

面向航空装备研发总体的系统工程新技术研究

李森¹, 杨水锋², 张亦卓³

(1.西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072; 2.成都飞机设计研究所, 四川 成都 610091;
3.中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

摘要:装备研发总体决定着技术方案选取、研发路线设计和作战能力生成等,是全局性和决策性的系统工程。研究了现代系统工程的理论基础以及在装备研发领域的具体实践,提出了在航空装备研发领域系统工程的技术原理,可以更准确地掌握系统工程理论方法的本质,更科学地指导航空工程领域的应用并获得效能提升。研究了装备研发总体与系统工程的逻辑关系,提出在装备研发领域总体设计就是系统工程。研究了航空装备研发的系统工程新技术,比如航空装备研发策划、清单化需求管理、技术与成本权衡设计、作战能力快速生成、研试训用体系技术等,可以为航空装备研发的顶层策划和过程实施等提供借鉴和指导。

关键词:航空装备;研发;总体设计;系统工程;作战能力

中图分类号:V37 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2025)06-1255-10

未来作战形态将面临全域博弈、精确制导、无人协同、信息优势、高致命性、本土防御、后勤增强、快速适应等典型特征和需要^[1]。在航空武器装备研发领域,需要提升远程打击、末端防御、对抗性后勤、非传统拒止等主要作战能力,并增强人工智能、自主系统、LVC训练、作战架构等重要使能技术^[2]。低成本、小型化、协同作战及跨域融合技术的应用日益频繁,创新了新型的空中进攻形式,增加了现代空战攻防技术的挑战^[3]。航空装备研发总体是最重要的航空科学和工程技术之一,需要应对新的安全威胁和使能技术,提升和开发研发总体系统工程技术,支撑快速增强或生成作战能力。Kyle^[4]运用企业系统工程原理实施 KC-46 飞机维护、修理、大修及改装等系统性工作。Rebeca 等^[5]提出基于本体工程(ontology-based engineering, OBE)的制造系统设计权衡空间框架,通过开发应用本体来整合装配系统的领域知识、工业需求与系统架构等。Fudge 等^[6]提出基于模型的逆向系统工程方法,针对复杂多维生物系统开展需求分析、建模仿真和预测评估工作。Fuchs 等^[7]运用人工智能系统工程(AI system engi-

neering)研究机器学习(machine learning, ML)系统开发与部署、工程实践优势与局限、威胁与安全深度耦合等。Wang 等^[8]指出基于模型的系统工程持续发展为未来高性能航空器研制,以及可能面临的进度延误与成本超支提供了最为有效的解决方案。综上所述,系统工程与不同工业领域已经实现深度耦合,并且随着系统工程技术的新发展,同步催生所在工业领域的技术进步和工程突破。对于航空科技和装备研发领域而言,新的任务场景和能力要求不断涌现,需要系统的新技术进行支撑和赋能。本文通过研究系统工程在航空装备领域的工程实践,提出了系统工程的具体内涵和技术原理,对系统工程和装备研发总体的关系进行了研究,提出了面向航空装备研发总体的系统工程新技术,比如装备研发管理策划、清单化需求管理、作战能力快速生成、研试训用体系技术等,可以为航空装备研发和管理的顶层策划、总体设计、项目管理等提供工作借鉴和指导。

1 系统工程的装备实践

1.1 系统工程的理论基础

系统工程理论和方法持续存在于科技与工程的

具体实践中。现代系统工程的理论基础包括一般系统论、信息论、控制论、运筹学等。在装备领域应用可以溯源到美国贝尔电话研究所在规划和建设全国微波通讯网络时,提出的规划、研究、发展、工程应用和通用工程等5个阶段,以及在第二次世界大战期间,英国防空科学调查委员会着重发展防空警戒和控制系统,研究防空战斗机部署与控制。系统工程在装备领域比较重要的早期学术专著是古德和摩卡尔合著的《系统工程——大型系统设计的应用》,该书面向大型装备系统的设计,从外部设计、内部设计2个角度,提出了基本理论、逻辑步骤、系统组成、设计工具、组织管理等方面的基本原理和设计方法。系统工程的理论基础在以上专著中并未说明,但其基本架构和研究内容可以呈现系统工程的基本理论。随着现代系统工程在载人登月等重大国防工程领域的成功应用,系统工程理论及方法也形成体系并快速发展。系统工程与运筹学、管理科学等学科领域产生和发展的背景基本相同,学科应用对象各有不同,但基本数学和物理原理一致,随着科学技术发展和应用领域扩大,在随后的学科发展中,学科交叉和跨域关联的态势明显,与工程管理、运筹学等系统工程相关联的理论、工具、对象也不断趋同并相互融合。

1.2 系统工程的技术原理

系统工程包括2个学科定位,一个是系统科学,与数学、物理、化学、天文学、地理学等同属于理学门类;另一个是控制科学与工程,与力学、机械、光学、材料同属于工学门类。系统工程既注重物理领域基本规律的科学研究,也注重工程理论和技术方法的实践应用,是一个从理论方法研究到工程技术应用完整规范的学科体系。美国国防部、国家航空航天局、国际系统工程协会等机构组织,以及钱学森、何文治、渡边茂、张新国、Blockley R、Sadraei M H等中外学者在系统工程领域开展了大量理论研究和应用实践。

在航空装备研发系统工程领域,系统工程可以是一种系统设计的思维、理论、技术、方法或工具,面向国防需求、体系建设、技术发展、装备研发、部署应用等方面局部或总体,采用评估、计划、分析、综合、仿真、试验、应用等系统过程,以达到系统性能、功能、接口、应用等最高程度综合化和最优化目的。由于不同学科、不同专业、不同领域之间相互交叉、相互融合,并且不断地向综合化、整体化发展,系统工

程已经成为这种趋势更具代表性和基础性的科学技术。

1.3 系统工程的装备实践

由于系统工程属于系统学和系统科学的范畴,具备目的性、总体性、最优性、综合性、关联性、实践性等基本特征。系统工程研究和应用对象多数是大型系统,大型系统通常在特定时间范围内,具有明确的任务目标、总体指标等目的性约束,一般包括成千上万甚至更多的组成部分,这些组成部分之间相互关联、相互影响、相互联系,经过专业化的运算、比较和组合之后,最优化地实现大型系统综合特性。此外,辩证唯物论、系统论、总体观等从另一个维度深度揭示了系统工程的思维精髓,同步推动了系统工程学科理论的发展和实践。

系统工程在装备领域研究对象是铁路运输系统、电话通讯系统、军事空防系统等大型系统的系统设计,“曼哈顿计划”、“北极星导弹计划”、“阿波罗登月计划”、“神舟飞船”等大型装备的工程建设,以及C-17、A400M运输机、F-22、F-35战斗机、B-2轰炸机等航空装备研发。系统工程的理论基础主要是系统分析、系统设计、计算与仿真、系统评估等^[9],并扩展运用了运筹学、最优化、网络化、信息化等数学工具,评价指标除了经济、进度、技术指标之外,还包括可靠性、安全性、通用性、可扩展性等要求,运用生命周期评估技术评估制造、材料、燃油以及维护等方面的资源消耗和环境影响^[10-12]。航空航天研发领域一项典型的系统工程理论成果,是针对开放复杂巨系统的、定性到定量的综合集成方法。近年随着信息化、数字化、体系化和智能化的发展和应用,航空装备研发推行基于模型的系统工程(MBSE),通过提升系统元素的关联性增强研发过程的可追溯性与透明度,进而提升装备研发的效率和质量^[13],在业内也有较大影响和共识。

系统工程技术原理源自装备实践又指导装备实践,特别是大型装备实践与系统工程的技术迭代发展,更加催生系统工程理论方法的快速发展^[14]。比如先进运输机总体设计“氢燃料对飞机总体设计的影响分析”是非常典型的系统工程之一,需要对比权衡中短程常规布局方案和翼身融合体方案,以及确定储氢罐最佳布局、设计质量与重心变化、仿真评估燃料消耗、迭代最大起飞质量等^[15]。近年系统工程的发展更加注重与本领域内专业技术体系的结合,并且重点突出把系统工程的思维、理论和原则融

入到本领域内的研发流程、技术开发和工程实践等具体方面,而不是把系统工程的理论和方法作为主线。在航空装备研发领域,系统工程应用强调的是航空装备研发的工程阶段和设计实现,重点是飞机

各大部件如何设计、项目进度如何策划、专业系统如何集成、飞发/气动如何一体化设计、装备多学科优化技术如何应用等。图1给出了系统工程的理论发展与装备应用扩展历程。

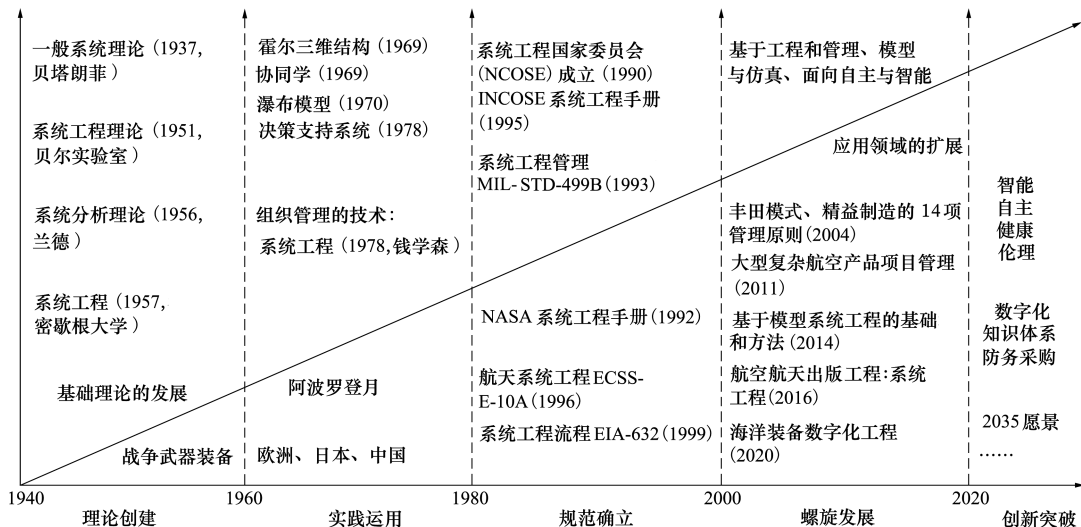


图1 系统工程的理论发展与装备应用扩展

2 研发总体与系统工程

2.1 系统工程的总体特征

系统工程总体的实践起源于导弹、原子弹等大型装备的研发工作。钱学森、许国志等编写的《组织管理技术——系统工程》指出总体设计部的科学实践方法就是系统工程,提出把系统工程总体理论从航空航天工业领域向其他更多领域进行扩展。开展复杂系统工程的重点是架构设计、模型构建、实施流程,从而实现整个系统高度涌现性和强关联性^[16]。运用系统工程能够提高效率、降低成本,提供自动化解决方案的基本原理^[17]。特别是大型装备研发领域的技术和管理机构设置及专业建设上,系统工程总体理论获得成功应用并取得实效。

系统工程总体立足于大型系统/任务整体的全局,着眼任务当前和长远目标,面向系统局部和整体,开展组织、指挥、协调、决策、预见、规划等工作,特别注重顶层战略布局、系统架构设计、实施路径选择、过程权衡决策等,在各方需求发生冲突时,需要系统性地取舍和权衡^[18]。运用科学、技术和管理方法并紧密结合早期验证,提供跨机构协作的综合解

决方案,从而有效应对产品开发复杂性并提升产品开发效率^[19]。作为系统工程总体的个人或组织机构,需具备全能知识体系、逻辑体系思维、宏观驾驭能力、科学决策远见等,还需要注重学习创新和凝聚协同。

2.2 装备领域的总体专业

系统工程总体在航空装备研发领域的应用实践具体体现在2个方面:大型装备研发的“两总”系统、大型装备系统研发的总体专业设置。“两总”系统是指总设计师系统和行政指挥系统,总设计师系统负责技术路线选择及实施,是超越行政的技术指挥体系,设置总设计师等。行政指挥系统实施指挥、调度、管理等,设置行政总指挥等,对总设计师系统给予管理支持和保障。大型装备系统研发的专业设置,通常与大型装备系统技术原理和功能用途相关,比如战斗机研发单位重点关注作战武器及指挥系统设计,直升机研发单位关注旋翼及传动系统设计,航天工业领域关注发射/回收着陆系统等,尽管装备系统的专业领域跨度较大,但是各大型号都设置有总体专业,负责战技指标协调/分配、总体布局设计、质量与平衡设计、全机几何外形设计、总体方案协调与调整等,这些工作与各个分系统、分专业都紧

密关联,并且决定了大型装备未来的主要指标和功能实现,可见总体专业在大型装备研发体系和实践中具有十分特殊的重要地位。

2.3 研发总体与系统工程

总体设计就是系统工程,系统工程就是总体设计。航空装备研发总体设计是一项复杂的系统工程,是一个反复迭代、逐次逼近的过程,需要多学科技术优化及研发流程高度迭代^[20],是在较大跨度的专业领域、进度周期、组织架构之内,运用系统工程的理论和方法进行航空装备研发设计。总体设计过程就是采用最佳工程技术不断优化,使各专业达到最优的技术和产品配置,在目标成本范围内达到最优飞机性能指标。航空装备研发阶段大致划分为装备论证、工程研制、列装定型、批产保障 4 个阶段,在这 4 个阶段基础上,分别设置立项批复、初步设计、详细设计、状态鉴定等里程碑控制节点,每个节点都有具体的目标、输入条件、工作内容、输出条件等,其中成品研制阶段划分论证、方案、初样、试样、鉴定等工程阶段。系统工程应用体系化更加明显、指导性更强,航空装备研发通常会制订《系统工程手册》《系统工程指南》《系统工程管理计划》等研发管理文件。

3 装备研发的系统工程新技术

在现代系统工程的理论基础上,随着具体工程应用的不断拓展,系统工程技术不断向前发展,主要划分为基于数学与物理、基于辩证与分析、基于建模与仿真、基于流程与方法 4 个阶段。比如最优化技术、兰德系统分析、面向对象系统工程、敏捷系统工程等代表了不同阶段的系统工程技术,同时智能系统工程、无人系统工程、作战体系工程等大量工程方法在不同领域深度应用。体系工程、任务工程、智能工程等基于系统工程原理而衍生的新概念和新技术,正在面向不同对象不断进行创新运用并形成了新的技术能力^[21-22]。人工智能、机器学习、自主技术等正在深度融入系统工程,同时也成为推动性能涌现、架构集成以及测试评估的新系统工程技术^[23]。无论是商用飞机产品或先进军用装备都需要针对研发方法、流程、工具进行紧密高效集成^[8],对于航空武器装备研发来说,面向装备快速研发、能力快速生成、博弈态势应对等未来任务需要,正在不断出现装备研发的系统工程新技术,向前重塑或改

变着航空装备研发的程序和规则。

3.1 复杂航空装备的研发策划

复杂装备研发策划不同于规划和计划,是由于任务、组织、过程、结果等不确定性影响而最具挑战性的研发活动^[24],是对航空装备研发具体工作的总体设计,对装备研发实施过程进行调整和变更,更加突出系统性、条目化和灵活性等特征。研发策划的主要内容包括重大研制里程碑节点设置、原型机投产节奏及任务分配、重要性能指标的的实现步骤、渐进式能力提升、多状态交付与统型、大型试验专项规划、分系统研发策划等。如图 2 所示,航空装备研发策划主要是对进度、经费、技术指标等的权衡和决策,重大试验科目和大型试验件的协调和取舍,不同研制阶段和专业领域不同风险度和影响度的技术攻关,项目管理工作计划等,都可以作为航空装备研发策划的内容。

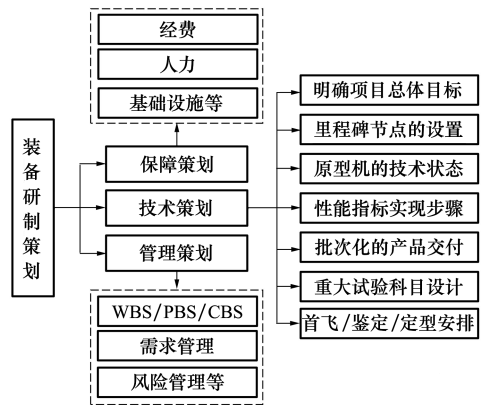


图 2 航空装备研发策划的主要内容

从具体工程实践上来看,研发策划是一种系统工程技术方法,是围绕航空装备研发的特定工程目标,在相关资源的保障支持下,有序开展或完成若干条目化、关联性、复杂性工作的系统工程过程。不仅在航空装备研发领域,在其他装备甚至工业工程领域,对任何一项具体工作都可以进行提前筹划安排、开展研发策划。通过开展航空装备研发管理策划工作,可以保持航空装备研发和管理工作的完整性、系统性、次序性,形成航空装备具体研发和管理条目化工作的实施内容、执行指引和总体约束,可以牵引研发全线机构及承研任务保持目标一致、协同并行、快速推进。李昌红等^[25]通过开展航空发动机系统工程策划来统筹技术及技术管理方法应用,厘清研制工作主线,提前识别并规避风险,主要包括研制策

划、需求管理、系统规范/研制规范/产品规范、技术成熟度评价、技术风险管理、技术评审等技术管理工作。

3.2 作战能力渐进式生成路径

作战能力渐进式生成包括技术指标的分阶段达标、航空装备的分状态交付、作战能力的分批次实现等工程内容。渐进式工程方法源于软件工程领域,现已经成为硬件工程、能力研发等多数领域“设计-构造-验证”的主流方法^[26]。图3为渐进式能力生成和全能力生成过程,在航空装备全寿命周期研发过程中,选择渐进式生成,还是选择全能力达标,对研制工作的开展、装备交付的节点、用户获得的能力等会产生非常大的影响。航空装备从作战想定和需求,到研制要求和实现,最终具备作战能力,是一个长期的过程。如果完全选择全能力达标后再交付装备,对于用户的作战能力增强、体系作战筹划、军事博弈应对都会造成较强的不确定性,反之若提前获得部分能力,随后再释放其他能力,则会提前获得作战能力,扩大军事效益。

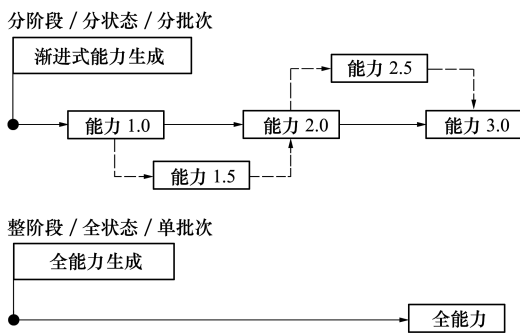


图3 渐进式能力生成和全能力生成

对于大型复杂航空装备来说,选择作战能力渐进式生成路径非常必要。其研发工作非常繁多、战技指标较高,需要在固定研发周期内全部达到要求、闭合研制需求,有的指标即使投入更多攻关资源,也可能难以达到要求,导致交付装备与能力的周期也将延长。比如,可以策划并设置能力1.0状态、2.0状态等大状态,必要时设置若干能力1.5状态、2.5状态等小状态,在不同的技术状态之间进行循环迭代和动态调整,甚至给装备研发工程人员更多技术和作战的创新机会,鼓励实现技术增量开发,可以获得更多能力提升,此外还需应对研发资金压力、进度周期以及外部威胁不确定性等。F-35战斗机任务

系统就是开展渐进式试验验证,先对子系统设备开展验证,逐步增加集成系统的复杂度,并快速比较系统性能,尽可能在集成早期发现并修正缺陷,其优势在于在某方面有限制的情况下,可以在其他方面验证系统性能。

3.3 清单化需求的生成与管理

需求是装备研发的源头,通常由装备需求方负责论证、推演、确定和升级,以作战能力、研制要求和战技指标等不同形式,自上向下贯穿军事战略、作战需求、装备体系需求、装备平台需求、分系统需求等多个层级,过程中不断与装备研发方进行迭代和传递,并由具体的装备产品作为承接和实现载体。从需求专业的范围上看,结合仿真推演工具、需求管理软件、体系论证工具等应用,涵盖需求定义、策划、开发、仿真、确认、监控、变更、验证、回归等完整流程和大量工作。由于需求跟踪和验证存在成本与复杂性等现实问题,装备开发生命周期应当根据实际需要进行添加、删除、变更或更广义地剪裁^[27]。如果从装备全寿命周期和全系统专业来看,需求是其中的1项工作和1个维度,特别是仿真推演需要大量模型、数据、算法、算力等支撑和训练,某种程度上讲,桌面推演和仿真推演具有同样原理和验证效果。

对于航空装备研发总体来说,主要聚焦需求捕获、需求仿真和需求生成等核心内容。在需求捕获和仿真分析基础上,清单化能力目录是最主要的装备研发依据。捕获装备能力的需求除了构造典型作战场景之外,更重要的是开展杀伤链的闭合分析,完成什么作战任务、确认什么体系缺口、需要什么作战能力、研发什么航空装备,能够呈现非常清晰的逻辑链条。清单化能力目录需要进行分级分类管理,从逻辑上可以分为体系级、平台级、系统级等,从能力重要度上可以分为关键项、重要项、一般项等。从能力清单数量上看,应该表现为金字塔结构,特别是体系级和关键项的能力清单,建议保持较少数量,以消减主次轻重不分等情况,避免在后续研发管理和能力分配上造成无序混乱。董亮等^[28]提出条目化需求管理是航空产品开展基于模型正向创新设计的关键技术,可以提供更加清晰的需求责任主体、测试方法、组成架构、配置版本等,降低用户需求、系统需求、产品设计等混合描述影响。

3.4 任务效能的核心设计验证

航空装备研发是为了交付装备产品和完成作战任务,其核心是达到要求的战术技术指标和保障良

好的任务能力及效能,比如雷达探测距离、电子干扰能力、武器挂载能力、远程投送能力、隐身及作战半径、载油量与耗油率、质量/速度/航程/载荷等都是最关键的技术指标,是研发设计的主要方面,是性能验证的重点科目,是完成任务的能力依据,是装备研制方必须保证实现和能够达标的技术要求,通常需要对关键技术指标的多方案设计权衡,从而揭示和获得主要性能参数的规律和结果^[29]。研发过程主要包括“设计-仿真-验证-优化”的快速研发循环工作,需要开展多轮次的设计迭代和试验验证,同时也是航空装备各专业持续追求和创新突破的“无止境”技术能力。如图 4 所示,任务效能表现为对核心指标设计的验证。

3.5 装备技术与成本权衡设计

航空装备成本广义上可包括寿命周期费用、研制费用、采购费用、保障费用等,通常更倾向于用目标价格和订购价格来衡量装备的经济性。需要强调的是,装备价格又与研制费用紧密关联和耦合,设计、试验、材料、外协、管理等研制费用又被摊销到装备的价格上。再往前推算,装备需求和设计方案是研制费用和装备价格的决定性根源。从装备研发总体的角度来讲,装备的设计方案是生产、试验、保障和管理的根源,是装备全寿命周期的起点,一旦确定装备设计方案,重新设计意味着前期投入的工装、试验、经费、时间等都将形成浪费并纳入成本。

打仗就是打消耗,是较为受到关注的军事理论和作战概念,比如在发挥高价值装备效能前提下,如何保护高价值目标,如何通过低价值目标进行抵消或抗衡,特别是低成本消耗战在局部对抗和冲突中发挥了重要作用。对于航空装备研发来说,就是要在材料选取、工艺路线、加工精度、设备数量、试验项目等方面,充分权衡技术和成本设计,能采用铝合金的,就不用钛合金;双余度可以,就不用三余度、四余度;系统试验一轮可以,就不用进行二轮、三轮。在航空装备成本更加合理的情况下,订购数量也会更加优化,投入使用装备数量也会有更大余地,未来进行军事博弈发挥的效能才会更大。袁涛等^[31]指出可损失可消耗的低成本无人机作战概念在未来战争中可以取得数量优势和质量优势,采用模块化任务载荷、商用货架产品、智能制造技术等,将低成本装备的工业制造能力转化为未来战争潜力和可承受的作战能力。

3.6 面向作战能力的快速研发

航空装备研发在不包括前期预先研究的情况下,从论证立项到批量交付需要几年、十几年甚至更长时间,期间的军事战略、外部威胁、航空技术、作战概念、战法运用都可能发生改变,作战场景和能力需求就有可能进行重新审视,正在研发的航空装备的体系贡献率也会随之变化,为此应该变革传统研发模式,快速研发装备,快速交付装备,快速获得能力并快速投入战训任务。特别是与竞争对手的军事博弈及作战准备上,更加需要下先手棋、打主动仗,提前获得威慑和压制能力,通过加速循环快速获取博弈优势,快速研发的装备产品是最好的能力载体。图 5 为面向作战能力的快速研发架构,重点是第 3 层描述了需要开展的快速研发工作。

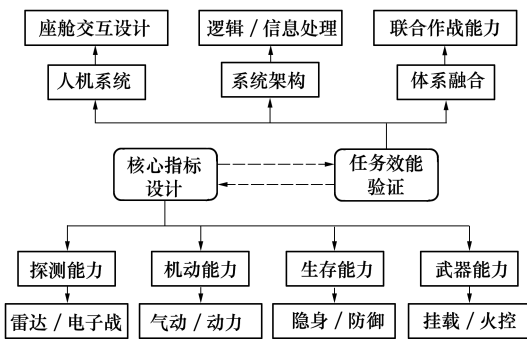


图 4 任务效能对核心指标设计的验证

任务效能的设计和验证包括人机系统操纵感知、任务逻辑架构等方面的协同设计,通过人机系统的高度协同,实现装备性能与操作能力的有机融合。比如飞行员与装备的交互设计,其中座舱、头盔、手柄、座椅、面板、屏幕、灯光、内饰等,直接影响飞行员的态势感知与操作效率。特别是装备自身的逻辑和架构设计,操纵流程、飞控逻辑、故障模式、信息处理、网信体制、航电架构等“看不见”的设计领域,关系决策效率、操纵品质、杀伤闭环、情报优势、体系组网、毁伤效果等最核心的任务效能,直接决定装备任务效率和战场生存能力,也是航空装备任务博弈的最关键所在。刘树光等^[30]指出无人机作战效能是无人机自主作战技术论证和装备体系建设的核心问题,主要基于特定作战任务需求结合无人机数量、作战模式、指挥架构、操作能力等效能因素,对无人机作战适应性、自主作战能力及任务完成效率等进行研究。

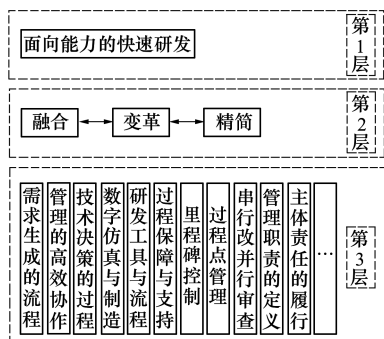


图 5 面向作战能力的装备快速研发

面向装备作战能力的快速研发是为了快速交付作战能力,作为一种全新的模式是对既有装备研发模式的重塑,也是装备研发模式变革的一个未来走向。对于周期长、复杂度高、管理要求严的武器装备研发,应用敏捷及快速研发的方法存在较大挑战^[32]。需要在需求生成、管理协作、技术决策、迭代频率、数字仿真等多方面进行高效融合和快速生成,需要对装备研发流程、过程保障支持、里程碑控制、技术成熟度、过程点管理等多方面进行重新定义和适度改革,比如串行审查改为联合审查、压减技术决策的层数链条、减少或合并过程点审查管理、增加数字仿真及验证的范围、缩减综合试验及设计迭代的时间和轮次、减少飞行试验及技术优化的架次和科目。陈彦^[33]提出并构建适应于军贸无人机的快速研发模式,包括重构组织架构、新建研发阶段模型、完善管理制度、提升研发手段、开发管理工具、优化研发流程等,切实缩短产品研发周期、降低产品研发成本、提高产品研发质量,提升了军贸无人机产品的研发效能。

3.7 数智模型仿真的驱动研发

模型仿真技术在航空装备研发领域应用广泛并且由来已久,ANSYS、Nastran、Matlab、AFSIM 等为计算流体力学、结构强度仿真、飞控系统设计、作战任务模拟等研发工作提供了非常大的技术支持,在验证设计方案、优化技术指标、构建体系能力、降低试验成本等方面发挥了重要作用,早已成为必不可少的工具和手段。特别是近年大数据/大模型、智能/自主技术的涌现和爆发,在航空装备研发领域已形成重大的技术冲击,比如在航空装备设计领域实践敏捷研发数字化,在制造领域推进数字孪生和智能产线建设,在作战研究领域深入研究空战智能博弈

技术的理论和实践。

航空装备研发在传统的数字化仿真和分析技术基础上,需深入研究运用敏捷设计、智能制造、仿真验证、数字孪生、数字主线等模型仿真技术^[34],比如通过多学科联合设计建模与仿真,加速航空装备设计方案的收敛和闭合,通过复杂结构设计和制造变量的耦合,缩短装备制造周期和提升加工精度,通过数字孪生虚拟结合验证技术,优化物理域装备平台及系统的功能,通过增强人工智能相关算法/算力/数据,在空战博弈中提升自主能力和战场优势。需要强调的是,当前阶段的数智/自主等技术在有限的装备研发和作战场景中有所突破,在模型精准度、传感器特性、场景不确定性等前提下,需要慎重运用新涌现技术的驱动力和创新力。王海峰等^[35]提出数字化研发技术具有开放、敏捷、协同等优势,数字化模型仿真支持多学科、多尺度、多状态的高保真数字化表征,可以推动装备方案快速生成、复杂结构精准设计、复杂系统虚拟验证,最终实现军用飞机“极限性能、极短周期、极优成本”的研发需求。

3.8 装备研试训用的体系技术

航空装备的研试训用强调体系协同和联合开发。研制是生成装备产品的过程,试验是验证装备能力的过程,训练是进行迭代优化的过程,使用是投入作战任务的过程。航空装备研发和能力生成过程是复杂的体系工程,从全寿命周期角度看,研、试、训、用 4 个过程依次推进、循序实现,从装备专业技术角度看,4 个过程相互作用、穿插影响。图 6 为装备研试训用体系技术的内在逻辑。比如装备设计工作会贯穿装备研发的全寿命周期各个环节,装备使用部门会持续参与装备的设计、试验、训练等并在各类评审中提出意见和指导,任何新设计、改进设计、贯改设计都需要开展试验验证并能够满足研制要求。

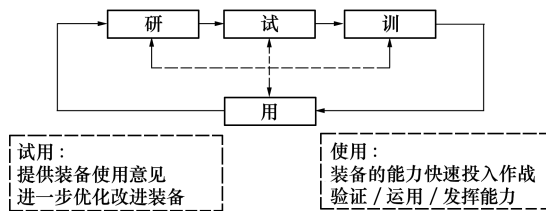


图 6 装备研试训用的体系技术

装备研发核心目标是“用”,在研试训用体系技术中是主导方向,包括装备正式交付用户后的使用,

装备作战能力可以快速投入作战场景,验证、运用和发挥所研发装备的作战能力;也包括交付用户后的试用可以为装备研发提供直接的使用意见,进一步优化改进航空装备。航空装备研制生产验证完毕,应快速交付用户投入使用,有利于装备的功能完善、性能提升、需求满足。装备研制方在释放装备作战能力的同时,要及时向用户推介装备的作战功能和模式,解决设计理念的不对称和使用模式的不对称,让使用者深度了解航空装备的作战原理,准确掌握航空装备可实现的战法战术。开展航空装备试训一体化系统及其关键技术研究,基于试验和训练在测试测量、数据采集、能力评估、仿真模拟等方面的一致性,设计应用层、互联层和资源层的一体化系统架构,在航空装备研发中一体化考虑试验、训练和评估等,能够加快装备能力生成,推动试/训/装融合发展。

4 结论

本文深入研究系统工程学科的学科发展和工程运用,面向航空装备快速研发和体系化需求,提出了聚焦航空装备研发系统工程的运用机理,对比研究了系统工程和研发总体的关系,提出了航空装备研发总体的研发管理策划、渐进式生成路径、清单化需求、任务效能设计验证、技术成本权衡设计、研试训用体系技术等系统工程新技术,可以为航空装备研发者和管理者提供工作借鉴和指导。本文深入阐明了系统工程技术原理,结合航空装备研发的工程实践,能够回答系统工程在航空装备研发领域是什么、为什么和怎么做的问题,通过系统工程新技术在航空装备研发领域的运用,可以推动航空装备研发总体技术和项目管理机构、装备分系统和配套单位的技术进步和管理提升。

参考文献:

- [1] GARY Brito, WILLIAM Lasher. The operational environment 2024-2034 large-scale combat operations[R]. TRADOC Pamphlet 525-92, 2024; 3-4
- [2] USA NAVAL AIR FORCES. Naval aviation playbook 2025[EB/OL].(2025-03-03)[2025-04-07]. <https://studylib.net/doc/27712145/naval-aviation-playbook-2025>
- [3] SHIVAM Bajpai, ROHITH Boyinine, ABHINAV Sinha, et al. Toward simultaneous localization and guidance for collaborative combat aircraft(CCA) Effectiveness [EB/OL].(2025-01-03)[2025-04-07]. <https://doi.org/10.2514/6.2025-1547>
- [4] KYLE E Blond. An enterprise system engineering analysis of KC-46A maintenance program decision-making[D]. Fort Collins: Colorado State University, 2023
- [5] REBECA Arista, ZHENG Xiaochen, MAS Fernando, et al. An ontology-based engineering system to support aircraft manufacturing system design[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023, 68: 270-288
- [6] FUDGE G L, REEVES E B. A model-based reverse system engineering methodology for analyzing complex biological systems with a case study in glycolysis[J]. IEEE Open Journal of Systems Engineering, 2024, 2: 119-134
- [7] FUCHS Magdalena, FISCHER Lukas, MONTUORO Alessio, et al. Risk assessment in AI system engineering: experiences and lessons learned from a practitioner's perspective[J]. Communications in Computer and Information Science, 2024, 169: 67-76
- [8] WANG Hao, TANG Yu, LYU Guangliang, et al. Application of system engineering in aircraft system design[C]//2024 3rd International Symposium on Intelligent Unmanned Systems and Artificial Intelligence, Qingdao, China, 2024
- [9] INCOSE. System engineering vision 2035; engineering solutions for a better world[EB/OL].(2022-08-11)[2025-04-07]. <https://www.incose.org/publications/se-vision-2035>
- [10] ZIEMINSKA-STOLARSKA Aleksandra, SOBULSKA Mariia, IZQUIERDO Daniel, et al. Life cycle assessment of hybrid-electric aircraft technologies-a review[J]. IEEE Access, 2025, 13: 49989-49999
- [11] KOŠČÁKOVÁ Martina, KORBA Peter, KOŠČÁK Peter, et al. Comparative analysis of life cycle assessment tools for aviation [C]//19th International Scientific Conference on New Trends in Aviation Development, Sary Smokovec, Slovakia, 2024; 96-101
- [12] POLLET Félix, LUTZ Florent, PLANÈS Thomas, et al. A comprehensive and generic life cycle assessment tool for overall aircraft design[EB/OL].(2025-01-15)[2025-04-07].<https://doi.org/10.2139/ssrn.5211853>

- [13] VOTH Viola, BERTRAM Oliver. Aircraft system design: a model-based and collaborative approach[C]//34th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Florence, Italy, 2024
- [14] USA DoD Office of the Deputy Director for Engineering. Systems engineering guidebook[EB/OL].(2022-02-01)[2025-04-07]. <https://www.studocu.com/en-au/document/rossmoynce-senior-high-school/computer-science-unit-2/do-d-sys-eng-guidebook-feb-2023/120789172>
- [15] VAN Nguyen, GAUVRIT Julie, JULIEN Cédric, et al. Impact of hydrogen fuel on overall design of transport aircraft[C]//34th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Florence, Italy, 2024: 7-8
- [16] PARREND Pierre, COLLET Pierre. A review on complex system engineering[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2021, 33(6): 1755-1784
- [17] FENTON Kevin P. Application of systems engineering principles in the analysis, modeling, and development of a DoD data processing system[D]. Fort Collins: Colorado State University, 2023:33-34
- [18] FREDRIK During, RAGHU Munjulury, ROBERT Hällqvist. Automation of engineering interoperability for aircraft design[C]//34th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Florence, Italy, 2024: 3-4
- [19] HUMPERT Lynn, ZAGATTA Kristin, ANACKER Harald, et al. Systems engineering and validation: a systematic literature review: contributing to sustainability with validation[C]//2024 the 7th International Conference on Computational Intelligence and Intelligent Systems, Nagoya, Japan, 2025: 104-110
- [20] SY Ousmane, SY Birame, LUTZ Florent, et al. Overall aircraft design: from the open-source FAST-OAD to its training branch [C]//12th International Conference on Innovation in Aviation and Space for Opening New Horizons, Barcelona, Spain, 2023: 2-3
- [21] RAZ Ali K, GAMARRA Marco. Mission engineering: analysis of mission threads with system of systems interdependence[EB/OL].(2024-04-01)[2025-04-07]. <https://doi.10.1109/SysCon61195.2024.10553596>
- [22] LEE Jay, SU Hanqi, JI Daiyan, et al. Engineering artificial intelligence: framework, challenges, and future direction[EB/OL].(2025-04-03)[2025-04-07]. <https://doi.10.48550/arXiv.2504.02269>
- [23] TORKJAZI Mohammadreza, RAZ Ali K. A review on integrating autonomy into system of systems: challenges and research directions[J]. IEEE Open Journal of Systems Engineering, 2024, 2: 157-178
- [24] STOIANOVA Olga V, MOSKALEVA Valeriia D. A method for planning R&D activities based on a set of models[C]//6th International Conference on Information Technologies in Engineering Education, Moscow, Russia, 2022
- [25] 李昌红, 张德志, 谈梦妮, 等. 航空发动机系统工程策划研究[J]. 航空动力, 2020(5): 56-61
LI Changhong, ZHANG Dezhi, TAN Mengni, et al. Research on the system engineering plan for aero engine[J]. Aerospace Power, 2020(5): 56-61 (in Chinese)
- [26] Hanusa Christopher H, Vergo Eric. Applying the iterative development process: the creation of fractal emergence[EB/OL].(2025-05-03)[2025-07-07]. <https://doi.10.48550/arXiv.2405.04544>
- [27] JAMES H McMichael, CHARLES J McCann. Spacecraft requirements development and tailoring[C]//AIAA Aviation 2019 Forum, Dallas, Texas, 2019: 2-3
- [28] 董亮, 刘俊堂. 航空产品研制条目化需求管理应用发展探讨[J]. 航空科学与技术, 2017, 28(11): 5-9
DONG Liang, LIU Juntang. Discussion on itemized requirement management in aviation product development[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(11): 5-9 (in Chinese)
- [29] MAANSI Srivastava, TANISHA Singh, ANMISH Varma, et al. A design trade-off of mixture ratio of liquid rocket engine[EB/OL].(2025-01-03)[2025-07-07]. <https://doi.org/10.2514/6.2025-0792>
- [30] 刘树光, 邵明军. 无人机自主作战效能评估技术研究综述[J]. 光电与控制, 2024, 31(4): 55-64
LIU Shuguang, SHAO Mingjun. A Review on UAV autonomous combat effectiveness evaluation techniques [J]. Electronics Optics & Control, 2024, 31(4): 55-64 (in Chinese)
- [31] 袁涛, 符松海, 刘新玉, 等. 外军低成本无人机成本控制技术浅析与启示[J]. 教练机, 2024, 5: 9-14
YUAN Tao, FU Songhai, LIU Xinyu, et al. Analysis and inspiration of cost control technology of low-cost UAVs in foreign armies[J]. Trainer, 2024, 5: 9-14 (in Chinese)
- [32] RYAN de Freitas Bart, JEFFREY A Hoffman, KEVIN R Duda. Is hardware agile worth it? -Analyzing the SpaceX development process[EB/OL].(2024-01-04)[2025-04-07]. <https://doi.org/10.2514/6.2024-2054>

- [33] 陈彦. C公司军贸无人机快速研发管理模式研究[D]. 成都: 西南财经大学, 2019: 28-33
CHEN Yan. Research on rapid R&D management mode of company C's military trade UAV[D]. Chengdu: Southwestern University of Finance and Economics, 2019:28-33(in Chinese)
- [34] KINARD A Don. F-35 digital thread and advanced manufacturing[EB/OL]. (2019-08-13) [2025-04-07]. <https://doi.org/10.2514/5.9781624105678.0161.0182>
- [35] 王海峰, 李嘉骏, 于凯, 等. 军用飞机敏捷研发数字化技术展望[J]. 航空工程进展, 2024, 15(6): 1-12
WANG Haifeng, LI Jiajun, YU Kai, et al. The outlook for digital technologies in military aircraft agile development[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(6): 1-12 (in Chinese)

Research on new systems engineering technologies for aviation equipment R&D overall design

LI Miao¹, YANG Shuifeng², ZHANG Yizhuo³

- (1.School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Chengdu 610091, China;
3.AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: R&D overall of equipment determines the selection of technical solutions, the design of developing routes, and the generation of combat capabilities, which is a systematic engineering of overall and decision-making significance. This paper studies the theoretical foundation of modern systems engineering and its specific practices in the equipment R&D field, proposes the technology principles of systems engineering, so as to more accurately grasp the essence of systems engineering theories, and scientifically guide their application in the aviation engineering field to achieve efficiency improvement. The logical relationship between equipment R&D overall and systems engineering is studied, and it is proposed that overall design in the equipment R&D field is a systems engineering. Some new systems engineering technologies for aviation equipment R&D are studied, such as aviation equipment R&D planning, list-based requirement management, technology-cost balanced design, rapid combat capability generated, and R&D-test-training-application system technologies, which can provide reference and guidance for the top-level planning and process implementation of aviation equipment R&D.

Keywords: aviation equipment; R&D; overall design; system engineering; combat capability

引用格式: 李淼, 杨水锋, 张亦卓. 面向航空装备研发总体的系统工程新技术研究[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(6): 1255-1264

LI Miao, YANG Shuifeng, ZHANG Yizhuo. Research on new systems engineering technologies for aviation equipment R&D overall design[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2025, 43(6): 1255-1264 (in Chinese)