

低空装备试验验证体系 发展路径及趋势

低空装备安全技术委员会

2025 年 11 月

编委会

主 任

张利国

副主任

刘法旺 左 涛 刘薇薇 程文渊

编 委（按姓氏拼音排序）

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 陈 宝 | 陈 果 | 程建康 | 邓文亮 | 董耀聪 |
| 杜志华 | 郭 佳 | 胡桂新 | 黄 兵 | 黄志晨 |
| 贾重任 | 金 君 | 金 伟 | 李 力 | 李宜恒 |
| 李 艺 | 李 勳 | 林嘉鑫 | 刘艾青 | 刘晓杰 |
| 陆晓华 | 闵立武 | 彭 鹏 | 屈 峰 | 沈雪玲 |
| 宋继伟 | 田 野 | 王橙帆 | 王景霖 | 王 珏 |
| 王 伟 | 王 雨 | 王玉鑫 | 王智新 | 谢 强 |
| 谢 岩 | 熊 智 | 许 萌 | 闫 峰 | 杨剑锋 |
| 杨瑞霞 | 余章龙 | 赵 诚 | 张 帆 | 周国兴 |
| 张红亮 | 周明岳 | 张 睿 | 周双勇 | 张旺旺 |
| 张学涛 | 张 帅 | 郑 昕 | 赵之然 | |

核心编制单位

北京理工大学

工业和信息化部装备工业发展中心

中国民航科学技术研究院

中国电子技术标准化研究院

工业和信息化部电子第五研究所

中机科（北京）车辆检测工程研究院有限公司

中咨高技术咨询中心有限公司

零重力飞机工业（合肥）有限公司

中国工程物理研究院总体工程研究所

中国信息通信研究院

中国航空工业集团气动院

中国航空工业集团民机试飞中心

中国航空工业集团北京长城计量测试技术研究所

北京航空航天大学

中国飞机强度研究所

中国工业互联网研究院

中国航空工业发展研究中心

中国铁路通信信号股份有限公司

参与编制单位（按拼音排序）

重庆长安汽车股份有限公司

重庆凯瑞机器人技术有限公司

国联汽车动力电池研究院有限责任公司

航宇救生装备有限公司

南京航空航天大学

清华大学

上海法拉笛驱动系统有限公司

上海机动车检测认证技术研究中心有限公司

上海沃兰特航空技术有限责任公司

四川沃飞长空科技发展有限公司

卧龙电气驱动股份有限公司

厦门市产品质量监督检验院

襄阳达安汽车检测中心有限公司

中国电子科技集团有限公司总体院

中国航空工业集团公司上海航空测控技术研究所

中国科学院力学研究所

中汽研汽车检验中心（天津）有限公司

珠海优翼测试科技有限公司

目 录

| | |
|-------------------------------|----|
| 一、概述..... | 1 |
| (一) 基本概念 | 1 |
| (二) 低空安全问题的内涵及对适航的理解 | 2 |
| (三) 研究范畴 | 4 |
| 二、国内外试验验证的发展状况 | 4 |
| (一) 国外 | 4 |
| 1、欧美地区 | 5 |
| 2、日韩地区 | 6 |
| (二) 国内 | 7 |
| 三、在国内的布局建设建议 | 9 |
| 四、低空装备试验验证体系建设内容 | 10 |
| (一) 整体框架 | 10 |
| (二) 具体建设内容 | 11 |
| 1、低空飞行器分系统 | 11 |
| 2、低空飞行器整机 | 13 |
| 3、无人机攻防一体设备 | 14 |
| 4、支持与保障设施 | 15 |
| 五、整体发展路线建议 | 16 |
| 1、整体规划、相对集中，快速形成平台化服务能力 | 17 |
| 2、分类指导、精准施策，推动政府与市场协同发力 | 17 |
| 3、体系布局、急需先建，实现建设范围全面覆盖 | 17 |
| 4、先易后难、层次推进，推进能力体系梯次化建设 | 18 |
| 5、已有共享、统筹协调，构建集约高效的能力体系 | 18 |

一、概述

当前，我国低空飞行器的研发如火如荼、发展迅速，但也遇到了非常多的卡点、堵点问题，其中一项就是第三方试验验证与安全性检测服务能力问题，这对低空飞行器的适航审定进程具有巨大的助推作用，各地方政府也意识到了低空第三方检测机构重要性和产业引流作用，也在大力推动该方向的建设，然而，具体怎么建设是一个崭新课题。

本报告是在 2024 年 11 月份由低空装备安全技术委员会编制发布的“新能源新构型低空装备安全技术体系报告”基础上，由低空装备安全技术委员会主导，组织行业内龙头企业、科研机构、高校、第三方检测机构等单位联合研究并编制完成。报告根据我国低空产业具体情况、国家相关文件对“新能源新构型低空装备安全技术体系报告”中的有关名词定义进行了修正。

（一）基本概念

低空装备：是指低空产业中的工业设备，主要包括新能源新构型低空飞行器（简称低空飞行器）、无人机攻防一体设备、支持与保障设施三大类装备，本报告中低空飞行器仅指新能源新构型的无人机和 eVTOL。

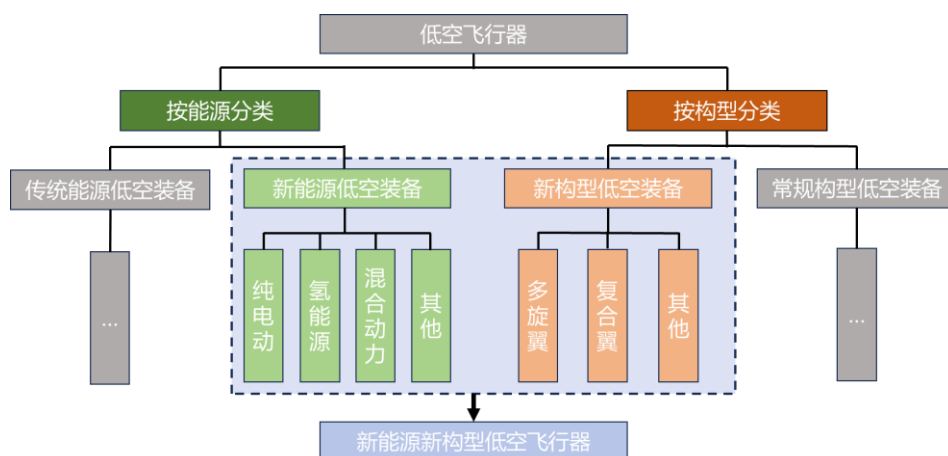


图1 新能源新构型低空飞行器的概念范围

低空安全：主要是指低空飞行器本体及低空飞行器运行过程中所导致的各类安全性风险及事故。

适航：是指航空器等装备在预期的环境中安全运行所具备的固有品质。

（二）低空安全问题的内涵及对适航的理解

低空安全是低空经济发展的核心前提，其核心表现可归纳为四个维度，具体包括：一是安全事故均发生于运行（运营）阶段；二是仅造成低空飞行器本身损坏；三是对周边环境或人员造成伤害；四是同时导致人员、环境与低空飞行器均出现损伤。

从本质来看，引发低空安全问题的核心原因可划分为四类，具体为：一是低空装备本体故障引发的安全性事故；二是运行环境变化导致的安全性事故；三是人为操作因素造成的安全事故；四是恶意攻击（含刑事、非合作场景）引发的安全事故。

数据显示，传统通航领域中，20%—30%事故的主要诱因

是人为因素；而在以无人化、电动化、智能化为核心特征的新通航领域（即新能源新构型低空装备），这一比例发生显著变化——80%的事故主因源于低空飞行器本体。

具备安全性的低空装备是设计所赋予、制造来实现、试验验证来表明、经审定确认、靠保障来实现安全运行。因此，低空装备要具有完善的设计方法、设计流程、设计标准、设计手册、验证方法、验证标准、验证设备等新的工业基础才能够安全健康发展。

低空装备试验验证与安全性检测是低空产业新工业基础的一环，是低空安全发展的必然要求。研发生产单位为了保证所研制的产品具有必需的性能、功能及相当水平的安全性可靠性所做的各类设计数据的相关试验验证与检测。民航局适航审定部门为了保证所投放市场运行的低空装备具有最低标准的安全性所进行的必要的试验验证与检测（既安全性检测）提供服务。

为规范无人驾驶航空器飞行管理、保障低空运行安全，2023年5月31日，国务院与中央军委联合颁布《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》（以下简称《条例》），该条例自2024年1月1日起正式实施。针对无人驾驶航空器的安全性要求，《条例》作出了明确的差异化规定：具体而言，最大起飞重量低于25kg的无人驾驶航空器，需依据强制性国家标准GB42590-2023完成检测认证；此外，最大起飞重量高于25kg的无人驾驶航空器，则需按要求进行适航取证。

值得注意的是，适航标准作为保障飞行安全的最低要求，需严格遵循以下核心准则，即“设计赋予、制造实现、验证表明、审定确认、维护保持”，确保全生命周期的安全合规。

（三）研究范畴

本报告聚焦于低空装备试验验证与安全性检测，主要内容为低空飞行器分系统及整机的安全性问题、无人机攻防一体设备的安全性问题以及支持与保障设施的安全性问题，项目旨在搭建完整的低空装备试验验证体系，助力低空装备产业安全、有序、健康的发展。

二、国内外试验验证的发展状况

在当前全球低空经济加速发展的背景下，行业面临着标准体系不统一与检测能力不足等共性挑战。由于各国适航标准存在差异，企业为满足不同市场准入要求需重复进行检测认证，显著增加了研发成本与周期。为应对这一局面，国际组织正积极推动标准统一化进程，同时快速提升专业检测能力，涵盖新能源系统、城市空域仿真等关键领域的专用测试设施陆续启动建设。在此过程中，AI 仿真、数字孪生等创新技术的应用深刻改变传统检测方式，推动形成“虚拟验证与实景测试融合”的新型认证体系，为低空装备的安全可靠运行提供技术支撑。

（一）国外

1. 欧美地区

欧美延续“监管机构－标准组织－执行机构”的三级体系，但检测设施主要服务于大飞机，虽可兼顾通用飞机和低空装备，但成本较高，限制了新机型研发，在新能源新构型装备领域呈现明显适配不足，总体上装备研发和安全认证处于探索阶段，相关标准和检测能力建设进展缓慢。

美国由 FAA 主导适航审定，通过“特殊适航认证(SAC)”“类型认证(TC)”双路径覆盖低空装备，分别委托 ASTM、RTCA 制定行业共识标准、完善通信导航规范，实际检测由波音（结构强度测试）、GE Aviation（动力系统验证）等航空巨头及 Intertek（电磁兼容检测）、UL（电池安全测试）等第三方机构承接。

欧洲由 EASA 建立统一认证体系，强制要求低空装备通过 CE 认证及全生命周期合规审查，依托空客（整机集成测试）、罗罗（动力系统验证）等企业实验室，以及 TÜV（环境适应性测试）、DEKRA（航电系统检测）等机构开展验证工作。其特定运行风险评估（SORA）框架针对不同空域风险等级制定差异化检测要求，系统化程度领先。

在标准制定方面，针对 eVTOL、氢燃料无人机等新能源新构型装备，现有标准存在明显空白。美国 FAA 审批灵活，ASTM 标准更注重行业共识，尤其在 BVLOS（超视距飞行）检测要求上更为严格。欧盟强调统一 CE 认证和全生命周期合规性，其 SORA 框架系统化程度高。但总体上看，面向新

能源新构型低空装备，欧美仍缺乏专业检测标准和机构，导致认证与检测服务滞后，限制了装备企业的发展。

2. 日韩地区

日本与韩国分别通过“分级管控与场景驱动”和“政策牵引与技术突围”两种差异化路径，系统推进适航认证、检测能力与关键技术的突破，展现出各自在制度设计与技术突破中的战略取向与阶段特征。

日本建立了以“风险分级+双轨认证”为核心的低空装备管理体系，依据运行风险将装备划分为1-4级，并由日本民航局主导适航审定，航空自卫队参与高风险机型检测，民用领域则适度放宽门槛，鼓励企业参与标准共制，形成军民协同的治理结构。在发展层面，日本重点推动电动垂直起降飞行器的商业化进程，计划于2026年前完成主力机型适航认证并实现交付。其检测体系聚焦场景化能力验证，涵盖电池在0-6000米海拔的充放电效率及5级强风下的航向控制精度等指标，但在全系统冗余设计与大型装备整体验证方面仍存短板，部分检测仍需依赖欧洲机构完成。

韩国构建了由国土交通运输部统筹，韩国航空大学与韩国航空宇宙研究院共同参与的“研发—检测—认证”一体化推进机制，并通过设立“低空装备认证快速通道”，将检测周期由12个月大幅压缩至6个月，显著提升了审定效率。在技术能力建设方面，韩国重点投入电池与飞控系统两大关

键环节，其 KARI 实验室已具备能量密度 300Wh/kg 以上电池的测试能力，飞控系统硬件在环仿真可实现在 0.1-10Hz 扰动下的动态响应验证。然而，在远距动态避障等高端检测领域，韩国仍面临测试设备依赖进口、自主验证能力不足的制约。

（二）国内

我国低空产业是在传统通用航空基础上发展形成的新兴产业形态，现已深度融合新能源汽车的产业链优势与互联网技术的创新生态，正加速形成涵盖整机、分系统及关键零部件的多维度检测能力。当前，我国与欧美发达国家处于相近的技术与市场发展阶段，并已在特定应用领域形成比较优势。

标准方面，我国民用航空适航审定标准主要借鉴美国 FAA 体系，大飞机和传统通用飞机的适航审定标准较为健全，但新能源新构型低空装备的技术标准、适航审定标准仍存在诸多空白，导致检测机构缺乏权威依据、生产企业面临技术门槛，出现“不会检、检不准”的行业困境。

检测能力方面，我国适航审定、试验验证和检测能力主要依托中航工业、中国航发、中国商飞等集团的专业研究所，以及民航局下属单位建设的实验室，现有检测能力主要面向大飞机和军用飞机，且布局分散，对新能源新构型低空装备的适应性差、成本高、周期长，受保密限制，制约了我国低空装备产业的发展进程，对我国在全球竞争格局中抢占战略

制高点形成了阻碍。从能力成熟度、技术储备水平、应用水平、国际先进水平等方面综合分析，我国低空装备试验验证与安全性检测能力主要分为以下四个层级。

一是处于国际领先地位，相关能力基本达到世界领先水平。在空气动力领域的常规风洞测试方向、常规环境模拟领域、地面设施领域，我国部分试验验证能力已达到国际领先水平，相关能力比较完备；地面设施可靠性试验验证已具有国际领先水平，但部分零部件乃至整机的环境试验还处于探索阶段。

二是处于加速追赶阶段，已形成一定试验验证与检验检测能力，但与国外相比仍存在差距。在通信与信息安全领域、结构强度领域、试飞领域、飞控与航电领域，我国已具备一定的检验检测支撑能力，基础设施布局加速推进，但现有能力仍难以充分满足低空装备安全发展的需要，相较于欧洲、美国、日本等国家和地区，部分关键能力在检测精度、效率、覆盖范围、智能化水平等方面仍存在一定差距，需持续优化提升。

三是处于同步探索阶段，国内外均处于探索、初步规划研究阶段，技术路径与发展方向尚不明确。在空气动力领域的城市风场测试等方向、主被动领域的部分试验验证与检验检测方面，国内外尚未建立完善的验证体系，相关检测方法的基础研究和应用验证工作正在推进，这些技术空白为我国在关键技术攻关和能力布局方面创造了战略性机遇。

四是处于空白布局阶段，我国尚未启动相关技术布局。在整机地面试验验证、低空装备极端环境模拟领域我国有相当大的部分关键检验检测能力空白。

此外，在能源领域，目前低空装备领域动力电池相关检测标准内容多参考汽车动力电池以及储能电池领域的标准内容，我国已建立相对完整的汽车动力电池标准体系，覆盖从材料到系统全层级，检测能力获国际认可，但该体系对低空装备的适用性还需进一步验证。

三、在国内的布局建设建议

我国低空产业发展非常不平衡，这种不平衡是有多种原因造成的，如经济发展、航空产业基础、创新能力等。

低空产业发达地区主要集中在长三角、珠三角、成渝、京津冀地区，东北地区、西北地区由于有比较好的应用场景和航空产业基础，特别是具有传统的航空试验验证基础，也能够为整个行业提供技术服务。鉴于上述原因，经综合研究后，建议在长三角、珠三角、成渝、京津冀地区、东北地区、西北地区相对集中建设低空装备试验验证与安全性检测基地（中心），打造我国新型工业的工业基础，提升全球竞争能力。如图 2 所示。



图 2 我国建设试验验证与安全性检测基地的布局建议图

四、低空装备试验验证体系建设内容

（一）整体框架

基于低空装备系统层级、试验验证阶段和运行场景，低空装备试验验证体系包含低空飞行器验证、无人机攻防一体设备验证、支撑与保障设施验证三大类。低空飞行器按照分系统和整机进行划分试验项目，无人机攻防一体设备主要分为探测设备、反制设备、通信指控设备、集群网络系统等，支撑与保障设施主要是指机场、起降点、航路上的地面设施等设备。依据试验验证的对象和范围，整个低空装备试验验证体系共包含 18 类试验验证内容。具体如图 3 所示。

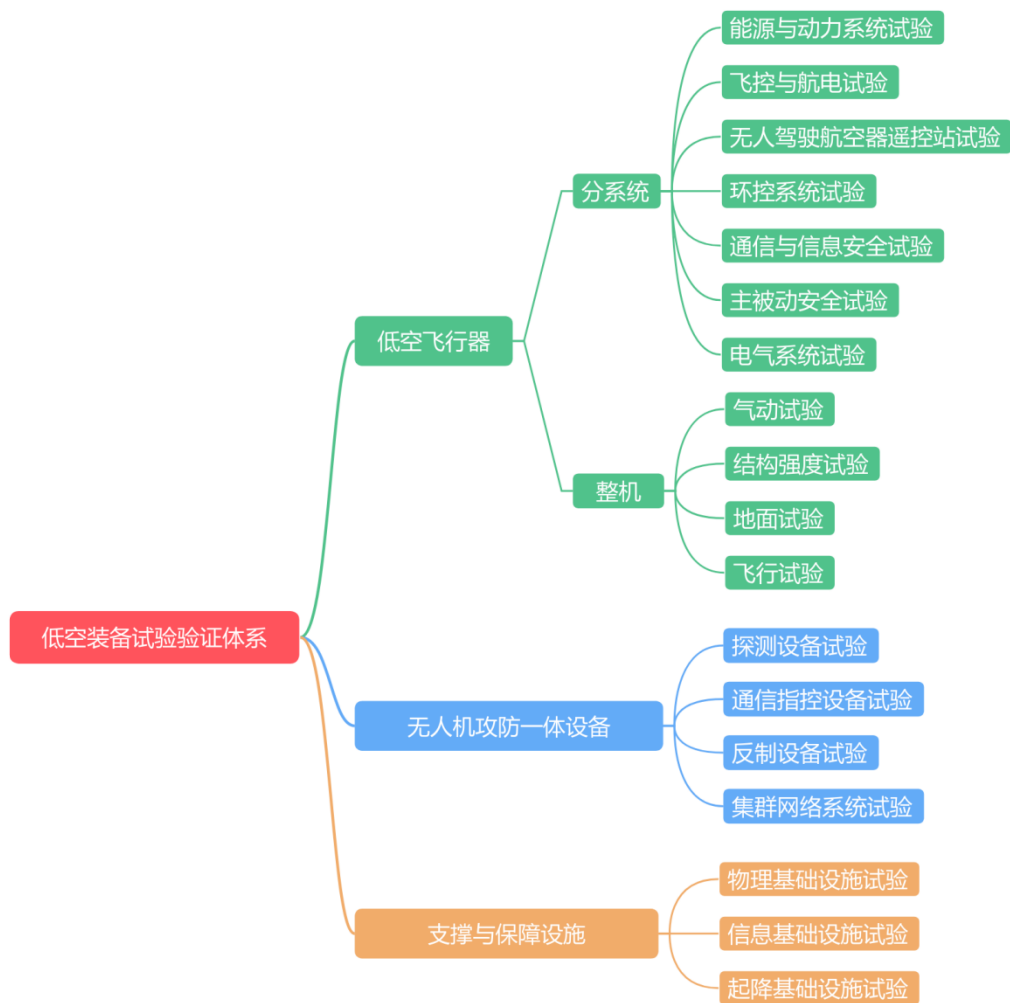


图3 低空装备试验验证体系建设整体框架

（二）具体建设内容

1. 低空飞行器分系统

低空飞行器分系统是指飞行器上的各个子系统及搭载的载荷等，具体包括能源与动力系统，飞控与航电系统、无人驾驶航空器遥控站、环控系统、通信与信息系统、主被动安全系统、电气系统等。这些子系统对于新能源新构型低空飞行器与传统航空器有比较大的差别，甚至无法用传统航空

器的相关系统进行划分和定义，因此，在本报告中根据当下产业的实际应用状态进行了重新的分系统划分。

依据试验验证类型和测试内容，低空飞行器分系统试验包含 7 类试验验证内容，24 个测试项目。具体如图 4 所示。

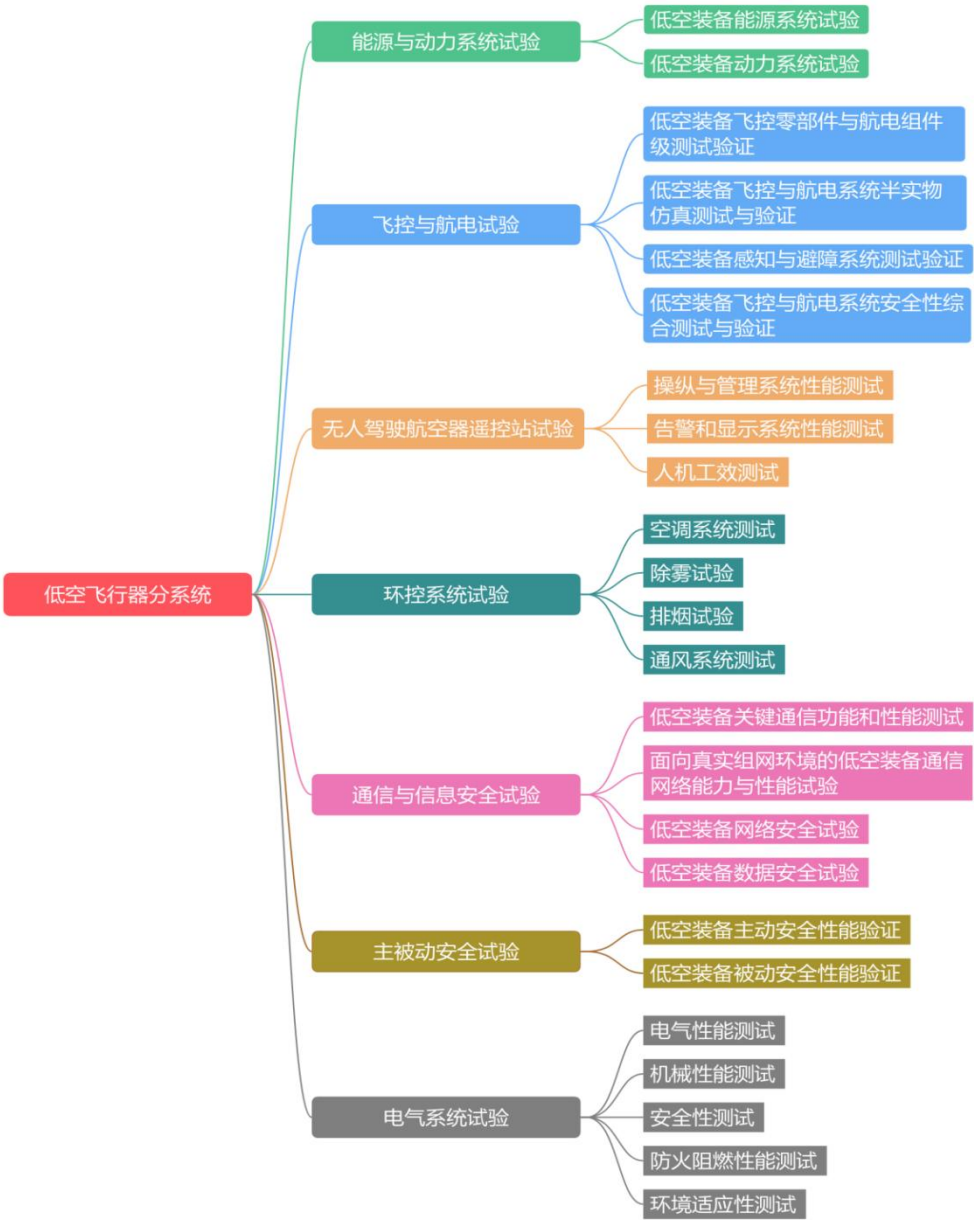


图 4 低空飞行器分系统整体框架

2. 低空飞行器整机

低空飞行器作为多学科交叉的高技术集成体，正从单一飞行工具向“空中智能平台”演进，我国现有整机适航测试依赖实体试飞，面临周期长、复杂环境验证难、仿真数据可信度低等问题，且缺乏自主可控的测试装备与统一标准。为此在整机地面试验板块可将整机强度测试、动力系统飞行包线典型工况地面测试、故障模拟测试、带负载飞控系统性能测试、整机地效及抗风测试、整机电磁兼容测试、热管理性能测试、雷击测试、多系统验证试验及整机环境适应性测试融合在一个地面综合测试平台中进行测试，该平台是一个创新性极强非标的模块化测试系统，至今为止全球尚未有机构研发出来，但是据可靠信息，欧洲以法国为主在进行这方面的论证研究，因此建议我国要组织国内最具优势的科研机构联合研制整机地面综合测试平台，把其提高为“测试母机”的高度进行立项研制。

在整机板块中把整机气动试验和螺旋桨等推进系统的气动试验都融合到气动试验中，这样便于分类；同理，把材料、零件、部件结构等的强度试验与整机强度试验整合为结构强度试验。

依据试验验证类型和测试内容，低空飞行器整机试验包含 4 类试验验证内容，27 个测试项目。如图 5 所示。

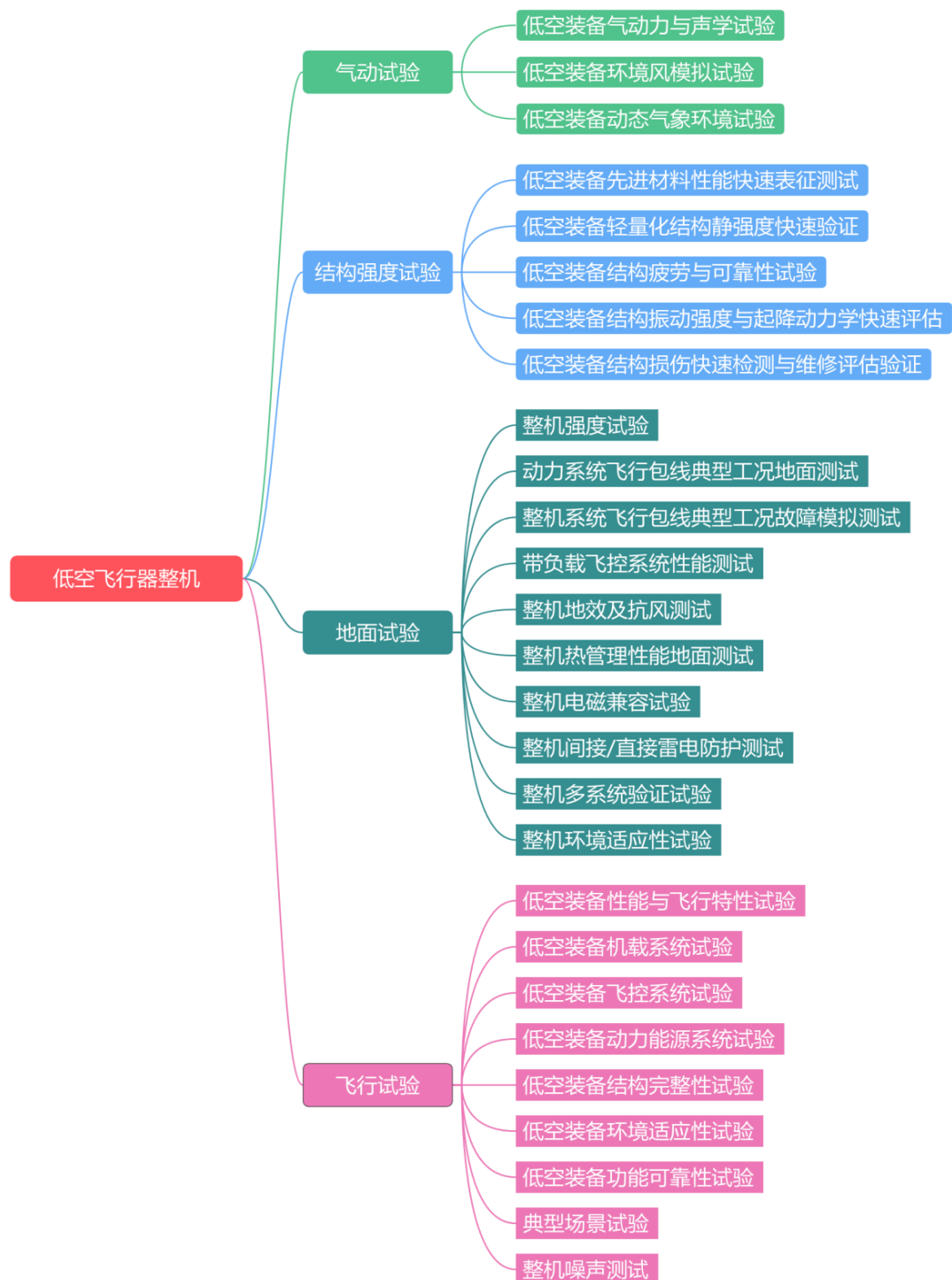


图 5 低空飞行器整机整体框架

3. 无人机攻防一体设备

根据当前作为非合作目标无人机及无人机集群所能

造成的重大公共安全风险，全球各国都在研制“反无”的相关装备，这些装备与无人机一同构成了攻防一体的系统，该系统的安全性、可靠性也需要进行试验验证与安全性测试。

依据试验验证类型和测试内容，无人机攻防一体设备试验包含 4 类试验验证内容，18 个测试项，如图 6 所示。

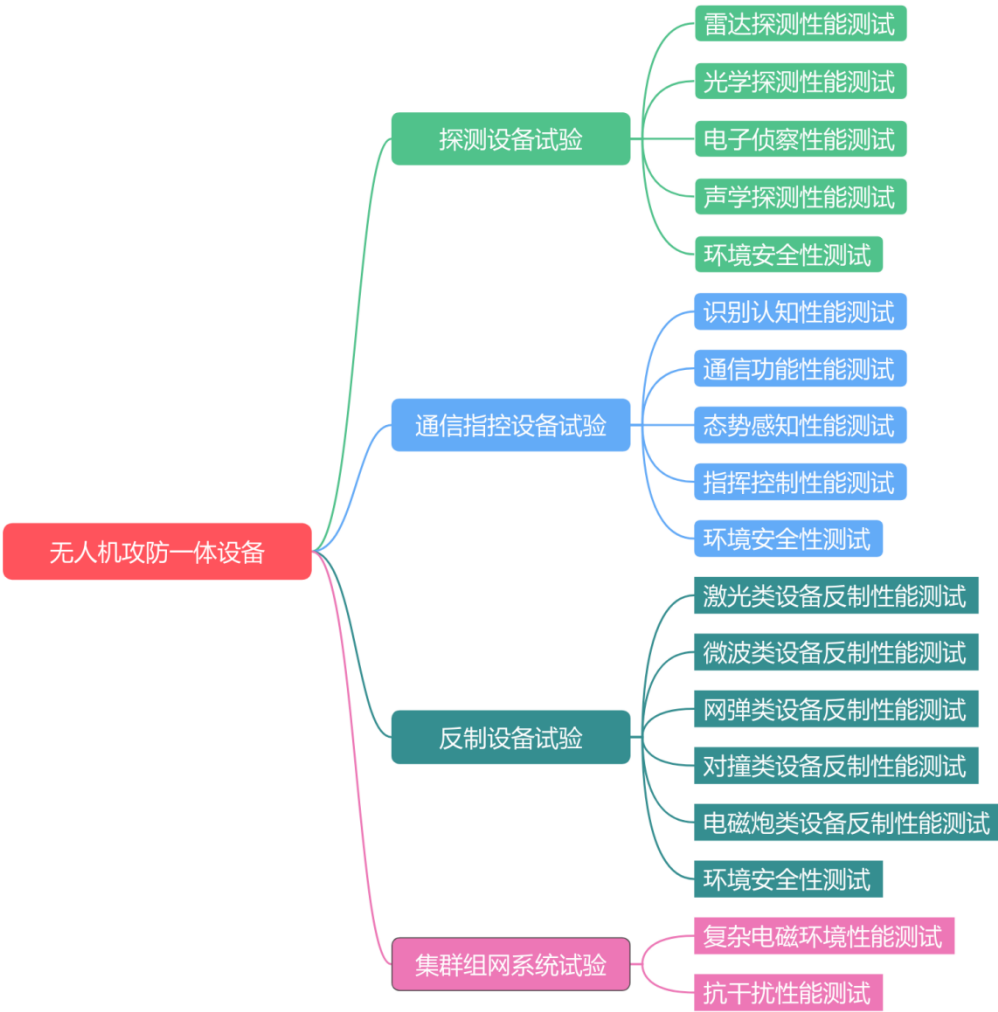


图 6 无人机攻防一体设备整体框架

4. 支持与保障设施

支撑与保障设施按照类型可以分为物理基础设施、信息

基础设施和起降基础设施，起降基础设施主要是指当前一些智能“机巢”和一些起降场的设备。

依据试验验证类型和测试内容，支持与保障设施试验包含 3 类试验验证内容，9 个测试项目。具体如图 7 所示。

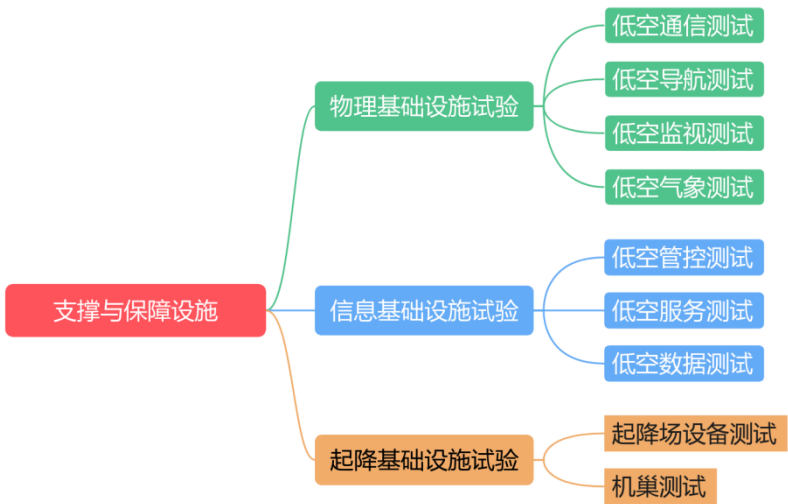


图 7 支持与保障设施整体框架

五、整体发展路线建议

低空装备试验验证体系是低空装备产业高质量发展的核心支撑，其系统性布局、专业化能力与高效化运行直接关系到低空装备安全合规应用及产业生态良性演进。本文系统梳理了低空装备试验验证体系的整体规划逻辑、具体实施路径、全领域覆盖布局等，致力于为低空装备试验验证体系建设提供实践指引，为了推动该项工作规范有序、持续高效发展，特提出如下整体发展路线建议。

1. 整体规划、相对集中，快速形成平台化服务能力

检测能力建设作为一项涉及人才、技术、资源与政策等多维要素的系统性工程，必须统筹各方资源，协同推进。从国家层面加强顶层设计与系统规划，在全国范围内优化布局，依托产业集聚区，集中优势资源建设具备专业权威性、服务高效性的低空装备试验验证与安全检测中心，通过提供一站式、一体化服务，切实解决行业发展中的堵点与卡点，有效降低企业的时间成本与经济负担，为提升行业发展效率、控制整体成本提供有力支撑。

2. 分类指导、精准施策，推动政府与市场协同发力

基于装备类型、技术特征、运行风险等级实施差异化检测方案，对载人低空装备实施由政府主导的严格适航审定，对物流无人机等商业应用业态，适度引入市场化检测机构。政府部门着力完善标准体系与监管框架，引导和鼓励市场主体积极参与建设专业化检测平台。探索实行政府购买服务、检测结果互认等机制，推动形成监管与服务并重的良性发展格局，以“有为政府+有效市场”为低空装备安全运行提供保障。

3. 体系布局、急需先建，实现建设范围全面覆盖

建立基于安全风险的分级分类矩阵，依据装备重量、载人属性、运行区域和应用场景等关键属性，系统规划检测能力布局。完善通用性检测标准体系，参照适航审定准则，优

先对影响安全的关键材料、结构、系统和任务载荷制定强制性国家标准，加快启动相关检测能力建设。优先建设新构型结构动静强度检测、主被动安全测试、新能源动力系统安全验证、新型航电及通信安全检测等市场需求迫切、安全风险高的检测能力。通过科学规划、分步实施，逐步建成覆盖设计、制造、运营全周期的试验验证与安全检测体系，为低空装备产业高质量发展提供坚实保障。

4. 先易后难、层次推进，推进能力体系梯次化建设

优先推进技术成熟度高、实施可行性强的检测平台建设，快速投入运营并形成阶段性成果；聚焦低空装备设计研发阶段的检测急需项，搭建试验验证与检测平台，快速形成适航审定支撑能力；逐步向系统级、结构级和材料级检测能力延伸，逐步构建形成完整的检验检测体系，最终实现从整机到零部件、从系统到材料的全方位检测能力覆盖。

5. 已有共享、统筹协调，构建集约高效的能力体系

充分整合利用传统航空、汽车领域的成熟检测资源，通过对既有标准规范的适应性转化及检测设备的升级改造，快速建立满足新能源新构型低空装备需求的“开放共享”试验验证能力。建立跨行业数据共享与协同创新机制，促进传统航空、汽车等领域技术成果的转移转化。坚持统筹规划，推动建立全国统一的标准规范体系，建设具有规模效应、支持多型号并行检测的专业化检测中心，最终形成集约高效的检

验检测基础设施布局。