

基于模型的高端装备创新 研制任务集成管理*

谭跃进 吕欣 葛冰峰 赵翔 豆亚杰 杨志伟

摘要:聚焦高端装备创新研制阶段的用户需求分析、任务分解与资源配置、任务网络分析和系统集成验证等4个环节,运用体系结构框架技术和系统工程“V”模型,开展高端装备制造创新研制任务需求分析与管理、任务分解结构和资源配置管理、任务网络分析与评价、任务集成与验证研究,解决数据驱动的高端装备创新研制用户需求获取与持续管理、用户需求到任务分解结构的转化机制和描述建模、任务资源动态优化配置、网络化建模与评价、数据和模型驱动的任务集成与验证评估等关键科学问题,突破相应的关键技术,建立互联网与大数据环境下高端装备制造创新研制任务集成管理理论方法体系。

关键词:任务需求分析与管理 任务分解与资源配置 任务网络分析与评价 任务集成与验证

DOI:10.19744/j.cnki.11-1235/f.2023.0006

一、引言

以互联网与大数据为代表的新兴信息技术与制造业深度融合,引发了新一轮产业变革,形成了新的生产方式、产业形态、商业模式和经济增长点。高端装备制造过程中出现的网络众包、异地网络化协同设计和制造、个性化需求定制、系统总集成总承包、精准营销等都给高端装备制造任务的需求分析、系统设计、任务分析、资源配置以及集成验证带来了新的挑战,呈现出制造数据多元化、用户需求个性化、研制任务网络化、集成验证系统化等许多新的特征。高端装备制造的核心是装备的设计与研制。设计与研制阶段的工作决定了整个装备70%的资源分配,对全寿命费用和进度的影响高达85%(国际系统工程协会,2015)。因此,聚焦高端装备制造的设计与研制阶段,开展互联网与大数据环境下高端装备制造创新研制任务集成管理研究,是高端装备制造工程管理理论与方法研究的重要组成部分。高端装备制造创新研制任务集成管理是以管理科学为理论基础,从高端装备用户需求和整体目标出发,在技术、费用、进度和风险等约束下,基于互联网与大数据技术,有效组织跨领域、跨行业、跨区域高端装备创新研制任务的需求分析、总体设计、任务分解、资源配置、系统集成和验证评估等研制过程和活动的科学理论与方法。

国际系统工程协会(International Council on Systems Engineering, INCOSE)早在1998年就宣称基于模型的系统工程(Model-Based Systems Engineering, MBSE)是一种全新的系统工程方法论,近些年来在《系统工程2020年愿景》和《系统工程2025年愿景》中面向工业界、学术界发起MBSE倡议,并将其定义为规范化应用建模技术的系统工程方法论,用于支撑系统从概念设计阶段开始并持续贯穿到系统开发及其后续寿命周期阶段的需求、设计、分析、验证、确认等活动(国际系统工程协会,2015)。MBSE极力倡导并推动系统工程从传统基于文档向基于模型的转变和发展,已逐渐成为应对新一轮科技革命和产业革命条件下高端装备研制和全寿命周期管理的顶层方法论和研发新范式(李德林等,2021)。MBSE实施的首要原则是一致性原则,即要确保同一实体数据在不同视图模型、抽象层次上的一致性。体系结构框架(Architecture Framework)提供了一种规范化的定义、参考、指南和规则,从多个视图及不同抽象层次上对复杂系统体系结构加以捕获,将复杂的系统问题划分为便于管理的模块,使得利益相关方对整体有宏观把握的同时,可以关注于特定方面,有效降低复杂性(葛

* 本研究得到国家自然科学基金重大项目“互联网与大数据环境下高端装备制造创新研制任务集成管理”(基金号:71690233)的资助。感谢合肥工业大学杨善林院士、清华大学王建民教授、北京大学侍乐媛教授、同济大学乔非教授提出的宝贵意见。谭跃进为本文的通讯作者。

等,2013)。此外,系统工程“V”模型是用于定义复杂系统生命周期的开始、结束和概念、研发、生产、使用、维修、处置等活动过程阶段的系统工程生命周期模型,强调了对用户需求持续确认和定义需求开发中集成验证计划的必要性以及持续风险和机会评估的重要性,适用于组织高端装备(或复杂产品)的协同设计与制造,以及协调跨多个企业的大型研发项目(谭跃进等,2017)。

因此,本文运用体系结构框架技术和系统工程“V”模型,聚焦高端装备创新研制阶段的用户需求分析、任务分解与资源配置、任务网络分析和系统集成验证等4个环节,开展基于模型的高端装备创新研制任务集成管理研究,如图1所示。具体地,从任务维度开展高端装备创新研制任务需求分析与管理、用户需求到任务分解结构的转化机制和描述建模、任务资源动态优化配置管理、任务网络分析与评价、任务集成与验证等方面的研究,建立互联网与大数据环境下高端装备制造创新研制任务集成管理的理论方法体系,为互联网与大数据环境下高端装备制造任务集成管理提供新的管理理论、方法和技术支撑,对提高高端装备制造任务集成管理的科学化水平,实现跨越式发展具有重要的理论意义和应用价值。

二、高端装备制造创新研制任务需求分析与管理

高端装备创新研制的需求分析与管理主要是利用互联网和大数据,同时结合传统需求调查方法获取的数据(郝建青、张仲义,2001;经有国等,2011),通过数据分析等技术手段发掘高端装备创新研制的需求点,并以便于人和机器理解的形式进行持续管理。需求分析与管理涉及的关键步骤和任务包括互联网数据爬取和存储、需求点挖掘、需求图谱构建与规范化管理等。

(一)高端装备创新研制的需求数据获取与存储方法

随着互联网的迅猛发展,出现了来源广泛、数量巨大、类型众多的需求数据,而且高端装备系统集成度、复杂度和智能化程度不断提升,系统更新迭代速度不断加快,传统的需求获取方法已经难以适用。为满足高端装备系统的潜在需求,多源数据自动采集、无用信息过滤、智能识别和数据自动存储等是需要重点突破的关键技术。针对数据采集工作,采用资源动态调整的分布式爬取技术,为解决数据采集量巨大的问题,使用常态化部署的分布式云爬虫采集的方式,动态调用计算资源,并通过已有知识来引导和优化采集过程,实现数据定时采集、实时监控、API接口多元化导出和多IP并发自动切换避免IP封锁等功能,实现数据采集效能最大化。为

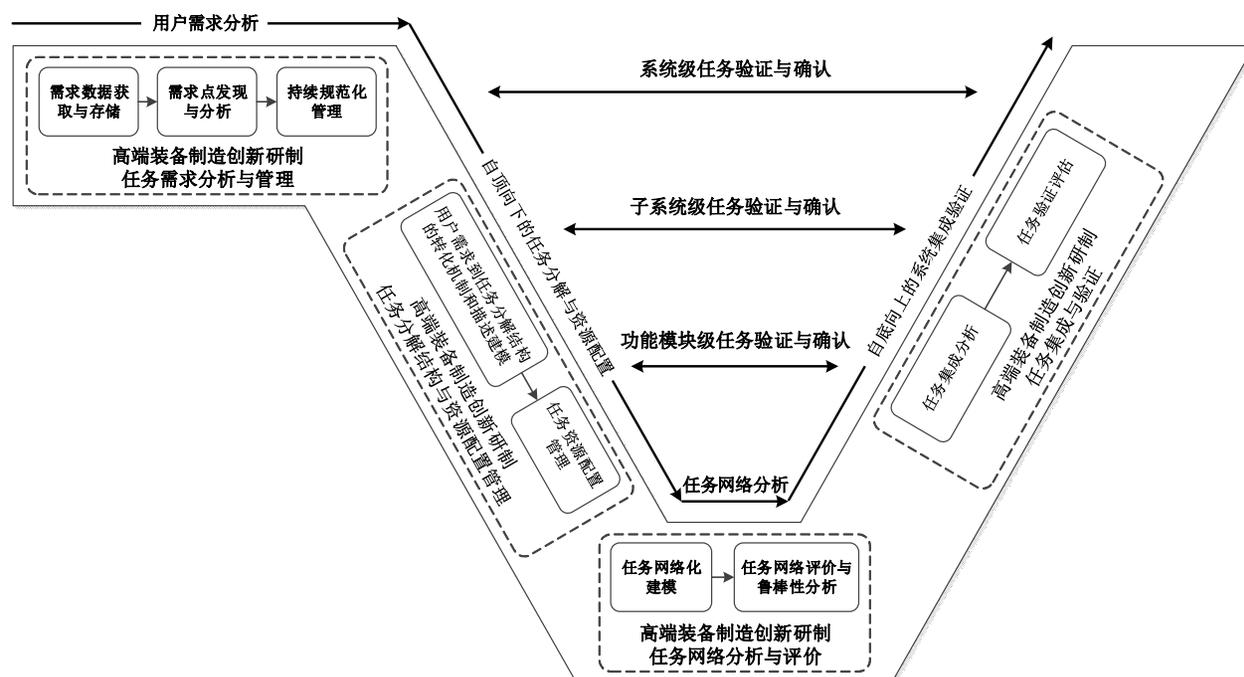


图1 基于模型的高端装备创新研制任务集成管理研究框架

过滤采集信息,利用URL去重、正则表达式配置和基于语义的深度拷贝检测等相关技术,进行数据清洗,利用Bert+CRF的堆叠网络结构并结合一种新的需求领域数据标注策略,对爬取数据中的主题、时间、作者等关键字段信息进行自动识别与提取。为补充完善数据词集,设计与优化需求领域知识引导的数据爬取技术。根据启动时用户定义的领域关键概念,采用“通用语料预训练+专业语料微调”的策略对关键概念进行低维嵌入表示,用于关键词扩充,同时结合爬取过程中获取的新信息,进行在线学习,自动完善关键词集。此外,针对数据存储工作,实现语义级的细粒度数据清洗和入库,充分考虑需求数据在云中存储的安全性问题(薛矛等,2015),安全云存储系统应当是企业需求数据存储所必备的特质,最终将数据保存到“关系型+非关系型”的混合数据管理平台中。

(二)高端装备创新研制的需求点发现与分析

由于高端装备系统研制周期通常较长,在获取需求时往往需要考虑前瞻性问题,防止出现系统研制出来即过时等情况的发生。因此,还需要找出哪些实体是最关键最核心的,判断它们未来的影响力如何,预测系统智能化相关需求。需求的特异性是装备制造开发的重要属性(杨善林、钟金宏,2012),互联网大数据为高端装备制造创新研制的需求发现提供了原始数据支撑。为评估需求点的价值,可采用自监督训练建立需求知识价值评估模型,在此基础上利用网络动力学和深度学习方法进行需求影响力预测,以得到需求发展曲线模型设计和求解需求发展演化的动力学方程。此外,针对需求中异质信息网络,实现高效精准的需求信息检索。针对特定领域信息检索问题,研究如何在领域知识库的指导下,提高基于机器学习的排序等经典信息检索模型在需求分析中的满意度;针对各类特定领域的机器学习问题中标注样本匮乏问题,研究基于知识库的远程监督等弱监督学习方法的基础理论,提升关系抽取、分类和预测等典型监督式学习模型的性能,通常应用随机森林(彭徽等,2018)、特征设计(韩彤晖等,2019)以及神经网络(黄贤英等,2019),研究结合特征向量和卷积神经网络进行科学影响的早期预测和自动提取发现科技智能,该技术可用于辅助新技术驱动的创新研制的需求分析。

(三)高端装备创新研制需求的持续规范化管理

由于大数据价值密度低,从海量数据挖掘的零散需求点或难以利用。为此,可将需求点及其关系利用知识图谱进行建模,形成需求图谱,实现语义级的高效管理。

本部分主要研究构建高端装备系统需求知识图谱,包括从前述采集到的多源数据中进行领域知识抽取,从已有通用知识图谱中提取领域相关内容,以及进行知识融合形成高端装备系统需求知识图谱。知识抽取任务主要是进行实体及其之间关系的抽取,现有方法大多将知识抽取看作一个串联流程,即先进行实体识别再进行关系分类。这种方案存在错误传播和累积等缺陷,实体识别和关系分类是两个紧密相关的步骤,基于统一的表示可提升两个任务联合学习的效果。通用知识图谱的构建通常是基于事先制定的知识库模式进行的,在构建领域知识库时,通用知识库中的相关知识是领域知识的一个有品质保证的重要来源,应当充分利用起来。而直接全盘接收通用知识库的数据,会引入大量领域不相关的信息,影响领域知识利用的效果。此外,领域样本的稀疏特性,一直是困扰各种机器学习模型的难点,易导致模型在领域上的泛化能力不足。所以,从通用知识图谱上提取哪些知识成为一个棘手的问题。知识融合是知识工程中由来已久的问题,领域知识图谱的抽取通常是基于领域的文本进行的,但又不完全属于开放的知识库,更接近于两者之间的一种存在形式。这种领域知识的多来源特性导致了知识库的异构特性,给知识融合带来了困难。此外,抽取的知识通常质量较低,且多数存在不清晰、不完整和不一致等问题,此时利用已有的存量知识对新的知识本身及其信息抽取过程进行评估、校正和完善很有必要。

需求知识获取的过程可细分为3个层次——需求抽取、融合与加工。需求抽取主要是将表达需求的关键部分,如实体、关系和属性等,从原始数据中抽取出来;需求融合是将源自不同数据的需求知识进行合并的过程,可以消除实体和概念的歧义,剔除冗余和错误概念,确保需求知识的质量;需求加工是对现有需求知识的补全和升华的过程。为减少任务之间的错误传播,针对实体和关系的联合抽取,谭等(2019)提出了一种多层

嵌入转换约束机制,可从文本数据中同时抽取多个有关需求“实体—关系”对。在需求融合方面,曾等(2018)考虑了实体之间的全局一致性,将其与实体相似度结合来进行链接与消歧,再利用对实体和文本进行联合表示学习,提升需求知识融合的效果。

进行持续的规范化需求管理是确保装备研制成功的有效途径。然而,需求管理是一个复杂的迭代过程,焦、陈(2006)将需求管理的过程分成3步:需求获取,列出需求清单;需求分析,一般包含需求分类、优先级排序及协商;需求规格说明,即定义具体产品规格。

三、高端装备制造创新研制任务分解结构与资源配置管理

高端装备的创新研制是一项跨领域、跨行业、跨区域、多学科融合的复杂系统工程,创新研制的首要任务是将个性化的用户需求转化为系统设计和研制任务要求。一项大的研制任务通常要按系统、子系统、功能模块逐级分解并落实到各个研制单位和团队,并且高端装备创新研制通常时间紧、任务重、参研单位多、研制风险高、管理难度大。因此,从用户需求到任务分解的转化,以及数据驱动的高端装备创新研制任务资源动态优化配置成为互联网与大数据环境下高端装备创新研制任务管理亟需解决的问题。

(一)高端装备创新研制任务分解结构的建模方法

任务分解结构是指把系统(或任务)按其固有结构和顺序分解,用来控制成本和协调计划进度。任务分解结构就是把一个项目,按一定的原则分解成任务,任务再分解成一项项工作,再把一项项工作分配到每个人的日常活动中,直到分解不下去为止。对高端装备创新研制任务分解结构进行建模实际上就是为高端装备的创新研制构建任务描述模型的过程,是对要建立的系统的抽象。任务分解结构利用形象的框图显示系统各个层次之间的递阶关系,系统管理人员可借助这种方法编制系统设计、建造、运行等各阶段的计划进度的网络图,拟定成本计划,及时交流信息,以便控制成本和协调计划进度。戈尔帕耶加尼、埃玛扎德(2007)采用模块化神经网络对任务分解结构进行建模,重点描述任务分解结构的属性之间的关联关系,将创新研制工作分解为一系列研制子任务,进一步将研制子任务分解为最小单元活动,进而构建创新研制工作的树状结构。利用设计结构矩阵对产品研发项目的任务之间进行聚类分析,将相应所谓研制任务匹配到合适的研发团队(杨青等,2018)。

高端装备创新研制任务是指满足用户需求而进行产品研发实现的途径、过程、工作、活动的集合,具体可表现为在研发过程中需要实现产品的各种需求、约束,达到既定的水平,包括时间需求、功能需求、性能需求等。在实现过程中,需要将这些任务具体、明确,对高端装备的创新研发进行剖析,并将其划分为具有不同关联关系的子系统和若干创新研制子任务。进一步地,可以从功能结构和内聚关联性对这些子任务进行分析(徐等,2021)。首先,任务分解须满足一定的功能结构要求。其次,任务分解必须保证任务所包含活动应具有较强关联性关系,同时任务之间的信息交互较少。在高端装备研制中,考虑到研制任务的紧迫性、任务重、时间逻辑性较强,在对任务分解的同时需要对供应商进行考虑,结合供应商的实际情况进行任务分解,设计出高端装备的并行产品开发模式(张等,2020)。

一项高端装备创新研制任务,通常通过相应的功能来满足用户的需求,这些存在逻辑关系的功能模块组成相应的产品任务结构。在产品设计的初期,通过功能分析能够较为准确地分析任务结构中的功能模块耦合关系,从而根据功能之间的关系,将总任务进行初步的分解。通过对功能分析,将高端装备创新研制任务自顶向下进行初步分解,形成相互之间功能相关性低但本身内聚性高的N个子任务。通过对高端装备的创新研制任务进行功能分析的第一步分解,可以得到高端装备的创新研制任务的初步分解任务集。但大多数情况是不能直接将此时的任务集分配给创新团队研发的,因为此时任务集之间的信息交互性会比较大。为了让子任务更加明确,需要对子任务集进一步分解,充分考虑子任务之间的信息交互程度,计算子任务之间的关联关系。将子任务的属性进行量化,以任务粒度和任务可行性等标准来对高端装备初步分解任务集进行精确分解。

通过对高端装备创新研制任务进行分析及分解,得出任务分解方案的可行性越高越好。因为方案的可行

性越高说明能够满足该任务的供应商数量越多,方案执行阶段可选择的接受对象越多。然而,考虑到任务执行过程中的不确定因素会带来风险等因素的影响,需要该领域的专家对任务分解方案的不确定风险进行评估,该风险值越低越好。因为,高端装备的研制紧迫性、成本高、构成复杂等,需要提前对任务分解方案执行过程中的不确定风险进行评估,基于犹豫模糊集偏好模型可用于解决上述问题(周等,2018)。同时,考虑到任务完成后的集成,每一次集成都是一次迭代,子任务层级关系越复杂、数量越多所需要的迭代次数就越多,其中花费代价,包括时间、人力、成本等各种资源将会越来越多。因此,在对高端装备的分解方案进行遴选时,要考虑任务集成复杂度,高端装备的任务集成复杂度越低越好。考虑上述3种分解方案的属性,对任务的分解方案进行遴选。这3种属性对于分解方案的重要程度也是不一样,需要考虑方案的可行性、不确定风险、任务集成复杂度的重要程度进行多属性决策。除此之外,方案的可行性、任务集成复杂度,以及方案执行过程中的不确定风险这些属性的信息值可能是不同类型的。因此,这是一个混合信息下的多属性高端装备任务分解方案决策问题。

(二)高端装备创新研制用户需求到任务分解结构的转化机制

高端装备的创新研制不同于传统的产品生产过程,具有战略性、高复杂性、高投入、高产出等特点,具体表现为利益主体多元化、信息来源多元化、运营环境动态化、决策过程复杂化、任务关系网络化、数据模型多样化等,其研制需求与研制任务之间存在多对多的依赖关系。互联网与大数据环境下,基于高端装备创新研制用户需求分析的结果,需要建立用户需求到研制任务的转化机制,将用户需求映射到高端装备创新研制任务所包含的核心要素上,实现创新研制需求到研制任务的转化。麦凯等(2001)通过识别产品的功能要求,并将其转换为与设计意图/基本原理相关的物理要素,研究其中的物理产品结构和形状的元素与电子产品规格的元素之间的关联性,将用户的需求转化到产品的功能设计任务。胡克斯、法瑞(2000)提出了一种以客户需求为中心的转化机制,通过智能需求管理与转化,将客户需求转化为产品设计任务。谢清(2007)研究了定制产品的需求到功能映射原理,并基于定制产品功构单元粒度对产品功能结构进行了划分。易树平等(2015)为解决云制造服务平台中制造任务分解与资源配置脱节的问题,提出一种基于聚类算法的任务分解优化方法,通过综合考虑任务间的相关性、任务—资源的匹配性以及资源竞争性,将初步分解后得到的子任务进行重组,实现了任务分解转化机制的优化。

质量屋最早由美国学者豪泽、克劳辛(1988)提出,是实现高端装备创新研制用户需求到任务分解结构转化的关键技术手段,也是将用户需求映射转化为高端装备功能特性的一个具体可行方法,其构造如图2所示。

质量屋的技术流程通过专家经验和层次分析法将用户需求的重要程度进行排序,并将其作为输入进入到质量屋的用户需求矩阵中(李延来等,2009),进行用户需求到高端装备功能结构映射转化的模型计算,最终实现基于重要度排序的高端装备功能结构构建,具体流程如图3所示。

从图3可知,基于质量屋技术的用户需求到高端装备功能特性映射转化方法,是从用户需求开始的。首先,对用户需求进行规范化描述,再将规范化描述后的用户需求进行层次化排序,明确各个需求之间的层次关系;然后结合层次分析法,确定各个

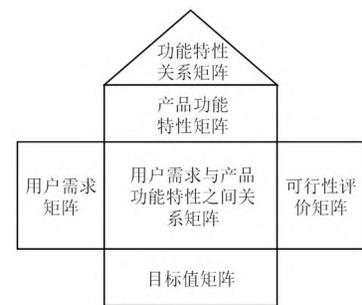


图2 质量屋

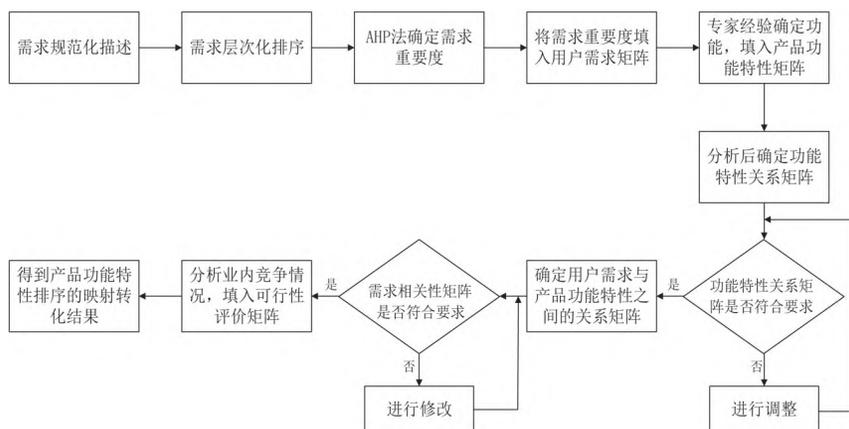


图3 质量屋技术流程

需求的重要度,再将带有重要度排序的用户需求作为输入,填入质量屋的用户需求矩阵中;接着通过专家经验确定高端装备应该具备哪些功能,并将其填入质量屋的产品功能特性矩阵中;随后对高端装备各个功能之间的关系进行分析,将结果填入功能特性关系矩阵中。在这里还要对高端装备各个功能特性之间的关系进行调整和验证,直至其符合设计的相关要求;其次,确定用户需求与高端装备功能特性的关系,将其填入质量屋的用户需求与产品功能特性的关系矩阵中,利用同样的调整和验证方法,对用户需求与产品功能特性的关系矩阵进行分析评价,直至其符合设计的相关要求,再通过市场调研和同类产品竞争情况分析,完成可行性评价矩阵,填入质量屋。最后,通过质量屋的矩阵运算规则,计算出高端装备各个功能特性之间的重要性排序结果,以此来实现高端装备创新研制用户需求向任务分解结构的转化。

(三) 高端装备创新研制任务资源配置管理

资源配置优化是高端装备研制任务优化的主要内容之一,围绕高端装备研制任务资源配置优化问题,许多学者开展了深入研究。勃朗宁和亚辛(2016)分析了资源受限条件下多项目调度中各种优先级规则的表现性能,发现组合项目中资源占用优先规则与网络密度、迭代强度和资源冲突程度等影响因素有关。程永波等(2016)针对“主制造商—供应商”多主体协同模式,分别构建了整体最优资源整合策略模型和个体最优资源整合策略模型,并分别求出两种情形下供应商的最优资源投入量。坎加斯蓬塔和萨洛(2014)以最小分配经费和最高任务完成效率为目标,对资源配置问题进行数学建模,并采用智能进化算法进行优化求解。熊等(2016)考虑活动工期受到多种外部环境因素影响,采用多目标进化算法解决随机资源投入的项目调度问题。张西林等(2019)在基于设计结构矩阵构建高端装备研制任务仿真模型的基础上,考虑资源分配数量对研制工期、成本等参数的影响,基于多目标粒子群算法进行研制任务资源配置优化,并在此基础上,考虑研制任务流程与资源配置的相互影响,构建两阶段算法,进行高端装备研制任务资源配置与流程联合优化,从而有效缩短研制工期、减少研制成本、降低研制风险。

在进一步的研究中,需要研究如何更加有效利用研制任务执行过程中产生的实时动态数据,对研制任务资源配置方案进行动态调整。通过相关研制任务的历史数据和实时动态数据的挖掘发现其变化规律、评估其运行效果,在此基础上提出相应的调整策略和管理机制。

四、高端装备制造创新研制任务网络分析与评价

高端装备的创新研制需要在获取用户需求和实现从用户需求到任务分解的基础之上,把研制任务分解并落实到各个研制单位和团队,构成一个由研制任务和参研机构相互结合而成的多层任务网络。研制任务网络的节点是高端装备制造创新研制工作中的任务、子任务以及参与任务管理和研制的组织机构,高端装备制造创新研制过程中任务、子任务及组织机构相互联系、相互作用构成了研制任务网络的边。在构建多层异质任务网络基础上,运用系统工程、管理科学、复杂网络的理论方法对其进行建模、分析与评价。

(一) 高端装备制造创新研制任务网络化建模方法

高端装备制造创新研制任务参与组织众多,任务繁重,且研制任务各要素之间关系错综复杂,管理者需要及时掌握整个研制过程的各种数据信息,对整个研制任务网络进行有效管控。工业大数据是高端装备制造创新研制项目管理的关键要素,也是目前全球制造业转型面对的一项重要课题。物联网、大数据等信息技术的快速发展和应用,可以从庞大的数据库中找到最符合项目要求的各项指标,提高项目监控和管理效率。例如空中客车、欧洲核子研究中心和伦敦贯城铁路工程等复杂项目的组织更依赖于数字技术管理海量数据集(怀特等,2016),基于物联网的能源节约型生产管理过程可以较大提高公司生产效益。

高端装备制造影响因素众多,层次和组织结构关系复杂。在高端装备制造创新研制项目管理过程中,项目规模增大,任务活动和作用关系急剧增加,传统的键路径、Petri网和层次任务网络等方法模型抽象较为简单,不能应对海量数据的计算压力、无法反映项目参与主体间错综复杂的作用关系(法兰福等,2013)。复杂网络作为对复杂系统结构和作用机制的一种抽象,可以用于描述系统中个体之间的关系以及系统的整体行为,为

高端装备研制工程管理提供了网络化的建模方法。然而,互联网与大数据环境下高端装备创新任务工作量大、参与组织多,研制任务各要素之间关系错综复杂,高端装备创新研制任务之间的关系呈现出多属性、层次性、动态性和网络化等特征,传统简单的单一网络忽略了高端装备研制体系所具有的异质性、层次性等特点,将不同类型节点及边同等对待,没有反映出节点和边的多样性,并且节点的属性也无法进行描述。

异质网络作为一种半结构化的表示模型,能更好区分高端装备创新研制任务各要素及要素之间关系的差异性,可用于描述高端装备创新研制任务过程中难以结构化描述的复杂信息,并能够有效地将各种类型实体的不同属性进行融合分析(李等,2019,2020)。异质网络在数学上表示为一个网络图模型,包含了多种类型的对象或关系,每个对象属于一个特定的对象类型,每条关系属于一个特定的关系类型。此外,高端装备创新研制工作中的任务及参与任务管理和研制的组织机构存在明显的层次化关系,采用基于多层异质网络模型对高端装备创新研制任务网络进行建模,能较好地刻画高端装备创新研制过程中参与组织和研制任务之间的相互作用关系。将高端装备创新研制任务网络建模为不同类型的多层网络,研制任务网络中的节点就是高端装备创新研制工作中的任务、子任务以及参与任务管理和研制的组织机构。不同的研制任务或组织之间相互联系,存在不同类型的相互作用关系,各组织与任务之间相互依存,组织和任务的变更会引起一连串的连锁反应。

(二)高端装备创新研制任务网络评价与鲁棒性分析方法

高端装备创新研制工作技术难度大、参与单位多、任务体量大、不确定性因素多,容易导致部分研制任务实际进展滞后预定计划,进而影响整个高端装备创新研制工作的完成。基于各种研制工作过程数据提取和挖掘任务网络的统计特征和演化规律,对任务网络进行状态监控和鲁棒性分析,从而实现任务网络的科学管理和系统优化。

高端装备创新研制关键任务识别是高端装备创新研制任务网络评价中的重要内容,常用的方法包括基于任务网络统计量的关键节点识别方法(吕等,2016)与基于灵敏度分析的关键节点识别(李等,2021)。基于任务网络统计量的关键节点识别方法主要从网络拓扑结构层面对高端装备创新研制关键任务进行分析,而基于灵敏度分析的关键节点识别方法主要通过分析任务活动的变化对目标函数的影响进而识别关键任务。在研制任务网络中,可用整个研制任务的完成时间作为目标函数,建立任务活动时间变化或组织节点管理能力变化对其所执行的任务节点的活动时间的映射函数,通过计算任务节点变化对目标函数影响的灵敏度,实现高端装备创新研制关键任务的识别分析。

以上高端装备创新研制任务网络评价忽略了高端装备创新研制过程中存在技术、管理、资金、时间等许多不确定性因素。实际上,高端装备创新研制工作带有一定“探索性”与“前瞻性”,“高端”的研制定位与“创新”的研制要求都让创新研制工作表现出更强的不确定性,从而面临更高的风险,尤其在互联网与大数据环境下,用户个性化需求的波动以及海量数据信息的更新,都影响着高端装备创新研制任务的规划与优化过程,多层研制任务网络中可能出现的两种类型的任务延迟情形,即整体延迟和部分延迟。整体延迟用于刻画研制任务网络中可能出现的任务严重延迟情形,此时所有关系层上与其相关的任务均受到影响而延迟。而部分延迟是用于刻画任务出现较程度的延迟情形,只有某一关系层上与其相关的任务受到影响。

在高端装备创新研制过程中,对于研制网络中可能出现任务整体延迟和部分延迟等风险,可基于研制工作过程中的数据对研制任务网络鲁棒性分析,更好地把握整体研制工作进程,实现研制任务的鲁棒性评估,进而针对鲁棒性评估结果,采取有效措施对其进行控制,以降低总体风险,确保各任务节点的顺利完成。通常采用的方法是对研制任务网络中关键节点进行冗余配置来进行鲁棒性优化设计,即对关键节点(组织节点、任务节点)进行应急预案设置,比如一个任务多套实施方案或一个任务多套应急响应机制,当任务网络中部分关键节点出现紧急情况,立即启用应急响应预案,协调组织间的相关任务资源,实现上下级任务节点间信息流动,使任务节点之间继续保持连通,以此提高任务网络的鲁棒性。

创新研制工作中的需求不确定性同样也对高端装备供应链网络中的资源配置和分配带来较大影响。高

端装备销售平台配送和制造商配送两种主要的配送模式都会影响高端装备的销售和利润(孙等,2020a)。通过基于数据驱动的优化技术,对资源配置量、随机需求量,以及需求方服务水平三者之间的量化关系进行刻画,能够从数学层面刻画满足服务水平的最小资源配置量以及最优的资源分配策略(吕等,2019)。此外,通过双渠道选择,高端装备销售商可以通过第三方分销中心保管库存或自管库存来满足其需求。基于风险修正的研制任务供应链网络配送渠道选择模型开创性地考虑了产品属性、退货成本以及决策者风险评估等因素,能够定量分析不同因素对于产品最终利润的影响,依托企业真实交易数据进行鲁棒性测试,该模型被证实可以显著提高总产品收益达35%以上(孙等,2020b)。

五、高端装备制造创新研制任务集成与验证

基于体系结构框架技术和系统工程“V”模型可以为高端装备创新研制任务的分解到集成的演进过程提供工程管理方法和手段。互联网与大数据环境下,高端装备创新研制任务网络涉及到的信息、资源、知识和技术等数据可以被及时地采集、处理、传输和重用,为任务的集成管理提供了新的环境和技术支撑。在研制任务网络分析和评价的基础上,基于一致的、可追溯的形式化模型,形成高端装备创新研制任务集成和验证评估的理论方法,可以为高端装备创新研制从功能模块、子系统到系统的集成验证,以及设计与研制的需求满足度评估等提供科学的理论依据和有效的方法支持。

(一)高端装备创新研制任务集成分析

高端装备创新研制具有任务网络化、信息多元化和模型多样化等特点,常用的集成方法有基于模型的集成方法(刘玉生等,2012)、基于设计结构矩阵的集成方法(勃朗宁,2016;格特纳等,2015)和多功能集成方法(布雷特等,2011)等。在互联网与大数据环境下,高端装备创新研制任务的集成以MBSE方法论为指导,对任务网络中的各个要素,如任务、信息、资源、数据和知识,以及上一层次的系统架构和功能,建立通用的、结构化的模型,这些模型是进行集成验证的基础。整个集成过程从底层任务网络开始,自底向上进行不同层次、不同粒度的聚合。高端装备创新研制任务集成过程如图4所示。

高端装备创新研制任务在集成过程中需要重点解决集成的准则设计、集成时间和范围的确定以及有效的集成方法。

1. 高端装备创新研制任务集成的多准则设计

高端装备创新研制任务的复杂性和需求的多样性及变更频繁等特点,可以采用MBSE方法,对任务网络、系统结构模型和系统功能模型的相关要素进行建模。在基于模型的基础上,可以从多个视角分析系统变更的影响,从而对设计更改的周期和费用进行有效控制。

MBSE方法使得高端装备创新研制任务多层次、多粒度、近实时的集成变得可行,能够及时快速地掌握任务网络的状态变化,进而提高系统设计的准确性。采用MBSE方法的任务集成需要综合考虑集成的成本和效益,提高任务集成的费效比。影响任务集成的成本和效益的因素主要包括任务集成的频率、范围和要素,据此可以建立高端装备创新研制任务集成的多准则优化模型,根据效用理论确定集成方案的效用函数,从而进行多准则决策。

2. 基于网络聚类的高端装备创新研制任务聚合

高端装备创新研制任务网络具有复杂网络的特征。因此,高端装备创新研制任务网络具有一定的网络簇结构。通

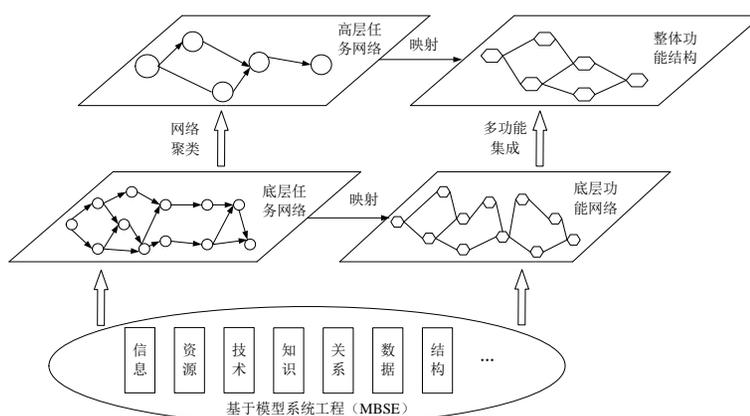


图4 高端装备创新研制任务集成过程

通过网络聚类方法可以分析高端装备创新研制任务网络中的网络簇结构,确定同簇节点和异簇节点,从而对任务网络进行聚类和集成,确定任务网络集成的范围。基于网络聚类方法,可以分析高端装备创新研制任务网络的结构和特征,通过挖掘任务网络中的演化规律从而预测任务网络的演化行为。采用基于种群的进化算法对高端装备创新研制任务网络进行聚类,为了提高算法的性能,在种群初始化阶段采用启发式方法生产种群中的个体。针对高端装备创新研制任务网络的特点,设计种群个体的染色体表示方法和进化操作,通过适应度函数评价,选择出较好的个体组成下一代种群,针对新的种群,设计局部搜索算法,以提高解的质量。

3. 数据驱动的高端装备创新研制任务集成动态决策

在确定任务集成的范围后,需要确定任务集成的时间。在互联网与大数据环境下,可以根据任务网络的数据,包括实时监控数据和预测数据,对高端装备创新研制任务集成过程进行动态决策。在高端装备创新研制任务集成动态决策过程中,通过任务聚合可以确定任务集成过程中每次集成的范围,基于任务网络的实时数据,可以对任务集成的时间进行决策。采用固定响应阈值模型进行研究,对蚁群任务分工行为模拟提出动态任务分配,蚁群中每只蚂蚁对任务的响应可以通过一个固定的响应阈值来表示,行为响应的实际差别可以通过蚂蚁个体之间响应阈值的水平来反映。不同任务对应的刺激强度不同,刺激强度与任务网络相关数据具有关联关系,当某项任务的刺激强度超过某个蚂蚁的响应阈值时,该项任务就被执行。

4. 高端装备创新研制任务多功能集成方法

高端装备创新研制任务网络中每一个节点(即子任务)向上追溯可以对应于高端装备的一个子功能,通过任务网络的反向映射,可以得到高端装备研制的功能网络,涉及到多个不同学科的功能模块,需要通过底层功能模块集成形成高端装备研制的整体功能模块。采用多功能集成方法对高端装备的功能模块进行集成,多功能集成方法主要分为两个方面:横向集成和纵向集成。横向集成是指不同阶段对应的功能集成;纵向集成是指自底向上的不同粒度的功能模块的集成。通过建立高端装备多功能集成的多目标优化与决策模型,设计有效的多功能集成算法和多目标决策模型,将高端装备创新研制的各个阶段紧密联系起来,从而降低研制过程的决策风险。

(二) 高端装备创新研制任务验证评估

在高端装备创新研制过程中,验证与评估活动必不可少。昂戈和卡拉塔斯(2016)通过构建模拟模型对活动任务进行可执行仿真验证。陈等(2019)提出了一种设计阶段的模型验证方法。高端装备创新研制任务验证评估具有验证过程复杂、评估指标多样化、评估结果不确定性高的特点。结合高端装备创新研制任务集成过程中的特点,运用模型驱动的系统工程方法,通过资源冲突检测、需求满足度分析、逻辑一致性分析对集成后的任务进行评估,并建立通用的、结构化的模型,整合集成模型构建过程中的各个要素得出验证评估结果,之后反馈到上游流程,对任务完成结果进行改进。验证评估的整体过程分为任务一致性验证和需求满足度验证评估。

1. 高端装备创新研制任务的一致性验证

互联网与大数据环境下的高端装备创新研制任务的一致性验证可以结合任务网络运行的大量实际数据,辅助分析和验证高端装备创新研制任务体系架构的逻辑(时序关系)合理性、行为(功能和过程)正确性,以及是否满足预期的用户需求,进而预测在不同环境条件下的可能行为和可能达到的任务状态,并进行校验与验证。

对高端装备创新研制任务的一致性验证分为静态验证和动态验证。静态验证主要从组成的各个系统出发,通过描述系统之间的各组成要素及其之间的关系来构建静态模型,验证需求与数据的一致性和完备性,以及检验视图产品中定义的核心数据在种类、数量和逻辑上是否满足设计的要求。动态验证需要构建可执行模型,通过抽取核心数据模型中系统、组织、活动等有关实体的属性、参数、约束数据,得到可执行模型的基本结构,并将仿真集成到可执行中以支持行为、性能和有效性的动态分析。通过动态验证可以发现模型中的错误、缺陷或者变化,及时反馈到设计与集成中,达到验证优化的目的。

2. 高端装备创新研制任务的需求满足度评估

高端装备创新研制任务具有评价指标多样性、输入评估信息不确定性等特点,其需求满足度评估是任务集成与验证之后需要回答的关键问题。需求满足度主要包括高端装备创新研制任务的完成水平和任务集成之后的具体状况;任务集成后是否能够达到事先预定的系统功能;增加、修改或删除某些任务后对整个体系的创新研制任务有何影响。

根据高端装备创新研制任务的特点,可以依托互联网和装备研制的历史案例和数据,通过对大量案例和数据的融合分析,建立评价指标体系,因此采用解析法进行需求满足度评估。首先需要建立指标体系,其次建立底层指标评价,然后建立指标聚合,最后获取顶层评估数值。根据指标体系应该具备的完备性、独立性、可测性等特点,从指标赋权和综合这两个角度对指标进行综合分析,最后得出有效的评估结果。

六、总结与展望

本文聚焦高端装备创新研制阶段的用户需求分析、任务分解与资源配置、任务网络分析和系统集成验证等4个环节,运用体系结构框架技术和系统工程“V”模型,研究了互联网与大数据环境下基于模型的高端装备创新研制任务集成管理。首先,开展高端装备制造创新研制任务需求分析与管理研究,基于需求大数据平台获取的数据,采用自然语言分析等数据分析手段发掘高端装备创新研制的需求点,形成结构化的需求知识图谱,便于人和机器理解与运用,实现了创新研制需求的持续规范化管理;基于评测数据的实验表明,上述方法具备良好的可行性,所提技术方案能够辅助企业从低价值的互联网与大数据环境中提炼有价值的信息,进而更好地服务和满足用户的需求。其次,开展高端装备制造创新研制任务分解结构与资源配置管理研究,基于任务分解方案的可行性、任务研发不确定风险以及任务集成复杂度对高端装备创新研制任务分解结构进行建模,形成一套完整的高端装备创新研制用户需求到任务分解结构转化机制,实现了高端装备创新研制用户需求向任务分解结构的有效转化;基于数据驱动的智能优化算法对高端装备创新研制任务资源动态优化配置进行研究,结合用户需求、研制任务以及资源动态变化情况进行配置优化,实现了高端装备由研制需求—任务—资源配置方案的一体化管理设计,更好地服务于高端装备用户需求落地于生产研制的项目实践活动。然后,开展高端装备制造创新研制任务网络分析与评价研究,在高端装备创新研制任务网络化建模基础上,针对研制任务供应链网络配送渠道管理,依托真实交易数据和物流管理数据,构建基于风险修正的研制任务供应链网络配送渠道选择模型,并定量地分析了不同因素对于产品最终利润的影响,有效提升了资源配置效率。最后,开展高端装备制造创新研制任务集成与验证研究,基于一致的、可追溯的形式化模型,运用MBSE方法分析高端装备创新研制任务集成的准则、时间和范围以及有效的集成方法,再结合任务集成过程中的特点,采用可执行验证方法对集成后的任务进行一致性验证,并分析研制任务需求满足度的评估方法,为高端装备创新研制从功能模块、子系统到系统的集成、验证和评估等提供科学的理论依据和有效的方法支持。

近年来,基于模型的高端装备创新研制任务集成管理在众多高端装备制造领域得到了广泛应用,包括航空发动机控制系统设计与开发、直升机航电系统设计与测试、民用飞机研制与高效过程管理、核动力装置智能化设计等,已成为高端装备研制和全寿命周期管理的顶层方法论和研发新范式。随着以智能传感技术、移动嵌入式系统、工业大数据分析等新兴技术为代表的工业互联网,以及人工智能技术等的发展和与高端装备制造行业的加速创新融合,进一步为用户需求获取与分析提供了新的手段,使得高端装备制造商能广泛采集大量用户信息,更全面、实时的得到产品反馈。结合社交媒体监控、文本分析和情感分析等方法,互联网大数据已逐步应用于高端装备创新研制的产品缺陷检测与更新换代等研发决策支撑,并基于数据构建贯穿从产品定制、配送、储存、销售到售后服务等各个环节的高端装备创新研制任务网络,引导进一步设计出更贴近需求的以用户为中心的产品。此外,大批高端装备制造行业已迅速开展产品研制、生产、管理流程与数字孪生技术、大数据及人工智能技术等结合,有效优化设计、制造和管理效率,解决生产过程中存在的产品的质量不稳定、产品一致性差、生产周期长、成本高等一系列问题。因此,结合我国国情和发展需求,系统深入研究并形

成互联网与大数据环境下高端装备创新研制任务集成和验证评估的理论方法,具有重要的理论意义和应用价值。未来可密切结合互联网+、物联网、智能工厂、人工智能等新兴技术,开展高端装备创新研制的应用与验证工作,典型应用包括航发涡轮工艺设计、智能制造、质量管理与生产集成、装备过程调试的智能识别、数控机床智能监控及智能装备故障诊断等^①。

(作者单位:国防科技大学系统工程学院)

注释

①中外文人名(机构名)对照:国际系统工程协会(INCOSE);布雷特(Brettel);勃朗宁(Browning);亚辛(Yassine);陈(Chen);法兰克福(Farughi);格特纳(Gaertner);葛(Ge);戈尔帕耶加尼(Golpayegani);埃玛扎德(Emamizadeh);豪泽(Hauser);克劳辛(Clausing);胡克斯(Hooks);法瑞(Farry);焦(Jiao);陈(Chen);坎加斯蓬塔(Kangaspunta);萨洛(Salo);李(Li);吕(Lü);吕(Lyu);麦凯(Mckay);昂戈(Onggo);卡拉塔斯(Karatas);孙(Sun);谭(Tan);怀特(Whyte);熊(Xiong);徐(Xu);曾(Zeng);张(Zhang);周(Zhou)。

参考文献

- (1)程永波、宋露露、陈洪转:《复杂产品多主体协同创新最优资源整合策略》,《系统工程理论与实践》,2016年第11期。
- (2)韩彤晖、杨东强、马宏伟:《一种利用情感词统计信息构造文本特征表示的方法》,《计算机应用研究》,2019年第7期。
- (3)郝建青、张仲义:《实时信息系统需求分析的动态建模方法》,《管理工程学报》,2001年第1期。
- (4)黄贤英、刘广峰、刘小洋、阳安志:《基于word2vec和双向LSTM的情感分类深度模型》,《计算机应用研究》,2019年第12期。
- (5)经有国、但斌、张旭梅、郭钢:《MC半结构化客户需求信息表达与处理方法》,《管理科学学报》,2011年第1期。
- (6)李德林、毕文豪、张安、范秋岑:《基于MBSE的民机研制过程管理》,《系统工程与电子技术》,2021年第8期。
- (7)李延来、唐加福、姚建明、徐捷:《质量屋构建的研究进展》,《机械工程学报》,2009年第3期。
- (8)刘玉生、袁文强、樊红日、曹悦:《基于SysML的模型驱动复杂产品设计的信息集成框架研究》,《中国机械工程》,2012年第12期。
- (9)彭徽、王灵娇、郭华:《基于随机森林的文本分类并行化》,《计算机科学》,2018年第12期。
- (10)谭跃进、陈英武、罗鹏程、程志君:《系统工程原理(第二版)》,科学出版社,2017年。
- (11)谢清:《定制产品功能—结构映射原理、方法及关键技术研究》,浙江大学博士学位论文,2007年。
- (12)薛矛、薛巍、舒继武、刘洋:《一种云存储环境下的安全存储系统》,《计算机学报》,2015年第5期。
- (13)杨青、郑璐、索尼亚:《研发项目中“团队—产品—功能”多领域集成与组织聚类研究》,《系统工程理论与实践》,2018年第6期。
- (14)杨善林、钟金宏:《复杂产品开发工程管理的动态决策理论与方法》,《中国工程科学》,2012年第12期。
- (15)易树平、谭明智、郭宗林:《云制造服务平台中的制造任务分解模式优化》,《计算机集成制造系统》,2015年第8期。
- (16)张西林、谭跃进、杨志伟:《多重不确定因素影响下的高端装备研制任务流程优化》,《系统工程理论与实践》,2019年第3期。
- (17) Brettel, M., Heinemann, F., Engelen, A. and Neubauer, S., 2011, “Cross-Functional Integration of R&D, Marketing, and Manufacturing in Radical and Incremental Product Innovations and Its Effects on Project Effectiveness and Efficiency”, *Journal of Product Innovation Management*, 28(2), pp.251~269.
- (18) Browning, T. R., 2016, “Design Structure Matrix Extensions and Innovations: A Survey and New Opportunities”, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 63(1), pp.27~52.
- (19) Browning, T. R. and Yassine, A. A., 2016, “Managing a Portfolio of Product Development Projects under Resource Constraints”, *Decision Sciences*, 47(2), pp.333~372.
- (20) Chen, R., Liu, Y., Zhao, J. and Ye, X., 2019, “Model Verification for System Design of Complex Mechatronic Products”, *Systems Engineering*, 22(2), pp.156~171.
- (21) Farughi, H., Yegane, B. Y. and Fathian, M., 2013, “A New Critical Path Method and a Memetic Algorithm for Flexible Job Shop Scheduling with Overlapping Operations”, *Simulation*, 89(3), pp.264~277.
- (22) Gaertner, T., Terstegen, S. and Schlick, C. M., 2015, “Applying DSM Methodology to Improve the Scheduling of Calibration Tasks in Functional Integration Projects in the Automotive Industry”, *The Journal of Modern Project Management*, 3(2), pp.46~55.
- (23) Ge, B., Hipel, K. W., Yang, K. and Chen, Y., 2013, “A Data-centric Capability-focused Approach for System-of-systems Architecture Modeling and Analysis”, *Systems Engineering*, 16(3), pp.363~377.
- (24) Golpayegani, S. A. H., Emamizadeh, B., 2007, “Designing Work Breakdown Structures Using Modular Neural Networks”, *Decision Support Systems*, 44(1), pp.202~222.
- (25) Hauser, J. R. and Clausing, D., 1988, “The House of Quality”, *Harvard Business Review*, 66(3), pp.63~73.
- (26) Hooks, I. F. and Farry, K. A., 2000, *Customer-Centered Products—Creating Successful Products Through Smart Requirements Management*, New York: Amacon.
- (27) International Council on Systems Engineering (INCOSE), 2015, *Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Process and Activities*, 4th ed., Hoboken: Wiley.
- (28) Jiao, J. and Chen, C. H., 2006, “Customer Requirement Management in Product Development: A Review of Research Issues”, *Concurrent Engineering*, 14(3), pp.173~185.
- (29) Kangaspunta, J. and Salo, A., 2014, “Expert Judgments in the Cost-effectiveness Analysis of Resource Allocations: A Case Study in Military Planning”, *OR Spectrum*, 36(1), pp.161~185.

- (30) Li, J., Jiang, J., Yang, K. and Chen, Y., 2019, "Research on Functional Robustness of Heterogeneous Combat Networks", *IEEE Systems Journal*, 13(2), pp.1487~1495.
- (31) Li, J., Zhao, D., Ge, B., Jiang, J. and Yang, K., 2020, "Disintegration of Operational Capability of Heterogeneous Combat Networks under Incomplete Information", *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics: Systems*, 50(12), pp.5172~5179.
- (32) Li, J., Zhao, D., Jiang, J., Yang, K. and Chen, Y., 2021, "Capability Oriented Equipment Contribution Analysis in Temporal Combat Networks", *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics: Systems*, 51(2), pp.696~704.
- (33) Lü, L., Chen, D., Ren, X. L., Zhang, Q. M., Zhang, Y. C. and Zhou, T., 2016, "Vital Nodes Identification in Complex Networks", *Physics Reports*, 650, pp.1~63.
- (34) Lyu, G., Cheung, W. C., Chou, M. C., Teo, C. P., Zheng, Z. and Zhong, Y., 2019, "Capacity Allocation in Flexible Production Networks: Theory and Applications", *Management Science*, 65(11), pp.5091~5109.
- (35) McKay, A., Pennington, A. D. and Baxter, J., 2001, "Requirements Management: A Representation Scheme for Product Specifications", *Computer-Aided Design*, 33(7), pp.511~520.
- (36) Onggo, B. S. and Karatas, M., 2016, "Test-driven Simulation Modelling: A Case Study Using Agent-based Maritime Search-operation Simulation", *European Journal of Operational Research*, 254(2), pp.517~531.
- (37) Sun, L., Lyu, G., Yu, Y. and Teo, C. P., 2020a, "Cross-Border E-commerce Data Set: Choosing the Right Fulfillment Option", *Manufacturing & Service Operations Management*, Articles in Advance, pp.1~17.
- (38) Sun, L., Lyu, G., Yu, Y. and Teo, C. P., 2020b, "Fulfillment by Amazon Versus Fulfillment by Seller: An Interpretable Risk-adjusted Fulfillment Model", *Naval Research Logistics*, 67(8), pp.627~645.
- (39) Tan, Z., Zhao, X., Wang, W. and Xiao, W., 2019, "Jointly Extracting Multiple Triplets with Multilayer Translation Constraints", *Proceedings of 33rd AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 33(1), pp.7080~7087.
- (40) Whyte, J., Stasis, A. and Lindkvist, C., 2016, "Managing Change in the Delivery of Complex Projects: Configuration Management, Asset Information and 'Big Data'", *International Journal of Project Management*, 34(2), pp.339~351.
- (41) Xiong, J., Leus, R., Yang, Z. and Abbass, H. A., 2016, "Evolutionary Multi-objective Resource Allocation and Scheduling in the Chinese Navigation Satellite System Project", *European Journal of Operational Research*, 251(2), pp.662~675.
- (42) Xu, X., Yang, K., Dou, Y., Zhou, Z., Chen, Z. and Tan, Y., 2021, "High-end Equipment Development Task Decomposition and Scheme Selection Method", *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 32(1), pp.118~135.
- (43) Zeng, W., Zhao, X., Tang, J. and Shang, H., 2018, "Collective List-only Entity Linking: A Graph-based Approach", *IEEE Access*, 6, pp.16035~16045.
- (44) Zhang, X., Tan, Y. and Yang, Z., 2020, "Joint Optimization of the High-end Equipment Development Task Process and Resource Allocation", *Natural Computing*, 19(4), pp.811~823.
- (45) Zhou, Z., Dou, Y., Liao, T. and Tan, Y., 2018, "A Preference Model for Supplier Selection Based on Hesitant Fuzzy Sets", *Sustainability*, 10(3), No. 659.

Model-based Task Integration Management on the Innovative Development of High-end Equipment Manufacturing

Tan Yuejin, Lu Xin, Ge Bingfeng, Zhao Xiang, Dou Yajie and Yang Zhiwei
(College of Systems Engineering, National University of Defense Technology)

Abstract: Focusing on the four aspects of user needs analysis, task decomposition and resource allocation, task network analysis, and systems integration and verification, this paper utilizes the Architecture Framework and Systems Engineering V-Model to carry out the following studies on the innovative development process of high-end equipment manufacturing: task requirement analysis and management, task decomposition and resource allocation, task network analysis and evaluation, and task integration and verification. It strives to address several key scientific questions and to make breakthrough in related key technologies, including the data-driven user needs acquisition and continuous management, transformation mechanism and descriptive modeling from user needs to task decomposition structure, dynamic optimization in task resource allocation, network modeling and evaluation, data-driven and model-driven task integration, validation and assessment, and thus to establish the theory and methodology for task integration management on the innovative development of high-end equipment manufacturing in the Internet and big data era.

Keywords: task requirement analysis and management; task decomposition and resource allocation; task network analysis and evaluation; task integration and verification

Model-based Task Integration Management on the Innovative Development of High-end Equipment Manufacturing

Tan Yuejin, Lu Xin, Ge Bingfeng, Zhao Xiang, Dou Yajie and Yang Zhiwei
(College of Systems Engineering, National University of Defense Technology)

Summary: Equipment design and development is the core part of high-end equipment manufacturing, which determines 70% of the resource allocation of the whole equipment, and its impact on the life-cycle cost and schedule is up to 85%. Focusing on the innovative development process of high-end equipment manufacturing, this paper conducts research on the integrated management of high-end equipment manufacturing innovation and development tasks in the Internet and big data environment, providing theoretical and methodological support for the high-end equipment development process and activities such as task requirement analysis, overall design, task decomposition, resource allocation, comprehensive integration, verification and evaluation.

This paper utilizes the Architecture Framework and Systems Engineering V-Model to carry out the following studies on the innovative development process of high-end equipment manufacturing: task requirement analysis, task decomposition and resource allocation, task network analysis, and task integration and verification. Firstly, based on the Internet big data, natural language processing methods are used to mine the requirement points for the innovative development of high-end equipment, after which a structured requirement knowledge graph is formed. Secondly, the task decomposition structure of high-end equipment innovation development is modeled based on the feasibility of task decomposition scheme, the uncertain risk of task development, and the complexity of task integration. The personalized user requirements are transformed into system design and development task requirements, and the high-end equipment innovation and development task resources are dynamically optimized based on the data-driven intelligent optimization algorithms. This realizes the integrated management design of high-end equipment from development requirements to development tasks and to resource allocation schemes. Thirdly, this paper builds the task network of high-end equipment innovation and development, the key tasks are identified by the complex network theory and methods, and the robustness of the task network is evaluated and optimized. Finally, based on the consistent and traceable formal models, the Model-based Systems Engineering (MBSE) method is used to analyze the criteria, time, scope and effective integration methods of high-end equipment innovation and development task integration, then the consistency verification and demand satisfaction evaluation of high-end equipment innovation and development task integration are carried out. Results show that the Internet big data-driven user requirement analysis methods can help enterprises extract valuable information from the low-value Internet big data, which has good feasibility and can better serve the project practice activities of high-end equipment requirements in production and development. Using the real transaction data and logistics management data, the development task supply chain network distribution channel selection model based on risk correction has effectively improved the efficiency of resource allocation.

This paper establishes the theory and methodology for task integration management on the innovative development of high-end equipment manufacturing in the Internet and big data era, which can provide scientific theoretical basis and effective method support for the innovative development of high-end equipment from functional modules, subsystems to system integration, verification and evaluation.

Keywords: task requirement analysis and management; task decomposition and resource allocation; task network analysis and evaluation; task integration and verification

Jel Classification: l60, l64, n60, o14