

文章编号: 1674-8190(2024)02-152-14

MBSE 在航空飞行控制系统的应用研究

陈宣文, 黄晖, 戴小氏

(航空工业西安航空计算技术研究所 第十九研究室, 西安 710068)

摘要: 现代飞机系统的复杂性不断增长, 传统的开发方法在管理和维护方面变得越来越具有挑战性。首先, 对航空飞控系统研发过程在当前系统工程实践方面进行了评估, 阐述了传统开发方式的不足和基于模型的系统工程(MBSE)的核心原则和优点, 以及在实现中常用的工具和方法; 然后, 展示了 MBSE 如何在飞行控制系统研发时使用模型来支持复杂系统的规范、设计、分析、验证和确认的过程; 最后, 结合先进的 MBSE 工具和方法的发展, MBSE 结合敏捷的开发前景, 以及提高 MBSE 实践的互操作性和标准化的需求对未来的研究方向进行了展望。本文研究为利用 MBSE 方法论和工具来改进飞行控制系统的设计、开发和性能感兴趣的航空工业专业人员、系统工程师提供资源和解决思路。

关键词: MBSE; SysML; 飞行控制系统; 数字线程; 基于模型的测试

中图分类号: V243; TP29

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.02.17

Application of MBSE in aviation flight control system

CHEN Xuanwen, HUANG Hui, DAI Xiaodi

(The Nineteenth Research Laboratory, AVIC Xi'an Aeronautics Computing
Technique Research Institute, Xi'an 710068, China)

Abstract: As the complexity of modern aircraft systems continues to grow, traditional development methods become increasingly challenging in terms of management and maintenance. Firstly, the development process of aviation flight control system is evaluated in the current system engineering practice, and the shortcomings of traditional development methods and the core principles and advantages of model-based system engineering (MBSE) are expounded, as well as the tools and methods commonly used in implementation. Then, it shows how MBSE supports the process of specification, design, analysis, verification and validation of complex systems by using models in flight control system development. Finally, the future research directions are proposed, including the development of advanced MBSE tools and methods, the prospect of MBSE combined with agile development, and the need to improve interoperability and standardization of MBSE practices. The study in this paper can provide the resources and ideas for aerospace industry professionals and systems engineers interested in using MBSE methodology and tools to improve the design, development, and performance of flight control systems.

Key words: MBSE; SysML; flight control system; digital threads; model-based test

收稿日期: 2023-06-16; 修回日期: 2023-11-19

通信作者: 陈宣文(1976-), 男, 学士, 高级工程师。E-mail: chenxuanwen760108@163.com

引用格式: 陈宣文, 黄晖, 戴小氏. MBSE在航空飞行控制系统的应用研究[J]. 航空工程进展, 2024, 15(2): 152-165.

CHEN Xuanwen, HUANG Hui, DAI Xiaodi. Application of MBSE in aviation flight control system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(2): 152-165. (in Chinese)

0 引言

基于模型的系统工程(MBSE)的概念被首次提出始于2007年的国际系统工程协会(INCOSE)的国际研讨会^[1],以形式化的建模为基础,从概念设计阶段开始系统需求、设计、分析、验证和确认活动,并在整个开发和后期生命周期阶段继续进行。MBSE取代过去由系统工程师实践的以文档为中心的方法,并通过完全集成到系统工程过程的定义来影响系统工程的实践。MBSE应用在各个行业稳步增长,包括航空航天、汽车和国防^[2-3]。航空飞控系统直接影响到飞行安全,具有高安全、高可靠要求,采用基于模型的方法论更加高效、完整和正确地完成航空飞控系统的各项设计开发工作成为了重要的研究方向。

本文针对航空飞行控制系统应用和实施MBSE进行探索,对航空飞控系统研发过程在当前系统工程实践方面进行了评估,展示了MBSE如何在飞行控制系统研发时使用模型来支持复杂系统的规范、设计、分析、验证和确认的过程,结合先进的MBSE工具和方法的发展、MBSE结合敏捷的开发前景以及提高MBSE实践的互操作性和标准化的需求对未来的研究方向进行了展望,以期为航空飞行控制项目选择最合适的MBSE方法和工具,实施和评估MBSE试点项目,扩大整个行业对MBSE的应用并建立治理机制,与行业合作伙伴、监管机构和标准组织合作,成为航空飞行控制系统推广MBSE的最佳实践。

1 当前系统工程实践的评估

1.1 传统系统工程实践

高复杂性与高风险并存的大型飞机代表项目如波音787和F-35,虽然严格按照系统工程进行管理,却屡屡出现延迟交付和成本超支等问题^[4]。航空飞行控制系统的传统系统工程实践基于以文档为媒介,依赖文本描述和静态图来表示系统信息。这些方法导致难以在系统开发生命周期的不同阶段保持各个组成元素信息的一致性、可追溯性和可重用性,尤其存在涌现性问题^[5],同时还有不同利益相关者之间的沟通和协作一致性方面的矛盾。此外,航空系统日益复杂,F-35的软件代码已经达到800万行,导致对系统工程活动的更高要求,例如需求分析、架构设计以及预先验证和确认。传统系统工程实践难以满足这些需求,只能

在中后期的数学仿真、地面半物理仿真和试验试飞环节才能发现并解决问题,从而导致更长的开发时间、更高的成本以及与系统故障相关的风险增加。传统系统工程实践需要进行基于文档向基于数字化模型的开发范式转变,以适应高安全、高可靠的飞控系统开发要求。

1.2 MBSE工程应用实践

近年来,国内外科研院所的专家和工程技术人员对基于MBSE的相关专业的应用进行了大量的研究、实践和探索,特别是航空^[6-11]、航天^[12-16]、高铁动车^[17-19]等相关复杂系统采用建模范式开发的应用,积累了相当的理论和实践经验。伴随着国外MBSE技术的推动,基于模型驱动的系统工程开发技术在国内航空业的系统研制中进行应用和推广。具有代表性的有新舟600、ARJ21等型号的显控系统软件研制采用了Simulink模型开发,C919飞行显控软件研制采用SCADE进行模型开发^[20]。在国外,空客公司采用MBSE流程来开展A350全生命周期阶段的研发,美国航空航天局NASA也积极推进MBSE在航天领域中的应用,尤其目前国外最新发布B-21“突袭者”项目中,诺斯罗普·格鲁曼公司运用MBSE结合高精度数字模型实现数字孪生,利用诸如高度沉浸式虚拟环境、增强现实和虚拟现实等先进技术,使得工程师能够模拟飞机各方面要求例如武器系统、隐身能力和燃油效率。针对开发过程的早期识别和解决潜在的问题,在模拟分析中不断修正模型,降低了后期设计更改的代价高昂的可能性,并缩短了总体开发时间^[21-22]。

1.3 MBSE在航空飞行控制系统领域的开发优势

相对于传统系统工程开发方法,MBSE从传统的“基于文档报告为中心”变为“基于模型为中心”,使用可视化的数字化模型作为利益相关者沟通的核心基础,设计者的精力更多集中到和业务逻辑相关的工作。通过为系统设计和开发提供更正式、更严格和集成的数学方法,航空飞行控制系统应用MBSE可以解决传统系统工程实践的一些局限性。MBSE从概念设计阶段到整个产品生命周期,MBSE提供高风险航空飞控任务运行所需的端到端可追溯性、协作、任务管理功能,并使得航空任务数字化开发成为可能。MBSE结合了系

统架构模型和传统领域模型(如图 1 所示),以确保系统在每个生命周期阶段满足所有要求。通过基

于模型正向分析的更严格验证提高系统可靠性和安全性。

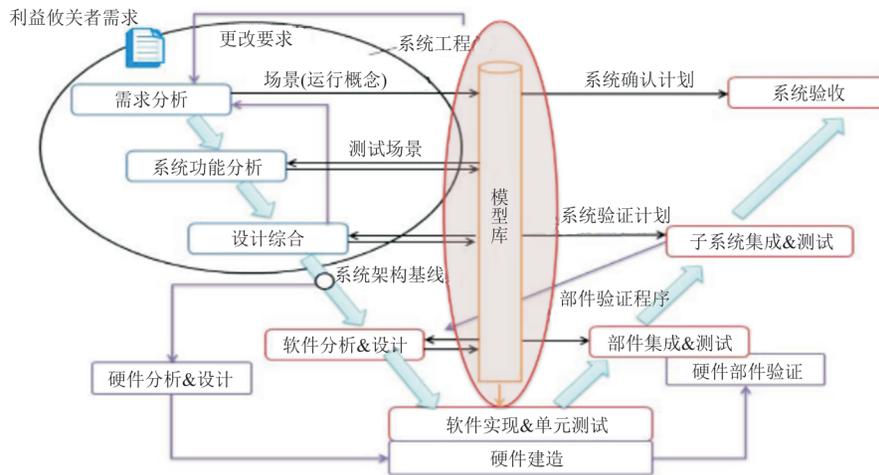


图 1 基于模型的系统工程

Fig. 1 Systems engineering based on model

2 MBSE 方法论和工具的选择

MBSE 方法论和工具的比较如表 1 所示。考虑将以下 MBSE 方法和工具用于航空飞行控制系统: SysML^[23] 及其相关工具(例如 IBM Rhapsody^[24]、MagicDraw^[25]等)。

SysML 是一种广泛使用的 MBSE 语言,非常适合航空领域并得到各种商业工具的支持。这些工具提供不同级别的可扩展性、易用性和集成功能。

表 1 MBSE 方法论和工具的比较
Table 1 Comparison of MBSE methodologies and tools

方法论	工具	特点
INCOSE OOSEM	EA	是一个自顶向下、场景驱动的过程,它使用 SysML 来支持系统的分析、规范、设计和验证
Dior OPM	Op cat	OPM 将形式化的可视化模型 OPD(Object Process Diagram)和受严格限定的自然语法 OPL(Object-Process Language)结合在一起,用于表达系统的功能、结构和行为
Assault Magic Grid	Magic Draw	使用表格的形式表达 MBSE 的各个工作流程,通过建立各阶段模型之间的关系,可以统计需求覆盖情况,以及对模型进行追踪
IBM Harmony	IBM Rational Harmony-SE	包含了三个顶层流程:需求分析、系统功能分析和设计综合,支持 SysML、UML 和其他建模语言,专为模型驱动开发和代码生成而设计,支持安全关键和实时系统,与其他 IBM 工具和第三方插件集成与其他工具相比相对昂贵
Arcadia	Capella	开源且免费使用,为系统工程和架构量身定制,清晰的功能分析和系统分解方法,活跃的社区与发展,仅限于 Arcadia 方法论,与 SysML 和 MagicDraw 相比不够成熟
Ansys	ModelCenter	强大的仿真和分析能力,支持多域和多物理模拟, SysML、ModelCenter 等 MBSE 工具集成,广泛应用于航空航天、汽车、电子等各行业,较少关注 SysML 等系统建模语言,专注于模拟和分析,可能需要额外的工具来实现完整的 MBSE 解决方案
AADL	OSATE	专为实时、安全关键型和嵌入式系统而设计,适用于航空电子系统的建模和分析,支持性能、安全性和可靠性分析,适用于航空电子系统的建模和分析,支持性能、安全性和可靠性分析特定于航空和类似领域,与 SysML 等通用 MBSE 工具相比,通用性较差
IBM RUP	IBM Rational RUPEE	RUP SE 将 RUP 中的并行设计和迭代开发概念引入系统工程领域,从角色、工件和任务的角度对系统设计工作进行分解和分类,最终形成工作分解结构(WBS)

AADL(Architecture Analysis and Design Language)及其相关工具(例如 OSATE)。AADL 是一种特定领域的 MBSE 语言,专门用于分析和设

计安全关键的实时系统,例如航空飞行控制系统。OSATE 是一种开源工具,支持 AADL 建模和分析活动^[26]。

其他 MBSE 方法 (例如 IBM Telelogic Harmony-SE^[27]、INCOSE OOSEM^[28] 等) 提供了 MBSE 的替代方法,可能更适合特定项目或组织,取决于对项目的具体要求、组织背景和可用资源。

3 MBSE 在飞行控制系统的应用

MBSE 在飞控系统设计过程中的应用过程包括:1) 运用用例图完成需求分析和规范阶段的工作;2) 运用追踪矩阵来保证需求在开发过程中的可追溯性;3) 系统架构和设计过程中,运用块图和内部块图进行静态结构建模,使用活动图、顺序图和状态机进行动态行为建模;4) 运用 AADL 在实时、安全关键型和嵌入式系统的优势进行飞控系统性能、安全性和可靠性分析;5) 运用数字线程并

持续验证进行飞控系统实施和集成;6) 运用基于模型的测试和仿真自动生成测试用例和程序,在控制律数学仿真、飞行员在环测试、铁鸟台架和试验试飞等关键过程完成最终验证和确认。

3.1 需求分析和规范

使用 SysML 来捕获和表示需求, SysML 提供了一组丰富的图表和结构 (结构图例如块定义、内部块), 行为图 (例如活动、序列、状态机) 以结构化、可视化的格式捕获和表示飞控系统需求, 促进利益相关者对系统的共同理解, 使用模型进行需求管理还可以实现需求文档的高效共享和版本控制^[29]。飞控系统功能需求分析过程如图 2 所示。

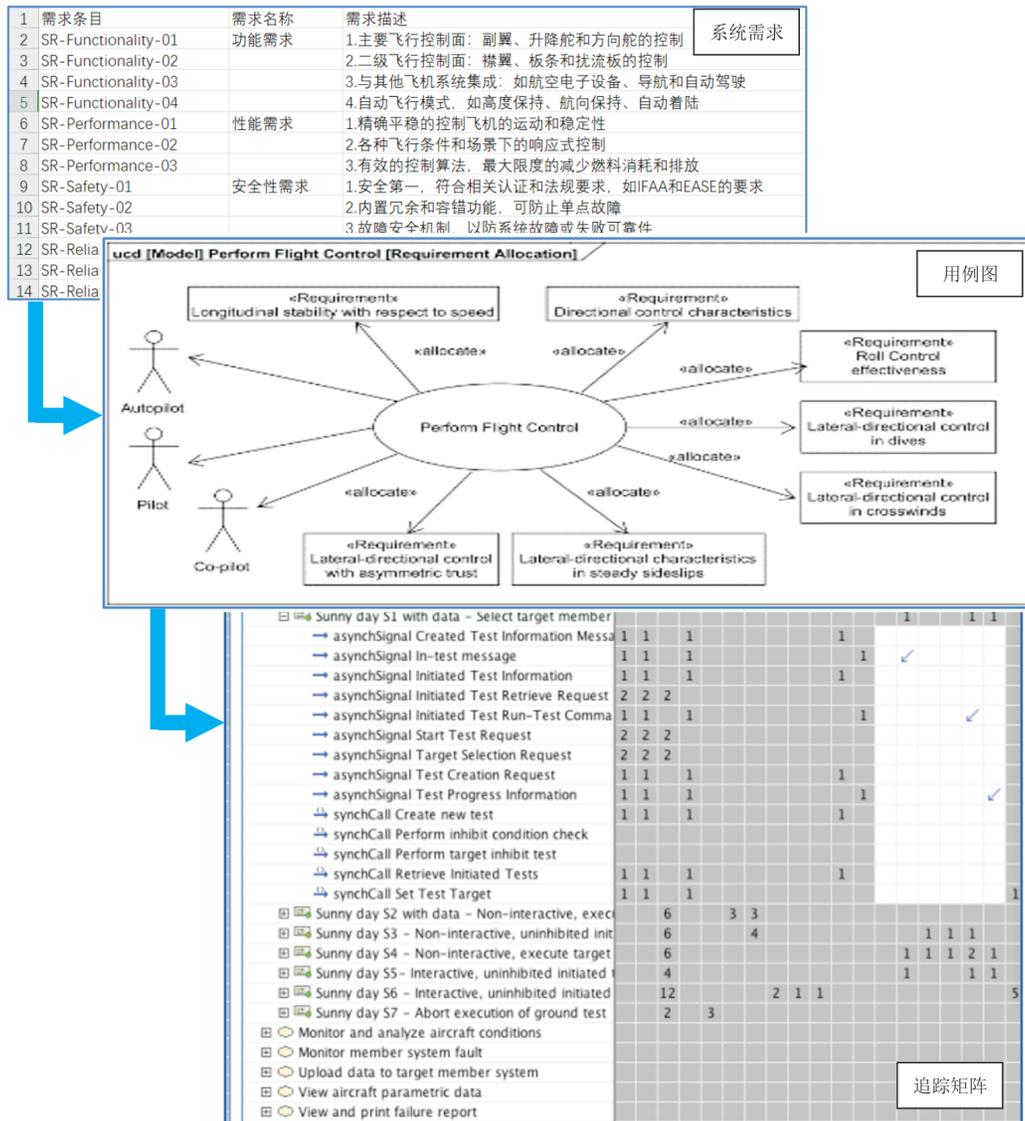


图 2 飞控系统功能需求分析过程
Fig. 2 Analysis process of functional requirements of flight control system

首先,系统需求采用条目化、文字化的形式作为输入;然后,用例图通过描述用户使用系统提供的某种服务实现一个目标的方式来说明系统的需求;最后,追踪矩阵将用户需求与测试用例联系起来并追踪,用于通过测试用例映射和跟踪用户需求,捕获客户提出的所有需求和需求可追溯性。

3.2 需求在开发过程中的可追溯性

MBSE 通过将需求链接到模型中的系统元素

(例如,组件、接口、行为)自动生成可追溯性矩阵如图 3 所示,有助于在整个开发过程中跟踪和管理需求、设计元素和验证工件之间的关系。改进的可追溯性有助于更好地进行变更管理、影响分析和整体项目管理^[30]。需求可追溯性矩阵的主要目的是验证测试用例是否全面检查和覆盖了所有需求,保证了软件测试期间不会出现取消任何功能的情况。

需求条目	需求名称	需求描述	系统需求
2	SR-Functionality-01	功能需求	1.主要飞行控制面:副翼、升降舵和方向舵的控制
3	SR-Functionality-02		2.二级飞行控制面:襟翼、板条和扰流板的控制
4	SR-Functionality-03		3.与其他飞机系统集成:如航空电子设备、导航和自动驾驶
5	SR-Functionality-04		4.自动飞行模式,如高度保持、航向保持、自动着陆
6	SR-Performance-01	性能需求	1.精确平稳的控制飞机的运动和稳定性
7	SR-Performance-02		2.各种飞行条件和场景下的响应式控制
8	SR-Performance-03		3.有效的控制算法,最大限度的减少燃料消耗和排放
9	SR-Safety-01	安全性需求	1.安全第一,符合相关认证和法规要求,如IFAA和EASE的要求
10	SR-Safety-02		2.内置冗余和容错功能,可防止单点故障
11	SR-Safety-03		3.故障安全机制,以防系统故障或失败可靠件
12	SR-Reliability		
13	SR-Reliability		
14	SR-Reliability		

测试用例	需求 1	需求 2	需求 3	需求 4	需求 5	需求 6	需求 7	需求 8	需求 9	需求 10	需求 11	
Sunny day S1 with data - Select target member										1	1	1
→ asynchSignal Created Test Information Message	1	1	1			1						
→ asynchSignal In-test message	1	1	1			1						
→ asynchSignal Initiated Test Information	1	1	1			1						
→ asynchSignal Initiated Test Retrieve Request	2	2	2									
→ asynchSignal Initiated Test Run-Test Command	1	1	1			1						
→ asynchSignal Start Test Request	2	2	2									
→ asynchSignal Target Selection Request	2	2	2									
→ asynchSignal Test Creation Request	1	1	1			1						
→ asynchSignal Test Progress Information	1	1	1			1						
→ synchCall Create new test	1	1	1			1						
→ synchCall Perform inhibit condition check												
→ synchCall Perform target inhibit test												
→ synchCall Retrieve Initiated Tests	1	1	1			1						
→ synchCall Set Test Target	1	1	1									1
Sunny day S2 with data - Non-interactive, execute	6		3	3								
Sunny day S3 - Non-interactive, uninhibited initiated	6		4					1	1	1		
Sunny day S4 - Non-interactive, execute target	6							1	1	1	2	1
Sunny day S5 - Interactive, uninhibited initiated	4							1			1	1
Sunny day S6 - Interactive, uninhibited initiated	12			2	1	1						5
Sunny day S7 - Abort execution of ground test	2	3										
Monitor and analyze aircraft conditions												
Monitor member system fault												
Upload data to target member system												
View aircraft parametric data												
View and print failure report												

图 3 飞控系统功能需求追踪矩阵

Fig. 3 Functional requirement tracking matrix of flight control system

3.3 系统架构和设计

3.3.1 静态结构建模

在 SysML 中,块定义图(BDD)和内部块图(IBD)在表示可视化系统组件的结构和关系方面发挥着重要作用。块定义图用于定义系统的主要构建块,例如组件、子系统以及它们之间的关系^[31]。BDD 提供了系统体系结构的高级视图,显

示了元素及其关联的静态结构。IBD 用于对块的内部结构建模,包括部件、端口和连接器,在更详细的层次上表示系统的静态结构,重点关注块中的组件如何相互连接和相互作用。系统架构和设计过程如图 4 所示,块图从“黑盒”角度用于飞控系统组件之间的信息流和接口定义,内部块图用于进一步的“白盒”分析。

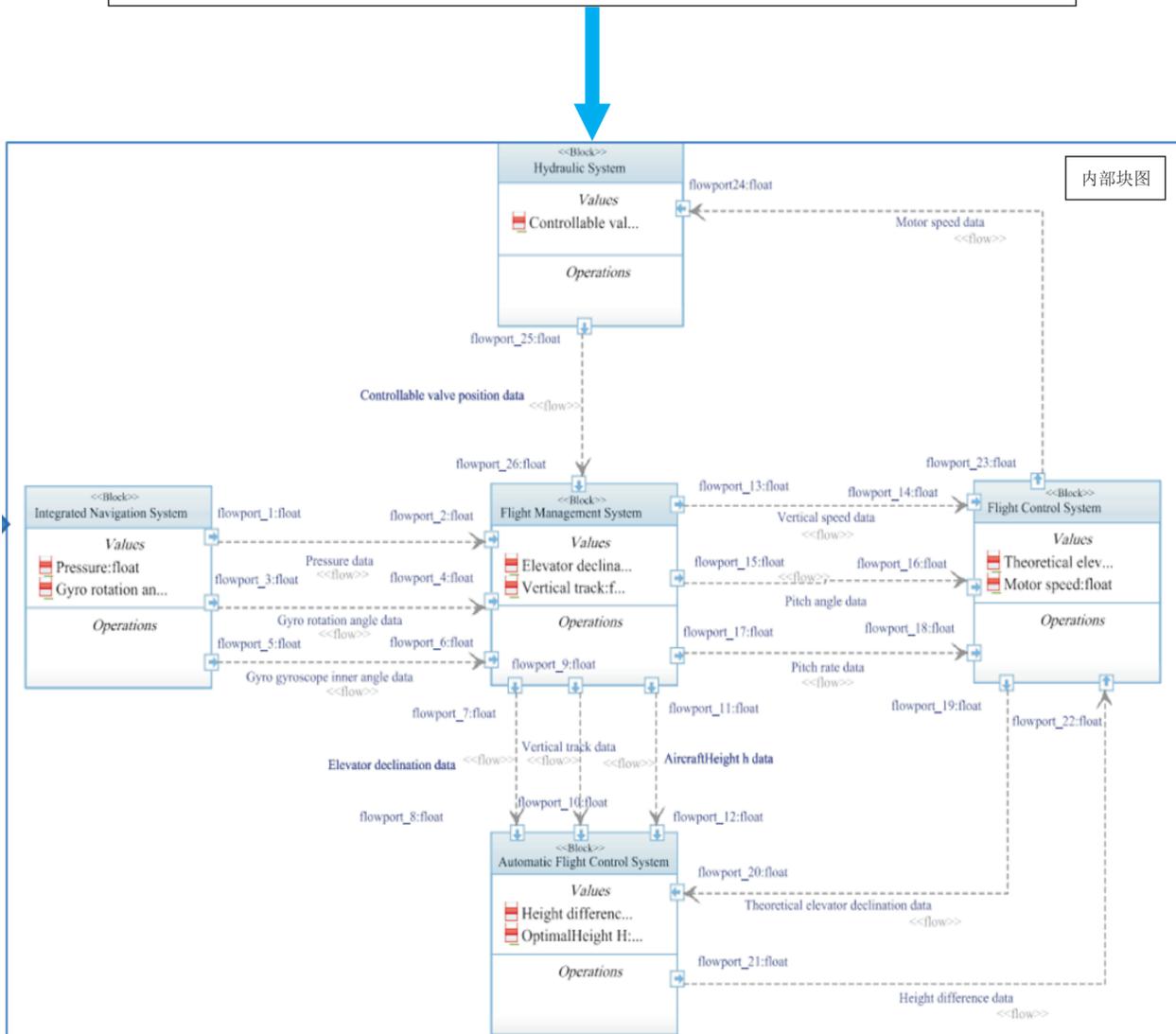
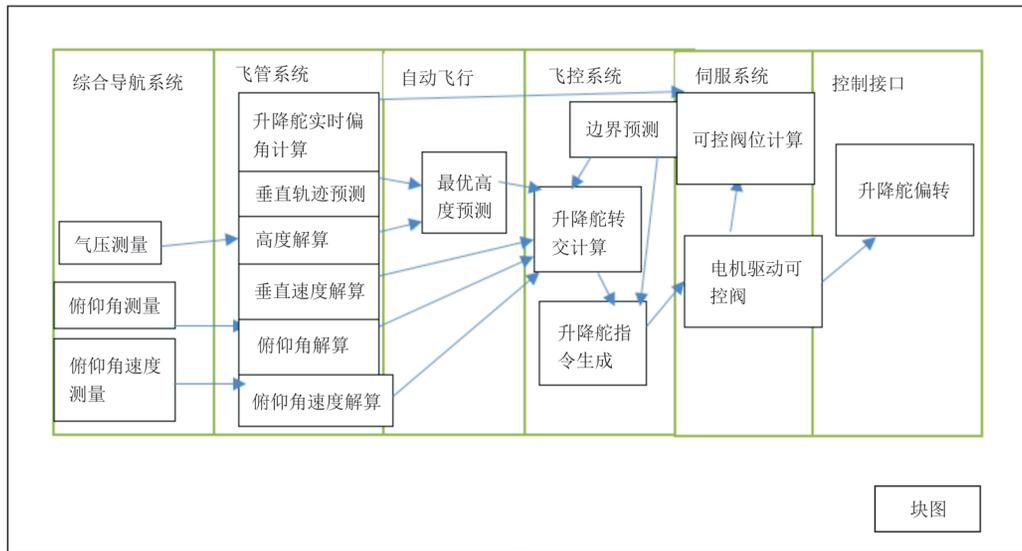


图 4 系统架构设计过程^[30]
Fig. 4 System architecture design process^[30]

3.3.2 动态行为建模

SysML中的活动图用于对活动之间的控制流和数据流进行建模,表示系统的动态行为^[32],如图5所示,序列图用于表示系统组件之间随时间的交互,重点关注组件之间交换的消息序列;状态机为系统的状态相关行为建模,表示组件或系统可能处于的各种状态,以及由事件或条件触发的这些状态之间的转换。

互,重点关注组件之间交换的消息序列;状态机为系统的状态相关行为建模,表示组件或系统可能处于的各种状态,以及由事件或条件触发的这些状态之间的转换。

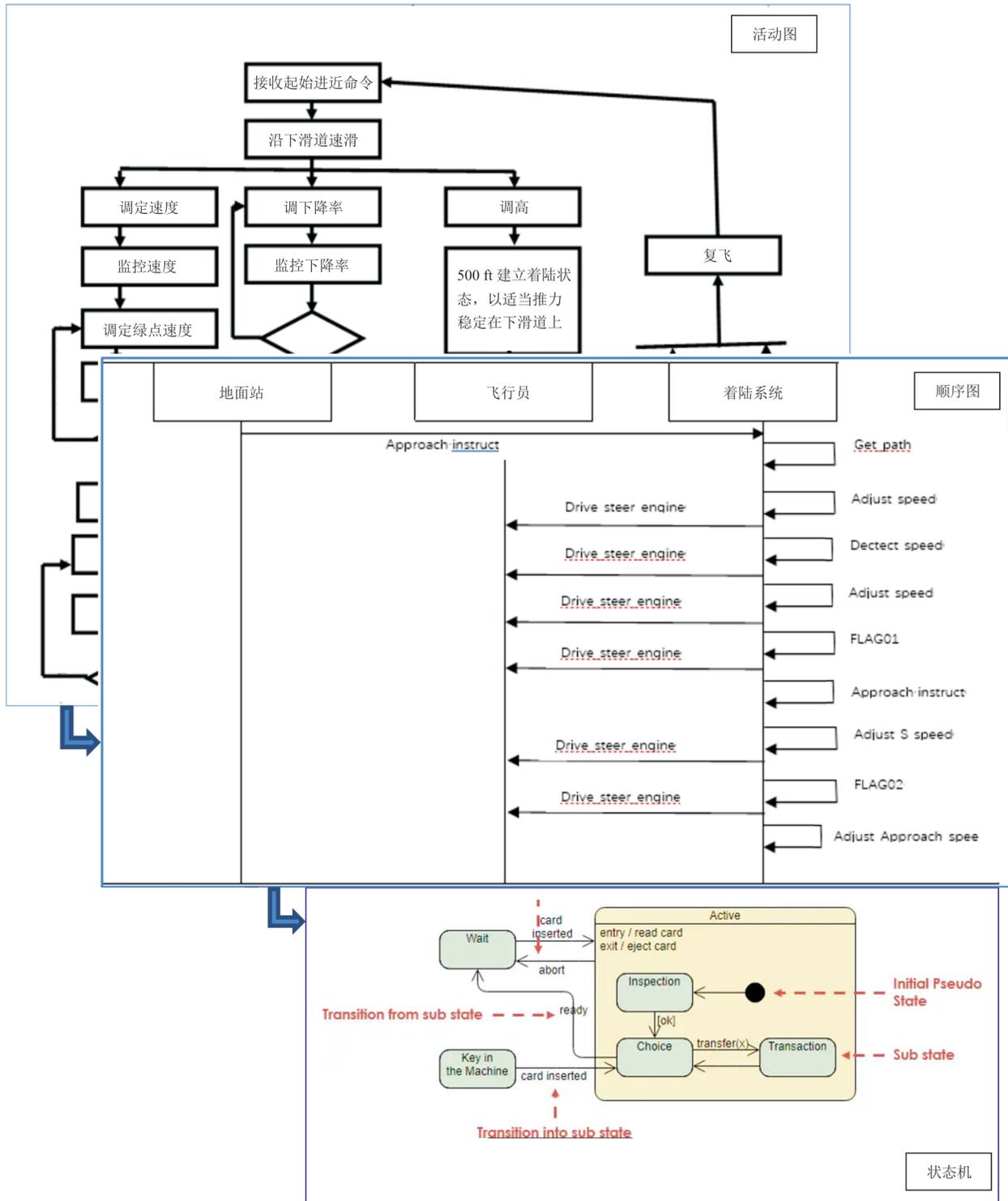


图5 动态行为建模^[32]
Fig. 5 Dynamic behavior modeling^[32]

3.3.3 模型组装和执行

模型驱动工程(MDE)是一种利用系统模型作为软件和硬件开发的主要信息来源的方法。MDE技术可用于从系统模型自动生成代码、配置文件

或其他工件,如图6所示,确保设计和实现之间的一致性。这种自动化方法减少了手动编码工作,最大限度地降低了错误风险,并加快了开发过程^[33]。

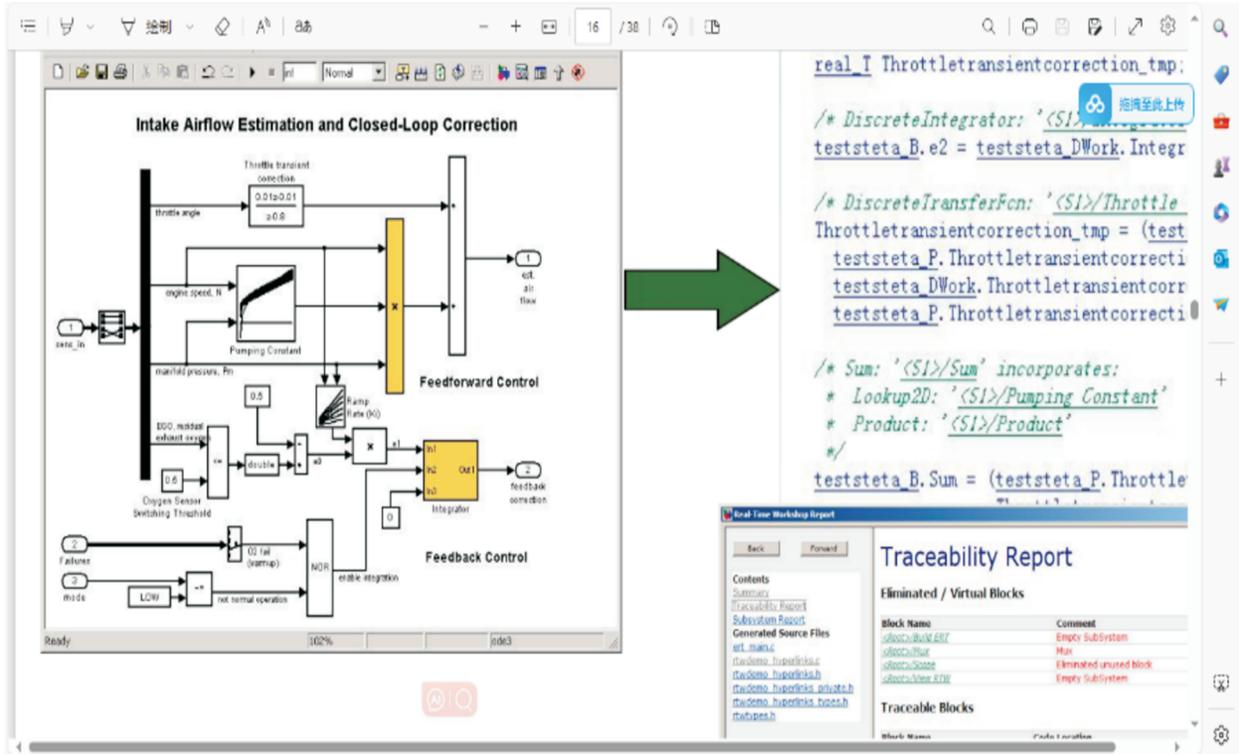


图6 Simulink模型自动生成代码

Fig. 6 simulink model automatically generates code

3.4 AADL在飞控系统中的应用

AADL专为实时、安全关键型和嵌入式系统而设计,支持性能、安全性和可靠性分析,适用于航空飞控系统和类似领域的建模和分析。在性能分析方面,AADL使用OSATE平台,可以对飞控软件进行数据端对端连接一致性验证、数据流延迟验证、调度表分析时域调度性验证^[34-35];在安全性方面,AADL可以建立飞控系统的安全性模型和错误模型库进行安全性定量评估^[36-37];在可靠性方面,AADL可以实现对飞控系统进行可靠性建模及系统可靠性分析^[38-39]。遵循ARP4761的要求,对飞控系统软件AADL建模进行可靠性分析:

1) SysML模型可以自动转换为AADL模型^[40],完成飞控系统软件架构模型;

2) 使用AADL的EMV2附录子语言为架构模型中的构件进行软件子系统错误模型建模,同时生成静态/动态故障树^[41];

3) 架构模型和错误模型综合飞控软件可靠性模型完成以后向广义随机Petri网(Generalized stochastic Petri net,简称GSPN)模型转换;

4) GSPN模型导入可靠性仿真工具进行定量计算,通过设置故障源的故障概率逐步增长,对目标系统出错概率在其影响下的变化过程进行仿真,如图7所示。

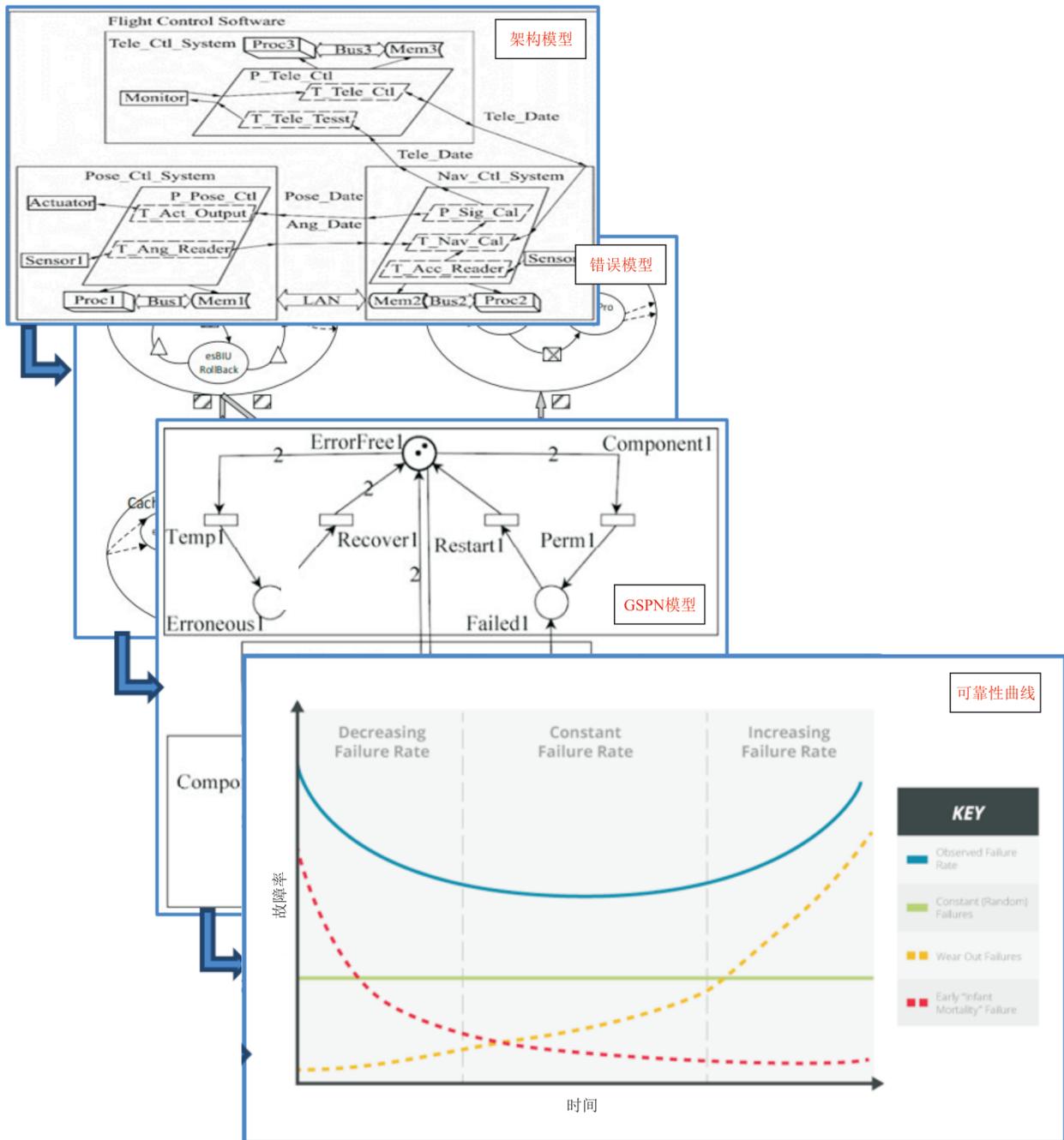


图7 飞控系统软件可靠性建模分析过程^[42]
 Fig. 7 Software reliability modeling and analysis process of flight control system^[42]

3.5 实施和集成

运用数字线程并持续验证进行飞控系统实施和集成,包括数字线程和持续验证两部分。

3.5.1 数字线程

数字线程^[43]是连接和集成产品生命周期各个

方面的框架,从飞控系统设计和制造到运营和维护,数字线程在系统模型、实施工件和验证结果之间建立了一致的信息流,确保跨系统组件的无缝集成,如图8所示。通过提供连续的信息流,可以实现高效的变更管理、可追溯性和系统性能的实时监控。

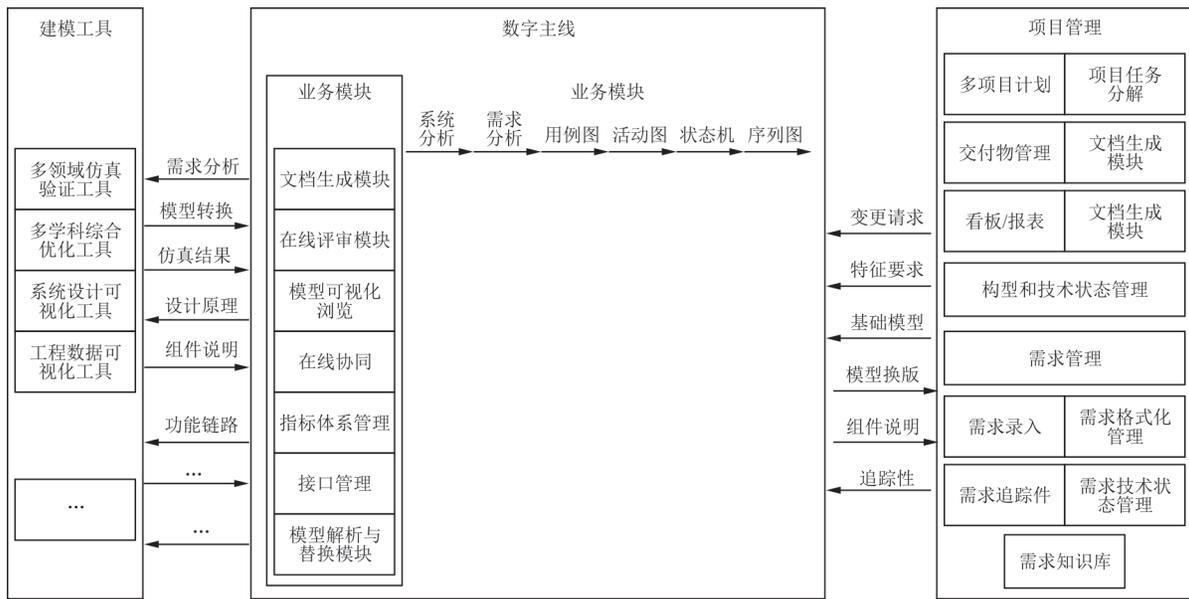


图 8 数字线程

Fig. 8 Digital threads

3.5.2 持续验证

持续验证是一个涉及整个飞控系统开发过程中验证和验证系统组件及其交互的过程。通过应用基于模型的系统工程技术,工程师可以通过基于模型的测试、仿真和分析进行持续验证,在飞控系统开发过程的早期进行检测和解决集成问题。及早地发现和解决集成问题有助于降低代价高昂的返工风险,提高整体系统的质量并缩短开发周期。

3.6 验证和确认

3.6.1 基于模型的测试和仿真

基于模型的测试 (Model-based Test, 简称 MBT)^[44]是一种使用系统模型作为生成测试用例、测试脚本和预期结果的基础技术,如图 9 所示。MBT 与系统仿真一起,使工程师能够评估系统及其组件在各种条件和场景下的性能,确保测试参数满足指定要求,如图 10 所示,其中 1 ft=0.304 8 m。

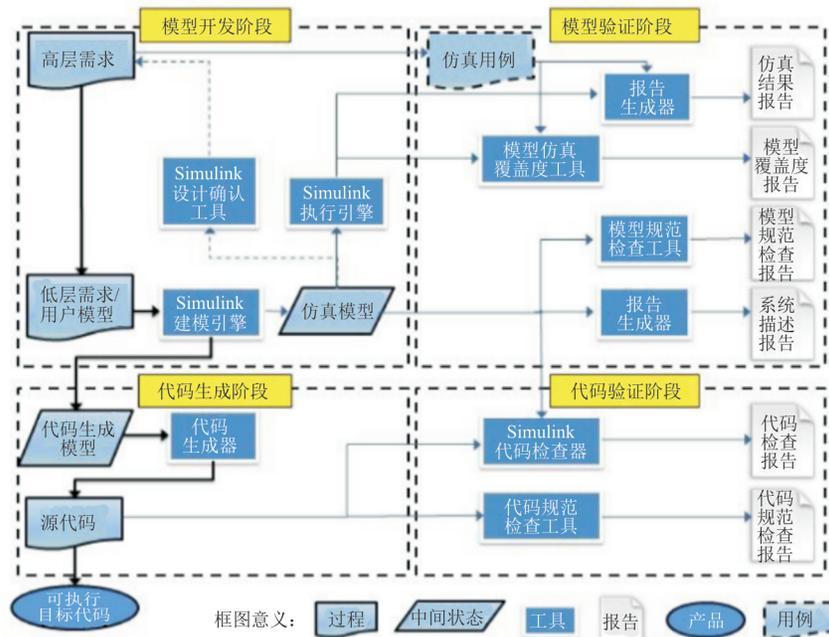


图 9 基于模型的验证过程

Fig. 9 Model-based validation process

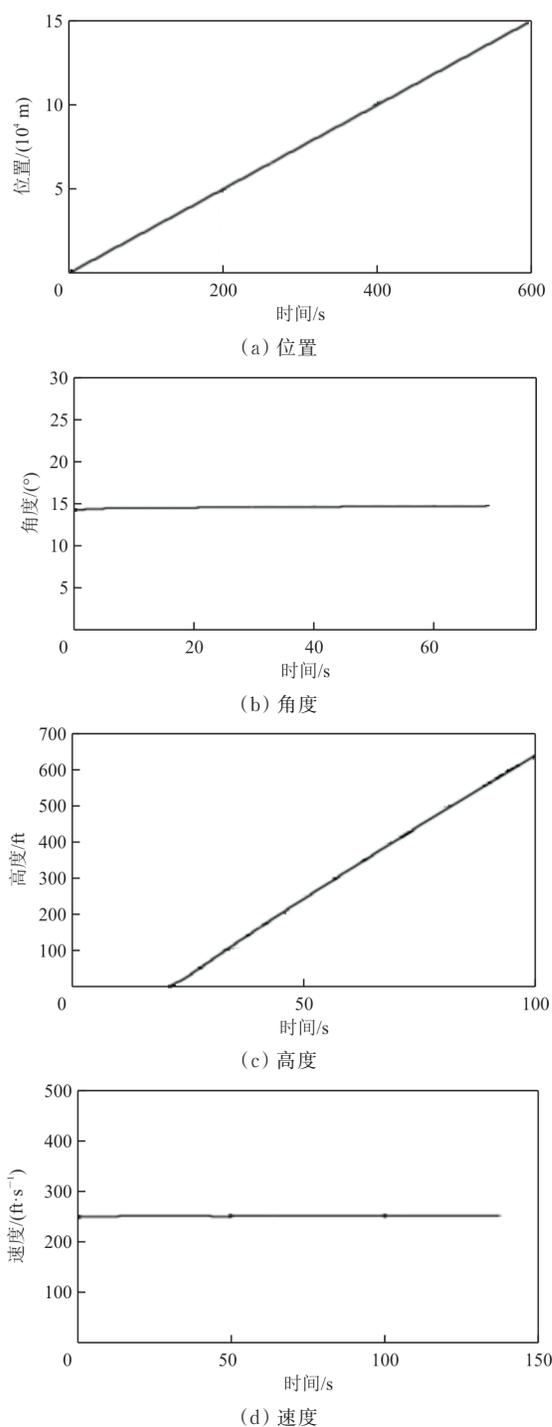


图 10 基于模型的仿真(部分)
Fig. 10 Model-based simulation

通过利用 MBSE 工具和方法,工程师可以在整个开发过程中对系统进行全面测试和仿真,从而提高整体系统质量并降低故障风险。

3.6.2 自动生成测试用例和程序

使用 MBSE 工具(Simulink 等),工程师可以根据系统模型自动生成测试用例和程序,确保测试

符合设计规范。这种自动化方法减少了创建测试用例的手动工作,并确保测试是全面的,涵盖系统的所有相关方面。通过自动生成测试用例,工程师可以更专注于分析测试结果、识别问题和改进系统设计,打造出更稳健可靠的最终产品。

3.6.3 飞控系统的验证和确认

飞行控制系统的验证和确认过程对于确保其安全性、可靠性和性能至关重要^[45]。飞控系统验证和确认过程如图 11 所示,包括以下 4 个关键步骤:1) 控制律数学仿真:这一阶段涉及使用基于计算机的模拟开发和测试控制律及算法。数学仿真有助于完善飞行控制系统在各种条件和场景下的性能,包括正常和异常情况。2) 飞行员在环测试:飞行员通过飞行模拟器在模拟环境中与飞行控制系统进行交互,从飞行员的角度对系统的处理质量和整体性能进行现实评估。根据飞行员的反馈对控制规律进行必要的调整,确保系统满足期望的飞行特性。3) “铁鸟”台架测试:“铁鸟”试验台复制飞机的飞行控制系统、执行器和其他相关子系统。台架测试允许在现实环境中集成测试硬件和软件组件,从而能够检测和解决潜在的集成问题。4) 试验试飞:飞行控制系统在实际飞机上进行一系列试飞。这些飞行评估了系统在真实飞行条件下的性能、安全性和可靠性。测试飞行在各种条件和飞行制度下进行,以确保系统符合所有法规要求和性能规范。

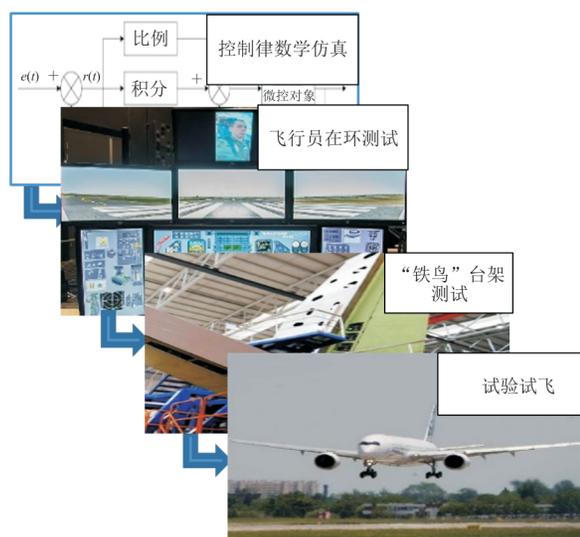


图 11 飞控系统验证和确认过程
Fig. 11 Verification and confirmation process of the flight control system

4 展望

本文展示了MBSE如何在飞行控制系统研发时使用模型来支持复杂系统的规范、设计、分析、验证和确认的工作过程,然而,随着敏捷工程、尤其是人工智能技术的发展,MBSE未来的新技术的嵌入、替换和升级前景非常广阔。以人工智能为例,在MBSE中的应用前景包括以下4个方面:1) 智能需求分析:自然语言处理(NLP)和机器学习(ML)等人工智能技术可以自动从文本源中提取需求,减少手动识别和分析需求所需的时间和精力,提高需求捕获的准确性和完整性。2) 自动模型生成:强化学习(RL)等人工智能技术可以从高级规范自动生成系统模型,减少手动创建模型所需的时间和精力,提高所生成模型的抽象度和通用性。3) 智能模型验证:基于规则的专家系统和ML算法等人工智能技术可以根据需求自动验证模型并识别潜在的问题或者异常,减少手动执行验证任务所需的时间和精力,提高获得验证结果的准确性和可靠性。4) 自主决策:深度强化学习(DRL)等人工智能技术可以训练自主代理在复杂、不确定的环境中做出的决策,在航空飞行控制系统这类安全关键系统中及时准确的决策对于避免危险和预防事故至关重要。另外,敏捷工程在MBSE中的结合应用可以帮助工程师更快速、灵活地应对相应变化,提高工程流程的效率。

在未来结合了人工智能和敏捷工程的MBSE可以更好应对复杂系统的挑战,提高系统工程流程的效率和有效性,并最终交付更安全、兼顾弹性和灵活性的系统,这种结合使得MBSE在未来的系统工程中发挥更大的作用,为复杂的航空产品提供更高的可追溯性、可信度和可靠性。

5 结束语

MBSE的成功应用与推广需要一种全面和系统的方法。航空飞行控制系统开发过程采用MBSE可以提高效率、降低成本以及改善利益相关者之间的沟通。航空飞行控制系统开发过程正在经历系统工程实践的范式转变,而MBSE的应用对于满足现代航空系统不断增加的复杂性至关重要。为了促进转变,利益相关者必须投资于教育、培训和研究,以确保劳动力充分熟练掌握MBSE方法和工具。此外,行业合作伙伴、标准组织和学

术界之间需要紧密合作,结合敏捷开发和完善标准化MBSE方法、工具和框架促进系统工程领域的创新和持续改进。通过MBSE的深度应用,航空飞行控制系统可以更好地应对未来的挑战,确保交付安全、可靠和高效的航空飞控系统。

参考文献

- [1] INCOSE. Systems engineering vision 2020, version 2.03 [M]. San Diego: INCOSE, 2007.
- [2] 景博,黄崧琳,王生龙,等. 军用飞机PHM系统一体化设计架构分析[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 64-73.
JING Bo, HUANG Songlin, WANG Shenglong, et al. Analysis on integrated design of military aircraft prognostic and healthmanagement (PHM) system [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 64-73. (in Chinese)
- [3] 李娇,敖亮,任文明. 基于MBSE的通用质量特性建模分析技术研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(5): 87-95.
LI Jiao, AO Liang, REN Wenming. Research on modeling and analysis technology of general quality characteristics based on MBSE [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(5): 87-95. (in Chinese)
- [4] 张新国. 迎接航空工业新一轮技术革命[J]. 航空科学技术, 2011, 41(22): 1-3.
ZHANG Xinguo. Meet the new round of technological revolution in aviation industry [J]. Aeronautical Science and Technology, 2011, 41(22): 1-3. (in Chinese)
- [5] 颜乐鸣,刘从越,陈申平. 基于系统科学的复杂系统软件生命周期模型研究[J]. 空间控制技术与应用, 2021, 47(2): 80-85.
YAN Leming, LIU Congyue, CHEN Shenping. Research on software life cycle model of complex system based on System Science [J]. Space Control Technology and Applications, 2021, 47(2): 80-85. (in Chinese)
- [6] 迟明,单栋,阎振鑫,等. 基于模型的仿真设计在某飞控系统中的应用[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(10): 2556-2566.
CHI Ming, SHAN Dong, YAN Zhenxin, et al. Application of model-based simulation design in a flight control system [J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(10): 2556-2566. (in Chinese)
- [7] 崔展博,景博,焦晓璇,等. MBSE技术在飞控系统PHM中的应用研究[J]. 研究与开发, 2022, 41(3): 69-78.
CUI Zhanbo, JING Bo, JIAO Xiaoxuan, et al. Application of MBSE technology in flight control system PHM [J]. Research and Development, 2022, 41(3): 69-78. (in Chinese)
- [8] 王雨农,毕文豪,张安,等. 基于DODAF的民机MBSE研制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(12): 3579-3585.
WANG Yunong, BI Wenhao, ZHANG An, et al. Development method of MBSE for civil aircraft based on DODAF [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(12): 3579-3585. (in Chinese)

- [9] 赵俊钦, 李艳军. 基于MBSE的民机推力管理架构设计与仿真方法[J]. 航空计算技术, 2021, 51(5): 105-118.
ZHAO Junqin, LI Yanjun. Design and simulation method of civil aircraft thrust management architecture based on MBSE [J]. Aeronautical Computing Technology, 2019, 51(5): 105-118. (in Chinese)
- [10] 王文浩, 毕文豪, 张安, 等. 基于MBSE的民机系统功能建模方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(10): 2884-2892.
WANG Wenhao, BI Wenhao, ZHANG An, et al. Functional modeling method of civil aircraft system based on MBSE [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(10): 2884-2892. (in Chinese)
- [11] 张哲林, 黄素娟, 陈斌. 基于Arcadia方法的民机信息系统架构设计[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(2): 124-126.
ZHANG Zhelin, HUANG Sujuan, CHEN Bin. Architecture design of civil aircraft information system based on Arcadia method [J]. Industrial Control Computer, 2022, 35(2): 124-126. (in Chinese)
- [12] 张柏楠, 戚发轫, 邢涛, 等. 基于模型的载人航天器研制方法研究与实践[J]. 航空学报, 2020, 41(7): 78-86.
ZHANG Bonan, QI Faren, XING Tao, et al. Research and practice of model-based manned spacecraft development method [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(7): 78-86. (in Chinese)
- [13] 卢志昂, 刘霞, 毛寅轩, 等. 基于模型的系统工程方法在卫星总体设计中的应用实践[J]. 航天器工程, 2018, 27(3): 7-16.
LU Zhiang, LIU Xia, MAO Yinxuan, et al. Application and practice of model-based systems engineering in overall satellite design [J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(3): 7-16. (in Chinese)
- [14] 韩风宇, 林益明, 范海涛. 基于模型的系统工程在航天器研制中的研究与实践[J]. 航天器工程, 2014, 23(3): 119-125.
HAN Fengyu, LIN Yiming, FAN Haitao. Research and practice of model-based systems engineering in spacecraft development [J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(3): 119-125. (in Chinese)
- [15] 焦洪臣, 雷勇, 张宏宇, 等. 基于MBSE的航天器系统建模分析与设计研制方法探索[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(9): 2516-2525.
JIAO Hongchen, LEI Yong, ZHANG Hongyu, et al. Exploration of modeling analysis, design and development method of spacecraft system based on MBSE [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(9): 2516-2525. (in Chinese)
- [16] 何巍, 胡久辉, 赵婷, 等. 基于模型的运载火箭总体设计方法初探[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(1): 12-17.
HE Wei, HU Jiuhui, ZHAO Ting, et al. Preliminary study on the overall design method of launch vehicle based on model [J]. Missile and Space Launch Vehicle Technology, 2021(1): 12-17. (in Chinese)
- [17] 张世聪, 陈波, 张晓晋, 等. 基于MBSE的动车组设计方法研究及应用[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(2): 94-102.
ZHANG Shicong, CHEN Bo, ZHANG Xiaojin, et al. Research and application of EMU design method based on MBSE [J]. China Railway Science, 2018, 39(2): 94-102. (in Chinese)
- [18] 王保民, 陈波, 张世聪. 基于MBSE的动车组整车逻辑研究方法及应用[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(6): 143-151.
WANG Baomin, CHEN Bo, ZHANG Shicong. Research method and application of EMU logic based on MBSE [J]. China Railway Science, 2021, 42(6): 143-151. (in Chinese)
- [19] 刘义鑫, 刘潇潇, 王保民, 等. MBSE在动车组转向架失稳检测系统架构设计中的应用[J/OL]. 机械科学与技术: 1-9. [2023-06-16]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230049>.
LIU Yixin, LIU Xiaoxiao, WANG Baomin, et al. Application of MBSE in the architecture design of EMU bogie instability detection system [J/OL]. Mechanical Science and Technology: 1-9. [2023-06-16]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230049>. (in Chinese)
- [20] 牟明, 邢亮. 模型开发在型号软件研制中应用研究[J]. 航空计算技术, 2015, 45(3): 77-79.
MU Ming, XING Liang. Application of model development in model software development [J]. Aeronautical Computing Technology, 2015, 45(3): 77-79. (in Chinese)
- [21] modelbaba. 美国新一代隐轰 B-21 亮相在即, 制造商 Northrop Grumman MBSE 技术路线简析 [EB/OL]. [2023-06-16]. <https://modelbaba.com/mbse/3284.html>.
modelbaba. The new generation of hidden bomb B-21 in the United States is about to be unveiled, and the manufacturer Northrop Grumman MBSE technical route is briefly analyzed [EB/OL]. [2023-06-16]. <https://modelbaba.com/mbse/3284.html>. (in Chinese)
- [22] STEPHEN L. B-21 first flight running a few months behind [EB/OL]. [2023-06-16]. <https://www.defensenews.com/air/2023/03/16/b-21-first-flight-running-a-few-months-behind/>.
- [23] 蒋彩云, 王维平, 李群, 等. SysML: 一种新的系统建模语言[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(6): 1483-1487.
JIANG Caiyun, WANG Weiping, LI Qun, et al. SysML: a new system modeling language [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(6): 1483-1487. (in Chinese)
- [24] 丁鼎. 基于模型的系统工程在民机领域的应用[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2012, 29(4): 47-50.
DING Ding. Application of model-based systems engineering in the field of civil aircraft [J]. Journal of Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 29(4): 47-50. (in Chinese)
- [25] 丁钱. 基于模型驱动的复杂系统装备互操作可视化仿真与验证平台设计与实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
DING Qian. Design and implementation of model-driven visual simulation and verification platform for complex system equipment interoperability [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2021. (in Chinese)
- [26] MITTAL R. Solving the instance model-view update problem in AADL [C] // The 25th International Conference on

- Model-Driven Engineering Languages and Systems. New York: Association for Computing Machinery, 2022: 55-65.
- [27] 李德林, 毕文豪, 张安, 等. 基于MBSE的民机研制过程管理[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(8): 2209-2220. LI Delin, BI Wenhao, ZHANG An, et al. MBSE based development process management of civil aircraft[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(8): 2209-2220. (in Chinese)
- [28] KRUPA G P. Application of agile model-based systems engineering in aircraft conceptual design[J]. The Aeronautical Journal, 2019(3): 1-41.
- [29] 毕文豪, 范秋岑, 李德林, 等. 基于多视角的民机正向设计建模方法[J]. 航空学报, 2023, 44(10): 150-171. BI Wenhao, FAN Qiucen, LI Delin, et al. Commercial positive design modeling method based on the multiple points of view[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(10): 150-171. (in Chinese)
- [30] 范秋岑, 毕文豪, 张安, 等. 民用飞机高度控制系统MBSE建模方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(1): 164-171. FAN Qiucen, BI Wenhao, ZHANG An, et al. MBSE modeling method for civil aircraft altitude control system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(1): 164-171. (in Chinese)
- [31] 薛芳芳, 王亮亮, 缪炜涛, 等. 基于MBSE的民机飞行管理软件设计[J]. 航空计算技术, 2019, 49(5): 111-116. XUE Fangfang, WANG Liangliang, MIAO Weitao, et al. Design of flight management software for civil aircraft based on MBSE[J]. Aeronautical Computing Technology, 2019, 49(5): 111-116. (in Chinese)
- [32] 梅芊, 黄丹, 卢艺. 基于MBSE的民用飞机功能架构设计方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(5): 1042-1051. MEI Qian, HUANG Dan, LU Yi. Functional architecture design method for civil aircraft based on MBSE[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(5): 1042-1051. (in Chinese)
- [33] 薛定宇, 陈阳泉. 基于MatLab/Simulink的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011. XUE Dingyu, CHEN Yangquan. System simulation technology and application based on MatLab/Simulink[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011. (in Chinese)
- [34] 邓佳佳, 张育平, 陈海燕. 基于SysML&AADL的IMA刹车控制系统实时性需求验证[J]. 计算机与现代化, 2017(6): 40-49. DENG Jiajia, ZHANG Yuping, CHEN Haiyan. Timeliness requirement validation of brake control system based on SysML&AADL[J]. Computer and Modernization, 2017(6): 40-49. (in Chinese)
- [35] ZHANG L. Specifying and modeling cloud cyber physical systems based on AADL[C]// The 17th International Conference on Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science. Wuxi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018: 26-29.
- [36] 张子文. 基于模型的民用飞机系统安全性分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021. ZHANG Ziwen. Research on model-based safety analysis for civil airplane systems[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021. (in Chinese)
- [37] 闫洽鹏. 基于机器学习的嵌入式系统的安全性分析[D]. 北京: 北方工业大学, 2021. YAN Zhipeng. Safety analysis of embedded systems based on machine learning[D]. Beijing: North China University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [38] 陈小颖, 祝义, 赵宇, 等. 面向CPS时空性质验证的混成AADL建模与模型转换方法[J]. 软件学报, 2021, 32(6): 1779-1798. CHEN Xiaoying, ZHU Yi, ZHAO YU, et al. Hybrid AADL modeling and model transformation for CPS time and space properties verification[J]. Journal of Software, 2021, 32(6): 1779-1798. (in Chinese)
- [39] 魏晓敏, 董泽乾, 肖明睿, 等. 基于AADL的失效概率分配及安全性评估方法[J]. 软件学报, 2020, 31(6): 1654-1671. WEI Xiaomin, DONG Zeqian, XIAO Mingrui, et al. Failure probabilities allocation and safety assessment approaches based on AADL[J]. Journal of Software, 2020, 31(6): 1654-1671. (in Chinese)
- [40] 马燕燕, 杨志斌, 江国华. 一种SysML模型到AADL模型的自动转换方法[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(3): 456-466. MA Yanyan, YANG Zhibin, JIANG Guohua. An automatic conversion method from SysML model to AADL model[J]. Computer Engineering and Science, 2020, 42(3): 456-466. (in Chinese)
- [41] 胡少成. 基于AADL的飞控软件建模与可靠性验证[D]. 成都: 电子科技大学, 2020. HU Shaocheng. Modeling and reliability verification of flight control software based on AADL[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [42] 陆寅, 秦树东, 郭鹏, 等. 软硬件综合AADL可靠性建模及分析方法[J]. 软件学报, 2022, 33(8): 2995-3014. LU Yin, QIN Shudong, GUO Peng, et al. Hardware-software integrated reliability modeling and analysis using AADL[J]. Journal of Software, 2022, 33(8): 2995-3014. (in Chinese)
- [43] SHAWN D, HARRISON P M P. Model-based engineering for product support[J]. Defense Acquisition, 2021(7/8): 32-37.
- [44] MARKUS D, JÖRG B, JAN P. Model-based testing: automatic generation of test cases, test data and test procedures from SysML models[EB/OL]. [2023-06-16]. <https://doi.org/10.4271/2015-01-2553>.
- [45] TISCHLER M. Practical methods for aircraft and rotorcraft flight control design: an optimization-based approach[M]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017.