

文章编号 1004-924X(2009)10-2371-06

白光日冕仪光学系统的杂散光抑制

张红鑫¹, 卢振武¹, 夏利东², 刘 华¹, 李 萍¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学技术研发中心, 吉林 长春 130033;

2. 山东大学威海分校 空间科学与物理学院, 山东 威海 264209)

摘要:为满足日冕仪对杂散光抑制的苛刻要求,通过分析日冕仪的工作原理和结构特点,设计了白光日冕仪光学系统,系统观测范围为 $2.5\sim 15 R_{\odot}$,角分辨率为 $14''$,口径为 30 mm ,焦距为 200 mm ,系统总长为 $1\ 080\text{ mm}$;其中光学系统长 370 mm , 37 pl/mm 的MTF值 >0.5 。分析了直射太阳光、太阳光在外掩体 D_1 边缘的衍射光、视场光阑 A_1 边缘的衍射光、以及物镜组 O_1 各表面多次反射带来的系统杂散光的特点,利用多个光阑互相共轭的空间位置关系,设计了相应的杂散光抑制结构,从而完全抑制了系统的4个主要杂散光源产生的杂散光,使系统整体杂散光抑制水平达到 $10^{-8}\sim 10^{-10} B_{\odot}$,满足了日冕仪光学系统对杂散光抑制的要求。

关键词:日冕仪;杂散光;光学设计

中图分类号:TH703 文献标识码:A

Stray light suppressing of optical system in white light coronagraph

ZHANG Hong-xin¹, LU Zhen-wu¹, XIA Li-dong², LIU Hua¹, LI Ping¹

(1. *The R&D Center of Optical Electric Technique, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *School of Space Science and Physics, Shandong University at Weihai, Weihai 264209, China*)

Abstract: To meet the demands on suppressing strictly stray light for a coronagraph, a white coronagraph is designed based on its working principle and the properties of stray light. The white coronagraph shows its main specifications in the field of view of $2.5 R_{\odot}$ to $15 R_{\odot}$, a resolution of $14''$, a aperture of 30 mm , a focal length of 200 mm , and the total length of 1080 mm . Furthermore, the length of optical structure is 370 mm and the MTF value at 37 pl/mm is above 0.5 . The four kinds of stray light sources is analyzed in detail, which is direct sun light, the diffractive light of sun light at edge of an external occulter D_1 , the diffractive light of sun light at edge of a field stop A_1 , and the multi-reflection light in the objective O_1 . With the help of conjugated stops, a stray light suppressing structure is designed. Experiment results show that four main stray light sources are totally suppressed and the stray light suppressing level reaches $10^{-8}\sim 10^{-10} B_{\odot}$, which satisfies the system requirements.

Key words: Coronagraph; stray light; optical design

收稿日期:2009-02-10;修订日期:2009-03-31.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40774080)

1 引言

日冕仪是在不发生日全蚀时观测日冕的光学仪器,为法国人 Lyot 在 1930 年所发明。太阳外冕的观测对人们全面理解太阳活动,特别是全面理解那些作为日球层和磁层活动的驱动源如日冕物质同抛射(CME)之类的现象是极为重要的^[1]。在以往重要的空间太阳探测项目中,从早期的火箭飞行直到 SOHO^[2]、STEREO^[3] 这样更为先进的观测飞船,日冕仪一直是其中的关键仪器之一。由于日面观测无法提供足够的信息,日冕的成像观测对预报空间天气是至关重要的。利用日冕仪的成像观测,可以开展外日冕的形态学研究和测量该区域的电子浓度;研究 CME 爆发的演化和传播(包括形态、速度和密度等)和紫外波段的观测一起预报 Halo CME;同时可以监测外日冕随太阳活动周的演变。

由于日冕的亮度相对太阳光球来说非常微弱,因此在法国人 Lyot 1930 年发明日冕仪之前,人们只能利用日全食期间才能对日冕进行光学观测。而且受天空背景限制,日冕仪在地面工作时只能在海拔几千米以上的高山上使用且视场被局限在几个太阳半径之内;同时,只能在白天进行并极大地受制于大气条件,无法达到连续不间断观测和在大空间范围对日冕结构进行跟踪的目标,这一目标只可能在太空中实现。1963 年,外掩式日冕仪在火箭上进行了空间观测^[4]。该日冕仪具有极低的杂散光,使得它能够比地面日冕仪向外观测到更大的日冕空间范围。从那以后,若干星载外掩式日冕仪已经对日冕进行了长周期的连续观测,包括:OSO-7^[5](1971~1972)、Skylab(1973~1974)^[6]、P78-1(1979~1985)^[7]、太阳极大年计划(SMM;1980~1989)^[8]、SOHO^[9](1995~)、以及 STEREO^[10](2006~)而且观测的空间分辨率、视场(FOV)、时间分辨率以及任务持续时间都不断地得到提高。

目前,我国正在论证中的“夸父计划”^[11]是由“L₁+极轨”的 3 颗卫星组成的一个空间观测系统:位于地球与太阳连线引力平衡处第一拉格朗日点(即 L₁ 点)上的夸父 A 星和在地球极轨上共轭飞行的夸父 B₁、B₂ 星。建议的夸父 A 星将观测太阳 EUV/FUV(极紫外/远紫外)发射、白光

CME 以及测量射电波、空间等离子体、磁场和高能带电粒子等。白光日冕仪监测 2.5~15 个太阳半径日冕。因此,白光日冕仪将是夸父 A 星最为关键的仪器之一,并且在我国是首次研制。本文针对“夸父计划”中 A 星载荷白光日冕仪的具体要求,从日冕仪的基本光学特性出发,设计了光学系统,并对其进行杂散光抑制设计。在设计过程中,通过分析系统杂散光特点,设计了多个光阑互相共轭的空间位置关系,从而达到了良好的杂光抑制水平。其中,系统视场为 4°,角分辨率为 14",口径为 30 mm,焦距为 200 mm,系统总长为 1 080 mm;其中光学系统为 370 mm,37 pl/mm 的 MTF 值>0.5;系统的 4 个主要杂散光源从结构上被全部抑制,系统的整体杂散光抑制水平可达 10⁻⁸~10⁻¹⁰B_⊙。

2 工作原理

如图 1 中所示,D₁ 为外掩遮光体,其作用为遮拦 0~2.5 R_⊙ 的太阳光;A₁ 为入射孔径,D₁ 的存在使得 A₁ 完全处于太阳光球区域直射光的阴影区内,这样有利于系统的杂散光抑制;O₁ 为物镜组,其作用是将 2.5 R_⊙~15 R_⊙ 的日冕成像在视场光阑 S 位置,视场光阑 S 决定了 15 R_⊙ 以内的系统视场角,同时,物镜组 O₁ 也将外掩遮光体 D₁ 成像在 D₂ 位置,其目的是为了在 D₂ 位置有效遮拦太阳光直射 D₁ 边缘引起的衍射光;D₂ 之后是场镜组 O₂,O₂ 起到了准直物镜组 O₁ 所成的日冕像的作用,同时,也将 A₁ 成像在 LYOT 光阑 A₃ 处,以便 LYOT 光阑有效遮拦来自于 A₁ 边缘的衍射光;O₃ 为中继镜组,其作用是将准直后的日冕像再次成像于像面 CCD 上。

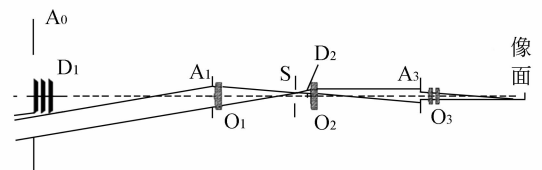


图 1 日冕仪工作原理

Fig. 1 Principle of coronagraph

由于日冕仪的成像目标是太阳周围的日冕光,而日冕区域的光强远远小于太阳光球区域的光强,所以,太阳光球区域的强烈辐射对于日冕仪

来说是一个巨大的杂散光光源,必须在光学系统中充分考虑这一因素,对其予以抑制。由以上讨论可知, D_1 与 D_2 互为共轭位置; A_1 与 A_3 互为共轭位置,如图 2 所示,这种结构可以利用各个光阑之间的共轭关系进行杂散光的抑制

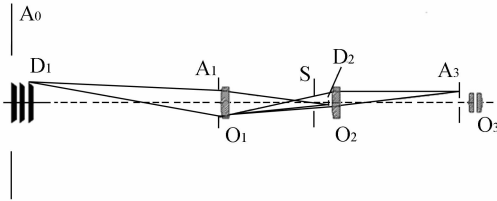


图 2 日冕仪杂散光抑制原理

Fig. 2 Principle of suppressing stray light in coronagraph

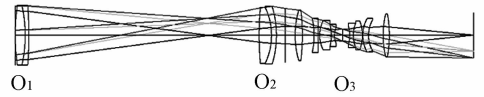


图 3 日冕仪光学系统示意图

Fig. 3 Layout of coronagraph

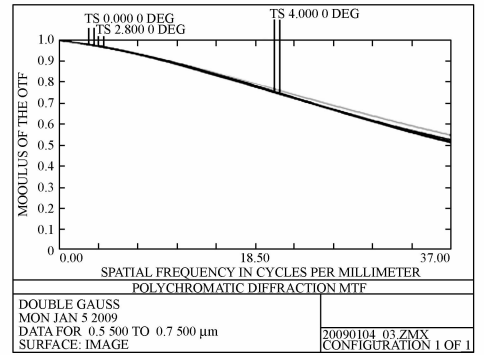
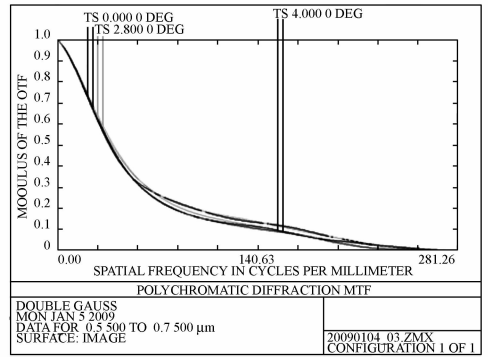


图 4 系统的 MTF

Fig. 4 MTF of system

3 系统杂散光抑制结构设计

在杂散光抑制的结构设计中,通常需要与光学设计同步交替进行,以保证系统同时具有有极高的杂散光抑制水平和良好的成像质量,本系统的视场范围为 $2.5 \sim 15 R_{\odot}$,对此区域的日冕进行成像,需要系统的杂散光抑制水平达到 $10^{-8} \sim 10^{-10} B_{\odot}$ 。(B_{\odot} :日面中心亮度)。这里直接给出最终的光学系统设计结果:

表 1 主要技术指标

Tab.1 Main specifications

望远镜视场	$2.5 \sim 15 R_{\odot}$
空间分辨	$14''/\text{pixel}$
带宽	$650 \sim 750 \text{ nm}$
孔径	$\phi 30 \text{ mm}$
相对孔径(D/f)	$1 : 6.67$

图 3 为光学系统示意图。图中,物镜组 O_1 由一双胶合镜组构成,用来对日冕进行一次成像;场镜组 O_2 由一双胶合镜组构成,用来准直 O_1 成的日冕像;中继镜组 O_3 由一组双高斯镜组构成,用来将准直后的日冕像二次成像于像面。

图 4 为系统传函曲线,在 37 lp/mm 时,系统的 MTF 值 > 0.5 。

由于太阳光球区域的辐射强度巨大,所以由其引起的直接、间接杂散光成为日冕仪系统的主

要杂散光光源。系统最大的杂光光源为太阳直射光,其次是太阳直射光在 D_1 边缘衍射光和 A_1 边缘的衍射光,然后是距离太阳最近的物镜组 O_1 的表面多次反射。下面分别来具体讨论以上杂光光源的抑制方法。

3.1 直射太阳光的遮拦

如图 5 所示,太阳光直射光线的遮拦是整个系统杂散光抑制的首要问题,这里采用外遮光体 D_1 将太阳直射光拦掉,边缘采用刀口处理,三层重叠排列,逐层遮拦。尺寸大小确保系统的内部

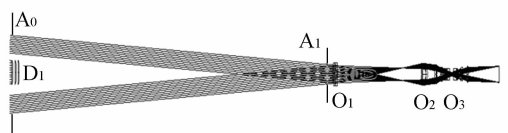


图 5 直射太阳光的遮拦

Fig. 5 Suppressing of direct sun light

视场,这里为 $2.5R$ 。若仅仅考虑对太阳直射光的遮拦, D_1 的位置与大小是可变的,但是系统同时需要考虑太阳光在 D_1 边缘衍射光的影响,在消除这一影响时,便确定了 D_1 的位置与大小。

3.2 太阳光在 D_1 边缘衍射光的影响

由于太阳光直射至 D_1 的边缘,对整个系统来说,其衍射光是一个巨大的杂光光源。图 1 中多层遮光体逐级抑制衍射光,使得衍射光剩余量最小,除此之外,在 D_1 后端面边缘仍然具有很大的衍射光强,需要采取其他的措施进行抑制,如图 6 所示:



图 6 太阳光在 D_1 边缘衍射光的遮拦

Fig. 6 Suppressing of diffractive light of sun at D_1 edge

D_1 后端面边缘可以看作是点光源,被物镜组 O_1 成像在场镜组 O_2 的前方。这样,在 D_1 关于 O_1 共轭的位置放置光阑 D_2 就可以有效地消除 D_1 边缘衍射光的影响。显然,物镜组 O_1 决定了 D_1 与 D_2 的共轭关系,增大 O_1 的光焦度会减小 D_1 与 O_1 的距离,进而缩短整个系统的尺寸;但是,物镜组 O_1 光焦度的增大会导致其中的光学表面曲率增大,从而带来更大的像差,进而增大后组 O_2 、 O_3 的像差校正负担。因此,需要平衡系统总长与系统成像质量和复杂程度之间的关系。这里: D_1 与 O_1 之间的距离为 710 mm 。

3.3 视场光阑 A_1 边缘衍射光的抑制

由于 A_1 处于整个光学系统的最前方,受到外界光线的直接照射,其边缘衍射光的影响不可忽视,这里本文采取了与消除 D_1 边缘衍射光同样方法,在 A_1 被后面光学系统所成像的位置进行遮拦,如图 7 所示:

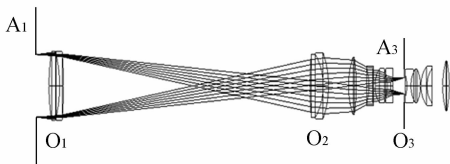


图 7 视场光阑 A_1 边缘衍射光的遮拦

Fig. 7 Suppressing of diffractive light at A_1 edge

A_1 作为点光源,被后面的场镜组 O_2 与中继镜组 O_3 的前半部成像,在 A_1 像的位置设置光阑 A_3 有效地消除 A_1 边缘衍射光。这里需要注意的是,由于光学系统初始设计阶段没有考虑消除杂散光的结构问题,所以可能出现 A_1 的像在某一透镜中的情况,这时为了不影响前面的杂散光抑制结构,仅对中继镜组 O_3 进行限制优化,使 A_1 的像位于两透镜中间方便装卡的位置。

3.4 物镜组 O_1 各表面多次反射光的抑制

物镜组 O_1 直接受到外界光线的照射,各表面多次反射产生的杂散光也需予以消除。物镜组 O_1 各表面多次反射形成的杂散光在中继镜组 O_3 的中部被聚焦,在此处可以最有效地对其进行遮拦,如图 9 所示:

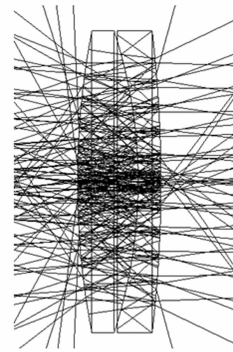


图 8 物镜组 O_1 各表面多次反射光

Fig. 8 Multiple reflective light in objective O_1

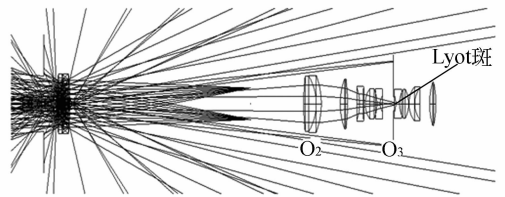


图 9 物镜组 O_1 各表面多次反射光在 O_3 中的聚焦情况

Fig. 9 Multiple reflective light in objective O_1 is focused at O_3

由上图可以看出,所有视场的杂散光全部被聚焦在一个很小的范围内,而且这个位置与 A_3 的位置十分接近,这种情况下,有两种途径对杂散光进行遮挡,(1)将聚焦点调整到与 A_3 的位置一致,这样可以在 A_3 中间添加一个档片拦截 O_1 各表面多次反射光;(2)将聚焦点调整到后面的透镜

表面,在此透镜表面中心的一个小区域内镀吸收膜进行遮拦,这被称为 Lyot 斑。

到此为止,系统最主要的杂散光源在结构上就被完全消除了。虽然从结构上已经没有杂散光到达像面,但是系统的机械结构和光学表面物理缺陷仍然会引入不同程度的杂散光,对日冕仪这种要求杂散光抑制水平极其苛刻的光学系统来说,任何一个杂散光源都要采取措施进行最大程度的消除,这里主要注意以下几点:镜筒内壁进行消杂光设计,用光线追迹的结果确定遮光片的尺寸大小;所有光阑边缘进行刀口设计,最大程度减小散射光的出现;所有光学材料采用工艺成熟的玻璃材料,减小工艺过程带来的镜片缺陷;所有光学表面采取超光滑抛光工艺^[12-14](表面微观粗糙度达到 0.1 nm 量级),并镀减反膜,经过以上措施之后,据研制经验,系统的整体杂散光抑制水平可达 $10^{-8} \sim 10^{-10} B_{\odot}$,满足系统要求。

4 结 论

白光日冕仪将是“夸父 A 星”最为关键的仪器之一,并且在我国是首次研制。日冕仪的工作特点决定了其对杂散光抑制要求极其严格,只有同时考虑系统的杂散光抑制与成像质量,并相互协调,才能保证系统具有极高的杂散光抑制水平和成像质量。本文通过分析系统杂散光特点,设计了多个光阑互相共轭的空间位置关系,从而达到了良好的杂光抑制水平。其中,系统视场为 4° ,角分辨率为 $14''$,口径为 30 mm,焦距为 200 mm,系统总长为 1 080 mm;其中光学系统长 370 mm,37 pl/mm 的 MTF 值 >0.5 ;系统的 4 个主要杂散光光源从结构上得到全部抑制,整体杂散光抑制水平可达 $10^{-8} \sim 10^{-10} B_{\odot}$ 。

参考文献:

- [1] SCHWENN T C Y, DONOVAN R, MARSCH E, *et al.*. Space weather explorer—The KuaFu mission [J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41: 190-209.
- [2] DOMINGO V, FLECK B, POLAND A. The SOHO Mission: an overview [J]. *Solar Phys.* 1995, 162: 1-37.
- [3] KAISER M L, KUCERA T A, DAVILA J M, *et al.*. The STEREO Mission: an introduction [J]. *Space Science Reviews*. 2008, 136: 5-16.
- [4] TOUSEY R. Observations of the white light corona by rocket [J]. *Ann. Astrophys.* 1965, 28: 293-297.
- [5] KOOMEN M J, DETWILER C R, BRUECKNER G E, *et al.*. White light coronagraph in OSO-7 [J]. *Appl. Opt.* 1975, 14: 743-751.
- [6] MACQUEEN R M, GOSLING J T, HILDNER E, *et al.*. The High Altitude Observatory white light coronagraph [J]. *Soc. Photo-Opt. Inst. Eng.*, 1974, 44: 207-212.
- [7] MICHELS D J, HOWARD R A, KOOMEN M J, *et al.*. Satellite observations of the outer corona near sunspot maximum [J]. *In Radio Physics of the*

Sun. 1979, 80: 439-442.

- [8] MACQUEEN R M, CSOKE-POECKH A, HILDNER E, *et al.*. The high altitude observatory coronagraph/polarimeter on the Solar Maximum Mission [J]. *Solar Phys.* 1980, 65: 91-107.
- [9] BRUECKNER G E. The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO) [J]. *Solar Physics*, 1995, 162: 357-402.
- [10] HOWARD R A, MOSES J D, VOURLIDAS A, *et al.*. Sun earth connection coronal and heliospheric investigation (SECCHI) [J]. *Space Sci Rev.* 2008, 136: 67-115.
- [11] XIA L D, TU C Y. The KuaFu mission [J]. *Chinese J. of Space Science.* 2006, 26: 25-29.
- [12] 张峰, 张斌智. 磁流体辅助抛光工件表面粗糙度研究 [J]. *光学精密工程*, 2005, 13: 34-39
ZHANG F, ZHANG B ZH. Surface roughness of optical elements fabricated by magnetic fluid-assisted polishing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13: 34-39. (in Chinese)
- [13] 高宏刚, 陈斌, 曹健林. 超光滑光学表面加工技术 [J]. *光学精密工程*, 1995(3): 8-14.
GAO H G, CHEN B, CAO J L. Fabricating technology for super smooth surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995(3): 8-14. (in Chinese)

- [14] 高宏刚, 曹健林, 陈斌. 浮法抛光原理装置及初步实验[J]. 光学精密工程, 1995(3): 57-60.
GAO H G, CAO J L, CHEN B. A prototype ap-

paratus for float polishing and initial experiment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995(3): 57-60. (in Chinese)

作者简介:



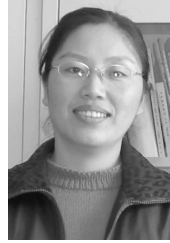
张红鑫(1978—), 男, 河北邯郸人, 博士, 副研究员, 2007 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事光学设计, 衍射光学, 光学加工等方面的研究。E-mail: firs-thongxin@163.com



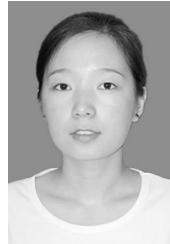
卢振武(1955—), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 1982 年于东北师范大学获得学士学位, 1985 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 研究方向为光学设计, 衍射光学等。E-mail: luzw@ciomp.ac.cn



夏利东(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 1993 于中国科技大学获得硕士学位, 2002 年于哥廷根大学获得天文和天体物理学博士学位, 2003 年和 2004 年曾先后在马普太阳系研究所和英国 Armagh 天文台从事博士后研究, 主要从事天文和天体物理学方面的研究。E-mail: xld@sdu.edu.cn



刘 华(1976—), 女, 副研究员, 2006 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 2007 年~2008 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所从事博士后研究, 研究方向为光学设计, 衍射光学等。E-mail: girlliu-hua@sohu.com



李 萍(1986—), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 2007 年于山东师范大学获得学士学位, 主要研究方向为光学设计、杂散光分析。E-mail: liping198612@126.com