

多架构建模方法在飞机娱乐系统的实现及应用

孙胜楠¹, 鲁金直^{2*}, 陈金伟¹, 黄百乔³, 兰小平⁴, 张会生¹

1. 上海交通大学动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240
2. 北京中科蜂巢科技有限公司, 北京 100088
3. 国防科技工业海洋安全体系创新中心, 北京 100094
4. 兵器工业信息中心, 北京 100089

摘要 提出了一种实现基于模型的系统工程(MBSE)多架构建模方法。基于多架构建模方法的元元模型, 构建了Capella中的特定域建模语言, 采用Arcadia建模方法作为建模规范, 同时基于架构驱动的方法建立了模型间的追溯关系, 形成了一套完整的基于模型的系统工程驱动流程。通过飞机娱乐系统作为案例建立模型, 比较Capella建模和多架构建模两种方法, 给出了两种方法在效率及效能方面的比较, 结果表明多架构建模方法具有建模的高效性和较强的扩展能力, 为不同MBSE建模语言和建模方法的整合提供一种解决方案。

关键词 基于模型的系统工程; 多架构建模; 特定域建模语言; 飞机娱乐系统

传统的系统工程设计方法采用基于文档形式进行信息表达和传递, 容易造成知识碎片化、信息爆炸、交流不一致、无法建立明确的追溯性关系以及验证性不足等问题。随着信息技术的迅速发展, 利用图形化、结构化的建模语言描述系统设计开发过程中的需求模型、功能模型和架构模型等变得越

来越容易, 基于模型的系统工程(MBSE)方法应运而生, 利用模型表达系统全生命周期中需求、设计、分析、验证和确认等过程。

MBSE方法的实现主要包括建模语言、建模方法以及建模工具。MBSE方法通过图形化的建模语言实现产品系统设计及开发的模型表达。目前,

收稿日期: 2020-04-16; 修回日期: 2020-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51876116, 51906138); 中国博士后科学基金面上项目(2019M650085); 国防基础科研计划项目(JCKY2017208A001)

作者简介: 孙胜楠, 硕士研究生, 研究方向为燃气轮机、系统工程, 电子信箱: sun.shengnan@sjtu.edu.cn; 鲁金直(通信作者), 博士, 研究方向为基于模型的系统工程, 电子信箱: lujz@zhoneycomb.com

引用格式: 孙胜楠, 鲁金直, 陈金伟, 等. 多架构建模方法在飞机娱乐系统的实现及应用[J]. 科技导报, 2020, 38(21): 177-186; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2020.21.022

主要应用的建模语言包括统一建模语言UML^[1]、系统建模语言SysML^[2]、领域特定建模语言DSML^[3]、业务流程建模语言BPMN^[4]等。UML和SysML是为MBSE方法的实现构建的通用性建模语言,这种通用性建模语言的语义、语法相对固定,扩展性不足,很难实现系统及体系级整合,在特定的领域进行系统建模时,需要添加更多的信息进行表达,建模过程相对烦琐。

建模方法指的是建模的流程规范,目前常用的建模方法包括Harmony-SE方法^[5]、OOSEM方法^[6]、Arcadia方法^[3]和OPM方法^[7]等。Harmony-SE方法的建模流程为系统需求分析-系统功能分析-系统设计综合3个阶段。OOSEM是面向对象的系统工程方法(object-oriented system engineering method),实现过程包括分析需求、定义逻辑体系结构、合成候选分配架构、优化和评估可选方案、验证和确认系统等开发活动^[8]。Arcadia方法遵循的建模流程为运营分析-系统分析-逻辑架构-物理架构-产品结构分解。不同应用领域有不同的工业标准和规范。建模方法为MBSE的实现提供了规范的工作流程,相应的逻辑也为模型的实施与验证提供借鉴依据。

MBSE建模工具可以支持不同建模方法与建模语言。目前,大多数的建模工具在一种建模语言与建模方法的基础上来推广其理论体系。由于现有建模语言及模型的数据异构,单一建模工具无法实现与其他工具的结合。这也使得MBSE方法在所涉及的专业领域过程中落地困难。因此,亟需一套建模体系和方法允许支持多种MBSE语言的整合和统一表达。

针对上述建模语言、方法、工具中存在的问题,提出一种多架构建模方法^[9],通过M0-M3建模框架,从基础元元模型出发,建立特定领域元模型库,形成特定域建模语言,通过特定域建模语言建立模型,表达系统开发设计中各阶段的信息。在建模过程中可以选取适合所在领域的建模方法进行建模流程的管理,形成建模规范。将建模语言和建模方法集成到自主开发的特定域建模工具中,构建特定域建模语言,选取飞机娱乐系统的案例进行介绍,

并与目前已有的商业化软件进行对比,证明该方法的可用性以及效率和效能的提高。

1 多架构建模方法

采用M0-M3建模框架实现多架构建模技术,分为4个层次^[10-11],如图1所示。M3层为元元模型,包括图、对象、关系、角色、点及属性^[9]6种,通过元元模型建模方法开发M2层的元模型,形成特定域建模语言的元模型库。建模时选取适合的建模方法按照流程规范逐步将元模型实例化建立形成M1层的模型,不同模型之间通过架构驱动建立模型的追溯关系实现模型转化。多个模型组合用于表达M0层的真实系统视角。基于元元模型的多架构建模方法可以对元模型进行重用和扩展,解决系统变化引起模型结构组成改变的问题,能够自主开发MBSE方法实施所需的架构。选取Capella中的DSML建模语言与Arcadia建模方法,结合架构驱动方法介绍如何通过多架构建模方法实现MBSE方法的整体流程。

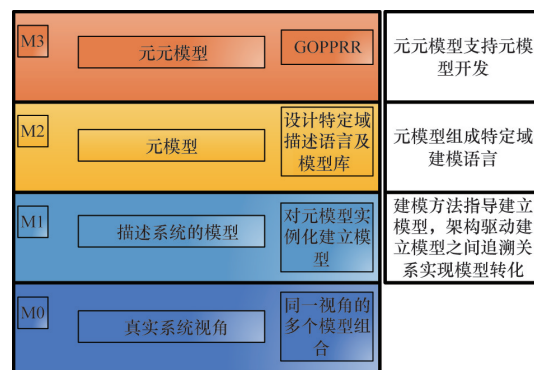


图1 M0-M3层次架构

1.1 元元模型建模方法

GOPRR元元模型分为6种,包括图、对象、属性、点、关系、角色,如图2所示。具体解释及定义如下。

图(graph):图由其他5种元素组合而成,在一个框内对系统进行描述。

对象(object):模型中的基本元素,可以单独存在,也可以与其他对象链接。

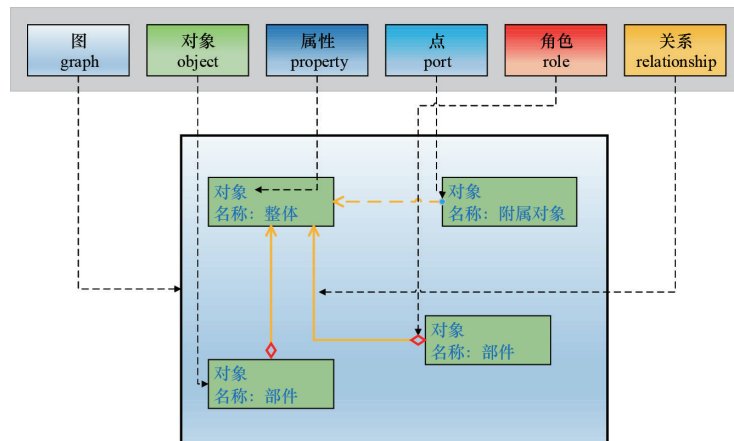


图2 GOPPRR方法

属性(property):不能单独存在,附属到其他元模型用于表示其特性。

点(port):通常附属到对象上,表示对象连接的端口。

角色(role):在关系的两端,连接对象,表示对象以何种方式或身份进行连接。

关系(relationship):关系通过角色与对象进行连接,表示对象之间的交互方式。

通过 GOPPRR 的 6 种元素进行组合,开发针对特定系统的特定域建模语言元模型。6 种元模型的设计流程如下。

- 1) 定义属性元模型,用于在其他元模型中引用。
- 2) 点元模型中添加属性,并定义其固定语法(图标和图形符号)及类别,包括输入、输出、无向 3 种,建立点元模型。
- 3) 对象元模型设定名称以及相关描述,根据领域知识添加不同对象所特有的属性,并定义其固定语法。此外包含点的对象则将建立的点元模型附加在对象上。
- 4) 关系元模型中添加属性及其固定语法,表示连接对象之间的交互关系。
- 5) 建立角色元模型,定义角色名称、属性及其固定语法。
- 6) 在图元模型中添加前面 5 种元模型,用绑定的形式定义对象或对象上的点、关系和角色连接的规则。

通过上述元元模型方法构建特定域建模语言,在特定的领域可以自定义每种元模型的结构,采用这种元元模型的建模方法能够很容易地对元模型进行重用和扩展,为 MBSE 方法在不同领域的落地实施带来更便利的解决办法。

1.2 特定域建模语言

选取 Capella 中的 DSML 建模语言为例,基于上述的元元模型建模方法进行开发,为建模提供基础。采用 GOPPRR 方法实现 Capella 中 DSML,如图 3^[3]所示。整个模型作为图元模型,以系统、角色、功能的图形作为对象元模型,对象上的连接点用点元模型表示,对象之间的连接方式用关系元模型表示,关系的两端以角色元模型表示,上述 5 种元模型的名称信息等用属性元模型定义,从而实现 Capella 建模的需求。

1.3 建模方法

Capella 中使用 Arcadia 建模方法,这种建模方法将建模分为 5 个层级,每个层级中包含若干元模型库。Arcadia 方法的层级关系如图 4 所示,包括运营分析、系统分析、逻辑架构、物理分析和产品结构分析。

运营分析层首先确定系统中的角色和实体,并建立角色和实体之间的包含关系。其次根据利益相关人分析其能力建立,将能力分配给所属对象。然后分析系统用例,建立活动之间的交互关系。在运营架构图中引入利益相关人,并将活动分配到各利益相关人,自动生成活动之间的交互关系。

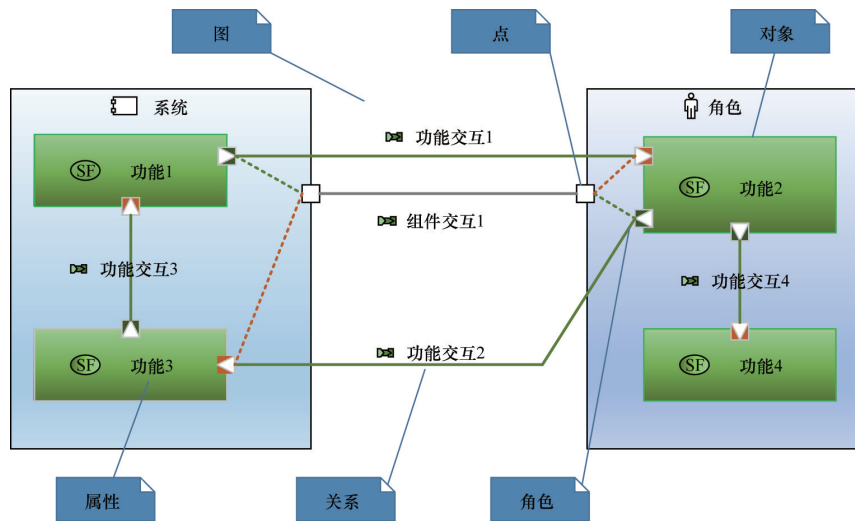


图3 Capella中DSML实现

系统分析层首先通过模型转化的方式将活动转化为对应的功能。在系统分析中建立系统和利益相关人的模型,将利益相关人划分至所属系统中。其次通过任务和能力的形式分析系统需要具备的功能。然后建立功能之间的交互关系,通过功能组合实现系统运行过程中的用例。最终在系统架构中引入系统与利益相关人,并将功能分配到相应的对象中,自动生成功能之间的交互关系,形成整个系统的架构。

逻辑架构层首先建立逻辑功能与角色功能之间的交互关系,表示系统内部逻辑实现与功能配合。其次建立系统逻辑组件之间的细化分解模型,逻辑组件表示系统硬件、管理等。最后在逻辑架构中引入系统、利益相关人,并将逻辑组件分配到对应的系统和实体中,在逻辑组件、角色中通过重用逻辑功能和角色功能,自动生成功能之间的关系,形成系统的逻辑架构。

物理分析层首先建立物理功能与角色功能的交互模型,表示物理功能的实现方式。其次建立物理组件的细化分解图,物理组件表示构成系统的实际组件。最后在物理架构中引入系统和利益相关人,将物理组件分配到利益相关人和系统中,并将物理功能和角色功能分配到物理组件或角色中,自动生成功能交互关系,形成最终的物理架构模型。

产品结构分解层级最终建立起产品终端结构,与物理架构层级物理组件的构建方式相同,但产品终端层注重的软硬件分配和集成关系,一般是软硬件工程师关注的重点。在产品结构分解图中对系统的软硬件结构划分,表示其组成形式。

除了上述5层结构外,还包括共用层级的模型图。其中类图以产品所需精度对系统的数据建立模型,表示出数据结构的构建。模式/状态机图用于建立系统的状态转化模型,可以在每个层级的顺序图中引用标识出系统的运行模式和状态。此外,还包括接口图,用于表示系统的接口形式。

1.4 架构驱动

在建模过程中,除建模方法作为指导外,还需要建模模型间自动生成和模型转化的追溯关系,对多个模型进行管理。如在“运营活动交互”中建立了活动之间的交互关系,在“运营架构图”中可以将已经建立的活动添加到所属的对象中,并自动生成已经建立的活动之间的交互关系,提高建模效率。不同层级之间的模型通过模型转化建立追溯关系,如在运营分析层级建立活动之间的关系,将活动转化为系统分析层级的功能,建立不同层级模型之间的关系。研究采用的多架构建模方法通过架构驱动的方法建立上下层模型之间的追溯关系。

架构驱动的原理如图5所示,采用架构驱动的

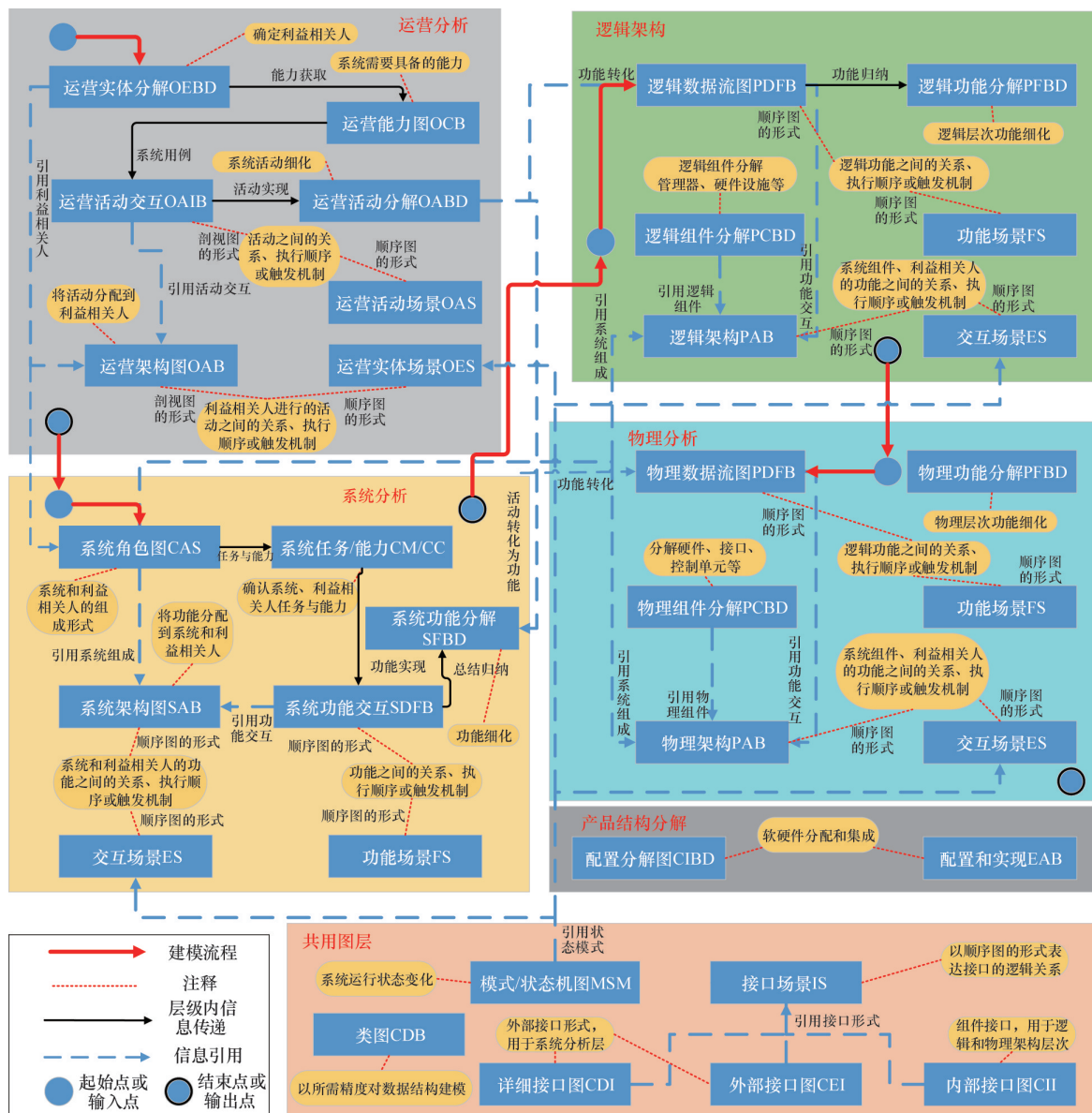


图4 建模方法

脚本语言定义转换规则,转换规则参考初始元模型与目标元模型,转换规则包括输入模型的匹配规则以及输出模型的生成规则。在执行架构驱动时将已有模型作为输入模型,架构驱动器读取输入模型信息,并根据匹配规则匹配输入模型,匹配成功的规则将执行,根据生成规则自动生成目标模型,实现基于架构驱动模型自动生成,从而建立不同层级间模型的追溯关系。

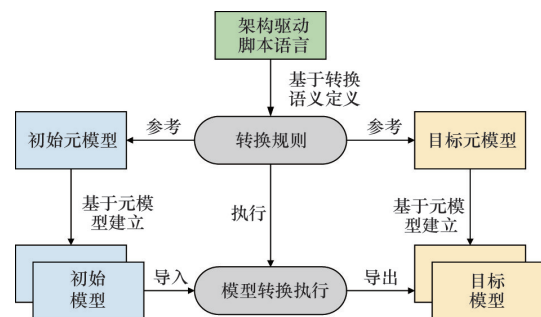


图5 架构驱动原理

2 飞机娱乐系统特定域模型建立

研究案例采用多架构建模工具 MetaGraph (<http://www.zkhoneycomb.com/>) 建立 Capella 特定域建模语言元模型库。以飞机娱乐系统的设计为例,建立飞机娱乐系统的特定域模型,建模过程遵循 Arcadia 建模方法,不同层级与模型之间通过架构驱动方法建立追溯关系。

2.1 飞机娱乐系统实现

飞机娱乐系统是指在飞机上为乘客服务设置的播放音乐、影视或乘客上网、看地图等功能的系

统。飞机娱乐系统包含乘客、乘务员、航空公司、飞机等在内的利益相关人,航空公司制定商业战略,设置飞机飞行期间的功能,通过机组人员为乘客提供服务,使乘客在旅途中获得旅行服务。

运营分析:运营分析层级分析系统利益相关人,包含的相关实体有航空公司、飞机、乘客个人设备,相关人员为机组人员、乘客、地面维护员;分析系统中的能力,将能力分配到对应的角色或实体,通过运行中的用例,如乘客点播电影、看地图、听广播等建立角色和实体活动之间的交互关系;将活动分配到所属的对象中,建立图6所示运营架构。

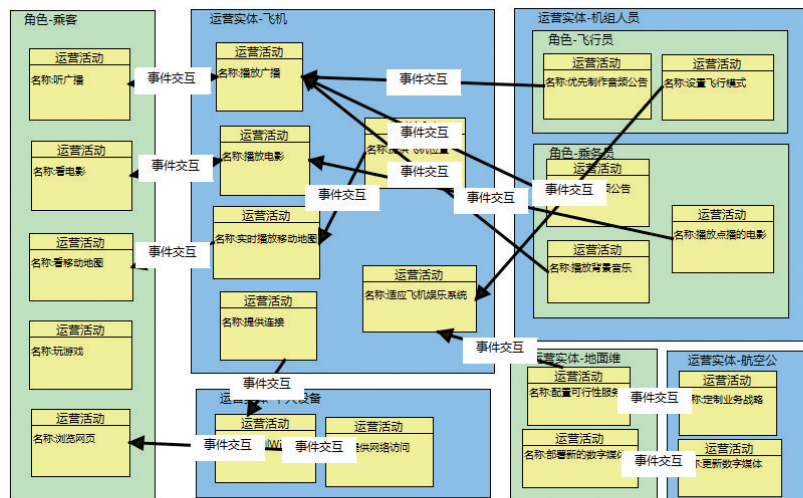


图6 运营架构

系统分析:完成运营分析图后建立系统分析图,确定系统中包含的实体和角色,根据系统所需完成的任务和具备的能力建立系统中利益相关人的任务能力图。根据任务能力以及运营活动建立系统运行过程中各功能之间的关系,通过功能表示系统活动的实现过程,最后将功能分配到所属对象,形成系统分析图(图7)。

逻辑架构:逻辑架构层级将展示系统内部实现机理。如乘客看视频需要座位电视内部的数字媒体功能加载视频数据包,通过解压缩视频数据包乘客可以在座舱屏幕上看电视,以此表示系统内部实现机理,图8为系统的逻辑架构图。

物理架构:物理架构表示系统的布置方式,如

系统中包含服务器、处理器、播放器、网络传输设备等实际物理组件,将功能分配到实际的组件,通过物理组件以及组件所包含的功能交互关系表示出系统的实际构建方式。图9为系统中网络传输的物理架构图。

架构驱动实现:在 MetaGraph 中构建架构驱动器,通过架构驱动实现模型的转化和重用,建立模型的追溯关系同时简化建模过程,如图10所示,通过架构驱动实现A向B的转化,图10的A中的对象通过架构驱动转换生成B中的对象,如C-F所示,活动对象生成功能对象,在生成的模型中添加属性值形成目标模型。D-E为模型的重用,将A中的对象自动生成B中相同的对象。G为架构驱动器的

算法结构,采用 karma 语言进行架构模型转化规则描述,通过架构驱动器实现架构模型转化。

通过上述分析,可以从角色和系统实体所执行的活动出发,分析对应功能的应用场景。根据场景,通过系统分析的外部实现方式建立系统的功能架构,分析系统内部实现机理建立详细的内部逻辑关系,最后在系统中加入功能对应的实际组件建立

系统的物理架构模型,实现系统架构的解决方案。

2.2 结果对比分析

通过多架构建模方法,按照 Arcadia 建模方法的层级顺序建立 Capella 特定域建模语言元模型库,共包括5层29种图元模型,其中对象元模型和关系元模型的数量如表1所示。

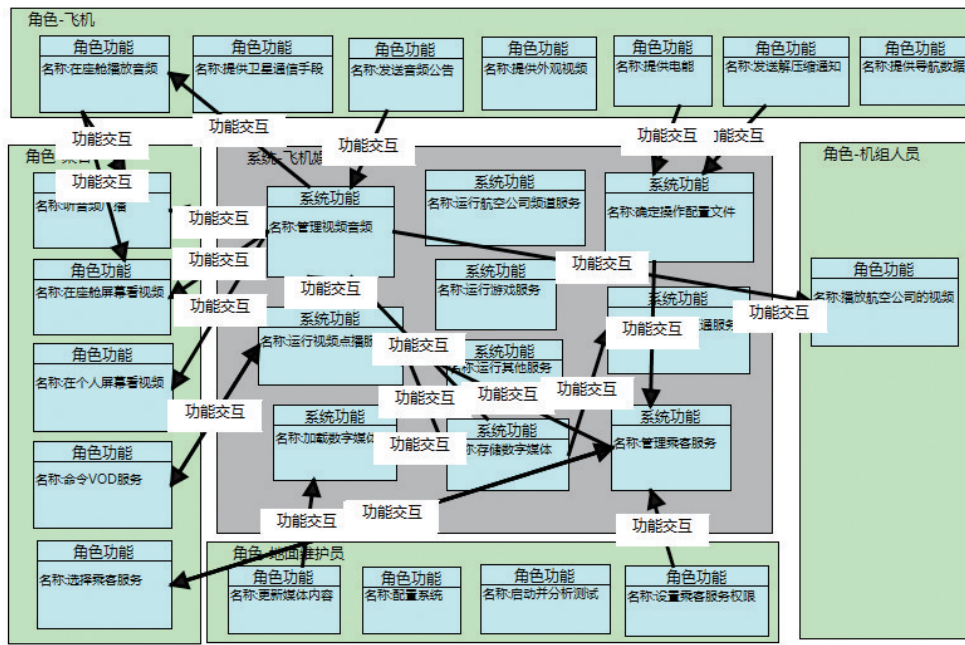


图7 系统分析

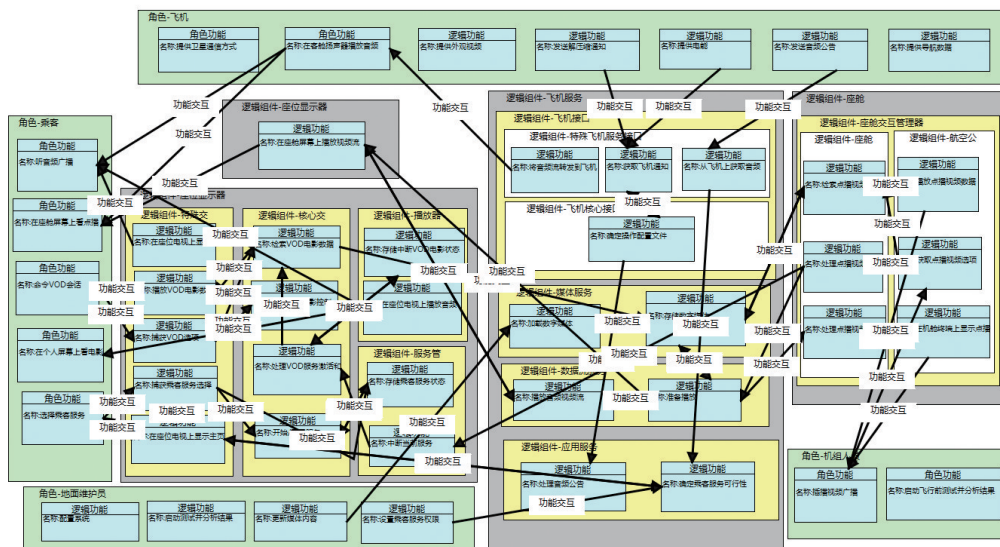


图8 逻辑架构

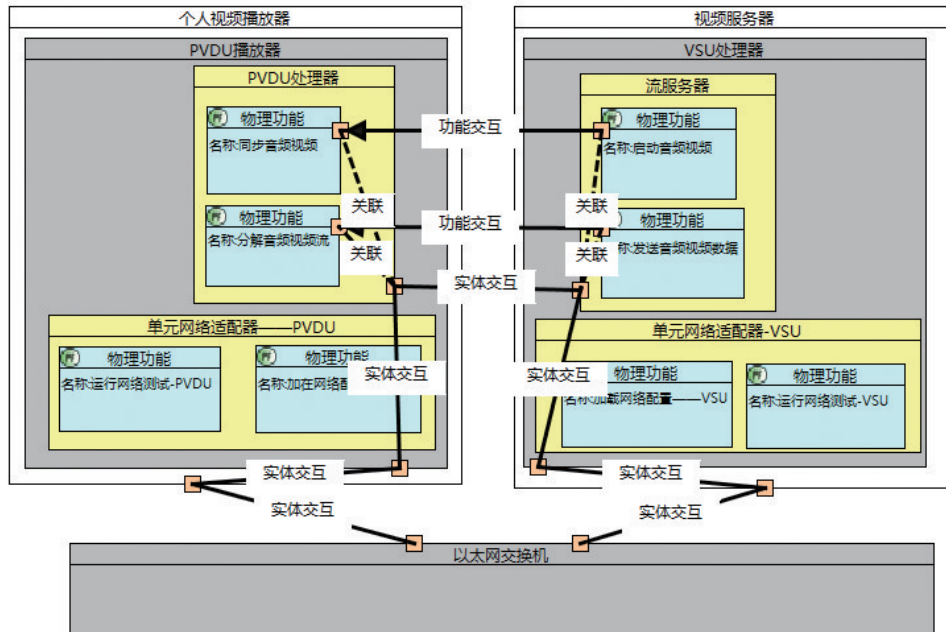


图9 网络传输物理架构

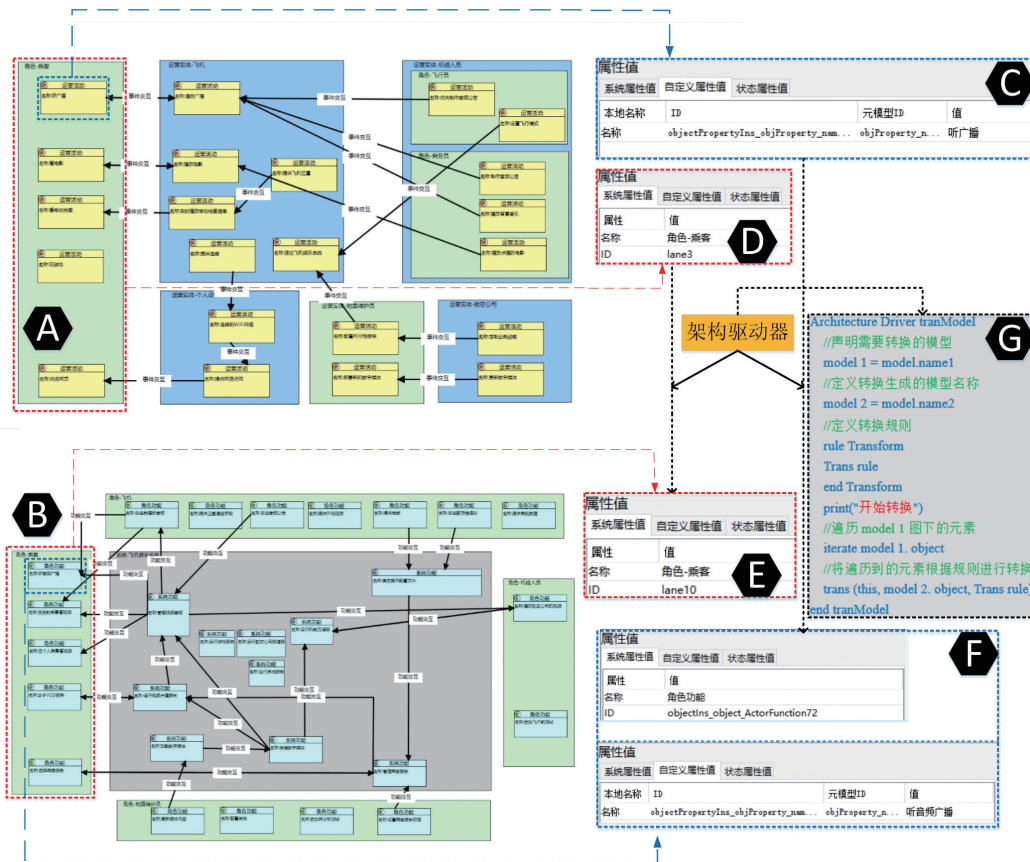


图10 架构驱动实现方案

表1 MetaGraph-Capella 元模型对比

名称	MetaGraph	Capella
图元模型种类	29	29
对象元模型种类	48	40
关系元模型种类	29	28
打开并加载模型时间/s	55	79

两种方法中对象元模型的数量不同的原因在于, Capella 可在对象中添加其他属性, MetaGraph 中 GOPPRR 方法采用分解模式的方式, 将需要在建模时添加的属性以对象的形式放置在分解视图中, 实现 Capella 中在对象中添加属性的方式。由此采用 GOPPRR 的元元模型建模方法可以覆盖 Capella 建模的全部需求。在工具使用方面, 在相同的环境下打开并加载一个模型的时间 Capella 需要 79 s, 而 MetaGraph 只需要 55 s。

Capella 软件建模时可以重用和自动生成已有元素, 在 MetaGraph 中通过架构驱动的方法不仅同样可以实现已有元素自动生成, 还可以重用已有模型实现从上级模型向下层模型的自动转化, 进而简化建模过程。与此同时, MetaGraph 中架构驱动可以通过脚本语言形式进行定义, 进而实现上下层模型间的追溯关系查询和管理。此外, Capella 无法支持其他领域建模语言, 如 BPMN; 而采用多架构建模方法不仅可以实现对 Capella 中 Arcadia 方法的基本支持, 还允许支持其他建模技术。

3 结论

以多架构建模方法为指导, 分层实现 MBSE 方法的整体流程, 得到如下结论。

1) 通过多架构建模方法, 从 GOPPRR 元元模型出发, 构建特定域建模语言, 建模时选取适合特定领域的建模方法指导建模流程, 实现整个建模过程的标准化。

2) 建立不同层级模型时, 采用架构驱动的方式建立模型的自动生成和转化机制, 实现研发流程中信息的可追溯性, 提高建模效率的同时可以实现模型的自动验证。

3) 在多架构建模工具中以飞机娱乐系统为案例介绍多架构建模方法的整体实现过程, 证明所提方法的正确性, 并给出了 Capella 建模和多架构建模两种方法的比较, 在模型加载速度上多架构建模方法有明显提升, 并且多架构建模方法可以覆盖 Capella 建模的全部需求, 具有较强的扩展能力, 证明多架构建模该方法在效率和效能上的提高。

参考文献 (References)

- [1] Torre D, Labiche Y, Genero M. A systematic identification of consistency rules for UML diagrams[J]. *Journal of Systems and Software*, 2018, 144: 121-142.
- [2] INCOSE A. A world in motion: Systems engineering vision 2025[M]. San Diego: International Council on Systems Engineering, 2014.
- [3] Roques P. Systems architecture modeling with the Arcadia method: A practical guide to Capella[M]. London: Elsevier, 2017.
- [4] Chinosi M, Trombetta A. BPMN: An introduction to the standard[J]. *Computer Standards & Interfaces*, 2012, 34(1): 124-134.
- [5] Hoffman H P. Harmony/SE: A SysML Based Systems Engineering Process[C]//Proceedings of Innovation 2008. France: Telelogic User Group Conference, 2008: 1-25.
- [6] Friedenthal S, Moore A, Steiner R. A practical guide to SysML: The systems modeling language[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2014.
- [7] Dori D. Object-process methodology—A holistic systems paradigm[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2002.
- [8] Estefan J A. Survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies[J]. *IncoSE MBSE Focus Group*, 2007, 25(8): 1-12.
- [9] Kelly S, Tolvanen J P. Domain-specific modeling: enabling full code generation[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- [10] 郝彬彬, 鲁金直, 李军, 等. 基于特定域建模方法的航空发动机 MBSE 实施方法[J]. *科技导报*, 2019, 37(7): 88-95.
- [11] Wang H, Wang G, Lu J, et al. Ontology supporting model-based systems engineering based on a GOPPRR approach[C]//World Conference on Information Systems and Technologies. Galicia, Spain: Springer, Cham, 2019: 426-436.

Implementation and application of multi-architecture modeling method for aircraft entertainment system

SUN Shengnan¹, LU Jinzhi^{2*}, CHEN Jinwei¹, HUANG Baiqiao³, LAN Xiaoping⁴, ZHANG Huisheng¹

1. School of Mechanical Engineering, Key Laboratory of the Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2. Beijing ZK Fengchao Technology Company Limited, Beijing 100088, China

3. National Defense Technology Industry Maritime Security System Innovation Center, Beijing 100094, China

4. Ordnance Industry Information Center, Beijing 100089, China

Abstract This paper proposes a multi-architecture modeling method to implement model-based systems engineering (MBSE). The meta-meta model based on the multi-architecture modeling method constructs the domain-specific modeling language in Capella. The Arcadia modeling method is adopted as the modeling specification. At the same time, the traceability relationship between models is established based on the architecture-driven method. A complete system engineering driven process based on model is formed. The aircraft entertainment system is used as a case to build a model, and the two methods of Capella modeling and multi-architecture modeling are compared, and the efficiency and effectiveness of the two methods are compared. The results show that the multi-architecture modeling method has modeling efficiency and strong scalability, which brings a solution for the integration of different MBSE modeling languages and modeling methods.

Keywords MBSE; multi-architecture modeling; domain-specific modeling language; aircraft entertainment system ●



(责任编辑 王丽娜)