

航天器自主功能验证评估指标体系构建及验证

张妍¹, 尹溶森², 孙波²

¹西北工业大学计算机学院, 陕西 西安

²北京空间飞行器总体设计部, 北京

收稿日期: 2025年6月14日; 录用日期: 2025年8月21日; 发布日期: 2025年9月1日

摘要

本文致力于构建航天器自主功能验证评估指标体系, 并研究相应的验证准则。首先, 基于航天器自主行为的特点与需求, 提出了泛化性、鲁棒性、可信性等多维度评估指标, 形成了全面、系统的评估体系。其次, 针对各评估指标, 设计了具体的测试方法与验证流程, 确保评估结果的准确性与可靠性。进一步地, 通过实际案例分析与验证, 验证了评估指标体系的有效性与实用性。本研究不仅为我国航天器自主功能性能的全面评估提供了科学依据, 也为航天器自主化装备的验证提供了重要的评估标准。

关键词

航天器, 自主功能, 验证评估, 指标体系, 验证

Construction and Verification of the Evaluation Index System for the Autonomous Function Verification of Spacecraft

Yan Zhang¹, Rongsen Yin², Bo Sun²

¹School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi

²Beijing Space Vehicle Master Design Department, Beijing

Received: Jun. 14th, 2025; accepted: Aug. 21st, 2025; published: Sep. 1st, 2025

Abstract

This paper focuses on establishing an evaluation index system and validation criteria for spacecraft autonomous function verification. Firstly, based on the characteristics and requirements of spacecraft autonomous behavior, a comprehensive and systematic evaluation system is formed by proposing multi-dimensional assessment indicators such as generalization, robustness, and trustworthiness.

文章引用: 张妍, 尹溶森, 孙波. 航天器自主功能验证评估指标体系构建及验证[J]. 国际航空航天科学, 2025, 13(3): 61-69. DOI: 10.12677/jast.2025.133006

Secondly, specific testing methods and validation procedures are designed for each evaluation indicator to ensure the accuracy and reliability of the assessment results. Furthermore, through practical case analysis and validation, the effectiveness and practicality of the proposed evaluation index system are verified. This research not only provides a scientific basis for the comprehensive evaluation of spacecraft autonomous function performance in China, but also offers important assessment standards for the validation of autonomous spacecraft equipment.

Keywords

Spacecraft, Autonomous Function, Validation and Evaluation, Index System, Validation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着空间技术的飞速发展，航天器在深空探测、地球观测、通信导航等领域的任务日益复杂化和多样化。传统的地面测控模式已难以满足未来航天任务对实时性、自主性和可靠性的严苛要求。在此背景下，航天器自主功能的重要性日益凸显，它赋予航天器在轨独立感知、决策、规划和执行任务的能力，从而显著提升任务效率、降低运营成本并增强系统鲁棒性[1]。然而，航天器自主功能的复杂性也对其验证与评估带来了前所未有的挑战。如何构建一套全面、科学、可量化的评估指标体系，并制定有效的验证准则，以确保航天器自主功能在极端空间环境下的可靠性和安全性，已成为当前航天领域亟待解决的关键问题。

当前，航天器自主功能验证评估领域的研究尚处于发展阶段，面临诸多挑战。一方面，自主功能涉及感知、决策、执行、导航、飞控等多个维度，各维度之间相互耦合，难以进行孤立评估；另一方面，空间环境的复杂性和不可预测性使得地面验证难以完全模拟真实在轨情况，对评估方法的普适性和有效性提出了更高要求[2]。此外，现有评估方法多侧重于单一性能指标或特定任务场景，缺乏对航天器自主功能整体效能的系统性、多维度评估。

国内外学者在航天器自主功能评估方面已开展了诸多探索。例如，一些研究关注于特定自主模块的性能评估，如自主导航系统的精度和鲁棒性评估[1]，或自主决策系统的实时性和可靠性分析[2]。另一些研究则尝试构建通用性的评估框架，但往往侧重于理论层面的探讨，缺乏具体的量化指标和可操作的验证流程[3]。在评估方法上，德尔菲法、层次分析法、熵权法、数据包络分析法以及各种组合赋权法被广泛应用于复杂系统的评估中[4]-[8]。然而，这些方法在应用于航天器自主功能评估时，仍存在以下不足：

1) 评估维度单一：多数研究未能全面覆盖航天器自主功能的泛化性、鲁棒性、可信性等关键特性，导致评估结果片面。

2) 理论支撑不足：指标体系的构建过程缺乏严谨的理论依据和量化标准，使得评估结果的科学性和可信度受限。

3) 缺乏实际数据验证：案例分析多采用假设数据或简化模型，难以充分验证评估体系在真实复杂任务场景下的有效性和实用性。

4) 适用性局限：现有评估方法往往针对特定系统或场景设计，缺乏普适性，难以适应航天器自主功能的多样性和复杂性。

本文旨在深入研究航天器自主功能验证评估指标体系的构建及其验证准则。首先，我们将分析航天器自主行为的特点与需求，在此基础上，提出一套涵盖感知能力、决策能力、执行能力、导航能力、飞控能力和任务完成能力等多维度的评估指标体系，并详细阐述各级指标的内涵与表征参数。其次，本文将探讨适用于航天器自主功能评估的有效方法，并结合 DAF 法(德尔菲法、层次分析法、模糊综合评价法的综合运用)确定各指标的权重，以确保评估结果的客观性和科学性。最后，通过一个具体的航天器任务案例，演示自主功能验证评估流程，并进行量化计算，以验证所构建指标体系的有效性和实用性。本研究的成果将为我国航天器自主功能性能的全面评估提供科学依据，并为未来航天器自主化装备的研发与验证提供重要的理论支撑和实践指导。

2. 航天器自主行为的特点与需求

航天器的自主行为是指航天器在没有人操作的情况下，能够根据环境变化和任务需求，主动采取相应的控制和决策行动。航天器自主行为的特点和需求对于航天器的性能提升和任务执行具有重要意义。

航天器需要通过传感器获取环境信息，并对这些信息进行处理和分析，以便作出合理的决策。航天器的自主行为需要具备较高的信息处理能力，能够对海量的数据进行快速、准确的处理和判断。其次，航天器在执行任务的过程中，可能会面临各种复杂的环境和任务需求变化。航天器的自主行为需要具备适应性，能够根据环境变化和任务需求的变化，及时调整决策和控制策略，以适应不同的情况和需求。此外，需要能够根据任务目标和环境条件，作出合理的决策，并进行相应的控制行为。航天器的自主行为需要具备较高的决策能力，能够根据不同的情况和需求，选择最优的决策方案，以实现任务目标。

在航天器自主行为的需求方面，首先是提高任务执行效率。航天器的自主行为需要能够根据任务需求和环境条件，快速、准确地作出决策和执行控制行为，以提高任务执行效率。其次，航天器的自主行为需要能够对环境变化和任务需求的变化作出及时的响应，并根据情况做出相应的决策和控制行为，以确保任务执行的可靠性和安全性。最后，航天器的自主行为需要能够根据不同的任务需求和环境条件，灵活地调整决策和控制策略，以适应不同的任务和环境影响，提高任务的适应性和灵活性。

综上所述，航天器自主行为的特点和需求对于航天器的性能提升和任务执行具有重要意义。通过研究和开发具有强大信息处理能力、适应性强和决策能力强的航天器自主行为，可以提高航天器的任务执行效率、可靠性和安全性，进一步推动航天器技术的发展和應用。

3. 航天器自主功能的多维度评估指标构建

航天器自主功能的多维度评估指标构建是为了对航天器的自主功能进行全面的评估和验证，以确保其在实际应用中的可靠性和性能。在构建评估指标时，需要考虑航天器的自主行为特点和功能需求，以及评估指标的客观性和可操作性。

3.1. 评价指标选择要求

航天器自主功能的多维度评估指标体系的构建应根据在轨航天器自主功能能力要求和发展特点，遵循评价指标设计的基本规律，进行系统分析与研究。除独立性、系统性、层次性、可行性等一般功能评价指标构建要求外，还有以下几个方面。

其一，时效性与任务完成度的协同评价。随着任务复杂度的提升，航天器不仅需确保任务高质量完成，更需强化时间敏感性，尤其在突发场景中，快速响应能力直接决定任务成败；任务完成度则聚焦执行精准性与目标达成率，二者共同构成自主功能效能的核心标尺。其二，冗余度与健壮性的双重保障。冗余设计通过系统级备份机制，在局部失效时维持任务连续性，而健壮性则体现航天器在辐射、极端温

度等复杂太空环境中抵御干扰、保持稳态运行的综合能力，二者共同构建航天器可靠性的技术基石。其三，智能化评价的深度融合。基于人工智能与大数据技术，可实现航天器运行状态的实时监测、任务轨迹的智能预测及异常模式的自主诊断，这种数据驱动的评价范式不仅提升评估精度，更通过闭环反馈机制为自主控制算法迭代与系统优化提供关键支撑，成为推动航天器智能化升级的核心驱动力。

3.2. 评价指标选取

从构建目的出发，实现指标分析的可量化，使得构建的指标体系能够对航天器自主功能进行持续有效的监控与评价[8][9]。该组指标主要从感知能力(Perceptive ability, P)、决策能力(Decision-making ability, D)、执行能力(Executive ability, E)、导航能力(Navigation ability, N)、飞控能力(Flight control ability, F)、任务完成能力(Task execution capability, T)等 6 个方面考查航天器自主功能的整体效能。

对构建的 6 个一级指标进行详细分解，见下表 1。

Table 1. A multi-dimensional evaluation index system for the autonomous functions of spacecraft
表 1. 航天器自主功能的多维度评估指标体系

一级指标	二级指标	表征参数	量化标准/计算方法
感知能力 (P)	感知范围 (P1)	探测距离、视场角	探测距离：单位为公里(km)，指传感器能够有效探测到目标的距离。视场角：单位为度(°)，指传感器能够覆盖的空间范围。
	感知精度 (P2)	分辨率、灵敏度	分辨率：单位为米(m)或像素(pixel)，指传感器能够区分最小细节的能力。灵敏度：单位为分贝(dB)或信噪比(SNR)，指传感器在低信号条件下探测目标的能力。
	感知速度 (P3)	扫描速度、扫描帧率	扫描速度：单位为度/秒(°/s)或米/秒(m/s)，指传感器扫描目标区域的速度。扫描帧率：单位为帧/秒(fps)，指传感器每秒捕获图像或数据的帧数。
决策能力 (D)	决策准确度 (D1)	正确决策度、置信度、误判率	正确决策度：指在给定条件下，系统作出正确决策的百分比。置信度：指系统对自身决策正确性的评估，通常为 0~1 之间的数值。误判率：指系统做出错误决策的百分比。
	决策速度 (D2)	响应时间	响应时间：单位为秒(s)，指从接收到信息到作出决策所需的时间。
	决策稳定性 (D3)	决策稳定性、适应性、决策一致性	决策稳定性：指在相似输入条件下，系统决策结果的一致性。适应性：指系统在环境变化或任务需求变化时，调整决策策略的能力。决策一致性：指系统在不同时间或不同情境下，对相同问题作出相似决策的程度。
执行能力 (E)	执行效率 (E1)	燃料消耗率、能源利用效率	燃料消耗率：单位为千克/小时(kg/h)，指执行任务过程中燃料的消耗速度。能源利用效率：单位为百分比(%)，指系统有效利用能源的比例。
	执行完成度 (E2)	任务成功率、任务执行精度、任务执行错误率	任务成功率：指任务成功完成的百分比。任务执行精度：指任务执行结果与预期目标之间的偏差。任务执行错误率：指任务执行过程中出现错误的百分比。
	执行精度 (E3)	执行精度、执行稳定性、执行一致性	执行精度：指执行动作的准确性。执行稳定性：指执行动作在重复操作中的一致性。执行一致性：指在不同条件下执行相同动作的相似性。
导航能力 (N)	定位精度 (N1)	绝对定位精度、相对定位精度、动态性能	绝对定位精度：单位为米(m)，指航天器在绝对坐标系中的位置误差。相对定位精度：单位为米(m)，指航天器相对于其他目标的位置误差。动态性能：指航天器在运动过程中的定位精度。
	定位可靠性 (N2)	定位精度稳定性、抗干扰能力、多路径效应处理能力	定位精度稳定性：指定位精度在不同环境和时间下的波动范围。抗干扰能力：指系统在受到外部干扰时，保持定位精度的能力。多路径效应处理能力：指系统处理信号多路径传播的能力。

续表

	定位速度(N3)	更新频率、数据处理速度、系统响应时间	更新频率：单位为赫兹(Hz)，指定位信息更新的频率。数据处理速度：单位为兆字节/秒(MB/s)，指系统处理导航数据的速度。系统响应时间：单位为秒(s)，指从接收到导航数据到输出定位结果所需的时间。
飞行能力(F)	姿态控制精度(F1)	姿态控制稳态误差、最大超调量、执行精度	姿态控制稳态误差：单位为度(°)，指姿态控制系统达到稳定状态后的误差。最大超调量：单位为度(°)，指姿态控制过程中最大偏差。执行精度：指姿态控制动作的准确性。
	飞行稳定性(F2)	姿态稳定性、轨道稳定性、结构稳定性、振动特性	姿态稳定性：指航天器姿态在受到扰动后恢复稳定的能力。轨道稳定性：指航天器轨道在受到扰动后保持稳定的能力。结构稳定性：指航天器结构在飞行过程中的稳定性。振动特性：指航天器在飞行过程中产生的振动情况。
	控制能力(F3)	飞行轨迹、控制误差、响应时间	飞行轨迹：指航天器实际飞行路径与预设路径的偏差。控制误差：指控制系统输出与期望值之间的偏差。响应时间：单位为秒(s)，指从发出控制指令到控制系统开始响应所需的时间。
任务完成能力(T)	任务完成率(T1)	任务成功率、任务执行精度、任务执行错误率	任务成功率：指任务成功完成的百分比。任务执行精度：指任务执行结果与预期目标之间的偏差。任务执行错误率：指任务执行过程中出现错误的百分比。
	任务执行时间(T2)	任务响应速度、任务持续时间	任务响应速度：单位为秒(s)，指从接收到任务指令到开始执行任务所需的时间。任务持续时间：单位为小时(h)，指任务从开始到结束的总时间。
	任务资源利用率(T3)	载荷利用率、维修保养成本、任务完成比	载荷利用率：单位为百分比(%)，指航天器载荷在任务执行过程中的有效利用率。维修保养成本：单位为美元(\$)或人民币(¥)，指任务执行过程中所需的维修和保养费用。任务完成比：指实际完成任务量与计划任务量之比。

3.3. 指标权重确定

考虑到航天器自主功能运行环境的特殊性，DAF法(德尔菲法[10]、层次分析法[11][12]、模糊综合评价法[13][14]的综合运用)是较为有效的评价指标权重确定及自主功能评估方法。

通过邀请专家参与德尔菲法调查，按照收集、总结、再反馈的步骤，重复评价并录入数据，计算排序权重。为避免成员结构单一对评估结果造成影响，群决策组成员包括航天装备维修保障机构人员、航天装备维修管理人员、院校航天装备保障学科专业教授等，人员岗位多样且分析问题角度全面，增强评估结果的客观性和科学性。评价指标权重见表2。

Table 2. Multi-dimensional evaluation index weights for the autonomous functions of spacecraft

表 2. 航天器自主功能的多维度评估指标权重

一级指标	权重	二级指标	权重
P	0.3197	P1	0.1067
		P2	0.1677
		P3	0.0453
D	0.2157	D1	0.1079
		D2	0.1078
		D3	0.0887
E	0.2566	E1	0.1059
		E2	0.021
		E3	0.0409

续表

N	0.0649	N1	0.0433
		N2	0.0216
		N3	0.0165
F	0.0289	F1	0.0041
		F2	0.0083
		F3	0.0313
T	0.11421	T1	0.0245
		T2	0.0086
		T3	0.0059

由指标权重可以看出，一级指标中感知能力、决策能力和执行能力的权重较大。二级指标中，感知精度权重最大，可以看出自主功能对感知信息的要求是最高的。这是因为航天器在太空中面临的环境极为复杂和多变，包括极端的温度、辐射、真空等条件，以及可能遭遇的微小碎片、流星体等潜在威胁。因此，航天器需要具备精确的感知能力，以便实时监测和评估其周围环境的状态，从而作出及时的反应和调整。高感知精度有助于航天器更准确地识别潜在威胁，避免碰撞或损坏，保障其安全稳定地运行。

综上所述，航天器自主功能的多维度评估指标构建需要考虑航天器的自主行为特点和功能需求，并确保评估指标的客观性和可操作性。这将有助于提高航天器自主功能的可靠性和性能，推动航天器技术的发展和应用。

4. 航天器自主功能评估方法与验证流程

4.1. 现有评估方法

航天器自主功能评估方法有很多，在调研了航天器自主功能验证方面的研究成果后，总结常用的方法如下。

德尔菲法：通过第三方组织相关专家对特定的问题进行专家评议多次反复，意见逐步趋于一致，得到一个比较一致的并且可靠性较大的结论或方案。该方法适用于难以量化评价的系统，专家经验发挥重大作用的复杂系统。

熵权法[15]：依据各指标值所包含的信息量的多少确定指标权重的客观赋权法，指标的熵越小，说明该指标值的变异程度越大，则该指标的权重也应越大。该方法适用于含有多组数据，评价对象较多，有较多数据支撑的系统。

数据包络分析法[16]：根据多项投入指标和多项产出指标，利用线性规划的方法，对具有可比性的同类型单位进行相对有效性评价的一种数量分析方法。数据包络分析法适用于具有多输入多输出的复杂系统。

组合方法：上述评估方法对于系统评估问题都有着各自适用的领域，但是随着系统的复杂性提升，单一的评估方法便难以胜任。组合评估方法开始发挥其优势，针对系统的不同特点，选取多个适用的方法组成综合评估方法，如 AHP-熵权法、AHP-模糊综合评价法等，这些方法获取主客观权重对特定系统具有较好的评估效果，但组合评估方法需要依赖系统的运行特征与指标体系来确立，并无普遍适用的方法。

4.2. 评估方法与验证流程

航天器的自主功能是指其能够根据环境变化和任务要求，自主地进行决策和执行任务。为了确保航

天器自主功能的可靠性和性能，需要进行全面的测试和验证。航天器自主功能评估过程中各组成部分高度耦合，指标体系复杂，上述常用评估方法不能很好地适配，本文基于此提出评估方案，其执行步骤如下。

Step 1: 确立评估指标

参考航天器自主功能验证相关的专家，进行评估要素的筛选，确立了 6 个要素集，共计 18 项具体指标。

Step 2: 单项评估得分计算

具体评估指标计算，对于有大量统计数据且能通过概率分布描述的指标以概率分布为依据确立评分标准，对于数据数量较少，概率分布不易确定的则依据相关国标或者行业标准以分段线性评估确立得分标准，最终数据转换为正向化归算至百分制。

Step 3: 确立组合权重

考虑到航天器自主功能运行环境的特殊性，DAF 法计算得到所有指标的权重。

Step 4: 分别进行单点时序、多点排序评估对于单点运行状况的评估，利用底层指标得分与组合权重确立，最终获得各项指标以及整体的百分制得分；对于多点排序决策在上述组合权重的基础上利用 TOPSIS 排序方法，对多个接入点方案的运行优劣进行排序，得到最优方案。

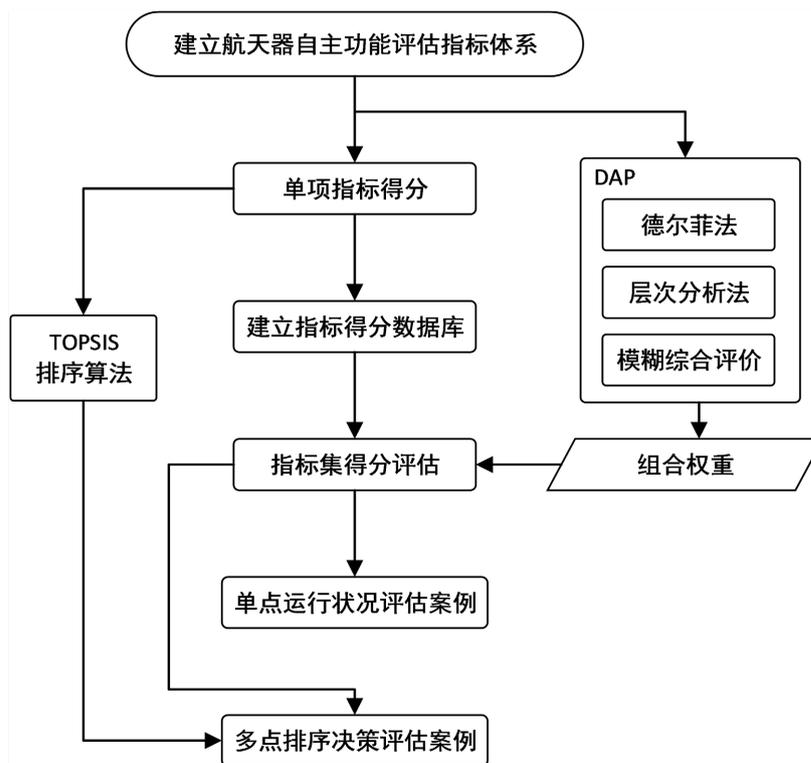


Figure 1. Evaluation process of autonomous functions of spacecraft
图 1. 航天器自主功能评估流程

如图 1 所示，航天器自主功能测试方法与验证流程是保证航天器自主功能可靠性和性能的重要手段。通过合理的测试方法和验证流程，可以有效评估航天器的自主功能，并为其性能提升和优化提供指导。

5. 案例分析及验证

为了验证航天器自主功能评估指标体系的有效性和实用性，本节针对一个具体的航天器任务案例进行分析，并基于此案例进行自主功能验证评估和量化计算。选择某地球观测卫星作为案例对象，其主要

任务是进行高分辨率对地成像，用于环境监测和灾害评估，利用本文提出的方法，评估该卫星在洪涝灾害成像任务中的表现。

根据卫星在任务中的表现，对各项二级指标进行评估，并给出假设得分(满分 100 分)，以感知能力为例，其任务得分如下表 3 所示。

Table 3. Scores of the secondary indicators of perception ability
表 3. 感知能力二级指标得分

指标名称	指标项	表现情况	得分
感知范围	P1	卫星能够覆盖整个受灾区域，并具备一定的超视距探测能力。	90
感知精度	P2	卫星在复杂天气条件下仍能获取高分辨率图像，对云层和地物细节识别准确。	85
感知速度	P3	卫星能够快速扫描目标区域，并实时传输图像数据。	88

针对所有二级指标按上述评分处理，得到二级指标得分总表，如下表 4 所示。

Table 4. Scores of all secondary indicators
表 4. 所有二级指标得分

二级指标	得分	二级指标	得分	二级指标	得分
P1	90	E1	87	F1	91
P2	85	E2	86	F2	89
P3	88	E3	91	F3	92
D1	92	N1	93	T1	95
D2	90	N2	90	T2	90
D3	89	N3	88	T3	88

同样，以感知能力为例，其一级指标得分计算方式如下：

$$S_p = w_{P1} \cdot S_{P1} + w_{P2} \cdot S_{P2} + w_{P3} \cdot S_{P3} \quad (1)$$

其中， S 为得分值， w 为权重。将二级指标得分代入上式，得：

$$S_s = 90 * 0.1067 + 85 * 0.1677 + 88 * 0.0453 = 27.8439 \quad (2)$$

系统自主功能验证评估结果计算方式如下：

$$S = w_p \cdot S_p + w_D \cdot S_D + w_E \cdot S_E + w_N \cdot S_N + w_F \cdot S_F + w_T \cdot S_T \quad (3)$$

将计算得到的各一级指标值代入上式，得到系统评估总得分：

$$S = 89.6351 \quad (4)$$

从评估结果来看，该卫星在任务中表现出较高的自主功能水平。其中，感知能力和决策能力得分较高，这与卫星在复杂环境下需要精准感知和快速决策以应对突发情况的任务需求相符。任务完成能力也取得了高分，表明卫星能够高效、高质量地完成核心成像任务。导航能力和飞控能力表现良好，为任务的顺利执行提供了坚实保障。执行能力得分略低于感知和决策，可能意味着在某些操作的精细化或效率上仍有提升空间。整体而言，本次评估结果验证了该卫星在复杂地球观测任务中具备强大的自主功能，能够有效应对挑战并达成任务目标。

6. 总结

航天器自主功能的验证与评估,一直是航天科技领域的重要课题。本文围绕航天器自主功能的特点与需求,构建了一套全面、系统的验证评估指标体系,旨在为我国航天器自主功能的性能评估提供科学依据和评估标准。通过深入研究,提出了泛化性、鲁棒性、可信性等多维度评估指标,并设计了具体的测试方法与验证流程。这些指标和方法不仅考虑了航天器自主功能的多样性,还兼顾了评估的准确性和可靠性,为航天器自主功能的全面评估提供了有力支撑。进一步地,通过实际案例的分析与验证,证明了这一评估指标体系的有效性和实用性。它不仅能够帮助更准确地评估航天器自主功能的性能,还能够为航天器自主化装备的验证提供重要参考。

参考文献

- [1] Wright, L. and Davidson, S. (2024) Digital Twins for Metrology; Metrology for Digital Twins. *Measurement Science and Technology*, **35**, Article ID: 051001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad2050>
- [2] 刘潇翔, 汤亮, 曾海波, 刘羽白, 张新邦. 航天控制系统基于数字孪生的智慧设计仿真[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 377-384.
- [3] PR Newswire (2023) Space and Building Management Software Converge with Digital Twins to Ignite a 29% CAGR Surge in Global Net-Zero Energy Buildings by 2027. <https://www.prnewswire.com/news-releases/space-and-building-management-software-converge-with-digital-twins-to-ignite-a-29-cagr-surge-in-global-net-zero-energy-buildings-by-2027-302019524.html>
- [4] 张琳琳, 廖兴禾, 侯兴明. 在轨航天器智能维修保障链评价指标体系构建[J]. 军事运筹与评估, 2023, 38(4): 30-35.
- [5] 侯炜, 韦国军, 齐分岭, 等. 航天装备试验效能指标体系优化研究[J]. 设备管理与维修, 2022(15): 26-28.
- [6] 崔永龙, 王伟卿, 彭永平. 部队装备维修保障能力生成的系统动力学模型及运用[J]. 中国战略新兴产业, 2018(40): 160-161.
- [7] 沈剑, 黄定东, 赵大磊. 装备维修保障能力评估指标体系与方法研究综述[J]. 科技资讯, 2013, 19(26): 249.
- [8] 潇耀友, 张健. 复杂装备保障能力评估指标体系研究[J]. 科技创新导报, 2019, 16(7): 242-243.
- [9] 贺宁. 基于分岔理论的敏捷供应链系统优化模型研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [10] 曲钟阳. 基于德尔菲法的技术预见[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [11] 牛虎, 刘泊天, 高鸿, 等. 基于层次分析法-熵权组合法的航天器材料应用验证综合评价研究[J]. 宇航材料工艺, 2023, 53(2): 22-29.
- [12] 周文明, 李彩霞, 廖捷, 等. 一种新研航天器系统可靠性指标论证方法[J]. 航天器工程, 2022, 31(5): 26-34.
- [13] 张英. 基于模糊层次分析-模糊综合评价模型的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 安庆: 安庆师范大学, 2022.
- [14] 马东锋. 航天器体系设计的效能评估方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [15] 李潘琳. 基于熵权法的改进 DRASTIC 模型的应用与研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2022.
- [16] 张志峰, 白焱. 基于综合赋权 C-TOPSIS 法的航天器研制风险控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 626-630.