

大视场日冕仪光学系统杂散光抑制

孙明哲^{1,2} 张红鑫^{1,*} 卢振武¹ 卜和阳¹ 马俊林¹ 王潇洵¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电技术研发中心, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 大视场日冕仪主要用来对215倍太阳半径内的日冕进行全周向观测以监测太阳活动并对影响日地空间的灾害性空间天气进行预警。根据杂散光抑制要求,将大视场日冕仪的光学系统设计成外掩透射式二次成像结构,其光学系统长度为355.89 mm,视场为 $\pm 20^\circ$,焦距为40 mm。将大视场日冕仪杂散光按照光强分为三级,其中一级为太阳直射光,二级为外掩体和外窗口边缘的衍射光,三级为内掩体表面反射光、物镜口径边缘的衍射光和散射杂散光。对这三级杂散光分别进行抑制后得到内视场的杂散光抑制水平为 10^{-9} 量级,外视场的杂散光抑制水平为 10^{-13} 量级。

关键词 光学设计;日冕仪;杂散光;外掩式;二次成像

中图分类号 TH751; P111.41; O439 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.052203

Stray Light Suppression of the Large Field of View Coronagraph Optical System

Sun Mingzhe^{1,2} Zhang Hongxin¹ Lu Zhenwu¹ Bu Heyang¹ Ma Junlin¹ Wang Xiaoxun¹

¹Opto-electronics Technology Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The large field of view coronagraph is used to image the corona within 215 solar radii. This coronagraph can be used to monitor the solar activity and forecast the violent space weather events. For the need of the stray light suppression, the coronagraph is designed to be an external occulted and secondary imaging system. The optical system has a length of 355.89 mm, a field of view of $\pm 20^\circ$ and a focal length of 40 mm. The stray light of the coronagraph is divided into three levels by the intensity. The first level is the direct light from the sun. The second level is the diffracted light from the occulter and external diaphragm. The third level is the reflected light from the inner occulter, the diffracted light from the objective aperture and the scattered light. The three levels of stray light are suppressed respectively. Finally, the stray light level of the coronagraph is 10^{-9} at the inner field and 10^{-13} at the outer field.

Key words optical design; coronagraph; stray light; externally occulted; secondary imaging

OCIS codes 220.4830; 110.6770; 120.4820; 290.2648

1 引言

日冕是太阳大气的最外层,日冕和日冕物质抛射(CMEs)与耀斑、日冕震荡、日珥爆发等太阳活动相关^[1-3]。日冕物质抛射事件造成绚烂的极光,同时还会造成无线电和电视的静电噪音,引起地面电力控制网络混乱和电力中断^[4-5]。日冕活动还会严重影响日地空间环境和空间通信,破坏卫星和空间站上的精密电子仪器,甚至威胁空间作业中的宇航员的生命^[4-8]。对日冕和日冕物质抛射事件进行观测可以提前一到两天对影响地球及

收稿日期:2013-12-09;收到修改稿日期:2014-01-06;网络出版日期:2014-04-29

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA04071800, XDA04060804)

作者简介:孙明哲(1984—),男,博士研究生,主要从事光学系统杂散光分析与抑制方面的研究。

E-mail: sunmingzhe2003@126.com

导师简介:卢振武(1955—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学中的应用基础研究工作。E-mail: luzw@ciomp.ac.cn

*通信联系人。E-mail: firsthongxin@163.com

日地空间的灾害性空间天气进行预警。国际上很早就注重对日冕的观测,同时日冕仪也经历了不断改进的过程。1930年,Lanzerotti^[9]发明内掩式日冕仪开始了非日全食情况下的日冕观测。1948年,Evans^[10]首次发明外掩式日冕仪^[10]。1963年,Tousey^[11]首次将日冕仪通过探空火箭升空对日观测,1971年发射的OSO-7^[12]装载的日冕仪首次观测到CMEs现象。随后Skylab^[13]、P78-1^[13]、SMM^[14]、SOHO^[15]、STEREO^[16]等对日观测卫星上都配备了日冕仪,在空间对日冕及CMEs进行观测。

在太空对日冕和CMEs观测彻底消除了大气散射对日冕观测的影响,使得日冕观测可以延续到距离太阳更远的区域。但目前对日冕进行全周向观测的日冕仪最大视场也仅为30个太阳半径(SOHO)^[15],仅在扇形情况下能够达到对330个太阳半径(STEREO)^[16]的日冕及CMEs进行观测。对日冕及CMEs进行大视场全周向观测有利于对发生太阳耀斑和CMEs等活动时的太阳磁场结构信息进行三维重现,从而有利于研究太阳磁场对地影响。由于日冕的亮度远小于太阳光球层的亮度,故需要抑制太阳光球层光线对日冕仪造成的杂散光。不同光学系统对杂散光有不同的抑制方法^[17-26],日冕仪对杂散光采用分级抑制的方式。

本文设计了一个大视场、全周向观测日冕仪,对215倍太阳半径(R_{\odot})大视场范围内的日冕及CMEs成像。系统视场为 $\pm 20^{\circ}$,光学口径为8 mm,焦距为40 mm,总长355.89 mm。采用对日冕仪各级杂散光分别抑制的方法,得到了很好的结果。

2 日冕仪工作原理

大视场日冕仪采用外掩式二次成像结构,其结构如图1所示^[15]。由于日冕的强度远小于太阳光球的强度,故首先要消除太阳光球层发出的光。外掩式日冕仪在光学系统外部利用外掩体D1来遮掩太阳直射光,使得入射孔径A1完全处于D1的阴影内。大视场日冕仪的外掩体D1为三圆盘型结构,圆盘尺寸由大至小,使得小圆盘在前一个大圆盘的阴影内遮拦前一个圆盘的边缘衍射光。物镜组O1将太阳日冕第一次成像在视场光阑A2位置,A2决定日冕仪的视场,同时物镜组O1将外掩体D1成像到A2后一定距离的内掩体D2位置,使内掩体D2能够遮拦D1边缘残余的衍射光。D2之后放置场镜组O2,场镜组O2用来准直日冕成像光,同时也将入射孔径A1成像在Lyot光阑A3处,以便Lyot光阑有效遮拦来自于入射孔径A1边缘的衍射光。在Lyot光阑后放置中继镜组O3,其作用是将准直后的日冕光成像于像面电耦合图像传感器(CCD)上。

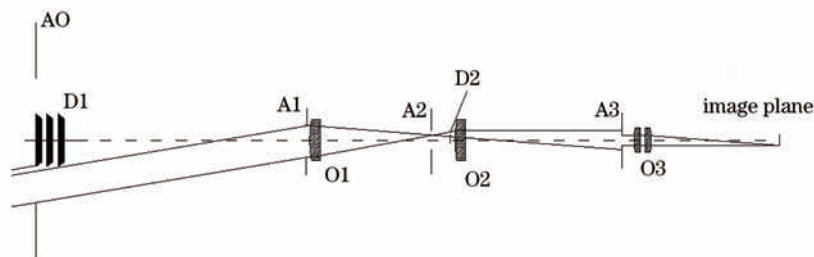


图1 外掩式日冕仪结构图

Fig.1 Structure of the externally occulted coronagraph

3 大视场日冕仪光学系统设计

大视场日冕仪的设计参数如表1所示。日冕仪的视场为以太阳为中心,视场为 $\pm 20^{\circ}$,对应于卫星在1天文单位(AU)处,视场可达 $72R_{\odot}$,在3 AU处,可达 $215R_{\odot}$ 。 20° 角光线像高为13.803 mm,小于CCD半峰全宽 $1024 \times 13.5 \mu\text{m} = 13.824 \text{ mm}$,有大于一个像素点的余量。

表1 日冕仪主要技术指标

Table 1 System parameters for coronagraph

Overall length of optical system	Effective focal length	Back focal length	Effective F -number	Wavelength	Field of view
355.89 mm	40 mm	130.95 mm	5	630~730 nm	$\pm 20^{\circ}$

日冕仪的光学系统结构如图2所示,共由13片透镜组成,由K9、ZK7、ZF6、LAK6四种材料的玻璃磨制而成。采用透射式而不用反射式是因为在相同表面粗糙度情况下,反射镜表面粗糙度造成的杂散光比透镜要

大1个数量级,故对于外层日冕的观测通常使用透射式日冕仪。图2中物镜组O1将日冕第一次成像在视场光阑位置,场镜组O2准直日冕成像光。O3为中继镜组,其作用是将一次日冕像再次成像于像面CCD上。图3为系统的点列图,可以看出此系统最大弥散斑的直径均方根(RMS)值为 $12.67\ \mu\text{m}$,小于选用的CCD最小像元尺寸($13.5\ \mu\text{m}$)。传递调制函数如图4所示,空间频率为 $37\ \text{lp/mm}$ 时,各视场的传递函数均大于0.65。

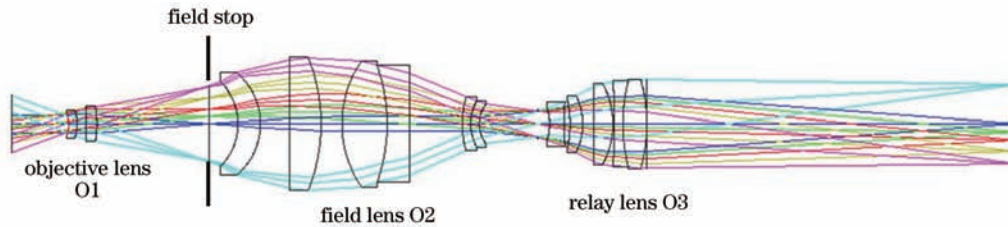


图2 大视场日冕仪光学系统图

Fig.2 Optical system of the large field of view coronagraph

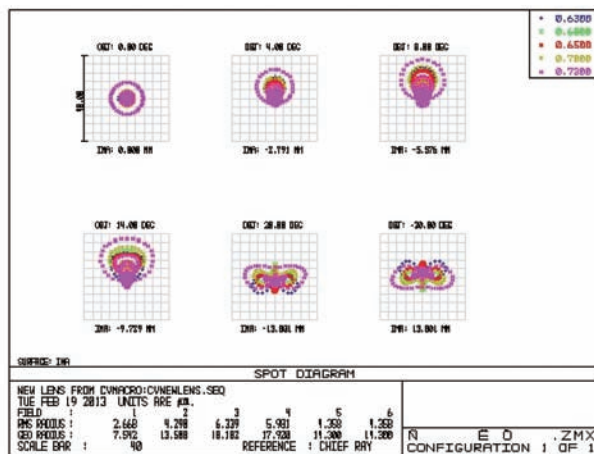


图3 点列图

Fig.3 Spot diagram

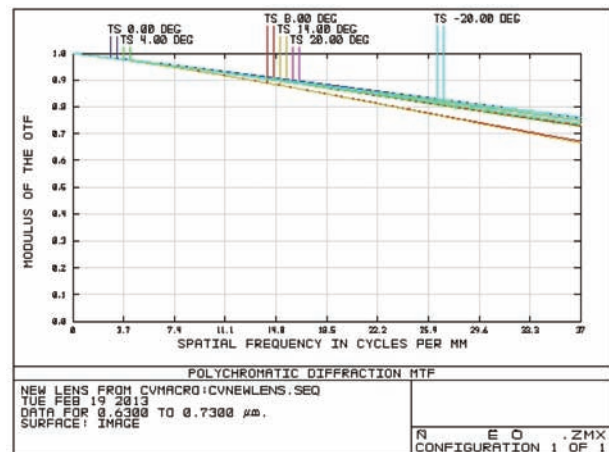


图4 调制传递函数

Fig.4 Modulation transfer function

4 杂散光分析及抑制

大视场日冕仪系统杂散光主要分为太阳直射光、衍射杂散光、散射杂散光。衍射杂散光主要包括外掩体边缘的衍射光、外窗口边缘的衍射光、入射孔径的衍射光。散射杂散光主要包括日冕仪器壁的杂散光、玻璃中的杂质和材料不均匀性造成的散射、表面粗糙度造成的杂散光、灰尘污染物造成的杂散光。按照日冕仪杂散光的强度将其分为三级,一级杂散光为太阳直射光,二级杂散光为外掩体边缘的衍射光和入射窗口A0边缘的衍射光,三级杂散光为入射孔径A1边缘的衍射光、内掩体D2表面的反射光和散射杂散光。

4.1 一级杂散光

太阳直射光是大视场日冕仪中的最大杂散光光源,由于日冕亮度远低于太阳光球层亮度,故应将太阳直射光进行抑制才能对日冕成像。太阳直射光的抑制通过三方面进行:

- 1) 利用外掩体对照射到物镜表面的太阳直射光实现遮拦;
- 2) 利用拒热镜将照射入日冕仪腔体内的太阳直射光进行反射聚焦出腔体外;
- 3) 其他部分的太阳直射光由大视场日冕仪外窗口遮拦。

首先选取三圆盘型外掩体D1对太阳直射光进行遮拦,使物镜口径A1完全处于外掩体D1的阴影内,如图5所示,图中外掩体三圆盘直径分别为 33.4 、 33.2 、 $33\ \text{mm}$,圆盘间距为 $20\ \text{mm}$,最后一个圆盘距离第一片物镜前表面为 $520\ \text{mm}$ 。可知后一个圆盘在前一个圆盘的阴影内,使得后一个圆盘可以遮拦前一个圆盘边缘的衍射光。从而使物镜口径处的衍射光大大降低。外掩体的位置通常取在外窗口的位置处,外掩体大小由内视场大

小和内掩体的过遮拦比来决定。本日冕仪的内视场为 2.13° ,则内掩体遮拦掉小于 2.13° 视场的光线,当内掩体对外掩体过遮拦比为1.3时,外掩体的半径应为 2.13° 视场光线在外掩体位置处高度的1/1.3。D1的每个圆盘边缘均采用刀口处理,同时第一个圆盘前表面抛光镜面处理,使得照射到D1前表面的太阳直射光完全被反射出去,减小因D1前表面吸收过多的太阳直射光而产生热效应的影响。同时D1其他表面喷消光漆处理,以避免被镜片或日冕仪镜筒壁等反射的光线照射到D1后表面再反射到日冕仪物镜内造成杂散光。

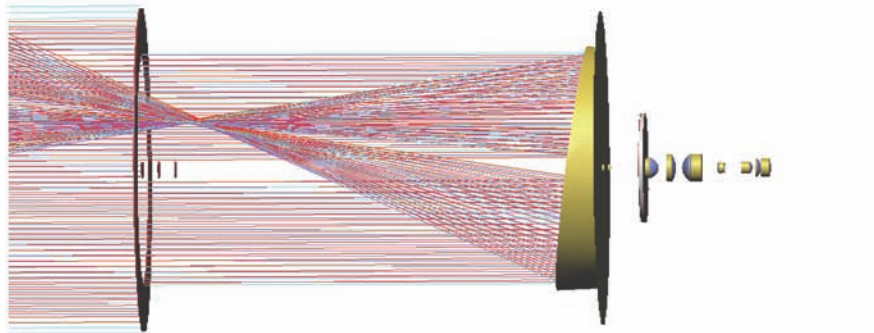


图5 太阳直射光的遮拦与倾斜拒热系统

Fig.5 Blocking of the direct sunlight and the tilted heat rejection system

同时利用拒热镜将进入腔体的太阳光反射出去,避免照亮腔内部件带来杂散光,其设计参数主要考虑遮拦距离、系统视场和系统口径。拒热镜做成球面反射镜形式主要是为了尽量减小反射出腔体的光束口径,以降低反射光和镜筒壁、外掩体和入射窗口A0碰撞再次引入散射光的几率。将拒热镜倾斜放置,使其聚焦光束避开位于中心的外掩体,避免照到外掩体后反射入腔体造成杂散光。拒热镜表面的散射光可照射到外掩体后表面并反射入物镜内形成杂散光,而拒热镜受最强的太阳直射光照射,所形成的杂散光和物镜表面散射的杂散光达同一量级。对这部分杂散光的消除只能通过拒热镜表面做超光滑处理来实现,对于大视场日冕仪情况其表面粗糙度RMS值至少应低于 0.5 nm 。

外窗口的位置位于物镜组第一片透镜前 560 mm 处。对于大视场情况,外窗口距离物镜越远,入射窗口越大,则日冕仪体积越大。而距离物镜越近,渐晕越大。外窗口的位置应权衡考虑这两方面因素。选定位置后再由外视场光线高度和视场光阑对其的遮拦比来求出外窗口的大小。大视场日冕仪外窗口选用锯齿型外窗口,如图6所示^[15],外窗口内包络半径为 210.5 mm ,外包络半径为 215.5 mm ,边数为40。由于衍射光最强的部分在垂直于窗口边界的方向,因此这种形状的外窗口可大大减少入射到物镜口径处的衍射光。

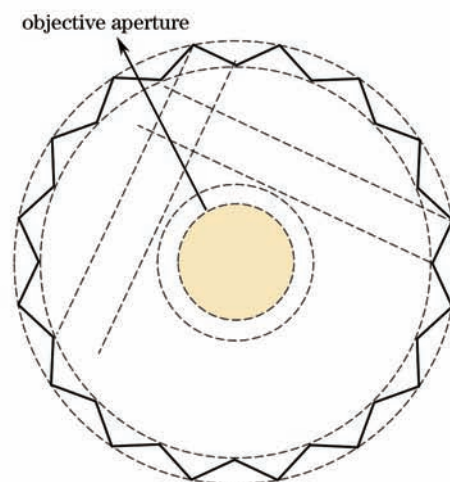


图6 锯齿型外掩体形状

Fig.6 Toothed occulter

4.2 二级杂散光

由于太阳直射光远大于外层日冕的强度,则其照射在外掩体边缘而产生的衍射光也不可忽略。对其抑制的方法是通过物镜组对其边缘成像,使得边缘衍射光聚焦在其像面的位置,并在其像面位置放置内掩体,

对其边缘的衍射光进行遮拦,其大小为外掩体像的1.1倍。如图7所示,其中内掩体为直径3 mm,高1.1 mm的圆锥,位于场镜组第一片透镜前6.8 mm处。经三圆盘型外掩体消衍射杂散光后再经内掩体遮拦到达像面处的杂散光可达到 $10^{-9} B_{\odot}$ (B_{\odot} 为太阳光球层平均亮度),这部分杂散光分布在日冕仪内视场附近。

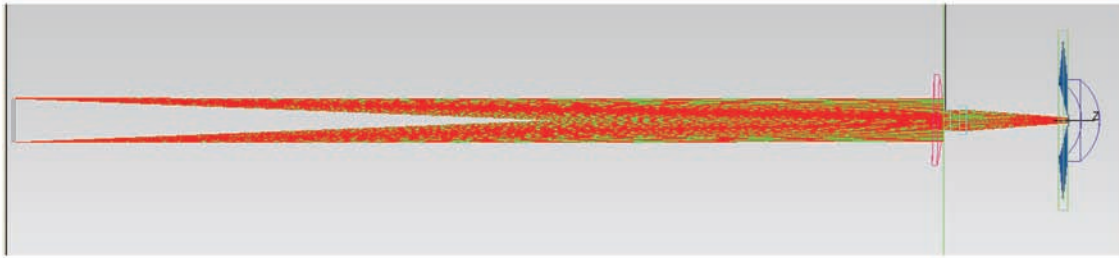


图7 外掩体边缘衍射光的遮拦

Fig.7 Bolcking of the diffracted light from the external occulter

与外掩体相同,入射窗口A0也受到太阳直射光的照射,采用视场光阑对其抑制,如图8所示,其中视场光阑直径为24.4 mm,位于场镜组第一片透镜前12.1 mm处。遮拦后剩余的衍射杂散光在像面处为 $10^{-13} B_{\odot}$ 。

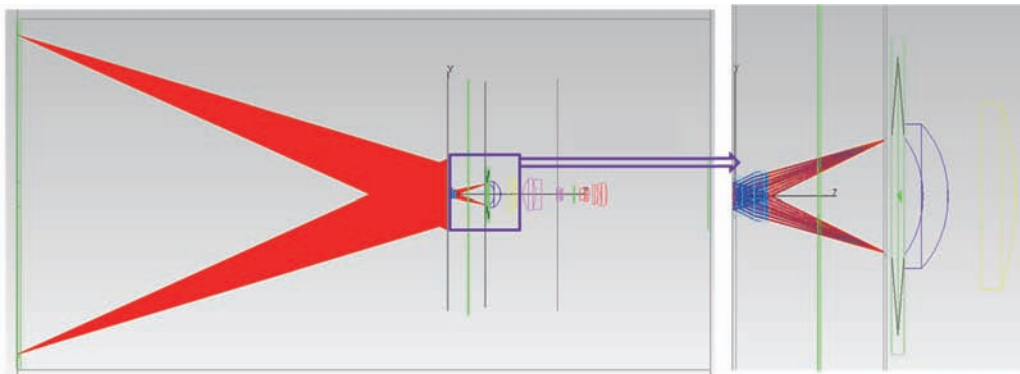


图8 入射窗口A0边缘衍射光的遮拦

Fig.8 Bolcking of the diffracted light from the external diaphragm A0

4.3 三级杂散光

入射孔径A1受到外掩体的衍射光照射而产生的二级衍射光对光强微弱的外层日冕光的成像带来不可忽略的影响,对其抑制的方法是在其像面位置设置Lyot光阑(孔径光阑),将A1边缘的衍射光进行遮拦,Lyot光阑的半径为A1像半径的1/1.1。如图9所示,Lyot光阑直径为8.1 mm,位于中继镜组第一片透镜前4.25 mm处。这部分杂散光到达像面时是发散的,几乎是均匀分布,经Lyot光阑遮拦后在像面的剩余杂散光能量在 $10^{-14} B_{\odot}$ 量级。

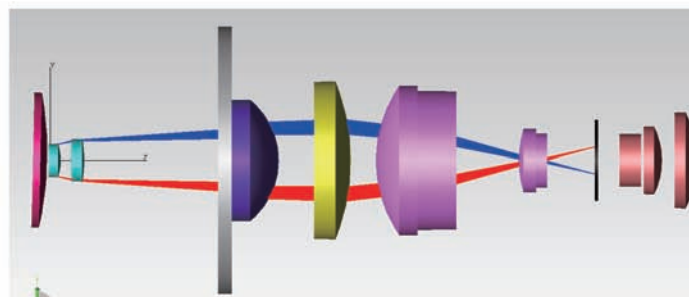


图9 Lyot光阑对A1衍射光的遮拦

Fig.9 Bolcking of the diffracted light from A1 by the Lyot aperture

内掩体D2用来遮拦太阳光直射D1边缘引起的衍射光,需要优化D2的面形,使得到达D2表面的二级杂散光被反射和聚焦到垂直主光路的方向,在相应的位置设计与D2面形匹配的凹形尖腔吸光槽,从而彻底消除上述杂散光。这里将D2设计为圆锥体,吸光槽设计为直边尖角与之匹配,如图10所示。

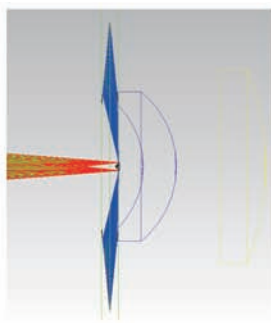


图10 内掩体D2与吸光槽

Fig.10 Internal occulter D2 and light trap

散射杂散光包括镜筒壁的反射光、玻璃杂质、不均匀性、表面粗糙度和灰尘污染物造成的散射光。通过在镜筒壁内表面加消杂光光阑或加工消杂光螺纹消除日冕仪镜筒壁的杂散光,通过选择适当的材料避免玻璃中杂质和不均匀性造成的散射,康宁和肖特的某些玻璃可以满足要求。

表面粗糙度和灰尘污染物造成的杂散光主要是由于外掩体边缘的衍射光照射到物镜表面再散射造成的杂散光。一方面,表面粗糙度造成的杂散光要通过对镜片表面做超光滑处理来消除。日冕仪的物镜组一般采用浮法抛光,抛光的表面粗糙度RMS值小于0.2 nm,其散射杂散光为入射光的 10^{-8} 量级^[27]。另一方面,为了消除灰尘污染物造成的杂散光,要求日冕仪的加工、装调及检测过程均在百级超净间中进行,以达到由灰尘污染物造成的杂散光小于入射光的 10^{-8} 量级^[27]。综上,由于照射到物镜表面的外掩体边缘的衍射光为 $10^{-5} \sim 10^{-6} B_{\odot}$,可得到由表面粗糙度和灰尘污染物造成的杂散光为 $10^{-13} \sim 10^{-14} B_{\odot}$ 。

对大视场日冕仪各级杂散光分别进行了分析。其中一级杂散光被抑制后转为二、三级杂散光,二级杂散光被抑制后剩余杂散光为:1)外掩体剩余的杂散光,强度为 $10^{-9} B_{\odot}$;2)外窗口剩余的杂散光,强度为 $10^{-13} B_{\odot}$ 。其中外掩体剩余的杂散光分布在像面的内视场附近。三级杂散光中入射孔径剩余杂散光强度为 $10^{-14} B_{\odot}$,散射杂散光强度为 $10^{-13} \sim 10^{-14} B_{\odot}$,它们几乎均匀分布在像面。由此可总结出日冕仪总的杂散光抑制水平,内视场达到 $10^{-9} B_{\odot}$,外视场达到 $10^{-13} B_{\odot}$ 。

5 结 论

由于大视场日冕仪对杂散光抑制水平要求比较高,使得日冕仪的光学系统设计应考虑杂散光抑制。根据对日冕仪杂散光抑制的要求设计出二次成像的外掩式大视场日冕仪,视场为 $\pm 20^{\circ}$,光学系统总长为355.89 mm,焦距为40 mm,空间频率为37 lp/mm时调制传递函数大于0.65。采用对杂散光分级抑制的方法,使得各部分杂散光均得到较好的抑制。总的杂散光抑制水平为内视场达到 10^{-9} 量级,外视场达到 10^{-13} 量级,可以满足大视场日冕仪的观测要求。

参 考 文 献

- 1 John C. Raymond. Imaging the Sun's eruptions in three dimensions [J]. Science, 2004, 305(5680): 49-50.
- 2 J P Byrne, S A Maloney, R T J Mcateer, *et al.*. Propagation of an Earth-directed coronal mass ejection in three dimensions [J]. Nat Commun, 2010, 1: 74.
- 3 N Srivastava, P Venkatakrishnan. Relation between CME speed and geomagnetic storm intensity [J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29 (9): 1-1-1-4.
- 4 Zhao Haibin, Lin Qisheng, Chen Yiping, *et al.*. Coronal structure and brightness profile of the total solar eclipse on August 1, 2008 [J]. Chinese Sci Bull, 2009, 54(12): 1790-1792.
赵海斌, 林启生, 陈一平, 等. 2008年8月1日日全食的日冕结构和亮度分布 [J]. 科学通报, 2009, 54(12): 1790-1792.
- 5 Hu Zhongwei. Total solar eclipse: observation and research of solar corona [J]. Chinese Journal of Nature, 2009, 31(5): 258-261.
胡中为. 日全食——日冕的观测研究 [J]. 自然杂志, 2009, 31(5): 258-261.
- 6 Gao Pengxin, Li Kejun. Statistical properties of coronal mass ejections [J]. Progress in Astronomy, 2008, 26(2): 115-125.

- 高朋鑫, 李可军. 日冕物质抛射基本物理参数的统计特征 [J]. 天文学进展, 2008, 26 (2): 115–125.
- 7 Song Limin, Zhang Jun, Yang Zhiliang, *et al.*. Earth-directed coronal mass ejection [J]. *Progress in Astronomy*, 2002, 20(1): 33–44.
- 宋丽敏, 张 军, 杨志良, 等. 对地日冕物质抛射研究 [J]. 天文学进展, 2002, 20(1): 33–44.
- 8 Wang Shui. Coronal mass ejections and space weather [J]. *China Basic Science*, 2000, 4: 12–15.
- 王 水. 日冕物质抛射与空间天气学 [J]. 中国基础科学, 2000, 4: 12–15.
- 9 L Lanzerotti. Space Weather effect on technologies [J]. *Space Weather, Geophys Monogr Ser*, 2011, 125: 11–22.
- 10 J W Evans. A photometer for measurement of sky brightness near the Sun [J]. *J Opt Soc Am*, 1948, 38, 1083–1085.
- 11 R Tousey. Observations of the white light corona by rocket [J]. *Ann Astrophys*, 1965, 28. 600–604.
- 12 M J Koomen, C R Detwiler, G E Brueckner, *et al.*. White light coronagraph in OSO-7 [J]. *Appl Opt*, 1975, 14(3): 743–751.
- 13 R M Macqueen, J T Gosling, R H Munro, *et al.*. The high altitude observatory white light coronagraph [C]. *SPIE*, 1974, 44: 207–212.
- 14 R M Macqueen, A Csoeke-Poechk, E Hildner, *et al.*. The high altitude observatory coronagraph/polarimeter on the solar maximum mission [J]. *Sol Phys*, 1980, 65(1): 91–107.
- 15 G E Brueckner, R A Howard, M J Koomen, *et al.*. The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO) [J]. *Sol Phys*, 1995, 162(1–2): 357–402.
- 16 R A Howard, J D Moses, D G Socker. Sun Earth connection coronal and heliospheric investigation (SECCHI) [J]. *Space Science Reviews*, 2008, 136(1–4): 67.
- 17 Lin Jianchun, Sun Liwei, Chen Boyang, *et al.*. Stray light analysis of a coaxial two reflect mirror system and optimized design of inner photomask [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0116001.
- 林剑春, 孙丽崑, 陈博洋, 等. 同轴两反光学系统杂散光分析及内遮光罩优化设计 [J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0116001.
- 18 Liu Jiang, Wang Fei, Wang Gaowen, *et al.*. Application of standard intensity insensitive five-step phase-shifting algorithm in projected fringe deflectometry [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1108003.
- 刘 江, 王 飞, 王高文, 等. 免疫投影基准光强变化的五步移相算法在条纹投影偏折法中的应用 [J]. 中国激光, 2013, 40 (11): 1108003.
- 19 Fu Xiuhua, Mo Zhaoyan, Huang Jinlong, *et al.*. Design and fabrication of near space laser communication link optical system filter film [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0907003.
- 付秀华, 莫朝燕, 黄金龙, 等. 临近空间激光通信链路光学系统中滤光膜的研制 [J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0907003.
- 20 Li Da, Meng Yanli, Chen Bo. Stray light analysis of reflective Lyman-Alpha coronagraph [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32 (8): 0822006.
- 李 达, 孟艳丽, 陈 波. 反射式莱曼阿尔法日冕仪杂光分析 [J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0822006.
- 21 Li Yan, Liu Jianfeng. Research on integrative suppression of internal and external stray light in infrared optical remote sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0928002.
- 李 岩, 刘剑峰. 红外光学遥感器内杂散光和外杂散光的综合抑制研究 [J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0928002.
- 22 Yang Jiaqiang, Cheng Dewen, Wang Qingfeng, *et al.*. Design of a novel wide view-field angle and anti-stray-light fundus camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1122002.
- 杨加强, 程德文, 王庆丰, 等. 新型大视场消杂光眼底相机光学系统的设计 [J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1122002.
- 23 Lu Tianxiong, Bai Jian, Huang Zhi, *et al.*. Stray light analysis and suppression of panoramic annular lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0511003.
- 鲁天雄, 白 剑, 黄 治, 等. 全景环带成像系统的杂散光分析及抑制 [J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0511003.
- 24 Liu Wendong, Yang Bo. Lens-hood design of starlight semi-physical experimental platform [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(9): 092203.
- 刘文东, 杨 博. 星光半物理实验平台遮光罩设计新方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(9): 092203.
- 25 Bian Wenbin, Gao Sitian, Lu Rongsheng, *et al.*. Analysis of optical characters of confocal Fabry-Pérot interference microscopy probe [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 051203.
- 边文宾, 高思田, 卢荣胜, 等. 共焦法布里珀罗干涉显微测头光学特性分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 051203.
- 26 Wang Xiaokun. Fabrication and testing of large aperture off-axis SiC aspheric mirror [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 011201.
- 王孝坤. 大口径离轴碳化硅非球面反射镜加工与检测技术研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 011201.
- 27 P G Nelson. An analysis of scattered light in reflecting and refracting primary objectives for coronagraphs [R]. *COSMO Tech Note 4*. Boulder, CO, High Altitude Observatory, 2007.