

基于公理化设计的系统工程方法与MBSE模型体系*

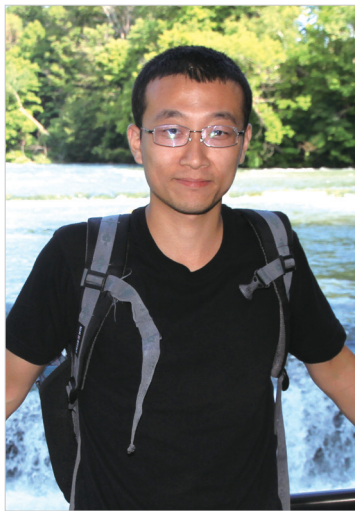
王昊琪, 张 旭

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

[摘要] 对基于模型的系统工程 MBSE 方法及其建模体系进行了研究。在运用 MBSE 时, 系统工程师所面临的挑战之一是如何对遇到的复杂工程问题进行分析, 以及如何定义完整的系统模型。将公理化设计作为 MBSE 的理论基础, 提出基于公理化设计的系统工程方法, 同时建立对应的 MBSE 模型体系, 为系统工程师完整定义复杂工程问题提供建模方法和模型框架。根据公理化设计中的设计域、设计公理和“Z”字形映射过程, 分别建立复杂系统的设计过程、模型分析和控制过程, 以及设计过程中的信息反馈回路; 同时建立对应的系统需求模型、功能架构模型和物理实现架构模型, 构成 MBSE 模型体系, 从系统的、基于模型的角度为系统工程师提供一个描述工程问题的方法和完整视图。通过卫星电缆网设计验证文中所提出的观点, 最后给出对应的结论和未来的研究工作。

关键词: 基于模型的系统工程; 公理化设计; 复杂产品建模

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.13.094



王昊琪

北京理工大学机械与车辆学院数字化制造研究所博士研究生, 主要研究方向为先进制造与生产系统工程、CAD/CAM、基于模型的系统工程。

在以飞机和卫星为代表的复杂产品研制中, 系统工程是广泛应用的一种研制方式, 覆盖了从系统目标识别、系统功能分解到系统物理组成的构建等环节, 目的是保证用户需求在系统的整个生命周期中都得到满足, 且使经济效益最大化^[1-2]。

随着数字化技术的发展, 基于模型的系统工程(Model-Based System Engineering, MBSE)成为系统工程发展的最新方向, 强调将模型作为系统设计的核心^[3]。

近年来, 国际领先的航空企业在积极推进系统工程和 MBSE。空客公司在 A350 系列飞机的研制中采用 MBSE, 将需求逐步细化, 并进行功能分析与设计综合, 实现了系统级的需求分析、确认域验证; 洛克希德·马丁公司将 MBSE 应用于其需求管理和系统构建模型建立中, 并与

后续机械、电子和软件的设计与分析集成; 波音公司建立了面向产品生命周期的 MBSE 过程, 涵盖从概念设计到需求和生产等阶段, 强调以需求定义、功能和行为集成、逻辑架构设计为核心^[4]。在国内, 尤其是航空航天领域以及高校已经开展了大量研究与应用工作, 形成了相对独立有效的研制方式^[5-6]。其中, 汤超等^[7]通过 Rhapsody 方法指导民用飞机起落架系统的需求分析、功能分析和设计综合, 使用 SysML 建立对应的系统模型, 探索 MBSE 方法在民用飞机复杂系统中的指导作用, 但是没有对系统模型的建立给出完整定义。景涛^[8]将基于模型的系统工程应用在飞机作动器设计中, 通过不同仿真分析软件, 将产品的物理系统模型和控制系统模型耦合起来, 形成作动器系统模型, 对整个方案进行分析和优化, 但

* 基金项目: 国防基础科研资助项目(C0320110002)。

在设计与分析过程中,对如何从需求分析到组件分解过程没有详细说明。葛立敏等^[9]介绍了 MBSE 在现代飞机航电系统中的应用,将基于模型的设计流程分为白盒分析和黑盒分析过程,共同明确系统实现,但该设计流程过分依赖 SysML,对不了解此建模语言的设计师,适用率较低。LMS 公司面向多电飞机及其智能控制系统的设计,研究系统级集成仿真解决方案,提出了支持 MBSE 的描述完整系统的“虚拟铁鸟”,在系统集成阶段早期,将物理模型和控制模型进行耦合,形成机电一体化的系统模型^[10]，“虚拟铁鸟”的实质是系统集成阶段的建模、仿真与分析,缺乏在系统设计初期对系统需求、功能和行为进行分析的过程,从而建立系统模型。

MBSE 在国内航空航天领域中的研究处于起步阶段。实际应用中,系统工程与 MBSE 只告诉工程师要做什么,以及利用模型来实现什么,而对实现方法的分析不充分。因此,当工程师对复杂问题进行分析和描述时,就会遇到两个方面的问题:一是用什么方法来分析复杂问题;二是如何完整定义分析结果。其中,分析方法提供解决复杂工程问题的思路 and 过程,而分析结果的完整定义保证后续系统研发的效率。这就说明缺乏面向复杂产品系统工程设计的结构完整理论,对系统级模型的构建并不充分,尤其是在总体设计和概念方案设计阶段。造成这种现象的原因主要包括:

(1) 系统工程与现代设计理论结合不充分。

系统设计过程是系统工程的核心,虽然其基本过程是进行反复分析、综合、试验和评价,但目前大多是以经验为基础的演绎、归纳过程,需要充分利用现代设计理论建立面向系统的设计过程。

(2) 在 MBSE 中缺乏对复杂系统描述的完整定义。

MBSE 强调以模型为核心来定义产品,在系统设计阶段所定义的模型既要支持对产品的需求、功能、行为、系统组成、关键参数等数据的描述,还要与后续的三维模型、分析仿真模型、加工装配模型等学科领域模型集成,并且保证这些模型的一致性表达。在国内,系统模型的建立侧重于几何与制造信息的结合,但对于需求、行为和功能等元素考虑不充分,这些系统设计要素的完整定义目前还处于研究阶段。

因此,研究支持系统设计过程的理论方法,并且建立相应的系统模型框架,从系统的、基于模型的角度为系统工程师提供一个描述工程问题的方法和完整视图,对提高设计效率和水平、提高复杂系统的研制综合能力具有重要意义。

针对以上两个问题,本文以公理化设计理论为指导,对复杂产品研发过程的系统工程方法进行研究;同时,在系统工程的指导下,提出了支持复杂产品研发的 MBSE 模型框架。

MBSE 简介

MBSE 是在系统工程基础上发展起来的,经历了从最初的基于文档的设计方式到如今基于模型设计方式的转变,强调将模型作为系统设计核心^[11]。这种系统设计方式的转变,引起了系统设计过程变化,国内外学者对 MBSE 的内涵、定义、设计过程和建模方法等进行了大量研究,主要集中在^[3]:

(1) 基于模型的系统设计过程研究;

(2) 基于模型的系统模型及其建模方法研究。

在国外,MBSE 发展尤为迅速。其中, Hoffmann 采用服务请求驱动的建模方法,将模型作为研发流程核心,支持系统设计中的需求分析、功能分析和结构设计^[12]; Barbieri 等提出了一种基于“W 模型”的 MBSE 方

法论,支持复杂机电产品集成开发,强调通过在更高层次的系统级模型,弥补在多学科并行开发过程中信息之间由于缺乏沟通而导致集成不充分的缺点^[13]; Mhenni 等提出了一种面向复杂机电产品系统设计阶段的 MBSE 方法论,将系统设计分为黑盒分析与白盒分析两个主要阶段,前者的目标是提供一个完整和一致的需求和功能描述,后者用来完成系统内部具体架构建设和行为分析^[14]。

国内学者也对 MBSE 的系统设计和系统建模技术进行了研究。其中,王崑声等对国外 MBSE 的理论和方法的研究与应用情况进行了总结,分析了 MBSE 的内涵,认为系统工程的关键在于构建一个系统模型,并且给出了 MBSE 相对于传统基于文档的系统工程的优势及其理论与技术基础^[5]; 刘玉生等从模型驱动角度出发,对面向复杂产品系统设计建模方法进行分析,对现有的 4 种基于模型的系统工程方法(通用系统建模方法、并行系统建模方法、基于对象-过程的建模方法和基于状态分析的建模方法)进行了较为全面的分析与评述^[15],在此基础上提出了支持模型驱动的多领域复杂产品多层次设计与仿真信息集成框架,用来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^[16]; 韩凤宇等研究了 MBSE 在航天器研制中的应用,分析了 MBSE 的内涵,并讨论了如何应用其来指导航天器的研制,认为应该扩展 MBSE 的应用范围并融入模型驱动思想^[17]。

目前,对 MBSE 的研究主要集中在其建模语言和系统工程方法上,大多数只涉及对 MBSE 的定义,很少关注如何实现整个系统工程过程,以及实施 MBSE 所需的模型组成元素^[18]。相对于国外,国内对 MBSE 的研究还处于起步与探索阶段,主要集中在对其内涵的研究和现有相关方法总结上,与现代设计方法结合不充分。

现代设计理论为 MBSE 提供了理论基础。现代产品设计方法有多种,主要包括德国的 Pahl 等提出的系统化设计理论^[19]、Grabowski 提出的通用设计理论(Universal Design Theory, UDT)^[20]、日本 Akao 提出的质量功能配置(Quality Function Deployment, QFD)理论^[21]和 Tomiyama 提出的一般设计理论(General Design Theory, GDT)^[22]、美国 Suh 提出的公理化设计理论(Axiomatic Design, AD)^[23]。其中,公理化设计可以作为 MBSE 的理论基础^[24],以科学公理和法则为基础的设计公理体系认为系统设计是设计域(用户域、功能域、结构域和工艺域)层次分解和不断迭代的过程。公理化设计通过相邻设计域间的映射进行产品设计,并在映射过程中利用设计公理判断设计的合理性和最优性。根据以上分析,本文根据公理化设计中的设计域、设计公理和“Z”字形映射过程,分别建立复杂系统的设计过程、模型分析和控制过程,以及设计过程中的信息反馈回路,同时建立对应的系统需求模型、功能架构模型和物理实现架构模型,构成 MBSE 模型体系,从系统的、基于模型的角度为系统工程师提供一个描述工程问题的方法和完整视图。

基于公理化设计的系统工程方法

1 映射机制

系统工程作为复杂产品研发方法,主要是以“V”字形模型为过程展开,包括自顶向下的系统分析、子系统定义和设计过程(系统设计),以及自底向上的子系统测试、集成和验证过程(系统集成)。其中系统设计是系统的核心,但系统设计过程大都是以经验为基础的设计活动,本文将公理化设计作为系统设计的理论基础。

根据前文对公理化设计的介绍,可以用一个通用的设计过程模型来

描述公理化设计过程,包括设计分析和设计分解两个阶段。其中,设计分析用来确定满足设计分解结果的设计参数,包括设计目标分析、设计决策分析等;设计分解的目的是在设计分析的基础上,对系统进行细化,包括分解顺序确定、子功能要求生成等。设计分析和设计分解迭代进行,最终完成系统的总体设计。图 1 解释了基于公理化设计的研发过程,其中上半部分表示自上至下的设计演化过程,从初始的概念设计到后续的详细设计,每一个过程又是设计分析和设计分解迭代的结果,图 1 中的黑色封闭圆环表示这种迭代的公理化设计过程。

在公理化设计过程中,设计域、设计公理,以及设计域中的用户域、功能域、结构域等之间的“Z”字形映射过程是其核心,本文通过 3 种映射关系建立基于公理化设计理论的系统设计方法。图 2 给出了公理化设计到系统设计的映射关系,它们分别是:设计域和系统设计过程的映射、设计公理到系统分析和控制的映射、设计域之间的“Z”字形映射和系统设计过程的反馈回路的映射。

根据公理化设计,设计域描述产品研发的整体信息,包含从用户的需求分析、系统功能的定义与分解到物理结构的确定等,这与系统工程过程中的系统设计过程所包含的活动相

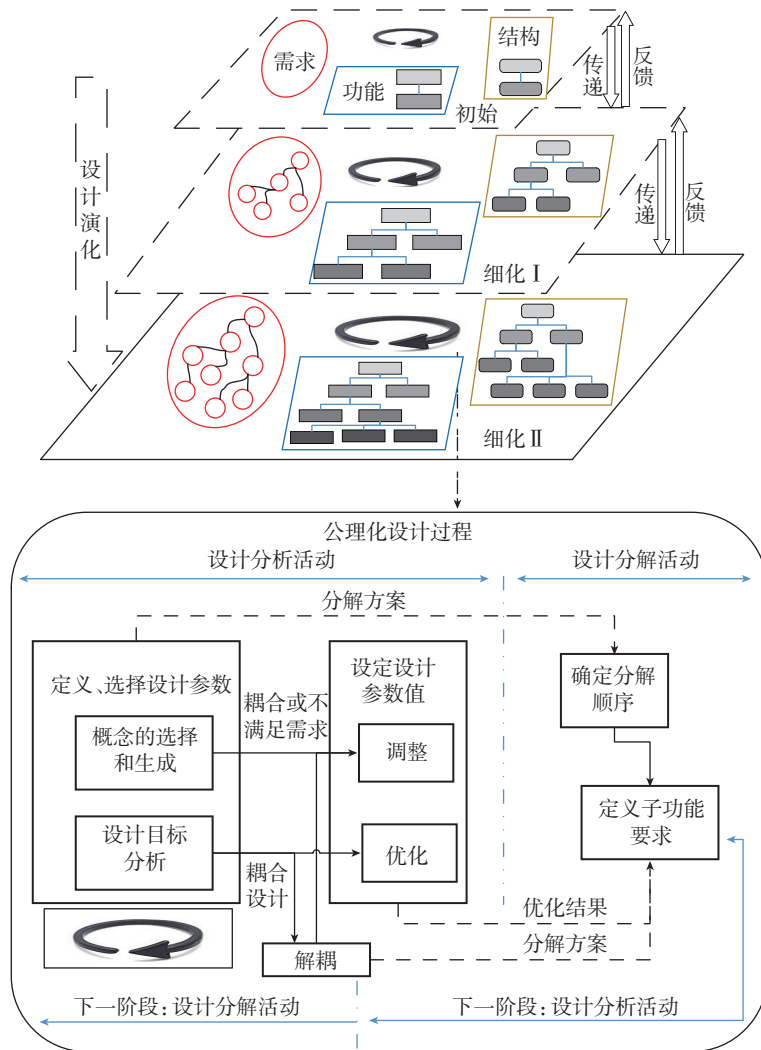


图1 公理化设计过程

Fig.1 Axiomatic design process

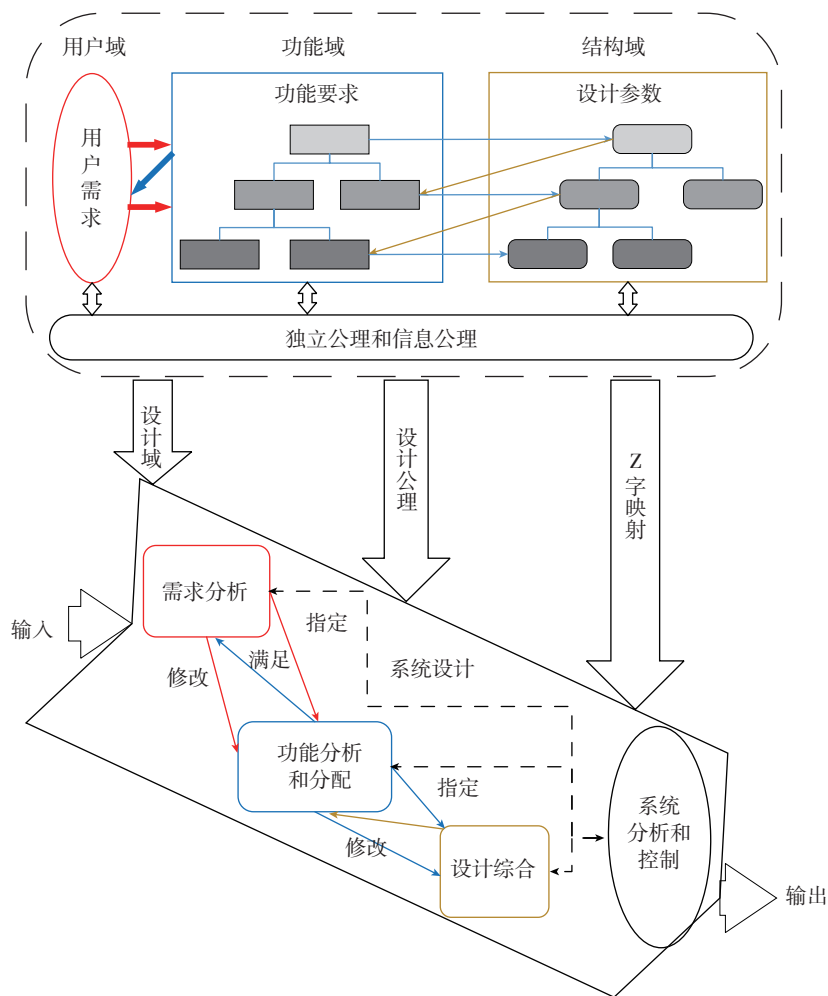


图2 公理化设计与系统工程方法的映射关系

Fig.2 Mapping relationship between axiomatic design and system engineering approach

吻合。另外,在不同的系统设计阶段,工程师通过分析设计元素来确定设计结果的优劣性和可行性,公理化设计理论中的独立公理和信息公理可作为对设计过程进行分析和评价的依据。同时,系统设计过程之间往往存在信息的交互,前一个设计活动的结果作为下一个活动的输入,后者也要反馈相应的信息作为设计优化的数据,与这种信息交互相对应的是公理化设计理论中的“Z”字形映射过程,它通过相邻设计域之间自上而下地映射和变换,充分考虑了设计过程中信息之间的传递。

详细分析这3种映射关系的建立过程,如图2所示。

2 基于设计域的系统设计过程

根据公理化设计中的用户域、功能域和结构域,将系统设计过程分为需求分析、功能分析和分配,以及设计综合3个活动,而这3个活动又包括相应的子活动。

(1) 系统需求分析。

用户域表示用户对产品的需求,是整个产品研发的起点,一旦需求发生变动,通常需要整个产品设计方案重新定义。用户域中的需求不仅包括用户需求,还应该扩展到技术需求、销售需求、维护需求以及回收需求等。因此,根据用户域的定义与要求进行系统需求分析。如图3所示,将公理化设计的用户域映射为系统需求分析。

系统需求分析是系统设计的第

一步,作为外部资源和内部活动的接口,其目的是将外部输入转化为一系列的功能和性能需求,作为后续功能分析和分配的基础。如图3所示,系统的需求分析主要包括任务分析、功能需求定义、性能需求定义和设计约束定义。需求分析的优劣决定了最终产品研发效率的高低,无论是后续系统功能确定或系统物理架构的构建,都需满足系统需求。随着研发的细化,系统需求也从抽象变得具体。

(2) 系统功能分析和分配。

功能域是满足用户需求的一系列产品功能要求和约束的集合。从系统工程角度出发,公理化设计将系统功能分为总功能和子功能。其中,总功能对应系统输入与输出的能量、物料和信息的关系。1个系统的总功能可分解为若干复杂程度较低的子功能,直到无法分解的功能元。因此,根据功能域的定义与要求进行系统功能的分析和分配。

公理化设计的功能域和系统功能分析与分配之间的对应,如图4所示。系统功能分析和分配是连接顶层系统要求和约束与后续详细的系统开发与实施的桥梁,主要包括功能分解、功能需求分配、系统功能架构建立以及接口定义。最初的功能分析是将功能性需求进行分解,它们必须满足更加详细的功能。在这种分配中,需求的可追溯性尤为重要,因为需求往往对应多个功能,随着系统研发的进展,这种映射关系就变得异常复杂,如果不对这种关系进行记录,系统的优化与变更能力将大大降低。最终,系统功能分析的结果是功能架构,它描述了这些功能怎样一起工作来完成相关系统任务。通常情况下,系统功能分析后,存在多种功能架构满足同1个需求,而每1个功能架构的成本、性能、实施风险等都不尽相同,这就需要下面的设计综合来进一步分析。

(3) 设计综合。

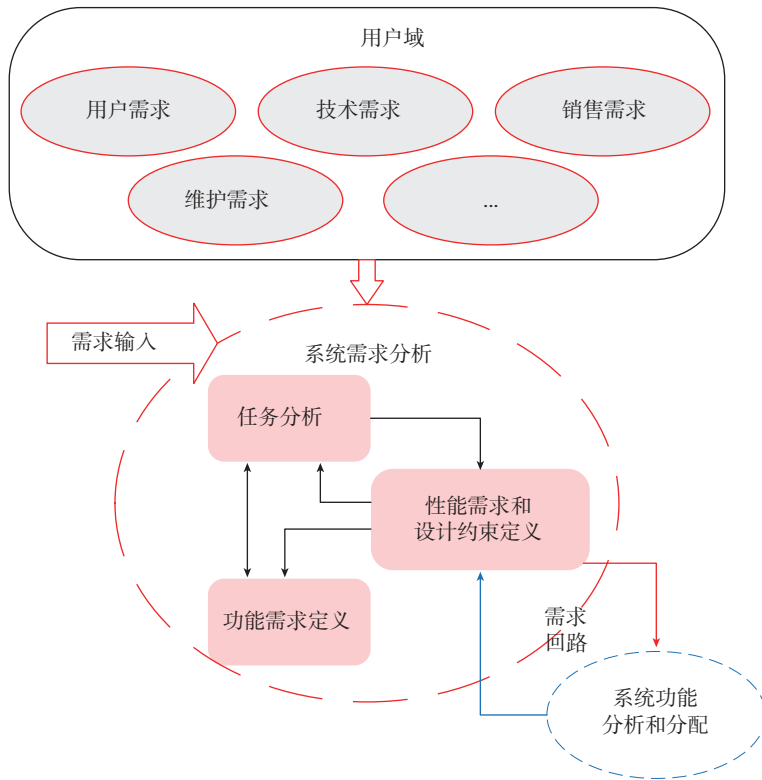


图3 用户域到系统需求分析的映射

Fig.3 Customer domain mapped to system requirements analysis

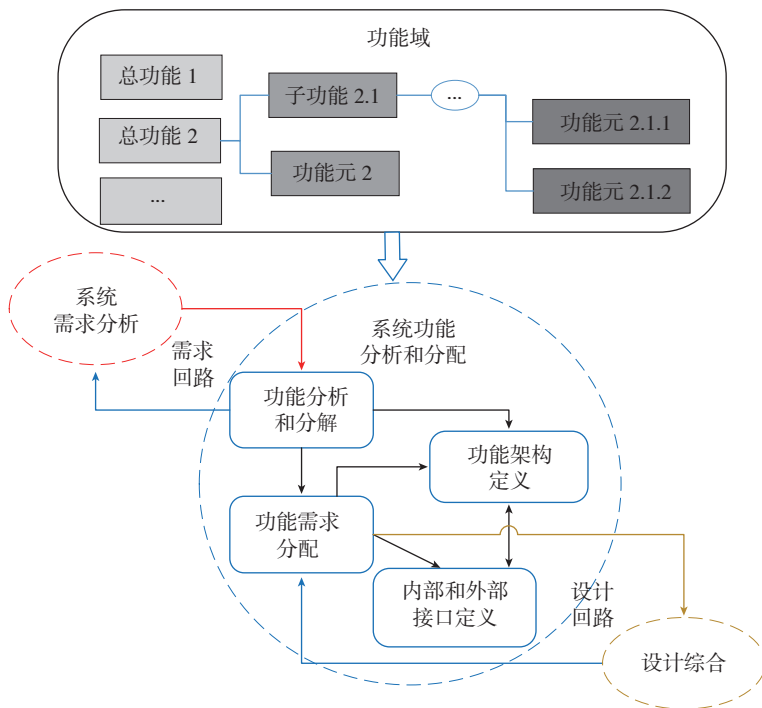


图4 功能域到系统功能分析和分配的映射

Fig.4 Functional domain mapped to system functions analysis and distribution

结构域是实现功能要求的物理设计过程。根据前文的介绍,结构域元素的集合,描述了产品的整个结构中的设计参数反映了能够满足功能

要求的设计参数,其确定过程就是结构域的形成过程。设计参数的选择受到功能的限制,还要考虑不同设计参数彼此的关联关系,设计参数的确定和功能域中功能分解同时进行。因此,根据结构域的定义与要求展开设计综合。

如图5所示,设计综合主要包括功能和需求到物理元素的分配和定义、物理架构的建立以及接口的定义。首先,通过将上一阶段的功能架构中的功能元素转化为对应的物理元素,建立这些元素之间的关联关系,进行整合形成相应的物理系统架构。这些元素需要开发得足够详细,使得满足需求分析中的需求和约束,形成详细的系统设计方案。在这一过程中,还要找到每一个物理元素的关键参数,及其对系统性能、成本、进度和风险等的灵敏度,以便进行系统的分析和控制。其次,物理接口定义作为功能分析和分配的延续,将不同的子物理架构进行关联。

3 基于设计公理的系统分析和控制

建立设计公理与系统开发过程中模型分析和控制的对应关系。公理化设计中的设计公理为设计师们提供了判断设计优劣的依据,其中,独立公理给出了判断设计可行性的依据,而信息公理是在满足独立公理的前提下,判断这些可行设计的优劣的依据。

$$[FR]_{m \times 1} = [A]_{m \times n} [DP]_{n \times 1}, \quad (1)$$

$$I_i = \log_2 \left(\frac{1}{P_i} \right) = -\log_2 P_i, \quad (2)$$

$$I_{sys} = \log_2 \left(\frac{1}{P_{[m]}} \right) = -\log_2 P_{[m]}. \quad (3)$$

根据设计公理,在系统分析和控制中,一方面,用独立公理(公式1)对功能分析与分析阶段进行分析和优化,保证功能元素之间的独立性。其中, $[FR]_{m \times 1}$ 为功能要求向量, $[DP]_{n \times 1}$ 为设计参数向量, $[A]_{m \times n}$ 为设计矩阵。为了满足独立公理,应尽量使得设计矩阵 $[A]_{m \times n}$ 为对角矩阵或三角矩阵。

另一方面,在设计综合阶段,用信息公理(公式(2)与公式(3))对系统架构模型进行分析。其中, P_i 为设计参数满足功能要求的概率,对于有 m 个功能要求的系统,其信息总量为 I_{sys} , 对于满足独立要求的设计而言,联合概率为 $P_{[m]} = \prod_{i=1}^m P_i$, 这时对应的信息总量为 $-\log_2 P_{[m]}$ 。因为对于同一个功能可能有不同的物理架构实现,信息公理通过概率计算不同设计的信息含量,其中概率最高(I_{sys} 或 $P_{[m]}$ 值最小),即信息含量最少的设计为最优的设计方案。因此,可以将这两条设计公理作为系统工程过程各个活动的输出进行验证的依据,形成对应的系统分析与控制活动。

4 基于“Z”字形映射过程的设计过程反馈回路

公理化设计过程是在相邻的两个设计域之间自上而下地进行映射和变换的过程,充分考虑两者之间的相互关系,整个映射过程形象地描述为“Z”字形映射。用户域和功能域的“Z”字形映射形成系统的需求反馈回路,描述了系统需求对系统功能的要求,系统功能对系统需求的满足情况,以及需求的修改对功能的影响;功能域和结构域的“Z”字形映射形成系统的设计反馈回路,描述了系统功能对系统物理架构的要求,系统物理架构对系统功能的满足情况,以及功能的修改对物理架构的影响。

与公理化设计相对应,系统设计过程最主要的组成元素是需求分析、功能分析和分配、设计综合,以及系统分析和控制,它们之间存在着密切的信息传递关系,根据公理化设计域之间“Z”字形映射,系统设计过程包含主要两条信息反馈回路:需求回路和设计回路,如图6所示。系统设计过程是一个迭代的过程,主要体现在这两条信息回路之间的信息传递。如需求分析结果作为功能分析和需求到功能分配的输入,而功能分析后

的结果一方面反馈给需求分析阶段来验证功能与需求的一致性,另一方面作为系统综合阶段的输入,形成需求回路;同时,系统需求的修改会导致系统功能变更,形成需求到功能的“Z”字形映射。同理,设计回路反映

求回路;同时,系统需求的修改会导致系统功能变更,形成需求到功能的“Z”字形映射。同理,设计回路反映

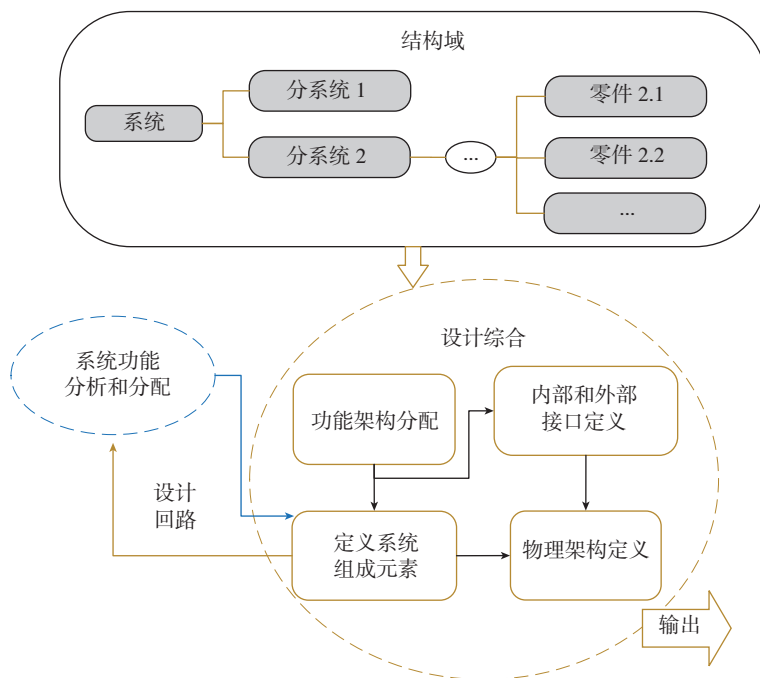


图5 结构域到设计综合的映射

Fig.5 Physical domain mapped to architectural design

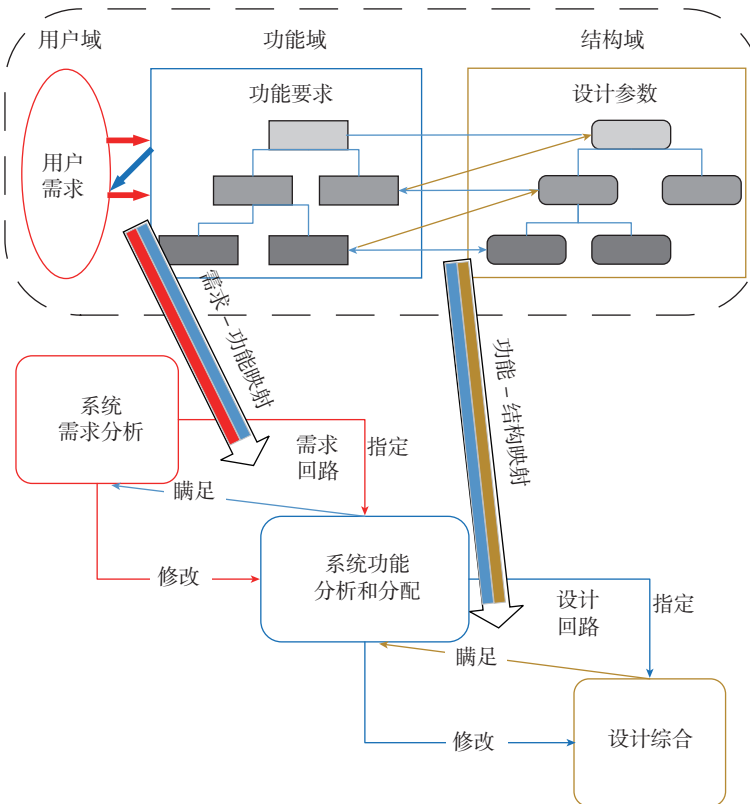


图6 “Z”字形映射到信息反馈回路的映射

Fig.6 Relationship between information feedback loop and zigzagging process

的是功能分析和分配与设计综合之间的信息传递关系,功能架构的定义可以指导系统物理配置,系统物理架构的分析结果作为功能验证与修改的依据;同时,系统功能的修改会使系统物理结构变更,形成功能到物理架构的“Z”字形映射。

综上,通过这3种映射关系,可以建立基于公理化设计的系统工程方法。如图7所示,完整的系统工程方法体系得以建立,包括需求分析、功能分析、设计综合之间的信息交互,以及保证系统设计质量的方法。在基于公理化设计的系统工程方法

基础上,下一节建立符合MBSE系统定义要求的模型体系结构,将理论体现到实际的工程元素中。

MBSE 模型体系构建

基于公理化设计的系统工程,通过系统需求分析、功能分析和分配,以及设计综合为工程师提供了描述复杂工程问题的方法。在上述过程中会产生层次化、多视图、多粒度和多领域的信息,本节对这些信息及其之间的关系进行分类,建立符合MBSE系统定义要求的模型体系结构。

MBSE 强调以模型为核心来定

义产品,在系统设计阶段所建立的模型既要支持对产品的需求、功能、行为、系统组成、关键参数等数据描述,还要与后续的三维模型、分析仿真模型、加工装配模型等学科领域模型集成,并且保证这些模型的一致性表达。结合基于公理化设计的系统工程,建立如图8所示的总体模型框架,此框架由以下3类模型构成:需求模型、功能架构模型、物理实现架构模型。

在图8的总体模型框架中,以用户需求作为输入,通过建立系统需求模型、系统功能架构模型、系统物理实现架构模型,输出可行的设计方案,这3种模型及其之间元素的映射与满足关系构成了MBSE总体模型框架。下面就这3类模型元素及其组成进行详细说明。

系统需求模型描述了系统需求分析的结果。在此过程中,输入的用户需求被转化为能够被系统识别的系统需求,是整个产品研发的源点。系统需求定义了系统必须做什么以及如何执行好,系统需求分析就是用来确认系统的功能需求和相关的性能需求,这些需求之间往往存在关联关系,本文将这些关系分为包含、满足和派生,并用统一建模语言(United Modeling Language, UML)描述了这3类模型。系统需求模型及其组成如图9所示,系统需求由系统需求元素组成,分为功能、性能和物理需求,这些元素之间存在不同的关联关系,同时系统需求与系统功能元素和系统结构元素之间存在着满足与映射关系,该关系明确了系统需求元素与系统功能元素或系统结构元素的对应,满足关系明确了系统功能元素或系统结构元素满足系统需求元素的情况。

系统功能架构模型描述的是系统功能分析和分配结果。在此过程中,工程师将得到的系统需求转化为一个连贯的系统功能描述,它是

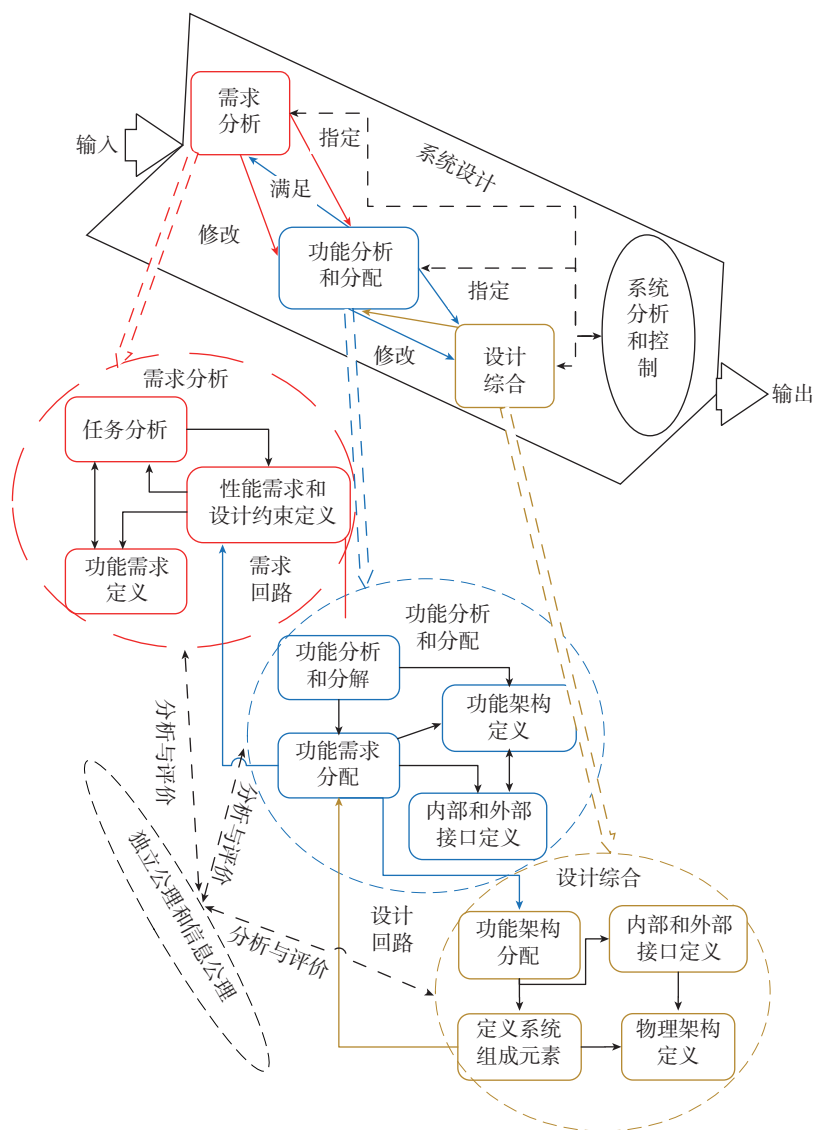


图7 基于公理化设计理论的系统设计方法

Fig.7 System design method based on axiomatic design

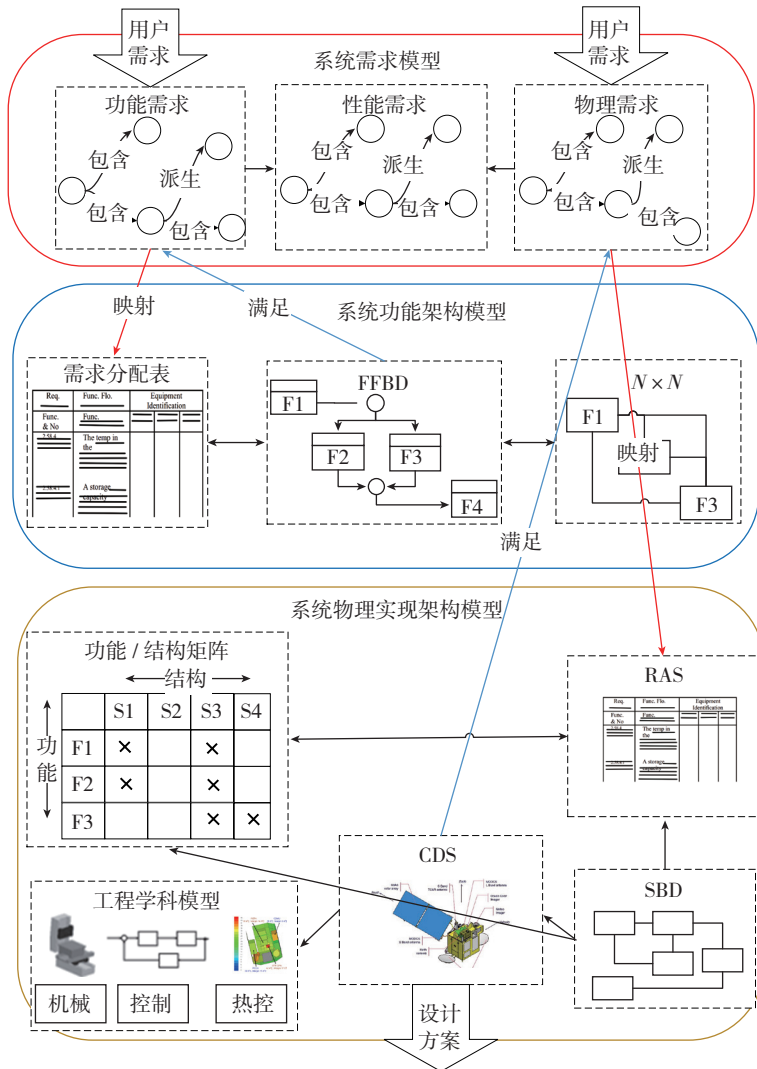


图8 系统工程总体模型框架

Fig.8 Modeling framework for system engineering

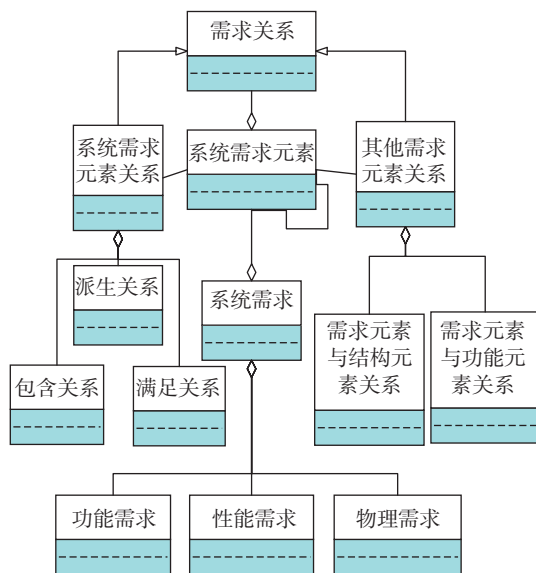


图9 系统需求模型 (UML)

Fig.9 Model of system requirements represented by UML

产品研发实质的起点。与系统需求相比,系统功能比较抽象,要完全确定系统功能并不能通过简单的文字描述来实现,本文认为应该用实际的运行场景来描述系统功能,运行场景是活动和状态的集合。其中活动即是流程,可用功能流程图(Functional Flow Block Diagram, FFBD)来表达,而功能之间的关联关系通过相应的接口来确定,系统功能架构模型如图9所示。另外,功能是为了实现系统需求的,需要记录功能与系统需求的对应关系,以及功能对系统需求的满足情况通过需求分配表(Requirement Allocation Sheet, RAS)和执行对应的状态图来实现。图10用UML给出了系统功能架构模型,由以下元素构成:(1)活动、状态等系统功能元素;(2)系统功能元素之间的关联关系;(3)由功能元素组成的功能结构;(4)系统功能元素与系统需求元素、物理结构元素之间的映射、满足关系。

系统物理实现架构模型描述的是系统设计综合的结果。此过程关注的是在所规定的性能约束范围内,对一个物理实现结构在其实施所需功能能力上的开发。这一阶段将功能转换为对应的系统产品元素(包括子系统和组件),它们集成后形成结构化系统,通过原理块图(Schematic Block Diagram, SBD)、设计表(Design Sheet, DS)和概念描述表(Concept Description Sheet, CDS)这些模型来进行描述;系统产品是为实现对应的功能,需要记录其与功能的对应关系,以及对功能的满足情况,本文通过功能/物理矩阵、需求分配表等模型来记录这些关系;相同物理结构涉及到不同的工程学科,需记录物理结构与相关学科模型的对应关系。

图11给出了上述物理实现架构模型的静态UML描述。系统物理实现架构模型用来表示系统产品及其如何分解为子系统和组件,系统产品与功能、功能需求之间的关系及其满

足情况,系统物理实现架构模型是用来描述系统产品的组成与分解过程(如何分解为子系统和组件)、系统产品与功能、功能需求之间的关系、系统产品对功能的满足情况、系统产品所涉及的工程学科。因此,此模型包括以下元素:子系统、组件等系统产品元素,系统产品的分解关系,系统产品元素与系统需求元素、功能元素之间的映射、满足关系,系统产品

与相关工程学科模型的对应关系。

实例研究

电缆网是航天器设计中的一个重要分系统,担负着馈电和各类电信号传输任务。目前,卫星电缆网设计工作依托于电缆网设计系统,借助设计师经验,遵循电接口规范^[25]。随着卫星配套单机设备的不断增多和设计日益复杂,用于实现航天器内部设备间电气连接的电缆数量不断增加,且相互关系日益复杂,部分航天器电缆导线数已达到万根量级^[26],电缆网的设计涉及到多个专业,包括电气、机械、装配等,可见其设计工作已经成为一项系统工程。因此,应用系统工程方法进行电缆网设计对提高其效率具有重要意义。

本文通过基于公理化设计的系统工程对航天器电缆网设计问题进行描述,构建电缆网设计所需的完整信息模型体系。基于公理化设计的系统工程是一个迭代过程,这里只是证明其能够为系统工程师提供一个描述工程问题的方法和完整视图。

航天器电缆网的设计涉及到电气总体部门、机械总体部门以及生产与装配部门。电气总体部门以设备接口数据表单(Interface Data Sheet, IDS)和分系统接口表为输入,完成电缆网接口表,传递给机械总体部门,后者完成布局走向,形成电缆钉板图,最终由生产部门进行加工生产。

根据基于公理化设计的系统方法,先对航天器电缆网进行需求分析。航天

器电缆网的任务比较明确,就是实现电子设备、部件外部电性连接。

根据航天器电缆网的任务,其功能需求主要包括实现航天器与电子设备间供电与信号的传输(R1)、提供航天器与运载火箭及与地面测试设备的电气连接接口(R2)、为电子设备和“地”之间建立低阻抗电传导通路(R3),以及实施对航天器火工品、太阳能电池阵驱动机构、蓄电池组等的安全保护等(R4)。航天器电缆网最基本性能需求是保证供电和信号传输的安全性、可靠性和电磁兼容性,同时由于特殊工作环境,其性能需求包括抗辐射性、低挥发性、抗高温等。对于设计约束主要考虑电缆分支长度以及电缆网的总体重量、IDS表和分系统节点表的约束、可加工型、可装配性等因素。需求R1的修改会对航天器对应的供电型号与传输功能产生影响,进而电缆的选择也会发生改变。

对航天器电缆网的功能进行分析与分配。以“实现航天器与电子设备间供电与信号的传输(R1)”的功能需求为例,可分解为航天器与电气设备的供电、航天器与电子设备的信号传输两个子功能需求。其中,与电气设备的供电包括对有效载荷的供电、对控制系统的供电等。可通过RAS记录功能与系统需求之间的关系,可通过状态图描述目前电缆所处状态,或者用FFBD来描述系统功能。

对航天器电缆网的物理结构进行分析和描述。根据需求和功能的分析,编制标准电缆网节点表,在三维模型软件环境下,与电连接器、导线束、电缆支架等共同构成电缆网三维布局模型,最终输出电缆定版图。在电缆网物理实现架构模型的构建过程中,涉及到电气总体、机械总体、工艺等不同的工程学科。如当机械总体在进行电缆网布局时,如发现电缆网的重量超出安全值,说明没有满足系统需求中的设计约束,需要进行

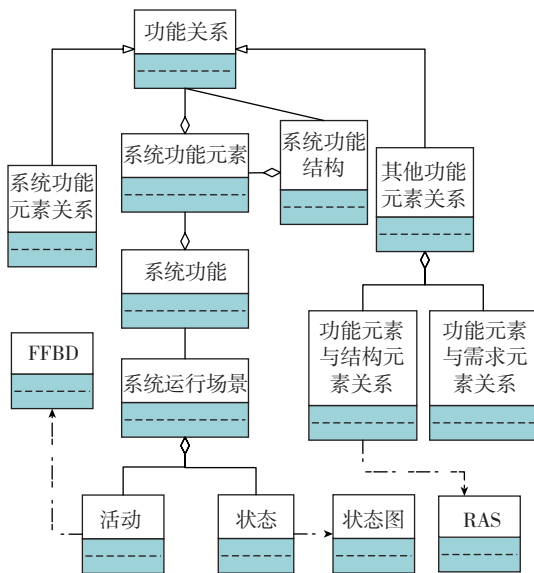


图10 系统功能架构模型 (UML)

Fig.10 Model of system functions represented by UML

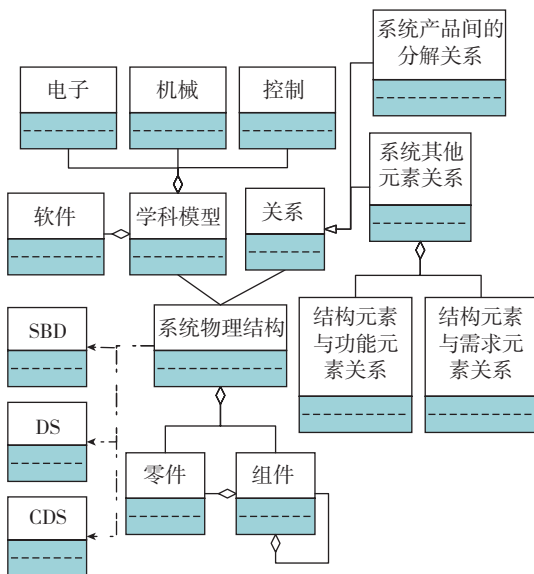


图11 系统物理实现架构模型 (UML)

Fig.11 Model of system physical structure represented by UML

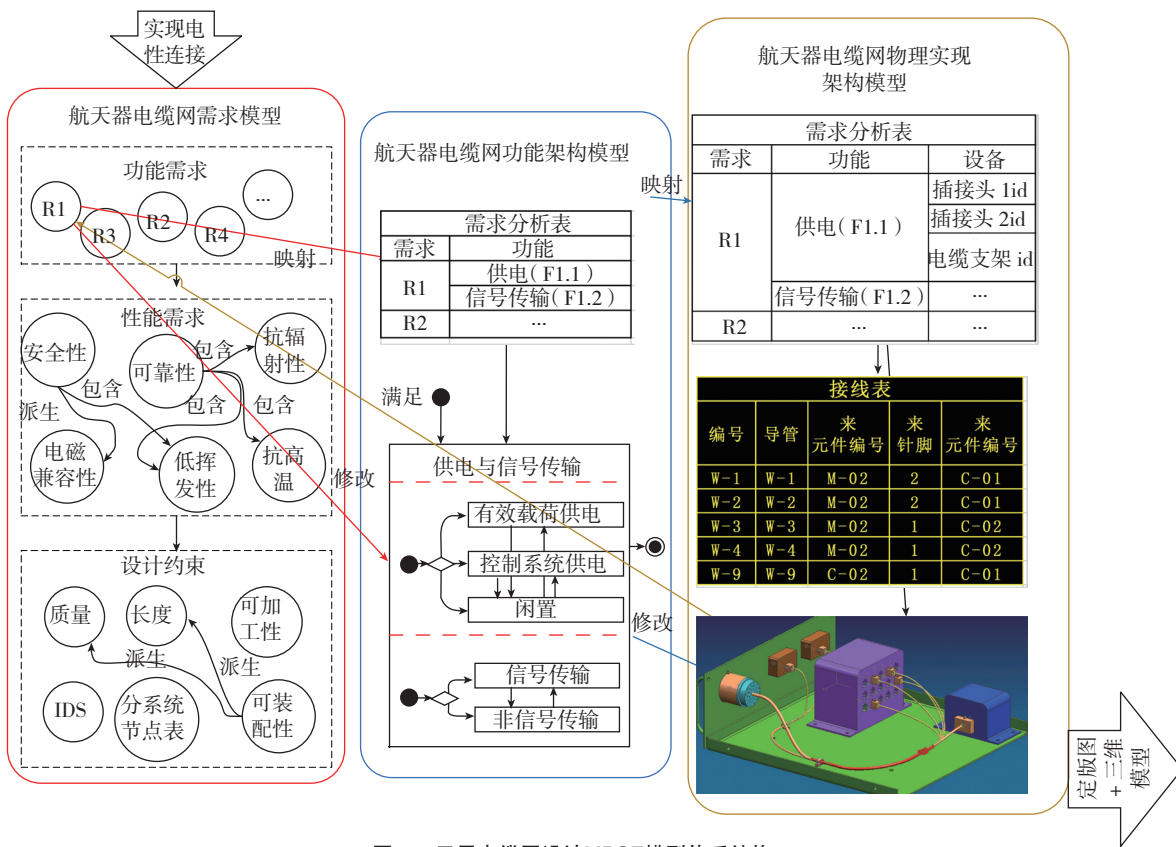


图12 卫星电缆网设计MBSE模型体系结构

Fig.12 MBSE modeling framework of cable network for satellite

调整或优化,可采取按照各设备之间的连接关系重新进行联网,按电缆集束走向划分电缆根数,尽可能减少电缆网中的过渡插头数量等措施。图12描述了最终得到的航天器电缆网设计的MBSE模型体系结构。

结束语

(1)研究了公理化设计的设计过程,提出了以公理化设计理论为基础的系统工程方法,从系统的角度为系统工程师提供一个描述工程问题的方法。(2)在基于公理化设计的系统工程方法指导下,研究MBSE中模型组成元素,用UML静态模型给出系统模型的完整定义,构成MBSE模型体系架构,从基于模型的角度为系统工程师提供了一个描述工程问题的完整视图。(3)在MBSE模型架构基础上,开展对系统工程中建模方法的研究,以及对系统模型驱动的多领域信息集成与协同技术的研究。

参考文献

[1] FOLLMER M, HEHENBERGER P, PUNZ S, et al. Approach for the creation of mechatronic system models[C]//Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11), Impacting Society through Engineering Design, vol.4: Product and Systems Design. Lyngby/Copenhagen, Denmark, 2011.

[2] DAVIS D. SMC systems engineering primer and handbook[M]. California, United States Air Force Space & Missile Systems Center, 2005:13-17.

[3] ESTEFAN J A. Survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies[R]. INCOSE MBSE Focus Group, 2008.

[4] 陶剑. 基于模型的航空制造企业架构[J]. 制造业自动化, 2015, 37(16): 11-13.

TAO Jian. The architecture of model-based aviation manufacturing enterprise[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(16): 11-13.

[5] 王崑声, 袁建华, 陈红涛, 等. 国外基于模型的系统工程方法研究与实践[J]. 中国航天, 2013(11): 52-57.

WANG Kunsheng, YUAN Jianhua, CHEN Hongtao. Research and practice for MBSE abroad[J]. Aerospace China, 2013(11): 52-57.

[6] 郭宝柱. 中国航天系统工程方法与实践[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(2): 16-19.

GUO Baozhu. China aerospace systems engineering methods and practices[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004,1(2): 16-19.

[7] 汤超, 方俊伟, 谢陵, 等. MBSE在民机起落架系统设计中的应用[J]. 民用飞机设计与研究, 2015(3):56-60.

TANG Chao, FANG Junwei, XIE Ling, et al. Application of MBSE method during landing gear system design for civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2015(3):56-60.

[8] 景涛. 基于模型的系统工程在作动器领域的应用研究[J]. 航空计算技术, 2015, 45(3): 104-107.

JING Tao. Research on model based system engineering for actuator designing[J]. Aeronautical Computing Technique, 2015, 45(3): 104-107.

[9] 葛立敏, 刘远恒, 王扬. 基于模型的系统工程在航电系统设计中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2015(8): 60-63.

GE Limin, LIU Yuanheng, WANG Yang. Study on application of model-based system engineering in avionics system design[J].

- Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(8): 60-63.
- [10] 程磊. 基于模型的系统工程与虚拟铁鸟解决方案[J]. 航空制造技术, 2013(3): 100-102.
- CHENG Lei. Model-based system engineering and virtual iron bird solution[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(3): 100-102.
- [11] International Council on Systems Engineering. A world in motion—systems engineering vision 2025[EB/OL]. [2014-07-21]. <http://www.incoe.org/docs/default-source/aboutse/se-vision-2025.pdf?sfvrsn=4,2014-06-13/2014-07-21>.
- [12] 汉斯·彼得·霍夫曼. 基于模型的系统工程最佳实践[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014: 3-18.
- HOFFMANN H P. Model-based systems engineering best practices[M]. Beijing: Aviation Industry Publishing House, 2014: 3-18.
- [13] BARBIERI G, FANTUZZI C, BORSARI R. A model-based design methodology for the development of mechatronic systems[J]. Mechatronics, 2014, 24(7): 833-843.
- [14] MHENNI F, CHOLEY J Y, PENAS O, et al. A SysML-based methodology for mechatronic systems architectural design[J]. Advanced Engineering Informatics, 2014, 28(3): 218-231.
- [15] 刘玉生, 蒋玉芹, 高曙明. 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(6): 741-749.
- LIU Yusheng, JIANG Yuqin, GAO Shuming. Model-driven modeling for system design of complex products: a survey[J]. China Mechanical Engineering, 2010(6):741-749.
- [16] 刘玉生, 袁文强, 樊红日, 等. 基于 SysML 的模型驱动复杂产品设计的信息集成框架研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(12): 1438-1445.
- LIU Yusheng, YUAN Wenqiang, FAN Hongri, et al. Research on information integration framework of SysML based model-driven design of complex products[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(12):1438-1445.
- [17] 韩凤宇, 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.
- [18] CLOUTIER R, SAUSER B, BONE M, et al. Transitioning systems thinking to model-based systems engineering: systemigrams to sysml models[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2015, 45(4): 662-674.
- [19] PAHL G, BEITZ W. Engineering design[M]. London: Springer, 2001.
- [20] GRABOWSKI H. Universal design theory: elements and applicability to computers universal design theory[M]. Aachen: Shaker Verlag, 1998: 209-219.
- [21] AKAO Y. QFD: Past, present, and future[J]. International Symposium on QFD, 1997, 20(1):1-12.
- [22] TOMIYAMA T. General design theory and its extensions and applications[M]. Aachen : Shaker Verlag: 1998: 25-46.
- [23] SUH N P. Axiomatic design as a basis for universal design theory[M]. Aachen: Shaker Verlag, 1998: 3-24.
- [24] BARTOLOMEI J E. Qualitative knowledge construction for engineering systems: extending the design structure matrix methodology in scope and procedure[R]. Air Force Inst of Tech Wright-patterson AFB on School of Engineering, 2007.
- [25] 徐福祥, 林华宝, 侯深渊, 等. 卫星工程概论(下)[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009:78-80.
- XU Fuxiang, LIN Huabao, HOU Shenyuan, et al. Conspectus of satellite engineering (II) [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2009:78-80.
- [26] 赵健伍, 盛北飞, 吕小虎, 等. 基于信息化手段卫星电缆网设计新模式探索[J]. 军民两用技术与产品, 2014(19):25-27.
- ZHAO Jianwu, SHENG Beifei, LÜ Xiaohu. Cable network design for satellite based on digital information[J]. Dual Use Technologies & Products, 2014(19): 25-27.

System Engineering Approach Based on Axiomatic Design and MBSE Modeling Framework

WANG Haoqi, ZHANG Xu

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

[ABSTRACT] This article is aimed at reaching model-based system engineering (MBSE) and its modeling framework. The fundamental challenge for system engineers when applying MBSE is to analyze the problem in an effective way and represent a complex system with complete models. Aiming at providing an efficient problem analyzing process and modeling framework, this paper proposed an axiomatic design (AD) based systems engineering approach by mapping the design domains, design axioms and “Z” shaped mapping process of axiomatic design to the complex system design processes, modeling and control processes and the information loops respectively. Then a modeling framework supporting MBSE, including requirement model, functional architecture and physical implementation architecture, is constructed. The provided method and modeling framework can instruct system engineers to capture the problem effectively. A case study is included in the paper to demonstrate how the presented approach is applied. Finally, the paper gave conclusion and future works that could enable the MBSE modeling framework to function in a consistent way.

Keywords: MBSE; Axiomatic design; Complex product modeling

(责编 古京)