

# 体系化推进系统工程流程、方法和工具平台在航空产品开发中的应用

## Systematically Promote Application of System Engineering Process, Method and Tool Platform in Aviation Product Research and Development

中航工业信息技术中心 郟永军



郟永军

高级工程师,北京航空航天大学硕士毕业,美国匹兹堡大学访问学者,中航工业信息技术中心(金航数码)系统工程应用部部长,中航工业系统工程推进办公室成员,中航工业系统工程信息化推进卓越中心负责人。具有 10 多年的航空信息化相关业务与技术的研究及应用经验,目前专注于系统工程、需求工程、基于模型的系统工程、嵌入式软件工程等领域的方法论与标准研究、咨询、培训、解决方案开发、工具采购和实施服务工作。

系统工程从“系统思维”的视角出发,结构化剖析系统的组成及元素

作为中航工业系统工程信息化推进工作的执行主体,中航工业信息技术中心(金航数码)联合国内外专家资源在 2014 年分别围绕航空运载器、航空发动机和航空系统开展了需求工程和 MBSE 的试点应用,整理形成了相关的流程、方法和规范,建立了完整的系统工程解决方案开发、咨询、培训、实施服务体系,培养了专业的系统工程信息化实施服务团队,形成了领域最佳实践,为后续系统工程推广应用奠定了基础。

之间的关系,并提供了覆盖概念、开发、生产、使用、保障和退出全阶段的可供裁剪的流程集。随着机械、电子、电气、流体、热、光、软件等多学科在航空产品开发过程中的深入应用及跨地域、多厂所联合协同模式的推广,航空产品开发技术复杂性和组织复杂性的双重特点愈发明显,基于模型的系统工程信息化应用已成为大势所趋,在概念阶段以形式化的建模方法支撑系统需求、设计、分析、验证和确认活动并持续贯穿开发和生命周期的后续阶段已成为当前国际航空航天和防务领域企业开展系统工程应用的主流方向。

在国家大力推进两化深度融合

的背景下,中航工业集团公司积极探索和实践工业技术与信息技术的融合,以带动工业过程转型和产品模式变革,并组织开展复杂组织体架构和系统工程的培训与试点应用。通过引入基于模型的系统工程方法论(MBSE)和相关信息化工具集,打造由需求工程、设计工程、制造工程、试验工程组成的纯数字空间下的 V 型研发模式,以实现综合、验证和确认环节在数字空间下的快速迭代。

### 系统工程的应用及发展

20 世纪 90 年代初,在波音、空客、洛克希德·马丁等知名航空航天和防务领域公司的大力倡导下,创立

了致力于开发系统工程学科和流程集并旨在提升系统工程使命和应用能力的全球性非营利会员组织——国际系统工程协会( INCOSE ), 积极推进系统工程在学术界、工业界的技术水平和实践能力提升, 通过促进跨学科的、可扩展和可剪裁的方法持续为工程领域提供系统工程解决方案, 以满足产业和产品趋向高度复杂的发展需求, 同时积极推动全球范围内系统工程工业标准的协调。2013年6月, INCOSE 正式批准中航工业获得其 CAB 的会员资格, 中航工业所属的工程技术和管理人员具有共享 INCOSE 在系统工程领域的知识体系和技术文献的权益。

近年来, 国际领先的航空企业在积极实践和推进 MBSE。例如空客公司在 A350 系列飞机的开发中全面采用 MBSE, 在飞机研制中逐层细化需求并进行功能分析和设计综合, 不仅实现了顶层系统需求分解与确认, 也实现了向供应商、分包商的需求分配和管理。洛克希德·马丁公司采用 MBSE 来统一进行需求管理和系统架构模型, 并向后延伸到机械、电子设备以及软件等的设计与分析之中, 如基于 MatLab 的算法分析以及 System C、Verilog、ANSYS 的软、硬件的设计与分析、Adams 的性能分析、SEER 的成本分析等, 构建了完整的基于模型的航空航天和防务产品的开发环境。洛克韦尔·柯林斯公司采纳 MBSE 方法覆盖航电全领域的系统定义和系统测试模型。罗·罗公司依据 INCOSE 系统工程手册制定了其自身的系统工程能力框架, 涵盖了系统思考、需求管理、系统定义、接口管理、系统功能分析、系统架构设计、确认和验证等能力, 覆盖了总工程师、项目管理者、总设计师、系统工程师、系统设计师、开发工程师、质量工程师、服务工程师等岗位职责, 实现了从航空动力系统到子系统到部件的系统工程迭代。波音公司构

建了以任务和需求定义、逻辑和功能集成、功能和逻辑架构设计为核心的覆盖产品全生命周期的 MBSE 过程, 从运行概念到需求到设计到生产。

国际集成商也在尝试由采办方直接定义系统的“黑盒”模型进行招标的做法, 投标方负责提供将“黑盒”模型转换为“白盒”模型, 之后采办方再通过事先定义的性能指标, 衡量对比不同的“白盒”模型的效能, 以此选择分系统或部件的中标者。

### 基于模型的系统工程对于复杂组织体系统的意义

从系统到系统之系统再到复杂组织体系统, 系统内部元素之间及与外部环境的交联关系越发紧密和复杂。站在系统的背景环境下审视系统不仅便于识别系统的利益攸关者, 更有利于建立对系统未来运行场景全貌的理解, 其核心是系统的运行概念。运行概念文档用于描述系统的使命、运行和保障环境、系统功能和特征等内容, 也为工业方与用户之间进行充分沟通提供了有效手段。运行概念文档的开发始于研究与探索阶段, 并在系统生命周期的后续阶段进行持续的迭代完善, 也被看做是系统需求的重要输入。

需求工程是定义、分析和需求管理的过程和方法, 位于系统工程最前端, 并贯穿系统生命周期。它开始于利益攸关者需要的分析, 产生可实现、可验证的结构化的系统需求与确认准则, 用以指导设计过程, 并通过需求确认与验证活动的迭代确保交付的系统满足利益攸关者的需要, 实现需求生命周期管理。在以文件为中心的系统工程应用过程中, MS Word 和 Excel 等电子文件的应用对于需求的表达和传递起到了一定的作用, 但是它无法消除文件本身固有的缺陷: 模糊的、容易有歧义、无法细粒度追踪等。当前主流方向是基于模型的系统工程, 模型与文件相比

不仅形象直观、易于理解, 且通过建模与仿真技术的应用还可以实现对系统需求的形式化表达、验证和确认。通过建立需求、功能、逻辑、物理 4 个层级的模型, 形成结构化的追踪链路和可复用的模型库, 用以支撑信息的一致性和完整性, 并提升变更的影响分析能力。基于模型的系统工程方法论核心由需求分析、系统功能分析和设计综合 3 个活动组成, 产生需求基线、功能基线和分配基线, 反映的是系统的正向设计过程: 系统的定义与分解。基于模型的系统工程不仅可以提升利益攸关者、项目管理者、系统工程师、软硬件开发工程师、测试工程师和专业工程专家之间沟通的效率, 同时增强系统设计知识重用的能力, 以需求为牵引的模型元素之间追踪性的建立也将会大大提升变更对项目成本和计划影响分析的决策能力。

基于模型的系统工程建设离不开组织强有力的支持及持续高效的培训工作的开展, 建立高素质的专业系统工程师队伍是保障 MBSE 顺利开展的先决条件, 产品开发流程和工程师的技能要与系统工程流程和 MBSE 技能要求相匹配。模型的精度与语义是 MBSE 建设效能评估的重要标准, 规避低质量的模型是系统工程师的重要职责。

### 中航工业系统工程建设目标与推进策略

2014 年, 中航工业发布了《关于印发航空产品系统工程信息化平台建设相关要求的通知》, 明确了系统工程信息化平台建设背景、目标、总体架构、建设内容和实施要求, 提出了统一中航工业系统工程业务架构、软件工具及实施服务, 实现需求、功能、架构的共享、协同、集成, 与国际航空航天和防务企业对接系统工程信息化应用和产品创新能力的总目标; 并进一步明确“十二五”期间将

在航空运载器、航空发动机、航空系统和航空武器系统领域形成最佳实践,制定系统工程流程、建模规范、实施规范等文件体系,开展与国际接轨的航空系统工程师培训与认证工作;“十三五”期间全面推广系统工程,建立以系统工程流程集为指导的产品开发体系,将基于文件的系统工程转变为基于模型的系统工程应用协同,建立国际认可的系统工程师培训与认证体系,并形成系统工程技术成熟度测评体系。

围绕系统工程建设目标,集团公司采用型号牵引、统一推进的策略,在集团公司统一 IT 架构的指导下,形成一致、可推广和支持行业协同的系统工程方法论、流程集,集中开展系统工程软件工具选型、采购和技术服务工作;直属单位制定领域内推进路线,落实领域内系统工程推进工作,加强考核与评价;成员单位制定本单位系统工程信息化平台建设规划,开展型号工程应用。

## 系统工程体系建设与推进措施

中航工业从系统工程推进组织、知识体系、培训体系和型号导入 4 个方面体系化推进系统工程。

### 1 推进组织

在推进组织建设方面,成立了中航工业系统工程推进委员会和推进办公室,由集团公司副总经理兼首席信息官张新国担任推进委员会主任。推进委员会是集团公司系统工程推进工作的最高决策机构;推进办公室是管理机构,负责系统工程推进实施和日常业务管理工作。中航工业系统工程信息化推进优异中心负责系统工程基础理论的研究、标准规范的制定、信息化工具平台采购及咨询、培训和实施服务工作。

### 2 知识体系

作为中航工业系统工程信息化推进工作的实施团队,中航工业信

息技术中心(金航数码)在引入了国际系统工程协会《系统工程手册》和《基于模型的系统工程方法论综述》基础上,着力开展知识体系建设,重点进行以下几个方面的研究工作。

(1) 基于模型的系统工程方法论。

强调在产品研发的方案阶段详细地定义需求与系统功能,并进行架构设计与综合,使用标准化的系统建模语言 SysML 建立需求、功能、架构模型,实现从需求到功能、架构的分解和匹配,通过模型执行和仿真手段实现系统需求和功能逻辑的验证和确认,是驱动 V 型研发模式的核心机理,用以指引和控制各个工程技术、专业工程领域的设计、综合和验证的过程。系统工程 V 模型如图 1 所示。

(2) 系统工程信息化工具平台。

集团公司选择 Rational 系列软件作为系统工程信息化平台的核心支撑工具,包括需求管理、变更管理、需求双 V (验证和确认) 所需的质量管理、系统逻辑建模、文档自动生成等工具,以及基于多物理场的仿真和各种专业工程分析与设计工具。

(3) 系统工程信息化应用。

航空产品研发经历多个阶段,涉及总体、结构、气动、强度、机械、电子、电气、软件等诸多学科技术运用和集成优化,涵盖了航空运载器、航空动力、航空系统、武器系统等多领

域系统 / 部件的开发和综合,融合了可靠性、维护性、保障性等多类工程专业的切入和开展,通过从飞机到系统、子系统、组件的系统工程信息化应用迭代,实现需求、功能、架构的传递、共享、协同、集成。系统工程信息化应用首先从需求管理开始,建立基于 V 型模型的需求工程过程,构建航空产品需求管理体系和需求信息架构,实现航空产品功能性需求和非功能性需求条目和属性的结构化定义,建立需求条目与国军标、适航条例等各种约束条件的引用关系以及需求验证和确认机制,实现需求跟踪、需求基线管理、需求变更及需求文档的自动化生成;其次,基于航空产品系统需求,定义其用例模型,识别系统功能边界及与之交互的外部环境与角色,基于功能需求分析系统功能行为,定义其活动图、时序图、状态图模型,识别与外部环境及角色的交互接口,建立需求与功能模型元素的分配关系,生成系统功能基线,通过权衡分析,定义系统架构模型,完成系统功能向子系统的分解和分配,产生系统架构基线,通过模型执行完成系统需求与功能逻辑的验证和确认,产生交付文档及模型。面向型号的系统工程推进路线如图 2 所示。

### 3 培训与认证体系

系统工程的建设需要从流程体系、落地方法、信息化支撑工具和专

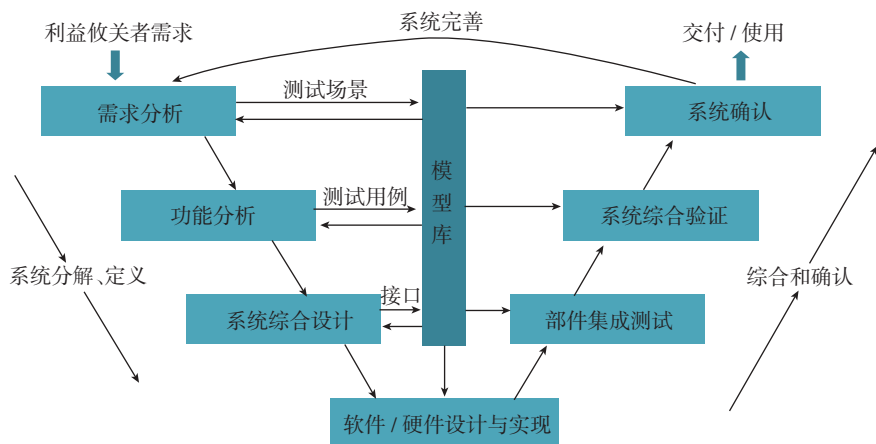


图1 系统工程V模型

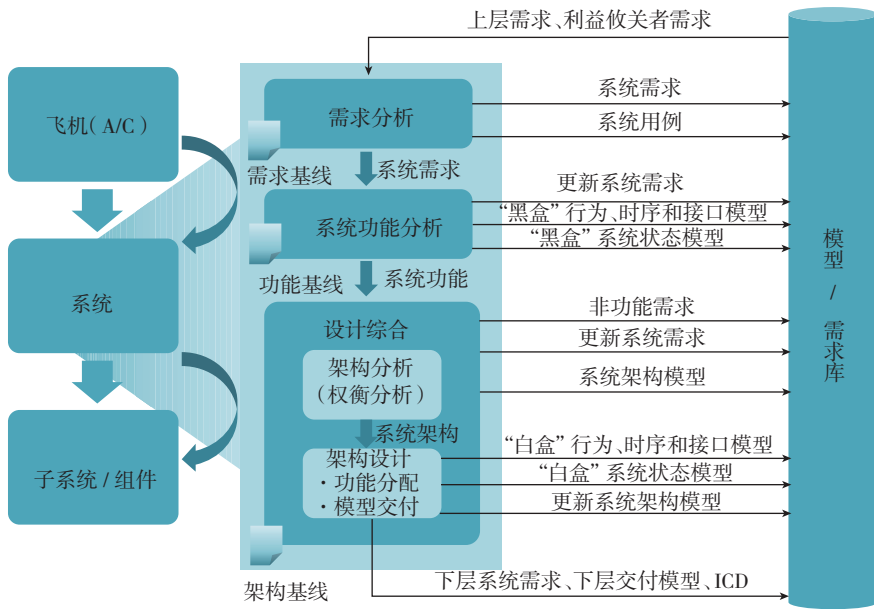


图2 面向航空产品的系统工程推进路线

业人才队伍建设等几个方面同步加以推进,需要通过国际系统工程师的培训与认证,使系统工程的基本概念和知识得以普及。

在培训体系建设方面,通过与国际系统工程协会合作,组织开展了4期国际系统工程师培训与认证工作;美国斯坦福大学2012年基于模型的系统工程调研报告中指出,影响MBSE建设成效的因素有11个,分别是文化的限制、MBSE学习曲线、可用的技能、MBSE价值感知的缺失、管理支持的缺失、方法成熟度、工具成熟度、MBSE培训、工具的可用性等,其中MBSE学习曲线和培训是其中重要的影响因素。波音公司

在其MBSE建设蓝图中特意提到了“training, training and training”,并构建了覆盖全球的系统工程师培训体系。

中航工业联合国际系统工程协会中国分会(清华大学工业工程系)建立了完整的中航工业-清华大学国际系统工程师培训与认证体系,特邀清华大学工业工程系、中航工业系统工程信息化推进优异中心和国际系统工程协会的专职讲师分别在北京、无锡、西安、成都组织开展了4期国际系统工程师培训与认证工作,中航工业集团总部、航电公司、信息技术中心、沈阳所、直升机所、一飞院、成都所、涡轮院、计算所、自控所、上

电所、动控所、雷电院、光电所、凯天、太航、庆安、南京机电等单位的130多人参加了培训(图3)。未来2~3年,中航工业将建立国际认可的系统工程师培训与认证体系,为系统工程在中航工业的推广应用培养更多的高素质专业人才。

#### 4 导航与试点应用

信息技术中心(金航数码)项目团队通过培训考取了Rational相关产品销售和技术认证,获取了IBM SVP(软件增值服务)认证,并与国外专家一起圆满完成了中航工业沈阳所、一飞院和自控所的系统工程导航项目,在此过程中掌握了系统工程的实施方法,形成了系统工程最佳实践,编制了标准实施规范、需求编写规范和系统建模规范;基于中航工业洪都需求管理项目完成了需求管理业务模式研究,形成了总体的需求模板样例。型号导入方面,在航空运载器、航空发动机、航空系统和航空武器系统领域10多家单位开展了系统工程试点应用,培养了典型示范。

#### 结束语

作为中航工业系统工程信息化推进工作的执行主体,中航工业信息技术中心(金航数码)联合国内外专家资源在2014年分别围绕航空运载器、航空发动机和航空系统开展了需求工程和MBSE的试点应用,整理形成了相关的流程、方法和规范,建立了完整的系统工程解决方案开发、咨询、培训、实施服务体系,培养了专业的系统工程信息化实施服务团队,形成了领域最佳实践,为后续系统工程推广应用奠定了基础。

未来,我们将持续加大与型号承制单位的合作,共建系统工程信息化应用示范工程,并积极组织国内外系统工程领域的专家资源,共同开展理论研究、咨询、培训与实施服务工作,全面推进基于模型的系统工程在中航工业的应用。(责编 谷雨)



图3 中航工业-清华大学国际系统工程师培训留念