



基于 Petri 网的航天器一体化控制系统行为演化特征研究

袁利^{1,2*}, 罗姗³, 施威杰³, 李敏², 孙康康³, 魏春岭², 姜甜甜², 邱剑彬³

1. 中国空间技术研究院, 北京 100190

2. 空间智能控制技术重点实验室, 北京 100190

3. 哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001

* 通信作者. E-mail: yuanli@spacechina.com

收稿日期: 2025-06-24; 修回日期: 2025-08-05; 接受日期: 2025-09-02; 网络出版日期: 2025-10-13

国家自然科学基金联合基金集成项目 (批准号: U21B6001) 资助

摘要 为了使航天器“感知–决策–执行”一体化控制系统在轨运行过程中既能保障既定任务执行, 还能自主完成轨道威胁目标的自主感知与规避, 以自适应空间不确定动态环境演变, 本文研究了时空约束下的航天器“感知–决策–执行”一体化控制系统行为演化特征. 基于“分散–集成”的建模思想, 提出了结合 Agent 和 Petri 网的一体化控制系统行为建模方法. 将一体化系统按照功能模块进行划分并抽象成各个功能模块 Agent, 从宏观上整体刻画系统. 从微观层面, 基于 Petri 网建模方法建立各个功能模块 Agent 的行为模型. 进一步, 基于一体化控制系统闭环框架, 建立 Agent 之间的相互交互和作用关系的行为模型, 分析一体化控制系统行为动态特性与系统参数、逻辑架构和协调运行机制间的关系. 基于 CPNTools 搭建仿真模型, 模拟系统在碎片威胁场景下的响应过程. 仿真结果显示, 模型可呈现多路径行为演化, 具备良好的活跃性、公平性与结构连通性, 能够根据不同感知结果自主选择应对路径, 实现威胁识别后的动态避障与任务调整, 展现出系统的适应性与稳定性.

关键词 “感知–决策–执行”闭环控制, multi-agents 模型, Petri 网, 行为模型, 行为演化特征

1 引言

随着空间碎片数量不断增加以及大型星座持续部署, 地球轨道环境日趋拥挤, 航天器面临的碰撞风险显著上升, 在轨安全稳定运行受到严峻挑战^[1]. 调查数据显示, 美国和欧洲航天局的卫星每年需进行近 40 次机动以规避碰撞威胁^[2]. 与此同时, 天基监视系统、“伴飞”侦察等新型轨道威胁不断涌现, 空间安全态势愈加复杂^[3,4]. 当前应对上述威胁的主流模式是以地面为主导的“星地链条”, 包括测定轨、威胁判定、规避策略生成、指令上注与执行等环节^[5]. 然而, 这类处置手段严重依赖地面人工判断决策, 存在窗口和弧段时空约束强、星地链条长、运维指控人为因素多等缺陷, 容易导致对威

引用格式: 袁利, 罗姗, 施威杰, 等. 基于 Petri 网的航天器一体化控制系统行为演化特征研究. 中国科学: 信息科学, 2025, 55: 2555–2571, doi: 10.1360/SSI-2025-0294

Yuan L, Luo S, Shi W J, et al. Behavioral evolution characteristics of the integrated control system for spacecraft based on Petri nets. Sci Sin Inform, 2025, 55: 2555–2571, doi: 10.1360/SSI-2025-0294

胁事件“过钝”或“过度”响应,难以应对日益严峻且快速变化的轨道空间环境^[6,7].为突破上述局限,各国都在大力发展航天器智能自主控制技术,期望通过构建具备感知、决策和执行上自主闭环能力的控制系统,实现自主执行任务和对威胁的自主感知、规避决策和机动执行^[6,8~10].

然而,“感知-决策-执行”一体化控制系统本质上是一个高度复杂的异构系统:变量涵盖连续状态和离散事件变量;结构具有多环路级联耦合复杂特征;组成元素间涉及竞争、合作多种复杂交互作用关系,系统行为具有并发性和涌现性^[11].在此背景下,深入理解系统的行为及其演化特征尤为关键.系统行为是指系统在特定任务场景或外部输入作用下,所引发的一系列状态迁移与动作响应,反映系统内部运行机制的动态执行过程.行为演化特征是指系统行为在任务场景变化或外部扰动影响下所呈现出的内在演变机制和必然发展路径,体现了系统如何通过感知、推理与执行实现状态转换、功能响应或任务切换的全过程.具体到一体化控制系统,行为演化特征描述了各功能模块在面临轨道威胁、资源限制等多重扰动下的协同响应机制,构成了从威胁识别到规避动作的完整闭环控制演化过程.因此,亟需建立描述航天器“感知-决策-执行”一体化控制系统行为演化特征的行为模型.通过模型深入研究和分析,揭示系统从当前状态向目标状态演变的路径与逻辑,支撑对控制策略执行过程的可预测性分析与安全评估;辅助识别极端场景或资源受限条件下的系统行为边界,为鲁棒性增强、任务容错设计和协同机制优化提供理论基础.

然而,在构建此类行为模型时,传统建模方法如微分方程、状态空间与传递函数等虽适用于表征连续过程,但难以描述多模块间基于事件触发的协同控制与行为冲突^[12,13],难以满足对“感知-决策-执行”一体化控制系统行为演化建模的需求.因此,亟需探索一种能够全面刻画系统行为的建模方法,不仅能够描述系统并发执行、异步交互、事件驱动和随机变化等特性,揭示系统特征参数模型、闭环逻辑架构与行为模型动态特性之间的关系,还能够分析系统在约束条件下的行为可达状态与行为路径集合.Agent建模将系统功能模块抽象为具有自治性与交互能力的个体,适用于处理复杂系统中的不确定性与协同机制^[14,15],多Agent建模通过引入主体间协调机制,进一步支撑机器人、制造系统与作战系统等多模块系统的建模与仿真^[16].Petri网作为离散事件系统的建模工具,能精确表达事件的先后、并发及互斥关系,通过形式化结构与数学分析反映系统的冲突与死锁等特性^[17~20].其建模的核心在于通过事件触发描述系统状态的变化过程,适于刻画系统微观层面的动态执行.将Agent建模的宏观模块抽象能力与Petri网的微观行为描述优势结合,可实现一体化控制系统从结构组织到行为演化的统一建模,为分析其在复杂环境下的响应机制与动态演化特征提供结构化、可验证的建模路径.

为实现航天器“感知-决策-执行”一体化控制系统的行为设计、优化与动态演化分析,本文融合Agent与Petri网围绕其行为演化特征开展研究.该方法基于“分散-集成”的建模思想,首先将控制系统按功能划分为多个模块,并将各模块建模为独立的Agent,以此实现系统在宏观层面的结构抽象与行为建模.同时,利用Petri网在微观层面对各功能模块的行为特征进行建模,并在闭环控制框架下构建各Agent间的交互与作用关系模型.进一步,本文探讨了系统行为动态特性与参数配置、逻辑结构及协同机制之间的内在联系.最后,借助CPNTools对一体化控制系统的行为演化过程进行了模拟分析,为航天器在轨自主威胁感知与规避系统的建模与分析提供了理论支持与方法参考.为突出本文的研究特色与贡献,主要创新点如下:

- (1) 提出了一种融合Agent与Petri网的系统行为建模方法,适用于建模复杂时空约束下的“感知-决策-执行”一体化控制系统行为演化过程;
- (2) 基于“分散-集成”的建模思想,将控制系统划分为多个功能模块,抽象为独立Agent,并针对每个Agent的内部行为特征构建相应的Petri网模型,实现模块级行为建模;
- (3) 构建了基于CPNTools的行为演化仿真模型;开展了任务执行与威胁规避典型场景的路径分析与验证,为模型的实际应用和工程实现提供支持.

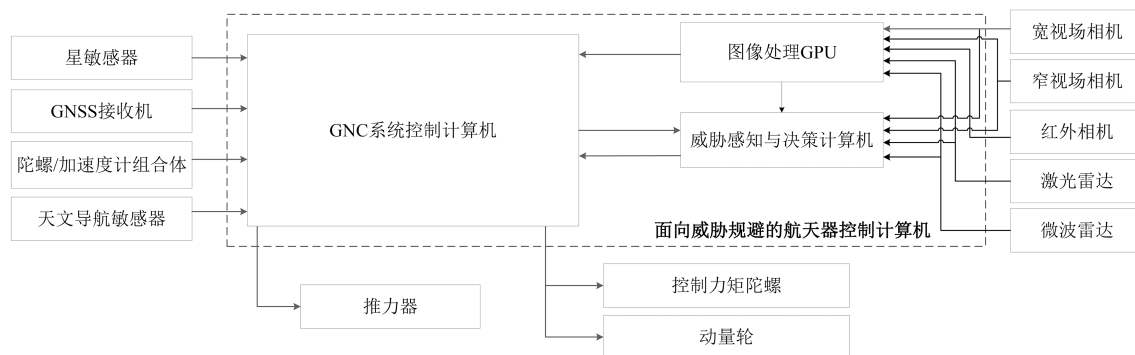


图 1 “感知 – 决策 – 执行” 一体化控制系统组成.

Figure 1 Composition of the “perception-decision-execution” integrated control system.

2 航天器“感知 – 决策 – 执行”一体化控制系统组成与分析

一体化控制系统在实现执行常规任务的同时自主规避轨道威胁, 因此系统需要具备以下能力: 轨道的自主定姿、定轨; 自主感知空间目标、详查目标并识别目标; 自主与目标建立相对导航, 并对目标运动行为估计; 自主对空间目标进行威胁行为判定; 自主决策提供规避策略; 自主生成动作序列和规划运动轨迹; 姿态、轨道和载荷自主控制. 为实现上述能力需求, 一体化控制系统组成如图 1 所示, 采用“感知 – 决策 – 执行”三大功能模块划分.

(1) 感知模块. 包括星敏感器、GNSS 接收机、陀螺/加速度计组合体、天文导航敏感器, 以及宽/窄视场光学相机、红外相机、激光雷达、微波雷达等设备, 用于获取自主定姿定轨信息和目标图像、相对运动信息.

(2) 决策模块. 由 GNC 控制计算机、图像处理 GPU 单元和威胁感知与决策计算机构成, 负责数据处理、目标识别、威胁判断和规避策略制定.

(3) 执行模块. 包括推力器、控制力矩陀螺和动量轮, 负责姿态与轨道的控制执行.

航天器“感知 – 决策 – 执行”一体化控制系统作为信息物理深度融合的复杂系统, 其行为特征表现为受时间/事件驱动, 具有多样性和不确定性. 此外, 系统内各功能模块间存在复杂的多环路耦合与交互, 整体行为具有涌现性. 基于此, 亟需构建能够准确刻画系统行为演化特征的模型, 揭示任务执行及威胁感知与自主规避和系统行为状态之间的映射关系, 为系统预测、评估与控制提供理论支撑.

3 航天器“感知 – 决策 – 执行”一体化控制系统建模方法

本节结合“自顶向下”分析与“自底向上”建模思路, 采用多 Agent 与 Petri 网融合方法, 实现对系统功能模块及其行为特性的统一建模. 在“自顶向下”分析方面, 首先从系统整体任务需求出发, 明确“感知 – 决策 – 执行”三大功能模块及其相互关系, 梳理各模块的关键子功能与交互逻辑, 形成系统行为的高层次结构视图; 在“自底向上”建模方面, 进一步针对各功能模块内部的关键行为单元构建具体的建模元素. 以 Petri 网建模语言为基础, 引入多 Agent 概念, 分别描述系统各部分在感知、决策与执行过程中的状态转移、资源竞争与行为协同机制. 该方法既提升建模效率, 又能准确刻画系统行为演化过程, 为后续分析与特征提取提供基础.

3.1 多 Agent 建模

Agent 模型结构主要分为反应型、慎思型与混合型 3 类. 反应型 Agent 响应快速、结构简单、适应性强, 适合处理简单任务, 但缺乏规划与推理能力; 慎思型 Agent 依托知识库与推理机制, 具备较强的逻辑推理与任务规划能力, 适合复杂任务处理, 但计算开销大、响应慢、适应性差; 混合型 Agent 融

合两者优势,具备较强的任务处理能力与灵活性,但模型复杂、资源需求高,且需解决多决策机制的协调问题。

在实际建模中,应结合系统各功能模块的属性选取合适的 Agent 结构。尽管类型不同,所有 Agent 模型均应包含以下基本要素^[16]:角色属性、输入输出信息集合、行为模型(含行为状态、触发事件与状态转换函数)、功能模型(含实现与调度功能),以及输入输出信息源集合。但是,Agent 模型的可解释性和可分析性存在一定缺陷,Petri 网模型可以有效分析系统行为,实现系统优化和改进。因此,实现 Petri 网与 Agent 建模方法的有机融合,有利于系统行为模型的表达和分析。

3.2 Petri 网理论

一个基本 Petri 网可定义为一个四元组 $N = (P, T, F, W)$, 其中, 库所集合 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 变迁集合 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$; 库所集和变迁集满足 $P \neq \emptyset, T \neq \emptyset, P \cap T = \emptyset; F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 表示有向弧集合; $W : F \rightarrow \mathbb{N}$ 称为网的权函数, 其中 $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, \dots\}$ 表示自然数集, $W(p, t)$ 是从库所 p 到变迁 t 的有向弧权值, $W(t, p)$ 是从变迁 t 到库所 p 的有向弧权值。Petri 网 N 的标识 $M = [M(p_1), M(p_2), \dots, M(p_n)]^T \in \mathbb{N}^n$ 是库所集到自然数 $\mathbb{N}$ 的映射, 标识 M 中 $M(p)$ 表示库所 p 包含托肯的数量。通常 Petri 网系统表示为 $\langle N, M_0 \rangle$, 其中 N 是 Petri 网, M_0 是 N 的初始标识。

令 $x \in P \cup T$ 是 Petri 网中的所有节点(库所与变迁)集合, $\bullet x = \{y \in P \cup T | (y, x) \in F\}$ 定义为 x 的前置集, $x^\bullet = \{y \in P \cup T | (x, y) \in F\}$ 定义为 x 的后置集。若 x 为库所(变迁), 则它的前置集 $\bullet x$ 中的元素表示其前置变迁(库所), 后置集 $x^\bullet$ 中的元素表示其后置变迁(库所)。当 $\forall p \in \bullet t, M(p) \geq W(p, t)$ 成立时, 称变迁 t 在标识 M 下使能, 该变迁触发后系统的标识状态更新为 M' , 记作 $M[t]M'$ 。

给定一个 Petri 网系统 $\langle N, M_0 \rangle$, 从初始标识 M_0 可达的所有标识集合称为 $\langle N, M_0 \rangle$ 的可达集, 记为 $R(N, M_0)$ 。如果 $\forall M \in R(N, M_0), \exists M' \in R(N, M_0), M'[t]$, 则称变迁 t 在标识 M_0 下是活的。Petri 网系统 $\langle N, M_0 \rangle$ 是活的当且仅当 $\forall t \in T$ 在标识 M_0 下是活的。

为支撑后续的动态行为分析, 本文基于 Petri 网模型引入系统状态空间与行为演化路径的形式化定义。系统的行为演化路径可形式化表示为一组标识-变迁序列: $\pi = (M_0, t_1, M_1, t_2, \dots, t_k, M_k)$, 其中变迁 t_i 在其前一状态 M_{i-1} 下使能。进一步地, 行为演化路径集合 Π 表示系统在多种输入扰动下的所有可能运行路径, 是后续行为特征分析的基础。

在多 Agent 与 Petri 网融合建模中, 需要划分系统模块, 明确各 Agent 的角色、输入输出、行为与功能; 利用 Petri 网刻画其行为逻辑, 并基于闭环控制框架建立 Agent 间的交互规则, 从而实现系统级建模与协调机制构建。结合一体化控制系统的组成与功能需求, 将其划分为 10 个模块: 感知层包括自主导航、图像处理、目标行为估计、威胁评估、自身监控; 决策层包括协调运行、行为决策、动作规划、运动规划; 控制层为控制执行。各功能模块分别建立对应的 Petri 网模型, 整体结构如图 2 所示。

3.3 行为模型

为实现对“感知-决策-执行”一体化控制系统的系统化建模, 本小节采用“自底向上”的建模策略, 围绕系统中的关键功能模块, 构建包括自主导航、图像处理、目标行为估计等在内的 10 个核心 Agent 的行为模型。每个 Agent 根据其功能特点构建对应的 Petri 网子模型, 以刻画其内部状态演化与行为逻辑。在此基础上, 进一步通过各 Agent 间的信息交互关系, 整合形成系统的整体融合模型, 以下逐一介绍各 Agent 的建模。

自主导航 Agent. 自主导航 Agent 通过星敏感器、GNSS 接收机、陀螺/加速度计及天文导航敏感器获取航天器的位置、速度、加速度、姿态及角速度等信息, 并向其他模块提供输入支持。为提高系统鲁棒性与可靠性, 该 Agent 需具备仅星敏感器定姿、仅陀螺定姿、星敏+陀螺定姿、仅 GNSS 定轨、仅加速度计定轨、GNSS+加速度计定轨、GNSS+天文定轨、仅天文定轨、星敏+陀螺+GNSS+加速度计融合定姿定轨等能力, 并能根据任务和资源状况自主选择适配的导航方式, 完成行为规划

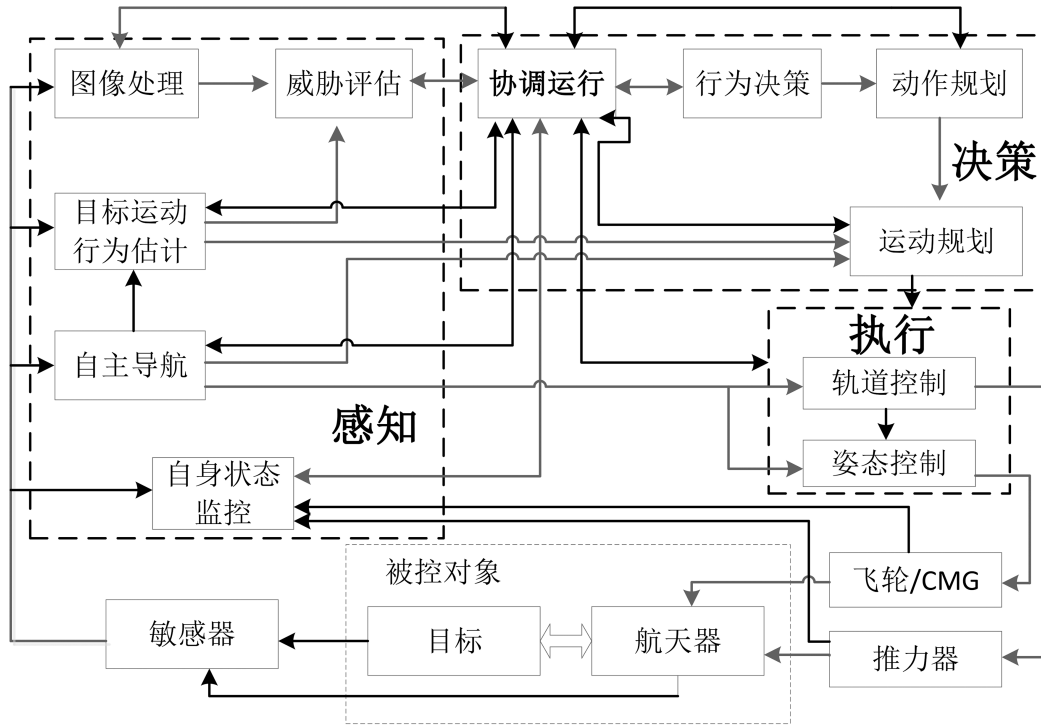


图 2 “感知—决策—执行”一体化控制系统闭环框架。

Figure 2 Closed-loop framework of the “perception-decision-execution” integrated control system.

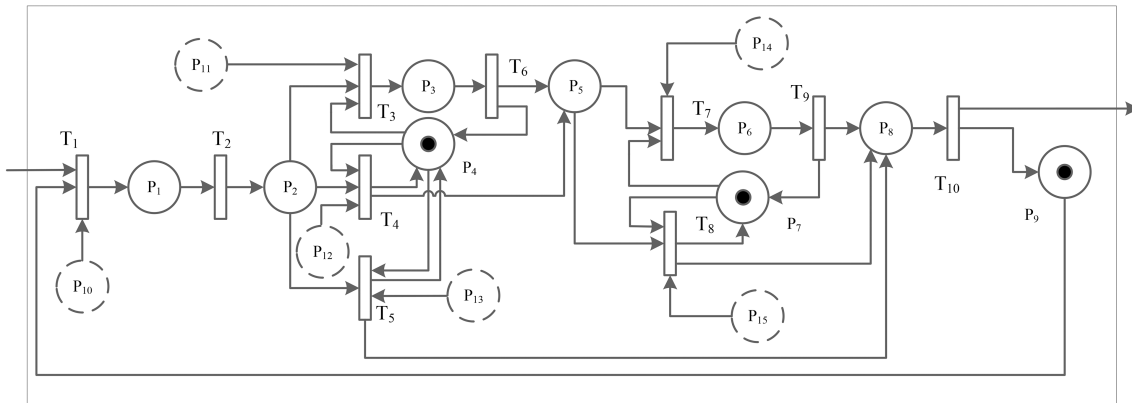


图 3 自主导航 Agent 的行为模型。

Figure 3 Behavioral model of the autonomous navigation agent.

与调度. 为支撑其自组织与协调运行, 需构建相应的 Petri 网行为模型, 如图 3 所示. 模型中库所分为过程库所与控制库所, 前者表达事件逻辑顺序, 后者用于实现特定行为触发条件 (如陀螺漂移超限且星敏可用时激活 T_3 变迁). 各库所与变迁的具体含义见表 1.

图像处理 Agent. 图像处理 Agent 基于光学相机、红外相机和激光雷达获取的图像数据, 实现目标形态特征提取、身份识别与分类以及近距离目标载荷的相对姿态估计, 并向其他模块输出处理结果. 由于图像数据来源多样, Agent 需具备光学图像、红外图像、激光点云图像的单模态处理能力, 以及“光学 + 红外”“光学 + 激光”“红外 + 激光”的双模态融合处理能力, 适应不同模态组合下的任务需求. 同时, 考虑远近距离下图像信息的可用性差异, Agent 还应具备在近距离场景中利用光学图像或激光点云提取目标姿态运动信息的能力. 为支撑上述功能的调度与协调, 建立图 4 所示的图像处理

表 1 自主导航 Agent 的 Petri 网库所和变迁含义.

Table 1 Explanation of places and transitions in Petri nets of the autonomous navigation agent.

库所		变迁
过程库所	控制库所	
P_1 : 数据采集完成状态	P_{10} : 协调模块启动工作标志位正常	T_1 : 导航数据采集
P_2 : 自主导航算法选配完成	P_{11} : 陀螺漂移阈值超过设定阈值, 且有正常的星敏测量信息	T_2 : 自主导航算法选配
P_3 : 参数修正完成	P_{12} : 仅采用星敏定姿、或仅采用陀螺定姿, 且不需要陀螺修正	T_3 : 陀螺参数修正
P_4 : 定姿冲突库所	P_{13} : GNSS、星敏、陀螺和加速度计信息正常	T_4 : 无需陀螺定姿
P_5 : 定姿完成	P_{14} : 加速度计漂移超过设定的阈值, 且有正常的 GNSS 测量信息	T_5 : 定姿定轨一体化
P_6 : 加速度计参数修正完成	P_{15} : 仅采用加速度计定轨或者仅采用 GNSS 定轨, 且加速度计漂移阈值满足要求	T_6 : 陀螺参数修正后定姿
P_7 : 定轨冲突库所		T_7 : 加速度计参数修正
P_8 : 定姿定轨完成		T_8 : 无需加速度计定轨
P_9 : 姿轨信息输出完成		T_9 : 加速度计参数修正后定轨
		T_{10} : 自主导航信息输出

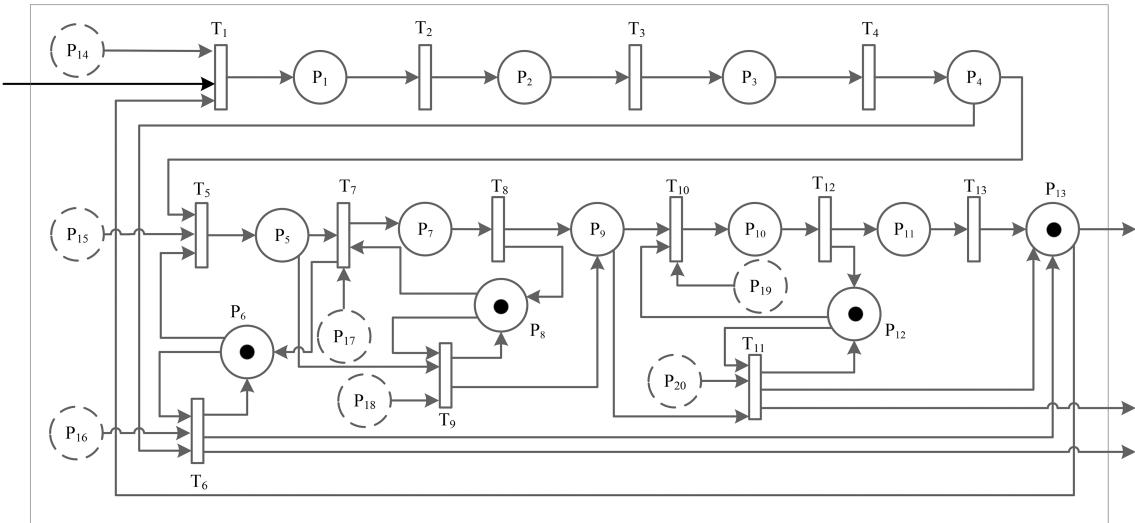


图 4 图像处理 Agent 的行为模型.

Figure 4 Behavioral model of the image processing agent.

表 2 图像处理 Agent 的 Petri 网库所和变迁含义.

Table 2 Explanation of places and transitions in Petri nets of the image processing agent.

库所		变迁
过程库所	控制库所	
P_1 : 图像采集完成状态	P_{14} : 协调模块启动工作标志位正常	T_1 : 图像采集
P_2 : 图像数据处理完成	P_{15} : 检测到有目标	T_2 : 图像数据处理
P_3 : 图像分割完成	P_{16} : 未检测到目标	T_3 : 图像分割
P_4 : 目标检测完成	P_{17} : 从多种模态数据中提取到目标特征	T_4 : 目标检测
P_5 : 特征提取完成	P_{18} : 仅从单种模态数据提取到目标特征	T_5 : 特征提取
P_6 : 多模态特征融合冲突库所	P_{19} : 具有满足目标识别的特征点数	T_6 : 无目标检测结果输出
P_7 : 多模态特征融合完成	P_{20} : 无法进行目标跟踪	T_7 : 多模态特征融合
P_8 : 目标识别冲突库所		T_8 : 多模态特征融合目标识别
P_9 : 目标识别完成		T_9 : 单模态特征目标识别
P_{10} : 目标跟踪冲突库所		T_{10} : 目标跟踪
P_{11} : 目标跟踪完成		T_{11} : 目标识别结果输出
P_{12} : 目标载荷姿态估计完成		T_{12} : 目标载荷姿态估计
P_{13} : 输出完成		T_{13} : 识别结果和载荷姿态估计输出

Agent 行为 Petri 网模型, 具体库所与变迁定义见表 2.

目标运动行为估计 Agent. 目标运动行为估计 Agent 在远距离时利用光学相机测量的目标方位

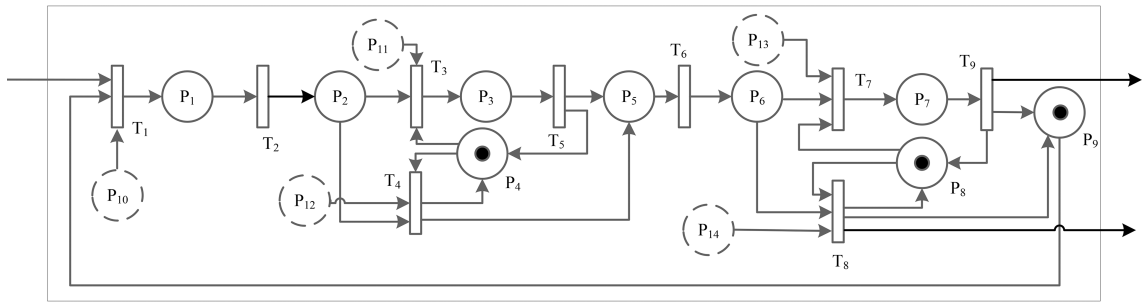


图 5 目标运动行为估计 Agent 的行为模型.
Figure 5 Behavioral model of the object motion behavior estimation agent.

表 3 目标运动行为估计 Agent 的 Petri 网库所和变迁含义.

Table 3 Explanation of places and transitions in Petri nets of the object motion behavior estimation agent.

库所		变迁
过程库所	控制库所	
P ₁ : 数据采集完成		T ₁ : 数据采集
P ₂ : 相对导航计算完成	P ₁₀ : 协调模块启动工作标志位正常且自主导航模块工作完成	T ₂ : 相对导航计算
P ₃ : 目标机动检测完成	P ₁₁ : 目标为非碎片情况和合作目标	T ₃ : 目标机动检测
P ₄ : 目标机动检测冲突库所	P ₁₂ : 目标为碎片情况、且定轨精度不满足要求	T ₄ : 目标定轨 (无机动检测)
P ₅ : 目标定轨完成	P ₁₃ : 相对距离小于设定的阈值	T ₅ : 目标定轨 (机动检测后)
P ₆ : 与目标轨道相交关系分析完成	P ₁₄ : 现有的数据不足以支撑行为估计、或已得到行为估计	T ₆ : 与目标轨道相交关系分析
P ₇ : 目标运动行为估计完成		T ₇ : 目标运动行为估计
P ₈ : 目标交会情况冲突库所		T ₈ : 目标信息输出 (无行为估计)
P ₉ : 输出完成		T ₉ : 目标信息输出 (行为估计后)

信息及航天器与合作目标间的距离, 结合自身轨道数据, 估算目标的相对位置和速度, 进而识别目标轨道信息及其与本体轨道的几何关系 (如共面、异面、相交、相离). 同时, 该 Agent 能检测目标的机动行为, 并基于相对运动与轨道几何关系, 判断其运动模式, 如绕飞、悬停、掠飞和伴飞等. 针对目标运动行为估计 Agent 的功能实现与协调问题, 建立如图 5 的行为模型, Petri 网模型中库所与变迁的具体含义如表 3 所示.

威胁评估 Agent. 威胁评估 Agent 综合图像处理 Agent 提供的目标身份、载荷特征与相对姿态信息, 以及目标运动行为估计 Agent 提供的相对位置、速度、方位和行为特征, 评估目标的威胁行为、能力及等级. 由于不同信息分别由图像处理 Agent 和目标运动行为估计 Agent 提供, 考虑到两类信息在获取和传输上的时间差异, 该 Agent 能根据信息完整度进行分层次评估, 并输出相应等级的威胁结果. 针对威胁评估 Agent 的功能实现与协调问题, 建立如图 6 的行为模型, Petri 网模型中库所与变迁的具体含义如表 4 所示.

自身状态监控 Agent. 自身状态监控 Agent 的功能是判断敏感器测量数据的有效性, 并能够进一步对敏感器、执行机构和控制计算机等进行故障诊断, 实现一体化控制系统的状态监控. 针对自身状态监控 Agent 的功能实现与协调问题, 建立如图 7 的行为模型, Petri 网模型中库所与变迁的具体含义如表 5 所示.

协调运行 Agent. 协调运行 Agent 的功能是: (1) 进行任务安排和冲突消解, 实现任务协调; (2) 进行系统资源协调和分配, 实现资源冲突消解; (3) 负责管理和协调自主导航 Agent、图像处理 Agent、目标运动行为估计 Agent、威胁评估 Agent、自身状态监控 Agent、行为决策 Agent、动作规划 Agent、运动规划 Agent 和执行 Agent 的活动状态, 确保各个功能 Agent 之间高效有序的协作完成任务和规避威胁; (4) 将各个模块需要的信息发送给相应模块. 针对协调运行 Agent 的功能实现与协调问题, 建立如图 8 的行为模型, Petri 网模型中库所与变迁的具体含义如表 6 所示.

行为决策 Agent. 根据威胁评估模块提供的威胁评估结果, 运动行为估计模块提供的相对位置、

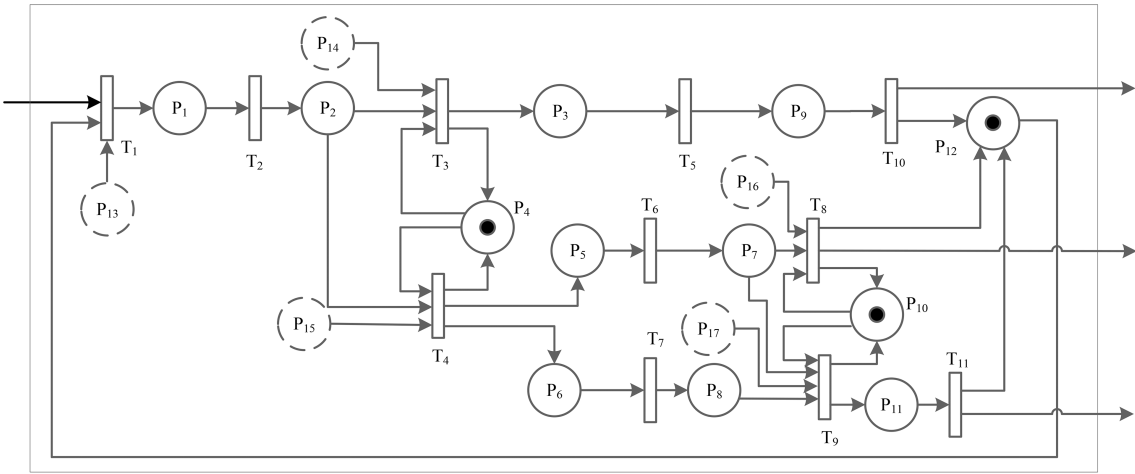


图 6 威胁评估 Agent 的行为模型.

Figure 6 Behavioral model of the threat assessment agent.

表 4 威胁评估 Agent 的 Petri 网库所和变迁含义.

Table 4 Explanation of places and transitions in Petri nets of the threat assessment agent.

库所		变迁
过程库所	控制库所	
P_1 : 数据采集完成状态		T_1 : 数据采集
P_2 : 威胁评估方式选择完成		T_2 : 威胁评估方式选择
P_3 : 碰撞概率求解完成		T_3 : 碰撞概率求解
P_4 : 威胁评估方法冲突库所	P_{13} : 协调模块启动工作标志位正常、且自主	T_4 : 威胁评估策略选择
P_5 : 威胁评估策略选择完成等待运动威胁评估	导航、图像处理、目标运动行为估计模块标	T_5 : 碰撞威胁评估
P_6 : 威胁评估策略选择完成等待意图威胁评估	志位与协调模块一致	T_6 : 运动威胁评估
P_7 : 运动威胁评估完成	P_{14} : 目标为非碎片情况和合作目标	T_7 : 意图威胁评估
P_8 : 意图威胁评估完成	P_{15} : 未知目标	T_8 : 运动威胁评估结果输出
P_9 : 碰撞威胁评估完成	P_{16} : 无目标图像信息	T_9 : 综合威胁评估
P_{10} : 综合威胁评估冲突库所	P_{17} : 目标图像信息和运动信息均可获取	T_{10} : 碰撞预警结果输出
P_{11} : 综合威胁评估完成		T_{11} : 综合威胁评估结果输出
P_{12} : 输出完成		

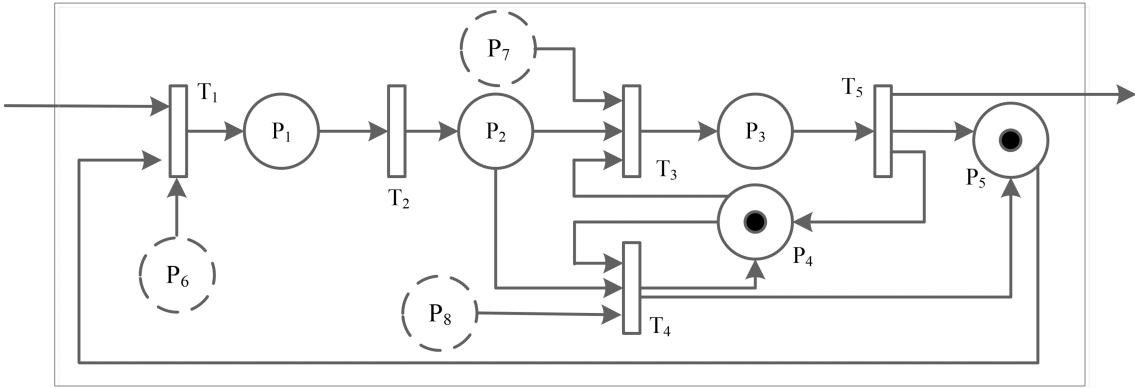


图 7 自身状态监控 Agent 的行为模型.

Figure 7 Behavioral model of the self-state monitoring agent.

速度和方位信息, 自主导航模块提供的航天器位置、速度、加速度、姿态、角速度和角加速度信息, 自身状态监控模块反馈的自身状态信息, 进行威胁规避决策 (或任务分配), 实现相应指标评估下的威胁规避 (或任务执行方案) 最优策略搜索. 针对行为决策 Agent 的功能实现与协调问题, 建立如图 9 的

表 5 自身状态监控 Agent 的 Petri 网库所和变迁含义.

Table 5 Explanation of places and transitions in Petri nets of the self-state monitoring agent.

库所		变迁
过程库所	控制库所	
P_1 : 数据采集完成		T_1 : 传感器和执行机构数据采集
P_2 : 数据有效性判断完成	P_6 : 周期时间触发	T_2 : 数据有效性判断
P_3 : 状态监测完成	P_7 : 传感器、执行机构和计算机存在有效性数据判别标志为无效	T_3 : 状态监测
P_4 : 状态监测冲突库所	P_8 : 所有传感器、执行机构和计算机数据有效标志均有效	T_4 : 输出 (无状态监测)
P_5 : 输出完成		T_5 : 输出 (状态监测后)

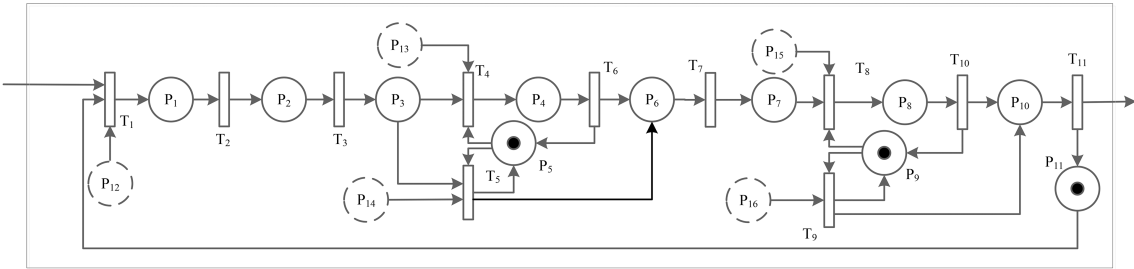


图 8 协调运行 Agent 的行为模型.

Figure 8 Behavioral model of the coordinated running agent.

表 6 协调运行 Agent 的 Petri 网库所和变迁含义.

Table 6 Explanation of places and transitions in Petri nets of the coordinated running agent.

库所		变迁
过程库所	控制库所	
P_1 : 数据采集完成状态		T_1 : 数据采集
P_2 : 状态更新完成		T_2 : 系统状态更新
P_3 : 任务冲突检测完成	P_{12} : 状态监控模块标志位和协调运行模块工作标志位正常, 或自主导航模块、图像处理模块、运动行为估计模块、威胁评估模块和协调运行模块均完成, 或行为决策模块、动作规划模块、运动规划模块和协调运行模块均完成, 或数据接收时间超过时间阈值	T_3 : 任务冲突检测
P_4 : 任务规划完成		T_4 : 任务规划
P_5 : 任务规划冲突库所	P_{13} : 有新的任务产生需要重新安排	T_5 : 任务调度 (无任务规划)
P_6 : 任务调度完成	P_{14} : 无新的任务产生	T_6 : 任务调度 (任务规划后)
P_7 : 资源冲突检测完成	P_{15} : 资源使用情况发生变化	T_7 : 资源冲突检测
P_8 : 资源分配完成	P_{16} : 资源使用情况不变	T_8 : 资源分配
P_9 : 资源分配冲突库所		T_9 : 资源调度 (无资源分配)
P_{10} : 资源调度完成		T_{10} : 资源调度 (资源分配后)
P_{11} : 输出完成		T_{11} : 输出

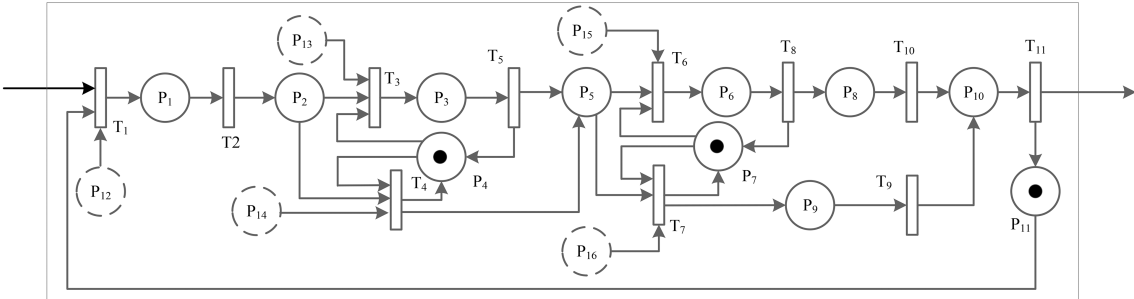


图 9 行为决策 Agent 的行为模型.

Figure 9 Behavioral model of the behavior decision agent.

行为模型, Petri 网模型中库所与变迁的具体含义如表 7 所示.

动作规划 Agent. 根据行为决策功能模块生成的威胁规避策略 (或任务执行方案), 和目标运动

表 7 行为决策 Agent 的 Petri 网库所和变迁含义.

Table 7 Explanation of places and transitions in Petri nets of the behavior decision agent.

库所		变迁
过程库所	控制库所	
P_1 : 数据采集完成		T_1 : 数据采集动作
P_2 : 任务执行效果评估完成		T_2 : 任务执行效果评估
P_3 : 行为策略调整完成	P_{12} : 协调模块工作标志位正常, 且自主导航模块、威胁评估模块、目标运动行为估计模块、状态监控模块标志位与协调模块对应一致	T_3 : 行为策略调整
P_4 : 行为策略调整冲突库所	P_{13} : 评估结果不满足要求	T_4 : 无行为策略调整的决策方法协调
P_5 : 决策方法协调完成	P_{14} : 评估满足要求或执行新任务或执行效果好的任务	T_5 : 决策方法协调
P_6 : 行为规划完成	P_{15} : 任务决策时间充足且较复杂	T_6 : 慎思行为规划
P_7 : 行为规划冲突库所	P_{16} : 任务简单且时间紧迫	T_7 : 反应式行为决策
P_8 : 慎思行为决策完成		T_8 : 慎思行为策略决策
P_9 : 反应式决策完成		T_9 : 反应式行为策略生成
P_{10} : 行为决策结果生成完成		T_{10} : 慎思行为策略生成
P_{11} : 输出完成		T_{11} : 输出

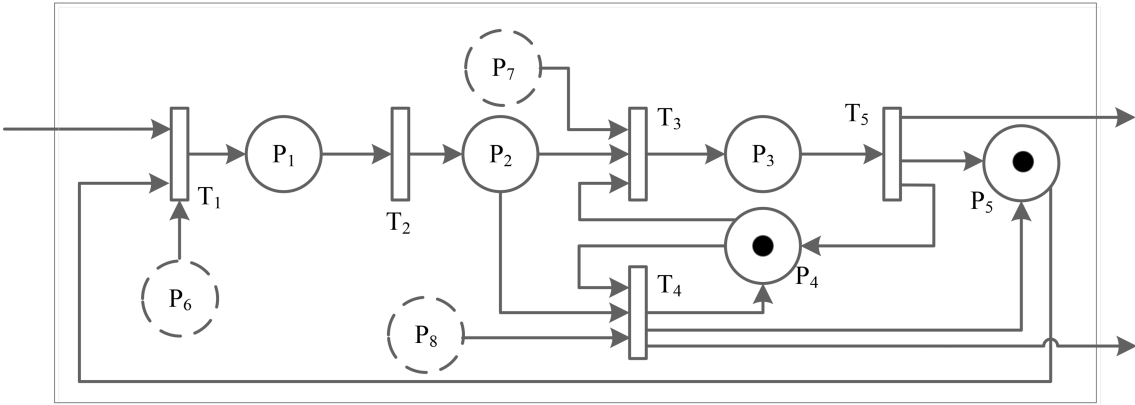


图 10 动作规划 Agent 的行为模型.

Figure 10 Behavioral model of the action planning agent.

表 8 动作规划 Agent 的 Petri 网库所和变迁含义.

Table 8 Explanation of places and transitions in Petri nets of the action planning agent.

库所		变迁
过程库所	控制库所	
P_1 : 数据采集完成		T_1 : 数据采集
P_2 : 评估完成	P_6 : 协调模块工作标志位正常且目标运动行为估计模块、自主导航模块、行为决策模块完成	T_2 : 动作规划结果评估
P_3 : 动作规划完成	P_7 : 动作规划结果执行效果不满意或者未执行行为策略	T_3 : 动作规划
P_4 : 动作规划冲突库所	P_8 : 动作规划结果执行效果满足要求	T_4 : 输出动作序列 (无规划)
P_5 : 输出完成		T_5 : 输出动作序列 (有规划)

行为估计功能模块提供的相对位置、速度和方位信息, 以及自主导航功能模块提供的航天器位置、速度、加速度、姿态、角速度和角加速度信息, 生成不同优化指标导向的姿态、轨道、载荷最优动作序列(或任务执行方案). 针对动作规划 Agent 的功能实现与协调问题, 建立如图 10 的行为模型, Petri 网模型中库所与变迁的具体含义如表 8 所示.

运动规划 Agent. 根据动作规划功能模块输出的姿态轨道动作序列、目标运动行为估计功能模块提供的相对位置、速度和方位信息, 以及自主导航功能模块提供的航天器位置、速度、加速度、姿态、角速度和角加速度信息生成期望的姿态和轨道运动轨迹. 针对运动规划 Agent 的功能实现与协调问题, 建立如图 11 的行为模型, Petri 网模型中库所与变迁的具体含义如表 9 所示.

执行 Agent. 根据运动规划功能模块提供的期望姿态和轨道运动轨迹, 和目标运动行为估计功能

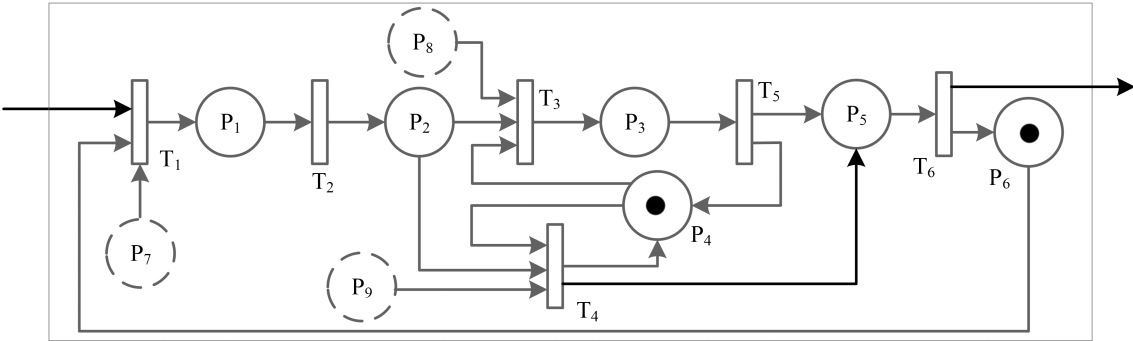


图 11 运动规划 Agent 的行为模型.
Figure 11 Behavioral model of the motion planning agent.

表 9 运动规划 Agent 的 Petri 网库所和变迁含义.

Table 9 Explanation of places and transitions in Petri nets of the motion planning agent.

库所		变迁
过程库所	控制库所	
P ₁ : 数据采集完成	P ₇ : 协调模块工作标志位正常, 且动作规划模块、自主导航模块、目标	T ₁ : 数据采集
P ₂ : 评估完成	运动行为估计模块均完成	T ₂ : 规划结果评估
P ₃ : 参数选配完成	P ₈ : 需要重新规划运动轨迹	T ₃ : 参数选配
P ₄ : 参数选配冲突库所	P ₉ : 不需要重新规划运动轨迹	T ₄ : 无参数选配轨迹生成
P ₅ : 轨迹生成完成		T ₅ : 参数选配轨迹生成
P ₆ : 输出完成		T ₆ : 规划结果输出

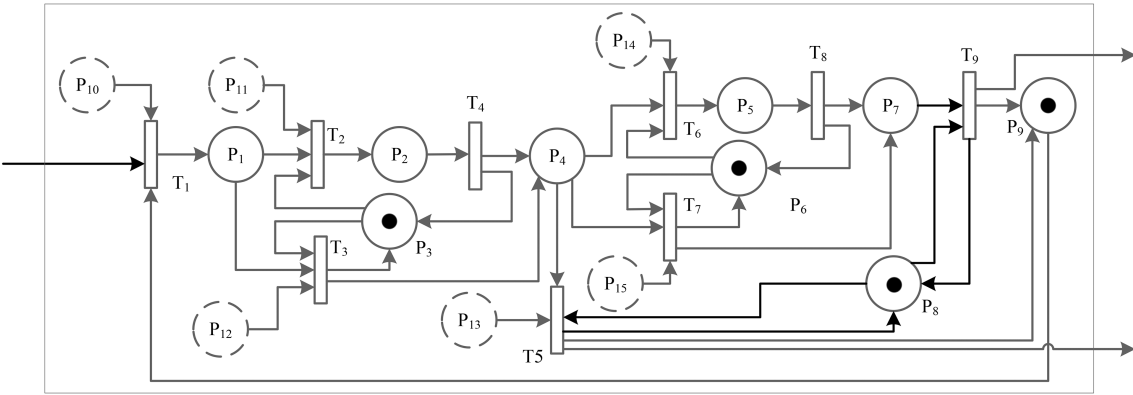


图 12 执行 Agent 的行为模型.
Figure 12 Behavioral model of the executive agent.

模块提供的相对位置、速度和方位信息, 以及自主导航功能模块提供的航天器位置、速度、加速度、姿态、角速度和角加速度信息生成姿态和轨道控制指令. 针对执行 Agent 的功能实现与协调问题, 建立如图 12 的行为模型, Petri 网模型中库所与变迁的具体含义如表 10 所示.

“感知 – 决策 – 执行” 控制系统行为模型. 根据图 2 所示的一体化控制系统闭环框架, 分析各子功能模块 Agent 模型间的直接交互关系, 并将其集成在一起, 从而形成如图 13 所示一体化控制系统 Petri 网模型, Petri 网模型中库所与变迁的具体含义如表 11 所示.

表 10 执行 Agent 的 Petri 网库所和变迁含义.

Table 10 Explanation of places and transitions in Petri nets of the executive agent.

库所		变迁
过程库所	控制库所	
P_1 : 数据采集完成		T_1 : 数据采集
P_2 : 参数选配完成	P_{10} : 协调模块启动工作标志位正常, 且运动规划模块和自主导航模块均完成	T_2 : 参数选配
P_3 : 参数选配冲突库所		T_3 : 姿控指令生成 (不用参数选配)
P_4 : 姿控指令生成完成	P_{11} : 工作模式发生变化且当前参数无法满足性能指标	T_4 : 姿控指令生成
P_5 : 轨控指令生成完成	P_{12} : 工作模式未发生变化且性能指标满足要求	T_5 : 姿控指令输出
P_6 : 轨控指令生成冲突库所	P_{13} : 不需要进行轨控且姿控指令不需要进行力矩分配	T_6 : 轨控指令生成
P_7 : 力矩分配完成	P_{14} : 需要轨控且需要轨控力矩分配	T_7 : 无轨控力矩分配
P_8 : 指令输出冲突库所	P_{15} : 需要轨控且不需要轨控力矩分配	T_8 : 姿轨控力矩分配
P_9 : 输出完成		T_9 : 姿轨控制指令输出

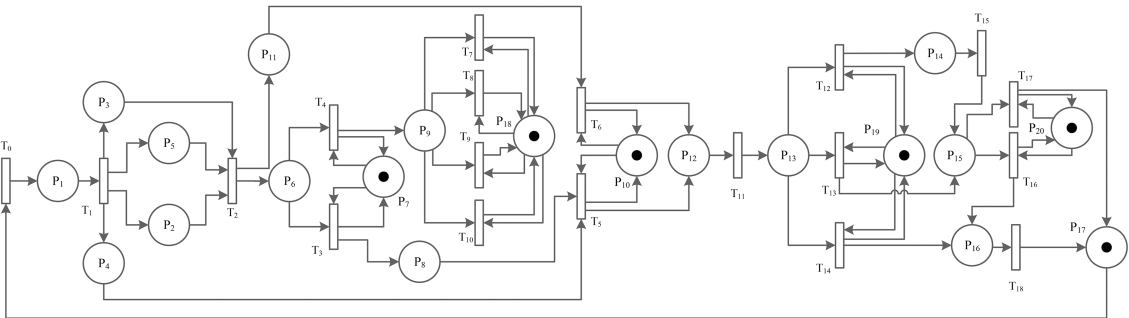


图 13 “感知 – 决策 – 执行” 控制系统整体模型.

Figure 13 “Perception-decision-execution” control system model.

表 11 “感知 – 决策 – 执行” 控制系统模型的 Petri 网库所和变迁含义.

Table 11 Explanation of places and transitions in the Petri net of the “perception-decision-execution” system.

库所		变迁
P_1 : 传感器测量信息完成	P_{11} : 图像处理开始	T_0 : 初始化
P_2 : 自身状态监控完成	P_{12} : 威胁评估完成	T_1 : 接收敏感器信息
P_3 : 自主导航信息	P_{13} : 决策模块协调信息 (有威胁)	T_2 : 感知模块协调
P_4 : 目标运动估计信息	P_{14} : 行为决策完成	T_3 : 目标行为估计 (自主导航后)
P_5 : 图像处理信息	P_{15} : 运动规划完成	T_4 : 决策模块协调 (自主导航后)
P_6 : 自主导航完成	P_{16} : 动作规划完成	T_5 : 图像处理
P_7 : 自主导航、决策模块冲突库所	P_{17} : 执行完成	T_6 : 威胁评估 (无图像信息)
P_8 : 目标运动估计完成	P_{18} : 决策模块冲突库所 (无威胁)	T_7 : 威胁评估 (有图像信息)
P_9 : 决策模块协调信息 (无威胁)	P_{19} : 决策模块冲突库所 (有威胁)	T_8 : 行为决策 (自主导航后)
P_{10} : 威胁评估冲突库所	P_{20} : 运动规划、动作规划冲突库所	T_9 : 运动规划 (自主导航后)
	P_{21} : 图像处理完成	T_{10} : 动作规划自主导航后
		T_{11} : 执行 (自主导航后)
		T_{12} : 决策模块协调
		T_{13} : 行为决策 (决策模块协调后)
		T_{14} : 运动规划 (决策模块协调后)
		T_{15} : 动作规划 (决策模块协调后)
		T_{16} : 运动规划 (行为决策后)
		T_{17} : 动作规划 (运动规划后)
		T_{18} : 执行 (运动规划后)
		T_{19} : 执行 (动作规划后)

4 行为演化与动态响应特性分析

4.1 动态特性

为了系统描述和量化系统行为在演化过程中所呈现的具体表现形式, 如状态迁移路径的分支变化、行为响应的时序特征及资源调度的动态调整, 需深入理解其行为动态特性. 该特性体现系统行为“如何演化”的过程性与性能表现, 是其在动态环境下适应性与稳定性的集中反映. 行为动态特性并非由单一因素主导, 而是由特征模型、逻辑架构与协调机制三者耦合作用.

特征模型定义了系统核心模块 (感知、决策、执行) 的功能属性、信息处理能力及其交互机制, 描述了感知模块可获取的威胁信息类型 (如监测能力、异动检测精度等)、决策模块基于感知进行推理与行为规划的准则 (如任务目标、安全约束、动作集, 以及执行模块将策略转化为动作的能力边界 (如轨道机动、姿态调整精度). 特征模型从根本上决定了系统整体行为的发生与实现, 规定其外在动态特性的表现形式, 并界定内在演化特征得以遵循的基础条件和能力边界, 并为后续的逻辑架构设计和协调

运行机制制定了基础性的约束框架。

逻辑架构描述系统内部功能模块的组织关系与信息/控制流路径。架构规定的模块间固定连接和交互模式决定了行为发生的基本时序依赖关系,其合理性直接关系到系统行为的正确性和稳定性。通过特定的组织方式,逻辑架构能够整合不同模块的能力,使系统展现出超越单个模块能力的复杂涌现行为,如基于多源传感器融合的态势感知、多智能体协同规划等。逻辑架构为系统行为的动态演化提供了结构性的约束和赋能基础,定义了行为在系统中“如何组织”和“如何流动”的拓扑框架。本文通过 Petri 网建模形式化描述该架构下的行为交互与状态迁移。

协调运行机制嵌套于架构之上,包含用于行为选择、状态跳转、资源调度与冲突处理的规则与算法,依据当前状态和外部输入动态决策后续动作。其作用并非直接生成行为序列,而是在特征模型与架构所定义的状态空间内,选择演化分支。在 Petri 网中,这体现在变迁的使能条件与优先级设定,反映系统的响应实时性与决策灵活性。协调运行机制与行为演化特征之间既有交叉也有边界:协调机制为系统提供运行的有序性与高效性,演化特征反映系统自适应调整与优化的能力;二者的融合是构建具备强鲁棒性与适应性复杂系统的关键。

综上,一体化控制系统的行为动态特性由特征模型、逻辑架构与协调运行机制三者共同作用决定。本文聚焦于利用 Petri 网对系统逻辑架构进行形式化建模,识别系统不同条件下行为路径演变与调整机制,展现多场景下的动态响应特性,刻画系统在复杂条件下的行为演化特征。

4.2 行为演化与动态响应特性仿真分析

本节利用 CPNTools 对航天器“感知-决策-执行”一体化控制系统的 Petri 网模型进行状态空间分析,旨在揭示系统在所有可达状态下的行为演化路径及其动态响应特性,评估系统对不同输入情境的适应性与稳定性,并验证模型结构的正确性与系统的可达性,确保航天器控制系统在任务全周期稳定运行。CPNTools 生成的标准状态空间报告提供了系统行为演化的关键指标信息,为分析系统的运行机制与控制性能提供支撑。

为增强系统模型的应用导向,本文引入碎片规避场景作为典型实例,刻画航天器在面对空间碎片潜在威胁时,如何通过感知-决策-执行一体化控制实现动态响应与行为演化。该场景综合考虑碎片是否存在、感知资源是否完备、图像处理能力是否可用等多因素条件,构建具有典型性的 Petri 网系统初始标识。如图 14 所示为航天器规避威胁“感知-决策-执行”一体化系统 Petri 网模型的状态空间报告。分析表明状态空间由 35 个节点和 63 条有向弧构成,反映了系统在不同输入激励下所有可能状态及其状态间的转换关系。每个节点代表系统的一种特定状态,而每条弧则表示系统从一个状态演化至另一个状态的转移。报告中“状态空间为 Full”的结论表明,在模型规则下,状态空间已经被完整探索,所有逻辑上可达的系统状态都已被涵盖。强连通分量图同样包含 35 个节点和 63 条弧,进一步证实了系统内任意两个状态之间均存在至少一条可达路径,说明系统整体状态空间具有高度连通性,为系统行为的灵活演化提供了保障。

在活跃性属性方面,报告中给出了 3 个死标识(标识 18, 34, 35)。这些死标识并非指示系统故障或死锁,而是在特定输入条件下,系统行为演化的正常终止状态。报告中未出现死变迁实例,表明在当前模型结构下,系统能够根据不同的输入条件有效地进行状态转移,避免了冗余状态的产生,保证系统行为演化的效率和可靠性。此外,公平性属性分析结果显示,系统的状态转移序列中不存在无限循环的变迁序列,确保了系统行为的有限性,避免潜在的无限循环或死锁现象,为系统的稳定运行提供了保障。综上,模型中不存在非预期死锁、死变迁及孤立状态,且所有可达状态高度连通,印证了模型具有自洽性,其结构和规则能够一致、有效地描述目标系统的行为演化。

根据状态空间报告获得系统的基本性质,接下来将通过可达图分析进一步研究系统的状态转移路径,尤其是各个标识之间的可达关系,以验证系统是否满足预期的动态行为和稳定性要求。系统共有 71 条可达路径通向 3 个死标识,保证所有可行执行序列均收敛至预设终止状态,揭示系统动态行为的

Statistics

State Space

Nodes: 35
Arcs: 63
Secs: 0
Status: Full

Scc Graph

Nodes: 35
Arcs: 63
Secs: 0

Liveness Properties

Dead Markings

[18, 34, 35]

Dead Transition Instances

None

Live Transition Instances

None

Fairness Properties

No infinite occurrence sequences.

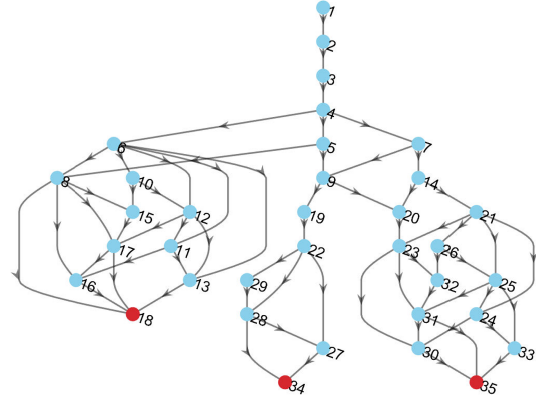


图 14 状态空间报告.

Figure 14 State space report.

图 15 (网络版彩图) 系统可达图.

Figure 15 (Color online) Reachability graph of the system.

非确定性特征, 反映系统在面对不同环境和输入时的多样化响应.

在图 15 所示的可达图中, 初始标识为 $M_0(p_0) = 1$, $M_0(p_7) = 1$, $M_0(p_{10}) = 1$, $M_0(p_{17}) = 1$, $M_0(p_{18}) = 1$, $M_0(p_{19}) = 1$, $M_0(p_{20}) = 1$, $M_0(p_{21}) = 1$. 为进一步剖析系统在不同任务情境下的动态响应机制与行为演化特征, 本小节选取状态空间中 3 条具有代表性的演化路径, 分别对应以下 3 类典型场景: (1) 无威胁; (2) 存在威胁且图像处理可用; (3) 存在威胁但图像处理不可用. 其中, M_n ($1 \leq n \leq 35$) 表示状态空间可达图中的第 n 个标识, 其与系统状态之间的对应关系详见表 12.

路径一: 无威胁场景. 路径为 $M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_4 \rightarrow M_5 \rightarrow M_8 \rightarrow M_{18}$. 在该路径中, 系统完成传感器数据接收与图像处理, 成功判断当前环境中无空间碎片威胁, 决策模块直接发起任务执行指令. 整体流程紧凑、逻辑清晰, 体现了系统在低风险条件下的快速闭环响应能力与任务推进效率.

路径二: 存在威胁, 图像处理可用场景. 路径为 $M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_4 \rightarrow M_5 \rightarrow M_9 \rightarrow M_{19} \rightarrow M_{22} \rightarrow M_{29} \rightarrow M_{28} \rightarrow M_{27} \rightarrow M_{34}$. 在此情境中, 系统成功获取图像数据, 图像处理模块完成空间目标识别与行为估计, 随后触发威胁判断与决策, 并最终完成规避执行操作. 该路径完整体现了系统在信息完备条件下的协同决策链与多 Agent 间的逻辑协同能力.

路径三: 存在威胁, 图像处理不可用场景. 路径为 $M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_4 \rightarrow M_7 \rightarrow M_{14} \rightarrow M_{21} \rightarrow M_{25} \rightarrow M_{24} \rightarrow M_{33} \rightarrow M_{35}$. 本路径对应系统在识别到空间碎片威胁但图像资源暂不可用的情况下 (如图像数据未及时接收), 系统启用无图像模式下的威胁评估与规避策略, 最终实现动作执行. 路径末

表 12 标识与系统状态对照表.
Table 12 Comparison table of markings and system states.

标识	系统状态	标识	系统状态	标识	系统状态
M_1	等待传感器数据	M_{13}	执行 (无威胁)	M_{25}	运动规划 (有威胁, 无图像)
M_2	接收传感器数据	M_{14}	威胁评估 (有威胁, 无图像)	M_{26}	行为决策 (有威胁, 无图像)
M_3	自身状态监控	M_{15}	行为决策 (图像处理后, 无威胁)	M_{27}	动作规划 (有威胁, 有图像)
M_4	自主导航或者图像处理	M_{16}	动作规划 (图像处理后, 无威胁)	M_{28}	运动规划 (有威胁, 有图像)
M_5	图像处理	M_{17}	运动规划 (图像处理后, 无威胁)	M_{29}	行为决策 (有威胁, 有图像)
M_6	协调 (有图像)	M_{18}	执行 (图像处理后, 无威胁)	M_{30}	动作规划 (有威胁, 有图像)
M_7	目标行为估计 (无图像)	M_{19}	目标行为估计 (有图像)	M_{31}	运动规划 (有威胁, 有图像)
M_8	决策模块协调 (无威胁)	M_{20}	图像处理	M_{32}	行为决策 (有威胁, 有图像)
M_9	目标行为估计 (有图像)	M_{21}	决策模块协调 (有威胁, 无图像)	M_{33}	执行 (有威胁, 无图像)
M_{10}	行为决策 (无威胁状态)	M_{22}	决策模块协调 (有威胁, 有图像)	M_{34}	执行 (有威胁, 有图像)
M_{11}	动作规划 (无威胁状态)	M_{23}	图像处理	M_{35}	执行 (有威胁, 有图像)
M_{12}	运动规划 (无威胁状态)	M_{24}	动作规划 (有威胁, 无图像)		

端 M_{33} 状态下图像处理相关变迁保持使能状态, 是模型结构中为支持图像资源动态恢复与场景扩展而保留的设计机制, 不影响当前闭环行为的稳定性与执行结果, 体现系统在受限环境下的容错性与决策能力.

5 总结与展望

航天器“感知 – 决策 – 执行”一体化控制系统结构复杂, 多环路嵌套, 功能组成多, 存在大量决策行为, 元素之间的行为和交互作用关系复杂, 采用单一数学语言难以完全描述系统功能与行为演化特征. 为此, 本文围绕该类控制系统的行为建模与演化分析问题, 提出了一种融合 Agent 与 Petri 网的系统行为建模方法. 采用“分散 – 集成”的建模思想, 将系统划分为功能模块并抽象为 Agent, 宏观层面建模系统结构与功能逻辑, 微观层面则基于 Petri 网构建各 Agent 行为模型及各 Agent 之间交互作用关系的行为模型. 通过构建基于 CPNTools 的系统仿真模型, 对控制系统行为演化过程进行建模分析, 揭示系统动态行为与模块参数、逻辑架构、协同机制之间的内在关联. 研究结果为航天器在轨威胁感知与自主规避控制系统的功能设计、性能分析和验证评估提供了结构化、可验证的建模分析新路径与理论支撑. 未来研究可进一步拓展该方法的适应性, 融合博弈论、机器学习等智能机制, 以增强系统在复杂动态轨道环境下的自主决策能力与任务鲁棒性.

参考文献

1 Yuan L, Xiong K, Zhao Q. Autonomous starlight navigation technology based on relativistic perturbations. Sci Sin Inform, 2025, 55: 1140–1156 [袁利, 熊凯, 赵琴. 基于相对论效应的自主星光导航技术. 中国科学: 信息科学, 2025, 55: 1140–1156]

2 Moranta S, Hrozensky T, Dvoracek M. Towards a European Approach to Space Traffic Management. ESPI Report 71, 2020

3 Martin M, Pfrang K, Weeden B. U.S. military and intelligence rendezvous and proximity operations in space. Secure World Foundation, 2021. 1–4

4 Gong J G, Ning Y, Lv N. Development and enlightenment of space based situational awareness technology for high orbit in the United States. Aerospace Control Appl, 2021, 47: 1–7 [宫经刚, 宁宇, 吕楠. 美国高轨天基态势感知技术发展启示. 空间控制技术与应用, 2021, 47: 1–7]

5 Yuan L, Jiang T T. Review on intelligent autonomous control for spacecraft confronting orbital threats. Acta Autom Sin, 2023, 49: 229–245 [袁利, 姜甜甜. 航天器威胁规避智能自主控制技术研究综述. 自动化学报, 2023, 49: 229–245]

6 Braun V, Flohrer T, Krag H, et al. Operational support to collision avoidance activities by ESA’s space debris office. CEAS Space J, 2016, 8: 177–189

- 7 Merz K, Virgili B B, Braun V, et al. Current collision avoidance service by ESA's space debris office. In: Proceedings of the 7th European Conference on Space Debris, 2017. 18–21
- 8 Yuan L. Spacecraft intelligent autonomous control technology toward uncertain environment. *J Astronaut*, 2021, 42: 839–849 [袁利. 面向不确定环境的航天器智能自主控制技术. *宇航学报*, 2021, 42: 839–849]
- 9 Qin C, Liu Y, Wang T, et al. TOGA-based fuzzy grey cognitive map for spacecraft debris avoidance. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 2025, 33: 1793–1802
- 10 Chen X, Wang T, Qiu J, et al. Mission planning on autonomous avoidance for spacecraft confronting orbital debris. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2025, 61: 4115–4126
- 11 Yuan L, Huang H. Current trends of spacecraft intelligent autonomous control. *Aerospace Control Appl*, 2019, 45: 7–18 [袁利, 黄煌. 空间飞行器智能自主控制技术现状与发展思考. *空间控制技术与应用*, 2019, 45: 7–18]
- 12 Ning X L, Gui M Z, Huang Y Q, et al. TOA and TDOA-based augmented state pulsar integrated navigation error suppression method. *Sci Sin Inform*, 2021, 51: 971–984 [宁晓琳, 桂明臻, 黄月清, 等. 基于 TOA 和 TDOA 的增广状态脉冲星组合导航误差抑制方法. *中国科学: 信息科学*, 2021, 51: 971–984]
- 13 Wang P, Wang T, Sun J, et al. Dual-quaternion-based dynamics modeling for a rigid-flexible coupling satellite. *J Guidance Control Dyn*, 2023, 46: 1298–1313
- 14 Xun Q J, Song B F, Pei Y, et al. Analysis of the factors influencing the combat effectiveness of airborne laser weapon system based on Agent modeling. *Syst Eng Electron*, 2020, 42: 826–835 [鄢奇佳, 宋笔锋, 裴扬, 等. 基于 Agent 建模的机载激光武器系统作战效能影响因素分析. *系统工程与电子技术*, 2020, 42: 826–835]
- 15 Pu W, Li X. Research on warfare modeling method based on agent action diagrams. *Syst Eng Electron*, 2017, 39: 795–805 [蒲玮, 李雄. 基于 Agent 行动图的作战建模方法. *系统工程与电子技术*, 2017, 39: 795–805]
- 16 Ding G, Cui L J, Han C, et al. Simulation evaluation analysis of aviation fleet support based on multi-Agent. *J Beijing Univ Aeronaut Astronaut*, 2023, 49, 2306–2316 [丁刚, 崔利杰, 韩诚, 等. 基于多 Agent 的航空机群保障仿真评估分析. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49: 2306–2316]
- 17 Vazquez C R, Aguayo-Lara E. Immediate transitions in timed continuous petri nets: performance evaluation and control. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 2023, 53: 3750–3761
- 18 Cong X, Fanti M P, Mangini A M, et al. Critical observability of labeled time petri net systems. *IEEE Trans Automat Sci Eng*, 2023, 20: 2063–2074
- 19 Li H, Yi P, Wu J X, et al. A two-dimension security assessing model for CMDs combined with Generalized Stochastic Petri net. *Sci Sin Inform*, 2020, 50: 1944–1960 [杨昕, 李挥, 邬江兴, 等. 融合广义随机 Petri 网的二维拟态安全评估模型. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50: 1944–1960]
- 20 Zhao J T, Chen Z Q, Liu Z X. A novel matrix approach for the stability and stabilization analysis of colored Petri nets. *Sci China Inf Sci*, 2019, 62: 192202

Behavioral evolution characteristics of the integrated control system for spacecraft based on Petri nets

Li YUAN^{1,2*}, Shan LUO³, Weijie SHI³, Min LI², Kangkang SUN³, Chunling WEI²,
Tiantian JIANG² & Jianbin QIU³

1. *China Academy of Space Technology, Beijing 100190, China*

2. *Science and Technology on Space Intelligent Control Laboratory, Beijing 100190, China*

3. *School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*

* Corresponding author. E-mail: yuanli@spacechina.com

Abstract This paper investigates the behavioral evolution of “perception-decision-execution” integrated control system for spacecraft under spatiotemporal constraints. The goal is to ensure that the system not only accomplishes scheduled assigned tasks, but also autonomously perceives and avoids orbital threats in uncertain and dynamically changing space environments. A behavior modeling approach integrating agent-based modeling and Petri nets is proposed based on a decentralized-integrated modeling philosophy. The integrated control system is composed of multiple functional modules, each module denoted by an agent, to represent the functional structure of the system at a macro-level. At the micro-level, Petri nets are utilized to construct behavior models for each functional agent. Furthermore, Petri nets are used to model the behavioral interactions and functional relationships between agents under the proposed closed-loop control framework. This forms a comprehensive behavioral evolution model for the integrated control system. The dynamic characteristics of system behaviors and their relationships among system parameters, logical architecture, and coordination mechanisms are analyzed. Based on CPNTools, a simulation model was constructed to emulate the system’s response under a debris threat scenario. The simulation results demonstrate that the model exhibits multi-path behavioral evolution, with good liveness, fairness, and structural connectivity. It is capable of autonomously selecting appropriate response paths according to different perception outcomes, thereby achieving dynamic obstacle avoidance and task adjustment following threat identification, which highlights the system’s adaptability and stability.

Keywords “perception-decision-execution” closed-loop control, multi-agent model, Petri net, behavior model, behavioral evolutionary characteristics