http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0361

民用无人系统运行场景架构设计与建模技术

郭泰*，安一平，舒振杰，蒋觉义，江雨航
(中国航空综合技术研究所，北京 100028)

摘 要：民用无人系统运行场景是全空间无人体系及低空经济产业价值的汇聚地，是推动新产业规模化发展的关键，同时作为典型的复杂体系，具有边界动态、多级涌现、利益权衡、持续演化等特征，必须按照体系工程的新思维开展架构设计，确保体系安全、高效运行。通过对民用无人系统运行场景架构设计与建模技术研究，提出运行场景“6+6”静动态要素元模型，从能力架构、运行架构、系统架构、标准架构对运行场景进行多视角架构设计和建模，形成一套从要素识别、架构设计到架构建模的完整方法，从而为新型基础设施建设、无人系统研制及选型、政策法规和标准规范的制定提供指导，为无人系统运行场景的搭建和产业体系化发展提供技术支撑。

关 键 词：低空经济；全空间无人体系；运行场景；架构建模；无人系统
中图分类号：V279; F562
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)09-3052-14

“全空间无人体系”和“低空经济”是国家在新业态新领域的战略部署，是发展战略新兴产业和新质生产力的典型代表。中共中央办公厅、国务院办公厅《关于完善市场准入制度的意见》[1]中明确提出“率先推动海陆空全空间智能无人体系应用和标准建设”，低空经济也连续两年被写入中央政府工作报告中，近期中央还出台了包括完善监管、促进消费、健全体系、发展产业、加强立法、保障空域等在内的多项政策助推低空经济高质量发展。在地方层面，各省市地方政府加速布局，截至2024年底，各地共出台全空间无人体系及低空经济相关政策文件225部，从行动指南、规划条例、扶持政策等不同视角加速基础设施和应用场景的建设落地[2]；2025年全国30省份将低空经济直接写入政府工作报告，囊括了产业升级、先导示范、设备更新、基础设施建设等诸多发力点。从产业培育和发展角度，无人系统场景涵盖无人系统全生命周期，包括无人系统研制、验证(含检测认证)、运行(正常、非正常、维修保障)、报废处置等环节，其中，无人系统运行场景是指对无人机、无人车、无人船、电动垂直起降航空器(electric vertical takeoff and landing aircraft, eVTOL)等海陆空多种无人系统及其配套基础设施一体运行和监管的新型综合应用体系，运行场景的突破将是全空间无人体系及低空经济取得规模化发展的核心，是产业价值的主要聚集区，也是带动产业链的核心增长点。

一方面，运行场景建设是让技术和产品走向产业化的关键载体[3]，场景驱动能够引领开创性技术的突破并推动空域资源管理改革[4]；另一方面，针对运行场景当前面临的普及率较低、消费潜力尚未充分激发等体系性问题[5]，亟需形成统一的架构，推动基础设施建设、无人系统研制、政策法规和标准规范等协同发展。当前国内外对于全空间无人体系及低空经济的相关研究大多集中在发展路径[6]、飞行器关键技术[7]、空域管理[8]、立体交通[9]、基础设施[10]、信息安全[11]、产业生态[12]、法律保障[13]等方面。对于运行场景的总体性、架构性技术研究则略显单薄，主要以论述的方式对于场景模式[14]、场景拓展[15]、

收稿日期：2025-06-14；录用日期：2025-10-04；网络出版时间：2025-11-28 17:45
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20251128.1603.003
*通信作者. E-mail：guotai101@126.com

引用格式：郭泰，安一平，舒振杰，等. 民用无人系统运行场景架构设计与建模技术[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(9)：3052-3065. Guo T，An Y P，Shu Z J，et al. Architecture design and modeling technology for civil unmanned system operation scenarios[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(9)：3052-3065 (in Chinese).

场景赋能[16]、场景驱动新质生产力发展[17]等进行阐释。

新兴产业发展早期经常面临运行场景不明确或受限等情况[18], 无人系统运行场景作为典型的复杂系统之系统(system of systems, SoS), 其子系统之间相互依赖、相互影响、连接复杂[12], 且各类子系统要素之间的运行规则仍处于不断探索阶段。需要从体系工程角度、结合架构理论, 对运行场景进行多视角分析, 明确运行场景的内涵边界、总体架构, 从而为运行场景中各类新型基础设施、无人设备、法规标准等建设提供顶层指引。因此, 本文从运行场景基本逻辑出发, 对运行场景静态、动态要素进行研究, 并将体系工程与典型架构框架[19]相结合, 对运行场景总体架构进行多视角设计。结合相关建模工具和方法, 对运行场景架构进行建模, 形成无人系统运行场景架构模型, 为后续基于模型开展各类系统或产品研制的运行概念、需求捕获及功能分析等关键政策法规和标准规范建设提供基础。

1　场景分析

1.1　场景要素分析

“场景”一词在不同的领域和背景下, 具有不同的涵义, 在分布式交互仿真标准 IEEE 1278-1993 中, 场景被定义为对初始条件和重大事件时间线的描述[20]。美国国防部高层级架构术语中强调场景应识别主要实体及其能力、行为及随着时间推移与所有相关环境条件的相互作用[21]。北约科学与技术组织建模与仿真 053 小组将场景定义为在与相关事件有关的指定时间框架内对假设或真实区域、环境、手段、目标和事件的描述[22]。根据国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)从需求工程角度对运行场景的定义, 运行场景“描述想象中的事件序列, 包括产品或服务与其环境和用户之间的互动, 以及产品或服务组件之间的互动”[23]。目前场景分析在民机需求捕获和确认中是已被广泛认可的技术方法[24], 但系统工程或建模仿真领域对场景的定义, 主要针对特定目标系统(system of interest, SOI), 从用户和运行视角描述 SOI 与外部环境或利益相关方的交互关系。全空间无人体系及低空经济无人系统的运行场景是典型的系统之系统, 包括多个系统在内的一组相互作用的系统或系统要素, 可提供任何一个组成系统都无法单独完成的独特能力。因此, 通过借鉴其他领域对场景的定义, 结合无人系统运行场景作为系统之系统的特征, 对运行场景定义如下: “特定区域内各系统、服务及主体与外部环境、目标和用户的互动, 以及各系统、服务及主体之间的互动”, 该定义并不仅着眼于特定系统或服务层级, 而是站在体系层级给出规范定义。

根据对不同组织“场景”定义的要素分析, 可划分为静态和动态 2 类, 静态类重点描述场景内的对象及环境, 动态类重点描述场景过程, 在此基础上结合典型架构框架元模型和民用飞机运行场景建模经验, 结合无人系统运行场景实际对典型场景要素进行精化, 提出运行场景“6+6”要素元模型, 如图 1 所示, 具体如下。

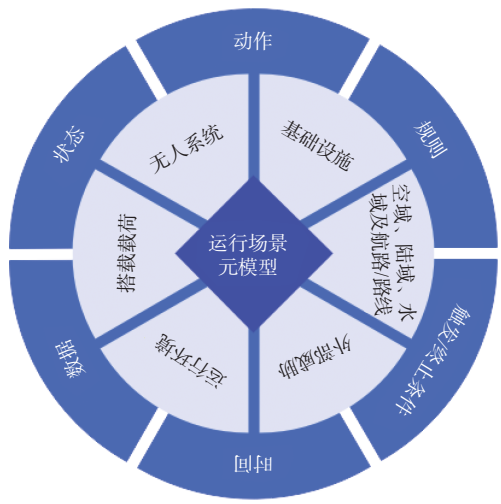

图 1　无人系统运行场景要素元模型

Fig. 1　Element meta-model of unmanned systems operational scenarios

静态要素。主要体现运行场景中各类系统、服务和主体, 主要包括:

1) 无人系统: 包括低空航空器如各类无人机、eVTOL 等新构型新能源航空器、无人车、无人船等无人系统产品;

2) 基础设施: 包括数据、网络、物理等不同类型的新型基础设施, 作为无人系统运行场景的使能系统或服务;

3) 搭载载荷: 包括人员、货物、各类探测感知设备等;

4) 空域、陆域、水域及航路/路线: 指运行场景所处的空域、陆域、水域条件及所划设的运行航路或路线;

5) 运行环境: 包括地理环境、气象环境、电磁环境、产业环境等;

6) 外部威胁: 指可能对运行场景产生安全风险的外部非合作目标如黑飞无人机、热气球、风筝、障碍物、漂浮物等。

动态要素。静态要素构成了运行场景的基础结构, 动态要素驱动场景内静态要素的交互, 主要包括:

1）时间：指场景的时间线，包括开始时间、结束时间等；

2）规则：指静态要素行为应遵循的具体规则，通常以法规、政策、标准等形式进行约束；

3）状态：主要用于描述各类静态要素在一定时间范围内维持不变的行为；

4）动作：指静态要素在场景中的具体行为，包括自身行为和对其他主体或对象的行为；

5）数据：指静态要素执行动作或状态转换过程中交互、产生的数据；

6）触发/终止条件：用于驱动场景动作或要素不同状态的转换。

上述根据对运行场景的要素分析，提出了场景要素的元模型定义，为规范化定义无人系统运行场景提供了理论基础。

1.2 场景框架定义

基于本文构建的场景要素元模型，从区域发展全空间无人体系及低空经济角度，对运行场景框架进行定义，先对特定区域下的无人系统运行场景的特点进行分析。

1）区域管辖：各地方政府发展全空间无人体系及低空经济主要以管辖区域范围开展，一般划分为省市级、地市级、县市级甚至乡镇级等，需要对不同区域范围的场景进行统筹考虑。

2）行业融合：按照不同区域内不同行业及对应的职能管理，各类运行场景在特定区域共同运行但接受不同部门管理。

3）环境差异：不同区域带来的基础设施条件不同，运行环境不同，空域条件不同，外部威胁不同，同行业场景在不同区域需要因地制宜。

4）创新驱动：全空间无人体系及低空经济运行场景中各类静态要素和动态要素均需要技术创新、产品创新、规则创新的有效支持。

根据以上特征分析，站在特定区域对全空间无人体系及低空经济运行场景框架进行构建，如图2所示。主要包括4个层面。

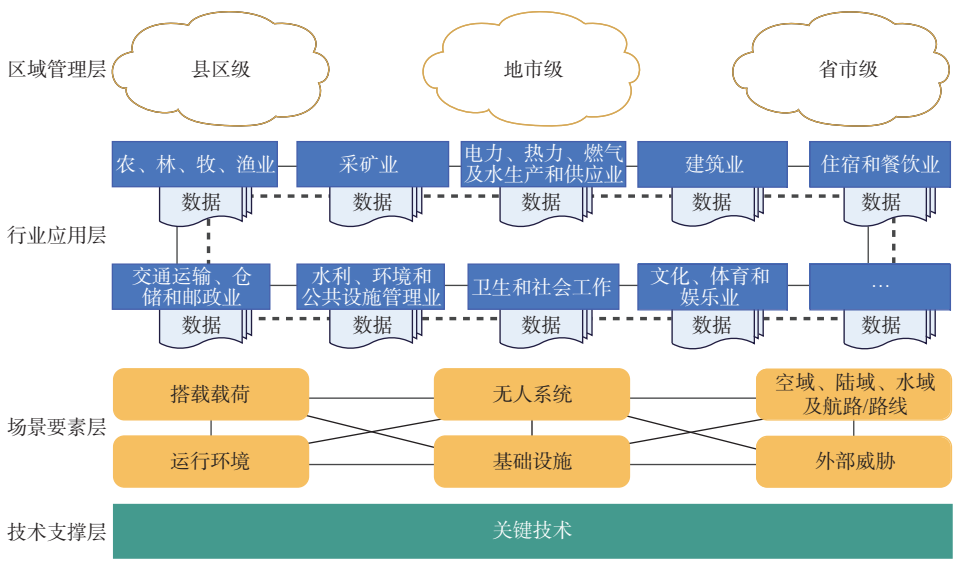

图2 区域发展视角下运行场景框架

Fig. 2 Framework of operational scenarios from perspective of regional development

1）技术支撑层：指支撑场景静态要素本身产品创新及动态运行创新的关键技术发展，依赖于全国乃至全球新技术突破及应用。

2）场景要素层：指不同地方特定区域范围内依据场景元模型的具体特征化，如空域航路要素应结合特定区域当前条件及与空域管理机构协商后具体定义。

3）行业应用层：指国民经济不同行业通过对场景要素的体系化组织形成的经济、社会活动，这也是场景驱动下全空间无人体系及低空经济的核心。

4）区域管理层：根据特定区域范围及行政区划的不同，对所管辖范围内采取各类关键技术的不同场景要素在不同行业的应用进行统筹设计、运营和管理。

2 架构分析

当前有关全空间无人体系及低空经济的架构分析大多停留在产业层面，描述场景、技术与空域间的共同演化逻辑[4]，从供给侧、需求侧和监管侧角度对总体架构进行划分，将产业、技术和生产要素划归为供给侧，将场景划归为需求侧，政策、法规、标准等划归为监管侧[25]。本文结合美国国防部架构

框架(Department of Defense architecture framework, DoDAF)、统一架构框架(unified architecture framework, UAF)等典型架构框架, 提出以“政策法规和标准规范”为核心, “目标-运行-实现”三位一体的架构元模型(见图 3)。其中, “目标”对应能力视角(capability viewpoint, CV), 表示运行场景作为体系能够在一定区域范围内实现的可持续性目标; “运行”对应运行视角(operational viewpoint, OV), 表示运行场景中各类元素的动态行为, 核心包括运行活动和运行状态等; “实现”对应系统视角(system viewpoint, SV)和服务视角(service viewpoint, SvcV), 表示为实现目标所必备的系统组成及需要的服务。“政策法规和标准规范”对应标准视角(standards viewpoint, StdV), 既包括当前政策法规和标准规范, 也包括未来的需求预测, 从而保证运行场景的安全、高效、兼容等目标的实现。此外, 在运行和实现层面, 存在各类数据、信息及资源的交互, 可通过数据与信息视角(data and information viewpoint, DIV)进行表达。



图 3　运行场景架构元模型

Fig. 3　Architecture meta-model of operational scenarios

2.1　能力架构

结合运行场景架构元模型, 围绕全空间无人体系及低空经济“安全底线”、“运行效能”这 2 大目标构建能力架构, 如图 4 所示, 主要包括以下 7 种能力。

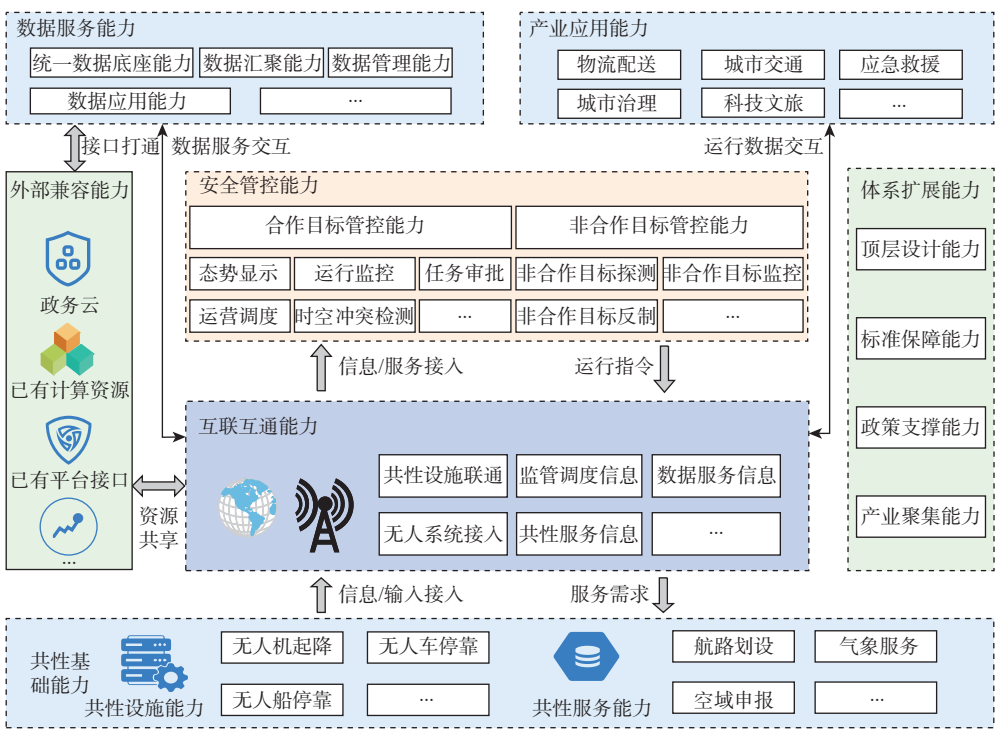

图 4　无人系统运行场景能力架构

Fig. 4　Capability architecture of unmanned systems operational scenarios

1) 共性基础能力: 包括共性设施能力和共性服务能力, 为无人设备提供起降停靠等功能支撑, 同时保障无人设备执行任务所需的各类服务。

2) 互联互通能力: 在运行场景内保障基础设施与无人设备、基础设施之间的互联互通, 通过数据服务交互支撑数据服务能力, 以运行数据交互支撑产业应用能力, 与外部兼容能力共同作用实现资源共享。

3) 安全管控能力: 对运行场景内合作目标实行态势、任务、调度等管控, 对非合作目标进行探测、监控和反制, 保障场景安全稳定运行。

4) 数据服务能力: 实现数据汇聚、数据管理、数据应用等服务能力, 能够实现体系内统一的数据底座和数据服务。

5）产业应用能力：依托城市治理、物流配送、科技文旅等不同领域的应用场景，实现产业链结构升级，打造新领域新业态。

6）外部兼容能力：实现与已有计算资源、平台接口、政务云等系统的兼容和资源共享，并与数据服务能力共同实现接口打通。

7）体系拓展能力：通过顶层设计、标准保障、政策支撑、产业聚集等方式实现体系的更新迭代，使其适应技术进步和经济社会发展的相关要求。

2.2 运行架构

根据能力架构所构建的体系目标，运行架构主要从运行视角描述体系的动态过程，如图5所示，主要特点如下。

1）数据和运行管理“双驱动”：一方面串联无人系统、新型基础设施、航路/路线划设及通信、感知、服务网，另一方面整合政府、运营商等外部资源。

2）航路、路线划设作为独立模块：空域、陆域、水域及相应的航路、路线作为运行场景的核心静态要素，在运行架构中作为独立模块，强化对特定区域资源的统一规划和管理。

3）政策和标准的持续迭代：在体系运行过程中，需要遵从现有政策法规和标准规范的约束，同时通过不断实践形成新政策法规的建议和标准规范，推动体系持续优化完善。

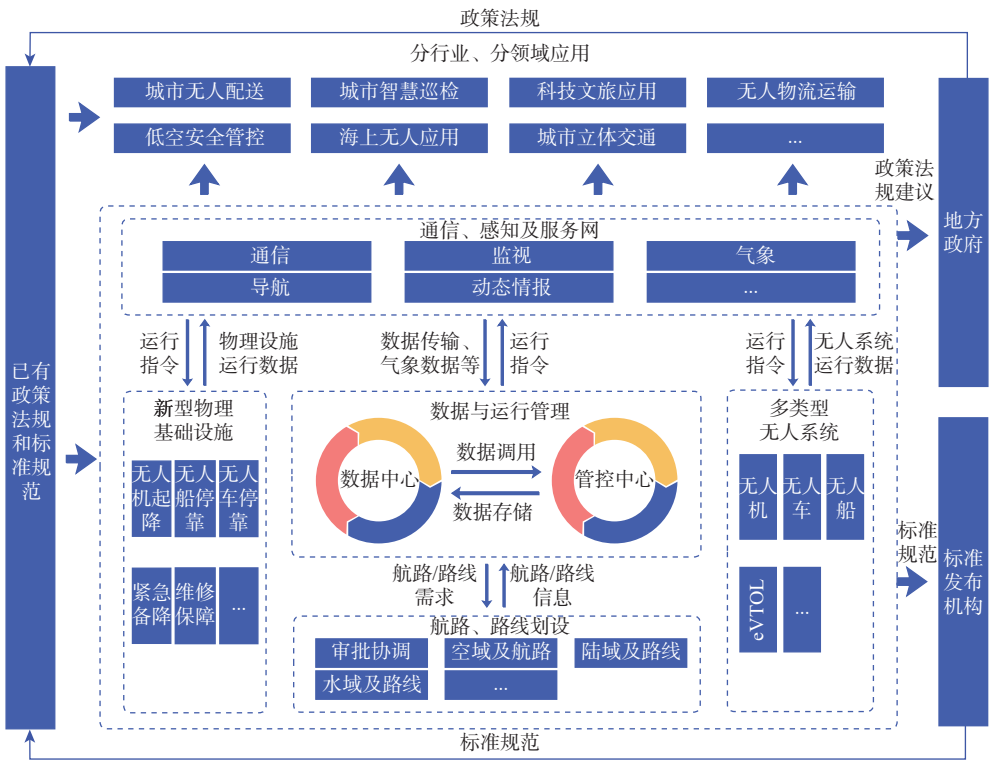

图5 无人系统运行场景运行架构

Fig. 5 Operational architecture of unmanned systems operational scenarios

2.3 系统/服务架构

综合能力架构和运行架构需要，从体系实现角度搭建系统/服务架构，如图6所示，主要包括4个部分。

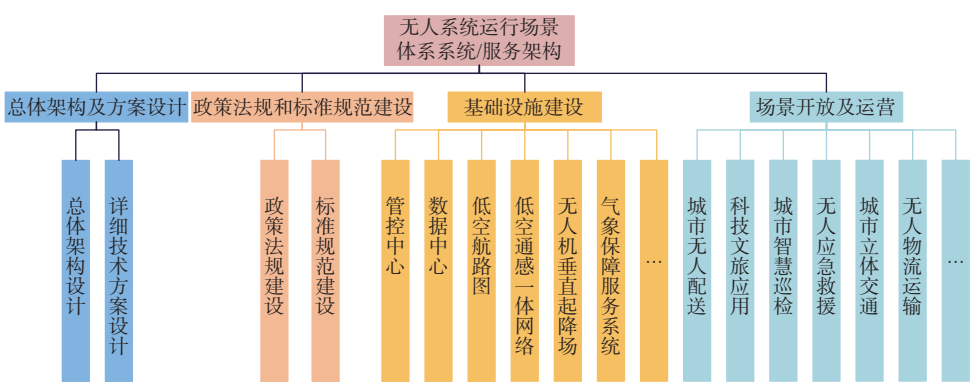

图6 无人系统运行场景系统架构

Fig. 6 Systems architecture of unmanned systems operational scenarios

1) 总体架构及方案设计: 从顶层视角对特定区域内复杂体系开展总体架构设计, 并开展详细方案及场景设计, 用于指导后续建设及体系升级。

2) 政策法规和标准规范建设: 围绕基础设施建设、场景开放及运营管理研究政策建议及标准制定, 与架构及方案设计共同支撑体系拓展能力。

3) 新型基础设施建设与实施: 保障运行场景运行活动的正常运转, 为其余 6 种能力提供支撑。其中, 基础设施的建设可根据不同区域的特点、性能及经济可承受性等选取不同技术路径的基础设施, 同时由于建设主体的不同, 部分基础设施如通信、监视、导航、气象等可通过服务的方式提供。

4) 场景开放及运营: 依托体系设计、政策、标准、基础设施, 鼓励不同行业运营主体开展相应场景建设, 前期主要由政府引导、培育, 后期主要由市场驱动。

2.4　标准架构

标准架构是保障全空间无人体系及低空经济场景安全、有序运行的核心, 如图 7 所示, 主要包括 4 个方面的内容。

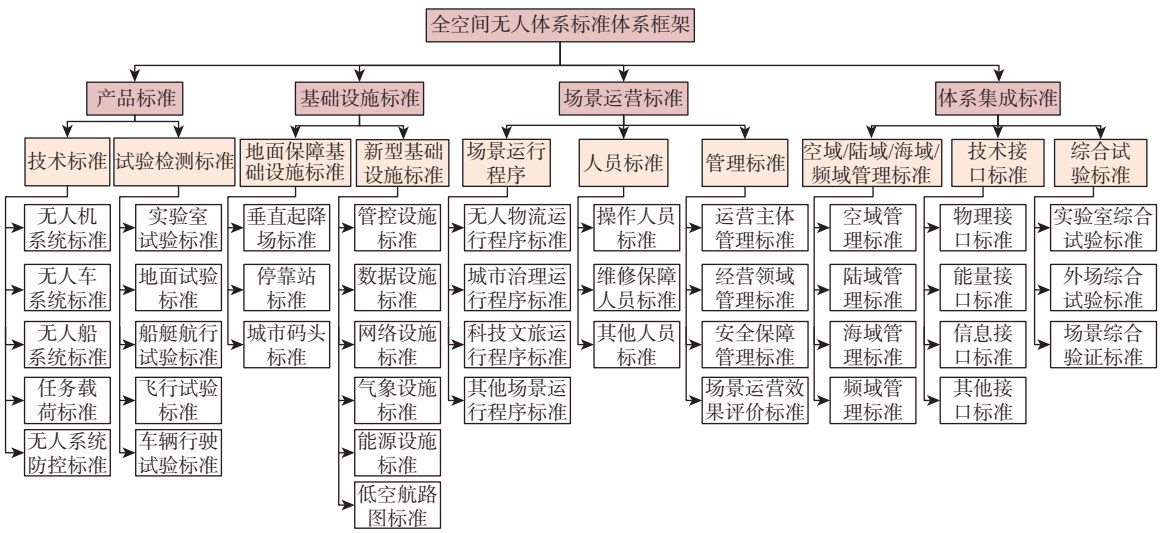

图 7　无人系统运行场景标准架构

Fig. 7　Standards architecture of unmanned systems operational scenarios

1) 产品标准: 包括无人系统产品本身的技术标准及相应的试验验证标准。

2) 基础设施标准: 主要包括地面保障基础设施和各类新型基础设施标准。

3) 场景运营标准: 主要包括运行程序、人员标准、管理标准 3 类, 规范各领域场景的有序运行。

4) 体系集成标准: 该类标准为全空间无人体系和低空经济的核心标准, 重点对空域/陆域/海域/频域管理、技术接口、综合试验进行规范。

3　架构建模

针对第 2 节构建的能力架构、运行架构、系统/服务架构、标准架构, 参考相关运行场景建模方法[26], 综合 DoDAF2.0、UAF 架构框架及系统建模语言(systems modeling language, SysML)提出统一的架构建模方法, 在建模前应通过全景视图(all viewpoint, AV)对全空间无人体系及低空经济所涉及的概念和术语如数据底座等进行规范化定义, 建模总体技术路径如图 8 所示。

3.1　能力视角

通过 CV-2 视图对全空间无人体系及低空经济能力架构进行构建, 形成 7 大能力域对应的能力分解结构, 具体如图 9 所示。

根据 CV-2 能力分解结构模型, 以及运行架构中相关运行场景活动, 可通过 CV-6 建立体系能力与运行活动之间的关联关系, 如图 10 所示。以“互联互通能力”中“数据服务信息”为例, 在正常场景中“传输飞行数据”、“传输航路气象评估数据”、“传输降落指令”、“传输任务指令”等均属于“数据服务信息”的能力范畴, 待运行活动完整构建后, 即可对“数据服务信息”能力进行完整定义。

3.2　运行视角

为使所构建的运行架构所属数据实现结构化, 更好与其他视角数据进行关联, 通过运行活动分解结构(OV-5a)、运行活动逻辑关系(OV-5b)、状态转移描述(OV-6b)、详细行为描述(OV-6c)等视图对运行架构进行构建。

从全空间无人体系及低空经济运行活动分解

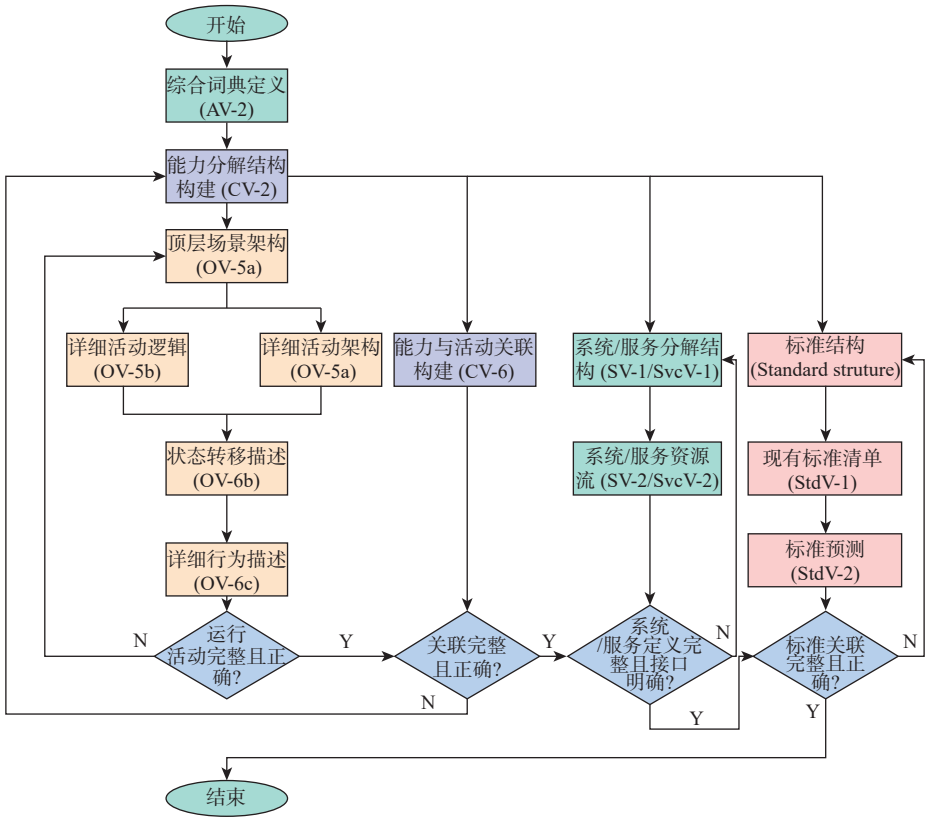

图 8 架构建模技术路径

Fig. 8 Technique path of architecture modelling

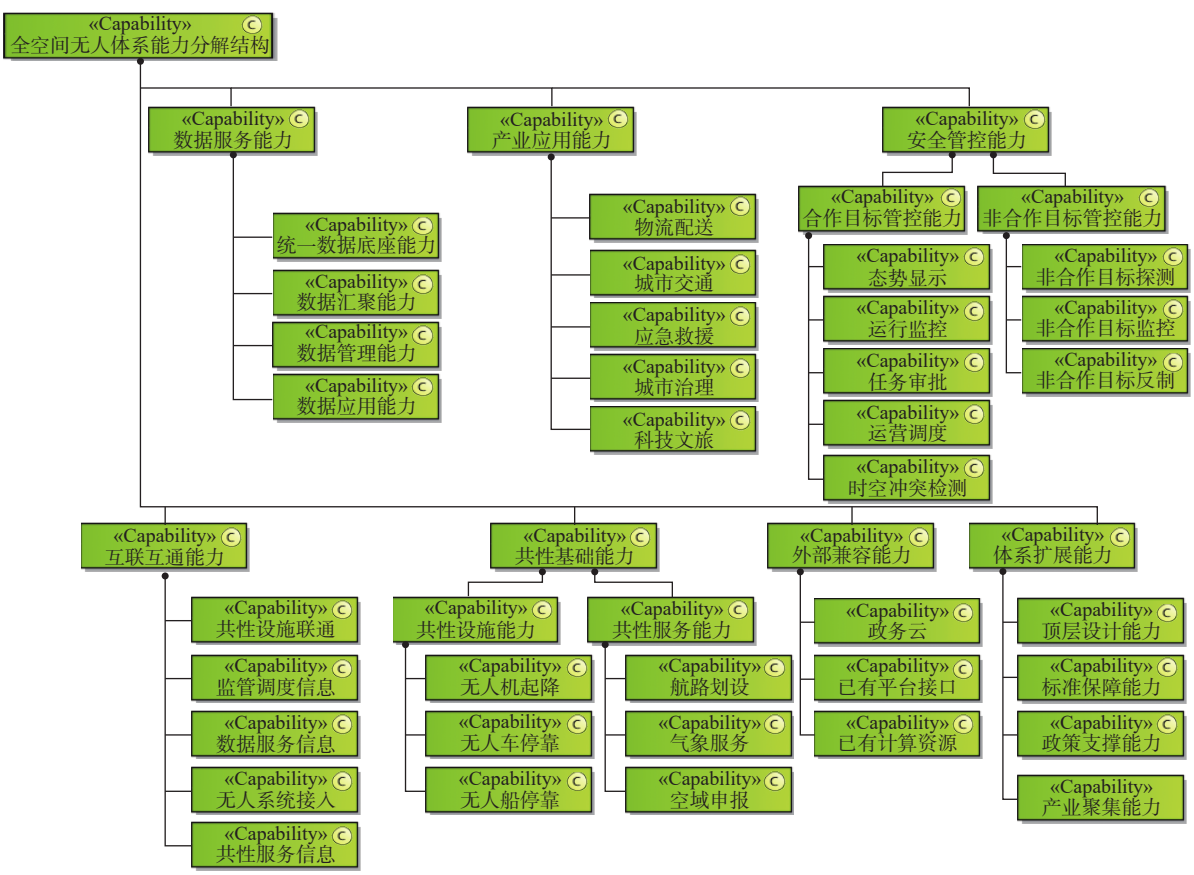

图 9 体系的能力分解结构(CV-2)

Fig. 9 Capability decomposition structure (CV-2)

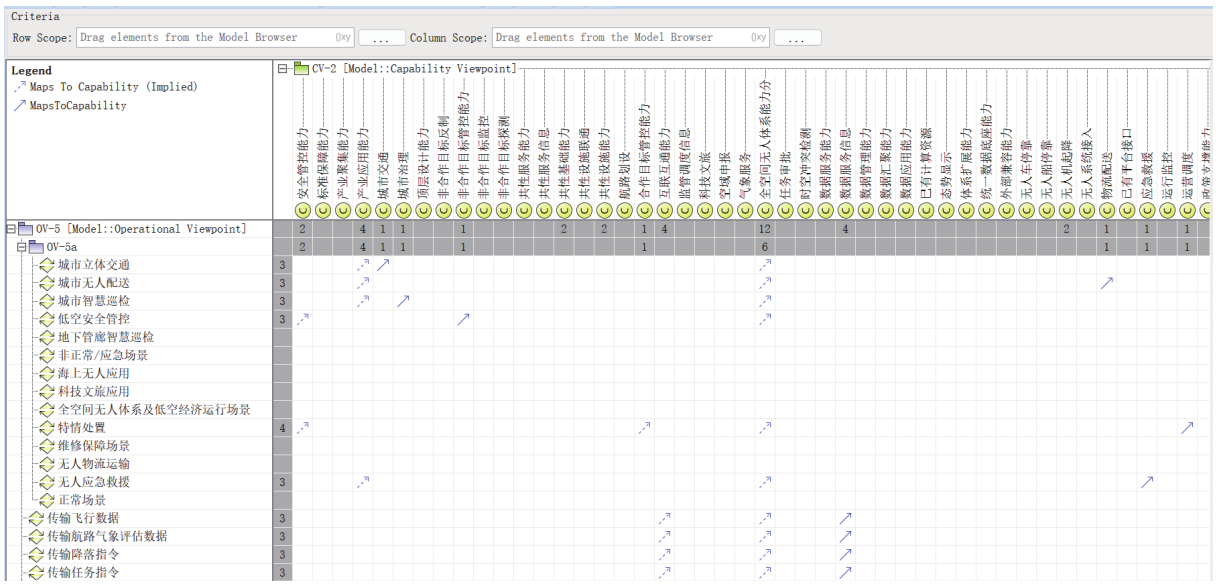

图 10　体系能力与运行活动关联(CV-6)

Fig. 10　Traceability matrix of systems of systems capabilities and operational activities(CV-6)

结构角度, 主要包括正常场景、非正常/应急场景、维修保障场景、培训场景 4 类, 其中, 正常场景可进一步特征化为城市无人配送、无人物流运输、科技文旅应用、海上无人应用、地下管廊智慧巡检、低空安全管控、城市智慧巡检、城市立体交通等, 如图 11 所示。

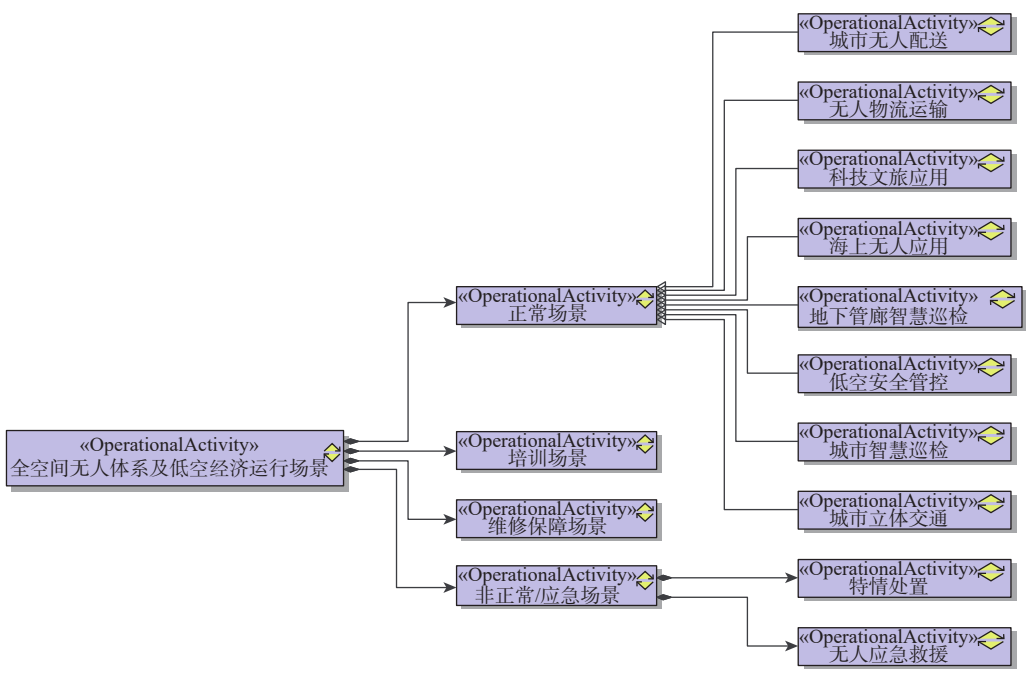

图 11　典型场景分解结构(OV-5a)

Fig. 11　Typical scenario decomposition structure(OV-5a)

典型场景分解结构构建完成后, 可针对具体场景进行详细逻辑建模, 在此以正常场景为例, 正常场景是从区域管理角度对各类运行场景的通用流程描述。涉及的主要利益关联方与 2.2 节一致, 具体如图 12 所示, 在此省略场景航路划设及飞行计划向军、民航等空域管理方的申请及批准的流程。

在此基础上选取以无人机索降方式开展配送的场景, 针对场景设计内容给出建模案例, 包括无人配送场景活动逻辑(OV-5b)、详细行为描述(OV-6c)、状态转移描述(OV-6b), 其中, 规则、时间、触发/终止条件等动态要素在不同视图中进行描述, 以实现对无人配送场景的完整设计和建模表达, 具体如图 13～图 15 所示。

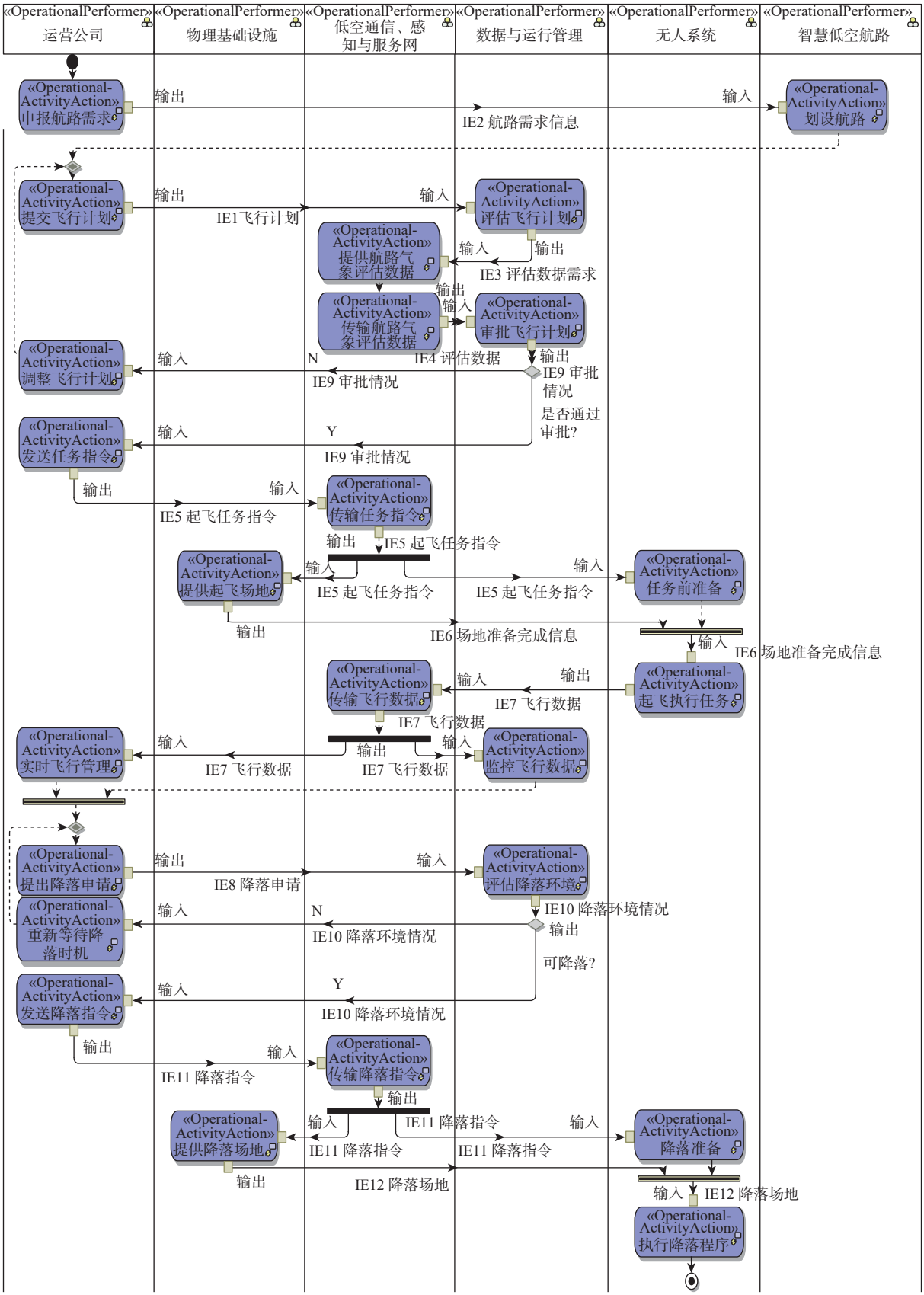

图 12 通用的正常场景活动逻辑(OV-5b)

Fig. 12 Generic normal scenario activity(OV-5b)

3.3 系统/服务视角

系统/服务视角的架构建模与 2.3 节一致，在此将通感一体网络、低空气象等均作为系统进行处理，通过 SV-1 方式对系统分解结构进行构建。在

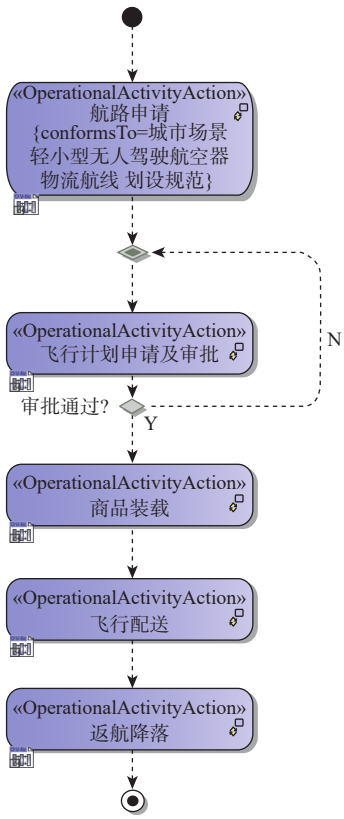

图 13　无人配送场景活动逻辑(OV-5b)

Fig. 13　Unmanned delivery scenario activity(OV-5b)

SV-1 基础上, 采用 SV-2 对基础设施之间的关联关系进行构建, 如图 16 所示。其中, 场景部分主要区别在于无人系统、任务载荷的不同, 在此不再赘述。

3.4　标准视角

由于 DoDAF 架构框架没有单独的标准结构视图, 在架构建模过程中借鉴 UAF 标准视图中标准结构视图对标准架构进行构建, 内容与 2.4 节一致, 在此不再重复。

通过标准视图 StdV-1 模型可对当前全空间无人体系已有标准及其对应的系统元素进行映射, 形成现有标准清单, 建模示例如图 17 所示。基于当前已有标准、政策等, 在开展系统各类元素建设时, 应符合所采用的标准和政策要求。

标准架构建模的核心价值在于通过实现各类元素与标准之间的显性化关联关系。尤其是全空间无人体系及低空经济作为战略新兴产业, 政策法规和标准规范缺乏, 需要基于所构建的运行架构、系统架构, 对各类元素的标准需求进行识别, 具体识别方法如图 18 所示。其中, 产品标准、基础设施标准主要来自系统/服务架构, 场景运营标准主要来自运行架构, 体

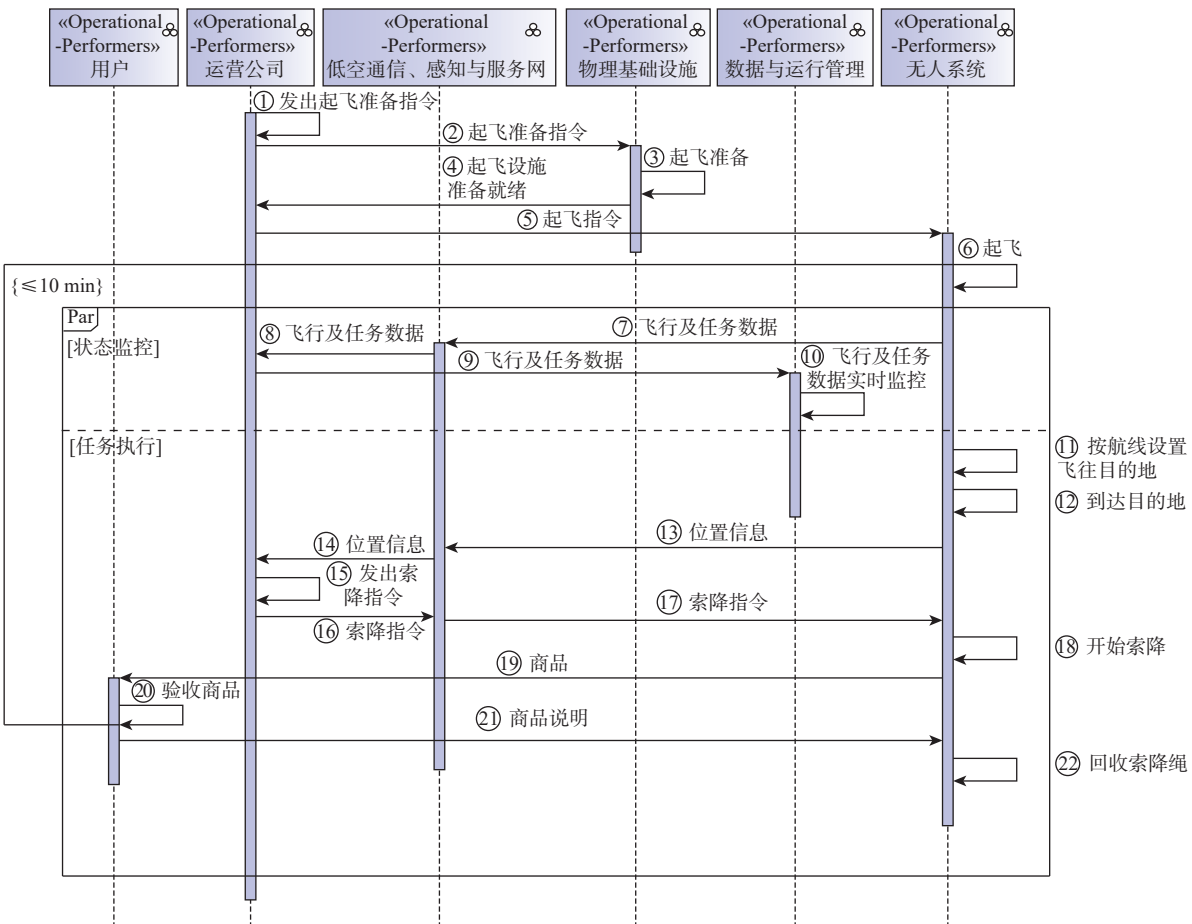

图 14　无人配送场景详细行为描述(OV-6c)

Fig. 14　Detailed behavioural description for unmanned delivery scenario(OV-6c)

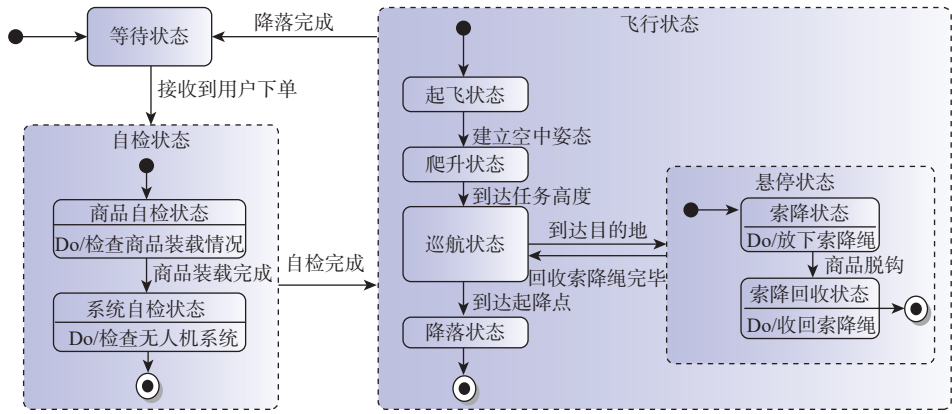

图 15 无人配送场景状态转移描述(OV-6b)

Fig. 15 State transition description for unmanned delivery scenarios(OV-6b)

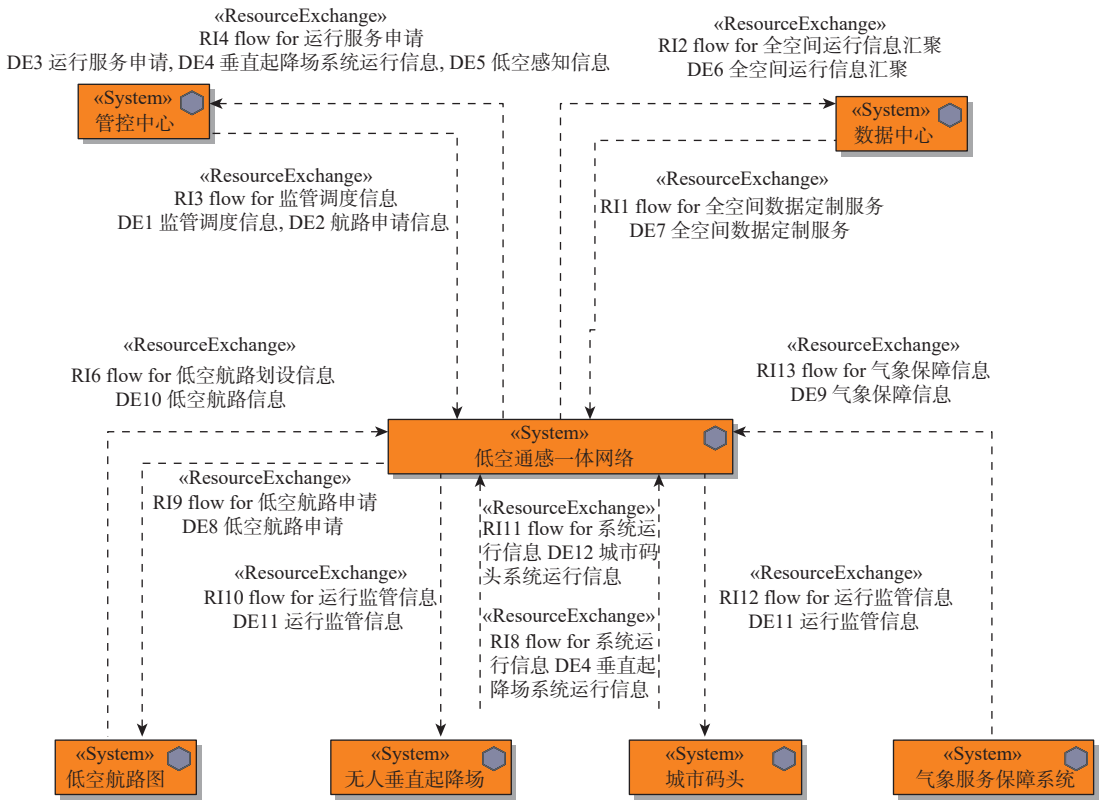

图 16 基础设施接口 SV-2 模型

Fig. 16 SV-2 model of infrastructure interface

#	System element	▽Standard / Policy
1	低空航路图	SUSE F0005-2024民用无人驾驶航空器城市低空运行航路划设规范
2	无人垂直起降场	SUSE F0004-2024无人驾驶航空器垂直起降场技术要求
3	数据中心	SUSE F0003-2024全空间无人体系数据中心通用技术要求
4	RI3 Resource Exchange:flow for 监管调度信息[管控中心 -> 低空通感一体网络]	SUSE F0002-2024全空间无人体系管控中心通信接口要求
5	RI4 Resource Exchange:flow for 运行服务申请[低空通感一体网络 -> 管控中心]	SUSE F0002-2024全空间无人体系管控中心通信接口要求
6	管控中心	SUSE F0001-2024全空间无人体系管控中心通用技术要求

图 17 现有标准模型(StdV-1)

Fig. 17 Existing standard models(StdV-1)

系集成标准则会同时涉及系统/服务架构和运行架构。

根据对各类系统元素、交互关系、运行活动中标准需求的识别,可按照标准结构不同领域的划分,对拟制定的标准和政策进行规划,具体如图 19 所示。

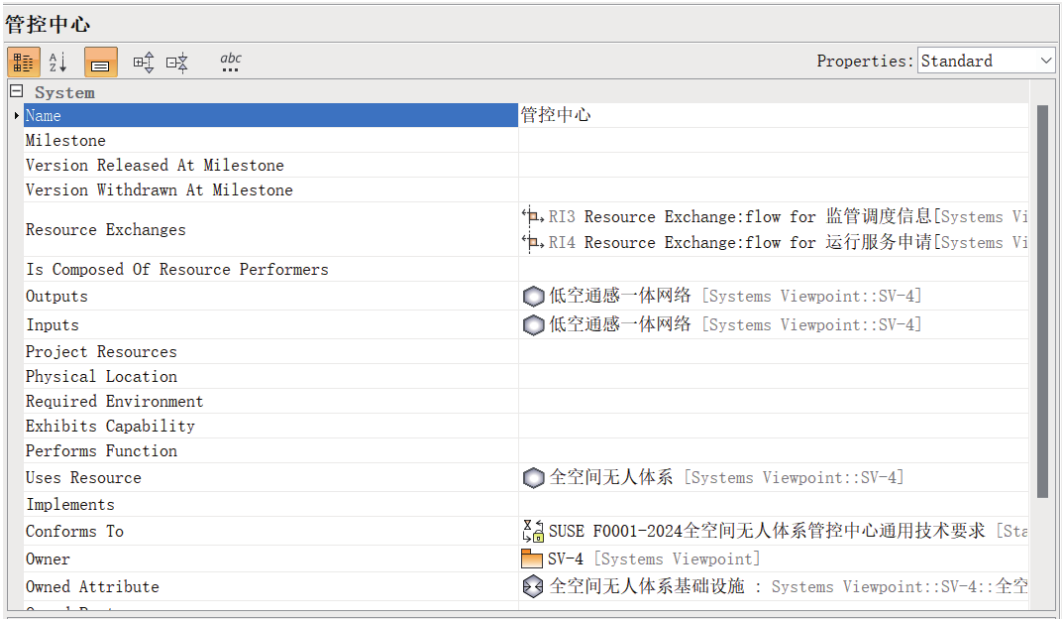

图 18　针对特定对象的标准需求识别

Fig. 18　Standard requirement identification for specific object

#	Technology area	From: 2025-06-30 To: 2026-06-29	From: 2026-06-30 To: 2027-06-29	From: 2027-06-30 To: 2028-06-29
1	数据设施标准	全空间无人体系数据定义及分类		
2	网络设施标准	全空间无人体系低空通感一体网络通用要求		
3	气象设施标准	全空间无人体系低空气象保障服务系统通用要求		
4	管控设施标准		全空间无人体系管控中心信息显示布局通用要求	
5	技术接口标准		无人系统空地数据传输内容与格式	

图 19　标准预测模型(StdV-2)

Fig. 19　Standards forecast models(StdV-2)

4　结　论

围绕全空间无人体系及低空经济背景下的无人系统运行场景复杂体系, 通过开展场景分析、架构分析、架构建模 3 方面的研究, 主要形成以下结论:

1) 通过对运行场景要素分析, 提出了运行场景“6+6”要素元模型, 并站在特定区域发展角度提出运行场景框架, 对运行场景复杂体系进行结构化解析, 为各地区开展运行场景的分析与设计提供有效参考;

2) 在场景框架基础上, 从架构分析角度提出运行场景架构元模型, 并对全空间无人体系及低空经济运行场景的能力架构、运行架构、系统架构、标准架构进行设计, 从不同视角对复杂体系架构进行定义, 改变传统单一视角的架构定义, 推动对复杂体系多视角架构的统一理解;

3) 研究形成一种面向全空间无人体系及低空经济运行场景的架构建模方法, 实现能力视角、运行视角、系统视角及标准视角不同要素的关联追溯, 为后续基于模型开展各类基础设施或无人系统产品研制的运行概念、需求捕获及功能分析提供框架, 尤其为支撑体系建设发展的关键政策法规和标准规范建设提供方法支撑, 保障无人系统运行场景的安全、健康发展。

参考文献（References）

[1] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 关于完善市场准入制度的意见[EB/OL]. (2024-08-01)[2025-06-02]. https://www.qstheory.cn/yaowen/2024-08/21/c_1130194466.htm.
Opinions of the General Office of the Central Committee of the Communist Party of China , the General Office of the State. Coun-

cil on improving the market access system[EB/OL]. (2024-08-01)[2025-06-02]. https://www.qstheory.cn/yaowen/2024-08/21/c_1130194466.htm(in Chinese).

[2] 中国信息协会低空经济分会. 低空经济发展报告 (2024-2025)[R]. 北京: 中国信息协会低空经济分会, 2025: 28-38.
Low-altitude Economy Branch of the China Information Industry Association. Low-altitude economic development report (2024-2025)[R]. Beijing: Low-altitude Economy Branch of the China Information Industry Association, 2025: 28-38(in Chinese).

[3] 欧阳桃花. 低空经济的技术创新与场景创新[J]. 人民论坛·学术前沿, 2024(15): 57-68.
Ouyang T H. Technological innovation and scenario innovation of low-altitude economy[J]. Frontiers, 2024(15): 57-68(in Chinese).

[4] 欧阳桃花, 郑舒文. 基于共同演化的低空经济产业生态策略研究: 以“低空航空器+”为例[J]. 北京航空航天大学学报 (社会科学版), 2024, 37(5): 109-119.
Ouyang T H, Zheng S W. Industrial ecological strategies of low-altitude economy based on co-evolution: taking “low-altitude aircraft+” as an example[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2024, 37(5): 109-119(in Chinese).

[5] 张晓兰. 我国低空经济发展面临的问题与政策建议[EB/OL]. (2024-12-30)[2025-06-10]. http://www.ndrc.gov.cn/wsdwhfz/202412/t20241230_1395328_ext.html.
Zhang X L. The issues and policy recommendations regarding the development of the low-altitude economy in our country[EB/OL]. (2024-12-30)[2025-06-10]. http://www.ndrc.gov.cn/wsdwhfz/202412/t20241230_1395328_ext.html(in Chinese).

[6] 张夏恒. 新质生产力背景下低空经济高质量发展的机理与路径[J]. 苏州大学学报 (社会科学版), 2025, 46(1): 112-122.
Zhang X H. Research on the mechanism and path of high-quality development of low-altitude economy under the background of new-quality productivity[J]. Journal of Soochow University (Philosopy and Social Science Edition), 2025, 46(1): 112-122(in Chinese).

[7] 褚鹏, 王军, 刘树光, 等. 基于人工智能技术的低空飞行器管控关键技术研究[J]. 航空兵器, 2023, 30(2): 120-124.
Chu P, Wang J, Liu S G, et al. Research on key technologies of low altitude vehicle management and control based on artificial intelligence technology[J]. Aero Weaponry, 2023, 30(2): 120-124(in Chinese).

[8] 刘泉, 陈瑶瑶, 洪晓苇, 等. 面向无人机的城市低空空域规划的国际经验[J]. 城市规划学刊, 2024(5): 64-70.
Liu Q, Chen Y Y, Hong X W, et al. International experience of urban low altitude airspace planning for drones[J]. Urban Planning Forum, 2024(5): 64-70(in Chinese).

[9] Huang C Q, Fang S F, Wu H, et al. Low-altitude intelligent transportation: system architecture, infrastructure, and key technologies[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2024, 42: 100694.

[10] 廖小罕, 徐晨晨, 叶虎平. 低空经济发展与低空路网基础设施建设的效益和挑战[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(11): 1966-1981.
Liao X H, Xu C C, Ye H P. Benefits and challenges of constructing low-altitude air route network infrastructure for developing low-altitude economy[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(11): 1966-1981(in Chinese).

[11] Li Z R, Gao Z, Wang K Y, et al. Unauthorized UAV countermeasure for low-altitude economy: joint communications and jamming based on MIMO cellular systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(6): 6659-6672.

[12] 李晓华. 政府引导、产业生态构建与低空经济发展[J]. 改革, 2025(2): 21-35.
Li X H. Government guidance, construction of industrial ecosystem, and the development of low-altitude economy[J]. Reform, 2025(2): 21-35(in Chinese).

[13] 孔得建, 袁泽. 低空经济政策法律体系的现状、经验与展望[J]. 北京航空航天大学学报 (社会科学版), 2024, 37(5): 85-95.
Kong D J, Yuan Z. Current situation, experience and prospect of the policies and legal system of low-altitude economy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2024, 37(5): 85-95(in Chinese).

[14] 樊一江, 李卫波. 我国低空经济阶段特征及应用场景研究[J]. 中国物价, 2024(4): 98-103.
Fan Y J, Li W B. The development stage and application scenarios of China’s low-altitude economy[J]. China Price Journal, 2024(4): 98-103(in Chinese).

[15] 庄茁. 人工智能赋能低空经济: 应用场景与未来方向[J]. 人民论坛·学术前沿, 2024(15): 38-44.
Zhuang Z. AI empowers low-altitude economy application scenarios and future directions[J]. Frontiers, 2024(15): 38-44(in Chinese).

[16] Yang H L, Zheng M T, Shao Z L, et al. Intelligent computation offloading and trajectory planning for 3-D target search in low-altitude economy scenarios[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2025, 14(4): 949-953.

[17] 王丹, 罗章松. 低空经济赋能农业新质生产力发展: 角色扮演、现实壁垒与破解之道[J]. 农林经济管理学报, 2025, 24(2): 165-173.
Wang D, Luo Z S. Low-altitude economy empowers development of new quality productivity in agriculture: role playing, realistic barriers and solutions[J]. Journal of Agro-Forestry Economics and Management, 2025, 24(2): 165-173(in Chinese).

[18] 李晓华. 以应用场景创新推动低空经济发展[J]. 中国军转民, 2024(23): 3.
Li X H. Promoting the development of low-altitude economy through application scenario innovation[J]. Defence Industry Conversion in China, 2024(23): 3(in Chinese).

[19] 王灿, 郭齐胜, 穆歌, 等. 军事领域体系结构研究综述[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(2): 1-11.
Wang C, Guo Q S, Mu G, et al. Review of system of systems architecture research in military domain[J]. Fire Control & Command Control, 2023, 48(2): 1-11(in Chinese).

[20] IEEE Computer Society. IEEE standard for information technology-Protocols for distributed interactive simulation applications—Entity information and interaction: IEEE 1278-1993[S]. Piscataway: IEEE Press, 1993.

[21] Durak U, Topçu O, Siegfried R, et al. Scenario development: a model-driven engineering perspective[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. Piscataway: IEEE Press, 2014: 117-124.

[22] NATO Science and Technology Organization. Rapid scenario generation for simulation applications[EB/OL]. (2023-07-04)[2025-06-09]. https://www.sto.nato.int/document/rapid-scenario-generation-for-

simulation-applications/.

[23] ISO/IEC/IEEE. Systems and software engineering—Life cycle processes—Requirements engineering: ISO/IEC/IEEE 29148: 2018(E) [S]. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-104.

[24] Society of Automotive Engineers. Guidelines for development of civil aircraft and systems: ARP4754B[S]. Washington, D. C.: Society of Automotive Engineers, 2023: 1-172.

[25] 卢方周, 闫坤, 李文宇, 等. 低空经济总体架构与提升路径[J]. 信息通信技术与政策, 2024, 50(11): 2-10.
Lu F Z, Yan K, Li W Y, et al. Overall architecture and enhancement pathways of low-altitude economy[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2024, 50(11): 2-10(in Chinese).

[26] 江雨航, 郭泰, 宫綦, 等. 民用飞机应急场景分析与建模方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(3): 839-849.
Jiang Y H, Guo T, Gong Q, et al. Analysis and modeling method of civil aircraft emergency scenario[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(3): 839-849(in Chinese).

Architecture design and modeling technology for civil unmanned system operation scenarios

GUO Tai*，AN Yiping，SHU Zhenjie，JIANG Jueyi，JIANG Yuhang

(AVIC China Aero-polytechnology Establishment，Beijing 100028，China)

Abstract：Operational scenarios for civil unmanned systems act as hubs of the industrial value of all-space unmanned system and low-altitude economy, playing a crucial role in scaling up new industries. This typical complex system features dynamic boundaries, multi-level emergence, balanced stakeholder interests, and continuous evolution. Modern systems engineering principles must be used in the design of such systems' architecture to guarantee their safe and effective operation. Our research into the architecture design and modeling of civil unmanned system scenarios produced a "6+6" meta-model, capturing static and dynamic elements. In addition to developing a thorough process that covers everything from element identification to architecture design and modeling, we created a multi-perspective architecture design and modeling including capability, operational, system, and standard architectures. This approach not only provides guidance for the construction of new infrastructure, the research, development, and selection of unmanned systems, and the formulation of policy and standard creation, but also concurrently offers technical support for the establishment of unmanned system operation scenarios and the systematic development of the related industry.

Keywords：low-altitude economy；all-space unmanned systems；operational scenarios；framework modeling；unmanned systems

Received：2025-06-14；**Accepted**：2025-10-04；**Published Online**：2025-11-28 17：45

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20251128.1603.003

* **Corresponding author**. E-mail：guotai101@126.com