0254-6124/2024/44(6)-1068-18 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LI Yijian, HUANG Wanning, ZHOU Jianghua, ZHANG Xiaojun, ZHANG Hangyue. Development Status and Prospects of Near Space Observatories (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(6): 1068–1085. CSTR:32142.14.cjss.2023–0145. DOI:10.11728/cjss2024.06.2023–0145

临近空间天文台发展现状与展望*

李一健[1,2] 黄宛宁[1] 周江华[1,2]
张晓军[1] 张航悦[1]

1(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

2(中国科学院大学航空宇航学院 北京 100049)

摘 要 临近空间天文台是一种特殊的天文台, 其选址于临近空间, 主要依托于高空科学气球浮空器平台. 中美等国家在 20 世纪大力推动高空科学气球技术发展, 形成了完整和成熟的科学气球系统, 进而促进了临近空间天文台的发展. 目前基于高空科学气球的临近空间天文台发展已经进入实用阶段, 在具体技术的研究上, 已从基础性应用技术向多用途、多功能的平台结构, 高可靠性、高稳定性和高精度控制等方面发展. 制约临近空间天文台发展的关键技术正在不断取得进展: 长航时飞行技术通过超压气球的实现得到突破, 高精度稳定指向技术由通过 WASP 系统的实现得到突破. 基于高空科学气球的临近空间天文台能够作为空间科学天文观测先进仪器的前期验证平台, 有效提升天基天文台任务的成功率.

关键词 临近空间天文台, 高空科学气球, 天文观测, 超压气球

中图分类号 P171.1

Development Status and Prospects of Near Space Observatories

LI Yijian[1,2] HUANG Wanning[1] ZHOU Jianghua[1,2]
ZHANG Xiaojun[1] ZHANG Hangyue[1]

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

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

Abstract Unlike ground-based observatories and space-based observatories, the Near Space Balloon Observatory is a unique type of observatory located in near space, mainly relying on high-altitude scientific balloon platforms. Throughout the last century, countries such as China and the United States have invested significant effort in promoting the development of high-altitude scientific balloon technology, resulting in the establishment of a comprehensive and advanced scientific balloon system, facilitating a wide range of balloon-borne scientific activities, which have facilitated the maturity of near-space obser-

* 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

2023-12-11 收到原稿, 2024-03-11 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

vatories. It has the advantages and potential of low distribution and usage costs, short preparation cycles, large payload capacity, recyclability for multiple uses, and more flight opportunities. The development of near space observatories, utilizing high-altitude scientific balloons, has now entered the practical stage. In terms of specific technical research, the focus has shifted from basic application technology to the development of multi-purpose, multifunctional platform structures with high reliability, stability, and precision control. With the ongoing advancements in two key technologies, namely long endurance flight and high-precision pointing, the potential of near-space balloon observatories is being increasingly explored. As early validation platforms for advanced instruments and innovative ideas in space science and astronomy observations, it can effectively enhance the success rate of space-based observatory observation tasks and accelerate the development lifecycle of space-based observatories. As a platform for nurturing space science talents, it can also cultivate more leading experts and strengthen the research team. This article takes the opening of China's fifth Antarctic Station, the Qinling Station, as an opportunity to suggest timely conducting high-altitude scientific balloon flight tests at the Qinling Station in Antarctica, further promoting the astronomical observation of Antarctica by China's near space observatory, and contributing greater strength.

Key words Near space observatory, High altitude scientific balloon, Astronomical observation, Superpressure balloon

0 引言

天文台是专门进行天文学研究的重要机构. 天文台选址的好坏与否将会直接影响到天文台观测质量. 只有将天文观测仪器设备安置在具有观测优势的特定位置才能充分发挥效用, 获得最大科学产出[1,2].

常规的天文台主要选址于高原. 由于地球被大气包裹, 基于地面的天文观测活动, 会受到大气中各类物质的影响, 因为大气层对天体辐射的吸收和散射, 会削弱天体辐射的强度并改变天体辐射的能谱[3]. 由于大气中氮、氧、臭氧对短波辐射的吸收, 使得天文台很难接收到波长较小的天体辐射[4]. 而红外辐射则会被大气中的水气、二氧化碳和臭氧强烈吸收[5]. 同时, 大气的湍流运动, 会直接影响光学成像的质量[6]. 因为地球大气密度随高度指数减小, 大气消光作用主要集中在下层, 所以世界各地的天文台, 大多选择建在海拔较高的山峰上[7].

还有一类天文台选址于地球卫星轨道, 利用火箭将搭载望远镜等天文观测设备的卫星发送到太空. 这一类天文台常被称为天基天文台或空间天文台. 天基天文台运行在地球大气层上、宇宙空间中, 既没有大气散射干扰, 还能观测到容易被大气吸收的宇宙射线, 因此其在观测上能拥有比地基天文台更高的观测精度、更宽的观测频谱和更大的观测窗口.

1970 年美国和欧洲航天局发起了大型轨道天文台计划, 将哈勃空间望远镜 (HST)、钱德拉 X 射线天文台 (CXO)、斯皮策空间望远镜 (SST) 和康普顿 γ 射线天文台 (CGRO) 送入太空, 这四台空间天文台分别工作在可见光和紫外线、γ 射线及硬 X 射线、软 X 射线和红外线, 覆盖电磁波全频段, 使人类跨入通过电磁波谱研究宇宙和天体的“全波段天文学”时代.

世界多国还发射了宇宙背景探测器、普朗克卫星等约 120 多颗天文卫星, 取得的一系列重要成果极大地推进了多波段天文学的发展[8]. 当众多天基天文台成功运行并取得重要发现后, 致力于引领空间科学发展的科学家们开始构思下一代更强大的天基天文台. 2021 年美国国家科学院发布了最新的《十年调查》(Decade), 宣布将启动新一代大型轨道天文台计划[1]. 新一代旗舰型天基天文台有哈勃太空望远镜继任者詹姆斯 · 韦伯空间望远镜以及南希–格雷斯–罗曼太空望远镜[9].

中国为了推动空间科学的进一步深入发展, 于 2011 年由中国科学院启动实施了空间科学战略先导专项[10]. 空间先导专项一期成功实施了两个天基天文台计划: 2015 年成功发射了暗物质粒子探测卫星悟空号[11], 2017 年成功发射了硬 X 射线调制望远镜卫星慧眼号[12]. 战略先导二期已成功实施了三个天基天文台计划: 2020 年成功发射了引力波暴高能电磁对应体

全天监测器卫星怀柔一号[13]; 2022 年成功发射了先进天基太阳天文台夸父一号[14]; 2024 年成功发射了爱因斯坦探针卫星[15]. 以上天基天文台的成功发射、运行, 以及取得的很多宝贵的观测资料和大量的优秀成果, 标志着中国开始步入天基天文台时代.

由于复杂科学仪器设备的开发以及更具挑战性的天文观测的需要, 空间科学研究任务正在稳步增长. 天基天文台需要大型科学仪器长时间运行于复杂的空间环境中, 技术难度高, 在轨运行后几乎再难以进行维修, 故对可靠性要求高, 因此从创新概念提出到工程研制、火箭发射以及科学运行, 到最后取得科学成果, 一般具有较长的周期. 因此很多著名天基天文计划, 例如 COBE, CREAM, DAMPE, AMS, HXMT, WMAP 等, 前期都引入了临近天文台开展临近空间飞行试验验证, 并取得了较好的效果. 随着气球浮空器平台的不断发展, 基于高空科学气球的临近空间天文台逐渐成熟完备, 其承担天基天文台载荷前期验证的潜力正在不断被发掘.

根据以天文观测任务驱动为主线的基于高空科学气球临近空间天文台的研究现状, 本文分析了制约临近空间天文台发展的关键技术及最新研究进展与应用, 对临近空间天文台发展趋势进行了展望, 以推进中国临近空间天文台的深入研究.

1 临近空间天文台

临近空间天文台是一种特殊的天文台, 工作在临近空间. 临近空间一般是指距地面 20～100 km 的空间区域. 在这个区域内, 常规的飞机飞不上去, 卫星下不来, 是跨接航空和航天的新领域[16,17]. 目前, 高空科学气球是为数不多的能够在临近空间长期可靠运行的飞行平台[18]. 因此, 临近空间天文台主要依托于高空科学气球浮空器平台.

高空科学气球是利用大气浮力抵御地球引力的浮空飞行器. 1912 年奥地利物理学家 Victor Francis Hess 通过气球搭载, 在高空做实验发现了宇宙线的存在, 这一发现最终获得了诺贝尔物理学奖. 由此气球与科学产生了不解之缘, 打开了利用气球进行空间科学研究的大门[19].

19 世纪 50 年代, 高分子材料技术快速发展. 1950 年美国工程师 Otto Winzen 发明了使用加强带将聚乙烯材料密封的工艺. 轻薄廉价的聚乙烯薄膜被用于气球制造, 使得球膜重量从 300 g·m^2 降低到约 20 g·m^2, 这一重要研究进展, 极大降低了高空科学气球球膜重量.

美国国家航空航天局、法国空间研究中心、欧洲航天局、日本宇宙航空研究开发机构等都持续对科学气球进行研发投入, 使用高空科学气球平台进行了大量飞行试验, 取得了可观的科研成果[20].

作为一款成熟的临近空间飞行平台, 高空科学气球系统包括且不局限于以下子系统: 气球球体及降落伞等系统; 升空发放、搜寻回收和运输等设施及指挥系统; 气球吊舱能源循环系统; 定位、姿态控制、浮力控制等控制系统; 视距或卫星中继测控数传、电子学和数据管理系统; 载荷系统[19]. 图 1 给出了典型科学气球配置.

目前, 基于高空科学气球的临近空间天文台工作高度能够达到距离地面 35～45 km 的大气顶端. 此处大气密度为地面的 1%～0.1%, 非常接近外空间环境. 临近空间天文台载重量大, 可达 1～3 t, 有效载荷占比可达 80%, 试验成本一般为百万至千万量级一次. 平台设备可通过降落伞回收重复使用, 实验灵活, 周期短, 图 2 为临近空间天文台典型发放回收全过程.

综上所述, 基于高空科学气球的临近空间天文台具有一系列的优点和应用潜力, 发放使用费用低、准备周期短、载重大、可回收多次利用、具有较多的飞行机会[20,21].

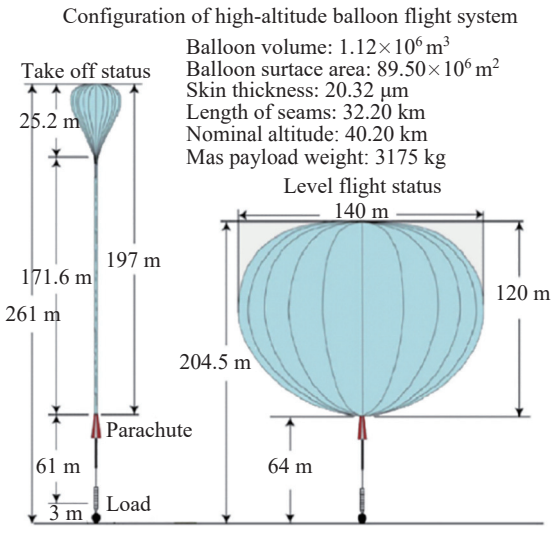


图 1 典型科学气球配置

Fig. 1 Typical scientific balloon configuration

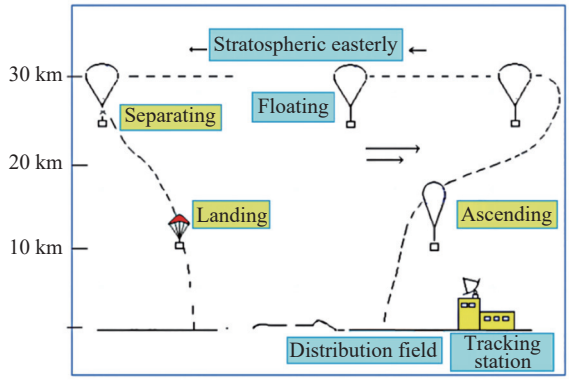


图 2 典型的临近空间天文台全过程

Fig. 2 Typical entire process of near space observatory

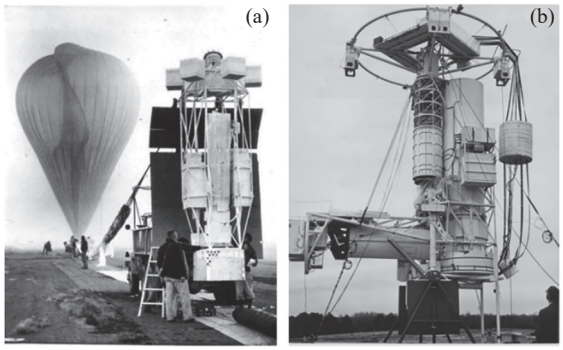


图 3 飞行前 Stratoscope I (a), Stratoscope II (b)

Fig. 3 Stratoscope I (a), Stratoscope II (b) before flight

2 临近空间天文台发展现状

临近空间天文台依托于气球浮空器平台. 这里以天文观测任务和气球浮空器平台技术为主线, 分析国内外临近空间天文台的发展现状.

2.1 国外发展现状

国外的临近空间天文台研究起步较早. 早在 20 世纪 60 年代美国就规划了观星计划 (Project Stargazer), 计划将两名航天员和一架望远镜用高空气球送入 25 km 的高空观察恒星. 1957 年美国首次使用 Stratoscope I 气球平台携带球载望远镜升空观测, 获得了具有高分辨率和细节的太阳米粒组织图像. 这次成功使得美国普林斯顿大学 (PU) 升级原装置, 建造了 Stratoscope II 气球平台, 其目标是拍摄行星和恒星星云 (见图 3). 1963 年 3 月 这架被视为哈勃太空望远镜前身的 Stratoscope II 成功升空. 这两次气球平台的试验, 使人们发现了其巨大潜能[22].

挑战者号航天飞机失事后, 原计划借助天基天文台的科学观测项目转为希望借助临近空间天文台实现, 对于临近空间天文台发展的需求更加迫切. 1986 年美国 NASA 提出了基于高空科学气球的临近空间天文台的全面研究与发展战略规划[23], 并于 1989 年启动了长时气球 (LDB, Long Duration Balloon) 工程, 计划开发一个能在南极长时飞行的临近空间平台. 该平台采用零压气球, 具体指标为: 承载的有效科学载荷重量大约 900 kg, 飞行时间不低于三周, 飞行高度大于 30 km. 1990 年初 NASA 开始了 LDB 飞行试验, 到 1994 年基本完成目标[24].

为了获取更长的飞行时间, 并且开拓中纬度飞行能力, 美国 NASA 在 1994 年启动了长时气球飞行器 (LDBV, Long Duration Balloon Vehicle) 计划, 重点突破方向是气球薄膜性能改进. 其目标是建造一个飞行时间接近 25 d、承载 1.3 t 有效科学载荷、飞行高度可达 39 km 的气球飞行平台. 该计划采用新型过压气球结构设计, 使得气球具备承担一定内外压差的能力; 使用气球薄膜材料 EVAR 能够降低球体内昼夜温度变化程度, 进而降低昼夜飞行高度变化[25,26].

为了进一步推动高空科学气球发展, 促进大型科学家群体进行世界级的科学研究, 美国于 20 世纪末同步启动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.

超长时间气球计划 (ULDB, Ultra Long Duration Balloon) 致力于发展大型超压气球, 采用了更高的超压压力、新型的材料和结构, 达到更优越的飞行性能. 该气球的设计目标为, 体积 73.6×10^4 m^3, 飞行高度 35 km, 载重 2 t, 飞行时长 100 d[27]. 该计划的标志性成功是 2013 年超级超铁银河元素记录仪 (Super-TIGER) 计划, 其实现了绕南极飞行 3 圈 55 天, 如图 4 所示.

南极气球天文计划面向全世界征集了大量气球天文任务建议, 最后形成了约 20 多个具有原创科学思想和新一代尖端仪器研发的项目. 南极气球天文计划分为非粒子和粒子天体物理两部分[19], 图 5 为南极气球天文计划部分项目.

非粒子天体物理包含了大爆炸宇宙学、X 和 γ 射线源、系外行星/宇宙生物学等三个方向, 主要计划与关注领域列于表 1.

粒子天体物理分为宇宙线起源和加速、中微子天文、暗物质/反物质三个方向, 主要计划与关注领域如表 2 所示.

NASA 在开发超长航时气球平台的同时, 也启动了对于超高空气球平台的研究. 美国 NASA 开发了一个体积近 170×10^4 m^3 的零压气球, 并于 2002 年夏季发放升空. 这是迄今为止成功飞行过的最大气球, 其飞行高度达到了 49 km[28]. 超高空气球平台提供了将中等有效载荷 (250～750 kg) 放置在接近外空间高度段 (47～50 km) 的机会. 这对于进行低能量宇宙射线电子观测以及其他需要超高海拔以方便收集纯净数据的学科来说具有重要意义. 超高空气球平台的一个重要优势是其相对较大的氦气容积导致昼夜飞行中的夜间有相对较小的热量交换过程, 因而预计其有能力在很少使用或不使用压载物的情况下连续穿越多个昼夜周期.

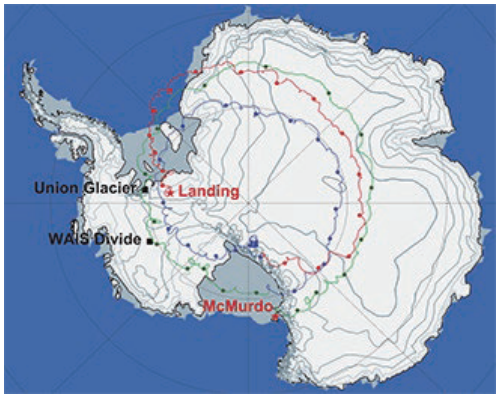


图 4 Super-TIGER 飞行 55 天航迹

Fig. 4 55-day flight path of Super-TIGER

国际上还有一些比较著名的临近空间天文台计划, 例如德国的日出 SUNRISE 计划和日本的风神 FUJIN 计划. 日出 SUNRISE 是由德国马克斯–普朗克学院牵头的太阳观测项目. SUNRISE 计划于 2006 年 6 月进行了第 1 次飞行实验, 2013 年 6 月进行了第 2 次飞行实验, 2022 年 7 月进行了第 3 次飞行实验[29,30], 如图 6 所示. 望远镜对日面中心的宁静区进行了多波段成像观测, 前两次球载任务都获得了详实的科学数据和丰富的科学产出, 第 3 次飞行实验由于望远镜无法对准太阳, 因此无法获得观测数据. 日本风神 FUJIN 任务是在临近空间使用大口径的望远镜对行星进行光学观测, 旨在揭示行星大气现象的机

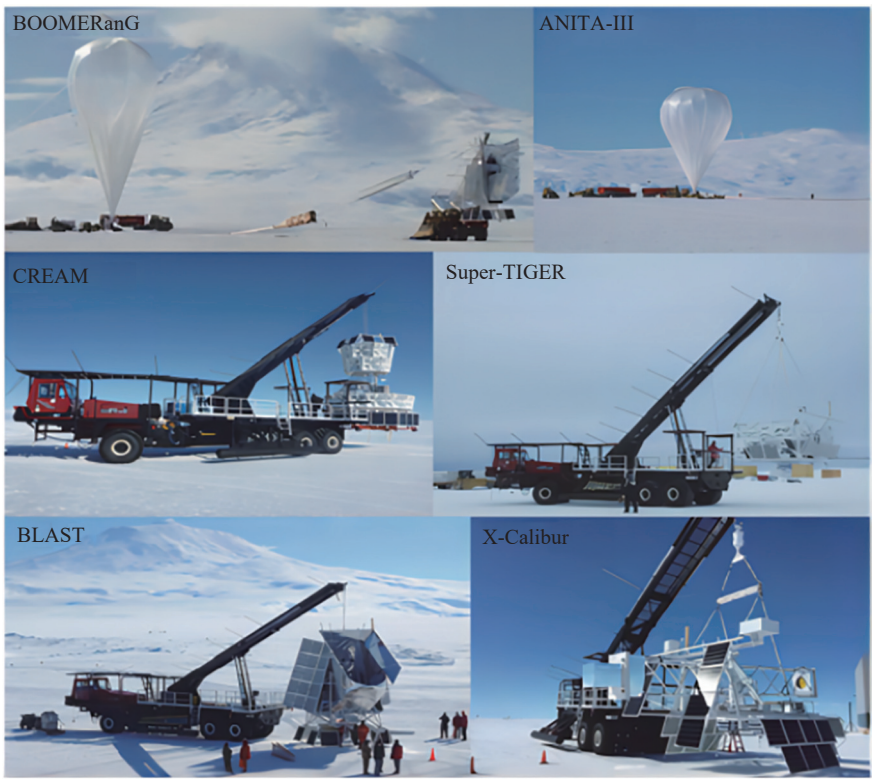


图 5 南极气球天文计划部分项目

Fig. 5 Partial projects of the antarctic balloon astronomy program

表 1　南极气球天文计划 (非粒子天体物理)

Table 1　Antarctic balloon astronomy program (non particle astrophysics)

课题	主要计划和关注领域
大爆炸宇宙学	ARCADE宇宙/天体物理和扩散辐射绝对辐射计: 全新厘米波精密差分辐射计 EREX E/B模实验 NCT 核康普顿望远镜 BLAST球载大孔径亚毫米波望远镜 SPIDER宇宙再电离时代偏振仪 BETTII 红外干涉双望远镜 CoFE-T 背景前景探测 HALO 高空透镜观测台(暗能量) BOOMERanG 毫米波段气候观天计划
X射线和 γ 射线源	DoGONE 多普勒敏感核γ探测 GRAPR γ 射线偏振仪实验 X-Calibur 硬X射线偏振飞行任务
系外行星和宇宙生物学	BEST 球载系外行星光谱望远镜 ICarbS行星离子碳谱仪 Planet Scope 行星望远镜 Zidiac 系外星尘盘探测 STO平流层太赫兹天文台

表 2　南极气球天文计划 (粒子天体物理)

Table 2　Antarctic balloon astronomy program (particle astrophysics)

课题	主要计划和关注领域
宇宙线起源和加速	ATIC宇宙先进薄型离子量能器 CREAM 宇宙线能量和质量探测器: 穿越辐射探测器和钨闪烁光纤测能量 CREST 宇宙线电子同步辐射望远镜: 测高能电子地磁场同步γ辐射 Super-TIGER 超级超铁银河元素记录仪: 闪烁/硅阵列粒子谱仪
中微子天文	ANITA 南极暂现脉冲天线
暗物质和反物质	BESS Polar 气球超导磁谱仪实验: 测量宇宙线中的低能反质子 ATIC 先进薄型离子量能器 GAPS 通用总反物质谱仪: 寻找反氘核和中微子湮灭通道

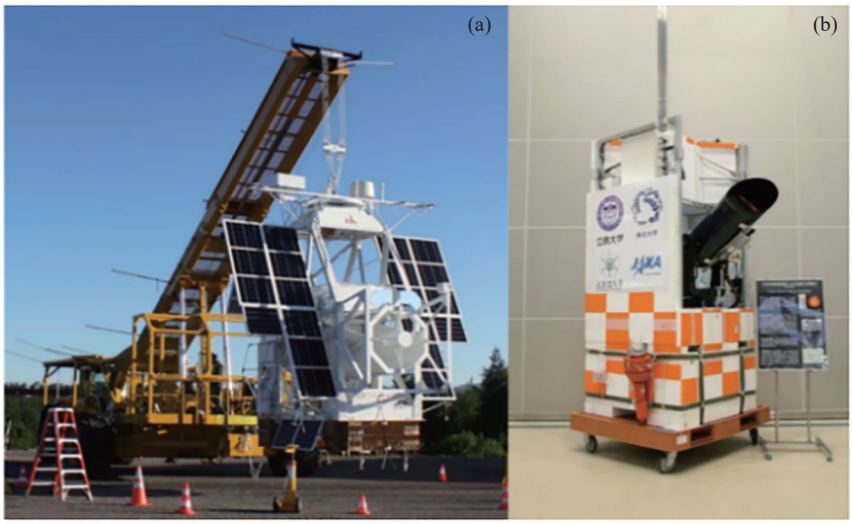


图 6　德国日出 SUNRISE 计划 (a) 和日本风神 FUJIN 计划 (b)

Fig. 6　German SUNRISE Plan (a) and Japanese FUJIN Plan (b)

制, 通过在紫外线到近红外区域以高空间分辨率拍摄特定波长的图像. 到目前为止, 风神有两次计划. 风神1任务目标是进行高精度金星观测, 2013年5月由于恶劣天气条件和总线系统故障, 飞行失败. 风神二任务是对木星和金星进行观测, 飞行实验正在积极筹备中[31].

综上所述, 国外著名空间科研机构均非常重视基于高空科学气球的临近空间天文台的天文观测应用, 在临近空间高度开展了大量的飞行试验, 特别是利用南极的特殊地理条件, 开展了大量长航时的飞行试验, 取得了大量科学成果.

2.2 中国发展现状

中国科学院高能物理研究所在1977年全国自然科学学科规划会议上提出了发展高空科学气球的倡议, 并于1978年正式启动了高空科学气球系统第一期工程, 其主要任务是进行气球观测平台的设计、制造与控制, 以及确保成功进行相关科学观测活动, 如图7所示. 1984年中国科学院基本建成了完整的科学气球系统, 包括 $(1\sim5)\times10^4$ m^3 气球系列及发放、测控、姿控、气象、回收等完整系统, 该系列气球飞行高度可达35 km, 载荷能力可达450 kg, 共发放气球50余次, 并同步开展了初级宇宙线重核成分测量、太阳红外亮度温度测量、宇宙线高能粒子核作用研究、γ射线本底测量和感生的中子本底测量、蟹状星云脉冲星观测等科学观测任务[32]. 1985年中国科学院批准中日合作开展越洋气球飞行计划, 为期三年. 由中国科学院上海天文台、紫金山天文台及空间科学与应用研究中心 (国家空间科学中心前身) 主导的中日跨海长距离气球飞行取得成功, 1986－1988年的7次飞行中获得了天鹅座X-1高能X射线能谱、塞弗特星系SCO-α1红外辐射及测量了太阳红外亮度温度.

中国科学院高能所从1980年初开始开展了HAPI系列球载探测器试验, 于1984－1993年进行了HAPI-1～4球载飞行试验, 成功开展了基于高空科学气球的对脉冲中子星硬X射线以及γ射线背景的观测实验, 取得了丰富的科研成果[33], 如图8所示. 这些气球飞行实验成果验证了直接解调成像方法的有效性, 成功促成了硬X射线调制望远镜 (慧眼HXMT) 卫星立项[34]. 中国科学院紫金山天文台于本世纪初参加了美国南极气球宇宙线探测项目ATIC, 这为后来的暗物质卫星DAMPE立项打下了坚实的基础[35].

1994年在中国科学院和国家自然科学基金委员会 (NSFC) 的资助下, 大型球载太阳望远镜工程 (BST) 启动, 如图9所示. 该工程的科学目标是实现接近衍射极限的0.2″分辨率的观测, 对太阳物理例如磁元的精细结构、太阳活动区与耀斑的能量活动机制及太阳大气结构等方面开展研究[36].



图7 一期工程建立的静态发放系统和气球发放场景

Fig. 7 Static distribution system and balloon distribution scenario established in the first phase of the project

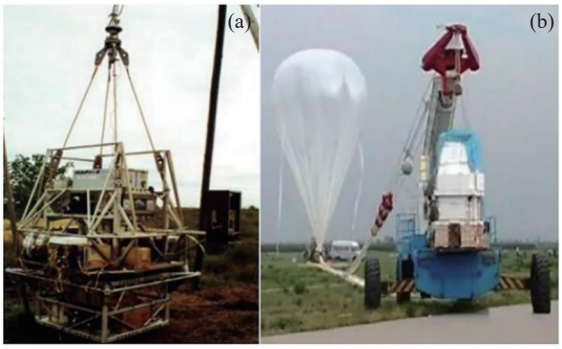


图8 搭载HAPI-4球载硬X射线望远镜吊舱

Fig. 8 Equipped with HAPI-4 ball mounted hard X-ray telescope gondola

2018年, 中国科学院空天信息创新研究院实施的鸿鹄专项正式启动. 鸿鹄专项聚焦临近空间实验平台能力提升, 旨在加强临近空间环境和生态系统认知, 目标为建成中国首个临近空间科学实验系统, 引领临近空间科学研究, 提升临近空间开发利用水平, 是中国首个聚焦临近空间领域的大型科学计划.

在鸿鹄先导专项的支持下, 以中国科学院云南天文台的日冕观测课题“日冕仪临近空间搭载实验”需求为牵引, 中国科学院空天院浮空器研究中心与中国科学院西光所等单位联合研制了基于高空科学气球的临近空间天文台. 该课题的主要任务是研发

50 mm 口径的折射式日冕仪, 其工作波长为 5500 Å, 滤光片透过带宽度为 50～100 Å, 具备对白光日冕进行偏振观测的能力. 2022 年 10 月 4 日该临近空间天文台发放成功, 飞行高度 30 km[37], 如图 10 所示.

在鸿鹄专项的牵引下, 中国科学院空天信息创新研究院已经成功研制出适用于临近空间天文台姿态控制的中型吊舱方位控制系统. 该系统适用于重量在 700 kg 以下 (转动惯量 100～160 kg·m^2) 的吊舱, 能够给搭载的载荷提供长时间 (2 h) 稳定精度≤0.5°, 短时间 (15 min) 稳定精度≤0.2°的方位控制[38]. 中国科学院鸿鹄专项 "临近空间对太阳风暴响应特征观测研究" 科学任务也使用了带有空天院研制吊舱方位姿态系统的临近空间天文台, 如图 11 所示. 该任务的研究对象是: 临近空间对太阳风暴的响应[39]. 2022 年 9 月, 该临近空间天文台成功获取了一个 A 级太阳耀斑事件期间的太阳紫外光谱辐射数据, 揭示了在临近空间高度上的太阳紫外辐射光谱 (190～400 nm) 变化特征, 并给出了临近空间对太阳耀斑紫外 (190～400 nm) 辐射增强响应的模拟结果[40].

中国在重载型临近空间天文台方面, 也取得了重大进展. 2022 年 9 月 30 日, 中国科学院空天信息创新研究院在青海使用 1.8×10^5 m^{3}的高空气球完成了载重能力 1.2 t、飞行高度 30 km 的重载高空气球飞行演示验证试验, 如图 12 所示. 此次试验是中国近年来搭载重量最重的高空气球飞行试验, 标志着中国重载型临近空间天文台研制取得阶段性成功.

2023 年, 中国科学院空天信息创新研究院设计并研制了一款基于 10^6 m^3 重载高空科学气球的临近空间天文台, 可以将 3.6 t 的载荷送入 37 km 的高空,

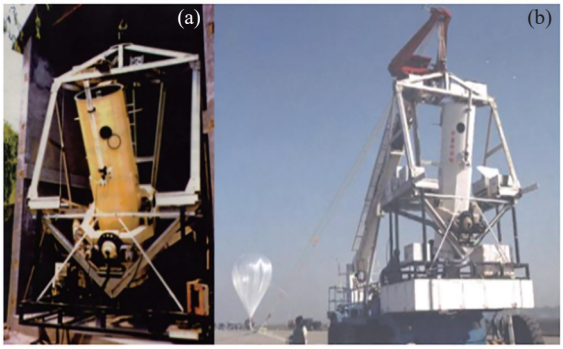


图 9 国家天文台临近空间天文台地面测试 (a) 和发放升空前 (b)

Fig. 9 National observatory near space observatory ground test (a) and release before lift off (b)



图 11 鸿鹄专项临近空间天文台

Fig. 11 Honghu special near space observatory



图 10 搭载日冕仪临近空间整体结构[37] 和实物

Fig. 10 Overall structure of the near space equipped with a coronagraph[41] and physical images



图 12 重载型临近空间天文台

Fig. 12 Heavy duty near space observatory

如图 13 所示. 重载气球的成功研制是一项重要的科研突破, 使得我国成为全世界第二个具备百万量级高空气球研制能力的国家, 也意味着以此为基础的临近空间天文台可以搭载更多更重的观测仪器设备, 一次观测可获取更多的研究成果.

综上所述, 中国较早建成了高空科学气球系统, 具备较好的临近空间天文台技术基础, 早期曾开展过较多的天文观测活动, 近些年在中国科学院鸿鹄专项的牵引下临近空间天文台技术有了进一步发展.

3 临近空间天文台关键技术

临近空间天文台在往高可靠性、高稳定性和高精度控制方向进一步发展的过程中, 需要突破两个关键技术, 即长航时飞行技术和高精度稳定指向技术. 长航时飞行可以让临近空间天文台飞行更长的时间, 一次飞行可以获取更多科研成果. 高精度稳定指向能够让搭载的天文观测设备获得更稳定的观测环境, 实现角秒级精度稳定指向, 可观测超远距离行星星云等目标. 美国 NASA 气球项目办公室主任 Debbie Fair brother 也曾表示临近空间天文台发展的未来方向有两个, 一个是长航时飞行, 另一个是高精度稳定指向.

3.1 长航时飞行技术

长航时飞行技术正在通过超压气球进行实现. 零压气球是开放式结构, 带有排气管, 会因为昼夜温差变化导致气体损失而导致飞行高度有较大变化, 故工作时间受限, 如图 14 所示.

超压气球采用了全新的结构设计, 移除排气管, 球体全封闭, 使用高强度薄膜材料. 超压气球白天受光照导致球内气体的温度升高, 球体封闭不排出气体, 飘飞过程中由球膜承受球体内外压差. 这种设计可以避免昼夜温差导致的浮力损失, 从而实现长时间滞空, 并且飞行高度稳定, 更有利于天文观测的成果产出[41]. 超压气球现阶段比较成熟的结构是球膜–加强筋一体的结构形式: 加强筋安装于相邻两幅球膜的焊缝处, 其长度相比焊缝在设计中有意地缩短, 如图 15 所示. 球膜在受到较大的内外压差时, 会因为高

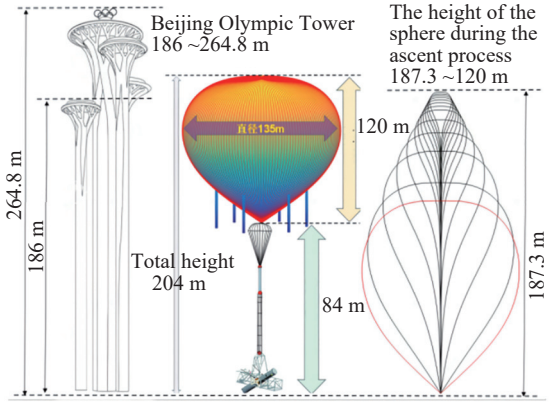


图 13 基于 10^6 m^3 重载气球临近空间天文台概念

Fig. 13 Concept of near space observatory based on 10^6 m^3 heavy-duty balloon



图 14 零压气球飞行过程

Fig. 14 Conceptual diagram of zero pressure balloons

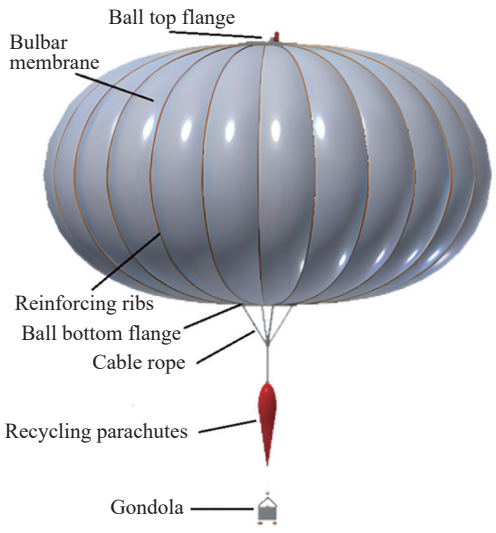


图 15 超压气球概念

Fig. 15 Concept diagram of overpressure balloon

强度、低延伸性加强筋的约束作用形成局部圆弧突起. 这种结构可以明显减小球膜曲率半径, 增加可承受的压差[42,43].

美国 NASA 在 2008 年创造了使用体积为 2×10^5 m^3 的超压型高空科学气球在南极飞行 54 d 的记录, 并在 2016 年南半球中纬度飞行了 46 d[44].

2017 年 9 月中国科学院空天信息创新研究院研制的超压气球在内蒙古首飞取得圆满成功, 该超压气球球体体积约为 7000 m^3, 平飞高度 25 km, 载重能力 150 kg, 总飞行时间 8 h[45]. 到目前为止, 中国科学院空天信息创新研究院已掌握发放 10^4 m^3 超压气球、飞行 30 d 以上的长航时飞行技术. 中美超压气球如图 16 所示.

目前长航时飞行技术有两个方向需要进一步突破: 球膜–加强筋结构的设计制造问题和升空展开不稳定性问题.

球膜–加强筋一体结构会导致在设计和制造中不同体积的超压气球缺乏简单的几何相似律, 因此不同型号体积的气球设计参数需要重新优化. 在球膜–加强筋的结构中, 随着球膜上应力的减小, 加强筋上会产生很大的应力. 在地面加压破坏的实验中, 加强筋相较于球膜先出现断裂, 也证明了在这种一体化结构中, 原本由球膜所承受的应力实际上大幅度地转移到了加强筋上[46]. 既要做到较小的质量, 又要保证足够的强度, 加强筋材料性能成为超压气球设计制造的限制因素之一. 随着材料科学的发展, 球膜和加强筋的性能在不断改善. 同时由于设计和加工的原因, 超压气球中加强筋和球膜的接触受力是比较复杂的, 球成型膨胀过程中容易出现筋膜拉扯效应导致的球膜撕裂现象, 因此设计制造过程中还需要尽可能减弱和避免出现筋膜之间的相互受力.

南瓜型超压气球的展开不稳定问题首次出现于 1984 年 Nott 对超压气球充气过程中. 在充气过程中, 气球形成扭曲状态, 继续加压, 其扭曲形状保持不变, 气球无法展开, 最后在移除四幅球膜后接近稳定状态[47], 如图 17 所示.

美国 NASA 在超长航时气球研制中, 也发现了超压气球随着表面积与体积的增加, 存在着展开不稳定的问题, 充气过程中要么无法进入旋转对称结构, 要么在达到临界压力后发生弯曲, 如图 18 所示.

针对这种现象, 研究尝试采用地面充气展开试验以及数值分析方法来还原超压气球升空时的失稳过程, 以探索失稳形成的原因[48]. 美国 NASA 通过大量的飞行试验以及模型测试, 发现了高空气球的最大瓣角 (即最大直径处各球膜瓣之间的张角) 越大, 气球越容易完全成形. 结合最新研究成果, NASA 在随后开展的 586 NT 和 591 NT 号及后续型号的超压气球飞行试验中, 均实现了超压气球升空完全成形, 并在 2012 年瑞典基律纳成功试飞约 5.32×10^5 m^3 的超压气球, 该气球能在内外压差为 15 Pa 的低压下完全展开, 且在内外压差达到 160 Pa 时仍能平稳飞行, 这些试验结果表明, NASA 最新设计的球形具有可靠性, 在超压气球展开稳定性上取得阶段性突破[49].

大型超压气球的突破和实现将能极大提高临近空间天文台的搭载能力和飞行高度稳定性, 使其能够在较低纬度实现飞行高度 33 km 左右连续飞行 100 天以上的目标.

3.2 高精度稳定指向技术

以往的球载吊舱姿态控制是基于航天器的主动姿态及稳定控制原理和角动量守恒定律, 利用反作用飞轮或力矩陀螺提供交换角动量, 以实现对方位角的调整和控制. 典型的球载吊舱有德国日出项目 (SUN-

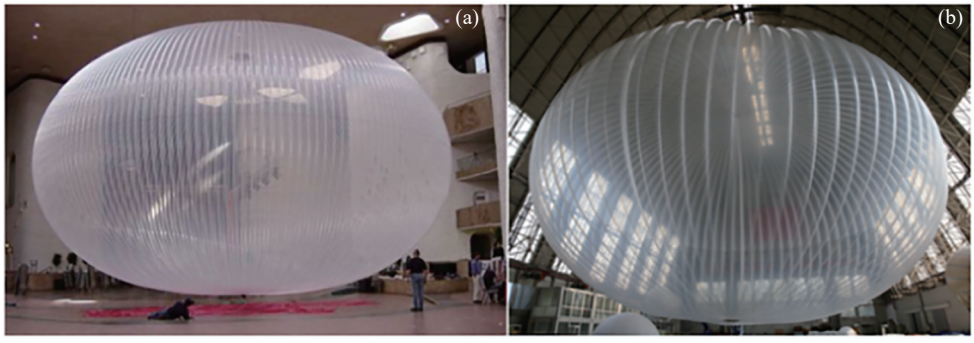


图 16 美国 NASA 超压气球 (a) 和中国超压气球 (b)

Fig. 16 NASA superpressure balloon (a) and China superpressure balloon (b)

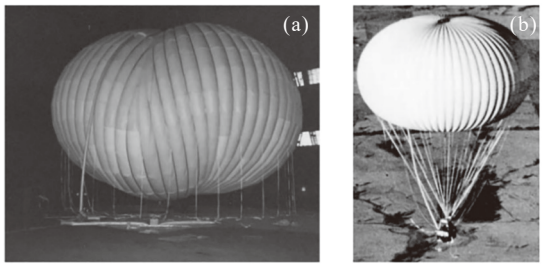


图 17 Nott 的超压气球. (a) 展开不稳定, (b) 移除 4 幅球膜接近稳定

Fig. 17 Nott's overpressure balloon. (a) unfolds unstable, (b) removes 4 spherical membranes and approaches stability

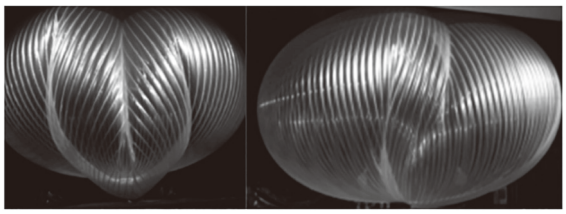


图 18 NASA 地面球体充气实验性展开不稳定

Fig. 18 NASA ground sphere inflation experiments show unstable deployment

RISE), 其通过反作用飞轮和反捻器的配合使用, 实现吊舱方位角的调整和控制, 如图 19 所示.

由于吊舱转动惯量过大, 为实现较好性能飞轮必须达到一定质量, 而且面对外部长时间扭矩会进入饱和状态. 为了进一步突破高精度稳定指向技术, 实现整体控制系统轻量化和高精度稳定指向, 美国 NASA 研制出一套通用球载指向平台的 WASP (Wallops Arc Second Pointing) 系统, 后者能够为天文观测设备提供由于 1″的指向精度[50], 如图 20 所示.

WASP 系统首先使用 NASA 的 SPS(也被称为太阳指向系统), 安装在吊舱上方进行方位控制, 来保持吊舱在 1°～3°精度范围内的粗略方位定位[51]. 主动万向节结构则类似于一个平衡惯性平台, 具有俯仰和偏航双轴, 由直流电机驱动指向, 消除了间隙问题, 并且采用独特的轴承设计, 消除了系统动力学中的两种有害的非线性效应:由于齿轮系引起的形变和由于齿轮系引起的静摩擦[52], 如图 21 所示.

整个控制过程粗方位角控制器将使吊舱旋转到目标方位角, 并在整个观测期间保持该方位角. 俯仰轴和偏航轴随后将被激活, 使球载望远镜达到目标姿态[52].

WASP 团队在研制完成后, 于 2011 年到 2014 年进行了 5 次飞行测试.

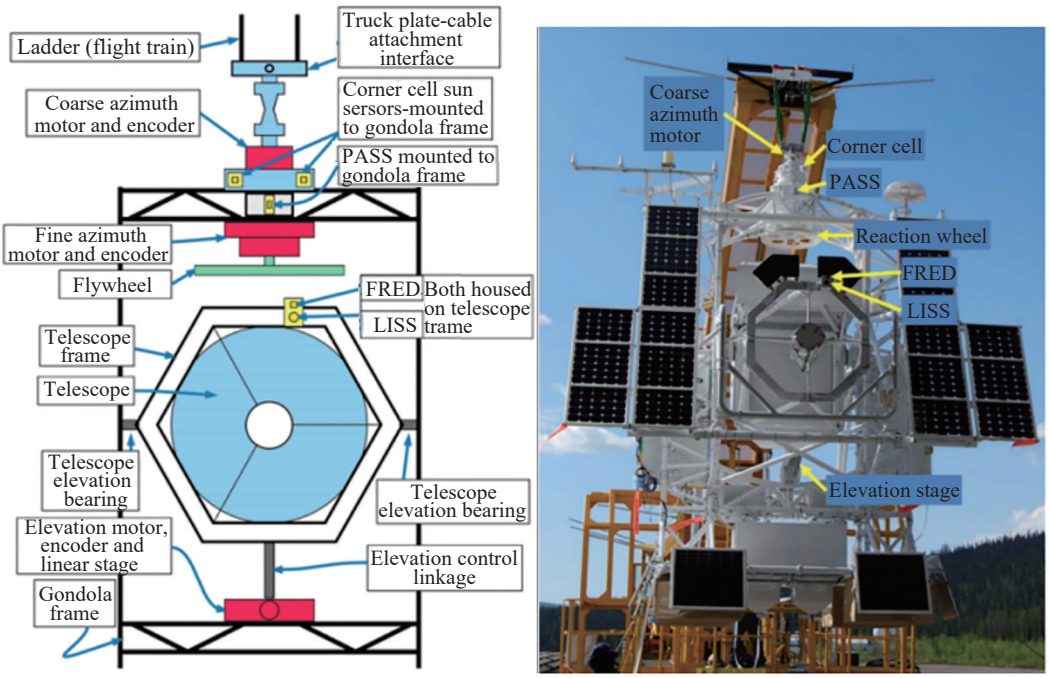


图 19 日出任务结构与实物

Fig. 19 Schematic diagram and physical diagram of the SUNRISE task structure

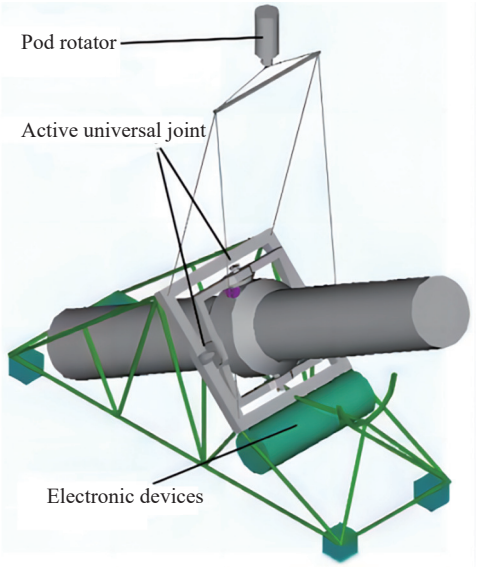


图 20 WASP 概念

Fig. 20 WASP conceptual diagram

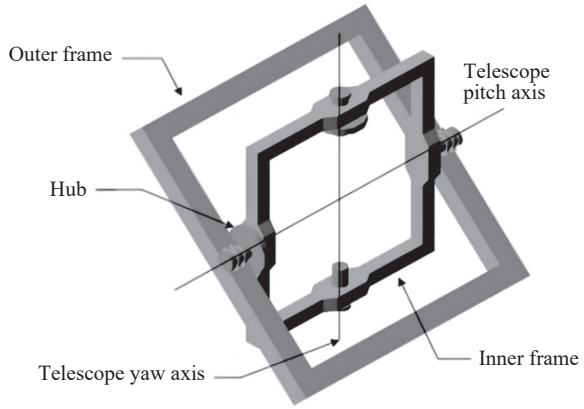


图 21 WASP 主动万向节结构

Fig. 21 WASP active universal joint structure

2011 年 10 月 7 日 WASP 进行第 1 次飞行测试, 目的是证明在典型飞行环境影响下, WASP 可实现角秒指向稳定性. 在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. 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. 试验于 2012 年 9 月 22 日进行, 平台总飞行时间约为 15.5 h, 在 1 h 的惯性指向测试中, 俯仰均方根误差为 0.15″, 偏航均方根误差为 0.22″[53]. WASP 第 1 次和第 2 次测试情况如图 22 所示.

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进来, 分别为第 3 次和第 4 次测试的气候科学高光谱成像仪 (HySICS) 和第 5 次测试的平流层行星观测仪器 (OPIS).

相较于前两次测试, 引入科学仪器设备会带来一些新的调整, 例如安装在指向结构上的斯特林循环制冷机会给指向引入干扰. 在 2013 年 9 月 29 日进行的第三次测试过程中发现了翻滚角漂移现象, 经分析很大程度上是由于循环制冷机的振动对惯导产生了干扰, 导致了偏航的大偏差, 并且增加了惯导速率信号中的噪声, 并造成了 2″到 4″的残余偏移. 第 4 次测试进一步优化了以上问题. 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, 并开始使用平流层行星观测仪器 (OPIS) 进行天文观测. WASP OPIS 的飞行在 2014 年 10 月 8 日发放, 总飞行时间约 11 h. WASP 系统成功地指向了木星和火星以及一些恒星目标, 包括天棓四星 (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, 结合来自星跟踪器的单位矢量的目标相对姿态角的俯仰均方根误差为 0.47″RMS, 偏航均方根误差为 0.39″RMS[53], 如图 23 所示.

在 WASP 系统具备了高精度稳定指向功能后, NASA 使用 WASP 系统承载了三次科学实验, 即 X-Calibur 任务、BITSE 任务和 PICTURE-C 任务.

X-Calibur 科学任务是测量硬 X 射线 25-70 kev 能量范围的线偏振. 2016 年 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[54,55]. BITSE 任务是美国 NASA 与韩国 KASI 合作开发的外掩单级日冕仪, 用来证明当电子的温度和速度发生变化时, 可以通过量化 k-日冕谱的形状变化和红移来测量日冕电子的温度和流动速度. 2019 年 BITSE 任务升空后最终获得了 17060 张日冕图像, 观测到的窄条纹与 SOHO 日冕仪在重叠物理域的几何性质吻合较好[56]. 球载行星成像可回收测试实验平台–星冕仪 PICTURE-C 任务的目标是为了搜索观测系外行星. 2019 年第 1 次飞行实验成功展示了系外行星直接成像任务的许多关键技术. 2022 年第 2 次飞行实验, 首次成功使用其高阶和低阶波前控制系统在近空间环境中的天文台上执行焦平面波前校正[57,58], 如图 24 所示.

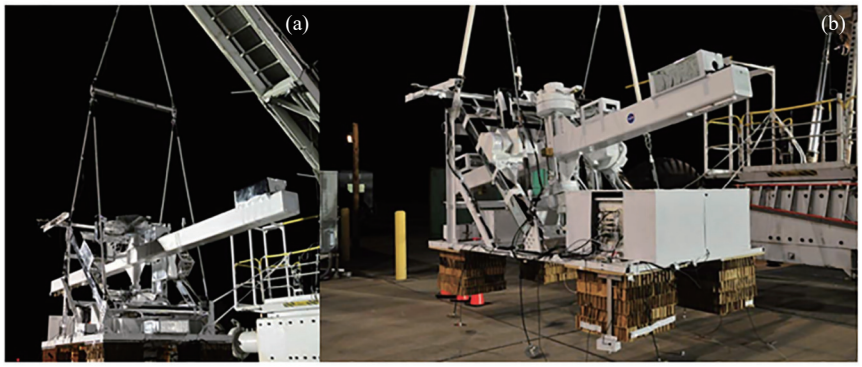


图 22 WASP 第 1 次 (a) 和第 2 次测试 (b)

Fig. 22 First (a) and second test (b) of WASP

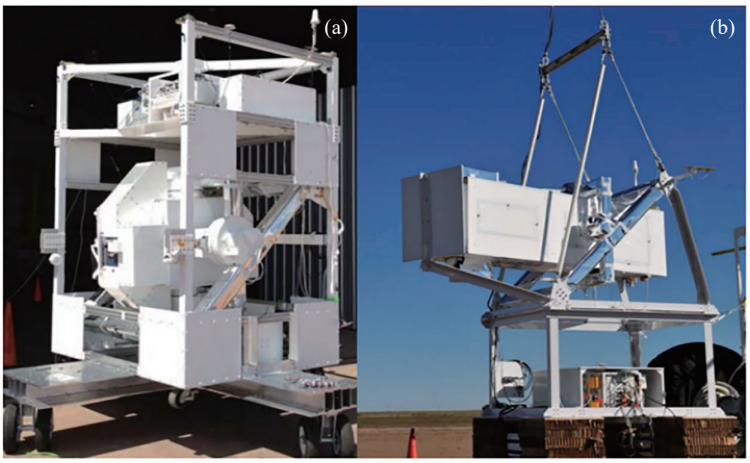


图 23 WASP HySICS (a) 和 WASP OPIS (b)

Fig. 23 WASP HySICS (a) and WASP OPIS (b)

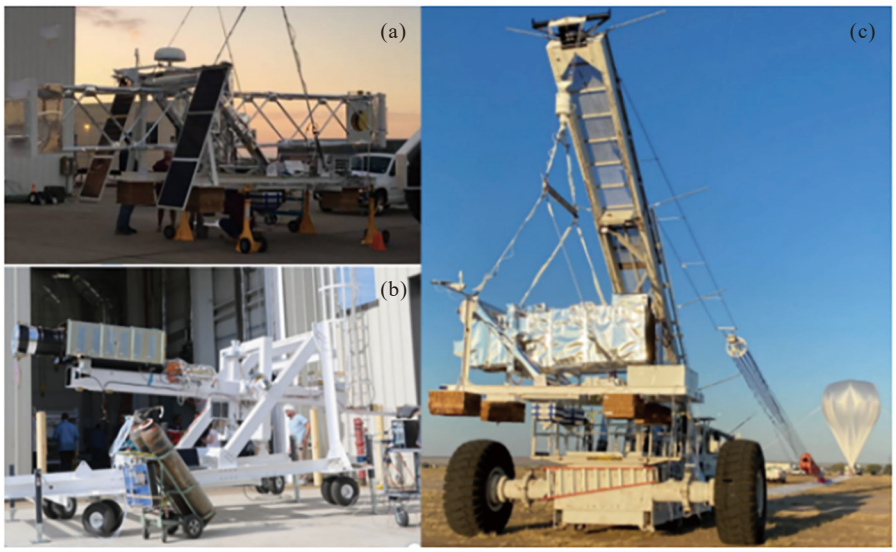


图 24 起飞前的 X-Calibur (a), BITSE 集成后地面测试 (b), 飞行前的 PICTURE-C (c)

Fig. 24 X-Calibur before takeoff (a), ground testing after BITSE integration (b), PICTURE-C before flight (c)

WASP 指向系统开发项目于 2014 年成功完成. 在 4 年的 5 次试飞中, WASP 系统可以适应各种质量、惯性和配置的载荷, 同时保持角秒级的高精度性能. 随后进行了 3 次科学实验, 实现了高精度稳定指向, 完成了预定科学目标. 由于具有卓越的指向性能, WASP 系统被美国 NASA 认为是除超压气球技术之外, 高空科学气球领域的另一大技术突破.

4 临近空间天文台发展展望

结合长航时技术和高精度稳定指向技术的临近空间天文台与球载望远镜结合具有以下优点. 望远镜温度≤250 K, 可以观测微弱的太阳系目标; 飞行高度≥33 km, 对于红外观测, 可以最小化地球大气的影响; 望远镜的口径≥1 m, 允许以经济高效的方式收集光线, 以实现最大的信噪比衍射极限性能; 0.5″的指向能力, 允许观察延长的目标和多次短时间曝光; 时间覆盖率≥100 d, 允许长时间飞行用于监测行星目标上的时变过程[59]. 球载行星望远镜概念如图 25 所示.

4.1 科学思想前期验证平台

搭载科研观测仪器的临近空间天文台可以与天基卫星、地基科研平台及其他形式的科研平台相互配合, 对创新思想进行前期验证, 将其提升成潜在的天基天文台载荷. 临近空间天文台具备成为空间科学天文观测先进仪器和创新思想的前期验证平台的潜力.

从气球飞行使用的仪器中衍生出的航天器仪器的例子很多[60] (见表 3), 图 26 为部分项目展示.

综上分析可以看出, 基于高空科学气球的临近空间天文台完全可以作为科学思想前期验证平台, 促进



图 25 球载行星望远镜概念

Fig. 25 Conceptual diagram of a spherical planetary telescope

表 3 从气球飞行的仪器中衍生的航天器仪器部分案例

Table 3 Partial examples of spacecraft instruments derived from balloon flying instruments

序号	航天器仪器	衍生于气球项目
1	康普顿 γ 射线天文台的仪器	美国NASA气球飞行仪器设备
2	宇宙微波背景探测器COBE卫星/威尔金森观测卫星WMAP	宇宙微波背景辐射探测BOOMERANG
3	鲁万–拉马蒂高能太阳光谱成像仪RHESSI探测器	由气球携带的开发仪器改进
4	高级宇宙定位探测器ACE的宇宙射线同位素光谱仪	首次演示在气球飞行中进行
5	地球观测系统EOS: Aura卫星仪器	可以追溯到气球飞行仪器设备
6	火星挥发物和气候勘测器MVACS	可以追溯到气球飞行仪器设备
7	火星极地着陆器上的热和进化气体分析仪TEGA	可以追溯到气球飞行仪器设备
8	国际空间站项目: 阿尔法磁谱仪AMS	气球实验: 超导磁谱仪实验BESS Polar
9	中国暗物质探测卫星DAMPE	气球实验: 先进薄型离子量能器ATIC
10	国际空间站项目ISS-CREAM	气球宇宙线能量和质量探测器CREAM
11	国际空间站项目: 日冕诊断实验CODEX	日冕温度和电子速度气球研究BITSE
12	中国硬X射线调制望远镜卫星: 慧眼HXMT	中国高空科学气球HIPI-1～4
13	欧洲航天局的太阳轨道飞行器	日出SUNRISE气球飞行任务的IMaX仪器
14	国际空间站项目JEM-EUSO	EUSO-Balloon 任务



图 26 衍生到航天设备中的部分气球仪器项目

Fig. 26 Partial balloon instrument projects derived from aerospace equipment



图 27 美国南极麦克默多站

Fig. 27 McMurdo station

新一代尖端科学探测技术的发展, 成为航天器/天基天文台的重要技术储备源头, 为前沿科学和新一代先进的空间科学任务夯实基础.

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、可回收多次利用、具有较多的发射和飞行窗口等优势, 可以容纳较多的科研项目, 能够充分激发科学家的潜能, 有力地激励原创性科学思想, 进而推动前沿科学研究.

4.2 中国南极天文观测建议

虽然我国在制约临近空间天文台的硬件技术上已经取得了突破, 具备了长航时大载重的飞行能力, 但是由于国内民航的蓬勃发展, 国内空域的限制在一定程度上制约了基于高空科学气球的临近空间天文台的天文观测活动.

天文观测需要长时间观测, 而南极是全球长时间气球飞行的最佳区域: 南极夏季不落日, 南纬 70°冬至前后各约两个月, 基本避免了昼夜气球温度交变和浮力损失. 同时南极地区的极地涡旋使得零压气球可以实现定高长时间绕飞, 有利于回收, 且没有飞行限制. 美国在南极罗斯海地区建成了麦克默多站, 后由南极天文计划发展成为了著名的世界级高空科学气球基地 (见图 27)[61]. 2023 年 12 月 NASA 在南极发放的 GUSTO 任务取得了空前成功, 飞行时间打破了原 55 天的纪录.

中国于 2024 年 2 月建成并开站的秦岭站所在纬度为南纬 74°56′, 接近美国麦克默多站的纬度–南纬 77°50′50″. 如果在秦岭站可以开展高空科学气球飞行, 则可以借助极地涡旋, 实现长时间绕飞. 因此建议后续尝试在秦岭站开展临近空间天文台的飞行试验, 开展中国的临近空间天文台南极天文观测.

5 结语

临近空间天文台是一种特殊的天文台, 选址于临近空间, 依托于高空科学气球浮空器平台. 随着科学技术不断发展, 以美国为代表的国家在制约临近空间天文台的关键技术难题上做出了新的突破, 让科学界看到了临近空间天文台在天文观测领域的潜力.

临近空间天文台作为空间科学天文观测先进仪器和创新思想的前期验证平台, 能够有效提高天基天文台观测任务的成功率, 缩短天基天文台研发生命周期; 同时作为空间科学人才培养平台, 可以成为空间科学家和工程师的摇篮, 培育更多领军人才, 壮大研究队伍.

近年来受空域限制, 中国的临近空间天文观测活动在频度上与先进国家有较大差距. 因此, 建议以中国南极第五站秦岭站开通为契机, 适时开展南极秦岭站的高空科学气球飞行试验, 进一步推动中国临近空间天文台的南极天文观测, 为中国空间科学发展贡献更大的力量.

参考文献

[1] WANG Haiming. The National Academy of Sciences releases its Decadal Survey of Astronomy and Astrophysics[J]. *Journal of Space Science*, 2022, **42**(1): 5-8 (王海名. 美国国家科学院发布天文学和天体物理学十年调查报告 [J]. 空间科学学报, 2022, **42**(1): 5-8)

[2] RAN Fanhui. Research and Design of Remote Control System for Astronomical Site Selection Telescope Based on RTS2[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015 (冉凡辉. 基于 RTS2 的天文选址望远镜远程控制系统研究与设计 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015)

[3] LIU Haocheng. Study on Geographical Environment Suitability of Observatory Site Selection Based on Multi-source Remote Sensing at Lenghu Region[D]. Xining: Qinghai University, 2023 (刘浩成. 基于多源遥感的冷湖区域天文台选址地理环境适宜度研究 [D]. 西宁: 青海大学, 2023)

[4] COSTA J, BOCK A, EMMART C, *et al*. Interactive visualization of atmospheric effects for celestial bodies[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2021, **27**(2): 785-795

[5] RODIMOVA O B. Carbon dioxide and water vapor continuum absorption in the infrared spectral region[J]. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2018, **31**(6): 564-569

[6] ZHANG L H, XIONG R, CHEN J, *et al*. Optical image compression and encryption transmission-based ondeep learning and ghost imaging[J]. *Applied Physics B*, 2020, **126**(1): 18

[7] BAUER S E, IM U, MEZUMAN K, *et al*. Desert dust, industrialization, and agricultural fires: Health impacts of outdoor air pollution in Africa[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, **124**(7): 4104-4120

[8] 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)

[9] BAI Qingjiang, FAN Quanlin, SHI Peng, *et al*. On the development of NASA's next generation flagship scientific mission WFIRST[J]. *Science & Technology Review*, 2021, **39**(11): 38-45 (白青江, 范全林, 时蓬, 等. 关于新一代旗舰型科学卫星 WFIRST 发展的分析 [J]. 科技导报, 2021, **39**(11): 38-45)

[10] WU Ji, WANG Chi, FAN Quanlin. Review on 11 years of implementation of Strategic Priority Program (SPP) on space science and its prospect[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, **37**(8): 1019-1030 (吴季, 王赤, 范全林. 中国科学院空间科学战略性先导科技专项实施 11 年回顾与展望 [J]. 中国科学院院刊, 2022, **37**(8): 1019-1030)

[11] CHANG J, AMBROSI G, AN Q, *et al*. The DArk matter particle explorer mission[J]. *Astroparticle Physics*, 2017, **95**: 6-24

[12] ZHANG S N, LI T P, LU F J, *et al*. Overview to the hard X-ray modulation telescope (*Insight*-HXMT) satellite[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2020, **63**(4): 249502

[13] LI Xinqiao, WEN Xiangyang, AN Zhenghua, *et al*. The GECAM and its payload[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2020, **50**(12): 80-96 (李新乔, 文向阳, 安正华, 等. GECAM 卫星有效载荷介绍 [J]. 中国科学 (物理学 力学 天文学), 2020, **50**(12): 80-96)

[14] GAN W Q, FENG L, SU Y. A Chinese solar observatory in space[J]. *Nature Astronomy*, 2022, **6**(1): 165

[15] Yuan W, Zhang C, Feng H, *et al*. Einstein probe — a small mission to monitor and explore the dynami X-ray universe[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology*, 2015, **23**(4): 383-6

[16] 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)

[17] SMITH-PIERCE M C, CHAROENBOONVIVAT Y C,

SHUKLA D, *et al*. High altitude aerodynamic reflectors to counter climate change[C]//2018 Applied Aerodynamics Conference. Atlanta: American Institute of Aeronautics, 2018

[18] 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)

[19] GU Yidong. 100 years of balloon science observation[J]. *Modern Physics Knowledge*, 2020, **32**(2): 3-12 (顾逸东. 气球科学观测 100 年 [J]. 现代物理知识, 2020, **32**(2): 3-12)

[20] 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)

[21] LI Zhibin, HUANG Wanning, ZHANG Zhao. Summary of the hot spots of near space vehicles in 2018[J]. *Science & Technology Review*, 2019, **37**(1): 44-51 (李智斌, 黄宛宁, 张钊. 2018 年临近空间科学热点回眸 [J]. 科技导报, 2019, **37**(1): 44-51)

[22] MCCARTHY D J. Operating characteristics of the stratoscope II balloon-borne telescope[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1969, **AES-5**(2): 323-329

[23] SMITH JR I S. Advancements in NASA balloon research and development[J]. *Advances in Space Research*, 1996, **17**(9): 37-44

[24] CHEN Xu. Development of long duration high altitude balloon[J]. *Spacecraft Engineering*, 2007, **16**(4): 83-88 (陈旭. 长时高空气球的研制发展 [J]. 航天器工程, 2007, **16**(4): 83-88)

[25] ZHU Rongchen, WANG Sheng, JIANG Luhua. Development status of long endurance superpressure balloon technology[C]//Chinese Aeronautical Society. Harbin: Chinese Aeronautical Society, 2014 (祝榕辰, 王生, 姜鲁华. 长航时超压气球技术的发展现状 [C]//2014 年中国浮空器大会. 哈尔滨: 中国航空学会, 2014)

[26] ORR G D. The long duration balloon vehicle (LDBV) flight system development[C]//34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 2012

[27] BINNS W R, BOSE R G, BRAUN D L, *et al*. The SUPERTIGER instrument: measurement of elemental abundances of ultra-heavy galactic cosmic rays[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, **788**(1): 18

[28] RAINWATER E L, SMITH M S. Ultra high altitude balloons for medium-to-large payloads[J]. *Advances in Space Research*, 2004, **33**(10): 1648-1652

[29] LECINSKI A, CARD G, KNÖLKER M, *et al*. The design and performance of the gondola pointing system for the sunrise II balloon-borne stratospheric solar observatory[J]. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2017, **6**(2): 1740007

[30] 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)

[31] 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): Pk_95-Pk_102

[32] GU Yidong. From high-altitude balloons to manned spaceflight[J]. *Modern Physics Knowledge*, 2023, **35**(S1): 192-199 (顾逸东. 从高空气球到载人航天 [J]. 现代物理知识, 2023, **35**(S1): 192-199)

[33] LI Tibei, GU Yidong. China's high altitude scientific balloon and high energy astronomical observation[J]. *Nature Journal*, 1984(3): 163-169, 240 (李惕碚, 顾逸东. 我国的高空科学气球与高能天文观测 [J]. 自然杂志, 1984(3): 163-169, 240)

[34] LU Fangjun. From ball-borne experiments to HXMT[J]. *Modern Physics Knowledge*, 2021, **33**(2): 4-11 (卢方军. 从球载实验到慧眼卫星 [J]. 现代物理知识, 2021, **33**(2): 4-11)

[35] CHANG J, ADAMS J H, AHN H S, *et al*. An excess of cosmic ray electrons at energies of 300-800 GeV[J]. *Nature*, 2008, **456**(7220): 362-365

[36] 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)

[37] LIN Jun, SONG Tengfei, SUN Mingzhe, *et al*. A 50-mm balloon-borne white-light coronagraph: Ⅰ. Basic structure and experiments on the ground[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2023, **53**(5): 154-180 (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 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, **53**(5): 154-180)

[38] LI Yijian. Research on attitude control Technology of Balloon borne Pod Based on Multi-sensor Fusion[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2023 (李一健. 基于多敏感器组合的球载吊舱姿态控制技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2023)

[39] WANG Xinyue, DU Dan, YAN Zhao'ai, *et al*. *In situ* observation of atmospheric NO_x over Qinghai-Tibet Plateau by scientific experiment system in near space program[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, **67**(27): 3348-3356 (王馨悦, 杜丹, 闫召爱, 等. 临近空间飞行平台青藏高原大气 NO_x 原位观测实验 [J]. 科学通报, 2022, **67**(27): 3348-3356)

[40] LI L, SU J F, CHEN T, *et al*. Measurement of atmospheric conductivity on the Qinghai-Tibet Plateau in China[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2022, **134**(2): 40

[41] 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)

[42] ZHU Rongchen, WANG Sheng, YANG Yanchu, *et al*. Design and ground experiments of pumpkin shaped superpressure balloon spheres[C]//Proceedings of the 4th Academic Annual Conference on High Resolution Earth Observation. Beijing: Office for 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: 高分辨率对地观测系统重大专项管理办公室 (中国科学院), 2017)

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

[44] GASKIN J A, SMITH I S, JONES W V. Introduction[J]. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2014, **3**(2): 1403001

[45] ZHU Rongchen. Superpressure balloons achieve their first near space flight[J]. *Modern Physics Knowledge*, 2018, **30**(1): 1 (祝榕辰. 超压气球实现临近空间首飞 [J]. 现代物理知识, 2018, **30**(1): 1)

[46] CATHEY JR H M. Evolution of the NASA ultra long duration balloon[C]//AIAA Balloon Systems Conference. Williamsburg: AIAA, 2007

[47] CALLADINE C R. Stability of the "Endeavour" balloon[J]. *Studies in Applied Mechanics*, 1988, **19**: 133-149

[48] BU Yalou, CAI Rong, YANG Yanchu, *et al*. Study on stability of pumpkin shape super pressure balloon deployment[J]. *Computer Simulation*, 2023, **40**(5): 56-63 (卜亚楼, 蔡榕, 杨燕初, 等. 南瓜型超压气球展开稳定性研究 [J]. 计算机仿真, 2023, **40**(5): 56-63)

[49] NAKASHINO K, SAITO Y, AKITA D, *et al*. Analytical study on the inflated shape of a superpressure balloon covered with a diamond-shaped net[J]. *Advances in Space Research*, 2023, **71**(1): 705-719

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

[51] 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

[52] STUCHLIK D W. The wallops arc second pointer-a balloon borne fine pointing system[C]//AIAA Balloon Systems Conference. Dallas: AIAA, 2015

[53] STUCHLIK D W, LANZI R. 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

[54] 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

[55] 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

[56] 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]//Proceedings of the SPIE 11116, Astronomical Optics: Design, Manufacture, and Test of Space and Ground Systems. San Diego: SPIE, 2019: 111160F

[57] 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 of the SPIE 12680, Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets. San Diego: SPIE, 2023: 126800F

[58] 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 of the SPIE 11117, Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets. San Diego: SPIE, 2019: 111171R

[59] YOUNG E. NASA's GHAPS Project: A balloon-borne telescope for planetary science[C]//Egu General Assembly Conference. Vienna: EGU General Assembly, 2017

[60] VON EHRENFRIED M D. Stratospheric Balloons: Science and Commerce at the Edge of Space[M]. Cham: Springer, 2021

[61] GORHAM P W. Particle astrophysics in NASA's long duration balloon program[J]. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, 2013, 234/235/236/237/238/239/240/241/242/243/244: 231-238

作者简介



李一健 男, 1998 年 9 月出生于江西省吉安市, 现为中国科学院空天信息创新研究院博士研究生, 飞行器设计与控制专业.
E-mail: lyjiantx2018@163.com



黄宛宁 男, 1980 年 5 月出生于河南省南阳市, 现为中国科学院空天信息创新研究院高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为临近空间浮空器科学探测, 多浮空器组网通信、空间信息网络等.
E-mail: hwn@aoe.ac.cn