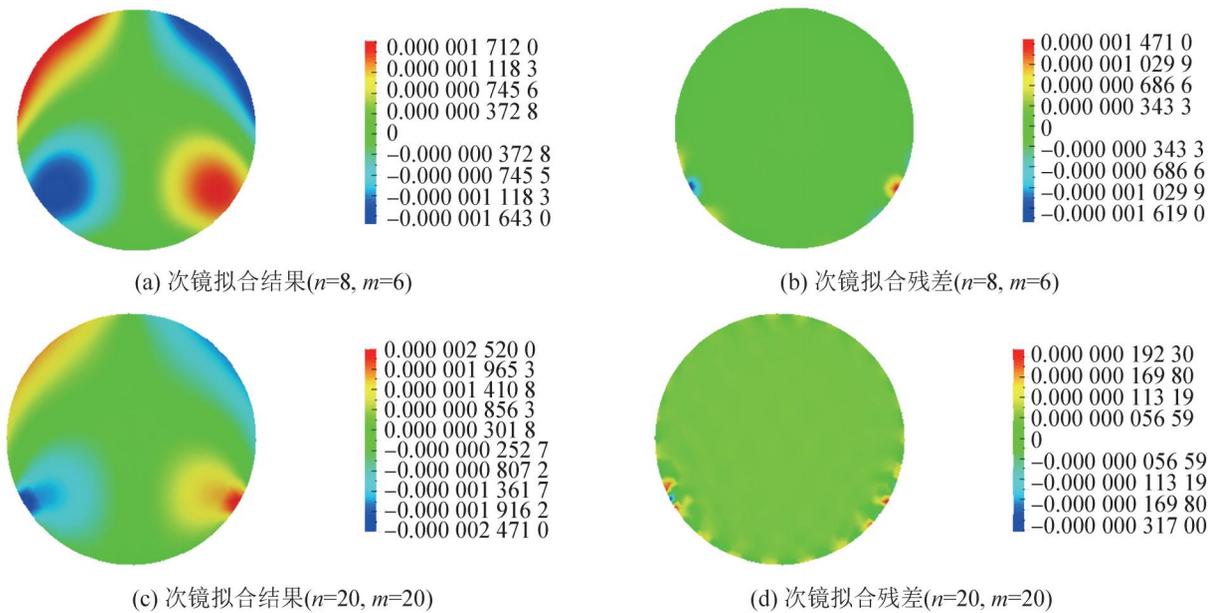
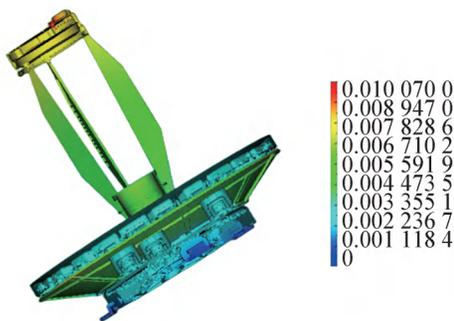
图8 修改 $n/m$ 值后的次镜拟合结果Fig. 8 Fitting result of secondary mirror after  $n/m$  value modification

图9 光机系统受温度作用的位移云图

Fig. 9 Displacement cloud image of an optical-mechanical system affected by temperature

镜面参数设置与前述相同，在此不再赘述，为提高拟合精度，选择拟合阶数 $n=20$ 、 $m=20$ ，可获得的拟合结果如图10~11所示。

图10(a)为主镜镜面在温度载荷下经过有限元分析后的CAE位移云图，最大形变量仍为镜面边缘，最大形变量为0.003 031 mm。图10(b)是在温度载荷作用下去除刚体位移后的位移云图，最大形变量0.000 062 11 mm。图10(c)为主镜镜面经过曲率修正后的云图。图10(d)为主镜镜面形拟合结果，云图形状与经过曲率修正后的云图相似，且大小相近。图10(e)为拟合残差，最大残差为0.000 005 051 mm。

图11(a)为次镜在温度载荷作用下的CAE位移云图，形变量沿镜面边缘向里越来越小，呈环形状分布，边缘形变量最大，为0.007 573 mm。图11(b)为去除刚体位移后的云图，形状与CAE位移云图相似，最大形变量为0.000 515 3 mm。图11(c)为曲率修正后的云图。图11(d)为次镜拟合结果，云图形状与曲率修正后的云图相似，最大形变量为0.000 094 01 mm。图11(e)为拟合残差，拟合残差是拟合结果和曲率修正后位移的1/3。

## 2.4 光学评价

通过程序生成带有拟合后Zernike系数的光学宏文件，将光学结果文件导入光学原始设计系统中，生成变形后的光学系统。比较原始光学系统、重力载荷作用下和温度载荷作用下光学系统的像质。光学系统点列图对比效果如图12所示。

可以看出，在重力和温度载荷作用下，光学系统整体光斑大小有所变化，在(0, 0)视场点，RMS光斑大小由0变化为0.003 489 mm和0.037 327 mm，仿真结果表明光学系统受重力和温度影响产生了镜面变形，并导致了成像质量下降。

场曲与畸变比较如图13所示。

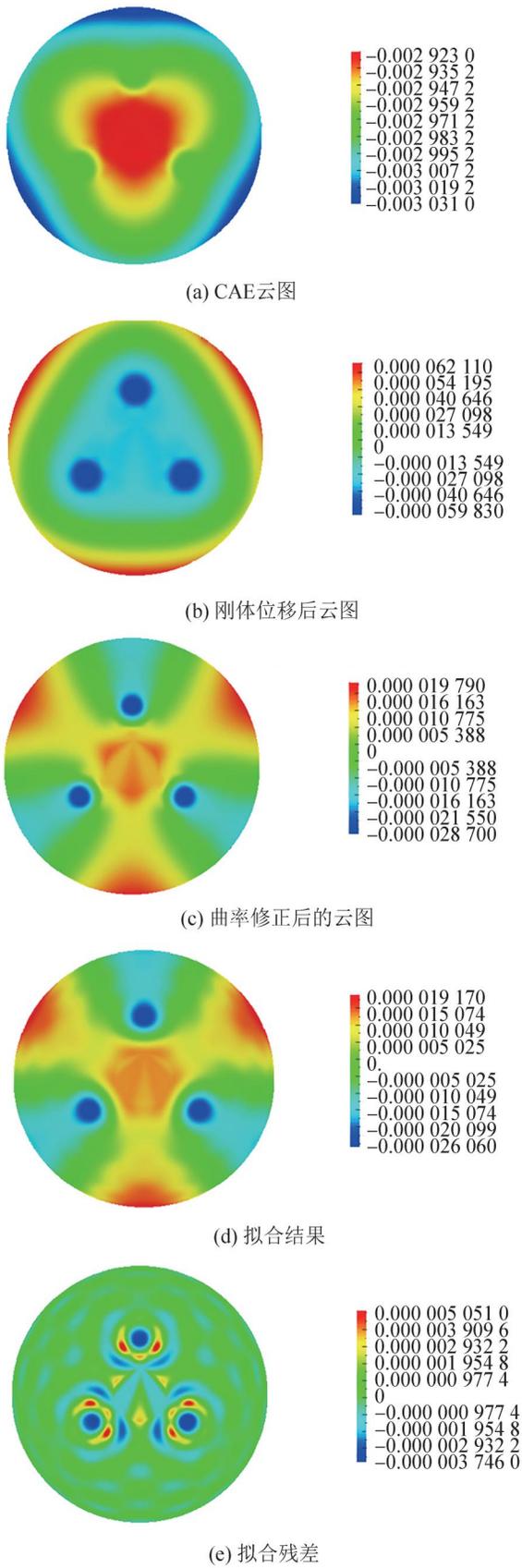


图 10 主镜拟合结果(温度载荷)  
Fig. 10 Fitting results of primary mirror (temperature load)

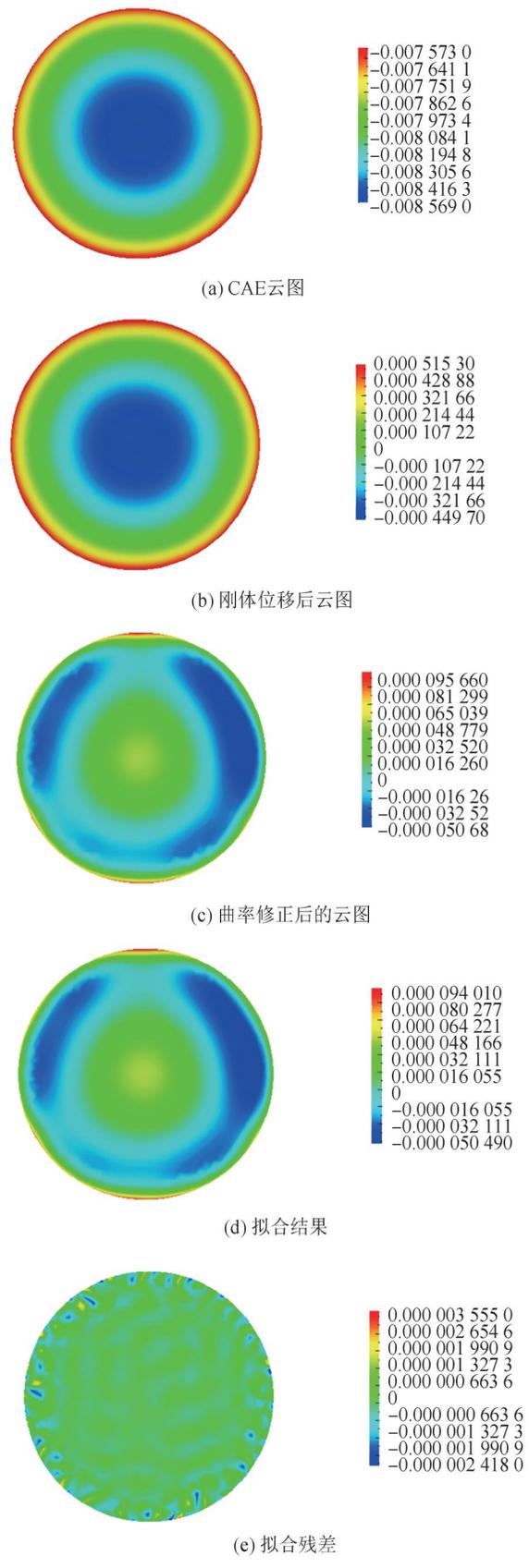
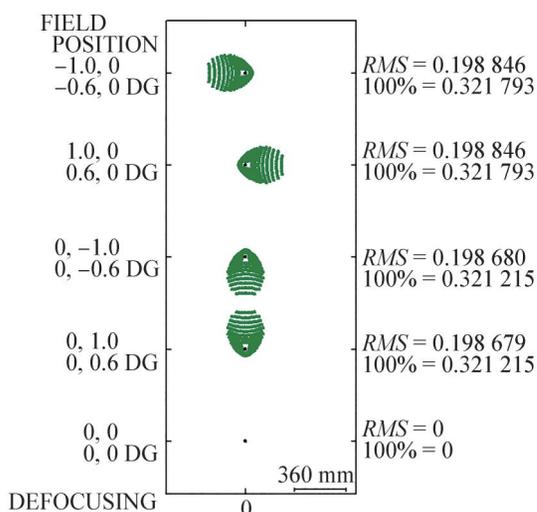
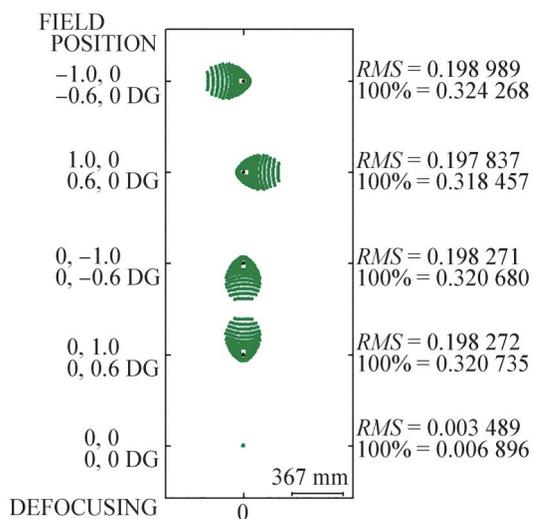


图 11 次镜拟合结果(温度载荷)  
Fig. 11 Fitting results of secondary mirror (temperature load)

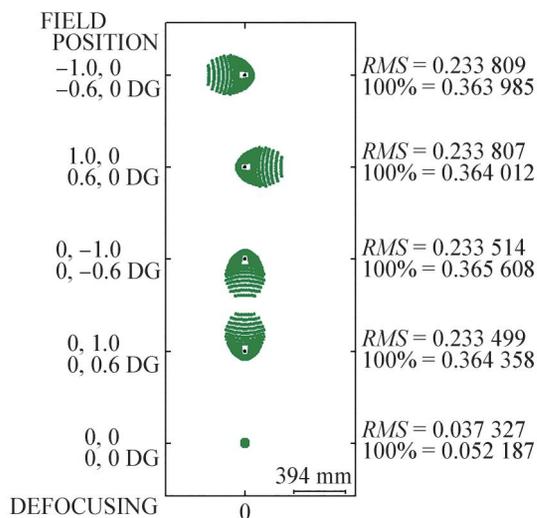
<http://www.china-simulation.com>



(a) 原设计光学系统



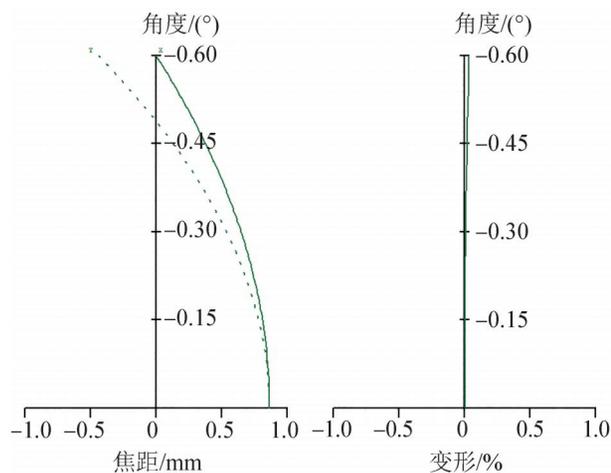
(b) 重力载荷下的光学系统



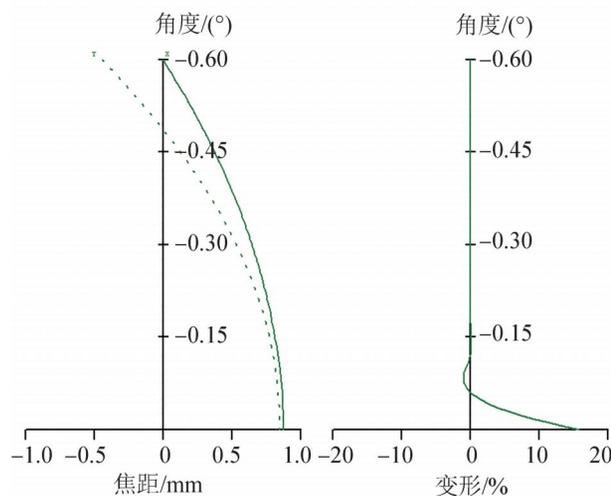
(c) 温度载荷下的光学系统

图 12 点列图对比

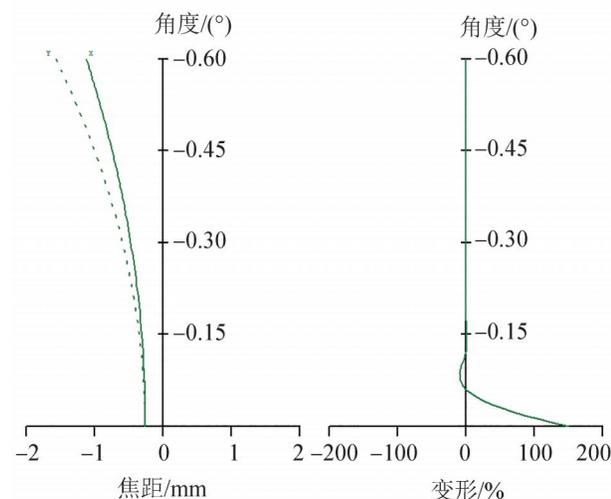
Fig. 12 Comparison chart of spot diagrams



(a) 原设计光学系统



(b) 重力载荷下的光学系统



(c) 温度载荷下的光学系统

图 13 场曲与畸变对比

Fig. 13 Comparison chart of field curvature and distortion

可以看出, 在重力和温度载荷作用下, 光学系统畸变变大, 温度载荷作用对光学系统场曲影响较大, 且产生焦点偏移。

### 3 结论

本文提出了一种高精度光学系统光机热耦合分析方法, 通过集成分析的思想, 实现光机热一体化分析。通过Zernike多项式作为结构分析与光学设计的接口, 该方法对于光机系统的结构设计 with 光学系统像质评价具有积极的参考意义。以卡塞格林光学系统作为案例研究对象, 采用光机热集成分析方法, 分析卡塞格林系统在重力和温度载荷的作用下光学面形的变化情况, 并分析了卡塞格林光学系统像质变化, 为光机系统结构优化提供了参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 刘先胜, 车宏, 刘欣. 高空无人机光电侦察装置光机技术研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(增1): 465-469.  
Liu Xiansheng, Che Hong, Liu Xin. Research on the Opto-mechanical Technology of the Electro-optical Reconnaissance Device on High-altitude UAV[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(S1): 465-469.
- [2] Zhang G P, Yang H T, Mei C, et al. Thermal/structural/optical Integrated Design for Optical Window of a High-speed Aerial Optical Camera[C]//AOPC 2015: Optical Design and Manufacturing Technologies. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2015: 96760W.
- [3] 李诚良. 基于光机热集成分析的空间低温红外光谱仪研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.  
Li Chengliang. Research on Space Cryogenic Infrared Spectrometer Based on Integrated Structural/Thermal/Optical Analysis[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [4] 王健, 张美君, 虞林瑶, 等. 卡塞格林系统结构设计与仿真[J]. 机电工程技术, 2022, 51(5): 84-86, 97.  
Wang Jian, Zhang Meijun, Yu Linyao, et al. Cassegrain System Structural Design and Simulation[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(5): 84-86, 97.
- [5] 杨怿, 陈时锦, 张伟. 空间光学遥感器光机热集成分析技术综述[J]. 光学技术, 2005, 31(6): 913-917, 920.  
Yang Yi, Chen Shijin, Zhang Wei. Review of Thermal-structural-optical Integrated Analysis of Space Remote Sensor[J]. Optical Technique, 2005, 31(6): 913-917, 920.
- [6] 方振中. 光刻机投影物镜光学镜片的光机热集成分析及软件实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.  
Fang Zhenzhong. Thermo-opto-mechanical Integrated Analysis and Software Development of a Projection Object Lens System for Photolithography[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [7] Bernd Dörband, Günther Seitz. Interferometric Testing of Optical Surfaces at Its Current Limit[J]. Optik, 2001, 112(9): 392-398.
- [8] 刘琼. Ansys宣布收购Zemax, 光学战略布局再度强化[EB/OL]. (2021-09-26) [2023-02-01]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/414210199>.  
Liu Qiong. Ansys Announced the Acquisition of Zemax, Reinforcing the Optical Strategic Layout[EB/OL]. (2021-09-26) [2023-02-01]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/414210199>.
- [9] 王增伟, 赵知诚, 杨溢, 等. 基于刚体运动完备方程的光机热集成分析方法[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(6): 235-252.  
Wang Zengwei, Zhao Zhicheng, Yang Yi, et al. Thermal-structural-optical Integrated Analysis Method Based on the Complete Equations of Rigid Body Motion[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6): 235-252.
- [10] 刘光. 基于光机热集成的空间相机主动热光学关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019.  
Liu Guang. Research of the Key Technologies on Active-thermal Optics for the Space Camera Based on Structural-thermal-optical Integration[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [11] 史建亮, 任戈. 一种新型的光机集成建模与仿真工具[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(23): 7445-7447, 7463.  
Shi Jianliang, Ren Ge. New Toolbox of Modeling and Simulation for Mechanical/Optical Integrated Analysis[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(23): 7445-7447, 7463.
- [12] 惠彬, 李景镇, 裴云天, 等. 大口径折反射式光学系统的光机结合分析[J]. 光子学报, 2006, 35(7): 1117-1120.  
Hui Bin, Li Jingzhen, Pei Yuntian, et al. Integrated Analysis of Optics and Mechanics in Larger Aperture Catadioptric Optical System[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(7): 1117-1120.
- [13] 刘巨, 薛军, 任建岳. 空间相机光机热集成设计分析及关键技术研究综述[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 422-427, 480.  
Liu Ju, Xue Jun, Ren Jianyue. Review of Research on

- Integration Design of Structural, Thermal and Optical Analysis with Key Technique of Space Camera[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(2): 422-427, 480.
- [14] 刘朋朋, 靳利锋, 赵慧, 等. 低轨道遥感相机光机热一体化分析及优化设计[J]. *红外技术*, 2022, 44(6): 614-621.  
Liu Pengpeng, Jin Lifeng, Zhao Hui, et al. Integrated Opto-mechanical-thermal Analysis and Optimization Design of a Low-orbit Remote Sensing Camera[J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(6): 614-621.
- [15] 邢占, 陈晓依, 彭志勇, 等. 红外气动光学效应研究进展与思考(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(4): 98-114.  
Xing Zhan, Chen Xiaoyi, Peng Zhiyong, et al. Research Progress and Thinking of Infrared Aero-optical Effect (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(4): 98-114.
- [16] 王惠. 气动光学效应对高速飞行器像质影响的建模仿真方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
Wang Hui. Research on Modeling and Simulation Method of Aero-optical Effect on Image Quality of High-speed Aircraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [17] Yang Dongsheng, Dong Minzhou, Zhang Tong, et al. Aerothermal Radiation Transfer Calculation Method from the Dome to the Detector Based on Reverse Ray Tracing[J]. *Optik*, 2017, 136: 543-552.
- [18] 孙喜万, 刘伟. 气动光学效应研究进展[J]. *力学进展*, 2020, 50(1): 249-309.  
Sun Xiwan, Liu Wei. Research Progress of Aero-optical Effect[J]. *Advances in Mechanics*, 2020, 50(1): 249-309.
- [19] 叶井飞, 高志山, 刘晓莉, 等. 基于Zernike多项式和径向基函数的自由曲面重构方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 233-241.  
Ye Jingfei, Gao Zhishan, Liu Xiaoli, et al. Freeform Surfaces Reconstruction Based on Zernike Polynomials and Radial Basis Function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 233-241.
- [20] 张向明, 姜峰, 孔龙阳, 等. 卡塞格林系统光学装调技术研究[J]. *应用光学*, 2015, 36(4): 526-530.  
Zhang Xiangming, Jiang Feng, Kong Longyang, et al. Research on Optical Alignment Technology for Cassegrain System[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(4): 526-530.
- [21] 邹营营. 基于卡塞格林光学系统的红外目标模拟器技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.  
Zou Yingying. Research of Infrared Target Simulation Technology Based on Cassegrain Optical System[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [22] 郭良贤, 卫俊杰, 唐培. Zernike圆域多项式镜面拟合仿真与精度研究[J]. *光学与光电技术*, 2018, 16(6): 56-62.  
Guo Liangxian, Wei Junjie, Tang Pei. Fitting Simulation and Precision of Mirror Surface with Zernike Circular Polynomial[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2018, 16(6): 56-62.