

基于元模型的需求定义方法研究

李亚青, 李 佳, 孙树森, 宁伟航, 郭广鑫

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 在复杂系统或产品的研制过程中, 高质量的需求或需求模型是实现设计要求或设计指标进行准确描述、多层次传递、基于模型开展评审与管理的重要基础; 如何提升需求质量是工业领域尤其是以航空航天为代表的高端制造行业关注的重点问题之一; 针对需求的质量提升, 通过元模型建模方法应用, 构建需求元模型, 明确需求元模型组成、关系及内涵; 提出一种基于元模型的需求定义方法, 通过需求元模型的实例化应用实现需求模型的规范定义, 以满足需求完整性、无歧义性等特征要求, 有效降低复杂系统或产品设计团队对于需求模型定义的难度; 基于元模型的需求定义方法为需求或需求模型的质量提升提供可行的实践方法, 为复杂系统模型可扩展性应用及模型复用性提升提供了思路。

关键词: 元模型; 需求定义; 需求模型; MBSE; 需求质量

Research on Requirement Definition Methods Based on Meta-model

LI Yaqing, LI Jia, SUN Shusen, NING Weihang, GUO Guangxin

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: In the development process of complex systems and products, high-quality requirements or requirement models are essential foundation for accurate description of design requirements and design indicators, multi-level transmission, and model-based review and management. How to improve the quality of requirements is one of the key issues of concern in the industrial field, especially in high-end manufacturing industries represented by aerospace. To enhance the quality of requirements, a meta-modeling method is applied to construct a requirement meta-model, and clarify the composition, relationships, and content of the requirement meta-model. A requirement definition method based on the meta-model is proposed, which realizes the standardized definition of the requirement model through the application of the requirement meta-model instances, meeting the characteristic requirements of requirement completeness and unambiguity, and effectively reducing the difficulty of complex system or product design teams on defining requirement models. The requirement definition method based on the meta-model provides a feasible practical approach for improving the quality of requirements or requirement models. It also offers ideas for enhancing the extensibility of complex system models and improving the reusability of models.

Keywords: meta-model; requirement definition; requirement model; MBSE; requirement quality

0 引言

随着基于模型的系统工程在航空航天等高端制造行业的逐步推广应用, 研发技术团队对于复杂系统中需求开发与需求定义的重视程度逐步提升。高质量的需求或需求模型是实现设计要求或设计指标进行准确描述、多层次传递、基于模型开展评审与管理的重要基础。本文提出一种基于元模型的需求定义方法, 详细定义了需求元模型组成、关系及内涵, 并通过元模型应用实现需求模型的规范定义, 以满足需求完整性、无歧义性等特征要求, 为提升需求或需求模型质量提供了可行的实践方法。

1 研究现状

1.1 复杂系统需求开发过程

当前, 以航空航天为代表的高端制造业正广泛推广

和应用基于模型的系统工程, 针对复杂系统或产品的研发与设计, 在开展详细设计之前引入需求开发流程, 对系统的问题域和解决方案域进行详细划分与定义描述。其中, 问题域主要回答系统要做什么、解决什么问题, 通过识别与系统运行相关的利益攸关者, 并对利益攸关者模糊的期望和目标进行准确描述, 加强对问题本质的理解, 并达成团队成员的共识; 解决方案域则进一步明确系统如何做, 并找到最有效的方案以解决特定问题域中的问题, 以利益攸关者需求作为输入, 扩展到解决方案的范围, 并形成详细定义的可支持工程实践的系统需求。

美国国家航空航天局 (NASA) 在系统工程手册中明确提出系统设计流程中包含利益攸关者需求开发流程和技术需求开发流程, 通过相关活动反复迭代、交互形成满足利

收稿日期: 2024-07-17; 修回日期: 2024-08-28。

作者简介: 李亚青(1992-), 女, 硕士研究生, 工程师。

引用格式: 李亚青, 李 佳, 孙树森, 等. 基于元模型的需求定义方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 302-307.

益攸关者期望且能指导系统详细设计的需求集^[1]。国内高端制造企业将需求开发流程定义为需求捕获、需求分析、需求定义及需求确认 4 个部分^[2]。

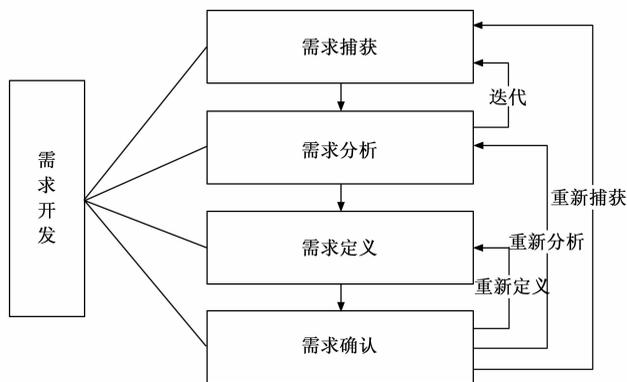


图 1 需求开发流程

针对复杂系统的方案域与解决问题域, 分别通过需求开发流程实现利益攸关者需求和系统需求的详细定义。在需求捕获过程中, 通过确定复杂系统或产品的应用范围及目标, 对系统用户等相关方及类似系统或产品的研发经验进行调研分析, 开展初步的系统运行分析, 识别并捕获初始需求; 在需求分析过程中, 对初始需求进行细化, 通过开展对系统运行场景的行为活动建模, 将初步的、概括的需求细化为多个详细需求^[2], 同时也可以对需求类型进行分类, 明确需求的优先级等; 在需求定义过程中, 主要是对需求分析过程中识别的需求进行准确描述, 需求定义过程决定了对需求分析、需求识别结果的准确表达程度; 在需求确认过程中, 对需求模型进行评审, 对需求的一致性、可验证性、可追溯性进行确认。

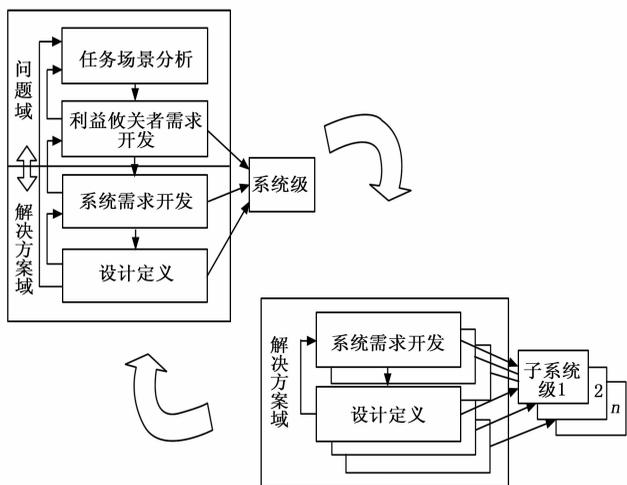


图 2 问题域与解决方案域需求开发

1.2 需求定义质量的重要性

需求质量是需求开发领域关注的重点工作, 需求捕获

与需求分析主要决定了能否识别出复杂系统的全部需求, 需求定义则决定了能否通过自然语言对需求开发过程中识别出的结果进行准确定义, 需求定义的质量直接决定了需求开发过程的成效。同时, 需求定义质量也直接影响复杂系统的设计要求自顶向下进行有效分解及组件产品由下至上实现集成交付的效果。

大量研究表明, 清晰、准确、完整的需求定义是复杂系统设计开发关键环节, 有缺陷的需求是导致项目出现问题, 造成能力缺失、成本超支、进度延迟的最大原因, 且由需求定义在系统或产品研发早期引入的错误一般在系统建设全生命周期的后期测试阶段才能识别, 对复杂系统或产品的实现有重要影响, 提升需求定义质量可以有效避免由于需求不完整, 需求歧义等问题引入的故障与错误。

随着系统复杂程度的提升, 涉及需求开发过程的工程师也逐渐增多, 需求定义目前还存在很多问题与挑战, 例如需求的不明确、不完整, 需求定义存在歧义, 不同工程师对于需求表达的不一致, 需求冲突, 需求变更频繁等等。提升需求质量将有效降低需求缺陷, 满足高质量需求特征要求, 进而提升复杂系统或产品的整体研制进度。需求缺陷对成本的影响可能会达到 10%、20%, 甚至更多, 对于提升需求质量本身产生的成本则远远低于需求缺陷对成本的影响, 一般仅占到整个项目本身的 0.01%~0.8%。

需求定义过程中, 工程师一般通过自然语言对需求进行描述定义, 尤其对于复杂系统或产品, 需求模型或需求条目的数量庞大, 同时对于复杂系统或产品的研制周期往往有严格的要求, 需求集的定义与编写由不同的工程师完成, 受限于工程师使用然语言的习惯, 不同的工程师对于需求定义准确性的理解天然存在差异, 且在时间紧张的情况下, 需求质量提升一直是工程领域的难题。为提升需求定义质量, 形成高质量的需求集, 一般有以下特征要求。

- 1) 正确性: 需求定义描述的内容是正确的, 准确地表达了利益攸关者的期望及系统需要实现满足的功能、性能、约束等。
- 2) 完整性: 需求定义描述的内容无缺失, 包含所有信息, 在单独理解一条需求时无需再参考其他需求或额外的资料。
- 3) 一致性: 需求不能和其他需求产生冲突, 本身的定义也不能不一致或者存在前后矛盾。
- 4) 清晰性: 在不用语义分析情况下, 需求应能够清晰表达。
- 5) 独立性: 单一需求描述或表达单一的事件, 每条需求只包括一个活动者、一个活动和一个活动对象。
- 6) 无歧义性: 一条需求只有一种语义上的解释, 不同的人员对同一条需求的理解应基本相同。
- 7) 可验证性: 需求定义描述的内容可以被验证, 存在

一种方法证明需求在系统或产品中对应的设计方案得到验证和满足。

为满足高质量需求特征要求,针对需求定义的质量提升国内外学者开展了一系列的研究工作。王春晖提出一种用户故事表达需求质量提升方法,并用语法分析等技术进行故事缺陷检测识别,通过完善故事表达提升需求质量^[3]。Alistair Mavin 提出一种 EARS 需求编写方法,总结了方便工程师使用的需求模板,降低需求编写的难度,提升需求的一致性与质量^[4]。郑蓝提出高质量需求检查单,通过需求检查单的满足程度保证需求表达的清晰准确^[5]。孙宝华提出基于 NLP 的软件需求分析评价模型,识别需求的不完备和歧义的程度^[6]。

1.3 元模型研究情况

元模型最初由 OMG 组织提出,作为数据管理规范与分层管理方法用于数据仓库的管理^[7]。随着元模型、元建模技术、领域语言扩展定义等研究内容在复杂系统研制中开展工程应用,元模型逐渐成为工程领域提升模型构建规范性,开展模型复用、拓展异构模型集成传递的研究方向。王暖臣提出了一种基于元模型的本体构建方法,通过对 DM2 的分析构建装备体系领域本体,实现了对装备体系知识的通用化表达^[8]。耿宏提出在虚拟维修环境下分析维修过程,通过提取仿真要素构造维修对象元模型,提出元模型融合下的虚拟维修过程建模方法,降低了模型的复杂程度^[9]。张晓丽应用元模型方法对航空电子系统进行分析,提取其中的建模元素及内在关联,建立了航空电子系统模型,并利用 MDA 技术对模型进行接口转换^[10]。针对多无人平台系统面临的分布式、数量众多、平台异构困难等问题,杨佩提出了任务元模型、逻辑元模型和控制元模型,实现了适应任务变更、物理状态变更、多兵种协同作战和系统功能服务化的柔性重组^[11]。毛媛提出了基于元模型的复杂系统建模方法,将复杂系统分解为多个子系统,并定义了六种元类及元关系,即限定分解后的子系统的属性和关系,通过子系统集成形成复杂系统模型^[12]。

基于元模型的建模方法为复杂系统提升模型可扩展性和模型重用性提供了良好的思路,本文通过将元模型建模技术应用于需求模型构建,通过需求元模型探索提升需求或需求模型质量的实践应用方法。

2 需求元模型构建

元模型表示模型的模型,是一种高度抽象的模型。模型本身就是一种抽象的概念,建模的过程就是通过一定的规则和方法实现对对象的抽象表达,对于同一对象而言,运用不同的规则和方法可以构建不同类型的模型。以真实的物理世界为例,各类型模型(几何模型、动力学模型、行为模型等)都是对真实物理世界中实体对象不同维度的抽象,同样元模型可以作为表达模型结构、内涵及关系规

则的抽象。

元模型一般有四层架构,如图 3 所示, M_0 为物理层, M_1 为模型层, M_1 是对 M_0 的抽象表达,模型是元模型的实例; M_2 为元模型层, M_2 是对 M_1 的抽象表达,元模型是元元模型的实例; M_3 为元元模型层, M_3 是对 M_2 的抽象表达,表示元模型的基础元素等。元的概念是分层的,可以基于已有的建模语言进行元模型定义,实现领域语言快速扩展,无需建立新的元元模型或者新的系统建模语言。



图 3 元模型四层架构

复杂系统或产品通常以结构化文本的形式对需求进行模型化表达,需求模型是需求条目描述的信息扩展,一般还应包含编号及需求属性,通过需求管理工具对需求模型进行统一管理,以便建立需求模型之间的追溯关系并开展需求变更影响性分析。

为建立一种能够支撑需求质量有效提升的方法,借鉴 OMG 组织提出的 MOF (Meta Object Facility) 元对象机制,通过对需求定义本质的分析与研究,按照抽象语法、具体语法再到语义模型的方式,通过建模语言元模型类型的扩展构建需求元模型,明确需求的元模型要素,需求模型之间的关系等,以支撑需求的规范性定义,并满足需求特征要求,提升需求质量。需求元模型如图 4 所示。

需求的元模型要素主要包括需求标识、需求描述、需求属性和需求关系。

2.1 需求标识

需求标识应包含需求的编号及名称。对于复杂系统或产品,一般以需求作为复杂系统开展设计的输入,需求模型的量级往往较大。每一条需求应明确定义需求标识,其中编号作为需求集中的唯一标识并能按照企业或项目团队内的要求体现一定的分类特征;名称可以作为需求内容主旨的归纳。

2.2 需求描述

需求描述为需求模型的核心元素,对复杂系统的运行场景、功能特性、设计特征、行为约束等进行详细描述说明,且描述表达应满足正确、完整、一致、无歧义、可验证等需求特征要求。对于需求描述,可进一步划分为描述对象、条件、动作、动作对象、动作细化、动作约束等子要素。

其中描述对象主要为需求定义的本体,一般为系统、

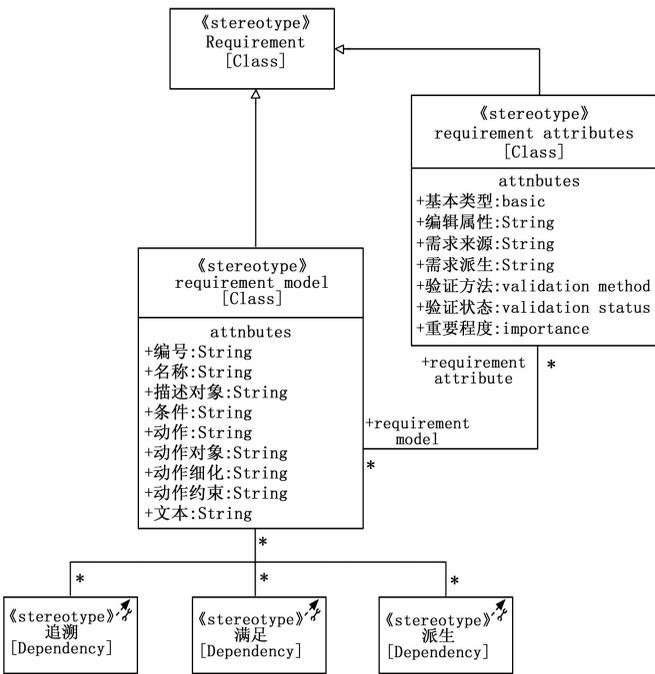


图 4 需求元模型

利益攸关者或者需求定义的主语；条件表示描述对象在一定的约束条件或者是运行条件下，是主语的补充说明；动作表示描述对象具备的某种功能或者是执行的动作；动作对象表示动作作用的主体；动作细化表示执行某种动作的性能属性或者是具备某种功能达到的程度，是对动作的进一步细化；动作约束表示执行某种动作或具备某种功能的约束条件，是对动作的约束。

2.3 需求属性

需求属性是需求模型分类及状态的补充说明，使单一需求模型关联必需的属性信息，在需求管理过程中基于属性标签实现过滤或排序。需求属性又可以划分为基本类型、编辑属性、需求来源、需求派生、验证方法、验证状态、重要程度等子要素。

其中基本类型表示需求模型的基本分类，一般有功能、性能、通用性、环境、接口、约束、其他等；编辑属性表示需求编写定义的基础信息，一般有编辑人，编辑时间，修改人及修改时间等；需求来源与需求派生表示需求本身的上下游之间的关联关系，在需求发生变更时，可快速进行需求追溯及需求变更影响性分析等需求管理活动；验证方法表示对需求可验证性的说明，通过已定义的具体方式可以验证需求的满足程度，一般有仿真分析、系统测试、试验验证等；验证状态是需求当前技术状态的说明，一般有待验证、已验证通过、验证未通过等；重要程度表示需求的优先级，一般有关键、重要、一般、可选等。

2.4 需求关系

需求关系是需求模型之间关系的统一定义，属于领域

语言扩展，为可选的元模型要素，在需求模型中可以通过添加属性的方式进行补充。在需求图模型或者需求表模型中，可以增加需求关系元素以直观展示需求之间的各类型关系，一般可以划分为追溯关系、派生关系、满足关系等子要素。

3 基于元模型的需求定义应用

按照需求元模型的定义，构建可复用可扩展的模型元素 <<requirement model>>，在系统建模工具中可实现模型元素的一致性应用，通过补充具体的信息实例化 <<requirement model>>，即可构建高质量的、符合需求特征要求的需求模型。

3.1 需求标识

开展基于元模型的需求定义应用时，首先需要确定需求标识，需求标识应按照不同高端制造企业业务的规则进行设计，在设计过程中需要能够体现需求的基本类型、需求所处的层级结构等信息。

具体规则如图 5 所示，第一级代码通过 StR 和 SR 区分利益攸关者需求和系统需求；第二级代码可以按照需求基本类型的大写首字母实现类型区分，例如 F 表示功能需求，P 表示性能需求等；第三级至第五级代码按照复杂系统或产品的系统、子系统、组件分别表示需求所处的不同层级；第六级代码表示需求模型的顺序码。

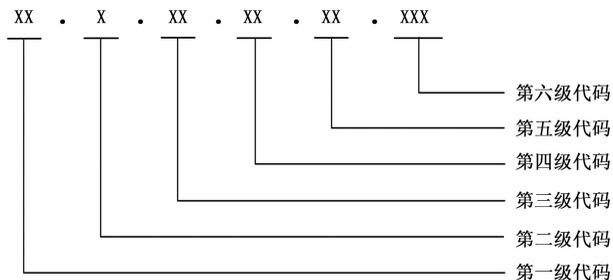


图 5 需求编码规则

例如某飞机起落架的需求“起落架在飞机着陆过程中应能吸收震动载荷”，起落架是飞机系统中的重要子系统，需求编号可以定义为 SR.F.01.06.00.002。

其中，SR 表示为系统需求；F 表示为需求模型的基本属性为功能类需求；01 表示所属总体层级；06 表示起落架为飞机系统中编号为 6 的子系统；00 表示尚未分解或分配为组件级需求，为子系统级需求；002 表示起落架系统所属分类下的第 2 条需求。

3.2 需求描述

需求描述是需求的核心内容，决定了需求定义的准确程度和需求质量，按照需求元模型的定义，需求描述包括描述对象、条件、动作、动作对象、动作细化、动作约束等。

示例 1:

某飞机级系统需求的初始状态为:飞机应具备调节温度功能。按照需求元模型的定义,需求模型可分解如下:

描述对象为<飞机>;

动作为<应具备>;

动作对象<调节温度功能>;

需求描述缺少条件、动作细化及动作约束,经过补充完善,条件为<启动后>,动作细化为<在飞机客舱和驾驶舱内>,动作约束为<温度范围 20~30 摄氏度>,该飞机级需求可以定义为:飞机在启动后应具备在飞机客舱和驾驶舱内调节温度功能,温度可调节范围为 20~30 摄氏度。补充需求标识和需求属性后,元模型应用示例如图 6 所示。

«requirement models» 调节温度	
文本 = "飞机在启动后应具备在飞机客舱和驾驶舱内调节温度功能, 温度可调节范围为20-30摄氏度" 编号 = "SR.F.01.00.00.108"	
«requirement attributes»	
基本类型 = 功能 编辑属性 = "创建人XX; 创建时间XX.XX" 重要程度 = 重要 需求来源 = "利益攸关者" 需求派生 = "分配" 验证方法 = 系统测试 验证状态 = 待验证	
«requirement models»	
动作 = "应具备" 动作对象 = "调节温度的功能" 动作约束 = "温度范围20-30摄氏度" 动作细化 = "在飞机客舱和驾驶舱内" 描述对象 = "飞机" 条件 = "启动后"	

图 6 元模型应用示例 1

示例 2:

某航天器子系统级需求的初始状态为:控制系统应能控制航天器姿态。按照需求元模型的定义,需求模型可分解如下:

描述对象为<控制系统>;

动作为<应能控制>;

动作对象<航天器姿态>。

需求描述缺少条件、动作细化及动作约束,经过补充完善,条件为<在点火后>,动作细化为<实现转弯>,动作约束为<根据设计要求>,该航天器子系统需求可以定义为:控制系统在点火后应能根据设计要求控制航天器姿态实现转弯飞行。补充需求标识和需求属性后,元模型应用示例如图 7 所示。

示例 3:

某飞机子系统级需求的初始状态为:刹车系统应能为机轮提供防滑保护。按照需求元模型的定义,需求模型可分解如下:

描述对象为<刹车系统>;

动作为<应能提供>;

动作对象<防滑保护>;

动作细化为<为机轮>;

«requirement models» 姿态控制	
文本 = "控制系统在点火后应能根据设计要求控制航天器姿态实现转弯飞行" 编号 = "SR.F.01.03.00.017"	
«requirement attributes»	
基本类型 = 功能 编辑属性 = "创建人XX; 创建时间XX.XX" 重要程度 = 关键 需求来源 = "航天器系统" 需求派生 = "分配" 验证方法 = 系统测试 验证状态 = 待验证	
«requirement models»	
动作 = "应能控制" 动作对象 = "航天器姿态" 动作约束 = "根据设计要求" 动作细化 = "实现转弯" 描述对象 = "控制系统" 条件 = "在点火后"	

图 7 元模型应用示例 2

需求描述缺少条件及动作约束,且动作细化描述不清晰存在歧义,经过补充完善,条件为<在飞机着陆过程中>,动作细化为<为每个机轮>,动作约束为<独立的>,该飞机子系统需求可以定义为:刹车系统在飞机着陆过程中应能为每个机轮提供单独的防滑保护。补充需求标识和需求属性后,元模型应用示例如图 8 所示。

«requirement models» 防滑保护	
文本 = "刹车系统在飞机着陆过程中应能为每个机轮提供单独的防滑保护" 编号 = "SR.F.01.06.00.003"	
«requirement attributes»	
基本类型 = 功能 编辑属性 = "创建人XX; 创建时间XX.XX" 重要程度 = 重要 需求来源 = "飞机系统" 需求派生 = "分解" 验证方法 = 系统测试 验证状态 = 已通过	
«requirement models»	
动作 = "应能提供" 动作对象 = "防滑保护" 动作约束 = "独立的" 动作细化 = "为每个机轮" 描述对象 = "刹车系统" 条件 = "在飞机着陆过程中"	

图 8 元模型应用示例 3

3.3 需求属性

需求属性是需求模型分类及状态的补充说明,在应用过程中,可以按照枚举进行设计,模型构建过程中可以在统一的范围内进行定义,以提升需求属性的规范性及质量。针对 3 个示例中的需求,需求属性如表 1~3 所示。

表 1 示例 1 需求属性应用

需求:飞机在启动后应具备在飞机客舱和驾驶舱内调节温度功能,温度可调节范围为 20~30 摄氏度。		
需求属性	基本类型	功能
	编辑属性	创建人 XX;创建时间 XX
	需求来源	利益攸关者
	需求派生	分配
	验证方法	系统测试
	验证状态	待验证
重要程度	重要	

表 2 示例 2 需求属性应用

需求: 控制系统在点火后应根据设计要求控制航天器姿态实现转弯飞行。

需求属性	基本类型	功能
	编辑属性	创建人 XX; 创建时间 XX
	需求来源	航天器系统
	需求派生	分配
	验证方法	系统测试
	验证状态	待验证
	重要程度	关键

表 3 示例 3 需求属性应用

需求: 刹车系统在飞机着陆过程中应能为每个机轮提供单独的防滑保护。

需求属性	基本类型	功能
	编辑属性	创建人 XX; 创建时间 XX
	需求来源	飞机系统
	需求派生	分解
	验证方法	系统测试
	验证状态	已验证通过
	重要程度	重要

4 结束语

本文提出一种基于元模型的需求定义方法, 构建需求元模型, 明确需求元模型组成及内涵, 对需求标识、需求描述、需求属性和需求关系 4 类核心元模型要素进行详细定义。需求元模型实现模型的规范化领域扩展, 通过对需求元模型实例化应用, 有效降低复杂系统或产品设计团队对需求模型编写定义的难度, 实现需求模型的规范定义, 有效提升需求模型的质量。同时, 需求元模型具备良好的可扩展性和复用性, 可以根据情况进行模型扩展, 新扩展的模型也具备较好的复用能力。未来, 随着需求模型在复杂系统或产品研制过程中的全面应用, 需求元模型也将为需求模型的智能化快速生成和行业领域的定制应用建立良好的基础。

参考文献:

- [1] 朱一凡. NASA 系统工程手册 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [2] 吴 讯, 马 媛. 复杂软件需求开发方法研究 [J]. 微计算机信息, 2011, 27 (11): 3-5.
- [3] 王春晖, 金 芝, 赵海燕, 等. 一种用户故事需求质量提升方法 [J]. 计算机研究与发展, 2021, 58 (4): 731-748.
- [4] MAVIN A, WILKINSON P, HARWOOD A, et al. Easy approach to requirements syntax (EARS) [C] // Atlanta: 2009 17th IEEE International Requirements Engineering Conference, IEEE, 2009: 317-322.
- [5] 郑 蓝. 需求编写准则探究 [J]. 科技创新导报, 2015, 12 (16): 85-86.

- [6] 孙宝华 胡 楠, 李东洋. 基于神经网络和 NLP 的软件需求安全分析研究 [J]. 计算机科学, 2019, 46 (s1): 348-352.
- [7] 李燕娜. 基于元模型的空战仿真系统研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [8] 王暖臣, 王小龙, 穆 歌, 等. 基于元模型的装备体系知识图谱构建 [J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46 (7): 2374-2382.
- [9] 耿 宏, 王晨飞, 钱文高. 基于元模型融合的飞机虚拟维修过程模型优化 [J]. 火力与指挥控制, 2023, 48 (9): 92-98.
- [10] 张晓丽, 彭 寒. 基于特定领域建模的综合航电分区级元模型研究 [J]. 计算技术与自动化, 2019, 38 (1): 136-138.
- [11] 杨 佩, 毛 可, 王慧平, 等. 基于元模型的无人平台系统柔性体系结构设计初探 [C] // 北京: 2013 第一届中国指挥控制大会论文集, 2013: 633-638.
- [12] 毛 媛, 刘 杰, 李伯虎. 基于元模型的复杂系统建模方法研究 [J]. 系统仿真学报, 2002 (4): 411-414.
- [13] DA SILVA, ALBERTO RODRIGUES. Linguistic patterns, styles, and guidelines for writing requirements specifications: focus on use cases and scenarios [J]. IEEE Access, 2021, 9: 143506-143530.
- [14] ANJUM R, AZAM F, ANWAR M W, et al. A meta-model to automatically generate evolutionary prototypes from software requirements [C] // Bangkok: Proceedings of the 7th International Conference on Computer and Communications Management, 2019: 131-136.
- [15] 沈伟业. 基于元模型的 C4ISR 系统需求建模描述方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2024.
- [16] 谢慧慈, 饶明波, 汪 琦, 等. 基于 ARP4754A 需求过程的飞机系统设计研究 [J]. 教练机, 2023 (1): 57-60.
- [17] 洪雄亮, 刘 颖, 张玉明, 等. 基于模型的民机试飞需求定义流程标准化研究 [J]. 航空标准化与质量, 2023 (4): 9-14.
- [18] 张 越, 李明浩, 张培臣, 等. 基于元模型的一体化联合靶场体系结构设计 [C] // 珠海: 第三届体系工程学术会议论文集, 2021: 362-370.
- [19] 包天舒. 基于模型的需求文档自动生成研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- [20] 李春洪, 吴 柱, 赵晓东. 基于元模型订单的联合作战仿真协同建模机制 [J]. 指挥信息系统与技术, 2024, 15 (1): 29-34.
- [21] 王国强, 陈宇轩, 马滢滢, 等. 多无人机协同空战任务规划仿真系统 [J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44 (9): 1-10.
- [22] 孙连山, 王今雨. 非功能需求的结构化定义以及概念性追踪管理框架 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29 (12): 4598-4603.
- [23] 李 民, 郝 莲. 民用飞机生产体系需求定义过程研究 [J]. 民用飞机设计与研究, 2020 (3): 127-132.
- [24] 高 明, 李 明, 陈庆贵. 基于系统工程 V 模型的航空发动机正向设计方法 [J]. 海军航空大学学报, 2023, 38 (3): 294-300.