

临近空间天文台亚角秒级指向系统 WASP*

崔钰琅 李一健 周江华

(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

(中国科学院大学航空宇航学院 北京 100049)

摘要 WASP (Wallops Arc Second Pointer) 是由美国国家航空航天局 (NASA) 开发的一种临近空间天文台亚角秒级指向系统, 旨在构建可适配多类科学载荷的临近空间天文观测平台. WASP 系统由指向控制系统 (PCS) 和星跟踪子系统 (CARDS) 组成, 该系统结合精密机械和电子组件, 辅以超压气球技术, 能在临近空间执行长时飞行任务, 同时保持亚角秒级的指向精度. WASP 系统的灵活性和标准化设计使其能够适配多种科学载荷, 满足不同的任务需求. 在空间科学领域, WASP 系统的应用不仅拓宽了高空科学气球的研究范围, 也为临近空间天文台的建设提供了创新方案, 推动了对临近空间的探索. WASP 系统的成功试飞和应用, 为其在行星科学、天体物理学和地球观测等领域的应用奠定了基础, 也为中国临近空间科学的发展提供了可靠的参考.

关键词 WASP, 高空科学气球, 亚角秒级指向, 临近空间天文台, 空间科学探测

中图分类号 V11

Arc Second Pointing System of Near Space Observatories WASP

CUI Yulang LI Yijian ZHOU Jianghua

(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

(School of Aeronautics and Astronautics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The Wallops Arc Second Pointer (WASP), developed by the National Aeronautics and Space Administration (NASA) in response to the challenge of sub-arcsecond-level pointing stability for high-altitude scientific balloon platforms during long-duration observational missions, is a near-space observatory-grade sub-arcsecond pointing system designed to establish a multi-payload-compatible near-space astronomical observation platform. Comprising a Pointing Control System (PCS) and a star tracker subsystem (Camera Attitude Reference Determination System, CARDS), WASP serves as the core technology for achieving high-precision fine-pointing control in near-space environments. By integrating precision mechanical and electronic components with super-pressure balloon technology, the system enables extended-duration missions in near-space while maintaining sub-arcsecond-level pointing accuracy. Its modular design and standardized interfaces allow seamless adaptation to diverse scientific payloads,

* 国家自然科学基金项目 (52227811) 和国家重点研发计划项目 (2022YFB3207300) 共同资助

2024-07-29 收到原稿, 2025-02-11 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

fulfilling varied mission requirements. To transition early-stage ground-test hardware and software from laboratory settings to real-world flight conditions, the WASP team collaborated with multiple research groups to conduct five successive test flights. These flights validated the system's technical methodologies and performance capabilities while enabling further optimizations based on operational mission requirements. Following the completion of WASP's development phase, the system has engaged in scientific collaborations with numerous research teams, producing notable achievements. Since 2014, WASP has supported missions including the X-Calibur hard X-ray polarimeter, BITSE (Balloon-borne Investigation of Temperature and Speed of Electrons in the corona), PICTURE-C (Planetary Imaging Concept Testbed Using a Recoverable Experiment-Coronagraph), SuperHERO (Super High-Energy Resolution Observatory), and XL-Calibur, yielding groundbreaking scientific results across astrophysics and planetary science domains. In the field of space science, WASP not only expands the research scope of high-altitude balloon platforms but also provides innovative solutions for constructing near-space observatories, advancing the exploration of near-space environments. The successful test flights and operational deployments of WASP have laid a foundation for its applications in planetary science, astrophysics, and Earth observation, while offering a reliable reference for the development of near-space science in China.

Key words WASP, High altitude scientific balloon, Sub-arcsecond pointing, Near space observatory, Space science exploration

0 引言

临近空间天文台是一种特殊的天文台, 依托于高空科学气球浮空器平台, 工作在距离地面 20~100 km 的临近空间. 该区域位于地球稠密大气层之上, 此处大气密度为地面的 1%~0.1%, 非常接近外太空环境^[1,2]. 轨道望远镜 (例如哈勃太空望远镜^[3]) 能够提供清晰的宇宙图像, 但其成本高达数十亿美元. 而临近空间天文台, 可以将望远镜送至 99% 的地球大气之上, 以获得清晰的宇宙图像, 且成本远低于轨道望远镜^[4]. 美国、法国、欧洲、日本等国家与地区的空间机构都持续使用基于高空气球的临近空间天文台进行大量天文观测任务, 图 1^[1] 给出了国际上部分高空科学气球项目, 其均取得了重要的研究成果^[5]. 临近空间天文台具有发射使用费用较少、准备周期短、载重大、飞行时间长、可回收多次利用、具有较多的发射和飞行窗口等优势, 可以很好地与天基卫星、地基科研平台及其他形式的科研平台相互配合^[6].

由于空间科学研究的深入, 超远距离星体星云逐渐纳入天文观测任务中的主要目标^[7-9]. 为了更好地实现这些天文观测任务, 临近空间天文台需要往高稳定性和高精度控制方向进一步发展, 高精度指向技术则是其中的关键技术^[10-12]. 该技术可以保证科学仪器精确对准超远距离星体星云等目标, 获取高质量的观

测数据^[13].

美国国家航空航天局 (NASA) 于 2011 年开始研制新型的临近空间天文台高精度指向技术系统, 取名为 WASP (Wallops Arc Second Pointer)^[14]. WASP 系统在 2011—2014 年经过 5 次试飞和技术改进, 可为天文观测设备提供亚角秒级指向精度, 能够满足高精度行星探测任务的需求. 同时, WASP 系统采用标准化结构设计, 能够支持多种类型的天文观测仪器, 无需额外工程设计, 极大节省了研发成本^[15].

通过与天文观测各领域科研团队合作, WASP 系统应用于 X-Calibur, XL-Calibur, BITSE, PICTURE-C, SuperHERO 等多个天文观测任务, 在科学观测中实现了亚角秒级高精度指向, 完成了预定科学目标^[16].

1 发展起源

基于高空科学气球的临近空间天文台是空间科学先进国家低成本途径拓展空间科学任务规模的重要选择. NASA 在 20 世纪末提出了两个大型天文观测计划: 超长时间气球计划和南极气球天文计划^[17]. 其目的就是利用临近空间天文台的低成本近太空访问机会, 促进更多大型科学团队进行空间及天文科学研究^[18].



图1 国际部分重要高空科学气球项目

Fig. 1 Important international high-altitude scientific balloon projects

1.1 新型球载吊舱姿态控制方案

与传统的卫星相比, 临近空间天文台的运动特性更为复杂. 其工作环境临近空间依然存在低密度大气, 其产生的大气扰动, 例如大气湍流、重力波、行星波等, 虽然强度不如对流层, 但是作用在体积庞大的临近空间天文台气球球体上, 会产生持续不断的扰动. 这对于需要高精度稳定指向的超远距离天文观测具有较大干扰, 这也是临近空间天文台指向技术实现高精度和高稳定性必须克服的难关.

以往大多数临近空间天文台吊舱指向技术借鉴了航天器的主动姿态控制思路, 利用角动量守恒定律, 通过反作用飞轮或力矩陀螺交换角动量, 实现方位角的调整和控制^[19-21]. 同时, 在绳笼与吊舱处设计反捻装置, 通过转动电机释放扭节的吊绳结构, 起到去耦与卸荷的双重作用. “方位驱动+反捻解耦”是目前临近空间天文台吊舱指向技术的主流方案^[22,23]. 图2所示为德国的SunRISE项目, 其通过这种配合实现了吊舱方位角的精确控制^[24].

实际应用中, 研究发现在扩大临近空间天文台带载能力的过程中, 存在飞轮挤占吊舱有限资源的矛盾. 对于大型重型吊舱, 由于吊舱自身具有大转动惯量, 飞轮为实现较好的控制性能也应具备大质量和大

转动惯量. 而这将导致飞轮挤占整体资源的使用空间、电力资源和载重资源. 这意味着“方位驱动+反捻解耦”方案不完全适用于大型重型吊舱. 因此WASP开发团队为了解决这一矛盾, 设计新型控制方案, 在不使用飞轮的情况下, 实现小于1"的指向精度.

1.2 为科学研究提供通用姿控方案

传统的高空气球飞行任务中, 气球平台提供方通常只提供基础的设备搭载服务, 不提供高精度指向的全套解决方案. 这就给科学研究带来极大麻烦, 研究人员通常并不熟悉气球平台的飞行运动特点. 为了顺利完成科学观测, 往往需要在球载吊舱指向控制方面付出相当大的精力和财力.

为了更好地满足需求, 实现更轻便和精确的稳定指向, 且尽可能满足其通用性, 迫切需要气球平台方开发新型的球载吊舱姿态控制系统, 从根本上优化提高指向精度, 降低研发成本. 而NASA研发的WASP系统, 能够为临近空间天文台提供小于1"的指向精度且持续稳定的指向控制^[13]. 同时, WASP系统能在无需额外工程设计的情况下, 支持多种科学仪器.

2 WASP 系统设计

WASP系统对于球载吊舱的姿态控制, 采用先粗

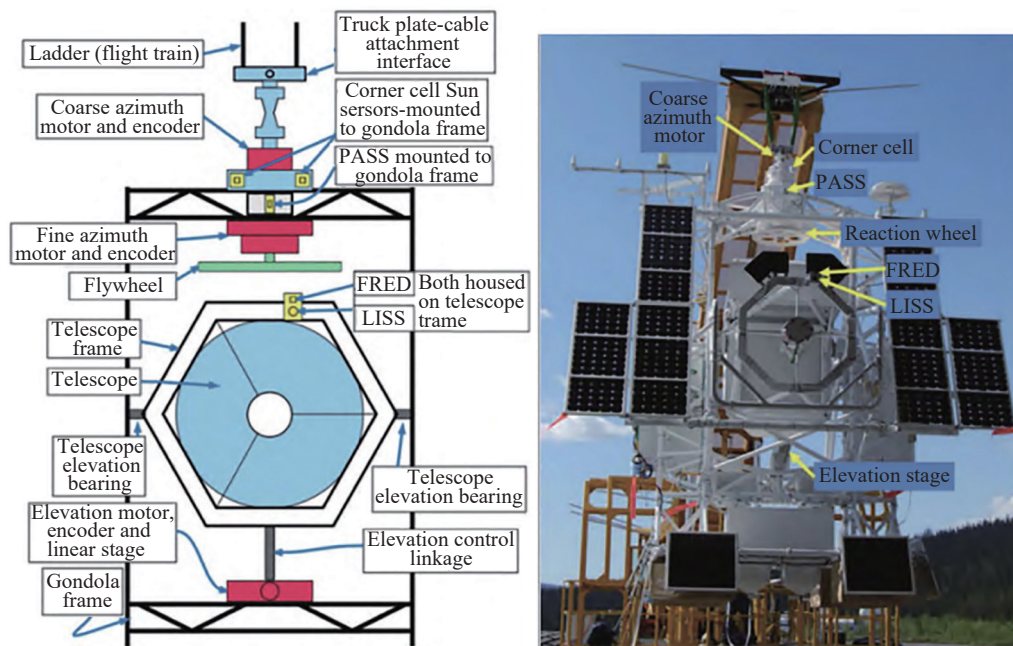


图2 日出任务结构与实物

Fig. 2 Schematic and physical diagram of the SunRISE task structure

控后精控的二级控制来实现。

一级控制是球载吊舱的整舱方位控制, 通常采用扭转器, 或者飞轮与反捻器协同控制的方案^[25]。而WASP系统采用由NASA开发的吊舱旋转器来实现粗方位控制, 以期达到 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 的指向精度。

二级控制是能够达到高精度精细指向控制的关键。二级控制主要是通过二级双轴转台或框架来对方位和俯仰方向的双轴控制, 通常有以下两种控制参考形式。

第一种是先方位, 后俯仰的控制形式。云南天文台的日冕仪和日本的风神(FUJIN)行星望远镜都采用了这种方式, 如图3所示。该方法的优点是二级转台可作为一个独立的设备开展研制和测试; 最后再与吊舱集成。而缺点是二级双转台方位通道的质量惯量较大, 转台方位控制和一级整舱的方位控制, 容易相互较劲, 存在控制协调的问题, 导致一二级方位的控制精度均受影响。例如, 日冕仪一级方位控制精度为 0.5° , 风神(FUJIN)吊舱一级方位精度也是 0.5° , 远没有达到亚角秒级指向精度的要求^[26]。

第二种是先俯仰后方位的控制形式。中国科学院国家天文台的大型球载太阳望远镜项目(Stratospheric Balloon-borne Solar Telescope, BST)和WASP系统都采用该控制形式。这种构型的优点是二

级转台的俯仰、方位通道的质量、惯量较小, 不容易与一级姿控产生干涉, 更容易实现较高的指向控制精度; 其缺点是二级转台难以单独调试, 需要先固定到吊舱或专用工装架后才能调试。

中国科学院国家天文台的球载太阳望远镜项目实物如图4所示, 在BST项目中, 二级转台采用两种形式。一种是被做成单框架的形式, 而吊舱则直接用作外框架。该方案可以减轻重量, 但还需单独对吊舱设计专用接口, 用于安装俯仰电机、码盘等。同时, 还要考虑接口处结构的刚度、同轴度等, 增加了吊舱设计的复杂性, 且通用性较差^[20,27]。另一种是做成双框架形式, 将外框架和吊舱固定连接。WASP系统则是采用这种方式, 以WASP主动万向节框架为核心, 再通过与指向轴上结构单元的协同控制来达到亚角秒级的指向精度。

WASP系统应用的典型球载吊舱结构形式如图5所示。载荷正上方安装有吊舱旋转器, 通过吊索系统连接主吊舱结构。主吊舱结构作为整个吊舱的主体, 为吊舱内结构单元的所有组件提供物理结构支持。WASP主动万向节框架的外框架直接与吊舱固连。从指向系统的角度来看, 吊舱为其提供了结构基础。指向轴结构单元安装在云台内框架中, 通过WASP系统与吊舱的协同控制, 可保证亚角秒级高精



图 3 中国云南天文台的日冕仪 (a) 和日本风神 (FUJIN) 行星望远镜 (b)
Fig. 3 Coronagraph of Yunnan Observatory of Chinese Academy of Sciences (a), and Japanese FUJIN Planetary Telescope (b)

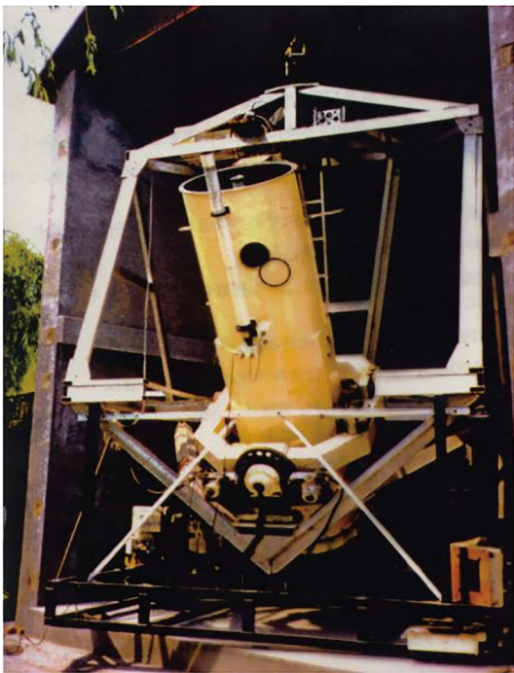


图 4 中国科学院国家天文台的大型球载太阳望远镜项目
Fig. 4 Stratospheric Balloon-borne Solar Telescope (BST)

度精确指向.

WASP 系统由指向控制系统 (Pointing Control System, PCS) 和星跟踪器子系统 (Camera Attitude

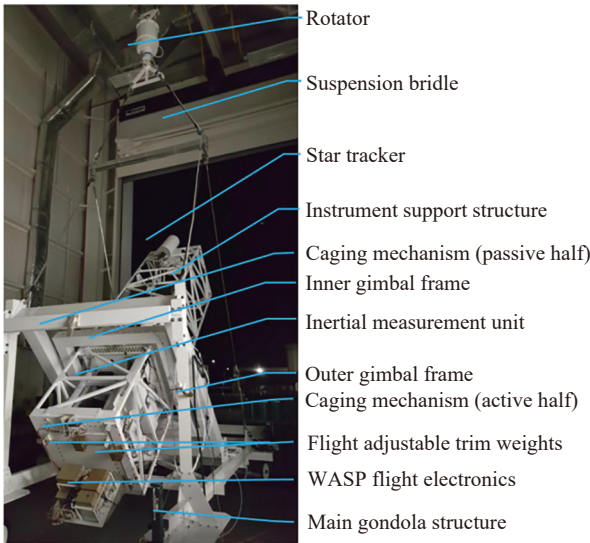


图 5 WASP PICTURE-C 吊舱在夜间对准验证测试
Fig. 5 WASP PICTURE-C gondola during nighttime alignment verification test

Reference Determination System, CARDS) 组成. WASP 系统参与的科研项目可以分为吊舱旋转器、吊舱内结构单元和指向轴结构单元三部分, 如图 6 所示. 吊舱旋转器负责球载吊舱的一级粗方位控制. 吊舱内结构单元以主动万向节框架为核心, 包括 WASP 轮毂、闭锁系统、航空电子系统等搭载在吊舱内部的其他设备. 指向轴结构单元主要包括

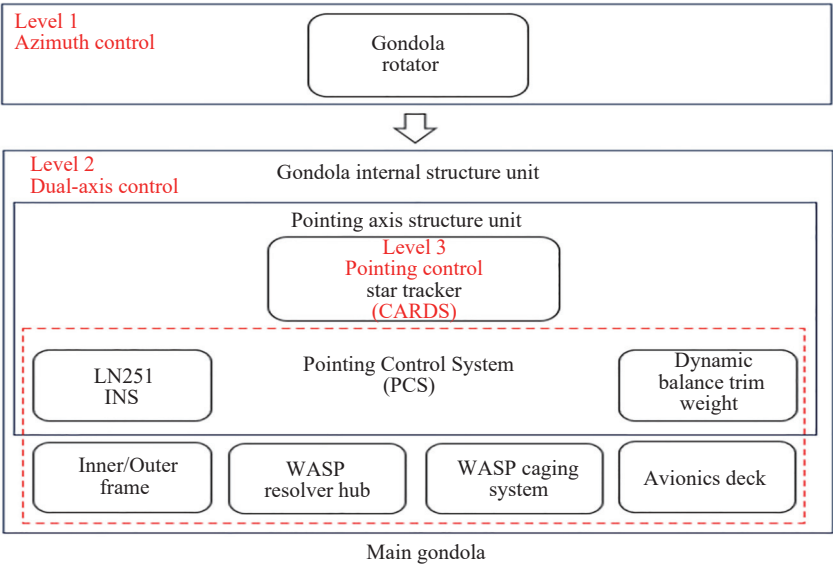


图 6 WASP 系统主体结构
Fig. 6 Primary structure of WASP system

LN251 惯导系统、动态平衡配重系统、CARDS 等用于观测和控制调试的其他仪器设备。

2.1 吊舱旋转器

在 WASP 系统参与的项目中, 首先发挥作用的是安装在吊舱顶部的吊舱旋转器^[28]。WASP 使用的吊舱旋转器如图 7 所示, 其安装在载荷正上方, 不仅能够将吊舱的旋转与气球分离, 还能作为载荷的粗略方位指向系统, 可为气球载荷提供精度为 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 的粗方位控制。

旋转器结构一般由多个关键部件组成, 如图 8 所示。位于上部和下部的万向节结构, 提供旋转的灵活性; 中心轴连接这些部件并承受旋转时的扭矩; 太阳传感器安装在旋转器上。滑环和航电外壳负责传输电力和信号, 同时保护内部的电子设备; 电机外壳用于保护电机组件; 主轴承外壳则可以支撑轴并减少摩擦; 底部吊耳用于连接主载荷。

此外, 由于早期开发的旋转器质量较大, 限制了超压气球的有效载荷能力, NASA 团队研制了新型的 5.5 K 旋转器。相比老式旋转器, 5.5 K 旋转器质量减少约 34%, 且组装需要的零部件更少。新旋转器能够进一步满足超压气球的载荷或延长飞行时间的需求; 在加工制造方面也简化了采购和组装过程。

2.2 吊舱内结构单元

2.2.1 主动万向节框架

WASP 的指向控制系统以主动万向节框架为核

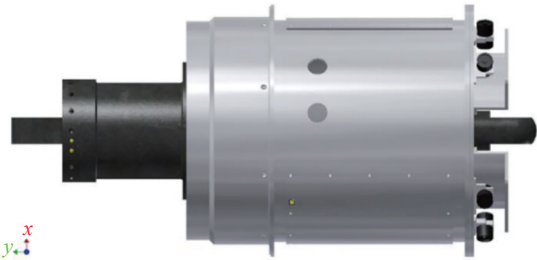


图 7 吊舱旋转器外部结构
Fig. 7 Exterior structure of the gondola rotator

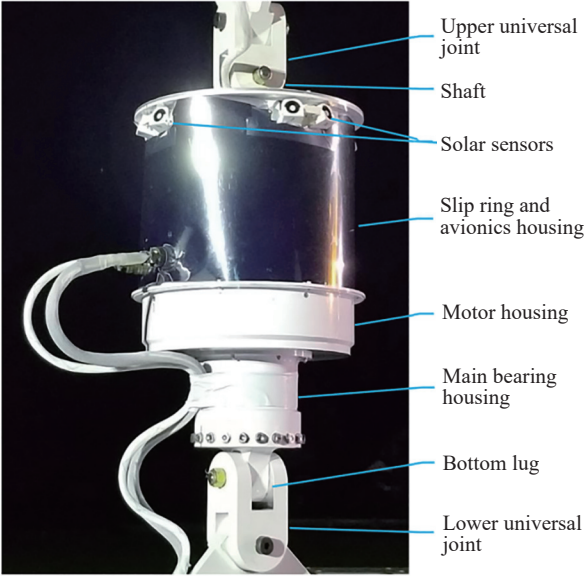


图 8 集成的 5.5 K 旋转器 (用于 2022 年试飞)
Fig. 8 5.5 K rotator integrated for a test flight in 2022

心, 该万向节类似于一个平衡的惯性平台, 由 WASP 轮毂连接内外框架构成, 如图 9 所示. 系统采用“外俯仰+内偏航”的布局, 减小内框的转动惯量, 可降低偏航方向运动时对吊舱旋转器的潜在干扰.

该系统的外框架和内框架通过一个特殊设计的轮毂连接 (见图 10)^[31]. 该轮毂配置了一个用于驱动的大直径的无刷直流扭矩电机和高精度编码器. 轮毂的特殊之处在于通过保持内部电机中心轴连续旋转, 并且万向节对立两侧的轴进行反向旋转, 以消除旋转中的静摩擦. 这种精巧的设计是实现亚角秒级指向精度的结构关键.

2.2.2 航空电子系统

WASP 系统的能源系统和大部分航电设备都安装在主吊舱内. WASP 在主吊舱内设有专门的铝

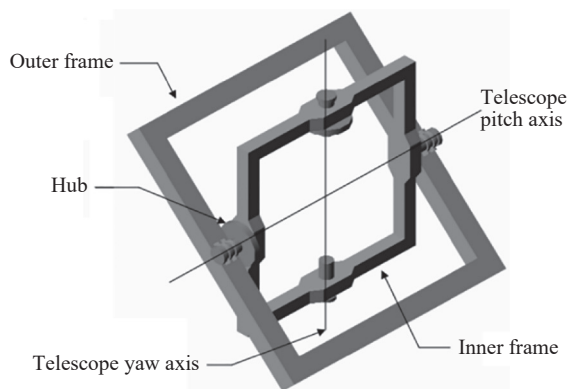


图 9 WASP 主动万向节结构

Fig. 9 WASP active universal joint structure

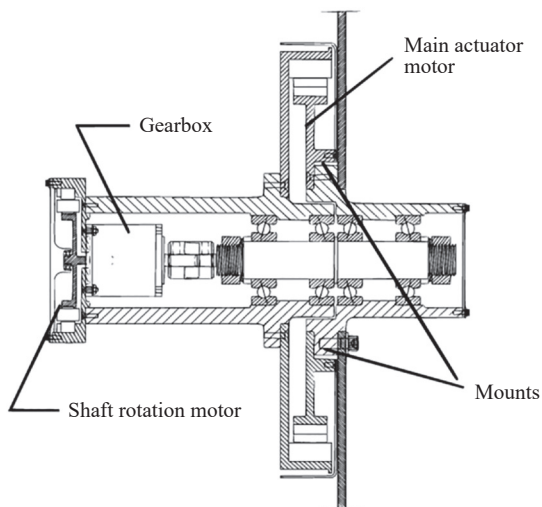


图 10 WASP 驱动电机结构剖面

Fig. 10 Structure profile of WASP actuator motor

合金框架, 用于安装高精度指向控制相关的电子设备, 共有两层安装面. 所安装的电子设备包括主飞控计算机、相机姿态确定系统计算机、编码器解码箱、继电器箱、电机驱动器以及电流采集箱, 如图 11 所示^[15].

2.2.3 闭锁系统

WASP 系统配备了闭锁系统, 其大致结构如图 12 所示^[15]. 该系统用于在高空气球系统发放和上升阶段将观测设备固定于吊舱框架. 在飞行器进入平飞状态时, 闭锁系统会释放指向结构, 然后在降落前重新固定指向结构. 这一机制在起飞和降落过程中有效观测设备, 避免因晃动导致损坏. 闭锁系统设计为双冗余结构, 提供两种独立的操作方式以确保安全.

2.3 指向轴结构单元

指向轴结构单元主要用于搭载望远镜等天文观测设备. 图 13 给出了 GHAPS 系统中的指向轴结构单元. 这一部分的结构可以根据需求进行定制化设计, 以适应搭载不同功能的探测设备和控制系统. 动

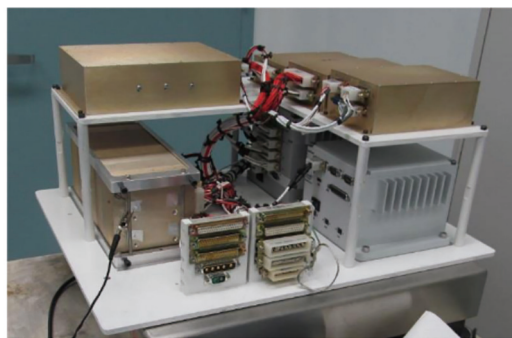


图 11 WASP 航空电子设备安装布局

Fig. 11 WASP avionics deck layout

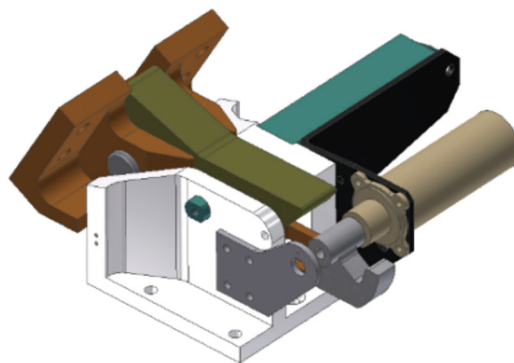


图 12 WASP 闭锁系统

Fig. 12 WASP caging system

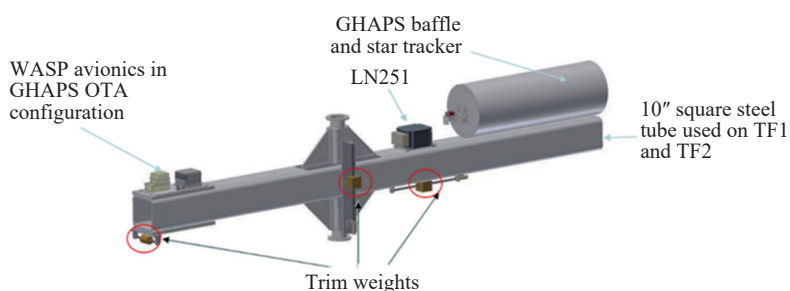


图 13 GHAPS 系统中的指向轴结构单元

Fig. 13 Pointing axis structure part in GHAPS

态平衡系统、LN251 惯导系统、CARDS 都集成于该结构单元上。

2.3.1 动态平衡系统

为了补偿 WASP 系统在飞行中由于科学仪器移动部件、低温冷却或系统过热而引起的平衡变化, WASP 设计了动态平衡系统。动态平衡系统由 3 个组件构成, 分别安装在指向结构的俯仰、偏航和滚转方向上。每个组件由一个小型直流电机沿螺纹轴驱动黄铜配重组成。通过调整三个轴的组件上黄铜配重块的位置, 实现对整个系统平衡的动态调整。

2.3.2 LN251 惯导系统

LN251 惯导是 WASP 系统的姿态确定系统组成之一 (见图 14)^[15], 其通常安装在 WASP 指向系统的指向轴, 为控制系统提供高质量、低成本的惯性速率单元。WASP 系统通过对 LN251 惯导的增量角度输出进行积分来计算仪器的姿态, 并采用修正的比例积分-微分控制律计算各轴的控制力矩。利用由扩展卡尔曼滤波器开发的姿态解决方案, 将机载三轴惯性速率传感器集成的姿态与星跟踪器或太阳传感器测量的四元数和单位矢量数据进行融合。WASP 姿态解决方案能够同时容纳多个来源的数据。

2.3.3 星跟踪器子系统

CARDS 是一套高性能的星敏感器系统, 专为亚轨道平台设计, 其主体结构如图 15 所示^[15]。CARDS 位于 WASP 主吊舱指向轴的前端, 为最终的精细指向控制提供精确的姿态参考。

CARDS 计算机输出星点跟踪数据至主 WASP 飞行计算机, 进行空间姿态解算, 并与控制系统算法相结合, 为 WASP 系统提供稳定的星点跟踪能力。这一集成能够保证 CARDS 在日间强背景光观测中依然具有较好的工作性能。

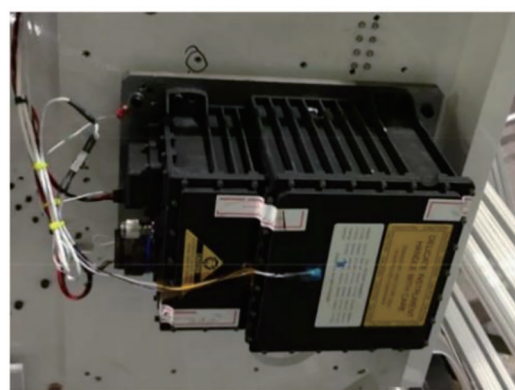


图 14 LN251 惯导系统

Fig. 14 LN251 inertial navigation system

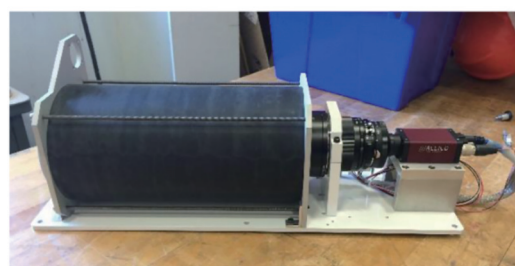


图 15 CARDS 星跟踪器

Fig. 15 CARDS star tracker

CARDS 系统在日间也能进行准确的星追踪, 确保科学仪器能精确、稳定地对准天空目标, 对天文观测和其他科学任务至关重要, 有效提高了观测效率和数据质量。

综上所述, WASP 系统通过各个子系统相互配合实现了对观测目标的亚角秒级高精度对准。其设计灵活, 能够与主吊舱及其仪器支撑结构兼容, 适应各类仪器和吊舱的形状, 以满足不同科学任务的需求, 提供稳定的高精度指向服务。这种集成方法有效降低了

成本, 提升了系统效率, 使 WASP 成为空间科学研究中广受欢迎且性价比高的方案.

3 WASP 试飞历程与性能优化

为了将早期地面测试硬件和软件从实验室环境转移到实际的飞行条件中, WASP 联合多个科研团队, 共开展 5 次试飞测试. 通过试飞, WASP 团队验证了其技术方法和性能能力, 并根据实际的实验需求, 对相关技术做进一步优化. 表 1 给出了 5 次试飞测试中的优化内容. 5 次试飞测试可以大致分为 2 次技术验证飞行和 3 次搭载科研仪器试飞, 以下将展开具体论述.

3.1 技术验证飞行

WASP 团队在系统研制完成后, 2011—2014 年进行了两次技术验证飞行测试, 图 16 展示了两测试的试飞准备阶段.

2011 年 10 月 7 日, WASP 第 1 次飞行测试在萨姆纳堡进行, 总飞行时间约为 285 min, 目的是证明在临近空间飞行环境的影响下, WASP 可以实现亚角秒指向稳定性.

第 1 次测试期间, 工程团队操控 WASP 系统以角秒级的精度进行惯性指向, 稳定性测量值为俯仰 0.24" RMS, 偏航 0.22" RMS. 此次试飞后, WASP 系统进行了多项改进, 包括将星追踪器纳入控制系统回路, 将模拟望远镜缩短至 16 ft 以减小惯性, 将航空电

表 1 5 次试飞测试中的优化内容
Table 1 Optimizations made during 5 test flights

优化点	具体作用	试飞阶段
集成星追踪器	集成星追踪器到控制系统, 提高了指向精度和稳定性	技术验证飞行
电子设备位置调整	将航电甲板从外部框架移动到模拟望远镜上, 优化重量分布和空间利用	技术验证飞行
WASP 轮毂编码器	在 WASP 轮毂上增加角度位置编码器, 提高了角度测量的精度	技术验证飞行
目标跟踪方案	在控制软件中实施新的定位方案, 主动补偿滚动角度扰动, 提高了扫描操作的准确性	搭载科研仪器试飞
机械结构	修改冷却器的安装方式以提高隔离性, 并增加加强件以减少结构偏转	搭载科研仪器试飞
集成 CARDS 子系统	提供低成本系统, 为 WASP 控制系统提供姿态输入	搭载科研仪器试飞
集成三轴光纤陀螺仪	提供位置和加速度输出给 WASP 飞行计算机, 用于控制系统算法	搭载科研仪器试飞
动态平衡系统组件	使用动态平衡组件在飞行中补偿指向结构平衡的变化	搭载科研仪器试飞
自锁机构	提供冗余方法释放和锁定指向结构	搭载科研仪器试飞
集成星追踪器	具有飞行中对齐目标和自主对准的能力	搭载科研仪器试飞

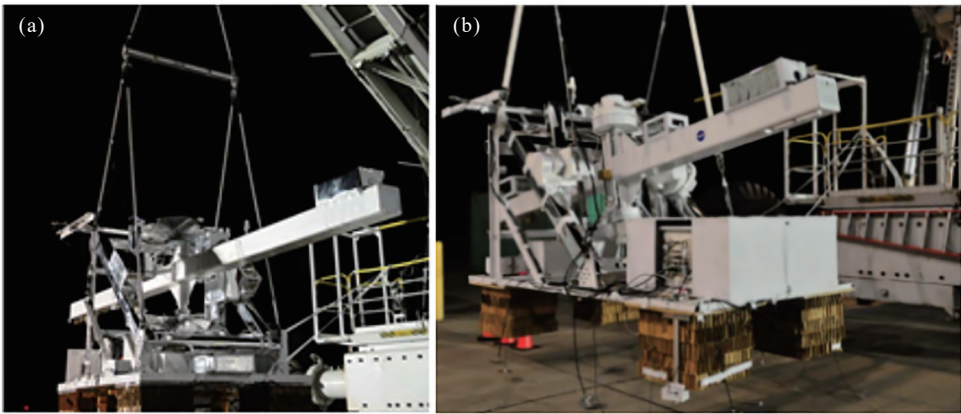


图 16 WASP 第 1 次测试 (a) 与第 2 次测试 (b)
Fig. 16 WASP first (a) and second test (b)

子设备甲板移动到模拟望远镜上, 并添加角度位置编码器到解析轮毂上.

由于第 1 次测试的成功, 很快开展第 2 次测试, 主要是在夜间飞行评估系统的低温性能. WASP 第 2 次测试于 2012 年 9 月 22 日开始, 总飞行时间约为 930 min, 在 1 h 的惯性指向测试中, 俯仰 $0.15''$ RMS, 偏航 $0.22''$ RMS. 在两次试飞测试中, WASP 性能良好, 可以在夜间、低温等复杂条件下实现亚角秒级指向稳定性.

3.2 搭载科研仪器试飞

第 3 次、第 4 次和第 5 次测试则开始将 WASP 系统与完整的科学仪器结合起来, 以满足科学要求. 有两个科学仪器设备参与 WASP 系统的试飞测试, 分别为第 3 次和第 4 次测试的气候科学的高光谱成像仪 (HySICS) 和第 5 次测试的平流层行星观测仪器 (OPIS), 如图 17 所示.

图 18 给出了 WASP HySICS 的系统组成与设计^[29]. 相比前两次测试, 搭载科学仪器设备试飞会带来更多影响. 例如, 2013 年 9 月 29 日在 WASP 搭载 HySICS 试飞过程中, 发现了翻滚角漂移现象, 经分析很大程度上是由循环制冷机的振动对惯导产生了干扰, 导致偏航的大偏差, 并且增加了惯导速率信号中的噪声, 并造成了 $2'' \sim 4''$ 的残余偏移. 为解决 WASP 搭载科研仪器产生的一系列问题, 第 4 次测试

于 2014 年 8 月 18 日进行, 总飞行时间为 534 min. 在这次测试中, 在控制软件中实施了更新的瞄准方案, 并对指向结构进行了机械修改, 进一步优化了以上问题, 同时加快了 CARDS 系统的开发, 并搭载于 WASP 的 HySICS 指向结构中^[29].

第 5 次测试引入了新开发的 CARDS 恒星跟踪器作为主要的白天定姿的设备, 并使用 OPIS 进行天文观测. WASP OPIS 的飞行发放在 2014 年 10 月 8 日, 总飞行时间为 662 min. WASP 系统成功指向了木星和火星以及一些恒星目标, 包括天棣四星 (Etamin)、南河三 (Procyon) 和天厨一 (Altais). CARDS 星跟踪器能够提供 3.9 等恒星的跟踪单位矢量, 并在白天拍摄到 4.3 等以下的恒星. 在 1 h 的观测中, WASP 的测试飞行数据展示了 40 min 内 $1''$ 的稳定性. 结合来自星跟踪器的观测结果显示 WASP 的指向性能为俯仰 $0.47''$ RMS, 偏航 $0.39''$ RMS^[30].

经历 5 次试飞任务后, WASP 系统已经充分证明了其在各种飞行条件下的稳定性和提供亚角秒级精细指向精度方面的卓越能力. 同时, 搭载不同科学仪器的成功试飞, 也很好地展现出 WASP 系统的通用性. 在试飞过程中, WASP 系统持续的技术改进和优化, 对于维持高精度稳定指向, 支持更多科研任务打下了基础.



图 17 WASP HySICS (a) 和 WASP OPIS (b)

Fig. 17 WASP HySICS (a) and WASP OPIS (b)

4 空间科学应用任务

WASP 系统自研发成型后, 陆续开展多项科研合作, 取得多项重大科研成果. 从 2014 年开始, WASP 系统陆续参与了 X-Calibur 任务、BITSE 任务、PICTURE-C 任务、SuperHERO 任务和 XL-Calibur 任务等科学任务.

4.1 硬 X 射线偏振测量任务

4.1.1 X-Calibur 任务

X-Calibur 任务是由美国圣路易斯华盛顿大学 (WUSTL) 和 NASA 等科研机构共同研发. 该任务是关于硬 X 射线偏振测量的任务. 这是一种利用偏振光的特性来研究天体物理现象的技术. 图 19 给出了 X-Calibur 的主体结构. X-Calibur 是一个搭载在高空气球上的望远镜, 专门设计用于测量高能 X 射线 (15~50 keV 能量范围) 的偏振. 通过测量 X 射线的偏振, 可以获得关于致密天体 (例如黑洞吸积盘和中子星磁层) 内部区域的几何信息, 这些区域对于理解物质在强引力场中的行为以及宇宙中最强大的磁场至关重要.

2016 年 WASP 系统支持了来自美国新墨西哥州萨姆纳堡的 X-Calibur 首次科学支持任务, 并在 2018 年支持了位于南极洲的美国麦克默多站 X-Calibur 的第 2 次飞行, 如图 20 所示^[32]. 为进行测量任务, X-Calibur 利用 NASA GSFC X 射线天体物理实

验室提供的 255 壳 X 射线聚焦镜, 以及由圣路易斯华盛顿大学提供的旋转偏振计.

X-Calibur 设计和开发了一个非常刚性的结构来维持基本对准, 而 WASP 系统提供了精细指向, 这对于保持 X 射线聚焦镜和位于 8 m 外的探测器之间的对准至关重要. 在飞行过程中, 这种对准的保持精度需要优于 1 mm. WASP 系统的参与很好地满足了 X-Calibur 任务的科研需求^[31].

2016 年 9 月 17 日, WASP 系统创造了最长飞行时间纪录, 持续飞行了 1477 min. 图 21 给出了飞行过程中 X-Calibur. 在此次飞行中, WASP 系统提供了亚角秒级的指向跟踪精度, 使得 X-Calibur 成功观测了包括蟹状星云、天蝎座 X-1、天鹅座 X-1 和 GRS1915+105 在内的 X 射线目标. 尽管在飞行中 WASP 的绝对指向性能受到星追踪器和惯性速率单元 (Inertial Rate Unit, IRU) 之间对准误差的影响, 尤其是在白天高环境光背景下, 星追踪器无法持续锁

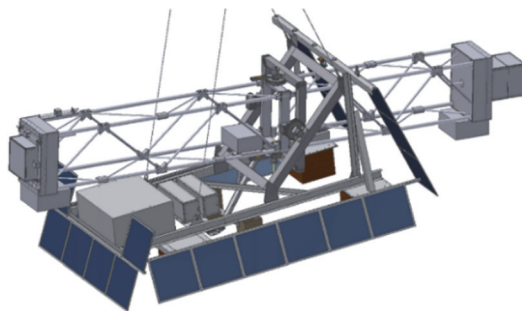


图 19 X-Calibur 桁架和吊舱设计

Fig. 19 X-Calibur truss and gondola design

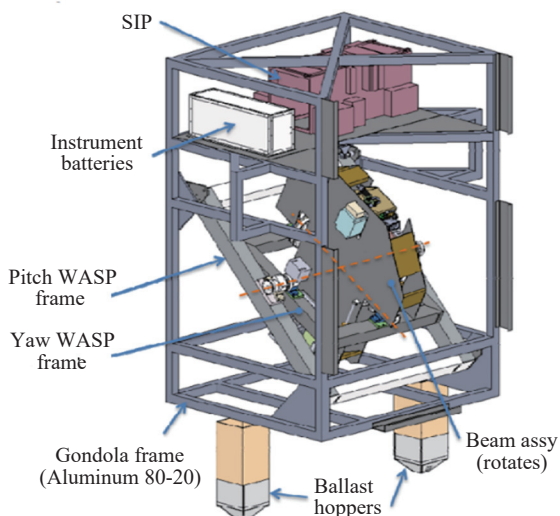


图 18 WASP HySICS 设计

Fig. 18 WASP HySICS design



图 20 X-Calibur 有效载荷及其主要部件在麦克默多长时气球设施的最终兼容性测试

Fig. 20 X-Calibur payload and its main components during the final compatibility test at the McMurdo long-duration balloon facility

定. 但这些问题在飞行后, 通过批处理 CARDS 和 IRU 指向数据的方式得到了识别和纠正^[32].

4.1.2 XL-Calibur 任务

XL-Calibur 任务是空间科学领域中硬 X 射线偏振测量的进阶任务. 其是 X-Calibur 任务的第二代, 专门设计用于在临近空间高空气球平台进行硬 X 射线 (15~80 keV) 偏振测量. XL-Calibur 在 X-Calibur 的基础上进行了显著的改进和扩展, 以提高对高能 X 射线源的偏振测量能力.

XL-Calibur 的设计包括一个 X 射线镜, 将 X 射线聚焦到由铍棒和碲锌镉 (Cadmium Zinc Telluride,

CZT) 探测器环绕的偏振仪上. 偏振仪位于一个反符合屏蔽体内, 以减轻平流层中存在的粒子带来的背景干扰. 镜子和偏振仪-屏蔽体装配件安装在一根长 12 m 的轻型桁架的两端, 由 WASP 以角秒精度进行定位. XL-Calibur 任务通过使用更大有效面积的 X 射线镜、更薄的 CZT 探测器减少背景以及改进的反符合屏蔽系统, 显著提升了灵敏度, 超过了 X-Calibur. XL-CALIBUR 实验采用专门的吊舱设计, 允许高达 75° 的仰角. WASP 与 3 个星跟踪器和 1 个配置为宽视场太阳传感器的 WaIST 接口, 以允许指向靠近太阳和高海拔的目标^[33]. 图 22 给出了在 Wallops 飞行中心集成测试期间的 XL-Calibur^[33].

XL-Calibur 于 2022 年 7 月 12 日, 从瑞典基律纳成功发射, 气球将有效载荷带到了约 40 km 的高度, 直到 2022 年 7 月 18 日, 在加拿大北部上空终止. 此外, XL-Calibur 任务于 2024 年 5 月 7 日至 7 月 15 日在瑞典基律纳再次进行了试验, 试验结果资料还在整理中.

通过与 X-Calibur 任务和 XL-Calibur 任务的合作, WASP 系统不仅证明了其在高空气球科学任务中的实用性和可靠性, 而且还推动了对高能 X 射线偏振的研究. 两次合作的成功展示了 WASP 系统在支持

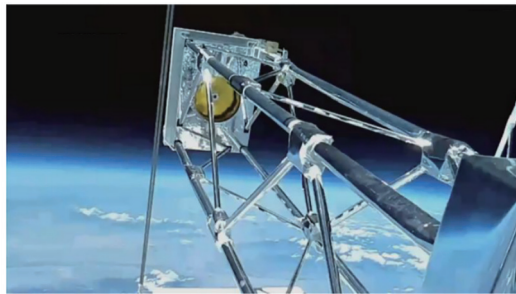


图 21 飞行过程中的 X-Calibur 指向
Fig. 21 X-Calibur pointing during flight



图 22 Wallops 飞行中心集成测试期间的 XL-Calibur. (a) 夜间星跟踪器测试期间的前视图,
(b) 白天太阳传感器测试期间的侧视图

Fig. 22 XL-Calibur during integration testing at wallops flight facility. (a) Front view during nighttime star tracker testing, (b) side view during daytime sun-sensor testing

复杂科学实验和获取高质量科学数据方面的能力, 为未来的空间科学任务提供了宝贵的经验和技術基础.

4.2 球载日冕电子温度与速度考察 (BITSE 任务)

BITSE (Balloon-Borne Investigation of Temperature and Speed of Electrons in the Corona) 任务是美国 NASA 和韩国 KASI (Korea Astronomy and Space Science Institute) 等科研机构共同开展的在空间科学领域中太阳和太阳风研究的一个具体方向. 该任务的主要目标是使用超压气球搭载的单阶段外部遮挡日冕仪来观测太阳日冕的电子温度和速度. BITSE 通过在太阳光谱的蓝色端使用 4 个窄带滤波器来成像太阳日冕, 并利用偏振相机同时获取偏振和总亮度图像, 从而在太阳风加速区域 ($3 \sim 15 R_s$, R_s 表示太阳半径) 内测量日冕电子的物理特性. BITSE 任务特别关注于太阳日冕的电子温度和速度的测量, 这些参数对于理解太阳风的加速和加热机制至关重要^[34]. 在指向技术上, BITSE 任务利用 WASP 吊舱系统搭载其仪器, 以实现高精度指向需求.

BITSE 日冕仪与 WASP 系统在 NASA 的 Wallops 飞行中心完成集成, 并进行了地面测试, 如图 23 所示^[34]. 集成后的 BITSE 吊舱总质量约为 3200 磅 (约 1450 kg), 搭载了一个能够达到最高高度的气球, 体积为 $3.9 \times 10^7 \text{ ft}^3$ ($1.10 \times 10^6 \text{ m}^3$), 平飞高度约为 $1.3 \times 10^5 \text{ ft}$ (约 40 km).

在 BITSE 任务中, WASP 系统提供了对太阳的

精确指向, 这对于确保日冕仪能够准确捕捉到太阳日冕的微弱信号非常关键. 通过这种精确指向, BITSE 能够在太阳活动最小期成功地观测到太阳日冕的极流和流束, 从而为理解太阳风的起源和演化提供了宝贵的数据.

BITSE 于 2019 年 9 月 18 日在美国新墨西哥州萨姆纳堡成功发射, 升空后显示了 WASP 系统的出色性能. 飞行期间, BITSE 在约 $1.28000 \times 10^5 \text{ ft}$ (约 39 km) 的高度获得了 17060 张日冕图像. 图 24 给出了 BITSE 由机载摄像机拍摄的日冕仪及其周围环境的快照^[35]. 在整个科学指向窗口中, 俯仰和偏航指向误差 RMS 为 $0.15'' \sim 0.20''$.



图 23 BITSE 日冕仪集成到 WFF (Wallops 飞行中心) 的吊舱和 WASP 系统中

Fig. 23 Coronagraph integrated to the gondola and WASP system at Wallops Flight Facility (WFF)

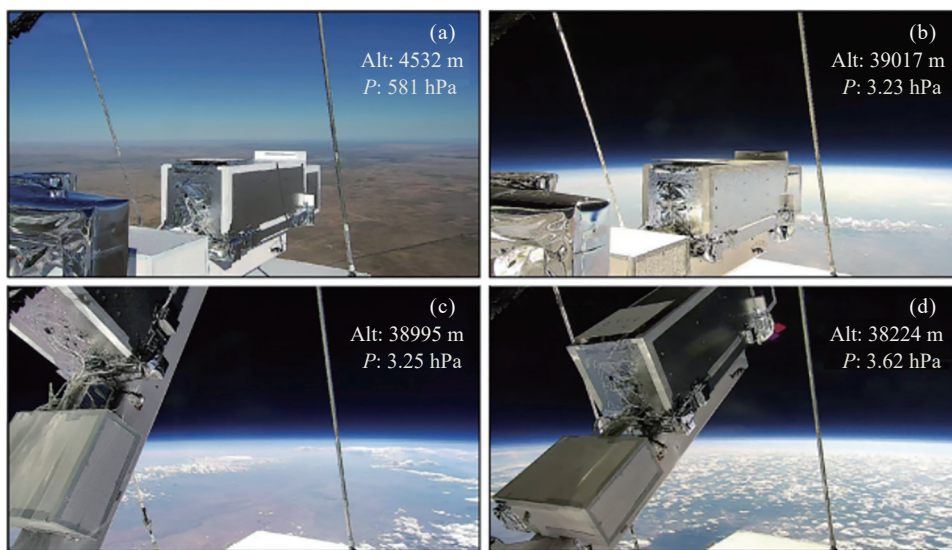


图 24 由机载摄像机拍摄的日冕仪及其周围环境的快照

Fig. 24 Snapshots of the coronagraph and its surroundings made by the on board video camera

BITSE 任务的初步结果表明, 该任务成功地测量了太阳日冕的温度和电子流速, 这对于揭示太阳风加速机制和日冕物质抛射的动力学过程具有重要意义. BITSE 是第一次成功使用偏振相机的太阳观测实验. WASP 系统与 BITSE 任务的合作是空间科学领域中的一个成功案例, 展示了高空气球平台进行太阳物理研究的潜力和价值. 这一合作不仅提高了科学研究的效率, 也为未来的太阳和空间天气任务提供了重要的技术基础和经验^[35].

4.3 NASA 系外行星成像技术研究 (PICTURE-C 任务)

PICTURE-C (Planetary Imaging Concept Testbed Using a Recoverable Experiment – Coronagraph) 任务是由 NASA 主导的空间科学领域中系外行星成像和日冕仪技术研究的一个具体方向. 该任务旨在通过高空气球平台搭载的 60 cm 直径的偏轴望远镜和矢量涡旋星冕仪 (Vector Vortex Coronagraph, VVC), 直接成像邻近恒星周围的尘埃盘和外黄道尘埃^[36].

PICTURE-C 的主要目标是成熟化用于从空间直接成像系外行星的关键技术, 并在近空间环境中首次成功使用高阶和低阶波前控制系统进行焦平面波前校正. 通过这些技术, PICTURE-C 旨在提高对比度, 以便探测微弱的系外行星信号, 并为未来的空间任务, 如可居住世界观测者 (Habitable Worlds Observer, HWO) 等, 铺平技术发展的道路. 此外, PICTURE-C 利用了 WASP 系统的两轴指向能力, 以及其快速响应和精确控制的特点, 来维持望远镜对目标恒星的精确指向. 图 25 给出了在地面站为飞行前准备的 PICTURE-C. 目前, 该任务已完成 2 次飞行.

第 1 次飞行在 2019 年 9 月 28 日, PICTURE-C 共飞行了 20 h. PICTURE-C 任务成功地在近空间环境中进行了首次飞行平台的冠状图暗洞 (Coronagraphic Dark Hole) 创建. 这一成就显示了 WASP 系统在提供亚弧秒级指向稳定性方面的能力, 这对于高对比度成像任务至关重要.

第 2 次飞行在 2020 年 9 月, PICTURE-C 任务显示了约 1 mas 的光学指向稳定性, 这是通过低阶波前控制系统 (LOWFC) 实现的. 此外, 通过利用高阶可变形镜 (HODM) 结合电场共轭 (EFC) 和焦平面波前传感 (FPWFS) 技术, PICTURE-C 在飞行平台上

首次创建了一个高对比度的暗洞区域, 这是寻找尘埃信号的高频区域^[37,38].

PICTURE-C 任务在直接成像系外行星的技术发展方面取得了显著成果 (见 图 26)^[38]. 尽管在飞行中遇到了望远镜和 WASP 指向轴错位以及高频振动等问题, 这些问题也突显了在动态环境中操作高对比度日冕仪的复杂性, 为未来大型空间望远镜的观测稳定性和低阶波前控制提供了宝贵经验.

为解决这些问题并进一步优化性能, PICTURE-C 及其后继任务 PICTURE-D 将持续对 WASP 平台进行改进, 并研发新技术. PICTURE-D 任务计划于 2024 年和 2026 年进行飞行, 目标是通过整合先进的变形镜电子设备和涡旋星冕仪技术, 进一步提升技术成熟度. 任务将全面展开科学探究, 目的是捕捉附近几个残骸盘系统的图像, 利用新增的多星波前控制 (MSWC) 技术在双星周围捕获高对比度图像, 并借助双光栅矢量涡旋日冕仪 (dgVVC) 实现残骸盘的偏振测量, 从而为直接成像系外行星的空间任务铺平道路^[39].

4.4 球载高分辨率 X 射线天文观测 技术 (SuperHERO 任务)

SuperHERO 任务的前身是 HERO 系列任务. 图 27 给出了 HERO (High Energy Replicated Optics) 在新墨西哥州萨姆纳堡进行飞行前的指向测试^[40]. HERO 项目是由 NASA Marshall Space Flight



图 25 在地面站为飞行前准备的 PICTURE-C
Fig. 25 PICTURE-C prepared at the ground station for pre-flight

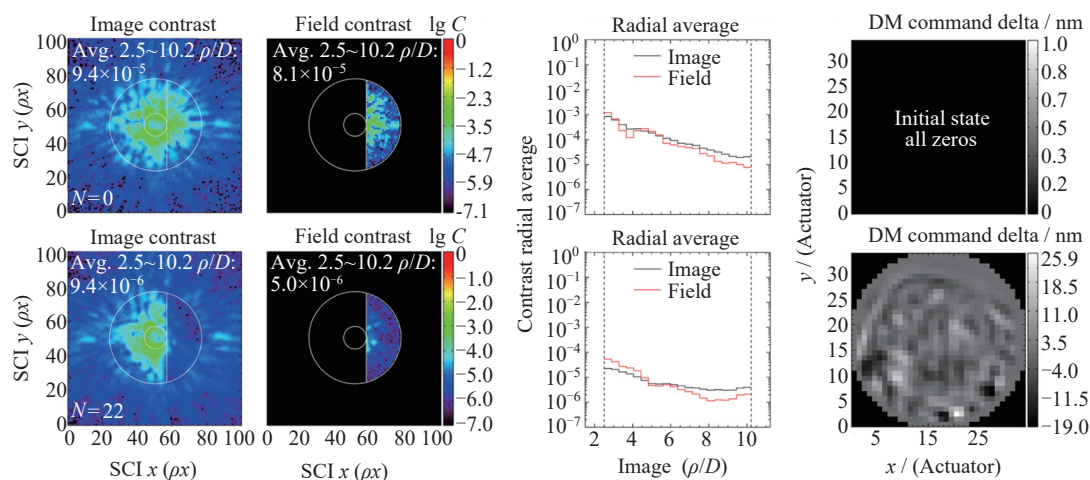


图 26 PICTURE-C 任务在特定恒星目标上的高对比度成像过程和结果

Fig. 26 High-contrast imaging process and results of the PICTURE-C mission on a specific stellar target

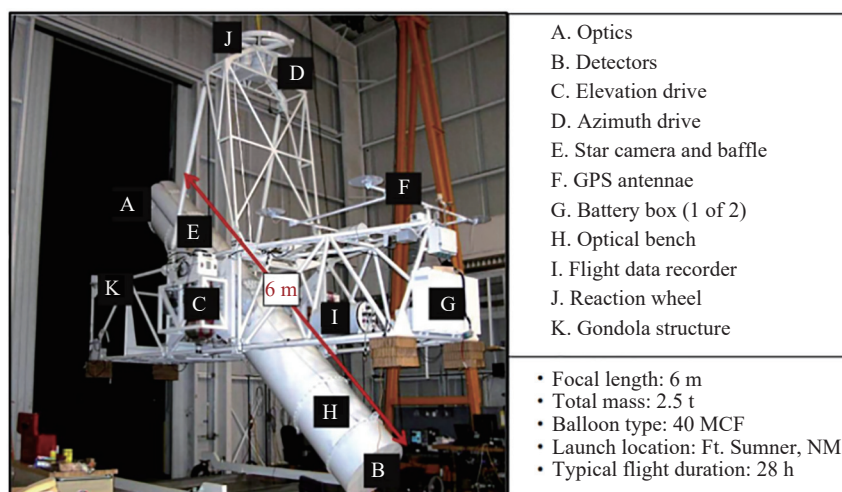


图 27 HERO 在新墨西哥州萨姆纳堡进行飞行前指向测试

Fig. 27 HERO is undergoing pointing tests prior to flight in Ft. Sumner, New Mexico

Center 开发的硬 X 射线望远镜, 旨在利用高空气球平台开展天文观测. 该项目采用电形成镍钴合金镜壳, 配置为 Wolter Type I 型, 通过两次反射来聚焦 X 射线. 2001 年, HERO 望远镜成功获取来自银河源的首批高分辨率硬 X 射线图像, 显示出气球平台在 X 射线光学领域的潜力. HERO 的升级版 HEROES 增强了太阳观测功能, 能在单次飞行中同时观测天文目标和太阳^[40]. 而 SuperHERO 作为下一代设计, 计划结合高分辨率光学和新型 CdTe 探测器, 通过长期气球飞行提高观测能力, 为未来空间任务中的直接成像技术打下基础.

SuperHERO 吊舱和有效载荷如图 28 所示^[41]. SuperHERO 吊舱的框架非常小, 轻型结构用于安装太阳能电池板、压载料斗和电子平台. 上部结构将是由 NASA WFF 提供的张力电缆系统和旋转器. 连接到 WASP 和光学工作台的吊舱结构使用夹芯板, 中间的钢管框架焊接到 WASP 系统上.

SuperHERO 使用两个主动指向系统, 一个用于天文观测, 另一个用于太阳观测. SuperHERO 系统将安装在一个轻质的碳复合材料结构上, 该结构将把 WASP 系统集成到其框架中, 以实现亚角秒级的指向精度. 这种配置将允许长时间气球飞行, 可以持续长

达 4 周. SuperHERO 任务目前处于提案阶段. 因此, 对于 WASP 系统的应用还在设计构想当中. 而 SuperHERO 任务也将随着其科学目标不断完善而进一步优化^[41].

5 WASP 系统发展趋势

WASP 系统在临近空间天文观测领域得到了广泛应用, 并在众多飞行任务中证明了其可靠性与稳定性. 该系统的核心优势主要包括以下方面.

- (1) 高精度指向 WASP 系统提供亚角秒级的精确指向, 从而确保了观测数据的准确性和科研工作的高效性.
- (2) 系统在飞行中能保持稳定的指向, 有效减少了振动和气流引起的抖动, 从而显著提升了科学数据的质量.
- (3) WASP 系统能够适配多种气球平台和科学载荷, 满足了不同科学任务的需求, 显示出其强大的适应性和灵活性.
- (4) 系统拥有完善的技术支持体系, 能够直接解决科研团队在高精度指向技术上的难题, 降低了研发成本, 是一种经济而有效的技术解决方案.

在 WASP 系统的发展历程中, WASP 不仅参与 NASA 自主研发的临近空间天文台项目, 还进行了一

系列技术优化与改进. WASP 系统的研究与发展进一步推动了临近空间科学领域的发展.

5.1 GHAPS (NASA 临近空间天文台)

高空行星科学吊舱 (Gondola for High Altitude Planetary Science, GHAPS) 是 NASA 开发的一项科学观测项目. 图 29 给出了 GHPAS 的初步设计^[42]. 该项目旨在组建新型临近空间天文台, 进行紫外线、可见光以及近中红外波段的天体观测. GHAPS 的设计目标是支持行星科学任务, 通过在临近空间进行观测, 可以避免大部分地球大气对观测的干扰, 从而获得更清晰的宇宙视图^[42].

GHAPS 设计了一个 1 m 口径的望远镜 (OTA), 其具有窄视场和接近衍射极限的性能, 能够在紫外线、可见光和近中红外波段进行观测. 此外, GHAPS 利用 WASP 系统来实现高精度的指向控制, 进而实现亚角秒级指向精度. 实际上, 在 GHAPS 项目中, WASP 系统依赖一个星跟踪器组件来确定望远镜的视线方向. 同时, GHAPS 吊舱内部还安装了飞行控制系统等必要的航空电子设备. GHAPS 还可以根据不同的科学任务搭载不同的科学仪器, 这些仪器安装在吊舱内, 并通过望远镜进行观测. 最后, GHAPS 具

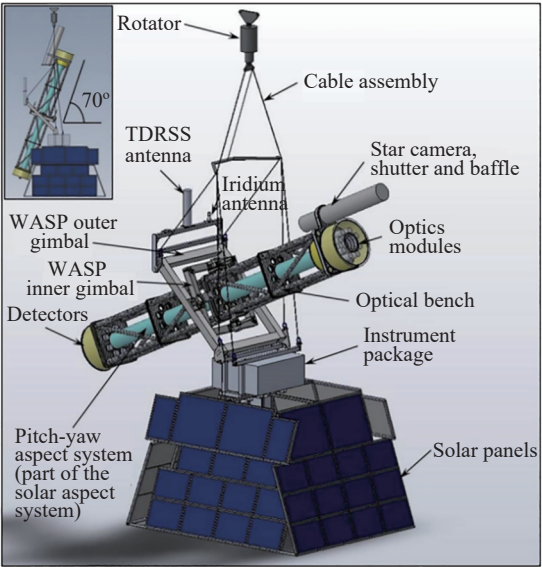


图 28 SuperHERO 吊舱和有效载荷

Fig. 28 Diagram of the SuperHERO gondola and payload with major components labeled

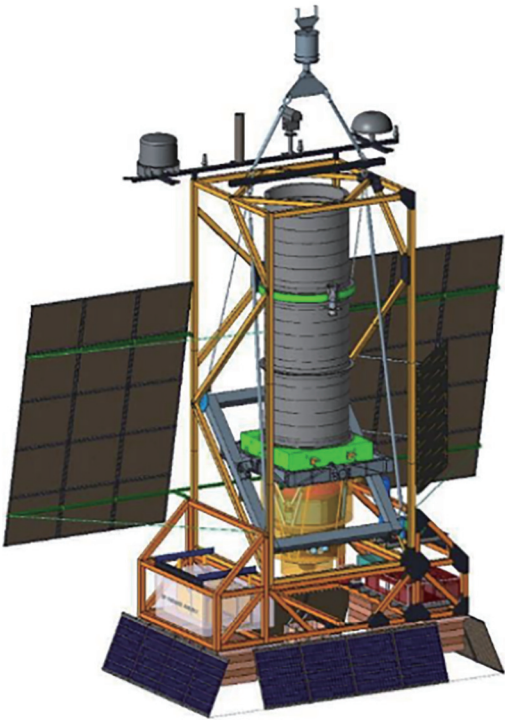


图 29 GHAPS 球载吊舱行星望远镜初步设计
Fig. 29 GHAPS gondola preliminary design

备发射与回收的能力, 这允许其在每次任务完成后经历经济高效的翻新, 随后便可再次投入使用, 执行后续的科学任务.

图 30 所示为 GHAPS 可以解决的示例科学案例. GHAPS 设计用于执行长达 100 天的连续飞行任务, 提供对行星大气、表面特性及小天体物理化学属性的深入研究. 得益于 WASP 系统的支持, GHAPS 能够在 $0.3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的紫外线至中红外波段进行高分辨率的光谱和成像观测, 这一能力对于探究行星气候的长期演变至关重要. GHAPS 的高度优势使其能够捕获地面观测难以获得的紫外线波段, 这对于分析特定分子和大气成分极为关键. 同时, 还减少了大气湍流的干扰, 显著提升了图像的清晰度. 图 31 给出 GHAPS 还能提供其他独特的能力. GHAPS 能够详细研究冰冷世界的羽流现象, 对地球以及小行星、彗星、柯伊伯带天体和近地天体进行成像和成分分析, 甚至能够检测 H、O 和 CO 等关键元素和气体, 观测双星系统和天体表面动力学.

GHAPS 整合了超压气球技术和 WASP 系统, 在保证长航时飞行的同时, 也满足亚角秒级精确指向精度. 作为一种典型的临近空间天文台, GHAPS 是一种相对较低成本的天文观测方案, 其拓宽了 NASA

在空间科学领域的任务规模, 以满足 NASA 行星科学目标和 NASA 十年调查中概述的目标^[43].

5.2 技术优化与改进

WASP 系统目前已经形成一套完整的方案. 在多次试飞和科学任务中, 已经展现出其高精度和通用性的性能. 此外, WASP 也在每次任务中进行技术优化与改进^[44].

对于软件部分, 2017 年 WASP 系统团队对飞行电子设备进行更新, 将飞行软件迁移到单板计算机, 并运行了嵌入式 Linux 操作系统. 利用 X-流式细胞仪飞行数据, 设计了一种精确确定惯性速率传感器与星敏传感器失准角偏差的方法. 地面支持软件已经开发完成, 其允许从速率传感器获得的原始积分四元数和从星敏传感器或太阳敏传感器获得的数据以这种方式批量处理, 以确定速率传感器相对于星敏传感器的方位. 新的软件架构增强了数据处理能力, 为科学仪器提供了更精确的指向控制.

对于硬件部分, 研究团队通过改进解算器速率传感器与电机引起的底盘电压的隔离, WASP 的定位稳定性得到显著提升. 此外, WASP 的机械结构 (包括其万向节框架) 也进行了调整, 以适应更大口径望远镜和更重载荷的需求. CARDS 在 WASP 参与的

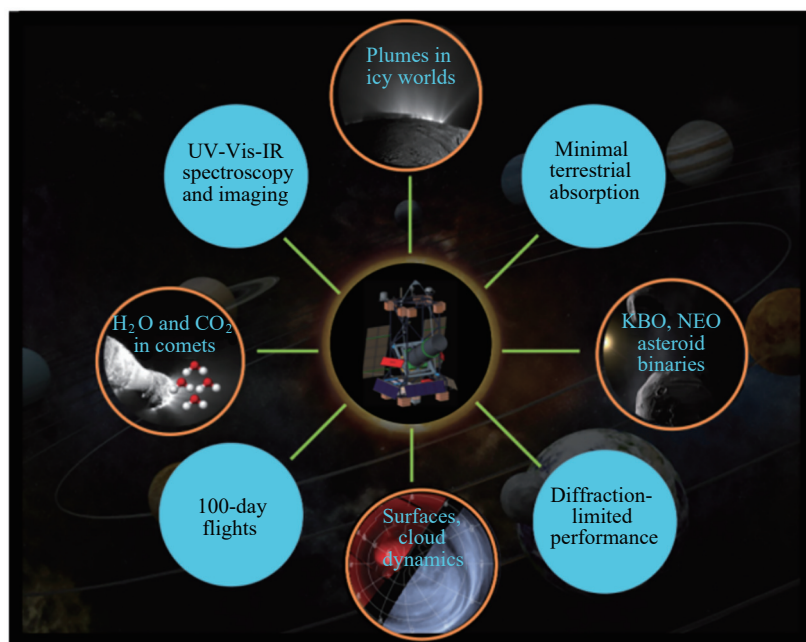


图 30 GHAPS 可以解决的示例科学案例以及气球天文台为行星科学提供的主要优势

Fig. 30 Example science cases that GHAPS can address, along with the principal advantages offered by a balloon-borne observatory for planetary science

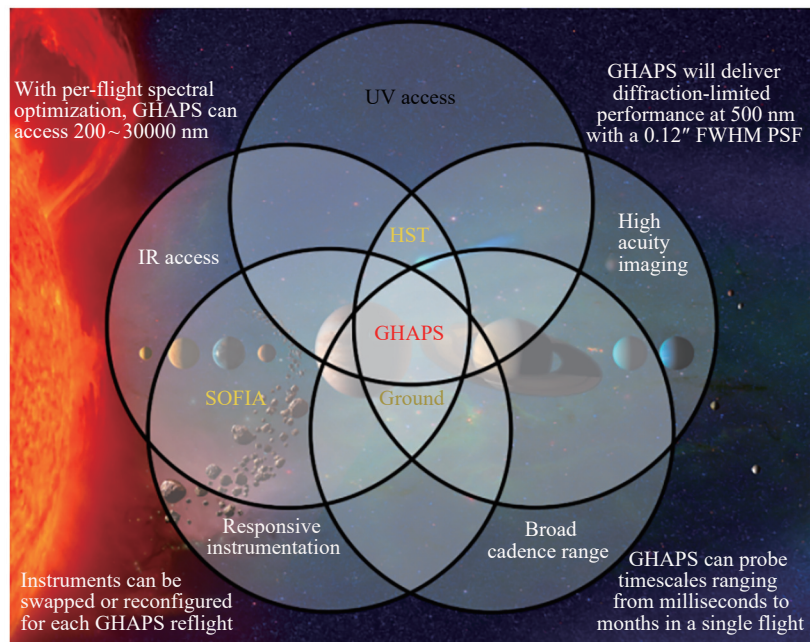


图 31 GHAPS 所提供的独特能力以及 GHAPS 与用于太阳系观测的其他资产之间的协同作用
Fig. 31 Unique capabilities afforded by GHAPS as well as the synergies between GHAPS and other assets used for solar system observations

7 次科学飞行任务中的 6 次中一直是日间星、太阳、行星和月球探测的中流砥柱, WASP 团队计划在未来的飞行中继续使用 CARDS. 同时, WASP 团队也在探索新型低成本的星追踪器技术^[45], 图 32 给出了 WASP 日间星跟踪器的设计. 此外, WASP 在 XL-Calibur 任务中应用了一种新的综合新跟踪器 WaIST. WaIST 被引入 XL-Calibur 传感器系统中, 目的是增加所需宽视场太阳感应能力, 同时不给已经管理着三个恒星跟踪相机以支持各种任务模式的 CARDS 计算机增加负担^[33].

在控制算法方面, WASP 团队也开展了相关优化与改进. 在 WASP 飞行软件中, 除 PID 控制律外, 还增加了两种神经网络控制律方法^[46]. 为了提高 WASP 的驻留指向稳定性能, 仿真和地面试验已经证明了亚角秒神经网络姿态参考控制器 (SNNARC) 和修正状态观测器 (MSO) 技术. SNNARC 利用一个两层网络, 通过一个基线参考跟踪控制律来估计非线性系统动态. MSO 在输入输出反馈线性化控制器中使用单层网络来估计状态. 两个控制器在 PICTURE-C 集成期间和 2021 年的测试流程中进行了测试, 测试结果如图 33 所示. WASP 团队有在后续飞行中依

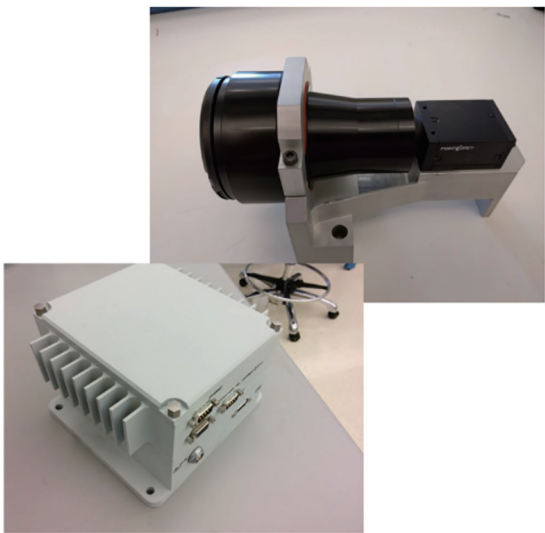


图 32 WASP 日间星跟踪器设计
Fig. 32 Design for WASP daytime star tracker

次投入使用各项控制器的计划和程序.

5.3 对中国临近空间科学发展的启示

中国以往基于高空气球进行高精度观测的实验较少, 现已进入新的发展时期. 近几年, 根据国家对临近空间的发展战略, 相关科研单位也开始逐渐意识到

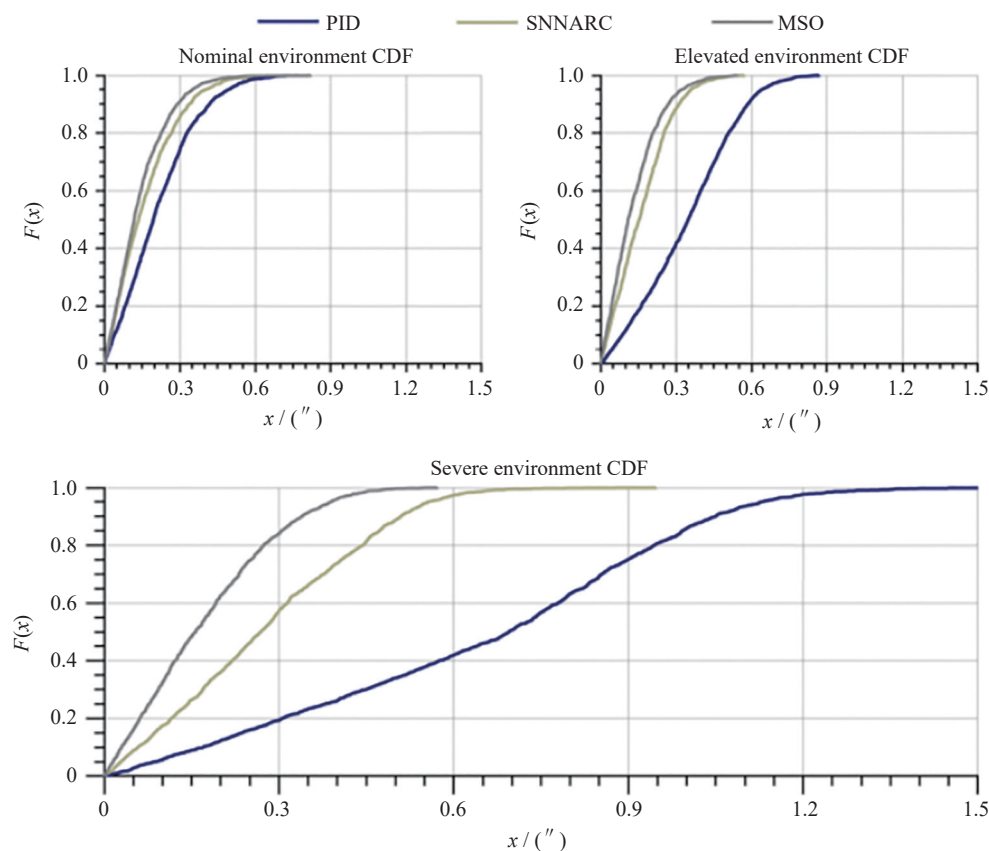


图 33 经验累积分布函数 (MSO 和 SNNARC 的指向性能变化较小, 而 PID 控制系统性能下降较快)

Fig. 33 Empirical cumulative distribution function shows that MSO and SNNARC have minimal changes in pitch pointing performance, whereas the PID control system degrades quickly

发展临近空间高精度观测的必要性^[47].

中国目前的高空气球的高精度观测任务, 大多仍采用原有的“方位驱动+反捻解耦”控制方案. 引入 WASP 系统“先俯仰、后方位”的双轴控制系统, 可以在提高吊舱带载能力的同时, 达到更高的指向控制精度. 此外, 引入 WASP 标准化的设计, 使得吊舱无须设计专用的接口, 即可搭载不同的科研观测设备. 因此, 设计一个通用化的临近空间天文台设备, 保证更高精度的指向和更好的通用性, 能够为中国临近空间高精度观测任务提供更好的服务, 拓展更多的应用场景.

在中国科学院鸿鹄专项的支持下, 中国科学院空天信息创新研究院在研究浮空器, 特别是在高空科学气球方面投入了大量的精力, 进行了大量研究和飞行实验, 力求在球载吊舱姿控系统上取得关键技术突破.

目前, 中国科学院浮空器系统研究发展中心正着手开展相关项目——临近空间球载天文台姿控吊舱

研制. 姿控吊舱的控制任务将由一级整舱姿控和二级双轴姿控协同完成. 一级姿控将继承已有的动量飞轮和反捻器的协同控制方案. 二级姿控将借鉴 WASP 系统的内外双框架结构, 外框架安装俯仰电机和编码器, 用于俯仰方向的控制; 内框架安装偏航电机和编码器, 用于指向轴方位的精调. 该课题的研究将聚焦于两个应用场景: 一是球载天文台天文观测的对星定向应用; 二是球载太阳能电池标定的对日定向应用. 表 2 给出了该课题对不同指向目标的精度要求. 考虑到各应用场景仪器设备的不同和精度需求的差异, 将设计不同结构形式的姿控吊舱, 并满足不同的指向精度需求.

WASP 系统在各个临近空间高精度天文观测任务取得的成就, 为中国研究球载吊舱姿控系统提供了宝贵的借鉴. 未来, 相信有中国更多的科研团队, 能够受益于球载吊舱姿态控制技术的发展, 得以开展更多的临近空间科学试验.

表 2 中国科学院临近空间球载天文台
姿控吊舱研制目标

Table 2 Development objectives of the attitude control gondola for the near-space balloon-borne observatory by the Chinese Academy of Sciences

指向目标	应用场景	指向精度要求
对星定向	天文观测	$\leq 20''$
对日定向	太阳能电池标定	$\leq 0.3^\circ$

6 结语

WASP 系统是一种高空科学气球吊舱控制系统, 其由 NASA 开发, 旨在实现高精度天文观测任务. 该系统结合精密机械和电子组件, 辅以超压气球技术, 能在临近空间执行长时飞行任务, 同时保持亚角秒级的指向精度. WASP 系统的灵活性和标准化设计使其能够适配多种科学载荷, 满足不同的任务需求.

自 2011 年以来, WASP 系统已支持多项科研任务, 并在多次飞行中展现了亚角秒级指向精度和持续的稳定性. WASP 系统的成功试飞和应用, 为其在行星科学、天体物理学和地球观测等领域的应用奠定了基础.

临近空间天文观测作为低成本途径拓展空间科学任务的方式, 成为很多空间科学先进国家的研究方向. WASP 系统作为临近空间天文台的关键技术之一, 支撑着临近空间天文观测领域的发展, 推动了空间科学的进步, 也为中国临近空间科学的发展, 尤其是临近空间球载天文观测的发展, 提供了宝贵的参考和借鉴.

参考文献

[1] HUANG Wanning, ZHANG Xiaojun, LI Zhibin, *et al.* Development status and application prospect of near space science and technology[J]. *Science Technology Review*, 2019, **37**(21): 46-62 (黄宛宁, 张晓军, 李智斌, 等. 临近空间科学技术的发展现状及应用前景 [J]. 科技导报, 2019, **37**(21): 46-62)

[2] SMITH-PIERCE M C, CHAROENBOONVIVAT Y C, SHUKLA D, *et al.* High altitude aerodynamic reflectors to counter climate change[C]//2018 Applied Aerodynamics Conference. New York: AIAA, 2018

[3] STREETMAN B J. Attitude tracking control simulating the Hubble Space Telescope[C]//Proceedings of the AIAA Guidance, Control, and Dynamics Conference. Reston:

American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003

[4] SMITH R L, JOHNSON T K, DAVIS M J, *et al.* High-altitude balloon platforms for optical imaging: System design and feasibility analysis[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2010, **6**(2): 023001

[5] HUANG Wanning, LI Zhibin, ZHANG Zhao, *et al.* Summary of hot spots of near space vehicles in 2019[J]. *Science & Technology Review*, 2020, **38**(1): 38-46 (黄宛宁, 李智斌, 张钊, 等. 2019 年临近空间科学技术热点回眸 [J]. 科技导报, 2020, **38**(1): 38-46)

[6] LI Zhibin, HUANG Wanning, ZHANG Zhao, *et al.* Summary of the hot spots of near space science and technology in 2020[J]. *Science Technology Review*, 2021, **39**(1): 54-68 (李智斌, 黄宛宁, 张钊, 等. 2020 年临近空间科技热点回眸 [J]. 科技导报, 2021, **39**(1): 54-68)

[7] GU Yidong. Thoughts on space science development[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, **37**(8): 1031-1049 (顾逸东. 关于空间科学发展的一些思考 [J]. 中国科学院院刊, 2022, **37**(8): 1031-1049)

[8] WANG Chi, SHI Peng, SONG Tingting, *et al.* Voyage 2050: ESA Science's Long-term plane and enlightenment[J]. *Science Technology Review*, 2022, **40**(4): 6-15 (王赤, 时蓬, 宋婷婷, 等. 远航 2050: 欧洲空间科学规划及启示 [J]. 科技导报, 2022, **40**(4): 6-15)

[9] FAIRBROTHER D A. The NASA balloon program - positioning for the future[C]//AIAA Balloon Systems Conference. Dallas, TX: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2015

[10] ZHU Rongchen, WANG Sheng. Research and development status of superpressure balloons[C]//Summary of Papers at the 24th National Space Exploration Academic Exchange Conference. Xi'an: Chinese Society of Space Sciences, 2011 (祝榕辰, 王生. 超压气球研究与发展现状 [C]//第二十四届全国空间探测学术交流会论文摘要集. 西安: 中国空间科学学会, 2011)

[11] ZHU Rongchen, WANG Sheng, YANG Yanchu, *et al.* Design and ground experiments of pumpkin shaped overpressure balloon spheres[C]//Proceedings of the 4th High Resolution Earth Observation Academic Annual Conference. Beijing: Office of Major Special Management of High Resolution Earth Observation Systems, Chinese Academy of Sciences, 2017 (祝榕辰, 王生, 杨燕初, 等. 南瓜型超压气球球体设计与地面试验 [C]//第四届高分辨率对地观测学术年会论文集. 北京: 中国科学院高分辨率对地观测系统重大专项管理办公室, 2017)

[12] YAJIMA N. A new design and fabrication approach for pressurized balloon[J]. *Advances in Space Research*, 2000, **26**(9): 1357-1360

[13] DEWEESE K D, WARD P R. Demonstration of a balloon borne arc-second pointer design[C]//36th COSPAR Scientific Assembly. Beijing: NTRS, 2006

- [14] WARD P R, DEWEESE K. Arc-Second Pointer for Balloon-Borne Astronomical Instrument[R]. Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, 2004. NASA-CR-2004-213153
- [15] STUHLIK D. The Wallops Arc second pointer-a balloon borne fine pointing system[C]//AIAA Balloon Systems Conference. Dallas: AIAA, 2015
- [16] STUHLIK D. The NASA Wallops Arc-Second Pointer (WASP) system for precision pointing of scientific balloon instruments and telescopes[C]//AIAA Balloon Systems Conference. Denver: AIAA, 2017
- [17] SMITH I S JR. Advancements in NASA balloon research and development[J]. *Advances in Space Research*, 1996, **17**(9): 37-44
- [18] FAIRBROTHER D A. 2017 NASA balloon program update[C]//AIAA Balloon Systems Conference. Denver, Colorado: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017
- [19] YAJIMA N, KOGAJI S, HASHINO K. Research on the Direction Control System of a Balloon-Borne Telescope[R]. Tsukuba: Mechanical Engineering Laboratory, AIST, 1986. MEL Technical Report 86-015
- [20] YE Xiangming. Study on High-accuracy Attitude Control and Pointing Technology of A Large Balloon-borne Solar Telescope[D]. Beijing: National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, 1999 (叶祥明. 大型球载望远镜高精度姿态控制及指向技术研究 [D]. 北京: 中国科学院北京天文台, 1999)
- [21] PASCALE E, ADE P A R, BOCK J J, *et al.* The balloon-borne large aperture submillimeter telescope: BLAST[J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, **681**(1): 400
- [22] ZHANG Wei, YUAN Zhaohui, ZHANG Weiguo, *et al.* Simulation and experiment study of attitude control for stratospheric balloon-borne gondola system[J]. *Computer Simulation*, 2009, **26**(8): 37-40 (张伟, 袁朝辉, 章卫国, 等. 平流层球载系统方位控制仿真与试验研究 [J]. *计算机仿真*, 2009, **26**(8): 37-40)
- [23] HE Linlin, LIU Zhaoyu, DOU Manfeng, *et al.* Research on the reaction wheel control system in the azimuth control of nacelle[J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2007, **35**(8): 36-38, 41 (何琳琳, 刘兆瑜, 窦满锋, 等. 高空气球吊篮方位控制的反作用飞轮系统 [J]. *微特电机*, 2007, **35**(8): 36-38, 41)
- [24] LIU Yanxiao, SONG Tengfei, ZHANG Tao, *et al.* Overview of balloon-borne solar telescope-SUNRISE[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2021, **18**(3): 314-336 (刘艳霄, 宋腾飞, 张涛, 等. 欧洲球载太阳望远镜 SUNRISE 及相关研究成果简介 [J]. *天文研究与技术*, 2021, **18**(3): 314-336)
- [25] WANG Honghui, YUAN Zhaohui, HE Chang'an. Design of comprehensive decoupler for balloon-borne Gondola's Azimuth control[C]//Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference (D Volume). Xi'an: Technical Committee on Control Theory, Chinese Association of Automation, Systems Engineering Society of China, 2013: 5222-5226 (王鸿辉, 袁朝辉, 何长安. 球载吊篮方位控制综合解耦器设计 [C]//第三十二届中国控制会议论文集 (D 卷). 西安: 中国自动化学会控制理论专业委员会, 中国系统工程学会, 2013: 5222-5226)
- [26] SHOJI Y, TAGUCHI M, NAKANO T, *et al.* FUJIN-2: Balloon borne telescope for optical observation of planets[J]. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, 2016, **14**(ists30): 95-102
- [27] YE X, YAJIMA N, AI G, *et al.* Attitude control and high precision pointing control system of a large balloon borne solar telescope[J]. *Advances in Space Research*, 2000, **26**(9): 1419-1422
- [28] HANAGUD A, SIMPSON J, LANZI R, *et al.* A solar pointing system for the long duration balloon missions [C]//International Balloon Technology Conference. San Francisco: AIAA, 2012
- [29] KOPP G, SMITH P, BELTING C, *et al.* Radiometric flight results from the HyperSpectral imager for climate science (HySICS)[J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2017, **6**(1): 169-191
- [30] HURFORD T A, MANDELL A M, REDDY V, *et al.* Observatory for planetary investigations from the stratosphere[J]. *Earth and Space Science*, 2015, **2**(4): 171-184
- [31] KISLAT F, BEHESHTIPOUR B, DOWKONTT P, *et al.* Design of the telescope truss and gondola for the balloon-borne X-ray polarimeter X-Calibur[J]. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2017, **6**(2): 1740008
- [32] ABARR Q, BEHESHTIPOUR B, BEILICKE M, *et al.* Performance of the X-Calibur hard X-ray polarimetry mission during its 2018/19 long-duration balloon flight[J]. *Astroparticle Physics*, 2022, **143**: 102749
- [33] ABARR Q, AWAKI H, BARING M G, *et al.* XL-Calibur -- a second-generation balloon-borne hard X-ray polarimetry mission[J]. *Astroparticle Physics*, 2021, **126**: 102529
- [34] GONG Q, GOPALSWAMY N, NEWMARK J. Innovative Compact Coronagraph Approach for Balloon-borne Investigation of Temperature and Speed of Electrons in the Corona (BITSE)[C]//Astronomical Optics: Design, Manufacture, and Test of Space and Ground Systems II. San Diego, United States: SPIE, 2019: 111160F
- [35] 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[J]. *Solar Physics*, 2021, **296**(1): 15
- [36] COOK T, CAHOY K, CHAKRABARTI S, *et al.* Planetary imaging concept testbed using a recoverable experiment-coronagraph (PICTURE C)[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2015, **1**(4):

- 044001
- [37] MENDILLO C B, HEWAWASAM K, HOWE G A, *et al.* Decoupling the image-plane and low-order wavefront sensors for the PICTURE-C coronagraph[C]//Proceedings Volume 11117, Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets IX. San Diego: SPIE, 2019
- [38] MENDILLO C B, HEWAWASAM K, MARTEL J, *et al.* Balloon flight demonstration of coronagraph focal plane wavefront correction with PICTURE-C[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2023, 9(2): 025005
- [39] MENDILLO C B, HEWAWASAM K, MARTEL J, *et al.* The PICTURE-C exoplanetary imaging balloon mission: second flight results and the transition to a new mission, PICTURE-D[C]//Proceedings Volume 12680, Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets XI. San Diego: SPIE, 2023
- [40] GASKIN J, APPLE J, CHAVIS K S, *et al.* High energy replicated optics to explore the sun: hard X-ray balloon-borne telescope[C]//2013 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2013: 1-11
- [41] GASKIN J, ELSNER R, RAMSEY B, *et al.* SuperHERO: Design of a new hard-X-ray focusing telescope[C]//2015 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2015: 1-15
- [42] YOUNG R. Overview of the Gondola for High Altitude Planetary Science (GHAPS)[R]. Greenbelt: International Society for Optical Engineering, 2016
- [43] LEWIS M, JUERGENS J R, ARETSKIN-HARITON E, *et al.* Gondola for High Altitude Planetary Science (GHAPS) Guide System Trade Study[R]. Pasadena: NASA Jet Propulsion Laboratory, 2020
- [44] UDINSKI E P, LANZI R J. Wallops Arc-Second Pointing (WASP) System[R]. Athens: NASA, 2023
- [45] HEATWOLE S H, CRAIG S D, CASTELLUCCI K J, *et al.* Low-Cost Star Tracker Development for Suborbital and Small Satellite Platforms[R]. Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, 2019
- [46] GALCHENKO P, PERNICKA H. Neural network attitude control system design for the wallops arc-second pointer[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2022, 45(7): 1365-1370
- [47] MA Jun, ZHU Meng, WANG Caixi, *et al.* Technology and development prospect of electro-optical detection in near space[J]. *Aerospace Technology*, 2022(2): 85-96 (马俊, 朱猛, 王才喜, 等. 临近空间光电探测技术与发展展望 [J]. 空天技术, 2022(2): 85-96)

作者简介



崔钰琅 男, 2001年1月出生于重庆市江北区, 现为中国科学院空天信息创新研究院硕士研究生, 飞行器设计专业。
E-mail: cuiyulang23@mailsucas.ac.cn



周江华 (通信作者) 男, 1973年2月出生于江西省鹰潭市, 现为中国科学院空天信息创新研究院研究员, 博士生导师, 主要研究方向为浮空飞行器飞行动力学与控制。
E-mail: Zhoujh@aircas.ac.cn