



## 论 文

# 迭代模型在空间项目地面系统的应用

张洁, 黄茂海\*

中国科学院国家天文台天文与技术重点实验室, 北京 100012

\* E-mail: mhuang@nao.cas.cn

收稿日期: 2015-12-21; 接受日期: 2016-05-06

中国科学院空间科学先导专项(编号: XDA04080300)资助项目

**摘要** 为了解决传统的瀑布模型面对具有创新性和探索性的空间项目地面应用系统的不适应性问题, 本文采用了基于 RUP 开发方法和分阶段发布策略的迭代模型, 并将此方法应用到中方天文卫星(SVOM)科学应用系统中。通过将系统分成 3 个逐步演变且可以交付使用的系统, 与卫星系统研制流程同步, 实现地面系统在研制阶段的无缝连接和平滑过渡。同时通过对需求管理工作流程的定义, 解决了在原型系统阶段需求识别的一大难题, 使得研制工作更加高效合理, 最大限度地支持卫星各阶段的定标和测试工作, 实现天地同优。

**关键词** 空间科学, 地面系统, 迭代模型, 分阶段发布, RUP 工作流裁剪, Redmine 问题跟踪系统

## 1 引言

随着时代变迁和信息技术的发展, 空间项目地面应用系统呈现出有效载荷种类和数量多、面对的用户最多、用户需求变化最大、运行管理复杂等特点, 地面系统对软件的依赖性越来越大, 软件也逐渐由硬件的附属产品上升为独立的产品。不同于普通的商业软件, 空间项目地面软件要求具有很高的可靠性、可维护性和安全性, 以最大限度地保证飞行任务的顺利执行。因此在软件开发过程中必须采用合理有效地管理进行软件的质量保证活动, 以支持开发人员在规定的时间内, 开发高质量的软件, 满足任务需求。

目前国内空间项目地面系统软件多数采用瀑布模型的管理方式, 面对具有创新性和探索性空间项

目地面系统, 传统的瀑布管理方式显得非常狼狈。本文结合国内空间项目地面系统特有的开发特点, 在现有的大工程总体采用瀑布模型的环境下, 研究如何将灵活多变的迭代开发模型能合理地运用到空间科学项目地面系统中, 使得地面系统的开发过程更加合理和科学。

## 2 迭代模型在空间项目地面系统的应用策略

### 2.1 瀑布模型的应用现状及瓶颈

瀑布模型以项目的阶段评审和文档控制为手段有效地对整个开发过程进行指导, 为项目提供了按阶段划分的检查点。当前一阶段完成后, 开发者只需

**引用格式:** 张洁, 黄茂海. 迭代模型在空间项目地面系统的应用. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 829–835  
Zhang J, Huang M H. The application of iterative model in space project ground system (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 829–835, doi: 10.1360/N092015-00316

要去关注后续阶段。采用瀑布模型可以保证系统在整体上的充分把握,使系统具备良好的扩展性和可维护性,保证整个软件产品较高的质量,保证缺陷能够提前被发现和解决,在一定程度上消除非结构化软件和降低软件的复杂度<sup>[1]</sup>。

然而,瀑布模型过于强调早期需求和设计阶段中预先建立完善细致的文档的特点限制了它的应用,只适合应用到继承性强或者是需求上没有多少创新的常规任务的工程项目建设。

作为地面系统重要任务需求之一的任务支持部分,一般包括任务运行、地面接收、数据预处理与快视和数据规定管理与发布等需求,具有很强大的继承性和通用性。国内大部分空间项目,比如实践10号卫星、量子卫星等,地面系统的任务支持部分的开发无一例外都是采用的瀑布模型,其研制技术流程为可行性论证阶段→软件需求分析阶段→软件设计阶段→软件编码和测试阶段→交付验收测试阶段→工程系统间联试阶段→在轨测试阶段→任务运行阶段。

在卫星初样和正样整星联试阶段,是由航天器自行研制的一套地面测试系统和地面运行控制中心参加联试,而真正在卫星发射之后投入使用的地面系统都仅仅在研制过程中与卫星系统进行数传链路和指令格式的对接试验,只有等到卫星正样结束后,整个工程大系统包括测控系统、卫星系统、地面系统协同进行大系统联试,来验证各系统之间功能和接口的正确性。

一般来说,瀑布模型开发方式,适合继承性和通用性强的,技术上比较成熟的项目。对于一些空间科学项目来说,具有对空间科学的探索性、独特性和未知性等特点,在方案论证阶段很难发现所有需求及需求解决方案,导致在研制过程中数据处理方面的

需求会出现频繁的变更,瀑布模型会出现很大的不适应性<sup>[3~5]</sup>。

另外,在一些空间科学项目里要求地面系统具有时效性,甚至要求天地协同,统筹分配任务,这给地面系统在可靠性和准确性方面提出了更高的要求。传统瀑布模型的地面系统的开发往往是在航天工程靠近末端的一个环节,从获取任务需求到满足工程实施条件,一般研制周期只有短短数月,而且在研制周期内,用于支持载荷定标和测试、分系统和系统之间的联试、大系统的联试的地面电测系统都是来自于各分系统内部,真正用于在轨测试和日常运行阶段的地面系统很难在研制过程中得到足够的测试和锻炼,很难保证高可靠性和准确性。

## 2.2 迭代模型的特点

将迭代模型引入地面系统中,最大的优势是迭代模型采用积极拥抱变化的策略,通过不断地迭代,响应和完善每一次的需求变更,很好地适应空间项目地面系统的创新性和探索性<sup>[6,7]</sup>。

另一个优势就是,在工程建设的各个阶段,地面系统可以开发出一系列的产品版本,每一个版本都是下一个版本的基础和原型,通过逐次迭代逼近目标。通过天地统筹,统一协调需求,统一设计方案,统一工程实施,统一进行天地一体的联调联试,使得地面系统在有效载荷研制阶段就能参与到载荷设备的调试、测试和定标的工作,给科学家用户在后期的数据处理和分析中提供非常宝贵的第一手的测试数据,同时也给地面系统锻炼的机会,在发射前经过多年使用和演练,能最大程度地保证飞行阶段的顺利运行。

在现有地面系统中采用迭代模型进行开发最成功的例子之一就是赫歇尔红外空间天文台项目。作为欧洲迄今最复杂的空间科学设备-赫歇尔红外空间天文台项目地面系统的重要组成部分,赫歇尔公共科学系统(Herschel Common Science System, HCSS)采用迭代模型,其开发过程要经历一个从先启阶段→精化阶段→构建阶段→移交阶段开发过程(开发周期),在迭代过程中的每一个生命周期阶段都的经过需求、分析、设计、实现、测试以及发布的过程<sup>[8,9]</sup>。

HCSS 开发方式最大的创新是支持 Herschel 整个生命周期的所有活动。HCSS 的开发与载荷仪器的研发测试是并行同步开展的。系统在有效载荷研制阶

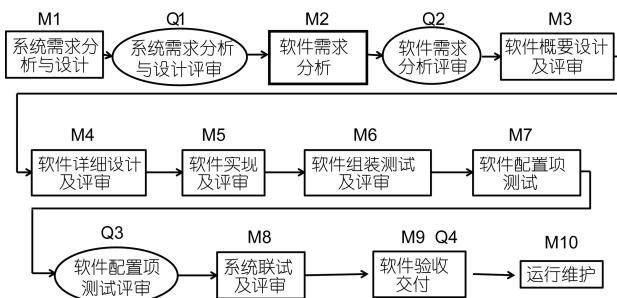


图 1 空间项目瀑布模型研制技术流程<sup>[2]</sup>

段、整星集成和联调阶段、在轨测试阶段、日常运行阶段以及项目结束后的长期成果保存阶段, 都为各种用户提供一致的交互支持, 实现 HCSS 在项目研制周期的各个阶段实现平滑过渡。

HCSS 从研制开始到现在已经成功解决了一万多个问题, 发射 6 年来包含几百万源代码的处理软件已经演进了 10 个版本, 处理了超过 17000 条的变更请求。虽然飞行器已经停止运行, 但是需求还是不断地被提出、被分析和被处理。

### 2.3 迭代模型在地面系统中应用的问题

虽然地面系统采用迭代模型的开发方式优势非常明显, 但是迭代开发模型的引进对于习惯于传统航天管理模式的系统来说是一个巨大的挑战和质疑。

一方面, 按照以往空间项目的开发经验, 星地各系统在研制过程中基本处于各自为政、互不参与的状态。卫星系统包括载荷分系统都有各自的一套地面电测系统, 用于支持各自的调试、定标和测试工作, 地面系统只能等到总体联试时, 才会与卫星系统进行接口联试。而迭代模型强调的是项目开发方和载荷和用户等利益相关方都需要参与到项目当中, 通过相互的沟通协调和测试反馈, 逐步完善任务需求。所以如何使地面系统的研制工作与卫星系统的研制紧密联系, 从而逐步完善和实现全程支持星上的设计制造、测试、集成联试、在轨测试以及日常运行各个阶段, 是迭代模型不得不面对的一个难题。

另一方面, 地面系统内部迭代模型的开发方式这种轻量化的过程, 拥抱变化的特点与严谨的航天管理模式大相径庭。如何制定和完善地面系统迭代模型开发管理流程, 既能满足航天管理规范, 又能保证研制工作高效顺利的开展, 是迭代模型不得不面对的另一个难题。

### 2.4 迭代模型的解决方案

#### 2.4.1 迭代开发方法的选择

迭代开发方法包括 RUP(rational unified process), SCRUM, XP 等为代表的敏捷开发方法<sup>[10,11]</sup>。

相对于 SCRUM 和 XP 来说, RUP 最显著的品质就是它能够选择性地做到比较正规, 文档化程度比较高。在以严谨和传统著称的军用软件甚至是航天软件来说, 其软件工程化程度要求较高, 必须明确工

作步骤、具体的描述方式以及确定的评价标准, 开发过程必须纪律化和制度化。显然相对于这种敏捷的轻型灵活的 SCRUM 和 XP 开发方法, RUP 开发方法更符合国内空间项目地面系统软件的开发现状。

#### 2.4.2 RUP 工作流的裁剪和定义

RUP 把软件的开发周期分为初始、细化、构造和交付 4 个阶段; 每个阶段内部含有若干次迭代, 而每一次迭代相当于一个微型瀑布模型, 包括需求分析、设计、编写代码和测试等, 每一次的迭代是以前一次迭代为基础, 其开发模型如图 2 所示。除上述 4 个阶段外, 还有 9 个核心工作流, 其中核心工程工作流 6 个, 即商业建模、需求、分析与设计、实现、测试、部署; 核心支持工作流 3 个, 即配置和变更管理、项目管理、环境。在项目中, 这 9 个核心工作流被轮流使用, 在每一次迭代中以不同的重要程度重复。

RUP 方法论是一套包含过程构建、方法以及技术的一整套体系框架, 对于不同类型的软件项目, RUP 并未给出具体的裁剪策略及实践指南, 让实施者感到有些无据可循。为了保证软件开发的效率和质量, 必须结合地面系统的自身特点对 RUP 工作流进行裁剪和工作流程的定义。

#### 2.4.3 分阶段发布策略

迭代开发在地面系统中的发布策略采用分阶段发布, 将软件产品的发布阶段规划为一系列的演变, 每次演变都得到一个计划交付的产品主要发布版(图 3)。除了第一个演变之外, 其他的演变在项目初期只能进行粗略的定义, 但是安排完好的一个项目规划框架, 可以使多个演变融入到整体计划当中。

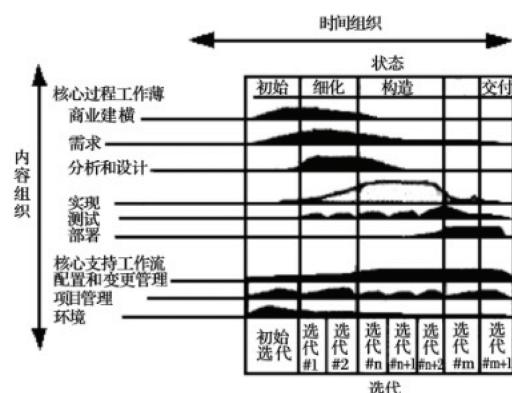


图 2 RUP 开发模型

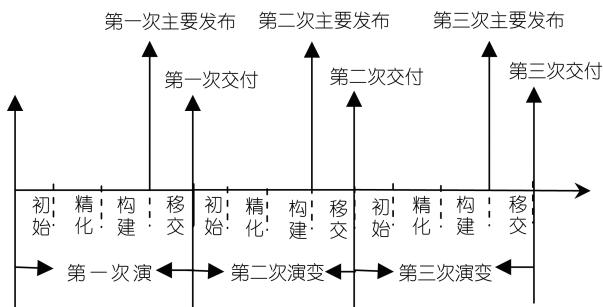


图 3 分阶段发布策略

这种策略的关键就是从一开始就限定了项目的范围，把关注点放在用户的主要需求，通过第一次演变关注地面软件最基本和最紧迫的部分，尽早地交付一个可供用户使用的软件产品，在此基础上通过后期多次的演变，逐步实现地面系统软件的功能和性能要求，使得地面软件在支持载荷研制阶段载荷的调试、定标和整星集成以及联调的工作得以实现。

### 3 迭代模型在实际项目应用案例分析

#### 3.1 项目简介

中法天文卫星(Space multi-band Variable Object Monitor, SVOM)科学应用系统，作为卫星工程六大系统之一的地面应用系统重要组成部分，负责制定科学观测策略，完成科学观测任务编排，生成观测请求后交由地面支撑系统生成卫星及载荷遥控指令上传；接收地面支撑系统传来的科学和辅助数据，处理产生各级科学数据产品并及时响应、发布伽马射线暴(GRB)警报。

SVOM(中法天文卫星)是一个专用于探测和研究伽玛暴的空间科学项目，于2006年10月在中法两国元首的见证下，两国航天局长签订了关于天文卫星的合作备忘录。

到目前为止所有已知的伽玛暴都是在空间被探测到的，而所有的伽玛暴红移都是在地面上测量的。在 SVOM 项目的设计中，试图达到空间设备和地面设备之间的最佳配合。当卫星通过星载天文设备探测到伽马射线暴天文现象后，通过科学应用系统转发到中法各自的地面后随望远镜，在卫星探测到 GRB 事件 5 min 内开始地面观测。

这给科学应用系统的开发提出了很高的要求，地面系统必须具备能够天地协同工作、高可靠的实时

性和数据通信以及快速灵活的多源数据分析的技术要求。

#### 3.2 应用方案

考虑到 SVOM 项目科学应用系统的复杂性和独特性，将采用迭代模型进行科学应用系统的开发。

基于前面章节的分析，SVOM 科学应用系统采用分阶段发布的策略，将系统分为 3 个可以逐步演变并且可以独立交付的系统，分别是原型系统、核心系统和完全系统(图 4)。

在 SVOM 科学应用系统原型系统中识别整个系统最重要的核心需求，在核心系统之前保证这些核心需求的实现，然后在接下来的两个系统中附加次要功能、完善核心部分、优化性能以及软硬件集成。在原型系统阶段依照工程总体任务，进行整个应用系统逻辑结构设计，根据载荷仿真模拟器实现数据处理、产品生成、脚本梳理环等功能；按照业务运行要求进行标准化和规范处理，如软件的模块化结构、数据格式、命名规则和与其他系统的接口等，给后续的核心系统和完全系统的研制工作打下基础。

同时，根据工程总体及中法双方地面联合研制进度的要求，将科学应用系统的研制工作与卫星及载荷的研制流程同步(表 1)。

这个研制流程的一个重要优点是从系统研制早期就具有了可以运行的软件系统，载荷仪器天文学家可以着手编制模拟和处理软件配合仪器的研制、优化、测试、标定，一方面协助了载荷研制，另一方面使科学应用系统软件系统尽早开始与用户见面，当发射时已经经过几年的使用。

2014 年 10 月 SVOM 卫星工程召开了 Phase B 阶段启动会，确定 2016 年进行电性件功能测试。为了支持卫星与载荷电性件对接测试，原型系统的设计围绕载荷研制对测试数据处理的需求，需要通过系统仿真完成需求、接口和初步设计任务，内容包括伽马暴仿真数据库、伽马暴轮值值班组工作流程仿真、数据档案原型、伽马暴警报网络关键技术仿真等。

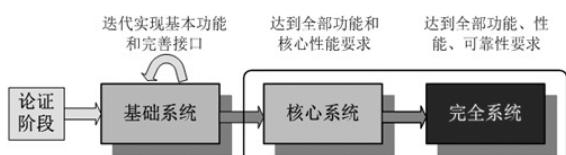


图 4 地面系统研制流程

**表 1 卫星系统与地面系统研制流程对应关系**

卫星载荷阶段	阶段	地面系统研制流程	
		系统工作	
需求和方案	原型阶段	用户需求分析、系统需求初步分析、可行性分析、系统方案设计 系统需求分析、初步设计、开发环境和原型系统建立 原型系统改进、功能完善性能优化	
初样	核心系统阶段	核心系统建立和鉴定、完全系统设计通过评审	
正样	完全系统阶段	完整系统建设、系统集成、测试鉴定和演练	

后续的核心系统和完全系统在此基础上围绕载荷和卫星的初样、正样、集成联试、在轨测试以及在轨运行需求，采用连续一致系统和流程，逐步实现最终目标，实现各阶段转阶段中软件无缝连接和平滑过渡，测试方式和数据都不发生剧烈变化。

### 3.3 RUP 工作流的定义

#### 3.3.1 工作流确定

虽然空间型号地面应用系统表现出任务的多样性的特点，但是进行数据处理还是各个型号地面应用系统都需要面对的核心任务。另外原型系统开发团队参与过基于 RUP 开发的赫歇尔地面段的研制和运行，有着丰富的经验和开发基础，因此对于商业建模、部署和环境这 3 个工作流可以弱化或者可以裁减掉。

SVOM 科学应用原型系统在项目初期，很多功能和需求都无法完全确定，开发人员对功能需求的理解也可能出现偏差，导致在开发过程中会涉及到频繁的需求变更，所以需求获取、配置和变更管理、测试和项目管理这 4 个工作流显得尤为重要。

#### 3.3.2 各阶段工作流的产出物及活动

由于开发团队参与过赫歇尔地面段的研制工作，不仅对于 RUP 的开发有着丰富的经验和基础，而且已经建立了一整套稳定高效的软件开发综合支持环境。所以该阶段的工作可以快速地执行通过，不需要浪费过多的时间和成本，只需制定好项目的启动和实施计划，其核心产出物是软件开发计划。

在精化阶段的主要风险是架构，其核心产出物是架构设计和需求说明(主要需求)。根据前文分析的那样，本原型系统的最大特点就是要实现科学地面段在不同任务阶段的平滑过渡，这就意味着其必须具备软件可重用性和数据兼容性。所以对于原型系统来说，架构设计的扩展性非常重要。另外在该阶段

需要确定主要的需求，并进行详细的描述。同时开展原型系统的开发、设计、创建和验证系统整体架构基线，进一步评估技术方案风险。

构建阶段关注的是完成最终需求分析和原型系统的进一步开发。其核心产出物是需求说明(完整)、测试文档和设计报告。该阶段结束时，原则上原型系统已经充分完成，并且拥有足够高的质量，可以提交给用户测试。在该阶段关注的活动包括需求分析、设计、测试以及管理不断变化的需求。

在提交阶段的工作是用户的验收测试和用户试用。其核心产出物是验收测试说明和报告。需要关注的是用户验收测试、用户培训以及发现缺陷和不足的后续修复工作。

### 3.4 需求工作流的实施

正如前文中分析的那样，在 SVOM 科学应用系统原型系统阶段识别整个系统最重要的核心需求。核心需求的识别是整个系统最重要也是最难的一步，关系到如何界定原型系统的范围、规模、扩展性、兼容性等要求以及影响后续系统的迭代开发等。因为如果原型系统中的核心需求没有确定下来，随着时间推移，项目越滚越大，到最后的阶段可能一个关键问题没有得到解决，而次要特性做了很多，耗费大量的资源。本文将重点阐述需求管理在 SVOM 科学应用系统中如何具体实施，保证开发活动高效的开展。

#### 3.4.1 需求开发方式的定义

在 RUP 中用例分析技术并不包括所有需求过程，它只是一种需求分析技术，是在传统的需求捕获技术的基础上使用的，不能完全替代这些需求捕获技术。而且一方面由于空间项目的科学性和复杂性，软件开发人员并不具备丰富的空间天文知识，在理解科学家的需求上会有局限性，另一方面，科学家会觉得用用例来定义需求会限制他们对需求的提出。

基于以上考虑, 本项目采用传统的功能需求分析和基于用例的方式结合进行需求的捕获和分析.

### 3.4.2 原型系统需求定义

一方面, 以传统的功能需求分析模式, SVOM 科学应用系统的主要需求是科学数据处理功能, 包括数据处理算法和软件功能、数据产品处理功能以及数据本地暂存与管理功能等. 数据类型包括 VHF alert、载荷科学数据和辅助数据. 考虑到原型系统阶段, 星上载荷的研制工作还在初期, 以 VT(光学望远镜)观测模拟器的输出数据作为原型系统的输入数据, 实现载荷观测仿真数据处理的基本功能.

另一方面, 考虑到原型系统必须具备可重用性和良好的扩展性, 将原型系统分为地面电测支持分系统(EGSE)和数据处理分系统(DP), 这两个分系统均支持后续系统的迭代开发. 地面电测分系统主要用于对 VT 观测仿真器输出数据的处理转换和转发以及外部接口的模拟. 数据处理分系统主要用于各类数据转入到原型系统, 供后续分析处理使用, 同时提供数据存储、查询、快视、处理、分析的支持. 具体需求结构见图 5.

各个功能单元的需求则通过定义各角色用户和场景用例内容, 确认用例是否符合实际情况, 与各个

用户角色沟通进一步细化需求. 本项目所涉及的主要用户角色包括天文学家、定标和仪器科学家、科学数据处理脚本工程师、数据质量控制工程师和系统运维工程师等几类.

通过这样的方式, 在项目早期就确认了所必须的需求, 开发人员可以在项目早期就可以进行设计开发的工作. 另外后期基于用例的需求开发进一步进行需求的确认和细化, 能够弥补和纠正前期需求分析的疏漏和错误.

### 3.4.3 基于 Redmine 的问题跟踪系统

迭代开发的特点之一就是永无停止的需求开发过程, 尤其是构建阶段, 随着开发的推进, 会发生频繁的需求变更. 这点与传统的瀑布模式开发中必须要求所有需求确定下来, 才能进行下一步的工作完全不同.

SVOM 科学应用系统项目中, 对需求是采用积极拥抱变化的策略. 任何人在任何时候都可以提出新的需求, 无论需求合不合理, 只要需求被提出, 相关责任人都会在最短的时间对新需求的提出作出回应.

为了满足要求, 本项目采用基于 Redmine 项目管理工具有效地支持需求变更流程, 使得开发过程

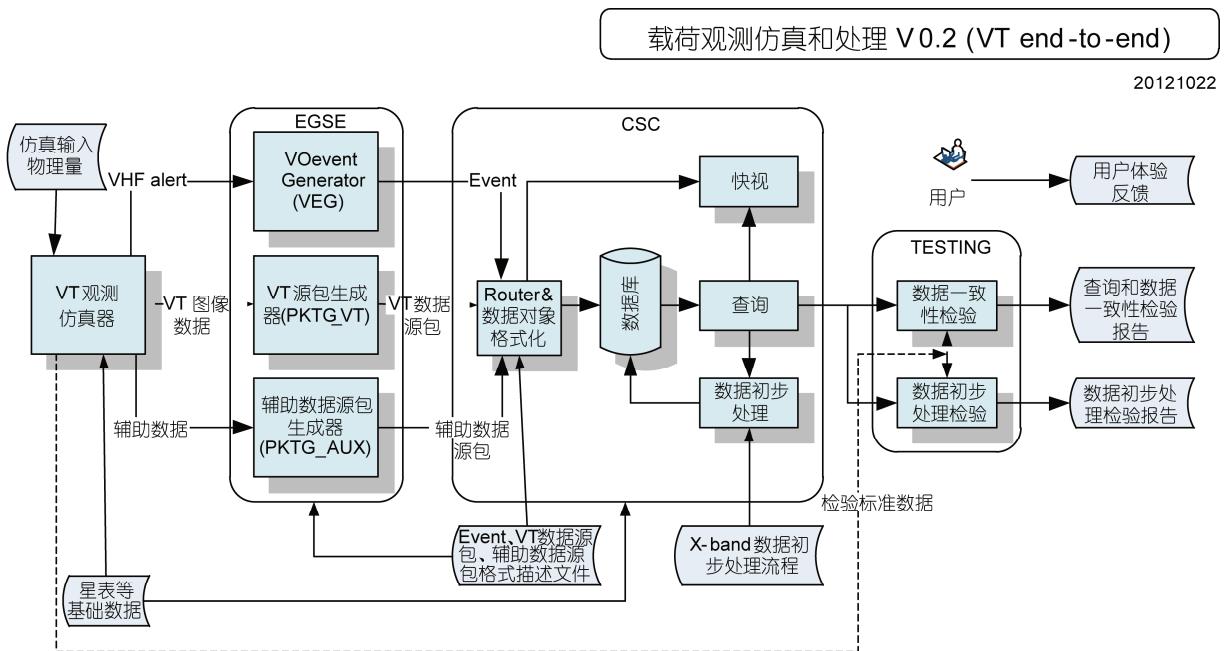


图 5 (网络版彩图) 原型系统的需求结构

中的需求管理更加流畅和高效。通过 Redmine, 记录并可以追溯每一个需求的变更审批过程。包括请求、分析、接受或拒绝、实施、验证和关闭。在 Redmine 中, 要求记录每一个需求的变更状态, 包括请求人、时间、变更原因、影响或严重性以及变更状态。

## 4 结论

不同的模型会以不同的顺序和过程实现软件生存周期的各阶段, 每个模型的产生都是软件开发最

终产品不断改进的解决方案的经验总结。

SVOM 科学应用系统采用迭代模型开发, 根据工程总体研制进度要求, 围绕卫星电性件测试要求, 制定和设计原型系统的开发, 初步确立了卫星电性件测试支持计划, 并对后续的系统打下基础。同时, 通过对 RUP 工作流的裁剪和定义, 特别是需求管理工作流的应用, 使得迭代模型在地面系统中的应用更加合理科学, 研制工作更加高效, 最大限度地支持卫星系统各阶段的定标和测试工作, 同时也得到了充足的锻炼机会, 具有更强的可靠性和正确性。

## 参考文献

- 1 李学仁. 军用软件质量管理学. 北京: 国防工业出版社, 2012
- 2 中国航天科技集团公司. 航天型号软件工程化管理要求(Q/QJA30-2005), 2005
- 3 徐冰霖, 隋起胜, 李权. 航天工程地面测控软件的软件生存周期模型. 飞行器测控学报, 2010, 29: 48–51
- 4 宋征宇. 载人运载火箭软件工程化二十年实践. 载人航天, 2013, 19: 1–7
- 5 龙江. 卫星型号研制的系统状态管理方法研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010
- 6 Sasankar A B, Chavan V. SWOT analysis of software development process models. Int J Comput Sci Iss, 2011, 8: 390–399
- 7 dos Santos Jr. D, da Silva I N, Modugnp R, et al. Software development using an agile approach for satellite camera ground support equipment. In: Elleithy K, ed. Advances and Innovations in Systems, Computing Sciences and Software Engineering. Netherlands: Springer, 2007. 71–76
- 8 Ott S, Bakker J, Brumfitt J, et al. The Herschel Data Processing System. In: Astronomical Data Analysis Software and Systems XV ASP Conference Series, 2006, 351: 516
- 9 张洁, 黄茂海. 赫歇尔空间天文台科学地面段软件开发管理方法的研究. 天文技术与方法, 2015, 12: 212–218
- 10 Larman G, 著. 张晓坤, 等译. 敏捷迭代开发管理者指南. 北京: 人民邮电出版社, 2013
- 11 Bittner K, Spence I, 著. 罗景文, 罗灿峰, 张弘毅, 译. 迭代软件开发项目管理. 北京: 清华大学出版社, 2010

# The application of iterative model in space project ground system

ZHANG Jie & HUANG MaoHai

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

To solve the non-adaptive problem which the traditional Waterfall model faces in the space ground system, this paper introduces the iterative model based on RUP and development method by stages. The method is applied to SVOM (Space multi-band Variable Object Monitor) ground system. The ground system is divided into three delivery systems, which synchronize the satellite development process and ease the contradiction with the different development process. Meanwhile the ground system development becomes more efficient and rational. It maximally supports calibration and testing of the satellite at all the phases to simultaneous optimize the satellite system and ground system.

**space science, ground system, iterative model, development method by stages, RUP tailoring, Redmine**

doi: 10.1360/N092015-00316