

基于MBSE与SysML的空空导弹系统架构建模研究



浦乐¹, 王西超^{2,*}, 杨艺³

1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471000

2. 上海电机学院电气学院, 上海 201306

3. 江苏理工学院, 江苏 常州 213000

摘要: 针对目前缺乏空空导弹系统架构建模方法的现状, 为实现系统设计之前对不同方案架构进行仿真以获得最佳系统架构, 研究了一种基于模型的系统工程(Model-Based System Engineering, MBSE)与SysML的空空导弹系统架构建模方法。首先将SysML引入MBSE方法中, 基于此研究空空导弹系统架构建模方法; 其次, 为实现空空导弹架构离散状态行为和连续动态行为的完整描述, 基于SysML模型参数图和状态图构建了带参数约束的空空导弹动态模型; 最后, 以某型号空空导弹为例, 对其系统架构进行了详细设计, 并进行了仿真实验验证。设计实践表明该方法能满足空空导弹架构建模的要求。

关键词: 空空导弹; 系统架构; MBSE; SysML; 参数图

中图分类号: V37

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2020.02.007

空空导弹系统是一个涉及机械、控制、电子、液压和软件等多种领域的复杂大系统^[1,2]。传统的空空导弹设计方法是一种文档驱动式设计方法, 主要包括系统方案设计、系统详细设计、系统软硬件联调、系统验证分析等多个步骤。随着航空技术的发展, 当前空空导弹设计方法转变为基于文档和数字化模型混合的设计方法, 但其本质上还是文档驱动式的设计方法。该方法各阶段的设计成果均为文字、图表等文档, 导致在各阶段之间传递的信息也是各种文档, 造成了设计方案表达不充分、信息表达的歧义性、领域设计之间存在鸿沟、文档的不可执行性以及软件测试工作量大等缺点。近年来, 基于模型的系统工程(MBSE)技术越来越得到工业界的认可^[3-5], MBSE是系统设计工作通过数字化设计手段的实现, 因此在工作流程上与传统系统工程并无太大差异, 仍然分为需求分析、系统分析、系统设计三个步骤^[6-8]。MBSE与传统系统工程方法主要的区别是利用模型代替传统的文档方式, 模型具有的唯一性和可执行性是其最大的特点。基于此, 本文引入基于SysML的系统架构建

模方法^[9,10], 在方案设计阶段利用基于MBSE的设计方法对空空导弹系统架构进行建模, 并对不同系统架构进行仿真分析, 最终获得最优系统架构, 实现在方案论证阶段减少甚至消除设计中的逻辑错误, 避免到设计后期才发现由于逻辑错误而造成循环设计^[11-13]。

1 MBSE理论概述

本文展开基于MBSE的空空导弹系统架构设计工作。从需求分析和用例出发, 利用RHAPSODY建模工具, 基于MBSE方法和SysML建模语言, 对空空导弹系统架构进行建模与仿真, 主要包括基于SysML的需求分析、系统分析和系统设计三个部分, 最终实现在空空导弹系统方案设计阶段对其架构进行仿真, 获得最优系统架构。

(1) 需求分析

该阶段目的是将军方原始需求转化为系统需求, 同时依据需求定义空空导弹用例, 详细描述系统的行为, 主要通过SysML的需求图和用例图表达。

收稿日期: 2019-10-30; 退修日期: 2019-11-13; 录用日期: 2019-12-09

基金项目: 航空科学基金(20170112006, 2017515/2037)

*通信作者: Tel.: 18601762898 E-mail: wangxc@sdju.edu.cn

引用格式: Pu Le, Wang Xichao, Yang Yi. Research on architecture modeling of air to air missile system based on MBSE and SysML[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(02): 54-59. 浦乐, 王西超, 杨艺. 基于MBSE与SysML的空空导弹系统架构建模研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(02): 54-59.

(2) 系统分析

该阶段主要是把系统需求分解为功能性需求和非功能性需求,同时将系统功能性需求转化为若干个可执行模型,利用 SysML 的顺序图、活动图和状态来实现每一个用例的分析。

(3) 系统设计

该阶段分为架构分析与架构设计两个阶段。架构分析阶段是利用顺序图、活动图和状态图对不同的系统架构进行评估分析,获得最佳系统架构。架构设计阶段功能性需求分配到系统架构的结构中,从而完成系统设计。

2 需求分析

需求分析是指对空空导弹进行详细的分析,弄清楚空空导弹的战术要求,包括需要输入什么命令、什么数据,最后应该输出什么、做出什么机动动作。具体的需求分析包括功能需求、性能需求、接口需求和约束需求等。首先将 DOORS 中条目化的军方需求和量化的性能需求逐条转化为 SysML 的需求图,使得每条细化后的需求都能够以用例图来进行动态行为分析。需求模型的功能主要是将军方提出的战术需求转换为系统需求,军方需求是以自然语言表达的,如飞行速度达到马赫数 5 等,其中系统需求的表达形式要符合空空导弹领域专业术语规范。需求模型既包含军方对空空导弹提出的各种需求,如空空导弹的功能需求和非功能性需求等,还包含相关的空空导弹设计规范和空空导弹设计相关的国军标。SysML 设计的空空导弹需求模型可以逐层分解为多个具体的需求图,图 1 为其中一幅空空导弹需求图,图中军方需求 ID 用“ARMY”开头,系统需求 ID 用“SYS”开头。其中“ARMY_GJB1”和“ARMY_GJB2”表示相关的国军标军方需求,其余的 9 个需求均是由这两个军方需求进行内部具体分析获得。“<<trace>>”由系统需求指向军方需求,表示该系统需求是由所连接的军方需求进一步分析获得。另外要注意的是,军方需求和系统需求不是一一对应的关系,如系统需求“SYS4”是由两个军方需求共同具体分析后获得的,系统需求本身之间也存在层次性关联,如系统需求“SYS2.1”和“SYS2.2”均是由“SYS2”进一步细化而来。

3 系统分析

系统分析主要运用 SysML 的行为图,包括用例图、活动图、状态图和顺序图。其中用例图用来描述系统的功能性需求行为,并确定系统边界和参与者;活动图描述系统的工作流程;状态图描述单个对象的内部状态变化;顺序图描

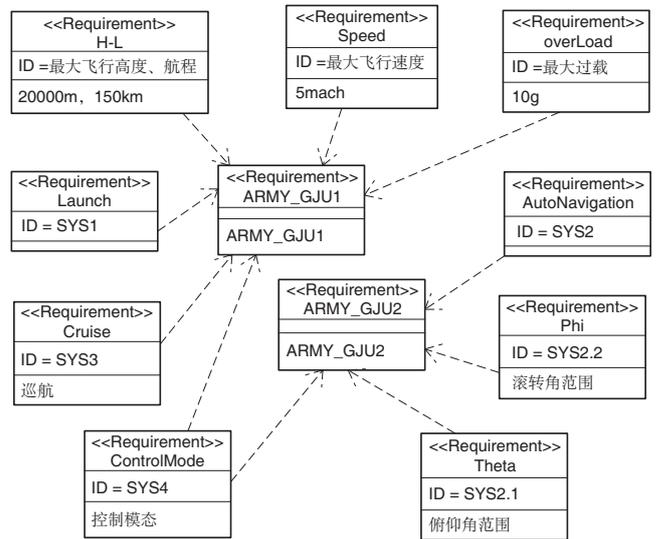


图 1 空空导弹顶层需求图

Fig.1 Requirements diagram of air-to-air missile

述不同对象之间的顺序交互。

(1) 用例行为分析

在军方需求模型设计完成后,空空导弹设计师需要将需求模型分为功能性需求和非功能性需求,其中功能性需求主要包含空空导弹本身需要做的事情以及军方期望空空导弹将来要做的事情。非功能性需求主要包含空空导弹的性能、可靠性和安全性等。其中,功能性需求能够使用用例图进行建模。空空导弹用例模型建模的基本方法是:首先依据功能性需求划定空空导弹系统边界,然后根据空空导弹的典型使用方式挖掘出在系统边界以外直接与空空导弹进行交互的各种参与者,最后针对功能性需求所期望的空空导弹应该提供的每一项功能定义一个用例。图 2 为空空导弹主用例图,主要包含初制导、中制导、末制导、弹道解算和攻击区解算 5 个子用例。弹道解算用于实时解算攻击过程中被攻击目标的位置、速度和姿态信息,初制导、中制导和末制导均包含弹道解算用例;攻击区计算用例是计算空空导弹的攻击覆盖范围,其方法是利用空空导弹载机和被攻击目标的相对态势进行计算,根据计算结果判断空空导弹是否满足发射条件,初制导包含攻击区计算用例。

(2) 系统交互行为分析

按照以上方法,对每个功能性需求都进行层次性的用例分解,直至将所有的功能性需求全部用相关用例表达出来,完成空空导弹的需求分析。图 3 对导弹典型飞行状态进行系统分析,获得传感器、制导计算机、飞控计算机、发动机和空空导弹本体这五者之间的顺序交互行为,惯导等多

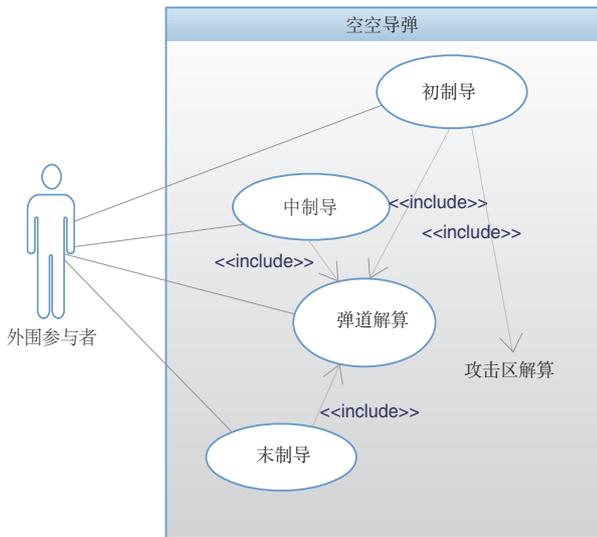


图2 空空导弹顶层用例图
Fig.2 Use case diagram of air to air missile

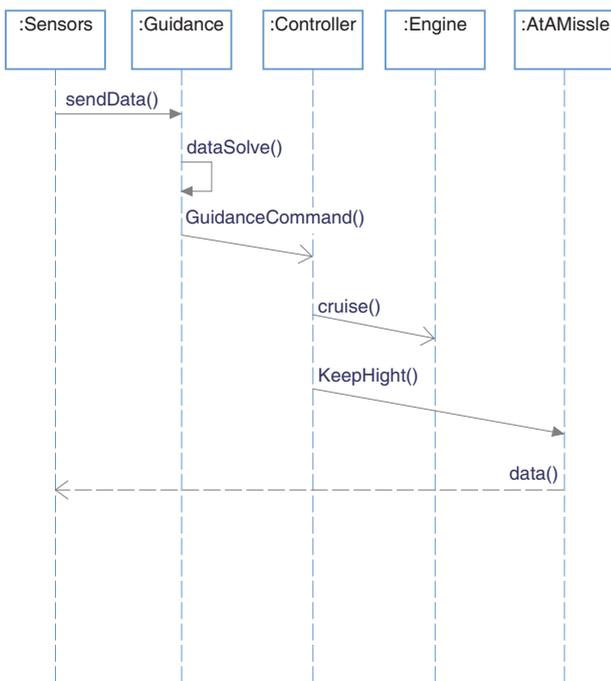


图3 空空导弹飞行状态顺序图
Fig.3 Sequence diagram of air-to-air missile

种传感器将采集到的空空导弹飞行状态信息发送给制导计算机,制导计算机依据导弹飞行状态进行制导律解算,并发送制导指令给飞控计算机,飞控计算机依据制导指令向发动机和导弹本体的执行部件发送发动机控制命令和姿态控制命令。

至此,经系统分析可以得到空空导弹系统的外围参与

者,交互对象传感器、制导计算机、飞控计算机、发动机和空空导弹本体模块的部分输入输出事件、属性、操作、状态以及模块间的事件、数据传递等信息均已获得。

4 系统设计

系统设计依照特定的系统设计逻辑方法,完成系统功能、结构设计,以及参数化表征,即对上述系统分析获得的系统信息,设计空空导弹架构模型,包括静态结构建模、动态行为建模以及约束关系建模三个部分。

(1) 静态结构建模

其中静态结构模型由包图、块定义图、对象图、内部块图构成。包图的主要功能是对SysML的各种图按性质进行分类;块定义图显示了使用“块”的组件进行系统静态结构建模的基本构成,这些组件可以通过接口与其他组件进行连接,“块”可以代表硬件,也可以代表软件,还可以代表其他类型的组件;内部块图则是显示组件内部的组成,其中连接器显示内部“零件”如何连接到外部接口以及彼此之间是如何连接的;对象图是组成系统的各个“块”的实例化模型,可以进行仿真运行。图4给出了由块定义图建模的空空导弹静态结构模型,空空导弹模型(AtAM)由制导系统模型(Guidance)、控制系统模型(Control)、传感器模型(Sensor)、推力系统模型(Thrust)和导引头模型(Seeker)构成。块定义图采用自顶向下的分解模式,将空空导弹的功能分解到不同的子系统,各个子系统分别进行建模,子系统间通过接口进行数据和信息的传递。

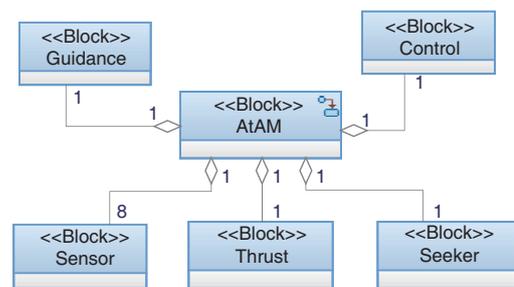


图4 空空导弹静态结构模型
Fig.4 Static structure model of air-to-air missile

(2) 动态行为建模

动态行为模型由顺序图、状态图和活动图组成,其中顺序图用来描述组成空空导弹的各个组件之间的交互顺序;活动图是整个空空导弹各个组件间的功能流程;活动图用来描述单个组件内部的状态变化。状态图是描述一个对象

基于事件或者守卫条件反应的动态变化行为,描述了对象自身是如何依据当前状态对不同条件和不同事件做出反应的。

图5为空空导弹典型作战过程状态图描述,将整个导

弹作战过程分解为随载机飞行、导弹加电、自检、对准、准备、发射、自主飞行和击中目标8个状态,各个状态间以飞行员操作、载机飞行参数条件和导弹自身状态作为状态迁移条件,建立空空导弹典型作战过程描述。

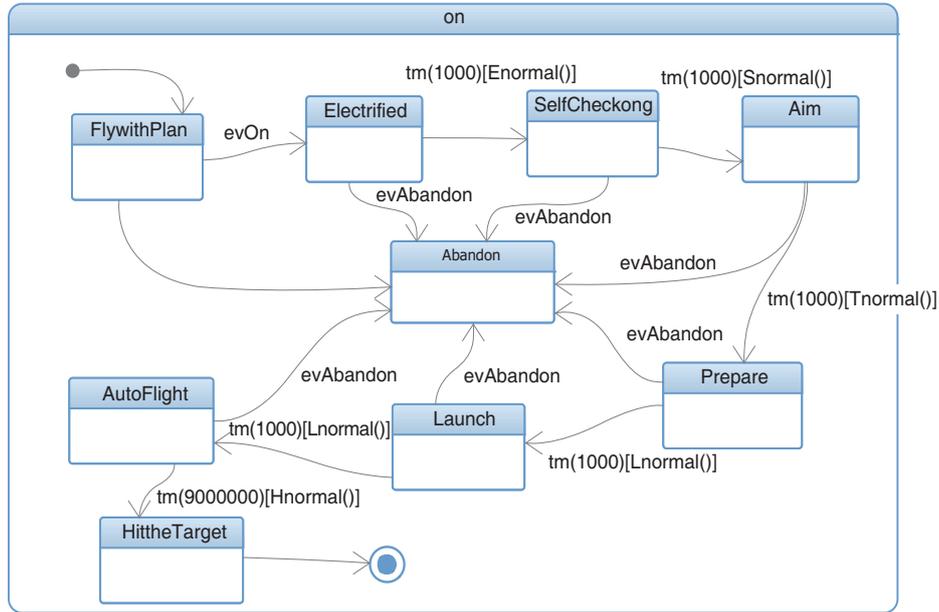


图5 空空导弹动态行为模型

Fig.5 Dynamic behavior model of air to air missile

(3) 约束关系建模

空空导弹的约束关系众多,如弹体、制导设备、导引头等部件之间的质量约束关系,空空导弹气动力、空气阻力间的约束关系等,约束关系建模由需求图和simulink扩展图构成。参数图是SysML的一种内部块图,描述了“块”及其内部属性和零件之间的约束关系,参数图描述了一种系统结构参数的变化如何影响其他结构参数的变化。图6为空空导弹力和力矩的参数约束关系模型,空空导弹模块的各个属性通过约束参数端口传递给约束属性模块(Constraint Property),图中“Fxyz_and_Txyz”约束属性模块表示空间三轴方向上的力和力矩计算;“DynamicModel”约束属性模块表示空空导弹所受力、力矩与线速度、角速度之间的约束关系。

(4) 系统验证

系统验证主要为经过静态结构图、动态行为图和参数图的协同仿真,验证系统设计是否满足需求。图7为“自主飞行”状态的仿真图,可以看出RHAPSODY中“AutoFlight”模态变为红色,表明目前空空导弹状态为“自主飞行”状态,满足设计要求。

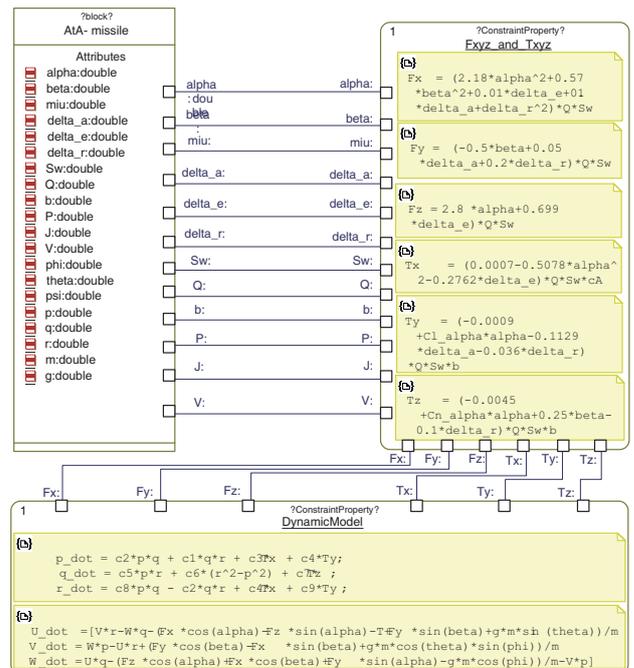


图6 空空导弹参数图

Fig.6 Parameter diagram of air to air missile

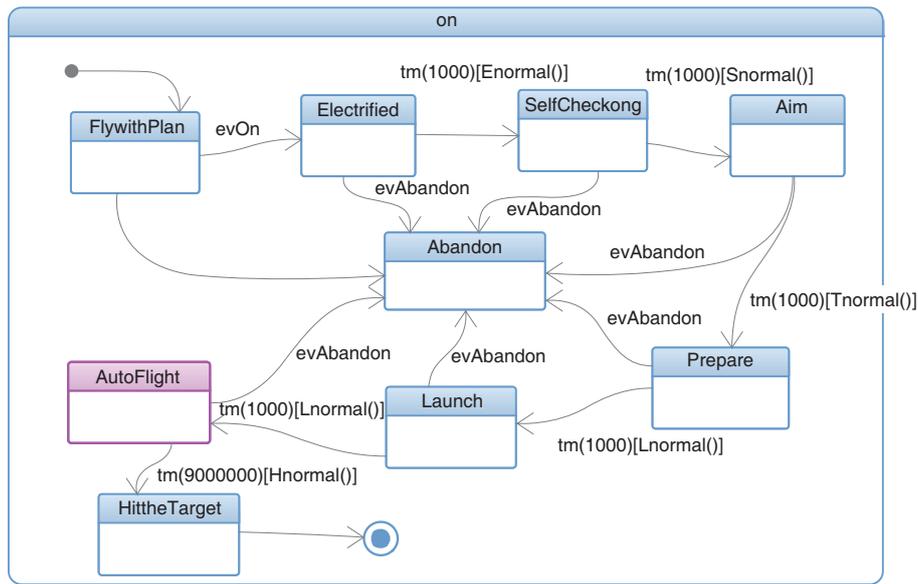


图7 自主飞行状态验证

Fig.7 Autonomous flight status verification

5 结束语

本文采用MBSE和SysML对空空导弹系统进行可视化建模,通过SysML的需求图、用例图、块定义图、内部块图、顺序图、状态图和参数图对空空导弹的军方需求、架构模型和约束关系进行了分析。建立了空空导弹从随载机飞行到击中目标全过程的状态迁移模型,并结合参数约束关系模型,实现了空空导弹架构离散状态行为和连续动态行为的完整描述。应用实例表明,利用SysML是实现MBSE方法的最优选择,并可有效提高空空导弹系统开发的进度与质量。

AST

参考文献

- [1] Ochi Y. Missile guidance law design based on two-degree-of freedom bearing control[C]// Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Austin, TX, 2003:11-14.
- [2] Liaw D C. Nonlinear control for missile terminal guidance, journal of dynamic systems [J]. Measurement and Control, 2000(122): 663-668.
- [3] Spangelo S C, Kaslow D, Delp C, et al. Applying Model Based Systems Engineering (MBSE) to a standard cubesat[C]// Proceedings of IEEE Symposium on Aerospace Conference Aerospace Conference, 2012.
- [4] Wibben D R, Fu Rfaror. Model-based systems engineering approach for the development of the science processing and operations center of the NASA OSIRIS-REx asteroid sample return mission[J]. Acta Astronautica, 2015,115: 147159.
- [5] Wu Q, Gouyon D, Hubert P, et al. Towards Model-Based Systems Engineering(MBSE) patterns to efficiently reuse knowhow [J]. Insight, 2017,20(4) :3133.
- [6] Vipavetz K, Shull T A, Infeld S, et al. Interface management for a NASA flight project using Model-Based Systems Engineering (MBSE) [J]. IncoSE International Symposium, 2016, 26(1): 1129-1144.
- [7] Schindel B, Dove R. Introduction to the agile systems engineering life cycle MBSE pattern[J]. IncoSE International Symposium, 2016, 26(1) :725-742.
- [8] Weilkiens T, Scheithauer A, Maio M D, et al. Evaluating and comparing MBSE methodologies for practitioners [C]// IEEE International Symposium on Systems Engineering. IEEE, 2016: 1-8.
- [9] Min B I, Kerzhner A A, Paredis C J J. Process integration and design optimization for model-based systems engineering with SysML[C]// ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2011: 1361-1369.
- [10] Paredis C J J, Bernard Y, Burkhart R M, et al. An overview of the SysML-modelica transformation specification[J]. IncoSE International Symposium, 2010, 20(1):709-722.

- [11] Bozzano M, Cimatti A, Pires A F, et al. Formal design and safety analysis of AIR6110 wheel brake system[C]// International Conference on Computer Aided Verification, 2015: 518-535.
- [12] David P, Idasiak V, Kratz F. Automating the synthesis of Alta Rica Data-Flow models from SysML[C]// in Reliability, Risk and Safety, Three Volume Set: Theory and Applications; Proc. of European Safety and Reliability Conference (ESREL09), 2009: 105-112.
- [13] 王西超. 飞行控制系统数字化设计顶层建模与模型集成技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.
- Wang Xichao. Resrarch on system high level modeling and model integration technology for flight control system digital

design[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese) (责任编辑 王昕)

作者简介

浦乐(1983-)男, 学士, 高级工程师。主要研究方向: 信息系统设计。

Tel: 13643794006 E-mail: pu022@163.com

王西超(1982-)男, 博士, 讲师。主要研究方向: 基于Sysml的系统架构设计、基于MBSE的系统设计、飞控系统设计。

Tel: 18601762898 E-mail: wangxc@sdju.edu.cn

杨艺(1985-)男, 博士, 讲师。主要研究方向: 飞行器控制系统设计。

Tel: 18502563458 E-mail: 5604993@qq.com

Research on Architecture Modeling of Air to Air Missile System Based on MBSE and SysML

Pu Le¹, Wang Xichao^{2,*}, Yang Yi³

1. Air Missile Research Institute, Luoyang 471000, China

2. Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China

3. Jiangsu University of Technology, Changzhou 213000, China

Abstract: Due to the lack of air-to-air missile system architecture modeling method at present and in order to achieve the best system architecture by simulating different schemes before system design, a modeling method of air-to-air missile system architecture based on MBSE and SysML is studied. Firstly, SysML is introduced into the MBSE method, and the modeling method of air-to-air missile system architecture based on MBSE is studied. Secondly, in order to realize the complete description of discrete state behavior and continuous dynamic behavior of air-to-air missile architecture, a dynamic model of air-to-air missile with parameter constraints is constructed based on the parameter diagram and state diagram. Finally, taking a certain type of air-to-air missile as an example, the system architecture is designed in detail and verified by simulation. Design practice shows that the method can improve the requirements of air-to-air missile architecture modeling.

Key Words: air-to-air missile; system architecture; MBSE; SysML; parameter diagram

Received: 2019-10-30; **Revised:** 2019-11-13; **Accepted:** 2019-12-09

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20170112006, 20175152037)

*Corresponding author. Tel. : 18601762898 E-mail: wangxc@sdju.edu.cn