

基于 SysML 的模型驱动复杂产品设计的信息集成框架研究

刘玉生 袁文强 樊红日 曹 悅

浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州, 310027

摘要: 针对如何为复杂机电产品建立不同层次、不同物理域的设计信息及其与仿真信息间的关联这一重要问题, 以系统建模语言 SysML 为基础, 提出了支持模型驱动多域复杂产品多层次设计与仿真信息集成框架; 建立了基于 SysML 扩展的核心集成信息模型, 以支持系统设计与仿真集成及不同层次设计过程的信息集成。以此为基础, 重点研究了 SysML 和 Simscape 建模语言的元模型及其间的映射规则, 以及基于三元图文法的系统层设计信息与仿真信息动态关联与集成的方法。最后给出了实例进行分析验证。

关键词: 模型驱动; 复杂产品; SysML; 系统设计; 设计与仿真集成

中图分类号: TP39.74

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.12.011

Research on Information Integration Framework of SysML Based Model—driven Design of Complex Products

Liu Yusheng Yuan Wenqiang Fan Hongri Cao Yue

State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou, 310027

Abstract: Aiming to build the association among different levels of design information and simulation information of different physical domains of the complex mechatronic products, a SysML-based framework of an integration of hierarchical design and simulation information was proposed for supporting the model—driven design of multi—domain complex mechatronic systems. An integration information model was established based on the extension mechanism of stereotype of SysML. After that, the meta—models of SysML and Simscape, a typical simulation modeling language, were explored and the mapping rules between them were also studied. The integration method between the system—level design and simulation information was proposed based on triangular graph grammar (TGG). At last, some examples were shown to illustrate the proposed method and some discussion was also given.

Key words: model—driven; complex product; SysML; system design; integration of design and simulation

0 引言

由于复杂机电产品系统涉及机械、电子、控制等多个领域, 因此具有高度复杂性、动态性和不确定性等诸多特点^[1]。在设计传统的复杂机电产品系统时往往是先设计好其机械部分, 然后再设计其电子与控制等其他部分, 其间设计遵循端到端的集成方式, 在各个子系统均设计好后进行复杂产品系统的总装成^[2]。这种设计方法至少存在着以下几个问题: ①由于在产品的设计初期, 缺乏在其系统层面进行整体全局的系统设计, 因而原本功能良好的各个子系统间很可能产生冲突, 致使整个复杂产品机电系统功能失效, 更为严重的后果是, 此类设计缺陷无法通过后期的详细设计或加工来弥补; ②各个子系统在优化设计时, 缺乏考虑子系统间的功能交叠与相互依赖的特点, 只考

虑了其领域内本身参数的优化问题, 而不同子系统(如机械、控制、电子系统)参数间的相互影响关系很难在优化设计中实现; ③由于很难对多域进行统一建模, 且多域协同仿真建模具有过程复杂和难以通用的特点, 仿真分析只有在各个单物理域(如机械、控制、电子域)中进行, 且通常是在复杂产品的详细设计阶段进行, 很难在设计初期进行应用。因此, 传统的复杂机电产品系统设计方法已远远无法满足市场的需要^[3-5]。

造成上述问题的关键原因之一是缺乏多物理域复杂机电产品系统不同层次的设计信息及仿真分析信息集成的方法与工具。具体问题主要有: 如何统一地表征多域复杂机电产品的系统层设计信息; 如何建立多域复杂机电产品系统层设计模型与仿真模型间的信息动态关联与集成; 如何建立多域复杂机电产品系统层与具体工具层间信息的动态关联; 如何建立多域复杂机电产品具体不同的工具层模型之间的动态关联。

受软件工程及其统一建模语言(unified mod-

收稿日期: 2011-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61070064, 61173126);
国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目
(2011AA100804); 浙江省杰出青年基金资助项目(R1110377)

eling language, UML)的巨大影响^[6],国际系统工程学会和面向对象管理组织于 2006 年提出了一种全新的标准系统建模语言 SysML^[7],以支持基于模型的系统工程(或称为模型驱动的系统设计)。目前已有研究人员将其用于复杂机电产品系统设计中^[8-9],在 SysML 中重建了几乎所有的 Modelica 建模功能,然而,其映射只是在 SysML 表示的 Modelica 分析建模功能与其他仿真平台的 Modelica 建模功能间点对点进行,且设计者只能使用该扩展的分析建模工具进行设计建模。笔者所在课题组也已开始了相关研究,基于 SysML 探索了系统行为的建模方法、基于元模型的系统设计与分析集成等,但均还不完善^[10-12]。

基于 SysML,本文提出一种支持模型驱动复杂机电产品系统设计的信息集成框架与方法。一方面,建立包括产品系统层的设计信息与仿真信息,具体不同工具层的关键信息,如关键的特征几何信息与尺寸约束信息、控制参数信息等的集成信息建模;另一方面,以典型的系统层设计与仿真信息集成为例,探索上述信息集成与动态关联方法,以期解决上文提到的多域复杂机电产品系统设计时存在的信息集成问题。

1 基于 SysML 的多域复杂机电产品多层次系统设计与仿真集成的信息框架

1.1 SysML 的复杂系统建模功能

如前所述,SysML 是在 UML 建模语言的基础上面向复杂系统建模的扩展。它是一种图形化可视建模语言,其建模过程由系统设计人员通过图形(Diagram)交互实现。相比于基于文档的系统工程中主要以文本的形式对系统进行描述,基于模型的系统工程基于 SysML 建模语言,旨在从一开始就以模型的形式对包含人员、硬件、软件、过程、控制等在内的复杂系统进行二义性的说明、分析、设计、验证与确认等,且独立于具体的方法与工具。这样做的好处是从一开始就在设计人员、客户等各相关人员间建立清晰、无二义性的交流平台,消除理解歧义,同时还能支持将仿真分析引入至复杂产品早期的系统设计过程中来。

在继承 UML 图形表示的基础上,SysML 包含的基本建模图形及其关系如图 1 所示。由图 1 可知,通过 SysML 的多种图形可以方便地实现对复杂产品的结构、行为、需求与属性约束关系的建模。其中结构模型侧重于对系统的层次以及系统间不同对象的相互关联关系建模;行为模型主要针对基于功能的和基于状态的行为进行建模;需

求模型强调用户需求的层次关系、需求间的追溯关系及设计对需求的满足情况等;参数模型主要强调系统或系统内部部件间的约束关系。在具体的实现层次上,SysML 语义通过元模型(Meta-model)来定义与实现。SysML 的一个重要特点是:它具有极强的扩展能力,通过其扩展机制 Stereotype,用户可以自定义其需要的功能。

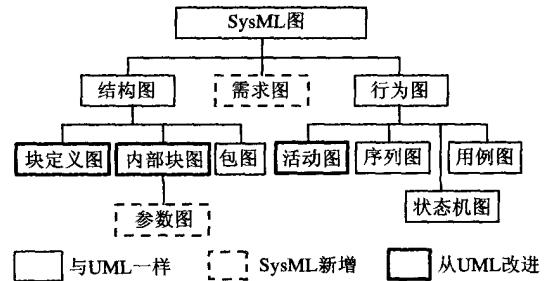


图 1 SysML 所有图形的层次结构

1.2 多域复杂机电产品多层次系统设计与仿真集成的信息集成框架

复杂机电产品的设计涉及多学科领域和众多的参与人员,同时为保证极其复杂的产品设计在最短的设计周期内尽量达到性能最优,应尽可能地在产品的系统设计阶段即引入仿真分析,以帮助设计人员及早发现问题。为此,本文提出支持面向多域多层次复杂机电产品设计与仿真分析的信息集成框架,如图 2 所示。基于 SysML,在复杂产品的系统设计层面、系统层设计与仿真分析间、系统层设计与具体的工具层设计间及不同的工具层设计平台间建立基于模型的无二义性的信息交流与集成平台,它主要包含两方面的内容:
①用于支持多域多层次的复杂机电产品系统无二义性信息集成的核心信息模型。如图 2 所示,在多域复杂机电产品的设计过程中,主要涉及四方面的信息:系统层设计信息、系统层仿真信息、工具层不同子系统的设计信息及工具层的仿真信息。然而,在每个部分中,并不是所有的信息都要用于集成。以系统层设计为例,系统层设计信息包含多域复杂机电产品的需求信息、功能及其分解信息、结构信息、行为信息及系统层各模型参数间的约束信息等,但在设计过程中,该部分的核心信息主要包括统一的层次式系统层结构与行为信息、关键具体结构与约束信息及其他领域参数与约束信息等。
②模型驱动复杂机电产品系统设计时不同集成信息间的动态关联机制。上述的集成核心信息确定后,还只是静态的信息,只有在其间建立动态的关联并将其与不同的具体信息进行关联才能实现无二义性的信息交流。因此,需要在

上述集成信息的基础上,进一步研究系统层设计与仿真信息间的动态关联机制、系统层与工具层

间信息的动态关联机制及不同工具层平台间的动态关联机制。

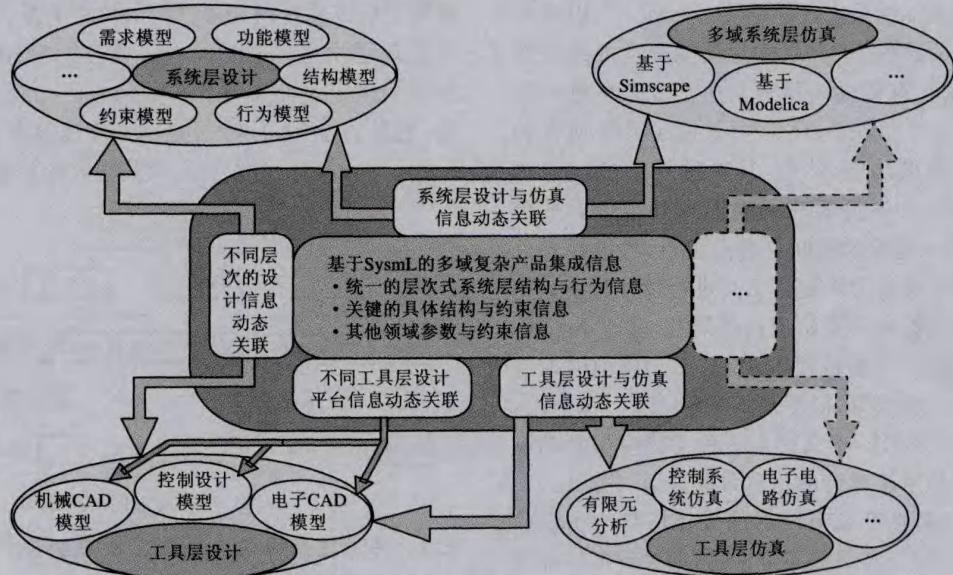


图2 基于SysML的模型驱动多域复杂机电系统设计信息集成框架图

2 支持多域复杂机电产品多层次设计与仿真集成的核心信息模型

由图2可知,从确定用户需求开始,到满足其要求的产品设计全部完成,需要经过多个反复的设计过程。这些设计过程总体上可以分为系统层设计和工具层设计两大部分。在系统层设计部分,主要是根据用户给定的需求,基于各种物理效应、工作原理等对给出的需求进行逐步的功能分解与功能推理,直至对应上可以实现的功能模型;接着基于此功能模型,求解能满足功能需求的行为模型和结构模型,并对其间的参数约束关系进行定义;在具体的工具层设计阶段,以系统层设计部分给定的需求模型、行为模型、结构模型、参数约束模型为基础,对其进行不同物理域子系统的划分,将划分的各模型作为不同子系统设计的初始条件,进行具体的详细设计。另外,考虑到多域机电产品在结构、行为上的复杂性,设计人员不可能仅基于设计给出的静态结构模型和行为模型对其进行评价,只有通过动态的模拟仿真分析,才能对可能的众多设计方案进行反复的对比、优化。

基于上述分析,要支持多域复杂机电产品多层次的设计与仿真的集成,其核心信息模型则必须包含以下三方面的信息:①支持系统层设计与仿真集成的信息;②支持不同层次的设计集成的信息;③支持不同的具体工具间集成的信息。

2.1 支持复杂产品系统层设计与仿真集成的信息表示

如前所述,复杂机电系统中包含多个不同域的子系统,这些子系统相互作用共同完成给定的要求,而这些不同子系统间可能会产生功能交叠与冲突、甚至是不可预测的行为^[13]。更为严重的是:这类“先天缺陷”无法经过后续设计与加工来弥补。因此,必须进行动态的仿真以评价、优化系统方案。然而,直接基于现有的SysML设计模型进行仿真存在以下3个问题:①SysML提供的Diagram较多,且相同的设计需求可以由不同的Diagram来完成设计,因此,如何基于SysML给出统一的、面向系统层仿真的信息表示是必须解决的问题;②虽然SysML提供了较多的Diagram以支持复杂系统的设计,但由于复杂机电产品的特殊性,如包含有连续行为甚至是离散/连续的混合行为,因此必须要对SysML进行面向复杂机电产品的扩展,以支持其特定信息的表示;③在进行系统层仿真时,还需要包含有仿真环境及仿真参数的建模。因此,本文对SysML进行以下扩展,以支持复杂产品系统层设计与仿真集成信息的表示。

2.1.1 面向连续动力学行为设计建模的SysML扩展

由物理学可知,复杂系统的连续动力学行为的重要特点是遵循克希霍夫定律(Kirchhoff's law),即在复杂系统的某一节点上,其势变量之值

必相等,而流变量之和为零。为此,本文扩展了 SysML 语言的 connector 功能,定义了扩展类 dynamicsConnector 以表达克希霍夫定律的各元素间的联系关系。如针对图 3 所示简单的弹簧—阻尼系统,其基于 SysML 的内部块图(internal block diagram, IBD)和扩展后 dynamicsConnector 的连续动力学行为如图 4 所示。

由图 4 可知,各建模元素间均通过具有克希霍夫语义的 dynamicsConnector 进行连接,可以由图 4 方便地建立系统的连续动力学行为。

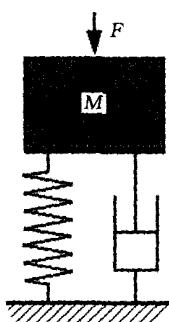


图 3 弹簧—阻尼系统

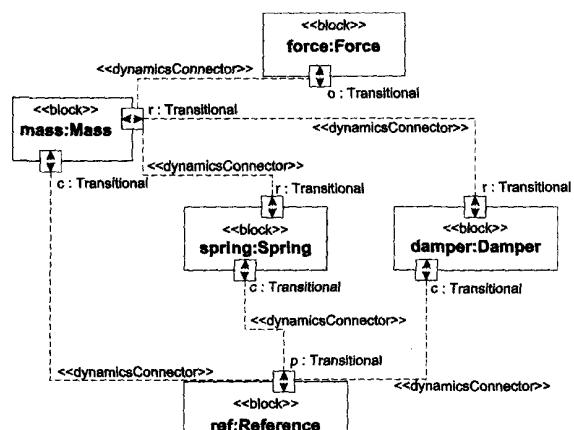


图 4 基于 IBD 的系统行为模型

2.1.2 面向混合行为设计建模的 SysML 扩展

复杂产品的典型行为特征是离散与连续混合。根据不同的外部条件,复杂产品的控制子系统会选择不同的行为。因此,要正确表达混合行为,所建模型必须能有效表达不同行为发生的条件及其转换机制。基于此,本文分别在 SysML 的约束块(constraint block)和依赖关系(dependency)的基础上进行扩展,提出条件约束块(conditional constraint block, CCB)和状态转换(transition)的概念,并基于此,在 SysML 参数图(parametric diagram)的基础上,提出有序参数图(sequenced parametric diagram, SPD),以支持复杂产品混合行为的统一建模。

(1) 条件约束块 CCB 的定义。在 SysML 中,约束块用来作为其他块(block)的约束属性以对块的属性进行约束,当实例化为约束属性时,它就永远处于活动(active)的状态(即受约束的属性必须永远符合其所定义的约束)。条件约束块 CCB 是在包含约束块所有内容的基础上进行以下语义

的扩展:当它作为约束属性时,具有“活动”和“不活动”两种状态,且只有处于活动状态时,其约束才生效。为此,CCB 在约束块的基础上增加两个数据信息:①活动指示(invariant)。invariant 是一个约束,当该 CCB 处于活动状态时,该约束为“真(true)”,因此,它是 CCB 被激活的前提条件,同时也是 CCB 变为不活动的结果(如果该条件为 false,则 CCB 处于 inactive 状态)。②触发器(trigger)。这里的 trigger 即标准的 UML 中的触发器,可以激发相应的约束块使其状态变为“活动”。除添加上述数据信息外,相应的参数信息也进行了扩展。除了约束参数之外,CCB 的参数还包含了活动指示 invariant 以及触发器所涉及的一些参数。为了区别,添加了两种扩展类—InvariantParameter 以及 TriggerParameter,它们与约束参数在句法上没有区别,只是作为语义区分,且要求 CCB 在相互继承时,只继承一般参数,不继承其他部分参数。

(2) 有向连接(directed link)。在 SPD 中,除了 SysML 中的绑定连接(binding connector)之外,为表达不同行为间的顺序关系,基于依赖关系(dependency relationship),扩展定义了有向连接DirectedLink。它主要用于两个 CCB 之间,用来表示 CCB 之间的序列。其语义是:一旦其被激活,则其源 CCB 变为“不活动”状态,而其目标 CCB 变为“活动”状态。

(3) 有序参数图(SPD)。SPD 是在参数图的基础上扩展而来的,以支持复杂产品混合行为的建模。其节点可以是 CCB 或约束属性,而节点间的连接关系除了绑定连接外,还有有向连接。由于条件约束属性对应的 CCB 可以进一步包含子 CCB,因此 SPD 可支持层次建模。SPD 元模型表示如图 5 所示。

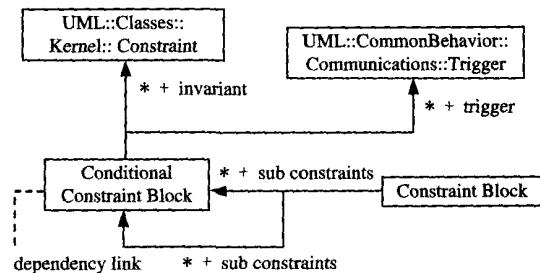


图 5 SPD 的元模型

2.1.3 面向系统层仿真信息建模的 SysML 扩展

本文扩展一个 Simulation 功能以表示基于系统的动力学模型进行仿真实验的相关信息。包含的信息主要可以分为两类:仿真环境配置信息

(如起始时间等)和仿真的参数信息(如外作用的脉冲力大小等)。此外,根据使用的仿真系统不同,有的系统可能还需要提供仿真的感应设备模型。

2.2 支持不同层次设计模型集成与不同工具间模型集成的信息表示

本文主要考虑在系统层设计模型与工具层模型间尤其是机械设计模型与控制设计模型的信息集成。对于系统层内的设计模型间如需求模型、功能模型、结构模型及行为模型间的信息交互,及不同具体设计工具内的不同层次设计模型间的信息集成则不重点研究。

2.2.1 基于 SysML 复杂产品的机械设计信息表示

目前几乎所有 CAD 系统均支持基于特征的产品信息表示,但不同的系统有不同的特征定义库。本文以 SolidWorks 为例讨论复杂机电产品的机械设计模型与系统层模型的集成。理论上,有两种集成的方法,即系统层设计模型在 CAD 系统中表示和基于 SysML 的 CAD 机械设计信息表示。本文选择第二种方法,即探索如何扩展 SysML 以支持相关产品特征信息及约束信息的表示,进而支持系统层设计信息与 CAD 产品信息的动态关联。一般地,在 CAD 系统中存在三个层次的信息:装配层、零件层和特征层。对于复杂零件,中间还存在子装配层等。

本文通过分别扩展 SysML 的块定义扩展类 CadAssembly、CadPart 来表示装配层、零件层的信息,其扩充的属性数据结构则用来表示装配层和具体零件的信息。具体地,在 CadAssembly 中,主要包含有零件、子装配及其间的约束关系等。在 CadPart 中,首先包含所有的特征及特征间的约束参数关系。此外,为支持系统层的设计与仿真,一些相关信息如质心坐标、零件质量等也包含在内。这里的约束关系是通过 SysML 中的 Constraint 来表达的。对于具体的特征,则分别建立相应的扩展类,如对通槽特征,建立 CadThroughSlot,而通槽特征的形状参数——深度与宽度则被定义为 CadThroughSlot 的属性。除上述各特征的形状参数外,特征间还需要定位参数约束信息,如特征间的方向与位置参数约束,及一些特殊约束如对齐、平行、垂直等约束关系等。此外,在特征中还有一个重要的依赖关系,即通过复制、剪切与拷贝建立的特征约束关系也需要建立。同样地,可以建立其他特征如通孔、阶梯、盲孔等特征的 SysML 表示。

2.2.2 基于 SysML 复杂产品的控制信息表示

控制子系统的设计对复杂机电产品的作用至关重要,是复杂机电产品系统的中枢部分。国际电工委员会受软件工程中模型化设计的影响,提出了用于分布式工业过程测量与控制系统功能块的新标准 IEC 61499 function block(FB)^[14]。其主要特点是实现控制系统设计的模型化。其基本的控制功能模块定义如图 6 所示。而实际的控制应用系统(application)即是由 FB 实例(instances)连接形成的网络。由于本文重点是研究其功能建模,因此关注的核心是 FB 的类型 T 参数(FB types)和 FB 的实例化 I 参数(FB instances),而其他参数如 Sa、Ie、Oe 主要是用于控制功能的分析与推理^[15-16],本文不考虑对其进行建模。

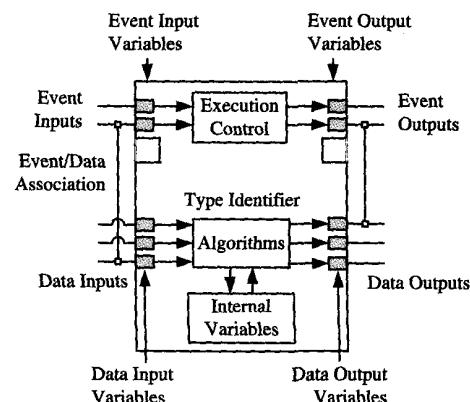


图 6 基本控制功能模块

首先,本文基于 SysML 的 Block 需要扩展添加 FB Application,用于表示整个实际的控制系统,其中包含各种 FB 类型的功能实例,最终形成一个控制系统网络。对于基本的 FB 类型,本文对基于 SysML 的 block 及其属性进行扩展,其定义如表 1 所示。

相应地,基于 FB 类型的实例化结果即是相应 FB 类型实例化出的属性。而实例之间的连接关系,则可在 SysML 的 ibd 中用连接“connector”进行关联。具体定义如表 2 所示。

3 基于元模型的系统层设计模型与仿真模型集成

本文基于三元图文法(triple graphics grammar, TGG)来实现系统层设计模型与仿真模型间的集成。其主要特点是除了分别建立源模型和目标模型元模型的图之外,还需要建立表示其映

表 1 基本 FB 类型的 SysML 表示

IEC 61499 FB 类型的定义	基于 SysML 的 IEC 61499 FB 类型扩展
b: 基本 FB 类型	⟨BasicFB⟩ block
g: 接口(interface)	
Ei, Eo: 事件输入/输出端口	⟨event port⟩ flow port
Di, Do: 数据输入/输出	⟨data port⟩ flow port
wi, wo: with function	⟨with⟩ dependency
c: 事件控制图(Event Control Chart)	⟨ECC⟩ conditional constraint block
Q: 状态(state)	⟨ECstate⟩ conditional constraint property, 其 type block 包含 ⟨ECaction⟩
k: 行为(action)	⟨ECaction⟩ conditional constraint property, 其 type block 包含: ① ⟨ControlAlgorithm⟩ 的实例, 作为 during action; ② ⟨SendEvent⟩ 实例, 作为 entry action
a: 控制算法(control algorithm)	constraint property, 其 type block 为 ⟨ControlAlgorithm⟩
eo: 事件输出 event output	constraint property, 其 type block 为 ⟨SendEvent⟩ constraint block
T: 变换(transition)	⟨Transition⟩ dependency
e: guard function	⟨trigger⟩ trigger ⟨condition⟩ constraint
I: 内部变量(internal variable)	⟨InternalVariable⟩ value property
A: 控制算法(control algorithm)	⟨ControlAlgorithm⟩ constraint block
s: 服务接口(Service interface FB)	⟨SIFB⟩ block

表 2 基本 FB 类型实例化的 SysML 表示

形式化表示模型	基于 SysML 的 IEC 61499 FB 实例扩展
I: FB instance	Instance
ce: event output connection	⟨event connector⟩
cd: data input connection	⟨data connector⟩
di, do, l: initial values	instance 中对 value property 进行赋值
p: initial state	需在 FB 定义中添加属性 initial state, 并在这里进行实例化

射关系的映射图。这里, 仿真模型拟以基于 Simscape 表示进行讨论。因为 Simscape 是 Mathworks 为支持复杂物理系统仿真而最新推出的建模语言, 是其 Simulink 产品线的扩展与延伸, 十分容易为用户熟悉和接受。

3.1 SysML 和 Simscape 的元模型

SysML 元模型是用来表示建模语言 SysML 的最基本的建模元素及其间的关系的。通过分析 SysML 的建模功能, 我们可以分析得出 SysML 和 Simscape 的元模型。关于 Stereotype 的元模型表示, 本文将其简化为一个字符串, 即 stereotype:

type: String。虽然这样存在一定的不合理之处(如无法体现其他属性), 但易于实现。

3.2 TGG 的转换规则

本文基于 MOFLON 实现了基于 TGG 的模型双向转换与集成。为此, 首先建立了一些 TGG 的连接类型(link type), 以表示两个元模型的元素之间的对应关系(如 SysML 的 block 对应到 Simscape 的 component); 然后, 针对每个 link type 建立相应的 TGG 转换规则。

域、包与块的转换规则(domain, package, block)基本类似, 如图 7 所示。以 block 为例: 包

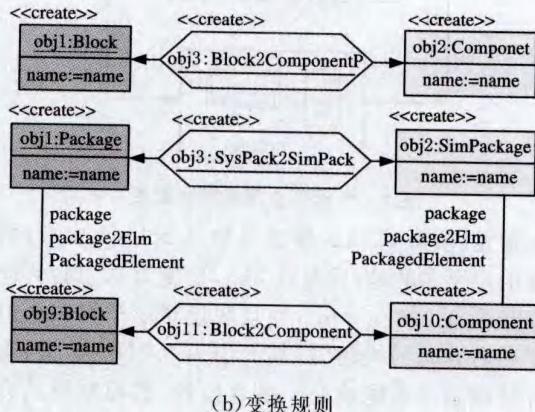
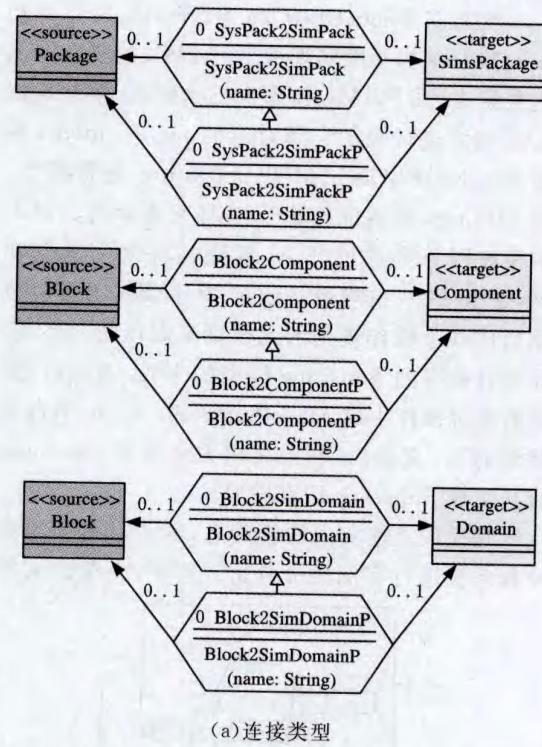


图 7 域、包与块的转换规则

含两个连接属性, 分别表示顶层 block 的转换和在包内的 block 的转换, 如图 7a 所示, 图 7b 所示为相应的 TGG 规则。这里存在的一个问题是在进行 block 属性间转换时, 需要用到 block 之间转

换的连接类型。而由于 block 之间的连接类型有多条,在表示属性转换的时候也要写多条。若这样递推下去,就会比较麻烦。为此,本文采用继承关系,只需要在表示属性转换的时候,使用 block 转换的父类连接属性。

类似地,对于 SysML 中的数值属性 (ValueProperty)、端口 (Port)、方程 (Equation)、继承关系等也可以建立在 SysML 和 Simscape 间对应的转换规则。

4 实现与实例

本文以 MagicDraw 16.5、Simscape 4.2 和 SolidWorks 为基础实现基于 SysML 的复杂产品信息集成,其 SysML 模型和 Simscape 模型均以 XMI 格式进行表示。其对应的 meta-model 模型通过 MOFLON's MOF 2.0 editor 来获取^[17]。SolidWorks 模型也是基于 XMI 来表示的。TGG 转换规则等则通过 TGG 规则插件来完成其功能,这里 TGG 的规范是通过 FUJABA 工具包自动形成其带操作规则的元模型来表示的^[18-19],在完成转换得到 Simscape 模型的 XMI 表示后,通过后处理操作生成 MathWorks Simscape 平台可接受的 ssc 文件后,利用其相关命令如 ssc_build 直接生成 Simscape 仿真模型。

在完成上述实现的基础上,本文以图 8 的倒立摆系统进行实例验证分析。这里,小车的主要

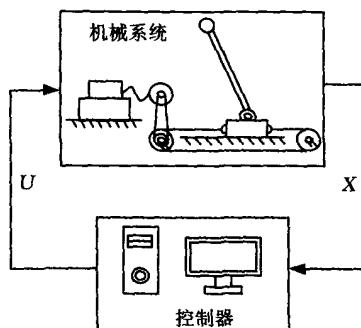


图 8 一级倒立摆系统示意图

参数是:质量 0.5kg,摩擦系数 0.1N/(m·s);倒摆的主要参数是:质量 0.2kg,长度为 0.3m,转动惯量为 0.006kg·m²,并且假设对小车有一个恒定朝右方向的扰动力,其大小为 0.2N。这里,为保持倒摆尽可能地处于垂直位置,其控制模式有两种:基本控制和实验控制。其控制方程分别如下:

$$F_c = -1.0000x - 1.6567v + 18.6854\theta + 3.4594\omega \quad (1)$$

$$F'_c = -10.7107x - 37.8345v + 105.5298\theta + 20.9238\omega \quad (2)$$

式中,x 为小车的位移;v 为小车的速度;θ 为倒摆角;ω 为倒摆角速度。

基于 Simscape 的倒立仿真模型如图 9 所示。在假设倒摆的初始角度为零时,其仿真结果如图 10 所示,图 10a 是倒摆角度的变化曲线图,图 10b 和图 10c 所示分别是基本控制和实验控制结果。基于上述的仿真结果,设计人员可以进一步分析,并通过调整和优化参数达到最优的控制效果。通

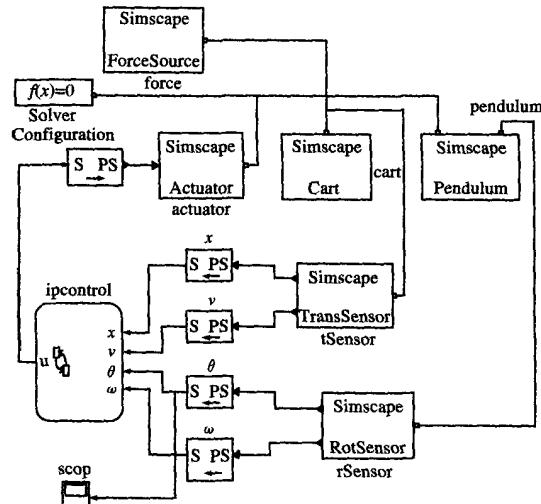
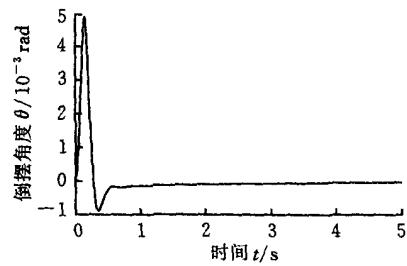
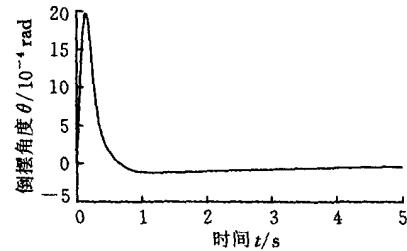


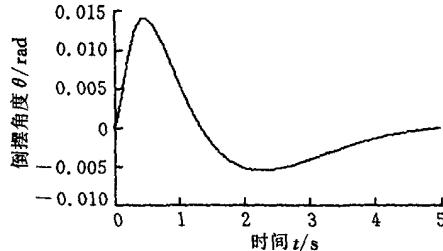
图 9 基于 Simscape 的倒立摆仿真模型



(a) 倒摆角度变化



(b) 基本控制结果



(c) 实验控制结果

图 10 倒立摆仿真实验结果

过上述实例可以看出,在复杂机电产品最开始的系统设计阶段,就可以针对不同的设计方案进行仿真、对比,从而从一开始就排除明显不合理的设计方案。

5 结语

本文提出了一种基于 SysML 的、模型驱动的多域产品不同层次设计信息与仿真信息的集成框架,讨论了多域复杂产品设计时信息集成的具体问题,深入地研究了如何扩展 SysML 以支持系统层设计时的离散/连续混合行为的表示、仿真信息的表示、控制设计信息的表示等。并以系统层设计与仿真集成为例,详细研究了基于 TGG 的复杂产品信息集成方法与机制。多域多层次的复杂产品信息集成是一项工程浩大的工作,目前还不完善,后期将进一步对不同层次的设计信息及具体工具层的设计信息与仿真分析信息的集成进行深入研究。

参考文献:

- [1] Michelle B, David H. System Design: New Product Development for Mechatronics [R]. Aberdeen: Aberdeen Group, 2008.
- [2] Thramboulidis K. Model Integrated Mechatronics—towards a New Paradigm in the Development of Manufacturing Systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2005, 1(1): 1-14.
- [3] Hewit J. Mechatronic Design—the Key to Performance Enhancement [J]. Robotics and Autonomous Systems, 1996, 19(2): 135-142.
- [4] Rzevski G. On Conceptual Design of Intelligent Mechatronic Systems [J]. Mechatronics, 2003, 13: 1029-1044.
- [5] Amerongen J. Mechatronic Design [J]. Mechatronics, 2003, 13: 1045-1066.
- [6] Object Management Group(OMG). Official UML Specification [EB/OL]. [2011-08-15]. <http://www.omg.org/spec/UML/2.4.1/>
- [7] Object Management Group(OMG). Systems Modeling Language specification [EB/OL]. [2010-06-01]. <http://www.omg.org/spec/SysML/1.2/PDF>.
- [8] Turki S, Soriano T. A SysML Extension for Bond Graphs Support [C]//5th Int. Conf. on Technology and Automation. Thessaloniki, Greece, 2005: 1707-1713.
- [9] Thomas A J, Paredis C J J, Roger B. Integrating Models and Simulations of Continuous Dynamics Into SysML [C]//Proc. of the 6th Int. Modelica Conf.. Bielefeld, Germany, 2008: 135-145.
- [10] Liu Yusheng, Cao Yue, Gao Shuming. Uniform Behavior Modeling for Mechatronic Systems Based on SysML Parametric Diagram: a Case Study [C]//The 8th Int. Symp. on TMCE. Ancona, Italy, 2010: 1333-1344.
- [11] Cao Yue, Liu Yusheng, Paredis C J J. Integration of System—level Design and Analysis of Mechatronic Systems Based on SysML and Simscape [C]//Conf. of ASME IDETC/CIE 2010. Montreal, Canada, 2010: 1-11.
- [12] 刘玉生,蒋玉芹,高曙光. 模型驱动的复杂产品系统设计建模综述[J]. 中国机械工程,2010, 21(6): 741-749.
- [13] 钟掘. 复杂机电系统耦合设计理论与方法[J]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [14] Nils H, Bernardo W. Analyzing the Liveliness of IEC 61499 Function Blocks [C]//Proc. of 13th IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2008. Hamburg, Germany, 2008: 380-383.
- [15] Goran C, Knut A. On Formal Analysis of IEC 61499 Applications Part A: Modeling [J]. IEEE Trans. on Industrial Informatics, 2010, 6(2): 136-144.
- [16] Goran C, Knut A. On Formal Analysis of IEC 61499 Applications Part B: Execution Semantics [J]. IEEE Trans. on Industrial Informatics, 2010, 6(2): 145-154.
- [17] Object Management Group. Meta Object Facility (MOF) Core Specification [EB/OL]. <http://www.omg.org/spec/MOF/2.0/PDF>, 2006.
- [18] Klar F, Rose S, Schürr A. TiE—a Tool Integration Environment [C]//Proc. of the 5th ECMDA Traceability Workshop. The Netherlands, 2009: 39-48.
- [19] Fujaba Core Development Group. Fujaba Tool Suite [CP/OL]. <http://www.fujaba.de>.

(编辑 王艳丽)

作者简介:刘玉生,男,1970年生。浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室教授、博士研究生导师。主要研究方向为基于模型的系统工程、模型驱动设计、CAx、三维模型检索、公差建模等。发表论文 40 余篇。袁文强,男,1989 年生。浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室博士研究生。樊红日,男,1985 年生。浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室博士研究生。曹悦,女,1986 年生。浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室硕士研究生。