

基于模块的运载火箭电气系统匹配验证仿真

李 强, 胡元威, 董余红, 邓梦然

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 为了缩短运载火箭的研制周期、降低研制成本, 通过数字仿真实现对运载火箭电气系统的匹配验证显得尤为迫切; 提出了一种基于模块的运载火箭电气系统匹配验证方法, 采用 SysML 语言进行了函数编写和结构建模, 实现了电气系统硬件与软件设备的匹配验证; 通过与真实匹配试验中测试数据的对比, 证实了该方法可以有效模拟并完成各电气系统的性能参数分析和接口匹配验证, 具有一定的工程应用价值。

关键词: SysML; 电气系统; 匹配验证

Simulation for Avionics Validation of Launch Vehicle Based on SysML

Li Qiang, Hu Yuanwei, Dong Yuhong, Deng Mengran

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

Abstract: In order to reduce the research cycle and cost of launch vehicle, there is an increasing need to perform comprehensive system level Matching and Validation using modeling and simulation. An approach is implemented in SysML, which extends model-based Matching and Validation to electronics and software through functional and structural models. The Component models of electronics and software are developed which are validated by comparison with test results from actual equipment. This experiment demonstrated such an approach is possible.

Keywords: SysML; avionics; matching and validation

0 引言

电气系统匹配试验可以对箭上及地面电气设备的技术指标、性能参数、软硬件接口设计的正确性及产品质量进行全面考核, 是运载火箭研制初期必须经历的大型地面试验之一^[1]。随着运载火箭电气设备复杂程度的日益提高, 往往需要更多的时间完成各种功能的验证与系统间各个接口的确认, 然而一台设备除了需要参加电气系统试验外还需要完成力学环境与热环境的考核试验^[2]。由于研制周期以及成本的限制, 显然无法通过真实试验完成对电气系统所有技术状态的验证与确认, 这就提出了对电气匹配数字化仿真的需求。另外, 通过数字化仿真可以在不破坏产品的情况下完成真实试验无法覆盖的故障模式, 对系统中内部节点的控制进行分析和研究, 并且可以快速对系统的性能进行评估与检验, 完成错误的定位与分析。实现运载火箭电气系统匹配验证的数字化仿真是未来电气系统发展的必然趋势^[3]。

本文首先分析了电气匹配数字化仿真的需求, 介绍了 SysML 语言建模方法; 设计了数字化仿真的实现流程, 采用 SysML 语言对电气设备的软硬件功能和接口进行建模, 设计了仿真系统的基本结构, 完成了数据指令发送、接收和解包以及仿真时钟的建模; 最后通过与真实试验中测试数据的对比, 证实了采用仿真方法完成电气系统匹配验证

的可行性。

1 电气匹配数字化仿真需求分析

1.1 电气匹配验证仿真的研究背景

随着电子技术的发展, 运载火箭电气设备智能化程度和系统复杂度大幅提高, 由早期简单的发送指令发展到多处理器、自动故障诊断并重构的多功能复杂智能系统, 需要完成的测试项目也成倍增长^[4]。电气系统由多个分系统的地面设备、网络、箭上设备以及分布范围较广的天线设备组成, 软件代码达到上百万行, 分布于多重架构中的并行处理器与存储器中。另外, 电气系统中包含了上百个传感器、变换器以及多个执行机构, 再加上由于冗余设计增加的备份设备, 使得系统十分复杂^[5]。往往无法完全通过试验完成对电气系统中所有硬件组合和各种模式、架构下的软件操作考核, 甚至对飞行过程中任意时刻的系统状态也无法做到合理的预估。在这种情况下, 对电气匹配的验证进行数字化仿真的工作就显得尤为重要^[6]。

数字化仿真在箭上产品力热环境方面的应用已较为成熟, 另外处理器软件算法的验证工作也可以完全通过数字模拟器完成。然而, 对于整个电气系统的验证却无法通过仿真进行。在真实试验中, 由于无法控制电气设备内部节点, 无法做到对所有模式, 尤其是故障状态下的产品状态进行验证。为了满足产品验证的覆盖性要求, 我们需要寻找一种能够快速有效的对电气系统产品进行验证的方法, 而 SysML 语言为我们提供了一种很好的平台。

1.2 SysML 语言简介

SysML (Systems Modeling Language, 系统建模语言)

收稿日期: 2018-07-17; 修回日期: 2018-08-20。

作者简介: 李 强(1983-), 男, 山西侯马人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电气系统总体设计。

是国际系统工程学会 INCOSE 和国际对象管理组织 OMG 为了满足系统工程的实际需要, 在对统一建模语言 UML2.0 的子集进行重用和扩展的基础上提出的一种系统工程的标准建模语言, 它是为支持系统工程领域中更大范围的系统建模而对 UML 进行的扩展和定制^[7]。SysML 的目标是“为系统工程提供一种标准化的建模语言, 进行复杂系统的分析、描述、设计与校验, 以提高系统的质量、改进不同工具之间进行系统工程信息交互的能力, 并且帮助建立系统、软件与其他工程学科之间的语义连接”^[8]。SysML 支持大范围内复杂系统的描述、分析、设计、验证与确认, 这些系统包括硬件、软件、信息、过程、人员以及设备等。

与一般的系统建模语言一样, SysML 由统一定义的基本语义组成, 通过这些基本的语义可以描述元素、需求、行为、参数以及各元素间的相互关系。采用 SysML 语言建立的模型由基本元素和相互关系组成。元素是建模的基本对象, 例如类、系统、子系统, 元素建模中包含了各个描述元素属性的参数项, 通过这些属性项可以描述系统的硬件(电气、结构)构成、软件功能等。而关系建模则对这些基本元素间的相互关系进行描述, 确定各单元间的数据流向、过程控制和存储位置等^[9]。SysML 建模语言针对不同的建模对象制定了不同的定义标准, 建模时根据建模标准可以完成语义的自动检查功能。各标准之间严格区分, 例如针对实时计算机系统建模需要采用实时模块完成。SysML 语言的核心在于根据统一化定义可以进行自动的推理与分析, 另外由于各系统在建模时采用相同的 SysML 语义, 方便各系统间明确和统一接口定义。

2 基于 SysML 仿真的基本原理

在 SysML 中, 我们可以分别对系统的硬件和软件进行建模, 并且可以对软硬件间的交互进行仿真。将各数字模型整合后仿真, 可以对系统的整体工作性能进行评估, 提早发现设计中存在的问题。

2.1 基本架构

针对建模对象的不同, SysML 建模的语义分为结构描述与行为描述两类。通常系统中的硬件设备和软件模块采用结构语义建模, 而工作逻辑和软件流程采用行为语义建模。结合两种语义形式就可以实现运载火箭电气系统的数字化建模, 模型中包含硬件和软件的各种功能逻辑, 可以完成指令传输与数据采集, 仿真模型中的主要元素如图 1 所示。在模型中加入数据驱动模块, 可以完成各设备间的信息交换, 实现系统的数字化仿真功能, 形成一套由事件驱动, 指令和数据驱动机制的仿真模型。

首先对电气系统组成单机或模块进行建模, 对元素间的关系进行描述, 将系统中的功能单元以及各单元间的信息交互关系进行分解抽象, 用块图和参数约束图进行构件形式的描述; 另外需要对电气系统状态及状态变化的状态基图进行描述, 对设备功能的切换, 任务流程调度等离散

时间进行描述与建模; 最后对电气系统功能流程等活动进行描述, 由控制流与对象流连接的方式, 给定动作的输入、输出、顺序和条件。

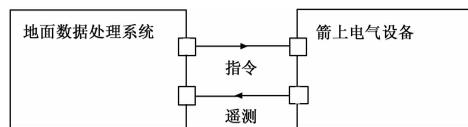


图 1 仿真模型中的主要元素

2.2 仿真方法

SysML 语言从系统总体功能和性能的角度描述系统, 并且能够将多领域模型集成到一起。以飞行控制系统为例, 由离散模型和连续模型构成, 其中离散模型设计原型描述系统的功能和行为, 设计原型描述系统的结构和组成。图 1~图 3 给出了一个简单的建模实例, 图 1 中的仿真模型是由两个箭载电气设备模块组成的静态结构图, 状态图描述电气系统每台单机设备和模块的功能和行为, 每个模块中的数值属性描述了设备中的有效信息, 对同一系统中两个设备的交互进行仿真。图 2 展示了模块的内部构架, 在描述模块之间通讯的同时对每台设备的指令动作也进行了建模。图 2 和图 3 对系统的结构和行为信息进行了完整的描述, 在此图形的基础上, 加入简单的逻辑代码, 就可以实现两个模块间数据的交互, 完成信息传递, 并可以将实时数据存入存储模块的属性值中。

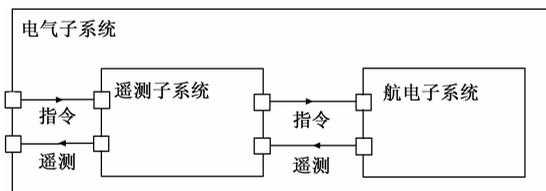


图 2 箭上电气设备

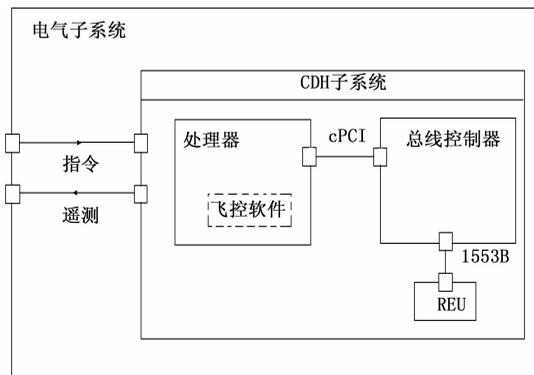


图 3 指令和数据处理系统建模

SysML 仿真的另一个优势在于可以将系统中多次重复的功能通过示例的形式进行循环仿真, 通过此功能可将复杂系统大大简化。运载火箭电气系统综合匹配仿真的过程中, 对部件重用的需求很大, 而 SysML 中建立了满足用户需求的部件库, 每个部件又按照部件的物理结构划分成产品部件模型, 部件模型为最小单位, 不可再分。仿真运行

时,系统操作的执行完全可控,可以做到对设备内各个节点的充分验证。在处理多路 1553B 总线数据链时这个功能显得尤为重要。

3 基于 SysML 的电气系统仿真模型设计

SysML 语言共定义了 9 种图形方式用以描述模型在各方面的特征,分别为需求图、行为图和结构图,结构图包括方框图、内部块图、包图和参数图。根据所提供的描述方式,采用自顶向下、逐层分解的思路,对运载火箭电气系统进行建模,模拟系统中的指令传输与数据处理功能。基于 SysML 的概念模型开发过程是模型驱动、以体系结构为中心、迭代递增的过程。仿真模型中包括用例图、块定义图、内部块图、活动图、顺序图、状态图和参数图等,电气系统仿真模型的总结构如图 4 所示。为了便于对模型封装,组成电气系统建模所需的部件达到重用目的,需要对典型电气系统的组成结构进行划分,包括测量部件、信号处理部件、信号调理部件和执行机构部件等。

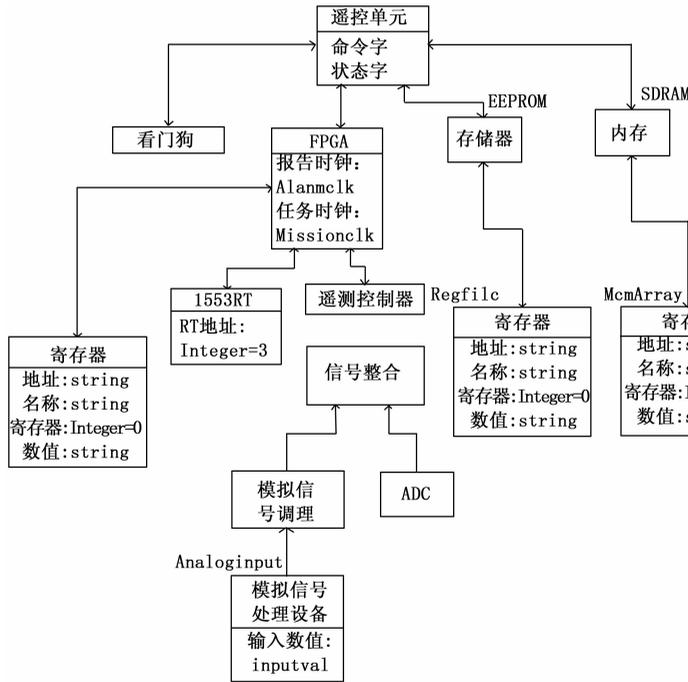


图 4 电气系统仿真模块的组成

3.1 指令处理建模

发送、接收和解包是电气系统处理输入命令时的三个关键流程,首先使用位操作模式对接收信号的处理过程进行建模,在模块逻辑关系属性中设置相应的数值并编写一定的说明性代码,可以明确电气系统工作的动作和状态。仿真模型中所有指令位都以字符串的形式建模,可以使用 Java 语言进行描述且形式上相对简单可靠。

为了使电气系统仿真模块能够发送信号并且识别不同的指令,需要引用标准指令和遥测代号的定义库。操作人员可以将仿真用到的一系列指令代码输入至这个定义库,通过这些定义库中的指令代码,可以将实际指令与仿真中的操作指令相结合。仿真模块可以对接收的输入指令进行

识别并形成完整的指令链,模拟电气系统工作。仿真运行时,所有的指令均以数字化形式运行,不需要与实际的硬件平台相对应。

除了完成指令生成和传输外,仿真模块还需要模拟指令的接收和纠错功能。由于受数字仿真的限制,遥测子系统的指令接收功能只是被描述为模块间的简单通路,而由 FPGA 控制的指令纠错功能则需要尽量与真实的运算逻辑相符。不仅要模拟指令格式的检查,还要实现指令类型的识别功能。仿真中用到的函数都是基于真实的硬件手册开发的。

经过指令检查纠错后,数据进一步传输至飞行软件模块,并完成信息的分解与处理,这些处理过程包括解包、提取和处理三个步骤。根据协议格式对数据信息进行解包,分离每条消息中嵌入的校验字,提取有效的操作位并根据指令信息执行动作。通过对指令处理的仿真,可以对双方通信协议的正确性进行充分的验证。仿真模块中的操作函数从接收的大量数据中剥离出针对某项功能的有效信息,这个过程中所有信息被当做字符处理,简化了分离与拼接的操作过程。

经过飞行软件处理后,系统接收的信息被转换为 1553B 总线通信格式发送至遥控单元进行处理。指令信息至 1553B 通信格式的转换是通过逻辑代码完成的,转换时使用与指令接收相同的定义库。完成格式转换后,数据信息被发送至 1553B 总线控制器,控制器将数据按发送顺序存储至堆栈模块。仿真运行时,总线控制器以固定的速率向总线上其它电气设备发送消息,但只对有效信息做出反馈。在此过程中,操作函数对总线数据字符进行分析和比较,并设定相应模块的属性值。

遥控设备收到有效的总线指令后,根据接收到的指令内容与模型中预先设定的硬件逻辑,更新部分存储器数值。由于电气系统设备的多样性,对硬件逻辑的仿真建模十分复杂,如果对逻辑通路中的每个环节做到全面建模需要大量的工作。为了简化建模,我们只对电气系统中的核心功能或需要考核的逻辑进行建模。另外,在建模时许多硬件单元重复出现(例如存储器),我们可以将单一的复杂模型合并,实现更加复杂的逻辑操作。仿真时各模块根据不同子地址通道中接收到的数值,对模块的属性参数进行更新,模块间通过属性参数的交互完成系统的整体功能。仿真过程中的每组参数组合都可以表征当前电气系统设备的状态和操作,图 4 给出了整个电气系统数字化仿真的功能逻辑框图。

3.2 仿真时钟建模

时钟仿真的目的是获取全局一致的物理或逻辑同步,确保仿真模块中各节点与时间相关的事件和数据的一致性。除了控制系统指令传输和总线数据处理外,对系统运行时钟的仿真也是运载火箭电气系统匹配数字化仿真中的关键问题之一,如何处理时钟信号将直接影响仿真结果的正确

性, 因此需要实现时钟的精确建模。时钟建模中包含两项关键流程: 仿真软件序列引擎与系统总线消息控制器。软件在仿真过程中其序列引擎中消息与时间的标签直接决定了各系统指令执行的精确时间, 为了使时间保持同步需要在几微秒内对指令标签进行处理, 例如 1553B 总线通讯需要在毫秒量级的固定周期内完成消息发送, 如果无法满足时间后期的条件限制, 系统将处于空闲状态并且很可能导致系统复位。为了确保匹配仿真中计时器的精度满足系统要求, 需要对时钟模块进行整合, 使其只能在特定事件下被触发。在这种模式下系统的仿真时间以及仿真周期将会与每一步操作和信息交互互相固联, 只有在前一布指令操作结束后, 才会执行仿真中的下一步指令。

3.3 故障模式建模

前面主要介绍了正常操作模式下电气系统硬件与软件的仿真, 而电气系统在故障模式下的仿真建模也非常重要。如何合理建立系统的故障模型, 测试系统在飞行过程中的工作边界, 为电气系统综合仿真提出了更高要求。由于运载火箭电气系统的高可靠性属性, 箭上各系统多采用冗余设计的模式, 因此往往为了更好的考核系统, 需要专门设置系统在一度故障甚至二度故障情况下的性能与流程仿真, 才能够充分验证和考核系统可靠性。实现故障模式下的仿真, 不仅能够避免采用真实设备测试引起的设备故障, 同时还可以在任意需要的节点注入故障, 增加了调整试验模式的灵活性。

通过描述故障中的信号传递机理, 建立故障模型库, 将可测故障与失效状态相关联。电气产品的失效状态在电路信号输出的状态与预期状态不一致。故障库的原始数据由测试常见故障中的故障数据驱动, 每个注入的故障传递到输出, 在信号输出上产生故障标记特征, 该脚本记录了失效的输出信号, 以及相应的失效状态。将脚本与相关故障载入故障库。当开展匹配仿真测试时, 对测试未通过的项目, 比较信号输出上产生的脚本与故障库中的脚本, 通过故障库中对信号机理的描述完成匹配试验中故障状态下的仿真与考核。

4 仿真结果与分析

针对典型运载火箭电气系统的基本功能搭建的相应的 SysML 模型, 并结合测试中的数据进行了仿真实验验证。在相同数据驱动的情况下。将系统仿真数据与真实匹配试验中获取的测试数据进行比对, 数据曲线基本吻合, 尽在部分模型简化较多的部分出现了一定的偏差。仿真结果表明(如图 5 所示), 除了由于真实试验中外系统扰动造成的数据偏差在简化模型下无法完全复现外, 其余仿真数据均与真实试验数据保持一致, 证实了采用 SysML 进行电气系统匹配试验仿真的有效性。

另外, 在故障状态下的仿真中, 我们对真实试验中无法实现的故障组合进行了全面仿真, 仿真结果表明利用数字化仿真可以有效提高电气匹配验证的覆盖性, 确保对所

有冗余设计的有效性进行考核。

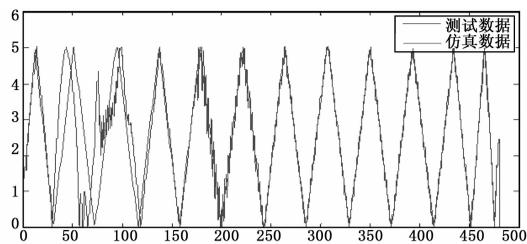


图 5 仿真数据与真实数据的比较

5 结束语

本文使用 SysML 语言对电气系统匹配试验中的软硬件进行了建模, 通过与真实试验中测试数据的对比表明仿真数据结果与真实数据基本吻合, 验证了使用数字仿真完成电气系统匹配验证的有效性和可行性。

本文只是搭建了较简单的仿真模型, 对仿真方法的基本原理进行了验证, 距离实现全箭电气系统完整的数字化仿真还有较远的距离, 实现通过仿真代替真实验证试验不仅需要大量的建模工作, 还需要提高仿真设备的并行计算能力。目前, 采用 SysML 建立的仿真模型基本可以满足系统验证的需求, 但在未来的工作中, 我们还需要对仿真软件的性能进行更深入的研究, 提高仿真精度, 使其更加接近真实设备的工作状况。

参考文献:

- [1] 王庆成. 航天器电测技术 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.
- [2] 于志坚. 对我国遥测技术发展的思考 [J]. 遥测遥控, 2003.
- [3] 张煜东, 吴乐南, 王水花. 专家系统发展综述 [J] 计算机工程与应用, 2010, 46 (19): 43-47
- [4] Rolston D W. Principles of artificial intelligence and expert systems development [M]. New York: McGraw-Hall, 1988: 22-23
- [5] 朱良平, 陶桓美, 李 靖. 运载火箭遥测参数实时自动判读研究 [J] 装备指挥技术学院学报, 2008, 19 (6): 67-70.
- [6] 刘竹生, 张博戎. 运载火箭总体设计多学科优化方法发展及展望 [J] 宇航总体技术, 2017 (2).
- [7] Holt J, Perry S. SysML for systems engineering [M]. Institution of Engineering and Technology, 2008.
- [8] Weillkiens T. Systems engineering with SysML/UML: modeling, analysis, design [M]. Morgan Kaufmann OMG Press/Elsevier, 2008.
- [9] Mhenni F, Choley J Y, Nguyen N, et al. Flight control system modeling with SysML to support validation, qualification and certification [J]. IFAC PapersOnLine, 2016, 49 (3): 453-458.
- [10] Baduel R, Chami M, Bruel J M, et al. SysML models verification and validation in an industrial context: challenges and experimentation [A]. European Conference on Modelling Foundations and Applications [C]. Springer, Cham, 2018: 132-146.