

文章编号: 1002-1582(2025)05-0571-08

基于高斯矩阵参数解算的共口径双波段 制冷型红外光学系统设计方法

杨瑞^{1*}, 姜其畅²

(1. 运城职业技术大学 信息技术应用创新学院, 山西 运城 044000)

(2. 运城学院 物理与电子工程系, 山西 运城 044000)

摘 要: 文章提出了一种基于高斯矩阵的初始结构参数解算方法, 并将其成功应用于共口径双波段制冷型红外光学系统的设计中。方法首先结合系统结构特点构建了理论模型, 并基于高斯矩阵方程推导出参数解算方法。在解算过程中, 通过引入边界条件筛选出合理的初始结构参数, 并在 ZEMAX 中基于解算结果搭建理想模型。随后, 利用实际透镜替换理想透镜, 并通过多轮迭代优化, 最终获得了成像质量优异的系统设计。系统具备中波和长波两个工作波段, 焦距分别为-600mm和-520mm, 工作 F 数均为2.5。系统整体结构紧凑、性能稳定, 具有较高的航空航天应用价值。与传统方法相比, 该方法有效降低了共口径系统中前置镜组参数趋同的难度, 显著提升了设计的可行性和效率。

关 键 词: 几何光学; 高斯矩阵; 红外成像; 双波段

中图分类号: O439

文献标识码: A

Design method of the dual band shared-aperture cooled infrared system based on Gaussian Brackets

YANG Rui^{1*}, JIANG Qichang²

(1. School of Application and Innovation in Information Technology, Yuncheng Vocational And
Technical University, Yuncheng 044000, China)

(2. Department of Physics and Electronic Engineering, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China)

Abstract: A Gaussian Brackets-based method for solving initial structure parameters is presented, successfully applied to a dual-band shared-aperture cooled infrared system. The method builds a theoretical model, derives Gaussian Brackets equations with boundary conditions, and calculates reasonable initial parameters. An ideal ZEMAX model is established, followed by real lens replacement and iterative optimization. The system operates in MWIR and LWIR bands with EFLs of -600mm and -520mm, and an $F/\#$ of 2.5. Featuring a compact structure and stable performance, it shows strong aerospace potential. This method streamlines front lens group parameter matching across bands, enhancing design feasibility and efficiency.

Keywords: Geometrical optics; Gaussian brackets; Infrared imaging; dual band

0 引 言

经过几个世纪的科技发展, 光学系统已无疑

成为了目前信息收集能力最强、性价比最高、潜力最大的信息探测手段之一。其中, 红外光学系统因其在军事领域的天然适配属性, 得到了大力

收稿日期: 2024-12-25; 收到修改稿日期: 2025-03-20

基金项目: 山西省教育科学“十四五”规划2024年度规划课题《产教融合视域下《大学物理》课程思政数字化资源库的构建与实践研究》(GH-240186); 2024年山西省职业教育教学改革与实践研究项目《《大学物理》数字化教学资源库建设与应用研究》(202403155)

作者简介: 杨瑞(1989—), 女, 讲师, 硕士, 从事物理电子学、光学方面的研究。

* 通讯作者: yangrui6171539@126.com

发展, 红外夜视仪、红外枪瞄系统、红外成像制导技术、红外自动跟踪等等装备的研发和更新换代俨然已成为了国与国之间军备竞赛的一部分^[1-5]。除军事用途外, 红外光学系统在工业、农业、安防及医疗等领域的应用价值也日益凸显, 展现出广阔的发展前景。

需求带来了应用技术的革新和发展, 除了在工作谱段范围上的不断扩展, 红外光学系统的结构形式也不再单一。例如: 结合变焦凸轮的红外光学系统^[6-11]; 多波段共口径红外光学系统^[12-14]。其中, 多波段共口径光学系统因其独特的光路设计和优越的性能在红外成像领域逐渐受到重视。这类系统能够在光路中同时接收多个不同波段的信息, 不仅有效减少了系统的体积和重量, 还简化了结构, 提高了系统的环境适应能力。尤其在复杂战场、恶劣气候及远距离探测等场景中, 多波段共口径系统展现出很高的稳定性和成像效率, 具有重要的研究价值。

然而, 多波段共口径系统的设计难度较大。传统设计方法通常需要为各通道分别选择初始结构, 并通过逐步优化的方式使两个通道的前置透镜组参数趋同。这种设计方法对初始结构的要求较高, 不仅需要具备良好的像质优化潜力, 还需要具备足够的前置镜组参数趋同能力^[15,16]。若初始结构选择不当, 设计过程将变得极为复杂。为此, 本文提出了一种基于高斯矩阵 (Gaussian Brackets) 的参数解算方法^[17], 该方法可在已知系统部分参数的基础上, 解算出剩余参数, 并通过设置边界条件筛选出合理解, 以此构建出合适的初始结构。采用该方法建立的初始结构在不同通道的前置镜组参数同步性方面效果显著, 且在灵活性、优化潜力上均有着良好的表现。

本文通过一个共口径双波段制冷型红外光学系统的设计过程来对本方法进行说明。首先在第一节中给出设计指标, 明确光学系统的理论模型, 接着基于高斯矩阵在 MATLAB 中建立起求解方程组并进行初始结构参数的解算, 根据解算结果在 ZEMAX 中搭建出光学系统的理想模型; 然后, 在第二节中根据前文搭建出的理想模型在 ZEMAX 中完成实际的光学系统设计, 并给出最终的优化设计结果。该系统具备中波红外和长波红外两个工作波段, 焦距分别为-600mm 和-520mm, 系统最大口径 245mm, 总长 320mm, 两个通道的 F 数均为 2.5, 在 MTF, 畸变控制、冷反射分析以及公差分析等方面均有较为优异的表现。

1 高斯矩阵方程组构建及初始结构参数解算

1.1 设计指标

在进行光学设计前, 必须设法获得一个合理的初始结构。为了确保各个通道在优化时具有较高的同步性, 不选择现有专利库中的初始结构, 而是通过方程组解算的方式来获取合理的初始结构参数, 首先根据系统特性给出相应指标要求, 如表 1 所示。

表 1 共口径双波段制冷型红外光学系统设计指标

系统参数	中波红外通道	长波红外通道
焦距($1/\varphi$)/mm	-600	-520
像面大小 IMA/mm	12	12
数值孔径 $F/\#$	2.5	2.5
工作波长 $\lambda/\mu\text{m}$	3.7~4.8	8~12
后工作距 BFL/mm	25	25
系统总长 TTL/mm	<350	<350

表 1 中 φ 、IMA、 $F/\#$ 、 λ 、BFL、TTL 分别对应为系统光焦度、像面大小、系统数值孔径、系统工作波长、系统后工作距、系统总长。为了控制系统尺寸, 该系统的前置共口径组采用同轴两反形式。此外, 由于制冷型红外系统对后工作距有较严格的要求, 因此, 将其作为设计指标中的一项要求写入。

则根据表 1 中的设计指标, 可确认两个通道所使用的制冷型探测器参数, 由表 2 给出。

表 2 制冷型探测器参数

探测器参数	中波红外通道	长波红外通道
分辨率/pixel	640×512	384×310
像元大小/(Pixel/ μm)	15	25
后工作距 BFL/mm	25	25

1.2 Gaussian Brackets 初始结构参数求解方程推导

接下来将逐步介绍系统初始结构参数的求解方法, 首先介绍光学系统中的一阶特性参数, 图 1 给出了一个四组元光学模型。

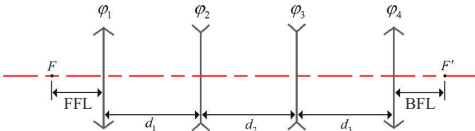


图 1 四组元光学系统模型

其中, φ_1 、 φ_2 、 φ_3 、 φ_4 为四个组元各自的光焦度; d_1 、 d_2 、 d_3 为四个组元彼此之间的间隔, FFL 对应系统的前焦距、BFL 为系统的后焦距, 由组元光焦度和间隔参数所构成的高斯矩阵^[17]可表示为

$$\begin{cases} \alpha = [d_3, -\varphi_3, d_2, -\varphi_2, d_1, -\varphi_1] \\ \beta = [d_3, -\varphi_3, d_2, -\varphi_2, d_1] \\ \gamma = [-\varphi_4, d_3, -\varphi_3, d_2, -\varphi_2, d_1, -\varphi_1] \\ \delta = [-\varphi_4, d_3, -\varphi_3, d_2, -\varphi_2, d_1] \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可将系统的总光焦度 φ 和后工作距BFL用可表示为

$$\varphi = -\gamma, \text{BFL} = -\alpha/\gamma, \quad (2)$$

然而, 本文所设计的系统并不能直接应用上述公式来计算, 需根据模型特点进行修正。共口径二次成像折反系统的光学模型由图2给出。

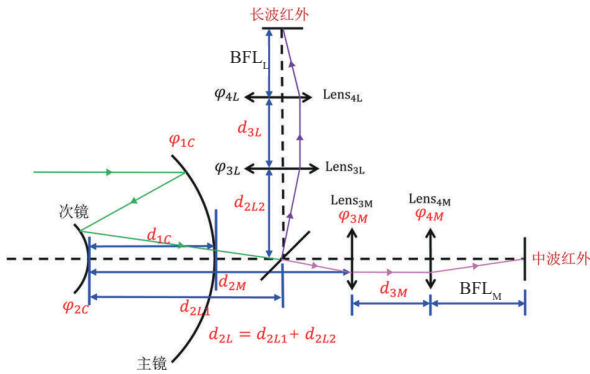


图2 共口径二次成像折反系统的光学模型

图2即展示了本文所设计系统的工作原理, 进入系统的光经过一个同轴两反共口径组后, 再通过一个分光元件将不同波段的光路分离, 进入各自的子通道中成像。该系统的参数共有13个, 其中包括前置共口径组中主镜 (Primary mirror) 和次镜 (Secondary mirror) 的光焦度 φ_{1C} 、 φ_{2C} 以及它们之间的间隔 d_{1C} ; 次镜到中波红外通道透镜单元Lens_{3M}的间隔 d_{2M} , 次镜到长波红外通道透镜单元Lens_{3L}的间隔 d_{2L} (由 d_{2L1} 和 d_{2L2} 构成, 在参数解算过程中不考虑分光元件的影响, 故应被视为一个参数); 中波红外通道透镜单元Lens_{3M}和Lens_{4M}的光焦度 φ_{3M} 、 φ_{4M} 以及它们之间的间隔参数 d_{3M} ; 长波红外通道透镜单元Lens_{3L}和Lens_{4L}的光焦度 φ_{3L} 、 φ_{4L} 以及它们之间的间隔参数 d_{3L} ; 两个通道各自的后工作距BFL_M、BFL_L。

由于系统中引入了反射光路, 因此该模型中波红外通道的一阶特性参数的高斯矩阵应修正为

$$\begin{cases} \alpha = [d_{3M}, -\varphi_{3M}, d_{2M}, -\varphi_{2C}, -d_{1C}, -\varphi_{1C}] \\ \beta = [d_{3M}, -\varphi_{3M}, d_{2M}, -\varphi_{2C}, -d_{1C}] \\ \gamma = [-\varphi_{4M}, d_{3M}, -\varphi_{3M}, d_{2M}, -\varphi_{2C}, -d_{1C}, -\varphi_{1C}] \\ \delta = [-\varphi_{4M}, d_{3M}, -\varphi_{3M}, d_{2M}, -\varphi_{2C}, -d_{1C}] \end{cases} \quad (3)$$

高斯矩阵 (Gaussian Brackets) 的运算规则为

$$\begin{cases} [a_1] = a_1 \\ [a_1, a_2] = a_1 a_2 + 1 \\ [a_1, a_2, a_3, \dots, a_N] = \\ [a_1, a_2, a_3, \dots, a_{N-2}] + [a_1, a_2, a_3, \dots, a_{N-1}] a_N \end{cases} \quad (4)$$

则可根据式(4)将式(3)展开为

$$\begin{cases} \alpha_M = 1 - d_{2M} \cdot (\varphi_{1C} + \varphi_{2C} + \varphi_{1C} \varphi_{2C} d_{1C}) - \\ d_{3M} \cdot (\varphi_{1C} + \varphi_{2C} + \varphi_{3M}) + \\ \varphi_{1C} d_{1C} \cdot (1 - \varphi_{2C} d_{3M} - \varphi_{3M} d_{3M}) + \\ d_{2M} d_{3M} \varphi_{3M} \cdot (\varphi_{1C} + \varphi_{2C} + \varphi_{1C} \varphi_{2C} d_{1C}) \\ \beta_M = -d_{1C} + d_{2M} + d_{3M} + d_{1C} \varphi_{2C} \cdot (d_{2M} + d_{3M}) - \\ d_{3M} \varphi_{3M} \cdot (-d_{1C} + d_{2M}) - d_{1C} d_{2M} d_{3M} \varphi_{2C} \varphi_{3M} \\ \gamma_M = -(\varphi_{1C} + \varphi_{2C} + \varphi_{3M} + \varphi_{4M}) - \varphi_{1C} \varphi_{2C} d_{1C} + \\ \varphi_{2C} \varphi_{3M} d_{2M} + \varphi_{3M} \varphi_{4M} d_{3M} + \\ \varphi_{1C} \varphi_{3M} \cdot (-d_{1C} + d_{2M}) + \\ \varphi_{1C} \varphi_{4M} \cdot (-d_{1C} + d_{2M} + d_{3M}) + \\ \varphi_{2C} \varphi_{4M} \cdot (d_{2M} + d_{3M}) + \\ \varphi_{1C} \varphi_{2C} d_{1C} d_{2M} \cdot (\varphi_{3M} + \varphi_{4M}) + \\ \varphi_{1C} \varphi_{4M} d_{1C} d_{3M} \cdot (\varphi_{2C} + \varphi_{3M}) - \\ \varphi_{3M} \varphi_{4M} d_{2M} d_{3M} \cdot (\varphi_{1C} + \varphi_{2C}) - \\ \varphi_{1C} \varphi_{2C} \varphi_{3M} \varphi_{4M} d_{1C} d_{2M} d_{3M} \\ \delta_M = 1 + d_{1C} \cdot (\varphi_{2C} + \varphi_{3M} + \varphi_{4M}) - \\ d_{2M} \cdot (\varphi_{3M} + \varphi_{4M}) - \\ d_{3M} \varphi_{4M} - d_{1C} d_{2M} \cdot (\varphi_{2C} \varphi_{3M} + \varphi_{2C} \varphi_{4M}) - \\ d_{1C} d_{3M} \cdot (\varphi_{2C} \varphi_{4M} + \varphi_{3M} \varphi_{4M}) + \\ d_{2M} d_{3M} \varphi_{3M} \varphi_{4M} \cdot (1 + \varphi_{2C} d_{1C}) \end{cases} \quad (5)$$

则该二次成像折反四组元系统中波红外通道的总光焦度 φ_M 和后工作距BFL_M可表示为

$$\varphi_M = -\gamma_M, \text{BFL}_M = -\alpha_M/\gamma_M, \quad (6)$$

类似地, 长波红外通道的高斯矩阵可表示为

$$\begin{cases} \alpha_L = [d_{3L}, -\varphi_{3L}, d_{2L}, -\varphi_{2C}, -d_{1C}, -\varphi_{1C}] \\ \beta_L = [d_{3L}, -\varphi_{3L}, d_{2L}, -\varphi_{2C}, -d_{1C}] \\ \gamma_L = [-\varphi_{4L}, d_{3L}, -\varphi_{3L}, d_{2L}, -\varphi_{2C}, -d_{1C}, -\varphi_{1C}] \\ \delta_L = [-\varphi_{4L}, d_{3L}, -\varphi_{3L}, d_{2L}, -\varphi_{2C}, -d_{1C}] \end{cases} \quad (7)$$

则按照同样的步骤对式(7)展开后, 长波红外通道的总光焦度 φ_L 和后工作距BFL_L可表示为

$$\varphi_L = -\gamma_L, \text{BFL}_L = -\alpha_L/\gamma_L, \quad (8)$$

完成上述推导后, 接下来, 需要构建方程组对两个通道的初始结构参数进行解算。首先应当明确系统中的已知量和未知量, 由前文可知, 该

系统共有 13 个参数需要确定，则根据“ N 个方程求解 N 个未知数”的原则，若将图 2 中展示的 13 个参数均视作未知量，则需要 13 个方程才可以将其全部解出，如此求解过于复杂，即便获得解空间后也必须经过层层筛选才能找到合理的解，在效率上相对低效。因此，对于本文系统初始结构参数的求解过程，直接将同轴两反共口径组的参数 φ_{1C} 、 d_{1C} 、 φ_{2C} 设为常量；并且由表 1 可知，希望设计的两个通道的后工作距均为 25mm，因此，直接将对应的 BFL_M 、 BFL_L 也设为常量；最后，将剩余参数中的 d_{2M} 、 d_{3M} 、 d_{2L} 、 d_{3L} 设为循环变量输入。以上已知参数的取值范围由表 3 给出。

表 3 解算初始结构参数的已知量(单位: mm)

同轴两反共口径组参数	
主镜焦距 $1/\varphi_{1C}$	300
主次镜间距 d_{1C}	-200
次镜焦距 $1/\varphi_{2C}$	-200
中波红外通道的循环输入参数	
次镜到光学单元 Lens _{3M} 距离 d_{2M}	230:10:280
光学单元 Lens _{3M} 到光学单元 Lens _{4M} 距离 d_{3M}	20:10:70
后工作距 BFL_M	25
长波红外通道的循环输入参数	
次镜到光学单元 Lens _{3L} 距离 d_{2L}	230:10:280
光学单元 Lens _{3L} 到光学单元 Lens _{4L} 距离 d_{3L}	20:10:70
后工作距 BFL_L	25

在这里，对 d_{2M} 、 d_{3M} 、 d_{2L} 、 d_{3L} 的取值范围给出说明，根据图 2 可知，为了保证结构上的合理性， d_{2M} 、 d_{2L} 均需大于 d_{1C} 的绝对值，且需考虑到放置分光元件的空间，因此，对于本次求解，我们将 d_{2M} 、 d_{2L} 的下限均定为 230，而为了不使得系统体积过于庞大，将其上限均定为 280，以 10 为间隔取点；而 d_{3M} 、 d_{3L} 则能直接反映分光后两个通道的长度，同样基于缩短系统总长的考量，将其下限定为 20，而上限定为 70，以 10 为间隔取点。结合表 1 中的系统总长要求，以上是比较合理的取值范围。

在确定已知量的取值后，可以开始进行两个通道的参数求解。由表 3 可知，当前对于中波红外通道的初始结构参数求解，只余 φ_{3M} 和 φ_{4M} 未知，故仅需两个方程即可完成求解，则前述所推导的式 (6) 可被用于构建求解方程组。需要注意的是，循环参数的每一次输入都对应一次方程组求

解过程，即会获得一组 φ_{3M} 和 φ_{4M} ，为了确保解得的光焦度数值合理，即不要过大也不要过小，需要对其添加边界限制条件，可表示为

$$\begin{cases} 30 \leq |1/\varphi_{3M}| \leq 200 \\ 30 \leq |1/\varphi_{4M}| \leq 200 \end{cases} \quad (9)$$

同理，对于长波红外通道的参数求解过程，其 φ_{3L} 和 φ_{4L} 的光焦度数值边界条件为

$$\begin{cases} 30 \leq |1/\varphi_{3L}| \leq 200 \\ 30 \leq |1/\varphi_{4L}| \leq 200 \end{cases} \quad (10)$$

此外，由于在表 1 中对系统总长提了要求，因此，对于中波红外通道的合理解，应当满足

$$d_{2M} + d_{3M} + BFL_M \leq 350 \quad (11)$$

同样，对于长波红外通道的合理解，应当满足

$$d_{2L} + d_{3L} + BFL_L \leq 350 \quad (12)$$

以上求解过程中的已知量参数取值、未知量求解边界条件设定等，均可根据需求更改，对于本文所设计的两个通道，由于系统总焦距相近，故为了简化求解过程，其输入参数、条件取值均相同。总之，在对两个通道分别求解并经过边界条件筛选后，保留下来的解均为合理解，从中随机选择一组作为初始结构参数，如表 4 所示。

表 4 共口径二次成像折反系统的初始结构参数(单位: mm)

同轴两反共 口径组参数	主镜焦距 $1/\varphi_{1C}$	主次镜间距 d_{1C}	次镜焦距 $1/\varphi_{2C}$
	300	— 200	— 200
中波红外通道参数			
次镜到光学单元 Lens _{3M} 距离 d_{2M}	250		
光学单元 Lens _{3M} 到光学单元 Lens _{4M} 距离 d_{3M}	60		
光学单元 Lens _{3M} 焦距 $1/\varphi_{3M}$	35.2916		
光学单元 Lens _{4M} 焦距 $1/\varphi_{4M}$	42.8541		
后工作距 BFL _M	25		
长波红外通道参数			
次镜到光学单元 Lens _{3L} 距离 d_{2L}	250		
光学单元 Lens _{3L} 到光学单元 Lens _{4L} 距离 d_{3L}	60		
光学单元 Lens _{3L} 焦距 $1/\varphi_{3L}$	36.9625		
光学单元 Lens _{4L} 焦距 $1/\varphi_{4L}$	35.9952		
后工作距 BFL _L	25		

根据表中数据在 ZEMAX 中构建的模型如图 3 所示。

由于两个反射镜并非理想透镜，因此系统中存在较为严重的球差，在将两个反射镜的圆锥系数

(Conic) 作为变量优化后的初始结构模型如图4所示。

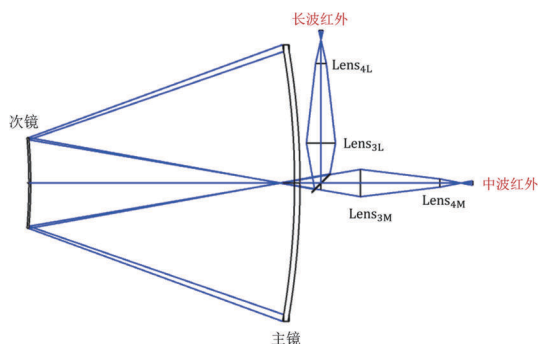


图3 共口径二次成像折反系统的初始结构模型

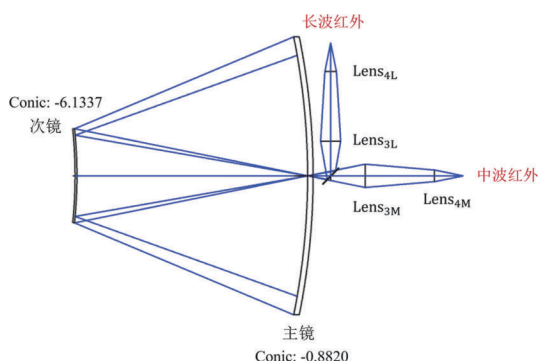


图4 优化后的共口径二次成像折反系统的初始结构模型

2 光学系统设计实例

2.1 光学系统设计

在上一节中,通过方程组解算求出了光学系统的初始结构参数,并据此搭建出了系统的初始结构模型。在ZEMAX中逐步使用实际的红外透镜和分光镜将模型中的理想透镜替代后,经过几轮迭代优化后,最终设计的折反式共口径双波段制冷型红外光学系统如图5所示。

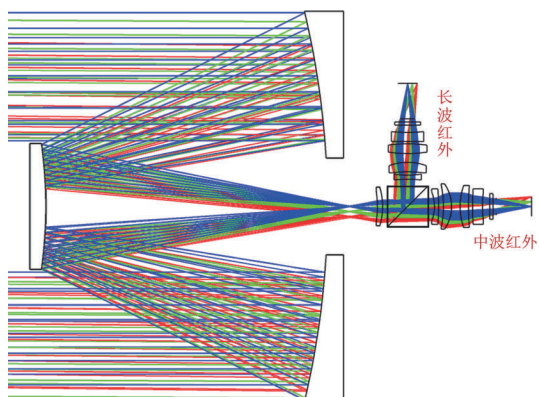


图5 折反式共口径双波段制冷型红外光学系统

由于方程解算得到的初始结构已将两个通道的共口径组参数统一,因此在设计过程中不再需要耗费大量精力在共口径组参数趋同的过程当中,可以更多的关注像差平衡校正、系统体积控制等

方面,且由于求解时预留了足够长的后截距,因此易于实现100%的冷光阑效率。优化设计后共口径双波段制冷型红外光学系统中的中波红外通道的焦距为-600mm,长波红外通道的焦距为-520mm,双通道的 F 数都为2.5。整个光学系统的总长为320mm,主镜的直径压缩到了245mm,并采用了一个分光棱镜进行双通道分光,实现了紧凑型设计的目的。

该双波段光学系统设计的过程中,主镜和次镜为非球面,其组成的一次成像结构不会产生色差。中波红外通道的二次成像组使用了锗、硒化锌和硅三种红外材料进行色差校正,长波红外通道的二次成像组仅使用了锗、硒化锌两种材料进行色差校正,为了更好的校正系统像差使用了一个非球面锗透镜,该透镜位于分光棱镜前,整个双通道光学系统结构紧凑,且使用的透镜数量较少,有利于提高双通道的系统透过率。

2.2 像质评价

接下来对该共口径双波段红外光学系统的像质进行评价,首先展示了该光学系统的点列图优化情况,如图6和图7所示。

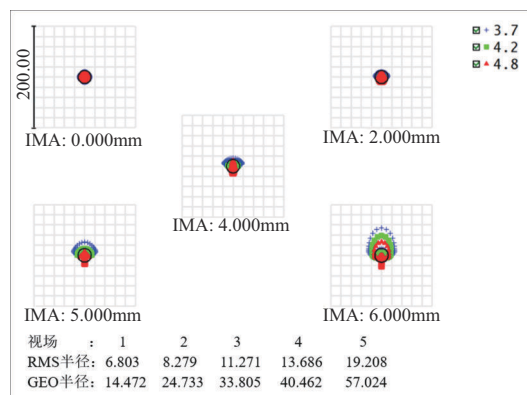


图6 中波红外光学系统通道点列图

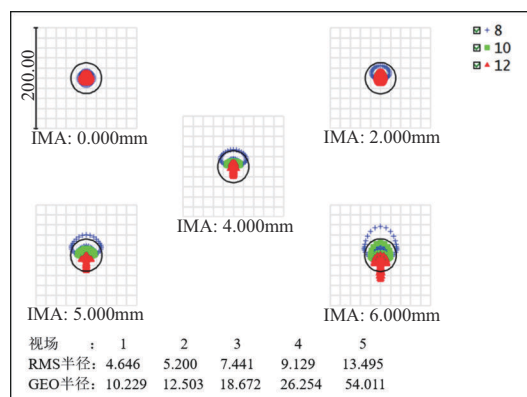


图7 长波红外光学系统通道点列图

其中,图6为中波红外通道的点列图弥散斑,图7为长波红外通道的点列图弥散斑,观察图6和图7可知,这两个光学通道各个视场的弥

散斑半径基本上均已小于艾里斑, 优化结果优异。接下来需要考察该系统的MTF表现, MTF的Nyquist频率与所选探测器像元尺寸之间的关系表示为

$$\text{Nyquist (lp/mm)} = \frac{1000}{2\text{Pixels}} \text{lp/mm} \quad (13)$$

则根据表2和式(13)可知, 应当考察中波红外通道在33lp/mm下的MTF表现, 由图8给出。

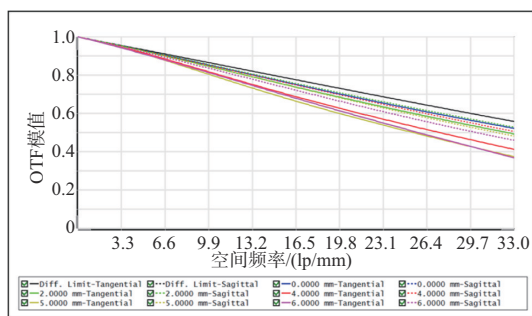
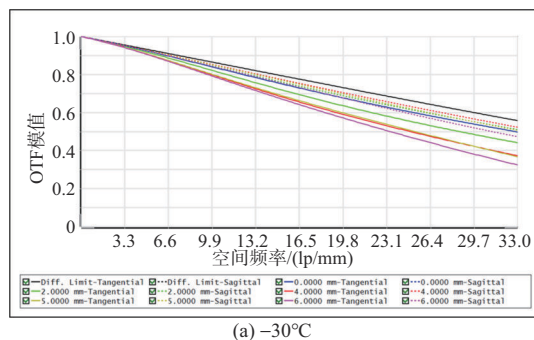


图8 中波红外光学系统通道的MTF曲线

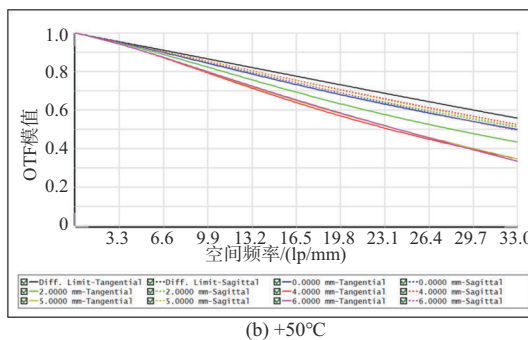
对于长波红外通道, 则需考察其在20lp/mm下的MTF表现, 由图9给出。

观察图8和图9可知, 两个光学通道的MTF均已优化至衍射极限, 说明各种像差平衡良好, 成像效果优异。最后评价两个光学通道的畸变控制情况, 由图10给出。

图10(a)为中波红外光学通道的畸变控制曲线图, 从中可知全视场的最大畸变小于0.65%, 畸变控制优异。图10(b)为长波红外光学通道的畸变控制曲线图, 从中可知全视场的最大畸变小于0.95%。



(a) -30°C



(b) +50°C

图11 中波红外通道消热差后的MTF曲线

对于长波红外通道, 同样采用移动平板保护玻璃前的两块透镜来实现补偿。其补偿结果由图12给出。从图中可知, 在-30~+50°C温度范围内, 长波红外通道也拥有良好的消热差表现。

2.4 公差及冷反射分析

采用光学设计软件Zemax中自带的公差分析功能对共口径双波段红外光学系统的公差进行分析。首先对两个光学通道的公差分别进行分析, 然后再对两个光学通道共用的光学元件取两个值中最小的公差, 最后得到的共口径双波段红外光

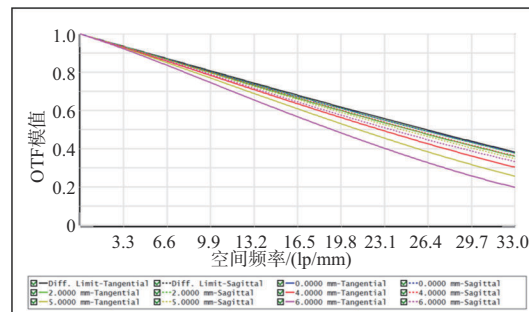
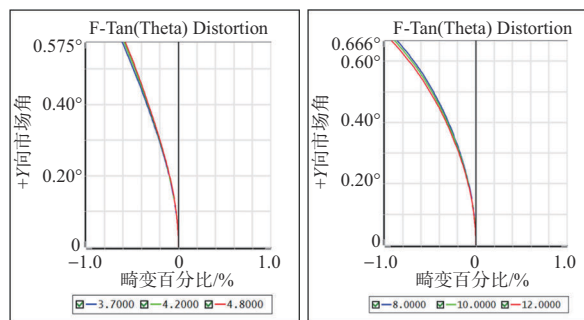


图9 长波红外光学系统通道的MTF曲线



(a) 中波红外通道

(b) 长波红外通道

图10 畸变控制曲线图

2.3 消热差结果分析

本文所设计的制冷型红外系统的双通道均采用透镜补偿组沿光轴运动的方式维持温度变化过程中的像面稳定。对于中波红外通道, 其补偿组由平板保护玻璃前的两块透镜构成, 具体消热差情况如图11所示。从图中可知, 在-30~+50°C温度范围内, 中波红外通道通过热补偿维持了很好的成像质量。

学系统的公差分配结果如表5所示。

把表5中分配的公差分别带入长波红外通道和中波红外通道中进行蒙特卡洛分析, 结果如表6所示。

由表6可知, 该系统中波红外通道的蒙特卡罗模拟样本中, 有80%在33lp/mm处的MTF高于0.310; 该系统长波红外通道的蒙特卡罗模拟样本中, 有80%在20lp/mm处的MTF高于0.284。

在考察过该系统的公差分析结果后, 还需对该系统的冷反射抑制情况进行考察。制冷型红外成像系统传感器的温度通常被降低至77K左右, 远低于

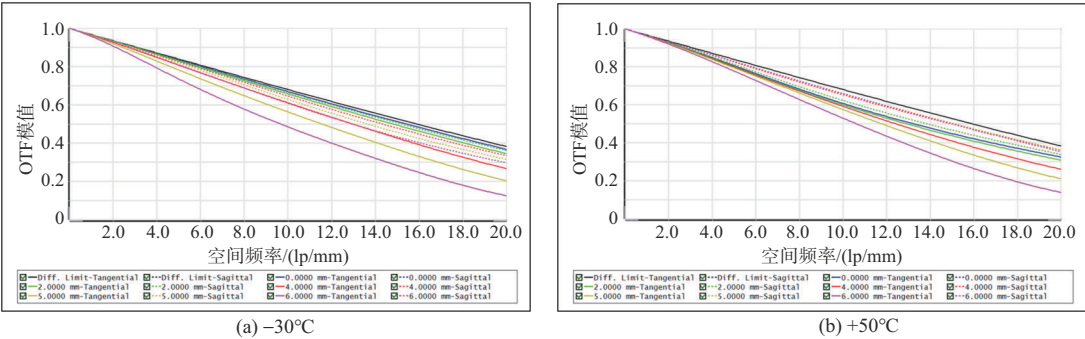


图 12 长波红外通道消热差后的 MTF 曲线

外界的环境温度，因此探测器上很容易出现冷像，从而影响成像质量。光学设计软件中的 YNI 值可以评估制冷光学系统的冷反射情况，当某光学表面的 YNI 绝对值大于 1 时，该表面反射的冷反射效应可忽略；当某光学表面的 YNI 绝对值小于或等于 1 时，该表面反射的冷反射效应需要着重分析。

表 5 公差分配表

公差元素	数值设定
曲率半径/光圈	≤4
厚度/mm	±0.02
表面倾斜/°	60
表面偏心/mm	±0.02
元件倾斜/°	60
元件偏心/mm	±0.02
表面不规则度/光圈	≤0.4
折射率	±0.001
阿贝数/%	±0.3

表 6 蒙特卡洛分析结果

样本比例/%	中波 33lp/mm 处的 MTF 值	长波 20lp/mm 处的 MTF 值
10	0.400	0.304
20	0.380	0.301
50	0.350	0.295
80	0.310	0.284
90	0.290	0.278

本次设计结果表明，长波红外通道的第 3 透镜后表面的 YNI 值为-0.61，因此需要对该表面的冷反射进行光线追迹，追迹结果如图 13 所示。

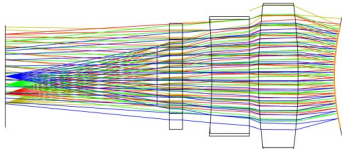


图 13 冷反射光路追迹图

由图 13 可知，第 3 透镜后表面反射的光线在像平面上成发散状态，对应的像斑很大，不会影响系统的正常成像，因此可判断该系统不会产生冷反射现象。

3 结 论

本文提出了一种基于高斯矩阵的初始结构参数解算方法，该方法可以根据系统的光路结构特性，构建参数求解方程组，并在已知部分参数的基础上，通过添加边界限制条件，解算出满足系统设计需求的合理解。

为了验证该方法的有效性，本文将其应用于共口径双波段二次成像折反式红外制冷系统的设计过程，并成功获得了合理的初始结构参数。在经过迭代优化后，最终获得的系统具备中波红外和长波红外两个工作波段，焦距分别为-600mm 和-520mm，最大口径 245mm，总长 320mm，两个通道的 F 数均为 2.5。经过光学仿真和性能分析，该系统在 MTF、畸变控制、及公差分析等方面均表现出良好的性能，并基于冷反射抑制需求，对 YNI 绝对值小于 1 的光学表面进行了反向光线追迹，确保其不会产生冷反射现象。

该解算方法具有较强的灵活性和广泛的适用性，可根据不同系统结构特点针对性构建求解方程组，并通过设置边界条件和参数约束自主划定合理解的范围，从而满足多样化的光学系统设计需求，具有较高的工程应用价值。

参考文献：

[1] 孙启扬,柴瑞青,谢圣文,等. 航天遥感红外探测器需求与发展[J]. 激光与红外,2023,53(10):1469—1475.
Sun Qiyang, Chai Ruiqing, Xie Shengwen, et al. Demands and development of spaceborne infrared detectors[J]. Laser and Infrared, 2023, 53(10):1469—1475.

[2] 谭淦年,于潇,张洪伟,等. 变 F 数红外光学系统的进展和关键技术[J]. 红外技术,2016,38(5):367—373.
Tan Songnian, Yu Xiao, Zhang Hongwei, et al. Progress and key technologies of infrared optical system with variable F-number[J]. Infrared Technology, 2016, 38(5):367—373.

[3] 王瑞凤,吴伟东,张彦朴. 抗红外制导弹方法综述[J]. 激光与红外,2006,36(12):1103—1105.
Wang Ruifeng, Wu Weidong, Zhang Yanpu. Summarization of countermeasures for the IR guided missile[J]. Laser and Infrared, 2006, 36(12):1103—1105.

- [4] 王勇. 利用红外夜视的海上弱小目标检测与分割[J]. 光学技术, 2022, 48(4):499—505.
Wang Yong. Detection and segmentation of micro sea target by use of infrared night vision[J]. Optical Technique, 2022, 48(4):499—505.
- [5] 杨芳, 王萌. 低空监控系统的红外小目标检测方法[J]. 光学技术, 2024, 50(1):120—128.
Yang Fang, Wang Meng. Infrared small target detection method of low-altitude monitoring system[J]. Optical Technique, 2024, 50(1):120—128.
- [6] 程伟宁, 赵久良. 制冷型红外变焦光学系统设计[J]. 光电技术应用, 2024, 39(4):37—41.
Cheng Weining, Zhao Jiuliang. Design of cooled infrared zoom optical system[J]. Electro-Optic Technology Application, 2024, 39(4):37—41.
- [7] 唐晗, 夏丽昆, 刘炼, 等. 大变倍比制冷型长波红外变焦光学系统设计[J]. 中国光学, 2024, 17(1):69—78.
Tang Han, Xia Likun, Liu Lian, et al. Design of cooled long-wave infrared optical system with large zooming range[J]. Chinese Optics, 2024, 17(1):69—78.
- [8] 唐晗, 周春芬, 冯建伟, 等. 变光阑长波红外连续变焦光学系统设计[J]. 红外技术, 2024, 46(5):491—500.
Tang Han, Zhou Chunfen, Feng Jianwei, et al. Design of LWIR continuous zoom optical system with variable diaphragm[J]. Infrared Technology, 2024, 46(5):491—500.
- [9] 吴凡, 李森森. 高分辨率红外变焦光学系统设计[J]. 光电技术应用, 2017, 32(5):1—4, 44.
Wu Fan, Li Sensen. Design of infrared continuous zoom optical system with high resolution[J]. Electro-Optic Technology Application, 2017, 32(5):1—4, 44.
- [10] 薛慧, 李常伟. 红外中波连续变焦光学系统的设计[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(5):421—424, 436.
Xue Hui, Li Changwei. Optical design of infrared continuous-zoom lenses[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2012, 31(5):421—424, 436.
- [11] 白瑜, 邢廷文, 蒋亚东, 等. 长焦距高分辨率红外两档变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014(8):2589—2594.
Bai Yu, Xing Tingwen, Jiang Yadong, et al. Design of infrared dual field of view optical system with long focal length and high resolution[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014(8):2589—2594.
- [12] Chen Y, Gao M, Song X. Method to design the common aperture multi-band optical system based on the PSO algorithm[J]. Optics Express, 2021, 29(12):18325—18335.
- [13] Gao M, Chen Y, Liu J, et al. Design of dual-band shared-aperture Co-zoom optical system[J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 64:40—46.
- [14] Vizgaitis J. Optical concepts for dual band infrared continuous zoom lenses[C]//International Optical Design Conference, 2010.
- [15] 单秋莎, 谢梅林, 刘朝晖, 等. 制冷型长波红外光学系统设计[J]. 中国光学, 2022, 15(1):72—78.
Dan Qiusha, Xie Meilin, Liu Zhaohui, et al. Design of cooled long-wavelength infrared imaging optical system[J]. Chinese Optics, 2022, 15(1):72—78.
- [16] 王希, 彭晴晴, 徐长彬, 等. 大视场大孔径制冷型红外光学系统设计[J]. 激光与红外, 2023, 53(10):1575—1578.
Wang Xi, Peng Qingqing, Xu Changbin, et al. Refrigerated infrared optical system design with large aperture and wide field of view[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(10):1575—1578.
- [17] Herzberger M. Gaussian optics and gaussian brackets[J]. Journal of the Optical Society of America, 1943, 33(12):651—655.