

DANG Wei, LUO Junwei, ZHENG Zuohuan, AO Liang, LI Bo, LI Peng, XIONG Shengyang, XU Pengcheng, SONG Hengxu, HU Jianqiao, FENG Yewei. Dependability Technology System for Autonomous Operation of Deep Space Exploration (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, 44(2): 228–240. DOI:10.11728/cjss2024.02.2023-0138

深空探测自主运行的一种可信性技术体系*

党 炜^{1,7,8,9} 骆军委^{2,8,9} 郑作环^{3,8} 敖 亮^{1,8,9}
李 博^{4,8,9} 李 鹏^{1,8} 熊盛阳⁵ 许鹏程^{3,8}
宋恒旭^{6,9} 胡剑桥⁶ 冯业为^{1,8}

1(中国科学院空间应用工程与技术中心 北京 100094)

2(中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室 北京 100083)

3(中国科学院数学与系统科学研究院应用数学研究所 北京 100190)

4(中国科学院微电子研究所 北京 100029)

5(中国运载火箭技术研究院 北京 100076)

6(中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室 北京 100190)

7(中国科学院空间科学与应用总体部 北京 100094)

8(中国科学院可靠性保障中心 北京 100094)

9(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 未知与不确定性是深空探测任务的基本特征. 本文基于战略导向的体系化基础研究, 建立了一种面向科学价值最大化的探测场景和以可靠性为核心技术基础的深空探测自主运行可信性技术体系. 分析研究了深空探测场景下的可靠性概念; 面向精确感知、最优计算、准确决策、快精准执行的目标要素, 提出了深空探测自主运行的可信性体系框架以及“需求—认知—工程”总体技术架构; 针对自主运行可信性的关键技术难点, 开展了可靠性导向的多物理场、强耦合白盒建模, 复杂网络故障传播机制分析, COTS 元器件深空探测应用的高可靠保证, 以及“模型+数据+知识”一体的融合机制分析等研究. 对该技术体系的关键技术验证策略及其最小系统在卫星星座中的应用进行了验证, 结果表明, 所提出的技术体系具有较高的工程价值.

关键词 深空探测, 自主运行, 可靠性, 可信性, 多物理场, 复杂网络

中图分类号 V524

Dependability Technology System for Autonomous Operation of Deep Space Exploration

* 中国空间站工程应用与发展阶段空间应用系统总体专项 (T014191), 国家重点研发计划项目 (2022YFF0610100), 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA30000000), 中国科学院关键技术人才项目 (T103201), 中国科学院可靠性保障中心种子基金项目 (CRAC-ZZKT-KY-2022-03) 共同资助

2023-11-28 收到原稿, 2024-03-21 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/>)

DANG Wei^{1,7,8,9} LUO Junwei^{2,8,9} ZHENG Zuohuan^{3,8} AO Liang^{1,8,9}
 LI Bo^{4,8,9} LI Peng^{1,8} XIONG Shengyang⁵ XU Pengcheng^{3,8}
 SONG Hengxu^{6,9} HU Jianqiao⁶ FENG Yewei^{1,8}

1(Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

2(State Key Laboratory of Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

3(Institute of Applied Mathematics, Academy of Mathematics and Systems Sciences,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

4(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029)

5(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076)

6(State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

7(General Establishment of Space Science and Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

8(Chinese Academy of Sciences' Reliability Assurance Center, Beijing 100094)

9(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The “unrecognized and uncertain” is the basic feature of deep space exploration missions. A technology system of dependability for autonomous operation in deep space exploration was proposed based on the principle of “scientific value maximization”-oriented exploration and reliability as the core technology. The concept of reliability in the scenario of deep space exploration was analyzed and involved. A dependability systematic framework for autonomous operation of deep space exploration and its overall technical architecture of “demand-cognition-engineering” were proposed, which include precise sensing, optimal calculation, accurate decision-making and “quickly, precisely, exactly” execution. The reliability-oriented multi-physics deeply coupled white-box modeling and its high-fidelity technology, the complex network fault propagation mechanism and its high-confidence technology, the high-reliability assurance route for the application of COTS components in deep space exploration, the fusion mechanism of “model + data + knowledge” and its dynamic evolution technology for multi-agent health state management based on multiple fetal sensing phenomena were studied. The key technology of this technical system and the application verification of its minimum system in the satellite constellation were introduced, and the results show that the technology system proposed has high engineering value.

Key words Deep space exploration, Autonomous operation, Reliability, Dependability, Multi-physics, Complex network

0 引言

深空探测是对月球及以远的天体或空间开展的探测活动^[1]. 人类深空探测活动始于 20 世纪 60 年代, 其发展历程可分为三个阶段^[2]. 第一阶段为 1958—1976 年, 由美国和苏联主导, 美国实现了载人登月. 第二阶段为 1976—1990 年, 该阶段是国际深空探测活动的“平静期”, 美国实现了地球以外 7 大行星的探测. 第三阶段为 1990 年至今, 以科学探索为主要驱

动力, 主要航天国家和组织既竞争又合作. 美国于 2017 年正式批复了阿尔忒弥斯计划, 并于 2022 年底完成了阿尔忒弥斯 1 号任务^[3]; 中国的嫦娥探月工程和火星探测任务也正稳步推进, 深空探测能力持续提升.

深空探测的最大挑战是面临大量未知和不确定情况, 而且基本脱离了地球的实时测控范围^[4]. 为了实现深空探测的自主运行, 亟需突破或掌握自主技

术^[1,2,5,6]等关键技术. 美国阿尔忒弥斯计划第一阶段将自主运行等列为近期聚焦的关键技术优先项^[7]. 目前深空探测是按技术与科学双驱动实施的^[8], 其发展方向和最终目标是实现科学任务的自主规划与探索^[9]. 本文以深空探测任务科学价值最大化的自主运行为应用场景.

深空探测未认知和不确定的重要特点是对象和环境的不确定性^[1], 毫无规律、难以预测的环境导致其任务也存在大量未知和不确定性^[4,10,11]. 仅就月球环境而言, 历次探测任务的观测结果差异较大, 表明了月球临近空间环境的复杂多变性^[12]; 而太阳系边际探测的第一项科学目标是探知其空间环境及其分布特性^[5]. 可见探测空间环境是深空探测任务的重大科学问题之一^[1], 也是每项科学探测必备的共性内容之一^[13].

目前, 深空探测自主运行任务可靠性的置信程度较低. 文献^[14]指出, 截至 2020 年 12 月, 共实施了 246 次深空探测活动, 其中成功 143 次, 成功率仅为 58.9% 左右, 这表明深空探测任务的可靠性问题非常突出. 经典的可靠性定义^[15-20]是设备在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力. 但是, 由于深空探测环境所具有的未认知和不确定特点, 经典可靠性概念中规定的条件已不完全适用. 在本文研究场景下, 有必要对可靠性概念进行补充完善.

针对深空探测发展新阶段, 亟需建立以适宜的可靠性概念为关键共性核心、面对未认知不确定环境条件、科学价值导向的自主运行可信性体系.

1 深空探测可靠性概念的演进

针对深空探测任务环境未认知和不确定以及科学价值最大化需求的特点, 经典可靠性定义在深空探

测场景中的适用性分析见表 1. 在此应用场景下, 将可靠性的定义补充完善并修订为: 在规定的以及未认知、不确定的条件下, 深空探测器能够持续完成规定科学任务的能力. 对于深空探测任务在未认知、不确定条件下出现的故障, 称为非预期故障^[4]; 在已认知条件下与之对应的预期故障则分为退化型故障和随机偶发型故障.

深空探测是一项重大工程. 基于修订后的可靠性定义, 这里将科学价值最大化的深空探测器的通用质量特性称为可信性. 国际电工委员会 (IEC) 标准给出的可信性定义是设备按需运行的能力, 包括可用性、可靠性、可恢复性、维修性/测试性、维护保障性以及耐久性、安全性和安保性等^[16], 其中可靠性是可信性体系的核心技术基础.

本文修订完善了深空探测场景下的可靠性概念, 这也是可靠性系统科学与工程^[21,22]学科理念的应用探索; 在此基础上, 依据战略导向的体系化基础研究原则, 利用深空探测任务的自主运行为代表的战略导向构建相关基础研究的体系化框架, 研究建立深空探测任务自主运行的可信性体系 (Dependability Methodology of Autonomous Operations in Deep Space Exploration, DMAODSE).

2 DMAODSE 总体框架

2.1 需求与框架目标要素

2.1.1 需求

深空探测任务科学价值最大化的需求关键是“抢时间”, 既要保证安全性又要有实时性^[4]. 面对科学发现机会要快速响应和实施突发探测^[11], 面对任务重大风险处置要及时有效^[23]. 美国航空航天局 (NASA) 提出的 NASA 方法学^[24]成果指出, 在健康状态评估、

表 1 经典可靠性定义在深空探测场景中的适用性分析
Table 1 Availability analysis for classic definition of reliability in deep space exploration scenarios

定义要素	经典定义	本文场景适用性分析	说明
对象	设备	适用	具体为探测器系统
条件	规定的条件	不完全适用	存在无法规定的未认知、不确定性的条件
时间	规定的时间	不完全适用	深空探测科学任务自主运行按需尽可能长
功能	规定功能	适用	—
能力	完成能力	适用	—

异常调查或定位以及进化的监视策略方面要求快速。因此, DMAODSE 的目标是保证自主运行能够可持续实现“抢时间”的价值, 争取得到错过重大科学发现前的处理时间余量以及发生不可接受故障前的处理时间余量。

本文提出一种科学发现和任务风险目标导向的粗瞄与精瞄协同架构^[25-28], 实现“抢时间”效益。对于科学发现, 探测任务按需进行粗/精协同瞄准目标区域开展工作; 对于任务风险, 探测任务按粗/精协同进行故障诊断与定位迭代协同, 支撑决策与执行。以“抢时间”为目标导向的 DMAODSE 体系需求内涵是: 自主运行对任务风险或科学机会的感知精确, 算力算法最优, 决策管理准确且不浪费时间, 执行链路最短最快。DMAODSE 体系在精确感知、最优计算、准确决策、快精准执行方面的总体框架如图 1 所示。

2.1.2 目标要素与策略

粗/精协同的四个要素及其策略如下。

(1) 精确感知。理想目标用于科学发现的传感器、支撑任务的风险敏感元器件, 实物感知到的物理现象按时序的变化情况与理论计算结果的误差趋近于零。用于科学发现的传感器的精确感知研究范式较成熟, 一般为“原理—实物—标定—应用”^[29-31]。对于支撑任务的风险敏感元器件的“不可靠现象”精确感知问题, 正在研究中, 文献 [23] 提出了基于数学方程提升模型精确性的研究方向; NASA 开展了通过耦合传感器数据和基于物理的模型联合构建数字孪生预测能力的研究^[24]; NASA 斯坦尼斯航天中心自主系统

实验室 (Autonomous Systems Laboratory, ASL) 研发了自主系统平台 (NASA Platform for Autonomous Systems, NPAS), 构建应用知识模型, 将静态模型转变为动态模型, 实现实时自主运行^[32], 在数字孪生体系中强化了物理模型及其时序特性的作用, 并且在阿尔忒弥斯计划开展了供配电分系统级、猎户座载人飞船舱段级、月球门户航天器级等分布式多层次自主系统设计的初步验证^[33]。本文提出从底层物理机理和数学方程, 根据可靠性风险严重程度与任务目标关联性, 按需构建高保真的精确模型, 称之为可靠性导向的白盒模型 (reliability-oriented white box model, R-WBM), 作为最优计算的输入。

(2) 最优计算。其理想目标是硬件提供当下最高的算力和软件提供最优的模型算法, 计算过程所需时间要远远小于实物物理现象按时序变化到不可接受的阶段, 例如重大天文现象已经结束或者重大任务风险已经演变为致命故障等。在追求极致算力的硬件资源方面, NASA 对商业货架 (commercial off-the-shelf, COTS) 元器件空间应用的研究指出, COTS 元器件的性能比宇航级元器件高 3~4 代^[34], NASA 下属各研究中心和火星探测等航天任务中, 由 COTS 元器件提供了先进性的支撑^[34-36]。近年来, 中国载人航天已经积累了较为成熟的 COTS 元器件空间应用的工程经验并构建了理论体系^[37]。本文仍采用基于 COTS 元器件的策略实现硬件的先进算力。在最优模型算法方面, 文献 [23] 指出建立故障在系统中的传播关系是其中的关键技术, 文献 [38-40] 利用复杂网络

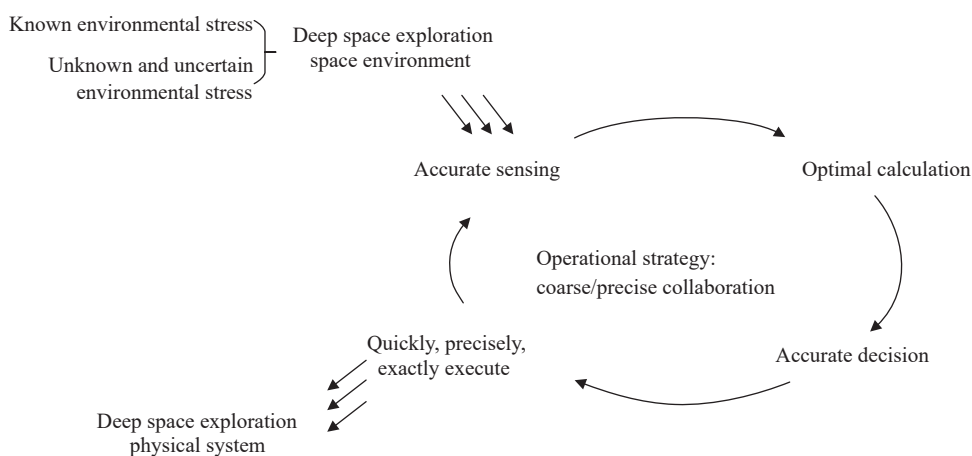


图 1 需求导向的粗/精协同运行架构

Fig. 1 Operating architecture of demand-oriented “coarse/precise collaboration”

对故障传播进行了研究. 本文提出以可靠性为导向的白盒模型 (R-WBM) 驱动推导动态演化, 以非自治微分方程^[41]建立任务驱动的复杂网络模型, 自底向上建立最优计算的策略.

(3) 准确决策. 理想目标是杜绝决策虚警, 实现极高决策置信度, 决策建议优于顶级专家的技术支持. 文献 [10] 指出, 深空探测自主运行应有学习能力和推理能力, 在陌生、未知的不确定环境中实现或提升局部自主功能. 文献 [9] 强调通过预设规则, 支撑深空探测的自主运行. 这里的预设规则来源于工程经验或知识, 属于人工知识, 而非机器学习产生的规则; NASA 也强调通过故障模式影响分析 (Fault Mechanism and Effect Analysis, FMEA) 支撑自主运行系统 NPAS 平台的研发^[32], 其中 FMEA 即工程经验或知识. 本文以“模型+数据+知识”三位一体融合为策略, 提高决策的准确性.

(4) 快精准执行. 理想目标是执行路径最短、最精准、最可靠. 文献 [4] 提出执行动作要快、精、准, 已有较好的基础.

在上述 (1)~(3) 中, 面对深空探测自主运行任务

的“抢时间”需求, 所采用的可靠性导向的白盒模型 (R-WBM)、复杂网络模型及其故障传播机制、“模型+数据+知识”三位一体融合等三个策略, 旨在解决理论与实际之间的差别. 本文将该差别称为实物与虚拟的可靠性误差问题 (简称 *R-A* 问题).

2.2 总体技术架构

根据深空探测自主运行的定义及其关键技术^[1], 结合本文对可靠性定义的修订, 将自主运行的任务需求、环境认知和工程实现作进一步细化, 建立如下 DMAODSE “需求—认知—工程”三维总体框架 (见图 2).

(1) 科学价值最大化自主运行作为纵轴, 称为需求维. 按照粗/精协同运行的 4 个策略展开, 分别为健康状态监测、异常/故障预警、异常/故障诊断 (即故障识别与定位)、异常/故障预测、异常/故障恢复管理、可持续探测—任务规划、可持续探测—任务调度、可持续探测—任务执行等.

(2) 将认知不确定程度作为横轴, 称为认知维. 分为已知和未知不确定性质.

(3) 可信性技术体系工程实现作为斜轴, 称为工

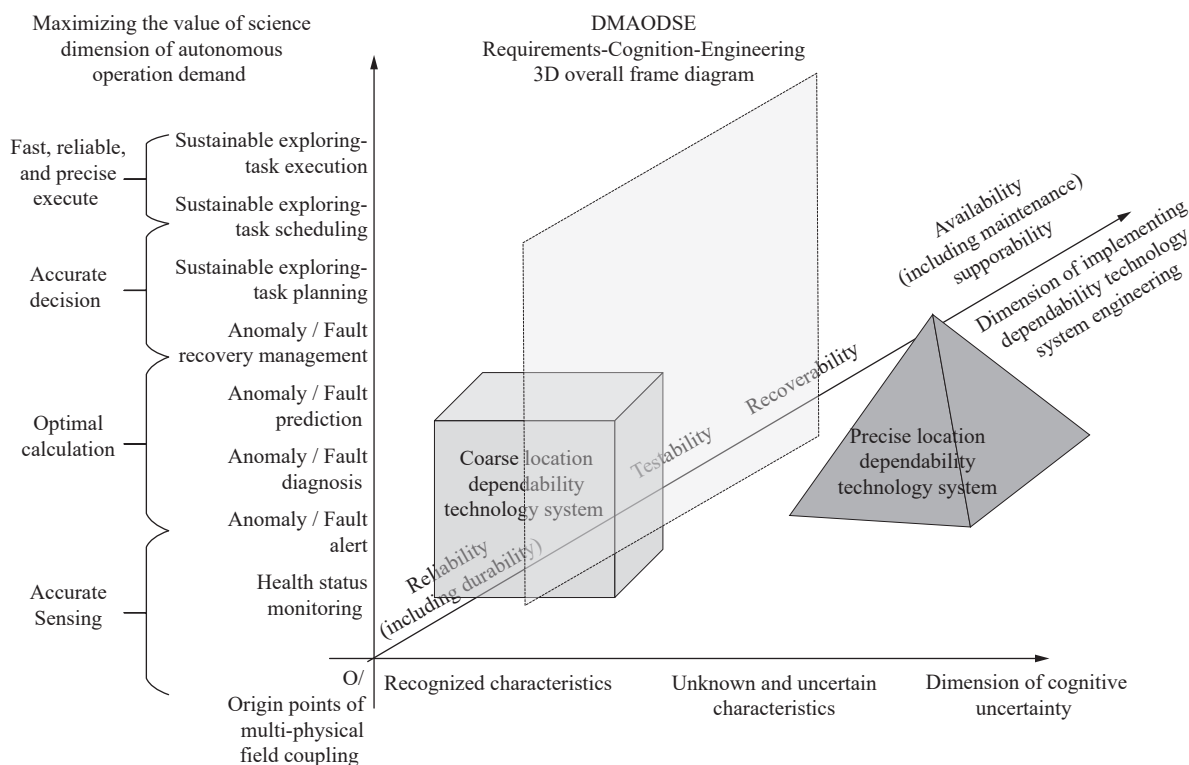


图 2 DMAODSE 的“需求—认知—工程”总体技术架构

Fig. 2 General technology architecture of “demand-cognition-engineering” for DMAODSE

程维. 按照深空探测器的特点及其通用质量特性^[42]细化, 分别为可靠性 (包含对寿命敏感的耐久性)、测试性、可恢复性、可用性 (含自主管理所需资源保障能力——维修保障性)^[19].

目前, 深空探测尚不具备全系统意义上的自主, 并且没有系统进行自主管理技术验证工作, 给探测器系统设计和验证带来了很大的难度^[4]. 本文以多物理场强耦合动力学方程为原点, 构建 DMAODSE 的“需求—认知—工程”总体技术架构, 具有一定的先进性.

2.3 关键技术难点分析

DMAODSE 的“需求—认知—工程”总体技术架构由粗瞄演进到精瞄以及粗/精协同的过程中, 还存在无法从源头和底层深层研究的技术风险, 进而成为“抢时间”需求导向的 DMAODSE 关键技术难点, 具体分析见表 2.

3 关键技术难点技术路线

文献 [14] 提出的系统工程方法与框架中的数字实物虚实闭环指出, 深空探测任务应采用“数字伴飞”技术路线, 即通过构建航天器的高精度数字仿真模型, 并保持与实物航天器技术状态同步以支撑提升航天器的运行效能, 提出基于模型的安全性可靠性质量管理与技术状态控制是深空探测 MBSE(Model Based Systems Engineering) 的关键技术之一. 文献 [43] 指出在处理系统可靠性问题时, 数字仿真是一项极为有力的工具, 文献 [44] 提出了基于模型的可靠性系统工程 (Model Based Reliability Systems Engineering, MBRSE). 同时, NASA 安全性与任务成功保证办公室也提出了基于模型的安全性任务保证 (Model-Based Safety and Mission Assurance, MBSMA) 的理念^[45]. 文献 [46] 提出了一种面向深空探测任

务的数字孪生云边端协同框架. 本文 DMAODSE 的关键技术路线策略为“数字伴飞”, 目标是解决 $R-A$ 问题.

3.1 高保真 R-WBM

3.1.1 多物理场强耦合基本 R-WBM 方程

深空探测任务涉及多个物理场 (例如热、电、磁、辐射、力等) 叠加并耦合产生的未认知和不确定场景, 元器件从源头和底层构建 R-WBM 的层次自下向上为: 可靠性需求牵引的物理力学模型、半导体物理模型、元器件物理/可靠性物理模型, 在层次方面分别对应与多物理场环境应力耦合的半导体材料、半导体材料缺陷及其时序演化、元器件缺陷及其时序演化, 最终将导致预期故障或非预期故障. 多物理场强耦合基本 R-WBM 方程的通用表达如下:

$$\frac{d\mathbf{Y}_1}{dt} = -\varepsilon(T, R, E, t, P) - S - U + W. \quad (1)$$

其中, $\mathbf{Y}_1$ 为物理力学级性能表征参数矩阵 (例如相互作用势、相变能垒等); ε 为已知环境因素引起的性能退化率, 其与温度应力 T 、空间辐射应力 R 、电场磁场应力 E 、时间 t 、空间位置 P 有关; S 为随机偶发因素引起的性能变化率, U 为未认知因素引起的性能变化率, W 表征材料恢复能力.

$$\mathbf{Y}_2 = f_1(\mathbf{Y}_1). \quad (2)$$

其中, $\mathbf{Y}_2$ 为半导体物理级性能表征参数矩阵 (例如半导体缺陷扩散率、载流子密度等), f_1 为半导体物理级模型架构的泛函.

$$\mathbf{Y}_3 = f_2(\mathbf{Y}_2) \quad (3)$$

其中, $\mathbf{Y}_3$ 为元器件物理级性能表征参数矩阵 (如输出电压、电流等), f_2 为元器件物理级模型架构的泛函.

3.1.2 多物理场强耦合的高保真技术路线

元器件层级 $R-A$ 问题的通用数学表达为

表 2 “抢时间”需求导向的 DMAODSE 关键技术难点分析
Table 2 Analysis of key technical difficulties in time margin oriented DMAODSE

应用场景需求	目标要素	策略	技术风险或难点
抢时间需求粗精协同策略	精确感知	可靠性导向的白盒模型(R-WBM)	模型如何实现“高保真”
	最优计算	复杂网络模型及其故障传播机制 先进COTS元器件的深空应用	模型如何实现高置信 系统如何实现高可靠
	准确决策	“模型+数据+知识”三位一体融合	决策如何提高准确性
	快精准执行	继承成熟机制	—

$$\min_{\epsilon} \Delta = |M - D|. \quad (4)$$

其中, M 表示元器件实物可靠性特性, D 表示基于物理模型和数学方程的元器件级虚拟可靠性. 其约束条件分别为

$$\text{s.t. } M = r(X_1), \quad (5)$$

$$X_1 = g(E_1, E_{21}, E_{22}, t), \quad (6)$$

$$D = r(Y_3). \quad (7)$$

其中, X_1 为实物刻画函数, 表示核心关键基础设施重要性 (按影响上一级或最终应用任务的严重程度) 的性能参数; r 为可靠性性能参数函数; g 为元器件性能参数随环境应力和时间改变的函数; E_1 为已认知内部环境条件的刻画函数, 例如热源与温度分布等; E_{21} 为已认知外部环境条件的刻画函数, 例如高能粒子等; E_{22} 为未认知外部环境条件的刻画函数, 可以统一到能量维度.

在国家科技重大专项方面, 中国空间站应用与发展阶段的空间科学与应用项目可以作为支撑高保真技术路线的资源之一, 其中指南 22——元器件与组件空间效应机理研究^[47] 重点资助的研究方向包括: 新型元器件与组件在轨辐射效应规律与机理研究, 国产新研或 COTS 元器件与组件飞行验证与评价, 空间辐射等效效应天地比对及数理模型研究等. 该指南和相关成果^[48] 与 DMAODSE 体系所需多物理场、强耦合、高保真 R-WBM 是强相关的, 有利于解决元器件层级的 $R-A$ 问题.

3.2 高置信复杂网络及其故障传播机制

提出高保真 R-WBM 和高置信复杂网络及其故障传播机制组成深空探测数字伴飞系统的基本型, 这是 DMAODSE 的基础. 基于物理模型和数学方程的虚拟系统可靠性仍以 D 表示, 基于系统实物各层级模型及其故障传播机制耦合下的系统可靠性仍以 M 表示, 其函数表达式更新为

$$D = r(Y_4), \quad (8)$$

$$M = r(X_4), \quad (9)$$

$$Y_4 = h_3(Y_3), \quad (10)$$

$$X_2 = h_1(X_1, t), \quad (11)$$

$$X_3 = h_2(X_2, t), \quad (12)$$

$$X_4 = h_3(X_3, t). \quad (13)$$

其中, Y_4 为系统级性能表征参数矩阵; X_2 为实物刻画函数, 表示板卡关键重要 (影响上一级或最终应用任务的) 的性能参数; X_3 为实物刻画函数, 表示设备/平台关键重要 (影响上一级或最终应用任务的) 的性能参数; X_4 为实物刻画函数, 表示系统关键重要 (影响最终应用任务的) 的性能参数; h_1 表示板卡模型架构, h_2 表示设备/平台模型架构, h_3 表示应用任务级复杂网络及其故障传播机制耦合函数 (简称系统网络模型).

3.3 高可靠保证 COTS 元器件的深空探测应用

NASA 全面总结了其下属所有研究中心关于 COTS 元器件在各类航天任务的保证情况^[34], 以指导其在更大范围的应用. 中国科学院空间应用工程与技术中心在载人航天工程领域, 针对 COTS 元器件空间应用的可靠性保证开展了相关研究^[49,50], 提出了空间应用 COTS 器件的可靠性保证总体思路^[51], 为其广泛应用奠定了基础.

国内外航天机构在 COTS 元器件的空间应用方面进展同步, 发展阶段如图 3 所示. 起步阶段为 20 世纪 80 年代到 20 世纪末, 英国萨瑞大学最先提出并在 UoSAT 系列卫星应用了 COTS 元器件; 全面发展阶段为 21 世纪初到 2015 年左右, NASA 发布了相关技术指南、国内发表了由顾逸东院士指导的支撑中国载人航天工程 (921 工程) 的论文^[50] 等; 成熟应用阶段预计为 2016 年至 2030 年左右, 美国 SpaceX 公司、中国载人空间站工程空间科学任务方面^[51] 等大量使用 COTS 元器件, COTS 元器件空间应用的研究重点逐渐从工程应用转移到理论层面.

针对高可靠应用场景下 COTS 元器件的系统可靠性风险控制问题, 文献 [37] 提出了风险信息熵的概念, 定量描述系统各层级引入风险的不确定程度. 系统风险信息熵模型为

$$H = \sum_{i=1}^m c \ln \Omega_i - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n'} p_{ij} \ln p_{ij}. \quad (14)$$

设系统共包含 m 个失效频数比未知和 n 个失效频数比已知的元器件. 其中, Ω_i 为第 i 个元器件 (失效频数比未知) 的风险值 (包括确定的和不确定的) 个数, p_{ij} 为第 i 个元器件 (失效频数比已知) 第 j 个失效模式 (该元器件失效模式总数为 n') 的频数比, c 为待定常数.

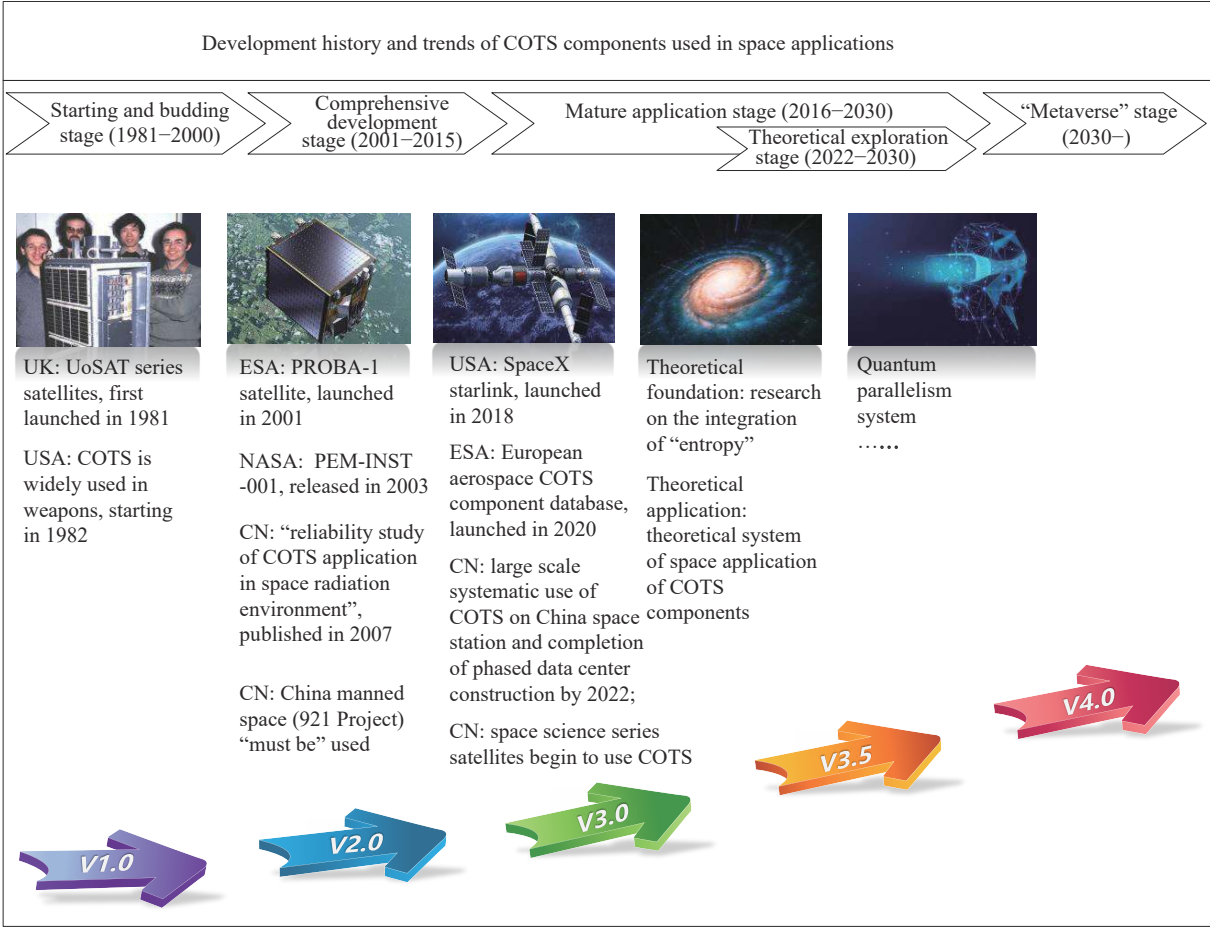


图 3 COTS 元器件空间应用发展历程及趋势分析
Fig. 3 Development history and trends of COTS components used in space applications

基于风险信息熵的概念和模型, 文献 [37] 给出了 COTS 元器件空间应用的理论框架, 并通过选用指导、应用认证、可靠性加固、状态检测等工程手段, 实现了系统熵减, 为 COTS 元器件空间应用的风险控制提供了理论支撑。

工程实践和理论分析表明, 高可靠保证 COTS 元器件的深空探测应用是可行的, 有利于解决自主运行所需的极致算力问题。

3.4 动态演进的“模型+数据+知识”

三位一体融合机制

NASA 提出了利用监测数据与新发故障知识, 促进构建无需专业人员支持、精准且高效的可靠性预计和系统功能性能风险鉴别方面的数字孪生进化能力 [24], 这是深空探测任务自主运行所需关键技术之一。文献 [11] 指出, 自适应规划知识模型设计是自主任务重规划或规划修复研究的重点。

本文提出了“物理模型+监测数据+经验知识”三融合驱动方式, 如何持续动态演进, 支撑提高决策的准确性是难点。根据深空探测发展出现了多探测器采用分布式多智能体算法 [11] 的特点, 基于仿生学理念提出了“基于多胞胎感应现象的多主体健康状态管理技术” [52], 将多探测器不同层级相同设备的健康状态进行“模型+数据+知识”三位一体融合后的再融合, 利用非自治数学模型和经验知识, 推导出动态演化过程, 以支持持续提高 DMAODSE 决策的准确性, 并极限逼近解决式 (4) 列出的全系统 $R-A$ 问题。

4 工程应用验证

DMAODSE 的工程应用验证以中国空间站工程空间应用任务、中国科学院先导专项 DRO 专项地月探测卫星星座等作为平台资源。其中远距离逆行轨道 (Distant Retrograde Orbit, DRO) 是地月空间开展

探测任务的理想轨道,也是地月空间引力势能高地的关键轨道资源. DRO 卫星星座由 A 星、B 星和 L 星三颗星组成,主要对地月空间航天器进行天基测定轨与自主导航^[53].

4.1 DMAODSE 验证策略与最小系统

DMAODSE 关键技术验证资源与方法见表 3,验证方法按理论、实验、试验予以区分.

选取 DRO 星座的 G 设备作为验证 DMAODSE 的最小系统,由于 G 设备选用了 COTS 元器件进行设计研制,进一步验证了 COTS 元器件空间应用的成熟性.因此,拟通过天地比对,初步验证“模型+数据+知识”三位一体融合技术的工程成熟度,DRO 卫星 G 设备 DMAODSE 最小系统(简称 DRO-G-DMAODSEmin 配置项)的运行架构如图 4 所示.

DRO-G-DMAODSEmin 配置项主要功能包括:对天基 G 设备的健康状态监测与数据解析,健康状态管理计算和数据存储,自动检测故障并推送故障处

置程序(此次实验中,天基系统不执行决策,待与地面比对后可执行故障恢复管理,使得 G 设备恢复至正常状态).在健康状态管理算法中,融合了基于故障模式及影响分析(FMEA)的专家知识和机器学习故障诊断方法,初步实现了“模型+数据+知识”的三位一体融合.

通过对三位一体融合的集成算法决策结果的权重寻优,获得最准确的决策结果,其“模型+数据+知识”三位一体融合机制为

$$\min S(\omega) = \sum_{t=1}^N \left(x_t - \sum_{i=1}^m \omega_i x'_{it} \right)^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \omega_i \omega_j \left(\sum_{t=1}^N e_{it} e_{jt} \right); \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^m \omega_i = 1; \\ \omega_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m. \end{cases}$$

其中, S 为 t 时刻的预测误差平方和, x_t 和 x'_{it} 分别为 t 时刻的真值和方法 i 的预测值, ω_i 为模型、数据、知识等方法 i 的权重系数, $e_{it} = x_t - x'_{it}$ 为 t 时刻方法

表 3 DMAODSE 关键技术验证平台与方法

Table 3 Verification platforms and methods for key technologies of DMAODSE

目标要素	验证关键技术	验证平台	验证方法
精确感知	可靠性导向的白盒模型(R-WBM)	中国空间站应用22号指南	理论与实验
最优计算	复杂网络模型及其故障传播机制	地面	理论与试验
	先进COTS元器件的深空应用	中国空间站应用、DRO星座	理论与试验
准确决策	“模型+数据+知识”三位一体融合	地面、DRO星座	理论、实验与试验
快精准执行	继承成熟机制	—	—

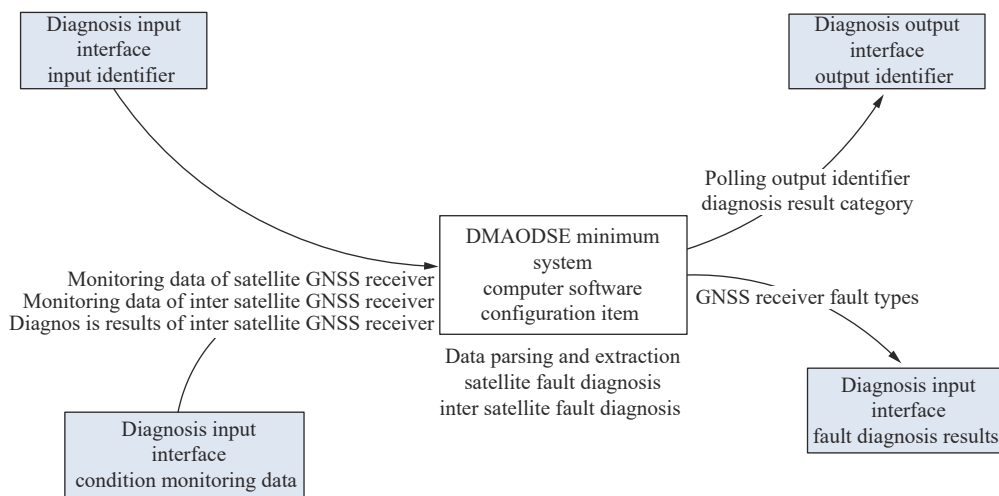


图 4 DRO-G-DMAODSEmin 配置项运行架构

Fig. 4 Operating architecture of DRO-G-DMAODSEmin configuration item

表 4 典型模拟数据下的 DRO-G-DMAODSEmin 配置项诊断性能评价
Table 4 Diagnostic performance evaluation of DRO-G-DMAODSEmin configuration item under typical simulation data

典型方法	准确率	精确率	召回率
Deep forest	0.9773	0.9457	0.9330
Random forest	0.9785	0.9512	0.9355
LightGBM	0.9797	0.9338	0.9528
XGBoost	0.9821	0.9371	0.9642

i 的预测误差.

在本案例中, 由于仅涉及数据和知识方法, 因此模型方法的权重为 0. 此外, 知识和数据方法在本案例中分别针对故障预案内和预案外开展故障诊断. 以基于知识驱动的专家系统诊断结果为主, 面向已知判据规则的故障; 以基于多种算法融合的数据驱动 Bagging 集成故障诊断模型结果为补充, 面向未知判据规则的故障, 主要通过挖掘数据中蕴含的故障信息, 建立监测参数与故障征兆之间的映射关系.

4.2 仿真与工程验证结果

针对 G 设备预案内的故障, 根据参数范围获取电源故障、通信接口故障、定位定轨故障、授时故障等工参数据; 针对 G 设备预案外的故障, 利用 Spirent SimGEN 模拟器软件, 开展卫星信号强度异常的故障模拟试验, 获取包含收星正常、收星亚健康、收星异常 3 类运行状态下的载噪比、跟踪星数等 463 维工参数据, 标签分别为 0, 1, 2, 样本数为 3359. 利用主流的 Deep forest, Random forest, LightGBM, XGBoost 等机器学习方法进行仿真验证, 结果表明, 知识-数据融合的健康管理与传统的地面测控站-航天器大回路操作控制模式相比, 处置响应时间从分钟级降低至毫秒级, 初步实现了“抢时间”的效果; 从对 G 设备收星状态诊断效果评价来看, 不仅可以实现电源故障、通信接口故障、定位定轨故障、授时故障等预案内故障 100% 的识别效果, 还可以识别收星亚健康、收星异常等预案外故障, 在准确率、精确率、召回率等指标上均取得了 0.93 以上的预测结果, 满足工程需求, 结果详见表 4.

另外, 根据航天卫星工程型号管理相关规定, DRO-G-DMAODSEmin 配置项按照软件工程化要求进行了全过程管理, 并逐级开展了单元测试、配置项测试以及初样系统联试和正样系统联试. 对于配置项

任务规定的数据解析提取、本星故障诊断、星间故障诊断等功能, 通过地面系统联试过程中产生的真实试验数据进行了验证. 工程阶段性验证结果表明, DRO-G-DMAODSEmin 配置项的功能性能均满足任务要求, 可识别故障预案库之外的 G 设备异常亚健康状态, 指导故障处置响应.

5 结论

针对深空探测任务科学价值最大化发展需求与自主运行任务风险现状的矛盾, 从可靠性基本概念在深空探测场景的适用性出发, 研究建立了深空探测任务自主运行的可信性体系 (DMAODSE), 并进行了理论分析和工程应用验证, 为后续关键技术攻关、工程实施奠定了基础, 也为国家实施深空探测战略的风险控制和任务可持续性发展提供了参考.

成熟的无人深空探测是未来开展有人深空探测的前提与支撑, 建议在以下方向继续开展战略导向的体系化基础研究.

- (1) 可靠性导向的白盒模型 (R-WBM) 建模理论与技术标准.
- (2) 基于本文 DMAODSE 体系的算力和能耗等资源量化分析方法与技术标准.
- (3) 基于本文 DMAODSE 体系的涌现性理论与方法.

致谢 本文研究得到了孙惠中研究员、顾逸东院士、朱嘉明教授、王自力院士、林宝军研究员、康锐教授、陈蔚薇研究员和李京苑研究员等的指导.

参考文献

[1] WU Weiren, YU Dengyun. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1(1): 5-17 (吴伟仁, 于登云).

- 深空探测发展与未来关键技术 [J]. 深空探测学报, 2014, 1(1): 5-17)
- [2] LIU Jizhong, HU Chaobin, PANG Fuchuan, *et al.* Strategy of deep space exploration[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2020, 50(9): 1126-1139 (刘继忠, 胡朝斌, 庞涪川, 等. 深空探测发展战略研究 [J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(9): 1126-1139)
 - [3] CHEN Zeyu, HE Yongning, SONG Ning, *et al.* Progress of the U. S. Artemis lunar program[J]. *Space Electronic Technology*, 2022, 19(6): 75-84 (陈泽煜, 贺永宁, 宋宁, 等. 美国阿尔忒弥斯载人登月计划进展 [J]. 空间电子技术, 2022, 19(6): 75-84)
 - [4] WANG Dayi, MENG Linzhi, YE Peijian, *et al.* Research of autonomous operation technology for deep space probe[J]. *Spacecraft Engineering*, 2018, 27(6): 1-10 (王大轶, 孟林智, 叶培建, 等. 深空探测器的自主运行技术研究 [J]. 航天器工程, 2018, 27(6): 1-10)
 - [5] WU Weiren, YU Dengyun, HUANG Jiangchuan, *et al.* Exploring the solar system boundary[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2019, 49(1): 1-16 (吴伟仁, 于登云, 黄江川, 等. 太阳系边际探测研究 [J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(1): 1-16)
 - [6] YU Dengyun, MA Jinan. Progress and prospect of deep space exploration in China[J]. *Science and Technology Foresight*, 2022, 1(1): 17-27 (于登云, 马继楠. 中国深空探测进展与展望 [J]. 前瞻科技, 2022, 1(1): 17-27)
 - [7] Artemis Plan: NASA's Lunar Exploration Program Overview[Z]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 2020
 - [8] YU Dengyun, SUN Zezhou, MENG Linzhi, *et al.* The development process and prospects for mars exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(2): 108-113 (于登云, 孙泽洲, 孟林智, 等. 火星探测发展历程与未来展望 [J]. 深空探测学报, 2016, 3(2): 108-113)
 - [9] CUI Pingyuan, XU Rui, ZHU Shengying, *et al.* State of the art and development trends of on-board autonomy technology for deep space explorer[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(1): 13-28 (崔平远, 徐瑞, 朱圣英, 等. 深空探测器自主技术发展现状与趋势 [J]. 航空学报, 2014, 35(1): 13-28)
 - [10] YE Peijian, MENG Linzhi, MA Jinan, *et al.* Suggestions on artificial intelligence technology application and development in deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(4): 303-316, 383 (叶培建, 孟林智, 马继楠, 等. 深空探测人工智能技术应用及发展建议 [J]. 深空探测学报, 2019, 6(4): 303-316, 383)
 - [11] XU Rui, LI Zhaoyu, ZHU Shengying, *et al.* Research progress of autonomous planning technology for deep space probes[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2021, 8(2): 111-123 (徐瑞, 李朝玉, 朱圣英, 等. 深空探测器自主规划技术研究进展 [J]. 深空探测学报 (中英文), 2021, 8(2): 111-123)
 - [12] WANG Mingyuan, WANG Mei, PING Jinsong, *et al.* A review of lunar space environment study[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2021, 8(5): 486-494 (王明远, 王美, 平劲松, 等. 月球空间环境研究进展 [J]. 深空探测学报 (中英文), 2021, 8(5): 486-494)
 - [13] WU Weiren, WANG Chi, LIU Yang, *et al.* Frontier scientific questions in deep space exploration[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(6): 606-627 (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)
 - [14] YU Guobin. Application and trend of model-based systems engineering methods for deep space exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2021, 8(4): 407-415 (于国斌. 深空探测任务协同的系统工程方法应用及趋势 [J]. 深空探测学报 (中英文), 2021, 8(4): 407-415)
 - [15] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 25000.10-2016 Systems and software engineering—systems and software quality requirements and evaluation (SQuaRE)—Part 10: system and software quality models[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016 (中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 25000.10-2016 系统与软件工程 系统与软件质量要求和评价 (SQuaRE) 第 10 部分: 系统与软件质量模型 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016)
 - [16] IEC. IEC 60050-192: 2015 International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 192: Dependability[S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission Publishing Office, IEC, 2015
 - [17] NASA. NASA-HDBK-8709.22, Safety and Mission Assurance ACRONYMS, Abbreviations, and Definitions[S]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 2018
 - [18] JONES H W. Improving reliability and maintainability (R&M) in space life support[C]//Proceedings of the 48th International Conference on Environmental Systems. Albuquerque: Albuquerque: International Conference on Environmental Systems, Inc., 2018: 1-15
 - [19] YANG Weimin. Reliability, Maintainability, and Supportability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995 (杨为民. 可靠性·维修性·保障性总论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995)
 - [20] The General Equipment Department of the People's Liberation Army of China. GJB 1405A-2006 Terms for equipments quality management[S]. 2006 (中国人民解放军总装备部. GJB 1405A-2006 装备质量管理术语 [S]. 2006)
 - [21] GAO Qiang, PAN Enrong. A comparative analysis of the self-reliant and self-strengthening path of Chinese and western philosophy of engineering: take concept research of

- engineering as an example[J]. *Journal of Engineering Studies*, 2022, **14**(4): 266-275 (高强, 潘恩荣. 中西方工程哲学自立自强之路比较研究——以“工程”概念研究为例[J]. *工程研究——跨学科视野中的工程*, 2022, **14**(4): 266-275)
- [22] KANG Rui, WANG Zili. Reliability systems engineering: a research review and prospect[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, **43**(10): 527505 (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)
- [23] WANG Dayi, TU Yuanyuan, ZHANG Xiangyan, *et al.* Theory and method of autonomous fault diagnosis and system reconfiguration for spacecraft[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, **44**(4): 546-557 (王大轶, 屠园园, 张香燕, 等. 空间飞行器自主诊断重构的理论和方法[J]. *宇航学报*, 2023, **44**(4): 546-557)
- [24] NASA Headquarters. NASA Methodology for Physics of Failure-Based Reliability Assessments Handbook[R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 2023
- [25] YU Zhiliang, ZHOU Naixin, CHEN Xinglin, *et al.* Research on coarse-fine composite technology for scanning in inter-satellite laser communication[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, **38**(5): 158-162 (于志亮, 周乃新, 陈兴林, 等. 星间激光通信系统粗精复合扫描技术[J]. *国防科技大学学报*, 2016, **38**(5): 158-162)
- [26] WEI Qiang, LIU Zhong. A track correlation algorithm of space-based reconnaissance based on rough and precise correlations[J]. *Radar Science and Technology*, 2017, **15**(1): 29-34 (尉强, 刘忠. 一种粗-精结合的航天侦察航迹关联算法[J]. *雷达科学与技术*, 2017, **15**(1): 29-34)
- [27] ZHANG Hui. Research on Pointing and Stabilization Technology of Optical Space Payload for Parallel Integration of Coarse and Fine Actuators[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2023 (章辉. 面向空间光学载荷的粗精并联式指向及稳定一体化技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2023)
- [28] ZENG Chan, LI Weimin, BI Bo. Simulation realization of high dynamic GPS signal coarse acquisition and fine acquisition algorithm[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, **43**(4): 790-799 (曾婵, 李卫民, 毕波. 高动态 GPS 信号粗捕和精捕算法仿真实现[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, **43**(4): 790-799)
- [29] LUO Lei, TANG Libin, ZUO Wenbin. Research progress in ultraviolet enhanced image sensors[J]. *Infrared Technology*, 2021, **43**(11): 1023-1033 (罗磊, 唐利斌, 左文彬. 紫外增强图像传感器的研究进展[J]. *红外技术*, 2021, **43**(11): 1023-1033)
- [30] LIU Tongjun, YE Huiqi, TANG Liang, *et al.* Research advance in astronomical high-precision wavelength calibration technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, **52**(5): 0552203 (刘桐君, 叶慧琪, 唐靓, 等. 天文光谱高精度波长定标技术研究进展[J]. *光子学报*, 2023, **52**(5): 0552203)
- [31] MA Chuanzhen, LIU Henan, CHEN Mingjun, *et al.* Research progress on key property and manufacturing technology of hemispherical resonator[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, **59**: 1-19 (马传震, 刘赫男, 陈明君, 等. 半球谐振子关键性能及制造工艺研究新进展[J]. *机械工程学报*, 2023, **59**: 1-19)
- [32] FIGUEROA F, UNDERWOOD L, WALKER M G, *et al.* NASA Platform for Autonomous Systems (NPAS)[C]. AIAA SciTech 2019. San Diego: AIAA, 2019: 1262-1276
- [33] FIGUEROA F, UNDERWOOD L, MORRIS J, *et al.* Risk-reduction autonomy implementation to enable NASA Artemis missions[C]//Proceedings of 2022 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2022: 1-13
- [34] 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: National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 2020
- [35] CAMPOLA M J. Radiation hardness assurance (RHA): challenges and new considerations[C]//Proceedings of Microelectronics Reliability and Qualification Working Meeting. El Segundo: NASA, 2017
- [36] PELLISH J. Commercial Off-the-Shelf (COTS) Electronics Reliability for Space Applications[R]. Maryland: National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, 2018
- [37] WEN Z, WEI D, LIANG A, *et al.* A theoretical framework of COTS components space application based on “risk information entropy”[C]//Proceedings of the 2022 4th International Conference on System Reliability and Safety Engineering. Guangzhou: IEEE, 2022: 353-357.
- [38] XIA W F, WANG Y H, HAO Y C. Modeling failure propagation to analyze the vulnerability of the complex electromechanical systems under network attacks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2023, **613**: 128514
- [39] WANG Mianyu. Process Fault Diagnosis Based on Graph Theory[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002 (王勉宇. 基于图论的过程故障诊断研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002)
- [40] LIU Tao, CHEN Zhong, CHEN Xiaorong. A brief review of complex networks and its application[J]. *Systems Engineering*, 2005, **23**(6): 1-7 (刘涛, 陈忠, 陈晓荣. 复杂网络理论及其应用研究概述[J]. *系统工程*, 2005, **23**(6): 1-7)
- [41] ARNOLD V I. Geometrical Methods in the Theory of Ordinary Differential Equations[M]. New York: Springer, 1983
- [42] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 19001-2016 Quality management systems — requirements[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016 (中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理

- 理委员会. GB/T 19001-2016 质量管理体系要求 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016)
- [43] YANG Weimin, SHENG Yixing. Digital Simulation of System Reliability[M]. Beijing: Beihang University Press, 1990 (杨为民, 盛一兴. 系统可靠性数字仿真 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990)
- [44] WANG Z L. Current status and prospects of reliability systems engineering in China[J]. *Frontiers of Engineering Management*, 2021, 8(4): 492-502.
- [45] LINDSEY N J, ALIMARDANI M, GALLO L D. Reliability analysis of complex NASA systems with model-based engineering[C]//Proceedings of 2020 Annual Reliability and Maintainability Symposium. Palm Springs: IEEE, 2020: 1-8
- [46] SHANG Yuye, YUAN Jiabin. Task offloading method based on cloud-edge-end cooperation in deep space environment[J]. *Computer Science*, 2023, 50(2): 80-88 (尚玉叶, 袁家斌. 深空环境中基于云边端协同的任务卸载方法 [J]. *计算机科学*, 2023, 50(2): 80-88)
- [47] China Manned Space Engineering Office. Space Science and Applications Project Guide for Space Station Applications and Development Engineering (V1.0)[M]. Beijing: China Manned Space Engineering Office, 2023. <https://www.cmse.gov.cn/gfgg/202306/W020230629432887860164.pdf> (中国载人航天工程办公室. 空间站应用与发展工程空间科学与应用项目指南 (V1.0)[R]. 北京: 中国载人航天工程办公室, 2023. <https://www.cmse.gov.cn/gfgg/202306/W020230629432887860164.pdf>)
- [48] XU T. A Multiphysics single event effect modeling method based on machine learning for semiconductor devices[C]//Proceedings of the 7th Sino MOS-AK Workshop. Nanjing: MOS-AK, 2023: 17-19
- [49] DANG Wei, SUN Huizhong, LI Ruiying, *et al.* Research on reliability assurance of COTS components in space application[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(11): 2589-2594 (党伟, 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)
- [50] DANG Wei. Reliability Study on COTS Used in Space Radiation Environment[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2007 (党伟. 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 (空间科学与应用研究中心), 2007)
- [51] ZOU Tianji, LI Peng, LI Dan, *et al.* Practice of COTS device reliability assurance system for space application[J]. *China Quality*, 2018(8): 83-88 (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)
- [52] DANG Wei, LI Peng, AO Liang, *et al.* A spacecraft intelligent autonomous health management system based on multiple births mind-body sensing: CN, 116578905A[P]. 2023-08-11 (党伟, 李鹏, 敖亮, 等. 一种基于多胞胎身心感应的航天器智能自主健康管理系统: 中国, 116578905A[P]. 2023-08-11)
- [53] LI Shuanglin, PU Jinghui, GUO Pengbin, *et al.* Single-beam differential relative navigation of DRO satellite formation[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, 10(2): 211-219 (李霜琳, 蒲京辉, 郭鹏斌, 等. DRO 卫星编队同波束差分相对导航 [J]. *深空探测学报 (中英文)*, 2023, 10(2): 211-219)

作者简介



党伟 男, 1982 年 10 月出生于陕西省富平县, 现为中国科学院空间应用工程与技术中心正高级工程师、责任科学家, 中国科学院可靠性保障中心总工程师等, 主要研究方向为可靠性系统工程、COTS 元器件空间应用等。

E-mail: dangwei@csu.ac.cn