

文章编号 1004-924X(2017)02-0342-09

星载激光通信系统遮光罩的优化设计

刘伟达^{1,2}, 康一丁², 李小明², 孟立新^{1,2}, 张树仁¹, 张立中^{1,2*}

(1. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学 空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了提高某 GEO 对地激光通信系统的可通率, 改善光学天线主镜、次镜的温度水平和温度不均匀性, 对其遮光罩进行了优化设计。结合地球同步轨道外热流特点, 在不降低通信信号性能的前提下, 提出了内壁等间距排布栅板的遮光罩结构。首先, 以能量遮挡率不高于 5% 为约束条件, 讨论栅板、遮光罩内壁对主镜阳光辐射角系数的影响, 得出遮光罩优化设计方案; 其次, 采用 IDEAS 软件开展系统热设计仿真分析, 考核栅板布局对主镜和次镜温度指标的影响; 最后, 计算采用优化后的遮光罩时的激光通信可通率。从温控的角度分析, 遮光罩内壁平行和垂直于赤道面方向都等间距布置 4 块栅板时, 与采用传统空心圆柱形遮光罩相比, 可通率从 81.51% 提高到 91.21%。

关键词: 激光通信; 遮光罩; 栅板; 温度水平; 温度不均匀性

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172402.0342

Optimized design of baffle in satellite laser communication system

LIU Wei-da^{1,2}, KANG Yi-ding², LI Xiao-ming², MENG Li-xin^{1,2},
ZHANG Shu-ren¹, ZHANG Li-zhong^{1,2*}

(1. *Mechanical and Electronic Department, Changchun University of
Science and Technology, Changchun 130022, China;*

2. *The Center of National and Local Combination of Optical-electrical Technology,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)*

** Corresponding author, E-mail: zlcust@126.com*

Abstract: In order to enhance the available probably ratio and to improve the temperature level and difference in a specific geostationary earth orbit (GEO) laser communication system, the structure of baffle was optimized. The baffle was uniformly installed grids on internal surface on the basis of GEO orbit external thermal flux characteristics, without the decrease of laser communication signal property. Firstly, the impact of grid and baffle inner wall on the solar view factor of the primary mirror was discussed in terms of energy shield ratio standard less than 5%. Then, the thermal simulation of temperature level and difference on the primary and secondary mirrors were performed by IDEAS, in which the influence of number and layout of grids on temperature indexes was analyzed. Finally, the laser communication available probably ratio with the optimized baffle was calculated. The results

收稿日期: 2016-09-01; 修订日期: 2016-11-18.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA7011111)

show that deploying 4 equally distributed grids along both parallel and vertical directions to the equator in the baffle, the available communication probably ratio is raised from 81.51% to 91.21% in comparison with the one of traditional cylindrical hollow baffle.

Key words: laser communication; baffle; grid; temperature level; temperature difference

1 引言

太阳是地球同步轨道的主要外热源,阳光进入地球静止轨道(Geosynchronous Earth Orbit, GEO)对地激光通信系统遮光罩之后,光学天线主次镜因受到阳光的辐射,其温度会剧烈变化^[1],从而导致其光学性能下降,甚至损坏,使通信无法正常进行。为了抑制阳光辐射对光学天线各元件温度指标的影响,保证通信的顺利进行,需要优化遮光罩的结构。目前,国内外主要通过增加遮光罩的长度^[2-5]来减小阳光直射光学天线的能量,抑制阳光辐射,但是受火箭整流罩包络尺寸的限制,遮光罩无法达到理想长度,从而严重影响抑制效果。因此,人们提出了可展开式遮光罩^[2-5],在卫星进入轨道之前,遮光罩收起,满足火箭整流罩的空间约束;卫星入轨后,遮光罩通过伸展臂等机构展开伸长,增强对太阳辐照的抑制效果。但是伸展机构不仅会降低可展开遮光罩的结构可靠性,而且结构复杂,加工难度大。

本文针对最大视场角为 $500 \mu\text{rad}$ 的 GEO 对地激光通信系统,就其遮光罩进行优化。由于该系统的视场角远远小于光学遥感系统^[6-11]的视场角,次镜和次镜支架等的遮挡对激光信号的能量损耗较小,因此,除了采用包覆多层隔热组件、设计热控加热区和隔热安装等温控措施,以降低外部环境对主次镜温度指标的影响外,该系统的遮光罩优化在不改变遮光罩长度,以能量遮挡率不高于 5% 为约束条件,在内壁添加栅板^[12],抑制阳光对光学天线主镜、次镜等元件的辐射,以免降低遮光罩的结构可靠性,解决了火箭整流罩外包络尺寸对遮光罩的空间约束等问题。本文从主镜、次镜全年的温度控制方面,分析了栅板排布对系统可通率的影响。

2 激光通信系统及其外热流特点

某 GEO 对地激光通信系统主要由光学天

线、中继光学系统、遮光罩和跟踪转台组成,如图 1 所示。光学天线采用卡式结构,主镜的有效口径为 250 mm,材料为 SiC,次镜的有效口径为 30 mm,材料为微晶玻璃,主镜和次镜的 Z 向间距为 200 mm。次镜支架采用 Invar 材料,遮光罩采用碳纤维材料,通过 10 mm 厚的垫圈隔热安装在光学天线前端,通光口径为 260 mm,外包络尺寸为 $\Phi 270 \text{ mm}$,长度为 400 mm。主镜的温度水平为 $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$,次镜的温度水平为 $(20 \pm 10) ^\circ\text{C}$,两者的温度不均匀性都优于 $2 ^\circ\text{C}$ 。

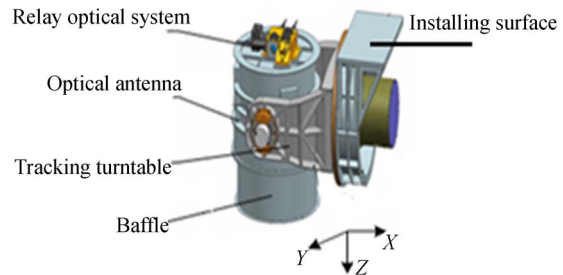


图 1 激光通信系统模型

Fig. 1 Schematic diagram of GEO laser communication system

系统坐标系定义如下:指向地球的方向为 +Z 向,即光学天线的光轴方向;±X 方向是东西方向,即飞行方向;±Y 方向为南北方向。阳光全年在南北方向的入射光线与赤道面的夹角在 $-23.5^\circ \sim 23.5^\circ$ 之间变化。当夹角为 0° 时,即春(秋)分时刻,地球遮挡时间最长,约为 72 min。

3 遮光罩的优化设计

本文中某对地激光通信链路是 GEO(东经 77°)对阿里地面站(北纬 $32^\circ 33' 57.82''$,东经 $80^\circ 09' 35.14''$,海拔高度为 5 036 m)。系统遮光罩的初始结构为传统空心圆筒式结构,如图 2 所示。在主镜室、次镜罩和遮光罩外表面包覆多层

隔热组件,并且设置一路主动加热区,遮光罩、主镜和次镜隔热安装,以减小遮光罩等组件对主镜、次镜的温度影响,保证主次镜在不受阳光辐射时,温度参数满足温控要求。阳光进入遮光罩后,主镜、次镜等光学元件因受到阳光辐射,其温度水平、温度不均匀性等参数变化剧烈。为了减小辐射对温度参数的影响,需要对遮光罩结构进行优化,以提高激光通信的可通率。

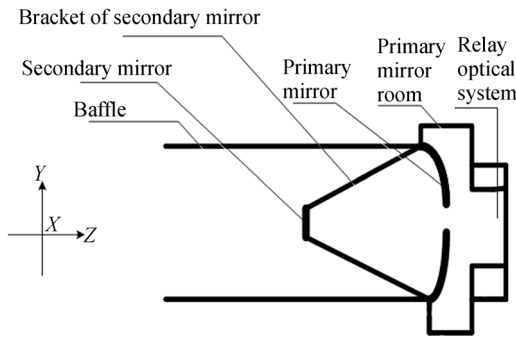
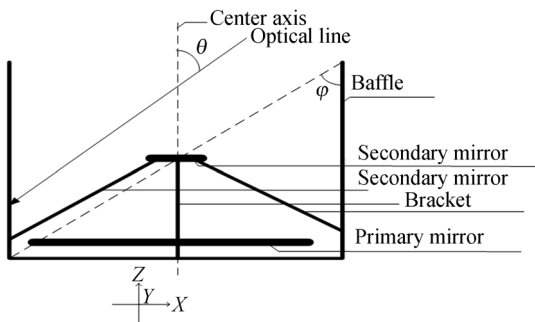


图 2 GEO 激光通信光学系统示意图

Fig. 2 Optical system of GEO laser communication

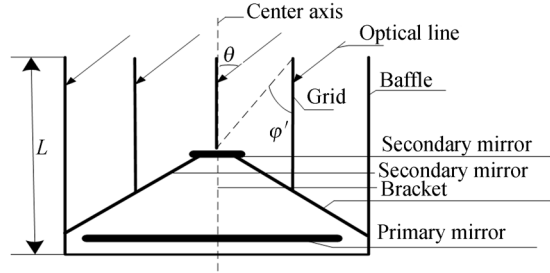
3.1 优化设计原理

为满足火箭整流罩外包络尺寸的要求,这里在不改变遮光罩的长度和形状的情况下,根据地球静止轨道外热流的特点,在遮光罩内壁平行和垂直于赤道面方向等间距添加栅板,以阻挡阳光照射遮光罩内壁、直射主镜和次镜,并且减小主镜和次镜光学元件能量直接辐射到空间的角度。然后通过优化栅板来降低辐射对主镜、次镜温度水平、温度不均匀性的影响。传统圆筒遮光罩添加栅板前后的结构如图 3 所示。



(a) 无栅板的遮光罩示

(a) Baffle with no grids



(b) 添加栅板后的遮光罩

(b) Baffle with grids

图 3 添加栅板前后的遮光罩示意图

Fig. 3 Schematic diagram of baffle before and after installing grids

图 3(a)中, θ 为某一时刻阳光入射方向与中心轴之间的夹角,即入射角; φ 为可被遮挡的最小夹角,即直射光学系统的角度。当 $\theta \geq \varphi$ 时,阳光照射到遮光罩内壁,形成对光学系统的二次辐射源; $\theta < \varphi$ 时,阳光直射光学系统。遮光罩内壁排布栅板后的结构如图 3(b)所示,阳光直射光学系统的最大角度为 φ' ,直射光学系统的角度从图 3(a)中的 φ 减小到 φ' ,缩短了阳光直射时间,减小了光学系统能量直接辐射到空间的角度,降低了空间损耗的能量,有助于减少加热区的加热功率,从而降低热控难度。

栅板的添加改变了空间、遮光罩内壁对主镜或者次镜的辐射角系数,从而影响两者的传热效率。这里以主镜为例进行讨论。遮光罩内壁无栅板和添加栅板后,其他物体对主镜的辐射角系数之和分别为 F_p, F_p^s , 并且都为 1。

$$F_p = F_{sp} + F_{bp} + F_{up} + F_{tp}, \quad (1)$$

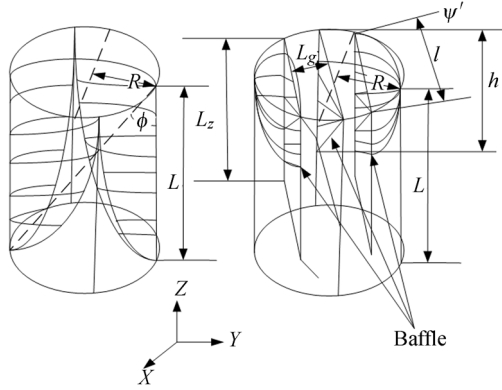
$$F_p^s = F_{sp} + F_{bp}^s + F_{tp} + F_{up}^s + F_{gp}, \quad (2)$$

其中: $F_{sp}, F_{bp}, F_{up}, F_{tp}, F_{gp}$ 分别为次镜、遮光罩内壁、空间、次镜支架以及栅板对主镜的辐射角系数, F_{bp}^s 和 F_{up}^s 分别为添加栅板后遮光罩内壁、空间对主镜的辐射角系数。

次镜和次镜支架的结构尺寸固定,两者与主镜的位置也不变,添加栅板不会改变次镜和次镜支架对主镜的辐射角系数 F_{sp} 与 F_{tp} 。显然, $F_{gp} > 0, F_{up}^s < F_{up}$, 主镜对空间的视角系数减小,阳光直射主镜的能量减少,光学系统损耗到空间的能量也减少,降低了能量的损失。

在轨道周期内,阳光照射到遮光罩内壁和栅板的投影如图 4 所示,图中阴影区为阳光投影。添加栅板前后遮光罩内壁对主镜的辐射角系数分别为:

$$F_{\text{bp}}^{\text{g}} = \frac{h \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} d\theta + \frac{1}{2} (L_z - h) (\varphi - \arctan \frac{L_g}{L_z}) + (L - L_z) \int_{\varphi'}^{\arctan \frac{L_g}{L_z}} R d\theta}{\pi R L} \quad (4)$$



(a) 无栅板

(b) 添加栅板

(a) Baffle with no grids (b) Baffle with grids

图 4 阳光投影示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sunlight projection

栅板对主镜的辐射角系数为:

$$F_{\text{gp}} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i \int_{\varphi}^{\arctan \frac{L_g}{L_z} - \varphi} dh}{\sum_{i=1}^n h_i l_i} \quad (5)$$

其中: L 为遮光罩 z 向的长度, h_i 为第 i 个栅板的 z 向长度, L_z 为与遮光罩内壁 x 向或 y 向距离最近的栅板的 z 向长度, l_i 为第 i 个栅板的 x 向或 y 向长度, R 为遮光罩的通光口半径, φ, φ' 分别为遮光罩没有排布栅板和安装栅板后阳光与光学天线光轴的夹角,即直射光学系统的角度。

从式(3)~式(5)可以看出,栅板 x 向或 y 向、 z 向长度、栅板间距是影响栅板、遮光罩内壁对主镜角系数的重要参数。根据角系数原理中的互换性特性,以上参数也是影响主镜对遮光罩内壁、栅板的能量辐射角系数的重要参数。

根据能量守恒原理,建立没有栅板时主镜、次镜、次镜支架、遮光罩与空间环境进行热交换的热平衡方程(6),以及添加栅板后的热平衡方程(7),从而分析栅板对主镜、次镜的温度指标的影响。

$$F_{\text{bp}} = \frac{L \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} R d\theta}{\pi R L} \quad (3)$$

$$\begin{cases} q_1 + q_2 = q_3 + q_4 \\ q_1 = S \sum_{i=1}^4 \alpha_i A_i \\ q_2 = \sum \lambda_{ij} (T_i - T_j) + \sum F_{kl} (T_k - T_l) A_{kl} \\ q_3 = \sum_{i=1}^4 \left[m_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} \right] \\ q_4 = \sum_{i=1}^4 \epsilon_i \sigma T_i^4 A_i \end{cases} \quad (6)$$

其中: A 为物体受到阳光辐射的面积; δ 为热传导距离; λ 为热传导因子,与元件之间的热阻相关; T 为元件温度; m 为物体质量; c 为材料比热容; ϵ 为物体向空间的能量发射率; σ 为波尔兹曼常数, $\sigma = 5.68 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$; S 为四个季节的太阳常数; α 为阳光对物体的辐射角系数; F 为物体之间的辐射角系数; i 取 1, 2, 3, 4, 1 表示主镜, 2 表示次镜, 3 表示次镜支架杆, 4 表示遮光罩; q_1, q_2, q_3, q_4 分别为这几个物体接收到的阳光辐射能量总和, 物体之间的传导和辐射能量, 物体自身能量变化以及物体向空间的辐射能量。

$$\begin{cases} q_1 + q_2 = q_3 + q_4 \\ q_1 = S \sum_{i=1}^5 \alpha_i A_i \\ q_2 = \sum \lambda_{ij} (T_i - T_j) + \sum F_{kl} (T_k - T_l) A_{kl} \\ q_3 = \sum_{i=1}^5 \left[m_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} \right] \\ q_4 = \sum_{i=1}^5 \epsilon_i \sigma T_i^4 A_i \end{cases} \quad (7)$$

方程(7)中增加了物体 5, 该物体即为栅板。同一时刻, 无论是否添加栅板, 进入遮光罩的阳光辐射能量 q_1 不变。栅板吸收和反射这些能量, 部分能量传导到遮光罩外表面, 可以通过外表面布置的散热面对外辐射; 没有传导出的能量和反射的能量使栅板成了阳光能量的二次辐射源, 这些能量辐射到遮光罩内壁、栅板、主镜、次镜、次镜支

架、空间。考虑到 q_1 不变,物体之间传导和辐射的总能量 q_2 也不变,栅板能量传导和辐射使主镜、次镜接收到的阳光能量减小,从而降低了温度水平。栅板、遮光罩内壁都是阳光的二次辐射源,避免主镜镜面局部受到过多的阳光辐射,使主镜、次镜各个部分受到均匀的辐射,改善温度的不均匀性。

增加栅板的面积和数量可以提高 q_2 中栅板对其他物体之间的辐射和传导能量,改善主镜、次镜的温度指标。栅板 x 向或 y 向、 z 向的长度直接决定了栅板的面积。另外,选择导热性好的材料也是增加栅板传导能量的重要手段。考虑到加工难度和结构轻量化的要求,栅板的材料选择密度很小的碳纤维材料,根据材料属性和加工工艺,所有栅板的厚度设定为 1 mm。

x 向或 y 向的栅板长度由它在遮光罩内壁的安装位置确定, z 向长度的增大可增加阳光阻挡面积,但是要避免栅板与次镜、次镜支架发生干涉,不能阻挡主镜、次镜和其他子光学系统的光路。对于等距离排布的栅板,需要添加更多的栅板,减小栅板间距。增加栅板的数量和长度会提高激光信号的能量遮挡率。激光通信系统是能量系统,所以能量遮挡率是决定通信能否顺利进行的重要因素。本文的对地激光通信系统的能量遮挡率不能超过 5%,因此栅板的长度和数量要保证遮挡率满足此设计要求。能量遮挡率为:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n (\tan \alpha \times l_i + b_i) \times h_i}{\pi R^2}, \quad (8)$$

其中: A 为能量遮挡率; α 为通信时的最大视角, $\alpha = 500 \mu\text{rad}$; l_i 为第 i 个栅板 $\pm y$ 方向或者 $\pm x$ 方向的长度; b_i 为第 i 个栅板的厚度; h_i 为第 i 个栅板与次镜及次镜支架不干涉时, z 轴方向的长度最大值; R 为遮光罩通光口径的一半。遮光罩内壁在平行和垂直于赤道面方向上等距离分布相同数量的栅板,栅板数量变化对应的能量遮挡率结果如表 1 所示。表 1 中, N 为两个方向的栅板数量, r 为能量遮挡率。

表 1 等距离排布的栅板对应的能量遮挡率

Tab. 1 Energy shield ratio of equally distributed grids

N	1	2	3	4	5
$r(\%)$	0.74	1.8	3.5	4	5.26

从表 1 可以看出,遮光罩内壁平行和垂直于赤道两个方向等间距分布的栅板个数都达到 5 时,能量遮挡率超过 5%,所以这两个方向至多等距离排布 4 块栅板。

本文以春分或秋分轨道条件下主次镜的温度变化为例,讨论遮光罩无栅板,遮光罩内壁东西、南北方向等距离排布 1~4 块栅板时主镜、次镜的温度水平及温度不均匀性,确定优化后的遮光罩结构。计算遮光罩结构优化前后主镜、次镜全年的最高温度水平、温度不均匀性极值,确定这两个温度参数不满足温控要求的时间,得出对地激光通信系统的可通率。

为了降低温控难度,保证主镜、次镜等光学元件在没有受到阳光辐射时的温度水平稳定,并且不低于温控要求的最小值,遮光罩在优化设计时还要考虑在主镜室、次镜罩和遮光罩外表面包覆多层隔热组件,布置加热区,适当减小加热区功耗,遮光罩、主镜和次镜隔热安装。

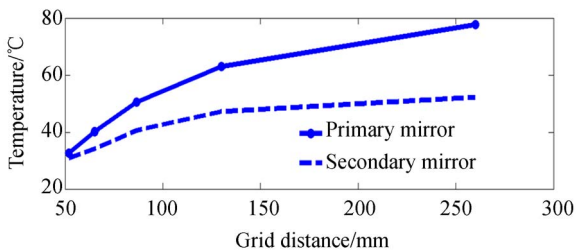
3.2 主镜、次镜温度的仿真分析

阳光没有进入遮光罩之前,为防止主镜、次镜等光学元件的温度过低,对遮光罩、次镜罩、主镜室、主镜和次镜进行了热设计,使主次镜温度始终高于温控要求的最低值。遮光罩、次镜罩和主镜室外表面包覆 10 单元多层隔热组件,面膜为 F46 单面镀银二次表面镜,并且设置一路主动加热区,适当减小加热区功耗。考虑到主镜、次镜等光学元件的严格热控要求,而遮光罩等组件的温度范围要求很宽,主镜、次镜分别与主镜室、次镜罩隔热安装,遮光罩通过 10 mm 厚的垫圈隔热安装在光学天线前端,弱化系统组件之间的热耦合,减小遮光罩的温度波动对主次镜的影响,从而避免主镜、次镜温度低于温控要求。

根据 GEO 和阿里站的位置、遮光罩的几何参数和材料参数以及光学天线温控条件,首先通过 IDEAS 软件仿真分析阳光在南北方向的入射光线与赤道面夹角为 0° 时,遮光罩没有添加栅板、遮光罩内壁平行和垂直于赤道两个方向排布 1~4 块栅板时,栅板间距对主次镜的最高和最低温度以及温度不均匀性的影响,结果如图 5 所示。

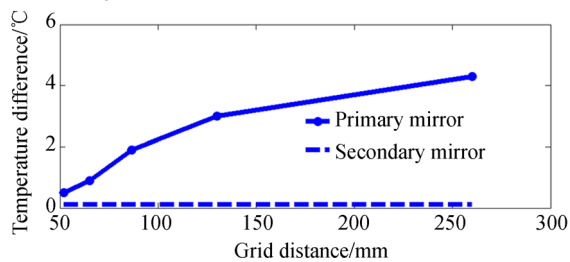
由图 5 可知,栅板间距为 260 mm 时,遮光罩内平行和垂直于赤道两个方向没有栅板,是优化之前的结构;栅板间距为 52 mm 时,主镜、次镜的最高温度、温度均匀性极值最低。这说明栅板间

距越小,主镜的最高温度、温度不均匀性极值越低,表明等间距排布的栅板数量越多,阻挡阳光的能量也越多,而且二次辐射对主镜的温度参数影响也越小。栅板数量的变化对主次镜的温度水平、温度不均匀性最低值的影响很小,并且系统的总加热功耗从无栅板时的 64 W,减小到了遮光罩内壁东西、南北方向等距离排布 4 块栅板时的 51 W,由此证明了添加栅板减小了主镜、次镜等光学元件对空间的视角系数,减少了光学系统在空间损耗的能量,减小了加热区的功耗,降低了热控难度。同时表明主镜、次镜分别与主镜室、次镜罩隔热安装,遮光罩通过 10 mm 厚的垫圈隔热安装在光学天线前端等隔热方法弱化了系统组件之间的热耦合,有效地减小了遮光罩等组件的温度变化



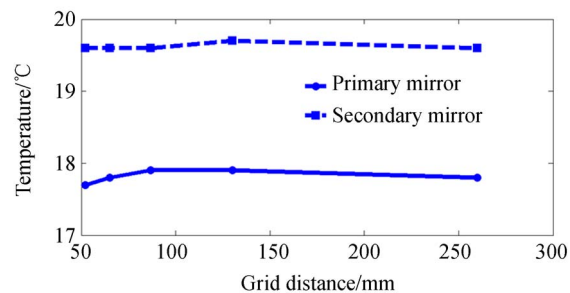
(a) 主次镜的最高温度

(a) Maximal temperatures of primary and secondary mirror



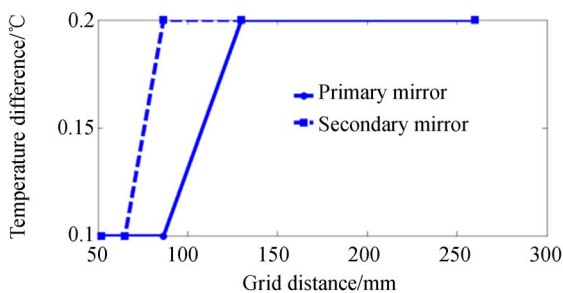
(b) 主次镜的温度不均匀性极大值

(b) Maximum temperature differences of primary and secondary mirrors



(c) 主次镜的最低温度

(c) Minimal temperatures of primary and secondary mirrors



(d) 夹角 0°时主次镜的温度不均匀性极小值

(d) Minimum temperature differences of primary and secondary mirrors

图 5 春分或秋分时平行和垂直于赤道面方向的栅板间距变化时主镜、次镜的温度指标

Fig 5 Temperature parameters of primary and secondary mirrors at equinoxes with different grid intervals in parallel and vertical directions to equator

对主镜、次镜等光学元件温度的影响。因此,优化设计的平行和垂直于赤道面两个方向的栅板的间距为 52 mm,数量为 4 块。优化后的遮光罩结构如图 6 所示。

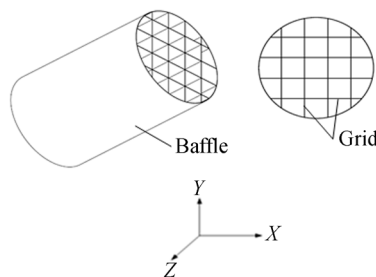


图 6 优化后遮光罩的结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of optimized baffle

遮光罩结构优化前后,阳光在南北方向上的入射光线与赤道面夹角为 0°时,IDEAS 软件仿真分析的主镜、次镜 2 个地球自转周期全天实时的温度变化结果如图 7 所示,温度不均匀性极值云图如图 8 所示,图 9 为春分季节主镜、次镜温度最低时的温度分布云图,夹角为 -23.5°时的温度变化结果如图 10 所示。遮光罩优化前后主次镜的最高温度、温度不均匀性极值和全年不满足温控要求的时间如图 11 所示。

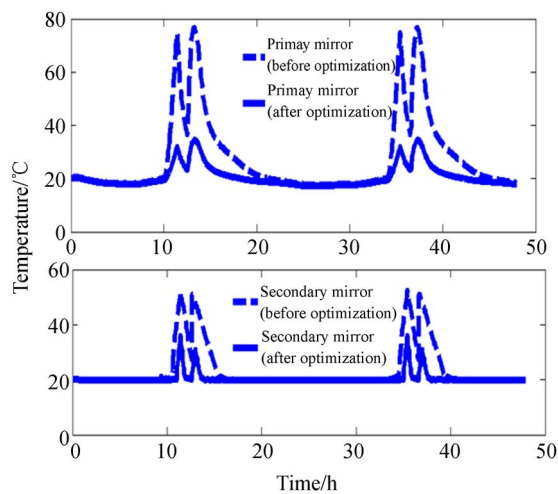
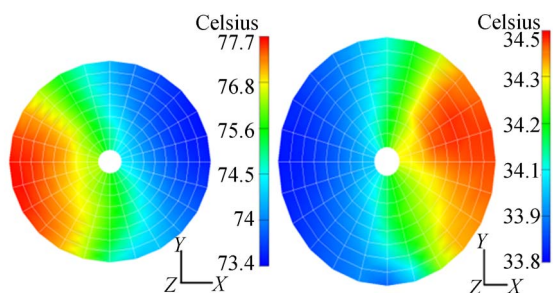
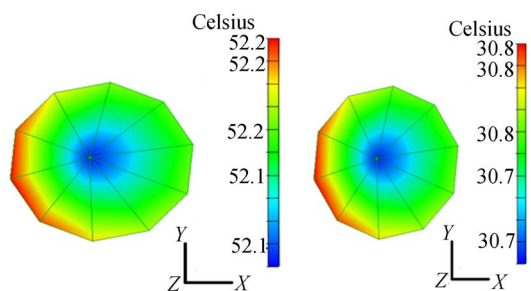


图 7 遮光罩优化前后春分或秋分时主镜、次镜的温度
Fig. 7 Temperatures of primary and secondary mirrors before and after baffle optimization



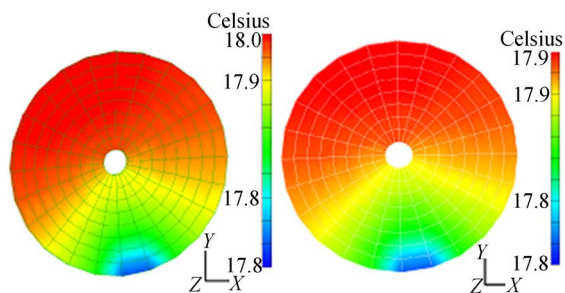
(1) 优化前 (2) 优化后
(1) Before optimization (2) After optimization
(a) 主镜温度分布云图



(1) 优化前 (2) 优化后
(1) Before optimization (2) After optimization
(b) 次镜温度分布云图

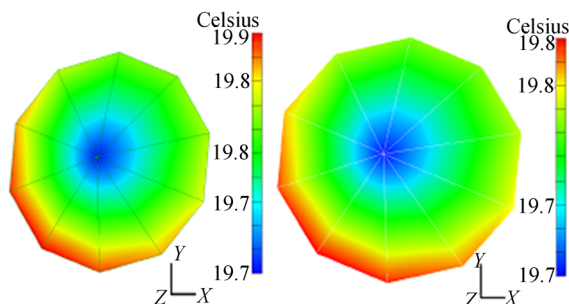
(b) Temperature distribution of secondary mirror
图 8 春分或秋分时遮光罩结构优化前后主镜、次镜的温度分布云图

Fig. 8 Temperature distributions of primary and secondary mirrors before and after baffle structure optimization at equinoxes



(1) 优化前 (2) 优化后
(1) Before optimization (2) After optimization
(a) 主镜温度分布云图

(a) Temperature distribution of primary mirror



(1) 优化前 (2) 优化后
(1) Before optimization (2) After optimization
(b) 次镜温度分布云图

(b) Temperature distribution of secondary mirror

图 9 春分或秋分时遮光罩结构优化前后主镜、次镜温度最低时的温度分布云图

Fig. 9 Temperature distributions of primary and secondary mirrors with minimum temperature before and after baffle structure optimization at equinoxes

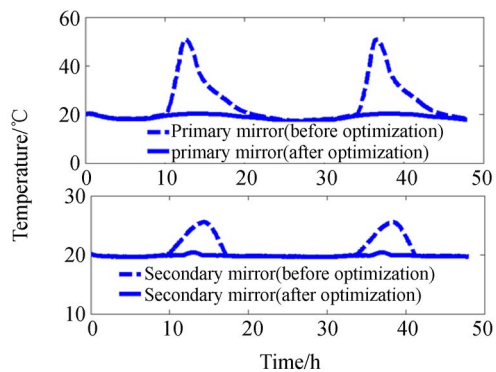
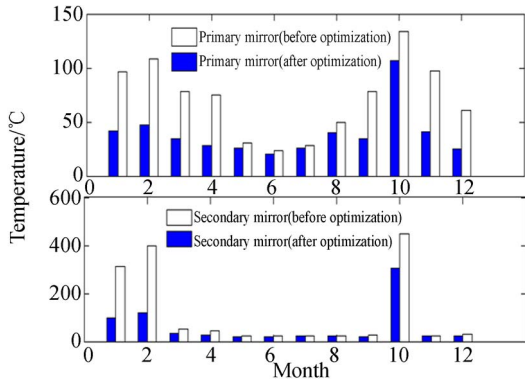
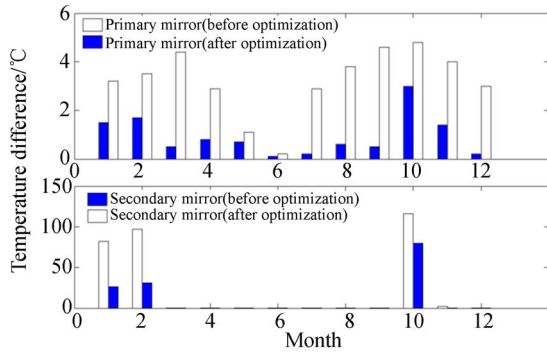


图 10 遮光罩优化前后夹角为 -23.5° 时主镜、次镜的温度
Fig. 10 Temperatures of primary and secondary mirrors before and after baffle structure optimization at intersection angle of -23.5°



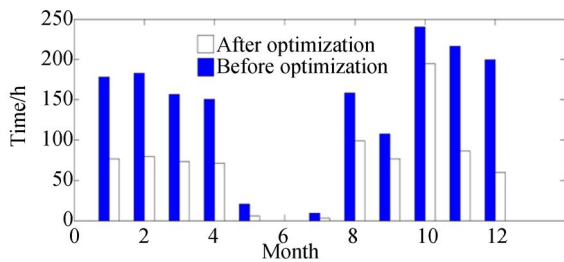
(a) 主镜、次镜的最高温度

(a) Maximum temperatures of primary and secondary mirrors



(b) 主镜、次镜全年温度不均匀性极值

(b) Maximum temperature differences of primary and secondary mirrors



(c) 不满足温控要求的时间

(c) Time unsatisfied with temperature control

图 11 遮光罩优化前后全年主镜、次镜的温度参数
Fig. 11 Temperature parameters of primary and secondary mirrors before and after baffle structure optimization for whole year

以上分析结果表明,栅板的添加不但能够保证主镜、次镜的温度水平、温度不均匀性的最低值变化稳定且高于温控要求的最小值,降低温控难度;而且能够阻挡阳光辐射光学天线的主镜和次镜,降低最高温度和温度不均匀性的最大值。栅板间距的优化大大增加了主、次镜全年的温度水平、温度差满足温度指标要求的时间,提高了激光通信的可通率。与传统空心圆筒式遮光罩相比,阳光与赤道面夹角为 0° 时主镜的最高温度降低了 43.2°C ,温度不均匀性极值减小了 3.6°C ,次镜的最高温度降低了 21.4°C ,主镜、次镜的温度参数全天不满足温控要求的时间从 8.25 h 下降到 4 h ;夹角为 -23.5° 时,主镜最高温度从 52.5°C 下降到 20.2°C ,次镜最高温度从 25.6°C 下降到 20.4°C ,可以全天进行通信;主次镜的温度参数全年在温控范围内的时间从 7140.71 h 增加到 7990.01 h ,延长了 849.3 小时。从温控的角度分析,激光通信全年的可通率从 81.51% 提高到 91.21% ,上升了 9.7% 。

4 结 论

本文提出了内壁等间距布局栅板的遮光罩结构,并讨论了栅板间距对主次镜温度参数的影响。仿真分析结果显示,遮光罩内壁垂直和平行于赤道面方向等距离排布 4 块栅板时,激光通信系统的可通率由无栅板时的 81.51% 提高到 91.21% ,系统的总加热功耗从 64 W 减小到了 51 W ,主镜、次镜的最低温度、温度不均匀性值变化很小,最高温度、温度不均匀性大大降低。由此表明,栅板能够阻挡阳光辐射光学天线的主、次镜,而且可以减小光学系统在空间损耗的能量,延长了主镜和次镜满足温控要求的时间,能够明显改善它们的温度参数。

参考文献:

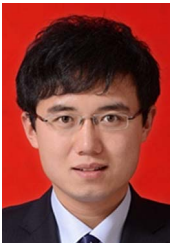
[1] 李晓峰,汪波,胡渝. 在轨运行热环境下的天线镜面热变形对空地激光通信链路的影响[J]. 宇航学报,

2005,26(5):581-585.

LI X F, WANG B, HU Y. Influence of mirror thermal distortion in thermosphere to space-to-ground laser communication links [J]. *Journal of Astro-*

- navitics*, 2005, 26(5):581-585. (in Chinese)
- [2] TOYODA M, TOYOSHIMA M, FUKAZAWA T, *et al.*. Measurement of laser link scintillation between ETS-VI and a ground optical station[J]. *SPIE*, 1997, 2990:287-295.
- [3] 胡亮. 空间可展遮光罩的结构设计、分析与仿真[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
HU L. *Structural Design, Analysis and Simulation of a Deployable Sun Shield*[J]. *Hangzhou: Zhe Jiang University*, 2011. (in Chinese)
- [4] 张月, 王超, 苏云, 等. 地球静止轨道甚高分辨率成像系统热控方案[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(9):3116-3121.
ZHANG Y, WANG CH, SU Y, *et al.*. Thermal control scheme for ultrahigh resolution imaging system on geosynchronous orbit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9):3116-3121. (in Chinese)
- [5] 梅超, 周泗忠, 闫佩佩, 等. 基于散射模型设计外遮光罩[J]. *光学学报*, 2013, 33(1):01220051.
MEI CH, ZHOU S ZH, YAN P P, *et al.*. Baffle design and stray light analysis of the off-axis three-mirror telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1):01220051. (in Chinese)
- [6] 颜昌翔, 许杰, 彭岩. 离轴三反空间光学望远系统的杂散光抑制[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2):289-293.
YAN CH X, XU J, PENG Y. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2):289-293. (in Chinese)
- [7] 钱婧, 董德平, 孙胜利. 静止轨道对地观测光学系统外遮光罩设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3):637-643.
QIAN J, DONG D P, SUN SH L. Design of outer baffle of earth observation optical system on geostationary orbit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):637-643. (in Chinese)
- [8] 贾学志, 金光, 张雷. 空间相机外遮光罩结构与优化[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(8):1560-1565.
JIA X ZH, JIN G, ZHANG L. Design and optimization of lightweight outer baffle for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8):1560-1565. (in Chinese)
- [9] 王威, 陈凡胜. 静止轨道对地观测成像系统外遮光罩设计[J]. *中国激光*, 2014, 4(9):9161001.
WANG W, CHEN F SH. Design of baffle of imaging system for earth observation on geostationary earth orbit [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 4(9):9161001. (in Chinese)
- [10] 杨林, 李达, 崔天刚, 等. 空间太阳望远镜在紫外波段成像检测中的杂散光测量和消除[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7):1456-1463.
YANG L, LI D, CUI T G, *et al.*. Measurement and elimination of stray light from space solar telescope for imaging test at UV band [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1456-1643. (in Chinese)
- [11] 钟兴, 贾继强. 空间相机消杂光设计及仿真[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3):621-625.
ZHONG X, JIA J Q. Stray light removing design and simulation of spaceborne camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):621-625. (in Chinese)
- [12] 李小明, 张立中, 韩成, 等. GEO激光通信光端机遮光罩优化设计[J]. *中国激光*, 2015, 42(9):905006.
LI X M, ZHANG L ZH, HAN CH, *et al.*. Design of optimization-baffle for GEO laser communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9):905006. (in Chinese)

作者简介:



刘伟达(1984—),男,吉林长春人,博士研究生,2008年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事空间光机结构优化分析的研究。E-mail: 1158398209@qq.com

导师简介:



张立中(1968—),男,吉林省吉林市人,教授,博士生导师,1993年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2010年于长春理工大学获得博士学位,主要从事机械设计、在线检测等方面的研究。E-mail: zlzcust@126.com