

空间太阳望远镜主光学望远镜内遮光罩热效应

李 蓉^{1,2}, 王 森², 施浒立²

(1. 杭州电子科技大学 机械学院, 浙江 杭州 310018; 2. 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘 要: 空间太阳望远镜(Space Solar Telescope, SST)主光学望远镜(Main Optical Telescope, MOT)口径达 1 m, 以 2.8'×1.5' 有效视场对日成像, 将获得 0.1"~0.15" 的图像。SST MOT 对日观测时所接收到的热量超过千瓦, 成为影响望远镜成像质量的主要热源和杂散光源。为此, 文中首先探讨了大口径太阳望远镜热设计与消杂光设计的特殊关联。然后, 针对主镜筒内消杂散光的内遮光罩结构提出了热兼容设计, 确定了内遮光罩结构热-杂散光效应集成设计的目标与评价体系。借助热分析软件获取 SST MOT 因内遮光罩结构参数变化引起的系统温度的变化趋势, 从热控角度对内遮光罩结构的设计提出了建议: 内遮光罩结构的垂直高度不宜超过 400 mm。探索的内遮光罩结构热-杂散光效应集成分析方法也可为其他太阳望远镜的综合优化提供参考。

关键词: 内遮光罩; GCF; 辐射角系数; 杂散光

中图分类号: TH751; P171 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)11-2974-05

Thermal effect on inner-shield in main optical telescope of solar space telescope

Li Rong^{1,2}, Wang Sen², Shi Huli²

(1. School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The SST (Space Solar Telescope) is designed to obtain its diffraction limit quality with aperture over 1 m. It observes the sun with a small view field of 2.8'×1.5' to obtain its high spatial resolution imaging of 0.1"-0.15". SST observing the sun directly can receive huge heat flow more than 1 000 W that will lead to unacceptable thermal distortion of the optical components. The sunlight enters into the telescope, which is an intense source of both heat and stray light. Based on the special thermal effect and stray light in the solar telescope, a compatibility analysis of the thermal effect of inner-shield in SST was performed. The relationship between the thermal control design and scattering elimination plan on the inner-shield structures in SST was presented. The objective and method of the compatibility analysis were determined. With the thermal analysis software, the temperature fields were calculated for a series of heights of inner-shield structure. A design of the inner-shield structure was put forward in thermal control terms and the suggestion was put out synchronously, which restrained the

收稿日期: 2013-03-07; 修订日期: 2013-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(11303007); 浙江省自然科学基金(LQ13E060004); 中国科学院太阳活动重点实验室开放课题(KLSA201315)

作者简介: 李蓉(1979-), 女, 讲师, 博士, 主要从事大型天文仪器的热控制与热分析方面的研究。Email: lirongjx@hdu.edu.cn

inner-shield with the height less than 400 mm. The aims of the optimal design of the inner-shield structure of SST are reached. The thoughts and methods of the optimal analysis are also useful for similar optical telescopes designed for solar observation.

Key words: inner-shield; GCF; radiation shape factor; stray light

0 引言

大口径空间太阳望远镜在轨观测时接收到大密度热流将严重影响望远镜成像性能^[1-2];而这类望远镜往往对太阳进行高分辨率局部观测,其有效观测视场外的太阳光进入望远镜后成为影响系统成像信噪比的强杂散光源。以往,望远镜的热控设计与消杂光设计是分离的,消杂光设计先完成后,热控设计为了不破坏系统消杂散光效果往往只能减少热控手段、提高热控目标、增加热控成本或实施难度,却降低了热控的可靠性,形成很大的滞后性与盲目性。这种情况在 SOLAR-B^[3]、STEREO^[4-5]、SMEI (Solar Mass Ejection Imager) 与 HERSCHEL (Helium Resonance Scattering in Corona & HELiosphere)^[6]等大型空间太阳望远镜的设计过程中得到体现。这些大口径太阳望远镜在传统热控设计与消杂光设计分离的实践中出现的滞后性与盲目性充分说明两者兼容分析设计的必要性。

文中以空间太阳望远镜 (Space Solar Telescope, SST)1m 口径的主光学望远镜(Main Optical Telescope, MOT)为研究实例,探讨消杂光设计中因内遮光罩结构几何参数改变对系统产生热效应的影响,获取相应计算的定量结果,从中寻求内遮光罩结构热敏感度与消杂光水平兼容的设计方案,并直接运用于 SST MOT 的优化设计中。

1 SST 叶片的热效应兼容设计理论

SST(Space Solar Telescope)是由中国太阳物理学家自主提出正在研发的一颗天文观测卫星,其 MOT 口径达 1m,它将用于对太阳小尺度磁场精细结构的观测和研究。SST MOT 为了实现 0.1" 成像分辨率目标,即达到衍射极限,要求在可见光波段观测时主镜面形的热畸变量控制在 $\lambda/20 \sim \lambda/40$ RMS 以内^[7]。32' 视场的全日面太阳光进入 MOT 镜筒的热量超

过千瓦,其中一小部分经镜筒内准直镜遮拦,绝大部分能量将直接射向主镜和镜筒内壁。显然,SST 有效视场 1.5'×2.8' 外的太阳光在系统内的传输既是热量的传递也是杂散光的传播,因此控制系统内这部分光能的路径将成为热控与消杂光设计的共同研究目标。

在 SST 外部遮光结构热效应的前期研究中发现^[8]:系统外部一级、二级遮光罩的几何尺寸的改变将直接导致系统消杂散光设计的结构几何因子(Geometry Composing Function, GCF) 以及热控辐射换热计算中的辐射角系数的改变,从而影响消杂光水平与热控精度。可以说,系统中热控结构与消杂光结构的几何尺寸都将影响到系统内温度分布与杂散光分布水平。合理确定系统遮光结构的尺寸是高精度、小视场大型空间太阳光学系统热效应与消杂散光效应兼容设计的重要内容之一。

SST MOT 主光路很长,达 4 m,镜筒内多次反射的光路导致次镜能接收到来自主镜前面的一级遮光罩产生的杂散光,这部分遮光罩即成为系统消杂光设计中的关键表面,是散射杂光到达探测器的通道。为了阻断这些通道,消杂光设计结合主镜内径的空间,设置锥形内部遮光罩结构,改变系统 GCF,将这类关键表面尽可能移出系统视场范围,降低系统的散射杂光水平^[9],具体如图 1 所示。

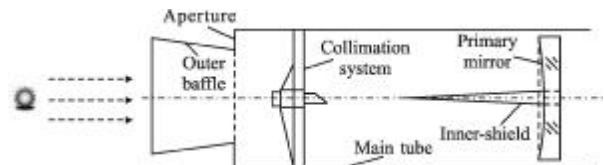


图 1 内部遮光罩结构示意图

Fig.1 Inner-shield structure in SST

从热控角度看,内部遮光罩结构的引入不仅在一定程度上抑制了杂散光的传播,同时也在很大程度上也阻断了系统内热辐射能量的传播途径。另一方

面,当内部遮光罩结构参数改变后,系统杂散光计算中的 GCF 因子与热计算中的辐射角系数因子都将发生改变,即内部遮光罩的结构形式直接关系到系统热控设计与消杂光设计的关键参数 GCF 与辐射角系数的量值,进而影响消杂光水平与热控效果,如图 2 所示^[10]。显然,除了外部遮光罩结构,在光学系统内部设置的内遮光罩结构也是改变系统 GCF 的经典有效措施。内遮光罩结构的设计同样需要兼容考虑热效应与杂散光效应。

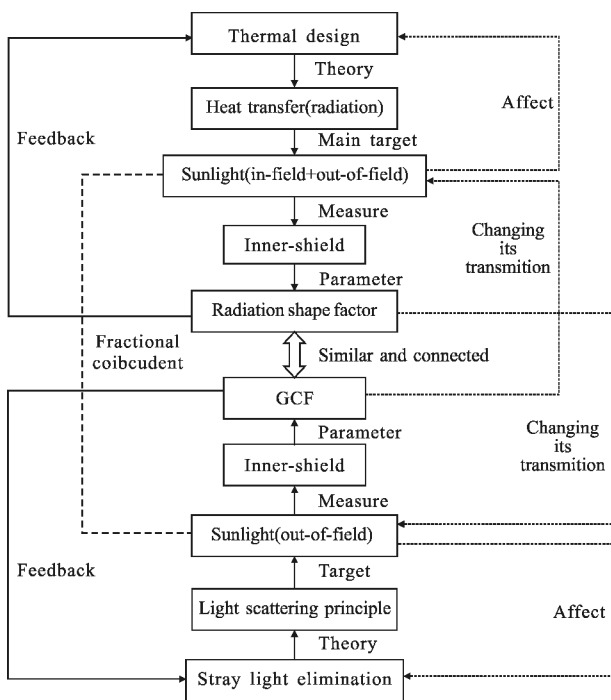


图 2 内遮光罩结构对 SST 热控与消杂光设计的影响机制
Fig.2 Relationship of thermal control and scattering elimination on inner-shield in SST

文中以 SST MOT 为具体研究对象,分析不同高度的内遮光罩结构热效应,为其兼容设计提供数据参考。采用 PATRAN 有限元软件建立结构分析模型,运用 SINDA/G、NEVADA 热分析软件进行温度场计算。基于已有的热控方案,保持相同的热边界条件(文中涉及的 SST 温度场计算为在轨对日观测时的稳态温度场,采用相同的采样点与轨道运行周期),改变内遮光罩的周向高度,定量分析系统相应的热效应,获取系统温度分布与内部遮光罩轴向高度之间的相互关系,为兼容设计内遮光罩几何尺寸提供理论依据,具体方案路线如图 3 所示。

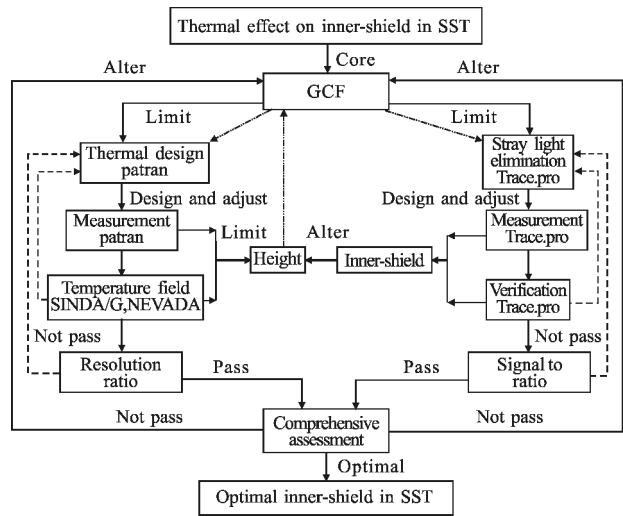


图 3 内遮光罩的兼容设计流程图

Fig.3 Flow chart of compatibility analysis on inner-shield

2 内遮光罩结构的热效应计算

SST MOT 内部遮光罩结构为锥形结构,其底端为圆形,其直径 $\Phi 120\text{ mm}$ 与主镜内径相同,其锥体的轴向高度 L_{in} 为可调参数,具体如图 4 所示。从消杂光角度看,内部遮光罩轴向高度 L_{in} 的取值越大,镜筒内壁关键表面进入准直镜后端的探测器视场内的范围越小。但是内部遮光罩的轴向高度 L_{in} 受到主镜焦距的限制,不能超越 $3\ 500\text{ mm}$ 。另一方面,若内部遮光罩轴向高度 L_{in} 与底面直径 $\Phi 120\text{ mm}$ 的比例过大则会影响内部遮光罩结构的强度。当内部遮光罩轴向高度与底端直径之比大于 10 时,该结构的加工、安装与固定都将难以实现,因此实际 L_{in} 的取值范围将远小于 $1\ 200\text{ mm}$ 。

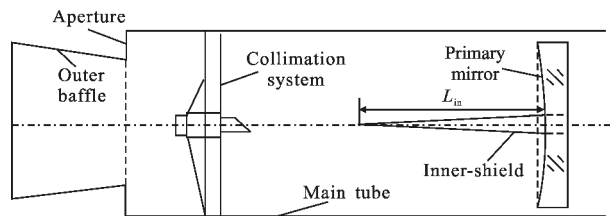
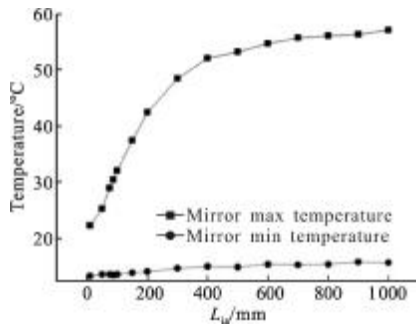


图 4 内遮光罩结构参数 L_{in} 的示意图

Fig.4 Parameter separation L_{in} of inner-shield

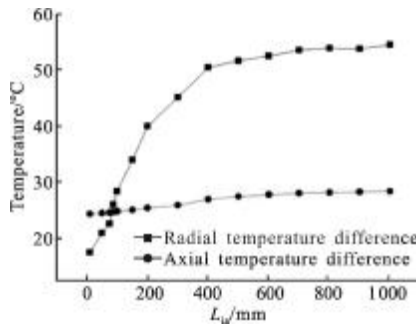
结合内部遮光罩轴向高度 L_{in} 的实际取值范围,分别讨论 L_{in} 取值为 100 mm 、 200 mm 、 300 mm 、 400 mm 、 500 mm 、 600 mm 、 700 mm 、 800 mm 、 900 mm 、 $1\ 000\text{ mm}$ 的 10 种情况,采用已有的热控方案不变,同时确保热计算边界条件不变,求解 L_{in} 10 种不同取值时系统

的温度分布情况,寻求规律,整理后如图 5 所示。



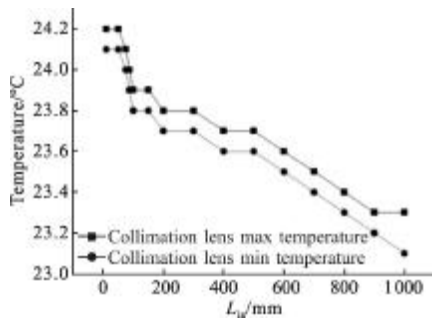
(a) 主镜温度

(a) Temperature variation of primary mirror



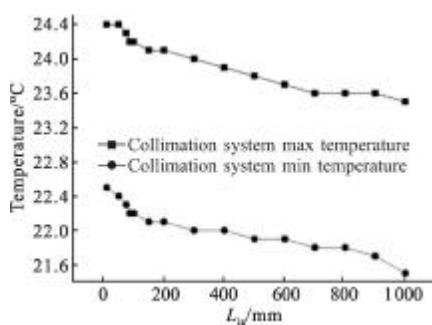
(b) 主镜温差

(b) Temperature difference of primary mirror



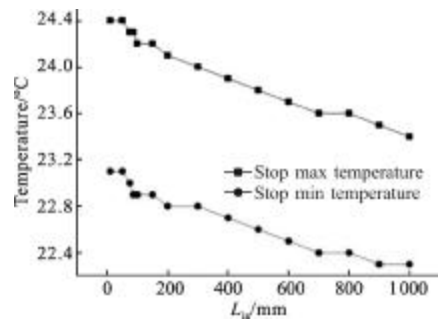
(c) 准直镜透镜温度

(c) Temperature variation of collimation lens



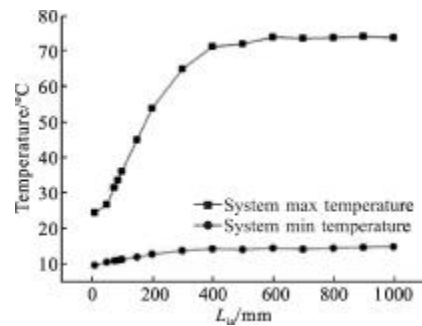
(d) 准直镜系统温度

(d) Temperature variation of collimation system



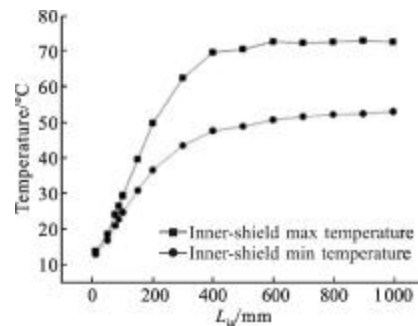
(e) 光阑温度

(e) Temperature variation of stop



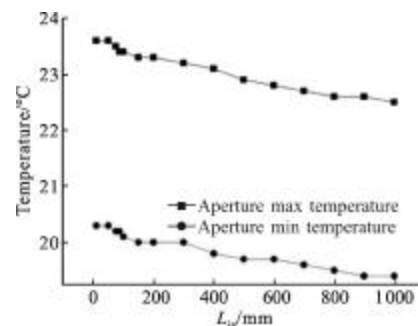
(f) 系统温度

(f) Temperature variation of system



(g) 内部遮光罩温度

(g) Temperature variation of inner-shield



(h) 通光口温度

(h) Temperature variation of aperture

图 5 内部遮光罩不同高度时系统各部位的温度

Fig.5 Variation tendency of temperatures with varying L_{in}

3 讨论

图 5(a)表示内部遮光罩不同高度取值时主镜温度的变化曲线。随着 L_{in} 取值的增大,主镜的温度也不断增高,最高温的变化相对于最低温的增幅更大,尤其是在 L_{in} 在 100~400 mm 区间内温度的增幅较大。这是因为内部遮光罩的介入使得主镜向主镜前端一段镜筒内反射的热量在主镜、镜筒壁与内部遮光罩三者之间来回地多次反射与吸收,主镜吸收热量增加,导致主镜温度上升。当 L_{in} 取值大于 400 mm 时,主镜的温度上升斜率减小是由于内部遮光罩自身结构成为主镜一个大的散热途径。类似地,主镜温差随 L_{in} 取值增大也增加,如图 5(b)所示。主镜径向温差远大于轴向温差是因为内部遮光罩的遮挡使得主镜在径向吸收的热量有一个较大的变化,而同时影响主镜轴向温差的主镜抛物面镜体对其轴向热容的变化远小于相应位置吸收热量的变化。

图 5(c)~(e)分别显示了准直镜透镜与准直镜系统随内部遮光罩高度变化的温度改变情况。可见,由于内部遮光罩减小了位于主镜前端的镜筒上的关键表面,从而减小了准直镜系统吸收的杂散光热量。由于光阑位于准直镜前端,其温度变化与准直镜系统具有类似的规律。

图 5(f)显示了系统温度与内部遮光罩高度取值之间的影响情况。系统的最高温出现在内部遮光罩锥体的顶端。位于主镜、镜筒壁与内部遮光罩三者之间来回反射的热量其中一部分被内部遮光罩吸收。 L_{in} 在 100~400 mm 区间内增大时,内部遮光罩吸收的辐射热量大于自身散热的辐射量,当高度超过 400 mm 时,内部遮光罩的表面积的增长使其辐射表面也增大,而其吸收的热量相对影响较小,温度的增幅逐渐平缓,如图 5(g)所示。

图 5(h)显示了通光口温度与内部遮光罩高度取值之间的影响情况。通光口温度随内部遮光罩高度的增加而减小,这是由于镜筒内关键表面上的热量部分被内部遮光罩吸收,从而通过镜筒传导给通光口的热量减小。

对比图 5(a)~(h),内部遮光罩高度的变化对系统温度影响明显。对比内部遮光罩不同高度时系统的温度分布情况, L_{in} 取值为 400 mm 是一个比较明显的拐点,高度值大于 400 mm 后系统各部分的温度变化减小而安装固定的代价增加,因此锥形内部遮

光罩的高度取值宜为 400 mm。

4 结论

文中结合 SST MOT 实际需求提出了望远镜内遮光罩结构的热效应兼容设计的方法,确定了该结构影响热效应与消杂光水平的几何参数。借助热分析软件探讨了 SST MOT 系统主镜筒内壁上内遮光罩几何结构变化对系统热效应的影响,得到了该结构的不同轴向高度 L_{in} 改变后系统各部位的温度变化趋势曲线图。根据消杂光的需求,结合内遮光罩结构的热效应,兼容设计建议:内遮光罩轴向高度 L_{in} 应小于 400 mm。

参考文献:

- [1] Stefan Dwnis, Pierre Coucke, Eric Gabriel, et al. Multi-application solar telescope: assembly, integration and testing [C]//SPIE, 2010, 7733: 773335.
- [2] Stefan Denis, Pierre Coucke, Eric Gabriel, et al. Optomechanical & thermal design of the multi-application solar telescope for USO[C]//SPIE, 2008, 7012: 701235.
- [3] Thomas Rimmel, Stephen L Keil, Christoph Keller, et al. Technical challenges of the advanced technology solar telescope [C]//SPIE, 2003, 4837: 94-109.
- [4] Suematsu Y, Katsukawa Y, Shimizu T, et al. Short telescope design of 1.5m aperture solar UV visible and IR telescope aboard solar-C [C]//SPIE, 2011, 8148: 81480D.
- [5] Meftah M, Irbah A. The space instrument SOOISM, a telescope to measure the solar diameter[C]//SPIE, 2011, 8146: 81460Z.
- [6] Ester Antonucci, Marco Romoli, Daniele Gardiol, et al. Ultraviolet and visible-light coronagraphic imager(UVCI) for HERSCHEL (Helium Resonance Scattering in Corona & HELiosphere)[C]//SPIE, 2003, 4853: 162-171.
- [7] Wang S. Study on Thermal-Optical of Space Solar Telescope [M]. Beijing: National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2005: 98-122.
- [8] Li Rong, Wang Sen. Thermal analysis of the baffle structure of the solar space telescope [J]. Science China: Physics, Mechanics and Astronomy, 2010, 53(9): 1755-1764.
- [9] Breault Robert P. Problems and techniques in stray radiation suppression[C]//SPIE, 1977, 107: 2-23.
- [10] Li Rong, Wang Sen, Shi Huli. Thermal effect on the vanes in the main optical telescope of the solar space telescope [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(5): 1291-1297. (in Chinese)