

引用本文:王海鹏,白素平,于信,等.大视场空间相机的无热化光机结构设计[J].光通信技术,2026,50(2):67-71.

大视场空间相机的无热化光机结构设计

王海鹏¹,白素平^{1*},于信¹,周子文²,沈宝亮³

(1.长春理工大学光电工程学院,长春 130022;2.吉林省产品质量监督检验院,长春 130103;3.中国人民解放军61769部队)

摘要:为解决现有空间相机视场角小、温度变化影响成像质量的问题,采用光学被动式无热化设计方法,结合ZEMAX软件优化与有限元分析,设计视场为 $20^\circ \times 20^\circ$ 、光谱范围为450~850 nm、焦距大于等于170 mm的光学系统,选用钛合金镜筒并采用三角形减重槽实现结构轻量化。结果表明:系统在奈奎斯特截止频率为50 lp/mm、温度为10~30 °C时调制传递函数(MTF)值大于0.71,点列图均方根(RMS)小于等于9.959 μm ,结构重量降至9.114 kg(减重率23.4%),满足衍射极限成像要求。

关键词:大视场空间相机;光机设计;无热化;轻量化

中图分类号:TN929.1;TH74 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2026)02-0067-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.02.011

Athermal opto-mechanical structure design for large field-of-view space camera

WANG Haipeng¹, BAI Suping^{1*}, YU Xin¹, ZHOU Ziwen², SHEN Baoliang³

(1. Changchun University of Science and Technology School of Optoelectronic Engineering, Changchun 130022, China; 2. Jilin Province Product Quality Supervision and Inspection Institute, Changchun 130103, China; 3. Unit 61769 of the Chinese People's Liberation Army, China)

Abstract: To address the issues of small field of view and imaging quality degradation caused by temperature variations in existing space cameras, a passive optical athermalization design method is adopted. Combined with ZEMAX software optimization and finite element analysis, an optical system with a $20^\circ \times 20^\circ$ field of view, a spectral range of 450~850 nm, and a focal length of no less than 170 mm is designed. A titanium alloy lens barrel is selected, and triangular weight-reduction grooves are employed to achieve structural lightweight design. The results show that when the system has a Nyquist cutoff frequency of 50 lp/mm and a temperature of 10~30 °C, the modulation transfer function(MTF) value is greater than 0.71, the root mean square (RMS) of the spot diagram is no more than 9.959 μm , and the structural weight is reduced to 9.114 kg(weight reduction rate of 23.4%), meeting the requirements for diffraction-limited imaging.

Key words: large field-of-view space camera, opto-mechanical design, athermalization, lightweight

0 引言

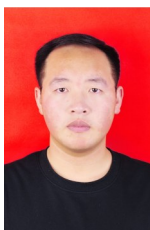
空间相机作为卫星平台上的核心载荷,具备高精度、高可靠性的特点,能够从多角度对空间目标进行

收稿日期:2025-04-11。

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(62205032)资助;长春理工大学青年基金项目(XQNJJ-2019-01)资助;吉林省科技发展计划项目(20220201097GX)资助。

作者简介:王海鹏(2000—),男,硕士研究生,主要从事光机结构方面的研究工作。曾参与了中国科学院长春光学精密机械与物理研究所某干涉仪设计、北京218研究所某舱体部件自动检测系统设计及组装、山西304研究所某物理量系统设计与组装、中国科学院光电技术研究所某激光器设计及组装等项目。

***通信作者:**白素平(1970—),女,硕士,教授,硕士生导师,主要研究方向为精密仪器总体结构设计。



探测与跟踪,是获取恒星图像信息及监测空间碎片最有效的设备之一。然而,空间环境复杂多变,剧烈的温度变化会导致光学元件的中心厚度、表面面型及折射率发生改变,进而引起成像质量下降。因此,开展空间相机的无热化设计研究,对于确保其在轨稳定运行具有重要意义。

在空间相机的发展历程中,国外起步较早,技术相对成熟。例如,美国的空间监视网络(SSN)已建成全球完善的空间目标探测系统,其HEO Holmes MK2空间相机专为空间碎片检测设计,口径达120 mm,视场范围达十余度,且重量控制在20 kg以内,实现了轻量化与大视场的结合。相比之下,国内空间相机研制起步较晚,虽已有巡天空间望远镜在轨运行,但其视

王海鹏,白素平,于信,等:大视场空间相机的无热化光机结构设计

场范围仅为 1.1° ,难以满足大范围空间目标的快速探测需求。在无热化技术研究方面,1981年,Miller J M等人^[1]开创了热-结构-光集成分析方法,但该方法计算复杂,对初始模型精度要求较高,工程实现难度大;2000年,胡玉禧等人^[2]利用T-C图设计了消热差与消色差系统,然而该方法主要适用于可见光波段,在红外波段的材料匹配选择上存在局限;2005年,奚晓等人^[3]研究了红外光学系统的被动式无热化技术,但该技术对光学材料的热特性依赖较强,适用的温度范围相对有限;2020年,高旭东等人^[4]通过引入衍射元件简化了深紫外侦察相机的无热化设计,但衍射元件的引入会带来额外的杂散光与衍射效率问题,影响成像对比度。目前,光学系统无热化设计主要分为光学被动式、机械主动式及机械被动式3种方法。其中,机械主动式虽技术成熟,但需增加测温与调焦机构,导致系统体积增大、复杂性提高且可靠性下降;而光学被动式与机械被动式则依靠材料热特性匹配或简单机械结构补偿,更具结构紧凑、稳定性高的优势。

鉴于现有空间相机普遍存在视场角较小、难以兼顾大视场与轻量化无热化设计的问题,本文旨在设计一种大视场空间相机的无热化光机结构。

1 光学系统设计与分析

针对空间环境温度变化引起的成像质量下降及卫星搭载的重量限制,本文采用光学被动式无热化设计方法,结合ZEMAX软件优化与有限元分析^[5-13],设计了一款视场范围为 $20^\circ \times 20^\circ$ 、光谱范围为450~850 nm、焦距不小于170 mm的光学系统,并通过钛合金镜筒与三角形减重槽实现机械结构轻量化。

1.1 光学系统设计

本文采用光学被动式无热化设计方法,系统需满足消热差条件。假设系统由 j 个光学透镜组成,则光学系统须同时满足光焦度、消色差方程、消热差方程,分别如式(1)、式(2)、式(3)所示。

$$\varphi = \sum_{i=1}^j h_i \varphi_i \quad (1)$$

$$\Delta f = (1/h_1 \varphi)^2 \sum_{i=1}^j (h_i^2 \omega_i \varphi_i) \quad (2)$$

$$\alpha L = (1/h_1 \varphi)^2 \sum_{i=1}^j (h_i^2 x_i \varphi_i) \quad (3)$$

式中: φ 为总光焦度, φ_i 为第 i 个光学透镜的光焦度, h_i 为第一近轴光线在第 i 个光学透镜入射面的径向高度, Δf 为轴向色差, ω_i 为第 i 个光学透镜的色散因子, α 为镜

筒的线膨胀系数, L 为机械件的长度, x_i 为热膨胀系数。

从消色差公式可知,色差的大小与镜片所处的位置、材料的阿贝数以及自身的光焦度相关。由于单透镜存在一定的光焦度而无法矫正色差,因此通常采用2种不同材料的镜片组成双胶合透镜以实现色差矫正。若使用同一种材料,则需要2个透镜的光焦度数值相等且符号相反,但此举会引入单色像差。故实际应用中,一般采用冕牌玻璃与火石玻璃相结合的双胶合透镜,可有效抑制色差对系统成像质量的影响。同时,镜筒材料的热膨胀特性直接影响无热化效果。本文选用钛合金作为镜筒材料,该材料具有低热膨胀系数、低密度及优异的抗腐蚀性能,是光学无热化设计的理想结构材料。

本文系统的技术指标如表1所示。

表1 本文系统技术指标

指标	参数
波长/nm	450~850
光圈数 F	1.7
视场范围	$20^\circ \times 20^\circ$
口径 D /mm	≥ 100
全视场平均调制传递函数(MTF)值	≥ 0.4
无热化温度范围/ $^\circ\text{C}$	10~30
奈奎斯特截止频率/(lp/mm)	50
轻量化范围/kg	≤ 15

根据技术指标中“全视场平均MTF值 ≥ 0.4 ”的要求,本文基于采样定理,推导出系统分辨率 N_f 与探测器像素单元尺寸的关系,如式(4)所示。

$$N_f = \frac{1}{2p} \quad (4)$$

式中: p 为像素单元的尺寸大小。

系统焦距 f' 的计算公式为

$$f' = FD \quad (5)$$

根据设计指标 $F=1.7$ 、口径 $D \geq 100$ mm,可得系统焦距 f' 为170 mm。

照相物镜的像高 y' 计算公式如(6)所示。

$$y' = -f' \tan \omega \quad (6)$$

式中: ω 为视场角。

基于上述计算,本文采用像差系数(PW)法求解初始结构并进行优化设计。优化过程中,通过ZEMAX软件的多重结构功能实现光学被动式无热化设计,得到光学系统结构示意图如图1所示。该系统采用隔圈

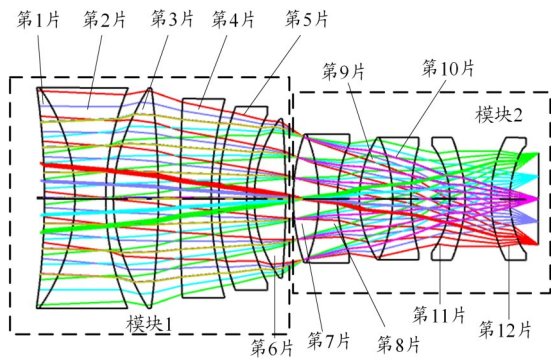


图1 光学系统结构示意图

表2 每片镜片的材料

镜片序号	材料型号	材料类型
第1片	H-ZK5	冕牌玻璃
第2片	N-KZFS11	特种火石玻璃
第3片	S-ZBAF20	低色散火石玻璃
第4片	S-LAF6LB	重镧火石玻璃
第5片	IRG102	红外光学玻璃
第6片	S-ZBAF3	低色散火石玻璃
第7片	H-ZK9	冕牌玻璃
第8片	N-LASF46B	重镧火石玻璃
第9片	S-LAF56	重镧火石玻璃
第10片	IRG102	红外光学玻璃
第11片	D-ZF10A@MY	重火石玻璃
第12片	H-ZF4A	火石玻璃

与压圈组合的装夹方式,被划分为2个子模块。光学系统中每片镜片的材料如表2所示。

1.2 光学系统分析

本文采用MTF与点列图对光学系统成像质量进行综合评价。仿真结果表明:

10℃时,系统在奈奎斯特截止频率为50 lp/mm处的最低MTF值为0.75,点列图最大均方根(RMS)半径为2.853 μm;

20℃时,系统在奈奎斯特截止频率为50 lp/mm处的最低MTF值为0.77,点列图最大RMS半径为8.731 μm;

30℃时,系统在奈奎斯特截止频率为50 lp/mm处的最低MTF值为0.71,点列图最大RMS半径为7.963 μm。

综上,光学系统在全温度范围(10~30℃)内的MTF值均高于0.71,满足设计指标要求。

以衍射MTF平均值作为评价标准,奈奎斯特截止频率设为50 lp/mm,对光学系统进行公差分析。通过300次蒙特卡罗(Monte Carlo)随机抽样分析系统公差敏感性,结果如表3所示。可以看出,90%的仿真样品

表3 光学系统公差分析结果

参数名称	数值
可追踪的蒙特卡罗文件生产个数	300
名义	0.615 114 26
最佳值(测试次数为第248次时)	0.574 435 54
最差值(测试次数为第113次时)	0.190 992 58
平均数	0.372 098 94
标准差	0.079 987 87
后焦点变化最小值	-0.241 189
后焦点变化最大值	0.235 691
后焦点变化平均值	0.009 577
标准偏差	0.083 342
公差分析良率90%	>0.267 201 13
公差分析良率80%	>0.305 500 43
公差分析良率50%	>0.363 859 01
公差分析良率20%	>0.450 491 76
公差分析良率10%	>0.475 122 01

公差分析良率大于0.267 2,满足系统公差分配要求,表明设计具有良好的工艺可实现性。

2 机械结构设计与分析

2.1 机械结构设计

本文所提光学系统部署于舱体内部,设计重点在于控制热效应、满足轻量化指标以及避免与其他组件发生共振。热效应方面,光学系统已通过被动式无热化设计消除大部分影响,机械结构则通过静态力学分析与热-结构耦合分析进一步抑制残余热变形,确保系统稳定性。

装配基准面设定于系统中部,采用由两侧向中心推进的安装策略。系统装配结构如图3所示。鉴于双胶合透镜3与2片弯月形透镜(透镜4、透镜5)口径一

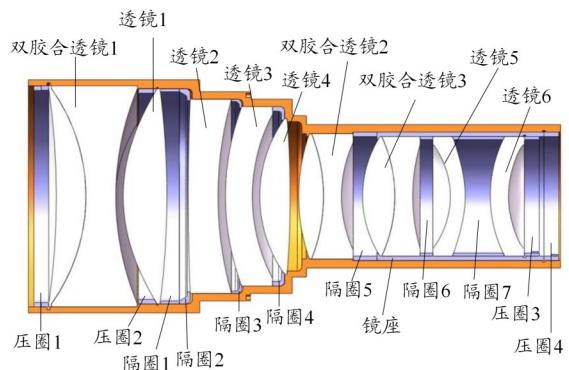


图3 光学系统装配图

王海鹏,白素平,于信,等:大视场空间相机的无热化光机结构设计

致且略小于双胶合透镜2,本文将双胶合透镜2、双胶合透镜3集成于同一镜座内,以简化安装与调校流程。其余空气间隔通过精密隔圈定位,镜筒两端采用压圈锁紧固定。镜筒材料选用钛合金(TC4),其具体参数如表4所示。最终装配完成后的光学系统总长为357 mm,最大外径为156 mm,总质量为11.898 kg。

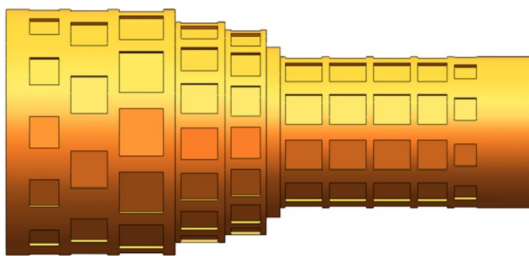
表4 钛合金材料参数

参数	数值
密度 $\rho/(g/cm^3)$	4.5
弹性模量 $E/(GPa)$	109
泊松比	0.29
导热率 $\lambda/(W/m \cdot ^\circ C)$	7.4
线膨胀系数 $\alpha/(10^{-6}/^\circ C)$	8.6

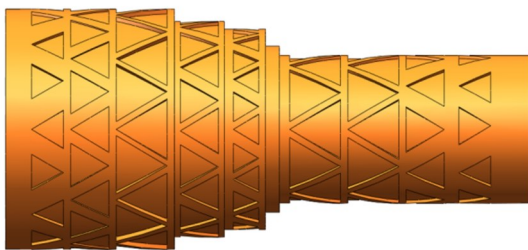
2.2 机械结构轻量化设计

为满足空间应用对载荷质量的严格限制,同时保证变温环境下的结构稳定性与成像质量,需对机械结构进行轻量化设计。常见的轻量化孔型包括三角形、正方形及六边形蜂窝状结构。其中,三角形结构可视为六边形蜂窝的半单元,且在同等材料去除率下具有更优的支撑刚度,因此被广泛应用于高刚度要求的轻量化设计中。

为优选最佳轻量化构型,本文建立了2种如图4所示的分布密度相同的三维模型:正方形孔减重槽结构(下文简称正方形孔结构)与三角形孔减重槽结构(下文简称三角形孔结构),并对比其在变温环境下的力学性能。



(a) 正方形孔



(b) 三角形孔

图4 2种不同形状减重槽结构示意图

轻量化设计需兼顾结构刚度与热变形对成像质量的影响。鉴于工作环境温度为10~30 $^\circ C$,本文对上述2种结构在10、20、30 $^\circ C$ 工况下进行了有限元热-结构耦合分析。分析前对三维模型进行了几何简化,去除了对计算结果影响微小的圆角及其他特征。不同温度下的形变仿真结果如表5和表6所示。

表5 正方形孔结构在不同温度下的形变仿真结果

温度/ $^\circ C$	X方向 形变/mm	Y方向 形变/mm	Z方向 形变/mm	总形变/mm
10	0.008 569 2	0.010 191	0.008 334 7	0.010 867
20	0.000 005 2	0.000 069	0	0.0002833
30	0.005 737 9	0.005 861 7	0.005 528 7	0.007 278

表6 三角形孔结构在不同温度下的形变仿真结果

温度/ $^\circ C$	X方向 形变/mm	Y方向 形变/mm	Z方向 形变/mm	总形变/mm
10	0.008 114 9	0.009 732 9	0.008 066 8	0.010 42
20	0.000 004 6	0.000 067 1	0	0.000 275 36
30	0.005 674 7	0.005 909	0.005 358 6	0.006 985 1

对比表5与表6可知,在各温度工况下,三角形孔结构的总形变量均小于正方形孔结构,具体如下:

10 $^\circ C$ 时,三角形孔结构总形变(0.010 42 mm)<正方形孔结构(0.010 867 mm);

20 $^\circ C$ 时,三角形孔结构总形变(0.000 275 36 mm)<正方形孔结构(0.000 283 3 mm);

30 $^\circ C$ 时,三角形孔结构总形变(0.006 985 1 mm)<正方形孔结构(0.007 278 mm)。

结果表明,三角形孔结构具有更高的刚度和热稳定性,更能适应空间环境的苛刻要求。因此,本文最终选用三角形孔方案。

根据表6可知,在10 $^\circ C$ 工况下2种结构形变最大。将该工况下的节点位移数据导入ZEMAX软件进行光机热集成分析,评估其对成像质量的影响。评估结果如下:

1)MTF特性:系统在奈奎斯特截止频率为50 lp/mm处的最低MTF值为0.71,较无机械结构引入前下降0.04,但仍满足设计指标(≥ 0.71);

2)点列图特性:RMS半径最大值为9.959 μm ,较初始状态增大7.106 μm ,但仍小于最小像元尺寸(10 μm),处于艾里斑范围内;

3)轻量化效果:系统总质量由11.898 kg降至9.114 kg,减重率达23.4%,满足载荷质量约束。

综上,该轻量化设计方案在显著降低系统重量的同时,保证了光学系统在全温区内的成像性能。

3 结束语

本文针对大视场空间相机镜头,开展了光学被动式无热化与机械结构轻量化协同设计研究。通过光学-机械-热多物理场耦合优化,系统奈奎斯特截止频率为 50 lp/mm、温度为 10~30 °C 时,全视场 MTF 值 \geq 0.71,点列图 RMS 半径最大值控制在 9.959 μm 以内,满足衍射极限成像要求。轻量化设计使机械结构质量由 11.898 kg 降至 9.114 kg,减重率达 23.4%,同时保证了结构刚度与热稳定性。

研究结果表明,本文所提无热化光机结构在确保光学性能的前提下,有效实现了系统轻量化与热环境适应性,为大视场空间光学载荷的工程研制提供了技术路径与设计参考。

参考文献:

[1] Miller J M, Hatch M R, Green K E. Predicting performance of optical systems undergoing thermal/mechanical loadings using integrated thermal/structural/optical numerical methods[J]. Optical Engineering, 1981, 20

王海鹏,白素平,于信,等:大视场空间相机的无热化光机结构设计

(2): 202166.

[2] 胡玉禧,周绍祥,相里斌,等. 消热差光学系统设计[J]. 光学学报, 2000,20(10):1386-1391.

[3] 奚晓,李晓彤,岑兆丰. 被动式红外光学系统无热设计[J]. 光学仪器, 2005,27(1):42-46.

[4] 高旭东,崔庆丰,郑汉青,等. 宽温度范围的深紫外光学系统无热化设计[J]. 光学学报,2020,40(17):154-162.

[5] 吴晓靖,孟军和. 使用简单机械结构实现红外光学系统无热化[J]. 红外与激光工程,2005,(4):391-393,405.

[6] 曾傲雄. 空间紫外望远镜光机结构优化设计研究[D]. 西安:中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所),2023.

[7] 林翠. 大口径空间望远镜分视场流量定标方法研究[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2023.

[8] 刘树迪. 大视场空间相机像旋补偿机构优化设计研究[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2023.

[9] 张坤. 高精度大视场空间目标测量光学系统研究[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2021.

[10] 魏磊. 长焦距宽视场空间相机主支撑结构优化设计[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2017.

[11] 李娟,王英瑞,张宏. 一种机械被动式无热补偿方法[J]. 红外与激光工程,2006,35(4):476-480.

[12] 王学新,焦明印. 光学被动式和机电式组合消热差方法的研究[J]. 应用光学,2010,31(3):354-359.

[13] 王学新,焦明印. 红外光学系统无热化设计方法的研究[J]. 应用光学,2009,30(1):129-133.