

文章编号 1674-2915(2009)05-0408-06

# 反射式内掩日冕仪的光学设计与杂散光分析

李萍<sup>1,3</sup>, 卢振武<sup>1</sup>, 夏利东<sup>2</sup>, 张红鑫<sup>1</sup>, 刘英<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 山东大学 空间科学与应用物理系, 山东 济南 264209; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 日冕仪的工作特点决定了其对杂散光抑制要求极其严格。根据反射式日冕仪的工作特点, 通过分析其光学特性以及其抑制系统杂散光的基本原理, 设计了反射式内掩日冕仪系统, 其相应参数为视场  $0.67^\circ$ 、口径 47 mm、焦距 768 mm、系统总长 1 200 mm, 系统在 30 lp/mm 处的 MTF 值  $> 0.6$ , 弥散斑半径  $< 2.5 \mu\text{m}$ , 成像质量达到衍射极限。通过分析系统杂散光特点, 建立了消杂散光结构, 全部抑制了系统的主要杂散光源。杂散光抑制水平达  $10^{-6} \sim 10^{-8} B_\odot$ , 可以实现对日冕的清晰成像观测。

**关键词:** 反射式日内掩冕仪; 光学设计; 杂散光

中图分类号: TH753.12 文献标识码: A

## Stray light analysis of internally occulted mirror coronagraph

LI Ping<sup>1,3</sup>, LU Zhen-wu<sup>1</sup>, XIA Li-dong<sup>2</sup>, ZHANG Hong-xin<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Department of Space Sciences and Applied Physics, Shandong University, Ji'nan 264209, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The principle of coronagraph requires that stray light in coronagraph system must be kept at an extremely low level. Based on the principle of mirror coronagraph, a internally occulted mirror coronagraph is designed by analyzing its optical characters and the basic rules to suppress the stay light. This system with a FOV of  $0.67^\circ$ , a aperture of 47 mm, a focal length of 768 mm and a total length of 1 200 mm shows that its MTF value at 30 lp/mm is above 0.6, the radius of spot is less than  $2.5 \mu\text{m}$ , and the image quality of the system approaches to the diffraction limit. In consideration of the character of stray light in the system, a structure of suppressing stray light is built, and the main sources of stray light are suppressed entirely by the designed structure. The system can achieve a level of  $10^{-6} \sim 10^{-8} B_\odot$  approximately in suppressing stray light, and it

收稿日期: 2009-06-21; 修订日期: 2009-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 40774080)

can get high quality coronal images.

**Key words:** internally occulted mirror coronagraph; optical design; stray light

## 1 引言

日冕仪是在不发生日全食时观测日冕的光学仪器,日冕的观测对人们全面理解太阳活动,特别是全面理解如日冕物质抛射(CME)之类的现象是极为重要的。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象 SOHO<sup>[1]</sup> 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变得至关重要。

由于日冕的亮度相对太阳光球来说非常微弱,在日冕仪出现之前,人们只能在日全食期间才能对日冕进行光学观测。然而,在地面上,因受天空背景限制,日冕仪只能在海拔几千米以上的高山上使用且视场局限在几个太阳半径之内。同时日冕的观测也只能在白天进行,且极大地受大气条件的限制,因此在地面上很难实现连续不间断地观测日冕和在大空间范围对日冕结构进行跟踪。1963年,日冕仪在火箭上进行了空间观测,其日冕仪具有极低的杂散光,使得它能够比地面日冕仪观测到更大的日冕空间范围。之后,若干星载折射式日冕仪对日冕进行了长周期的连续观测,包括:OSO-7(1971~1972)、Skylab(1973~1974)、P78-1(1979~1985)以及太阳极大年计划(SMM:1980~1989)。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。

折射式结构中,光线在镜片内多次反射,而镜片的散射会引起杂光。日冕仪对杂光的要求极其严格,为了减小系统内的杂光,Newkirk 和 Bohlin 提出在日冕仪中使用反射式结构<sup>[2~6]</sup>。反射式结构中因为不存在光线在镜片内多次反射及镜片的体散射而减少了杂光,随着玻璃的超光滑抛光技术和镀膜技术的发展,反射式日冕仪成为了现实。SOHO 中的 LASCO 包括 3 台日冕仪,可实现对

1.1~3 $R_{\odot}$ ( $R_{\odot}$ 为太阳半径)视场内的光谱辐射线及白光日冕进行清晰观测,光谱分辨率为 0.07 nm, CCD 像素角分辨率为 5.6", 系统内杂光水平大约在  $10^{-6}$ ~ $10^{-8}$   $B_{\odot}$ ( $B_{\odot}$ 为太阳光球发出的光的平均亮度)。LYOT(Lyman Orbiting Telescope)太阳计划中的 Lyman alpha 日冕仪也是反射式日冕仪,可对 1.2~2.5 $R_{\odot}$ 视场内的 Lyman- $\alpha$ (121.6 nm)谱线进行观测,空间角分辨率为 5"。

在太空中对 1.5~2.5 $R_{\odot}$ 的日冕进行观测时,为在保持较高的空间分辨率的同时减少杂光量,采用了反射式内掩日冕仪。本文从日冕仪的基本光学特性出发,设计了光学系统,其中系统半视场为 0.67°、口径为 47 mm、焦距为 768 mm、系统总长为 1 200 mm, 30 lp/mm 的 MTF 值 >0.6。通过分析系统杂散光特点,建立了消杂散光结构,全部抑制了系统的主要杂散光源。

## 2 工作原理

反射式内掩日冕仪的结构如图 1 所示,超光滑抛光的离轴抛物镜  $M_1$  将太阳成像在平凸球面镜  $M_2$  上,其中太阳光球发出的光被  $M_1$  成像在  $M_2$  的位置,透过  $M_2$  中心的孔后被平面镜  $M_4$  反射出系统,日冕光经离轴抛物镜  $M_3$  准直后被摄远系统成像在 CCD 上。 $A_1$  既是 Lyot 光阑又是孔径光阑,  $A_0$  及其边缘的衍射光经  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  成像在  $A_1$  处,  $A_1$  可遮挡  $A_0$  边缘的衍射光。 $M_1$  的尺寸大于太阳

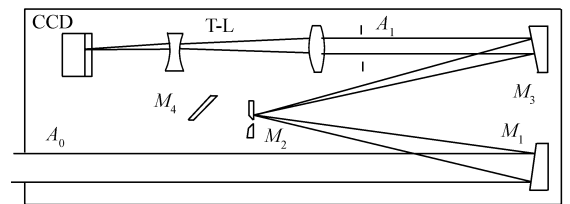


图 1 反射式日冕仪工作原理

Fig. 1 Principle of mirror coronagraph

光束的尺寸,因此只有  $A_0$  的边缘产生衍射大于太阳光束的尺寸,进而只有  $A_0$  的边缘产生衍射杂光。

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,所以太阳光球发出的光对于日冕仪来说是一个巨大的杂散光光源,在光学系统中必须充分考虑这一因素,对其予以抑制。反射式日冕仪杂光抑制原理如图 2 所示,针对反射式日冕仪中两大杂光源,太阳直射光与  $A_0$  边缘对太阳直射光的衍射光,设计消杂光结构,对它们分别进行抑制。首先,  $M_2$  中心有一圆锥孔,太阳直射光可以通过此孔被  $M_4$  反射出系统;其次,  $A_0$  与  $A_1$  互为共轭位置,  $A_0$  边缘的衍射光被  $A_1$  的边缘遮挡,这种结构可以利用共轭关系对杂散光进行了抑制。

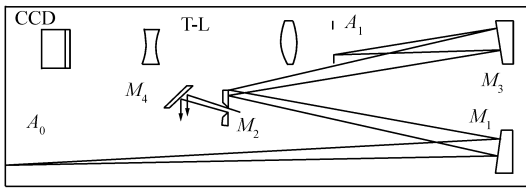


图 2 反射式日冕仪杂散光抑制原理

Fig. 2 Principle of suppressing stray light in mirror coronagraph

### 3 光学系统设计

#### 3.1 参数确定

日冕仪主要技术指标如表 1 所示。

表 1 主要技术指标

Tab. 1 Main specifications of system

望远镜 视场	空间角 分辨率	光谱 带宽	孔径	相对孔径 ( $D/f$ )
$1.5 \sim 2.5R_{\odot}$	$11.2''$	$530 \sim 640 \text{ nm}$	$47 \text{ mm}$	$1:16.3$

太阳与地球的距离:  $L = 1.56 \times 10^6 \text{ km}$ ,

太阳直径:  $D = 1.4 \times 10^6 \text{ km}$ ,

在  $1.5R_{\odot}$  处, 视场角  $\theta_1 = \frac{\frac{D}{2} \times 1.5}{L} = 0.4^\circ$

在  $2.5R_{\odot}$  处, 视场角  $\theta_1 = \frac{\frac{D}{2} \times 2.5}{L} = 0.6687^\circ$

系统的视场  $\theta = \pm 0.67^\circ$ ;

系统焦距  $f = 16.3 \times 47 \text{ mm} = 768 \text{ mm}$

像素尺寸 = 角分辨率  $\times$  焦距 =  $21 \mu\text{m}$

像高 =  $\tan(\omega) \times f = 8.98 \text{ mm}$

根据 CCD 乃奎斯特频率  $f_N$  的定义, 可知:

$$f_N = 24 \text{ lp/mm}$$

其中,  $a$  为像素尺寸。

在 CCD 的选择方面, 确定其像元尺寸为  $21 \mu\text{m}$ , 像素数为  $1024 \times 1024$ , CCD 的乃奎斯特频率为  $24 \text{ lp/mm}$ 。

#### 3.2 光学结构

日冕仪系统由两部分组成, 如图 1 所示, 包括反射镜组和摄远镜头 (T-L)。  $M_1$ 、  $M_2$ 、  $M_3$  组成无焦反射镜组, 太阳光经  $M_1$  成像在  $M_2$  处, 遮掉太阳光球光后, 日冕光经  $M_3$  准直后平行射出。  $M_1$ 、  $M_2$ 、  $M_3$  将  $A_0$  按 1:1 的比例成像于孔径光阑  $A_1$  处。  $M_1$  选用抛物镜而非球面镜, 可以保证太阳光球光经一次反射后能被全部消除而不影响日冕的观测。其中, 离轴抛物镜  $M_1$ 、  $M_3$  对称放置。利用反射镜取代透镜, 完全避免了透镜内光线的多次反射、体散射等带来的杂光, 而且反射面不会产生色差, 同时非球面的使用可提高系统成像质量。

摄远镜头焦距为  $768 \text{ mm}$ , 由 3 片镜子组成, 采用两片双胶合透镜, 中间一单透镜的结构, 除校正球差、色差、彗差和像散外, 由于最后一块镜子是负光焦度, 还能校正场曲。镜组的材料选用工艺成熟的 K9 和 F5 玻璃。

设计结果如下, 系统口径为  $47 \text{ mm}$ , 系统焦距为  $768 \text{ mm}$ , 系统总长为  $1200 \text{ mm}$ 。日冕仪的光学结构如图 3 所示, 系统的结构参数如表 2 所示。

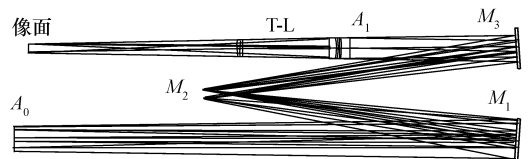


图 3 日冕仪光学系统示意图

Fig. 3 Optical structure of coronagraph

表 2 日冕仪系统的结构参数

Tab.2 Structure parameters of coronagraph system

Surf	Radius (mm)	Thickness (mm)	Glass	Conic	Decenter (Y)
1	Infinity	1 200			
2	-1 500	-750	MIRROR	-1	-100
3	-2 422	750	MIRROR	0	0
4	-1 500	-400	MIRROR	-1	100
Stop	Infinity	-20			
6	-167.79	-5.04	BK7		
7	778.8	-3.00	F5		
8	-210.67	-5.98			
9	-356.10	-15.00	F5		
10	-2 258.52	-209.74			
11	96.68	-3.00	BK7		
12	105.15	-7.49	F5		
13	107.89	-497.27			

由图 4 可得,各视场的弥散斑 < 2.5 μm,

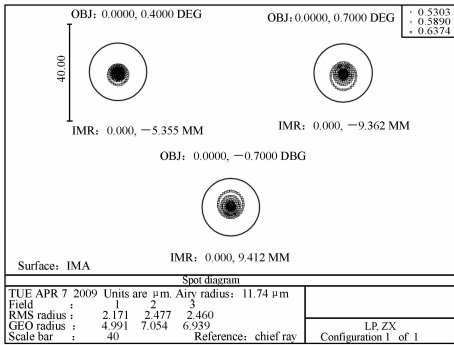


图 4 日冕系统点列图

Fig.4 Spot diagram of coronagraph

而且各视场差别很小,说明系统像差得到了较好的校正。

图 5 为日冕系统 MTF 图,图 6 是系统在 30 lp/mm (大于 CCD 的乃奎斯特频率 24 lp/mm) 时的传递函数值。在该频率,各视场的 MTF 值均大于 0.6,除了很好地保证了像质,还给系统的加工、装调带来了宽松的公差范围。

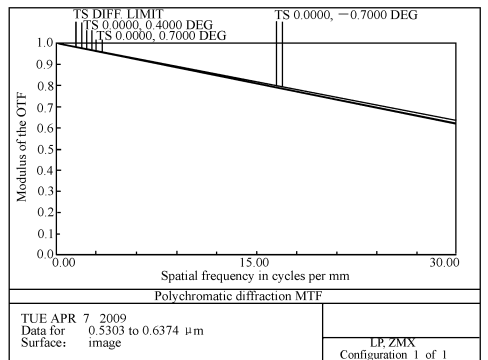


图 6 日冕系统在 30 lp/mm 时的 MTF

Fig.6 MTF of the coronagraph at 30 lp/mm

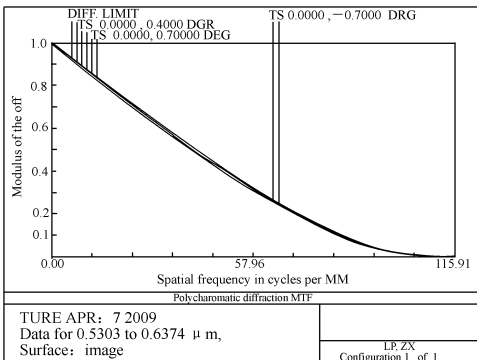


图 5 日冕系统 MTF 图

Fig.5 MTF of coronagraph

## 4 杂光分析

### 4.1 杂光来源

日冕仪的设计中主要考虑的问题是消除杂光。反射式日冕仪中杂光的主要来源,首先是直接进入系统的太阳直射光。内掩式日冕仪在入射

口径处无挡板,太阳光球发出的光和日冕光一起进入系统内;其次是入射口径  $A_0$  边缘的衍射光和  $M_1$  表面的散射光。此外,  $M_2$ 、 $M_3$  表面的散射,望远镜中光线在镜片内的多次反射、镜片表面的散射等,也都会产生杂光,但由于它们距离目标较远并且到达  $M_2$ 、 $M_3$  以及望远镜的光只有日冕光,所以这部分杂光影响较小。

## 4.2 消除杂光的措施

针对系统内的杂光,提出以下消除杂光的措施:

(1)为了消除直接进入系统的太阳直射光,反射镜  $M_2$  中心开有一圆孔,圆孔的尺寸大小确保系统的内部视场,即保证  $\pm 0.4^\circ$  视场内的光能透过圆孔,在其后再置一反射镜  $M_4$ ,将这部分光反射出系统,这里  $M_2$ 、 $M_4$  起到了内遮挡板的作用,人工制造了日全食,从而能对日冕进行观测。利用 LightTools 模拟了这个过程,图 7 为对  $1.5R_\odot$  视场内的太阳光的遮拦。

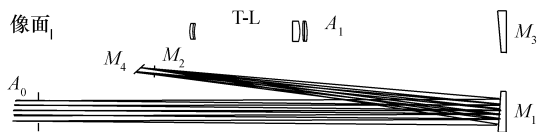


图 7 太阳直射光的遮拦

Fig. 7 Suppression of photospheric light

(2)由于太阳光直射到  $A_0$  的边缘上,对整个系统来说,  $A_0$  边缘的衍射光是一个巨大的杂光光源。  $A_0$  边缘可以看作是点光源,被  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  成像在镜组 T-L 的前方。这样,在  $A_0$  关于反射镜组共轭的位置放置 Lyot 光阑  $A_1$  就可以有效地消除  $A_0$  边缘衍射光的影响。  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  将  $A_0$  按 1:1 比例成像于  $A_1$  处,  $A_1$  与  $M_3$  之间的距离为 400 mm。LightTools 模拟如图 8 所示。

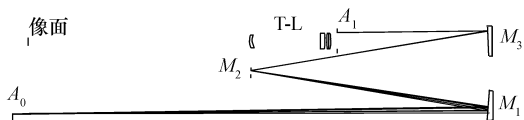


图 8 入射口径  $A_0$  边缘衍射光的遮拦

Fig. 8 Suppression of diffracted sunlight from edge of  $A_0$

(3)由于太阳光直射至  $M_1$ ,对整个系统来

说,其散射光是一个巨大的杂光光源。采取了上两种措施消杂光后,  $M_1$  成为产生杂光的主要元件。为减少  $M_1$  表面的散射光,  $M_1$  表面必须采取超光滑抛光。此外,在  $M_1$  表面镜面镀一层高反膜(100 nm 的 Al 膜和 200 nm 的  $\text{SiO}_2$  保护膜),可以提高  $M_1$  表面的反射率。

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,对此还需主要采取以下几个方面的措施:在镜筒内壁加遮光片消杂光,遮光片的尺寸大小可以利用光线追迹的结果确定;将所有光阑边缘设计成刀口,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<sup>[7,8]</sup>。

到此为止,系统最主要的杂散光源在结构上被完全消除了,对机械结构和光学表面物理缺陷引入的杂光也进行了抑制。在超净间内,利用太阳模拟装置对日冕仪内的杂散光进行测试,得到了日冕仪的杂光抑制水平(到达像面的杂光亮度)。国外相关实验室对 LASC0 中的杂光进行测试,其杂光抑制水平为  $10^{-6} \sim 10^{-8} B_\odot$ 。本文中设计的反射式日冕仪与其杂光抑制水平相近,即在  $1.5R_\odot$  处为  $10^{-6} B_\odot$ ,在  $2.5R_\odot$  处为  $10^{-8} B_\odot$ ,与日冕亮度相近,可以实现对日冕的清晰成像观测。

## 5 结论

日冕仪的工作特点决定了其对杂散光抑制要求极其严格,只有将系统的杂散光抑制与成像质量同时考虑,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,设计了反射式内掩日冕仪的结构,从而达到了良好的杂光抑制水平。系统的相应参数为:视场  $0.67^\circ$ 、口径 47 mm、焦距 768 mm、系统总长 1 200 mm,30 lp/mm 的 MTF 值  $>0.6$ 。根据其杂散光抑制的结构特点,系统的主要杂散光光源在结构上被全部抑制。

## 参考文献:

- [1] BRUECKNER G E, HOWARD R A, KOOMEN M J, *et al.*. The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO) [J]. *Solar Phys.*, 1995, 162: 357-402.
- [2] STENBORG G, SCHWENN R. MICA: The mirror coronagraph for Argentina [J]. *Space Science Reviews*, 1999, 87: 307-310
- [3] SCHWENN R. First view of the extended green-line emission corona at solar activity minimum using the LASCO-C1 coronagraph on SOHO [J]. *Solar Phys.* [J], 1997, 175(2): 667-684.
- [4] ROMOLI M, WEISER H, GARDNER L D, *et al.*. Stray-light suppression in a reflecting white-light coronagraph [J]. *Appl. Optics*, 1993, 32(19): 3559-3569.
- [5] KOOMEN M J, DETWILER C R, BRUECKNER G E, *et al.*. White light coronagraph in OSO-7 [J]. *Appl. Optics*, 1975, 14(3): 743-751.
- [6] FEDERICO L F, ROMOLI M, FINESCHI S, *et al.*. Stray-light analysis for the SCORE coronagraphs of HERSCHEL [J]. *Appl. Optics*, 2006, 45(26): 6657-6667.
- [7] 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)
- [8] 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 surfaces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 3: 8-14. (in Chinese)

作者简介: 李萍 (1986—), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事光学设计、杂光分析工作。

E-mail: liping198612@126.com