基于对象的航天器需求工程建设初探

张利强 王嘉春 谢 政 袁 义 苏传国 刘 霞
（北京空间飞行器总体设计部，北京 100094）

摘要：介绍了需求工程的研究内容；针对传统基于文档的需求工程的缺陷与不足，提出并阐述了开展基于对象需求工程建设的必要性；根据航天器研制的特点，研究提出了基于对象的航天器需求工程建设体系结构；围绕体系结构重点研究需求描述方法和需求应用验证过程，结合某航天器基于对象的需求管理验证了基于对象的航天器需求工程思想的可行性和适用性，通过对象化管理需求和关联视图，关联矩阵等方式分析关联关系，验证了基于对象的需求工程，提高了需求管理颗粒度，增强了需求关联影响分析能力，为后续开展基于对象的需求工程应用实施提供了理论指导和实践探索。

关键词：航天器；基于对象的需求工程；需求开发；需求管理

Spacecraft Requirements Engineering Building Based on Object

Zhang Liqiang Wang Jiachun Xie Zheng Yuan Yi Su Chuanguo Liu Xia
(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094)

Abstract: Introduce the research content of the requirement engineering. Analyze the limitation and shortage of the requirement engineering based on document, put forward and expatiate the necessity to develop building the requirement based on object. According to the character of the spacecraft research, put forward the architecture of the requirement engineering building based on object. Surround the architecture, importantly research the method of describing requirement and the process of validating the requirement. Combine the requirement management of the spacecraft, validate the feasibility and applicability to develop requirement engineering building based on object. Improve the granularity of requirement management and enhance the analyzing ability of the requirement relationship. Provide theoretical guidance and practical exploration for developing application and implementation of requirement engineering based on object.

Key words: spacecraft; requirement engineering based on object; requirement development; requirement management

1 引言

随着航天器广泛应用服务于军民领域，航天器的用户需求和系统需求等各类需求对航天器成功研制起着越来越重要的作用，需求管理已贯穿整个航天器项目的研发过程，从研制任务书（用户需求）到航天器系统需求、各分系统需求、系统测试、试验大纲、测试案例等环节，每个环节需求的变化都将直接影响着航天器研制的效率和质量。通过国内外企业工程应用实践统计分析，许多项目由于需求问题导致整个项目大量返工、延期、质量不达标，而且在需求阶段节省下来的精力，将以 200 倍的代价花费在返工阶段[1]。

基金项目：国家重大科技专项工程。
作者简介：张利强（1978–），高级工程师，计算机应用技术专业；研究方向：需求工程、系统工程、航天器数字化系统设计与分析。
收稿日期：2015-03-11

由此可见，精细化的需求管控对项目的成败至关重要。因此，有必要从航天器研制的源头抓起，研究完善需求采集、管控、变更影响分析的方式，提升需求管理效率，降低航天器失败风险。

介绍了需求工程的研究内容；对比分析了基于文档的需求工程和基于对象的需求工程，阐述了开展基于对象的需求工程建设的必要性；结合航天器研制的特点，研究提出了基于对象的航天器需求工程建设体系结构，围绕体系结构重点研究需求开发和需求管理方法；以某航天器为应用案例，验证了需求工程理论和方法适用于航天器需求工程建设，并提出深入研究应用基于对象的航天器需求开发和需求管理的合理化建议。

2 需求工程研究内容

需求工程按所研究内容的侧重点可分为需求开发与需求管理，如图 1[2~4]。

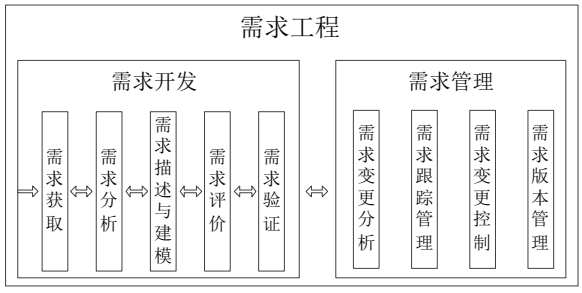

图 1 需求工程研究内容

需求获取是收集信息用以明确用户需求的过程，其结果交付物为用户需求规格说明书；需求分析是围绕需求获取阶段所得的用户需求，系统研发人员和用户共同探讨，对用户需求进行取舍、完善，形成一套双方都认可的需求，建立系统总体框架，并形成整个系统的需求概念模型；需求描述与建模是使用建模工具和相关符号，对所研发的系统需求、功能模块、接口参数、总体框架等内容的图形化、形象化描述，从而形成图文并茂的需求文档；需求评价是选定需求权衡指标，应用相关理论和分析评价工具，按照一定的规则，对需求规格说明中各个需求进行分析、比较、衡量的过程与结果；需求验证是指为确定给定阶段的产品是否满足该阶段开始时强加的条件而评估系统或组件的过程。

需求变更分析是指应用逻辑推理寻找与待变更需求相关联的需求，使用相应的工具手段和方法，多维度验证需求变化时对需求本身、相关联需求以及整个系统的影响，最终形成合理的需求影响分析结果；需求跟踪是指依据待跟踪需求的类型，通过需求跟踪能力矩阵或需求链接图建立需求间的关联关系，跟踪需求，保证在整个需求分解过程中所有需求均有源头；需求变更控制是指对提出需求变更申请、开展变更关联影响分析、执行需求变更、验证变更需求等过程的管控；需求版本管理是指对需求条目、需求条目属性、需求间关联关系、需求文档与可交付产品之间的相互关系等按照一定的版本命名规则进行管理。

3 基于文档和对象的需求工程对比分析

开展需求开发和需求管理的控制元素均以文档形式描述的需求工程为基于文档的需求工程。航天器研制分为总体、分系统和单机产品等层级，各层级基于文档的需求描述、需求评价、需求跟踪、需求变更控制等有着很多的限制，难以及时更改、维护、跟踪用户的需求变化及对系统的影响分析，具体表现在如下几个方面。

a. 需求获取不够准确规范。对航天器研制过程中一些定性、定量指标定义没有统一的标准规范，导致不同的读者依据自己的行业背景和行业知识，理解是不一样的。比如经验丰富的设计师编写设计文档时，可能会隐藏部分经验性、约定俗成的内容，不同的下游设计人员根据自己经验的多少会有不同的理解。航天器总体单位目前对于需求的内容都有存储和管理，但对于需求各方面属性的管理还有些不足，比如对于一篇需求文档，哪些需求的优先级最高，哪些需求经过了评审，哪些需求被下级需求所覆盖，哪些需求由哪个团队、部门、人来负责等等这些内容的管理还有所欠缺。尚未开展总体设计对用户需求的覆盖分析，分系统对总体设计覆盖性分析。

b. 需求关联关系描述不够全面，变更影响分析不够及时准确。航天器总体单位针对每一个航天器都产生大量的需求文档，虽然在不同的文档中存在着一定的逻辑关系，但这些关系并没有被明确地、显性地管理起来，以至于在根据需求进行向上或者向下的追踪时，难以找到确切的依据，需求追踪费时费力，还容易漏掉需求。需求变更，尤其是顶层的需求变更，影响的范围会比较广，比如性能指标要求变更会影响系统需求、设计等相关内容，不能及时地反馈到分系统

或单机产品，同时下游的变更不能精细化地反馈到上游或同级单机产品及分系统上。

c. 需求变更控制不够严密。技术指标和需求在航天器研制的过程中不可避免地会发生变更，这些变更如果不加以有效的控制，往往导致技术指标要求与实际产品之间的不一致，最终导致项目验收延期。而目前基于文档的变更申请比较粗放，难以控制、审核详细变更参数或对象，存在对微小变更不履行审批流程，设计师直接修改的现象。

基于对象的需求工程是将需求条目化，每条需求为一个可控需求对象，需求开发和需求管理的控制元素均为对象需求。基于对象的需求工程主要研究对象化需求开发标准规范、对象化需求分析方法（需求跟踪分析、需求影响分析等）、对象需求的变更控制机制等，实现航天器研制过程中的用户需求、航天器总体/各分系统/单机产品的技术要求、航天器总体/各分系统/单机产品的测试大纲、航天器总体/各分系统/单机产品的测试覆盖性分析报告、航天器总体/分系统各类设计建造标准规范等各类需求的条目化，建立需求对象间的链接关系，实现基于需求对象的各类报告的自动生成。

基于文档的需求工程与基于对象的需求工程相比较，基于对象的需求工程提高了需求描述的准确度，更加规范和精细化了需求管理过程，通过需求分析和管理工具可以提高各类需求的梳理采集、需求关联影响分析、需求变更管理的能力，提升用户需求管理颗粒度，降低需求分析描述冗余度，提升总体和各分系统需求协调能力，增强航天器需求跟踪分析能力。

4 基于对象的航天器需求工程建设研究

4.1 基于对象的航天器需求工程体系结构

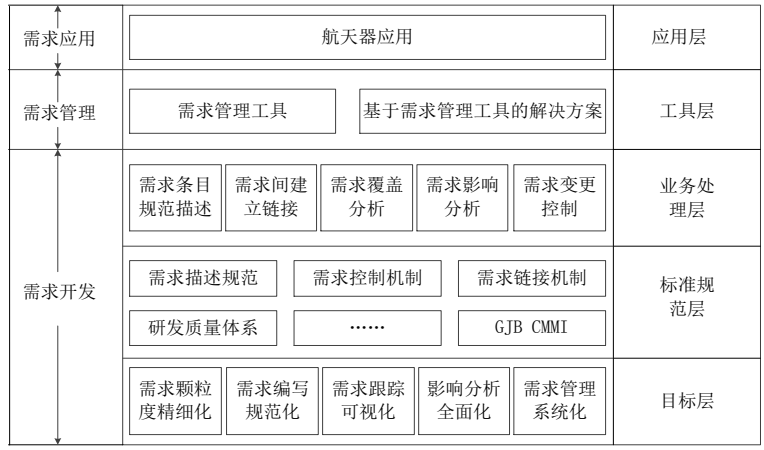

图 2 基于对象的需求工程体系结构

基于对象的航天器需求工程建设的总体结构可分为 5 层，如图 2 所示，分别为目标层、标准规范层、业务处理层、工具层及应用层。

目标层是开展航天器需求工程建设的最终目标，也是开展需求工程建设前提，只有明确需求工程建设目标方可围绕目标开展需求工程建设的研究、开发、应用实施。航天器需求工程建设的目标就是将需求按条目对象精细化分解，需求按照规范的语法语义描述，将需求间的关系可视化，便于跟踪需求间的逻辑关系，实现需求影响分析，以及系统化的全面管控。

标准规范层主要制定收集需求工程建设的质量标准体系、需求描述规范、需求变更控制机制等标准规范，指导需求工程建设和验证各类需求的可行性。例如，每条航天器需求需要满足航天器研制的质量标准，每条需求需要满足航天器设计建造标准规范等。

业务处理层主要实现需求的规范化描述，按照业务逻辑建立需求条目间的关联关系，支持上层需求是否被下层需求完全覆盖的分析工作，以及每条需求变化对其他需求影响的分析工作，研究实现需求变更控制的方法和流程。

工具层主要研究实现对条目化需求的管理和需求间链接关系的软件工具化管理，针对行业特点，需要结合所选需求管理工具软件制定、实施具体的需求管理解决方案。

应用层主要以其他各层为基础，开展航天器用户需求、系统需求、分系统需求、单机产品需求、各类测试大纲、测试报告、各类标准规范等的管控。

4.2 基于对象的需求描述

基于对象的需求工程建设的基础是如何将需求进行对象化描述，对象化描述需求的关键是注重需求的描述语言和语法，需求的对象化管理的核心是如何精准地描述需求属性开展精细化管控。针对自然语言描述的对象化需求，需要按照如下规定开展[5]。

4.2.1 对象化需求描述语言

对象化需求需要专用的描述语言来描述，该描述语言有其自身的特点，通过特定的助动词（如，“必须”、“应该”、“可能”等）表达需求的类型和级别，表达需求的功能、性能层级。通常，完整的需求描述应该包含主语、谓语和宾语，主语是涉众或产品或系统，谓语是主要应该具备或执行的动作，宾语是谓语的期望结果。根据主语的不同需求描述方式也不同，如对功能、约束、性能等各类需求描述方式各不相同，详见下文案例。

功能需求的描述

〈主体〉应该能够（在〈运行条件〉下，在〈事件〉的〈性能〉中）具有〈能力〉

a. 约束的描述

〈主体〉不应该破坏〈使用规则〉

b. 性能的描述

〈系统〉将〈功能〉在〈运行条件下〉，不低于〈量〉〈对象〉

针对每条对象化需求需要判断是否满足标准规范或可度量指标，通常所遵循原则有原子性、唯一性、可行性、准确性、可验证性、可追溯性、可维护性、可靠性等。

a. 原子性：每个语句描述一条独立含义的需求；

b. 可行性：在成本和进度限制内，技术实现上是可行的；

c. 唯一性：每条需求语句可以被唯一的标识符所标识；

d. 合法性：是指语法、语义合乎系统的规定；

e. 准确性：每条需求对象描述的语义是精准的，不会让人产生歧义；

f. 可验证性/可测试性：每条语句所描述的需求是可验证的，并且是知道如何开展测试验证；

g. 可追溯性：每条需求双向可追溯到高层需求、使命任务或待研系统的范畴（包括需要、目的、目标、约束）；

h. 可维护性：以可度量、可验证方式规定，需求间的耦合性尽可能弱，便于维护；

i. 可靠性：每条需求需考虑当软硬件出现故障是否存在及能够做出合理快速响应。

4.2.2 需求对象属性

每个需求对象由需求标题和文本构成，为了详实地描述需求对象，需要一些相关的附加信息称为属性。通常除了需求对象的基本属性信息（如创建时间、创建者等）之外，还需要考虑扩展属性，例如，需求验证方法、是否衍生需求、评审状态、优先级、风险等属性信息。这些属性在它的预期功能、性能之外为每个需求建立了一个上下文和背景解释、补充说明。

4.3 基于对象的需求分解、属性设定、链接及应用验证过程

基于对象的需求分解、属性设定、链接及应用验证过程，主要包括需求分解、需求条目属性设定、需求间链接关系建立、变更关联影响分析、需求覆盖性分析等。该过程是循环迭代分析、分解上层需求到下层需求，例如，上层需求（目标、期望、功能、性能等）转换为下层的需求信息；建立上下层需求的链接映射关系，由下层需求覆盖上层需求；开展需求的变更影响、跟踪分析。通过该过程，可以理清航天器研制过程中需求的实现过程，建立分系统-系统-用户多层需求之间链接和覆盖关系，建立测试案例和相应级别需求的验证关系，当系统需求、子系统、单机需求变化时，可根据链接关系开展变更关联影响分析，实现航天器研制过程中各类需求的可追溯性，整个分解及验证过程如图 3 所示。

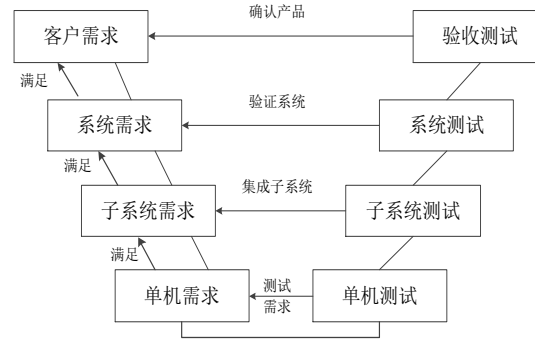

图 3 基于对象的需求分解应用验证过程

航天器需求工程按照用户需求（研制任务书）、航天器系统需求、航天器分系统需求、航天器单机产品需求的层次结构进行分解需求，同时，航天器应用

测试分为单机产品测试、分系统测试、系统测试、验收测试分别验证各级需求的合理性。

需求影响分析用于确定航天器研制过程中系统需求变化时，会如何影响用户需求和分系统需求；分系统需求变化时会如何直接影响系统需求，以及如何间接影响用户需求。如果某条需求变化影响到上下级需求，需要相应的设计人员进行影响分析并制定相应的设计修改方案。

需求追踪分析主要研究下层需求变化时，使用可追踪性可以确定这些下层产品的上层需求是什么。如果无法追溯上层需求，这样的需求可能会增加航天器研制成本。例如，某个单机产品的变更无法追溯相对应的分系统，则该单机产品游离于分系统之外，分系统测试时无法保证分系统的功能和性能，从而增加分系统的研制成本。

需求覆盖分析可以用来确定下层分解的需求是否覆盖了上层，即下层需求的若干组合是否能够完全满足上层需求，同层的测试结果是否能够完全满足系统的需求。

5 案例分析

以某航天器初样阶段的需求管理为例，系统采取用户需求、航天器系统需求、分系统需求的自上而下分解，采取自下向上的策略开展需求的覆盖性分析满足上级需求。航天器系统、分系统需求需要遵循卫星设计和建造标准规范，即需求遵循各类标准规范；通过各分系统需求对系统需求的覆盖性分析来验证分系统满足且覆盖系统需求；系统需求和各分系统需求由其各自的测试大纲和测试案例验证，即通过测试验证需求。其需求分解结构如图 4 所示。

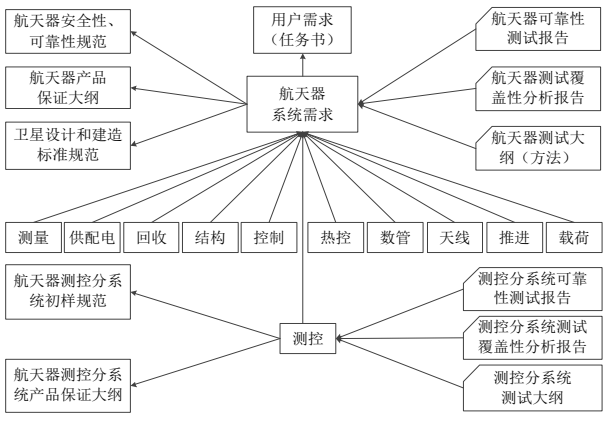

图 4 某航天器需求分解结构

通过需求管理软件 DOORS 系统开展航天器需求工程的建设，实现了需求条目化管理，并对需求条目进行了“是否为需求”、“是否为衍生需求”等属性进行设定，建立了系统需求向用户需求的链接映射关系、分系统需求向系统需求的链接映射关系、分系统需求向标准规范建立的遵循链接关系、测试大纲/报告向分系统/系统建立的测试验证关系等关联关系，定义了需求视图、需求衍生试图、需求关联矩阵等展示需求间关联关系。

通过基于 DOORS 的航天器需求工程建设，验证了航天器需求工程建设体系、基于对象的需求描述、基于对象的需求分解、属性设定、链接及应用验证的可行性和合理性。

6 结束语

通过对比分析传统基于文档的需求工程与基于对象的需求工程，发现传统基于文档的需求工程存在缺陷与不足；通过挖掘基于对象的需求工程的内涵和特点，提出了基于对象的需求工程建设体系结构，结合体系结构探索了需求的描述方法和需要应用验证过程；最后，通过某航天器的应用验证，证实了基于对象的需求工程的合理性和实用性，提高了航天器需求管控能力。

为了深入研究和应用航天器需求工程，未来，需要深入研究需求对象的编写要求、基于对象的需求分析原理方法、需求管控方法、系统功能分析、系统总体架构分析，形成系统的需求模型、功能模型、架构模型，实现基于模型的需求工程，使航天器研制的需求管控更加精细化和规范化，提升航天器研制的效率和质量。

参考文献

1 季建琴，段珅. 基于 DOORS 的民用客机需求管理过程与改进[J]. 科技论坛，2012(23)：347～348

2 余滨，段采宇. 军事需求与军事需求工程[J]. 需求工程，2006，2：37～42

3 秦喆. 军事需求工程基本理论[J]. 指挥信息系统与技术，2011，06，2(3)：1～4

4 张维明，余滨，段采宇. 军事需求的基本概念与内涵[J]. 需求工程，2006. 1：40～45

5 李一凡，李群，杨峰，等译. NASA 系统工程手册[M]. 电子工业出版社，2013，9