

基于 SysML 的多学科设计建模与优化

张强, 刘继红

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: **目的** 基于系统建模语言 SysML, 分析多学科设计建模与优化过程, 在理解多学科设计与优化数学模型的基础上, 构建系统设计优化模型。**方法** 通过分析多学科设计优化的数学模型, 利用 SysML 语言对多学科优化对象模型进行元模型表征, 将生成的 SysML 模型进行模型转化, 转换成 XML 格式以便优化求解器进行求解。**结论** 提出了一种用于多学科设计建模与优化的 SysML 扩展优化建模方法。通过 SysML 系统建模语言的扩展版型, 添加多学科优化相关的优化目标、优化约束、优化变量等优化元素的模型内容。提出了 SysML 优化信息的提取方法, 以 XML 为中间格式, 将提取的优化模型与优化求解器进行集成。通过系统设计与系统优化的集成求解为产品系统架构设计人员提供有效的决策支撑。

关键词: 基于模型的系统工程 (MBSE); SysML; 多学科设计优化; 优化模型构建

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)08-0037-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.08.004

Modeling and Optimization of Multidisciplinary Design Based on SysML

ZHANG Qiang, LIU Ji-hong

(School of Mechanical Engineering & Automation-BUAA, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the modeling and optimization process of multidisciplinary design based on system modeling language SysML, and build a design and optimization model of system based on the understanding the mathematical model of multidisciplinary design and optimization. By analyzing the mathematical model of multi-disciplinary design and optimization, the meta-model of multi-disciplinary optimization object model was characterized by SysML language, and the generated SysML model was transformed into XML format to be solved by the optimized solver. A SysML-extended optimization modeling method for multidisciplinary design modeling and optimization is put forward. Through the extended version of SysML system modeling language, model contents about optimization elements such as optimization objectives, optimization constraints and optimization variables related to multidisciplinary optimization are added. An extraction method of SysML optimization information is proposed. With XML as the intermediate format, the extracted optimization model is integrated with the optimization solver. The integrated solution of system design and system optimization provides effective decision support for product system architecture designers.

KEY WORDS: model-based systems engineering (MBSE); SysML; multidisciplinary design and optimization; optimization model building

随着科技水平的不断进步和经济的发展需求, 工程系统的复杂性不断增大。复杂工程系统的设计与开发不仅涉及多个学科, 并且不同学科间存在着不同程度的耦合。多学科设计优化 (Multidisciplinary Design

Optimization, MDO) 旨在充分考虑各学科间的相互影响与耦合作用, 采用适当的优化方法和策略以及分布式计算等技术, 组织和管理整个系统的设计过程, 实现设计阶段各个学科间的平衡, 通过深入分析各学

收稿日期: 2022-11-13

作者简介: 张强 (1997—), 男, 博士生, 主要研究方向为基于模型的系统工程 (MBSE)、数字主线。

通信作者: 刘继红 (1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为复杂产品数字化设计与制造、知识工程与知识管理、智能制造与工业互联网。

科之间的耦合关系和协同效应,获得系统的整体最优解,实现复杂工程系统性能的提高、设计成本的降低与研发周期的缩短,是一种解决复杂工程系统优化问题的有效方法^[1]。另一方面,在解决不同学科领域间相互耦合的复杂性问题时,基于文档的系统工程已无法满足当前的研发需求,因此,采用基于模型的系统工程进行研发成为必然趋势。基于模型的系统工程(Model-Based Systems Engineering, MBSE)是指不同学科(包括机械、电气和软件)采用以模型为中心的方法,将各种模型集成到系统工程过程中,实现模型驱动的产品系统研发乃至全生命周期一体化,有望取代以往以文档为中心的方法^[2]。MBSE通过形式化的建模来支持全生命周期的系统工程活动,实现复杂系统的信息统一管理和全生命周期可追溯管控。目前航空航天、车辆、船舶等复杂产品制造领域都在积极探索和应用MBSE技术进行产品的研发^[3-5]。但是,目前复杂产品的系统设计与系统优化是两个相对独立的过程,需要在不同的软件或者平台中实现,涉及

复杂的数据转换过程。而应用多学科设计优化的思想对系统进行优化验证时往往需要对优化对象进行重新建模,费时费力且容错性极低。

本文提出一种基于 SysML 的多学科设计建模与优化方法。通过分析多学科设计优化的定义和数学模型,基于 SysML 扩展机制实现基于 SysML 的 MDO 优化模型表征,同时基于 XML 格式实现优化信息的抽取,实现多学科设计建模与优化的集成。

1 系统设计与优化集成相关研究

基于模型是系统设计的手段,系统优化才是设计的最终目的。如图1所示,复杂产品的研制是设计方案不断迭代优化的过程。先进的系统设计方法和优化手段也一直是推动复杂产品创新研制的重要推动力。系统设计与系统优化的高效集成与应用对提高复杂产品的设计效率意义重大^[6]。系统设计与系统优化集成的研究可以从应用平台和理论研究两个方面进行阐述。

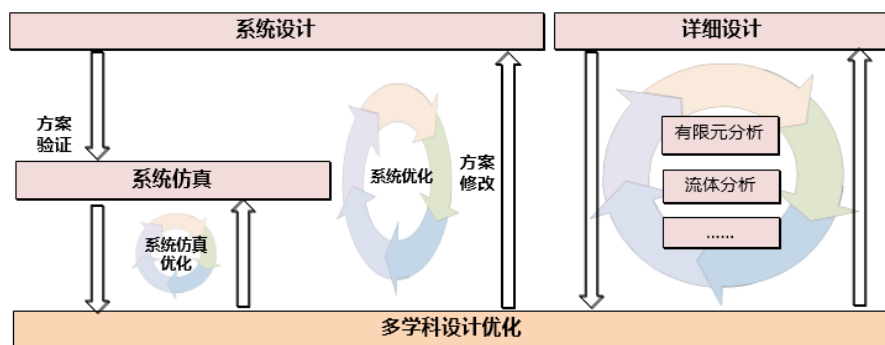


图1 系统设计与系统优化的关系

Fig.1 Relationship between system design and system optimization

1.1 系统设计与优化集成应用平台

在设计与优化的集成平台方面,国外研究较早,形成了一批面向多学科设计分析优化的商业工具,主要有达索公司的 Isight 和 Phoenix 公司的 ModelCenter 等。针对复杂产品的概念设计与优化集成,佐治亚理工的 R.Peak 等基于 SysML 建模工具的 MagicDraw 软件(达索公司)开发了 ParaMagic 插件^[7],可以在建模工具中进行系统设计并调用外部的数值计算工具进行优化求解分析。国内关于系统设计优化工具方面的相关研究较少,其中,北京航空航天大学的韩明红等提出了面向卫星等大型复杂产品的系统设计优化集成环境(SDOF),邓家提团队研制开发了产品协同设计优化平台(CLOVE),浙江大学刘玉生团队提出了基于 SysML 的系统设计与优化集成平台(OptiMatic),航天三院三部开发了 SysDeSim 国产系统建模软件^[8]。虽然这些工具都能在一定程度上支持系统的设计与优化,但是本质上这些工具只是从数据层面实现了设计与优化的关联,并没有实现系统设计

到系统优化的无缝集成。

1.2 系统设计与优化集成理论研究

系统设计与系统优化集成相关的理论研究主要有两个方向。一是通过扩展 SysML 语言,实现设计和优化模型的一体化表达,如 NASA 的喷气推进实验室(JPL)探索了基于 MBSE 的航天器任务操作系统设计,提高了对整体系统进行权衡和优化分析的能力^[9]。JPL 在小卫星的设计过程中扩展了 SysML 的元模型,通过设计方案权衡的元模型来支持方案的权衡分析^[10]。Leserf 等^[11]提出了一种基于可变性的 SysML 优化模型构建求解方法,通过在系统模型中添加扩展的可变性元素来定义系统设计模型变量,并根据优化上下文和模型可变性生成 PyOpt 优化框架下的优化问题描述文件。刘玉生和袁文强等提出了一种基于模式的系统设计与系统优化集成方法,通过 SysML 元模型扩展定义系统优化模型,并使用包含基本信息、问题描述、解决方案、影响等属性的模式信息,通过语义匹配寻找优化问题的解决方式。系统设计与系统

优化的另一种解决方案是对数值计算程序与系统概念设计建模工具加以集成, 以实现系统设计的分析和优化。例如, SysML 建模工具与 MDAO 分析优化决策工具的集成^[12]、SysML 与权衡分析工具的集成、SysML 与 MATLAB 工具的集成^[13]等。

系统设计和系统优化是复杂产品研制的重要环节, 且面向系统设计和系统优化的理论和技术都已相对成熟。但是, 目前复杂产品的系统设计与系统优化往往需要在不同的软件或者平台中实现, 无法实现即时的系统设计方案优化分析和信息反馈。基于建模语言对系统设计和系统优化进行建模, 可以提高设计优化分析的效率和容错性。

2 多学科设计优化理论

2.1 多学科设计优化的定义

迄今为止, 多学科设计优化 (MDO) 已经历了近 50 年的发展历程, 然而, 国际上对 MDO 的定义尚未有统一的认识。美国航空航天学会 (AIAA, American Institute of Aeronautics and Astronautics) 的多学科设计优化技术委员会给出了以下三种定义^[14]:

定义 1: MDO 是一种通过充分探索和利用系统中相互作用的协同机制来设计复杂系统和子系统的方法论。

定义 2: MDO 是一种在复杂工程系统的设计中, 必须对学科 (或子系统) 间的相互作用进行分析, 并且充分利用这些相互作用进行系统优化合成的设计优化方法。

定义 3: MDO 是一种当设计中每个因素都影响另外的因素时, 确定应该改变哪个因素以及改变到什么程度的设计方法。

虽然上述三种定义互不相同, 但所共同强调的 MDO 的主要特点如下:

- 1) 本质: 设计方法论。
- 2) 研究对象: 复杂产品设计过程。
- 3) 研究范围: 产品设计全生命周期。
- 4) 基本思想: 通过分析多学科之间的耦合协同作用, 实现复杂产品系统设计的整体最优。

综上所述, 多学科设计优化是一种解决复杂工程系统设计问题的综合方法, 通过充分分析复杂工程系统中学科间相互作用的协同机制, 考虑各学科间的相互耦合, 从系统的角度对复杂工程系统进行优化设计, 以实现降低产品成本、提升性能和缩短设计周期的目的。

2.2 多学科设计优化数学模型

传统的确定性多学科设计优化 (DMDO) 数学模型可描述为:

$$\min_{(DV=d_s, d)} f(d_s, d, y)$$

$$\text{s.t. } g^{(i)}(d_s, d_i, y_i) \leq 0$$

$$h^{(i)}(d_s, d_i, y_i) = 0$$

$$d_s^L \leq d_s \leq d_s^U, d_i^L \leq d_i \leq d_i^U$$

$$i = 1, 2, \dots, nd \quad (1)$$

式中的确定性设计变量为 d_s 、 d 。其中, d_s 是共享确定性设计变量, $d = (d_i, i = 1 \sim nd)$ 由所有学科的局部设计变量组成, d_i 是指第 i 个学科中的确定性局部设计变量。“共享设计变量”是在多个学科中共有的设计变量, 而“局部设计变量”是指某一学科独有的设计变量, d_s^U 和 d_s^L 分别为 d_s 的上下限, d_i^U 和 d_i^L 分别为 d_i 的上下限。 $f(\bullet)$ 为 DMDO 的优化目标, $g^{(i)}$ 、 $h^{(i)}$ 分别为第 i 个学科中的不等式约束和等式约束, $i = 1 \sim nd$, nd 为复杂工程系统包含的所有学科总数目 $y = \{y_1, y_2, \dots, y_{nd}\}$ 是学科 i 输出到其他学科的耦合变量, 是 DMDO 优化问题的所有耦合状态变量 (Coupled State Variables) 的集合。 $y_i = \{y_{ij}, j = 1 \sim nd, j \neq i\}$ 表示第 i 个学科输入到其他所有学科的耦合状态变量。其中 y_{ij} 为学科 i 输出到 j 的耦合状态变量。同理, y_{ji} 是其他所有学科输入到第 i 个学科的耦合状态变量。

实际上, 学科间的耦合状态变量、共享设计变量和局部设计变量之间存在如式 (2) 所示的关系:

$$y_i = y_i(d_s, d_i, y_{ji})$$

$$y_i = \{y_{ij}, j = 1, \dots, nd, j \neq i\}$$

$$i = 1 \sim nd \quad (2)$$

3 基于 SysML 语言的多学科设计建模

目前的复杂产品通常集成了机械、电子、控制等多个学科, 多领域交叉融合已成为现代产品设计的的发展趋势。基于模型的系统工程以一种高度形式化的、无二义性的描述方法, 可以有效避免多领域间设计协作时可能产生的歧义, 正成为未来系统工程发展的趋势。基于 MBSE 方法论, 设计者可以利用系统建模语言 (Systems Modeling Language, SysML) 方便准确地表达设计意图, 完成方案的初步设计。但是, 不能对设计方案进行功能验证和性能优化。因此, 在复杂产品的系统设计过程中, 将优化信息融入设计信息, 以便构建完整的优化模型, 从而实现系统的自动优化非常必要。

3.1 系统设计与系统优化集成需求

MDO 模型与系统设计模型的集成需要构建适合 MDO 问题表述的领域元模型。元模型在本质上定义了一种建模语言, 而针对某一特定领域问题 (如多学科优化) 的建模语言, 被称为领域相关语言 (DSL, Domain-Specific Language)。针对某一特定领域 DSL 元模型的构建方法主要分为三种: (1) 在同领域已存

在的 DSL 元模型的基础上进行细化,从而将更为宽泛的概念细化为更为具体的概念;(2)在某种通用的、与领域无关的建模语言(如 SysML)的基础上进行扩展,定义 MDO 的相关概念;(3)从零开始全新定义一门语言的元模型。

根据系统设计与系统优化的集成需求,可以选择第二种方式,在已存在的通用建模语言 SysML 的基础上进行扩展,从而定义针对复杂产品多学科设计优化的元模型。对 SysML 进行扩展,可以采用两种方法^[15]:一是在 SysML 的元模型中定义新元类,形成具有特定属性、约束和用法的新的建模元素;二是采用 Stereotype^[16]和 Tragged Value 对 SysML 现有元素进行扩展。第一种方法能够精确地表达所定义的建模元素及其语义,但是无法获得现有建模工具的支持。Stereotype 能够对 SysML 模型元素的语义进行扩展,从而实现建模元素的专有化;而 Tragged Value 能够为模型元素赋予 SysML 元模型中未包含的属性,该方法具有较高的灵活性和通用性。因此本文采用后一种方法对 SysML 进行扩展,以支持 SysML 对优化模型包含要素的表达。

基于 SysML 扩展版型(Stereotype),定义多学科优化元模型的过程主要包括以下几个步骤:(1)抽取 MDO 领域知识,根据 MDO 的定义和应用场景,识别其中涉及的概念、关系和约束;(2)定义抽象语法(Abstract Syntax),采用形式化的方法定义上述概念的抽象语法;(3)定义具体语法(Concrete Syntax),在抽象语法的基础上为所有上述总结的模型元素定义相应的 SysML 表示方法和符号,这个过程可以通过扩展 SysML 中相似的模型元素来实现;(4)对扩展完成的 MDO 元模型中的模型元素和使用方法进行说明,形成相应的规格说明书(Specification)。

3.2 定义优化模型的构造类型

基于 SysML 的系统模型信息包括需求、结构、功能、行为等,但是缺少能支持多学科优化的 MDO 信息。若要利用 SysML 构建多学科设计优化模型,则必须在系统模型上附加有关支持多学设计优化的信息。为了实现系统优化与系统设计的集成,需要使用同一种表达语言对设计问题和优化问题进行统一描述。其中系统优化并没有统一的表述语言。而系统设计一般使用 SysML 语言进行表征。可以利用 SysML 的元模型扩展机制,在 SysML 的元模型层定义多学科优化信息,实现系统优化的表征。

多学科优化信息包括两类。一类是优化对象模型和优化过程模型。优化对象模型主要指构建优化问题的基本元素,包括优化目标、约束函数、设计变量等。其中优化过程模型主要应用于具体的求解器,如 MATLAB、ISIGHT 等。值得注意的是,这些商用的求解器软件对优化求解来说已经非常成熟,而 SysML 建模软件的功能主要聚焦于系统需求、结构、功能、

行为的建模。因此不必过多考虑优化的过程模型。这里主要介绍优化对象模型的 SysML 扩展。优化对象模型主要描述一个优化问题的相关基本元素,如上文所述,优化对象信息主要包括参数、目标、变量和约束,其中 SysML 中的 parameter 元素与优化中的元素含义一致,因此这里只对优化目标、优化变量和优化约束进行元模型扩展。

3.2.1 优化变量元模型

在 SysML 中没有直接表示变量的元素,多学科系统中的设计变量是指在优化中待设计的变量,设计变量彼此之间相互独立、互不影响。根据设计变量是否含有不确定性因素,可以将设计变量分为确定性设计变量(Deterministic Design Variables)、随机不确定性变量(Alteatory Uncertainty Variables, AU)、认知不确定性变量(Epistemic Uncertainty, EU)和时变不确定性四种类型。同时根据变量的取值连续性可以将变量分成离散变量(Discrete Variables, DV)、连续变量(Continuous Variables, CV)两种类型。由于系统的设计变量和局部的设计变量可以在优化求解器中进行挖掘和定义,因此不必在 SysML 系统设计中专门进行定义,所以,本文按照是否含有不确定性来定义设计变量。在多学科系统中还有一种特殊的变量叫耦合状态变量(Coupled State Variable, CSV)。耦合状态变量是指对某一学科进行分析时,需使用到的其他学科的状态变量,并且是当前所分析学科的输入量。由于状态变量可以由参数图表征其关系,因此也不用为其扩展元模型。

基于以上分析有必要对 SysML 中的 parameter 元素增加额外的属性来定义变量类型以适应多学科系统的优化,可通过添加标签指示符的方式规定模块属性的类型应属于何种优化变量类型,如图 2 所示。

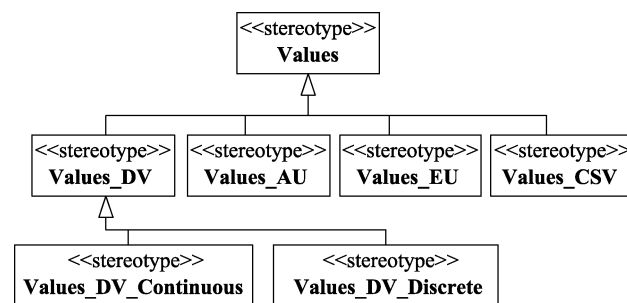


图 2 值属性中的变量类型扩展
Fig.2 Variable type extension in value attributes

为了在 SysML 设计模型中,对设计变量进行定义,如图 3 所示,“Variable”扩展了 SysML 元类“Block”。由于耦合状态变量一般有对应的关系式,可以通过一个连续变量和一个约束块来表达,所以不需要为其进行额外的扩展。因此,可以将变量元模型“Variable”实例化为连续型随机变量、离散型随机变量、随机变量和认知变量四种类型。

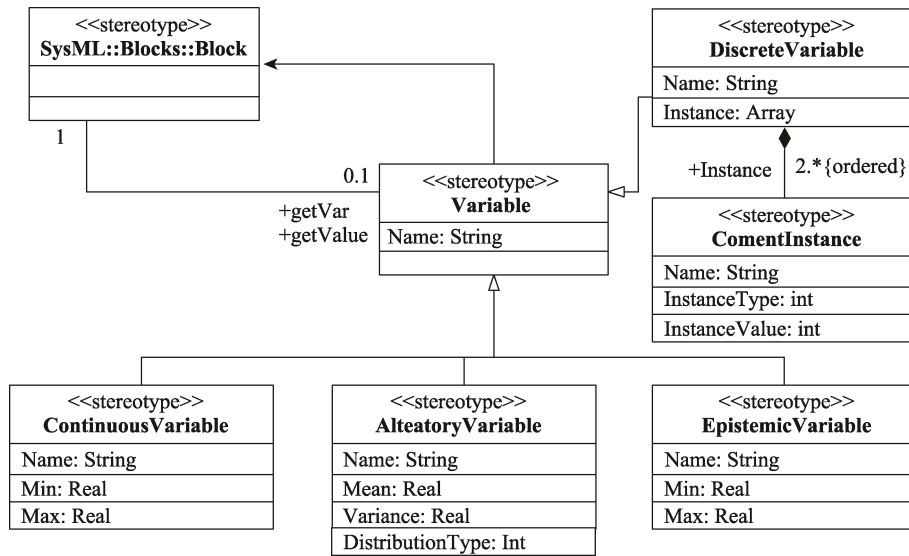


图 3 面向优化的变量元模型
Fig.3 Optimized variable meta-model

如图 3 所示, 对于 SysML 设计模型中的连续性变量构造型, 需要为其指定最小值和最大值, 以限制求解器探索空间的范围。对于随机变量, 目前采用概率理论对随机不确定性进行量化, 且已经得到学术界和工程界的广泛认同, 并取得了巨大的成功。对于服从其他分布的随机不确定性, 应选取最合适的概率分布 (例如对数正态分布, 威布尔分布, 耿贝尔分布等) 进行表征并采用 Rosenblatt 方法对其进行空间转换, 转换至标准正态空间。不同概率分布的转换关系如表 1 所示。

表 1 概率分布及其 $x-u$ 空间转换关系
Tab.1 Probability distribution and its $x-u$ space conversion relation

分布	概率密度函数	转换关系
正态分布	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-0.5\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^2}$ $-\infty \leq x \leq \infty$	$X = \mu + \sigma U$
对数正态分布	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-0.5\left[\frac{\ln x - \bar{\mu}}{\sigma}\right]^2}$ $x > 0$	$X = e^{(\bar{\mu} + \sigma U)}$
威布尔分布	$f(x) = \frac{k}{v} \left(\frac{x}{v}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{v}\right)^k}$ $x > 0$	$X = v[-\ln(\phi(-U)^*)]^{\frac{1}{k}}$
耿贝尔分布	$f(x) = \alpha e^{-\alpha(x-v)} e^{-e^{-\alpha(x-v)}}$ $-\infty \leq x \leq \infty$	$X = v - \frac{1}{\alpha} \ln[-\ln(\phi(U))]$
均匀分布	$f(x) = \frac{1}{b-a}, a \leq x \leq b$	$X = a + (b-a)\phi(U)$

注: $\phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{u^2}{2}} du$

对于随机变量的表征, 需要指定其均值和方差, 同时指定其分布类型。如表 1 所示, 本文将随机变量的分布类型定义为 1 到 5 的整数类型, 在抽取优化模型时, 通过判断确定其分布类型, 分布类型分别为 1

到 5 时, 定义其分布分别为正态分布、对数分布、威布尔分布、耿贝尔分布和均匀分布。

对于认知变量, 根据其量化类型可以分为模糊不确定性和区间不确定性等, 为了方便处理, 本文统一使用区间不确定性进行表征。因为区间不确定性所需的量化参数较少, 仅需要确定其取值范围即可, 同时其他类型的认知不确定性都可以删除部分信息变成认知不确定性。因此在 SysML 优化定义中, 只需定义认知变量的取值边界即可。

由于在 SysML 设计模型中, 离散变量往往对应的是组件的选择, 包括选择特定组件的类型和选择特定组件的数量两个环节, 因此可以使用多重性和实例加以表征。针对一个离散变量, 有一组实例 $INS = [ins_1, ins_2, \dots, ins_m]$ 与之相关联, 用于表征变量取值的选择。具体有三种情况:

1) 模型元素只有一个实例决策。通过定义一个有界整数变量 $x \in [1 \dots m]$ 来标识一个实例 ins_i 。

2) 模型元素存在多重性决策。通过定义一个有界整数变量 $y \in [1 \dots n]$, 进而标识该模型元素的多重性。

3) 模型元素同时具有实例决策和多重性决策。针对这种组合问题, 创建一个布尔值 x_{ij} , 其中:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, ins_i \text{ 用于多重性为 } i \text{ 的决策点} \\ 0, \text{其他} \end{cases}$$

$$i \in [1, \dots, n], j \in [1, \dots, m] \quad (3)$$

3.2.2 优化约束元模型

系统在设计过程中必须满足若干约束条件。约束条件分为等式约束和不等式约束。本文对优化约束的扩展定义如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 优化约束继承自 SysML 的 Constraint Block, 包含 name、equation、owner、variable、parameter、discipline 六

个属性。Equation 关联到 SysML 中方程的定义，一个约束可以包含多个方程。Owner 属性可以支持结构之间的层次关系，例如，可以在类模型和它自身之间建立一个关联 owner_ownedConstraint，以表明一个约

束可以拥有其他约束，如此可定义系统级的全局约束和学科的局部约束。一个约束可以拥有多个变量和参数，同时一个变量或者参数也可以赋给多个约束，如此可以定义学科共享变量，也就是学科间的耦合信息。

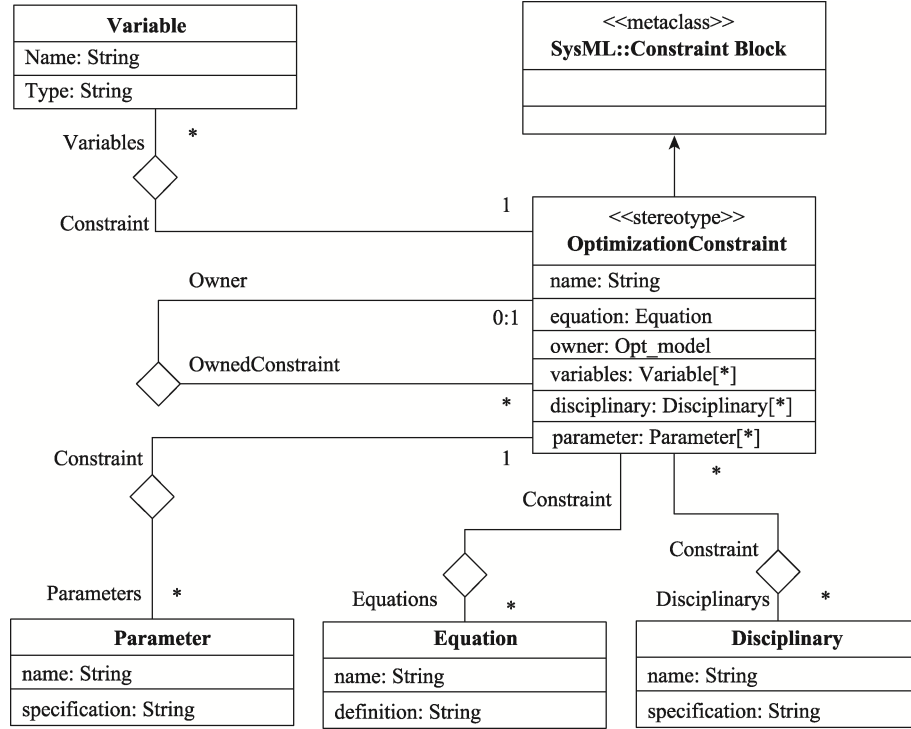


图 4 优化约束元模型定义

Fig.4 Definition of optimized constraint meta-model

等式约束除了上述定义外，还需要确定状态函数的值，而不等式约束则需要设定状态函数的上下边界。状态函数来源于属性中的 equation。等式约束和不等式约束的扩展关系如图 5 所示。

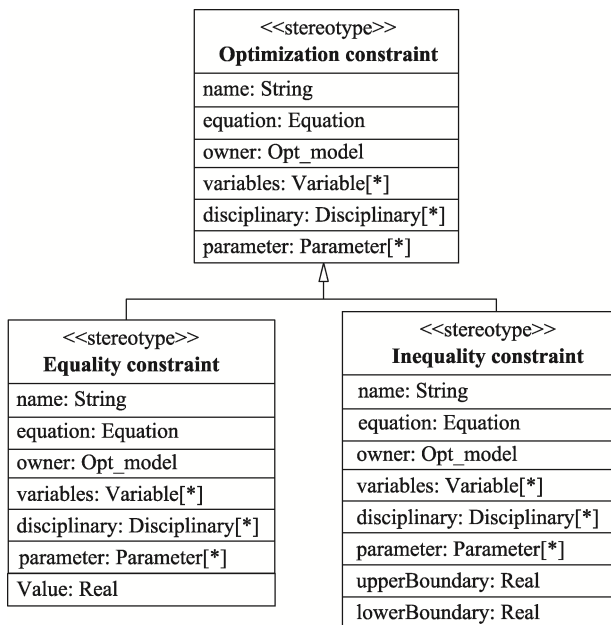


图 5 等式约束和不等式约束的扩展定义

Fig.5 Extended definitions of equality constraints and inequality constraints

3.2.3 优化目标元模型

优化目标的扩展与优化约束类似，从某种程度上讲，优化目标和优化约束是可以相互转化的。例如子系统的质量可以作为系统优化的约束条件，也可以作为系统约束的目标。如图 6 所示，优化目标也继承自 SysML 的 Constraint Block，包含 name、equation、owner、variable、parameter、discipline 和 direction 六个属性。其中 direction 是目标函数的取值方向定义，即要求目标是最大化还是最小化，本文将其数据类型定义为 Boolean 类型，其中 0 表示最小化，1 表示最大化。

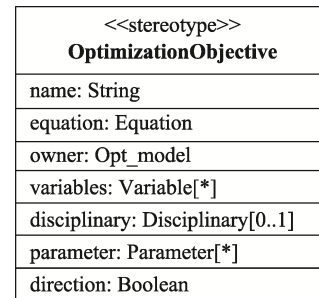


图 6 优化目标扩展模型

Fig.6 Extension model of optimized objectives

3.3 基于 SysML 扩展版型的 MDO 问题形式化表达

在 OOSEM 和 SysML 1.5 中，允许用户根据具体

的问题, 定义扩展图, 以满足不同类型的应用。如上文所述, 根据优化信息模型的多学科优化基础要素对 SysML 进行扩展, 可以表达优化目标、优化约束和优化变量等要素。但是还需要定义多学科优化问题的元模型, 通过扩展版型给出优化问题组织上的整体语义信息表示方法。

在 SysML 的九种图中, 参数图可以根据参数和参数之间的连接捕获约束块的内部结构。BDD 定义约束块及其关系。二者含有最多的优化信息表达的特

征, 因此可以以参数图和模块定义图为基础来定义优化问题的元模型。MDO 问题表示需要优化的系统模型情况, 以便最大化或最小化一组目标函数。如图 7 所示, 定义的优化问题元模型继承自参数图。图 7 中, 顶层的“MDO Problem”块扩展了 SysML 的原有构造类型“ConstraintBlock”。“MDO Problem”块有一个对“SystemBlock”和“SubsystemBlock”的引用, 可以用来表示和分析系统的层级关系。此外“MDO Problem”还包含优化目标、优化约束和优化变量等要素。

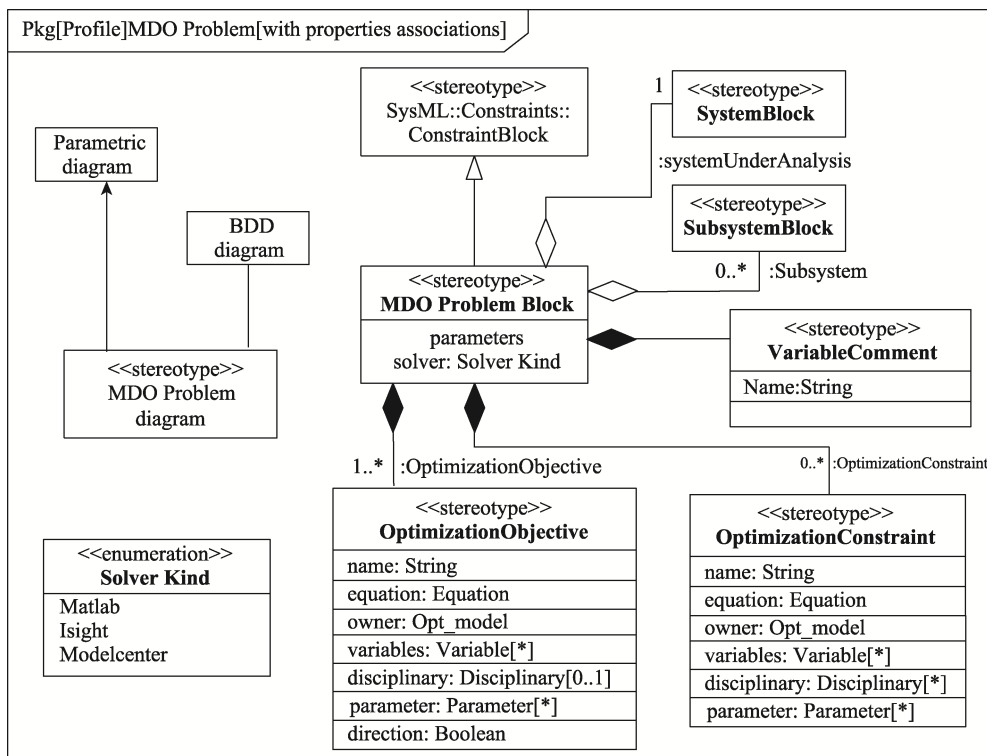


图 7 优化问题领域元模型

Fig.7 Meta-model of optimization problem domain

因为 MDO Problem 图继承自参数图, 因此其可以根据继承的绑定属性把优化约束或者优化目标表达式中每个变量或参数与存在于 SysML 模型中的值进行绑定, 可以将这些约束应用到特定的模块上。被绑定的值属性可以属于模块本身, 也可以属于模块的组成部分属性或者引用属性。通过这种方式可以创建任意复杂的数学模型并将它与任意复杂的机构模型组成部分进行捆绑。此外, 这里为每个目标函数都定义一个参数, 用于将输出结果绑定到“Opt solution Block”上, 通过这种绑定, 后续可以将优化后的结果返回到系统设计模型中。

4 基于中间格式 XML 的多学科设计建模与优化集成实现

SysML 是面向对象的, 支持在工具之间交换数据的标准化方法 (OMG XML 元数据交换标准), 因此这里将 XML 作为中间格式, 实现 SysML 优化信息提取, 并与优化求解器 (本文使用 MATLAB) 进行集成。MDO 问题的数据都可以以树形结构的形式进行组织, 使用 XML 进行存储和传输。翻译机制如图 8 所示。

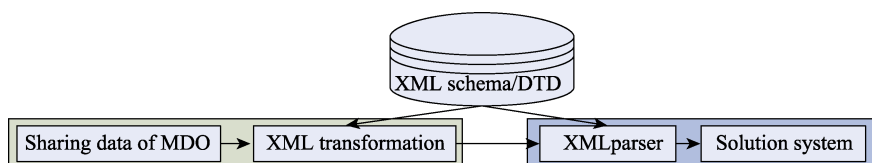


图 8 基于 XML 的翻译机制

Fig.8 XML-based translation mechanism

4.1 SysML 参数图表达机理

系统优化问题的元模型继承自参数图，从系统设计模型中抽取优化模型时，需要对 SysML 参数图进行解析，因此有必要对 SysML 的参数图表达机理进行分析，这关系着输出的目标模型的数学特性是否完整和有效。表 2 是对 SysML 中参数图模型元素的总结。

表 2 SysML 参数图模型元素及含义
Tab.2 Model elements and meaning of SysML parameter diagram

SysML 参数图模型元素	描述
约束	表达系统约束的常用机制，采用数学表达式的形式并应用于模型元素中，包含文本表示的等式或不等式
约束模块	对约束表达式进行封装，可应用于不同的情境下，方便约束信息的重用，通常包括约束和约束参数
约束属性	系统结构模块的属性之一，由约束模块进行定义，用于绑定结构的值属性参数
约束参数	约束模块的属性之一，对约束表达式中的参数进行显式表达
值属性	系统结构模块的属性之一，可与约束模块中的约束参数进行绑定
绑定连接器	代表连接器两端的元素之间的等价关系，可以是约束参数-值属性，也可以是约束参数-约束参数

以一个弹簧组件的约束模块为例，说明从参数图中抽取等式或不等式约束的原理，弹簧组件遵循胡克定律 $F=-KX$ ，其中 F 为弹力， K 为弹性系数， X 是弹

簧伸长或压缩的位移量。这只是针对单个组件的方程抽取，当组件处于某个子系统内部与其他组件通过接口相关联时，该组件约束中的参数可能会受到其他组件值属性的影响，从而增加了方程转换的复杂性。因此，本文采取以下原则从 SysML 的约束模块中抽取优化模型：（1）扩展约束模块中的等式约束和不等式约束对应优化中的等式约束和不等式约束，将约束表达式、其属性中的值和上下边界构成完整的优化等式约束和不等式约束；（2）为了方便理解和抽取优化模型，每个扩展约束模块只包括一个约束表达式及其相关的所有变量和约束参数；（3）每个扩展约束模块表达的约束属性对应一个用于方程抽取的参数图；（4）利用绑定连接器将约束参数与模块的值属性进行绑定连接，在约束表达式转换为数学方程代码时，可利用值属性名称对方程变量进行命名。

4.2 基于 XML 的优化信息提取与优化

为了实现 SysML 优化模型的提取，可以定义抽取各个类型元素的具体规则。

优化的过程可以从实际模型抽取活动中进行总结抽象，从而得到一组建模元素，以可视化的方式构建优化模型抽取的活动图，如图 9 所示，可以通过定义抽取规则支持设计人员对模型转换中 SysML 模型和 XML 之间的映射关系进行刻画。图中的“Transformation”本身是一个抽象转换类，其子类是原子转换（AutomaticTransformation），是不可再分的转换表达元素，多个原子转换组成一个转换任务；每个原子转换包括一组转换规则（TransformationRule），每条转换规则具有一个修饰符属性（Modifier），用来标识规则的类型信息。在不同的转换描述语言中规则具有不同的类型，具体的规则类型则通过规则分类器的子类来实现。除了类型修饰符属性外，每条规则还由若干

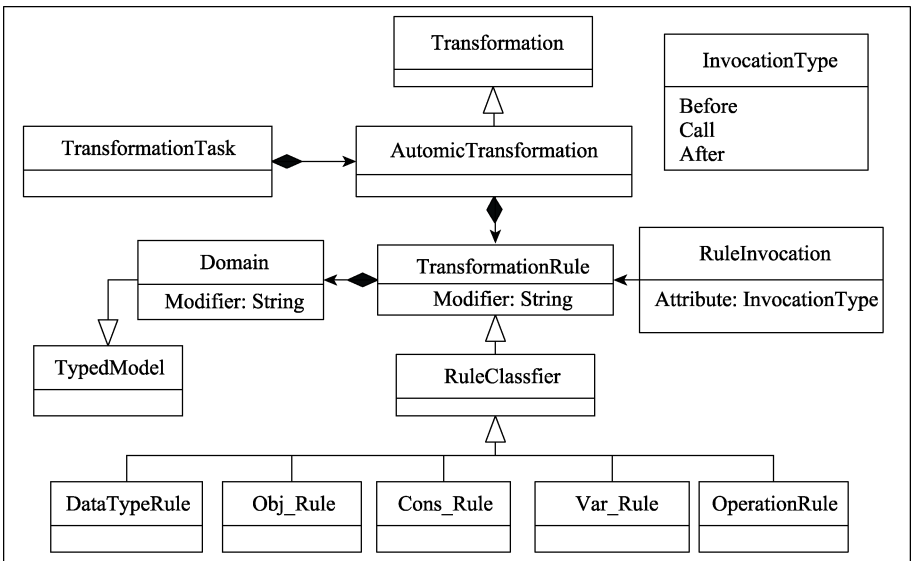


图 9 抽取规则元模型
Fig.9 Meta-model of extraction rule

区域 (Domain) 构成, 代表着不同语言中规则定义的组成部分, 每个区域也有标识所属类型的修饰符。对 SysML 优化模型进行抽取, 具体的规则如下:

1) 对象规则 Obj_Rule: 根据定义的优化目标表示规范, 对优化问题的目标函数进行解析操作, 记录优化目标所属学科, 提取优化目标的表达式 $f(x)$ 及 direction 属性并保存, 当 direction 属性值为 0 时, 令 $f(x) = -f(x)$ 。

2) 约束条件规则 Cons_Rule: 根据扩展的优化约束表示规范, 对优化问题的约束函数进行解析操作, 记录约束所属学科、约束总数、等式约束个数、不等式约束个数以及优化约束的表达式。其中, 当不等式约束上下边界不是无穷大时, 采用方程变换的方式, 将所有的约束转化成 $g(x) > 0$ 的形式, 例如 $g(x) \in [a, b]$, 且 $(a, b) \neq 0$, 则抽取的约束应转换成 $g(x) - a > 0$ 和 $b - g(x) > 0$ 两个约束。

3) 优化变量规则 Var_Rule: 根据约束参数与优化变量属性映射关系表示规范, 提取约束参数与系统优化变量间的连接关系信息, 保存约束参数类型、数值等信息, 并保存其对应的系统优化变量类型、数值等信息。

4) 操作规则 Operation Rule: 将提取的优化模型信息使用 XML 进行表达, 在提取系统优化模型的过程中, 需要进行优化变量和约束参数之间的传递, 通过约束参数与优化变量属性映射关系, 建立左右两端定义的映射关系, 将优化变量的值传递到约束参数。

同时为了解析由 SysML 建模工具(如 MagicDraw)构建的优化信息模型, 需要通过 XML 格式的文件进

行转换。通过上述描述的方法生成多学科设计优化 XML 信息后, 还需要利用特定的优化求解器(本文使用 MATLAB)对 XML 格式优化信息进行提取并求解。

将 XML 格式的优化信息提取到 MATLAB 的优化求解模型中, 首先需要将 XML 格式的文档解析为 DOM 模型。XML DOM 是 XML 的文档对象模型。每个 XML 标签都相当于一个元素节点, XML 的属性是一个属性节点。读取拥有特定标签名的节点或者节点树的节点, 即使用 `getElementsByTagName(TagName)` 得到特定标签名的所有节点, 或者利用节点间的层次关系, 使用 `getChildNodes` 方法获取其所有子节点, 依次逐级进行。

5 实例验证

5.1 基于 CSM 软件的优化元模型扩展

Stereotype 定义了如何扩展现有元类。使用 Cameo System Modeler 19.0 (CSM) 软件对上文定义的优化元模型进行扩展。通过在 Profile Diagram 上添加扩展元素, 构造了多学科设计优化元模型如图 10 所示。包括优化变量元模型、优化约束元模型和优化目标元模型。

扩展后的优化元素元模型通过发布可以在之后的优化建模中进行应用, 以随机设计变量为例, 为其定义的元模型包含名称、均值、方差、分布类型等属性, 应用时可以直接拖入随机设计变量的元模型中, 在 Specification 中设置变量的属性信息即可。优化元模型的具体扩展关系如图 11 所示。

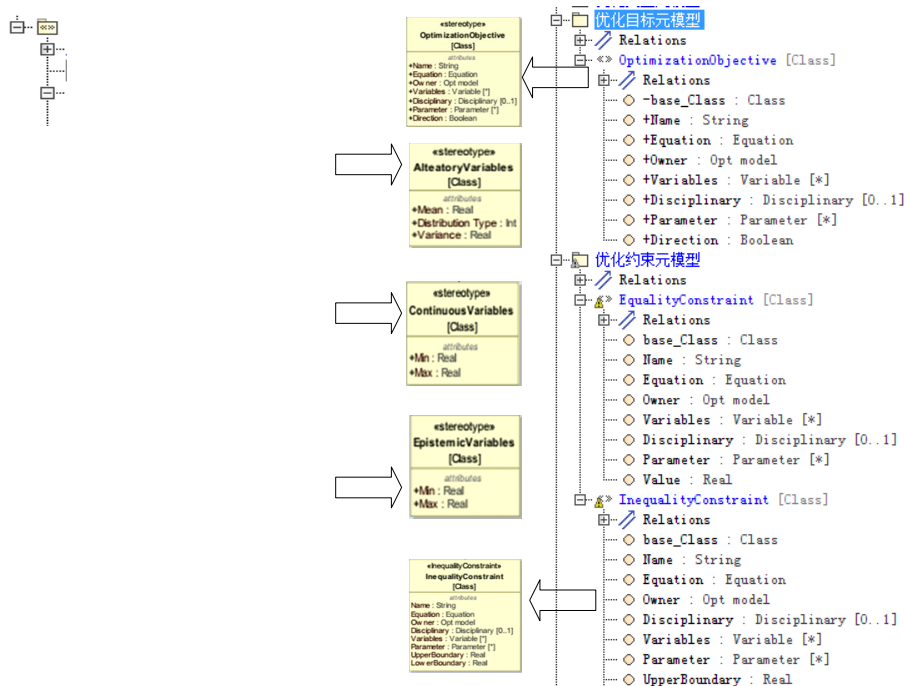


图 10 SysML 要素扩展元模型 (部分)
Fig.10 Meta-model of SysML element extension (partial)

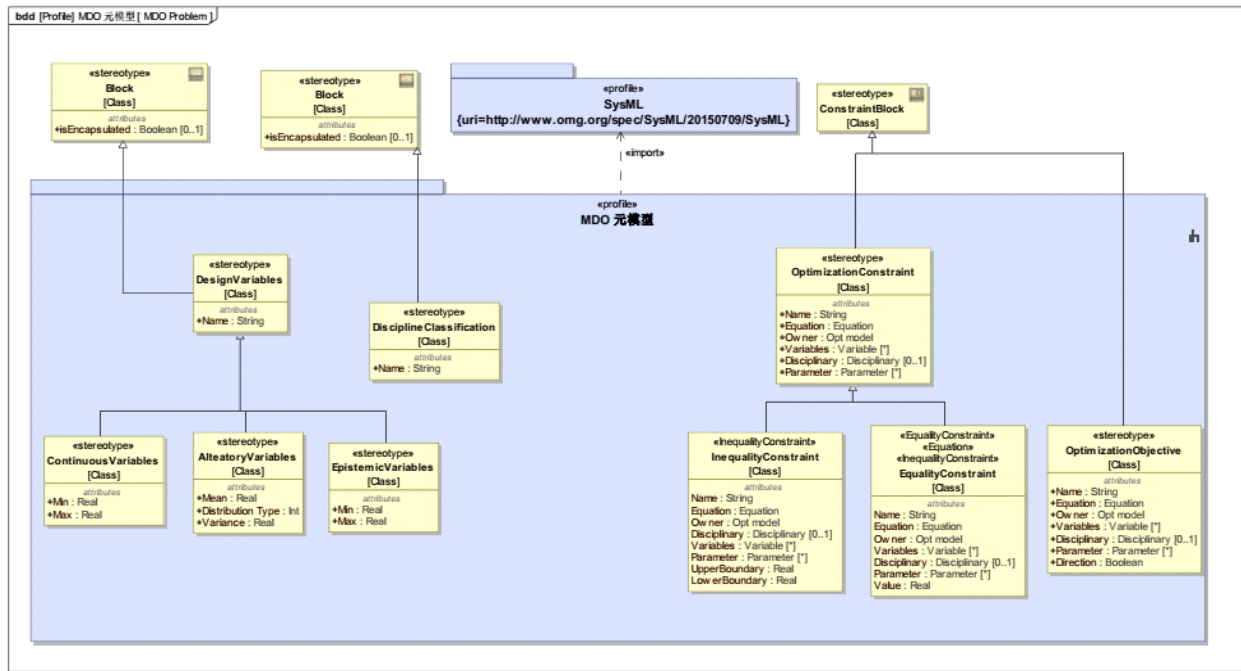


图 11 基于 SysML 扩展的优化问题元模型
Fig.11 Optimization meta-model based on SysML extension

5.2 基于 XML 的格式转换

为了解析由 SysML 建模工具（如 MagicDraw）构建的优化信息模型，需要通过 XML 格式的文件进行转换。根据 SysML 优化模型生成的 XML 文件如图

12 所示。该 XML 文件包含了完整的优化信息，包括优化变量、优化目标和优化约束等信息。该 XML 格式的优化信息可以提取到 MATLAB 等优化求解器中进行优化求解。

```

20 <ownedType xml:type="Class" xml:id="_19_0_2e20128_1454050958578_130697_44448" name="压缩机排量约束">
21 <ownedAttribute xml:id="_19_0_2e20128_1454050958579_294438_44450" name="owner: 舱内环境控制系统优化问题" isComposite="true"/>
22 <ownedAttribute xml:id="_19_0_2e20128_1454050958579_398251_44451" name="disciplinary: 空调子系统" isComposite="true"/>
23 <ownedAttribute xml:id="_19_0_2e20128_1454050958579_431363_44452" name="upperBoundary: +∞" isComposite="true"/>
24 <ownedAttribute xml:id="_19_0_2e20128_1454050958579_558051_44453" name="lowerBoundary: 260" isComposite="true"/>
25 </ownedType>
26 </nestedPackage>
27 <nestedPackage xml:id="_19_0_2e20128_1453952902542_845767_41680" name="优化目标">
28 <ownedType xml:type="emof:Class" xml:id="_19_0_1_7f7033a_1473644630063_18443_42101" name="空调分系统设计目标"/>
29 <nestedPackage xml:id="_19_0_2e20128_1454037590733_646106_42153" name="质量计算">
30 <ownedType xml:type="emof:Class" xml:id="_19_0_2e20128_1454037612843_140722_42154" name="m1"/>
31 <ownedType xml:type="emof:Class" xml:id="_19_0_2e20128_1454037806697_112745_42225" name="m2"/>
32 <ownedType xml:type="emof:Class" xml:id="_19_0_2e20128_1454037874305_338982_42264" name="m3"/>
33 <ownedType xml:type="emof:Class" xml:id="_19_0_2e20128_1454037929034_118312_42303" name="m4"/>
34 <ownedType xml:type="emof:Class" xml:id="_19_0_2e20128_1454037972872_480033_42342" name="m5"/>
35 <ownedType xml:type="emof:Class" xml:id="_19_0_1_7f7033a_1473766907629_439614_41756" name="膨胀阀">
36 <ownedAttribute xml:id="_19_0_1_7f7033a_1473767203239_732429_41978" name="PR" isComposite="true"/>
37 </ownedType>
38 <ownedType xml:type="emof:Class" xml:id="_19_0_1_7f7033a_1473766910074_271511_41801" name="冷凝器">
39 <ownedAttribute xml:id="_19_0_1_7f7033a_1473767268775_966243_41990" name="HE" isComposite="true"/>
40 </ownedType>
41 <ownedType xml:type="emof:Class" xml:id="_19_0_1_7f7033a_1473766911546_675349_41846" name="冷凝风机">
42 <ownedAttribute xml:id="_19_0_1_7f7033a_1473767231639_793868_41981" name="AirV" isComposite="true"/>
43 </ownedType>
44 <ownedType xml:type="emof:Class" xml:id="_19_0_1_7f7033a_1473766913346_895812_41891" name="蒸发器">
45 <ownedAttribute xml:id="_19_0_1_7f7033a_1473767251199_44493_41984" name="V" isComposite="true"/>
46 </ownedType>
47 <ownedType xml:type="emof:Class" xml:id="_19_0_1_7f7033a_1473766915658_710115_41936" name="压缩机">
48 <ownedAttribute xml:id="_19_0_1_7f7033a_1473767258639_685882_41987" name="CC" isComposite="true"/>
49 </ownedType>

```

图 12 SysML 优化模型转化获得的 XML 文件
Fig.12 XML files transformed from SysML optimization model

6 结语

本文提出了一种基于 SysML 的多学科设计建模

与优化方法。通过分析多学科设计优化的定义和数学模型，基于 SysML 扩展机制实现了基于 SysML 的 MDO 优化模型表征，同时基于 XML 提取优化信息，实现了系统设计与系统优化求解器的有效集成。采用

CSM 软件对本文提出的方法进行实例验证, 证明了该方法的可行性与有效性。

本文提出的系统设计与系统优化的集成求解可以为产品系统架构设计人员提供有效的决策支撑。后续工作将在现有基础上基于 SysML 语言实现复杂产品全生命周期各阶段模型的交互与集成, 形成一条贯穿产品全生命周期的数字主线, 支持全生命周期模型转换和回溯变更设计。

参考文献:

- [1] 刘钊, 凌闻元. 考虑不确定性的多学科设计优化方法研究综述[J]. 包装工程, 2021, 42(2): 35-42.
LIU Zhao, LING Wen-yuan. A Review of Multidisciplinary Design Optimization Methods Considering Uncertainties[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(2): 35-42.
- [2] 朱静, 杨晖, 高亚辉, 等. 基于模型的系统工程概述[J]. 航空发动机, 2016, 42(4): 12-16.
ZHU Jing, YANG Hui, GAO Ya-hui, et al. Summary of Model Based System Engineering[J]. Aeroengine, 2016, 42(4): 12-16.
- [3] D'SOUZA A, THOTA P. Configuration Management for Model Based Systems Engineering-an Example from the Aerospace Industry[J]. INCOSE International Symposium, 2022, 32(1): 648-664.
- [4] 童菲, 李吉宗. MBSE 在汽车电子架构领域的应用研究[J]. 机电一体化, 2018, 24(2): 25-30.
TONG Fei, LI Ji-zong. The Application Research of Model-Based System Engineering in Automotive Electrical Architecture Development[J]. Mechatronics, 2018, 24(2): 25-30.
- [5] 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 Bao-min, CHEN Bo, ZHANG Shi-cong. Research Method and Application of Vehicle Logic for EMU Based on MBSE[J]. China Railway Science, 2021, 42(6): 143-151.
- [6] SPYROPOULOS D, BARAS J S. Extending Design Capabilities of SysML with Trade-off Analysis: Electrical Microgrid Case Study[J]. Procedia Computer Science, 2013, 16: 108-117.
- [7] ROMANIW Y, BRAS B, GULDBERG T. Sustainable Manufacturing Analysis Using Activity based Costing in SysML[C]. Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference. New York, NY: American Society of Mechanical Engineers, 2011.
- [8] 袁琳, 刘玉生. 基于 SysML 的概念设计功能建模方法[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 164-177.
YUAN Lin, LIU Yu-sheng. SysML-Based Function Modeling Method for Conceptual Design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 164-177.
- [9] BINDSCHADLER D L, SMITH R R, VALERIO C P, et al. A Structured, Model-Based System Engineering Methodology for Operations System Design[M]//Cruzen C, Schmidhuber M, Lee Y, et al. Space Operations: Contributions from the Global Community. Cham: Springer, 2017: 271-290.
- [10] KASLOW D, ANDERSON L, ASUNDI S, et al. Developing a CubeSat Model-Based System Engineering (MBSE) Reference Model - Interim Status[C]//2015 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA. IEEE, 2015: 1-16.
- [11] LESERF P, DE SAQUI-SANNES P, HUGUES J, et al. Sysml Modeling for Embedded Systems Design Optimization: A Case Study[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development. New York: ACM, 2015: 449-457.
- [12] BALESTRINI-ROBINSON S, FREEMAN D F, BROWNE D C. An Object-Oriented and Executable SysML Framework for Rapid Model Development[J]. Procedia Computer Science, 2015, 44: 423-432.
- [13] CHABIBI B, ANWAR A, NASSAR M. Towards a Model Integration from SysML to MATLAB/Simulink[J]. Journal of Software, 2018, 13(12): 630-645.
- [14] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J, HAFTKA R T. Multidisciplinary Aerospace Design Optimization: Survey of Recent Developments[J]. Structural Optimization, 1997, 14(1): 1-23.
- [15] 曹悦. 基于 SysML 的多域复杂机电产品系统层建模与仿真集成研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
CAO Yue. Integration of System-level Modeling and Simulation of Multi-domain Complicated Mechatronic Product in SysML[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [16] FRIEDENTHAL S, MOORE A, STEINER R. Customizing SysML for Specific Domains[M]//A Practical Guide to SysML. Amsterdam: Elsevier, 2015: 357-384.

责任编辑: 马梦遥