



50 mm白光球载日冕仪: I. 基本结构与地面观测实验

林隽^{1,2,3*}, 宋腾飞¹, 孙明哲⁴, 张涛¹, 许方宇¹, 王晶星¹, 付玉¹, 李燕¹, 康凯锋^{1,3}, 黄旻⁵, 刘洋⁵, 周江华⁵, 张晓军⁵, 夏利东⁴, 张红鑫⁶, 刘大洋⁴, 宋红强⁴, 田晖^{7,8}, 皮晓宇¹, 伏红林¹, 张雪飞¹, 赵明宇¹, 刘煜^{1*}, 李语强¹, 金振宇¹, 宋海军⁹

1. 中国科学院云南天文台, 昆明 650216;
2. 中国科学院大学科学研究中心, 北京 100101;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 山东大学空间科学研究院, 威海 264209;
5. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京100094;
6. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;
7. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;
8. 中国科学院太阳活动重点实验室, 北京 100012;
9. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119

*联系人, 林隽, E-mail: jlin@ynao.ac.cn; 刘煜, E-mail: lyu@ynao.ac.cn

收稿日期: 2022-09-14; 接受日期: 2022-10-31; 网络出版日期: 2023-04-17

中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA17040507)、国家自然科学基金(编号: 11933009)、云南省“兴滇英才计划-云岭学者”专项和云南省“兴滇英才计划-云南省林隽科学家工作室”专项资助

摘要 本文介绍一台口径为50 mm、用于在浮空平台上进行观测的白光日冕仪。工作波段为5500 Å, 透过带宽为50 Å, 为传统的Lyot式日冕仪, 可观测1.08–1.50个太阳半径范围的内日冕。用鑫图的Dhyana 95V2-YNTT sCMOS相机采集观测数据。对日冕仪进行了三次地面观测实验: 第一次在云南丽江高美古观测站进行, 另两次在海拔4800 m左右的四川稻城无名山观测站进行, 后两次实验获得了较为理想的日冕白光观测数据。与美国高山天文台的20 cm口径K-cor日冕仪在同一天之内观测到的结果基本一致, 说明白光日冕仪的研制获得成功。同时获得的天空背景亮度表明, 稻城无名山是一处较为理想的高海拔太阳观测址点。

关键词 临近空间, 日冕仪, 天文台址, 球载装置, 望远镜系统研制, 光机结构设计, 杂散光抑制

PACS: 95.10.Gi, 95.55.Ev, 95.75.Rs, 96.60.Pb, 96.60.Wh

引用格式: 林隽, 宋腾飞, 孙明哲, 等. 50 mm白光球载日冕仪: I. 基本结构与地面观测实验. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 259611
Lin J, Song T F, Sun M Z, et al. A 50 mm balloon-borne white-light coronagraph: I. Basic structure and experiments on the ground (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 259611, doi: [10.1360/SSPMA-2022-0363](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0363)

1 引言

通常将距离地面20–100 km之间的区域称为临近空间(图 1(a)). 这个区域处于地球稠密大气层以上, 空气十分稀薄, 飞机无法飞到这样的高度; 另一方面, 这里仍然有大气, 对于高速飞行的卫星阻力仍然十分明显, 根本无法在这样的高度飞行. 正所谓飞机上不去, 卫星下不来, 留下一块供浮空平台(气球、飞艇)发挥作用的空域. 在浮空平台上工作的太阳望远镜与地面同类仪器相比, 有明显的优势^[1].

这个区域位于平流层的中上层, 远离风云变幻的对流层, 不受任何天气现象的干扰, 永远是万里无云的朗朗晴空; 这里稀薄的空气有效地阻隔了以对流为主的热交换形式, 极大地抑制了对天文观测具有破坏性影响的大气湍流, 光学设备几乎都可以在其衍射极限上工作. 另外, 空气的稀薄也极大地降低了来自大气对光线的散射, 对观测日冕非常有利. 从综合效果来看, 在临近空间进行的天文观测(简称“临空观测”)与在空间观测的效果相差无几(图 1(b)), 但是成本却只有利用相同仪器进行空间观测的百分之一、甚至更低; 临空观测所使用的设备都可以回收、再利用: 对前一次的观测结果分析处理之后, 重新规划科学目标、优化观测方案, 提高下一次的观测效率; 将设备回收、修理、改良之后还可以继续使用, 同时还可对原有光电控制技术进行升级, 提高观测数据的质量, 进一步降低科

研成本.

鉴于临空观测所具有的优势, 美国最早于1957年在浮空平台上进行了对太阳的高分辨观测. 在随后的60多年当中, 许多国家都开展了对太阳的临空观测实验, 获得了很多高质量的观测资料. 表 1列出了迄今为止所有的太阳临空观测实验和相应的参数. 我们注意到美国普林斯顿大学天文台于1957年进行了三次(8月22日、9月25日和10月17日)临空观测实验; 所使用的望远镜口径为12英寸(约30.5 cm), 飞行高度距地面80000英尺(大约24 km)^[2]. 三次放飞的时间都选在早晨, 风速均每小时10英里(16 km).

第一次放飞时, 望远镜指向精度不够, 获取的数据不具备深入分析的科学研究价值. 第二次放飞获得了8000张照片, 有400张照片拍摄到了太阳, 有5张照片上的米粒组织清晰可辨. 第三次任务获得的具有清晰米粒和日面边缘的图像更多. 科研人员对原有仪器设备添加电视、遥测和远程控制功能之后, 于1959年进行了第四次飞行任务^[3], 获得了即使在今天也仍然具有很高参考价值的米粒、日面边缘和太阳黑子精细结构等高分辨观测资料. 1975年的第五次飞行实验还配备了一台光谱仪, 但是只获得了米粒的观测数据^[4-6].

从1966年底到1973年中, 苏联先后进行过四次平流层太阳多波段观测实验^[7-9]. 在前三次实验中使用的是口径为50 cm的望远镜, 在第四次实验中, 望远镜口径升级为1 m. 从公开的资料来看, 他们的实验似乎

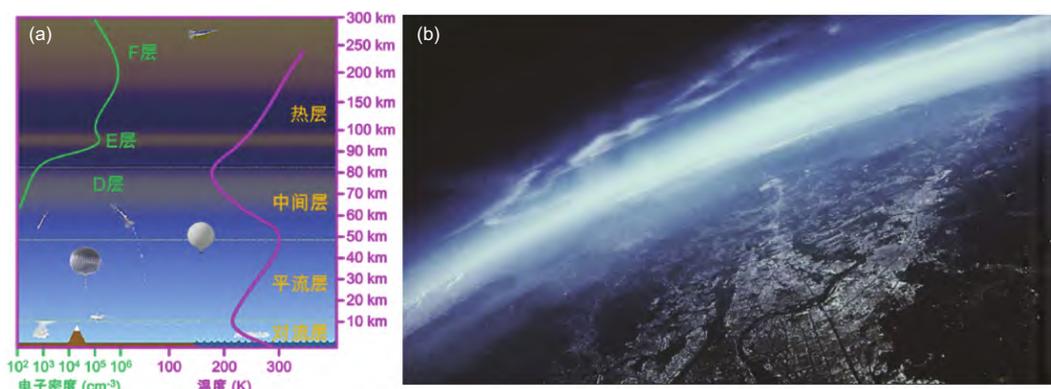


图 1 (网络版彩图) (a) 地球大气的重力分层以及电子密度和大气温度随海拔高度的分布; (b) 在浮空平台看到的地面和天空景象. 对大多数的观测来说, 浮空平台上的观测条件已经非常接近太空中的观测条件

Figure 1 (Color online) (a) Stratified atmosphere of the Earth and distributions of the electron density and temperature as a function of altitude; (b) landscape of the sky and the ground seen from a platform floating in the near space. For most of observations, the condition in the near space is already very close to that in the space.

表1 历史上的球载太阳望远镜及其相关信息

Table 1 Balloon-borne solar telescopes in history and the related information

Affiliations	Missions	Type of telescope	Aperture (m)	Spatial resolution (")	Wavelengths (nm)	Observation data	Pointing accuracy (")
Princeton University Observatory	Unmanned balloon	refraction	0.3	0.38	545	1957/08/22, 1957/09/25, 1957/10/17	1
Soviet Stratospheric Solar Observatory	Soviet solar stratoscope	—	0.5, 1	0.24–0.3, 0.12	525, 438.4–480	1966/11/01, 1967/09/22, 1970/06/30, 1973/06/20	—
Applied Physics Laboratory of the Johns Hopkins University	Flare genesis experiment	refraction	0.8	0.5	612.22	1996/01/07, 2000/01/10	2
Laboratory of Stellar and Planetary Physics	Balloon-borne ultraviolet solar telescope-spectrograph	reflection	0.2, 0.3	0.5	190–300	1970/10/05, 1971/06/24	2–3
Max Planck Institute for Solar System Research	Sunrise	reflection	1	0.10–0.18	214, 300, 312, 388, 396.8, 525.02	2006/06/08, 2013/06/12	1–2
NASA of USA and KASI of the South Korea	BITSE	refraction	0.05	1.98–2.13	393.5, 405, 423.4	2019/09/18	<1

不是很成功, 只有第三次任务获得太阳黑子与米粒组织在 $H\alpha$ 线心和线翼的观测资料. 他们发现在线心观测到的暗芒(Mottle)比在线翼观测到的光球米粒大好几倍 [8]. 与欧美同期、同类型的球载太阳望远镜相比, 苏联的球载太阳望远镜研发技术明显处于领先水平.

科学产出多、影响大的球载太阳望远镜项目当属德国马普所主持的“日出(Sunrise)”项目. 该项目分别于2006年6月8日和2013年6月12日进行了两次实验. 第一次实验的观测目标是日面中心附近的宁静区, 对这个区域开展多波段观测, 而且获得在5250.2 Å波段上的偏振测量数据 [10,11]; 第二次实验观测了一个活动区 [12]. 这两次飞行实验获得了大量观测数据, 并有丰富的科学产出, 根据这些观测数据发表的科研论文超过50篇. 目前, 第三次实验正在积极筹备当中. 有关Sunrise的详细介绍, 感兴趣的读者可以参考文献[1].

临近空间也是观测日冕的上佳区域. 由于空气稀薄, 密度只有海平面的1.5%, 因此空气分子散射对日冕

成像的干扰也明显下降. 但是因为技术上的困难, 在浮空平台上成功进行的日冕观测实验迄今只有1次. 由美国和韩国联合开展的“球载日冕电子温度和速度考察(BITSE)”任务于2019年9月18日在美国新墨西哥州萨姆纳堡启动. 气球上升段花了不到3 h, 达到距地面大约39 km的平流层, 然后开始平飞阶段. 经过近1 h的仪器开机和调整、校准工作之后, 进行了3 h 35 min的正式观测实验. 随后由于稳定平台故障而被迫中断任务 [13].

BITSE任务在4个波段(3935, 4050, 3987和4234 Å)对日心距在 $3R_{\odot}$ – $15R_{\odot}$ 的区域进行了单色光观测, 一共获得17060张日冕照片. 对这些资料进行分析后得到的结果表明, 在 $4R_{\odot}$ – $7R_{\odot}$ 的高度范围内, 日冕电子温度大约是 10^6 K, 而流速大约是 260 km s^{-1} . 这些结果与其他研究人员根据别的观测资料得到的结果(见参考文献[14])基本一致. 除此之外, BITSE还是第一次在空间成功使用偏振相机的太阳观测实验. 使用偏振

相机的优势在于可以减少传统偏振测量所需要的观测步骤和相应的机械结构(即滤光片转轮),这对于将来的空间观测也非常重要。

中国科学院于2018年启动了“临近空间科学实验系统”项目,又称“鸿鹄专项”,旨在“研制重载浮空器、持久驻空超压浮空器、可复用动力浮空器、球载临近空间太阳能无人机系统、临近空间中高层科学探测平台等3类5型实验平台”“通过建成我国首个临近空间科学实验系统,旨在深度刻画临近空间天气、电磁环境、辐射环境,探查临近空间生物多样性,解释临近空间关键环境要素的生物效应,开展临近空间科学研究等”。于2019年7月至8月,完成首次飞行试验,为我国太阳物理研究提供了一个全新的观测途径和平台。

在专项“开展临近空间科学研究”的指引下,中国科学院云南天文台承担了其中“日冕仪临近空间搭载实验”的任务,主要目标是研发一台50 mm口径的折射式日冕仪,工作波长为5500 Å,滤光片透过带宽度为50–100 Å。选择5500 Å作为工作波长的原因在于5500 Å是人眼最敏感的波长,也是太阳辐射最强所在的波长。在这个波长上观测日冕可以大致反映出我们在日全食期间用肉眼看到的日冕特征。另外,原则上,滤光片透过带越宽越好(比如说100 Å,甚至更宽),但是也会增加抑制杂散光的难度。另一方面,本日冕仪采用镜筒内掩体来遮挡太阳直射光。由于内掩式日冕仪物镜只能采取单透镜的形式,这样就无法消除色差,谱带越宽,内掩体遮挡难度越大,指向精度越高,同时会导致内视场增大。综合考虑物镜焦距和内视场遮挡角度情况下,选择透过带宽为50 Å。

在相应的地面实验完成之后,将其搭载到浮空平台上,对日冕进行临空观测,获得观测资料,供后续科学研究使用。其宗旨在于研制我国首台具有自主知识产权的球载日冕仪,探索开发研制类似设备的技术路线、积累相应的科研和技术人才,为国内太阳物理界开辟在临近空间观测日冕的通道(日后在条件允许的情况下,可将这条通道延续到色球和光球),最终为考察日冕磁场结构和等离子体分布、研究太阳活动和爆发现象提供日冕高质量观测信息。

本文重点介绍了50 mm白光球载日冕仪的基本结构及地面观测实验。第2节介绍了球载日冕仪的飞行高度;第3节介绍了球载日冕仪的科学目标;第4节介绍了日冕仪系统的基本结构;第5节则介绍了日冕仪在地面

进行的观测实验;最后,在第6节进行了总结和展望。

2 球载日冕仪飞行高度

球载日冕仪将在距离地面30 km以上的平流层当中进行观测,这里空气稀薄,流动平缓,大气散射光微弱,特别适合开展日冕观测。一般情况下,色球和日冕都被淹没在光球的光芒当中,只有在日全食过程中月球将光球完全挡住才可以被观测到。在没有日全食时,科学家就借助日冕仪来观测日冕^[15],其原理同日全食一样,就是设法将太阳光球的光挡住,专门观测日冕。

一般情况下,地面附近大气的散射光要远比日冕的光强,因此也很难观测到日冕。如图2所示,日冕的亮度勉强超过高海拔位置处的大气散射光强度,日全

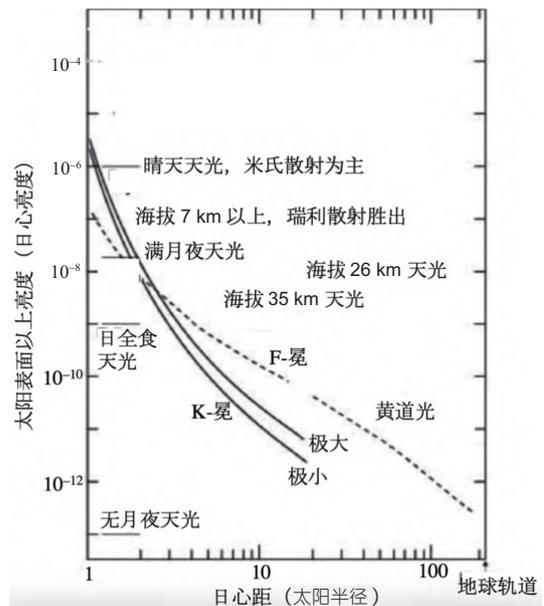


图2 日冕亮度随着离开日心距离的变化。横坐标是日心距,纵坐标表示亮度(以日心亮度为单位)。图中标出了不同情况下晴天的天空亮度,包括日间亮度、晚间满月亮度、日全食亮度、不同海拔高度处的天光背景亮度。可以看出,在海拔35 km的高度附近,天光背景的亮度与发生日全食时候的亮度相近

Figure 2 Variations of the coronal brightness versus the heliocentric distance. The x-axis is for the heliocentric distance, and the y-axis is for the brightness in units of brightness of the solar center. The brightness of the clean sky in various cases is specified. These cases include day time, full-moon night, total eclipse, as well as background sky at different altitudes. It shows that the background sky seen at the altitude of 35 km is close to that as the total eclipse occurs.

食时则明显超过了散射光强度,因此日全食是观测日冕的最佳时机.在没有日全食时就要借助日冕仪来观测日冕,而且还必须在较高海拔的位置上.

球载日冕仪正好可以创造这一条件.原则上,浮空平台越高,空气对阳光的散射越弱;但是,高度越高,所需要的气球体积越大,代价也越高,大气散射光的减弱带来的观测效果的改善趋于饱和.因此对于给定的日冕仪系统,当大气散射强度与日冕仪光学系统导致的散射光强度达到相同水平时,再增加高度已无意义.

根据我们收集到的资料,可以大致估计大气散射光强度随高度变化的情况.已有研究成果表明,地面附近的散射光主要由气溶胶产生的米氏散射导致,而在离开地面一定高度之后,米氏散射被空气分子的瑞利散射替代.根据已有的实测结果^[16-22],我们归纳总结了如下描述两种散射效果的等效光学厚度的经验公式(二者大小已根据实测结果做了归一化):

$$\text{米氏散射: } \tau_m(h) = \left(\frac{3}{20}\right)^{h/5};$$

$$\text{瑞利散射: } \tau_r(h) = 0.2s_0^2 \exp[a(s_0 - 1)],$$

其中, $s_0 = 6738/(6738 + h)$, h 是海拔高度,以km为单位, $a = 725.19$, 是无量纲常数.因为两种散射的效果均与散射体的密度成正比,而且其最终结果是从每一个散射源出来的光强度沿视线的积分,所以这里的等效光学厚度是从观测者所在海拔高度, h , 沿天顶方向对散射体密度进行路径积分的结果.上述公式给出的结果表明,海平面附近米氏散射的强度是瑞利散射强度的5倍;在海拔7 km以上的区域,瑞利散射超过米氏散射(图2),因此在高海拔地区,大气散射的主要来源是瑞利散射.

综合来看,地球大气总的散射光强度随高度增加而减弱,但是到了海拔25 km以上之后,散射光强度随高度减弱的势头逐渐放缓;到了30 km以上,散射光随高度的减弱变得非常缓慢,在35和40 km处,散射光水平基本上处于同一个水平,略高于日全食发生时的天空背景亮度(图2).再往上,空气更加稀薄,对气球的要求更高,代价更大,但是通过增加高度降低大气散射光强度的效果已基本达到饱和,除非完全离开大气层;再考虑到日冕仪内部本身的散射光水平以及本项目所能够争取到的资源,可以将35 km作为一个参考的理想放飞高度.我们注意到Sunrise的飞行高度分别是35和37 km^[1], 而BITSE的放飞高度是40 km^[13]; 由

于Sunrise的目标不是日冕,而BITSE使用的是多通道的窄带单色光日冕仪,所以大气杂散光对其观测结果的影响目前还难以做出合理的评估.

3 球载日冕仪科学目标

理论计算和观测研究均表明,太阳爆发所释放的能量事先储存在日冕磁结构中(图3(a)),磁结构的复杂程度越高,储存的能量也越多,爆发也越激烈^[23-25].一般大的爆发除了产生强烈的电磁辐射之外,还伴随着大规模的磁化等离子体的抛射(图3(b)),即爆发日珥和CME;从平衡状态进入高度动力学状态,中间要经历一个加速过程,同时爆发之前隐藏在复杂磁结构中的精细特征在这个过程中也会被释放出来(图3(c)).理论研究表明,CME主要加速过程和复杂结构释放基本上发生在太阳表面以上几万km至几十万km的高度范围^[26-30],这个范围正好落在日冕仪的视场之内,因此球载日冕仪可以为我们提供研究太阳爆发这个重要阶段的关键观测资料,对研究太阳爆发动力学特征最为明显的阶段非常有利.

除了对上述平衡和动态日冕磁场与等离子体结构进行观测之外,处于二者之间的一些小规模的能量释放过程也可能被日冕仪观测到.日冕加热是太阳物理领域内长期没有能够被定量解释的现象.光球表面的温度在6000 K左右,而日冕的温度则高达百万K以上.太阳的热量来自其内部,光球比日冕更靠近热源,但是远离热源的地方反而更热,这需要一个物理上的解释.

目前有两种可能的机制,即磁重联加热和MHD波加热.二者都认为能量来自光球,由光球等离子体带着其中的磁场一起运动,将光球的等离子体动能转换为磁场能量送入日冕.二者差别从这里开始:磁重联加热机制认为,送入日冕的磁场能量通过相反极性磁场之间的相互湮灭,即磁重联,转化为热能加热日冕.Parker^[31]认为,日冕中随时随地都有纳耀斑发生,其释放的能量加热了日冕^[32,33];而MHD波加热机制则认为,能量以MHD波的形式随着磁场的波动送入日冕,经过相应的耗散机制将波动的能量转换为热能^[34-36].这两种机制都有其合理的部分,也有能够得到观测证实的成分,但也有其缺陷和目前观测无法证实的成分在内.

一般来说,MHD波加热机制发挥作用的区域受到宏观磁场位形的限制:如果相关区域中的磁场具有开

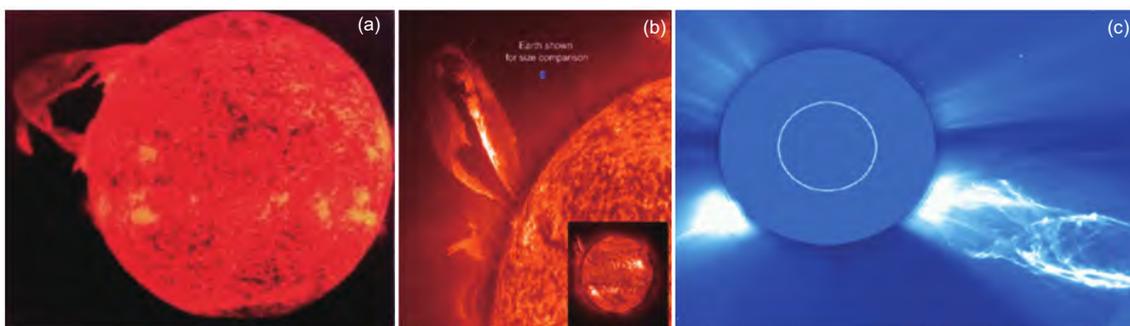


图3 (网络版彩图)爆发后各个阶段的磁场结构. (a) 常规望远镜观测到的爆发初期的大尺度日珥, 可以分辨出其中磁场结构的一些细节; (b) 爆发进行到一定阶段日珥仍然可以被常规望远镜观测到, 原来隐藏的一些磁场结构开始被释放出来; (c) 爆发日珥已经演化为CME, 其中的复杂结构已被完全释放出来, 此时离开太阳的距离增大, 亮度减低, 必须使用日冕仪才能够观测到; 中间的白圈表示太阳圆面, 更大的圆盘是日冕仪的挡板. 图片取自NASA图库

Figure 3 (Color online) Structures of the disrupting magnetic configuration in different stages of the eruption. (a) Large scale eruptive prominence in the early stage observed by the ordinary solar telescope, some small features of magnetic field could be recognized; (b) eruptive prominence in a later stage still in the field-of-view of an ordinary telescope, but more details that used to be hidden are revealed; (c) the eruption in the late stage, the eruptive prominence has evolved into CME that can only be observed by the coronagraph because of the low brightness at large distance from the Sun. All the internal structures of the prominence have been released. The bright circle marks the Sun and larger circular shadow represents the occulting disk of the coronagraph. From the NASA gallery.

放结构, 那么MHD波可以在较大的范围内加热日冕; 如果磁场的结构是闭合的, 加热的范围就会受到限制. 而纳耀斑则不受这个限制, 在闭合和开放的磁场结构中都可能发生.

不过, 越来越多的观测和理论研究都表明, 两种加热机制可能不会完全独立地发挥作用. 在闭合的冕环结构中, 环足附近发生的小尺度磁重联除了加热当地的等离子体之外, 还会在冕环中激发电磁波, 沿着冕环从低日冕传递到高日冕^[37]. 而在大尺度的具有开放磁结构的日冕区, 低日冕、甚至色球中上层的磁重联除了产生针状体和喷流之外, 也会在周围的磁场结构中产生向上传播的扰动, 沿着开放的磁结构将能量送入高层日冕^[38-40]. 根据Banerjee等人^[41]的研究, 传播的扰动或者MHD波不完全由磁重联所产生, 但是磁重联肯定会在周围的磁结构中产生扰动. 这表明, MHD波对日冕的加热可以与磁重联无关, 而磁重联加热还可能进一步激发MHD对日冕的次级加热.

通过对日冕磁场结构和等离子体分布的观测研究, 我们可以分析、推测什么样的物理过程在其中发生, 这些过程发生的后果是什么, 对日冕加热或是其他的重要观测现象(比如爆发前的能量存储)是否有影响、程度如何. 这些观测结果和相应的研究或许不能马上解决日冕加热的难题, 但至少可以提供推动最终

解决该难题的观测依据.

本日冕仪的一个重要功能是能够对白光日冕进行偏振观测. 对日冕进行偏振观测的必要性在于, 我们关心的大部分的日冕磁场和等离子体空间分布和物理特征都是由K-冕的观测特性揭示的, 因为K-冕是由自由电子散射光球辐射所形成, 所以K-冕辐射是偏振的. 与K-冕同时存在的还有一层F-冕, 其辐射来自黄道面附近的尘埃对光球辐射的衍射, 一部分甚至来自尘埃本身的热辐射, 因此F-冕的辐射偏振很弱、甚至是不偏振的. 所以, 通过对日冕进行偏振观测可以将F-冕的信息滤除, 只留下K-冕的信息, 让我们可以研究日冕磁场和它在驱动太阳活动特别是CME事件中的作用, 同时理解CME的成因及其与周围日冕结构和相关活动的相互作用; 它也有助于对日冕磁场进行三维重构, 从而构建CME等的空间运动轨迹, 分辨出朝向地球传播的CME.

除此之外, 日冕偏振观测还有如下功效: (1) 部分消除大气散射, 35 km高度附近的大气虽然很稀薄, 但是还是能够对太阳辐射产生散射, 偏振观测可以有效消除大气散射光的影响. (2) 对探测器起到保护作用. 偏振片有一定的减光效果, 当球载日冕仪受到突然的波动(风的影响), 日面像将会产生偏离, 这样就可能造成太阳像会偏出日冕仪的内掩体遮挡范围, 可能对探

测器造成损伤, 而偏振片的减光则会有效地保护探测器.

4 日冕仪系统基本结构

本项目研发的球载日冕仪系统包括三个部分: 一级平台及仪器舱、二级平台、日冕仪(图4). 一级平台承载日冕仪以及与日冕仪观测有关的所有载荷, 包括电源、通讯设备、工控机、陀螺仪、太阳敏感器(简称“太敏”)以及二级平台. 电源负责给平台上的所有设备供电, 通讯设备负责与地面的通讯联络, 包括指令接收和数据传输, 工控机负责控制系统各个设备的运行, 陀螺仪则负责保持一级平台在水平方向上的稳定性, 太敏负责寻找太阳, 为二级平台在 $\pm 1^\circ$ 的误差范围内找到太阳的方位. 一级平台上端通过缆绳和降落伞与气球相连(图4), 由气球将整个系统带到平流层的工作区



图4 (网络版彩图)球载日冕仪系统基本结构示意图. 整个系统由一级平台与仪器舱、二级平台、日冕仪组成

Figure 4 (Color online) The sketch of the basic structure of the balloon-borne coronagraph system, which includes the first- and second-stage attitude control platforms, the gondola, and the coronagraph.

域. 观测结束后, 切断气球与降落伞之间的连接, 整个系统由降落伞带回地面.

二级平台是一个地平式支架. 包括观测设备和数据采集设备在内的日冕仪系统安装在二级平台上. 原则上, 二级平台可允许日冕仪系统水平转动 360° , 俯仰角上下 90° 转动. 在实际观测中, 由于一级平台可以在太敏的配合下找到太阳的方位, 误差在 $\pm 1^\circ$ 以内, 所以一级平台和太敏找到太阳之后, 在水平方向上, 只需要操作二级平台将望远镜指向这个方位, 然后在 $\pm 1^\circ$ 的范围之内调整指向即可; 同时, 因为太阳出现在地平线之上我们才能够观测, 所以只需要日冕仪的俯仰角在 $0\text{--}90^\circ$ 之间变化, 配合方位角的微调, 就可以对太阳进行精确定位.

本文将详细介绍日冕仪系统和地面实验过程, 一级平台、二级平台以及地面实验完成之后的其他实验, 包括日冕仪在临近空间进行的观测实验将在后续的文章中详细介绍. 日冕仪本身口径为 50 mm , 具有完整的K-冕(图2)成像功能; 成像系统包括光学成像镜组、机械结构、滤光片、偏振片、电动偏振轮及sCMOS相机. 其中, 电动偏振轮为6孔偏振轮, 其中4孔为偏振片, 1孔为平片, 1孔为测暗场的挡片. 具体参数如下: 口径 50 mm , 内视场1.1个太阳半径, 外视场1.5个太阳半径, 中心波长 5500 \AA , 透过带宽(FWHM) 50 \AA , 系统有效焦距 1587 mm , 日冕仪外形尺寸小于 $210\text{ mm}\times 205\text{ mm}\times 1900\text{ mm}$, 光学设计角分辨率为 2.8 角秒, 内视场杂散光强度低于 10^{-5} 日面中心亮度(B_\odot).

4.1 日冕仪光学结构

根据上述要求对日冕仪光学系统进行设计, 系统光路如图5所示. 系统物镜采用非球面设计, 日冕目标经物镜一次成像, 再经场镜进入后端系统, 最后成像在探测器上. 最后两片平片为偏振片和滤光片, 位置在像面前任意位置. 像面需要进行调焦设计, 以补偿前面偏振片和滤光片的厚度导致的焦距偏差. 这里物镜采用非球面形状可以有效提高成像质量, 减少镜片数量, 降低杂散光水平.

根据日冕仪系统像面点列图(图6), 我们发现最大弥散斑的rms直径大约为 $9\text{ }\mu\text{m}$, 小于 $11\text{ }\mu\text{m}$ 的探测器像素尺寸; 另外, 探测器特征频率低于 45 lp/mm (line-pair/mm), MTF在所有视场处均超过 0.49 (图7).

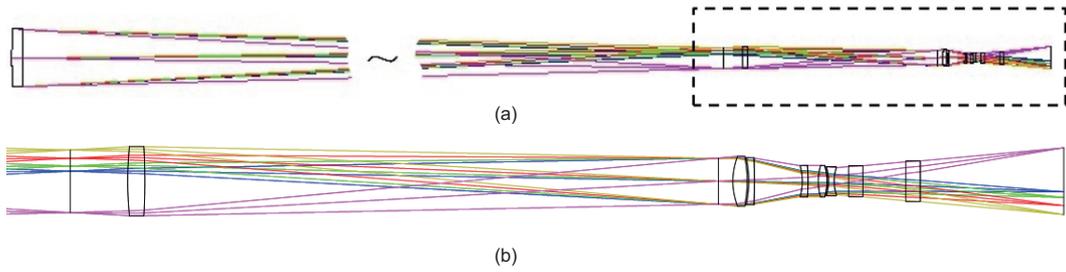


图5 (网络版彩图)日冕仪光学系统结构. (a) 整体光路, (b) 图(a)中虚线框内的内容

Figure 5 (Color online) The structure of the optical system of the coronagraph. (a) The entire optical path; (b) detailed content in the dashed box of panel (a).

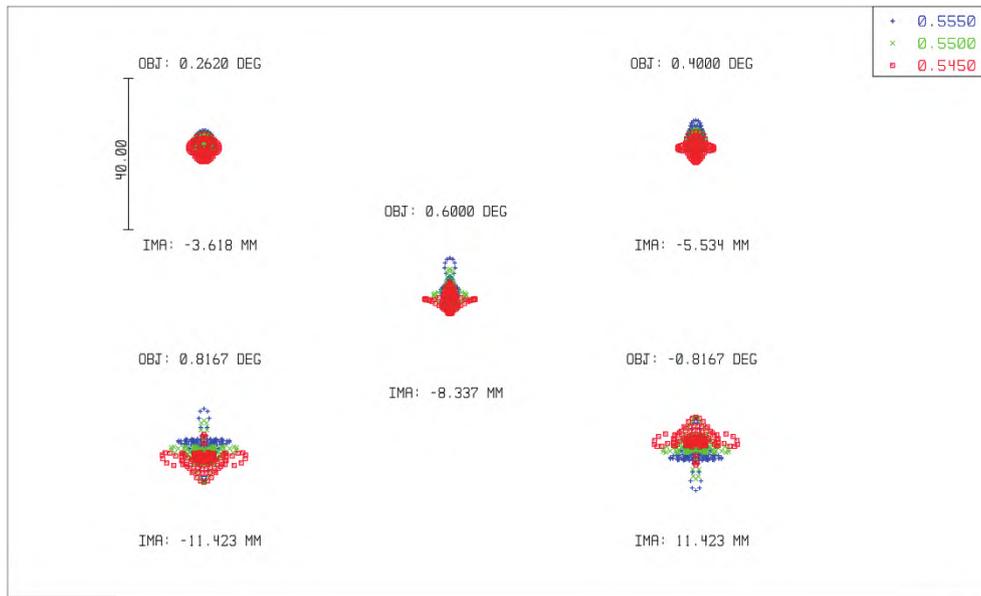


图6 (网络版彩图)光学系统点列图

Figure 6 (Color online) Spot diagram of the optical system.

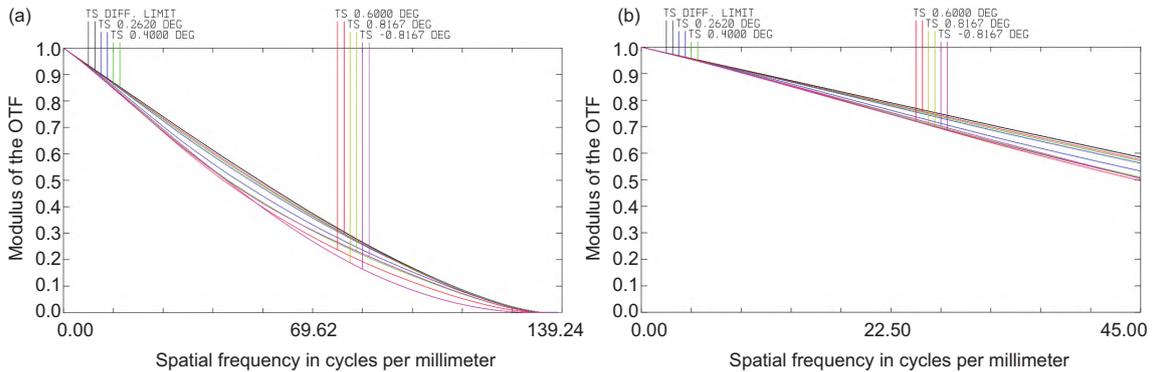


图7 (网络版彩图) (a) 光学系统传递函数; (b) 本光学系统截止频率为45 lp/mm

Figure 7 (Color online) (a) Optical transfer function of the optical system; (b) the cut-off frequency of the optical system is 45 lp/mm.

4.2 杂散光分析与抑制

日冕仪的杂散光主要来自以下6个方面^[42]:

- (1) 来自光球的直射光;
- (2) 在物镜光阑上产生的衍射杂光;
- (3) 入射光在物镜内表面多次反射形成的鬼像;
- (4) 物镜的粗糙表面导致的散射光;
- (5) 各透镜的粗糙表面和划痕导致的散射光;
- (6) 各透镜内部的不均匀性导致的散射光.

其中, (1) 太阳直射光是日冕仪系统中最强的杂散光, 也是其他各类杂散光的产生来源, 对其抑制的方法为利用内掩体进行遮挡; (2)和(3)两种杂散光通常采用共轭遮拦或聚焦遮拦的抑制方法, 即利用成像镜组对衍射杂光和鬼像进行成像或聚焦, 并在其聚焦位置处添加光阑或挡板进行遮挡; (4)–(6)三种杂散光, 通常需要对玻璃材料进行仔细筛选, 并对其表面进行精细抛光来进行抑制.

根据上述设计方案, 我们对日冕仪的杂散光水平进行了模拟计算. 结果如图 8(a) (不考虑光学系统的光洁度造成的影响)所示: 最强位置衍射杂散光约为 $9.2 \times 10^{-7} B_{\odot}$, 在大约 $1.2 R_{\odot}$ 附近降低到 $5.2 \times 10^{-7} B_{\odot}$, 在外视场达到 $8.7 \times 10^{-8} B_{\odot}$. 如果光学镜面具有一定的粗糙度, 比如假定前后表面的表面粗糙度均为rms 0.4 nm, 计算得到总杂散光强度分布如图 8(b)所示: 杂散光最强位置在 $1.065 R_{\odot}$, 强度约为 $1.2 \times 10^{-6} B_{\odot}$, 而外视场杂散光强度则达到 $3.2 \times 10^{-7} B_{\odot}$.

不过, 上述措施只能抑制日冕仪光学系统本身所产生的杂散光, 不包括系统外空气分子和气溶胶的贡献. 如果空气中气溶胶含量过高, 日冕仪视场内的杂散光水平会超过 $10^{-5} B_{\odot}$; 另外, 这些气溶胶颗粒还会黏附在物镜表面, 进一步提高杂散光水平. 高海拔地区的空气密度和气溶胶含量比海平面明显下降, 适合日冕观测. 而在临近空间的浮空平台上, 空气分子和气溶胶的影响会进一步降低(见图 2以及相关公式), 是观测日冕较为理想的环境. 一般来说, 为了尽可能地降低空气中尘埃和气溶胶的影响, 在每次观测之前, 都要对物镜进行认真的擦拭.

4.3 日冕仪机械结构设计

日冕仪的机械结构设计主要遵从以下原则: 首先满足功能要求原则, 一切机械结构设计都围绕日冕仪的基本功能要求展开. 其次是满足强度和刚度的设计准则, 零件截面尺寸的变化应与其内应力变化相适应, 使各截面的强度相等; 另外, 按等强度原理设计的结构, 材料可以得到充分的利用, 从而减轻重量、降低成本; 而且, 为保证日冕仪在使用期限内能正常地实现其功能, 必须要求日冕仪的机械结构有足够的刚度. 最后, 还必须满足加工工艺和装配工艺的设计原则. 结构设计的结果对产品零部件的生产成本及质量有着举足轻重的影响, 因此, 在结构设计中应该力求产品具有良好的加工工艺性; 同时, 装配是产品制造过程中的重要工序, 零部件的结构对装配的质量、成本有直接的影

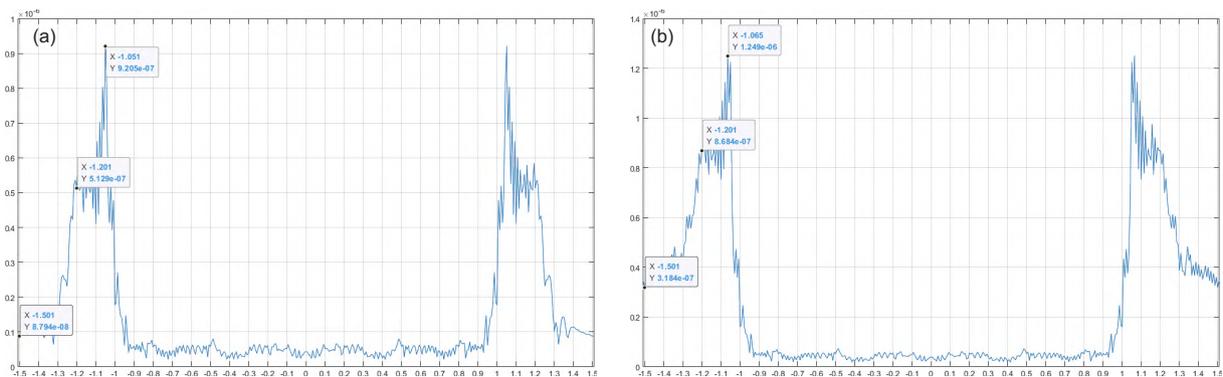


图 8 (网络版彩图) (a) 理想光滑镜面组成的日冕仪光学系统的杂散光水平; (b) 非理想光滑镜面组成的日冕仪光学系统的杂散光水平

Figure 8 (Color online) (a) The stray light level of the coronagraph composed of ideal smooth lenses; (b) the stray light level of the coronagraph composed of non-ideal smooth lenses.

响,因此在结构设计时必须合理地划分装配单元,以方便各零部件的安装调试和拆卸,保证各零部件都能够被准确地安装到指定位置.

4.3.1 机械结构整体设计方案

球载日冕仪整机布局采用内、外双层圆柱筒结构,如图9所示.外层圆柱筒结构为整机提供稳定可

靠的“骨架”,保证整机结构的刚度和强度满足日冕仪的光机性能要求;内层圆柱筒结构主要用于正确安装日冕仪光学元件,保证各个光学元件都处于其设计位置范围内.整机设计尺寸1900 mm × 248 mm × 276 mm (长×宽×高),重心轴线方向位置为距物镜前表面定点850–950 mm范围内,整机质量不大于45 kg.

如图10所示,球载日冕仪机械系统主要包括镜头保护盖组件、前消杂光组件、主镜组件、前承载筒组

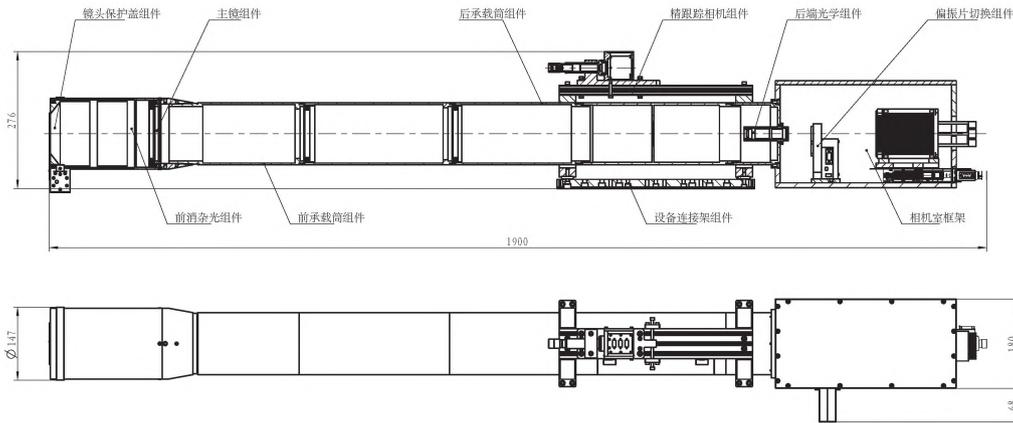


图9 球载日冕仪整机结构二维示意图

Figure 9 Two-dimensional diagram of the global structure of the balloon-borne coronagraph.

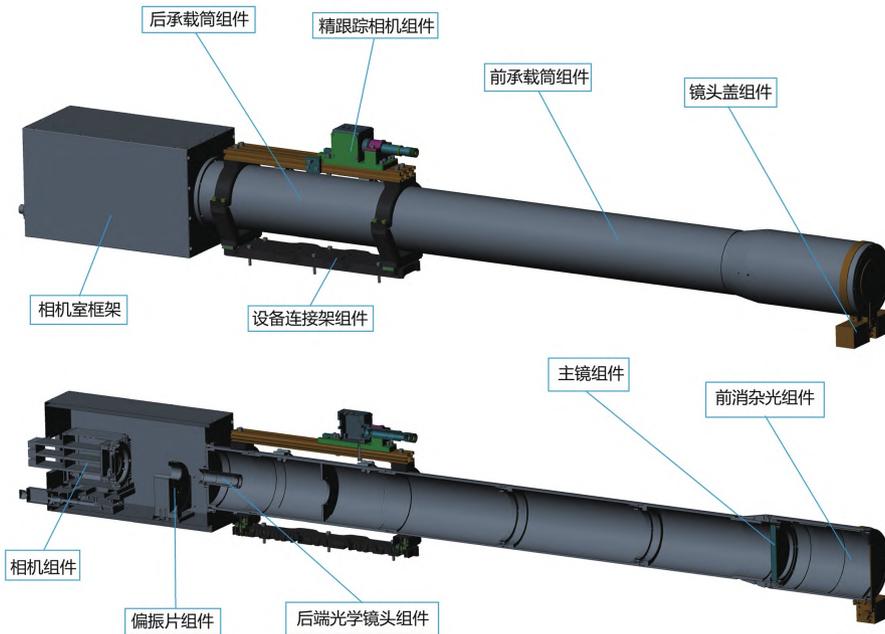


图10 (网络版彩图)球载日冕仪整机结构三维示意图

Figure 10 (Color online) Three-dimensional diagram of the global structure of the balloon-borne coronagraph.

件、后承载筒组件、后端光学镜头组件、偏振片切换组件、相机组件、相机室框架和设备连接架组件等. 其中, 前承载筒和后承载筒构成了日冕仪的外层圆柱筒结构; 主镜组件和后端光学镜头组件构成了日冕仪的内层圆柱筒结构. 各组件之间通过止口定位, 保证各光学元件所需的同轴度精度, 通过螺钉连接实现各组件之间的简单可靠连接.

4.3.2 主要组件设计方案

(1) 主镜组件结构设计

参考国外的设计方式, 同时结合国内已有的成功经验, 主镜组件由主镜、主镜座和主镜压圈构成, 如图 11 所示. 主镜材料为熔石英, 中心厚度 15 mm, 主镜组件的结构设计主要考虑主镜在装、拆过程中对表面的清洁度要求很高, 不能用吸盘等传统安装透镜所用工具, 因此, 为主镜设计了独立镜座, 可以避免在拆装主镜时接触到主镜的表面. 主镜压圈将主镜可靠地压紧在主镜座上. 主镜组件通过止口与前消杂光组件保证同轴定位, 通过螺钉将主镜组件与前消杂光组件固定为一体. 镜座与螺钉均为铝材.

(2) 后端光学镜头组件结构设计

后端光学镜头组件为球载日冕光学系统的重要组成部分, 其结构主要包括场镜、内掩体、内掩体座、视场光阑、场镜镜筒、Lyot光阑、小镜筒等. 这些零件和组件均安装于后端组件承载结构当中, 精跟踪相机架在这个结构之上(图 10). 场镜镜筒为后端光学镜头组件的固定座, 它与后端承载筒通过止口定位并通过

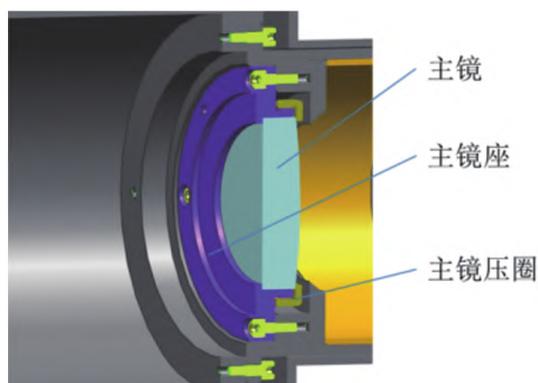


图 11 (网络版彩图)望远镜主镜组件示意图

Figure 11 (Color online) Schematic diagram of the objective lens assembly of the telescope.

螺钉固定连接, 小镜筒内的透镜组安装完成后作为一个整体与场镜镜筒进行装配. 内掩体座与场镜通过胶粘固定为一整体, 内掩体与内掩体座通过圆柱配合定中心, 通过螺纹连接固定, 装调时内掩体能沿着光轴方向前后调整一定距离. 视场光阑通过止口与场镜镜筒进行同轴定位, 并通过螺纹连接固定. 这部分光学零件的材质都是石英, 机械构架为铝材.

(3) 镜头保护盖组件结构设计

镜头保护盖主要用于保护观测设备在未启动时免受运输、升空过程中灰尘等杂物对透镜表面的损伤. 保护盖机械结构如图 12 所示, 由盖子、压圈、硅胶圈、转轴、减速电机、限位开关、开关座、电机座、抱箍、外壳组成. 除硅胶圈、减速电机和限位开关外, 均采用密度较低的铝合金材料制作, 并做了表面氧化处理. 盖子、压圈、硅胶圈组成镜头盖开合机构, 减速电机通过转轴带动镜头盖开合机构运动, 实现镜头盖的关闭/打开. 限位开关探测盖子所处位置, 给控制系统反馈; 硅胶圈为耐低温柔性材料, 保护盖关闭时, 在电机扭力作用下紧密接触镜筒并发生一定程度形变, 实现对镜筒的密封; 整体机械部分通过抱箍与望远镜对接. 镜头盖机械部分安装于镜筒上, 电控部分安装于电机下靠近工控机的位置. 二者间通过一根 5 m 长度的驱动线连接.

镜头保护盖电控系统集成于一个方形金属盒内, 接收来自上位机的控制指令, 驱动机械系统上安装的电机按照指令进行运作. 系统按操作周期进行控制. 控制信号给到驱动电路上, 驱动电路产生电机驱动信号, 通过驱动线给到机械系统的电机上. 在电机带动镜头盖达到限位后, 控制信号改变, 驱动电路停止. 此时完成了一个控制周期, 电控系统待机等待上位机下一步

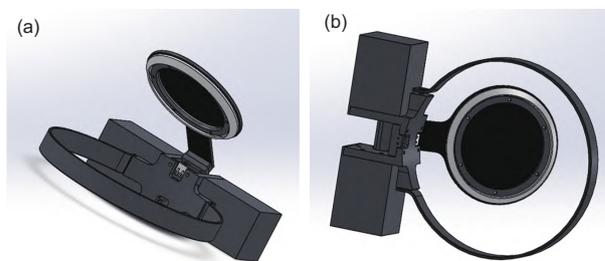


图 12 (网络版彩图)从不同角度看到的镜头保护盖. (a) 从侧边看; (b) 从底部看

Figure 12 (Color online) The telescope lid seen from two viewpoints. (a) Seen from the side; (b) seen from the bottom.

指令. 图 13描述了镜头保护盖的控制行为逻辑.

(4) 设备连接架组件结构设计

设备连接架组件主要用于将日冕仪固定到设备承载平台上, 要求结构稳定可靠, 操作简捷. 如图 14所示为球载日冕仪的设备连接架结构示意图(上面架着精跟踪相机), 结构由固定底板、支座和压块构成, 采用V型压紧固定方式, 即将日冕放置于沿轴向布置的两个V型支座上, 由两个V型压块将日冕仪压紧在设备连接架组件上, 通过底板将日冕仪固定安装到设备承载平台上. V型压块的顶部配有一块铝合金的精跟踪相机安装件(图 14黄色部分所示).

(5) 偏振片切换组件选型

日冕仪的光学系统中, 在相机前位置需要加装偏振切换组件, 该组件包括偏振片转轮、偏振片、挡光板等. 偏振转轮为6孔, 其中4个孔为偏振片, 1孔为平片, 1孔为挡光板(相当于快门作用), 偏振片切换组件

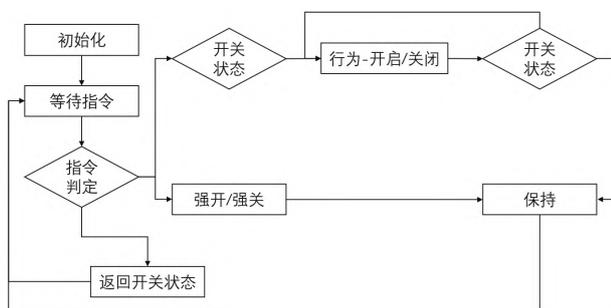


图 13 镜头保护盖控制行为逻辑

Figure 13 The controlling action logic of the telescope lid.



图 14 (网络版彩图)日冕仪设备连接架组件结构实体图. 上面架着的是精跟踪相机(绿色单元)

Figure 14 (Color online) The component of the base for the guide telescope mounted on the coronagraph. The green unit is the guide telescope.

机械结构为爱特蒙特产品, 其参数如表 2所示. 注意: 尽管偏振片的工作温度在 $0\sim 60^{\circ}\text{C}$ 之间, 而球载日冕仪的飞行高度在 30 km 以上, 环境温度在 -50°C 左右, 我们也不需要专门考虑偏振片的保温问题. 原因有二: 首先, 整个日冕仪镜筒已经做了保温处理, 最低温度在零摄氏度附近; 其次, 偏振片与sCMOS处于同一个相机室当中, sCMOS工作时发热, 还要进行降温处理(见4.5节最后两段的内容).

(6) 相机调焦装置选型

日冕仪在使用时需要调焦, 以便获得光学系统最清晰的图像, 球载日冕仪的相机调焦装置选用三英精控(天津)仪器设备有限公司的ETS-30R型产品, 产品的详细参数如表 3所示. 该装置采用步进电机驱动滚珠丝杠传动方式带动相机做平行光轴方向的直线运动, 导轨采用交叉滚柱导轨, 导向精度高, 承载能力强.

考虑到球载日冕仪观测期间临时调焦不方便(需要安装一体积较大的控制盒, 浮空平台所能提供的空间有限, 难以安装), 我们会在球载日冕仪升空前, 在地面根据平飞环境的空气温度和密度调好焦距, 并将其固定住, 在飞行过程中不再调焦.

4.3.3 日冕仪承载结构受力分析

日冕仪呈细长型, 在使用过程中所承受重力载荷会使得日冕仪两端发生相对倾斜, 因此, 必须保证结构的形变量小于光学系统所要求的公差值. 本项目对物镜相对场镜的倾斜度公差要求不大于 $\Delta = 1'$, 物镜与场镜之间最小距离为 $L = 1241\text{ mm}$, 因此整机的最大允许挠度变形量为: $\delta = L\Delta = 0.36\text{ mm}$.

日冕仪工作状态时两端最大相对倾斜变形产生于光轴处于水平面时的工况, 因此, 只要日冕的光轴处于水平面内时其最大变形量小于 0.36 mm , 其余工况也会

表 2 (网络版彩图)偏振片切换组件参数

Table 2 (Color online) Components of the polarizer wheel

参数	数值	图片
光透镜种类	圆形	实物图
孔数	6	
重复精度($^{\circ}$)	± 0.25	
整体尺寸	139×55×111	
连接器	USB Female Micro A	
响应时间(s)	0.8	
使用温度	0-60	

表3 (网络版彩图)相机调焦装置参数

Table 3 (Color online) Parameters of the unit for tuning the camera focus

参数	数值	图片
型号	ETS-30R	实物图
行程(mm)	30	
螺杆导程(mm)	1	
最大速度(mm/s)	10	
分辨率(8细分)(μm)	0.625	
重复定位精度(μm)	5	
步距角($^\circ$)	1.8 $^\circ$	
中心负载(kg)	10	

满足要求. 利用ANSYS workbench 14.0对整机结构进行力学分析, 先将日冕仪的真实构形进行必要的简化, 得到如图 15(a)所示的模型.

模型构建的方式如下: 在日冕仪的设备连接架组件的底板面上施加固定约束, 施加竖直向下的标准重力加速度; 将相机组件以及偏振片切换组件的重量简化为对其固定面的静力50 N, 方向与重力场方向一致; 将防护盖组件简化为对应位置的静力20 N, 方向与重力场方向一致. 然后对各零件赋予相应的材料硬铝的属性, 图 15(b)为对计算模型划分完有限元网格的结果, 图 15(c)为有限元分析变形结果图, 图 15(d)为有限元分析应力结果图.

图 15(c)表明, 球载日冕仪的最大变形为0.0172 mm, 远小于设计要求的0.36 mm, 因此, 结构具有足够的刚度, 球载日冕仪在使用过程中发生的变形在容许范围之内. 图 15(d)表明, 球载日冕仪力学应力为0.853 MPa,

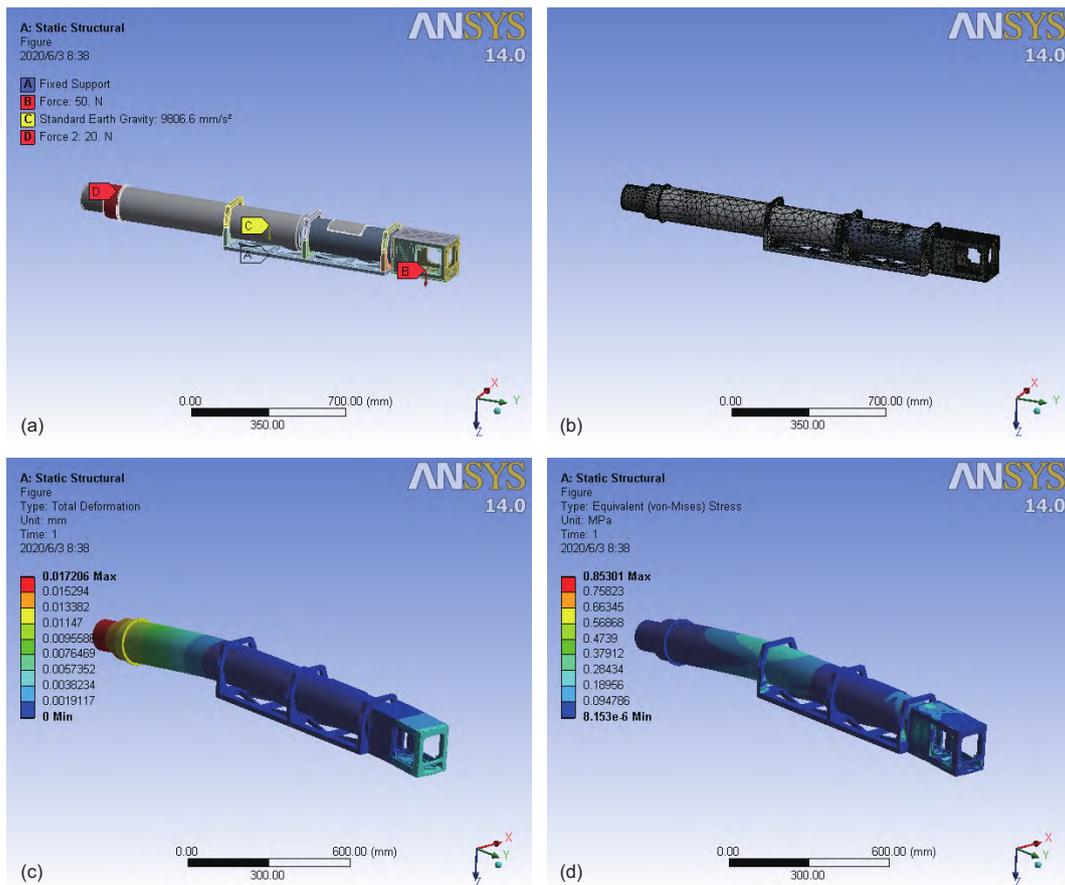


图 15 (网络版彩图)用有限元方法对日冕仪系统进行力学分析. (a) 日冕仪有限元分析模型; (b) 有限元分析网格划分结果; (c) 有限元分析变形结果; (d) 有限元分析应力结果

Figure 15 (Color online) The mechanical analysis of the coronagraph system carried out by the finite element method (FEM). (a) Finite element model of the coronagraph; (b) coronagraph meshed by FEM; (c) results of deforming the coronagraph by FEM; (d) results of the stress analysis for the coronagraph via FEM.

远远小于硬铝合金的屈服强度, 不会产生塑性变形, 结构具有足够的强度. 表 4给出了镜筒的本征频率, 包括1个基频和9个高次谐频.

4.4 系统杂散光的检测

本日冕仪杂散光抑制水平指标参考值为在距离日心 $1.1 R_{\odot}$ 的位置处不高于 $10^{-5} B_{\odot}$. 对于本日冕仪来说, 最根本的杂散光来源为太阳直射光, 所以, 杂散光的强度受制于太阳直射光强度; 于是抑制了直射光也就抑制了仪器中的各类杂散光. 为了评估日冕仪抑制杂散光的能力, 我们定义一个参数, $A = E(\theta)/E_j$; 其中, $E(\theta)$ 代表采取所有抑制手段之后, 杂散光在系统像面上的分布, E_j 代表无抑制措施时太阳直射光在像平面上的平均照度. 因此, A 值大小实际上就是系统杂散光的相对强度值, 相比于点源透过率或杂光系数等其他杂散光评价指标, 该指标在日冕仪系统中的意义更加明确, 且易于和信号光强度进行直接比较.

实际的检测在山东大学(威海)的专用于日冕仪研制和检测的千级超净暗室中进行, 检测原理如图 16所示. 该装置中模拟太阳光源选择将氙灯光源发出的光聚焦在特殊设计的开口光阑处, 经乳白玻璃匀化后通过平行光管获得视场角为 $\pm 16'$ 、光度均匀地模拟太阳光, 将其照射至位于13 m外的日冕仪, 此时日冕仪视场中拍摄到的暗环境处的光即为仪器杂散光. 记录杂散光灰度值和曝光时间, 然后去除日冕仪内掩体, 用日冕

表 4 日冕仪镜筒的本征频率

Table 4 The eigenfrequencies of the coronagraph tube

模式	频率 (Hz)	模式	频率 (Hz)
1	49.749	6	360.36
2	52.931	7	370.11
3	139	8	461.54
4	147.8	9	466.11
5	278.9	10	716.99

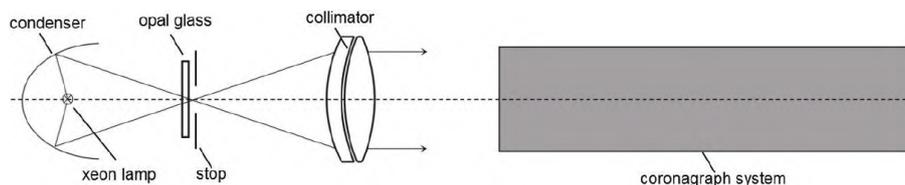


图 16 50 mm球载日冕仪杂散光检测原理示意图

Figure 16 The schematic descriptions of the principle of the stray light inspection of the 50 mm coronagraph.

仪直接对模拟光源成像, 在光源处放置 10^{-5} 倍的衰减片, 采用同样的曝光时间对像面进行拍摄, 得到模拟光源图像灰度值. 将杂散光的灰度值与模拟太阳光源的灰度值做对比, 可得到一比例系数, 此时系统杂散光抑制水平为衰减片的衰减量级与该比例系数的乘积. 日冕仪的杂散光检测图像如图 17所示. 图 18给出杂散光强度在1.1和1.5太阳半径处随方位角的变化.

从图 17可以看出, 日冕仪杂散光量级在内视场处的最大值约为 $2.6 \times 10^{-6} B_{\odot}$, 在外视场时约为 $1.5 \times 10^{-6} B_{\odot}$, 因此可以判定日冕仪的总体杂散光水平优于 $2.6 \times 10^{-6} B_{\odot}$, 满足项目所定指标.

4.5 日冕仪控制系统

一个完整的日冕仪观测系统包括日冕仪系统和控制系统. 日冕仪系统已经在前面的章节中做了介绍, 本节主要介绍控制系统. 该系统集成在两台完全相同的工控机当中(图 19), 其中工控机1的功能较为单一, 主要任务是采集和处理来自精跟踪相机的全日面太阳像数据, 然后将结果发给控制二级平台的单片机, 调整日冕仪指向从而实现闭环的指向跟踪系统. 工控机2用以控制以下设备: (1) 科学数据采集相机(sCMOS, 负责图像采集、数据存储和备份); (2) 滤镜轮(通过不同滤光片和偏振片的切换, 获取包含偏振信息的日冕图像); (3) 镜头保护盖(开合); (4) 电动调焦.

我们选用的工控机是无风扇工控机, 供电电压12 V, 供电功率60 W. 它具有以下优势: (1) 体积较小, 巧妙地将计算机的主要部件整合在机箱内; (2) 性能优良, 无风扇整机主要采用的是凌动高性能低功耗系列CPU, 不仅具有良好的性能而且发热量也比较低, 高端的无风扇整机也可采用英特尔i3/i5/i7高性能处理器, 性能强悍; (3) 功能丰富, 由于无风扇整机采用封闭式机箱, 扩展功能有限, 但其预留的接口比较多, 还预

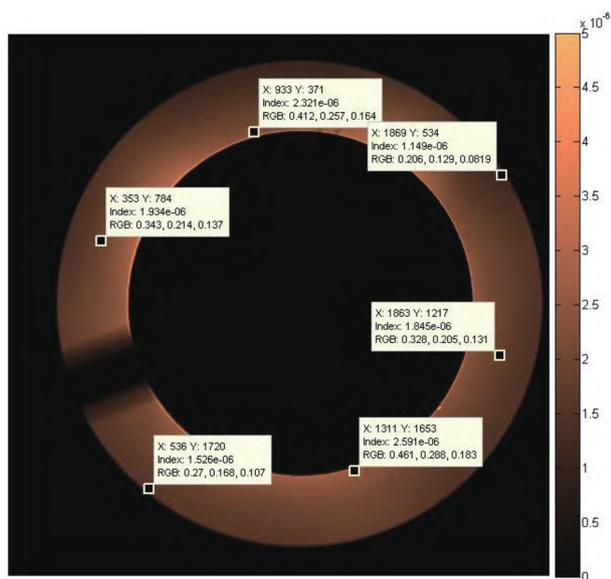


图 17 (网络版彩图) 50 mm日冕仪的杂散光检测结果图像
 Figure 17 (Color online) Image for the results of inspecting stray light of the 50 mm coronagraph.

留了2-12个USB接口和2-12个串口, 适合于各种工作环境; (4) 特性突出, 科学合理的合金机箱设计, 不仅可以防尘、防潮、防震, 工作温度范围可达-40°C-80°C, 另外还具备较强的抗电磁干扰能力。

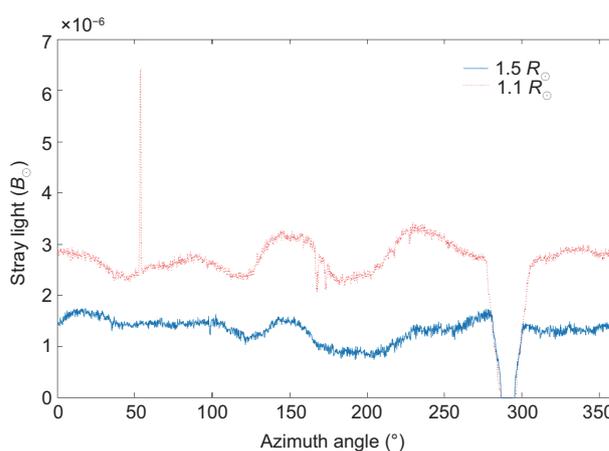


图 18 (网络版彩图)在1.1和1.5太阳半径处杂散光(单位: $10^{-6} B_{\odot}$)随方位角的变化
 Figure 18 (Color online) Variations of the stray light strength in units of $10^{-6} B_{\odot}$ versus the azimuth at 1.1 and 1.5 solar radii.

本项目使用的工控机型号是研华ARK-2250L-A2. 图 20(a)是厂家提供的产品. 我们定制了可在低温环境中正常工作的工业级固态硬盘, 工作温度在-40°C-80°C范围内. 另外, 为了保证工控机在高空低温低压环境中正常工作, 我们还对工控机的外观和接口进行了加固和改进, 使得所有接口满足航空标准(图 20(b)).

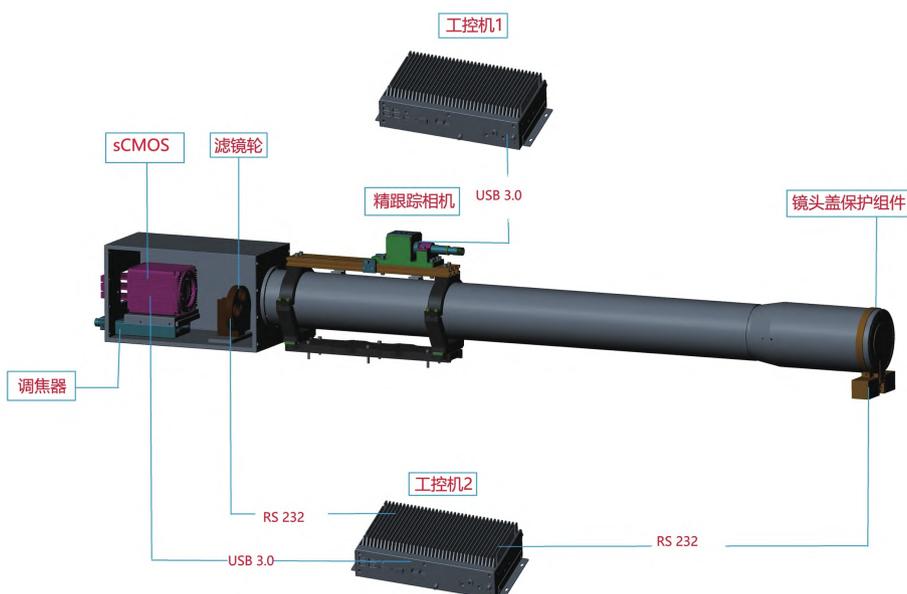


图 19 (网络版彩图)两台工控机各自负责控制日冕仪不同部件的运转
 Figure 19 (Color online) Two computers control the running of different units of the coronagraph.

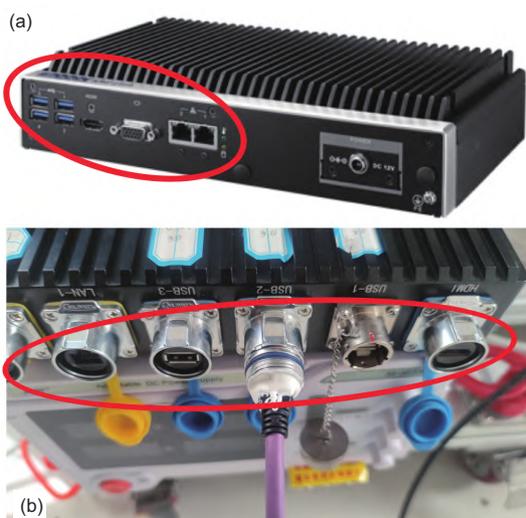


图 20 (网络版彩图) CONTEC工控机市场产品(a)与根据球载设备需求改装过后、接口达到航空标准的工控机(b)

Figure 20 (Color online) The product of the CONTEC computer for general market (a), and the same product (b) with the modified outlets of the Aviation Standards required for the balloon-borne instruments.

精跟踪相机是一个大视场相机, 它可以将整个太阳像纳入其视场, 通过工控机1内部的FPGA计算单元, 确定太阳像的质心在视场中的位置, 然后通过串口将太阳中心实际位置的信息输出给控制二级转台的工控机, 由工控机发出指令, 调整位于二级转台上的日冕仪的指向, 确保日冕仪光轴总是指向日心. 同时, 被相机

获取的太阳像也可以实时送到地面控制系统, 让地面观测人员随时掌握观测系统对太阳的跟踪状态, 也可以将观测数据储存起来供进一步分析研究. 图 21是精跟踪相机外形图, 图 22是其工作原理图以及与各信号接收端之间的联系.

本项目使用的科学数据采集设备为福州鑫图光电有限公司为我们定制的Dhyana 95V2-YNTT sCOMS(图 23), 属于在Dhyana 95V2标准产品基础上的定制产品, 其基本指标包括: 像元尺寸 $11\ \mu\text{m}$, 像面大小 $22.5\ \text{mm} \times 22.5\ \text{mm}$, 像素数 2048×2048 .

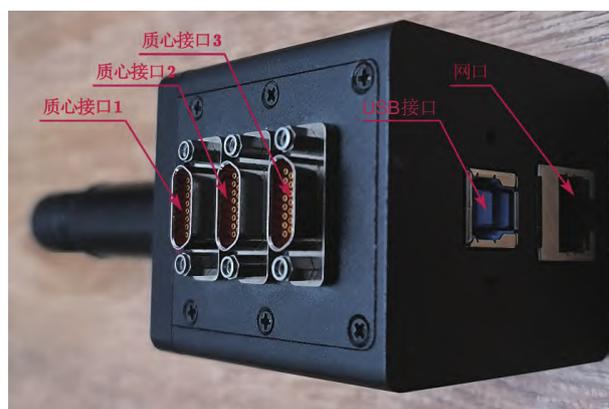


图 21 (网络版彩图)精跟踪相机外形图及数据和通讯接口

Figure 21 (Color online) The outline and outlets of data and communication of the guide telescope.

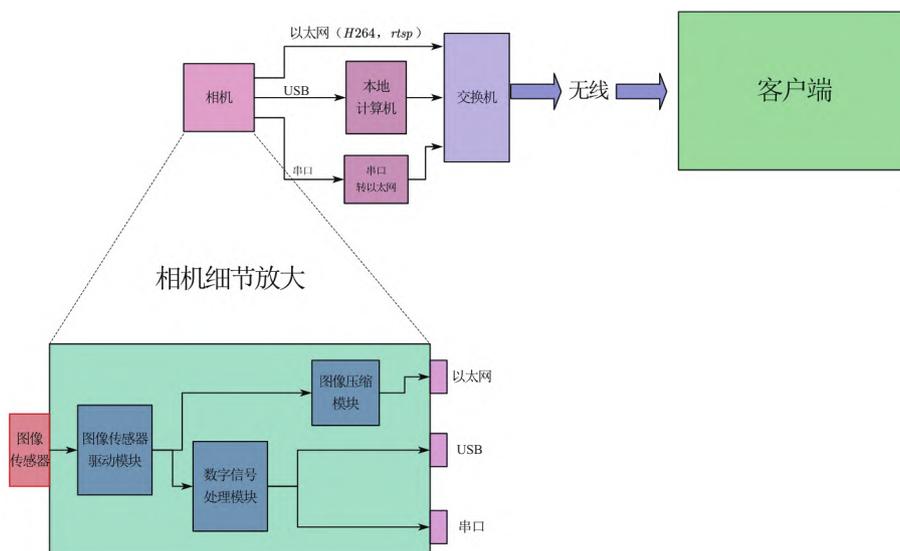


图 22 (网络版彩图)精跟踪相机工作原理图

Figure 22 (Color online) Sketch of the way of the guide telescope works.

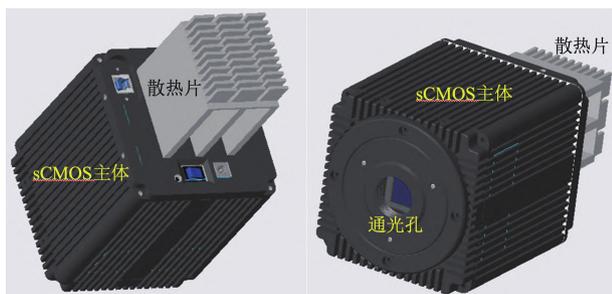


图 23 (网络版彩图) Dhyana 95V2-YNTT sCMOS外观图, 体积(长宽高): 100 mm×100 mm×204 mm (其中外部散热器高度77 mm)

Figure 23 (Color online) The outline of Dhyana 95V2-YNTT sCMOS with volume of 100 mm×100 mm×204 mm and the height of the outside radiator of 77 mm.

由于在距离地面30 km的平流层当中空气非常稀薄, 标准产品使用的风冷降温方式失效, 因此需要将标准产品上的风冷部件拆除, 专门设计和安装辐射金属片, 达到辐射致冷的效果. 经过改装之后, 该相机可在如下的环境中正常运行: 海拔高度: 30 km, 环境温度: -55°C – 30°C , 储存温度: -25°C – 40°C , 储存湿度: 0–85%.

4.6 球载日冕仪热控系统

球载日冕仪将在距离地面30 km的平流层当中工作, 这里的环境温度在 -50°C 左右, 与地面附近的差异非常大, 日冕仪上的光机电设备的性能会受到严重影响. 镜筒内的光学系统零部件受到的影响尤为明显. 为了保证日冕仪在这样严酷的环境中能够正常工作, 必须为日冕仪系统, 特别是镜筒部分配置保温装备, 或者热控系统. 根据日冕仪的光学性能和其中零部件特性, 我们要求日冕仪在浮空工作期间, 其镜筒内部的温度保持在 0°C 附近, 最低不超过 -5°C .

日冕仪镜筒用硬质铝合金制成, 导热性很好, 环境温度发生变化时, 内外温度会很快趋于一致. 我们采取以下几个措施来保证镜筒内的温度控制在日冕仪工作范围内: 首先在镜筒上贴加热片, 然后用隔热棉将镜筒包裹起来, 最后在隔热棉外面包上隔热铝箔, 既可以防止热量外泄, 也可以反射太阳光照, 在最大程度上保持镜筒内的温度恒定(图 24).

为了将温度保持在仪器正常工作范围之内, 热控系统不仅仅具有加热功能, 还需要随时探知仪器的温度, 并及时启动和停止加热功能: 仪器温度低于正常工

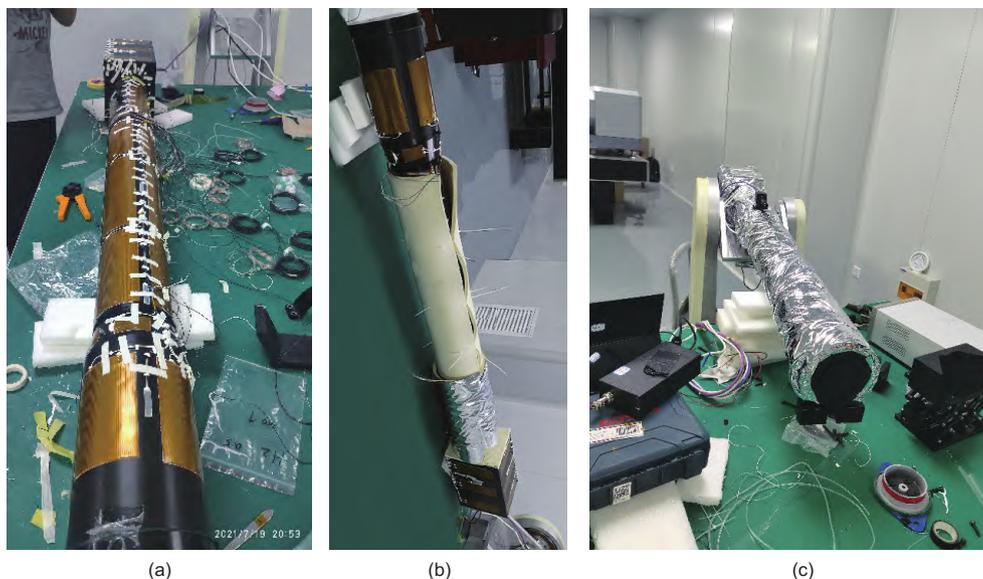


图 24 (网络版彩图)球载日冕仪热控系统加热与隔热保温单元. (a) 将加热片贴在镜筒上; (b) 加热单元外面包裹隔热保温棉; (c) 最外面再用反光铝箔包裹

Figure 24 (Color online) Heating and heat insulation units of the thermal control system of the balloon-borne coronagraph. (a) Stick heating components to the coronagraph tube; (b) the heating units are wrapped by the thermal insulation cotton; (c) the outmost layer is the aluminium foil for reflecting the sunshine.

作的温度范围时,启动加热功能;仪器温度处于正常工作范围、甚至高于这个温度范围时,停止加热功能.因此该系统应该具备以下功能:(1)多通道测温(在本项目的温控系统中,一共有12个测温通道);(2)温度数据实时采集;(3)数据采集周期不长于10 s;(4)多通道控温(一共有12个控温通道);(5)温度报警;(6)自动存储温度数据;(7)设备轻巧、便携.

为实现上述功能,需要配置能够通过低频电缆与被测系统连接的相应器件,包括与测温通道数相同数目、具备温度记录功能的传感器(热敏电阻),相同数目的、具备记录加热状态功能的加热器,以及数据采集、保存、控制处理软件.在飞行期间,该软件能记录所有测温数据,测温间隔5–10 s,能保证长时间稳定、正常工作;在飞行结束之后,数据可导出读取,供进一步分析研究.

根据日冕仪光机电性能,要求温度控制在 $-5^{\circ}\text{C}\pm 3^{\circ}\text{C}$ 的范围内.对热控系统的上述配置可满足这样的温控需求,由一路+28 VDC/250 W功率电源供电,单路加热器功率在10–20 W之间,电流 $\leq 1\text{ A}$.

4.7 数据存储与安全备份系统

临空观测对数据的采集和存储方式与地面观测和空间观测有所不同,需要有与之相适应的方法.地面观测只要保证观测设备和数据存储设备工作正常,对准目标持续观测并将数据储存起来即可,不需要对数据进行远程传输;空间观测则必须适时将数据传回地面,否则无法获得观测数据.临空观测对数据存储的要求介于二者之间,观测数据可以先存在置于浮空平台上的存储设备当中,观测结束之后与其他设备一起回收;另外,虽然平流层极少有湍流,但仍有空气流动,而浮空平台没有动力,随气流运动,望远镜的状态也可能发生变化.因此,有必要随时将浮空平台监控图像和望远镜观测图像传回地面,供操作人员及时了解浮空平台状态,必要时对望远镜和两个平台的状态进行调整.

根据球载日冕仪的这些特点和要求,我们在这里介绍数据存储与安全备份系统.除了由日冕仪系统获得观测数据并对数据进行存储之外,日冕仪与存储设备之间的数据传输也是球载望远镜系统需要考虑的一个重要环节.由于低温环境下大温度梯度及重力场变化的耦合作用,会导致接口损坏、电缆外表皮破裂、

断裂等状况,给数据传输带来不便,需要认真设计数据传输系统.另外,在平台上升、下降过程中,自身震动和低温、低气压、重力变化等因素也会影响数据存储系统,还需要做好数据备份系统(图 25).

我们使用RAID1技术来进行数据的存储和备份.为防止因驱动器故障而丢失数据,RAID1技术使用多台驱动器,以磁盘驱动器集合的形式提供数据保护,采用从多个驱动器提供输入/输出(I/O,图 26),对数据进行存储和备份.当一台驱动器出问题时,另一台驱动器上的数据可用作备份,而且RAID1控制器可以继续通过镜像中正常运行的磁盘来满足主机的请求.

针对球载日冕仪的工作环境,我们使用USB3.0耐低温传输线.数据量可根据sCMOS的规格和观测需求估计出来,然后确定所需要的数据存储和备份设备的规格.如前所述,本日冕仪所使用sCMOS的像元数 2048×2048 ,位深16位,单帧图像大小8 MB,图像输出帧率0.3 FPS,按工作时长8 h计算,累计数据量为: $8\times 0.3\times 3600\times 8/1024=67.5\text{ GB}$.因此,一块容量为

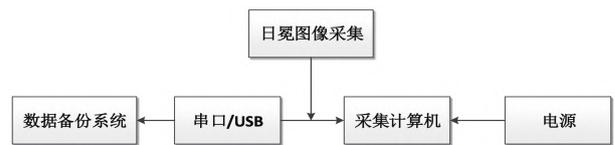


图 25 数据采集和存储系统总体框架图

Figure 25 The global structure of the system for collecting and storing of the data.

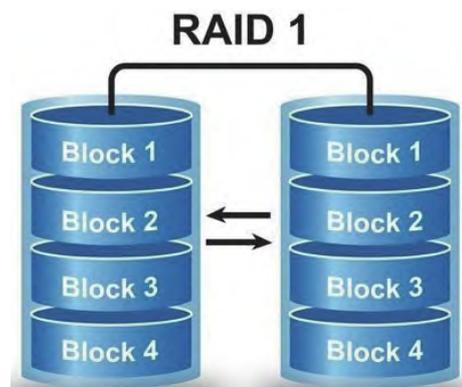


图 26 (网络版彩图) RAID1存储备份系统逻辑结构设计示意图

Figure 26 (Color online) Sketch of the logical structure designed for the RAID1 back-up system.

500 GB或以上的硬盘足以胜任这部分的数据存储需求。

为了降低存储设备损坏或受到外界干扰导致数据丢失的风险,我们在进行上述数据存储的同时,也同步进行数据安全备份.这也是大数据时代的一种数据安全策略,保护重要数据的最佳方式.一般来说,备份可以分为三个层次:硬件级、软件级、人工级.硬件级是指用硬件来保证数据的连续运行.比如磁盘镜像、双机容错等方式.软件级是将数据保存到其他介质上.人工级备份最为原始、简单、有效,但费时、费力.本设计采用硬件级磁盘阵列和软件级数据拷贝方式.RAID是一种把多块独立的硬盘按不同的方式组合起来形成一个硬盘阵列,从而提供比单个硬盘更高的存储性能和提供数据备份技术(图 26).数据备份的功能是在用户数据一旦发生损坏后,利用备份信息可以使损坏数据得以恢复,从而保障了观测数据的安全性.数据存储与安全备份单元的结构设计如图 27所示.

4.8 远程控制及数据传输系统

球载日冕仪系统整体及各部分逻辑关系如图 28所示,其中各个部分的构成和功能在前面已经做了介绍,这里介绍当日冕仪在浮空平台上工作的时候,地

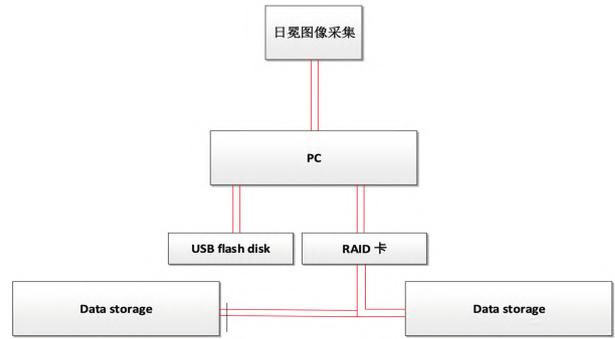


图 27 (网络版彩图)数据存储与安全备份单元结构示意图
Figure 27 (Color online) Sketch for structures of components of the datum storage and security back-up.

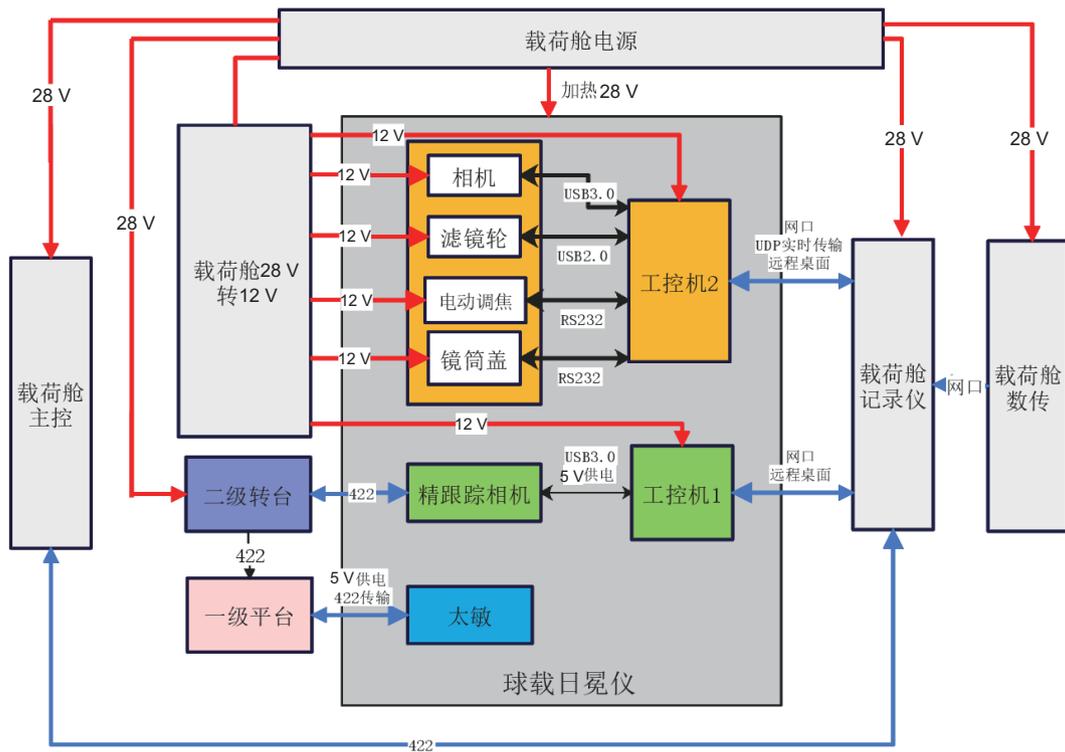


图 28 (网络版彩图)球载日冕仪系统整体及各部分逻辑关系示意图

Figure 28 (Color online) The sketch of the balloon-borne coronagraph ensembling and various components, as well as their logical connections to one another.

面操作人员控制和监视其工作状态、并进行数据传输的方式. 这些任务由远程控制及数据传输系统承担, 负责目标跟踪与数据传输, 保证实现整个观测控制的流程, 并进行可视化的操作以及观测数据传输、存储和备份.

首先, 目标跟踪的任务由精跟踪相机承担, 这台相机架在日冕仪镜筒之上(图 14, 21 和 22), 其光轴与日冕仪光轴平行, 具有较大的视场. 在正式观测开始之前, 先通过一、二级平台的联动将日冕仪指向太阳, 通过观测人员干预, 让精跟踪相机找到太阳, 使太阳完全进入其视场当中(图 29(a)), 也部分或完全进入日冕仪视场; 再经过指向微调, 将太阳像调到日冕仪视场中心, 让挡板将太阳圆面完全挡住(图 29(b)), 然后锁定指向、开启自动跟踪, 开始正式观测. 图 29(b)中间的阴影因挡光板形成, 太阳圆面过来的直射光被挡住; 周围的亮环则是由进入日冕仪镜筒的杂散光形成.

在上述人工干预精跟踪相机和微调日冕仪指向, 最终将太阳圆面完全遮挡的过程中, 需要进行浮空平台与地面之间的通讯联络, 进入正式观测之后, 也需要通讯联络和数据传输. 如图 30所示, 浮空平台和地面通讯是通过微波无线电点对点的传输方式进行, 总的带宽大致在8 Mbps.

利用远程桌面系统传输数据是常用的遥测通讯方式, 简单易用, 市场上有现成的产品, 在本项目中用于一、二级平台的目标捕捉和对准的操作过程. 但是观测数据的传输部分不能使用远程桌面系统, 因为数据

量大, 而且不能压缩, 远程桌面系统会很快将通讯带宽全部占满, 导致通讯瘫痪. 所以, 我们为数据传输开发了专用的客户端系统, 将需要传输的数据压缩之后再传输, 成功解决了通讯带宽被占满、通讯中断的问题.

首先是精跟踪相机的数传. 作为球载系统的视觉导航单元, 精跟踪相机承担着对目标(太阳)的追踪定位功能, 它通过不断输出太阳质心坐标为二级转台提供实时转向信息; 同时为了便于地面监视浮空平台上跟踪系统对全日面太阳像质心的跟踪状态, 该相机也具备实时视频推流功能, 可通过仅占500 kbps的极低通讯带宽的方式向地面推送图像以及太阳像质心信息.

结合球载日冕仪系统对各终端有低功耗、低重量、小体积、低数据传输带宽的需求, 本项目对精跟踪相机单元做了如下设计: 尺寸: 55 mm×50 mm×55 mm; 功耗: 5 W (图 21). 该相机还是一个独立运行的嵌入式系统, 探测器采集到太阳图像信息之后, 在其系统内部即可实时地进行太阳图像质心计算, 以及视频图像的H264硬件压缩. 太阳像质心计算的结果通过三个J30J接口给浮空平台上工控机、二级转台、日冕仪采集系统提供速率为80 Hz且精度为0.1角秒的质心信息.

同时为了便于地面适时监测, 相机还将视频的H264压缩结果以15 fps的速率通过网口向地面客户端推送, 并通过TCP/IP的方式以2 Hz的速率向地面发送质心预览数据(图 22). 为了充分展示相关数据、

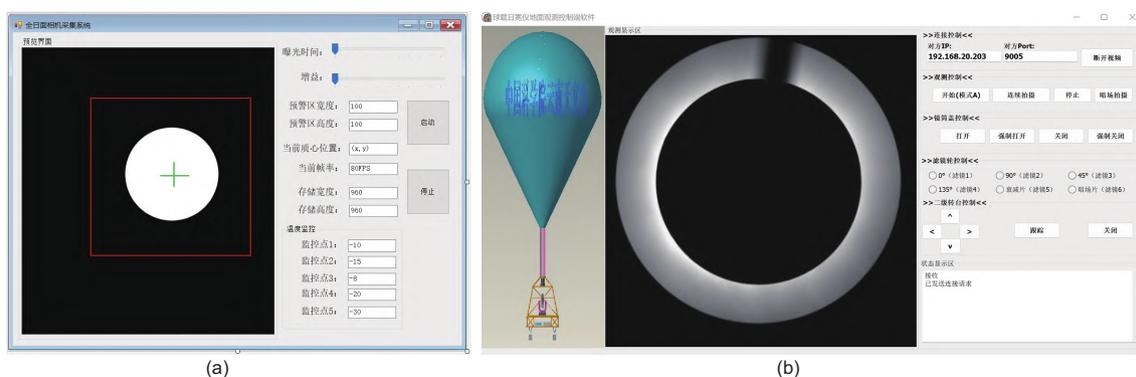


图 29 (网络版彩图) (a) 在精跟踪相机控制软件界面上看到的全日面像; (b) 日冕仪控制系统界面上看到的图像, 中间的阴影是挡光板留下的, 周围的亮环由进入日冕仪镜筒的散射光形成

Figure 29 (Color online) The image of the full solar disk seen in the window of the software controlling the guide telescope (a), and the image shown in the window of the software controlling the balloon-borne coronagraph (b). The shadow in the middle is the occulting disk of the coronagraph, and the bright ring around is from the stray light entering the tube of the telescope.

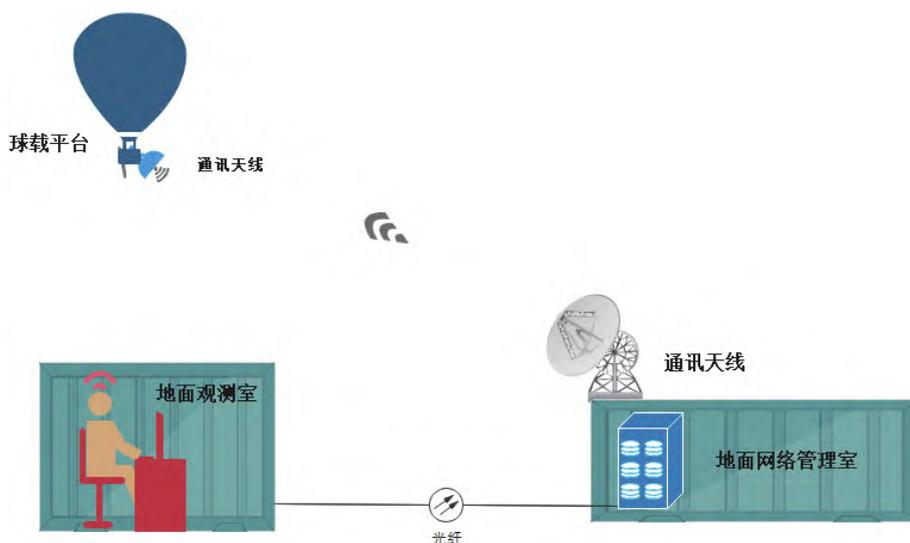


图 30 (网络版彩图)浮空平台与地面系统远程遥测通讯示意图

Figure 30 (Color online) Sketch of the telecommunication between the balloon and the system on the ground.

图像信息,我们也开发了与相机配套的地面客户端软件,并提供推流图像的显示、相机基本参数(基准点、曝光值、阈值等)的设置.经过这样的升级改造之后,由精跟踪相机采集的全日面数据就可以顺畅适时地从浮空平台传到地面控制系统.

其次是日冕仪观测数据的实时或适时传输.针对上述通过远程桌面开启日冕仪数据采集占有通讯带宽过大的问题,我们提出基于422链路及RTSP推流服务器的球载日冕仪控制和数据传输方案(图 31).通过对球载平台上的本地计算机进行RTSP服务搭建,对采集到的日冕观测数据进行RTSP码流转换,同时进行实时的压缩(压缩比待后期实验确定),然后通过搭建Nginx/RTMP服务器经无线链路对地面观测系统进行推流.地面观测电脑可以通过浏览器或者VCL进行实时拉流和播放观测到的数据.另外,地面观测计算机还可以通过无线的422链路对球载日冕仪上的其他硬件设备进行控制及状态的显示等(图 31(a)).

在做图像处理任务时,一个很常见的需求就是读取采集相机RTSP码流做识别,可以抽帧检测,也可以一帧一帧检测,还可以进行压缩等处理,再将处理过的图片串成视频流,在客户端进行显示.可在网页端显示的比较成熟的方案是RTMP流,因此,我们的方案是用OpenCv读取日冕仪采集相机的RTSP码流,分成两路,一路作为原始数据进行本地存储,另一路进行压缩

等图像处理之后,串成RTMP码流,通过无线链路在客户端显示(图 31(b)).

因为要将压缩处理过的图片串成RTMP码流,需要搭建一个RTMP服务器;其次,由于无法对sCMOS数据采集相机进行硬件的实时压缩和推流(类似监控摄像头)功能再改造,所以采用在球载工控机上进行Nginx服务器的搭建,通过FFMPEG读取处理后的图像并进行RTMP推流.另外,地面观测计算机可以通过无线的422链路对球载日冕仪上的其他硬件设备进行控制及状态的显示等.经过测试,以这套系统传输日冕观测数据所要求的数传系统带宽上限在1 Mb左右,极大地降低了对数传系统带宽的需求.

5 日冕仪地面观测实验

图 10所示的日冕仪主体装配完成之后,我们进行了三次地面观测实验,以检验日冕仪的成像和杂散光抑制效果.这三次地面实验中的头一次在云南省丽江市高美古云南天文台观测站进行,时间是2021年1月15日至1月29日;后两次在四川省稻城县无名山云南天文台观测站进行,时间分别是2021年2月23日至2月28日和2021年4月2日至4月13日.丽江观测站(图 32)海拔3200 m,地理位置(E100°2', N26°42');稻城无名山观测站(图 33)海拔

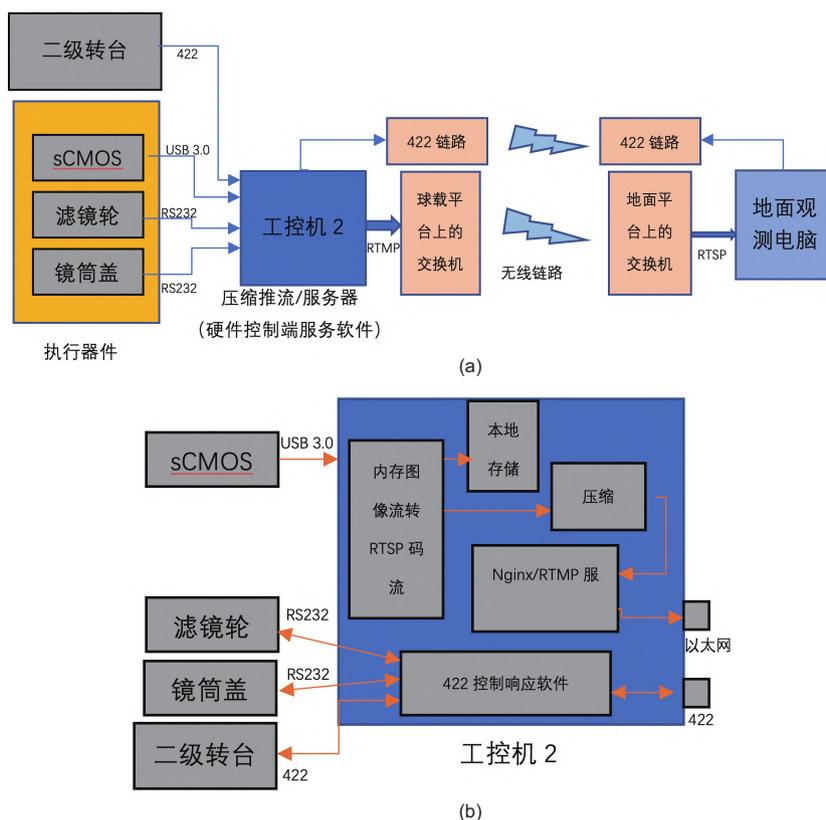


图 31 (网络版彩图) (a) 基于422链路及RTSP推流服务器的球载日冕仪控制和数据传输方案; (b) 工控机2的主要功能及其控制的相应设备和器件

Figure 31 (Color online) (a) The control and data transmission plan for the balloon-borne coronagraph based on 422 link and RTSP upstream server; (b) main functions of industrial computer 2 and the corresponding facilities under its control.



图 32 (网络版彩图)云南天文台丽江观测站日冕仪观测楼。50 mm白光日冕仪的第一次地面观测实验在该观测楼进行。远处背景是玉龙雪山

Figure 32 (Color online) The building of the coronagraph at the Lijiang Station of the Yunnan Observatories, at which the first ground experiment of the 50 mm white-light coronagraph was conducted. The distant background is the Jade Dragon Mountain.

4750 m, 地理位置(E100°6', N29°6'), 目前有1号(图 33(a))和2号(图 33(b))两个观测点, 彼此相距大约 10 km.

在丽江的地面观测实验于2021年1月18至28日进行, 没有获得理想的观测结果. 分析之后发现是跟踪系统不达标, 而且日冕仪挡光板漏光. 针对这些问题, 我们将日冕仪和赤道仪送回实验室进行全面检测和整修. 2021年2月18日, 经整修后的日冕仪完成实验室检验和调试, 具备再一次开展地面观测实验的条件. 我们将第二次地面观测实验的地点放在四川省稻城县无名山观测站2号点(图 33(b)), 正式观测于2月24日开始.

经过对日冕仪系统的综合调试, 于2月27日下午3点左右, 成功观测到了白光日冕(图 34(a)), 并获得了相应的观测数据, 实现了我国白光日冕观测零的突破! 作为对比, 我们在图 34(b)当中展示了大约 10 h 之后由美国高山天文台夏威夷 Mauna Loa 太阳观

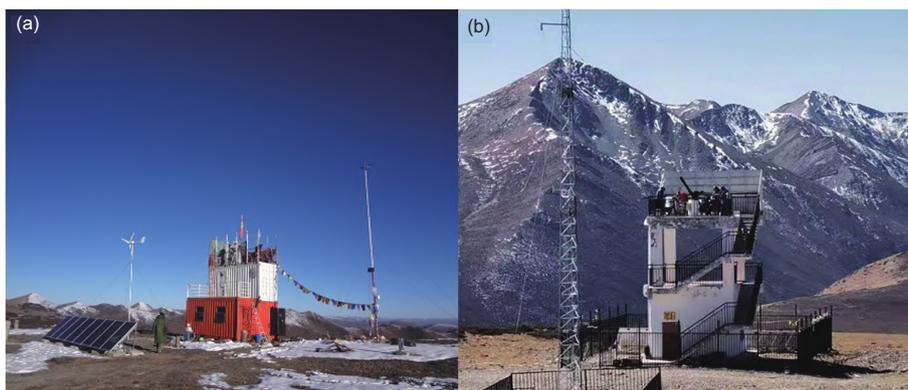


图 33 (网络版彩图)云南天文台在稻城无名山观测站的1号点(a)和2号点(b). 球载日冕仪的第二、三次地面观测实验在2号点进行

Figure 33 (Color online) Sites 1 (a) and 2 (b) of the Wumingshan Station of Yunnan Observatories. The second and third experiments of the balloon-borne coronagraph on the ground were conducted at site 2.

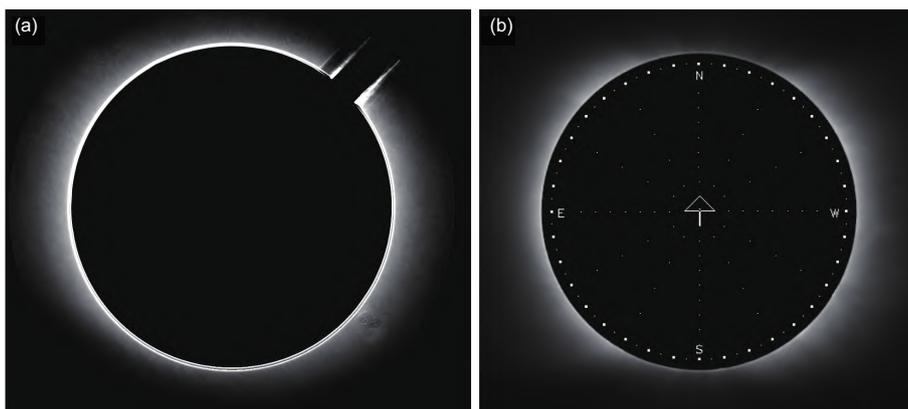


图 34 (a) 由本项目研发的50 mm口径白光日冕仪于2021年2月27日下午3点左右在四川稻城无名山2号观测点获得的白光日冕像. 作为对比, 我们也展示了Mauna Loa太阳观测站在大约10 h之后获得的日冕照片(b). 二者展示的日冕特征基本一致, 即太阳两极附近白光日冕辐射较弱, 而其他区域辐射显著增强. 图(a)右上角的柄状物为日冕仪内部挡板支撑杆所成的像. 两台日冕仪的口径、工作波长、透过带宽、观测时刻等参数的不同, 导致两张照片所包含的细节有不同

Figure 34 The white-light image of the corona obtained by the 50 mm white-light coronagraph at site 2 of the Wumingshan Station, Daocheng, Sichuan at about 3 pm local time on February 27, 2021 (a). For comparison, the white-light image of the corona obtained by the K-cor of the Mauna Loa Solar Observatory, Hawaii, USA about 10 h later was also displayed in panel (b). The overall features of the corona shown by two pictures are consistent, namely white light coronal radiation is weak near the poles of the sun, while the radiation is significantly enhanced in other regions. The handle-like region in the upper right corner of panel (a) is the image of the rod supporting the occulting disk of the coronagraph. Difference in some details exists because the apertures, working wavelengths, passbands, and the time of observations of two instruments are different.

测站的20 cm白光日冕仪(K-cor)拍摄到的白光日冕像. 我们注意到尽管二者在一些细节上有些差别, 但主要轮廓是一致的. 而二者的差别源于两地18个小时的时差, 也来源于K-cor的口径为20 cm, 比球载日冕仪的口径大, 而且它的工作中心波长是7350 Å, 透过带宽为 ± 150 Å, 均明显超过球载日冕仪. 由于观测波段选取的不同, 对杂散光的抑制效果也不同. 这些经验值得

我们在今后的工作中借鉴. 球载日冕仪的工作环境比地面要好, 有助于观测结果质量的改善.

在上述观测过程中, 天空背景的平均亮度在10 ppm左右^[43]. 这说明空气中气溶胶含量很低, 杂散光较弱, 有利于在地面上观测日冕. 由于偏振片在观测过程中发生松动, 导致其偏振光轴发生错位, 最终没能获得具有科学研究价值的偏振观测数据.

第二次地面观测实验于2月28日结束,日冕仪再一次被送回实验室进行检修和保养.经过一个多月的检修、完善和升级,我们于2021年4月2日至13日将日冕仪带到稻城进行了第三次地面观测实验,再一次获得了清晰的白光像,同时还获得了具有科研价值的日冕偏振数据(见文献[43]).球载日冕仪连续两次对日冕进行的地面观测实验取得成功,说明稻城是一个优良的太阳观测址点,可供我们开展高质量、高水平、高精度的观测研究;也说明我们已经掌握了研制白光日冕仪的关键技术.

6 总结与展望

海平面以上20–100 km的区域被称为临近空间.这里空气非常稀薄,没有足够的浮力支撑普通飞机在这里飞行;而对于高速飞行的卫星而言,这里的空气阻力以及由此导致的摩擦会让卫星迅速坠毁.这是一片“飞机上不去、卫星下不来”的区域,气球和飞艇是唯一能够进入这片区域并滞留的飞行器.与地面观测和利用卫星平台观测太阳相比,在临近空间进行观测具有其独特的优势和特点.首先,这里处于平流层当中,不受天气变化的影响,总是晴空万里,与外太空的观测条件十分接近.其次,操作相对容易,不需要过于复杂的测控、通讯和数据传输系统;观测数据既可以实时传回地面,也可以保存在浮空平台上的存储设备当中,观测结束之后随其他设备一起回收.再次,各种设备在观测结束之后能够回收,可以针对观测中出现的问题对这些设备进行升级换代,重复使用,降低观测和研究成本.鉴于此,欧美国家和苏联都进行过,而且仍然在临近空间开展对太阳的观测.

在中国科学院战略性先导科技专项(A类)“临近空间科学实验系统”总体技术项目预先研究课题的支持下,云南天文台承担了子课题“日冕仪临近空间搭载实验”的研发和观测任务;在山东大学(威海)的协助下,成功研制了我国第一台白光日冕仪.这是一台口径为50 mm的折射式、内掩式日冕仪,工作波长为5500 Å,透过带宽 ± 25 Å;视场内半径 $1.10 R_{\odot}$,外半径 $1.50 R_{\odot}$.仪器杂散光抑制水平(在可见光波段)可达到ppm量级,以观测内日冕为主.这台日冕仪将装载在由氦气球悬挂的浮空平台之上,在海拔30 km左右的临近空间对白光日冕(K-冕)进行观测.

本任务的主要科学目标为观测内日冕磁场结构和等离子体分布,追踪太阳爆发过程的早期表现以及对低层日冕的扰动.理论与观测研究均表明,驱动太阳剧烈爆发的能量事先储存在中低日冕层内的磁场结构中,而且这些结构的高度越低,其内部结构就越复杂,最终产生的爆发就越激烈[23–25].有的时候,这些结构当中较高的部分可以进入日冕仪的视场,让我们能够观测和了解它们在中高日冕层当中的特征和表现,为构造太阳爆发模型提供更多的观测依据,并对模型中的自由参数进行更多与实际环境相符的限制.

作为太阳物理重大问题之一,日冕加热问题的解决,也在很大程度上依赖于对日冕磁场和等离子体结构的认知.目前得到普遍认可的两种机制,MHD加热[34–36]和纳耀斑(磁重联)加热[31–33,44],是否有效、在什么环境中有效受到周围环境中的宏观磁场位形的限制:如果相关区域中的磁场具有开放结构,那么MHD波可以在较大的范围内加热日冕;如果磁场的结构是闭合的,加热的范围就会受到限制.而纳耀斑则不受这个限制,在闭合和开放的磁场结构中都可能发生,只要这些结构具有扭缠或者重叠的特征.日冕仪的观测结果可帮助我们大致确定相关区域中日冕加热的主要机制.

除了观测准静态的日冕磁场结构之外,本日冕仪还可以在监测太阳爆发过程中的磁结构的演化方面发挥作用.理论研究表明,CME的主要加速过程和内部扭缠结构的释放基本上都发生在太阳表面以上几万km至几十万km的高度范围内[26–30],正好可以被日冕仪视场所覆盖,太阳爆发处于高度动力学演化阶段的关键观测资料可以被本日冕仪所获得.

为了实现上述科学目标,也为了容易安装在浮空平台上并方便操作,本文所介绍的日冕仪采用了传统的透射式内掩体结构,将所有光学部件置入一刚性圆筒内.考虑到由地面上升到海拔30 km高度的过程中,环境温度变化较大,可从常温下降到 -50°C 左右,为了最大限度地降低环境温度变化对光学系统的影响,我们给日冕仪镜筒添加保温装置,将镜筒内的温度保持在 0°C 附近,变化幅度在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 之内.我们还定制了数据采集设备(sCMOS相机),以辐射冷却方式代替了原来的风冷方式,保证相机在空气稀薄的环境中能够得到有效冷却;同时,根据日冕仪进行科学观测时所处的周围环境,置于浮空平台上的控制设备(工控机)也进行

了符合航空标准的改装,使其各个接口不会因为环境温度和气压的变化而发生松动。

日冕仪获得的观测数据将存储在置于工控机当中的数据硬盘里,为了防止意外或者在观测设备回收的过程中硬盘损坏,我们在存储观测数据的同时也对这些数据做了备份,存在另外的一个硬盘当中。为了让地面观测人员实时掌握日冕仪的工作状态(包括太阳跟踪状态和数据采集状态),必要时及时采取相应措施,精跟踪相机和日冕仪获得的观测数据也需要定时传回地面。由于为数据传输和对浮空平台进行测控的所配备的信号传输通道带宽有限,需要将平台上的数据压缩之后才能够顺利传回地面。我们为此专门研发了两套数据压缩系统,一套针对精跟踪相机观测数据,另外一套针对日冕仪观测数据;在可接受的失真水平附近,精跟踪相机的数据压缩率在500倍左右,日冕仪数据压缩率为80倍,既可保证传回地面的图像的失真度在容许范围内,也可保证浮空平台在飞行过程中数据传输链路畅通,各种数据能够按要求正常传输。

我们利用地面观测实验对日冕仪的基本性能进行了检测。由于日冕仪对观测址点的环境和空气质量的要求较高,我们选择在云南天文台高海拔、低纬度的两个观测站,丽江高美古和稻城无名山,进行地面观测实验。先后一共进行了三次实验,一次在丽江、两次在稻城。由于天气原因,我们在丽江的观测没有取得具有科研价值的资料,但是发现并排除了日冕仪和辅助设

备存在的问题和故障,为下一步的实验做好了准备。

随后两次在稻城进行的实验成功观测到白光日冕,并取得了具有科研价值的观测资料。分析表明,我们的观测资料所揭示的白光日冕信息与美国高山天文台获得的白光日冕观测资料所揭示的信息基本一致^[43];二者差别来源于两地18个小时的时差、仪器口径以及工作波长的不同。能够在地面观测到白光日冕首先说明稻城无名山空气透明度高,几乎无污染,是一个优良的太阳观测址点;其次表明我们在“鸿鹄专项”的支持下研制的50 mm口径白光日冕仪获得了成功,为我们将来研制更加先进的大口径日冕仪和其他太阳观测设备打下了基础,在人才和技术两方面都积累了丰富的资源。

我们接下来的任务是对日冕仪进行一系列的高空环境模拟实验,过载实验,与两个平台和测控系统的对接及相关实验。高空环境模拟实验旨在检验日冕仪在空气稀薄和低温环境中的性能,保证日冕仪在临近空间能够正常工作。冲击试验意在检验日冕仪跟随浮空平台在脱离地面控制、开始上升的初始阶段是否能够承受短时间的过载(4g)。其他实验则是检测装载到浮空平台上的日冕仪和其他辅助设备之间的通讯和互动是否顺畅,能否在地面控制系统的指挥下正常工作。这些实验有的已经完成,有的正在进行,确保球载日冕仪系统届时正常升空并获得具有科研价值的观测资料。我们将在随后的文章中介绍这些工作。

参考文献

- 1 Liu Y X, Song T F, Zhang T, et al. Overview of balloon-borne solar telescope—SUNRISE (in Chinese). *Astron Res Tech*, 2021, 18: 314–336 [刘艳霄, 宋腾飞, 张涛, 等. 欧洲球载太阳望远镜SUNRISE及其相关研究成果简介. *天文研究与技术*, 2021, 18: 314–336]
- 2 Schwarzschild M. Photographs of the solar granulation taken from the stratosphere. *Astrophys J*, 1959, 130: 345–363
- 3 Danielson R E. The structure of sunspot penumbras. I. Observations. *Astrophys J*, 1961, 134: 275–288
- 4 Mehlretter J P. Der Flug von Spektro-Stratoskop. *Sterne und Weltraum*, 1976, 15: 44–47
- 5 Mehlretter J P. Balloon-borne imagery of the solar granulation. II. The lifetime of solar granulation. *Astron Astrophys*, 1978, 62: 311–316
- 6 Wittmann A, Mehlretter J P. Balloon-borne imagery of the solar granulation. I. Digital image enhancement and photometric properties. *Astron Astrophys*, 1977, 61: 75–78
- 7 Krat V A, Dulkan L Z, Karpinsky V N, et al. The third flight of the Soviet stratospheric solar observatory. *Astron Tsirkulyar*, 1970, 597: 1
- 8 Krat V A. On the size of the structure elements in the solar chromosphere. *Sol Phys*, 1972, 27: 39–43
- 9 Krat V A, Karpinsky V N, Pravdjuk L M. On the sunspot structure. *Sol Phys*, 1972, 26: 305–317
- 10 Bernasconi P N, Rust D M, Eaton H A, et al. Balloon-borne telescope for high-resolution solar imaging and polarimetry. *SPIE*, 2000, 4014: 214–225
- 11 Solanki S K, Barthol P, Danilovic S, et al. First results from the SUNRISE mission. In: *Proceedings of the 4th Hinode Science Meeting: Unsolved Problems and Recent Insights*, ASP Conference Series. Palermo, 2012. 143

- 12 Solanki S K, Riethmüller T L, Barthol P, et al. The second flight of the SUNRISE balloon-borne solar observatory: Overview of instrument updates, the flight, the data, and first results. *Astrophys J Suppl Ser*, 2017, 229: 2–16
- 13 Gopalswamy N, Newmark J, Yashiro S, et al. The balloon-borne investigation of temperature and speed of electrons in the corona (BITSE): Mission description and preliminary results. *Sol Phys*, 2021, 296: 1–32
- 14 Dolei S, Spadaro D, Ventura R. Visible light and ultraviolet observations of coronal structures: Physical properties of an equatorial streamer and modelling of the F corona. *Astron Astrophys*, 2015, 577: A34
- 15 Lyot B. The study of the solar corona without an eclipse (with Plate V). *J Royal Astron Soc Canada*, 1933, 27: 265–280
- 16 Wang M X, Ren L X, Lu W X, et al. Size distribution of atmospheric aerosol and its variation with height (in Chinese). *Sci Atmosph Sin*, 1984, 8: 435–442 [王明星, 任丽新, 吕位秀, 等. 大气气溶胶的粒度谱分布函数及其随高度的变化. *大气科学*, 1984, 8: 435–442]
- 17 Xue D T. Studies of altitude distribution of Earth's atmosphere density (in Chinese). *J Vacuum Sci Tech*, 2009, 29: 1–8 [薛大同. 对地球大气密度随高度分布规律的讨论. *真空科学与技术学报*, 2009, 29: 1–8]
- 18 Fernald F G, Herman B M, Reagan J A. Determination of aerosol height distributions by lidar. *J Appl Meteor*, 1972, 11: 482–489
- 19 Sinha H S S, Pandey R, Sharma S, et al. Nighttime E region plasma irregularities over an equatorial station Trivandrum. *J Atmos Sol-Terrestrial Phys*, 2011, 73: 2444–2452
- 20 Liu Q, Quan J, Jia X, et al. Vertical profiles of aerosol composition over Beijing, China: Analysis of *in situ* aircraft measurements. *J Atmos Sci*, 2019, 76: 231–245
- 21 Liu Q, Liu D, Gao Q, et al. Vertical characteristics of aerosol hygroscopicity and impacts on optical properties over the North China Plain during winter. *Atmos Chem Phys*, 2020, 20: 3931–3944
- 22 Hänel A, Baars H, Althausen D, et al. One-year aerosol profiling with EUCAARI Raman lidar at Shangdianzi GAW station: Beijing plume and seasonal variations. *J Geophys Res*, 2012, 117: D13201
- 23 Priest E R, Forbes T G. The magnetic nature of solar flares. *Astron Astrophys Rev*, 2002, 10: 313–377
- 24 Lin J, Soon W, Baliunas S L. Theories of solar eruptions: A review. *New Astron Rev*, 2003, 47: 53–84
- 25 Forbes T G, Linker J A, Chen J, et al. CME theory and models. *Space Sci Rev*, 2006, 123: 251–302
- 26 Lin J, Forbes T G. Effects of reconnection on the coronal mass ejection process. *J Geophys Res*, 2000, 105: 2375–2392
- 27 Lin J. Energetics and propagation of coronal mass ejections in different plasma environments. *Chin J Astron Astrophys*, 2002, 2: 539–556
- 28 Lin J, Raymond J C, van Ballegoijen A A. The role of magnetic reconnection in the observable features of solar eruptions. *Astrophys J*, 2004, 602: 422–435
- 29 Lin J, Soon W. Evolution of morphological features of CMEs deduced from catastrophe model of solar eruptions. *New Astron*, 2004, 9: 611–628
- 30 Lin J, Mancuso S, Vourlidis A. Theoretical investigation of the onsets of type II radio bursts during solar eruptions. *Astrophys J*, 2006, 649: 1110–1123
- 31 Parker E N. Nanoflares and the solar X-ray corona. *Astrophys J*, 1988, 330: 474–479
- 32 Rappazzo A F, Velli M, Einaudi G, et al. Nonlinear dynamics of the parker scenario for coronal heating. *Astrophys J*, 2008, 677: 1348–1366
- 33 Bradshaw S J, Klimchuk J A. Chromospheric nanoflares as a source of coronal plasma. II. repeating nanoflares. *Astrophys J*, 2015, 811: 129–143
- 34 Cranmer S R, van Ballegoijen A A, Edgar R J. Self-consistent coronal heating and solar wind acceleration from anisotropic magnetohydrodynamic turbulence. *Astrophys J Suppl Ser*, 2007, 171: 520–551
- 35 Asgari-Targhi M, van Ballegoijen A A, Cranmer S R, et al. The spatial and temporal dependence of coronal heating by Alfvén wave turbulence. *Astrophys J*, 2013, 773: 111–123
- 36 van Ballegoijen A A, Asgari-Targhi M, Voss A. The heating of solar coronal loops by Alfvén wave turbulence. *Astrophys J*, 2017, 849: 46–69
- 37 Wang T, Ofman L, Yuan D, et al. Slow-mode magnetoacoustic waves in coronal loops. *Space Sci Rev*, 2021, 217: 34–88
- 38 Samanta T, Pant V, Banerjee D. Propagating disturbances in the solar corona and spicular connection. *Astrophys J*, 2015, 815: L16
- 39 Cranmer S R. Low-frequency Alfvén waves produced by magnetic reconnection in the Sun's magnetic carpet. *Astrophys J*, 2018, 862: 6–15
- 40 Samanta T, Tian H, Yurchyshyn V, et al. Generation of solar spicules and subsequent atmospheric heating. *Science*, 2019, 366: 890–894
- 41 Banerjee D, Krishna P S, Pant V, et al. Magnetohydrodynamic waves in open coronal structures. *Space Sci Rev*, 2021, 217: 76–112
- 42 Brueckner G E, Howard R A, Koomen M J, et al. The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO). *Sol Phys*, 1995, 162: 357–402
- 43 Liu Y, Zhang X F, Song T F, et al. Ground experiment of a 50 mm balloon-borne coronagraph for near space project. In: *Proceedings of the Proc SPIE*. Chengdu, 2021
- 44 Mitra-Kraev U, Benz A O. A nanoflare heating model for the quiet solar corona. *Astron Astrophys*, 2001, 373: 318–328

A 50-mm balloon-borne white-light coronagraph: I. Basic structure and experiments on the ground

LIN Jun^{1,2,3*}, SONG TengFei¹, SUN MingZhe⁴, ZHANG Tao¹, XU FangYu¹,
WANG JingXing¹, FU Yu¹, LI Yan¹, KANG KaiFeng^{1,3}, HUANG Min⁵,
LIU Yang⁵, ZHOU JiangHua⁵, ZHANG XiaoJun⁵, XIA LiDong⁴,
ZHANG HongXin⁶, LIU DaYang⁴, SONG HongQiang⁴, TIAN Hui^{7,8},
PI XiaoYu¹, FU HongLin¹, ZHANG XueFei¹, ZHAO MingYu¹, LIU Yu^{1*},
LI YuQiang¹, JIN ZhenYu¹ & SONG HaiJun⁹

¹Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;

²Center for Astronomical Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, China;

⁵Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

⁶Changchun Institute of Optics, Fine Mechanical and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

⁷School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

⁸Key Laboratory of Solar Activity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

⁹Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China

A 50-mm balloon-borne white-light coronagraph was introduced in the study, which was a traditional Lyot coronagraph, with a working wavelength of 5500 Å and a passband of 50 Å for observing the inner corona from 1.08 R_{\odot} to 1.5 R_{\odot} . Dhyana 95V2-YNTT sCMOS was used to collect the observational data. Three experiments were conducted on the ground. The first experiment was conducted at the Gaomeigu Station, Lijiang, Yunnan, and the other two were conducted at the Wumingshan mountain in Daocheng, Sichuan, approximately 4800 m above sea level. The data with scientific significance were obtained in the latter two experiments. Comparison of our data with those obtained by the K-cor of the 20-cm aperture of the High Altitude Observatory at the Mauna Loa Solar Observatory on the same days verified the consistency of the two datasets, indicating the successful development of the white-light coronagraph. The brightness of the background sky indicates that Wumingshan is an ideal high altitude site for solar observations.

near space, coronagraph, observatory site, balloon-borne device, telescope system development, optomechanical structure design, stray light suppression

PACS: 95.10.Gi, 95.55.Ev, 95.75.Rs, 96.60.Pb, 96.60.Wh

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0363](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0363)