

一种基于 MBSE 的小卫星测控分系统建模设计方法

刘红杰^{✉1}, 窦 骄¹, 沈 鹏², 石 雷¹, 王雪宾¹

(1 航天东方红卫星有限公司 北京 100094

2 北京遥测技术研究所 北京 100094)

摘要: 基于模型的系统工程 MBSE 思想和信息化手段, 以模型为核心、关系追溯为手段, 集合测控分系统技术指标、设计经验等知识信息, 提出一种基于 MBSE 的小卫星测控分系统建模设计解决方案。利用模型承载文档, 显性化经验、信息、关系, 形成基于模型的知识管理工具, 提高工作效率, 解放设计师, 实现知识经验的数字化模型化承载, 为小卫星测控分系统由经验设计向仿真设计转变, 由基于文档到基于模型的研制模式转变, 由实物验证向虚拟和实物验证相结合转变进行了探索和尝试。

关键词: MBSE; 小卫星; 测控分系统; 建模设计

中图分类号: V556

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2022)03-0054-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211009001

引用格式: 刘红杰, 窦骄, 沈鹏, 等. 一种基于 MBSE 的小卫星测控分系统建模设计方法[J]. 遥测遥控, 2022, 43(3): 54-61.

A modeling design method of small satellite TT&C subsystem based on MBSE

LIU Hongjie¹, DOU Jiao¹, SHEN Peng², SHI Lei¹, WANG Xuebin¹

(1. DFH Satellite Co. Ltd., Beijing 100094, China;

2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China)

Abstract: This paper, with the help of model-based systems engineering MBSE idea and information means, takes the model as the core, relationship traceability as the means, and integrates the technical indicators, design experience and other knowledge information of TT&C subsystem. A modeling and design solution of small satellite TT&C subsystem based on MBSE is proposed. Using model carrying documents, combined with explicit experience, information, relationship, it forms knowledge management tools, which improve the work efficiency, and the liberation of the designer, and realizes digital model-based bearing of knowledge and experience. It has been explored and tried for the small satellite measurement and control subsystem from experience design to simulation design transformation, from document-based to model-based development mode, from physical verification to the combination of virtual and physical verification.

Key words: MBSE; Small satellite; TT&C subsystem; Modeling design

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211009001

Citation: LIU Hongjie, DOU Jiao, SHEN Peng, et al. A modeling design method of small satellite TT&C subsystem based on MBSE[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(3): 54-61.

引 言

卫星测控分系统作为卫星的一个重要组成部分, 由导航子系统及 S 频段测控子系统组成^[1]。导航子系统在轨实时接收 GPS 或者 BD 导航信号完成星上实时定位定轨, 同时将原始观测量数据下载到地面站用于地面事后精密定轨处理^[2], S 频段测控子系统为卫星和地面测控站之间、卫星与中继卫星之间提供 S 频段射频通道, 同时完成测距测速任务。S 频段测控子系统功能包括对地 USB 测控、对地扩频测控和中继扩频测控^[3]。卫星测控分系统与地面测控系统配合共同完成卫星入轨段以及在轨运行期间的卫

✉通信作者: 刘红杰 (dkliuhj_04@163.com)

收稿日期: 2021-10-09 收修改稿日期: 2021-12-06

星遥测遥控及轨道测量任务。卫星测控分系统呈现出的发展趋势有三个方向：一是先进技术的应用带来的高集成度、更复杂的系统设计；二是高密度星座带来的低成本、批量化设计生产；三是能够快速给出最合理的系统级解决方案。

传统的基于文档的航天系统设计模式、总体-分系统-总体迭代的方案论证模式难以适应未来卫星测控分系统的设计开发需求，成为了卫星测控分系统设计的瓶颈。基于模型的系统工程（MBSE）是国际航天行业解决上述问题、应对复杂系统设计的有效方法^[4,5]。MBSE 是应对系统复杂性和创新设计的一种工程范式变革，是研究和设计具有非结构、非线性、逻辑紧密、交互复杂等特点的一类系统的关键技术。其采用统一的体系结构框架对系统需求、设计、测试等所有信息元素进行标准化视图描述并相互关联，便于各方人员在不同阶段进行理解 and 交流，避免系统描述的不一致性；通过图形化表达、数字化模型对系统需求、功能、流程和接口关系等进行早期设计、验证和确认，避免实物集成后再验证确认带来的技术状态更改风险和项目进度推迟风险，可有效解决复杂卫星测控分系统设计开发中存在的问题^[6,7]。先进的数字化设计和系统仿真技术是提高航天器性能和产品质量，降低研制成本和风险、缩短研制周期以及保障在轨可靠运行的重要途径和手段。

本文基于 MBSE 的开发流程和方法，使用 MagicDraw19.0 软件工具，利用 SysML(Systems Modeling Language)的需求图、活动图、时序图、状态机图等，对卫星测控分系统的任务分析、需求、接口、行为等方面分别进行捕获建模，并对模型进行集成仿真。

1 基于模型的系统工程概述

基于 MBSE 是一种应用建模方法的正式方式，用于支持系统需求、分析、设计、检验与确认活动，这些活动从概念设计阶段开始，贯穿整个开发过程及后续的生命周期阶段^[8,9]。MBSE 对系统工程中的技术工程进行了颠覆性的改造，其核心是采用形式化、图形化和关联化的建模语言及相应的建模工具，改造了系统工程的技术过程，充分利用了计算机、信息技术的优势，开展建模仿真。MBSE 用面向对象的、图形化和可视化的系统建模语言描述系统的底层元素，进而逐层向上组成集成化、具体化和可视化的系统架构模型。

系统模型作为 MBSE 的主要工件，是系统详细说明、设计、分析和验证信息的根源，系统模型维持着这些信息之间的可追溯性，需求或设计的任何更改都会反映在系统模型中。系统模型提供了将系统工程中所有内容集成在一起的框架。系统模型由需求、设计、检验实例、设计原理及它们之间的相互关系等模型元件构成，包括其结构、行为、参数和需求^[10]。模型库所包含的模型元件之间的多个横切关系，使得可以聚焦系统的不同方面，从很多不同角度对系统模型进行观察。系统模型还能够和工程分析以及仿真模型进行整合，实现估算仿真和动态执行。

MBSE 的优势表现在：① 统一图形建模语言，方便沟通交流；② 建立模型关联，支持变更的自动传递；③ 早期系统验证，及早排除不合理方案；④ 早期自动推理，知识重用+自主创新；⑤ 早期仿真优化，正向设计+最优设计^[11]。

2 基于 MBSE 的小卫星测控分系统建模架构

2.1 建模目的

进行小卫星测控分系统建模的主要目的有两个：一是从指导工程角度，实现设计信息由纸质文档到模型的传递；二是从设计角度，实现设计验证一体化。

从指导工程角度，实现设计信息由纸质文档到模型的传递。传统的测控分系统设计要求及信息主要还是落在文档中，在信息传递过程中时常会出现信息缺失或误解。通过建立模型之间的关系进行设计信息传递，能够实现可追溯和关联性分析，将整星和分系统的指标要求分解传递给更下层级（如生产厂家）指导设计生产。整个传递过程受控、可追溯，能够实现对测控分系统设计构架和技术状态的全面分析和控制。

从设计角度，实现设计验证一体化。相比于传统的设计流程，测控分系统模型的仿真运行强调分析与传递模式，同时考虑设计与验证。通过建立仿真拓扑模型、链路分析验证模型以及其设计过程中所用

到的相关模型之间的关系, 进行反复迭代和验证覆盖性分析, 以保证测控分系统指标均满足验证要求。同时, 测控分系统设备作为具有高可靠性的设备, 在产品设计或设备制造方面创新难度大, 而颠覆性的设计创新点通常出现在功能分析或需求分析阶段, 因为这个阶段未涉及产品制造, 创新成本低。因此, 利用建模仿真, 能够探索新的功能分析或需求分析模式, 有利于整个测控分系统及整个型号研制的创新模式发展, 实现降本增效的目的。

2.2 建模构架及流程

小卫星测控分系统建模架构如图 1 所示, 其仿真模型主要由以下七部分组成: ① 整星总体测控需求模型; ② 分系统产品库模型; ③ 分系统仿真拓扑模型; ④ 参数分解模型; ⑤ 链路预算分析验证模型; ⑥ 测控时间及弧段仿真模型; ⑦ 分系统指标分解输出。

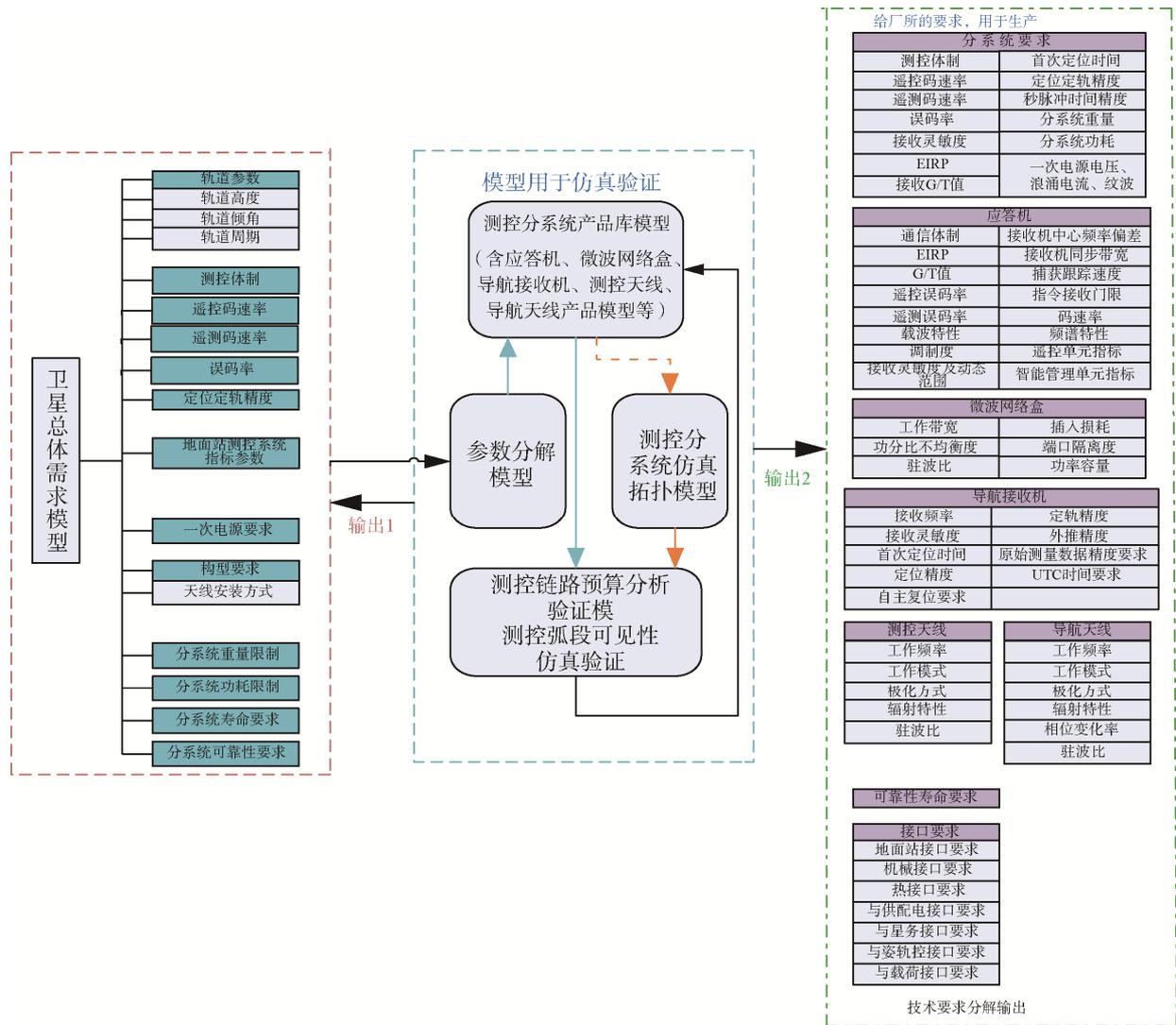


图 1 小卫星测控分系统建模架构

Fig. 1 Modeling architecture of small satellite TT&C subsystem

测控分系统建模仿真主要工作流程有以下 6 个步骤。

- ① 卫星总体根据需求, 分解出测控分系统的总体指标要求。
- ② 按照测控分系统的总体指标要求, 进入参数分解模型, 将分系统的参数指标分解为单机指标。
- ③ 根据分解完成的单机指标要求, 进入测控分系统产品模型库, 在现有单机模型库中进行选择。
- ④ 选定单机模型后, 根据需要直接进行链路预算分析验证, 判断是否满足链路余量要求, 如果不

满足,重新进入第③步进行单机模型选择,循环第③步和第④步,直到链路余量满足要求。

⑤ 选定单机产品后,也可进入测控分系统仿真拓扑模型中进行系统仿真运行,目的是验证已组成系统的逻辑工作关系和设计要求的符合性,这一步骤特别适用于在原有产品上的创新性或颠覆性设计的仿真验证,能够探索新的功能分析或需求分析模式。

⑥ 链路预算分析满足要求后,输出1为系统指标,然后回到总体需求中与原有需求进行比对,看是否满足要求。输出2为给单机厂所的具体系统及单机技术指标要求,用于指导实际工程生产。

测控分系统仿真模型可作为一个独立的软件模型单独运行,也可作为整星系统仿真中的一个子模块,在统一的任务调度下与其他分系统仿真模型一起共同完成整星系统级的仿真任务。

3 测控分系统建模要求

3.1 卫星总体测控需求模型

卫星总体测控需求描述了卫星使用测控分系统时应提供的要求,以确定测控分系统的边界。它从整星的使用场景以及可能遇到的实际问题出发,进行分析和总结,以条目化的形式记录每条需求。这些条目化的需求可以导入建模平台中,采用 SysML 需求图进行记录,从而作为建模的输入,同时条目化后的用户需求以需求表和需求图的形式在模型中进行承载。

卫星总体对测控分系统的需求及约束条件主要有以下几条^[12-14]:

① 轨道参数(主要含轨道高度、轨道倾角、轨道周期等);② 测控体制;③ 遥控码速率;④ 遥测码速率;⑤ 误码率;⑥ 定位定轨精度;⑦ 地面站测控系统指标参数;⑧ 一次电源要求;⑨ 构型要求(含测控天线、导航天线安装位置、方式等);⑩ 分系统重量限制;⑪ 分系统功耗限制;⑫ 分系统寿命限制;⑬ 分系统可靠性要求。

3.2 参数分解模型

针对每一个顶层的系统功能,根据建模的颗粒度要求,进行功能及参数分解。功能分解到哪一层结束,取决于建模目的和模型颗粒度,当动作分解到某一动作后就不需要再进一步分解。这一动作意味着可以有某一个结构来实现或承载这个功能行为,即不需要进一步分解。在分解时要对各个活动的颗粒度进行充分地把控,应当基于功能层次的考虑作出适当的抽象概括,避开物理实现和软硬件层次的具体设计。顶层活动的颗粒度应当能以清晰明确的方式概括性地表明系统的主要活动,底层活动的颗粒度应当细化到可以满足建模的分析要求,以支持功能分配、交联分析等。

根据对测控分系统功能需求的分析和整星要求,需要将颗粒度分解至单机层面,即将功能分解到测控分系统的单机功能技术指标,最终分解到应答机、微波网络盒(根据实际需求可选或不选)、导航接收机、测控天线以及导航天线这些单机层面即可。

3.3 分系统产品库模型

分系统产品库主要包含测控分系统中的单机,如应答机、微波网络盒、测控天线、导航接收机以及导航天线。

应答机产品库包括测控体制(USB、UXB或扩频体制)、遥控误码率、遥测误码率、工作频率、相干转发比(适用于USB体制)、接收机捕获灵敏度、遥控指令接收门限、接收机动态范围、接收机同步带宽、捕获跟踪速度、下行频率准确度、下行频率稳定度、发射功率、调制度(适用于USB体制)、码速率、发射频谱特性等指标产品^[15,16]。

微波网络盒产品库包括工作频率、带宽、插入损耗、幅度不平衡度、隔离度、驻波比、功率容量等指标产品。

测控天线产品库包括工作频率、带宽、工作模式(收发共用或收发分开)、极化方式、辐射特性、驻波比等指标产品。

导航接收机产品库包括工作频率、接收灵敏度、动态范围、首次定位时间、定位精度、定轨精度、

外推精度、原始测量精度、积分时间、UTC 累计时间、复位要求等指标产品^[17,18]。

导航天线产品库包括工作频率、带宽、极化方式、辐射特性、相位变化率、驻波比等指标产品。

3.4 分系统仿真拓扑模型

测控分系统的仿真拓扑模型主要包含应答机模型、微波网络盒模型、测控天线模型、导航接收机模型以及导航天线模块,并要求与整星其他分系统,如控制、载荷、星务、供电等实现数据交互。测控分系统内外数据交互关系如图 2 所示。

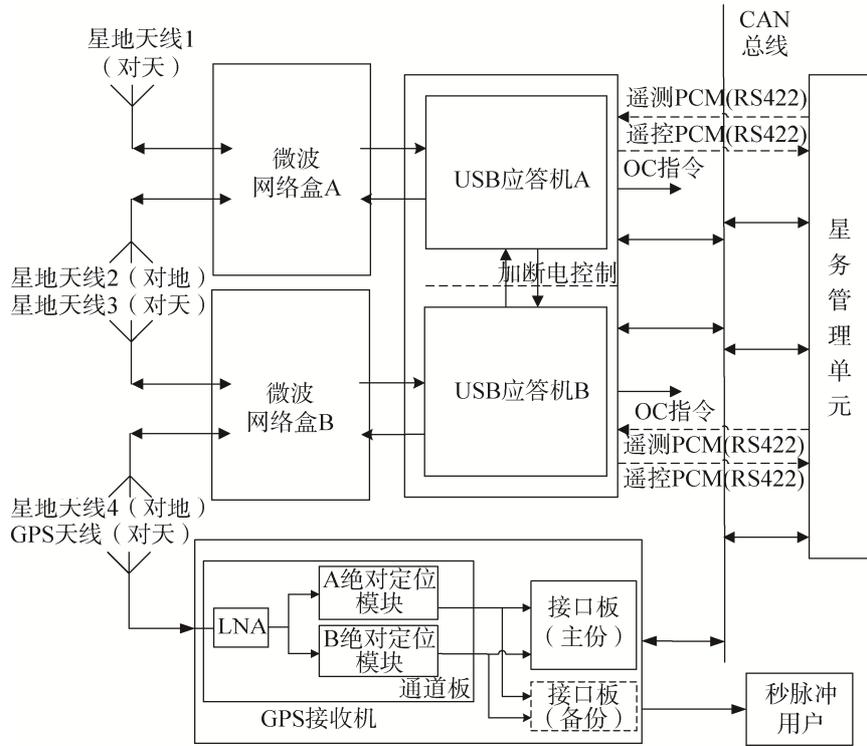


图 2 测控分系统数据交互关系图

Fig. 2 Data interaction diagram of TT&C subsystem

3.5 测控链路预算分析验证模型

测控链路预算分析验证作为系统级任务分析验证的一部分,在 MBSE 模型中以参数计算形式进行表达,完成不同输入参数下的结果计算,计算结果作为系统级权衡分析参数。

测控链路预算分析计算以独立的模型表达,需定义输入参数、输出参数和计算模型。该模型可接收来源于其他模型的输入参数或手动输入;当输入参数变化时,相应输出参数(结果)依据计算模型变化,并可传递给其他需求模型。有需要时,可在模型内部调用相应的仿真软件,如 Matlab 等。

3.6 测控时间及弧段仿真验证模型

测控时间及弧段可见性分析验证作为系统级任务分析验证的一部分,在 MBSE 模型中以参数计算或调用仿真结果形式进行表达,完成不同输入参数下的结果计算,计算结果作为系统级权衡分析参数。

测控时间及弧段可见性分析验证以独立的模型表达,需定义输入参数、输出参数和计算模型。该模型可接收来源于其他模型的输入参数或手动输入;当输入参数变化时,相应输出参数(结果)依据计算模型变化,并可传递给其他需求模型。有需要时,可在模型内部调用相应的仿真软件,如 STK 等。

3.7 分系统指标分解输出模型

卫星提出总体需求作为输入,对系统需求进行分析,对参数分解模型中的需求使用用例进行描述,将需求分解转化为对下一层级指标的输出,分解后的功能分配给逻辑架构,得出组成逻辑架构的分系统行为,下发给厂所,用于指导实际工程生产。

4 基于 MBSE 的测控分系统设计实例

本文将 MagicGrid 方法论应用于小卫星测控分系统的设计中, 基于 SysML 语言和 No Magic 公司的 MagicDraw 软件进行建模, 主要是将测控分系统的性能指标需求结构化, 在建立系统架构模型基础上实现测控分系统设计方案的快速验证, 在设计初期阶段确保需求指标得到追溯验证。具体建模设计流程包括需求分析、功能分析以及设计综合三部分。测控分系统逻辑架构模型如图 3 所示。测控分系统包括两个子系统, 即应答机子系统和 GPS 接收机子系统。

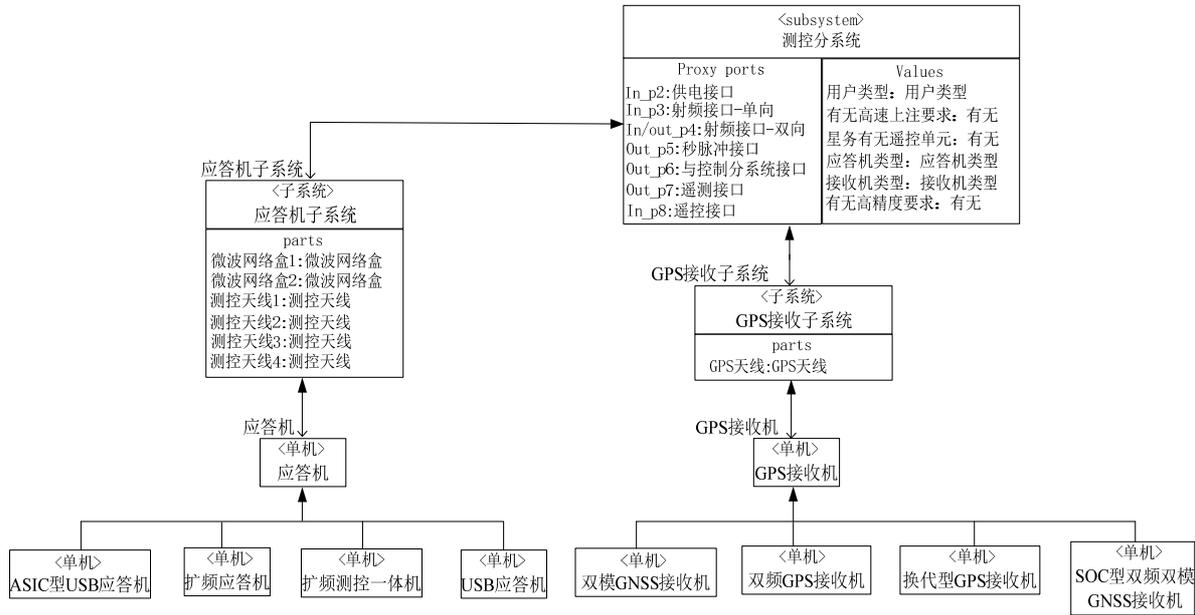


图 3 测控分系统逻辑架构模型

Fig. 3 Logical architecture model of TT&C subsystem

4.1 需求分析

系统需求捕获和分析是测控分系统设计过程的第一个阶段, 该阶段首先需要捕获系统各利益攸关方的需求。获取到利益攸关方的需求后, 设计人员需要对需求进行分析、细化, 捕获到系统需求。通过和利益攸关方沟通交流, 对需求进行分析梳理, 去除无用或者错误需求, 细化复杂需求, 合并重复需求, 同时将系统需求进行条目化管理, 实现需求的原子性、唯一性和可行性等。

4.2 功能分析

功能分析的目的是分析系统与外部的信息交互模式和系统自身的运行状态, 无须关心系统内部结构。基于需求分析建立的系统模型, 其功能分析的目的是建立能够描述系统功能及其相关元素的一系列模型, 主要包括活动图、顺序图、内部块图和状态机图。状态机表达了系统基于状态的行为, 是核心交付产物, 其运行结果是验证系统是否符合需求的重要手段。

4.3 设计综合

设计综合是在综合考虑所有系统功能的基础上进行系统的架构分析与设计, 将系统拆分成若干子系统, 需要完成子系统级的功能流程定义、识别子系统与外界及各子系统之间的交互、完成各子系统的状态行为定义并通过模型的执行对需求进行验证和确认。设计综合阶段是进行白盒分析, 白盒模型细化了系统的操作, 着重分析了子系统的行为、各子系统之间的交互及子系统与外部的交互关系。应答机子系统接口及信号流程模型如图 4 所示, GPS 接收机子系统接口及信号流程模型如图 5 所示。从图中可看出, 子系统内部之间的交互接口以及子系统与外部系统设备的交互关系。在性能参数仿真分析过程中, 需要将构建的模型元素与需求模型中的条目进行匹配, 确保每项需求都有模型元素与之对应, 例如, 功能需求对应功能活动、接口要求对应接口元素等。

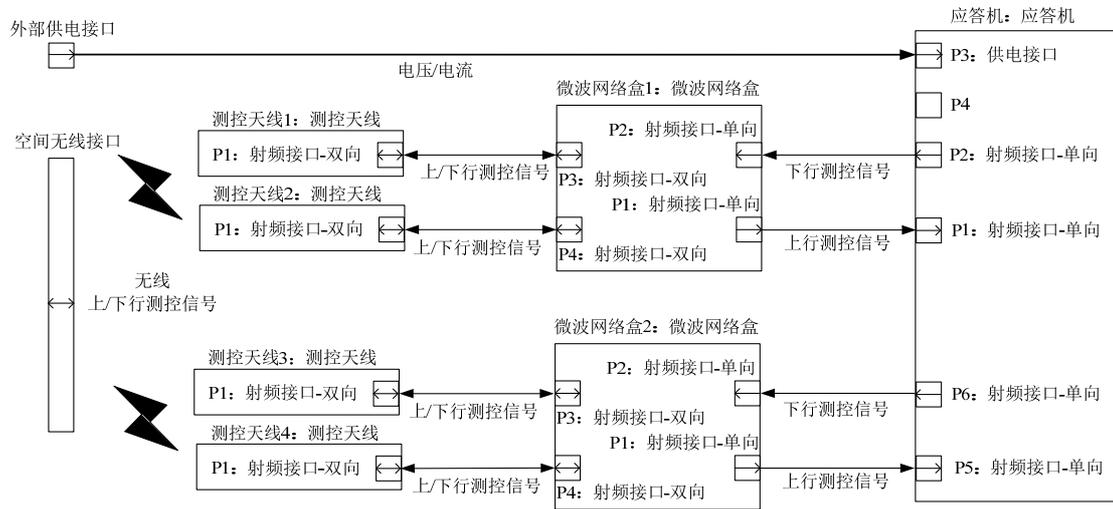


图 4 应答机子系统接口及信号流程模型

Fig. 4 Interface and signal flow model of transponder subsystem

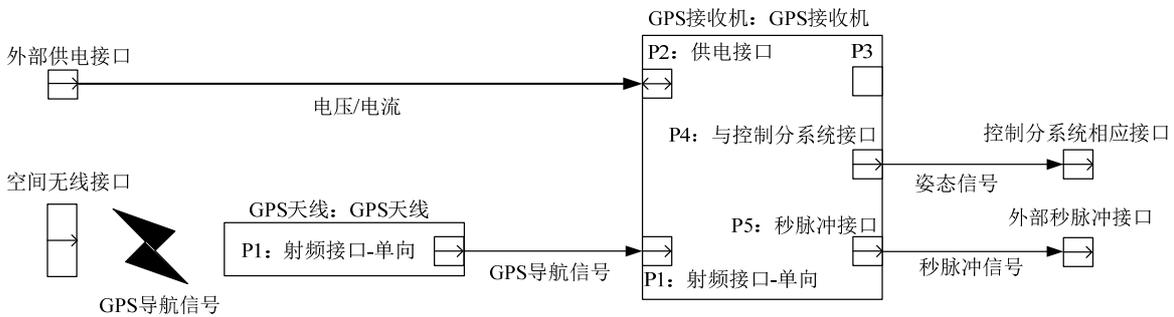


图 5 GPS 接收机子系统接口及信号流程模型

Fig. 5 Interface and signal flow model of GPS receiver subsystem

4.4 小结

本节将基于模型的系统工程方法应用于小卫星测控分系统的设计过程中, 采用 MagicGrid 方法论、SysML 语言、MagicDraw 软件工具, 构建了测控分系统需求模型、逻辑架构、行为模型、结构模型和需求追溯矩阵。模型追溯性强、系统元素关联性好, 能够提高设计信息的一致性和可追溯性, 通过系统模型的运行仿真实现了在设计早期对系统需求进行验证和确认, 从而提高设计迭代效率, 实现设计问题及缺陷的早期暴露, 避免设计问题向下传递, 对保证测控分系统的高质量、高效率设计研发具有重要意义。

5 结束语

本文借助基于模型的系统工程 MBSE 思想和信息化手段, 以模型为核心、关系追溯为手段, 集合测控分系统技术指标、设计经验等知识信息, 提出一种基于 MBSE 的小卫星测控分系统建模设计解决方案。利用模型承载文档, 显性化经验、信息、关系, 形成基于模型的知识管理工具, 提高工作效率, 解放设计师, 实现知识经验的数字化模型化承载, 为小卫星测控分系统由经验设计向仿真设计转变, 由基于文档到基于模型的研制模式转变, 由实物验证向虚拟和实物验证相结合转变进行了探索和尝试。

参考文献

[1] 彭成荣. 航天器总体设计[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011.
 [2] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

- [3] 汪精华, 梁杰, 杨文涛, 等. 高分多模卫星测控分系统设计与验证[J]. 航天器工程, 2021, 30(3): 135–140.
WANG Jinghua, LIANG Jie, YANG Wentao, et al. Design and verification of TT&C subsystem for GFDM-1 satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(3): 135–140.
- [4] WASEEM M, SADIQ M. Application of model-based systems engineering in small conceptual design-A SysML approach[J]. IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine, 2018, 33(4): 24–34.
- [5] LASORDA M, BORKY J M, SEGA R M. Model-based architecture and programmatic optimization for satellite system-of-systems architecture[J]. Systems Engineering, 2018, 21(4): 372–387.
- [6] 杜国红, 陆树林, 郑启. 基于MBSE的作战概念建模框架研究[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(3): 14–20.
DU Guohong, LU Shulin, ZHENG Qi. Research on operation concept modeling framework based on MBSE[J]. Command Control & Simulation, 2020, 42(3): 14–20.
- [7] 李文屏, 白鹤峰, 赵毅, 等. 基于MBSE的卫星通信系统建模与仿真[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(1): 69–74.
LI Wenping, BAI Hefeng, ZHAO Yi, et al. Modeling and simulation of satellite communication system base on MBSE[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(1): 69–74.
- [8] 陈红涛, 邓昱晨, 袁建华, 等. 基于模型的系统工程的基本原理[J]. 中国航天, 2016(3): 18–23.
CHEN Hongtao, DENG Yuchen, YUAN Jianhua, et al. The basic principles of model-based systems engineering[J]. Aerospace China, 2016(3): 18–23.
- [9] 邵健. 基于MBSE的航天任务分析与设计方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [10] 傅有光, 储晓彬, 李明. 基于MBSE的雷达数字化系统设计方法[J]. 现代雷达, 2017, 39(5): 1–7.
FU Youguang, CHU Xiaobin, LI Ming. A method for radar system lever digital research and development based on MBSE[J]. Modern Radar, 2017, 39(5): 1–7.
- [11] NASA. NASA 系统工程手册[M]. 朱一凡, 李群, 杨峰, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [12] 刘嘉兴. 飞行器测控通信工程: 通信[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [13] 陈宜元. 卫星无线电测控技术: 无线电[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2007.
- [14] 于志坚. 航天测控系统工程: 测量系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [15] 施伟, 陈鸿义. 小卫星 S 频段应答机发展历程与展望[C]//2013 年小卫星技术交流会, 2013.
- [16] 闫复利. 通用化测控应答机设计[J]. 信息通信, 2020(8): 89–91.
YAN Fuli. Design of universal measurement and control transponder[J]. Information & Communication, 2020(8): 89–91.
- [17] KAPLAN E D, HEARTY C J. Understanding GPS: Principles and Applications, Second Edition[M]. Artech House, 2006.
- [18] 张毅. 北斗导航接收机信号完整性研究与设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

[作者简介]

刘红杰 1985年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为小卫星测控技术。

窦 骄 1978年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为小卫星总体技术。

沈 鹏 1985年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为微波系统设计。

石 雷 1981年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为小卫星测控、数传和星间技术。

王雪宾 1990年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为小卫星测控、数传和星间技术。

(本文编辑: 杨秀丽)