

# 飞机航电系统需求工程应用研究

## Research on Requirement Engineering Application of Aircraft Avionics

中航工业西安计算技术研究所 毛宁 吕伟



毛宁

任职于中航工业西安航空计算技术研究所,长期从事航空机载电子产品研制、项目管理工作。

飞机航空电子系统(简称:航电系统)关系到飞机的可靠性、安全性、重量、体积及成本,是飞机上最重要的子系统之一。航电系统作为一个复杂学科和一种高精尖技术,在飞机中的地位日益提高<sup>[1]</sup>,其成本已超过飞机总成本的30%(现代军用飞机航空电子系统已接近整机出厂成本的40%~50%<sup>[2]</sup>)。先进航电系统已

对航电系统复杂性需求获取问题进行了梳理,研究基于需求的工程方法在复杂产品系统设计过程中的应用,指出在复杂产品系统研发中应用RBE方法有助于项目的顺利实施,并以某型航电系统为例,着重说明需求工程在航电系统研发过程中的重要作用。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.11.056

是现代军机作战效能的标志,也是民机安全性、经济性和舒适性的重要保障<sup>[3]</sup>。

航电系统技术发展迅速,随着平台中心向网络中心思想的演变,飞机对机载电子设备的性能要求进一步深化,航电系统综合化结构从早期物理上分离的功能子系统向概念上的功能区方向发展。短短30年的时间里,波音777/787、空客A380等民机的先进航空电子系统以及F-22、F-35等第四代飞机的航电结构,经历了从联合式体系向综合模块化航电体系IMA,乃至分布式综合模块化航电体系DIMA发展的过程<sup>[4]</sup>。单项技术朝着越来越尖端、系统技术朝着越来越复杂的方向不断发展,以及向“开放式、综合化、模块化、资源共

享”的模式演进,给航电系统研发和系统集成带来了前所未有的挑战。为了解决这些问题,美军早已提出了基于需求的系统工程(Requirements Based Engineering, RBE)。基于需求的工程通常被认为是独立于机载设备研制的系统工程(SE)学科,包括需求工程(RE)、构型管理(CM)、验证和确认(V&V)以及设计。目前RBE已经在A400M、A350飞机得到了重大应用<sup>[4]</sup>。

本文对航电系统复杂性需求获取问题进行了梳理,研究基于需求的工程方法在复杂产品系统设计过程中的应用,指出在复杂产品系统研发中应用RBE方法有助于项目的顺利实施,并以某型航电系统为例,着重说明需求工程在航电系统研发过程

中的重要作用。

## 应用背景

航电系统研发过程中主要存在以下几个问题:

(1) 研发模式面临转变。随着技术的发展,航电系统产品的研发模式已经由“需求满足型”向“需求驱动型”转变。在系统研发过程中,需要根据主机的要求,进行功能探索和细化,并自顶向下将功能分配至各部件,这种研制模式更注重架构设计、多部件协调优化和系统集成。在由“需求满足型”向“需求驱动型”转变的过程中,需要应用系统工程的方法对机载设备研制过程进行指导。

(2) 文档驱动的研制过程引发诸多问题。航电系统产品虽然在整个飞机系统中技术变革快,但是产品研发过程还处在传统的系统工程阶段,还是以文档作为各个阶段数据传递的核心,且通过大量文件对阶段性成果进行描述和评审,并通过文件驱动过程。文档规模大、版本多,技术状态不容易控制,评审较为困难,不容易发现问题,且研制过程中的需求散落在各个文件中,查找和共享不便捷,文档中的需求描述存在不确定性,可能造成理解歧义,导致需求和设计脱节。

(3) 需求变更频繁。航电系统属于信息技术行业,技术革新快,而目前的需求管理水平不完善,缺少有效手段提供需求变更的快速反应机制,导致在研发过程中难以在主机需求出现变更时,评估需求变更给研制带来的影响,易造成无法预估和控制,从而影响飞机的正常研制工作。

(4) 系统集成难度高,缺少明确的测试要求。飞机各系统在研制过程中需要开展相关的试验测试工作以验证所开发的产品是否满足设计需求,最终需要将各系统综合集成,并通过飞机整机试验测试以验证飞机是否可以实现既定的功能、满足飞

机设计需求和用户需求。缺少完整、正确的需求以及相应的测试要求,都无法有效开展各项测试工作以验证飞机满足最初要求<sup>[5]</sup>。

## 需求工程基本结构

需求工程是所有与需求有关活动的通称,包括需求开发和需求管理两个方面,具体内容如图1所示。

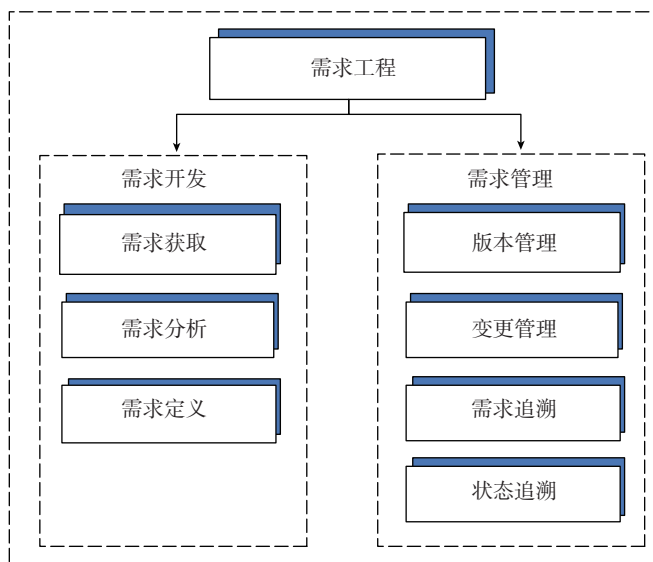


图1 需求工程基本内容

### 1 需求捕获

现代战争突破了传统模式,发展成为陆、海、空、天、电磁、网络六位一体的立体战争。在现代战术系统中,目前航电系统所提供信息已无法满足作战需要,必须运用综合化的航电系统提供必要的观测信息,实时进行目标发现、优化综合处理来获得状态估计、目标属性、态势评估、威胁估计等作战信息,并将这些信息提供给飞行员及地面指挥中心做判断。当前系统的需求开发就是基于这样的情况提出,如何通过调查与分析获取用户乃至作战需求并定义产品需求,对打赢现代战争具有重要的意义。笔者梳理了当今流行需求开发方法,主要概括为基于场景实例的方法、基于原型的方法、基于知识的方法<sup>[6]</sup>。

#### (1) 基于场景实例的方法。

基于场景实例(Scenario-Based)

的方法是当前研究较多的一种方法。该方法从用户(利益有关方)角度设想和期望目标系统的行为和功能逻辑,以此来理解、分析和描述目标系统。目前采用最多的是用 Use Case (UC)图来表示用例场景。Use Case 是一种可视化场景建模方法<sup>[5]</sup>。基本思路是:首先确定系统的边界,然后在系统边界外发现用例的使用者,

即主角。此后,确定系统的功能和活动,即用例。基于场景的需求捕获关键是确定正确范围,明确系统边界。明确系统边界的关键在于描述交互,而不是内在的系统活动。UC方法旨在方便涉众从较高的抽象层次上来理解系统的行为。用例模型是从系统环境的视角描述系统的行为,属于系统的黑盒模型,通常是按事件发生的时间顺序来描述系统行为。

#### (2) 基于知识的方法。

基于知识的方法与基于场景实例的方法不同,目标在需求开发中起着重要的作用,并且需求的本质就是达到一个目标。比较典型的工作如 Sutcliffe 和 Maiden 的基于类比推理的领域模型重用、KAOS 项目的元模型制导下的需求获取<sup>[7-8]</sup>。该方法采用了目标概念,并提出了一种从系统级目标和组织环境目标来获取需求

说明的方法,其目的是支持面向目标的整个需求获取和建模过程,复合系统不但包括系统本身,而且包括其所处的组织环境。采用目标的方法以该复杂系统及组织环境为研究背景,试图以本体和领域本体作为需求获取过程的基本线索,引导用户全面描述现实系统,并通过重用领域模型,构造应用软件的需求模型。该方法的特点是有益于精确定义需求,有益于需求文档的书写更方便,有利于最终需求说明书更容易被理解。

### (3) 基于原型的方法。

航电系统所有设计活动的根基与系统和利益有关方的匹配程度息息相关。基于原型的方法包括需求捕获、需求分析和需求定义3个活动,这3个活动有先后顺序,需求捕获的主要目的是通过采访、调查、沟通等途径获取利益有关方的需求,并最终形成用户顶层要求<sup>[9]</sup>。需求分析是对各种途径获取的用户需求原始信息进行分析、归类、总结,也可以使用 SysML 建模语言对需求进行建模,形成每一个用例的活动、顺序、状态模型,并最终来验证需求的合理性。

## 2 需求管理

航电系统包括通信系统、系统服务、操作系统、硬件及其驱动程序和一组用于配置的软件工具链。在系统架构设计中必须考虑许多约束和需求,所以航电系统存在着天生的需求易变问题,需求不稳定,需求本身改变/拓展,并随时间发生变化。而这些问题的解决依赖于先进的需求管理技术<sup>[10-11]</sup>。需求管理是一个动态管理过程,主要包括版本控制、需求变更管理、需求追溯、状态追踪活动。目前,需求分析和管理成为建立企业能力的关键一步,也成为自主创新、建立中国品牌的关键一步。

每一项需求在项目不同阶段有着不同的成熟度,随着工程的不断推进,系统研发人员对于所开发的系统

认识逐步具体、全面,需求的成熟度不断发生变化,同时众多利益有关方的要求变化也会使产品的需求发生变化,因此需求的变更贯穿于整个项目的生命周期。

如图2所示,展示了利用 IBM DOORS 工具进行需求管理的路线图。首先,需要建立并理解需求流程,这样可以从中识别出各种与需求相关的不同类型的信息,以及各种不同类型信息之间的关联关系。根据这些可以建立信息的逻辑模型。接下来的工作就是将它们“映射”到 DOORS 工具,如 DOORS 中的结构、模块、文件夹、项目、属性。为了严格控制各个环节的活动和设计结果满足系统需求,有必要对需求的状态进行追踪,建立需求与架构、方案及产品测试等数据间的追溯关系,验证和确认产品开发的各个阶段所开展的设计活动、设计结果是否满足需求,

短研制周期、降低研制成本<sup>[12]</sup>。

需求验证的目的是证明所设计的产品或系统满足相应层级的需求,产品或系统可以实现既定功能。通过需求模型或者产品检查需求的一致性、完备性和准确性。验证方法包括形式化验证和可执行模型验证,形式化验证通过语义分析、逻辑性分析来检查需求的正确性和一致性;可执行模型验证通过建立可执行模型对需求进行动态分析,验证需求的正确性。需求验证工作的输入是飞机或者系统经过确认的需求,采用检查、评审、分析、试验、建模等方法验证所设计的产品或者系统满足相应层级的需求。

图3为系统验证和确认关系,确认和验证的区别是:确认的目的是证明系统的需求是正确的和完整的,而验证的目的是证明需求的实现,也就是系统能够满足需求。

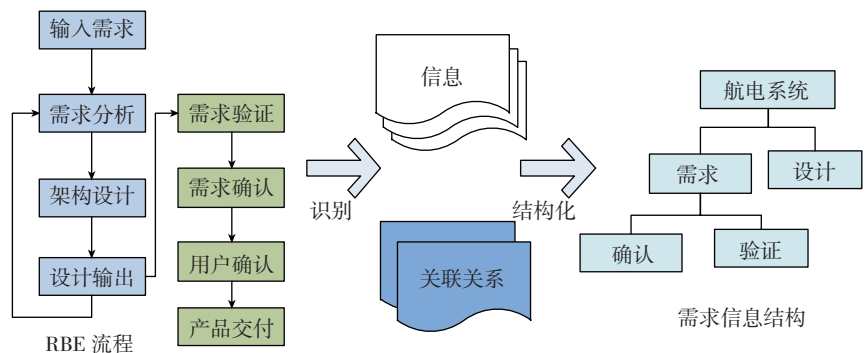


图2 需求管理流程架构图

并可迅速提供需求的符合性检查。

## 3 需求确认与验证

需求确认是为了保证所定义的需求是正确的、完整的,可以满足市场需求以及所有相关方的需求。需求确认是站在需求及用户的角度来看设计方案及产品是否满足用户和上一层需求。在航电系统研制过程中,需求的确认与设计工作是一个互相迭代的动态过程。但一般看来,在产品研制初期提高需求的正确性和完整性,可以有效减少设计迭代、缩

## 4 RBE 基本流程

基于需求的工程(RBE)是对需求工程(RE)的延伸,应ISO/IEC 15288系统工程要求实施的活动,并贯穿于飞机项目的全寿命周期。RBE的最终目标是:全面满足客户的需求,缩短型号研制周期,全面支持合格审定,使项目时间、成本和质量达成最佳平衡,减小产品研制重复工作并降低风险,提升产品研制的成功率<sup>[13-14]</sup>。

RBE重点是准确捕获并定义所

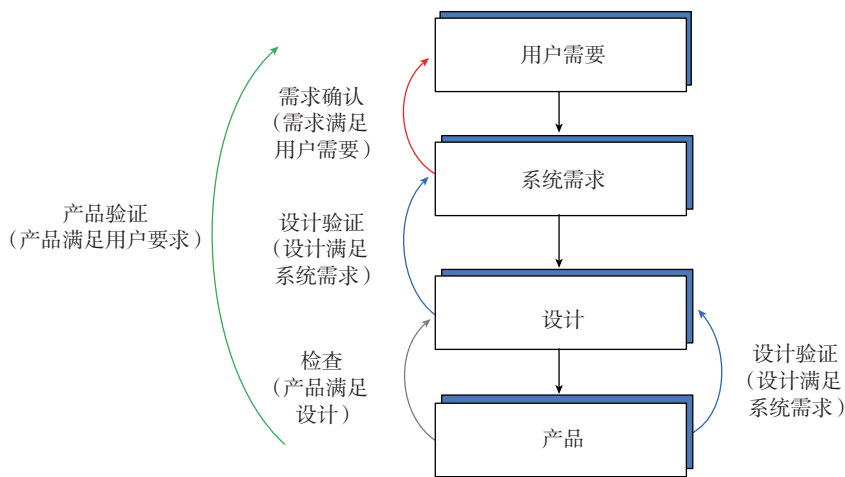


图3 系统验证和确认关系

开发系统的需求,在产品研制整个寿命周期实施需求管理,在整个寿命周期内所有的设计活动均围绕最初的设计需求而开展。图4给出了RBE方法在系统研制过程中的应用流程,首先捕获客户需求,其次,通过需求分析活动定义系统需求,并根据系统需求研制产品,在产品的制造过程中,通过产品验证和系统确认,分别验证产品已经满足系统需求和客户要求,有效保证了设计与需求之间的一致性。

### 航电系统需求工程应用实例

现以某飞机航电系统使用场景为例,简要说明需求捕获、确认验证及管理过程。航电系统在飞机中的定位如图5所示,航电系统和机电系统、飞控系统、地面系统、动力系统连接,由多个传感器、模块及其软件组成,为用户(包含飞行机组、地勤和空勤)提供飞行参数、飞机系统和飞机环境信息显示、导航数据和飞行计划管理、飞控系统自动飞行的飞行引导数据、飞机系统的维护、系统数据记录等功能。

设计者首先对航电系统的应用场景进行想定,如假设滑跑、爬升、巡航、降落等阶段的航电系统应用场景,描述各个阶段应用场景下航电系

描述的是用户如何使用系统,而非系统能提供什么功能。总结用例分析结果中所有相关信息形成用户需求,用户需求是产品的研制总要求,是从用户的角度对产品进行的直观描述。用户需求分析后,衍生并分解形成产品需求并展开设计,所有需求的处理工作在 DOORS 工具下完成。

#### 1 需求捕获

飞机的整个工作过程可以分为暖机、起飞、爬升、巡航、下降、着陆6个剖面,假定飞机暖机过程中,如图6所示航电系统的工作过程为:系统开机后进行飞行前准备(飞行计划、系统检查)、任务确认、起飞爬升、巡航等,巡航过程中涉及飞行监控和监控对象,飞行准备中涉及飞行计划导

统的操作流程,每一步操作即为一个用例,描述和分析每个用例的操作步骤的目的、初始条件、环境、主体,

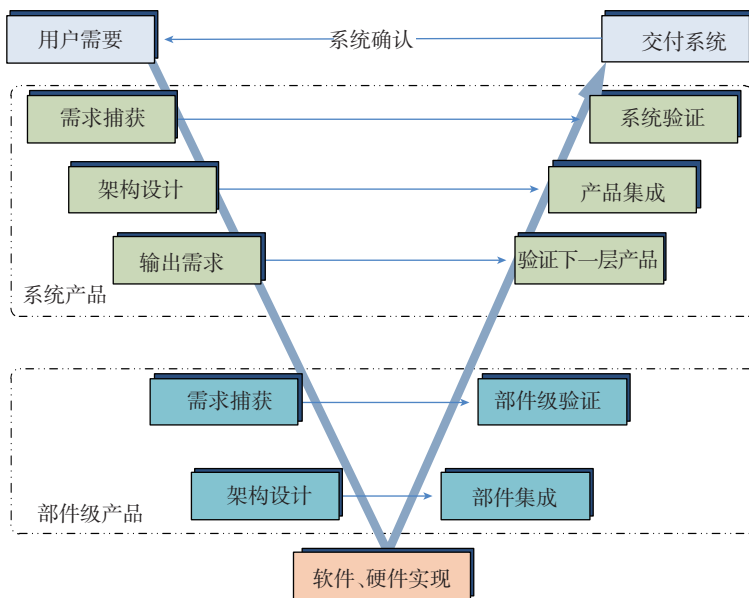


图4 RBE一般过程

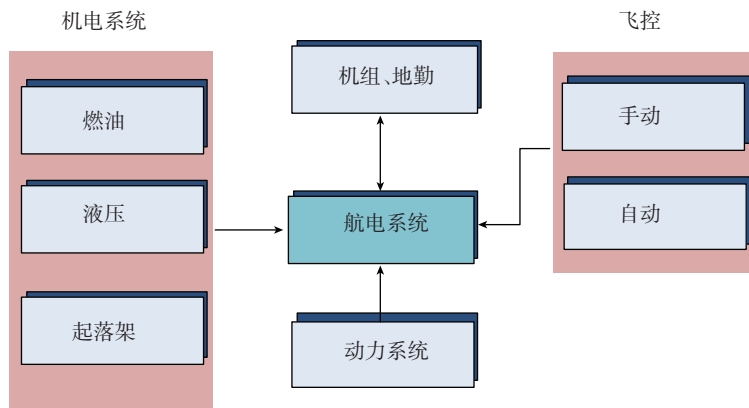


图5 航电系统交联关系图

人和系统检查,每一步骤即为一个用例。

现以 UC1 为例进行分析,如航电系统上电过程条件是外部应有面板提供按钮,应根据需要进行操作启动其他设备,应通过座舱维护显示检查各设备是否启动。在此过程中,系统开发者还须考虑各个利益攸关方所关注的其他问题,如系统服务、系统必需的性能、硬件约束等条件,将所有信息进行梳理以形成原始需求文档。如表 1 所示,基于场景的 UC 描述必须包括标识、标题、目的、环境、描述、结束状态。

图 7 为航电系统需求信息架构示意图。根据技术协议要求和系统设计目标与要求,开展相关设计工作并最终形成系统级需求,并将系统级需求分配给相应的系统作为系统开展设计活动的输入。

2 需求确认

需求的确认一般发生在研制周期的初期,责任主体是系统的集成者,在需求定义的每一个层次(包括飞机级需求、系统级需求和部件级需求)上都要进行需求的确认,这与安全性方面的工作是一样的,如图 7 所示,在 DOORS 中建立用户需求与系统需求、系统需求与测试性的追溯报告,整个需求追踪关系清晰明确,当需求发生变更可以迅速确认变更范围,评估需求变更将会造成的影响。

3 需求验证

需求验证是一件十分复杂的工作,有模型仿真验证、相似性分析、试验验证等方法,可见很大程度上是基于分析的活动,它需要证实每个阶段都符合前面阶段所定义,仿真模型是构建仿真模型体系和仿真系统的核心,在运用仿真验证法验证需求时,首要的是要通过建立可信赖的仿真模型体系和数据标准来保证仿真模型的可信性,并通过模型的动态演示验证需求的正确性,图 8 所示是基于模型仿真验证的需求验证实例,仿真

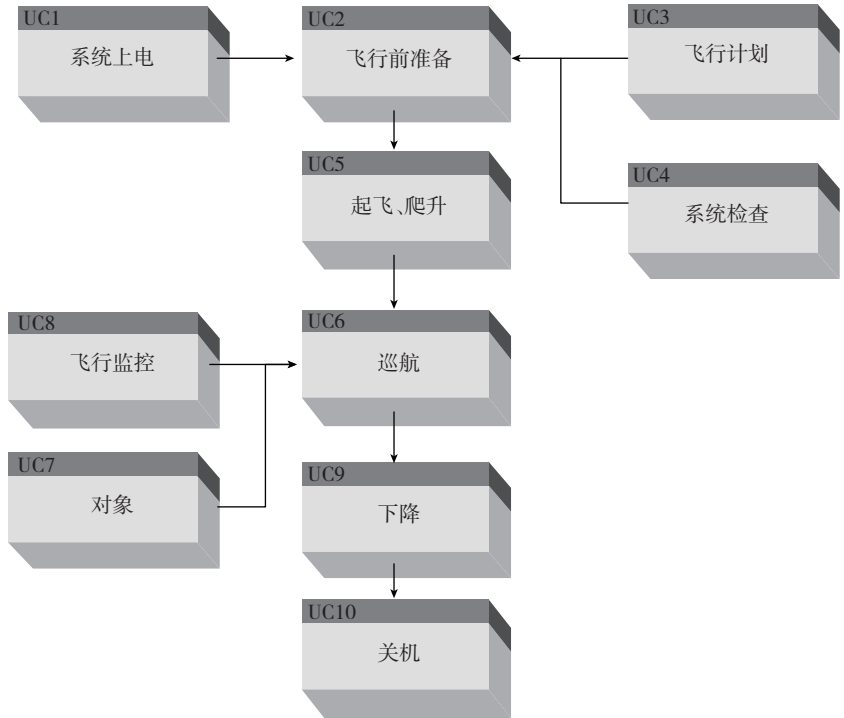


图6 航电系统暖机过程操作流程

表1 User Case场景描述

用例标识	UC1
标题	系统开机
目的	完成系统加电和初始化,航电系统设备进入工作状态
描述	流程 1: (1) 系统应提供启动控制面板(分别具有各个设备的启动和关闭开关) (2) 操作启动控制面板开启主处理系统和显示控制系统 (3) 根据座舱显示确认主处理系统和显示控制系统正常启动 (4) 根据需要操作启动控制面板,开启其他设备 (5) 通过座舱维护显示检查各设备是否启动 流程 2: (1) 系统应提供启动控制面板(全部设备一起启动和关闭开关) (2) 操作启动控制面板全部启动开关,开启全部设备 (3) 通过座舱维护显示检查各设备是否启动正常
结束状态	系统开机完成后应自动进入初始位置对准,初始位置对准完成后进入飞行准备

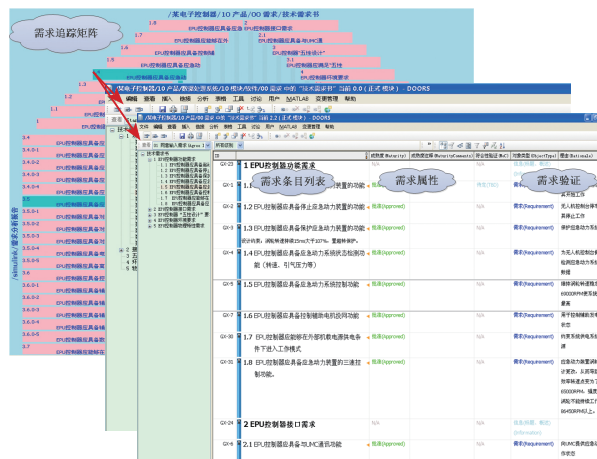


图7 基于追踪的需求管理视图

验证环境主要在 Matlab/Simulink 中构建,并通过 DOORS 接口工具完成需求条目和仿真模型的追踪,保证了需求被正确实现。

#### 4 需求管理

需求管理工作贯穿于整个产品的研发工作,通过开展需求的状态追踪可以实时掌握需求的状态,必须合理有效控制需求条目的版本变更,才能保证客户需求的正确实现<sup>[15-16]</sup>。需求管理还包括需求层级明确有效的追溯关系,复杂产品系统一般包含多个子系统,这就涉及到需求的分配、分解而产生不同层级的需求,通过建立不同层级之间需求的追溯关系,可以清楚掌握需求的发展情况、了解不同层级之间需求的关系,同时所建立的追溯关系,也有助于在需求变更时评价需求变更后对于其他系统产生的影响,以此来保证系统顶层设计要求被相关子系统满足实现。

结合实际情况将信息架构对应至 DOORS,并将需求的属性、追踪矩阵,需求的视图在 DOORS 工具中定义和完善。图 9 为航电系统需求信息架构示意图。根据技术协议要求和系统设计目标与要求,开展相关设计工作并最终形成系统级需求,并将系统级需求分配给相应的系统作为系统开展设计活动的输入。

#### 结束语

为了适应打赢未来高技术局部战争的条件,航电系统的研制需建立起一整套满足军事需求分析的理论和方法<sup>[17]</sup>。目前,缺少有效的需求分析理论和方法指导。本文结合复杂航电系统的研制特点与实际问题,介绍了需求的分析方法、需求流程概念,并对需求捕获技术进行了深入探讨,举例说明需求定义及需求管理具体内容,将 RBE 方法应用于航电系统产品开发过程,对现阶段产品研制有重要实践作用。

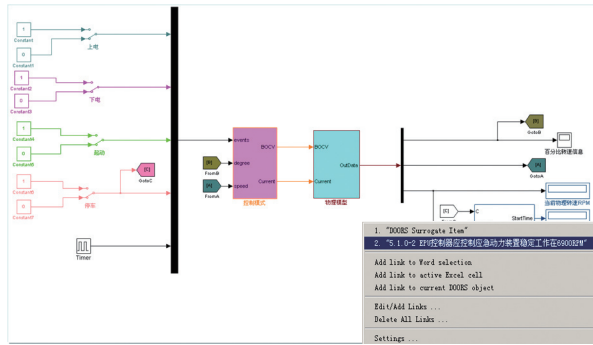


图8 基于需求的设计验证

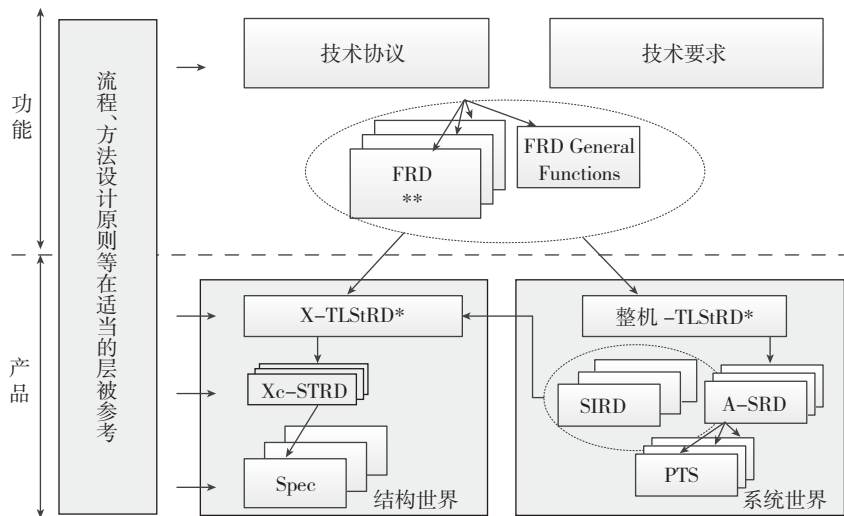


图9 需求的分解和传递过程

#### 参考文献

[1] 罗志强. 航空电子综合化系统. 北京:北京航空航天大学出版社,1990.  
 [2] Morgan D R. Military avionics twenty years in the future//IEEE 14th Digital Avionics Systems Conference, USA, 1995: 483-490.  
 [3] 牛文生. 综合化模块航空电子系统分布式平台. 北京:航空工业出版社,2015.  
 [4] Nelson T. 787 systems and performance. Boeing Commercial Airplanes, 2012.  
 [5] Sutcliffe A, Maiden N. The domain theory for requirements engineering. IEEE Transactions on Software Engineering, 1998(3): 760-773.  
 [6] 段采宇. 军事需求工程的现状与趋势. 需求工程,2006(4):39-43.  
 [7] Dardenne A V, Lamsweerde A, Fickas S. Goal-directed requirements acquisition. Science of Computer Programming, 1993(1): 3-50.  
 [8] 廖福钊. 军事信息系统需求工程现状与发展. 指挥信息系统与技术,2013(10):6-11.  
 [9] 尤海峰. 大型民用飞机 IMA 系统应

用分析及发展建议. 电讯技术, 2013(1):110-116.

[10] 郭博智. 大型客机设计中的需求管理. 民用飞机设计与研究,2013(4):1-5.  
 [11] James, Ramsey W. Integrated modular avionics: less is more[J/OL]. Avionics Magazine, 2007-02-01[2015-05-10]. [http://www.aviationtoday.com/av/commercial/Integrated-Modular-Avionics-Less-is-More\\_8420.html](http://www.aviationtoday.com/av/commercial/Integrated-Modular-Avionics-Less-is-More_8420.html).  
 [12] 张莘艾. 基于需求的工程方法在复杂产品系统研发中的应用. 科技信息, 2015(20):416-417.  
 [13] 王聪. 需求工程的形式化方法. 军事通信技术,2008(1):53-56.  
 [14] 郑占君. 商用飞机研制需求管理技术研究. 航空科学技术,2013(2):50-51.  
 [15] 牛志一. 现代化战争中的多传感器信息融合技术研究. 计算机与信息技术,2003(3):71-73.  
 [16] 殷军. 作战模拟系统需求工程探讨. 军事运筹与系统工程,2008(2):28-31.  
 [17] 谭小卫. 一种新的飞机作战效能评估方法. 系统工程理论方法应用,2014(1):75-80.

(责编 叶枫)