

# **低空智能网联体系发展路径及趋势**

低空智能网联技术委员会

2025 年 11 月



## 编委会

主任

张学军

副主任

刘法旺 吴启晖

编委（按姓氏拼音排序）

陈 果	丁光河	董亚斌	杜志华	冯 亮
冯 伟	郭 佳	胡桂新	贾子晔	金 伟
雷 根	李诚龙	李朝斌	李慧盈	李 劍
李文字	李新军	林嘉鑫	刘 冰	牛 锐
牛成勇	彭 璐	祁卫卫	汤新民	田 野
王 珣	王文峰	王 岩	王 洋	王允升
王智新	文 博	谢 陵	徐 雷	徐大勇
许崇春	张 笑	张旺旺	张阳帆	张长禄
赵 伟	周 全	周震博	周 剑	朱钧宇
朱泓正	庄优芳			

## **核心编制单位**

北京航空航天大学  
工业和信息化部装备工业发展中心  
南京航空航天大学  
中国信息通信研究院  
中国电子技术标准化研究院  
中国铁路通信信号股份有限公司  
中移（成都）信息通信科技有限公司  
中国工业互联网研究院  
粤港澳大湾区数字经济研究院

## **参与编制单位（按拼音排序）**

昂际智航（成都）科技有限公司  
北京理工大学  
北京鸢飞科技有限公司  
北京云圣智能科技有限责任公司  
北京国汽智能网联汽车技术研究  
大唐高鸿信安（浙江）信息科技有限公司  
时代飞鹏科技有限公司  
浪潮通信信息系统有限公司  
上海御风未来航空科技有限公司  
深圳多翼创新科技有限公司  
四川沃飞长空科技发展有限公司  
四川九洲空管科技有限责任公司  
四创电子股份有限公司

天翼交通科技有限公司  
襄阳达安汽车检测中心有限公司  
西华大学  
招商局检测车辆技术研究院有限公司  
中船海丰航空科技有限公司  
中国电信无人科技有限公司  
中国电信股份有限公司卫星通信分公司  
中国电子科技集团有限公司总体院  
中国电子信息产业发展研究院  
中国工程物理研究院总体工程研究所  
中国航空工业发展研究中心  
中国航空工业集团计算所  
中国联通研究院  
中国民航大学  
中国民用航空飞行学院  
中国汽车工程研究院股份有限公司  
中国汽车技术研究中心有限公司  
中国铁塔股份有限公司  
中航通飞通用航空有限公司  
中汽研汽车检验中心（天津）有限公司  
中兴通讯股份有限公司  
舟山低空产业发展有限公司  
舟山高新技术产业园区  
珠海低空投资运营有限公司



# 目 录

一、 编制依据 .....	1
(一) 编制方法 .....	1
(二) 编制背景 .....	1
二、 基于场景安全风险的分级发展和建设思路 .....	5
(一) 基本思路 .....	5
(二) 分级方案 .....	5
三、 低空智能网联体系建设总体发展路径 .....	8
(一) 发展目标与适用范围 .....	8
(二) 低空智能网联体系建设路径 .....	9
(三) 低空智能网联体系各环节参与方分解 .....	11
四、 低空智能网联体系建设步骤 .....	13
(一) 运行场景分析 .....	13
(二) 运行模式设计 .....	16
(三) 可接受安全水平分析 .....	22
(四) 所需能力分析 .....	24
(五) 技术方案设计 .....	27
(六) 系统集成与验证迭代 .....	29
五、 低空智能网联体系建设发展趋势与愿景 .....	31



## 一、编制依据

### (一) 编制方法

一是调研当前各地低空智能网联体系建设工作进展与问题，梳理国内低空领域装备技术及前沿发展方向，对当前主流产品、技术和国内低空经济建设实践成果进行整理和总结。

二是研究国内外相关工作和前沿技术，结合现有文献，积极听取行业内对《低空智能网联体系参考架构（2024版）》反响、建议和意见，对行业内近期成果、动向、趋势和困难开展深入分析。

三是广泛邀请相关企业、科研院所、高校、行业专家参与研讨和编制，推动行业凝聚共识，形成合作。

四是邀请行业专家参与咨询、评审，提炼研究成果。

### (二) 编制背景

1. 《低空智能网联体系参考架构（2024版）》有效凝聚共识，多方已开展低空智能网联体系研究，仍需更深入指导和支持

低空智能网联体系参考架构（2024版）为低空装备产业发展和低空基础设施建设提供了方向指引和理论支撑。2024版确立以“五方三层两体系”为核心的低空智能网联体系框架构建原则，明确了构成要素、体系逻辑和发展路径，初步形成了架构完整、方向清晰、覆盖全面的体系框架。该参考架构明确了低空智能网联体系的发展蓝图，得到了有关部委和业界广泛认可。

然而，低空智能网联体系建设是一个跨领域、跨行业的复杂系统工程，其发展面临安全与效率的双重考验，涉及从飞行器制造到运行管理的全链条协作，其主要要素与现有运输航空、通用航空存在差异。传统运行模式和航空基础设施不足以支撑未来低空安全高效的监管和服务要求，需要在空域管理、运行规则、技术方案选择、基础设施建设等方面构建理论体系、实现方法突破，进而支撑决策、指导产业发展。

## 2. 未来低空场景大规模应用，如何进行安全、高质量的场景选择与培育，将成为关键问题

国务院办公厅印发《关于加快场景培育和开放推动新场景大规模应用的实施意见》，将低空经济列为新赛道重点领域，提出要稳妥有序拓展低空经济等领域应用场景，为其规模化应用与高质量发展划定清晰路径。未来低空场景的选取和培育不仅要考虑应用需求的多样性，也要系统考虑空域条件、运行环境、安全保障能力及配套基础设施等因素。

低空智能网联体系是大规模场景应用的基础，在场景规模化应用和体系化建设过程中，围绕受可接受安全水平约束下的能力建设是开展场景安全能力建设的核心任务。由于各地在专业认识、区域产业水平、地方产业方向存在差异，其场景选择、运行规划和技术体系构建等方面的模式和路径存在差异，而低空智能网联体系通过基于航空理论和既往经验的体系化方法，实现了针对

不同场景的安全有序的运行管控与差异化的服务供给，为各类低空场景的安全、有序、高效运行提供统一、可扩展且可持续的基础支撑。

### 3.亟需明确低空智能网联体系发展路径，适应低空经济发展趋势

未来3—5年，低空经济将进入快速发展通道，低空智能网联体系也将大规模推广应用和建设落地，各低空参与方依据参考架构开展建设工作需要明确思路，统筹规划。当前在推进建设时，部分地区低空建设主导方受限于认识、经验和专业技术，难以从全局角度把握产业发展的复杂性，未能准确把握低空经济发展方向，难以形成有效举措，进而难以推进区域低空经济的有效发展，甚至出现了基础设施的过度建设和技术选择方向性问题，造成了资源浪费，更造成了低空运行的安全隐患。

低空智能网联有关技术的落地工作面临诸多新问题、新挑战，参考架构也需要适应发展新要求。随着低空经济改革稳步推进，低空智能网联体系建设已由基础探索阶段迈入规模化部署与深化应用阶段，体系建设所涉及的空域管理、运行规则、通导监技术、平台服务模式、数据治理与安全等方面均呈现出更高协同要求和更复杂的技术与治理挑战。体系架构需在运行模式、能力框架、关键技术体系、治理机制等层面不断迭代升级，以适应从“试点示范”向“体系建设与规模化运营”转变的趋势。不同地区发展基础差异显著、能力建设阶段不一致，因此体系化建设工

作需要兼顾顶层的统一性与区域的差异化。

## 二、基于场景安全风险的分级发展和建设思路

### (一) 基本思路

低空智能网联体系建设应基于场景牵引，低空场景的安全风险等级直接影响到低空智能网联体系的基础设施分级建设。不同应用场景对应着不同等级的初始运行风险与剩余运行风险（初始运行风险超出可接受安全水平的部分），需要通过不同等级的通信、导航、监视及机载航电能力，消减剩余运行风险，保障运行风险被控制在统一的可接受的安全水平内。低空载人类新应用场景现阶段相对较少，可参考现有民航体系进行管理；而无人机的应用场景众多、初始运行风险差异大，需结合风险评估结果分级发展和建设，具体实现思路如下图所示。

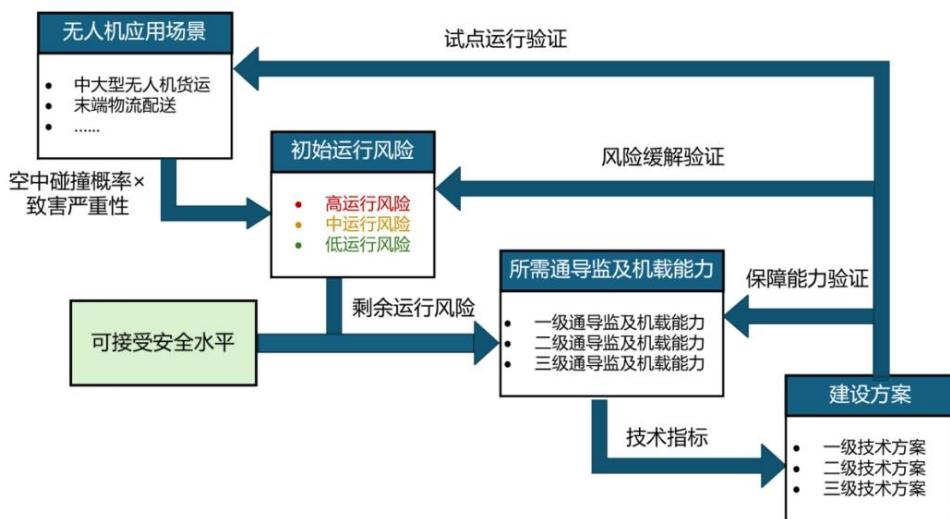


图 1 基于运行风险的系统分级发展和建设思路

### (二) 分级方案

由于无人机本体安全水平与场景耦合度较小，在开展运行风险分级时，可暂不考虑飞行器本体风险和由其引发的对地、对空风险，可将其作为修正量，依据无人机本体

安全水平，最终修正场景分级。

无人机为主的应用场景的运行风险可视为该场景中航空器空中碰撞概率与事故严重性的乘积。空中碰撞概率与场景中飞机间的最小遭遇时间密切相关，遭遇时间越短，空中碰撞概率越高；事故严重性则主要考虑人员伤亡，其中无人机运行过程中人员伤亡的概率与飞行区域的人口密度呈正相关（除此之外，还可以将其他敏感暴露要素，例如幼儿园、学校、医院、加油站以及水源地等区域，按照与人口密度相同的思路一并纳入考量）。假设初始运行风险显著高于可接受安全水平为高风险；与可接受安全水平相当为中风险；显著低于可接受安全水平为低风险。结合上述事故概率、严重性以及运行风险分级标准，得出无人机应用场景的初始风险分级结果如表 1 所示。

**表 1 无人机应用场景初始运行风险分级表**

空中碰撞概率	高	中	低
人口稠密区飞行	高风险	高风险	中风险
非人口稠密区飞行	中风险	低风险	低风险

风险分级后，相应提出对低空智能网联体系不同等级的所需能力，其中一级通信、导航、监视及机载所需能力应能够将高风险场景的空中运行风险缓解至可接受安全水平以内。依此类推，二级对应中风险场景，三级对应低风险场景。不同级别的低空智能网联体系应该能够在两机最小遭遇时间范围内处置掉空中碰撞风险。具体而言，通导监及机载设施设备应确保“冲突探测 - 冲突告警 - 指挥控

制 - 空中作动” 整条冲突处置链路消耗时间小于两机最小遭遇时间。

基于上述分级建设思路和风险分级结果，我们对无人机典型常态化应用场景进行风险与所需能力分级，如表 2 所示。对于其他非常态化场景（如航空探矿与矿区巡察等特种作业、无人机编队灯光秀表演、应急搜索救援），其所需能力应视运行具体情况进行讨论，不在表 2 中体现。

**表 2 无人机典型常态化应用场景运行风险分级示例**

无人机应用场景	碰撞概率	飞行航线是否覆盖人口稠密区	初始运行风险	所需能力等级
中大型无人机货运	中	否	低	三级
城市快递末端配送	中	是	高	一级
外卖	高	是	高	一级
医疗物资转运	中	是	高	一级
空中拍照与影视航拍	中	是	高	一级
		否	中	三级
空中广告	中	是	高	一级
无人机培训	中	否	低	三级
航空喷洒、巡护、监测	低	否	低	三级
路况巡查与交通指挥	低	是	中	二级
		否	低	三级
航空遥感与气象探测、地质勘察与地形测绘	低	是	中	二级
警用飞行与安防巡查	低	是	中	二级
		否	低	三级

运行场景分级是开展低空智能网联体系建设的前置工作。通过开展场景分级，确定场景的风险水平，进而确定基础设施建设水平，才能确保后续工作与场景需求相适应，实现场景整体风险可控。

### 三、低空智能网联体系建设总体发展路径

#### （一）发展目标与适用范围

低空智能网联体系需满足前瞻性、可扩展性、系统性、经济性四项基本原则。

（1）前瞻性原则：体系的建设规划应充分考虑未来低空领域的发展趋势，秉持“适度超前但不过度超前”的总体理念，避免局限于当前的需求和现状，适度提前布局关键技术、基础设施和管理架构，确保体系能够适应未来多元化的复杂需求，避免因技术或理念的滞后而限制体系长期发展。

（2）可扩展原则：建成后的体系具备模块化、开放性和标准化的接口，以便于功能扩展、性能优化和规模升级，避免大面积、高成本的重构工作。

（3）系统性原则：低空智能网联体系涉及多个相互关联、相互影响的子系统，任何环节的缺陷都会对体系整体带来极大的安全隐患。在建设过程中，须从全局出发对各分、子系统进行统筹规划和协同设计，确保各部分之间的无缝衔接和高效协同工作。

（4）经济性原则：体系建设过程中应充分考虑全寿命周期成本，力求以最小的成本实现最大的功能和效益。既要通过优化设计方案、采用成熟的技术和设备降低建设成本；还要注重运营过程中的成本控制，通过提高系统的运行效率和资源利用率降低运营成本。

## (二) 低空智能网联体系建设路径

低空智能网联体系的建设是一项涉及运行场景与模式、飞行器及管理服务能力、技术方案等方面复杂的系统性工程。总体思路路径是“场景牵引、风险分级、能力映射、技术迭代”，以运行场景为起点、以可接受安全水平为底线、以所需能力为桥梁、以技术方案为落点，通过多方协同、逐步推进，形成“七步闭环”的系统性发展流程，为低空经济规模化发展提供可靠的实施路径。如图 2 所示。

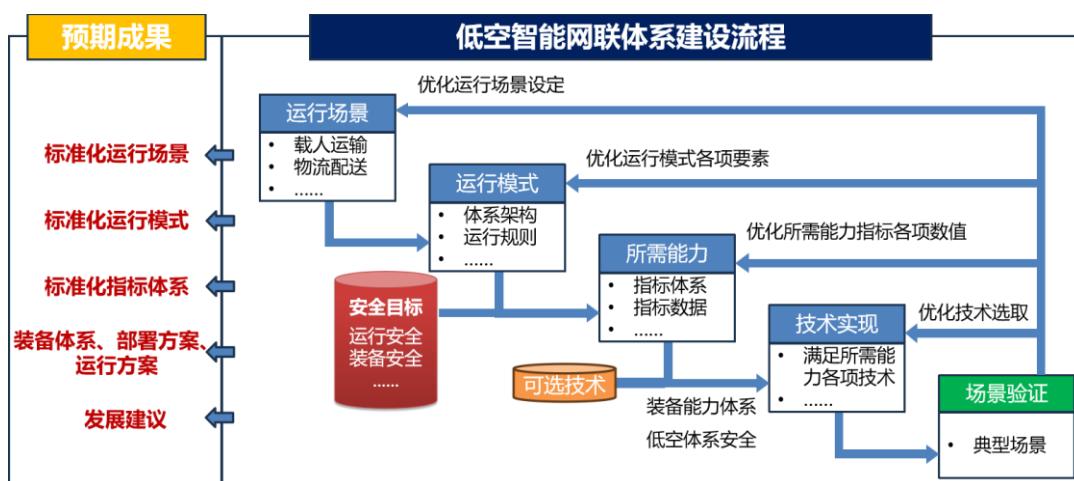


图 2 低空智能网联体系建设思路

(1) 运行场景：各地主导深入挖掘当地低空应用场景需求，明确当地场景类型及特色，并做好风险分级工作，为后续低空智能网联体系设计提供基础依据。

(2) 运行模式：对参与方、流程与规则、性能目标等关键方面及其相互关系进行全面分析，梳理核心理念，确保运行模式体系设计的可操作性，确保管理方与技术方的协同性，以便各有关机构基于当地场景特点细化对应的运行模式。清晰的运行模式将进一步决定基于运行的所需能

力。

(3) 可接受安全水平：根据各地的运行场景特点和运行模式设计，制定满足要求的可接受安全水平，并采用科学方法对运行空域和不同飞行器进行对地和对空安全风险等级的定性和定量评估，确保将低空风险控制在可接受安全水平的状态，进而从安全层面上决定了所需能力的部分指标。

(4) 所需能力：依据运行模式进行分析，挖掘需满足的功能、性能指标和适用条件，有效指导技术方案的选择和资源的合理配置。所需能力是连接运行模式、安全水平评估与技术实现的关键环节。

(5) 技术选取：基于所需能力将能力指标转换为技术指标，并依据技术指标选择能够满足相应需求的、与地方经济发展水平相适应的可用技术，确保技术方案与运行场景、运行模式和所需能力等因素的高适配性，完成运行体系的落地发展。

(6) 系统验证：按照理论仿真、系统集成验证、真实场景运行验证三个阶段，对体系的设计方案、技术实现及综合能力进行全面评估，逐步从理论可行性验证过渡到实际运行能力验证，确保体系从设计到应用的平稳落地。系统验证是低空智能网联体系建设中确保科学性和可靠性的核心环节。

(7) 迭代优化：各阶段层次的验证结果可分别为体系建设提供反馈依据，包括能力指标调整、技术方案优化、

运行模式完善等，逐步提升体系的适配性和实际效能。验证后的反馈与迭代优化是体系持续完善的必要途径，通过动态闭环的优化机制，确保体系设计与运行需求始终保持一致，为低空智能网联体系的长期发展奠定坚实基础。

### （三）低空智能网联体系各环节参与方分解

低空智能网联体系的发展和建设是一项典型的“多主体共建”的系统工程，低空运营参与方主要提供任务场景与业务需求，驱动体系设计面向实际应用；低空交通管理与服务提供方主要承担运行相关的顶层设计，确保低空运行活动合法合规、安全有序；低空行业监管方负责对行业的可接受安全水平进行研判，给出满足安全约束的所需能力要求，并对低空活动开展监管，是体系安全治理的保障。

低空装备相关参与方在全流程承担着贯穿运行、验证、能力构建和技术落地的关键任务。其中低空飞行器制造方不仅提供飞行装备本体，还深入参与飞行器能力构建、适航能力验证、系统集成测试等多项工作；其提供的飞行包线、抗风能力、CNS 能力、自动化能力等直接影响空域划设、航线规划和交通规则的落地形态。而低空基础设施保障与服务提供方保障了体系运行的安全和高效：其提供的通信、导航、监视、起降场等基础设施，构成了运行设计和技术方案的真实边界。低空装备各方在方案设计、数据供给、功能验证、运行支持等各环节均提供支撑，确保了顶层设计的可执行性。

**表 3 低空智能网联体系各环节参与方分解**

建设环节		主导方	支撑协同方
运行场景想定		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 低空运营参与方</li> <li>● 低空交通管理与服务提供方</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 低空行业监管方</li> <li>● 低空基础设施保障与服务提供方</li> <li>● 低空飞行器制造方</li> </ul>
运行模式设计	可用空域划设	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 低空行业监管方</li> <li>● 低空交通管理与服务提供方</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 低空运营参与方</li> <li>● 低空基础设施保障与服务提供方</li> <li>● 低空飞行器制造方</li> </ul>
	航线设计与规划		
	运行规则制定		
可接受安全水平分析		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 低空行业监管方</li> <li>● 低空交通管理与服务提供方</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 低空运营参与方</li> <li>● 低空飞行器制造方</li> </ul>
所需能力分析		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 低空行业监管方</li> <li>● 低空交通管理与服务提供方</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 低空运营参与方</li> <li>● 低空基础设施保障与服务提供方</li> <li>● 低空飞行器制造方</li> </ul>
技术方案设计		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 低空运营参与方</li> <li>● 低空基础设施保障与服务提供方</li> <li>● 低空飞行器制造方</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 低空行业监管方</li> <li>● 低空交通管理与服务提供方</li> </ul>

## 四、低空智能网联体系建设步骤

### (一) 运行场景分析

#### 1. 目标与任务

低空运行场景具有典型的多样性特征，因此运行场景选定分析是低空智能网联体系发展和建设的起点和关键。其核心任务是根据地方经济和地理特点，结合地方政策、资源分布和基础设施条件等外部因素限制，综合梳理适用于本地低空经济发展的典型运行场景，并明确各场景的需求与关键要素，识别多类型低空运行场景与业务需求，为后续的运行模式设计提供基础输入。

根据飞行特点，典型运行场景主要可划分为载人出行、低空物流、文体旅培、公共服务四个类别。综合考虑行业分类和应用场景等关键要素，可将上述四类典型场景进一步细化描述如表 4 所示。

表 4 运低空经济四类典型运行场景

低空运行场景类别	涉及的典型经济行业类别	主要应用场景描述
载人出行	交通运输、仓储和邮政业 (G)	载客运输（短途运输、包机飞行） 空中出租车
	住宿和餐饮业 (H)	个人娱乐飞行
	文化、体育和娱乐业 (R)	空中游览和飞行体验
低空物流	交通运输、仓储和邮政业 (G)	通用航空货运 城市快递配送（末端配送） 多式联运
	住宿和餐饮业 (H)	城市外卖配送
	卫生和社会工作 (Q)	医疗物资转运（血液配送、器官移植转运）

低空运行场景类别	涉及的典型经济行业类别	主要应用场景描述
文体旅培	文化、体育和娱乐业 (R)	无人机编队灯光秀表演
		空中拍照与影视航拍
		航空体育运动 (跳伞、滑翔伞、热气球)
	教育 (P)	执照培训 (商照/私照/运动类驾驶员)
		航空运动训练
	租赁和商务服务业 (L)	空中广告
公共服务	农、林、牧、渔业 (A)	航空喷洒/撒 (播种造林、投放鱼苗)
		巡护 (防火、林区、牧区、鱼种场)
		监测 (农田、水质)
	采矿业 (B)	航空探矿与矿区巡查
	电力、热力、燃气及水生产和供应业 (D)	电力空中巡查和管道巡检
	交通运输、仓储和邮政业 (G)	路况巡查与交通指挥
	科学研究和技术服务业 (M)	航空遥感与气象探测
		地质勘察与地形测绘
	水利、环境和公共设施管理业 (N)	检测 (水资源、水源工程)
		巡查 (保护区、环境、市容、绿化、园区)
		土地开发勘测、监查
	公共管理、社会保障和社会组织 (S)	警用飞行与安防巡查
		应急搜索救援
		智慧城市管理
		消防灭火与消防指挥

参考资料：1. 中国航空学会《2024 低空经济场景白皮书》；2. 中国交通运输部

《低空交通运输应用场景典型案例》。

各地方政府应结合自身资源条件，重点关注能够发挥本地经济特色和优势的运行场景。因不同运行场景对空域规划、飞行器能力以及通导监性能的要求不同，在明确场景分类的基础上还需确定运行场景中的具体需求和运行条件。

## 2.运行场景要素分析

运行场景的构建依赖对当前运行环境和未来需求趋势的综合研判。运行场景想定的输入要素主要包括现有运行情况、空域资源、政策情况三类要素，以形成对区域基础条件、政策导向与发展趋势的系统认知，明确体系建设的逻辑起点和重点方向。场景要素分析的输入内容既包含定量化的数据支撑，也包括政策及行业趋势类的定性判断，应通过系统化的收集与研判，为后续任务定义与方案设计奠定基础。

## 3.运行场景想定

运行场景想定的输出成果主要聚焦于在完成现状评估和需求研判后，对体系建设范围、运行边界及条件约束进行明确。通过梳理任务定义、空域条件与用空约束、需求点位置和飞行器类型，可形成体系建设的顶层输入框架，为能力设计、系统架构规划和实施路径制定提供清晰方向。



图 3 运行场景分析与想定示意

## (二) 运行模式设计

### 1. 目标与任务

运行模式设计的目标是为低空智能网联体系构建统一、规范、可执行的运行组织机制，确保体系愿景能够落地实施。通过明确体系的组成要素、参与方职责分工、协同运行流程，形成一套能够指导运行管理实践、支撑规模化运营、保障安全与效率并重的发展模式。运行模式设计旨在解决“谁来参与、在何处运行、按什么规则运行”等关键问题，实现低空运行活动的有序组织、透明管理和持续优化。

为实现上述目标，运行模式设计需重点完成以下任务：一是明确参与方体系，梳理低空智能网联体系中各类主体（包括低空载运具、行业监管方、运营参与方、交通管理与服务提供方、基础设施保障方等）的角色定位与职责边界，构建权责清晰、协调高效的运行责任体系。二是空域划设，构建与低空智能网联体系相适应的空域组织方式，空域结构与使用规则，为运行提供空间基础。三是航线规划与设计，基于空域结构和运行需求，形成满足不同运营模式（如点对点、航路式、网络化运行）、不同载具性能

及不同运行场景的航线规划方案，构建具备可扩展性和可持续优化的低空航路网络体系。四是运行规则制定，围绕运行流程，制定标准化、可执行的运行管理规则，为运行提供制度和管理依据。

## 2. 明确参与方职责

为确保体系建设的系统性、边界清晰性与责任闭环，需要在运行场景想定阶段明确各环节的主导责任方（负责最终成果形成与决策），并界定协同参与方（提供支持性数据、资源、技术与审查），形成跨部门、跨主体的责任协同体系。

## 3. 可用空域划设

### （1）空域基础条件与约束分析

可用空域划设需基于区域空域结构、管理权限、限制性规定及安全间隔要求开展系统分析。可用空域划设的输入以“空域条件与用空约束”为核心，要求在法规、管制实践与本区域地理环境的约束下对现有空域资源进行全面梳理与定量化描述。具体包括现行可用空域边界、空域类型与层次、空管与地方政府的使用规则、军民协调与敏感区分布、现有航路与临时占用信息，以及空域容量与冲突点的统计分析。

### （2）形成低空可用空域说明

基于上述分析，形成适配低空运行的可用空域布局成果，在完成输入研判与分析后，输出应形成可直接供试点运行与管理系统使用的空域划设成果，主要包括试点可飞

空域的空间分布方案与结构化的分层空域数据。输出需明确每一片可飞区域的空间边界、适用高度层、开放时间窗口、适用飞行器类型及对应的运行限制或优先规则；同时，应形成配套的运行模式说明，以支持不同业务场景下的动态调度与流量控制。输出成果应便于在运行管理平台、飞行计划系统和应急指挥中直接调用。



图 4 可用空域划设示意

#### 4. 航线规划与设计

##### (1) 航线规划基础数据分析

航线规划需基于多源空间数据融合分析，主要围绕运行安全约束、环境承载能力与空间可用性展开，核心目的是为航线布局提供量化、可比、可计算的风险与条件基础。输入需整合人口密度与地面敏感目标分布，以评估航线经过区域的潜在第三方风险暴露水平，并结合可用空域边界、空域分层及使用规则，明确航线可布设的空间走廊与避让区域。同时，应融入地形地貌与建成环境数据，用于识别影响航迹高度规划、通信遮挡与自动化导航性能的地形障

碍物、城市峡谷、高层建筑群等因素。此外，有人机历史运行数据（含航迹、运行事故/告警记录、典型冲突点与时段特征）可为航线规划提供可借鉴的运行模式、负荷规律与风险经验，使无人机/eVTOL 航线设计能够兼顾现有航空交通体系与未来低空运行需求。

## （2）航线设计成果生成

基于风险量化评估与空间可用性分析，输出成果需形成可直接支撑航线建设决策、运行审批与系统部署的规划成果。核心输出为“三维风险地图”和“低风险航路规划”。三维风险地图应综合人口暴露、地形障碍、敏感区、空域限制及历史运行风险，形成可视化、可叠加、可量化的三维风险场，用于航线设计、优化与仿真验证。低风险航路规划需输出推荐航路走廊、节点与航路网络结构，明确航路高度层级、宽度、避障规则、适用机型与运行模式，并形成机器可读数据，以便纳入飞行计划、运营调度和数字空管系统直接调用。



图 5 航线规划与设计示意

## 5.运行规则制定

### (1) 运行规则需求分析

运行规则制定需以任务特性、三维风险地图及规划航路体系为基础。运行规则制定需求分析环节的重点在于将需求侧要求与航路结构特性相融合，形成具有针对性的运行控制逻辑与安全边界。任务需求决定了运行模式、服务类型、响应速度、运行密度与服务等级要求，是制定规则的根本约束，应明确不同任务场景对优先级、通行权、时效性和安全冗余的差异化要求。三维风险地图为规则制定提供风险分区与运行条件的量化依据，使规则能够呈现差异化强度，如在高风险区提高航距、限速或能力门槛，在低风险区允许更灵活的调度策略。此外，运行航路航线是规则落地的空间框架，需考虑航段容量、关键节点的冲突概率、通行瓶颈、垂直分层策略及备降路径设置，以支撑运行规则中的间隔标准、路权优先级、换道与避让逻辑。上述输入必须结构化并可映射至具体航路、时间窗与机型条件，确保规则具备可执行性与系统化适配能力。

### (2) 运行规则体系构成

基于任务需求、风险认知与航路结构，运行规则输出需明确飞行器在低空运行中的“怎么飞、谁先飞、飞多快、遇冲突如何处置、如何申请与如何管控”等关键制度安排，以形成可执行、可监管、可本地各场景的运行规则体系。应制定运行安全间隔标准，依据场景任务类型、飞行器性能与风险等级分区确定纵向/横向/垂直间隔及动态调节机制。

同时，需形成基本交通运行规则，包括路权分配、速度限制、优先机制、机动与避让要求等（隐含了对飞行器能力的最低要求）。此外，还应输出飞行计划报批流程，明确飞前申报与审批模式、变更与豁免机制等。最后，需形成运行管控流程，包括常态运行、容量管控、异常与应急处置规则以及信息通报机制。

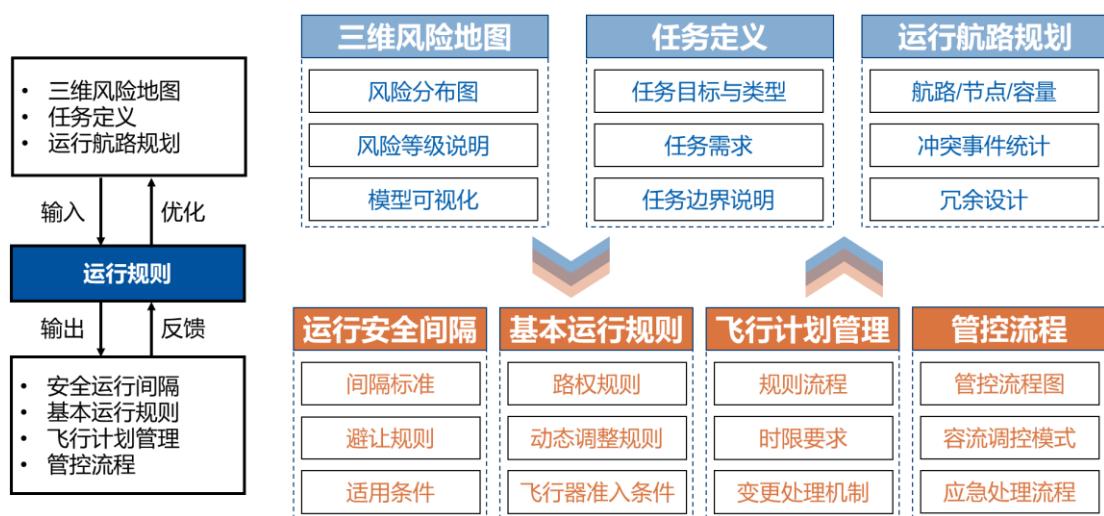


图 6 运行规则制定示意

### (三) 可接受安全水平分析

#### 1. 目标与任务

在低空运行中，“可接受安全水平”（TLS）体现的是整个低空智能网联体系在飞行器、基础设施、运行管理等多要素综合作用下所必须达到的整体安全底线，而非某一单独环节的安全表现。地方应结合自身场景特点设定本区域的可接受安全标准。在此约束下，需要明确既定运行模式中的主要风险源、风险构成及可接受的安全水平，并通过定量模型评估人口暴露、飞行密度、空域环境与运行规则对风险的影响，判断现有运行安排是否满足目标安全要求。同时，对各类风险缓解措施的效能进行系统评估，明确其组合方式与最低配置要求，为能力指标体系的构建提供可量化、可验证的安全风险依据，实现用安全要求约束所需能力、以能力建设支撑可接受安全水平的准则。

#### 2. 可接受安全水平分析基础要素

可接受安全水平分析依赖于对任务特性、运行环境与既定安全标准的系统化输入，以构建可量化的风险评估基础。任务描述需明确运行类型、任务频度、暴露时间、运行高度与航段特征等参数，以界定评估场景与风险暴露尺度。任务区域的人口密度是衡量地面第三方风险的关键因子，应提供空间化人口数据及敏感点分布，用于计算事故后果影响。运行安全间隔作为前序环节的输出，是风险模型中影响冲突概率、链式事故触发及失效冗余要求的直接变量，需按场景提供对应参数。此外，目标安全水平是判

断风险是否可接受的基准，应结合国家标准、监管要求与国际参考基准明确容许风险阈值。

### 3. 风险缓解措施量化

风险缓解措施需量化并形成可支撑安全决策、运行准入与监管审查的风险评估成果，核心输出包括“风险缓解效能”与“标准处置时间”。风险缓解效能应量化不同缓解手段（如技术能力提升、冗余配置、运行程序、空域结构或交通规则优化）对风险降低的贡献，可形成单一措施及组合措施的缓解比例，为确定最低运行配置与强化路径提供依据。标准处置时间是指运行主体在面临异常或冲突情形时，从识别、决策到执行处置动作所需的最短时间要求，是验证运行安全间隔合理性和运行能力门槛的关键参数，应按场景、机型与风险等级确定。



图 7 可接受安全水平分析示意

## (四) 所需能力分析

### 1. 目标与任务

所需能力分析是将运行模式对应的运行要求和可接受安全水平对应的安全约束转换为能力指标，并计算出其合理数值。通过需求驱动与约束导向相结合，构建科学的所需能力指标体系。

所需能力可针对目标属于合作或非合作分别制定，如表 5 和表 6 所示。

表 5 合作目标所需能力典型指标体系

所需能力	指标	指标数值要求
监视	监视概率	基于运行需求与安全约束，提出分级建设思路下的数值要求
	识别信息更新频率	
	监视精度	
	.....	
通信	监视识别信息传输时间	基于运行需求与安全约束，提出分级建设思路下的数值要求
	覆盖率	
	.....	
	.....	
导航气象与航空信息资料	导航服务覆盖率	基于运行需求与安全约束，提出分级建设思路下的数值要求
	导航服务连续性	
	导航服务异常告警时延	
	实时气象服务更新频率	
	气象服务预警时间	
	城市强风告警时间	
	.....	
信息关联	目标关联度	基于运行需求与安全约束，提出分级建设思路下的数值要求
	.....	
指挥控制	飞行态势上传频率	基于运行需求与安全约束，提出分级建设思路下的数值要求
	指令响应时间	
	.....	

**表 6 非合作目标所需能力典型指标体系**

所需能力	指标	指标数值要求
探测	探测概率	基于运行需求与安全约束，提出分级建设思路下的数值要求
	虚警概率	
	探测信息更新频率	
	探测精度	
	.....	
处置	飞行态势上传频率	
	识别准确度	
	识别判定时间	
	处置响应时间	
	处置成功率	
信息关联	飞行态势上传频率	
	.....	

在实际实施过程中，对于所需能力指标体系的分析还需建立动态反馈机制。随着场景运行复杂度的提升和技术的快速迭代，各项需求可能发生变化，因此需要定期复核所需能力指标，并根据验证的反馈结果进行调整和优化指标数值，确保所需能力与运行场景的长期适配性。

## 2. 所需能力的计算依据

所需能力分析依托前序环节的成果，通过多维输入构建能力要求的计算基础。任务需求决定运行场景下的服务功能、运行效率与服务质量要求，对能力配置的强度和完善程度具有决定性影响。三维风险地图提供运行风险分区及限制条件，为能力要求的差异化设定提供输入依据。运行航路航线描述运行的空间结构、节点瓶颈和通行模式，

从运行负荷、通信覆盖、监视精度及导航性能角度引出能力需求。基本交通运行规则明确了间隔、路权、避让等运行行为规范，是通导监与管控能力设计的行为逻辑基础。风险缓解效能与标准处置时间则直接决定能力的最低配置要求与响应性能门槛，例如冗余能力、识别与处置能力等。结构化的输入使其能映射到能力模块、能力指标及能力等级。

### 3. 所需能力指标量化

所需能力的指标量化需明确在所定义运行模式与安全约束下的能力构成与能力水平，形成能力体系框架和能力准入要求。所需通导监能力应结合航路结构、运行密度和风险等级细化为通信、导航、监视能力指标，包括能力指标、冗余要求等。所需管控能力包括运行组织与交通管理能力、容量管理、计划与运行动态协同、异常与应急管控能力以及信息服务支持能力，可形成管控能力分层与能力成熟度要求。所需飞行器能力则明确平台在不同运行等级、运行条件下的最低能力要求。



图 8 所需能力指标量化示意

## (五) 技术方案设计

### 1. 目标与任务

本环节在明确能力需求的基础上，形成满足能力要求的技术指标，以及可落地实施、可集成建设且具有成本效益的技术方案，为后续工程实施与系统建设提供依据。核心任务包括：围绕所需通导监能力、管控能力及飞行器能力，结合现有资源与基础条件，设计系统架构与技术配置路线，明确所需建设内容、部署策略与实施步骤；开展多技术路径对比，确定最优或组合式技术方案，并形成与能力要求的匹配性分析与可行性验证。同时需考虑兼容性、扩展性、演进能力与运维要求，确保技术方案不仅可解决当前需求，还具备适应未来规模化和智能化发展的能力。

### 2. 技术方案设计依据

技术方案设计的核心在于将所需能力指标转换为技术指标，并选取合适的技术及部署方案，实现完整的技术路径。技术实现应从技术成熟度、技术实现难度、经济水平以及三者之间的相互制约关系等多个方面同时出发，选取既能满足技术指标，又能节约成本的高性价比技术方案。

各地可结合自身区域优势，重点关注本地经济、基础设施能够支持的技术方案。所需能力要求是方案设计的核心依据，用于明确各技术模块需实现的功能性能指标、覆盖要求、冗余等级与能力成熟度，为方案选型与架构设计提供约束。现有资源条件决定建设方案的基础环境与可用

资源，包括当前已具备的通信、导航、监视类基础设施能力，设备型号、覆盖范围、站点位置、供电与回传条件，以及部署区域的电磁环境约束，用于明确可利用与需补齐的资源差距。

同时，需获取现有数据情况，包括可用数据类型、格式、标准、接口方式与更新周期，以判断数据融合与系统集成难度。设备及基础设施兼容性分析则用于评估拟选技术与现网的协同程度，包括接口、协议、频段、时钟同步、信息安全与管控兼容性，为方案适配性、成本与改造复杂度评估提供基础。

### 3. 技术方案选取

技术方案设计需形成可直接用于工程建设、招采与实施部署的技术方案。首先需形成体系化的技术方案，明确系统架构、设备选型、部署方式与规模，包括各类设备/系统的类型、数量、安装或覆盖位置、网络拓扑与接口设计。其次，需输出技术方案与能力需求的匹配评估，说明方案对各项能力要求的满足程度、性能裕度、能力短板以及需通过程序性措施或后续升级补足的环节，实现方案与能力要求的映射。此外还应提供成本估算，包含建设成本、运维成本与全生命周期成本测算，以支撑投资决策与建设节奏规划。

部分系统、设备根据各有关部门要求，可能存在名称、重点指标等方面的差异，但技术选取时，应构建有关需求

的最大集，具体系统名称等问题，本报告不再额外进行区别。

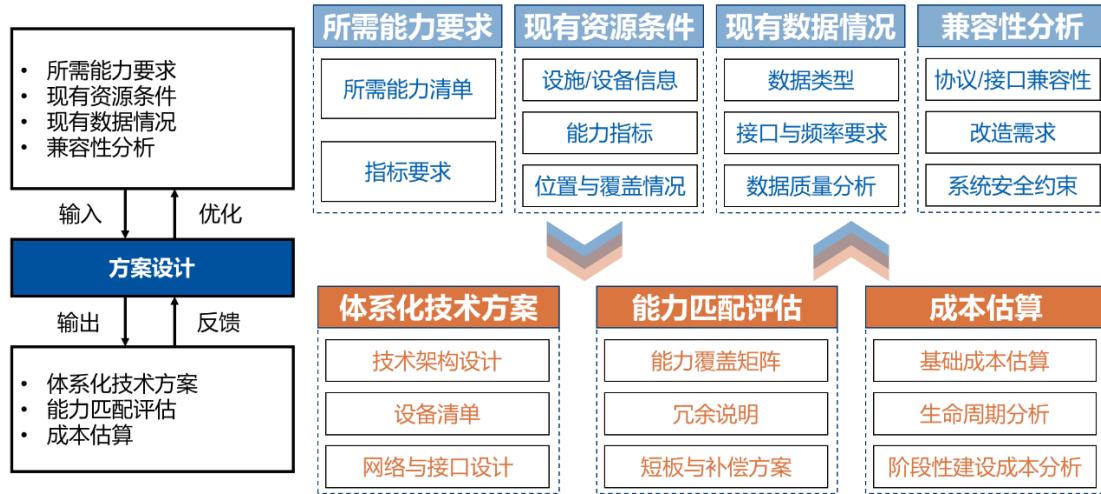


图 9 技术方案设计与选取示意

## （六）系统集成与验证迭代

低空智能网联体系需要通过构建从单项能力到体系协同的集成与验证闭环机制，确保场景需求、运行规则、安全要求以及技术能力实现一致性落地，并通过持续迭代优化形成可演化的低空智能网联体系。该过程强调能力验证与安全验证双路径并行推进，并在性能、安全与成本之间寻求动态平衡。

### 1. 体系集成与能力验证路径

体系建设需遵循由单机到多机，再到系统级集成的能力验证路径，逐步实现能力构建与协同提升。单机验证聚焦飞行器和基础设施核心能力（如自主避障能力、导航定位精度、机载通信链路稳定性）满足基本标准；多机验证通过验证多飞行器和基础设施在同一空域下的协同能力、冲突探测与避让机制、信息共享与链路容量表现等，确保

系统具备稳定支撑多主体运行能力；系统验证则面向全链路运行体系，包括通导监基础设施、管控平台、运行规则与服务流程等。通过阶段性集成演进，可在不牺牲安全性的前提下降低技术成熟度不足带来的系统性风险。

## 2.多层次安全验证与逐级演进

安全作为体系建设的基础核心保障之一，需从单体安全、群体安全到体系安全逐级推进。单体安全验证关注单个飞行器或系统组件在故障情形下的可靠性与失效保护能力；群体安全验证测试多主体同时运行时的风险传导、链式故障与事故外溢效应，并检验运行规则、交通组织与冗余设计的有效性；体系安全验证则模拟复杂运行环境下的全局态势，包括系统互联故障、极端运行条件以及意外事件响应能力，重点评估安全机制能否形成闭环并具备恢复能力。通过逐级验证构建安全弹性，使体系具备抗故障、抗扩散与可恢复能力。

## 3.通过多约束下的柔性调节维持体系平衡

体系集成需在安全、经济与技术能力之间实现动态平衡。当结合本地需求和投入确定的技术能力暂未达到安全约束要求时，可通过运行规则优化、运行模式调整或缓解措施强化等方式进行替代性满足，形成“能力—规则—流程”之间的柔性调节机制。同时，通过评估经济投入与收益，综合考虑基础设施部署成本、技术升级周期与运营成本，避免过度建设或冗余能力导致体系不可持续。体系需建立持续迭代机制，通过实测数据反馈、运行经验积累与技术

演进周期性更新，实现能力、规则与安全要求的同步优化，形成可扩展、可复制、可升级的体系演化路径。

在低空智能网联体系建设过程中，运行场景想定、空域设计、航线规划、运行规则制定、安全水平分析、能力需求确定以及技术方案设计等关键环节均涉及多方协同参与。

## 五、低空智能网联体系建设发展趋势与愿景

低空智能网联体系经前述思路步骤建设完成后，各参与方能够在特定场景下初步稳定运行。但运行模式的划定、可接受安全水平的限定、所需能力指标等要素的量化等方面可能并不与应用场景完全适配，仍有待优化。

低空智能网联体系的发展是一个逐步推进、持续完善的过程。依据近期、中期、远期规划的发展流程如图 10 所示。

场景	近期	中期	远期
空域	<ul style="list-style-type: none"><li>● 低密度、低风险、单机控制</li><li>● 物流配送、低空摄影场景</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 中等密度、可控风险、集中控制</li><li>● 城市交通、公共安全、应急救援</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 高密度、大流量、分布控制</li><li>● 智慧城市、大规模物流、载人交通</li></ul>
低空飞行器	<ul style="list-style-type: none"><li>● 分段隔离运行</li><li>● 廊道式管理</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 动态网格化空域管理</li><li>● 多用户共享空域</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 自由空域</li><li>● 空域自适应共享</li></ul>
信息物理基础设施	<ul style="list-style-type: none"><li>● 飞行器及机载设备-单机智能</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 飞行器及机载设备-多机智能</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 飞行器及机载设备-体系智能</li></ul>
管理服务	<ul style="list-style-type: none"><li>● 基本通信网络和地面监控站</li><li>● 低密度数据支持</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 集成智能地面传感器网络</li><li>● 实时数据传输与远程监控</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 智能通导监算基础设施</li><li>● 大规模实时数据处理与分布式协同</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>● 手动飞行计划</li><li>● 自动化监视与报告</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 自动化飞行计划生成与管理</li><li>● 实时监控与多方协同</li><li>● 辅助管理平台</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 飞行器自动认证</li><li>● AI自动化决策</li><li>● 大数据分析调度</li><li>● 智能管理平台</li></ul>

图 10 低空智能网联体系的发展规划图

当前运行场景和运行模式尚未明确，空域密度和运行风险相对较低。现阶段飞行器的设计制造以满足单机独立运行为目标，智能化水平较低；机载设备以满足基础通导

监能力的设备为主；空域以隔离运行为主，通过廊道式的运行模式确保业务的正常开展；服务能力和监管自动化水平、实时性和全面性较低。

随着相关技术的成熟和应用场景、应用边界的逐渐明确，低空运行将逐步向中等密度、可控风险的方向发展。飞行器将向网联化和业务驱动的智能化方向发展；机载设备将集成更多高精度、智能化的设备，以支持多机协同和复杂任务执行；基础设施建设将为飞行器提供动态感知能力，确保安全高效地运行；空域管理由静态隔离运行模式向动态网格化运行模式转变。依托智能航电系统和实时数据传输实现飞行器之间的协同感知和动态避障；基于低空智能网联体系的服务支撑平台和应用系统逐步投入使用，服务和监管的自动化水平得到较大提升，逐步实现人在回路上的空域容流管理、飞行计划调整、冲突风险告警解脱等能力。

未来，随着低空智能网联体系的进一步扩展和完善，低空运行将全面进入高密度、大规模、复杂异构的运行阶段。飞行器将以高速可靠的网络协同为核心，运行模式将由单机智能向体系智能转变；空域管理将从动态网格化运行进一步演进至灵活的低空自由运行，飞行器能够在无固定航线约束的情况下自主完成复杂任务；低空监管和服务向高度智能化和无人化的方向发展，基于人工智能的监管服务平台能够实时监控飞行器运行状态并进行智能化安全管理和调度，实现人在回路外的低空运行的精准管理与高

效调控。

为保证体系的落地发展，应在持续的应用实践中对运行模式、能力需求以及技术手段进行系统验证和迭代优化，将模式和需求转化为实际可用的系统能力。这种科学实践路径能够确保发展方向的正确和可行，在面对复杂环境和技术挑战时具有更高的适应性和创新性。低空智能网联体系的未来发展应注重开放性、可迭代性和兼容性。三者相互支撑、相互促进，共同推动体系的持续演进与完善。