DOI 10.15302/J-SSCAE-2025.03.014

价值可持续太空探索的系统工程——理念、架构与实践

党炜[1,2,3,4]，许鹏程[3,5,6,7]，郑作环[3,5,6,7]，张竞菲[1]，王大辉[8]，陈英武[9]，张雯[1,3]，骆军委[3,10,11]，李京苑[12,13]，宋恒旭[14,15,16]，肖依永[17,18]，熊盛阳[12]，林宝军[3,19]，任羿[17,18*]

（1. 中国科学院空间应用工程与技术中心，北京 100094；2. 中国科学院空间科学与应用总体部，北京 100094；3. 中国科学院可靠性保障中心，北京 100094；4. 中国科学院大学航空宇航学院，北京 100049；5. 数学科学全国重点实验室，北京 100190；6. 中国科学院数学与系统科学研究院，北京 100190；7. 中国科学院大学数学科学学院，北京 100049；8. 北京师范大学系统科学学院，北京 100875；9. 国防科技大学系统工程学院，长沙 410000；10. 半导体芯片物理与技术全国重点实验室，北京 100083；11. 中国科学院半导体研究所，北京 100083；12. 中国运载火箭技术研究院，北京 100076；13. 中国星网网络系统研究院有限公司，北京 100029；14. 超常环境非线性力学全国重点实验室，北京 100190；15. 中国科学院力学研究所，北京 100190；16. 中国科学院大学工程科学学院，北京 100049；17. 可靠性与环境工程技术全国重点实验室，北京 100191；18. 北京航空航天大学可靠性与系统工程学院，北京 100191；19. 中国科学院微小卫星创新研究院，上海 201210）

摘要：太空探索活动进入价值可持续发展模式阶段，航天大国率先降低全生命周期成本以驱动可持续发展，以价值引领的“无人区”式目标强化驱动力，自然需要解决在探索性目标牵引下太空探索的任务宏观和微观、系统内部和外部存在未知状态的认知自适应可持续这一重要理论问题。本文基于钱学森工程控制论、系统工程、系统科学等学术发展逻辑和相关理论原理，结合中国载人航天工程在空间科学与应用领域超过30年的工程实践，从源头和底层出发总结规律、融合理论／原理、演绎发展；以系统论、大成智慧学思想为指导，构建了价值可持续太空探索的系统工程（TSE）方法体系，涵盖人工智能技术驱动的“物穷其理、宏微交替”理念，基于数据–知识–逻辑的认知三维结构和总体基本原理及其架构，三重嵌套自适应控制原理结构及其数学物理基础要点，针对存在未知状态的系统韧性构建原理。载人航天工程空间科学应用任务在降低成本、科学探索方面的全面实践以及月球相关探索项目中的前瞻应用，表明TSE方法体系能够显著提升太空探索活动的价值可持续性，为推进钱学森“创建系统学”进程、新时期航天强国建设提供了方法论与工程实践支撑。

关键词：太空探索；价值可持续；系统工程；自适应控制；深空探测；航天强国

中图分类号：V11　　**文献标识码：**A

Systems Engineering for Value-Sustainable Space Exploration: Philosophy, Architecture, and Practice

Dang Wei[1,2,3,4], Xu Pengcheng[3,5,6,7], Zheng Zuohuan[3,5,6,7], Zhang Jingfei[1], Wang Dahui[8], Chen Yingwu[9], Zhang Wen[1,3], Luo Junwei[3,10,11], Li Jingyuan[12,13], Song Hengxu[14,15,16], Xiao Yiyong[17,18], Xiong Shengyang[12], Lin Baojun[3,19], Ren Yi[17,18*]

(1. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. General Establishment of Space Science and Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 3. Chinese Academy of

收稿日期：2025-03-18；**修回日期：**2025-05-21

通讯作者：*任羿，北京航空航天大学可靠性与系统工程学院研究员，研究方向为可靠性系统工程、数字孪生；E-mail: renyi@buaa.edu.cn

资助项目：国家重点研发计划项目(2022YFF0610100)；国家自然科学基金项目(12090010, 12090014, 12031020)；中国载人航天工程国家科技重大专项

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

Sciences' Reliability Assurance Center, Beijing 100094, China; 4. School of Aeronautics and Astronautics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. State Key Laboratory of Mathematical Sciences, Beijing 100190, China; 6. Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 7. School of Mathematical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 8. School of Systems Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 9. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China; 10. State Key Laboratory of Semiconductor Physics and Chip Technologies, Beijing 100083, China; 11. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 12. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China; 13. Academy of Network Systems, China Satellite Network Group Co., Ltd., Beijing 100029, China; 14. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Beijing 100190, China; 15. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 16. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 17. State Key Laboratory of Reliability and Environmental Engineering Technology, Beijing 100191, China; 18. School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 19. Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

Abstract: Space exploration activities have progressed into a stage of value-sustainable development. Leading space-faring nations prioritize full lifecycle cost reduction to drive sustainability, enhanced by value-oriented objectives in uncharted frontiers. This progression necessitates addressing the fundamental theoretical challenge of achieving cognitive adaptive sustainability for exploration-driven missions, which involves unknown states across macro/micro mission scopes and internal/external system boundaries. Building on Qian Xuesen's foundational theories of engineering cybernetics, systems engineering, and systems science, this study integrates empirical insights into space science and applications from over 30 years of engineering practice in China's Manned Space Program. Guided by system theory and Metasynthetic Wisdom, we establish a value-sustainable space exploration systems engineering (TSE) framework derived from first principles through theoretical synthesis and deductive development. The TSE framework comprises an AI-driven methodology of "probing universal truths via macro–micro reciprocation"; a data-knowledge-logic cognitive triad structure with its general basic principles and architecture; a triple-nested adaptive control mechanism grounded in mathematical–physical underpinnings; and principles for constructing system resilience under unknown states. The comprehensive implementation of China's manned space science—advancing cost reduction and scientific exploration—together with foward-looking applications in lunar projects, demonstrates that TSE framework significantly enhances value sustainability in space exploration. This work advances Qian Xuesen's "Creating Systematology" vision while providing systematic methodologies and engineering support for strengthening China's space sector in the new era.

Keywords: space exploration; value-sustainable; systems engineering; adaptive control; deep space exploration; space power

一、前言

以"万户升天"为代表的人类太空探索活动具有高价值、高风险的特点。1957年，世界首颗人造地球卫星进入轨道，标志着人类进入了太空时代。1970年，我国成功发射了"东方红一号"人造地球卫星，开启了探索宇宙奥秘、和平利用太空的广阔征程。20世纪90年代，作为航天强国的美国率先实施以降低全生命周期成本来驱动可持续发展的太空探索活动，也以任务的先进成果及效益为价值牵引，持续保持太空领域的发展引领地位。当前，世界航天形成了多极化发展格局，各国积极制定太空战略和规划[1~3]，持续推进太空探索活动。以竞争与协作共存为特征的全球航天生态业已形成，太空探索成为事关人类共同命运的标志性活动。

全球航天正在经历太空探索的系统性转型，由高价值目标牵引下大包络多裕量控风险、高成本多余量保验证的刚性发展模式，逐步转向以价值可持续为导向的动态风险可接受、综合成本可承受的柔性发展模式，即价值可持续的太空探索。其中，价值指客体能满足主体需要的效益关系，在人类认识自然方面客体的尺度包含渺观、微观、宏观、宇观、胀观等层面[4]。对于太空探索活动，相关尺度的承载领域涵盖空间科学、空间技术、空间应用以及相关的任务目标、成果产出等。特别是在柔性发展模式下，上述任务目标可由刚性模式下确定的状态拓展为模糊、动态、虚实结合的状态，各国太空探索的战略和规划中给出了基本一致的内涵[1~3]。

价值可持续太空探索的定义为：太空探索在保持价值存在状态的条件下（即探索任务具有成果产出效益），实现相关效益所需的成本可承受、状态可保持。自20世纪50年代起，钱学森持续强调与价值可持续具有相同含义的共性基础——如何将可靠性较低的元件组成可靠性较高的系统，是可靠性

理论的重要课题之一[5~7]，由此形成“可靠性之问”。结合当前太空探索的实践进展[8~12]，可将该问题描述为：如何将更低成本、更高性能，而可靠性风险存疑的商业现货（COTS）元器件应用到系统可靠性要求较高的太空探索任务中？在这方面，美国国家航空航天局（NASA）、太空探索（SpaceX）公司等持续开展了工程探索[8~10]。在我国，载人航天工程“造船为建站、建站为应用”的发展理念重在应用，相应空间应用系统主要承担空间科学与应用研究任务[13]；确立了因任务引领性及其有效载荷先进性而“不得不用”COTS元器件的系统策略，开展了超过30年的实践探索[14~18]，阶段性地建成了安全性、先进性、可靠性、经济性相综合的工程技术体系[15~19]。相关进展支撑了空间科学与应用成果效益产出的可持续性[12,20,21]，取得了钱学森“可靠性之问”理论的实验结果，底层逻辑即价值可持续太空探索的系统工程（Systems Engineering for valuE-Sustainable Space Exploration，简称SE-ES-SE、Triple-SE，进一步简化为TSE）。

以载人航天工程、北斗卫星导航工程为代表的地球轨道航天任务，以“嫦娥”探月工程、“天问”火星探测工程为代表的深空探测任务都取得了丰硕成果[11,12,22,23]并将继续深化推进，《国家空间科学中长期发展规划（2024—2050年）》标志着我国航天强国建设进入了高质量发展阶段。在此背景下，我国航天领域对TSE及其方法体系的需求更为深入、更显迫切。针对于此，本文采取“从源头和底层解决关键技术问题”思路[24]，基于钱学森学术思想发展逻辑和相关理论原理，就我国载人航天空间应用系统的工程实践进行总结提炼，论证提出TSE方法体系；遴选太空探索重大工程实践案例，演绎并阐释TSE方法体系的可行性、有效性，为深化钱学森“创建系统学”[4]的发展研究、保障航天领域工程任务实施提供理论依据。

二、价值可持续太空探索的研究背景与理性应对

（一）太空探索价值可持续的矛盾辨析

1. 三个未知及其协同效应的矛盾

兼顾成本降低和先进引领的太空探索价值可持续的柔性发展模式，内生逻辑复杂且实现难度较大，成为航天领域的代表性工程技术难题，原因包含两个方面：发挥太空探索任务的引领作用，需要以先进的系统指标为支撑，但技术阈值的提升将放大系统运行健康风险认知方面的不确定性，特别是“无人区”式的深空探测等任务目标及环境存在未知导致相应的不确定性显著增长；降低成本可能导致风险控制技术措施减少、风险认知盲区扩大，进而引起部分风险点认知方面（如新型先进芯片的辐射效应机理等）不确定性的增加，对于“无人区”式的任务而言不确定性也将显著增长。可见，刚性发展模式下航天系统工程实际上存在1个基础性的矛盾：保持太空探索任务效益领先性持续最强、系统全生命周期费效比持续最优，与任务目标性质及其内生引领性特点相伴、系统性降低成本诱发“点、线、面”风险认知的不确定性增加是矛盾的。以太空探索价值可持续为工程应用目标，亟需解决“三角关系”矛盾（见图1）：任务存在宏观未知状态，系统基础的风险机理存在微观未知状态，系统宏观健康状态存在未知情况、跨层级相互影响存在不稳定／不确定甚至未知。

2. 经典系统工程目标要素特性变化的矛盾

从系统工程的本质特性角度看，深空探测等太空探索活动的目标和环境具有未认知、不确定的特点[25]，与传统航天任务中目标和环境具有确定性的特点不一致。从系统工程的三大类、六要素[5]对比结果看，在“任务指标”的目标要素以外，均无本质变化或不适用对比分析（见表1）。其中，“任务指标”要素的变化，在由目标确定的国家战略[5,26]属性基础上，增加了具有未认知、不确定特性的探索性质，体现出本质变化。例如，在地球轨道的太

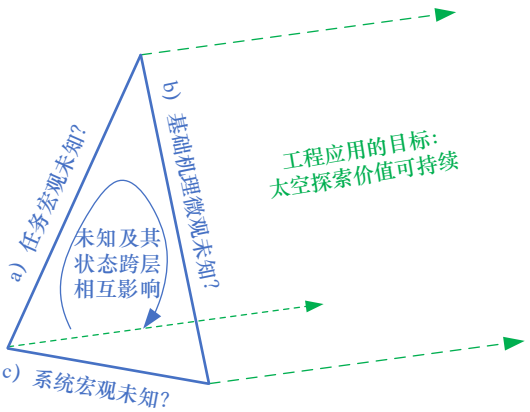


图1 太空探索价值可持续的“三角关系”矛盾

表1　系统工程要素经典与发展的协同对比

序号	类型	要素	相同特性	差异特性	本质变化
1	人	人	精神传承	经历不同	—
2	物	物资	存在自主风险	更加丰富	无
3	物	设备	存在自主风险	更加先进	无
4	物	财	国家投入	更加充沛	无
5	事	任务指标	目标确定的国家战略	增加了探索性质	较大
6	事	信息	关键基础	更大规模	无

空探索中，这种本质变化是客观存在的：面对任务引领及产出效益最大化的需求，开展科学“无人区”的探索，在任务的宏观认知方面存在未认知或不确定的状态；面对降低系统全生命周期成本的需求，拓展采用COTS元器件等，在微观机理认知方面存在未认知或不确定的状态。因此，经典系统工程的目标要素特性与当下发展需求对比产生的重大变化，构成太空探索价值可持续的理论层面矛盾，进而从底层影响了钱学森现代科学技术体系中系统科学内容[4]。

（二）价值可持续太空探索的发展历程

太空探索价值可持续发展的驱动力分为隐性和显性两类。任务引领是太空探索的内生性属性，在商业航天、空间科学、深空探测等细分领域体系化发展之前作为国家特定战略处于非公开状态，因而该驱动力是隐性特征。降低成本是显性特征，太空探索降低成本的含义与“低成本内涵概念”[27]是一致的，但聚焦天基部分（不包括地面发射组织管理成本等）。优化系统的经济性[28]，实现系统全生命周期费效比最优，提高太空探索的经济可承受性[29]，是实现价值可持续的共性基础。以作为显性特征的降低成本为主线条，分析价值可持续太空探索的发展历程。

政策导向维度的太空探索价值可持续发展可分为3个阶段，目前全球范围内处于高质量发展、规模化发展的并存状态。①“0－1”的创造阶段，以服务国家特定战略目的、不考量成本的全面竞争为突出特征，人造卫星、载人空间站、载人登月、深空探测的创造性突破为代表，在20世纪90年代这类政策逐步冻结[26,30]。② 高质量发展阶段，以服务国家战略、探索经济可承受性管理为突出特征，如20世纪90年代NASA开始实施的“更快、更好、更便宜”的政策[30]。③ 规模化发展阶段，以服务国家战略、市场需求，着眼系统性降低成本为突出特征，如2006年NASA发布商业轨道运输系统计划政策[31]激发了“新航天”领域的活力，以SpaceX公司为代表的商业航天力量阶段性地促成NASA的载人航天、天地运输等计划[2]的可持续发展获益。

技术导向维度的太空探索价值可持续发展也可分为3个阶段，目前全球范围内处于体系化工程应用成熟发展、工程与理论协同探索发展的并存状态。① 先驱探索阶段（20世纪80年代—20世纪末），以COTS元器件替代昂贵的宇航级或军品级元器件，作为降低系统成本的关键共性技术，如英国萨里大学的卫星研发、美国的武器装备研制等[14,25,27,30]。② 体系化工程应用阶段（21世纪初—21世纪20年代），仍采用COTS元器件的空间应用等策略，开展相关工程技术、方法体系的探索与实践，如NASA发布的相关技术规范（2003年）[32]，中国载人航天空间应用系统部署的前瞻研究（2004年）[14]，SpaceX公司建设“星链”星座并开展规模化、低成本迭代探索（2018年起），国际标准化组织、欧洲空间局发布或立项的COTS类产品空间应用标准规范（2007年、2010年、2024年）[33~35]。③ 工程与理论协同发展阶段（21世纪20年代起步），基于工程实践，以机理认知为导向，从源头和底层出发探索相关理论并注重反馈迭代、持续交替，用于指导工程实现价值的可持续发展，如源自中国空间站空间科学与应用工程实践的一系列理论探索[17,25]。

以20世纪90年代初为“分水岭”，美国开始引领全球航天领域转入降低成本的可持续发展模式，以使用COTS元器件为技术导向，针对空间应用风险机理认知的不确定性，系统性地开展相关工作。我国在载人航天工程空间应用系统中也实施先行探索超过30年，在工程应用逐步成熟的同时，及时启

动相关理论研究、战略导向的体系化基础研究，构建并应用太空探索经济性方面的关键指标之一（元器件使用成本评价指数）。各国相关实践表明，钱学森“可靠性之问”及其应用引导了各发展阶段中太空探索的价值可持续性提升。当然，也需继续应用钱学森学术思想以及具有引领性的理论原理，指导建立价值可持续太空探索中相关理论与工程协同的方法体系。

（三）价值可持续太空探索面临的挑战

1. 地球轨道太空探索层面

全面以COTS元器件空间应用为基线，逐渐形成“宇航级固本、COTS促引领”的潮流，实现降低系统全生命周期成本的目标。然而，由于不可接受风险认知不确定性可能造成任务失利，关键任务或系统的重要部位仍需使用价格昂贵、抗辐射加固的宇航级元器件。以保证宇航级元器件抗辐射能力为前提，持续降低固有成本成为挑战问题之一（问题I）。以保证系统任务成功为前提，进一步提高COTS元器件的使用比例、降低系统的元器件使用成本评价指数，实现持续降低系统全生命周期成本成为挑战问题之二（问题II）。问题I、问题II分别属于图1“三角关系”矛盾中的b边问题、b边和c边问题的综合。

对于空间站应用及其科学发现等重大任务、巨型星座运行及其在轨服务等，需要预防系统性的故障（如欧洲的伽利略导航星座系统崩溃而停止服务[36]），否则应用服务停止的机会成本以及长远影响将高到无法接受的程度。这一底层逻辑同样适用空间科学应用类太空探索任务，即面对潜在重大成果的发现机会，任务系统能够不发生系统性的故障，确保太空探索成果产出能力维持在最大化的状态[37]。在提升任务系统持续产出效益的同时，避免在需要时不发生系统性故障成为挑战问题之三（问题III）。问题III属于图1“三角关系”矛盾中的c边问题。

2. 深空探测太空探索层面

深空探测太空探索[1,2,38,39]趋势明显，相应的价值可持续发展面临挑战。在成本受限、任务目标及环境具有未认知和不确定性的条件下，深空探测任务的探索性和引领性越来越强、任务周期越来越长、系统指标要求越来越高，导致系统可靠性方面的挑战越来越大。为此，系统能保持健康自主运行、避免发生系统性故障、持续支撑探索效益产出，成为挑战问题之四（问题IV）。问题IV属于图1“三角关系”矛盾中a边、b边、c边问题的综合。

太空探索价值可持续的矛盾进一步加剧：鉴于系统指标的先进性、经济可承受方面的综合需求，“不得不用”性能先进的COTS元器件成为必然趋势；探测任务的引领性更是需要系统持续可靠地自主运行[2,25]，以支撑探索效益产出的最大化。在任务层面，“无人区”式目标具有较强的探索性，环境条件因无法提前探测而具有较高的不确定性；对于任务宏观的探索效益引领、系统宏观的健康状态维持而言，相关的风险认知均具有较高的不可预见性。在基础产品层面，在未知环境条件下使用COTS元器件对微观机理的风险认知也具有较高的不可预见性。可见，深空探测的宏观、微观层面风险认知均呈不可预见且不确定的状态，这是根源性的问题；在太空探索价值可持续需求的推动下，相关问题存在放大趋势。从源头、底层两方面着手深化相关理论与工程的协同，在具有未认知、不确定特点的任务目标及环境条件下，立足微观机理认知，提升系统宏观健康状态管理风险应对的精细化水平，使之维持探索能力完好的状态（即可信的自主运行能力），以支撑任务宏观的探索效益产出最大化，这是挑战问题之五（问题V）。问题V属于图1“三角关系”矛盾中a边、b边、c边问题的综合。

3. 相关挑战的根因分析

在学术领域交叉协同方面，钱学森以“两弹一星”工程实践为基础，总结提出了系统工程理论[5,40]、领衔创建了系统科学思想体系[4]。当前，以工程实践为主的系统工程、以理论研究为主的系统学，在工程、理论“两条线”上分别培养了一批杰出的工程师、产出了一批重大成果[41~47]。尽管如此，系统工程、系统学无法如同“两弹一星”模式一样实现工程与理论的协同交织、相互支撑、交替发展，且“两条线”上需求与供给的鸿沟存在加深的态势，这是价值可持续太空探索在地球轨道、深空探测任务上面临挑战的根本原因。

（四）价值可持续太空探索面临挑战的理性应对

价值可持续太空探索的内生矛盾引发了理论和工程层面的挑战，涉及从顶层任务效能到底层基础产品风险、从宏观到微观的宽泛内容。顶层任务效

能事关太空探索效益产出的最大化，在探索需要时系统应保持完好状态；底层基础产品风险关联先进性和降成本导致的潜在风险机理未认知或不确定，需持续追求该状态的最小化。与之相应的理念是“物穷其理、宏微交替”（宏微交替是抽象的理念，在具体应用时“宏”“微”均有相对性），也与一些著名科学家倡导的理念[42]趋同，属于钱学森现代科学技术体系下系统科学中的系统论[4,40]。相关理性应对思路，源自战略导向的体系化基础研究[24]，即从微观到宏观，“自下而上”贯通源头原理、底层机理、全系统中各层级的基础认知，“由近而远”串联全生命周期内覆盖任务规划论证、工程实施、运行探索的一贯性价值需求；进一步从宏观到微观，构建“宏”“微”协同、交替实现价值可持续性的方法体系，由此落实体系化原理，从源头和底层出发解决关键技术问题[24]。

构建TSE方法体系，重在基于钱学森现代科学技术体系的系统科学架构[4,40]，按照“交替”理念协同，从以往工程任务归纳并总结出底层逻辑及规律（见图2）。在工程技术层，融合系统工程要素性质变化发展的理论，提炼出方法体系的共性基础；在技术科学层，融合工程控制论理论原理，提炼解决各种关键问题所需、认知自适应可持续的控制结构；在基础科学层，融合大成智慧学[4]、人工智能（AI）方法原理，提炼出数学物理基础要点。以天宫空间站[48]或星际航行站[49]作为太空探索载体示例，应用领域背景为宜居行星（空间科学国家战略中的五大主题之一）[1]，工程任务构想为星际博望计划，相关任务的特点为：太空探索的目标和环境均存在未认知的情况，宏微两端机理未认知、不确定且具有开放性（对应图1所示的“三角关系”矛盾）；工程任务将无法获得地球上的通信支持[25]，而是在配置AI技术的支持条件下，通过自适应、自组织能力达到寻找宜居行星的目标。综合分析该太空探索载体的任务、系统、环境可见，其本质特性与开放的复杂巨系统[4,50]是一致的，这是构建TSE方法体系的基本依据。

三、价值可持续太空探索系统工程的方法体系

（一）TSE方法体系在工程技术层级的要点

太空探索价值可持续的矛盾，根因是探索性目标诱发宏微两端风险的认知状态多元化。本研究按照“物穷其理、宏微交替”理念，遵循钱学森系统论[40]和创建系统学[4]的学术思想，立足工程实践的归纳和演绎逻辑，对载人航天工程空间应用系统太空探索的方法和经验进行总结、梳理、凝练，

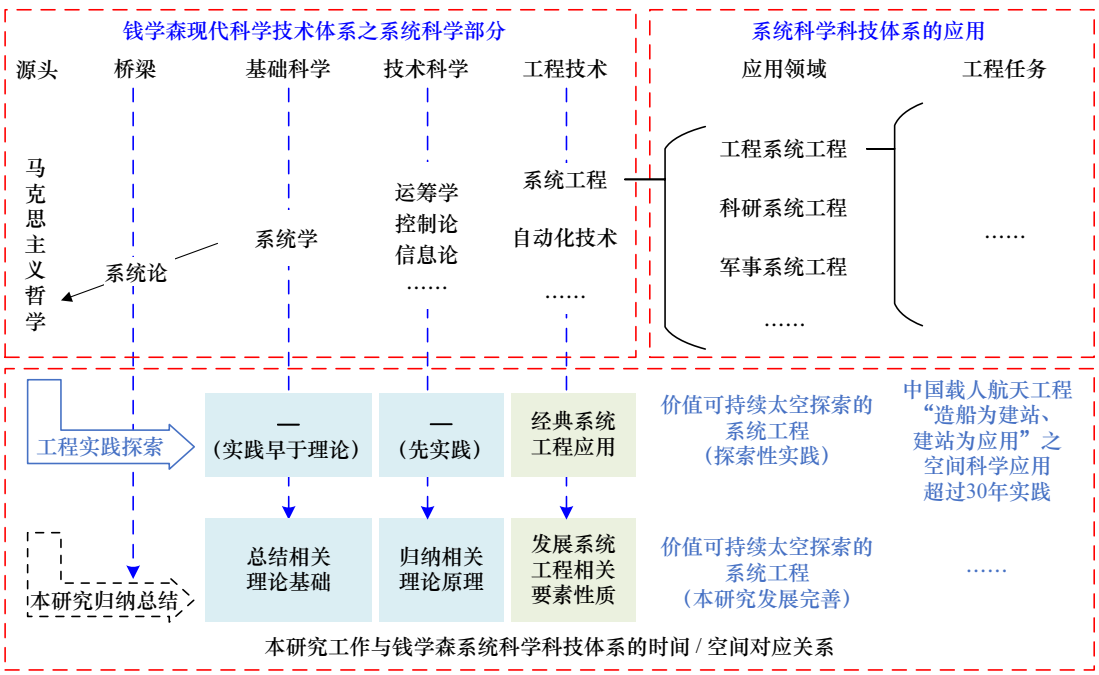


图2　基于钱学森现代科学技术体系提炼构建TSE方法体系的逻辑关系

形成了 TSE 方法体系“数据 – 知识 – 逻辑”框架（“D-K-L 框架”）的认知三维结构（见图 3）。① 知识维（K 维）以价值可持续太空探索的矛盾根因和应用为导向，按全系统各层级进行知识分类，涵盖各种跨专业知识。为了解决任务宏观的认知问题，在传统的系统层级基础上，向上增加任务级跨专业知识，作为宏端；向下依次增加物理机理级知识、物理原理级知识，作为落实“物穷其理”理念、解决关键技术问题的微端。知识的认知状态，分为非已知状态、已知状态两大类以及 6 个独立的认知状态等级：未（认）知（S_{C0}）、非已知不确定的不确定（S_{C1}，又称奈特不确定性[51]）、主观不确定（S_{C2}）；客观不确定（S_{C3}）、已知且确定（S_{C4}）、公理类已知（S_{C5}）。② 逻辑维（L 维）以价值可持续太空探索的矛盾根因和可持续为导向，面对宏微两端风险认知方面的潜在未知，定义全生命周期内推进知识认知状态的步骤。③ 时间维（D 维）是太空探索任务从项目启动到接续推进的全生命过程，可视为持续获得科学研究探索数据、持续产生系统健康状态数据的维度，又称数据维；设计开发阶段、生产试验阶段统称工程实施阶段，运行服务阶段、维护更新阶段统称系统服务阶段。

考虑系统工程目标要素性质的变化，进一步解析 TSE 方法体系“D-K-L”的总体基本原理（见图 4）。图 4 中，左半边代表工程 / 实际，右半边代表理论 / 虚拟，分别表示追求对太空价值的可持续探索、对太空探索的价值可持续；底部的“反馈与交替”，表示运用现代科学理论与实验协同原理，进行知识求真与证伪的发展循环。在认知三维结构的框架下，面向图 1“三角关系”矛盾，以太空探索任务目标与环境宏观认知需求、基础微观机理认知需求、系统宏观健康状态认知需求为牵引，基于发射前既有知识的信任基础、发射后持续增加的已测数据，反馈迭代、持续交替、动态演进；应用 AI 技术驱动工程技术层中的可信自主运行框架（DMAODSE）[25]、技术科学层中的控制原理、基础科学层中的知识求真，持续提升任务及其系统知识的规模以及认知状态的可信程度，实现从定性到定量的综合集成[4,50]，确保太空探索活动的价值可持续。

（二）运用钱学森学术观点协同验证 TSE 方法体系

1. 应用场景下目标实现的底层逻辑分析

在太空探索具体项目（如星际博望计划构想）实施的全生命周期过程中，D 维、K 维、L 维协同作用的目标方向为：动态寻求该项目降低成本、保持可靠、效益最大的最优解。钱学森工程控制论体系中，在论述自寻最优点系统时引入了未认知不确定的特性及其控制原理[6,7,52]；在自行镇定系统、适应环境系统（自适应系统）方面进一步发展了该原理，以在无人参与情况下控制系统可理解如何正确地行动[6,7,52]；在模型参考自适应控制系统中，再次发展了该原理，提出了受控对象参数变化在未认知

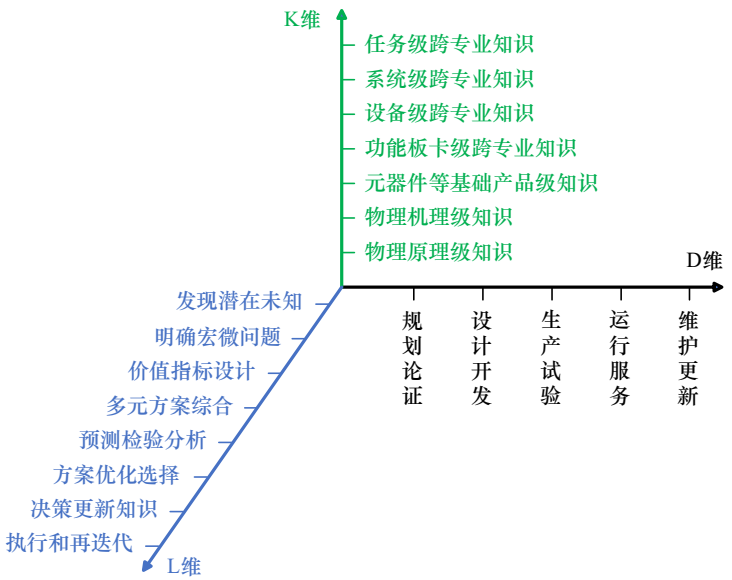


图 3　TSE 方法体系“D-K-L 框架”的认知三维结构

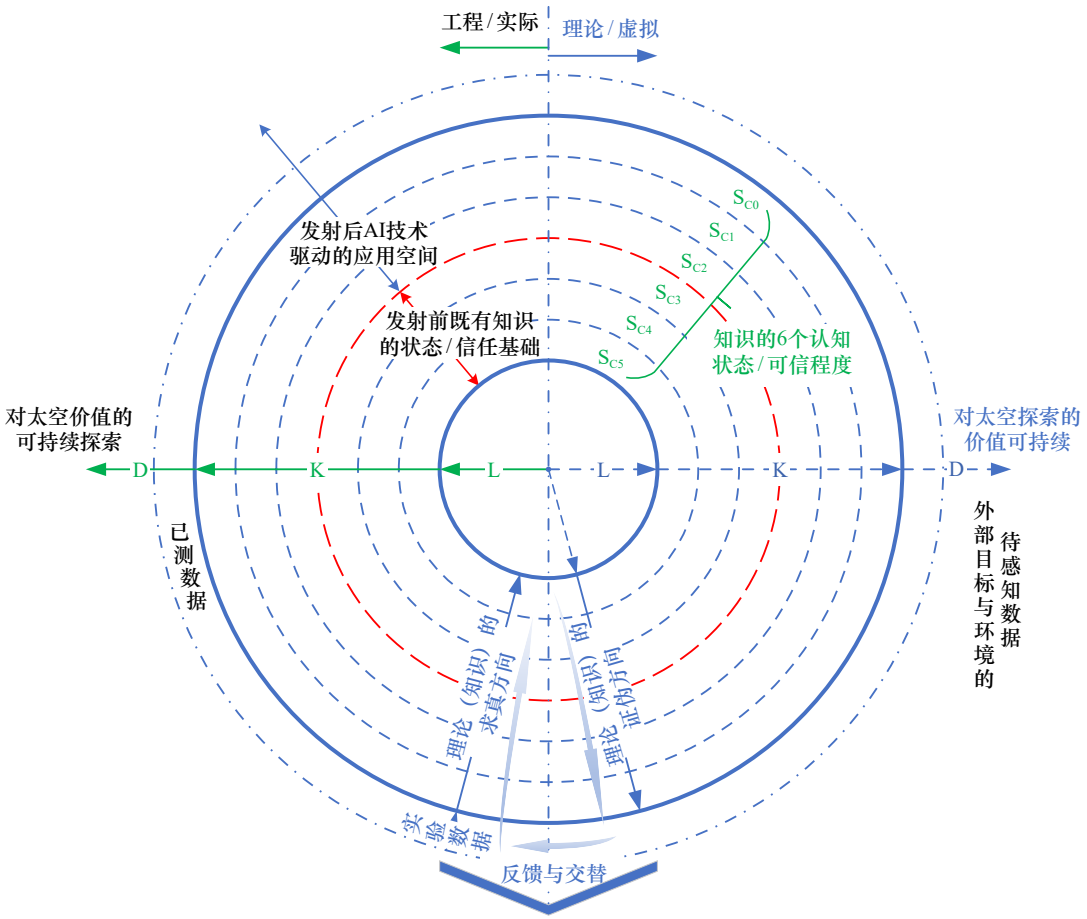


图4　TSE方法体系“D-K-L”的总体基本原理

不确定的情况下，依靠自适应控制器实现系统“正确地行动”的设想[52]。可见，TSE方法体系在目标应用场景下的底层逻辑与工程控制论是协同一致的，属于钱学森阐述的“正确地行动”。

2. 应用场景下自主演进的协同分析

针对太空探索目标和环境具有非已知状态的特点，已有研究构建了以DMAODSE为框架、太空探索自主运行可信性的技术体系，提出了智能动态演进的初步机制[25]。相关内容是TSE方法体系“D-K-L框架”在工程技术方面的基础。TSE方法体系“D-K-L框架”在应用场景下发挥的作用有：对于太空探索系统的设计开发和生产试验阶段，在因降低成本需求而引入的可靠性风险处于非已知状态、系统服务阶段面对目标和环境具有非已知状态时，能够持续对非已知状态进行认知自适应，获得可信程度较高的知识维护更新系统，提升系统应对非已知状态的能力，进而维持系统的可靠运行和健康探索，保持探索产出效益最大化的状态。如此，针对外在的宏观目标与环境及其动态变化，系统能够自组织自适应，进而内化外部影响的持续演进，促进保持稳定可靠的固有特性，称为韧性。以属于宜居行星主题的星际博望计划构想为例（见图5），在方案阶段、初样阶段、正样阶段，系统相关数据（如各阶段的试验数据、质量问题归零数据等）随着工程研制的推进而持续积累，相关知识认知状态的可信程度持续提升、知识规模持续增加，使工程风险逐步“见底”；在系统服务阶段，AI技术驱动并协同TSE方法体系理念应用至星际航行任务，有效应对外部目标与环境的非已知状态，持续获取解决图1“三角关系”矛盾所需的知识，系统内部知识的认知状态可信度持续提升，系统风险“见底”的非已知范围逐步缩小，由此赋予系统以韧性，支持实施寻找人类宜居行星的任务目标。

韧性是系统保持“正确地行动”能力的表现，可促进实现太空探索价值可持续。TSE方法体系下系统具备韧性指，太空探索系统在受到内外部干扰

的条件下对干扰中的非已知状态进行处理，使系统健康运行依赖的知识持续保持在已知状态范围内（即信任基础），且系统继续稳定、可靠地运行。相应的韧性能力构建原理如图6所示。K维的系统宏观层以及“内部与外部分界线”，示意开放复杂巨系统与环境的界线。预测目标场景与外部环境条件可知，随着系统研制进程的推进，利用设计分析（对应图6中V模型的左半侧）、测试验证（对应图6中V模型的右半侧）、质量归零（对应图6中成对箭头虚曲线）等活动产生的数据，逐步提升系统认知

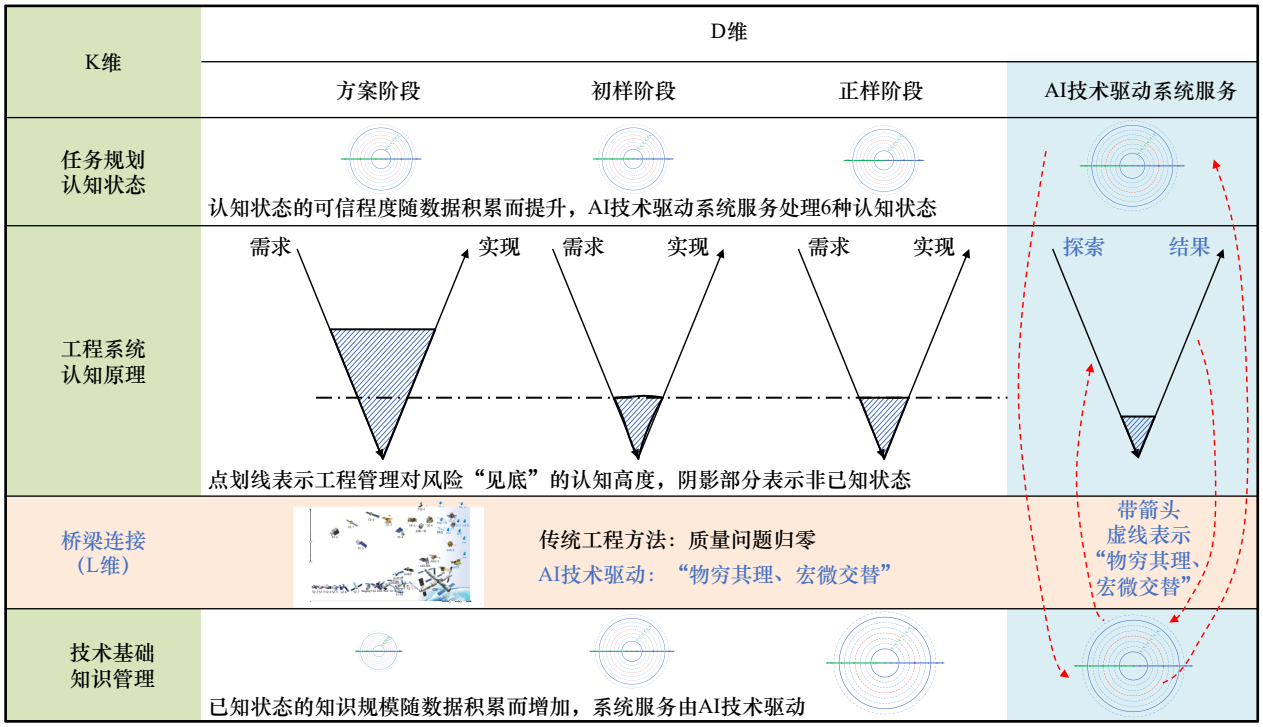
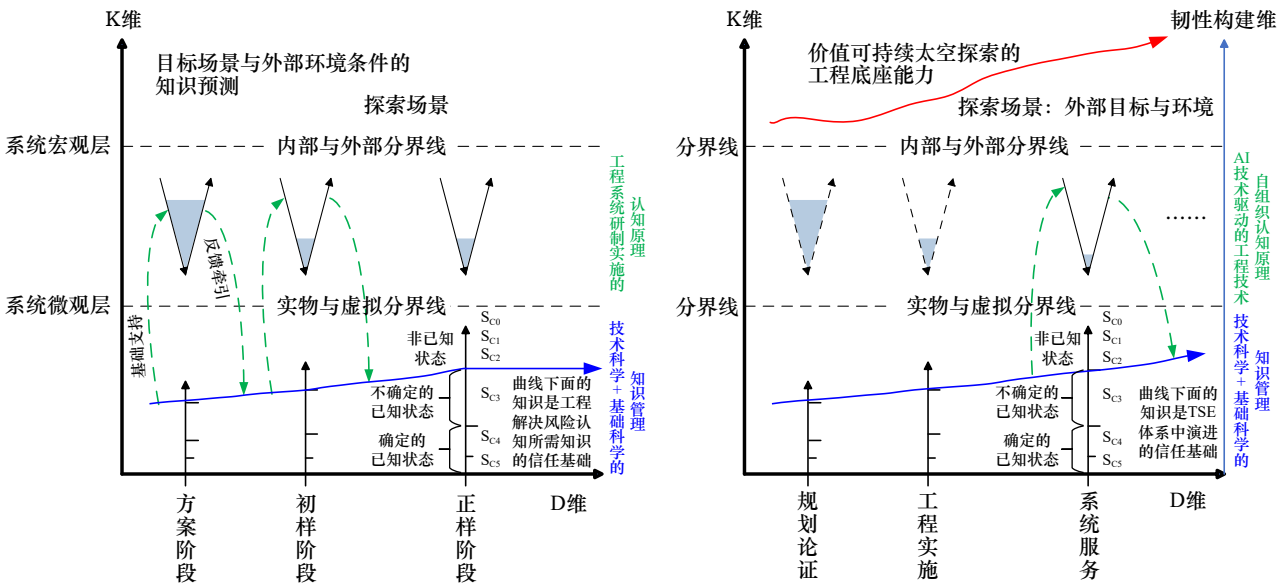


图5　TSE方法体系“D-K-L框架”的应用场景下协同分析（以星际博望计划构想为例）



(a) 传统的航天任务各阶段知识管理与提升原理　　(b) TSE方法体系下系统韧性构建原理

图6　太空探索系统的韧性能力构建原理：传统方式与TSE方法体系“D-K-L框架”

所需的技术科学和基础科学知识（如图6（a）中系统微观层以及“实物与虚拟分界线”下方的曲直线所示）；在正样阶段之后，系统自身的知识状态维持不变，即系统中软/硬件的技术状态固化（对应图6（a）中底部曲直线末尾段的直线部分），系统的固有可靠性保持不变。另外，图6（b）中增加了韧性构建维，“实物与虚拟分界线”下方的曲直线末尾段由直线变为继续提升的曲线，表示系统在服务阶段仍然在提升已知状态的知识规模，以支撑工程底座能力曲线的持续上扬。

工程底座能力的持续提升是系统发展的重要目标、太空探索产出效益最大化的韧性能力基础。在TSE方法体系“D-K-L框架”的认知三维结构机制的作用下，系统韧性构建原理描述如下。① 太空探索任务系统的运行处于“如履薄冰、如临深渊”状态，利用“宏微交替、物穷其理”理念和TSE方法体系“D-K-L框架”的认知三维结构，注重与AI技术的协同运用，形成“技术科学+基础科学”的知识管理能力，由此持续增加系统的信任基础知识，扩大“信任基础”。② 更新系统处理下次非已知状态的能力，以“信任基础”知识提升为依托，与“AI技术驱动的工程技术自组织认知原理”相应的系统状态数据融合，发挥理论虚拟与工程实物的协同作用（虚实结合）。理论虚拟计算追求高置信度，以减少误判导致的系统停止工作时长，即在系统虚实结合机制下，理论提前预测的可靠性与实物演变结果之间的误差动态趋于零[25]。

在经典控制理论中，系统控制的首要目标是保持稳定性[52]，克服各种不利因素的影响，确保精准响应控制指令[53]，这与本研究对系统韧性的界定是一致的。钱学森将自适应系统底层逻辑类比为一切生物面对正常或恶劣条件都能生存的适应性机能[6,7,52]，如正常人的神经系统不仅能无故障运行，还具备思维能力提升与可靠性增强的特点。当前兴起的具身智能研究[54]也印证了这种能力的应用价值与可实现性。整体上，TSE方法体系在应用场景下自主演进的特征，与钱学森工程控制论中的基本原理及底层逻辑是协同一致的。

（三）TSE方法体系在技术科学层级的要点

1.“D-K-L框架”控制原理结构

自适应系统“正确地行动”，被钱学森定义为“接连的尝试性的变化着适应”[6,7,53]。载人航天工程空间应用系统提出了各次型号空间科学任务“正确地行动”的指导原则：如履薄冰、如临深渊，做好科学与工程的桥梁，牢靠地引领空间科学与应用持续全面发展。这与钱学森的定义具有本质上的趋同性。相应地，TSE方法体系在自适应控制原理下的目标要点为：系统在开放的目标和环境中，能够安全、持续的反馈和控制，对开放目标及环境与系统耦合的认知自适应可持续，持续提升韧性工程底座能力，使系统保持充分的运行稳定和可靠，维持甚至提升经典可靠性范式下系统的固有可靠性。

进一步，在模型参考自适应控制[52,55~58]的基础上，协同AI技术应用原理，构建了TSE方法体系“D-K-L框架”三重嵌套自适应控制原理结构（见图7）。① D控制环路的太空探索实物物理系统，外部干扰类型分为非已知状态、已知状态。实物物理系统被控对象P_D的输入是以追求探索产出效益最大化为导向的任务规划与调度，或者以保证探索系统

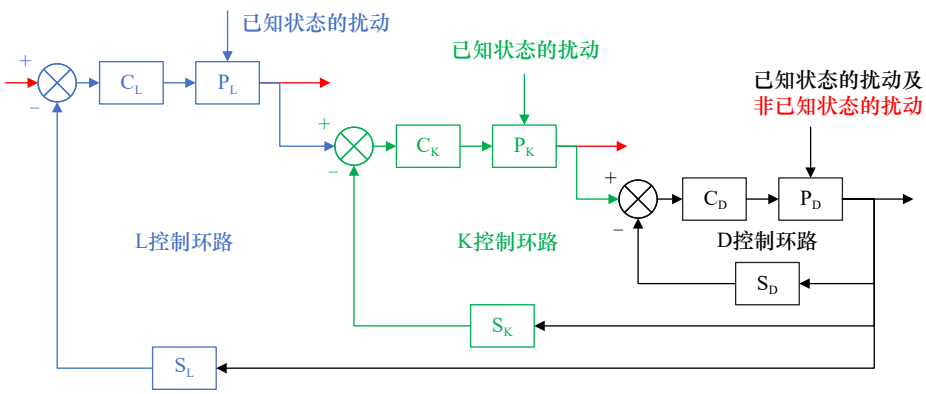


图7　TSE方法体系“D-K-L框架”三重嵌套自适应控制原理结构

注：C表示控制器；P表示被控对象；S表示P的数据反馈环节。

安全、健康可持续为导向的风险处理与恢复，P_D的输出是探索结果的数据、图像或信号，健康管理数据与状态信息等数据。控制量及控制策略C_D指探索结果可信指数及任务规划调度优化策略，或者健康状态风险指数及风险处理恢复优化策略，也是在太空探索任务中应用AI4E（AI for Engineering）技术协同DMAODSE[25]可信自主运行的基本原则。② K控制环路的太空探索数字伴飞系统，外部干扰类型假设仅含已知状态。数字伴飞系统被控对象P_K的输入是影响追求探索价值最大化或保证探索安全可持续的非已知状态（S_{C0}、S_{C1}、S_{C2}）的解释或机理建模需求，P_K的输出是对当下非已知状态的解释知识或物理数学模型（即新的知识）。控制量及控制策略C_K指预测与实际的符合性以及在追求探索产出效益最大化、保证探索系统安全健康可持续双重约束下的置信优化策略。③ L控制环路的太空探索智慧逻辑系统，外部干扰类型假设仅包含已知状态。智慧逻辑系统被控对象P_L的输入是影响非已知状态（S_{C0}、S_{C1}、S_{C2}）解释知识或者物理数学模型的符合性、置信度的最大包络基本原则（如近似公理体系[59]、紧性[59]）以及确定性规律[60]、已知函数等，P_L的输出指符合性和置信度优化提升的基本原则（即新的逻辑）。控制量及控制策略C_L指在追求探索产出效益最大化、保证探索系统安全健康可持续双重约束下的实际符合性与认知状态调整优化策略（如逼近论[60]作用机制），也是应用AI4S（AI for Science）技术的指导原则。

2. TSE控制原理与DMAODSE框架的关系

TSE方法体系是较DMAODSE框架[25]更为本质化的概括，DMAODSE框架可视为TSE方法体系在工程技术层面的降级应用。TSE方法体系“D-K-L框架”三重嵌套自适应控制原理与DMAODSE框架的协同关系可表述如下。① TSE、DMAODSE的控制结构中都包含针对开放复杂巨系统的自适应控制器，但DMAODSE对AI4E的需求更多（如多胞胎感应原理运用、非自治数学方程与物理模型融合、监测数据及经验知识驱动[25]），且TSE对AI4S存在更迫切的需求（如微观非已知情况的发现和认知）。② TSE、DMAODSE均为解决太空探索目标和环境存在未认知、不确定的情况（即宏观非已知情况）而提出，但TSE还需解决微观非已知情况。③ TSE纳入系统全生命周期各阶段降低成本可持续的知识迭代，而DMAODSE侧重考虑系统运行服务和维护更新阶段的知识迭代。④ TSE是在钱学森系统工程和创建系统学科技思想指导下提出的大尺度、跨时空，“端到端、互宏微”，适用于价值可持续太空探索的系统工程方法体系，而DMAODSE是中尺度、跨时空，“端到端、互宏微”，具有系统自主运行可信及泛在性的技术框架。

（四）TSE方法体系在基础科学层级的要点

钱学森指出，生物不可能预先假定周围的情况[6,7.52]，解决思路是更接近生物适应机能的系统结构原理[6,7,52]，关键是弄清机理；对于个别细节和难点，主要通过实验来检验[61,62]；物质及其表现形式一定是可认识的，可借用仿生学等演绎发展[52]；研究控制理论的最终目的是学会设计系统[53]，实现全面的智能自主运行。这也是TSE方法体系的终极目标。为此，本研究从底层逻辑出发，将“数据–模型–知识”[25]改进为“D-K-L框架”，符合认知底层规律，即从定性的现象出发获得客观数据，结合逻辑思考产生知识（即现象背后的规律），继续结合数据或逻辑而使知识更加准确可信或可用于推理预测。上述过程符合“从定性到定量综合集成法”[4]的本质，“D-K-L框架”可视为将大成智慧学[4]运用在以价值可持续太空探索为代表的开放复杂巨系统的尝试。在“TSE方法体系的终极目标”描述中，“更接近生物适应机能的系统结构原理”中的“更接近”依赖L协同逼近论[60]实现，“系统结构原理”即指K；“弄清机理”依赖L实现“弄清”，“机理”即指K；“实验来检验”依赖D实现；“演绎发展”“学会设计系统”指应用TSE方法体系“D-K-L框架”后不同程度的涌现效果。

1. 韧性能力的数学表示及相关基本假设

“D-K-L框架”是TSE方法体系的核心基础，也是TSE融合AI4E、AI4S等智能工具，保持效益产出最大化的理论依托。TSE控制原理中，反馈及其机制的技术本质是可靠性，即“宏微交替”中“交替”的驱动力。可靠性是与故障处理紧密关联的一门学科[63,64]，结合DMAODSE框架[25]对可靠性概念进行延展后可将可靠性定义修订为：开放的复杂巨系统（如宜居行星深空探测器）在可已知、存在非已知等条件下，功能持续保持效益产出最大化（即太空探索价值可持续）的能力。在TSE方法体系

“D-K-L 框架”下，经典可靠性范式下的固有可靠性[63]将保持不变或提升。在 TSE 方法体系“D-K-L 框架”三重嵌套自适应控制原理结构中，涉及 4 个数学物理基本假设。

假设 1：仅考虑 K 环路（P_K 过程）、L 环路（P_L 过程）的干扰类型为已知状态，而 D 环路（P_D 过程）的干扰类型为已知状态或非已知状态。

假设 2：P_D 过程是可控的，P_D 的输出结果（如数据、图像、信号）是可信的。

假设 3：在某时刻，各过程调用如图 4 所示知识的认知状态可信程度依次为 L 环路（P_L 过程）不低于 K 环路（P_K 过程）、均不低于 D 环路（P_D 过程）。

假设 4：系统在 P_D、P_K、P_L 过程分别产生的新 D、新 K、新 L，均符合自然规律。

2. 基础科学要点的协同

以新 K、新 L 的产生为例，阐述 TSE 方法体系“D-K-L 框架”基础科学要点的协同机制。新 K 的产生原理如图 7 中的 K 环所示，基于 P_D 过程产生的新 D 及其特征描述并运用数据分析、统计分析等方法，获得新现象、新数据的规律以及这些现象和已知观测数据的相关性，进而确定关联规律，如周期性规律、单调性规律、指数规律、拟周期规律（统称确定性规律）；根据确定性规律，应用已知的数学函数并将已有的物理规则框架作为参考值，建立新现象和相关变量之间的动力学机制；基于数值逼近和最优化原则构造控制器 C_K，确定新的关联函数，由此产生新的动力学方程，即得到新 K。

新 L 的产生原理如图 7 中 L 环所示，在某时刻，若反馈与参考值的偏差大于阈值，新现象将无法由现有的物理模型描述；新现象处于未认知或奈特不确定状态，需要建立新的物理模型、公理化体系来作为描述依据或基础支撑；利用新 D 的各阶微分和变量相关性分析技术，结合既有公理来构建新的公理化体系的过程，即为构造控制器 C_L，进一步获得新的关联变量并随之更新参考值；再次通过 C_K 的变量相关性、似然估计、最优化等方法建立新的物理方程，分析新方程和新系统的稳定性、紧致性、收敛性并据此优化系统，得到的新物理方程即为更新后的公理化体系（新 L）。

本研究针对太空探索宏端和微端存在的多元化认知以及随时间持续存在的状态，以“D-K-L 框架”的认知三维结构、总体基本原理、三重嵌套自适应控制原理结构为核心，在基础科学、技术科学、工程技术层级上建立了 TSE 方法体系，属于新时期航天强国战略需求牵引下，基于钱学森系统论，对以载人航天工程空间科学与应用任务超过 30 年成功经验为代表的太空探索活动的客观总结与理性提升。

四、价值可持续太空探索系统工程方法体系的实践案例

（一）载人航天工程空间应用系统案例

1. 工程任务实践的背景

空间应用系统涉及利用神舟飞船、目标飞行器、天宫空间站、天舟货运飞船等平台开展空间科学与应用工作以及建造空间站实验柜平台等工作，相关任务具有引领性，因而太空探索活动面对的科学目标、应用目标为非已知状态。为应对先进性需求，“不得不用”低成本且可靠性风险存疑的 COTS 元器件，属于典型的宏观和微观存在非已知状态、追求科学产出效益最大化的任务。这一情况符合宏观科学探索未认知、应用实验非已知、微观机理存在未认知或奈特不确定性[51]的状态，可归入图 1“三角关系”矛盾范围。

2. 工程任务实施的过程

工程任务在地面的实施过程包括确定工程决策理念、开展工程实施管理、进行产品验证确认。通过提升知识认知状态的可信程度或产生新 K，持续增强系统的韧性，验证了图 6 中的基本原理，确保空间科学与应用成果产出最大化、可降低成本以及价值可持续。① 在工程决策理念确定过程中，系统“自上向下”接受任务存在全生命周期认知状态多样化的状态，在工作中融合认知状态存在多样化的理念；相比传统的航天工程模式，这是决策理念的新逻辑，也是 TSE 方法体系中关于新 L 应用的验证。② 在工程实施管理过程中，系统生命周期全面责任体系主动且持续地发现潜在未知，打破僵化、刚性执行型号任务标准规范以及继承既有工程经验的观念藩篱；验证了按照图 3 中 L 维驱动持续产生新 K（即标准规范或工程经验暂未覆盖的内容），依据研制进度安排提升系统全生命周期认知状态的可信程度，重点突破某型 COTS 元器件首次空间应用可靠性风险关键单点认知状态的可信程度。③ 在

产品验证确认过程中，利用系统各层级全生命周期中的集成测试、摸底实验、例行试验等产生的数据，协同既有物理机理级或原理级知识，验证了按图4、图7反馈迭代提升基础产品级及以上相关知识认知状态的可信程度，产生了新K（如某型COTS元器件首次空间应用的抗辐射能力阈值及其系统防护设计的跨专业协同知识）并获得确认和迭代；利用在轨软件可上注更新的上行资源，在任务宏观未认知或奈特不确定状态时持续产生了新K，并经确认后更新在轨软件。

3. 工程应用结果与发展

空间应用系统研究团队以K为目标，相关知识的呈现方式包括系统级标准规范和技术文件、“传帮带”工程经验。坚持工作组织确定的底层L不变（空间应用系统“自上向下”的工程治理与决策理念），根据型号任务全生命周期工程实施的测试试验D，持续开展由科学目标牵引、以技术先进性为导向的低成本太空探索的优化活动[14~16,18]。在每次型号任务成功的基础上进行迭代，更新系统级标准规范和技术文件（即更新K），持续提升空间应用系统总体应对微观非已知状态的能力，增强应对在轨运行服务阶段宏微非已知（如科学实验探索）的韧性，支持形成高质量的科学研究与应用成果。对于典型综合电子设备，项目的元器件使用成本评价指数从80%降至不超过30%，在轨平均异常间隔周期提高了一个数量级。载人航天工程各型号任务空间科学与应用太空探索的连续成功，充分验证并持续更新了该工作组织的L。

在顺利完成工程任务的基础上，进一步开展了TSE方法体系的应用深化工作。以认知状态S_{C3}、S_{C4}、S_{C5}的L为基础，面向太空探索工程实施阶段需求，发展了供给侧网络韧性运行评价与优化方法[65~67]、微观非已知知识的生成[68,69]和已知知识AI4E精细化管理[70]、以元器件为代表的基础产品使用规模化/数字化/智慧化应用系统[19]；面向系统服务阶段需求，开展了空间站科学研究与应用任务的规划与资源优化[71~73]、任务分布式调度与优化[74~76]；开发了AI4E价值可持续太空探索基础性支撑产品，如太空探索元器件选用智能工具[77,78]、知识图谱技术应用工具[70]。结合上述工程实践，综合验证了TSE方法体系的正确性与工程价值以及数字伴飞技术路线[25]的可行性。

4. 实践启示

空间应用系统开展空间科学与应用任务，目标效益是预先确定的，但在轨科学发现的具体内容、在轨应用探测的具体边界均是非已知的，说明任务宏观层中具有确定性非已知的状态。与传统的航天业务和目标都是确定性已知状态的模式相比，空间应用系统的定位与使命本质上具有一定的开放性和引领性。太空探索发展模式由使命驱动形成，自然可由刚性转为柔性，也就体现在日常管理中可不完全按照传统型号标准规范（即K）执行；但作为K层基础的L必须是刚性的（即文中假设3、案例中工程治理与决策理念），否则工程管理的控制环路不够稳定，可能影响科学应用成果的产出。在L刚性的基础上，K的状态是结合D反馈下的柔性，可按“一事一议”原则分析具体数据与机理的关系，交替迭代提升认知后再作决策，由此形成动态更新的标准规范体系（即K），增加以价值导向、逻辑内容为主的标准规范体系，协同K相关的创新（即有人参与的认知自适应可持续）。

在“无人区”式的深空探测太空探索活动（如星际博望计划构想）中，任务宏观层由传统的航天确定性已知状态、空间应用系统确定性非已知状态增强为非已知状态下的非已知。在即将进入通用AI时代的当下，依据TSE方法体系、本案例发展探索相关的基础验证[65~78]，可以发现无人参与的认知自适应可持续是可行的（即星际博望计划构想中实施宜居行星探测目标是短期可实现的）。

（二）面向相关问题的TSE应用实践

1. 机理方面的非已知类问题相关应用案例

问题I、问题II及其机理非已知范围扩增的本质是，COTS元器件太空应用微观机理非已知，更多使用COTS元器件后系统结构的宏观机理非已知。TSE方法体系应用实践重在从元器件质量管理“五统一”[79]模式的统一试验项目要求（即K不变的刚性模式），转为L不变并通过质量技术风险管控L驱动“D-K”迭代产生新K。例如，根据相关COTS元器件的空间辐射效应可靠性评估试验数据（D），重新制定使用该COTS的系统设计措施（K），以实现系统可靠[16,18,80]。

2. 建立韧性并自适应演进类问题相关应用案例

问题III、问题IV、问题V及其面临非已知干扰

而系统自适应演进的本质是，宏微两端风险引发的系统结构变化或重构的宏观机理及其应对措施非已知。TSE方法体系应用实践重在提升系统的健康监测、异常和故障预警能力、异常和故障诊断 / 预测 / 恢复管理等，开展全生命周期内精细化机理认知相关的基础性工作，如面向月球相关探索卫星星座开展工程验证的DMAODSE框架[25]；融合健康指数、多源不确定性，完成精细化健康状态管理研究[81]，支撑系统韧性能力的持续提升并保持系统的自主运行[82]。

3. 实践启示

问题I~V属于新时期太空探索活动遇到的关键共性和基础性难题，在刚性、半刚性发展模式下即将面临的难题，面向未来任务需要提前策划解决的难题。问题I、问题II分别具有微观确定性的非已知但可已知状态、宏观确定性的非已知但可已知状态等属性，在底层逻辑上与空间应用系统是一致的，通过微观基础机理研究、宏观系统机理研究可以得到解决。问题III具有系统的复杂性内生不确定的特点，处于宏观确定性的非已知且不确定状态，解决的技术路线为内部精细化高置信的健康状态管理，即研究复杂网络模型及其故障传播机制[25]，以应对复杂性风险的崩塌情况；这与预防系统紊乱的“钱学森猜想”[4,40]是相通的，已开展了相关案例的实质性探索。问题IV具有在未认知且不确定的环境条件下基础产品机理内生不确定性的特点，处于微观确定性非已知且不确定状态，解决的技术路线为AI技术驱动的可靠性导向白盒模型[25]、复杂网络模型及其故障传播机制[25]，已开展了相关案例的实质性探索。问题V关联于面向未来任务的前瞻部署，在目标、环境、系统三方面非已知状态的协同下，属性的底层逻辑进一步增强为非已知状态下的非已知；以“微分化取证、积分化求解”为解决原则，通过微分和积分原则进行宏微交替，将空间应用系统的刚性L在源头已知状态下柔性化，充分利用既有的确定性非已知状态结果，集成破解和反馈交替[83]。

（三）TSE方法体系是系统科学创建过程中的垂直探索案例

TSE方法体系是系统科学以重大应用为牵引，在太空探索垂直领域的应用落地，相关的总体架构、内容要点等与钱学森现代科学技术体系[4,40]存在对应关系。① 在钱学森以开放的复杂巨系统理论为代表的创建系统学[4]基础上，纳入“D-K-L”总体基本原理、“R-Δ 问题”[25]导向原理、系统韧性能力构建协同AI技术应用原理及其数学物理基础要点，作为TSE方法体系的基础科学层级要点。② 构建“D-K-L”三重嵌套自适应控制原理结构，据此改进可靠性定义并作为控制反馈的技术本质，形成TSE方法体系的技术科学层级要点和融合AI技术的底层逻辑。③ TSE方法体系“D-K-L框架”的认知三维结构、AI技术驱动的DMAODSE框架[25]、系统韧性能力构建技术，共同作为TSE方法体系的工程技术层级要点。在实践案例中，将该垂直探索进一步应用至以月球相关探索为代表的深空探测任务，基于天地测控独立的决策环路条件，在天基执行前中断、进行天地决策比对、再执行非实时策略，开展可信自主运行DMAODSE框架下AI4E应用的技术实验。在星座载荷健康状态管理中[25]，以DRO-G-DMAODSEmin软件配置项为载体，完成相关工程验证与在轨搭载。

五、结语

齐奥尔科夫斯基提出“地球是人类的摇篮，但是人类不能永远停留在摇篮里”，这是人类星际移民的共同梦想。面对浩瀚宇宙，太空探索需要积极应对目标与环境的未认知、非已知不确定的不确定等非已知状态以及对系统带来的宏微两端机理非已知状态，在认知自适应可持续的基础上，平视已认知和未认知状态，逐梦星辰大海。本文在中国载人航天工程相关工程实践基础上，重在归纳和总结底层规律，针对太空探索宏观、微观及其时空演化持续存在认知多元化的情况，以“物穷其理、宏微交替”协同大成智慧学为理念，提出了基础科学要点、技术科学要点、工程技术要点体系化协同架构，为中国空间站可持续发展运营、空间科学国家战略宜居行星探测等价值可持续太空探索提供了系统工程方法体系的理论参照。

“D-K-L”三重嵌套控制原理结构、“D-K-L”总体基本原理，是对钱学森工程控制论所述“至于是否还存在其他的更接近于生物的适应机能的系统结构原理，我们就暂不考虑了”[52]、经典系统工程

要素发展所需理论原理、创建系统学传承的进一步探索。面向未来，还可从两方面继续发展TSE方法体系。① 交替应用本研究理论，再反哺发展TSE方法体系；以TSE方法体系的持续应用为检验，持续反馈迭代，协同使用AI技术，为创建系统学贡献新的理论成果；将TSE方法体系探索应用至解决预防系统紊乱的“钱学森猜想”[4,40]。② 深入发展本研究理论，持续完善TSE方法体系，在“D-K-L”三重嵌套控制原理结构中开展K环路、L环路考虑非已知干扰引发的智能体信源可靠性研究；在“D-K-L框架”下，开展太空探索背景下多智能体之间数据与知识的交换协议标准研究。

致敬

中国载人航天工程及其空间应用系统集体和工程科学家团队32年的系统工程实践，*Engineering Cybernetics*（钱学森著）出版70年，钱学森归国70周年。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 18, 2025; **Revised date:** May 21, 2025

Corresponding author: Ren Yi is a research fellow from the School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University. His major research fields include reliability systems engineering and digital twin. E-mail: renyi@buaa.edu.cn

Funding project: National Key R&D Program of China (2022YFF0610100); National Natural Science Fund Project (12090010, 12090014, 12031020); China Manned Space Project of National Science and Technology Major Project

参考文献

[1] 中国科学院, 国家航天局, 中国载人航天工程办公室. 国家空间科学中长期发展规划(2024—2050年) [EB/OL]. (2024-10-15)[2025-04-15]. https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c10616360/content.html.
Chinese Academy of Sciences, China National Space Administration, China Manned Space Engineering Office. National mid and long-term development program for space science (2024—2050) [EB/OL]. (2024-10-15)[2025-04-15]. https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c10616360/content.html.

[2] National Aeronautics and Space Administration. NASA’s lunar exploration program overview (NP-2020-05-2853-HQ) [R]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 2020.

[3] European Space Agency. ESA strategy 2040 [EB/OL]. (2025-03-27) [2025-04-15]. https://www.esa.int/About_Us/ESA_Strategy_2040.

[4] 钱学森. 创建系统学(新世纪版) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
Qian X S. Creating systematology (new century edition) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2007.

[5] 钱学森, 许国志, 王寿云. 组织管理的技术——系统工程 [N]. 文汇报, 1978-09-27(01).
Qian X S, Xu G Z, Wang S Y. Systems engineering: A technology for organization and management [N]. Wenhui Daily, 1978-09-27(01).

[6] Tsien H S. Engineering cybernetics [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1954.

[7] 钱学森. 工程控制论(新世纪版) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
Qian X S. Engineering cybernetics (new century edition) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2007.

[8] Cooper M C. Commercial parts technology qualification processes [R]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2013.

[9] Hodson R F, Chen Y, Pandolf J E, et al. Recommendations on use of commercial-off-the-shelf (COTS) electrical, electronic, and electromechanical (EEE) parts for NASA missions [R]. Hampton: NASA Langley Research Center, 2020.

[10] Guidelines for the utilization of COTS components and modules in ESA [R]. Noordwijk: ESA ESTEC, 2024.

[11] 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.
Gu Y D. Thoughts on space science development [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(8): 1031–1049.

[12] 周建平, 吴季. 统筹空间科学、空间技术、空间应用协调发展的思考 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 59–66.
Zhou J P, Wu J. Coordinated development of space science, space technology, and space application in China [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 59–66.

[13] 中国载人航天工程办公室. 中国载人航天 系统组成 空间应用系统 [EB/OL]. (2025-03-04)[2025-04-15]. https://www.cmse.gov.cn/gygc/xtzc/kjyyxt/.
China Manned Space Engineering Office. Space utilization system of China manned space [EB/OL]. (2025-03-04)[2025-04-15]. https://www.cmse.gov.cn/gygc/xtzc/kjyyxt/.

[14] 党炜. COTS应用于空间辐射环境的可靠性研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(硕士学位论文), 2007.
Dang W. Reliability study on COTS used in space radiation environment [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Master’s thesis), 2007.

[15] 党炜, 孙惠中, 李瑞莹, 等. COTS器件空间应用的可靠性保证技术研究 [J]. 电子学报, 2009, 37(11): 2589–2594.
Dang W, Sun H Z, Li R Y, et al. Research on reliability assurance of COTS components in space application [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(11): 2589–2594.

[16] Dang W, Zhang W, Qi M, et al. Reliability assurance framework for COTS components used in space scientific payloads [R]. Beijing: The 64th International Astronautical Congress, 2013.

[17] Zhang W, Dang W, Ao L, et al. A theoretical framework of COTS components space application based on “risk information entropy” [R]. Guangzhou: 2022 4th International Conference on System Reliability and Safety Engineering, 2022.

[18] 邹田骥, 李鹏, 李丹, 等. COTS器件空间应用可靠性保证体系实践 [J]. 中国质量, 2018 (8): 83–88.
Zou T J, Li P, Li D, et al. Practice of COTS device space application reliability assurance system [J]. China Quality, 2018 (8): 83–88.

[19] 谭一泓. “元器件使用可靠性智慧化解决方案”发布 国产元器件选用效率大幅提升 [J]. 高科技与产业化, 2019, 25(2): 56–57.

Tan Y H. “Intelligent solutions for reliable components” released, domestic components’ selecting efficiency achieved significant improvement [J]. High-Technology & Commercialization, 2019, 25(2): 56–57.

[20] 顾逸东, 吴季, 陈虎, 等. 中国空间探测领域40年发展 [J]. 空间科学学报, 2021, 41(1): 10–21.
Gu Y D, Wu J, Chen H, et al. Review of the 40-year development of China’s space exploration [J]. Chinese Journal of Space Science, 2021, 41(1): 10–21.

[21] 王赤. 空间科学突破的前瞻和中国的贡献 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(8): 1050–1065.
Wang C. Prospects of global space science breakthroughs and China’s contributions [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(8): 1050–1065.

[22] 吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华, 等. 中国探月工程 [J]. 深空探测学报, 2019, 6(5): 405–416.
Wu W R, Liu J Z, Tang Y H, et al. China lunar exploration program [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(5): 405–416.

[23] 张荣桥, 耿言, 孙泽洲, 等. 天问一号任务的技术创新 [J]. 航空学报, 2022, 43(3): 626689.
Zhang R Q, Geng Y, Sun Z Z, et al. Technical innovations of the Tianwen-1 mission [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(3): 626689.

[24] 习近平. 加强基础研究 实现高水平科技自立自强 [J]. 求是, 2023 (15): 4–9.
Xi J P. Strengthening basic research and achieving greater self-reliance and strength in science and technology [J]. Qiu Shi, 2023 (15): 4–9.

[25] 党炜, 骆军委, 郑作环, 等. 深空探测自主运行的一种可信性技术体系 [J]. 空间科学学报, 2024, 44(2): 228–240.
Dang W, Luo J W, Zheng Z H, et al. Dependability technology system for autonomous operation of deep space exploration [J]. Chinese Journal of Space Science, 2024, 44(2): 228–240.

[26] 刘昱东. “两弹一星”工程管理创新研究 [D]. 长沙: 国防科技大学(博士学位论文), 2013.
Liu Y D. Research on management innovation of “nuclear bomb, guided missile and manmade satellite” project [D]. Changsha: National University of Defense Technology (Doctoral dissertation), 2013.

[27] 白照广, 边凤梅, 孙纪文, 等. 卫星低成本策略与实践研究 [J]. 先进小卫星技术(中英文), 2024 (2): 1–18.
Bai Z G, Bian F M, Sun J W, et al. Research on low-cost strategy and practice of satellite [J]. Advanced Small Satellite Technology, 2024 (2): 1–18.

[28] 黄兆东, 谢宜, 刘振云, 等. 航空装备经济性工程思考 [J]. 航空财会, 2022, 4(5): 11–16.
Huang Z D, Xie Y, Liu Z Y, et al. Thoughts on economic engineering of aviation equipment [J]. Aeronautical Finance and Accounting, 2022, 4(5): 11–16.

[29] 常文兵, 肖依永, 黄兆东. 航空装备经济可承受性设计与管理 [J]. 飞机设计, 2009, 29(5): 46–49.
Chang W B, Xiao Y Y, Huang Z D. The design and management of affordability for aviation material [J]. Aircraft Design, 2009, 29(5): 46–49.

[30] Hamaker J W. The faster, better, cheaper approach to space missions: An engineering management assessment [R]. Albuquerque: NASA Marshall Space Flight Center, 1999.

[31] Spotlight on lessons learned: Lessons learned from NASA’s commercial orbital transportation services (COTS) program [EB/OL]. (2022-11-21)[2025-04-15]. https://appel.nasa.gov/2022/11/21/spotlight-on-lessons-learned-lessons-learned-from-nasas-commercial-orbital-transportation-services-cots-program/.

[32] Teverovsky A, Sahu K, Leidecker H, et al. Instructions for plastic encapsulated microcircuit (PEM) selection, screening, and qualification [R]. Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2003.

[33] Space systems—Off-the-shelf item utilization (ISO 21350) [EB/OL]. (2023-04-17)[2025-04-15]. https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/af79c91c-6859-48be-876c-39dc23cb1a7a/iso-21350-2023#:~:text=This% 20document% 20contains% 20requirements% 20and% 20guidelines% 20for% 20the, implementation% 20related% 20to% 20a%20space%20product%20or%20system.

[34] ECSS-Q-ST-20-10C—Off-the-shelf items utilization in space systems [EB/OL]. (2010-10-08)[2025-04-15]. https://ecss.nl/standard/ecss-q-st-20-10c-off-the-shelf-items-utilization-in-space-systems-ecss-8-october2010/.

[35] Space systems—Commercial off-the-shelf (COTS) electrical, electronic, and electromagnetic (EEE) components for space application—Assurance requirements [EB/OL]. [2025-04-15]. https://www.iso.org/standard/90195.html#:~:text=This%20document%20establishes% 20technical% 20guidelines% 20for% 20the% 20key, the% 20aerospace%20mission.%20The%20family%20includes%20electro-optical%20components.

[36] European GNSS Service Centre. Service outage [EB/OL]. (2019-07-13)[2025-04-15]. https://www.gsc-europa.eu/notice-advisory-to-galileo-users-nagu-2019026.

[37] 吴季. 载人航天、深空探测和科学卫星三类任务中的空间科学 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1635–1641.
Wu J. Space science in manned space flight, deep space exploration and scientific satellite programs [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(11): 1635–1641.

[38] 吴伟仁, 王赤, 刘洋, 等. 深空探测之前沿科学问题探析 [J]. 科学通报, 2023, 68(6): 606–627.
Wu W R, Wang C, Liu Y, et al. Frontier scientific questions in deep space exploration [J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(6): 606–627.

[39] Foust J. NASA slows down work on Mars sample return due to budget uncertainty [EB/OL]. (2023-11-13)[2025-04-15]. https://spacenews.com/nasa-slows-down-work-on-mars-sample-return-due-to-budget-uncertainty/.

[40] 钱学森. 论系统工程(新世纪版) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
Qian X S. On systems engineering (new century edition) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2007.

[41] 国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 中国学科发展战略•系统工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2024.
National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. China’s discipline development strategy: Systems engineering [M]. Beijing: Science Press, 2024.

[42] 郭雷, 张纪峰, 杨晓光. 系统科学进展(1) [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
Guo L, Zhang J F, Yang X G. Advances in systems science (1) [M]. Beijing: Science Press, 2017.

[43] 郭雷, 张纪峰, 杨晓光. 系统科学进展(2) [M]. 北京: 科学出版社, 2017.

Guo L, Zhang J F, Yang X G. Advances in systems science (2) [M]. Beijing: Science Press, 2019.

[44] 黄春平, 侯光明. 载人航天运载火箭系统研制管理 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Huang C P, Hou G M. Development management of manned space launch vehicle systems [M]. Beijing: Science Press, 2007.

[45] 袁家军. 神舟飞船系统工程管理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
Yuan J J. System engineering management of Shenzhou spacecraft [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

[46] 孙家栋, 杨长风. 北斗二号卫星工程系统工程管理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
Sun J D, Yang C F. System engineering management of Beidou-2 satellite project [M]. Beijing: National defense industry press, 2017.

[47] 林宝军. 基于功能链的导航卫星系统工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
Lin B J. Navigation satellite systems engineering based on functional chains [M]. Beijing: Science Press, 2021.

[48] 王翔, 王为. 天宫空间站关键技术特点综述 [J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(11): 1287–1298.
Wang X, Wang W. Key technical characteristics of the Tiangong space station [J]. Scientia Sinica Technologica, 2021, 51(11): 1287–1298.

[49] 钱学森. 星际航行概论 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2008.
Qian X S. Introduction to interplanetary travel [M]. Beijing: China Astronautics Press, 2008.

[50] 许国志, 顾基发, 车宏安. 系统科学与工程研究(第2版) [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2000.
Xu G Z, Gu J F, Chen H A. Systems science and engineering: Theories and applications (2nd edition) [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technological Education Publishing House, 2000.

[51] 徐元栋, 黄登仕, 刘思峰. 奈特不确定性下的行为决策理论研究综述 [J]. 系统管理学报, 2008, 17(5): 481–489.
Xu Y D, Huang D S, Liu S F. Knightian uncertainty and theory of choice under knightian uncertainty [J]. Journal of Systems & Management, 2008, 17(5): 481–489.

[52] 钱学森, 宋健. 工程控制论(下册)(第三版) [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Qian X S, Song J. Engineering cybernetics (volume II) (3rd edition) [M]. Beijing: Science Press, 2011.

[53] 钱学森, 宋健. 工程控制论(上册)(第三版) [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Qian X S, Song J. Engineering cybernetics (volume I) (3rd edition) [M]. Beijing: Science Press, 2011.

[54] 沈甜雨, 陶子锐, 王亚东, 等. 具身智能研究的关键问题: 自主感知、行动与进化 [J]. 自动化学报, 2025, 51(1): 43–71.
Shen T Y, Tao Z R, Wang Y D, et al. Key problems of embodied intelligence research: Autonomous perception, action, and evolution [J]. Acta Automatica Sinica, 2025, 51(1): 43–71.

[55] 柴天佑, 岳恒. 自适应控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
Chai T Y, Yue H. Adaptive control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.

[56] Gang T. Adaptive control design and analysis [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

[57] Annaswamy A M. Adaptive control and intersections with reinforcement learning [J]. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, 2023, 6: 65–93.

[58] 郭雷. 时变随机系统 稳定性与自适应理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
Guo L. Time-varying stochastic systems stability and adaptive theory [M]. Beijing: Science Press, 2020.

[59] Folland G B. Real analysis [M]. Hoboken: Wiley, 1999.

[60] 莫国端, 刘开第. 函数逼近论方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Mo G R, Liu K D. Method for approximation theory of functions [M]. Beijing: Science Press, 2003.

[61] 上海交通大学钱学森研究中心. 集大成 得智慧——钱学森谈教育(第二版) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015.
SJTU Qian Xuesen Research Center. Wisdom: Qian Xuesen on education (2nd edition) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2015.

[62] 费曼, 莱顿, 桑兹. 费曼物理学讲义(新千年版)(第 1 卷) [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2022.
Richard F, Robert L, Matthew S. The Feynman lectures on physics: The new millennium edition (volume I) [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2022.

[63] 杨为民, 阮镰, 余沼, 等. 可靠性 • 维修性 • 保障性总论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
Yang W M, Ruan L, Yu Z, et al. General theory of reliability, maintainability and supportability [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.

[64] 康锐, 王自力. 可靠性系统工程理论研究回顾与展望 [J]. 航空学报, 2022, 43(10): 527505.
Kang R, Wang Z L. Reliability systems engineering: A research review and prospect [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(10): 527505.

[65] 王振肖. 复杂装备供应链确信可靠性评价与优化研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(硕士学位论文), 2021.
Wang Z X. Belief reliability evaluation and optimization of complex equipment supply chain [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Master's thesis), 2021.

[66] 殷琦雯. 空间科学载荷元器件供应链管理能力成熟度模型研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(硕士学位论文), 2023.
Yin Q W. Research on maturity model of management capabilities of space science payload components supply chain [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Master's thesis), 2023.

[67] 翁欣. 基于蒙特卡罗 DEA 的载人空间站载荷元器件供应商评价研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(硕士学位论文), 2020.
Weng X. Research for manned space station payload components supplier performance evaluation based on Monte Carlo data envelopment analysis [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Master's thesis), 2020.

[68] 刘凯. 具有退化特征的空间电子产品加速试验及评估方法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(博士学位论文), 2018.
Liu K. Study on accelerated testing and assessment method for space electronic products with degradation characteristics [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Doctoral dissertation), 2018.

[69] 李鹏. 基于数据驱动的固态硬盘故障预测方法与应用研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(博士学位论文), 2022.
Li P. Data-driven failure prognostics method and its application in solid-state drives [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Doctoral dissertation), 2022.

[70] 侯景. 标准知识抽取及其相似度研究——以空间科学及应用标

准为例 [D]. 北京: 中国科学院大学(硕士学位论文), 2024.
Hou J. Research on standard knowledge extraction and its similarity: Taking space science and application standards as an example [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Master's thesis), 2024.

[71] 陈状. 空间站在轨科学实验任务规划建模与应用研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(硕士学位论文), 2023.
Chen Z. Research on modeling and application of on-orbit science experiment mission planning for space station [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Master's thesis), 2023.

[72] Kang Z J, Gao M, Dang W, et al. Optimization model and solution algorithm for space station cargo supply planning under complex constraints [J]. Sustainability, 2024, 16(15): 6488.

[73] 康至娟. 空间站物资补给需求管理研究与应用 [D]. 北京: 中国科学院大学(博士学位论文), 2025.
Kang Z J. Research and application of cargo supply demand management for the space station [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Doctoral dissertation), 2025.

[74] 张哲. 分布式元器件检测业务调度分析与研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(硕士学位论文), 2023.
Zhang Z. Analysis and research on distributed component detection service scheduling [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Master's thesis), 2023.

[75] 冯业为. 面向插单场景的元器件补充筛选订单调度优化 [D]. 北京: 中国科学院大学(硕士学位论文), 2022.
Feng Y W. Optimization of component additional screening scheduling scheme with order insertion situation [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Master's thesis), 2022.

[76] 王嘉杰. 面向插单场景的分布式元器件鉴定多订单调度方法 [D]. 北京: 中国科学院大学(硕士学位论文), 2025.
Wang J J. Multi-order scheduling method for distributed component identification in the scenario of order insertion [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Master's thesis), 2025.

[77] 李自豪, 党炜, 汪洋, 等. 空间科学装置元器件替代关系与数字化表征研究 [J]. 载人航天, 2021, 27(3): 387–394.
Li Z H, Dang W, Wang Y, et al. Research on substitution relation and mathematical characterization of space science device components [J]. Manned Spaceflight, 2021, 27(3): 387–394.

[78] 李自豪. 基于多模态数据的航天元器件EBOM推荐方法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(硕士学位论文), 2021.
Li Z H. Aerospace electronic components EBOM recommendation method research based on multimodal data [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Master's thesis), 2021.

[79] 余振醒. 谈谈航天元器件质量管理"五统一" [J]. 质量与可靠性, 1998 (3): 11–12, 25.
Yu Z X. On "five unifies" of quality management of aerospace components [J]. Quality and Reliability, 1998 (3): 11–12, 25.

[80] 张泽明, 党炜, 汪洋, 等. 几种COTS元器件单粒子试验研究 [J]. 载人航天, 2017, 23(2): 207–211.
Zhang Z M, Dang W, Wang Y, et al. Study on single event effect test of several commercial off-the-shelf (COTS) components [J]. Manned Spaceflight, 2017, 23(2): 207–211.

[81] Li P, Maged A, Zhang A B, et al. An adaptive prognostics method based on a new health index via data fusion and diffusion process [J]. Measurement, 2022, 193: 110968.

[82] Li P. Architecture design of manned spacecraft autonomous health management system [R]. Milan: IAF Human Spaceflight Symposium, 2024.

[83] 普里戈金, 斯唐热. 从混沌到有序: 人与自然的新对话 [M]. 上海: 上海译文出版社, 2005.
Prigogine I, Stengers I. Order our of chaos [M]. Shanghai: Shanghai Translation Publishing House, 2005.