

需求工程方法在机载系统研发中的应用研究



沈腾^{1,*}, 孟繁鑫², 张浩驰¹

1. 中国航空工业发展研究中心, 北京 100029

2. 南京机电液压工程研究中心 航空机电系统综合航空科技重点实验室, 江苏 南京 211106

摘要:通过对需求工程的理论方法进行阐述,探讨机载系统研发过程中开展需求工程方法理论的应用研究。结合MBSE系统工程V模型流程说明航空产品研发各阶段与需求工程如何对应;结合ARP 4754A阐述复杂航空系统正向研发流程中需求工程如何实现。重点剖析机载系统研发过程中如何应用需求工程的技术流程,即需求开发,进行需求捕获—需求分析—需求分配—需求验证,来提升研发效率和产品质量,并辅以空气管理系统研发为示例演示系统研制过程中的需求开发过程。

关键词:需求工程;需求开发;机载系统研发;系统工程

中图分类号:TP302.1

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2019.12.004

需求是正向设计的起点,目前我国航空产品的研制已经逐渐从跟踪仿制走向自主研发,对需求的论证和实现作为正向自主研发的重要特征和内容被航空工业界越来越重视起来。在复杂航空产品研制方法和研制流程方面,经过多年推广,国内飞机制造商和供应商均已不同程度贯彻了系统工程理念和ARP 4754A民机和系统研制流程指导原则。由于需求工程在系统工程中是贯穿始终的主线且在ARP 4754A流程中也占据重要地位,故开展需求工程在复杂航空系统中的应用研究具有重要意义。

1 需求工程概述

1.1 需求工程应用的必要性

需求工程是指应用已证实有效的技术、方法进行需求分析,确定客户需求,帮助分析人员理解问题并定义目标系统的所有外部特征的一门学科。需求工程广泛应用于民机及机载系统研制过程中。飞机机载系统属于复杂产品系统,具有研发成本高、规模大、技术含量高、单件或小批量定制化、集成度高等特点。机载系统通常依据《SAE ARP 4754A民机与系统研制指南》^[1]进行研发,该指南给出了航

空系统研发流程,引入了系统工程理论开展工程实现,涵盖了从需求提出到需求实现的过程。系统越复杂、需求越多元化、约束越多,则越需要采用需求工程理论方法进行开发和管理,防止需求传递不清楚导致发生设计和验证与需求脱节的情况。国际民机研制过程中,系统供应商均开展需求工程从客户和飞机的需求着手展开需求论证,进而进行系统设计,提高系统集成能力,确保系统研发全面成功、需求全面实现。

1.2 系统工程中的需求工程

民机和系统在开发过程中通常采用系统工程方法,需求工程是系统工程中重要的组成部分,典型的系统工程V模型如图1所示。由图可知,需求工程是贯穿系统工程始末的主线。从需求工程的角度来看,V模型流程左侧各级之间就是上一环节给下一环节提出输入的需求,下一环节通过制定方案满足需求并沿系统架构分解到再下一环节的过程,同时每一环节通过工程化迭代过程制定并执行相应的需求验证计划,最终实现系统需求的验证与确认。

采用基于模型的系统工程进行机载系统的研发^[2],需要顾及的研制内容众多,但抓住需求工程这条主线,可以帮

收稿日期:2019-10-10;退修日期:2019-10-25;录用日期:2019-11-11

*通信作者. Tel.: 010-57827624 E-mail: 9810472@qq.com

引用格式: Shen Teng, Meng Fanxin, Zhang Haochi. Application research of requirement engineering method in airborne system development [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(12): 23-29. 沈腾, 孟繁鑫, 张浩驰. 需求工程方法在机载系统研发中的应用研究 [J]. 航空科学技术, 2019, 30(12): 23-29.

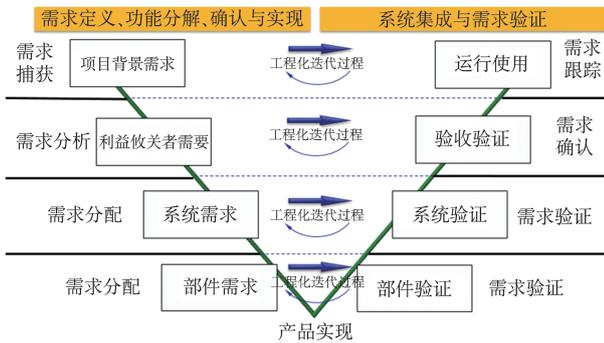


图1 需求在系统工程流程中的串联作用

Fig.1 The serial function of requirements in systems engineering process

助提高对研制流程的理解和管理,并实现在整个研制流程中管理控制相关设计活动严格遵循系统需求,确保所有系统需求的实现,最终取得项目研制、适航取证、运行维护的成功,对于全面提高机载系统的研制能力具有重要意义。

表1 工程研制项目各阶段需求工程开展的主要内容

Table 1 Main contents of requirement engineering in each stage of project

阶段	项目规划阶段	立项论证阶段	可行性研究阶段	初步设计阶段	详细设计阶段	验证阶段
主要任务	根据项目背景制定: (1) 项目指导思想; (2) 发展目标; (3) 进度; (4) 经费; 提出最顶层的项目需求	顶层需求的开发和确认: (1) 完成市场需求捕获和项目级需求的初步开发; (2) 制订需求捕获、分析、分配、验证初步方案; (3) 根据需求分配,完成初步架构设计和提出相应的初步系统方案; (4) 需求管理文件; (5) 与上级研制单位达成需求确认协议	完成系统级需求的初步开发和确认 (1) 完成顶层技术需求分析与验证; (2) 开展飞机和系统关键技术论证,沿着概念方案架构,将需求分解分配; (3) 根据需求分配完成架构设计和提出相应的系统方案; (4) 形成系统需求管理文件; (5) 确认需求、功能和研制保证等级的分配	系统级需求的开发和确认: (1) 冻结系统级需求、功能和研制保证等级的分配; (2) 完成系统方案的多轮迭代、确认; (3) 完成模拟验证和部分实物验证; (4) 建立初始的系统需求控制基线	需求的更改和方案确定: (1) 开展子系统级和部件级的需求开发与确认,形成完整的飞机需求基线和技术基线; (2) 完成设计更改; (3) 开展需求更改相关的决策分析工作	需求的验证: (1) 实物产品制造; (2) 从部件验证—系统验证—整机地面验证—飞行验证逐级完成需求验收; (3) 实现需求工程的实物验证和确认

2 需求工程应用方法

2.1 需求工程应用流程

民机机载系统研制在飞机研制过程中处于承上启下的位置,利益攸关者需求(如市场需求、设计目标、飞行运行概念等)作为飞机制造商研制输入,经飞机级需求定义与架构设计提炼和确认后,向系统级研制传递需求作为系统研制输入。

系统级研发首先对飞机级传递的需求进行捕获、分析和确认,分解细化为系统功能清单,进行系统架构备选、权衡、确认,实现系统级的架构定义。期间每一步都既要在系统内部进行需求开发和反馈迭代,还要与飞机级进行需求开发工程化迭代,直至所有需求完成确认。

系统级研发还需要通过系统的需求开发和架构设计提炼、确认向部件输出的明确需求作为部件的研发输入,并在

1.3 工程项目研制周期中的需求工程

项目是具有目标、期限、预算、资源消耗与资源约束的一次性活动。从项目实施的角度看,整个项目周期包括项目规划、项目立项论证、项目可行性研究、初步设计、详细设计、试制与验证的过程,就是系统研发需求从提出、细化、分析、分配、实现、验证与验收的过程,可以说项目本身就是在特定需求约束下,实现需求的一个过程。项目周期各阶段均需要进行需求工程全过程的捕获、分析、论证/设计和初步模拟验证等。各阶段主要区别在于需求工程应用深度不同,随着项目推进需求从粗到细,从少到多,由抽象到具体,由定性到定量^[3];在设计阶段(初步设计、详细设计),实现需求的工程化迭代,完成模拟验证和部分实物验证;在生产制造和验证阶段实现需求工程的实物验证和确认,包括了试验件制造、部件验证、系统验证、机上地面验证、飞行验证等。生命周期各阶段中需求工程所需开展的主要任务见表1。

下一级需求开发和架构设计过程中起到确认作用,详细需求传递流程如图2所示。

根据上述流程要求,系统需求开发的主要流程如下:(1)开展需求捕获和分析,形成系统级需求文件;(2)在系统需求基础上开展功能分析工作,定义系统功能之间交互关系,形成功能架构和功能清单;在功能分析过程中将产生衍生需求,同时对原需求文件进行完善;(3)在功能清单基础上,开展功能危害分析,分析功能失效状态、影响类别,制订安全性目标和需求,并完善到需求文件中;(4)开展需求确认工作,确保需求正确性和完整性,满足利益相关方输入需求;(5)开展详细架构设计工作,承接需求、功能和安全性目标的物理实现:定义飞机/系统备选系统物理架构,将功能和需求面向备选架构进行分解和分配,捕获飞机/系统内部物理架构之

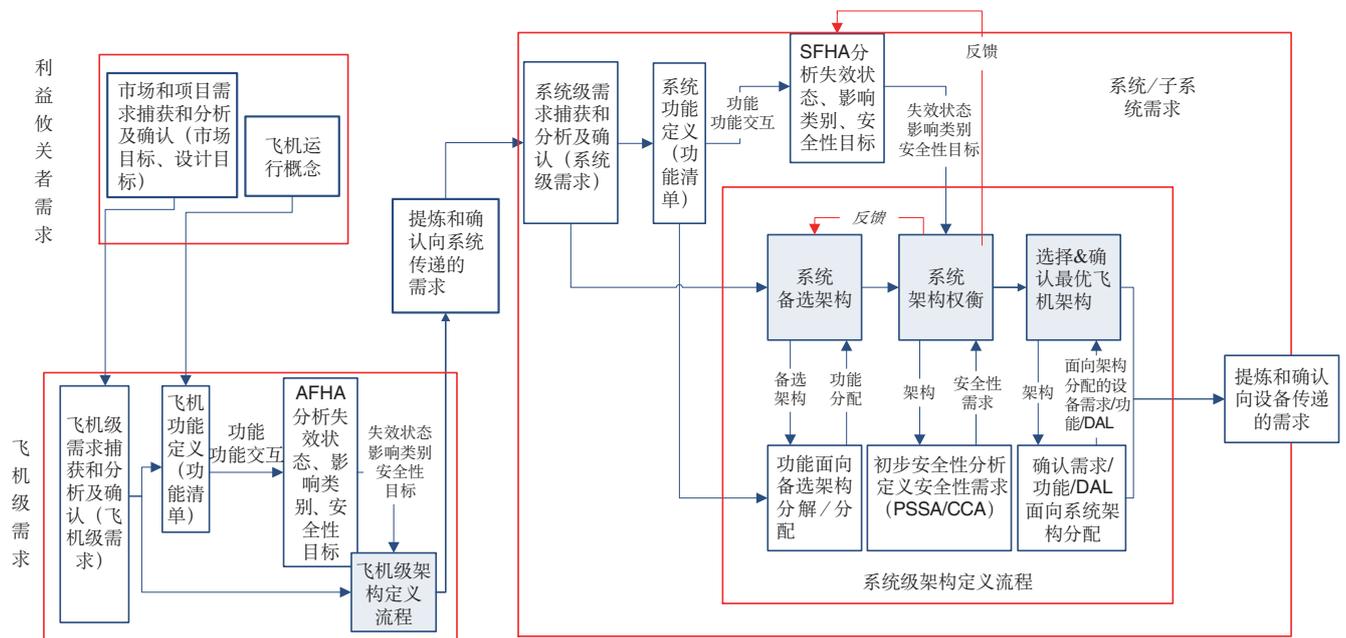


图2 需求传递过程

Fig.2 Requirement transfer process

间接口、功能和衍生需求；(6)开展物理架构权衡工作，围绕需求和功能沿着备选物理架构分解分配，开展初步安全性评估，分析架构安全性，提出隔离和冗余要求；同时，从成本、技术可行性、关键性能参数、竞争性、扩展能力、重量和空间约束、全寿命周期考虑等方面进行方案权衡分析；(7)选择和确认最优架构：确认需求、功能和研制保证等级的分配，并在初步设计评审后进行冻结，完成详细方案设计，开展设计验证工作，完善和确认系统架构；(8)提炼并确认向下层级传递的

需求，将衍生需求反馈到系统需求文件中，并纳入需求管理。

2.2 需求开发工程化流程

需求开发工程化流程包括了需求捕获、需求分析、需求分配和需求验证4个阶段，工作内容分别包括利益攸关者识别、利益攸关者的功能需求定义、系统需求定义、功能架构设计、逻辑架构设计、物理架构及控制架构接口等设计，完成试验件制造，依次进行部件验证、系统验证、地面验证、飞行验证，最终实现需求确认，如图3所示。

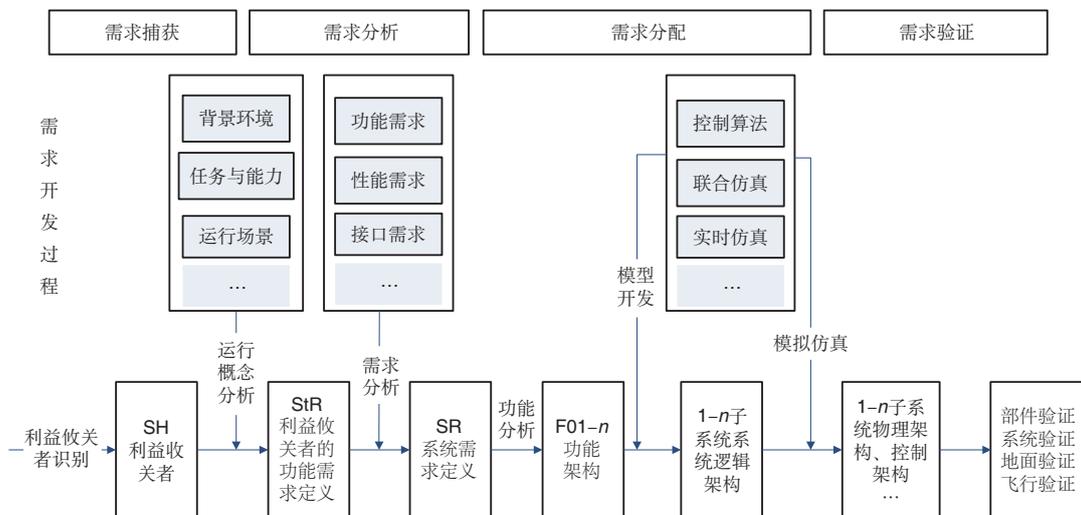


图3 需求开发流程

Fig.3 Requirement development process

在利益攸关者和功能需求定义过程中可运用背景环境、任务与能力、运行场景等运行概念分析方法,在系统需求定义过程中可采取功能需求、性能需求、接口需求等需求分析方法。在功能架构、逻辑架构、物理架构等设计工作中,为提高系统研发效率和研发质量、节约研发成本,可采用模型开发方法进行,如控制算法、联合仿真、实时仿真等模拟仿真验证^[4]。

利益攸关者识别主要工作包括组织成员按照系统研制生命周期识别研发活动,识别与该研发活动相关的利益攸关者;将识别的利益攸关者进行统计,建立利益攸关者列表;识别主要或次要利益攸关者。其中,主要利益攸关者是指缺乏对其需求的考虑则无法通过阶段评审,次要利益攸关者是指缺乏对其需求的考虑仍可以通过阶段评审,但建议补充;对识别的利益攸关者列表进行评审,确保无遗漏。

运行概念开发过程中,首先需定义计划使用的系统范围,系统范围包括系统应当具有的能力、系统边界、系统环境等;在清晰定义系统范围后,需要定义系统边界,系统边界包括物理边界、功能边界、组织边界等,在边界定义过程,与利益攸关者达成一致较为困难,故需要详细沟通和多轮迭代以保证预定的系统与利益攸关者需求保持一致;之后则是运行概念中核心部分,即建立场景。场景以动态视角并从使用者角度描述系统运行,其描述了系统运行时间、地点、对象、原因及系统如何运行的过程,需要注意的是,系统运行场景数量很多,需有目的选择最实用的场景进行系统运行特性描述。尤其系统运行场景应选择在恶劣条件或者临界情况下的场景,保证系统需求完整性;在建立场景后,则在建立场景上继续深入,即场景完成后,通过不断迭代与完善场景,保证不同利益攸关者在理解过程中的一致性,同时通过场景运行检验系统在运行过程中出现的问题及缺陷。

需求分析流程的目的是将利益攸关者需求转换为系统需求。该活动从问题域向方案域视角转换,构建系统技术定义,产生可度量的系统需求,该系统需求可从系统供应商视角规定应有特征及数量,以满足利益攸关者需求。系统需求是系统定义的依据,且是构成架构设计、综合和验证的基础。因此,在项目生命周期早期根据定义明确的利益攸关者需求建立完备且最小需求集合较为重要。需求分析活动可明确产品解决方案所需的特征、属性和功能及性能需求;明确将会影响系统架构设计的约束和实现方法;实现系统需求对于利益攸关者需求的完整性和追溯性;定义系统

需求是否满足验证基础。

在定义了系统顶层功能后,需对系统顶层功能进行分解,功能分解是自上而下过程,需将系统功能分解到适当的低层级,实现系统功能向系统构型映射。系统功能分解需逐层进行,定义并清晰梳理本层功能后,再进行下一层级功能分析。功能分解包括功能流、接口、数据流等分析。功能分解需要持续进行直至底层功能颗粒度足够完成逻辑架构与物理架构工作。功能分解完成的判断依据是:最低层级子功能是否能够以一个完整的、简洁的、独特的需求形式提供给物理架构。系统功能逐层分解主要活动包括了系统功能分解、系统功能流分析、系统数据流分析、性能指标分配、系统功能接口分析等^[5]。

3 机载系统应用案例

机载系统是飞机实现主要功能和确保飞行安全的根本保障,与飞机机体、发动机一起,构成了飞机的三大组成部分。我国机载系统研发目前正在朝自主创新研发方向发展。为使需求工程流程和方法更易理解与实施,本文以机载空气管理系统为例,对系统需求开发的流程和方法进行描述。

3.1 需求捕获

利用利益攸关者识别方法可建立空气管理系统主要利益攸关者列表,见表2。其中,SH表示利益攸关者(StakeHolder)。

针对表2,可捕获利益攸关者的需求,表3给出了部分功能需求。其中,StR为Stakeholder Requirement的缩写,表示利益攸关者需求。

3.2 需求分析

基于利益攸关者需求,可进行系统需求分析,获得系统需求,并将利益攸关者需求与系统需求进行关联,实现需求的追溯性管理,见表4。其中,SR为System Requirement的缩写,代表系统需求。

3.3 需求分配

利用功能分解分析流程与方法,对空气管理系统功能需求进行分析,对各个需求进行归类、分组,可得出空气管理系统主要功能模块,见表5。其中,F为Function的缩写,表示功能。由表5可知,需求SR001~SR003可由F01气源生成功能实现,SR005~SR006可有F03空气分配功能实现,其他需求分别对应了独立的功能模块。

根据表5分配的功能模块,可进行空气管理系统逻辑实体分配,见表6。由表6可知,空气管理系统气源生成、

表2 空气管理系统主要利益攸关者

Table 2 Major stakeholders in air management systems

类型	利益攸关者	优先级
SH1. 客户	SH1.1. 主机单位	主要
	SH1.2. 驾驶员	次要
	SH1.3. 乘务人员	次要
	SH1.4. 乘客	次要
SH2. 运营保障	SH2.1. 地勤人员	主要
	SH2.2. 维修人员	主要
	SH2.3. 签派人员	主要
SH3. 投资方	SH3.1. 政府	主要
	SH3.2. 企业/集团	主要
SH4. 供应商	SH4.1. 设计供应商	主要
	SH4.2. 制造供应商	主要
	SH4.3. 试验供应商	主要
	SH4.4. 服务供应商	主要
SH5. 监督方	SH5.1. 适航	主要
	SH5.2. 环保	主要
	SH5.3. 安监	主要
SH6. 制造单位	SH6.1. 工艺	主要
	SH6.2. 制造	主要
	SH6.3. 客服	次要
	SH6.4. 供应链	主要
	SH6.5. 质量	主要
SH7. 竞争者	SH7.1. 直接竞争者	主要
	SH7.2. 间接竞争者	次要
SH8. 交互系统供应商	SH8.1. 发动机供应商	主要
	SH8.2. 航电系统供应商	主要
	SH8.3. 电源系统供应商	主要

表3 利益攸关者需求

Table 3 Stakeholder needs

需求编号	需求	利益攸关者
StR-001	可以选择从发动机或APU引气	SH1.1. 主机单位
StR-002	预调节引气压力和温度	SH1.1. 主机单位
StR-003	对引气进行分配管理, 为制冷系统、燃油箱惰化系统、防冰系统和供水系统提供压缩空气	SH1.1. 主机单位
StR-004	控制驾驶舱和客舱温度	SH1.1. 主机单位
StR-005	驾驶舱、客舱、盥洗室、货舱及电子设备舱通风	SH1.1. 主机单位
StR-006	为座舱内人员提供足够、洁净的干燥新鲜空气	SH5.1. 适航
StR-007	为座舱提供足够的增压空气	SH5.1. 适航
StR-008	防止机翼前缘产生结冰	SH5.1. 适航
StR-009	为机上人员提供氧气	SH5.1. 适航

表4 系统需求列表

Table 4 System requirements list

需求编号	需求内容	需求来源
SR-001	可以选择从发动机或APU引气	StR-001
SR-002	预调节引气压力和温度	StR-002
SR-003	对引气进行分配管理, 为空调系统、燃油箱惰化系统、除冰系统和供水系统提供压缩空气	StR-003
SR-004	控制驾驶舱和客舱温度	StR-004
SR-005	驾驶舱、客舱、盥洗室、货舱及电子设备舱通风	StR-005
SR-006	为座舱内人员提供足够、洁净的干燥新鲜空气	StR-006
SR-007	为座舱提供足够的增压空气	StR-007
SR-008	防止机翼前缘产生结冰	StR-008
SR-009	为机上人员提供氧气	StR-009

表5 空气管理系统功能列表

Table 5 Air management system function list

需求编号	需求内容	功能编号	功能描述
SR-001	可以选择从发动机或APU引气	F01	气源生成
SR-002	预调节引气压力和温度		
SR-003	对引气进行分配管理, 为空调系统、燃油箱惰化系统、除冰系统和供水系统提供压缩空气		
SR-004	控制驾驶舱和客舱温度	F02	温度调节
SR-005	驾驶舱、客舱、盥洗室、货舱及电子设备舱通风	F03	空气分配
SR-006	为座舱内人员提供足够、洁净的干燥新鲜空气		
SR-007	为座舱提供足够的增压空气	F04	座舱增压
SR-008	防止结冰气象下机翼产生结冰	F05	结冰防护
SR-009	为机上人员提供氧气	F06	氧气供给

温度调节、空气分配、座舱增压、结冰防护、氧气供给等功能分别由气源子系统、制冷子系统、空气分配子系统、座舱压调子系统、机翼防冰子系统、氧气子系统等逻辑实体进行实现, 由此可确定空气管理系统初步架构。

3.4 需求验证

需求验证是根据需求开发流程中制定的需求验收策略进行验证的过程。按照部件、子系统、系统等逐层自下而上开展验证。表7为根据适航符合性验证方法确定的空气管理系统需求验证列表。其中, MC0为符合性声明;

表6 空气管理系统逻辑实体分析

Table 6 Logical entity analysis of air management system

需求编号	需求内容	功能编号	功能描述	逻辑实体
SR-001	可以选择从发动机或APU引气	F01	气源生成	气源子系统
SR-002	预调节引气压力和温度			
SR-003	对引气进行分配管理,为空调系统、燃油箱惰化系统、除冰系统和水系统提供压缩空气			
SR-004	控制驾驶舱和客舱温度	F02	温度调节	制冷子系统
SR-005	驾驶舱、客舱、盥洗室、货舱及电子设备舱通风	F03	空气分配	空气分配子系统
SR-006	为座舱内人员提供足够、洁净的干燥新鲜空气			
SR-007	为座舱提供足够的增压空气	F04	座舱增压	座舱压调子系统
SR-008	防止结冰气象下机翼产生积冰	F05	结冰防护	机翼防冰子系统
SR-009	为机上人员提供氧气	F06	氧气供给	氧气子系统

MC1 为说明性文件;MC2 分析/计算;MC3 安全性评估;MC4 试验室试验;MC5 地面试验;MC6 试飞;MC7 航空器检查;MC8 模拟器试验;MC9 设备鉴定。

4 结论

本文介绍了需求工程的基本概念、应用方法及其在机载系统中的应用案例。通过系统工程、产品生命周期等维度对需求工程理论方法在机载系统研发过程中的应用展开了论述,针对需求工程的应用方法进行了推演。通过应用方法研究可提升我国机载系统乃至飞机的研发效率和水平,为机载系统供应商开展由需求工程串联的正向研发提供方法指引。

AST

参考文献

- [1] SAE ARP4754A Guidelines for development of civil aircraft and system [S]. 2010.
- [2] 张新国. 系统工程手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
Zhang Xinguo. System engineering manual [M]. Beijing, China: Machinery Press, 2013. (in Chinese)

表7 空气管理系统需求验证

Table 7 Requirement verification of air management system

需求编号	需求内容	验证方法
SR-001	可以选择从发动机或APU引气	MC1, MC2, MC4
SR-002	预调节引气压力和温度	MC2, MC4, MC5, MC6
SR-003	对引气进行分配管理,为空调系统,燃油箱惰化系统,除冰系统和水系统提供压缩空气	MC1, MC2
SR-004	控制驾驶舱和客舱温度	MC2, MC4
SR-005	驾驶舱、客舱、盥洗室、货舱及电子设备舱通风	MC2, MC4, MC5, MC6
SR-006	为座舱内人员提供足够的、洁净的干燥新鲜空气	MC2, MC4, MC5, MC6
SR-007	为座舱提供足够的增压空气	MC2, MC4, MC5, MC6
SR-008	防止机翼前缘产生积冰	MC2, MC4, MC5, MC6
SR-009	为机上人员提供氧气	MC2, MC4

- [3] 邓智亮. 需求工程在民用飞机全寿命周期项目管理中的应用概述[J]. 科技视界, 2015(26): 257-274.

Deng Zhiliang. Application of requirement engineering in life cycle project management of civil aircraft [J]. Science & Technology Vision, 2015(26): 257-274. (in Chinese)

- [4] 周璇. 民用飞机需求变更管理研究[J]. 航空科学技术, 2018(10): 70-73.

Zhou Xuan. Research on the management of civil aircraft demand change[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018(10): 70-73. (in Chinese)

- [5] 冯青霞. 民用飞机构型管理过程与SAE ARP 4754A的符合性技术研究[J]. 航空科学技术, 2018, 28(9): 1-4.

Feng Qingxia. Study on the compliance technology between civil aircraft configuration management process and SAE ARP 4754A[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 28(9): 1-4. (in Chinese)

(责任编辑 陈东晓)

作者简介

沈腾(1982-)男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 民机研制项目前期论证、能力规划、固定资产投资项目论证以及民机工程实现论证。

Tel: 010-57827624

E-mail: 9810472@qq.com

孟繁鑫(1983—)男,博士,高级工程师。主要研究方向:飞行器环境控制系统。

Tel:025-51819410

E-mail: sunsky170@163.com

张浩驰(1984—)男,硕士,高级工程师。主要研究方向:项目管理、民机综合论证、产业及能力规划。

Tel:010-57827169

E-mail: 15001133380@163.com

Application Research of Requirement Engineering Method in Airborne System Development

Shen Teng^{1,*}, Meng Fanxin², Zhang Haochi¹

1. Aviation Industry Development Research Center of China, Beijing 100029, China

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration, Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems, Nanjing 211106, China

Abstract: By expatiating on the theory and method of requirement engineering, this paper discusses the application research of requirement engineering method theory in the process of airborne system research and development. Combining with the V model process of MBSE, this paper illustrates how each stage of aviation product development corresponds to the requirement engineering, and describes how to realize the requirement engineering in the forward development process of complex aviation system combined with ARP 4754A. This paper focuses on the analysis of how to apply the technical process of requirements engineering, namely, requirements development, to carry out requirements capture—requirements analysis—requirements distribution—requirements verification in the process of airborne system research and development, so as to improve the research and development efficiency and product quality. The development of air management system is taken as an example to demonstrate the demand development process in the system development process.

Key Words: requirement engineering; requirement development; airborne system research and development; system engineering

Received: 2019-10-10; Revised: 2019-10-25; Accepted: 2019-11-11

*Corresponding author. Tel. : 010-57827624 E-mail: 9810472@qq.com