



图学学报
Journal of Graphics
ISSN 2095-302X, CN 10-1034/T

《图学学报》网络首发论文

题目：面向 MBSE 的起落架系统模型集成技术
作者：张浩轩，王国新，梁赞，吴绶玄，鲁金直，阎艳，袁永吉，乔佳兴
收稿日期：2024-09-25
网络首发日期：2025-02-12
引用格式：张浩轩，王国新，梁赞，吴绶玄，鲁金直，阎艳，袁永吉，乔佳兴. 面向 MBSE 的起落架系统模型集成技术[J/OL]. 图学学报.
<https://link.cnki.net/urlid/10.1034.T.20250212.1625.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

面向 MBSE 的起落架系统模型集成技术

张浩轩^{1,2}, 王国新¹, 梁赞³, 吴绶玄^{1,4}, 鲁金直⁵,
阎艳¹, 袁永吉¹, 乔佳兴^{1,2}

- (1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081;
2. 北京理工大学长三角研究院, 浙江 嘉兴 314019;
3. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;
4. 奥斯陆大学信息学系, 奥斯陆 0373;
5. 北京航空航天大学航空与科学工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为了解决起落架系统在设计过程中架构建模和仿真建模工具之间的互操作问题, 提供对架构建模和仿真建模工具之间跨域信息的双向传递和接口互操作的能力, 提出了面向基于模型系统工程(MBSE)的起落架系统模型集成技术。首先, 采用多架构建模语言(KARMA)构建起落架系统架构模型, 进而通过架构模型中的仿真方案生成仿真模型。其次构建模型语义映射规则并通过解析仿真模型内容建立仿真模型的集成数据模型, 使得异构模型的语义具有一致性, 进而构建仿真工具适配器, 实现对异构数据的统一编译, 以及架构模型和仿真模型的集成。结果表明, 该方法实现了设计信息在异构模型间的双向传递以及架构建模和仿真建模工具间的互操作, 为起落架系统的架构模型和仿真模型间集成提供了支持。

关 键 词: 基于模型的系统工程; 模型集成; 起落架系统; KARMA; Simulink

中图分类号: TP 391

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(0000)00-0000-00

Model Integration Technology for Landing Gear Systems Based on MBSE

ZHANG Haoxuan^{1,2}, WANG Guoxin¹, LIANG Zan³, WU Shouxuan^{1,4}, LU Jinzhi⁵,
YAN Yan¹, YUAN Yongji¹, QIAO Jiaxing^{1,2}

- (1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Yangtze Delta Region Institute of Beijing Institute of Technology, Jiaxing Zhejiang 314019, China;
3. Beijing Institute of Space System Engineering, Beijing 100076, China
4. SIRIUS, Department of Informatics, University of Oslo, Oslo 0373, Norway;
5. Beihang University, School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing 100191, China)

Abstract: To address the interoperability issues between architecture modeling and simulation modeling tools in the design process of the landing gear system, a landing gear system model integration technology based on Model-Based Systems Engineering (MBSE) is proposed. This technology facilitates the bidirectional transfer of cross-domain information and interface interoperability between architecture modeling and simulation modeling tools. First, the landing gear system architecture model is constructed using the Multiple Architecture Modeling Language (KARMA), which is then utilized to generate the simulation model. Next, semantic mapping rules for the models are established, and an integrated data model for the simulation model is created by parsing its content. Additionally, a simulation tool adapter is developed to unify the compilation of heterogeneous data and integrate the architecture and simulation models. The results show that this method effectively enables the bidirectional transfer of design information between heterogeneous models and ensures interoperability between architecture and simulation modeling tools, thus providing

收稿日期: 2024-09-25; 定稿日期: 2025-01-06

Received: 25 September, 2024; Finalized: 6 January, 2025

基金项目: 国家部委项目(50923010101), 技术基础科研项目(JCKY2021203A001), 国家留学基金委项目(202406030154)

Foundation items: CN Ministry Project (50923010101), The National Ministry Project (JCKY2021203A001), The China Scholarship Council (202406030154)

第一作者: 张浩轩(2001-), 男, 硕士研究生。主要研究方向为基于模型的系统工程。E-mail: 3220230347@bit.edu.cn

First author: ZHANG Haoxuan (2001-), master student. His main research interests cover model-based systems engineering.

E-mail: 3220230347@bit.edu.cn

通信作者: 王国新(1977-), 男, 教授, 博士。主要研究方向为知识工程、系统工程等。E-mail: wangguoxin@bit.edu.cn

Corresponding author: WANG Guoxin (1977-), professor, Ph.D. His main research interests cover knowledge engineering and systems engineering, etc. E-mail: wangguoxin@bit.edu.cn

support for the integration of architecture and simulation models in the landing gear system.

Keywords: model-based systems engineering; model integration; landing gear system; KARMA; Simulink

起落架系统(Landing Gear System)是承担飞机起飞和降落功能的关键组成部分^[1],其另加复杂度高、数量多,是一个典型的复杂系统,其设计和性能直接关系到飞机的安全性。起落架系统的主要功能包括支撑机体重量、吸收着陆冲击力、提供地面状态下机体操纵能力以及在飞行状态下实现可靠的收放行为。由于飞机运行环境的复杂性和多变性,起落架系统需要承受多种工况下的动态载荷、振动和应力,设计要求极高。在起落架系统的设计过程中需要多部门协作设计以及关键指标的仿真验证。传统的基于文档的起落架系统总体设计模式由总体设计部门主导,多部门协作设计的形式,面临着设计验证滞后、跨部门协作沟通效率低下、无法实现设计的可追溯性^[2-3]等问题。

目前,基于模型的系统工程(Model-based system engineering, MBSE)作为一种全新的总体设计模式,已经广泛应用于航空动力装备^[4]、高速列车^[5]等复杂系统的总体设计中,可以实现系统在早期设计阶段的验证并且提高设计方案的一致性和可追溯性^[6]。目前,起落架系统的总体设计趋势是采用基于 MBSE 的设计模式^[7],通过分别构建起落架系统的架构模型和仿真模型实现对起落架系统的设计。在设计过程中,首先工程人员建立起落架系统的架构模型,描述起落架系统需求、组成、行为、接口等,如起落架系统结构、力学性能指标等,最终生成设计方案。随后,基于架构模型构建或转换生成仿真模型,通过仿真模型对架构模型设计方案中的起落架系统的关键性能指标以及动态行为进行验证^[8],如起落架系统力学响应、收放行为动作等。在设计过程中,可能需要根据仿真验证结果多次反复重构系统架构模型,并再次生成仿真模型进行仿真。对架构模型和仿真模型的集成过程而言,其核心是实现架构建模和仿真建模工具之间的互操作性。互操作性是指架构、建模等工具及其模型之间能够无

缝交换数据和使用数据的能力^[9]。由于架构模型和仿真模型采用的建模工具不同,不同建模工具底层的代码实现机制不兼容,且不同建模工具采用不同的建模语言,所构建出的模型的语义、语法异构。模型的含义通过语义、语法进行描述,模型的语义语法是模型含义的载体。架构建模工具和仿真验证工具均通过各自的编译机制实现解析和解释自身的语义、语法。然而,由于不同建模工具采用的语义、语法的异构,导致其编译机制无法兼容其他语言。在起落架系统设计过程中,采用多架构统一建模语言 KARMA 对起落架系统进行架构建模,通常采用 Simulink 对起落架系统进行收放载荷仿真,AMESim 对起落架系统进行液压收放仿真。Simulink 通过常微分方程(Ordinary differential equation, ODE)对仿真模型进行描述,AMESim 通过偏微分方程(Partial differential equation, PDE)对仿真模型进行描述。在架构建模工具中无法对 ODE、PDE 方程进行读取和模型解析,在仿真建模工具中无法对 KARMA 语言进行读取和模型解析。因此带来了架构建模与仿真建模工具之间的互操作性挑战,直接导致架构模型和仿真模型之间无法交换设计信息、难以有效集成。

架构模型与仿真模型的集成有多种实现路径,如模型转换^[10]、本体技术^[11]等。国内外学者对面向 MBSE 的模型集成技术进行了相关研究和实践。赵良玉等^[12]提出了一种 SysML 模型与 Simulink 模型的融合方法实现了对飞机起飞场景的早期数字验证。CHABIBI 等^[13]提出了一种通过配置文件和转换规则的方式实现了 SysML 到 Simulink 模型的半自动转换。CAO 等^[14]提出了一种将 SysML 模型自动转换为 Simulink 模型并进行物理仿真的方法。LU 等^[15]提出一种基于场景的本体,实现 MBSE 架构模型、Simulink 模型与 FMU 的模型集成与联合仿真。RANGEL 等^[16]提出了一种跨平台通讯框架,允许物理模型集成和交换参数实现模

型之间数据交换的方法。WU 等^[17]提出了认知数字总线本体形式化表征需求、架构、仿真模型之间的集成和追溯关系。通过上述分析可知，目前现有模型集成技术存在模型间单向性转换和接口无法形式化表征的缺陷，导致不同模型间无法实现跨域信息的双向传递和接口互操作。

本文提出了一种面向 MBSE 的起落架系统模型集成技术。首先，通过分析起落架系统的特征，采用多架构统一建模语言 KARMA 构建起落架系统架构元模型及模型，并通过代码生成技术将其转换生成 Simulink 仿真模型。其次，基于生命周期协作开放服务 (Open Service for Lifecycle Collaboration, OSLC)^[18]规范实现上述模型的语义解析，构建系统架构模型和仿真模型信息、接口及 OSLC 核心模型之间的映射规则，将其转换为基于 Web 的工具互操作服务，实现上述模型在异构工具间的互操作，进而实现起落架系统模型的集成。

1 面向 MBSE 的起落架系统模型集成技术

目前，在起落架系统的研发模式中，总体技术部门制定总体架构模型，多部门协作完成领域设计。多部门多领域的协作设计导致不同设计领域使用的工具不同，产生了多种不同的模型，存在同一模型重复构建，模型一致性维护存在困难的问题。所以需要对设计模型进行集成。模型集成是将多个异构模型和工具组合在一起，管理和整合来自不同领域的数据和信息，从而支持复杂系统的设计、分析和验证^[19]。面向 MBSE 的模型集成技术的流程如图 1 所示。通过模型集成实现架构模型和仿真模型之间交换设计信息，将架构设计信息指导仿真验证，仿真验证结果重构架构设计。

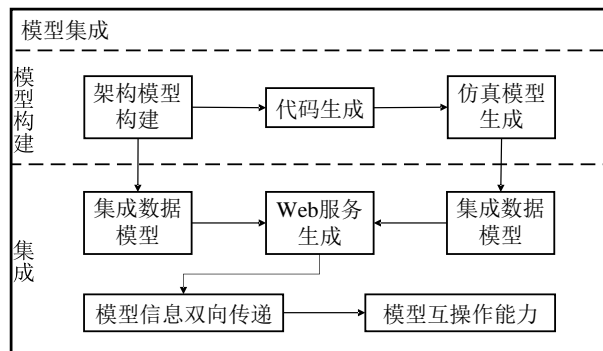


图 1 面向 MBSE 的模型集成技术流程

Fig. 1 The process of model integration technology oriented towards MBSE

在模型构建阶段，采用了多架构统一建模语言 KARMA^[20]基于元建模方法构建需求、功能、结构、参数等方面的起落架系统架构元模型及模型。本文中，元建模方法的本质是设计代表领域内共性知识和概念的元模型。通过构建系统架构模型，可以实现起落架系统的系统需求、活动场景、结构组成、参数指标等的完整表达和建模。随后，通过代码生成转化技术可以将起落架系统架构模型转换成可执行的 MATLAB 代码，在仿真工具中生成仿真模型，实现对架构设计方案中的关键性能指标进行验证。

在集成阶段，根据架构模型和仿真模型中的模型结构、模型参数等关键信息及对应工具的增删改查等操作接口，基于 OSLC 集成规范构建用于模型集成的集成数据模型。其中，OSLC 集成规范是一套用于集成 MBSE 生命周期内工具的技术规范^[21]。OSLC 提供了一种统一的编译机制，首先，通过在 OSLC 中对数据资源的统一描述，将架构模型和仿真模型中存在的不同语义和语法进行规范化，转化为一个统一的集成数据模型，使得异构模型在语义、语法层面具有一致性；其次，通过调用 REST API 对统一的集成数据模型进行编译，将异构工具生成的模型构建基于 Web 的互操作服务，可以在架构设计工具中调用服务实现仿真模型配置及在仿真验证工具中调用服务实现架构模型的调整和更新等互操作过程，解决架构建模工具和仿真建模工具由于语义、语法异构导致的集成困难。

2 起落架系统的模型集成

为了维护起落架系统模型一致性, 需要实现架构、仿真模型的有效集成。本文以起落架系统为例, 首先对其进行架构、仿真建模, 其次建立集成数据模型及服务, 以实现架构、仿真模型互操作。

2.1 起落架系统模型构建

2.1.1 架构模型构建

起落架系统的架构建模基于特定域建模手段采用了多架构统一建模语言 KARMA 中的视图、对象、端点、属性、关系、角色、约束 (GOPRR-E)^[20] 7 类基本的元元模型要素进行元模型设计, 上述 7 类元元模型是对元模型组成及关系设计的一种基本且最为完备的构型。元元模型与元模型的映射关系如图 2 所示。

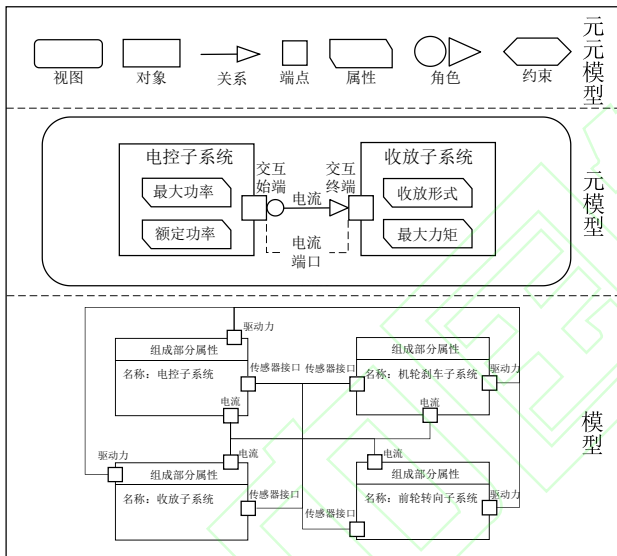


图 2 起落架系统元模型构建方法

Fig. 2 The method of landing gear system metamodel construction

其中:

1) 视图(Graph): 用于对系统的某个视点进行分析, 在一个框图内对系统进行描述。如起落架的子系统通过具有内部组成和行为接口的视图元模型进行表达。

2) 对象(Object): 模型中的主要元素, 用于表示一种实体, 可以单独存在, 也可以与其他对象进行关系链接。如起落架的电控子系统和收放子系统各通过一个对象元模型进行表达。

3) 关系(Relationship): 通过角色与对象连接, 表示对象之间以何种方式进行连接。如电控子系

统和收放子系统之间电信号交互通过关系进行表达和连接。

4) 端点(Point): 应附属在对象上, 用于表示对象和角色连接的端口。如电控子系统对象元模型上有电流端口等不同领域的端点元模型。

5) 属性(Property): 用于定义及描述一些元类型(对象、角色及关系)的特性。属性不能单独存在, 应附属到其他元元模型上用于表示其特性。如电控子系统对象元模型除了具有名称等属性元模型还具备电气领域设计中所需的功率属性元模型。

6) 角色(Role): 应在关系的两端, 表示对象以何种方式进行连接。如电流关系元模型的两端为交互始端角色元模型和交互终端元模型。

7) 约束(Extension): 代表上述元模型之间的附加约束关系。例如电控子系统元模型可以通过分解约束关系进一步展开为电控子系统组成视图元模型。

通过上述方法的设计和定义, 可以将起落架系统的设计要素清晰、完整、无歧义的表达出来。

2.1.2 仿真模型构建

前述工作介绍了如何设计起落架系统架构模型, 下面对起落架架构模型中的关键指标进行仿真评估。

起落架系统的设计需要最终落实到关键性能指标的计算与仿真分析中。Simulink 是一个用于建模、仿真和分析多领域动态系统的图形化编程环境, 用于创建仿真模型^[22]。Simulink 模型是由不同类型、包含多种属性和参数的模块、子系统及其之间的关系组合而成的。Simulink 模型的元素包括模型、子系统、模块、连接和参数; 子系统内包含子系统、模块、连接和参数; 模块中包含参数。其中:

1) 模型: 模型是子系统、模块、连接和参数及其之间的层级关系的集合。在架构模型中与图元模型相对应, 如起落架系统收放性能仿真模型。

2) 子系统: 子系统与模型内元素相同, 由模块、其他子系统、连接和参数及其之间的层级关系组成。在架构模型中与对象元模型相对应, 如用于判断输入的变化选择对应的模块的 If 逻辑子

系统，并可以通过分解约束关系将子系统展开为一个图元模型。

3) 模块：模块是将方程、信号处理操作和系统组件封装成可重用的形式的组件。在架构模型中与对象元模型相对应，如用于展现起落架系统载荷变化的示波器模块。

4) 连接：连接是子系统、模块相互之间的联系。在架构模型中与关系元模型相对应。

5) 参数：参数是设置和配置模块、子系统行为和特性的属性。在架构模型中与属性元模型相对应，如常量模块中的参数为起落架的自身重量。

为了最大限度的重用架构模型中的设计信息，并考虑到 SysML 等架构建模语言和 Simulink 语义语法的不兼容性，本文选择通过 GOPRR-E 的元建模方式，在架构模型中构建出起落架系统 Simulink 元模型。表 1 给出了所设计的部分 Simulink 元模型及其含义。

为了快速根据架构模型中的设计信息生成仿真模型，通过 KARMA 自身具备的代码生成能力^[23]，编写代码生成脚本将起落架架构模型中的 Simulink 仿真图转换成可执行的 M 文件。图 3 展示了构建 Simulink 元模型、模型和代码生成的仿真模型构建流程。代码生成脚本由创建 M 文件规则、创建并打开 Simulink 模型规则、模块添加规则、模块连接关系添加规则、模块参数设置规则等规则组成。通过不同的规则将 Simulink 仿真图中的对象、属性、关系等剥离，根据规则的顺序

进行组合，最终重构成 MATLAB 代码。通过运行生成的 M 文件，得到起落架系统的仿真模型并进行仿真。

表 1 Simulink 元模型(部分)
Table 1 Simulink metamodel (Partial)

视图	元模型		描述
	名称	类型	
Simulink 仿真图	Mux	对象	将输入信号进行集合
	Gain	对象	将输入乘以一个常量值(增益)
	Constant	对象	输出由常量值参数指定的常量
	Fcn	对象	将指定数学表达式应用于其输入
	Clock	对象	输出当前仿真时间
	Scope	对象	显示各个仿真结果变量历程曲线
	Sum	对象	对多个输入信号进行求和
	Transfer Fcn	对象	通过传递函数的分子和分母系数建立传递函数模型，应用于输入信号并输出
	Repeating Sequence Interpolated	对象	输出并重复离散时间序列
	Inport	对象	为子系统或外部输入创建输入端口
	Outport	对象	为子系统或外部输出创建输出端口
	Merge	对象	将多个输入整合成单个输出
	If	对象	将指定的数学表达式应用于其输出
	If Action Subsystem	对象	由 If 模块控制执行的子系统
	Action Port	对象	控制连接到 If 模块的 If Action Subsystem 模块的执行
	连接	关系	连接 Simulink 仿真图中各模块
	参数	属性	配置对象元模型的行为和特性

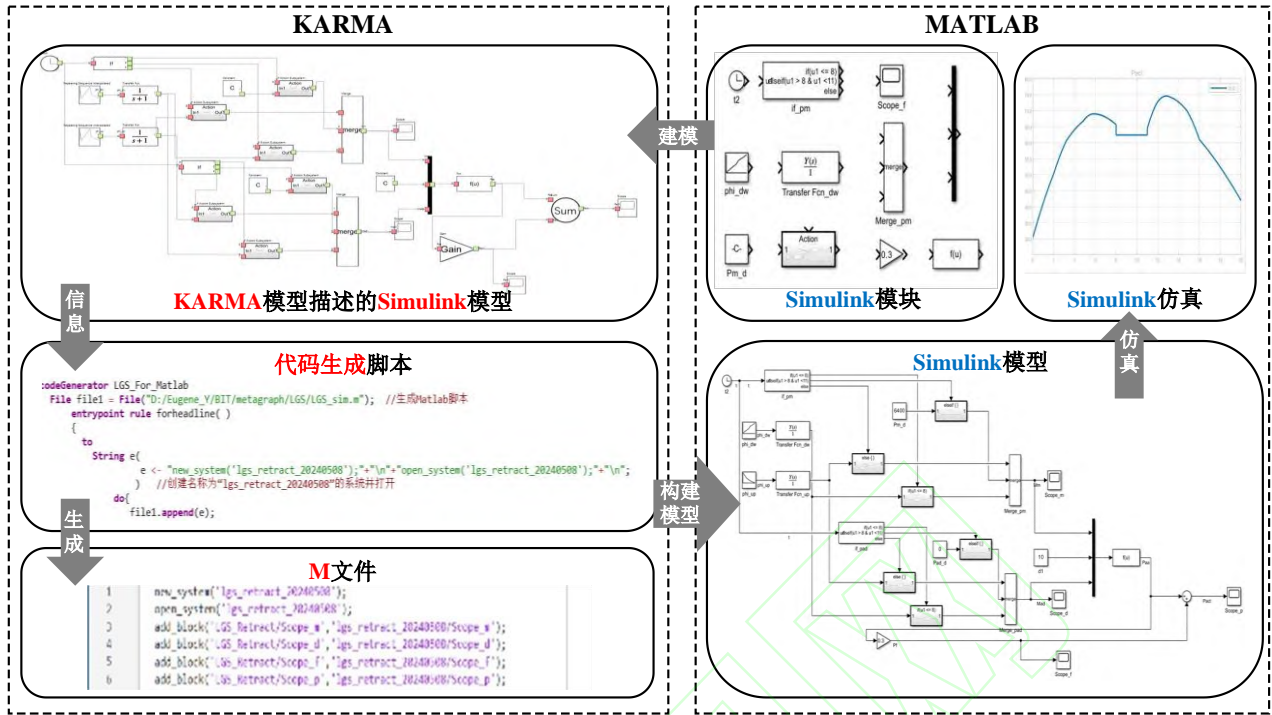


图3 起落架仿真模型构建流程

Fig. 3 The process of landing gear simulation model construction

2.2 基于服务的模型集成技术

为了实现基于服务的模型集成技术，首先根据 OSLC 规范建立仿真、架构模型与集成服务的语义映射规则，随后基于上述规则构建 Simulink 工具集成适配器，从而提供模型集成配置服务。

2.2.1 OSLC 核心模型

由于起落架系统架构模型和仿真模型之间采用的建模工具不同，不同建模工具底层的代码实现机制互不兼容，且不同建模工具采用不同的建模语言，所构建出的模型语义、语法异构。为了实现起落架系统不同模型之间交换设计信息，本文基于 OSLC 规范构建模型集成服务实现起落架系统模型语义解析和映射。

OSLC 是由 IBM 提出的用于 MBSE 生命周期内工具集成和协作的技术规范^[18]，能够提供一种统一的方法来管理和操作生命周期管理工具中的各种模型及其数据。OSLC 规范由核心规范和领域规范构成，其中核心规范对于 OSLC 规范最核心的集成概念和 OSLC 服务所支持的通用特性进行了规约和描述。OSLC 核心模型包括服务提供方目录、服务提供方、服务和资源，核心模型内部关系如图 4 所示。

其中：

- 1) 服务提供方目录(Service Provider Catalog): 服务提供方目录列出所有可用的服务提供方，使得发现和访问所有的服务提供方。在架构模型中，服务提供方目录是起落架系统模型库；在仿真模型中，服务提供方目录是起落架系统仿真模型所在文件夹。
- 2) 服务提供方(Service Provider): 服务提供方是一个具体的服务实例，提供一个或多个相关的服务。在架构模型中，服务提供方是起落架系统的模型，例如收放性能仿真方案架构模型、起落架收起活动图；在仿真模型中，服务提供方是起落架系统收放性能仿真模型。
- 3) 服务(Service): 服务是由服务相关方提供的具体功能，是管理资源的能力。在起落架系统中，服务是对架构模型和仿真模型内资源的增删查改能力。
- 4) 资源(Resource): 资源是服务的操作目标，服务通过对资源进行操作实现功能。在起落架系统中，架构模型的资源是视图、对象、端点、属性、关系、角色、约束，仿真模型的资源是模型、子系统、模块、连接、参数。

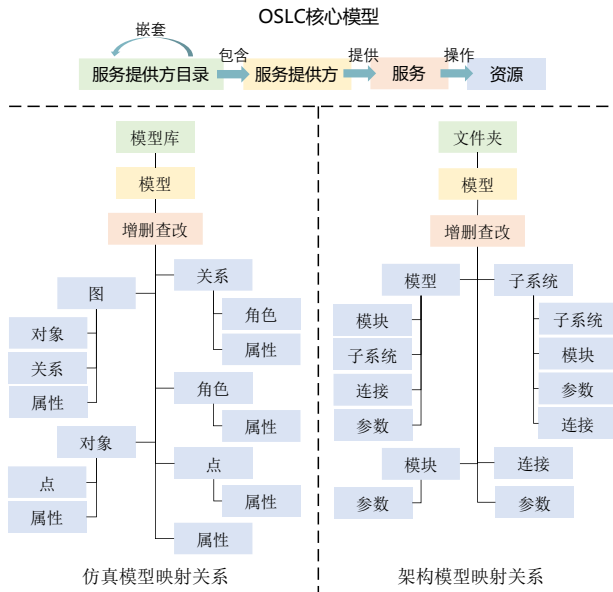


图 4 OSLC 核心模型和模型映射关系

Fig. 4 OSLC core model and model mapping relationships

2.2.2 语义映射规则

根据 OSLC 规范，首先需要建立 OSLC 核心模型、KARMA 架构模型和 Simulink 仿真模型之间的语义映射规则。OSLC 核心模型与起落架系统架构模型、仿真模型的语义映射规则见表 2。通过 OSLC 核心模型实现了起落架系统架构模型和仿真模型的统一表达，消除了架构模型与仿真模型的语义、语法异构问题。基于该映射规则，能够实现起落架系统集成服务的实现，实现模型在异构工具间的互操作。

表 2 OSLC 核心模型与模型映射对象

Table 2 OSLC core model and model mapping objects

OSLC 核心模型	架构模型	仿真模型
服务提供方目录	模型库	文件夹
服务提供方	模型	模型
服务	增删查改	增删查改
资源	视图、对象、端点、属性、关系、角色、约束	模型、子系统、模块、连接、参数

分别将起落架系统的架构模型和仿真模型语义与 OSLC 核心模型进行映射^[24]，如图 4 所示。通过与 OSLC 核心模型形式的对应来展现出 OSLC 规范与架构模型和仿真模型语义之间对应的映射关系。

2.2.3 仿真模型数据解析及服务生成

根据上述语义映射规则，可以构建 Simulink 工具集成适配器^[25]以提供仿真模型集成配置服务。上述工具适配器是 OSLC 核心模型以及语义映射规则的工具实现载体。基于 OSLC 的核心模型和

语义映射规则，在架构和仿真模型之间构建信息传递路径，实现不同工具和模型之间的语义一致性与互操作能力。构建 Simulink 适配器首先需要对仿真模型进行数据解析，获得仿真模型的模型结构、模型参数等关键信息及 Simulink 模型的增删改查等操作接口，确保模型数据能够顺利集成。

在进行起落架仿真模型解析时，需要搜索并提取每个模块和子系统自身参数和属性，以及不同模块和子系统之间的关系。起落架系统仿真模型的解析流程如图 5 所示。解析数据过程按照深度搜索的方式进行，首先搜索模型中的顶层元素(模块、子系统)的名称、类型等信息，并进行信息的记录，以该顶层元素为开始向下搜索该元素的位置等参数并记录信息。若该顶层元素为子系统，则继续向下搜索其中包含的元素。完成所有的搜索后，输出解析好的数据进而生成模型数据树。

Simulink 构建出的仿真模型可以使用统一标准的可拓展标记语言(eXtensible markup language, XML)格式^[26]进行数据的存储。XML 文件以具有固定的结构，具有根元素(Root Element)、子元素(Child Elements)和属性(Attributes)等层级关系，且由多个标签嵌套而成。这种结构化方式使得数据的层次关系清晰，具有很强的规律性，能够快速、准确的提取出所需要的内容。

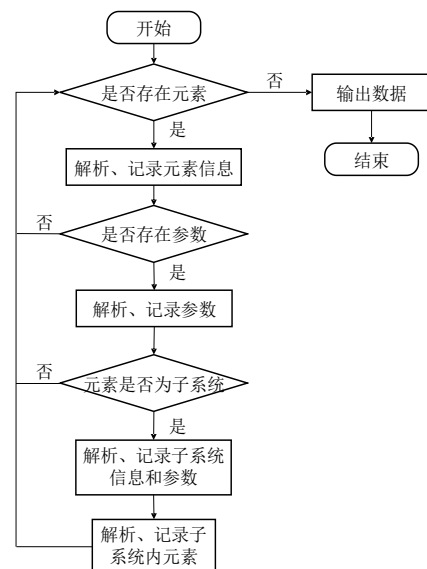


图 5 起落架系统仿真模型解析流程

Fig. 5 The process of landing gear system simulation model analysis

采用 DOM 解析方式^[27]对仿真模型进行解析，将其表示为树结构，便于读取模型中的数据。由于 DOM 解析将数据解析为树结构，与 XML 文件格式类似，可以建立起落架系统仿真模型与 XML 文件之间的映射关系，见表 3。

首先搜索 XML 文件中的<Model>标签，该标签中记录了起落架系统仿真模型的全部信息，包括内容结构和配置信息。在 XML 文件中，仿真模型全部的内容结构视为一个完整的系统，因此定位到文件中的第一个<System>，第一个<System>中包含了仿真模型完整的模型结构。紧接着，搜索下一级<P>标签，标签中的 Name 属性表示参数名称，记录模型相关的参数名称和值。对模型的基本参数记录之后，定位到<Block>标签，搜索仿真模型中的元素。<Block>标签的 BlockType 属性表示元素类型、Name 属性表示元素名称、SID 属性表示元素的 ID。随后搜索下一级<P>标签，记录当前元素的参数名称和值。若当前元素类型为“Subsystem”，则表明该元素是一个子系统，且<Block>标签下嵌套了<System>标签，需要继续解析<System>中包含的信息。若元素类型为其他形式，则说明该元素是一个模块。重复上述过程，直到遍历完所有<Block>标签。最后搜索至<Line>标签后，搜索该标签下嵌套的<P>标签，记录当前连接的参数名称和值。全部搜索完成后，完成起落架系统仿真模型的数据解析，形成模型

数据树，模型数据树的格式如图 6 所示。

仿真模型数据成功解析后，实现了对仿真模型数据的读取和改动，能够将仿真模型数据正确的按照语义映射规则进行映射。

围绕上述方法，实现了起落架系统模型集成技术，通过该技术开发了 Simulink 适配器^[27]，并导入仿真模型。通过语义映射规则和数据解析技术，能够在 Simulink 适配器中访问仿真模型的信息并进行模型的操作，实现跨域信息的双向传递，进而实现不同领域模型之间在异构工具间的互操作。

在完成仿真模型数据解析后，为实现 Simulink 工具适配器的构建，还需要生成对仿真模型数据的增删改查等操作的服务。在 Simulink 工具适配器中构建了以下仿真模型元素的服务：

- 1) 模型服务：查询模型内部结构/元数据(创建者、修改时间等)；
- 2) 子系统服务：查询/新增/删除子系统、查询/修改子系统的内部结构/子系统参数；
- 3) 模块服务：查询/新增/删除模块、查询/修改模块的参数(属性、位置等)；
- 4) 连接服务：查询/新增/删除连接；

通过在工具适配器中构建上述服务可以实现仿真模型信息的形式化表征，通过重用上述服务可以实现起落架设计信息在架构建模工具、仿真验证工具之间的一致性双向传递。

表 3 仿真模型与 XML 文件映射关系
Table 3 Simulation model and XML document mapping relationship

标签名	含义	关键属性
<Model>	模型定义标签。模型中所有内容通过该标签进行记录	\
<System>	子系统定义标签。子系统的所有内容通过标签进行记录	\
<Block>	元素标签。包括元素部分信息，用于记录元素中的所 有参数	BlockType: 元素类型 Name: 元素名称 SID: 元素 ID
<Line>	连接标签。记录连接线的始端、末端、分支、拐点信息	\
<P>	参数标签。参数名称和对应的通过该标签进行记录	Name: 参数名称

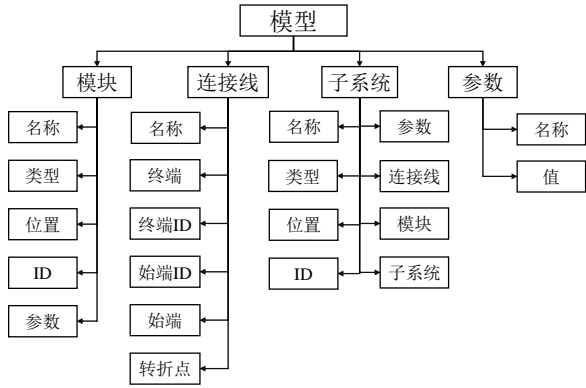


图6 起落架系统仿真模型数据树格式

Fig. 6 Landing gear system simulation model data tree format

2.3 起落架系统集成实例

下面将通过起落架系统设计中仿真结果未满足需求产生的架构变更为案例验证上述提出方法的有效性。

2.3.1 案例介绍

工程人员按照2.1节中所述的流程完成起落架系统架构模型和仿真模型的构建。当起落架系统需求发生变化时，工程人员更改架构模型对应相

关指标，并通过模型集成服务平台对起落架系统仿真模型进行更改，调整对应的参数。随后，对仿真模型进行仿真得到仿真结果，并将结果反馈至架构模型中，实现跨域信息的双向传递。

2.3.2 案例模型构建

首先，构建起落架系统的架构模型。基于需求-功能-逻辑-物理(RFLP)建模流程^[28]，从飞机级、系统级与子系统级三个层级出发，构建了起落架系统从需求到功能到逻辑到物理的模型，如图7所示。首先从系统任务需求和利益相关方需求出发，总结起落架系统需求。紧接着，根据系统需求提出起落架系统功能设计，包括系统上下文、用例分析、功能活动等。随后，根据用例活动分析开展逻辑设计工作，根据子系统内部接口交互设计并细化用例活动分析，并对作动筒收放载荷进行分析。最后，建立物理仿真架构图，对起落架内部组成分解与参数分析。

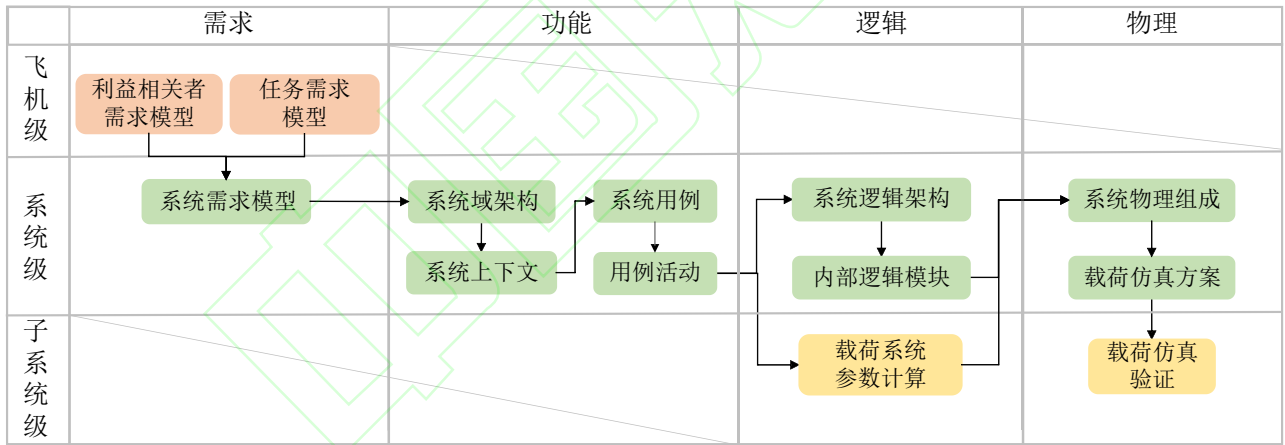


图7 起落架系统架构建模流程

Fig. 7 The process of landing gear system architecture modeling

在起落架系统收放过程中，收放作动筒的受力形式较为复杂，不仅需要承受其系统自重以及收放过程中伴随的摩擦力，还要承受起落架收放动作在飞行过程中产生的气动阻力等其他相关外力^[29]。在收放过程中，由于起落架形态发生变化，其受力造成的载荷会随之发生动态变化。本文对起落架系统的作动筒动态载荷进行仿真验证，从而保证起落架系统在收放过程中其作动筒具有充足的安全裕度。

在稳定气流环境中起落架系统的质量力 P_m 为

$$P_m = n_{g,d}^u G_t \quad (1)$$

式中， P_m 的方向竖直向下； G_t 为起落架转动部分重力； $n_{g,d}^u$ 为起落架收放时的使用过载，一般不大于2.0，本文中取2.0。

质量力 P_m 对固定点的力矩 M_m 为

$$M_m = P_m r \sin \phi \quad (2)$$

式中， r 为起落架质心距离固定点的距离； ϕ 为起落架运动角度，角度取值范围为 $0^\circ \sim 105^\circ$ 。

由于起落架收放时，飞机处于起飞或降落阶段，飞机机体会产生一定的俯仰角，考虑俯仰角

后, 可得到起落架系统收起与释放的质量力矩分别为

$$\begin{cases} M_{m\ down} = 6728.84 \bullet \sin \varphi \\ M_{m\ up} = 6728.84 \bullet \sin(\varphi + \pi/18) \end{cases} \quad (3)$$

起落架系统的气动阻力由各机械结构所受气动阻力叠加而成的, 其方向指向气流运动方向, 各机械结构所受气动阻力 P_{adi} 为

$$P_{adi} = C_{xi} \rho_0 (V_{g,d}^{max})^2 S_i / 2 \quad (4)$$

式中, C_{xi} 为各机械结构上阻力系数; S_i 为各机械结构在垂直于气流平面上的投影面积; ρ_0 为收放起落架时空气密度; $V_{g,d}^{max}$ 为收放起落架时最大飞行速度。

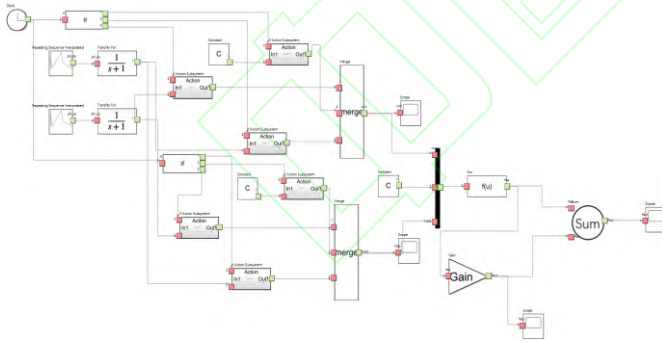
气动合力矩 M_{ad} 为

$$M_{ad} = \sum \overline{P_{adi} b_i} \quad (5)$$

式中, P_{adi} 随飞机收放起落架过程发生改变, b_i 为各机械结构气动阻力到固定转轴力臂距离, 其值随收放过程改变。

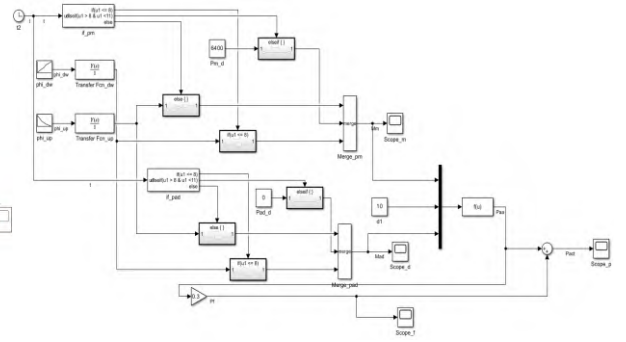
带入相关参数后, 起落架系统收起和释放时气动合力矩分别为

$$\begin{cases} M_{ad\ down} = 2127.75 \cos \varphi + 1009.25 \cos(1.225\varphi) \cos \varphi \\ M_{ad\ up} = 2127.75 \cos \varphi + 1009.25 \cos \varphi \cos \varphi \end{cases}$$



a. 起落架收放性能仿真方案架构模型

a. Landing Gear Retracting and Extending Performance Simulation Scheme Architecture Model



b. 起落架收放性能仿真模型

b. Landing Gear Retracting and Extending Performance Simulation Model

图 8 起落架系统仿真方案架构模型和仿真模型

Fig. 8 Landing gear system simulation scheme architecture model and simulation model

2.3.3 案例集成实现

在起落架系统设计过程中, 流程如图 9 所示。首先总体部门在完成起落架系统架构模型的构建并生成仿真模型后, 将模型传递至各个领域设计部门进行协作。其次, 载荷仿真部门对起落架系统的作动筒收放性能关键指标进行仿真, 仿真结

果如图 10(a)所示。由于仿真结果中动态载荷的最大值超过准许载荷 200MPa, 故追溯到架构模型中, 对起落架系统物理组成等模型进行更改并对仿真方案进行更改。工程人员在起落架自身重力和气动阻力不变的情况下, 改变收放作动筒的润滑形式, 从而降低收放过程中的摩擦力, 使收放

收放作动筒在收放过程中所产生的摩擦力 P_f

为

$$P_f = (0.18 \sim 0.4) P_{aa} \quad (7)$$

式中, P_{aa} 为合载荷, 由起落架质量力和气动阻力叠加产生; 本文中摩擦系数为 0.4。

起落架系统收放作动筒的总载荷 P_{act} 为上述各情况的载荷之和, 其计算式为

$$P_{act} = (M_m + M_{ad}) / d + P_f \quad (8)$$

式中, d 为收放作动筒对起落架转轴的力臂, 其值随收放过程而改变。

根据上述起落架系统收放作动筒动态载荷计算的机理, 通过 KARMA 建立起落架系统的载荷仿真方案, 如图 8(a)所示。在该方案中, 0-8s 为起落架系统释放时间, 8-11s 为起落架系统地面滑行时间, 11-20s 为起落架收起时间。

最后通过 KARMA 的代码生成技术, 将起落架收放性能仿真方案架构模型转换为 MATLAB 代码文件, 执行后生成 Simulink 仿真模型, 如图 8(b)所示。

作动筒收放过程中的最大载荷低于准许载荷。

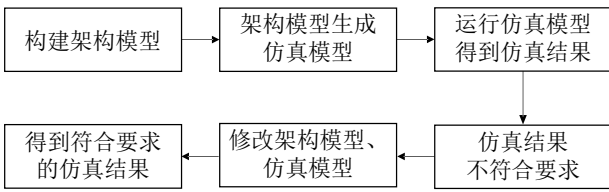


图 9 案例流程

Fig. 9 The process of case

首先，工程人员在架构模型中起落架收放性能仿真方案中，将 Gain1 的参数从 0.4 修改为 0.3，即由于修改收放作动筒的润滑形式，其摩擦系数便随下降，这样使得收放作动筒的摩擦力减少，如图 10(b)所示。由于架构模型的改变，再次通过

架构模型中的仿真方案生成新模型会造成仿真模型的重构，难以维护管理模型的一致性问题，故采用 Simulink 适配器对仿真模型进行更改，并在完成更改后在工具适配器中直接进行仿真。随后，打开 Simulink 适配器，进入仿真模型中，可以看到仿真模型中的所有模型、子系统、模块及其详细的结构、位置、参数信息。按照架构模型中仿真方案对仿真模型进行相同的修改并保存，得到更改后的仿真模型，如图 10(c)所示。在适配器中点击仿真执行，即可对新的仿真模型进行收放作动筒载荷的验证，结果如图 10(d)所示，验证结果为最大载荷低于准许载荷。

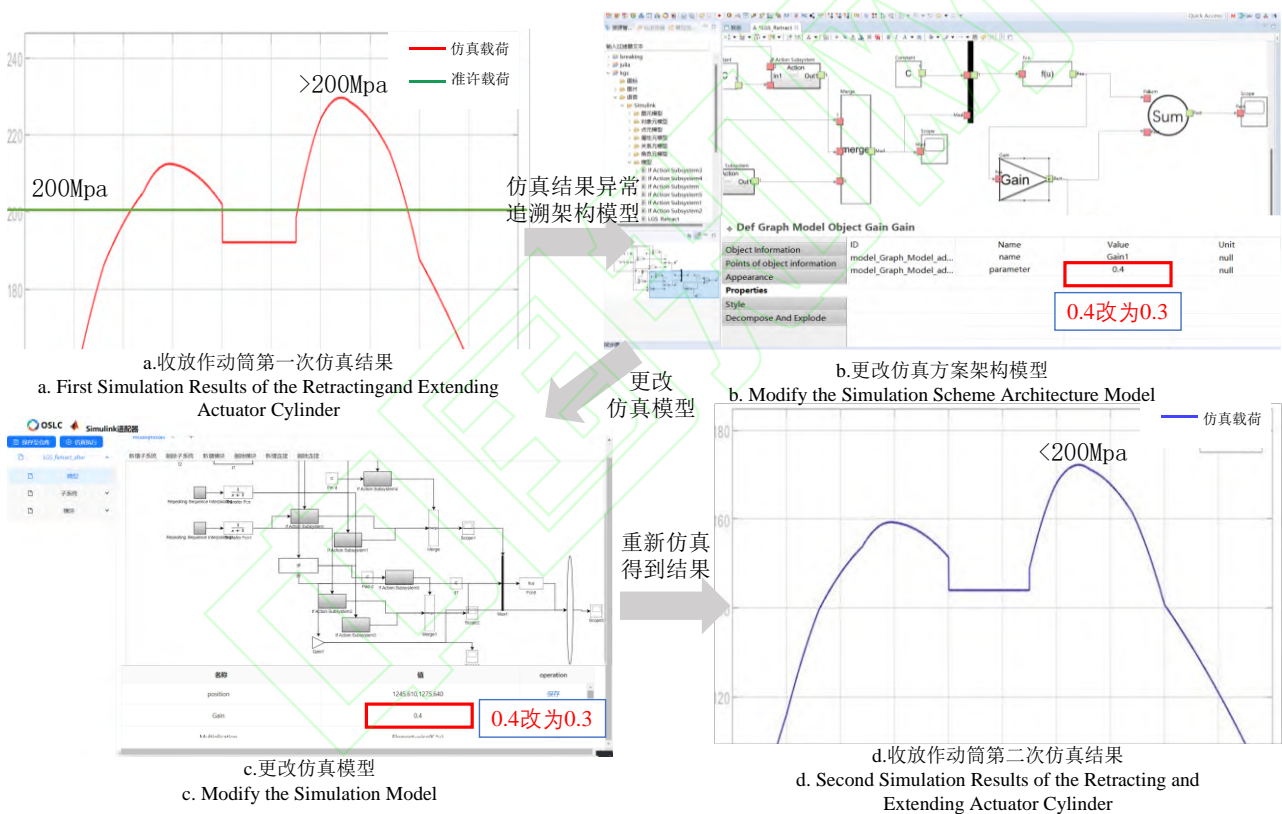


图 10 起落架系统模型集成实现

Fig. 10 Landing gear system model integration implementation

3 结论

本文以飞机的起落架系统为研究对象，提出了一套面向 MBSE 的起落架系统模型集成技术。首先建立起落架系统的架构模型，基于 GOPRR-E 元建模方法，建立了起落架系统完成的架构模型。随后，在架构模型中构建起落架收放性能仿真方案架构模型，通过代码生成技术实现架构模

型的仿真方案转换为仿真模型。然后根据 OSLC 规范，建立 OSLC 核心模型、架构模型和仿真模型之间的语义映射规则。基于语义映射规则，通过仿真文件解析和生成服务构建工具适配器以提供模型集成配置服务，提供一种统一的编译机制对不同模型进行解析，实现不同模型跨域信息的双向传递和接口互操作，实现异构工具之间的互操作，进而实现起落架系统模型的集成。

本文在研究中还存在需要改进和深入研究的地方：首先，仿真建模工具种类繁多，本文只实现了架构建模工具与 Simulink 仿真工具间的集成技术，对于仿真领域工具覆盖面少，可通过该方法开发其他不同领域仿真工具的集成技术；其次，该技术所构建的仿真工具适配器存在交互不便的问题。基于此，在未来工作中会通过该方法实现架构模型于其他领域仿真工具的集成以及不断优化现有的 Simulink 仿真工具适配器。

参考文献 (References)

- [1] 安红辉. 飞机起落架落震试验技术研究[D]. 南京航空航天大学, 2010.
AN H. Technology Research of an aircraft landing gear drop test [D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010 (in Chinese).
- [2] 胡炳涛,冯毅雄,刘继红等.面向“互联网+”定制产品的智能适应性设计研究 [J]. 机械工程学报,2023,59(12):109-125.
HU B T, Feng Y X, Liu J H, et. al. Research on Intelligent Adaptive Design for “Internet+” Customized Products [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023,59(12):109-125 (in Chinese).
- [3] 王昊琪,李浩,文笑雨.基于本体的公理化系统设计语义建模与推理规则[J].机械工程学报,2021,57(05):205-221.
Wang H Q, Li H, Wen X Y. Ontology-based Axiomatic System Design Semantic Modeling and Reasoning Rules [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021,57(05):205-221 (in Chinese).
- [4] 贺文虎,刘伟,王西龙,等.航空动力装备顶层功能分解分配建模方法研究[J].图学学报, 2024,45(02):292-299.
HE W H, LIU W, WANG Y L, et. al. Research on modeling method of top-level function decomposition and allocation for aviation power equipment [J]. Journal of Graphics, 2024,45(02):292-299 (in Chinese).
- [5] 王海芳,张雷,刘慧军,等.基于 DoDAF 的动车组 MBSE 的研制方法[J].图学学报,2024,45(02):339-346.
WANG H F, ZHANG L, LIU H J, et. al. A DoDAF-based method for developing MBSE for EMU [J]. Journal of Graphics, 2024,45(02):339-346 (in Chinese).
- [6] VAN MANEN B. Development and Implementation of an MBSE Requirement Verification Framework in the System Design Process[J]. 2022.
- [7] DELPRETE C, DAGNA A, BRUSA E. Model-Based Design of Aircraft Landing Gear System[J]. Applied Sciences, 2023, 13(20): 11465.
- [8] Thacker B H, Doebeling S W, Hemez F M, et al. Concepts of model verification and validation[J]. 2004.
- [9] ALVAREZ-RODRÍGUEZ J M, MENDIETA R, CIBRIÁN E, et al. Towards a method to quantitatively measure toolchain interoperability in the engineering lifecycle: A case study of digital hardware design[J]. Computer Standards & Interfaces, 2023, 86: 103744.
- [10] RIGGER E, RÄDLER S, STANKOVIC T. Integrating Computational Design Support in Model-Based Systems Engineering Using Model Transformations[C]//IFIP International Conference on Product Lifecycle Management. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022: 186-195.
- [11] YANG P, LU J, FENG L, et al. A knowledge management approach supporting model-based systems engineering[C]//Trends and Applications in Information Systems and Technologies: Volume 2 9. Springer International Publishing, 2021: 581-590.
- [12] 赵良玉, 叶俊杰, 何琪, 等. 基于 MBSE 的民机起飞场景仿真[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(10): 2499-2510.
Zhao Liangyu, Ye Junjie, He Qi, et. al. Simulation of civil aircraft takeoff scenario based on mbse [J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(10): 2499-2510 (in Chinese).
- [13] CHABIBI B, ANWAR A, NASSAR M. Towards a Model Integration from SysML to MATLAB/Simulink[J]. J. Softw., 2018, 13(12): 630-645.
- [14] CAO Y, LIU Y, PAREDIS C J J. System-level model integration of design and simulation for mechatronic systems based on SysML[J]. Mechatronics, 2011, 21(6): 1063-1075.
- [15] LU J, WANG G, TÖRNGREN M. Design ontology in a case study for cosimulation in a model-based systems engineering tool-chain[J]. IEEE Systems journal, 2019, 14(1): 1297-1308.
- [16] RANGEL D, PAVALKIS S, YAKIMENKO O. Integration of Cameo Systems Modeler with Simulink for Co-Orbital Engagement Mission Engineering[C]//INCOSE International Symposium. 2023, 33(1): 704-723.
- [17] WU S, WANG G, LU J, et al. Design ontology for cognitive thread supporting traceability management in model-based systems engineering[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2024, 40: 100619.
- [18] JIM A. OSLC core version 3. 0:overview[EB/OL]. [2024.9.27]. <http://docs.oasis-open.org/oslc-core/oslc-core/v3.0/>.
- [19] MA J, WANG G, LU J, et al. Systematic literature review of MBSE tool-chains[J]. Applied Sciences, 2022, 12(7): 3431.
- [20] LU J, WANG G, YAN Y, et al. Semantic Model - based Systems Engineering based on KARMA: A Research and Practice Roadmap 2025[C]//INCOSE International Symposium. 2022, 32(1): 706-720.
- [21] SAADATMAND M, BUCAIONI A. OSLC Tool Integration and Systems Engineering – The Relationship between the Two Worlds[C]//2014 40th EUROMICRO Conference on Software Engineering and Advanced Applications. 2014: 93-101.
- [22] DABNEY J B, HARMAN T L. Mastering simulink[M]. Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall, 2004.
- [23] GUO J M, WANG G X, LU J Z, et al. A General Modeling Language Supporting Architecture driven and Code Generation (Part 2) [C]. 30th Annual INCOSE International Symposium, 2020, 30(1): 1460-1473.
- [24] CHEN R, WANG G, WU S, et al. A Service-oriented Approach Supporting Model Integration in Model-based Systems Engineering[C]//2023 IEEE International Systems Conference (SysCon). IEEE, 2023: 1-7.
- [25] WU S, LU J, HU Z, et al. Cognitive thread supports system of systems for complex system development[C]//2021 16th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE). IEEE, 2021: 82-87.
- [26] ACHARD F, VAYSSEIX G, BARILLOT E. XML, bioinformatics and data integration[J]. Bioinformatics, 2001, 17(2): 115-125.
- [27] JENSEN S H, MADSEN M, MØLLER A. Modeling the HTML DOM and browser API in static analysis of JavaScript web applications[C]//Proceedings of the 19th ACM SIGSOFT symposium and the 13th European conference on Foundations of software engineering. 2011: 59-69.
- [28] KLEINER S, KRAMER C. Model based design with systems engineering based on RFLP using V6[C]//Smart Product Engineering: Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference, Bochum, Germany, March 11th-13th, 2013. Springer Berlin Heidelberg, 2013: 93-102.
- [29] 石旭东,英福君,张宇,等.飞机起落架收放系统性能仿真与故障分析

[J].计算机应用与软件,2021,38(02):65-71+184.

Shi X d, Ying F J, Zhang Y, et. al. Performance Simulation and Fault Analysis of Aircraft Landing Gear Extension and Retraction System [J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(02): 65-71+184 (in Chinese).

