空间太阳望远镜主光学望远镜叶片结构热效应

李 蓉 1,2,王 森 2,施 并立 2

(1. 杭州电子科技大学,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1m,以2.8'×1.5'视场对太阳成像,将获得0.1"~0.15"的高空间分辨率和高信噪比图像。SST MOT 对日局部视场观测时系统所接收到的超千瓦热量,成为对望远镜成像产生极强影响的热源和杂 散光源。基于SST MOT 的特殊工况与需求,提出了 MOT 主镜筒在消杂光设计过程中需要兼容考虑 叶片结构的热效应,讨论了同时影响该结构的几何结构特征函数(Geometry Composing Function,GCF) 与辐射角系数的关联因素,确定了叶片结构热控与消杂光兼容设计的目标与评价体系。借助热分析 软件计算了 SST MOT 主镜筒内因叶片结构不同几何参数变化后引起的系统温度的变化趋势,从热 控角度对叶片结构的几何设计提出了建议:叶片优先采用垂直型结构、有效高度尽可能小,且叶片与 主镜轴向间距应大于425 mm。文中探索的叶片结构热效应与杂散光效应兼容分析的方法也可为其他 太阳光学望远镜的综合优化设计提供参考。

关键词:叶片; GCF; 辐射角系数; 杂散光 中图分类号:TH75 文献标志码:A 文章编号:1007-2276(2013)05-1291-07

Thermal effect on the vanes in the main optical telescope of the solar space telescope

Li Rong^{1,2}, Wang Sen², Shi Huli²

(1. Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The space solar telescope (SST) is designed to obtain its diffraction limit quality with aperture over one meter. 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 observes 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 vanes in SST was performed. In the compatibility analysis, the geometric parameter of vane structure became a key point which would affect the geometry composing function (GCF) in stray light analysis and affect the radiation shape factor in thermal analysis synchronously. This paper presented the relationship between the thermal control design and scatting elimination plan on the vane structures in SST. The objective and

收稿日期:2012-09-12; 修订日期:2012-10-13

基金项目:国家自然科学基金(61100101);中国科学院国家天文台知识创新工程青年人才领域前沿资助(kj704) 作者简介:李蓉(1979-),女,讲师,博士,主要从事热控制与热分析方面的研究。Email:lirongjx@hdu.edu.cn

method of the compatibility analysis were determined. With the thermal analysis software, the temperature fields were calculated for different geometric parameters of vane structure including depth, separation, and angle. A design of the vane structure was put forward in thermal control terms and the suggestion was put out synchronously, which restrains the vanes with less depth, more separation to the primary mirror and angled at 90°. The aims of the optimal design of the vane structure of SST were studed reached. The thoughts and methods of the optimal analysis are also useful for similar optical telescopes designed for solar observation.

Key words: vane; GCF; radiation shape factor; stray light

0 引 言

大口径、高空间分辨率、高信噪比太阳光学望远 镜在对日观测时接收的大密度热流将严重影响望远 镜成像性能[1-5];而这类望远镜对太阳进行高分辨率 局部观测时,其有效观测视场外的太阳区域即成为 对望远镜成像信噪比产生影响的强杂散光源。不论 是地基还是空基太阳望远镜,只要是对太阳局部视 场做高分辨率观测,都将面临同样的问题。以往,望 远镜的热控设计与消杂光设计是分离的,其中一方 先完成设计后,另一方为了不破坏前者的设计成果 往往只能缩小设计空间、提高设计目标、增加设计成 本或实施难度,形成很大的滞后性与盲目性。这种情 况在 ATST(Advanced Technology Solar Telescope)^[6]、 SOLAR - B^[7], STEREO^[8-9], SMEI (Solar Mass Ejection Imager) 与 HERSCHEL (Helium Resonance Scattering in Corona & HELiosphere)^[10]等大型太阳望远镜的设 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(SST)1m口径的主光学 望远镜(MOT)为研究实例,探讨消杂光叶片设计中 因结构几何参数改变对系统产生热效应的影响与制 约,获取因叶片结构不同几何参数改变后引起的系 统热效应变化的定量结果,从中寻求叶片结构热敏 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

SST 是由我国太阳物理学家自主提出正在研发

的一颗天文观测卫星,其主光学望远镜 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 λ/20~λ/40 RMS 以内^[11]。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 遮光结构热效应的前期研究中发现^[12]: 系统遮光罩几何结构的改变将直接导致系统消杂散 光设计的结构几何因子(GCF)以及热控辐射换热计 算中辐射角系数的改变,从而影响消杂光水平与热 控精度。可以说,系统中热控装置与消杂光设施几何 参数的设定都将影响到系统内温度分布与杂散光分 布水平。如何确定系统遮光结构的尺寸是高精度、小 视场大型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。

除了遮光罩结构,在光学系统的消杂光设计中 叶片结构也是改变系统 GCF 的经典有效措施。在一 个完备的光学系统中,叶片仅对大离轴杂散光有效^[13]。 图 1 描述了遮光罩内壁面产生的散射光的不同情 况,图 1(a)中没有叶片结构,散射光路径畅通无阻; 图 1(b)中增加了叶片结构后,散射光向前传播路径 被叶片阻断。通过两者对比,充分显示了叶片结构对 遮光罩壁面产生的散射光的有效抑制。从热控角度 看,叶片结构的引入不仅在一定程度上抑制了杂散 光的传播,同时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,当叶片结构参数改变 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,即叶片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。因此,叶片结构的设计需要 兼容考虑热效应与杂散光效应。



(a) 没有叶片阻挡的散射光路径情况 (b) 叶片对散射光路径的拦截

(a) High forward scatter (b) Forward scatter path path attenuated by the vanes

图 1 叶片对镜筒内壁散射光的抑制效果

Fig.1 Effect of scatter path attenuated by the vanes



图 2 叶片结构对 SST 热控与消杂光设计的影响机制 Fig.2 Relationship of thermal control and scatting elimination on the vanes in SST

文中以 SST MOT 为具体研究对象,分析不同叶 片结构的热效应,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),逐一改 变叶片几何参数,即轴向间距、高度、倾斜角度的取 值,定量分析系统热效应与这些几何参数之间的相 互关系,为兼容设计叶片几何尺寸提供理论依据,具 体方案路线如图3所示。



Fig.3 Flow chart of compatibility analysis on vane structure

2 叶片结构的热效应

SST MOT 主光路很长,镜筒超过 4 m,镜筒内壁 产生散射光的关键表面与间接表面对系统消杂散光 水平的影响较一般光学系统更为显著。引入叶片结 构将有效遮挡这些表面产生的一阶散射光直接到达 主反射镜,如图 4 所示,叶片在主镜筒内壁的轴向位 置、叶片垂直高度以及叶片与主镜筒内壁夹角是影 响叶片结构消杂光效果的主要几何因素。同时,叶片 的几何调整将改变镜筒内热辐射与热传导的途径,



(a) 垂直型叶片





(b) 倾斜型叶片

(b) Angled vanes

图 4 镜筒中两种类型叶片的分布图

Fig.4 Distribution of two kinds of vanes in tube

从而影响系统内温度的分布情况。为明确叶片不同 几何参数对系统热效应的影响,文中将单独计算叶 片每个几何参数变化后系统的温度改变情况。

在消杂光设计中,通常镜筒内叶片结构的一阶 散射特性是最重要的,比叶片结构是否倾斜更重要^[13]。 设计叶片结构时需要充分考虑镜筒壁面产生的一阶 散射光的路径,从而确定叶片顶端的斜角。在此基础 上再决定采用倾斜型叶片还是垂直型叶片结构。

通常,在杂散光分析中,叶片结构的垂直高度 D、两叶片的间距 S、叶片与壁面倾斜夹角 β 以及顶 端斜角 ω 是设计过程中需要确定的变量参数,具体 见图 5 所示。



图 5 叶片结构的几何参数 Fig.5 Geometric parameters of vane structure

从热控角度看,在众多的叶片中,离主镜最近的 叶片与系统热效应的影响最为直接,它将影响热控 关键部位,即主镜的温度分布情况,可以说离主镜最 近的叶片在轴向的位置比叶片倾斜角、叶片垂直高 度、叶片顶端斜角、叶片之间的间距等参数对主镜温 度分布的影响更为重要。叶片顶端的倾斜角 ω 的设 计通常是根据杂散光分析得到的一阶散射特性决定 的。在热分析中,叶片顶端倾斜角 ω 对系统温度分布 的影响可以忽略。与消杂光设计有所差别,影响系统 温度分布的叶片几何参数主要为:叶片与主镜的间 距 S_1 、叶片垂直高度 D 以及叶片与镜筒壁面的倾斜 夹角 β ,具体如图 6 所示。因此,叶片与主镜的间距 S_1 、叶片垂直高度 D 以及叶片与镜筒壁面的夹角 β



图 6 叶片结构参数 S_1 , D 及 β 的示意图 Fig.6 Parameter separation S_1 , D, and β of vane structure

成为影响系统热控效应的主要几何参数。这些参数 的确定不仅需要考虑消杂光效果,同时还要兼容系 统的热效应。

3 叶片与主镜轴向间距的热效应

SST 主镜实体半径为501.5 mm, 镜筒半径为 610 mm,为避免遮挡主镜成像口径,叶片垂直高度 D 的设计范围在镜筒与主镜的半径差的区域内,即0~ 108.5mm。为了简化问题, 仅讨论只有一个叶片的情 况,假设叶片与镜筒内壁面垂直且高度 D 为108.5 mm, 在此前提下单独讨论叶片与主镜轴向间距对系统的 热效应。基于已有的热控方案与热计算边界条件不 变,改变主镜与其相邻叶片的轴向距离 S₁的取值, 计算系统的温度分布,关注主镜与叶片的热效应变 化趋势。由于 SST 主镜与前端焦面接收器的距离约 3500mm,为了便于热模型的调整,结合镜筒主桁架 各环梁的轴向高度,取 S_1 为0mm、425mm、850mm、 1 175 mm 1 500 mm 1 825 mm 2 150 mm 2 475 mm 2800 mm、3125 mm、3450 mm 共11 个不同数值,定 量分析因 S₁不同取值带来的系统热效应改变趋势. 具体见图7所示。

图 7(a)与图 7(b)表示了叶片与主镜轴向间距 S₁ 变化引起的系统与叶片最高温的变化趋势。热计算 发现,当 S₁在 0~425 mm 区域内增大时,系统的最高 温出现在叶片结构上,且其温度不断升高,这主要是 由于叶片结构吸收了主镜与镜筒之间空隙处的热辐 射。但随着 S₁值的继续增加,系统与叶片的最高温 逐渐下降。这是由于叶片与主镜间距不断增大后其 相同面积接收到主镜与镜筒间隙的热辐射相应减 小,其温度自然下降。

类似地, 主镜最高温一开始随着 S₁取值增大也 升高,然后又逐渐下降。但是主镜最高温改变的拐点 出现在 S₁=1175 mm 处,滞后于叶片与系统最高温改 变的拐点值。这是因为叶片遮挡吸收了原本将直射 到镜筒内壁的太阳辐射, 造成叶片温度高于相应区 域的镜筒温度水平, 导致主镜与叶片辐射角系数的 增大,主镜温度不断上升。随着 S₁的继续增大,叶片 遮挡吸收的热量逐渐减小, 且主镜与叶片轴向距离 对辐射角系数的改变影响超过两者温差对该系数的 影响水平。致使主镜的温度一开始上升,随后减小的 趋势,如图 7(c)所示。



对比主镜、系统与叶片热效应的变化,大致趋势 是一致的。结合系统各部分温度梯度尽可能小的热控 目标,热控设计建议:叶片在镜筒内壁与主镜轴向间 距不能过小,即 S₁取值在 0~425 mm 区域内尽可能不 要增设叶片结构。

4 叶片高度的热效应

除了叶片与主镜的轴向间距 S₁ 外,叶片结构的 垂直高度 D 是影响系统温度分布的一个重要参数。 通常,在消杂光设计中,一旦镜筒壁面产生的散射光 被一定高度的叶片拦截后,不需再设置更高高度的 叶片结构来抑制此类散射光^[13]。从热控角度看,**D**的 增加将拦截更多的热辐射,叶片将吸收更多的热量, 从而改变系统内热辐射的传播途径。

基于文中 S₁ 对系统热效应的分析,S₁=425 mm 时,叶片对其影响最为恶劣。简化后,确定采用一个垂 直型叶片且 S₁=425 mm 时,只考虑叶片垂直高度 D 对 其的影响情况。由于 D 受主镜与镜筒半径的限制,当 D>108.5 mm 时,叶片将遮挡主镜的有效成像口径,因 此 D 取值范围在 0~108.5 mm 之间。将该区间八等分 并圆整后获得 D 的不同取值:108.5 mm、100 mm、90 mm、 75 mm、60 mm、45 mm、30 mm、10 mm。图 8 为针对 D



的每一种取值情况,采用原有的热控方案与热边界 计算条件,分别计算 D 八种不同取值时系统的温度 水平。

图 8(b)表示了叶片垂直高度 D 不同取值时主镜 最高温度的变化情况。随着叶片高度值的增加,其截 面积不断增大,遮挡接收到的热量也增多,叶片自身 的最高温度也不断上升。由于系统的最高温大都出 现在叶片结构上,因此系统最高温的变化情况如图 8(a)所示,与叶片的最高温变化情况相似。

类似地,主镜的最高温随着叶片垂直高度 D 的增加而升高。随着 D 值的增大,叶片遮挡周边镜筒内壁 而吸收的热量随着其截面积的增大而增加,叶片自身 温度相应升高。同时,叶片与主镜辐射换热加剧,引起 主镜温度也呈上升趋势,具体如图 8(c)所示。

鉴于主镜最高温、系统最高温、叶片最高温的热效应变化趋势一致的现象,热控设计为了保证主镜 与系统的温度变化尽可能小,建议:叶片垂直高度 D 尽可能小。

5 叶片倾斜角度的热效应

在消杂光设计中,叶片结构与镜筒内壁面夹角 也将影响光学系统的杂散光效应与热效应¹³¹,即叶 片与镜筒壁面之间的倾斜角β将成为影响系统消杂 光设计与热控设计的关键因素,参数β具体见图5 与图6所示。

在热控设计中,叶片结构与镜筒壁面夹角的变 化将引起叶片拦截热辐射面积的改变,即参数 β 与 S₁、D 一样,其改变后将引起系统温度分布的变化, 因此参数 β 的确定除了需要考虑消杂光的效果还需 要兼容系统的热效应。为了简化问题,仅讨论只有一 个叶片的情况,假设 S₁=425 mm,且 D=108.5 mm,在 此前提下讨论单独调整参数 β,考察其对系统的热 效应影响情况,从而更明确地分析参数 β 与系统热 效应之间的内在关系。显然,参数 β 的取值范围为 0°~180°,为了便于对比,保证系统热控措施与其他 消杂光措施不变的前提下,计算参数 β 在 0°~180° 范围内 11 种不同取值情况下的系统温度分布情况。 参数 β 的 11 个取值分别为 15°、30°、45°、60°、75°、 90°、105°、120°、135°、150°以及 165°。得到系统温度 分布变化的趋势具体见图 9 所示。



Fig.9 Variation tendency of temperature with varying β

图 9(b)表示了叶片倾斜角不同取值时叶片最高 温度的变化情况。随着叶片倾斜角的增加,其有效挡 光截面积不断增大,遮挡并吸收的热量也增多,叶片 自身温度不断上升。随着 β 角的继续增大,叶片不仅 遮挡了原本入射到镜筒壁的入射光能,同时另一侧 也逐渐开始对主镜等部件进行辐射换热,直至 β = 90°时,两种能量的交换达到极值。之后出现相反的 转变情况。当 β >30°时,叶片自身温度升高随后又下 降,至 β =90°达到最低温。当 β >90°时,叶片前侧遮 挡了入射的光能,后侧吸收了主镜向外界的辐射传 热,温度又逐渐反弹。由于系统的最高温大部分都出 现在叶片结构上,系统最高温的变化情况与叶片的 最高温变化情况大致相同,如图 9(a)所示。

图 9(c)表示了叶片倾斜角 β 不同取值时主镜最高温度的变化情况。随着叶片倾斜角在 0°~90°范围内增加时,由于叶片有效遮挡面积的增加促进了其吸收热量的增大,主镜相应的入射热能吸收减小,温度下降。当 β>90°时,由于叶片自身温度升高向外辐射热能被主镜吸收使得主镜的温度又逐渐上升。

基于主镜最高温、系统最高温、叶片最高温趋势 基本一致的情况,热控设计为了保证主镜与系统的 温差变化尽可能小,建议:叶片倾斜角 β=90°,即优 先采用垂直型叶片结构。

6 结 论

文中结合 SST MOT 实际需求提出了望远镜叶 片结构的热效应兼容设计方法,确定了该结构影响 热效应与消杂光水平的三个几何参数。借助热分析 软件探讨了 SST MOT 系统主镜筒内壁上叶片几何 结构变化对系统热效应的影响,得到了该结构的不 同几何参数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,结合叶片结构的热效应,兼 容设计建议:叶片与主镜轴向间距 S₁>425 mm,叶片 自身垂直高度 D 尽可能小,叶片与镜筒内壁夹角尽 可能为 β=90°。

参考文献:

- Spagnesi C, Vannoni M, Molesini G. Thermal effects in the solar disk sextant telescope[C]//SPIE, 2004, 5249: 746-753.
- [2] Xu Rong, Shi Huli. Thermal effect analysis of main structure in space solar telescope[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2425-2431. (in Chinese)
- [3] Yang Dehua, Jiang Zibo, Li Xinnan. Integrated thermal

disturbance analysis of optical system of astronomical telescope[C]//SPIE, 2008, 7017: 70171N.

- [4] Stefan Dwnis, Pierre Coucke, Eric Gabriel, et al. Multiapplication solar telescope: assembly, integration and testing [C]//SPIE, 2010, 7733: 773335.
- [5] Stefan Denis, Pierre Coucke, Eric Gabriel, et al. Optomechanical & thermal design of the multi-application solar telescope for USO[C]//SPIE, 2008, 7012: 701235.
- [6] Hopkins Randall C, Peter Capizzo, Sharon Fincher, et al. Spacecraft conceptual design for the 8 -meter advanced technology large aperture space telescope (ATLAST) [C]// SPIE, 2010, 7731: 77312Q.
- [7] Thomas Rimmele, Keil Stephen L, Christoph Keller, et al. Technical challenges of the advanced technology solar telescope[C]//SPIE, 2003, 4837: 94-109.
- [8] Suematsu Y, Katsukawa Y, Shimizu T. Short telescope design of 1.5m aperture solar UV visible and IR telescope aboard solar-C[C]//SPIE, 2011, 8148: 81480D.
- [9] Meftah M, Irbah A. The space instrument SOOISM, a telescope to measure the solar diameter [C]//SPIE, 2011, 8146: 81460Z.
- [10] 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.
- [11] Wang Sen. Study on Thermal-Optical of Space Solar Telescope
 [M]. Beijing: National Astronomical Observatories, Chinese
 Academy of Sciences, 2005: 98-122. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] Michael B. Control of Stray Light [M]//2nd ed. Handbook of Optics, Chapter 28, Vol. 1. NewYork: Mc Gravo-Hill. Inc, 2000.