

温度对空间红外光学系统性能的影响分析方法

智喜洋, 王达伟, 谭凡教, 刘明东, 王海鹏, 张 伟

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 建立并提出了空间红外光学系统热控温度对光学系统性能的影响分析模型及方法。首先在有限元分析基础上, 利用 Zernike 多项式表征热力学环境引起的光学表面形变, 并考虑到温度对材料折射率的影响, 完善了光学系统传递函数(MTF)分析模型, 利用该模型可得出 MTF 在热力学和惯性载荷作用下的变化规律; 然后从热辐射传输机理出发, 建立了融入光学系统自身辐射的背景辐射计算模型, 利用该模型可实现光学表面自身热辐射在像面产生辐照度的分析计算, 从而提出了红外光学系统性能分析方法。最后针对实际空间红外光学系统, 开展了系统性能随热控温度变化的分析实验。结果表明: 当将系统热控温度设置为 10 °C 时, 可实现背景辐射下降 48.6% 的同时, 光学系统 MTF 降低 30% 的应用需求。模型与方法可用于红外光学系统背景辐射水平和成像质量变化规律的研究, 并应用于最佳热控温度的优化选择, 为空间红外光学系统热控设计提供理论指导。

关键词: 空间红外光学系统; 系统性能分析方法; Zernike 多项式; MTF; 背景辐射计算模型
中图分类号: TN211 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0001-08

Analytical method of temperature effects on space infrared optical system performance

Zhi Xiyang, Wang Dawei, Tan Fanjiao, Liu Mingdong, Wang Haipeng, Zhang Wei

(Harbin Institute of Technology, Research Center for Space Optical Engineering, Harbin 150001, China)

Abstract: An analysis model about the effects of the temperature on the imaging and detection performance of the space infrared optical system was established. Firstly, on the basis of the finite element analysis, the optical surface deformation was characterized by Zernike polynomials. Considering the effect of temperature on materials' refractivity, the analytical method of MTF was improved, and then the changing rule of system MTF with the variation of thermodynamics and inertial load was presented. Secondly, the calculation model of camera background radiation was established by integrating the spontaneous radiation of the system, based on the heat transfer mechanics. This model can be used to calculate the irradiance generated by the spontaneous thermal radiation in image plane. Then the performance analysis method of infrared optical system was proposed. Finally, experiments were conducted using a real space infrared optical system. Experimental results indicate that when the system thermal control temperature is set at 10 °C, the background radiation can be decreased by 48.6%, as MTF

收稿日期: 2015-10-20; 修订日期: 2015-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(61308100)

作者简介: 智喜洋(1982-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光学遥感信息获取与处理、光学探测与成像技术等方面的研究。

Email: zhixiyang@hit.edu.cn

通讯作者: 谭凡教。Email: tanfanjiao@hit.edu.cn

can be decreased by 30% as well. The proposed method can be used to study the background radiation of space infrared optical system and the changing rule of the system's imaging quality, and then optimize the system's working temperature, which provides theoretical guidance for thermal control design.

Key words: space infrared optical system; analytical method of system performance; Zernike polynomial; MTF; calculation model of background radiation

0 引言

空间红外光学系统的探测灵敏度受到目标背景噪声、光学系统自身辐射和探测器噪声的制约。而在空间光学探测领域,目标背景为接近绝对零度的宇宙背景,其辐射对空间红外光学系统的灵敏度影响微乎其微,噪声在探测器制冷后也能够得到很好抑制,光学系统自身的热辐射成为限制空间红外相机探测性能的主要因素^[1]。因此通常采取主动热控措施来降低光学系统温度,抑制系统自身的热辐射,以便提高探测灵敏度。然而,降低系统温度往往会引起光学表面的形变以及光学材料物理属性的变化,从而造成红外光学系统成像质量的下降。因此为了同时保证空间红外光学系统的成像与探测性能,需要深入开展温度对红外光学系统性能的影响研究。

自 20 世纪 80 年代开始,国外已开始针对光机热集成技术开展了大量理论研究与实际应用工作。如天基 Hubble 望远镜^[2]、James Webb 望远镜^[3]和地基 30 m 口径 TMT 望远镜等^[4]在系统设计阶段都进行了充分的光机热集成分析。国内在光机热集成分析方面的研究起步较晚,目前在实际应用中的光机热集成分析仍主要采用国外软件。但在理论研究方面,国内科研人员也针对空间探测的光学系统开展了一系列分析工作,如巩盾^[5]系统分析了温度对某离轴三反系统成像质量的影响,并将分析结果应用于指导光学系统热控设计;陈驰等^[6]在光机热集成分析中引入了非序列光线追迹,分析了光学系统内光制热效应对红外光学系统成像质量的影响;陈长征^[7]利用光机热集成分析方法对空间相机用摆镜做了轻量化的优化设计。但这些方法仅是考虑环境因素对红外光学系统成像质量的影响,尚未结合光学系统自身辐射的影响开展研究;在光学系统辐射计算方面,尽管光线追迹法被广泛应用,但它是一种数值计算方法,仍无法全面反映热辐射传输的物理

机理。目前也有解析计算方法的相关研究,但未将光学表面温度分布对光学系统自身辐射的影响引入模型。

文中针对上述问题,从热控温度对红外空间光学系统成像质量与探测性能的影响机理出发,综合考虑温度对光学材料折射率和光学表面形变以及红外光学系统背景辐射的影响,提出温度对红外光学系统性能的影响分析方法。并针对实际空间红外光学系统开展性能分析实验,以光学系统 MTF 降低 30% 为应用实例,分析出热控温度应满足的设计要求以及红外光学系统背景辐射的下降程度。

1 温度对红外光学系统性能影响分析方法

温度对红外光学系统性能的影响主要体现在两个方面:1) 引起材料的物理属性发生变化以及光学表面的形变,这将导致光学系统成像质量的下降,影响系统成像性能;2) 引起红外光学系统自身热辐射发生变化,这将降低光学系统的探测灵敏度,影响系统探测性能。

光学系统成像质量可采用调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 表征,光学系统自身的热辐射可通过热辐射在像面上产生的辐照度来表征,通常又被称为光学系统背景辐射。因此,研究 MTF 和光学系统背景辐射的分析与计算方法是开展热控温度对空间红外光学系统性能分析的前提与基础。下面分别给出光学系统 MTF 和背景辐射的分析模型与方法。

1.1 MTF 分析模型与方法

MTF 可表征光学系统对入射光相位的调制作用。光学系统对入射光相位的调制作用主要由光学表面面形和位置、光学材料折射率决定。受红外系统工作时惯性环境和热学环境的影响,光学表面将发生形变,而且光学材料折射率也会发生变化,这些因素均将引起光学系统 MTF 的变化。现有光机热集成

分析方法考虑到了光学表面形变对 MTF 的影响, 但忽略了光学材料折射率在热学环境下发生变化对 MTF 的影响。

文中综合考虑光学表面形变(包括: 面形的改变和光学表面整体的空间位置变化, 如偏心、倾斜等)以及光学材料折射率在不同热环境下发生变化对 MTF 的影响, 提出更为完善的 MTF 分析方法(如图 1 所示)。具体步骤为:

首先, 建立折射率与温度之间的关系模型, 计算出不同热学状态下光学材料的折射率, 并通过有限元方法分析得到光学系统在惯性载荷和热载荷作用下其各个光学表面的形变量(如图 2 所示); 然后, 通过 Zernike 多项式对光学表面的形变量进行拟合, 获得各个光学表面形变量的 Zernike 多项式系数; 最后, 将光学材料折射率和 Zernike 多项式系数代入光学设计软件(Code V、Zemax 等), 利用光线追迹法获得不同温度下的光学系统 MTF。

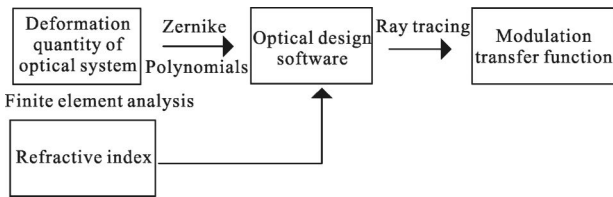


图 1 MTF 分析方法

Fig. 1 Analytical method of MTF

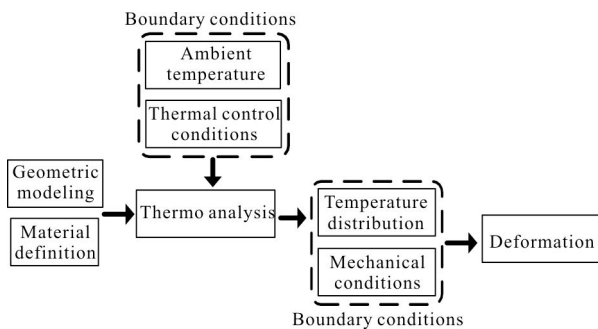


图 2 有限元分析流程图

Fig. 2 Flow chart of finite element analysis

1.1.1 折射率与温度关系模型的建立

光学材料的折射率可表征光经过材料传播后产生的相位延迟情况, 与波长、温度密切相关。现有方法很少考虑到温度对折射率的影响。

考虑 Sellmeier 方程:

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_i \frac{S_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \quad (1)$$

式中: n 为折射率; λ 为波长; S_i, λ_i 为系数; i 为加和的阶数。

在一定的温度下, 折射率是温度的函数 S_i, λ_i 则系数 S_i, λ_i 变成温度的函数。考虑到 λ_i 是温度的多项式, 则有:

$$S_i(T) = \sum_m S_{i,m} T^m \quad (2)$$

$$\lambda_i(T) = \sum_m \lambda_{i,m} T^m \quad (3)$$

式中: m 为多项式系数; T 为温度。此时 Sellmeier 方程具有以下形式:

$$n^2(\lambda, T) = 1 + \sum_i \frac{S_i(T) \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2(T)} \quad (4)$$

对公式(4)求导得:

$$2n(T) \frac{dn}{dT} = \sum \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2(T)} \frac{dS_i}{dT} + \sum \frac{2S_i(T) \cdot \lambda^2 \cdot \lambda_i(T) \frac{d\lambda_i}{dT}}{[\lambda^2 - \lambda_i^2(T)]^2} \quad (5)$$

考虑到公式(5)中 $n(T), S_i(T)$ 和 $\lambda_i(T)$ 的绝对数值变化很小, 在某一确定数值下可认为是常数。即 $n(T), \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2(T)}$ 和 $\frac{2S_i(T) \cdot \lambda^2 \cdot \lambda_i(T)}{[\lambda^2 - \lambda_i^2(T)]^2}$ 是常数。另外, S_i 和 λ_i 是温度的多项式函数, 其导数同样具有多项式形式。

综上, 将公式(5)关于温度的同次幂系数合并, 并消去 $2n(T)$ 。此时, dn/dT 是关于 T 的多项式函数。则折射率 n 随温度 T 变化规律的代表模型可用多项式函数表示:

$$n = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (6)$$

式中: a, b, c, d 为多项式系数。

公式(6)给出了温度与折射率之间的关系。在实际工程应用中, 只需获得若干温度下的折射率测量数据, 拟合出多项式系数, 即可得出其他温度对应的折射率。

1.1.2 光学表面形变量计算方法

Zernike 多项式各项系数可描述光学系统的像差, 因此采用 Zernike 多项式来表征光学表面形变^[8]。Zernike 多项式的具体表达式为:

$$Z_n^l(\rho, \theta) = R_n^l(\rho) \Theta_n^l(\theta) \quad (7)$$

式中: n 为多项式的阶数, 取值为 $0, 1, 2, \dots$; l 为与整

数 n 相关的序号,其值恒 n 与同奇偶性,且绝对值小于或等于阶数。

设 $l=n-2m(m=0,1,2,\dots,n)$, 则:

$$R_n^{n-2m} = \begin{cases} \sum_{s=0}^m (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! (m-s)! (n-m-s)!} \rho^{n-2s}, n-2m \geq 0 \\ R_n^{|n-2m|}, n-2m < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\Theta_n^{n-2m} = \begin{cases} \cos(n-2m)\theta, n-2m \geq 0 \\ -\sin(n-2m)\theta, n-2m < 0 \end{cases} \quad (9)$$

通过有限元分析可得到某一节点 (x_f, y_f, z_f) 在笛卡尔坐标系下 3 个方向的位移 $(\Delta x_f, \Delta y_f, \Delta z_f)$ 。对于光学表面来说,有限元分析得到的形变量包含了光学表面变形以及光学表面整体的偏心和倾斜。为了采用 Zernike 多项式表征包含光学表面偏心和倾斜的光学表面形变,需对节点坐标和形变量进行几何变换^[11]:

$$\Delta z = \text{sag}(x, y) + \Delta z_f - z_0 - \text{sag}(x_f + \Delta x_f - x_0, y_f + \Delta y_f - y_0) \quad (10)$$

式中: $\text{sag}(x, y)$ 为光学表面在 (x, y) 处的矢高。 (x_0, y_0, z_0) 为该光学表面的顶点坐标。该节点的坐标变换为:

$$x = x + \Delta x \quad (11)$$

$$y = y + \Delta y \quad (12)$$

有限元分析获得的是光学系统中各光学表面节点处的形变量,因此需要拟合出 Zernike 多项式的系数。在下面的计算中,每个节点形变量由公式(10)计算得出,每个节点的极坐标由公式(11)和(12)给出的笛卡尔坐标变换得到。设光学表面有 p 个节点, Zernike 多项式有 q 项。则第 i 个节点的形变量 $\Delta z_i(\rho_i, \theta_i)$ 可表示为:

$$\Delta z_i(\rho_i, \theta_i) = \sum_{j=1}^N x_j Z_{ij}(\rho_i, \theta_i) \quad (13)$$

式中: x_j 为 j 项 Zernike 多项式系数; (ρ_i, θ_i) 为归一化的第 i 个节点的极坐标。 $Z_{ij}(\rho_i, \theta_i)$ 是第 i 个节点的 j 项 Zernike 多项式的值。设:

$$A_0 = \begin{bmatrix} Z_{11}(\rho_1, \theta_1) & \cdots & Z_{1q}(\rho_1, \theta_1) \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{p1}(\rho_p, \theta_p) & \cdots & Z_{pq}(\rho_p, \theta_p) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_q]^T \quad (15)$$

$$b_0 = [\Delta z_1(\rho_1, \theta_1), \dots, \Delta z_p(\rho_p, \theta_p)]^T \quad (16)$$

则全部 p 个节点的形变量值应满足线性方程组:

$$A_0 X = b_0 \quad (17)$$

当 $p > q$ 时,方程组为超定线性方程组。其解 X 满足 $\|A_0 X - b_0\|_2 = \min$ 。为求解公式(17),方程两侧乘以 A_0^T , 可得:

$$A_0^T A_0 X = A_0^T b_0 \quad (18)$$

记 $A_0^T A_0 = A, A_0^T b_0 = b$, 可得:

$$AX = b \quad (19)$$

求解线性方程组即可得到光学表面形变量的 Zernike 多项式系数。考虑到公式(19)是对称正定线性方程组,文中采用共轭梯度法进行求解,具体过程为:

(1) 给定初始向量 $X^{(0)}$, 计算 $r^{(0)} = b - AX^{(0)}, p_0 = r^{(0)}$;

(2) 对于 $k=0, 1, \dots, N$;

① $\alpha_k = (r^{(k)}, r^{(k)}) / (p_k, Ap_k)$;

② $X^{(k+1)} = X^{(k)} + \alpha_k p_k$;

③ $r^{(k+1)} = r^{(k)} - \alpha_k Ap_k$;

④ 如果 $\|r^{(k+1)}\|_2 / \|b\|_2 < \varepsilon$, 则输出 $X^{(k)}, r^{(k)}$, 终止;

⑤ $\beta_k = (r^{(k+1)}, r^{(k+1)}) / (r^{(k)}, r^{(k)})$;

⑥ $p_{k+1} = r^{(k+1)} + \beta_k p_k$;

(3) 进入循环,转①。

进一步,将这些系数代入光学设计软件,并根据温度与折射率间的关系,即可获得不同温度下的光学系统 MTF 值。

1.2 红外光学系统背景辐射分析模型与方法

文中通过有限元分析获得热载荷作用下光学表面的温度分布,在此基础上从热辐射传输过程出发,分析光学表面自身热辐射在像面处产生的背景辐射。背景辐射分析方法的基本流程如图 3 所示。

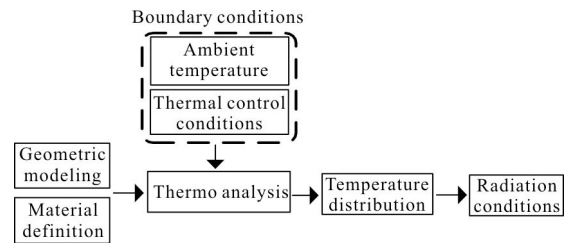


图 3 背景辐射分析方法

Fig. 3 Analytical method of background radiation

考虑到透射光学系统往往具有较高的透过率,因此不考虑辐射在光学表面间的二次散射对像面能量的影响,只计算光学表面直接辐射在像面上产生的辐照度。假设光学表面由很多小面元组成,每个小

面元具有相同的温度,计算每个面元在像面上产生的辐照度。如图 4 所示,设 dA 为第 n 个光学表面上的一个小面元,其辐亮度为 L 。 θ_s 为面元法线与辐射传播方向的夹角, θ 为像面法线与辐射传播方向反方向的夹角,传输距离为 l 。辐射传输过程中光学系统的透过率为 Γ_n ,则该小面元在像面处产生的辐照度为:

$$dE_i = \Gamma_n L \frac{\cos \theta \cos \theta_s}{l^2} dA \quad (20)$$

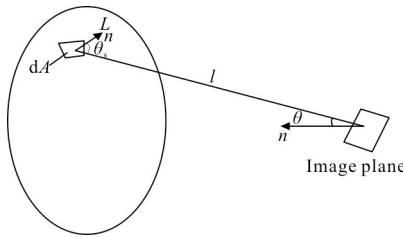


图 4 辐射计算模型

Fig.4 Radiation calculation model

此时,光学表面自身热辐射在像面上产生的总辐照度为:

$$E_i = \int_s \Gamma_n L \frac{\cos \theta \cos \theta_s}{l^2} dA \quad (21)$$

式中: Γ_n 为光学系统的透过率。第 n 个光学表面的自发辐射在传输过程中受到其后光学表面透过率的影响,则总透过率可表达为:

$$\Gamma_n = \prod_{i=n}^N \tau_i \quad (22)$$

式中: τ_i 为第 i 个光学表面的透过率。 N 为光学表面的数目。由此,所有光学表面自发辐射在像面处产生的辐照度可表示为:

$$E = \sum_{i=1}^N E_i \quad (23)$$

假设在温度 T 下光学表面微面元自身热辐射特性服从灰体辐射规律,则其表面面元的辐亮度可表示为:

$$L = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} d\lambda \quad (24)$$

式中: T 为微面元的温度; ε 为光学表面的发射率; λ 为辐射波长; λ_1, λ_2 为光学系统工作波段的边界。 c_1, c_2 为常数,其值为: $c_1 = 1.1056 \times 10^8$ ($W \cdot \mu m / m^4$), $c_2 = 1.4389 \times 10^4$ ($\mu m \cdot K$)。由此,通过有限元方法获得光

学表面微面元的温度,即可计算出光学系统自身热辐射在像面处产生的辐照度值。

2 实验结果及分析

针对某实际空间红外光学系统,利用文中提出的方法开展热控温度对光学系统性能的影响分析实验。红外光学系统焦距为 100 mm, $F\#$ 为 2,全视场为 $\pm 1.76^\circ$,工作波段为 2.5~4.5 μm 。光学镜头结构如图 5 所示,光学件材料为硅或锗,结构件材料为钛合金。热控温度设置为 0~20 $^\circ C$ 之间变化。

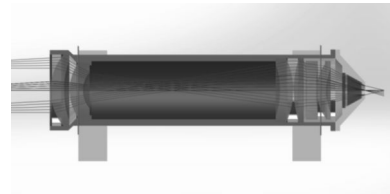


图 5 光学镜头结构图

Fig.5 Diagram of optical lens structure

2.1 温度对 MTF 影响分析实验

首先计算不同温度下的光学材料的折射率。利用 NASA 的高精度红外折射率测试系统 CHARMS 获得的硅和锗在波长 3 μm 、温度 20~300 K 之间的红外折射率数据^[10],并结合公式(6)拟合多项式系数,确定公式(6)的具体形式。由此即可计算得出该系统所用的光学材料硅和锗在 0~20 $^\circ C$ 之间不同温度下的折射率。拟合得到的多项式系数和硅和锗的折射率如表 1~2 所示。

表 1 多项式系数拟合结果

Tab.1 Fitting results of polynomial coefficients

Coefficients	Si	Ge
a	3.492	4.037
b	1.596×10^{-4}	4.029×10^{-4}
c	1.018×10^{-7}	-1.613×10^{-8}
d	-5.914×10^{-10}	-1.914×10^{-9}

表 2 折射率计算结果

Tab.2 Computing results of refractivity

Temperature/ $^\circ C$	0	5	10	15	20
Si	3.429 0	3.429 8	3.430 6	3.431 4	3.432 2
Ge	4.037 0	4.039 0	4.041 0	4.043 0	4.054 0

然后分析不同热控温度下光学表面的形变量。对系统在一定力学载荷和热载荷作用下进行有限元

分析,边界条件如表 3 和图 6 所示。分别计算热控温度为 0、5、10、15、20 °C 下的光学表面形变量,从而拟合出 Zernike 多项式系数。

表 3 有限元分析的边界条件

Tab.3 Boundary conditions of finite element analysis

Analysis type	Boundary conditions	Analysis output
Thermo analysis	Orbit temperature: -40 °C	Temperature distribution of optical surface
	Heat radiation emissivity: Structure parts: 0.85 Optics parts: 0.05	
	Thermal control temperature: Range from 0-20 °C	
Structure analysis	Fixed support, temperature distribution of optical surface	Deformation of optical surface

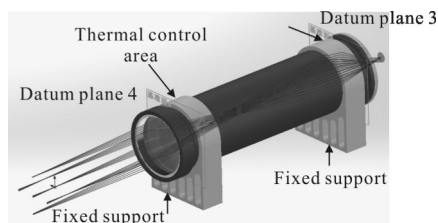


图 6 边界条件示意图

Fig.6 Schematic diagram of the boundary conditions

最后将不同热控温度下的光学材料折射率和采用光学表面形变量拟合出的 Zernike 多项式系数代入 Code V 软件得出 MTF。表 4 给出了不同温度下 MTF 的分析结果。图 7 给出了 MTF 随温度的变化规律曲线。

表 4 MTF 分析结果

Tab.4 Results of MTF analysis

Analytical conditions	MTF value in 0° field of view @52lp/mm		MTF value in 1.76° field of view @52lp/mm	
	Meridional direction	Sagittal direction	Meridional direction	Sagittal direction
0 °C	0.429	0.201	0.478	0.287
5 °C	0.438	0.259	0.476	0.349
10 °C	0.446	0.323	0.471	0.410
15 °C	0.452	0.386	0.463	0.461
20 °C	0.457	0.441	0.453	0.497
Design values	0.497	0.474	0.448	0.506

可以看出:针对该红外光学系统及设置条件,随着温度降低,系统成像质量明显下降;子午方向的 MTF 随温度变化较小,上下波动 10% 左右;弧矢方向 MTF 受温度的影响较大,变化幅度超过了 40%。

事实上,这是与热控位置的不对称分布有关的,热控位置的不对称分布导致了系统热载荷分布在子午和弧矢方向作用效果的不一致,从而导致 MTF 在两个方向上的变化出现了较大差异。

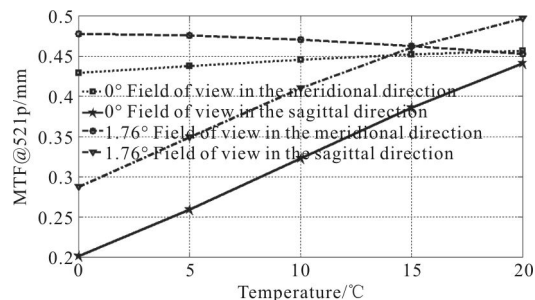


图 7 MTF 随温度的变化曲线

Fig.7 MTFs for different fields changed with temperatures

2.2 温度对背景辐射影响分析实验

采用有限元方法分析红外光学系统在一定热力学载荷作用下光学表面的温度分布,采用 1.2 节方法计算光学表面自身热辐射在像面中心产生的辐亮度。有限元分析边界条件如表 5 所示。

表 5 热分析的边界条件

Tab.5 Boundary conditions of thermo analysis

Analysis type	Boundary conditions	Analysis output
Thermo analysis	Orbit temperature: -40 °C	Temperature distribution of optical surface
	Heat radiation emissivity: Structure parts: 0.85 Optics parts: 0.05	
	Thermal control temperature: Range from 0 °C to 20 °C	

红外光学系统光学表面发射率为 0.05,各光学表面透过率为 0.98。分别计算热控温度为 0、5、10、15、20 °C 下光学系统自身热辐射在像面中心产生的辐照度(如表 6 所示)。

表 6 背景辐射计算结果

Tab.6 Calculation results of background radiation

Temperature/°C	Irradiance/(W/cm ²)
0	0.000 98
5	0.001 212
10	0.001 489
15	0.001 82
20	0.002 213

图 8 给出了辐照度随温度的变化规律曲线。可以看出:

(1) 通过降低温度能够有效地抑制红外光学系统背景辐射,当温度从 20 °C 降低到 0 °C,背景辐照度降低了 55%;

(2) 结合 MTF 分析结果,以降低热控温度造成 MTF 下降 30% 为应用需求,分析得出:红外光学系统热控温度应控制在 10 °C,此时可实现红外光学系统背景辐射下降 48.6%。

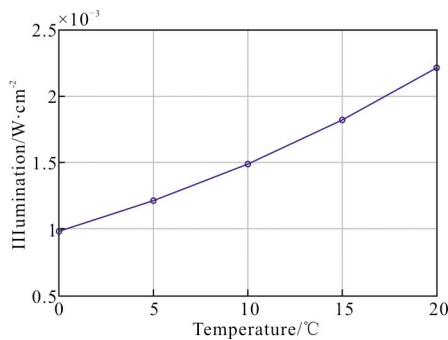


图 8 辐照度随温度的变化曲线

Fig.8 Irradiances changed with temperatures

3 结论

文中充分考虑光学材料折射率变化、光学表面形变对光学系统 MTF 以及红外光学系统自身热辐射的作用机理,通过理论建模、仿真研究建立了热控温度对红外光学系统性能的影响分析模型与方法。并针对实际空间红外光学系统进行了系统性能分析实验。可得出以下结论:

(1) 热控区域分布的不均匀性会导致光学系统 MTF 在子午、弧矢方向的不一致性,是造成成像质量下降的重要因素。因此在热控系统设计中应保证热控区域分布关于光学系统光轴的对称性;

(2) 以降低热控温度造成 MTF 下降 30% 为应用需求,分析得出:红外光学系统热控温度应控制在 10 °C,此时可实现光学系统背景辐射下降 48.6%。

文中建立的模型与方法能够更科学、全面反映温度对光学系统成像质量与探测性能的影响规律,可为空间红外光学系统热控设计提供理论指导。

参考文献:

- [1] Yin Limei, Liu Yingqi, Li Hongwen, et al. Cold optics technology to achieve high-accuracy infrared detection [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(9): 535-540. (in Chinese) 殷丽梅, 刘莹奇, 李洪文, 等. 实现高精度红外探测的冷光学技术[J]. *红外技术*, 2013, 35(9): 535-540.
- [2] Bely P Y, Lupie O L, Hershey J L. The line-of-sight jitter of the Hubble Space Telescope [C]//Proceedings of SPIE, 1993, 1945: 51-61.
- [3] Blaurock C, McGinnis M, KIM K, et al. Structural-thermal-optical performance (STOP)sensitivity analysis for the James Webb Space Telescope [C]//Proceedings of SPIE, 2005, 5867: 5867V.
- [4] Cho M, Corredor A, Vogiatzis K, et al. Thermal analysis of the TMT telescope structure [C]//Proceedings of SPIE, 2010, 7738: 7738C.
- [5] Gong Dun. The thermal effect on image quality of the remote sensor optical system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese) 巩盾. 温度对遥感器光学系统成像质量的影响 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
- [6] Chen Chi, Dong Tingting, Pan Haijun, Study on the spectrophotometer optical system with high resolution[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, 13(3): 64-70. (in Chinese) 陈驰, 董亭亭, 潘海俊. 光热制效应的光机热集成分析方法[J]. *光学与光电技术*, 2015, 13(3): 64-70.
- [7] Chen Changzheng. Optimization of pointing mirror for space camera and analysis of its effect on image quality degradation[J]. *Infrared*, 2014, 35(12): 23-34. (in Chinese) 陈长征. 空间相机用摆镜的轻量化优化设计及其对像质的影响分析[J]. *红外*, 2014, 35(12): 23-34.
- [8] Li Qikai. Zernike polynomials fitting in cryogenic optical thermal integration analysis [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(8): 45-50. (in Chinese) 李其锴. Zernike 多项式拟合用于低温光学镜头热集成分析[J]. *航天返回与遥感*, 2010, 31(8): 45-50.
- [9] Rradley J Frey, Douglas B Levition, Timothy J Madison. Temperature-depdent refractive index of silicon and germanium[C]//Proceedings of SPIE, 2005, 5904: 5904O-1-5904O-12.
- [10] Juergens Richard C, Coronato Patrick A. Improved method for transfer of FEA results to optical codes[C]//Proceedings of SPIE, 2003, 5174: 105-115.