0254-6124/2024/44(3)-0400-25 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

GE Jian, CHEN Wen, CHEN Yonghe, SONG Zongxi, WANG Jian, ZHANG Hui, LI Yan, ZANG Weicheng, ZHOU Dan, ZHANG Yongshuai, CHEN Kun, YANG Yingquan, MAO Shude, HUANG Chelsea, YAO Xinyu, LI Xinglong, JIANG Haijiao, YU Yong, TANG Zhenghong, DONG Feng, GAO Wei, ZHANG Hongfei, SHEN Chao, WANG Fengtao, WEI Chuanxin, YANG Baoyu, LI Yudong, WEN Lin, ZHANG Pengjun, ZHANG Congcong, XIE Jiwei, MA Bo, DENG Hongping, LIU Huigen, DUAN Xuliang, WANG Haoyu, HUANG Jiangjiang, GAO Yang, WANG Yifei, WANG Lei, QIN Genjian, LIU Xinyu, GAO Jie. Search for a Second Earth – the Earth 2.0 (ET) Space Mission (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(3): 400–424. DOI:10.11728/cjss2024.03.yg05

搜寻第二个地球——系外地球 (ET) 巡天计划*

葛 健[1] 陈 雯[2] 陈永和[3] 宋宗玺[4] 王 坚[5]
张 辉[1] 李 岩[1] 臧伟呈[6] 周 丹[1]
张永帅[1] 陈 琨[2] 阳应权[2] 毛淑德[6] 黄 煦[7]
药新雨[1] 李兴隆[8] 姜海娇[1] 于 涌[1]
唐正宏[1] 董 峰[3] 高 伟[4] 张鸿飞[5] 申 超[4]
王峰涛[4] 魏传新[3] 杨宝玉[3] 李豫东[9]
文 林[9] 张朋军[1] 张聪聪[1] 谢基伟[10]
马 波[11] 邓洪平[1] 刘慧根[10] 段旭亮[2]
王昊宇[2] 黄江江[2] 高 扬[2] 王伊菲[2] 王 磊[2]
秦根健[2] 刘欣宇[2] 高 婕[5]

1(中国科学院上海天文台 上海 200030)

2(中国科学院微小卫星创新研究院 上海 201304)

3(中国科学院上海技术物理研究所 上海 200083)

4(中国科学院西安光学精密机械研究所 西安 710119)

5(中国科学技术大学 合肥 230026)

6(清华大学天文系 北京 100190)

7(南昆士兰大学天体物理中心 图文巴 QLD4350)

8(中国航天科技集团公司第八研究院 803 研究所 上海 201109)

9(中国科学院新疆理化技术研究所 乌鲁木齐 830011)

10(南京大学天文系 南京 210023)

11(中山大学物理与天文学院 珠海 519082)

* 中国科学院战略性先导科技专项空间科学 (二期) 背景型号项目资助 (XDA15020600)
2023-10-08 收到原稿, 2024-05-06 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/)

摘 要 系外地球科学卫星 (ET) 将通过采用空间大视场超高精度测光这一关键技术在国际上率先突破生命起源中的系外地球存在及其演化这一重大前沿科学问题. ET 卫星将在日地拉格朗日 L2 点晕 (Halo) 轨道部署由 6 台广角凌星望远镜和 1 台微引力透镜望远镜构成的空间天文台, 结合凌星法和微引力透镜法, 利用空间超大视场和超高精度的光学测光观测, 首次发现富有重要意义、被广泛关注的系外地球, 并确定其发生率, 对目前了解甚少的类地行星和流浪行星进行国际上第一次大规模的种群普查, 首次发现流浪地球, 并确定其发生率, 揭示类地行星和流浪行星起源, 为地外生命探寻提供候选者和新方向. ET 卫星的观测结果、统计研究以及和对理论的检验将回答系外地球在宇宙中有多普遍, 类地行星是如何形成和演化的, 流浪行星又是如何起源的这些亟待解决的前沿科学问题. 对 ET 卫星发现的系外地球样本的后随观测, 将精确测量其质量、密度和大气成分, 有助于深入分析宜居性特征. 此外, 对 ET 新发现的大量各种系外行星样本的研究, 以及对理论的检验将推动这些种类的行星形成和演化规律的更深入认识, ET 的大量高精度、高频次和长基线测光数据将推动星震学、银河系考古学、时域天文学、双星和双星黑洞等领域的研究.

关键词 系外行星, 类地行星, 宜居带, 凌星, 微引力透镜, 测光

中图分类号 P12

Search for a Second Earth – the Earth 2.0 (ET) Space Mission

GE Jian[1] CHEN Wen[2] CHEN Yonghe[3] SONG Zongxi[4] WANG Jian[5]
ZHANG Hui[1] LI Yan[1] ZANG Weicheng[6] ZHOU Dan[1] ZHANG Yongshuai[1]
CHEN Kun[2] YANG Yingquan[2] MAO Shude[6] HUANG Chelsea[7] YAO Xinyu[1]
LI Xinglong[8] JIANG Haijiao[1] YU Yong[1] TANG Zhenghong[1] DONG Feng[3]
GAO Wei[4] ZHANG Hongfei[5] SHEN Chao[4] WANG Fengtao[4] WEI Chuanxin[3]
YANG Baoyu[3] LI Yudong[9] WEN Lin[9] ZHANG Pengjun[1] ZHANG Congcong[1]
XIE Jiwei[10] MA Bo[11] DENG Hongping[1] LIU Huigen[10] DUAN Xuliang[2]
WANG Haoyu[2] HUANG Jiangjiang[2] GAO Yang[2] WANG Yifei[2]
WANG Lei[2] QIN Genjian[2] LIU Xinyu[2] GAO Jie[5]

1(*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 200030)

2(*Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 201304)

3(*Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 200083)

4(*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an* 710119)

5(*University of Science and Technology of China, Hefei* 230026)

6(*Department of Astronomy, Tsinghua University, Beijing* 100190)

7(*Centre for Astrophysics, University of Southern Queensland, Toowoomba QLD* 4350)

8(*The 8th Research Institute, China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai* 201109)

9(*Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011)

10(*Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing* 210023)

11(*School of Physics and Astronomy, SUN YAT-SEN University, Zhuhai* 519082)

Abstract The Earth 2.0 (ET) mission will pioneer the international breakthrough in the frontier scientific issue of the existence and evolution of Earth 2.0s (or exo-Earths) in the origin of life by adopting the key technology of ultra-high precision photometry with a large field of view in space. The ET mission will deploy a space observatory consisting of six wide-field transit telescopes and one micro-lensing telescope in a halo orbit at the Sun-Earth Lagrange L2 point. Combining transit and micro-lensing methods, utilizing the ultra-large field of view and ultra-high precision optical photometry observations in space, the ET mission will for the first time discover historically significant Earth 2.0s and determine their occurrence rate. It will conduct the first large-scale survey of terrestrial-like and free-floating planets, discover free-floating Earth-mass planets and measure their occurrence rates, reveal the origins of Earth-like and free-floating planets, and provide candidates and new directions for the search for extraterrestrial life. The observational results, statistical studies, and theoretical tests of the ET mission will answer pressing frontier scientific questions such as "How common are Earth-like planets in the universe", "How do Earth-like planets form and evolve" and "How do free-floating planets originate". Follow-up observations of the Earth 2.0 samples discovered by the ET mission will precisely measure their mass, density, and atmospheric composition, contributing to an in-depth study of their habitability characteristics. Moreover, the study of the large number of various exoplanet samples newly discovered by ET, as well as tests of theories, will promote a deeper understanding of the formation and evolution of these types of planets. ET's abundant high-precision, high-cadence, and long-baseline photometric data will advance research in fields such as asteroseismology, Galactic archaeology, time-domain astronomy, binary stars, and binary black holes.

Key words Exoplanets, Terrestrial-like planets, Habitable zone, Transit, Microlensing, Photometry

0 引言

人类自文明诞生以来就一直好奇我们是否是宇宙中的唯一智慧生命, 并希望在未来能找到来自其他星球的智慧生命, 以回答"人类在宇宙中是否孤独"这个基本问题. 然而, 由于技术的限制, 过去对宇宙生命的认识只能通过古代的各种神话传说以及现代的科幻来描述对宇宙生命和外星人的思考和想象.

这种现状在 1995 年终于被打破, 天文学家首次通过视向速度 (Radial Velocity) 测量法发现第一颗围绕类太阳恒星公转的短轨道周期 (4.2 天) 的太阳系外的热木星[1]. 虽然巨行星上面不太可能有生命, 但这一发现使人类对系外行星的认识发生根本改变: 从原先相信系外行星的可能存在, 到真正发现系外行星的存在, 挑战了当时行星系统形成的传统理解, 彻底改变了人们对宇宙的认识. 因为这一历史性科学突破, 两位发现者被授予 2019 年诺贝尔物理学奖.

自 1995 年以来, 系外行星搜寻领域取得突飞猛进的发展, 已探测到 5000 多个系外行星*, 并发现系外行星的性质具有多样性, 其中绝大多数与太阳系内的行星不一样. 这些系外行星主要通过采用多普勒视向速度法、凌星法、微引力透镜法和直接成像法等观测发现的.

系外行星的探测方法各具优势. 视向速度法可以测量行星的质量下限 (因轨道倾角无法被直接测量)、轨道周期和偏心率等主要参量. 凌星法可以测量行星的大小、轨道周期和轨道倾角等主要参量, 也可以通过凌星透射光谱获得行星大气成分. 直接成像法可以获得行星的轨道周期、偏心率和光谱. 而微引力透镜法可以获得行星和恒星的质量比以及轨道的周期等参量. 由于视向速度法和凌星法通过观测系外行星绕着寄主恒星转产生的周期性信号, 这两种方法适用于探测离恒星较近, 也就是轨道周期较短的行星的信号. 相反, 因为恒星的亮度远超系外行星的亮度, 直接成像更适用发现离恒星较远距离, 即长轨道周期的系外行星. 三种方法可以通过后随观测进一步获得其他重要参量. 然后, 由于背景恒星—微引力透镜行星—观测者的对齐是极小概率、一次性事件, 因此微引力透镜事件发现的系外行星无法后随观测获得进一步的行星参量.

与视向速度法以及直接成像法相比, 空间凌星法 (超高精度测光) 有三大显著优势: 一是因为行星和恒

* https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/

星面积之比 (和行星凌星信号的强度成正比) 远远大于质量之比 (与行星运动导致的恒星的视向速度的幅度成正比) 或光流量之比 (与行星成像的信号强度成正比). 以地球和太阳为例, 行星与恒星面积之比约为 $1/10^4$, 而质量之比约为 $1/10^6$, 光流量之比约为 $1/10^{10}$, 因此凌星现象更容易探测到 (高出 2～6 个数量级). 二是凌星信号是几何效应, 和恒星的颜色或光谱没有关系, 因此可采用覆盖大部分可见光波段的宽带测光, 以提高测量信号的信噪比, 从而最大程度提高测光精度. 三是空间凌星测光方法不会像地面望远镜严重受到地球大气扰动的影响, 因此能够获得超高的测光精度. 除此之外, 通过优化的轨道设计, 空间卫星可以对目标进行连续长时间观测, 不会像地面望远镜受昼夜交替影响, 平均每天晚上只有约 10 h 的观测时间, 而系外地球凌星的平均时长约 13 h, 地面观测很容易错过. 因此, 空间凌星巡天是发现系外地球的最佳手段.

然而, 尽管国际上已经有过诸多尝试, 包括空间凌星搜寻, 人类最感兴趣的处于类太阳恒星的宜居带内的地球大小 (0.8～1.25 R_e, R_e 为地球半径) 的岩石行星, 即“系外地球” (或“地球 2.0”), 到目前为止还没找到. 恒星周围的宜居带是绕恒星周围的一个适当条件, 使液态水能够存在于行星表面的区域[2]. 这是一个温度既不太热也不太冷的区域, 有可能适合所知的生命存在.

美国 NASA 在 2001 年正式启动了使用灵敏的空间凌星法开展了第一次系统地搜寻系外地球的 Kepler 卫星计划. Kepler 采用的是单一的口径 0.95 m 的施密特式广角望远镜, 具有视场 105 平方度. Kepler 在 2009 年发射到地球拖尾轨道上运行, 开始空间凌星巡天[3,4]. Kepler 通过凝视在天鹅座右翼的 105 平方度的同一个天区 3.5 年来搜寻较广泛轨道范围 (几小时到 1 年左右) 的系外行星的凌星信号.

Kepler 当初核心科学目标是发现系外地球, 并测量其发生率[3,4]. 通过高精度监测行星经过其寄主恒星前发生凌星时的光度变化, Kepler 卫星在其空间运行期间总共发现了 2000 多个系外行星和 4000 多个候选者[3,5–8], 发现的数目超过同期已发现到的系外行星总数的 70%. Kepler 的观测数据揭示了一种新型的数量众多的行星种群: 距离恒星不到一个天文单位, 大小介于地球和海王星之间的行星, 也被称为超级地球和亚海王星. 统计研究表明银河系中大约有 1/3 的恒星拥有这样的行星, 其比例为巨行星 (类似于木星和土星) 的约 3 倍[9,10].

尽管有了这些重大发现, Kepler 在轨运行后很快就发现类太阳恒星的内禀噪声比其根据太阳活动估计的噪声要高出 50% 以上[11], 这些噪声源于恒星表面的对流和磁场活动. 由于测量噪声超出预期, 系外地球产生的凌星信号无法从 4 年的测光观测数据中探测出来, 因此, Kepler 原计划在上天 4 年后可以发现若干个系外地球候选者的愿望没能实现. NASA 根据实际情况及时调整观测策略, 决定将 Kepler 的运行再延长 4 年, 期望通过更长时间的观测数据的累加来降低测量噪声, 实现发现系外地球的目标. 然后, 遗憾的是 Kepler 卫星在运行到第 4 年有两个控制姿态的飞轮失效, 只能完成对同一天区继续凝视 4 年. Kepler 功亏一篑, 没能发现系外地球的候选者.

来自美国 MIT 和 Smithsonian 天文台的研究者早在 2005 年就提出使用空间凌星法搜寻全天中离太阳系较近的亮星周围的系外行星的 TESS 卫星计划[12,13]. 该计划在 2013 年被 NASA 正式批准, 在 2018 年 4 月发射到地月共振轨道上运行. 这颗卫星主要用来搜寻太阳系附近亮星周围的较小系外行星候选者, 并通过后随观测确定其质量和密度, 同时能向空间望远镜 JWST 和未来地面大型望远镜提供可以后随表征的观测目标.

TESS 卫星采用了和 Kepler 完全不同的测光望远镜设计, 采用的是 4 架口径 10 cm 的广角折射望远镜, 单次观测共同覆盖 2160 平方度天区. 为了能搜寻尽可能多的亮星周围的系外行星的凌星事件, TESS 搜索全天, 绝大部分天区只凝视观测 27 天, 只有 4% 的天区能持续观测 1 年, 这样的载荷设计和巡天策略主要目的是探测大量的亮星周围短周期 (周期小于 13.7 天) 的系外行星, 但明显不利于发现较长周期 (1 年左右) 的系外地球.

欧空局 (ESA) 正在研制的用于空间凌星系外行星巡天的 PLATO 卫星是欧洲一个科学团队于 2007 年提出的, 在 2014 年被正式接受[14,15]. 其采用与 TESS 相似的设计, 使用 24 架口径 12 cm 的广角折射望远镜, 单次观测总视场为 2232 平方度. PLATO 原先计划在 2026 年底发射上天后分别连续观测南北不同的一个天区各 2 年, 或者观测 1 个天区 3 年和短期观测若干个其他天区[14], 但最近调整了观测策略, 将连续 4 年凝视南半天球的 1 个天区, 以增加其发现亮于 11 等类太阳恒星附近系外地球的概率, 预期在 4 年内将发现 2～3 个系外地球候选者 (见表 1).

针对系外地球到目前为止仍未能找到的现实, 中国科学院上海天文台在 2019 年牵头, 联合微小卫星创新院、技术物理研究所、西光所和中国科大响应中国科学院先导 2 期的搜寻宜居行星的科学卫星方案的征集通知, 提出了通过使用凌星法凝视 Kepler 以及附近天区的更大视场 4 年搜寻系外地球候选者. ET 卫星通过采用优化凌星望远镜的光学设计、更先进的快读出、低噪声 CMOS 探测器技术和相控天线阵下载数据技术以及利用中国的 LAMOST 地面光学望远镜开展光谱观测筛选观测目标等解决了 Kepler 卫星凌星巡天观测出现的主要技术问题, 预计能够实现找到系外地球并确定其发生率的核心科学目标.

通过 2020－2022 年的背景型号的研究, ET 团队完成卫星方案的优化, 设计出由 6 台 28 cm 口径、550 平方度广角凌星望远镜和 1 台 35 cm 口径、4 平方度的微引力透镜望远镜组成的空间天文台 (见图 1)[16–18].

表 1　Kepler, PLATO 和 ET 的关键性能与预期系外地球产出的比较

Table 1　Comparison of the key performance and expected Earth 2.0 yield of Kepler, PLATO, and ET

	有效口径/cm	总视场/(平方度)	测光精度12.7等星/6.5 h /(ppm)	安静亮星数($\times10^3$)	总恒星数($\times10^3$)	预期系外地球$\eta_e \approx10\%$	
						2年	4年
Kepler	95	105	59	2.5	175	0	0～1
PLATO	59	2000	34	5	250	0～1	2～3
ET	68	550	28	40	2000	3～4	10～20

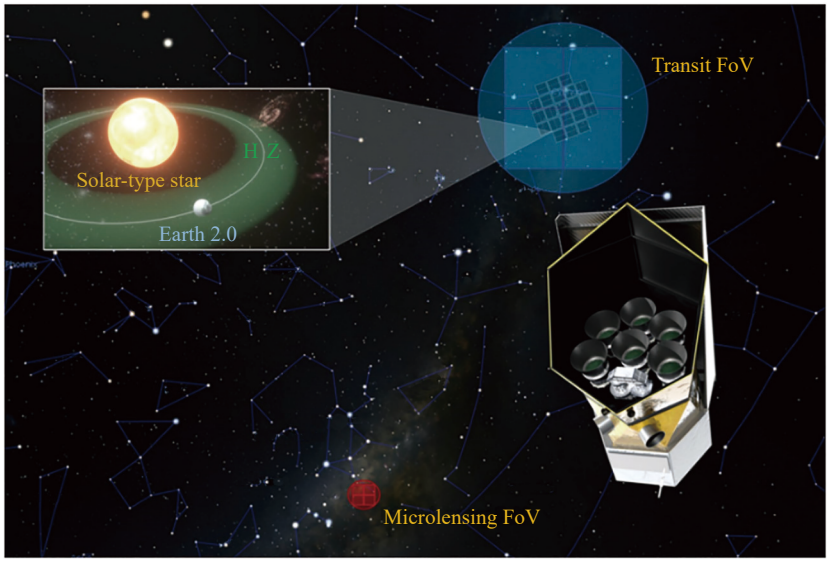

图 1　ET 空间天文台. ET 将凝视图中蓝色圈内区域 4 年时间, 旨在发现围绕类太阳恒星周围的宜居地球大小 (0.8～1.25 R_e) 的行星 (系外地球或地球 2.0). 由于 ET 覆盖 Kepler 已观测的天区 (图中网格区域), 结合 Kepler 已有的 4 年观测数据, ET 的产出将极大地拓展长周期行星 (包括地球 2.0) 与多行星系统的发现. 此外, ET 还将观测银河系核球区域 (红色天区), 利用微引力透镜法搜寻长周期冷行星和流浪行星, 包括流浪地球 (由 *Innovation* 期刊提供)

Fig. 1　ET space observatory. ET will observe the area within the blue circle for four years to discover habitable Earth-sized planets (0.8～1.25 R_e) orbiting sun-like stars (Exo-Earths or Earth 2.0). Since ET will cover the region previously observed by Kepler (the gridded area in the figure), combining it with Kepler's existing four-year observational data will greatly expand the discovery of long-period planets (including Earth 2.0s) and multi-planet systems. In addition, ET will also observe the Galactic bulge region (the red area in the image), using microlensing to search for long-period cold planets and free-floating planets, including free-floating Earth-mass planets (provided by the journal *Innovation*)

由于凌星法和微引力透镜法对探测小质量行星的高敏感性, ET 卫星将结合这两种方法, 利用超大视场和超高精度的光学测光, 将显著提升已知系外行星样本 (尤其类地行星) 数量, 包括系外地球和流浪地球.

ET 将在日地 L2 点的 Halo 轨道运行至少 4 年时间, 其搭载的 6 台凌星望远镜将同时凝视开普勒卫星 (Kepler) 视场及其附近天区内约 200 万颗 FGKM 型恒星 (主序星), 搜寻系外行星, 包括系外地球的凌星信号, 而另外 1 台微引力透镜望远镜将凝视银河中心区域约 3000 万颗恒星, 搜寻各种行星包括流浪地球在内的微引力透镜事件. 本文重点介绍 ET 计划的科学目标、有效载荷配置、任务总体设计和关键技术及最新进展.

1　科学目标

ET 结合其后随观测将发现大量类地行星, 包括首次发现富有历史意义、被大众广泛关注的系外地球, 对目前所知极微的类地行星进行第一次种群普查, 旨在解答系外行星领域的三个基本问题: 系外地球在宇宙中有多么普遍; 类地行星是如何形成和演化的; 流浪地球又是如何起源的. 由此, 系外行星科学研究将从此跃升到“地球时代”. 利用 ET 新发现的大量各类行星样本开展对系外行星尤其类地行星的种群的统计研究, 推动行星形成和演化的理论研究, 同时利用高精度、高频次和长基线观测数据推动星震学、银河系考古学、时域天文学、太阳系天体、双星和双星黑洞等领域研究.

科学目标 1　首次发现系外地球, 并精确测量系外地球的发生率

自从在类太阳恒星 51 Pegasi 周围发现了第一个系外行星后[1], 一个新的天文学领域——系外行星的研究呈爆炸式快速发展. 人们对行星世界的理解也随之发生了巨大变化.

在搜寻系外行星的早期阶段, 视向速度法是发现巨行星最高效、最强大的工具, 而正是通过这种方法发现了 51 Pegasi. 随着视向速度精度的不断提高, 近年来已经可以测量比地球质量略大的超级地球的质量.

而自 2009 年 NASA 的 Kepler 卫星发射以后, 使用空间超高精度测光发现系外行星的凌星法很快就展现了发现在较短轨道周期 (2 年以内) 的更小系外行星的巨大优势. Kepler 使用达到约 30 ppm (ppm 代表百万分之一)[11] 的超高测光精度的凌星法发现了 2000 多新的系外行星和 4000 多候选者[3,5–8]. 其中包含大小介于地球和海王星之间的行星, 也称为超级地球 ($1.25R_e<R_p\leqslant 2R_e$) 和亚海王星 ($2R_e<R_p\leqslant 4R_e$)(见图 2). 这些行星比巨行星更为普遍——银河系中约有 1/3 的恒星拥有这些行星[10], 但在太阳系中却不存在. 这一观测结果挑战了传统的行星形成理论, 并激发了全新的理论模型[19,20].

然而, 类木行星、亚海王星和超级地球, 在早期诞生时就具有厚重的、富氢和氦的大气层[21–23], 这些气体来自于行星系统诞生初期的原行星盘, 其也被认为是行星系统的第一代行星. 而以地球为代表的类地行星 (亦称岩石行星), 则是在气体盘消失后由固体物质碰撞吸积产生的, 是行星系统中的第二代行星. 由于形成过程和表面环境与地球非常不同, 无论是类木行星、亚海王星还是超级地球, 都不太可能孕育类地生命.

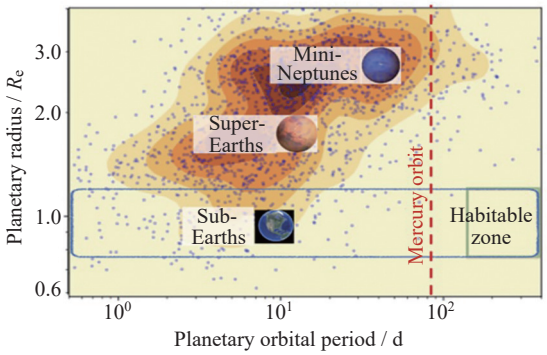

图 2　Kepler 发现的行星半径和轨道周期的分布. 大多数 Kepler 行星是所谓的超级地球和亚海王星, 少数是轨道周期很短的亚地球行星 (大约是地球大小), 但没有一个接近“地球 2.0” (在类太阳恒星宜居带内的地球大小行星, 如绿色框所示) (由武延庆提供)

Fig. 2　Distribution of planet radii and orbital periods discovered by Kepler shows that most Kepler planets are classified as Super-Earths and Sub-Neptunes, with a few being Sub-Earth planets (approximately Earth-sized) that have very short orbital periods. However, none closely resemble “Earth 2.0” (Earth-sized planets within the habitable zone of Sun-like stars, as indicated by the green frame) (Credit: WU Yanqing)

而处于类太阳恒星宜居带内的地球大小 (0.8～1.25R_e) 的行星, 即系外地球, 才是最有可能发现类地生命的地方, 因为其具有类似地球的物理、化学和星际环境. 因此, 搜寻系外地球是人类搜寻地外生命的第一步. 但是迄今为止, 人类还没有发现一个系外地球, 更没法对这类行星的发生率 (η_e) 做出可靠的统计性限制, 目前估计的η_e约为 0.05～0.42, 有非常大的不确定性[24,25].

ET 项目的核心科学目标之一就是首次发现系外地球. 一旦有了第一个发现, 就可以对地球的发生率给出下限, 并且随着系外地球样本数量的增加, 这样的限制会越来越精确. ET 预计发现 10～20 颗系外地球 (见图 3), 从而将地球发生率的不确定度限制在 30% 以内. 这一方面将有助于揭开地球起源之谜, 了解地球在宇宙中的位置, 另一方面也给未来直接成像观测系外地球的旗舰级大型空间计划 (例如美国的 Habitable Worlds Observatory, 中国的觅音和天邻计划) 提供后随表征观测的最佳目标以及设计的关键参量.

虽然目前系外地球仍无影无踪, 但类地行星确实存在,而且存在于非常广的轨道范围内, 即从灼热的恒星附近一直到极寒的空间. 事实上, Kepler 在一些安静亮星周围找到了约 300 个短轨道周期 (少于 30 天) 的类地行星. 通过各种探测方法, 目前共观测到 10 多个地球大小 (0.8～1.25R_e) 且位于宿主恒星宜居带内的类地行星 (见图 3), 例如 TRAPPIST-1[26], Teegarden's star[27], Gliese 1061[28], Kepler1649[29], TOI 700[30] 和 Kepler 186[31]. 然而其主星均为小质量的红矮星 (M dwarfs, 小于 0.60 太阳质量), 比太阳更加活跃, 会释放大量的紫外线甚至是 X 射线辐射, 剥蚀宜居带内行星的大气. 同时, 红矮星的宜居带非常靠近主星, 其中的类地行星受到很强的潮汐力锁定, 一面永远对着恒星, 另一面背对着太阳, 造成行星的表面和大气结构迥异于地球. 尽管如此, 广泛存在的类地行星预示着系外地球极有可能存在, 距离这个重大发现只一步之遥.

除了已经退役的 Kepler 项目以外, 目前运行中的系外行星项目都没有能力搜寻系外地球. 例如, 美国 TESS 卫星任务在空间中非常成功地发现了数千个短周期行星候选体, 包括地球质量的行星[32,33]. 然而, TESS 对同一天区的观测时间太短 (绝大部分天区小于 28 天), 几乎不可能找到轨道周期在 1 年左右

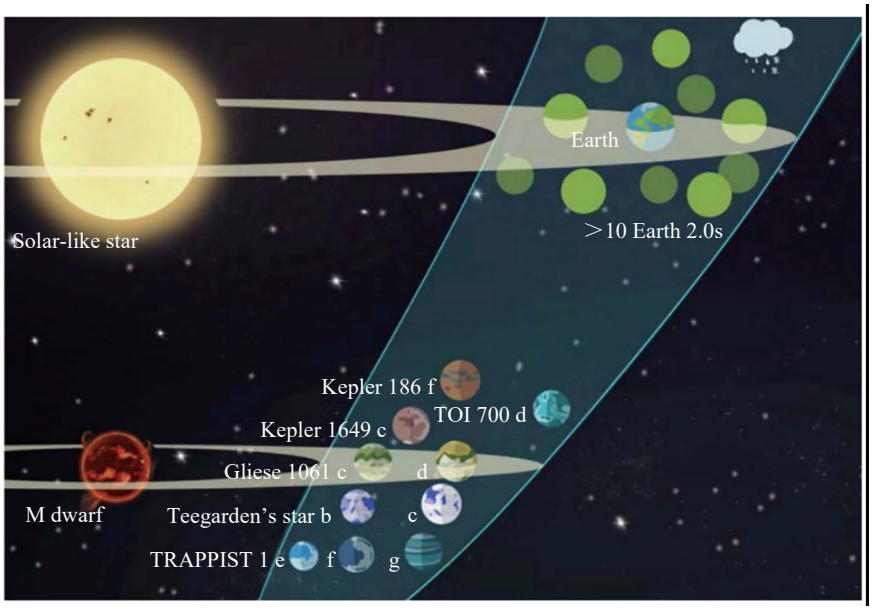

图 3 宜居带内的类地球行星. 目前探测到的处于宜居带 (蓝色阴影区域) 内的地球大小行星 ($0.8\ R_e < R_p \leqslant 1.25\ R_e$) 和未来 ET 预期探测到的系外地球 (地球 2.0, 绿色球体). 当前所有已发现的地球大小行星都围绕 M 矮星运行, 这与围绕 G 和 K 型矮星的系外地球有本质不同 (由方童提供)

Fig. 3 Earth-sized planets in habitable zones. Currently detected Earth-sized planets ($0.8\ R_e < R_p \leqslant 1.25\ R_e$) within the habitable zone (the blue shaded area) and the anticipated Earth 2.0 s from ET (represented by green spheres) differ significantly in their host stars (Credit: FANG Tong)

的系外地球. 同样, ESA 的 CHEOPS 卫星专门研究邻近的已知系外行星, 并不搜寻新的行星候选体[34]. 图 4 给出了空间测光科学卫星 (包括 Kepler, TESS, CHEOPS, PLATO 和 ET) 在相同曝光时间内在不同星等的测光精度. 很明显, 由于采用了更高透过率的光学系统和更低噪声的 CMOS 探测器, 在 13 等以后的暗星端, ET 的测光精度在同样曝光时间内将优于 Kepler 和 PLATO 等相似项目大约 0.5 和 1.5 个星等.

在表 1 中比较了 Kepler 和未来的 PLATO 及 ET 的主要性能与预期产出. 根据各个项目公布的核心设计参数和观测策略, 对其行星产出进行了模拟和估计. 本文采用了比较保守的系外地球发生率约 10% 估计系外地球的产出. 结果显示, 由于 Kepler 和 PLATO 下载的恒星数目较少, 因此其观测样本里适合搜寻系外地球的安静恒星 (黄金样本) 数量也少, 不利于搜寻系外地球这种凌星信号微弱且发生率不确定的行星. 根据使用 PLATO 的参量和观测天区和策略开展的模拟预计, PLATO 在观测 2 年的情况下 (仅能确保覆盖 1 个完整的系外地球轨道周期), 几乎不可能有效发现系外地球, 需要 3～4 年的连续观测才可能发现 2～3 个系外地球候选者. 而 ET 由于覆盖了 Kepler 天区部分恒星目标, 可将观测数据与 Kepler 的 4 年历史数据结合起来, 根据对 ET 巡天的模拟预计 ET 在空间运行 1 至 2 年连续观测后就有可能发现 3～4 个系外地球候选者, 因此, PLATO 在空间运行 2 年内, ET 如果能开始在空间运行, 则有很大可能最先发现系外地球候选者. 而在观测 4 年的情况下, ET 将会发现 10～20 个系外地球的候选者, 是 PLATO 预计发现的数目的 3 倍以上.

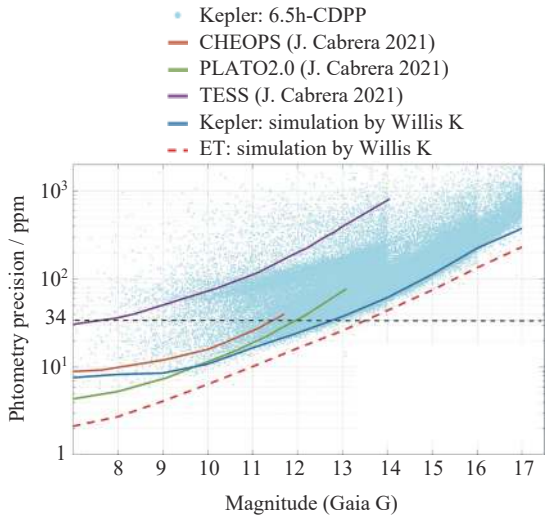

图 4　空间测光科学卫星测光精度 (不包括恒星活动产生的噪声). ET (6 台望远镜叠加观测同一视场模式) 与 CHEOPS, PLATO, TESS 和 Kepler 的测光精度比较. PLATO, CHEOPS 和 TESS 的测光精度来自 Cabrera 2021 (PLATO conference) 的 1 h 累积结果, 将其转化成 6.5 h 的精度以便与 Kepler 和 ET 的 6.5 h 模拟结果相比较. 淡蓝点为 Kepler 实际恒星测光数据

Fig. 4　Photometric precision of Space-based photometric space missions (excluding noise from stellar activity). ET (6 telescopes stacked observing the same field of view) compared with the photometry precision of CHEOPS, PLATO, TESS, and Kepler. The photometry precision of PLATO, CHEOPS, and TESS is derived from the 1 h cumulative results of Cabrera 2021 (PLATO conference), which we have converted to 6.5 h precision to compare with the 6.5 h simulation results of Kepler and ET. The light blue dots represent the actual stellar photometric data from Kepler

科学目标 2　扩大已知类地行星样本, 研究类地行星的种群统计特征, 探索其形成机制

除了系外地球以外, 类地行星整体的形成与演化过程是系外行星领域中一个重要的研究方向. 而人们对于类地行星的了解仅限于 Kepler 的短周期样本, 因此对以下关键信息知之甚少. (1) 长周期 (从 30 天到数百年) 类地行星的发生率; (2) 类地行星是如何形成的以及这些小质量行星在宿主系统中的轨道如何迁移; (3) 流浪地球质量的行星种群以及其是如何被“流放”的. 要充分了解类地行星形成和演化过程, 对类地行星的普查至关重要. 然而, 类地行星的小尺寸和低质量对凌星法和径向速度搜索提出了重大挑战, 尤其是对于那些具有长周期轨道的行星.

ET 将继续凝视 Kepler 观测过的目标 4 年, 有助于发现周期在 1 至 2 年的类地行星, 大幅增加这些行星的数量, 但 ET 对更长轨道周期的类地行星的探测能力非常有限. 这种局限可以通过 ET 的微引力透镜巡天观测来弥补. 微引力透镜法是一种有效用于发现低质量、长周期冷行星和自由游动的流浪行星的方法. 尤其通过 ET 与地面的微引力透镜望远镜网络 (KMTNet), 同时观测获得微引力透镜事件的视差测量行星的质量, ET 预计不光可以发现约 1000 颗冷行

星和流浪行星候选者, 还可以对其中约 300 颗冷行星和流浪行星的质量获得精确的测量. 因此, ET 巡天可以从大量统计样本中确定长周期和自由游动的类地行星的质量函数, 从而提供揭示类地行星起源的独特机会.

对 ET 的行星产出模拟显示, ET4 年的凌星和微引力透镜巡天观测将新发现约 4000 颗分布于各种轨道周期上的类地行星, 这将目前已知的样本数量提升一个数量级 (见图 5)[9,16–18]. 这些样本将用于对类地行星种群的统计特征的研究, 也可以为检验各种类地行星的形成和演化模型提供关键数据.

科学目标 3　首次发现流浪地球, 测量其发生率, 探索其形成机制

微引力透镜技术是目前探测包括“流浪地球”在内的流浪行星的唯一方法. 目前许多物理机制, 包括行星–行星动力学相互作用[35,36]、来自多星系统的散射[37] 和恒星在附近飞越[38] 等都预测了流浪行星的存在, 但流浪行星的数量和质量因模型而异[38,39]. 最近, Gould 等[40] 研究了韩国的 KMTNet[41] 探测到的流浪行星和束缚行星 (围绕恒星公转的行星) 候选体之后指出流浪行星显著比束缚行星更频繁, 散射机制在很大程度上塑造了束缚行星的幂律分布. 因此, 流浪行星的丰度和质量函数将为行星系统的形成和演化提供重要信息[42].

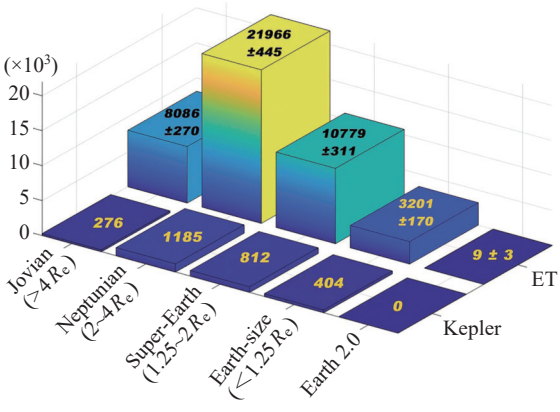

图 5　预测的 ET 凌星观测发现的行星与 Kepler 的比较. 对于亚地球和超地球, ET 将在不久的将来 (2033 年之前) 把样本量增加约 10 倍

Fig. 5　Predicted ET transiting planets compared with Kepler's discoveries. For sub-Earths and super-Earths, ET will increase the sample size by about 10 times in the near future (before 2033)

然而, 目前微引力透镜流浪行星的研究受到样本数量小和缺乏行星质量测量的限制. Sumi 等[43] 分析了 MOA-II 巡天观测到的 474 个微引力透镜事件的爱因斯坦时间尺度 ($t_{\rm E}$) 分布, 并发现有 10 个微引力透镜事件的 $t_{\rm E}$ = 0.5–2 d, 这表明木星质量的流浪行星的频率约为恒星的 2 倍. 但是 Mróz 等[44] 对比 MOA-II 具有更高质量且以其 5 倍的 OGLE-IV 统计样本数据开展了独立分析, 结果基本排除了实际存在大量木星质量的流浪行星的可能. Mróz 等[44] 还在数据中发现了 6 个 $t_{\rm E} < 0.4$ d 的事件. 这些事件大多采样不足, 但如果其是真实的微引力透镜事件, 则意味着低质量的流浪行星 (从地球质量到海王星质量) 比恒星更为频繁.

流浪行星的质量可以利用微引力透镜视差来测量 (见图 6). Spitzer 卫星和 Kepler 卫星过去对微引力透镜事件的同时观测已经证明了这种方法的可行性. 但由于需要地空同时观测来测量视差的挑战, 迄今尚未进行过任何关于系外微引力透镜行星的质量

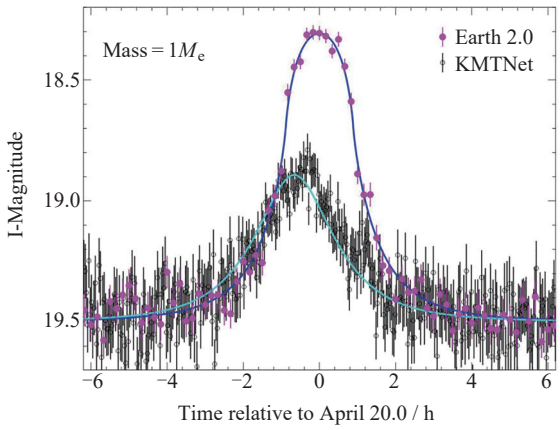

图 6　ET 卫星观测的流浪地球的模拟带有高斯噪声的光度曲线 (品红圆圈) 和地面的 KMTNet 望远镜 (黑色圆圈). ET 数据的误差棒是使用 ET 的望远镜参数计算的. 连续的 KMTNet 数据具有 1.0 min 的曝光时间和 1.0 min 的读出时间

Fig. 6　Simulation of the light curves for free-floating Earth-mass planet observed by the ET spacecraft, with Gaussian noise (magenta filled circles), and the ground-based KMTNet telescope (black circles). The error bars for the ET data were calculated using the telescope parameters of ET. The continuous KMTNet data have an exposure time of 1.0 minute and a readout time of 1.0 minute

函数的研究, 无论是束缚行星还是流浪行星.

ET 卫星上的微引力透镜望远镜具有与 KMTNet 相同的视场 (4 平方度)、像素尺度 (0.4″) 和波长覆盖, 其光度测量精度相当. 由于来自空间的持续稳定观测, ET 微引力透镜巡天将对低质量行星具有更高的探测效率, 优于当前的地面巡天. 通过由相距约 0.01 AU 的这两台广角望远镜对银河系核球的 3000 万颗恒星同时观测获得的视差测量是可以确定流浪行星质量的[42]. 因此, 在地球–太阳 L2 点上的 ET 卫星与地面的 KMTNet 巡天观测的结合将可以首次获得大量流浪行星质量的测量. 图 6 给出了 ET 和 KMTNet 观测的流浪地球的模拟光变曲线. 此外, ET + KMTNet 的同时观测也可用于获得束缚行星的微透镜视差测量, 并借此获得行星质量的测量.

在 4 年的观测期间, ET + KMTNet 微引力透镜巡天将每年中有半年时间连续观测位于银经纬 (l, b)~(+1.0, –1.8) 的 4 平方度核球区域中约 3000 万亮于 I=20.5 的恒星, 预计获得如下成果.

(1) 测量约 150 颗流浪行星的质量, 包括约 25 颗流浪类地球行星 ($0.5M_{\rm e} \leqslant M_{\rm p} \leqslant 2\ M_{\rm e}$, $M_{\rm e}$ 为地球质量).

(2) 测量约 130 束缚行星的质量, 包括约 10 颗冷类地行星 ($0.5M_{\rm e} \leqslant M_{\rm p} \leqslant 2M_{\rm e}$).

(3) 将束缚和流浪微引力透镜行星的幂律质量函数指数约束在 6% 和 10% 的不确定性内.

(4) 探测到 20 多个行星系统, 其中一半将具有质量测量.

综上所言, ET 计划结合地面的 KMTNet 的同时观测将首次发现流浪类地球行星, 并且进一步地给出流浪行星的丰度和质量函数, 为行星系统的形成和演化提供重要依据.

2　有效载荷配置

2.1　有效载荷总体配置方案

ET 的有效载荷拟用 6 台 28 cm 口径的广角光学望远镜阵列, 使用成熟的凌星技术对在 Kepler 和邻近天区约 200 万颗 FGKM 矮星连续观测 4 年 (以 4 年作为运行目标). 来自 6 台望远镜的每个恒星数据相互累加提高数据的信噪比. ET 同时配置 1 台微引力透镜望远镜凝视银河中心区域约 3000 万颗恒星进行微引力透镜事件观测. 该载荷配置将赋予 ET 凌星观测超高测光精度和长期稳定度, 使 ET 的凌星观测能够探测到处于类太阳恒星的宜居带内的地球大小的行星, 即轨道周期在 1 年左右的系外地球; 而微引力透镜观测能够探测到恒星周围最小为火星质量的长周期冷行星以及流浪行星. 有效载荷的总体布局如图 7 所示, 主要配置参数列于表 2.

ET 采用 6 台参数相同的凌星望远镜, 观测时指向同一天区. 望远镜采用透射式光学系统, 以在有限的体积内实现 28 cm 口径 550 平方度大视场.

ET 采用 1 台 35 cm 口径长焦微引力透镜望远镜于每年春分至秋分 (6 个月) 监测银河系中心区域. 微引力透镜望远镜采用折反射式光学系统, 以有效压缩系统体积.

每台望远镜将配置一套低噪声焦面相机. 焦面相机采用 2×2 个 8900×9210 pixel 的低噪声 GSENSE1081 CMOS 探测器拼接而成, 像素尺寸为 10 μm ×10 μm. 探测器工作在–40℃ 的低温环境, 以抑制暗电流.

根据科学需求及卫星数传能力, 载荷安装智能科学处理器, 实现对图像数据的累加、目标选源、数位重整和数据压缩等功能, 有效控制下传数据量. 采用高速光纤传输图像数据.

ET 将采用高稳定温控技术降低仪器噪声. 探测

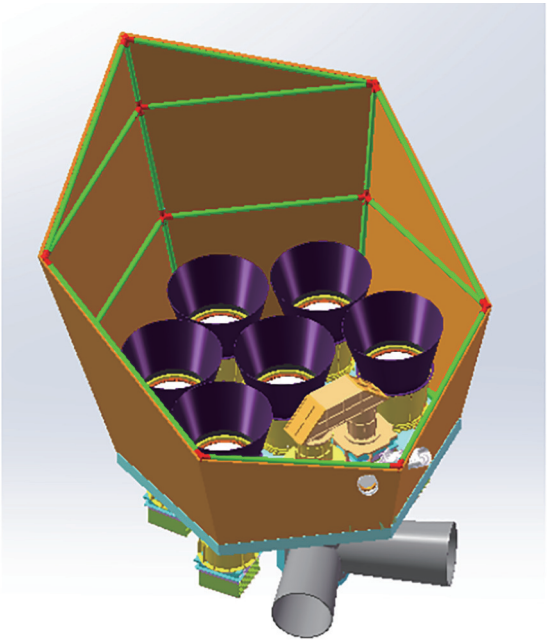

图 7　ET 有效载荷总体布局

Fig. 7　ET overall payload layout

表 2 ET 有效载荷主要配置参数

Table 2 Key parameters of the ET payload

项目	凌星望远镜	微引力透镜望远镜
有效观测波段	465～940 nm	650～1000 nm
有效口径	28 cm	35 cm
像元角分辨率	4.83″/pixel	0.4″/pixel
有效观测视场	550平方度	4平方度
望远镜像质	EE90直径≤5 pixel	FWHM≤1.0″
望远镜温度稳定性	≤±0.3℃	–
探测器温度稳定性	≤±0.01℃	–
探测器暗电流	≤0.25 e^- (s^{-1}·$pixel^{-1}$)	平均≤0.10 e^- (s^{-1}·$pixel^{-1}$)
探测器读出噪声	≤7 e^- / pixel	≤8 e^- / pixel
望远镜拼接指向精度	≤0.1°	–
曝光时间	10 s	10 min
读出时间	≤3 s	3 s
电功耗	峰值869 W, 平均764 W	
重量	1240 kg	
在轨存储数据量	10 Tbit	
下传数据量	约730 Gbit·d^{-1}	

器的制冷采用辐射被动制冷, 以避免制冷机微振动对望远镜稳定性产生影响. 利用望远镜遮光罩作为探测器辐射散热板, 结合相机内部的 PID 加热回路控制, 实现探测器 (–40±0.01)℃ 的高稳定环境. 对望远镜进行补偿加热及 PID 控制, 使望远镜工作于 (–15±0.3)℃, 既保证望远镜的温度稳定性, 又减小了望远镜和探测器的温差, 有利于探测器的温度稳定性.

ET 将设计遮阳罩, 阻挡来自太阳、地球和月球的杂光及外热流, 为载荷提供稳定的热环境和低的杂光环境.

凌星望远镜载荷的总体组成如图 8 所示, 主要由望远镜、焦面相机、健康管理器、数据处理系统、热控单元等子系统组成. 微引力透镜望远镜载荷的总体组成如图 9 所示, 主要由指向镜、望远镜、焦面相机、健康管理器、数据处理系统、热控单元等子系统组成.

2.2 望远镜设计

2.2.1 凌星望远镜

凌星望远镜设计采用透射式系统, 以满足大视场、大相对孔径、宽谱段的需求. 望远镜采用熔石英等有空间飞行经历的光学材料作为主材, 提高系统的可靠性、稳定性和抗辐照性能. 在部分凹面上采用非球面, 以提高系统的像差校正能力, 满足望远镜的像质需求.

凌星望远镜的光路结构如图 10 所示. 望远镜采用 9 片式透射结构. 光路总长约为 630 mm, 透镜口径 280～360 mm 不等, 透镜材料包括熔石英、CaF2

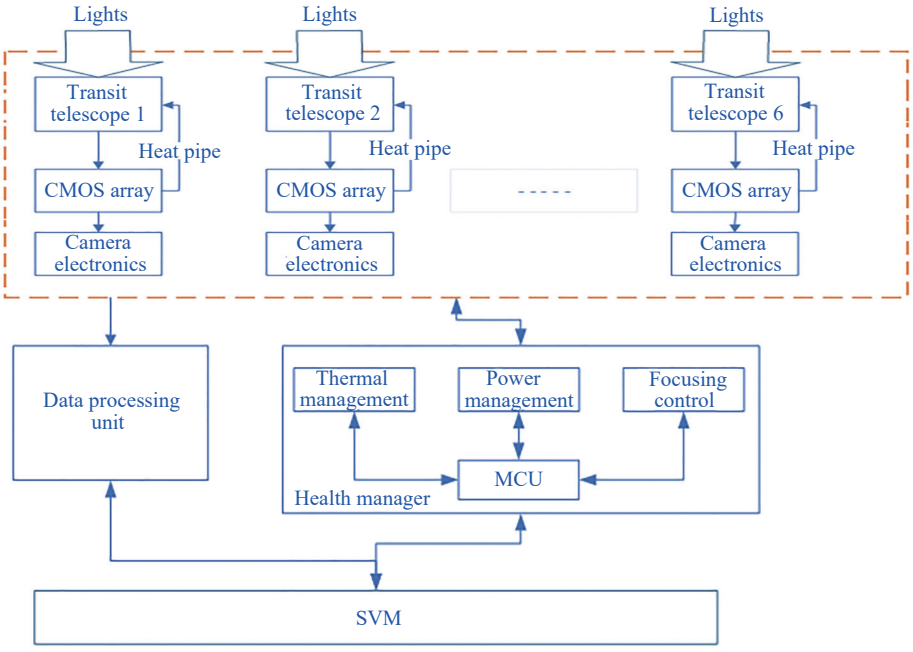

图 8 凌星望远镜系统组成

Fig. 8 Transit telescope system composition

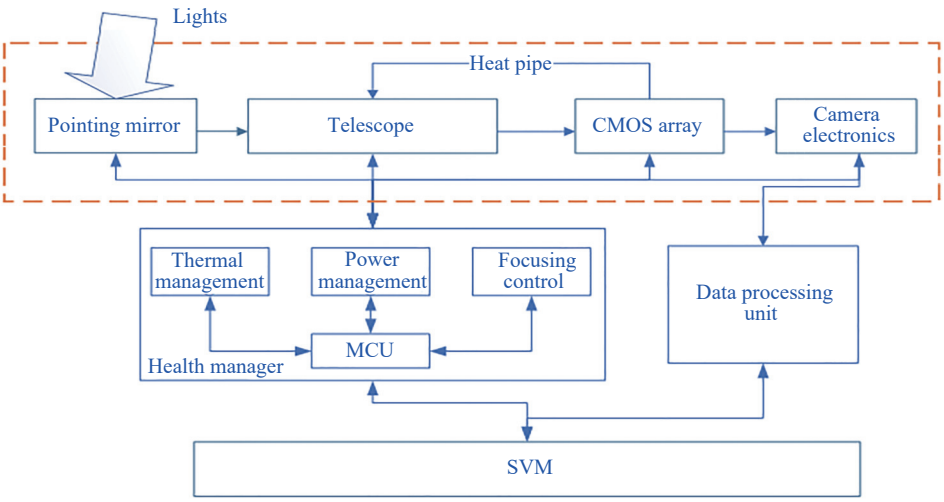

图 9　微引力透镜望远镜系统组成

Fig. 9　Micro-lensing telescope system composition

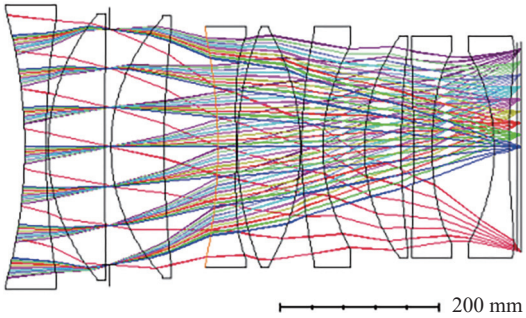

图 10　凌星望远镜光路结构

Fig. 10　Optical design of the transit telescope

等, 设计采用 7 个非球面, 均设置在凹面上, 有利于加工过程中的面型检测.

图 11 所示为凌星望远镜的能量集中度设计曲线, 望远镜全视场 90% 能量集中度直径约为 30 μm. 影响望远镜像质的误差因素包括材料性能、加工、装配、系统集成、探测器及电子学噪声、温度稳定性等等, 公差分配后满足 EE90 小于 5 pixel 要求.

凌星望远镜在光学设计的基础上, 开展了支撑结构的设计. 图 12 给出了望远镜的结构模装示例. 望远镜在轨工作温度预计为–15℃, 镜片所受到的温度应力、重力变形等与地面装校状态有很大的区别, 为了

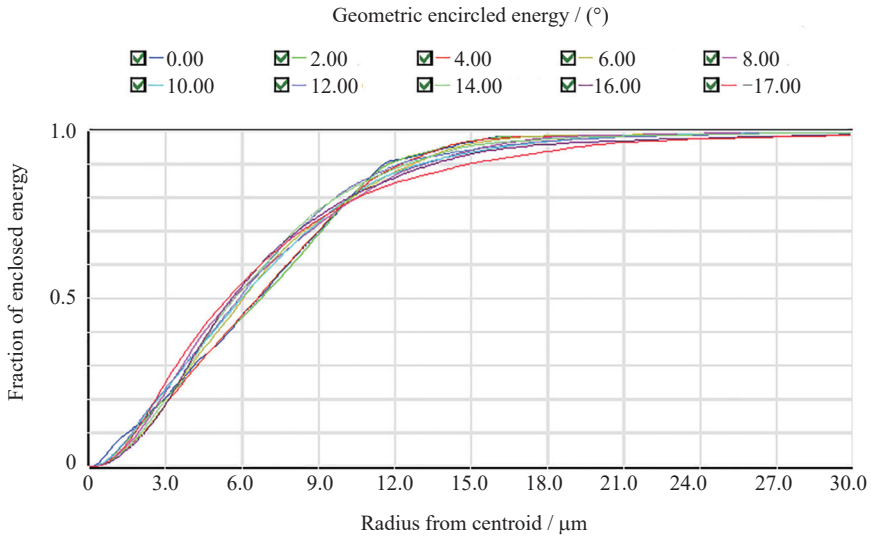

图 11　凌星望远镜能量集中度曲线

Fig. 11　Energy concentration curve of the transit telescope

保证最终的像质质量, 望远镜的透镜安装采用柔性镜室, 镜室材料选择与透镜材料线胀系数匹配的铝合金、4J32 和钛合金, 防止镜片的温度应力形变. 各透镜通过镜室与镜筒固定, 镜筒结构材料选用铝基碳化硅, 以获得高比刚度、低密度、高导热率以及合适的热膨胀系数.

2.2.2 微引力透镜望远镜

微引力透镜望远镜属于长焦系统, 且视场直径达到了 2.83°, 为了保证像质并控制光学系统的整体包络尺寸, 设计采取 RC 反射系统+透射校正镜组的折反射式结构方案, 如图 13 所示. 光学元件主要采用熔石英材料和碳化硅材料. 所有透镜均为球面.

图 14 给出望远镜的 RMS 系统波像差和 PSF 曲线. 系统设计的 RMS 波像差小于 0.03 λ, PSF 的半高宽小于 11 μm (0.44″).

对微引力透镜望远镜开展了误差分配. 影响望远镜像质的误差因素包括材料、加工、装配、系统集成、探测器及电子学噪声、温度稳定性等.

考虑各种误差, 望远镜的综合像质模拟显示 PSF 的 FWHM 仍小于 15 μm (0.6″). 考虑平台抖动 0.15″ 和热弹 (0.05″) 的影响, 望远镜综合像质 PSF 半高宽 FWHM 小于 0.78″.

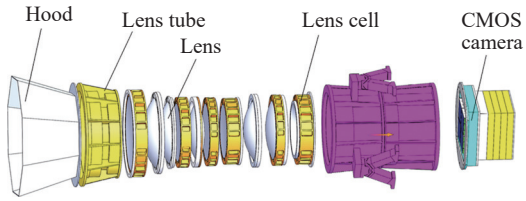

图 12 凌星望远镜模装示例

Fig. 12 Exploded view drawing of the transit telescope

微引力透镜望远镜结构模装见图 15, 主要包含以下结构模块: 望远镜主体、结构框架、指向镜组件、焦面相机模块. 结构框架是整台仪器主承载结构, 需具有高强度、高刚度、高稳定性, 能够满足热变形及力学环境的要求, 因此同样采用铝基碳化硅材料. 微引力透镜望远镜外包络尺寸为 1650 mm×875 mm×870 mm.

2.3 焦面相机

6 台凌星望远镜和微引力透镜望远镜均采用相同的相机配置. 相机由焦面组件、控制电子学和相机结构组成.

焦面组件由 4 块 8900×9210 GSENSE1081 CMOS 拼接而成, 同时包括拼接基板、加热器和冷头等. 冷头通过热管与望远镜遮光罩相连, 利用望远镜遮光罩作为辐冷板为探测器制冷. 拼接基板背部通过一个 PID 加热控制回路来实现探测器±0.01 K 的高稳定性温控. 拼接平整度要求为–40℃ 下优于 25 μm PV, 探测器物理拼缝不高于 0.5 mm. 探测器拼接需要在高精度测量和加工的基础上, 通过仿真和实验相结合的方案, 通过高精度三坐标测量仪的测量, 对拼接结构进行反馈调节, 实现焦面高精度拼接, 常温和低温下拼接精度的高精度检测.

相机电子学组成及信号流如图 16 所示, 主要由

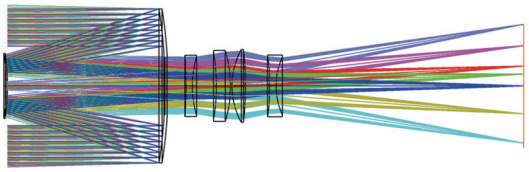

图 13 微引力透镜望远镜光路结构

Fig. 13 Optical design of the microlensing telescope

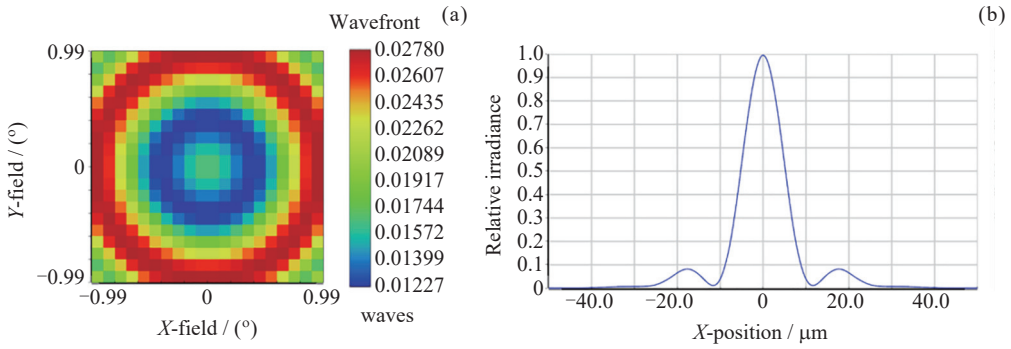

图 14 微引力透镜望远镜 RMS 波像差 (a) 和 PSF 曲线 (b)

Fig. 14 RMS wavefront aberration (a) and PSF curve (b) of the micro-lensing telescope

二次电源、时序控制及电源滤波电路及 CMOS 供电偏置及驱动电路等组成. 相机主要通过 FPGA 进行系统的控制与管理, 其主要功能包括: 通过 DC/DC 转换器及 LDO 线性稳压电源, 产生电路所需的各路电源; 为探测器提供驱动信号; 实现数字图像采集和将工作参数打包到图像数据中, 通过光纤下传至望远镜数传; 接收遥控命令, 按照遥控命令和遥控数据, 实现工作参数设置、工作模式切换与工作状态控制, 完成遥测数据的采集与输出.

图 17 给出了 CMOS 拼接相机的结构. 4 块 CMOS 拼接在一块碳化硅基板上, 共同组成相机焦面装配组件. 每块 CMOS 各有一个柔性线缆, 从拼接基板两侧伸出, 穿过焦面装配组件与底部焦面电控箱内部电路板 (控制电子学) 连接. 电控箱内处理电路板之间采用板间连接器进行转连接, 每层电路板外形尺寸为 230 mm×210 mm, 共 5 层.

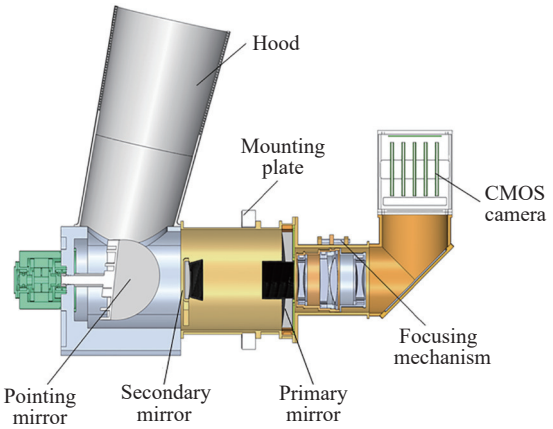

图 15　微引力透镜望远镜模装示例

Fig. 15　Opt-mechanical drawing of the micro-lensing telescope

2.4　热控设计

为了实现超高精度的测光观测, 要求载荷具有很高的温度稳定性, 以抑制望远镜温度漂移所引起的光变和探测器温度漂移所引起的噪声变化、增益变化、量子效率变化等. 为了满足测光精度要求, 望远镜需稳定工作在 (–15±0.3)℃, 探测器需要稳定工作在 (–40±0.01)℃.

ET 将工作在日地 L2 轨道, 设计采用遮阳罩遮挡太阳、地球和月球的外热流, 为载荷提供稳定的热环境.

载荷将采用辐射制冷技术为探测器和电子学散热, 以避免制冷机振动影响测光精度. 探测器的热量通过冷链导到冷头, 再经由热管导到望远镜遮光罩上, 以遮光罩作为辐冷板进行散热. 辐射制冷将使探测器的温度低于–40℃, 通过设置于探测器拼接基板背部的 PID 加热回路使探测器温度稳定在 (–40±0.01)℃.

望远镜的温控通过多层隔热膜配合主动加热实现. 望远镜外层包覆多层, 镜筒上分区设计不同功率的电加热器. 为减少加热功耗和探测器漏热, 望远镜工作点设置在–15℃. 通过分区主动加热和多点 PID 精密温控技术, 使望远镜温度稳定性优于±0.3℃.

电子学的热量将通过热管传导到专用的辐冷板上进行散热.

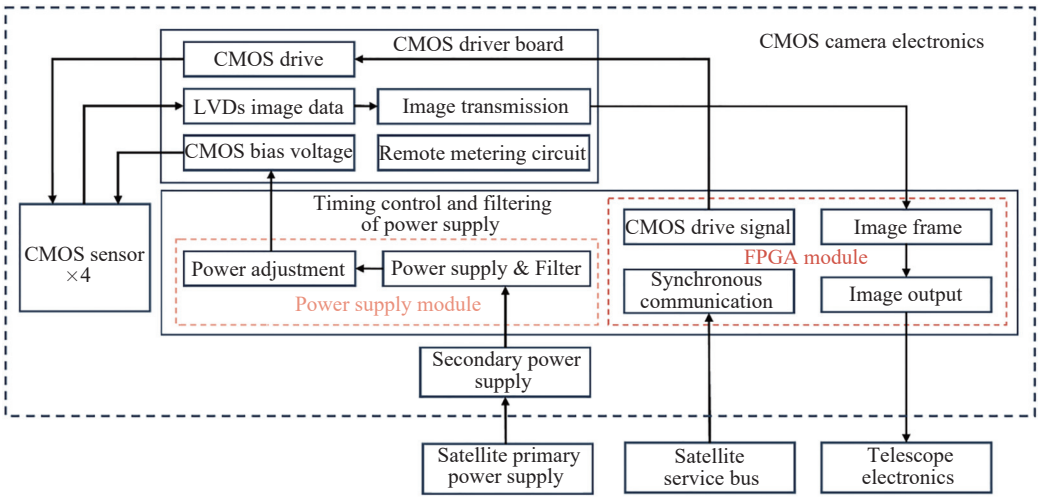

图 16　CMOS 相机组成及信号流

Fig. 16　CMOS camera composition and signal flow

2.5 在轨数据处理与存储

ET 每台相机的总像素规模达到约 18000×18000 pixel, 每台凌星望远镜 10 s 产生一幅图片, 微引力透镜望远镜每 10 min 产生一幅图片. 6 台凌星望远镜每天产生的数据量达 1030 Gbit , 经过无损压缩后传回地面, 压缩后的数据量是压缩前的约 60%, 即每天 566.5 Gbit. 凌星望远镜 200 万恒星的需求, 在轨存储 3 天需要 1.7 Tbit, 存储 5 天需要 2.8 Tbit. 微引力透镜望远镜每天产生的数据量约为 167 Gbit, 压缩后的数据量是压缩前的约 65%, 保存 5 天数据, 考虑约 10% 的冗余度, 星上存储需求为 1.9 Tbit.

凌星望远镜的星上数据处理流程如图 18 所示. 图像将经过目标像元堆叠、异常数值剔除、目标像元选取、数据数位重整 4 个过程, 最后经过无损压缩后存于星上计算机, 等待下传. 考虑星上资源和数据处理时间需求, 图像堆叠、异常数值剔除和目标像元选取, 以及后续的数据数位重整和无损压缩将由星载智能科学处理器完成.

根据 ET 的科学目标, 对下载需求归纳后, 每日下载数据的需求约 735.5 Gbit.

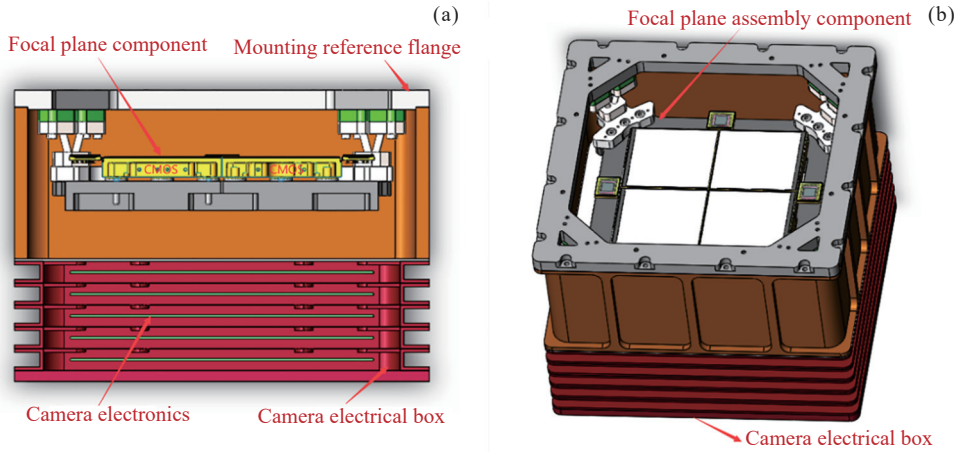

图 17 相机焦面装配组件与电控箱结构 (a) 及相机焦面部分外包络 (b)

Fig. 17 Camera assembly components and electronic control box structure (a) and the outer envelope of the camera (b)

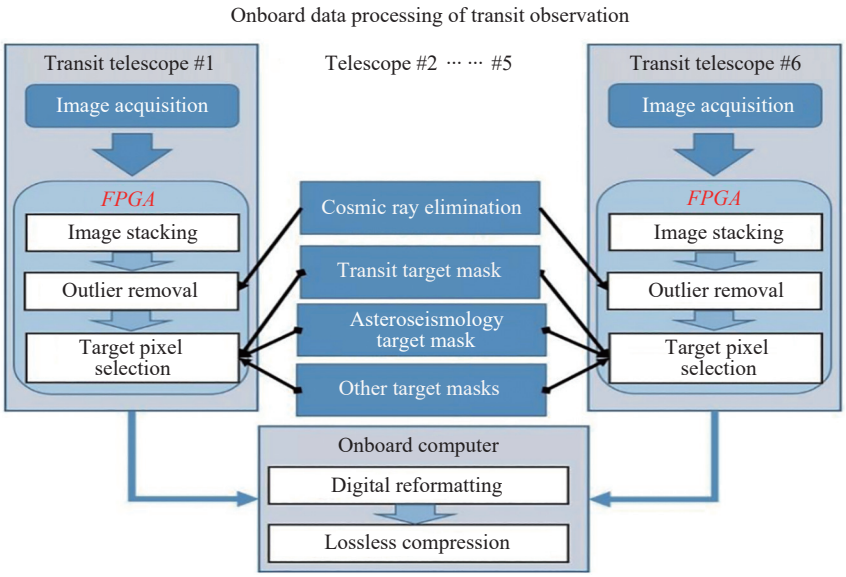

图 18 凌星观测星上数据处理流程

Fig. 18 Onboard transit observation data processing workflow

3　任务总体设计

ET 计划发射一颗卫星至日地 L2 轨道, 同时搭载 6 台凌星望远镜与 1 台微引力透镜望远镜, 采用三轴稳定零动量姿控方式, 结合超高精度定姿、超稳结构及热弹控制, 实现超稳指向与长期连续观测. 卫星总重约 3.2 t, 平均功耗约 1500 W, 计划使用 CZ-3B 运载发射.

为满足科学观测任务需求, ET 卫星需要运行在热环境稳定, 对观测目标长期无遮挡且摄动较少的轨道. 几种满足需求可选轨道对比如表 3 所示, 日地 L2 轨道是较为理想的任务轨道, 热环境、辐射环境和光照条件较好, 且星地距离满足测控数传需求. 经分析初步选择垂直日地连线方向振幅 A_z 为 13500 km 的 Halo 轨道.

日地 L2 点 Halo 轨道由于其不稳定的特点, 存在与之相连的稳定、不稳定轨道集合 (不变流形). 通过运载火箭将卫星直接送入不变流形, 执行星箭分离, 理论上探测器无需入轨机动即可自动入轨. 入轨后约每 90 天进行一次轨道维持, 可以确保卫星停留在 L2 点. 不变流形及飞行轨迹如图 19 所示.

ET 卫星的凌星望远镜视场中心需要至少连续 4 年指向开普勒天区及其附近, 微引力透镜望远镜每年春分至秋分指向银心. 考虑轨道与光照情况, 规划每 3 个月调整卫星的姿态, 绕光轴方向旋转 90°, 以确保较小的太阳电池阵法线与太阳矢量夹角, 保证整星的能源供应, 同时保证载荷稳定的热环境, 抑制杂散光. 任务期间的光照示意及观测策略如图 20 所示.

为解决卫星高稳定度需求与大数据量下传的矛盾, 卫星采用 Ka 波段数传方案, 设计了相控阵天线进行数据下传, 确保星上无转动机构, 可实现 40 Mbit·s^{-1} 下传信息速率. 测控采用 X 波段宽波束天线, 设计遥测遥控速率可调, 使用多测音体制, 同时

表 3　适用 ET 观测的轨道类型对比

Table 3　Comparison of orbital types suitable for ET observations

轨道类型	优点	缺点
月地共振轨道	辐射小, 日、月遮挡时间较短	轨道速度变化较大, 热流波动大
高椭圆轨道	数传速率高	穿越辐射带且热环境易受到地球影响
日心地球拖尾轨道	轨道热流稳定, 辐射低	若不轨道维持, 星地距离持续增加, 若维持燃耗较大
日地L2点的Halo轨道	热环境、辐射和光照条件较好	需要轨道维持, 但代价较小

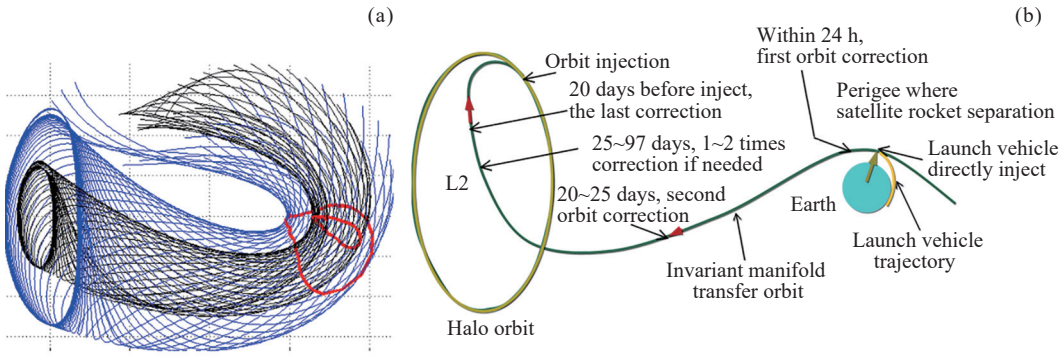

图 19　不变流形及飞行轨迹. (a) 不同尺寸 Halo 轨道不变流形接近地球的近拱点.(b) 运载直接送入不变流形轨道, 卫星自主修正入轨示例, 卫星沿不变流形转移, 中途不超过 5 次的轨道修正, 总转移所需时间约为 117 d

Fig. 19　Invariant manifolds and fiight trajectories. (a) Schematic diagram of the invariant manifold approach to Earth's periapsis for Halo orbits of different sizes. (b) Schematic diagram of the carrier directly entering the invariant manifold orbit, with the spacecraft autonomously correcting its orbit. The spacecraft transfers along the invariant manifold, with no more than 5 orbital corrections mid-way, and the total transfer time is approximately 117 days

具备发送 DOR 信标信号功能.

ET 卫星采用围绕载荷的超精超稳卫星设计思路, 采用分舱设计, 由载荷舱、服务舱组成. 7 台望远镜安装在高刚度高稳定热控的光学基准板上, 通过碳纤维支撑桁架支撑, 组成载荷舱. 望远镜、陀螺、星敏安装在同一高刚度光学基准板并限位锁定, 保证相互间的指向一致性, 减小在轨热变形引起的载荷指向低频漂移. 为抑制杂散光及提供良好的低温环境, 设计大尺寸遮光罩. 服务舱采用六边形柱体的承力筒构型, 用于安装大部分星上单机及推力. 卫星采用三折固定太阳电池阵, 并进行加固和隔热. 图 21 所示为卫星发射及爆炸状态.

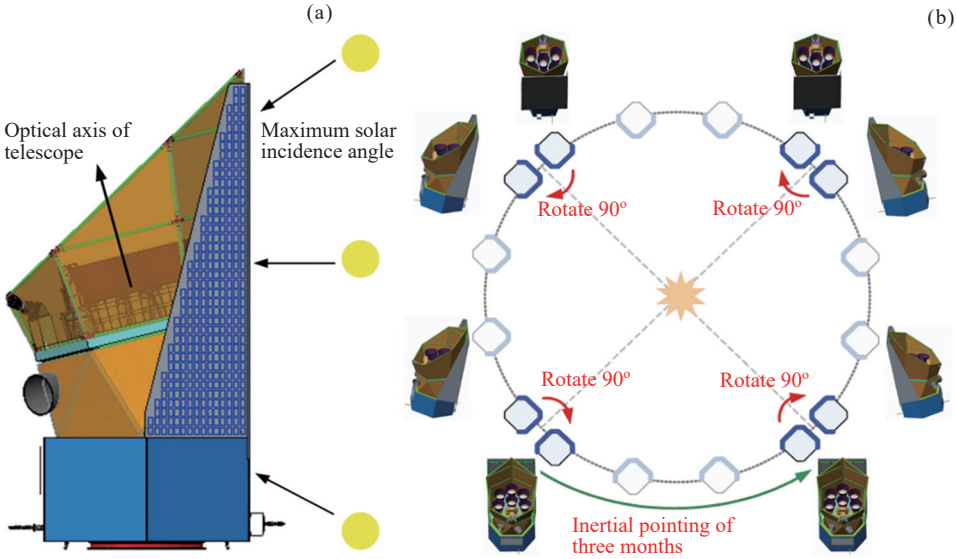

图 20 光照示意及观测策略. (a) ET 卫星凌星望远镜指向开普勒天区附近时太阳入射角; (b)ET 观测策略, 约每 90 天调整姿态, 保证能源供应

Fig. 20 Solar illumination diagram and observation strategy. (a) Schematic of the solar incidence angle when the ET's transit telescope is pointing near the Kepler field of view, (b) schematic of the ET observation strategy, with attitude adjustments approximately every 90 days to ensure energy supply

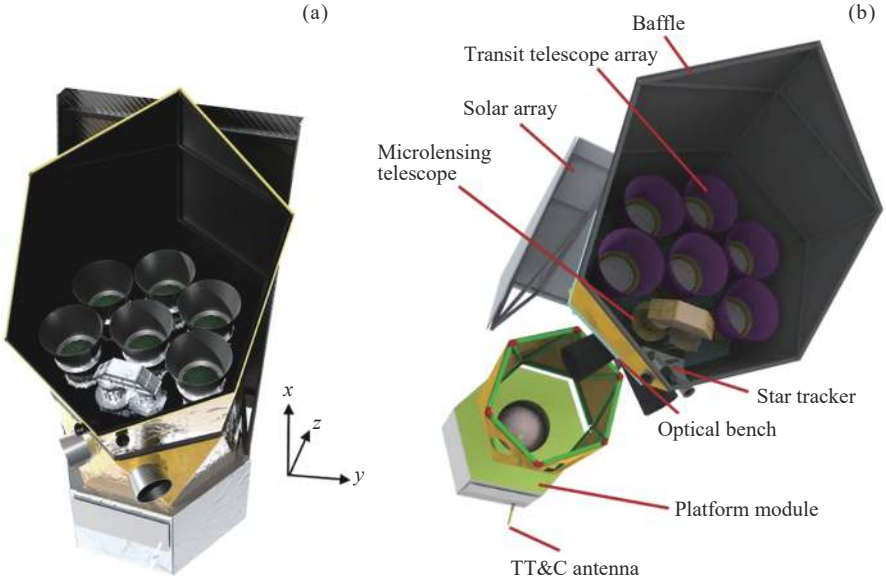

图 21 ET 卫星发射 (a) 及爆炸状态 (b)

Fig. 21 Schematic diagram of the ET spacecraft in its launch state (a), and exploded view diagram (b)

4　关键技术

ET 的关键技术包括: 超高稳定度卫星姿态控制技术和 CMOS 相机低噪声、快读出技术.

4.1　超高稳定度姿控控制技术

4.1.1　指标要求

满足载荷成像性能的 ET 卫星的姿态控制需求如下.

指向控制精度: ≤1.5 arcsec(1σ)(基于导星敏感器).

指向稳定性: ≤0.15 arcsec/10 min(1σ).

4.1.2　姿轨控控制系统组成

ET 卫星姿轨控系统由姿态敏感器、执行机构和姿态控制器组成.

系统采用导星敏感器+亚秒级星敏感器+超高精度陀螺+太阳敏感器粗定姿相结合的定姿方案, 姿态敏感器包括: 导星敏感器、亚秒级星敏感器、超高精度陀螺组件、模拟太阳敏感器, 三轴加速度计用于惯性导航和轨道控制评估.

系统采用轮控为主, 推力器控制为辅的姿态控制方案, 推力器用于入轨轨道修正、轨道维持和飞轮轮组角动量惯量, 执行机构包括: 反作用轮、推力器.

星务计算机集成了姿态控制器的所有功能, 姿轨控分系统所有单机的管理和控制均有星务计算机完成. 整个姿轨控分系统组成框图如图 22 所示.

推进系统由单组元无水肼推进系统组成, 携带 500 kg 燃料, 包括一个 700 L 的金属膜片防晃储箱和 12 台 5 N 推力器以及相关的压传组件、自锁阀组件组成.

4.1.3　超高稳定度姿态控制关键技术

影响 ET 卫星超高稳定度姿态控制技术的因素包括卫星的超高精度姿态的确定、超高精度的姿态控制 (含动力学建模、控制系统设计)、平台微振动影响评估及抑制、载荷–姿态敏感器端到端的高精度温度控制四大方面, 其应对措施如图 23 所示.

在超高精度姿态的确定方面, 主要解决超高 10 mas 量级超高精度导星敏感器的研制和应用关键技术、超高精度光纤陀螺的研制、超高精度姿态融合确定算法.

ET 卫星要求稳定度指标为 0.15″/10 min, 为实现这一稳定度指标, 通常要求卫星的姿态测量精度达到稳定度指标的 5 倍或以上, ET 要求凌星方向绝对导星精度: 非旋向优于 20 mas, 旋向优于 40 mas; 微引力透镜方向相对导星精度: 非旋向优于 20 mas, 旋向优于 50 mas.

结合 ET 项目科学目标和载荷设计, 系统设置 3 套导星敏感器, 包括凌星望远镜两套 (一主一备) 和微引力透镜望远镜一套, 导星与载荷共用光路, 焦面位置相同, 如图 24 所示. 每套导星装置包括 4 台导星探测器, 对称安装于相应望远镜主焦面外侧, 构成高精度导星敏感器. 导星探测器拟使用多次用于空间项目的 GSENSE2020 BSI CMOS 探测器 (见表 4), 实物如图 24 所示, 导星与凌星望远镜和微引力透镜望远镜的探测器共用光路.

在超高精度姿态融合确定算法设计方面, ET 卫星量测系统要求具备绝对定姿和相对定姿的功能、同时具备进一步提升系统测量精度的能力以及故障情况下的系统重构能力.

ET 卫星系统级测量考虑 5 种级别的测量方式进行测量单机备份和算法备份, 保障卫星姿态测量连续, 挖掘系统硬件的潜力.

级别 1: 组合测量 (凌星方向+微引力方向导星组

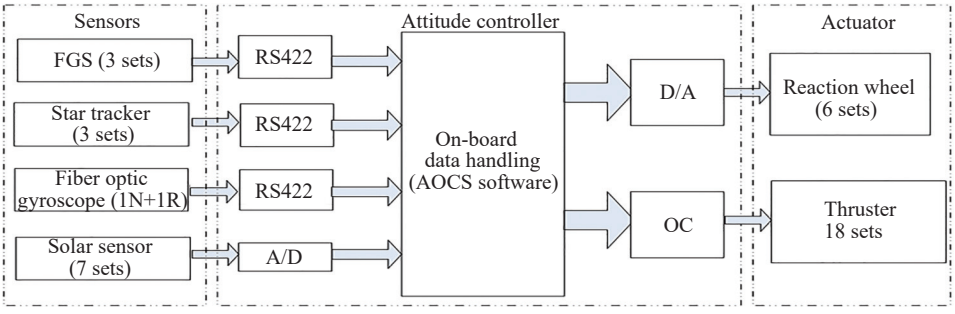

图 22　姿控系统组成

Fig. 22　Attitude control system composition

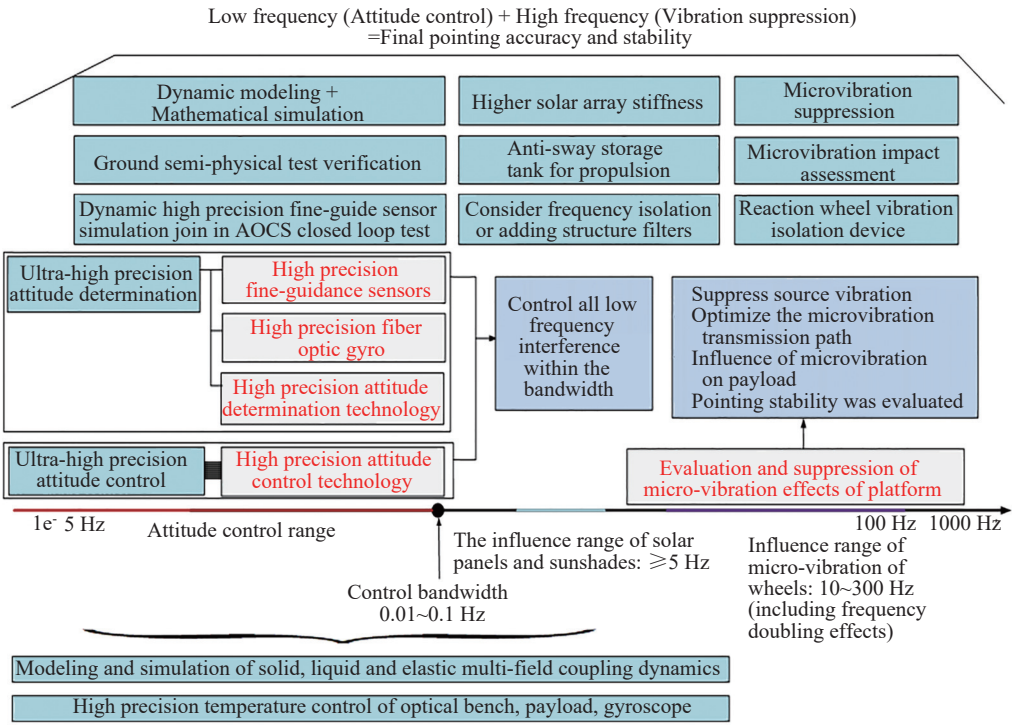

图 23 ET 超高稳定度控制关键技术应对

Fig. 23 Solutions of key technologies for ET's ultra-high stability control

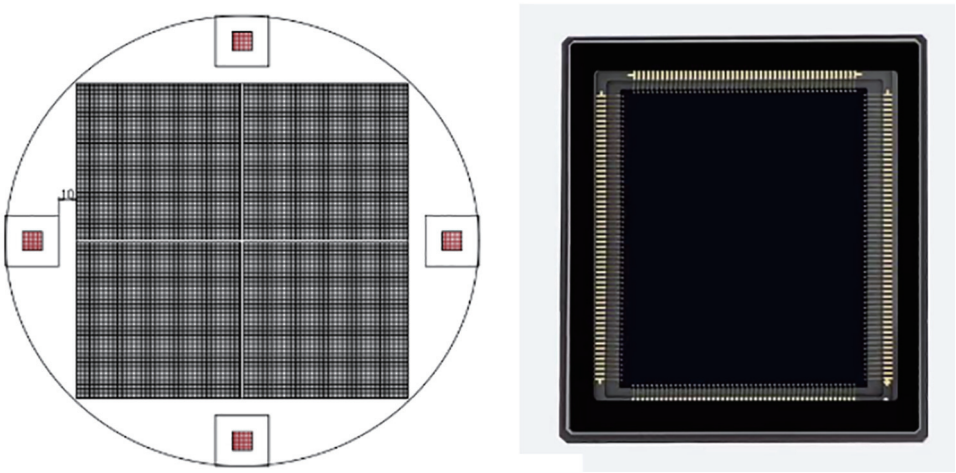

图 24 导星探测器在焦平面状态 (a) 及探测器实物 (b)

Fig. 24 Schematic diagram of the fine guidance sensor on the focal plane (a), and actual photo of the sensor (b)

合测量), 优先级最高.

级别 2: 凌星望远镜方向单独测量, 优先级次之.

级别 3: 微引力透镜方向单独测量, 优先级次之.

级别 4: 短时陀螺积分定姿, 在导星故障情况下, 利用陀螺积分计算卫星三轴姿态.

级别 5: 优先级最低, 在陀螺积分时间超出阈值情况下, 利用多星敏融合定姿.

这里除级别 4 之外, 还可以利用获得的姿态信息与陀螺进行融合 EKF 滤波, 进一步提高测量精度.

在超高精度姿态控制方面, ET 卫星设计控制带宽提高至约 0.1～0.5 Hz, 需要系统的采样频率达到 10 Hz 左右. 对于远超出控制系统带宽外可以利用微振动抑制方案等措施进行抑制.

在平台微振动影响评估及抑制方面, 在前期的关

表 4　GSENSE2020 BSI 探测器特征参数

Table 4　GSENSE2020 BSI detector characteristic parameters

器件参数	参数值
感光面积	13.3 mm×13.3 mm. 每个导星视场1.62°×1.62°@凌星、8.7′ ×8.7′ @微引力
像素尺寸	6.5 μm. 2.85″ @凌星、0.26″ @微引力
阵列	2048×2048 pixel
量子效率	平均70%(420～1000 nm), 峰值95%@560 nm
读出噪声	中位数1.6 e^-; 3.5 e^-(45 krad^{60}Coγ辐照)
暗电流	20 e^- (s^{-1}·$pixel^{-1}$) @ 25 ℃, 253 e^- (s^{-1}·$pixel^{-1}$) @25 ℃(45 krad^{60}Coγ辐照)

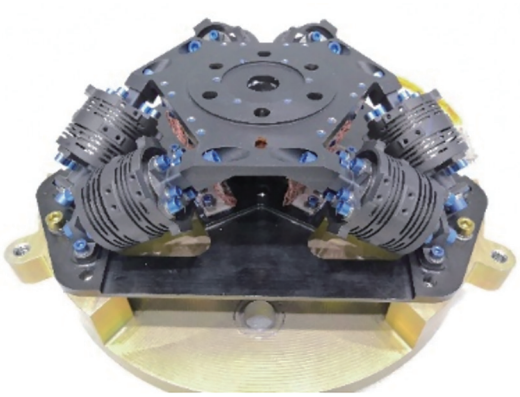

图 25　飞轮隔振系统正样件实物

Fig. 25　Fight model of the reaction wheel vibration isolation system

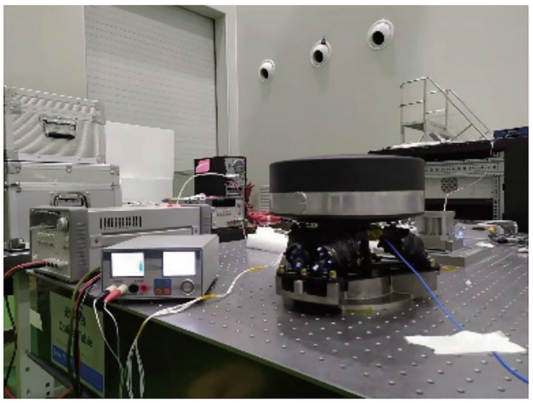

图 26　微振动测试现场

Fig. 26　Micro-vibration test site

键技术研究中, 主要完成了飞轮隔振系统的设计, 结合空间新技术试验卫星, 完成了飞轮隔振系统正样件的研制. 针对飞轮隔振系统与飞轮结构件集成组件, 通过 x, y, z 验收级正弦振动和随机振动力学试验, 实物如图 25 所示.

利用研制的飞轮隔振系统及飞轮, 在地面完成了与飞轮微振动抑制效果测试 (见图 26). 隔振前后干扰对比如图 27 所示. 从图 26 和图 27 可以看出, 在时域上对飞轮的干扰力抑制可达到 90% 以上, 在频域上 30 Hz 以前有部分隔振效果, 30 Hz 以后抑制效果明显, 隔振后飞轮干扰显著降低, 达到了预期的目的.

该飞轮隔振系统搭载在空间新技术试验卫星上进行了在轨测试, 微振动采集数据与系统设计技术、隔振技术与效果得到全面验证, 在轨隔振效果达到 90%.

结合 ET 构型设计、飞轮位置及载荷基准板设计, 考虑 ET 卫星多个动量轮工作工况, 通过仿真估

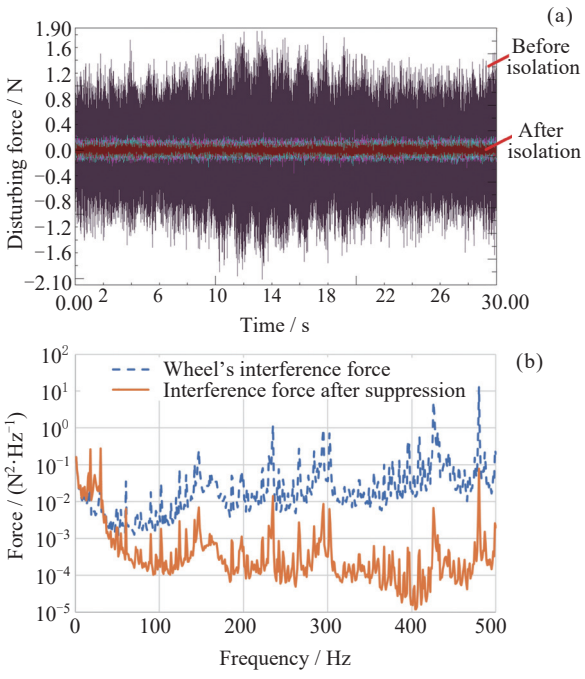

图 27　典型工况下地面隔振前后时域与频域对比曲线

Fig. 27　Time and frequency domain comparison curves before and after ground vibration isolation under typical conditions

计载荷界面微振动干扰对载荷指向影响如图 28 所示. 采取动量轮隔振后, 低频段载荷界面指向变化小于 0.045 arcsec.

在载荷–姿态敏感器端到端的高精度温度控制方面, 核心是解决大光学基准板的高精度温度控制问题. ET 卫星结构由卫星服务舱+载荷舱+固定太阳电池阵等组成, 主要为平台单机及载荷提供可靠的支撑, 同时满足载荷的遮阳需求. ET 卫星主承力结构如图 29 所示.

7 台载荷望远镜、星敏和光纤陀螺布局在同一块光学基准板上, 以保证相互间的指向一致性, 减小在轨热变形引起的载荷指向低频漂移. 采用桁架结构连接光学基准板及服务舱主结构, 保证支撑结构的灵活性, 同时减小服务舱结构热变形对光学基准板的影响. 服务舱采用承力筒+支撑框结构保证结构的刚度, 同时为卫星平台单机及推进系统提供简洁的传力路径.

针对光学基准板进行针对性热设计, 采用隔热配合主被动热控的设计思路进行均温性设计, 强化光学基准板面向导热. 此外, 考虑热稳定性, 设计时功耗波动较大的单机与敏感设备相隔离. 进行基准板稳态分析结果: 光学基准板初始温度为 20℃, 30 min 内, 光学基准板的温度为高温 20.00℃, 低温 19.79℃, 满足 ET 温度需求, 基准板稳态热分析如图 30 所示.

根据热变形分析结果, 提取获得顶板各载荷安装点位移, 如图 31 所示, 拟合得到各载荷界面法向变化, 得到载荷间相对指向变化为 0.89″(3σ), 即≤

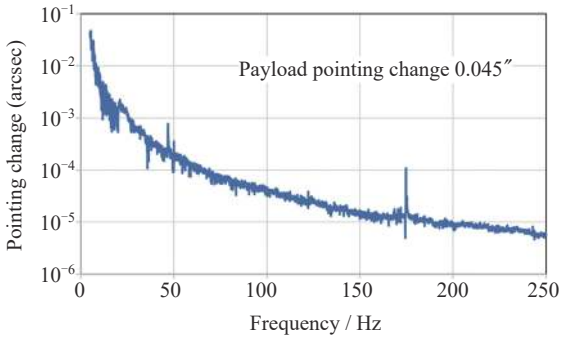

图 28 微振动干扰对载荷指向影响预估

Fig. 28 Estimation of the impact of micro-vibration interference on payload pointing

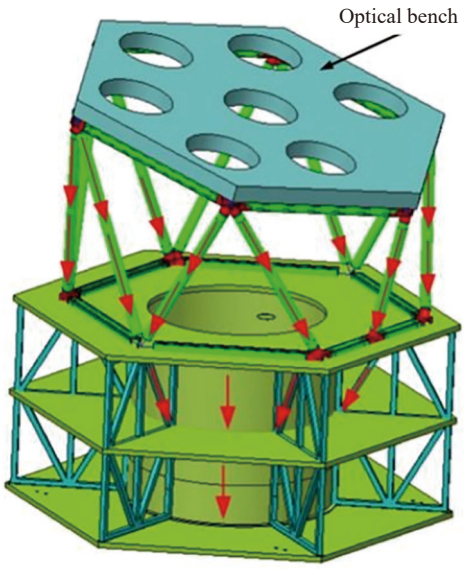

图 29 ET 卫星主承力结构

Fig. 29 ET spacecraft main bearing structure

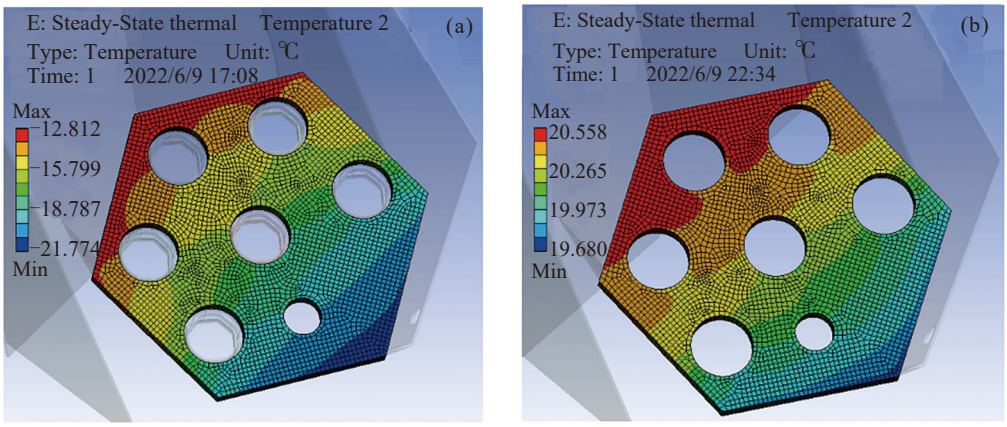

图 30 基准板稳态热分析

Fig. 30 Optical bench steady-state thermal analysis

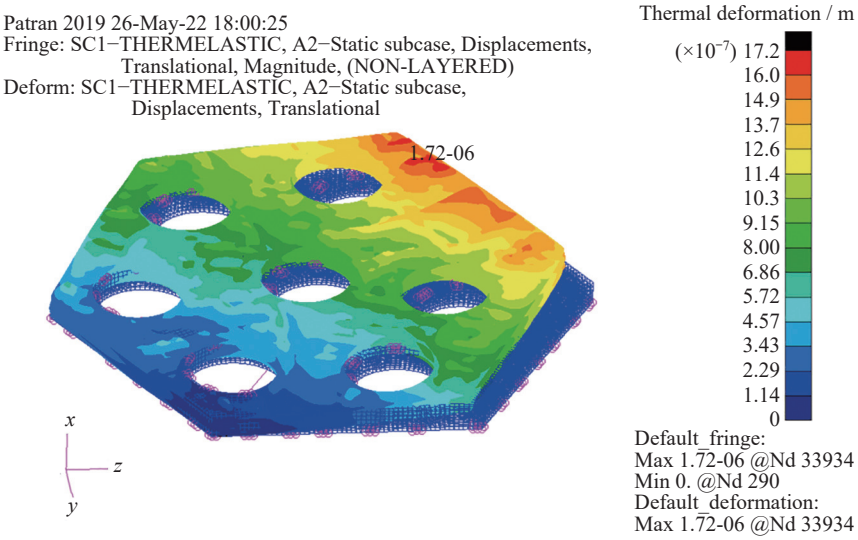

图 31　控温精度±0.3℃ 工况下光学基准板变形云图

Fig. 31　Deformation cloud image of optical bench with temperature control precision of ±0.3℃

0.3″(1σ)/30 min, 满足低频温漂≤0.4″/30 min(1σ) 指标要求.

4.2　CMOS 相机低噪声、快读出技术

ET 凌星望远镜的焦面相机是载荷的核心组件, 焦面相机包含探测器组件和相机电子学组件, 低噪声是 ET 的关键指标, 直接影响测光精度. 国际上采用低噪声 CMOS 探测器实现星载测光的, 只有 MIT 团队采用仙童的 CMOS 探测器 CIS252 F 的相机在近地轨道室温下对天文目标–亮星进行 20 Hz 的快速曝光, 实现了 170 ppm 的测光精度, 说明 CMOS 探测器可用于空间高精度测光观测, 但其测光精度比 ET 差一个多量级, 且国外的航天级别的 CMOS 探测器对中国禁运.

ET 项目将采用国内长光辰芯正在研制用于空间天文项目的 GSENSE 1081 BSI CMOS 探测器作为基线, 主要指标基本可以满足本应用. 星载项目在低噪声偏置及驱动器件选型、低噪声电源实现上也有难度, 星上资源包括体积、重量、功耗等限制使电路密度增大, 容易带来干扰和串扰等问题, 只有将这些问题解决后才能保证实现预期科学目标. 因此具有低噪声、高速读出的 CMOS 相机是实现 ET 项目的关键技术保障.

在背景型号研究中, ET 团队设计了基于 GSENSE6060 BSI 和 GSENSE1081 BSI 两种探测器的缩比原理样机. 图 32 给出了 GSENSE1081 BSI

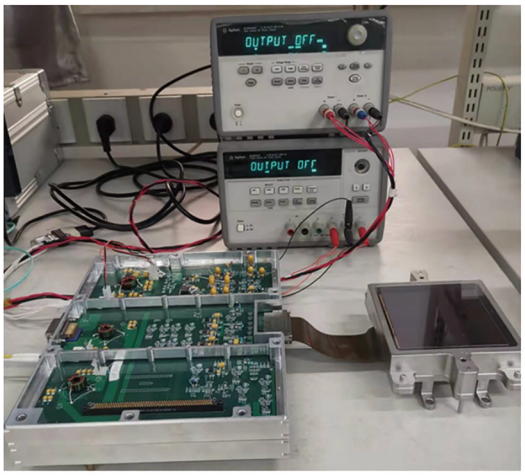

图 32　GSENSE1081 BSI 相机样机

Fig. 32　GSENSE1081 BSI camera prototype

CMOS 原理样机. 相机电子学由二次电源、时序控制电路、电源滤波电路、CMOS 供电、低噪声偏置及驱动电路等组成, CMOS 相机组成及信号流如图 16 所示.

ET 团队搭建了用于相机测试的高稳定真空低温测试系统. 测试系统的实物如图 33 所示. 其中探测器放置于杜瓦内, 温控温度–40℃±0.1℃.

团队开展了相机性能测试: 首先对相机分别两组采集两组偏置图像, 然后在暗场环境下, 对不同曝光时间下采集暗场图像. 随后采集平场图像, 具体步骤如下: 开启积分球, 对积分球到达探测器处的光进行

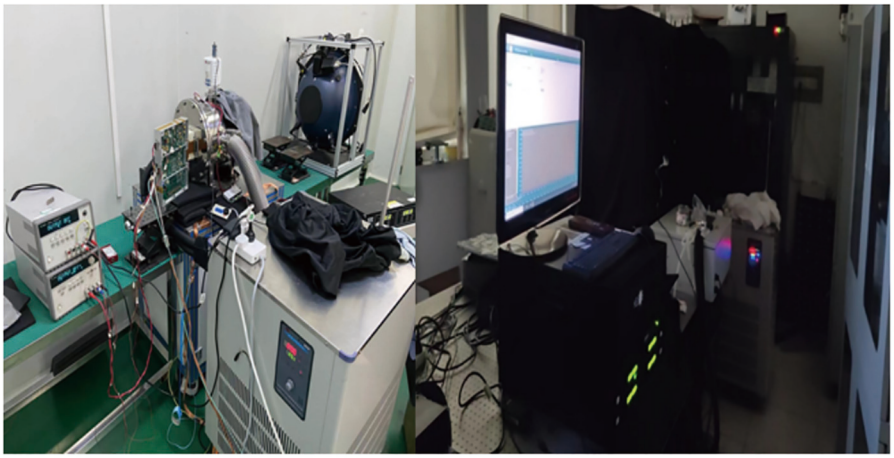

图 33 CMOS 相机测试系统实物. 测试系统包括真空罐、TEC、TEC 控制器、铂电阻、水冷系统、经过测试该系统可以长期工作温度稳定在小于等于–40℃±0.04℃

Fig. 33 Photo of the CMOS camera testing system. The testing system includes a vacuum chamber, TEC (Thermoelectric Cooler), TEC controller, platinum resistance, water cooling system, and it has been tested that the system can work for a long time with temperature stability at less than or equal to –40℃ ± 0.04℃

监测, 将积分球设置为稳定模式, 改变曝光时间分 30 步采集本底到满阱的图像, 最后对图像进行处理后即可获得相关性能指标. 图 34 给出了典型暗场和平场图像. 这些测试结果显示读出噪声约: 4.5 e^-, 读出时间: 2.94 s. 这些是基于 GSENSE1081 BSI 探测器的 2 通道输出测试的结果.

除了暗场、平场、偏置帧, 团队也测试了相机的增益 (Gain e/ADU)、读出噪声 (Readout Noise)、非线性度 (Nonlinearity)、暗电流 (Dark current)、光子转移曲线 (PTC)、像元间响应不均匀性 (PRNU) 等指标, 并完成了相机稳定性测试, 测试结果如表 5 所示.

根据表 5 测试结果, 相机在–40℃±0.1℃ 环境下, 相机系统的读出噪声优于 5 e^-, 增益约为 1.46 e^-/ADU, 暗电流优于 0.020 s^{-1}·$pixel^{-1}$, 增益和噪声的稳定性与一致性较好, 满足指标要求.

在 2023 年 6 月中旬长光辰芯完成了 4 通道读出开发后, 团队又对这 4 通道 GSENSE1081 BSI CMOS 探测器性能开展了测试, 相机系统的读出噪声约为 4.96 e^-, 读出时间约 1 s, –40℃ 时暗电流≤ 0.011 e^- (s^{-1}·$pixel^{-1}$) , 像素间响应非均匀性约 0.4%, 光子响应曲线线性度≤ 2.5%. 这些性能也满足指标要求. CMOS 相机的技术成熟度实现 TRL5. 因此, CMOS 低噪声、高速读出技术获得了突破.

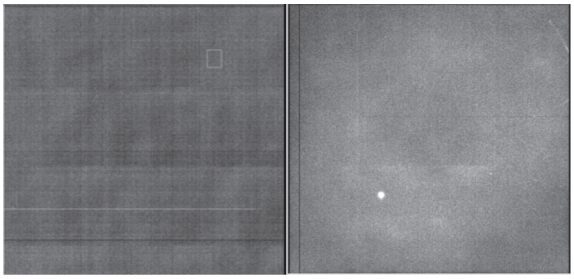

图 34 GSENSE1081 BSI CMOS 相机的暗场 (a) 与平场 (b) 测试获得的图像

Fig. 34 Images obtained from the dark field (a) and flat field (b) tests of the GSENSE1081 BSI CMOS camera

5 结语

系外地球和生命的发现是天文领域的下一个重大热点. 欧美的下一代空间卫星项目聚焦在系外地球搜寻和宜居行星的可宜居性研究中. ET 计划经过前期的背景型号的研究, 具备了较强的可行性和技术成熟度, 适合开展下一步卫星方案和工程的研究. 根据最新的项目进展分析, ET 有望在 2028 年完成卫星研制、测试和发射. ET 有望首次发现系外地球并发现数千颗分布在不同轨道上的类地行星以及在自由空间游动的流浪类地行星, 在系外行星这个快速发展的天文领域中做出中国的贡献.

表 5　2 通道 GSENSE1081 BSI 相机测试结果

Table 5　Test results for the 2-channel GSENSE1081 BSI camera

Date	Gain e^-/ADU	Readout Noise e^-/pixel/frame	Nonlinearity/(%) 10%～90% FW	PTC/(%) 10%～90% FW	Dark current e^-/s @ –40°	PRNU/(%)
1 July	1.466	4.619	0.54	0.90	0.010	0.65
4 July	1.460	4.627	0.47	1.48	0.011	0.61
5 July	1.459	4.616	0.87	2.08	0.017	0.61
6 July	1.463	4.603	0.42	1.86	0.010	0.61
7 July	1.467	4.624	0.61	1.85	0.014	0.64
8 July	1.464	4.643	0.60	1.98	0.014	0.63

致谢　审稿专家提出了宝贵建议, 提高了文章质量和描述的完整性, 加拿大多伦多大学武延庆教授在 ET 项目形成过程中做出了关键性贡献, 项目组全体研究人员和来自国内外 80 多所大学及研究所的合作伙伴对本研究做出了积极贡献.

参考文献

[1] MAYOR M, QUELOZ D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star[J]. *Nature*, 1995, **378**(6555): 355-359

[2] KASTING J F, WHITMIRE D P, REYNOLDS R T. Habitable zones around main sequence stars[J]. *Icarus*, 1993, **101**(1): 108-128

[3] BORUCKI W J, KOCH D, BASRI G, *et al*. Kepler planet-detection mission: introduction and first results[J]. *Science*, 2010, **327**(5968): 977-980

[4] BORUCKI W J. *KEPLER* Mission: development and overview[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, **79**(3): 036901

[5] FRESSIN F, TORRES G, CHARBONNEAU D, *et al*. The false positive rate of Kepler and the occurrence of planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **766**(2): 81

[6] HOWARD A W, MARCY G W, BRYSON S T, *et al*. Planet occurrence within 0.25 au of solar-type stars from Kepler[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2012, **201**(2): 15

[7] MORTON T D, BRYSON S T, COUGHLIN J L, *et al*. False positive probabilities for all Kepler objects of interest: 1284 newly validated planets and 428 likely false positives[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, **822**(2): 86

[8] THOMPSON S E, COUGHLIN J L, HOFFMAN K, *et al*. Planetary candidates observed by *Kepler*. VIII. A fully automated catalog with measured completeness and reliability based on data release 25[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2018, **235**(2): 38

[9] ZHANG H, GE J, DENG H P, *et al*. Science goals of the Earth 2.0 space mission[C]//Proceedings of SPIE 12180, Space Telescopes and Instrumentation 2022: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. Montréal: SPIE, 2022: 1218016

[10] ZHU W, PETROVICH C, WU Y Q, *et al*. About 30% of sun-like stars have *Kepler*-like planetary systems: a study of their intrinsic architecture[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, **860**(2): 101

[11] GILLILAND R L, CHAPLIN W J, DUNHAM E W, *et al*. *KEPLER* mission stellar and instrument noise properties [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2011, **197**(1): 6

[12] RICKER G R, WINN J N, VANDERSPEK R, *et al*. Transiting exoplanet survey satellite (TESS)[C]//Proceedings of SPIE 9143, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. Montréal: SPIE, 2014: 914320

[13] RICKER G R, WINN J N, VANDERSPEK R, *et al*. Transiting exoplanet survey satellite[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2015, **1**(1): 014003

[14] European Space Agency. PLATO Revealing Habitable Worlds Around Solar-Like Stars[R/OL]. https://sci.esa.int/documents/33240/36096/1567260308850-PLATO_Definition_Study_Report_1_2.pdf

[15] RAUER H, CATALA C, AERTS C, *et al*. The PLATO 2.0 mission[J]. *Experimental Astronomy*, 2014, **38**(1/2): 249-330

[16] GE J, ZHANG H, DENG H P, *et al*. The ET mission to search for earth 2.0s[J]. *The Innovation*, 2022, **3**(4): 100271

[17] GE J, ZHANG H, ZANG W C, *et al*. ET white paper: to find the first earth 2.0[OL]. arXiv preprint arXiv: 2206.06693, 2022

[18] GE J, ZHANG H, ZHANG Y S, *et al*. The Earth 2.0 space mission for detecting earth-like planets around solar type stars[C]//Proceedings of SPIE 12180, Space Telescopes and Instrumentation 2022: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. Montréal: SPIE, 2022: 13

[19] IZIDORO A, OGIHARA M, RAYMOND S N, *et al*. Breaking the chains: hot super-Earth systems from migration and disruption of compact resonant chains[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, **470**(2): 1750-1770

[20] OGIHARA M, KOKUBO E, SUZUKI T K, *et al*. Formation of close-in super-Earths in evolving protoplanetary disks due to disk winds[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2018, **615**: A63

[21] FULTON B J, PETIGURA E A, HOWARD A W, *et al*.

The california-*Kepler* survey. III. A gap in the radius distribution of small planets[J]. *The Astronomical Journal*, 2017, **154**(3): 109

[22] OWEN J E, WU Y Q. The evaporation valley in the Kepler planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, **847**(1): 29

[23] WU Y Q, LITHWICK Y. Density and eccentricity of *Kepler* planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **772**(1): 74

[24] HSU D C, FORD E B, RAGOZZINE D, *et al*. Occurrence rates of planets orbiting FGK stars: combining *Kepler* DR25, *Gaia* DR2, and Bayesian inference[J]. *The Astronomical Journal*, 2019, **158**(3): 109

[25] KUNIMOTO M, MATTHEWS J M. Searching the entirety of Kepler data. II. Occurrence rate estimates for FGK stars[J]. *The Astronomical Journal*, 2020, **159**(6): 248

[26] GILLON M, TRIAUD A H M J, DEMORY B O, *et al*. Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1[J]. *Nature*, 2017, **542**(7642): 456-460

[27] ZECHMEISTER M, DREIZLER S, RIBAS I, *et al*. The CARMENES search for exoplanets around M dwarfs. Two temperate Earth-mass planet candidates around Teegarden's Star[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2019, **627**: A49

[28] DREIZLER S, JEFFERS S V, RODRÍGUEZ E, *et al*. RedDots: a temperate 1.5 Earth-mass planet candidate in a compact multiterrestrial planet system around GJ 1061[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, **493**(1): 536-550

[29] VANDERBURG A, ROWDEN P, BRYSON S, *et al*. A habitable-zone earth-sized planet rescued from false positive status[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, **893**(1): L27

[30] GILBERT E A, BARCLAY T, SCHLIEDER J E, *et al*. The first habitable-zone earth-sized planet from TESS. I. Validation of the TOI-700 system[J]. *The Astronomical Journal*, 2020, **160**(3): 116

[31] QUINTANA E V, BARCLAY T, RAYMOND S N, *et al*. An earth-sized planet in the habitable zone of a cool star[J]. *Science*, 2014, **344**(6181): 277-280

[32] GUERRERO N M, SEAGER S, HUANG C X, *et al*. The TESS objects of interest catalog from the TESS prime mission[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2021, **254**(2): 39

[33] KUNIMOTO M, DAYLAN T, GUERRERO N, *et al*. The TESS faint-star search: 1617 TOIs from the TESS primary mission[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2022, **259**(2): 33

[34] BENZ W, BROEG C, FORTIER A, *et al*. The CHEOPS mission[J]. *Experimental Astronomy*, 2021, **51**(1): 109-151

[35] FORGAN D H, HALL C, MERU F, *et al*. Towards a population synthesis model of self-gravitating disc fragmentation and tidal downsizing II: the effect of fragment-fragment interactions[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, **474**(4): 5036-5048

[36] RASIO F A, FORD E B. Dynamical instabilities and the formation of extrasolar planetary systems[J]. *Science*, 1996, **274**(5289): 954-956

[37] KAIB N A, RAYMOND S N, DUNCAN M. Planetary system disruption by Galactic perturbations to wide binary stars[J]. *Nature*, 2013, **493**(7432): 381-384

[38] MA S Z, MAO S D, IDA S, *et al*. Free-floating planets from core accretion theory: microlensing predictions[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 2016, **461**(1): L107-L111

[39] BARCLAY T, QUINTANA E V, RAYMOND S N, *et al*. The demographics of rocky free-floating planets and their detectability by WFIRST[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, **841**(2): 86

[40] GOULD A, JUNG Y K, HWANG K H, *et al*. Free-floating planets, the einstein desert, and 'oumuamua[J]. *Journal of the Korean Astronomical Society*, 2022, **55**(5): 173-194

[41] KIM S L, LEE C U, PARK B G, *et al*. KMTNET: a network of 1.6 m wide-field optical telescopes installed at three southern observatories[J]. *Journal of the Korean Astronomical Society*, 2016, **49**(1): 37-44

[42] GOULD A, ZANG W C, MAO S D, *et al*. Masses for free-floating planets and dwarf planets[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021, **21**(6): 133

[43] The Microlensing Observations in Astrophysics (MOA) Collaboration, The Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE) Collaboration. Unbound or distant planetary mass population detected by gravitational microlensing[J]. *Nature*, 2011, **473**(7347): 349-352

[44] MRóZ P, UDALSKI A, SKOWRON J, *et al*. No large population of unbound or wide-orbit Jupiter-mass planets[J]. *Nature*, 2017, **548**(7666): 183-186

作者简介



葛 健 男, 现为中国科学院上海天文台讲席教授, 国家创新人才, 中国科学院系外地球 (ET) 巡天卫星任务创始人和首席科学家. 主要研究方向为系外行星和观测宇宙学、天文技术和仪器以及人工智能在天文大数据中的应用等.

E-mail: jge@shao.ac.cn