

产品与供应链协同演进系统变更设计研究进展

李庆奎¹, 曹恩智², 彭 晨^{2†}

(1. 北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100192; 2. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444)

摘要: 产品与供应链协同演进系统是智能制造领域极为关心的一类复杂系统, 变更设计又是降本增效、抵御意外风险、提高产品质量和用户满意度的重要手段. 本文综述近年来产品与供应链协同演进系统变更设计研究所取得的最新进展. 首先阐明产品与供应链协同演进系统变更设计的基本概念, 剖析产品与供应链协同演进系统的本质, 介绍变更设计的内涵、起因、过程及内容. 其次, 重点概括产品与供应链协同设计和变更效应传播两大范畴, 主要归纳协同设计与变更效应传播分析、预测及控制等研究现状. 最后, 根据产品与供应链协同演进系统的复杂特性, 指出该系统变更设计研究的开放问题, 展望该研究的发展趋势.

关键词: 变更设计; 产品与供应链; 同步演化; 协同设计; 变更传播

引用格式: 李庆奎, 曹恩智, 彭晨. 产品与供应链协同演进系统变更设计研究进展. 控制理论与应用, 2023, 40(2): 331 – 342

DOI: 10.7641/CTA.2022.20091

Advances in the study of the change design for the synchronous evolution systems of production and supply chains

LI Qing-kui¹, CAO En-zhi², PENG Chen^{2†}

(1. School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;

2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The synchronous evolution systems of production and supply chains are important systems in the intelligent manufacturing field, and change design is an important way to gain the satisfactory results for such systems which include the reduced costs and increased efficiency, protecting against unexpected risks, and improved product quality and customers' demands. This paper reviews recent works on the study of the synchronous evolution systems of production and supply chains, and the main contents include the following aspects. First, basic concepts of the change design for the production and supply chain synchronous evolution systems are presented, of which essence is analyzed. Moreover, the meanings, causes, processes, and contents of the change design are described. Then, focusing on the two areas of product-supply chain co-design and change propagations, the study on the co-design, as well as, analysis, prediction, and control for change propagation effects is reviewed. Finally, based on the complex features of the production and supply chain synchronous evolution systems, this paper lists some interesting open problems regarded with the change design for the synchronous evolution systems of production and supply chains, and points out the study trends for such systems.

Key words: change design; product and supply chain; synchronous evolution; co-design; change propagation

Citation: LI Qingkui, CAO Enzhi, PENG Chen. Advances in the study of the change design for the synchronous evolution systems of production and supply chains. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(2): 331 – 342

1 引言

1.1 背景与意义

近年来, 随着信息和网络技术的飞速发展, 基于信息技术、网络技术的协同智能制造已成为现代制造业的重要发展趋势. 这种新型制造模式, 通过计划、采

购、设计、制造与交付等供应链协同, 将传统的串行工作变为并行工作, 从而实现资源的最佳配置与充分利用, 促进企业价值链的提升. 作为协同制造的核心, 供应链在促进降本增效、供需匹配和产业升级中的作用显著增强, 已成为供给侧结构性改革的重要支撑. 世界

收稿日期: 2022-01-31; 录用日期: 2022-12-02.

[†]通信作者. E-mail: c.peng@shu.edu.cn; Tel.: +86 21-66136619.

本文责任编辑: 龙离军.

国家重点研发计划项目(2020YFB1708200)资助.

Supported by the National Key Research and Development Program of China (2020YFB1708200).

各国纷纷将匹配智能制造的供应链创新应用作为提升国力的重要手段。如,2012年美国发布了《全球供应链国家安全战略》,把供应链建设上升到国家战略的高度。2017年,国务院办公厅发布“供应链创新与应用的指导意见”^[1],将供应链建设上升到增强我国经济全球竞争力的战略地位。然而,由于内外环境的不确定,如贸易战造成供应链断裂,新冠肺炎导致全球供应链阻塞,《Nature》和《Science》已发表相关研究表明,全球供应链的崩溃和瘫痪已对低碳经济造成了冲击^[2-3],这将不可避免地导致产品生产设计的大规模变更。另一方面,新技术的应用、用户需求的改变、以及降本增效的需要,产品设计变更仍势在必行,供应链的变更同样不可避免。因此,在企业需求牵引的大力推动及国家政策的强力支持下,产品设计与供应链协同演进系统的变更设计问题引起学术界与工程技术界的广泛关注已成为当前研究热点。

现有关于变更设计的综述性研究^[4-8]通常单一地从产品端的设计变更及其变更效应传播入手,对产品与供应链协同变更问题关注不足。为此,本文将聚焦产品与供应链协同关系,力图综述产品与供应链协同演进系统变更设计的基本概念、分析产品与供应链协同设计、变更效应传播评估以及控制等研究现状,最后基于复杂系统特性,从协同设计与变更效应传播两大范畴出发,展望产品与供应链协同演进系统变更设计研究的发展趋势。

表1 文献数据来源和统计标准

Table 1 Data sources and statistical standards

来源和标准	中文文献	英文文献
数据库	中国知网(CNKI): SCI、EI来源、北大核心	Web of Science (SCI)
搜索方式	专业检索: 主题词设置为“工程变更”或“产品设计变更”或“产品与供应链设计”或“变更传播”或“供应链效应控制”	文献检索: 主题词设置为“engineering change” or “design change” or “product supply chain design” or “change propagation” or “propagation effect”
时间范围		1997-2022
当前检索时间		2022-05-25

1.3 本文的逻辑结构与主要内容

本文的逻辑结构与主要内容如图1所示。

2 产品与供应链协同演进系统变更设计的基本概念

产品与供应链变更设计并非全新概念,研究者们已对这两方面做出了一些框架性研究^[9-12]。本节整合产品与供应链协同及变更设计,从系统、内涵、起因、过程及内容等方面,对产品与供应链协同演进系统变更设计的基本概念进行界定和梳理。

2.1 产品与供应链协同演进系统

在产品设计和供应链演化进程中,二者间的交互

1.2 文献数据来源与统计标准

对产品与供应链协同演进系统变更设计研究综述主要集中于协同设计与变更效应传播范畴,下面首先说明这部分的文献数据来源与统计标准。

1.2.1 数据来源

数据来源遵循时间最早原则和质量保障原则。鉴于最早检索到研究产品与供应链协同设计及变更效应传播的文献源于1997年,为能够体现产品与供应链协同系统变更设计领域的研究进程,数据检索时间设定在1997-2022年。另外,为了保障文献的质量,择取的是学界和工业界公认的能反映变更设计领域进展的典型代表研究。

1.2.2 统计标准

统计标准分为中文文献统计标准和英文文献统计标准。中文文献的检索标准数据库为中国知网(CNKI),检索主题词为:“工程变更”或“产品设计变更”或“产品与供应链设计”或“变更传播”或“供应链效应控制”。英文文献的检索标准数据库为Web of science(SCI),检索主题词为:“engineering change” or “design change” or “product-supply chain design” or “change propagation” or “supply chain effect change”。文献数据来源和统计标准的直观呈现,如表1所示。

是真实存在的且不可忽略的。国外学者Fisher^[13]早在1997年通过实证研究发现产品与供应链不匹配会降低供应链的绩效,并将产品分为功能型产品和创新型产品,与此匹配的供应链为效率型供应链和响应型供应链。国内学者林勇和马士华^[14]在1998年也指明设计出与产品特性一致的供应链是必要的。产品与供应链之间协同关系的重要性不言而喻。

从系统层面,产品与供应链协同演进系统本质上是网络化动态系统,如图2所示。一方面为满足不断变化的客户需求,产品设计工程师需要对产品零部件特别是核心部件的功能和技术做出动态调整;另一方面供应商、制造商和分销商等要在战略、资源、任务和

能力等方面相互依存, 构成复杂的供应-生产-销售网络流^[15-16](信息流、资金流和物流), 供应链管理需要做出相应的流管理. 该系统的网络演化特性或功能不仅取决于网络上的动力学特性, 还取决于拓扑结构间的关系及权重变化. 由此, 变更设计不可避免且具有重要现实意义, 下面介绍变更设计的相关概念.

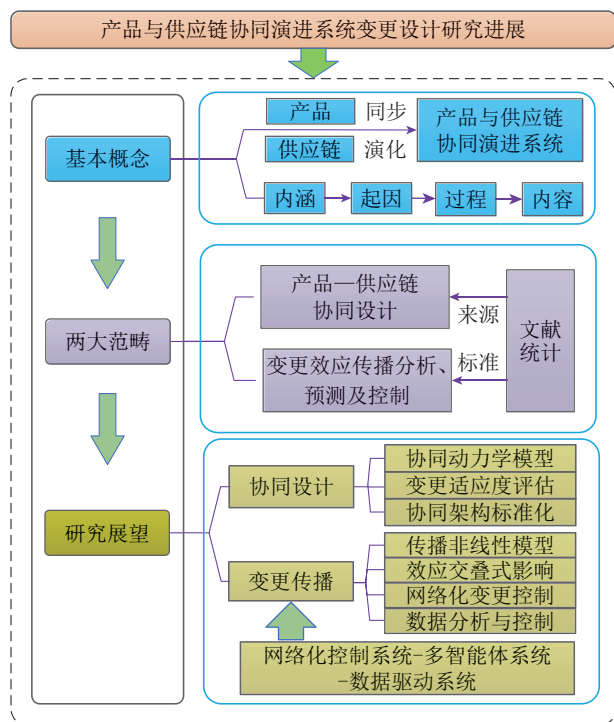


图1 本文逻辑结构与主要内容

Fig. 1 Logical structures and main contents of this review

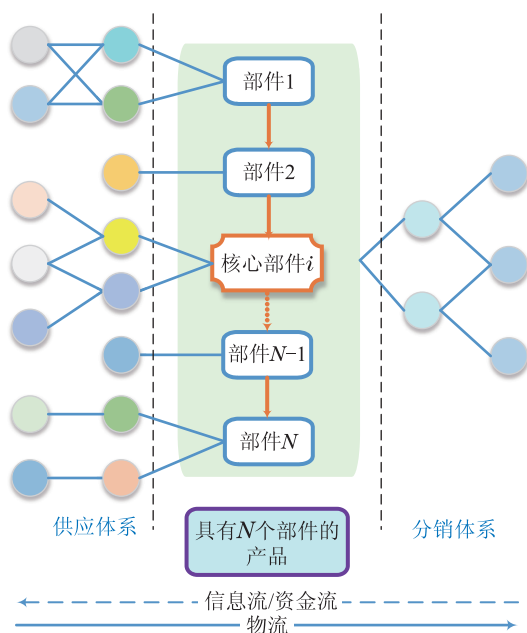


图2 产品与供应链协同演进系统结构图

Fig. 2 Diagram of a synchronous evolution system of production and supply chain

2.2 变更设计内涵

产品与供应链协同演进系统变更设计兼顾产品设

计改变与供应链协同两方面的内涵, 本文从产品设计

与供应链应急重构等方面来界定变更设计的内涵. 早在1997年, Wright^[4]首先综述了“工程变更”相关研究, 并对工程变更定义为, 进入生产阶段的产品开发, 产生经常性对其零部件修改的行为, 由于产品开发的各阶段均可能发生工程变更, 除机械产品的开发存在设计变更, 软件产品等开发同样存在设计变更, 因此Wright对工程变更的定义限制其施用范围. 而Jarratt等^[5]拓展了工程变更的实际应用需求, 拓展后的工程变更定义为, 产品开发过程中更改部分产品的结构、已发布的零部件、图纸或软件, 这种更改包括规模大小、变更形式、变更持续时间和涉及人员数量等, 但变更不改变产品的基本属性或功能.

产品设计变更与相匹配的供应链相互影响, 体现为产品设计一经变更, 其供应链通常发生改变, 另一方面, 供应链的中断或阻塞, 通常也会导致产品设计作相应的变更. 目前, 对供应链变更没有一个具体、明确的定义, 参考设计变更的定义, 供应链变更可定义为: 供应链的某些环节的行为发生变化后, 对供应链的决策不断修改或重新制定的过程. 其中, 供应链环节的行为变化称为变更事件的引入. 中外学者通常采用供应链中断或应急决策等概念或框架来研究供应链变更问题, 如Clausen等^[17]首先提出了应急管理

2.3 变更设计起因

引起产品与供应链演进系统变更的原因多样, 一般有设计偏差纠正, 零部件增添、替换、移除, 以及客户不确定需求变化, 供应链改变, 零部件制造或质量问题等. Jarratt等^[5]以及Eckert等^[8, 12]依据引起设计变更的原因, 将变更分为应急型变更(emergent changes)和发起型变更(initiated changes).

1) 应急型变更源于产品设计过程自身特性, 通常有: ①误差更正: 订正发生于产品开发生命周期任何阶段的错误, 错误涵盖从小的图纸错误到影响产品基本操作问题, 误差更正贯穿于产品设计的整个生命周期, 且包含产品任一部件; ②安全问题: 产品设计如果不能满足产品安全需要, 必须采取设计变更, 否则不仅无法满足产品安全标准, 甚至会引起伤亡、损害或财产损失; ③功能更改: 当产品无法满足初始设计的功能要求时, 均需要采取设计变更; ④质量问题: 不恰当的产品设计或不正确的制造装配等会引起质量缺陷, 需要对各环节筛查后实施变更.

2) 发起型变更源于外部因素, 通常表现在如下几方面: ①用户的不确定需求: 由于用户不确定需求的变化, 导致产品设计的变更, 通常用户的需求是多方面的, 如产品性能的提升, 功能的变化以及成本控制

等; ②市场的变化趋势: 产品生产要与市场的变化趋势相一致, 如流行款式与风格等, 产品需要变更设计迎合市场的需求^[19]; ③供应商: 完整的供应链要求有统一的技术标准、标准化的产品零部件和规范的材质变更实施条件, 一旦供应链发生变化, 要求产品对新标准或新配件的适应性变更; ④市场生产制造: 对指令构建、装配操作等可以在生产中实施变更设计, 以达到消除隐患或提高生产效率等目标; ⑤生产工艺: 产品设计者要能辨识出产品带给客户或企业的价值, 从而由设计方发起旨在提升产品优化设计, 如新技术应用等。

产品生产设计变更同样可能由政策法规或政治因素引起, 如贸易战导致的供应链断裂进而引起产品设计变更等^[20]。同样显而易见的是, 国防工业产品如航空发动机等, 由于军事政治等因素, 可能在其产品生命周期内经历设计变更问题^[21]。

2.4 变更设计过程及内容

不同学者提出了不同的变更设计过程, 将变更设计过程分成不同的要素或阶段。如Dale^[22]给出了两阶段设计过程, 而Jarrat^[5]提出了六阶段的变更设计过程(如图3所示), 即变更设计请求阶段、变更需求方案的确认、变更设计方案的风险/影响评估、变更设计方案的选择与批复、变更设计的执行, 以及变更设计的总结回顾六个阶段。其中, 在设计过程中可能出现反复阶段, 如图3中箭头所示, 另外, 这一个过程中还存在4个变更中断点, 每一个中断点变更设计可能因评估或其他事件导致变更中止, 细节参文献[5]。

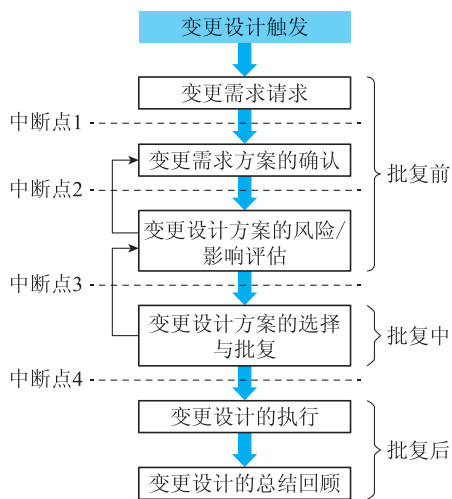


图3 变更设计过程^[5]

Fig. 3 Change design process^[5]

此外, 根据文献[5,8], 产品与供应链协同演进系统设计变更主要涉及如下内容:

- 产品结构修改(如材料、尺寸、模型、装配等);

- 产品功能改变(如性能、速度、效率等);
- 行为-结构映射原理修改等。

3 产品与供应链协同演进系统协同设计及其变更效应传播研究进展

通常, 当产品与供应链协同演进系统中产品的某一零部件发生变更, 将会在与该零部件相关联的其他零部件之间扩散, 也会产生供应链的连锁反应, 出现变更效应传播现象。由此, 产品与供应链协同设计与变更效应传播问题仍然属于产品与供应链协同演进系统变更设计研究问题范畴。现有的变更设计综述文献[4-8]大都数是聚焦于产品端的变更设计及变更效应传播问题, 没有集中关注产品与供应链协同关系。本节考虑产品-供应链协同设计问题, 梳理产品与供应链协同演进系统变更效应传播研究进展。

3.1 产品与供应链协同设计

从产品与供应链协同演进角度考虑变更设计问题, 注意到在产品设计时, 工程师更关心的是对产品功能、技术及客户满意度的要求。供应链管理者通常在确定产品设计基础上, 着眼供应链的最终绩效, 对供应链的结构和参数进行相关设置, 在此条件下, 变更设计是一个串行过程, 产品与供应链间的协同关系没有得到充分重视^[9-11,23-27], 因此最终影响供应链整体盈余。因此, 研究产品与供应链协同演进的并行设计, 优化整体供应链盈余具备现实意义, 表2列出了产品与供应链协同演进并行设计的相关研究成果。

3.2 变更效应传播分析、预测及控制

开展变更效应分析及预测研究, 评估变更设计的影响与风险以便进一步优化可能的变更设计实施方案, 是实施有效变更控制设计的重要环节^[35-36]。本文分别从产品设计端与供应链端回顾变更效应传播分析、预测及控制相关研究进展。

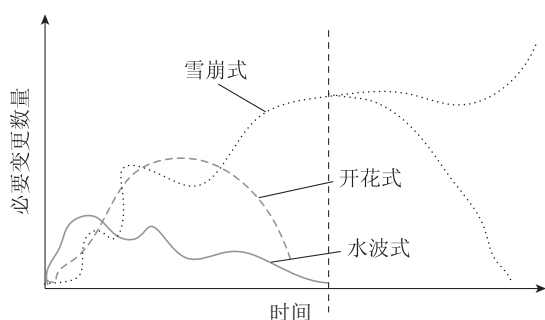
3.2.1 变更效应传播的类型、性质

Eckert^[12]根据影响企业设计变更传播的元素个数随时间发生改变的趋势, 将变更传播划分为水波式(ripple)传播、开花式(blossom)传播和雪崩式(avalanche)传播, 如图4所示。其中水波式传播一般是指初始变更造成的传播只会造成少数的其他变更, 然后变更数量极速变少。开花式传播分为两个时期: “开花期”和“凋谢期”。“开花期”初始变更引起的变更数量急剧增加, 随后进入“凋谢期”, 变更数量逐渐减少, 并维持在一定水平上。雪崩式传播通常指随着变更数量的逐渐累积, 如同滚雪球或雪崩, 进而导致影响变更元素的数量无法控制。雪崩式传播会增大开发成本、致使生产率降低且难以实施预测, 使企业的生产效益大大受损。

表2 产品与供应链协同设计

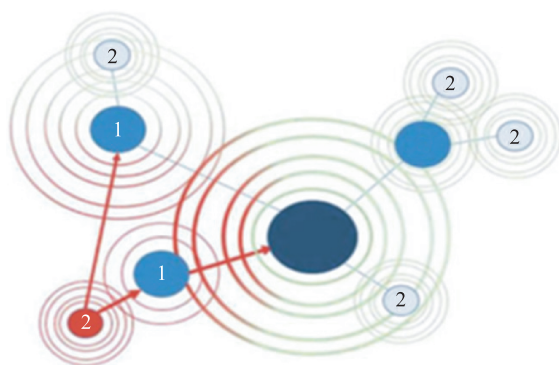
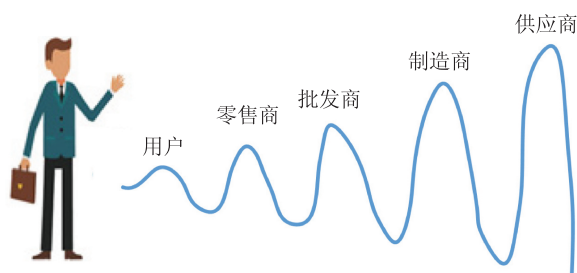
Table 2 Co-design of production and supply chains

参考文献	作者	方法技术	摘要
[28]	Nepal等	多目标优化方法	提出了多目标优化框架用于匹配供应链设计的产品结构策略, 模型逻辑用于计算供应指标的兼容性, 优化模型表述为具有两目标的目标规划模型.
[29]	Baud-Lavigne等	混合整数规划模型方法	研究产品零部件的标准化与供应链设计之间的联系, 通过一个混合整数规划模型构建标准化方式, 得出如果各个要素相互独立, 则供应链最优化由程度不同的标准化确定.
[30]	Wang等	运作参数如提前期或库存	提出了一个基于信息熵的装配供应链复杂性计算方法, 指出模块化的组装方式与非模块化的组装方式相比, 具有较低的供应链复杂度.
[31]	ElMaraghy等	整数规划模型方法	通过构建整数规划数学模型以确定供应链各节点在全球的布局 and 分布, 考虑模型中不同地区的最优化结构模型与外汇汇率, 进而使供应链总成本最小化.
[32]	陈杰, 黄悦	最优化方法及Lingo求解	构建产品设计及供应链设计两者间的相互影响关系, 通过模块化产品设计的方法确定产品结构数学模型表达式, 借助混合整数规划算法构建以成本最小为目标的供应链优化模型.
[33]	Lin, Y. & Zhou, L.	半结构化数据分析与典型案例方法	提出了产品设计变更对供应链风险的影响, 因果结构图用于辨识和概括内外部供应链风险的维数.
[34]	Chen等	混合整数规划方法	针对COVID-19疫情爆发, 提出了供应链中断恢复的产品变更设计控制策略, 混合整数规划模型用于求解优化应急采购、产品设计变更及延迟交货补偿多目标优化问题.

图4 不同的变更效应传播模式^[12]Fig. 4 Propagation of different change^[12]

在产品与供应链协同演进系统中, 不同的产品设计变更传播方式也会使供应链结构和运作参数发生改变, 形成不同的传播效应, 通常有涟漪效应^[37-39] (ripple effect) 和牛鞭效应^[40-41] (bullwhip effect). 涟漪效应是供应链的某些环节发生中断, 波及影响其他环节的一种传播现象, 并对供应链盈余产生影响, 如图5所示. 牛鞭效应是供应链的不同环节信息失调, 用户不确定需求信息顺着供应链由下游终端用户到上游节点原材料过程中逐级被扭曲且不断放大的供应链特有现象, 也最终影响供应链盈余, 如图6所示. 如文献[37-41]所述, 涟漪效应是一种低频率-高变动的异常突发性效应, 一般影响供应链的结构设计和计划, 进而影响供应链盈余; 相反, 牛鞭效应是一种高频率-低变动的经常性效应, 一般影响供应链运作, 进而

影响供应链盈余. 文献[39]给出了涟漪效应和牛鞭效应的具体区别, 参见表3.

图5 涟漪效应^[37-39]Fig. 5 Ripple effect^[37-39]图6 牛鞭效应^[40-41]Fig. 6 Bullwhip effect^[40-41]

产品与供应链协同演进系统变更设计, 有应急型和发起型两种形式, 即主动与被动两种形式. 一方面,

主动有效的产品与供应链协同演进系统变更设计,可以提高产品质量,满足用户个性化多样性的不确定需求,降低成本且增加企业效益;另一方面,当产品设计缺陷或供应链中断而导致的产品与供应链设计变更,可以保证用户需求的同时,减轻企业损失,维护系统的稳定运行.因此,如何有效设计产品与供应链协同演进变更,分析评估变更效应,预防变更效应的不当传播,具有至关重要的意义.中外学者在变更设计过程、变更效应传播分析与预测、变更路径优选等方向,开展了卓有成效的研究^[4-8].

表3 涟漪效应与牛鞭效应间的区别^[39]

Table 3 Differences between ripple effect and bullwhip effect^[39]

特征	涟漪效应	牛鞭效应
不确定性	危险深度不确定性	随机不确定性
风险如何	中断、意外风险(如工厂爆炸等)	运作、复发性的风险(如需求波动)
干扰特性	结构与临界性能(如供应短缺或收益受损)	运作参数如提前期或库存
减少偏差	冗余预设	信息协调
干扰如何	短期镇定、中长期恢复及高度协调	短期协调以平衡需求与供应
性能影响	输出性能(如年度收益)降低	当前性能(每天或每周出货)降低

3.2.2 产品设计端变更效应传播

产品设计变更传播既可以沿产品要素的直接关系由里向外扩散,还可以沿产品要素的非直接关系向系统其他部分扩散.对于复杂产品,产品零部件或供应链子系统间存在相互依存关系,如几何特征、材料、行为和功能等^[42-45].产品设计变更传播效应分析通常遵循如下步骤:1)通过产品架构分析建立产品模型,这是变更传播效应分析的前提条件;2)确定产品变更效应传播内容及范围;3)全方位建立产品设计变更传播影响评价指标体系,这是实施变更传播分析的依据.中外学者从不同角度开展产品设计变更传播的分析、预测及控制研究,概括起来有:

1) 基于产品零部件相关性变更传播分析方法. Clarkson等^[46]根据产品要素结构中不同节点的关联关系构建拓扑结构网络,借助设计结构关联矩阵以分析处于不同节点的零部件对关联要素的影响与传播概率,通过建立变更预测模型以确定大概率产生变更设计的节点零部件. Martin和Ishii^[47]利用了设计结构矩阵描述产品零部件间依赖关系,提出世代变更指数和耦合指数以量化产品的变更性.唐敦兵等^[48]利用设计结构矩阵确定变更传播范围,提出由子系统相对变

更率和影响可能性决定的变更影响程度的度量方法,据此建立产品变更设计影响分析模型.文献[49]为预防和控制高风险,高花费的工程变更雪崩传播,减小产品开发Hub节点间的相互影响,提出一种基于矩阵和产品开发Hub节点的雪崩传播预测方法.文献[50]在复杂产品开发网络中揭示重要节点对设计变更的影响,从而有效控制复杂产品设计变更传播.

2) 基于模块化产品变更传播度量指标的分析方法. Sosa等^[51]基于网络图模型提出了用以量测复杂产品零部件间模块度的方法,建立模块度的量测指标与设计变更传播间关系,以便有效阻止变更传播.在文献[52]中,研究者提出一种解析网络过程方法来度量模块化产品设计变更的影响,与传统用户输入方法相比,模块化方法可以在一定程度上避免用户提供数据的主观偏差,进而可有效预测变更的传播.在航空器装配工具设计领域, Yin等^[53]利用拓扑面作为基本单元给出了设计变更传播的分析方法,该方法给出了一个变更影响指标有助于设计者检测变更的有效性以及变更的影响度量.

3) 基于部件特性关联的变更传播路径优选方法.文献[54]提出了复杂产品工程设计变更传播路径动态优化方法,构建特性关联网络描述复杂产品设计结构,研究并揭示该网络中不同特性在变更时对其上、下游特性的影响机制.文献[55]利用多重网络理论和“功能-行为-结构”模型对设计变更传播路径进行表达,提出了一种多目标路径优选方法.该方法能够削弱变更传播对设计成本和研发时间的负面影响.李孟泽等^[56]依据复杂产品的设计参数构建了产品零部件的特性关联网络,针对相异节点设计变更的影响数值,给出了基于最小变更代价为目标的动态优化算法以优化复杂产品设计变更传播路径.在文献[57]中,研究者从产品组件特性关联关系出发,分析特性变更传播影响机制,提出基于产品特性关联网络模型的传播搜索算法. 宫中伟等^[49]结合语义相似度、信息论和变更设计相似度,从历史变更存储信息为基础,提出了以经验为主的设计变更传播路径预测方法.李玉鹏等^[58]根据零部件属性不同、网络拓扑与设计变更传播关系获取零部件的重要度区分,提出一种基于有向加权网络模型的复杂产品多源设计变更路径优化方法.

4) 着眼于控制的产品变更设计方法. Leng等人^[59]在航空工业利用Tree-Root跟踪算法及Ripple控制策略,给出了变更传播效应的影响范围.利用复杂网络技术,文献[60]建立了复杂生产系统的动态变更效应传播模型.在文献[61]中,研究者建立一个基于外部变更驱动的调度模型用于预测变更效应的传播. Hamraz等在文献[62]中给出了基于矩阵计算算法的变更效应传播的分析方法.文献[63]给出了一种复杂

产品设计变更的风险传播预测方法, 这种基于小世界网络的方法揭示了产品设计网络本身所固有特性影响产品设计变更传播风险抑制的规律, 设计节点依赖性以及变更传播强度, 进而阐述了设计变更传播最大风险优化机理. 基于荷兰韦斯特兰旋翼直升机设计案例研究, 文献[46]根据变更的相似性及影响建立用于变更传播风险预测的数学模型, 并开发原型工具用以计算特定产品的变更传播信息. 文献[64]利用数字孪生技术和结构设计矩阵思想, 将复杂工程系统转化到数字环境, 以此分析复杂工程系统变更传播效应. 文献[65]使用离散粒子群优化算法配置产品设计变更节点, 使产品变更设计节点的配置方案能够满足变更控制

传播需求. 考虑到航空产品设计变更传播路径预测困难的问题, 文献[67]评估了当前变更传播预测方法, 提出了贝叶斯网络方法估计变更传播风险, 并给出了一种新颖的估计变更容许度方法.

3.2.3 供应链端变更效应传播

供应链端因意外事件(如火灾、海啸地震或网络安全等因素)或运作因素导致的供应链变更, 极大地改变了供应链结构并深刻地影响着性能^[68], 大量研究通过网络拓扑结构分析、可量测性及优化问题研究了供应链网络中断的鲁棒性, 如文献[16, 69–71]. 如前所述, 变更效应影响体现为涟漪效应与牛鞭效应, 供应链端的变更效应传播研究进展如表4所示.

表4 供应链端的变更效应传播研究

Table 4 Study of change effect of supply chain side

传播效应	参考文献	方法技术	摘要
涟漪效应	[72]	弹性供应链结构仿真分析方法	当供应中断导致不能确定其方位且关联下游供应链性能的影响时, 涟漪效应出现, Ivanov考虑可持续的因素设计弹性供应链结构, 基于仿真分析, 辨识怎样的持续影响因素能够去除或放大涟漪效应.
	[37]	结构量化评估方法	给出了新颖的两模型多规则方法, 用这种结构量化方法评估供应链变更设计的涟漪效应, 并分析其保持稳定且具有弹性的潜在设计能力.
	[73]	大数据信息物理技术	研究数字化和工业4.0对供应链涟漪效应与中断风险控制分析的影响.
	[74]	数据分析与弹性控制	建立联结两类结果一致的理论模型: 提高数据分析能力作为提高信息处理能力的一种途径, 而弹性控制作为降低涟漪效应的一种途径.
牛鞭效应	[75]	自回归数据分析方法	研究具有终端需求未知参数的两尺度单产品供应链AR(1)自回归过程, 牛鞭效应受未知参数影响, 且随变更参数的更新而改变.
	[76]	大数据驱动分析技术	通过大数据驱动技术研究了供应链系统牛鞭效应在容量、变化及速度方面的特性.
	[77]	多智能体及切换拓扑控制技术	针对部分企业生产设备可能出现故障或与外界通讯失联情形, 利用多智能体技术, 将供应链系统建模为一类具有变更机制的切换系统, 利用 H_∞ 技术有效抑制牛鞭效应的影响.
	[78]	博弈控制方法	研究具有一个供应商多经销商的的两级供应链牛鞭效应的度量问题, 构建度量多经销商呈现AR(1)自回归需求过程的牛鞭效应传播模型.

产品与供应链协同演进系统控制的主要目标在于提高系统的性能, 主要包括高效性(如销售和服务水平)和效益性(如供应链成本), 同时还包括供应链中断的传播影响. 大量文献聚焦于研究系统的鲁棒性、弹性, 如文献[79–80]. 不同于弹性控制针对供应链的中断行为, 鲁棒性针对系统对不确定性的吸收^[72]. 而弹性控制偏重于系统功能的维持及恢复以保证变更后的系统性能^[81]. 根据Dolgui等^[38]对涟漪效应的控制框架以及其他抑制变更效应传播的研究结果^[82–83], 供应链中的中断风险及其效应传播影响主要源于单一资源, 风险较低的库存, 以及对仓库容量的过分利用. 涟漪效应及其如何影响经济性能依赖于库存或容量的缓冲能力, 即鲁棒恢复力.

4 产品与供应链协同演进系统变更设计研究展望

近年来, 随着信息技术的飞速发展, 产品与供应链协同演进系统变更设计研究引起学术界与工程技术的广泛关注并取得大量的研究成果^[4–11]. 然而, 该类系统是一类复杂的动态系统, 兼具如下特征:

- 体现物流、信息流等网络化系统属性;
- 具有分布式的自组织、自学习的多智能体系统特性;
- 具有多源数据融合的复杂数据驱动系统等.

针对如此复杂特征, 下面从协同设计和变更效应传播两个角度, 对产品与供应链协同演进系统变更设

计研究进行展望。

4.1 产品与供应链协同演进系统协同设计

需要指出的是现有的产品与供应链协同设计问题大都基于数学优化模型^[28-34]的研究, 研究内容相对单一, 仍存在一些潜在的开放问题。

1) 变更事件触发下产品与供应链协同动力学模型研究. 产品与供应链变更通常是动态过程, 而对该过程交互的动态系统模型研究相对不足. 另一方面, 将产品设计变更引起的拓扑结构变化与其节点上的动力模型有机地结合起来, 充分考虑网络拓扑结构与其节点上的动力学特性更具现实意义, 值得地一步深入研究。

2) 产品与供应链协同对引入变更的适应度评估模型研究. 产品与供应链变更对客户服务质量影响复杂多样, 如产品-供应链变更类型多且影响机理不清、评估指标主观难量化. 在量化影响因素不确定的情况下, 建立产品与供应链对引入变更的适应度评估模型, 有助于对客户服务质量影响机制进行分析, 达成协同制造, 实现降本增效目标。

3) 产品与供应链协同架构标准化研究. 由于参与协同制造的供应链企业一般是跨区域、跨业态, 涉及产品上下游, 产品设计不仅仅需要来源供应链市场的信息, 也要来自于用户需求变化信息的感知, 需要不断根据产品的发展情况来更新产品与供应链协同架构. 如何规范制造企业产品与供应链协同架构和方法论则具有挑战性。

4.2 产品与供应链协同演进系统变更效应传播

产品与供应链协同演进系统变更效应研究虽已取得系列成果, 然而在动态建模、效应影响机制与网络协调控制等方面依然有一些潜在的研究方向:

1) 变更效应传播非线性动力学模型研究. 现有产品与供应链协同演进系统的变更效应传播动力学模型大都是线性的. 而非线性更能刻画复杂系统的动力学特性, 因此, 研究更加逼近实际的变更效应传播非线性动力学模型更具现实意义。

2) 变更效应交叠影响机制研究. 不同的变更方式会产生不同的变更效应类型, 影响系统的不同层面, 如产品模块, 供应链结构和运作参数. 最近, 文献[84]指出供应链牛鞭效应和涟漪效应之间存在交叠现象, 涟漪效应能够驱动牛鞭效应, 可能会进一步加剧对系统性能的影响. 由此, 对产品与供应链协同演进系统的变更效应交叠影响机制研究具有理论价值和现实意义。

3) 传播效应下网络化变更协同库存控制研究. 虽然对变更效应传播的动态控制已存在相关研究^[37,85-87], 但是考虑到产品与供应链协同演进系统具体多智能体的特征, 对基于多智能体的动态演进系统

的网络化库存协调控制, 特别是在变更层面上的库存一致性问题, 目前研究结果还相当匮乏, 参考文献[77,88-89]. 文献[77]将多智能体思想融入网络化演进系统中, 在网络时滞的存在下, 研究了各子供应链的库存一致性, 但是若在网络堵塞发生的情况下, 设计的协调控制策略可能无法保持库存一致. 事件触发控制策略^[90-92]能够有效地节省网络资源并维持期望的系统控制性能, 研究基于事件触发的网络化演进系统库存一致性问题是一个有价值的方向. 由于网络的物理约束和开放性, 难免会受到一些黑客的恶意攻击, 对整个网络化控制系统造成严重破坏. 目前, 关于产品与供应链协同演进系统网络安全控制并不多见, 虽然已有一系列关于网络安全控制研究成果^[93-95]能给基于多智能体的网络化演进系统研究提供启发, 但如何研究该系统的网络安全库存协调控制问题仍然是一个挑战性问题. 以上相关框架可参见图7-8所示。

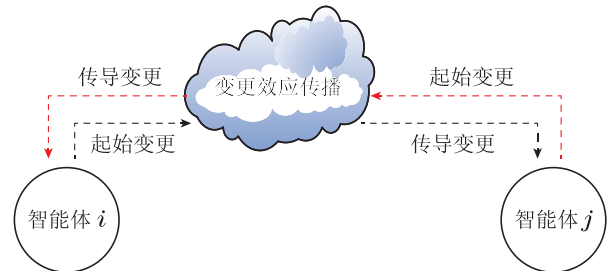


图7 多智能体产品与供应链协同演进系统变更传播

Fig. 7 Multi-agent based change propagation effect for production and supply chain system

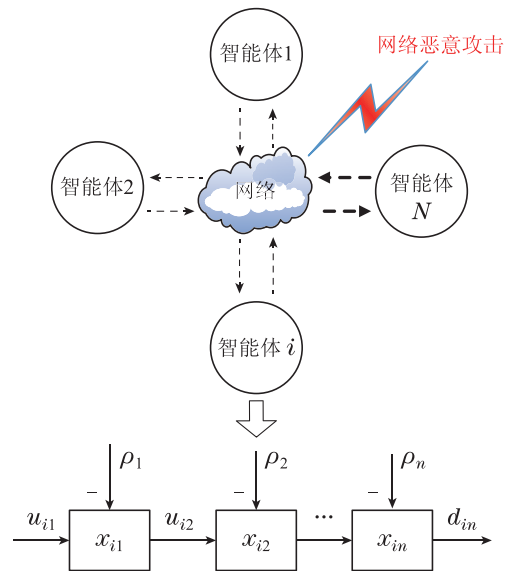


图8 多智能体产品与供应链协同演进系统示意

Fig. 8 Synchronous evolving for multiagent based production and supply chain systems

4) 基于数据驱动的变更效应传播分析与控制. 在产品生产设计与供应链协同演进过程中, 物流、信息流、资源流、生产过程、订单、销售等运行数据分布于

系统的诸环节,如企业资源计划(enterprise resource planning, ERP)、射频识别(radio frequency identification, RFID)、传感器、控制器、区块链(blockchain)等。系统运行模态存在大量不确定性、未建模动态等,因此,对系统的分析、控制、监测、预报、诊断与评估等,都依赖于对系统诸环节行为关系及要素的把握,即依赖诸环节输入输出数据所反映的动态特性,其中涉及产品与供应链系统信息层与物理层人工智能(artificial intelligent, AI)算法诸如深度/强化学习算法,数据分析处理技术等通常称为数据驱动(data driven)方法^[96-97]。显见,数据驱动技术在处理产品与供应链系统分析与控制问题具有天然的优势,可以预见,基于数据驱动技术的产品与供应链协同演进系统的变更设计,可以有效分析变更传播效应的影响,优选变更传播路径,且有效抑制变更效应的传播^[39]。基于数据驱动的产品与供应链系统风险分析技术路线的应用范例具体参见文献^[39]。

参考文献:

- [1] General office of the state council. Guidance from the general office of the state council on actively promoting supply chain innovation and application. *Logistics Technology*, 2018, 41(2): 3.
(国务院办公厅. 国务院办公厅关于积极推进供应链创新与应用的指导意见. 物流科技, 2018, 41(2): 3.)
- [2] GOLDTHAU A, HUGHES L. Protect global supply chains for low-carbon technologies. *Nature*, 2020, 585(7823): 28 – 30.
- [3] LABORDE D, MARTIN W, SWINNEN J, et al. COVID-19 risks to global food security. *Science*, 2020, 369(6503): 500 – 502.
- [4] WRIGHT I C. A review of research into engineering change management: Implications for product design. *Design Studies*, 1997, 18(1): 33 – 42.
- [5] JARRATT T A W, ECKERT C M, CALDWELL N H W, et al. Engineering change: An overview and perspective on the literature. *Research in Engineering Design*, 2011, 22(2): 103 – 124.
- [6] CHEN Yu, TENG Hongfei. Advances of coupling analysis for product design. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(8): 1729 – 1736.
(陈羽, 滕弘飞. 产品设计耦合分析研究进展. 计算机集成制造系统, 2011, 17(8): 1729 – 1736.)
- [7] MAO Zhifei, JIANG Shaofei. Review of engineering change. *Light Industry Machinery*, 2015, 33(4): 106 – 110.
(毛志飞, 姜少飞. 工程更改研究进展. 轻工机械, 2015, 33(4): 106 – 110.)
- [8] ULLAH I, TANG D, YIN L. Engineering product and process design changes: A literature overview. *Procedia CIRP*, 2016, 56: 25 – 33.
- [9] REITSMA E, HILLETOFTH P, JOHANSSON E. Supply chain design during product development: A systematic literature review. *Production Planning & Control*, 2021, DOI: 10.1080/09537287.2021.1884763.
- [10] GAN T-S, GRUNOW M. Concurrent product and supply chain design: A literature review, an exploratory research framework and a process for modularity design. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2016, 29(12): 1255 – 1271.
- [11] GAN T-S, STEFFAN M, GRUNOW M, et al. Concurrent design of product and supply chain architectures for modularity and flexibility: Process, methods, and application. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(7): 2292 – 2311.
- [12] ECKERT C, CLARKSON P J, ZANKER W. Change and customisation in complex engineering domains. *Research in Engineering Design*, 2004, 15(1): 1 – 21.
- [13] FISHER M L. What is the right supply chain for your product? *Harvard Business Review*, 1997, 75: 105 – 117.
- [14] LIN Yong, MA Shihua. Product-based supply chain design. *China Mechanical Engineering*, 1998, 9(10): 24 – 26.
(林勇, 马士华. 基于产品的供应链设计. 中国机械工程, 1998, 9(10): 24 – 26.)
- [15] SARIMVEIS H, PATRINOS P, TARANTILIS C D, et al. Dynamic modeling and control of supply chain systems: A review. *Computers & Operations Research*, 2008, 35(11): 3530 – 3561.
- [16] ZHAO K, SCHEIBE K, BLACKHURST J, et al. Supply chain network robustness against disruptions: Topological analysis, measurement, and optimization. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2019, 66(1): 127 – 139.
- [17] CLAUSEN J, LARSEN J, LARSEN A, et al. Disruption management-operations research between planning and execution. *Or/ms Today*, 2001, 28(5): 40 – 43.
- [18] QI X, BARD J F, YU G. Supply chain coordination with demand disruptions. *Omega*, 2004, 32(4): 301 – 312.
- [19] FRICKE E, GEBHARD B, NEGELE H, et al. Coping with changes: Causes, findings, and strategies. *Systems Engineering*, 2000, 3(4): 169 – 179.
- [20] LIU Luxin. Sanctions "Xinjiang cotton" or the U.S. and Europe to build a "supply chain alliance" the beginning. *World Affairs*, 2021, (8): 2.
(刘露馨. 制裁“新疆棉”或是美欧构建“供应链联盟”的开端. 世界知识, 2021, (8): 2.)
- [21] SUDIN M N, AHMED S. Investigation of change in specifications during a product's lifecycle. *The 17th International Conference on Engineering Design, Vol 8: Design Information and Knowledge*. Stanford, CA, USA: Design Soc, 2009, 8: 371 – 380.
- [22] DALE B G. The management of engineering change procedure. *Engineering Management International*, 1982, 1(3): 201 – 208.
- [23] LAU A K W, YAM R C M, TANG E P Y. Supply chain product co-development, product modularity and product performance: Empirical evidence from Hong Kong manufacturers. *Industrial Management & Data Systems*, 2007, 107(7): 1036 – 1065.
- [24] KHAN O, CREAZZA A. Managing the product design-supply chain interface: Towards a roadmap to the "design centric business". *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 2009, 39(4): 301 – 319.
- [25] JI Xuehong, SUN Daoyin. A study on the impact of matching product and supply chain upon business performance. *Industrial Engineering and Management*, 2011, 16(1): 12 – 16.
(纪雪洪, 孙道银. 产品与供应链匹配对企业绩效的影响研究. 工业工程管理, 2011, 16(1): 12 – 16.)
- [26] XIE Lijuan, MAO Jiye. Change of matching mechanism of product supply chain supported by information technology—case study in the context of private brand retailing. *Chinese Journal of Management*, 2021, 18(4): 475 – 485.
(谢莉娟, 毛基业. 信息技术与“产品-供应链”匹配机制变革—自有品牌零售情境的案例研究. 管理学报, 2021, 18(4): 475 – 485.)
- [27] ZHU Xiaoning, ZHANG Qun, YAN Rui, et al. Collaborative product design and development model and strategy for supply chain. *Statistics & Decision*, 2014, 10: 40 – 43.
(朱晓宁, 张群, 颜瑞, 等. 供应链协同产品设计开发模型及策略. 统计与决策, 2014, 10: 40 – 43.)
- [28] NEPAL B, MONPLAISIR L, FAMUYIWA O. Matching product architecture with supply chain design. *European Journal of Operational Research*, 2012, 216(2): 312 – 325.

- [29] BAUD-LAVIGNE B, AGARD B, PENZ B. Mutual impacts of product standardization and supply chain design. *International Journal of Production Economics*, 2012, 135(1): 50 – 60.
- [30] WANG H, KO J, ZHU X, et al. A complexity model for assembly supply chains and its application to configuration design. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2010, 132(2): 021005.
- [31] ELMARAGHY H A, MAHMOUDI N. Concurrent design of product modules structure and global supply chain configurations. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2009, 22(6): 483 – 493.
- [32] CHEN Jie, HUANG Yue. Simultaneously optimize the product design and supply chain design. *Industrial Engineering and Management*, 2013, 18(2): 17 – 23.
(陈杰, 黄悦. 同步化产品与供应链设计. 工业工程与管理, 2013, 18(2): 17 – 23.)
- [33] LIN Y, ZHOU L. The impacts of product design changes on supply chain risk: A case study. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 2011, 41(2): 162 – 186.
- [34] CHEN J, WANG H, ZHONG R Y. A supply chain disruption recovery strategy considering product change under COVID-19. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 60: 920 – 927.
- [35] KOH E C Y, CALDWELL N H M, CLARKSON P J. A method to assess the effects of engineering change propagation. *Research in Engineering Design*, 2012, 23(4): 329 – 351.
- [36] RAFIEI M, MOHAMMADI M, TORABI S A. Reliable multi period multi product supply chain design with facility disruption. *Decision Science Letters*, 2013, 2(2): 81 – 94.
- [37] SOKOLOV B, IVANOV D, DOLGUI A, et al. Structural quantification of the ripple effect in the supply chain. *International Journal of Production Research*, 2016, 54(1): 152 – 169.
- [38] DOLGUI A, IVANOV D, SOKOLOV B. Ripple effect in the supply chain: An analysis and recent literature. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(1/2): 414 – 430.
- [39] IVANOV D, DOLGUI A, SOKOLOV B. Ripple effect in the supply chain: Definitions, frameworks and future research perspectives. *Handbook of Ripple Effects in the Supply Chain*. Springer, 2019.
- [40] LEE H L, PADMANABHAN V, WHANG S. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. *Management Science*, 1997, 43(4): 546 – 558.
- [41] LEE H L, SO K C, TANG C S. The value of information sharing in a two-level supply chain. *Management Science*, 2000, 46(5): 626 – 643.
- [42] CHEN Zongheng. *Research on optimization for multiple change propagation paths based on component network*. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.
(陈宗衡. 基于零部件网络模型的多源变更传播路径优化研究. 杭州: 浙江工业大学, 2020.)
- [43] HE Rui, TANG Dunbing, XUE Jianbin. Engineering change propagation based on design structure matrix. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2008, 14(4): 656 – 660.
(何睿, 唐敦兵, 薛建彬. 基于设计结构矩阵的工程变更传播研究. 计算机集成制造系统, 2008, 14(4): 656 – 660.)
- [44] GAN Yi, HE Yiqi, GAO Li, et al. Vector space reconstruction model based on product characteristic linkage and design change propagation. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(1): 179 – 189.
(甘屹, 何怡琪, 高丽, 等. 基于产品特性关联和设计变更传播的向量空间重构模型. 机械工程学报, 2022, 58(1): 179 – 189.)
- [45] LI Yuliang, LIN Peihe. Parallel change propagation model of complex product. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(4): 737 – 743.
(李玉良, 林培何. 复杂产品的并行变更传播模型研究. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 737 – 743.)
- [46] CLARKSON P J, SIMONS C, ECKERT C. Predicting change propagation in complex design. *Journal of Mechanical Design*, 2004, 126(5): 788 – 797.
- [47] MARTIN M V, ISHII K. Design for variety: Developing standardized and modularized product platform architectures. *Research in Engineering Design*, 2002, 13(4): 213 – 235.
- [48] TANG Dunbing, XU Ronghua, TANG Jicheng, et al. Analysis of engineering change impacts based on design structure matrix. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(1): 154 – 161.
(唐敦兵, 徐荣华, 唐吉成, 等. 基于设计结构矩阵的工程变更影响分析. 机械工程学报, 2010, 46(1): 154 – 161.)
- [49] GONG Zhongwei, MO Rong, YANG Haicheng, et al. Method for forecasting avalanche propagation of engineering change. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(12): 2619 – 2627.
(宫中伟, 莫蓉, 杨海成, 等. 基于矩阵的工程变更雪崩传播预测方法. 计算机集成制造系统, 2012, 18(12): 2619 – 2627.)
- [50] SHAN Bingran, TAO Fengming. Design change control of complex products based on important nodes. *Computer Engineering and Applications*, 2018, 54(6): 222 – 227.
(单炳冉, 陶凤鸣. 基于重要节点的复杂产品设计变更控制. 计算机工程与应用, 2018, 54(6): 222 – 227.)
- [51] SOSA M E, EPPINGER S D, ROWLES C M. A network approach to define modularity of components in complex products. *Journal of Mechanical Design*, 2007, 129(11): 1118 – 1129.
- [52] LEE H, SEOL H, SUNG N, et al. An analytic network process approach to measuring design change impacts in modular products. *Journal of Engineering Design*, 2010, 21(1): 75 – 91.
- [53] YIN L, TANG D, KANG Y, et al. Topology face-based change propagation analysis in aircraft-assembly tooling design. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2016, 230(1): 120 – 135.
- [54] ZHENG Yujie, YANG Yu, ZHANG Na, et al. Dynamic majorization scheme for engineering change propagation paths in complex product. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(2): 474 – 483.
(郑玉洁, 杨育, 张娜, 等. 复杂产品工程变更传播路径动态优化. 计算机集成制造系统, 2018, 24(2): 474 – 483.)
- [55] LI Congdong, ZHANG Zhiwei, CAO Cejun, et al. Multi-objective optimization of design change propagation paths in complex product. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(3): 842 – 856.
(李从东, 章志伟, 曹策俊, 等. 复杂产品设计变更传播路径的多目标优选. 计算机集成制造系统, 2021, 27(3): 842 – 856.)
- [56] LI Mengze, SHENG Jianchao, LI Yupeng, et al. Multi-objective path optimization for design change propagation on complex product. *Machinery Design & Manufacture*, 2020, 6(6): 294 – 297.
(李孟泽, 盛健超, 李玉鹏, 等. 复杂产品设计变更传播多目标路径优化研究. 机械设计与制造, 2020, 6(6): 294 – 297.)
- [57] YANG F, DUAN G-J. Developing a parameter linkage-based method for searching change propagation paths. *Research in Engineering Design*, 2012, 23(4): 353 – 372.
- [58] LI Yupeng, LI Mengze, WANG Zhaotong. Multi-source design change propagation path optimization for complex product based on weighted and directed network model. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(6): 213 – 222.
(李玉鹏, 李孟泽, 王召同. 基于有向加权网络模型的复杂产品多源设计变更传播路径优化. 机械工程学报, 2019, 55(6): 213 – 222.)
- [59] LENG S, WANG L, CHEN G, et al. Engineering change information propagation in aviation industrial manufacturing execution processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(1/4): 575 – 585.
- [60] LI R, YI H, CAO H. Towards understanding dynamic design change propagation in complex product development via complex network

- approach. *International Journal of Production Research*, 2021, 60(9): 2733 – 2752.
- [61] CHUA D K H, HOSSAIN M A. Predicting change propagation and impact on design schedule due to external changes. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2012, 59(3): 483 – 493.
- [62] HAMRAZ B, CALDWELL N H M, CLARKSON P J. A matrix-calculation-based algorithm for numerical change propagation analysis. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2013, 60(1): 186 – 198.
- [63] GUO Yuming. Predication of design change propagation risk in product development network. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(10): 2547 – 2558.
(郭于明. 产品开发网络中的设计变更传播风险预测. 计算机集成制造系统, 2018, 24(10): 2547 – 2558.)
- [64] CHEN L, WHYTE J. Understanding design change propagation in complex engineering systems using a digital twin and design structure matrix. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2021, DOI:10.1108/ecam-08-2020-0615.
- [65] GUO Yuming, WANG Jian. Variant design nodes schemes evaluation in complex product development network. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2014, 26(2): 320 – 328.
(郭于明, 王坚. 复杂产品开发网络中变型设计节点方案评价. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(2): 320 – 328.)
- [66] GONG Zhongwei, MO Rong, YANG Haicheng, et al. History-based engineering change propagation predicting. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(3): 677 – 685.
(宫中伟, 莫蓉, 杨海成, 等. 基于经验的工程变更传播路径预测方法. 航空学报, 2013, 34(3): 677 – 685.)
- [67] YEASIN F N, GRENN M, ROBERTS B. A bayesian networks approach to estimate engineering change propagation risk and duration. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2020, 67(3): 869 – 884.
- [68] BEHZADI G, O'SULLIVAN M J, OLSEN T L, et al. Allocation flexibility for agribusiness supply chains under market demand disruption. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(10): 3524 – 3546.
- [69] GE Chenchen, ZHU Jianjun. Online and offline collaborative omnichannel retail supply chain system robust control and optimization. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.1603.
(葛晨晨, 朱建军. 线上线下协同的全渠道零售供应链系统的鲁棒控制与优化. 中国管理科学, 2022, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.1603.)
- [70] QIU Xiang, YU Li, LIU Andong. Bullwhip effect control of supply chain systems with time delays: A switched system approach. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2016, 36(6): 810 – 821.
(仇翔, 俞立, 刘安东. 时滞供应链网络系统的牛鞭效应切换控制方法. 系统科学与数学, 2016, 36(6): 810 – 821.)
- [71] LIU Chunling, SUN Linfu, LI Jizi. Cross-chain inventory coordination of multi-echelon cluster supply chains and robust optimization algorithm. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(9): 1046 – 1050.
(刘春玲, 孙林夫, 黎继子. 多级集群式供应链跨链库存合作及鲁棒优化算法. 控制理论与应用, 2009, 26(9): 1046 – 1050.)
- [72] IVANOV D. Revealing interfaces of supply chain resilience and sustainability: A simulation study. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(10): 3507 – 3523.
- [73] IVANOV D, DOLGUI A, SOKOLOV B. The impact of digital technology and industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(3): 829 – 846.
- [74] DUBEY R, GUNASEKARAN A, CHILDE S J, et al. Empirical investigation of data analytics capability and organizational flexibility as complements to supply chain resilience. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(1): 110 – 128.
- [75] PASTORE E, ALFIERI A, ZOTTERI G. The impact of demand parameter uncertainty on the bullwhip effect. *European Journal of Operational Research*, 2020, 283(1): 94 – 107.
- [76] HOFMANN E. Big data and supply chain decisions: The impact of volume, variety and velocity properties on the bullwhip effect. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(17/18): 5108 – 5126.
- [77] LI Q K, LIN H, TAN X, et al. H_∞ consensus for multiagent-based supply chain systems under switching topology and uncertain demands. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(12): 4905 – 4918.
- [78] YIN X. Measuring the bullwhip effect with market competition among retailers: A simulation study. *Computers & Operations Research*, 2021, 132: 105341.
- [79] HAN J, SHIN K. Evaluation mechanism for structural robustness of supply chain considering disruption propagation. *International Journal of Production Research*, 2016, 54(1): 135 – 151.
- [80] IVANOV D, SOKOLOV B. Control and system-theoretic identification of the supply chain dynamics domain for planning, analysis and adaptation of performance under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 2013, 224(2): 313 – 323.
- [81] AVEN T. How some types of risk assessments can support resilience analysis and management. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 167: 536 – 543.
- [82] SCHEIBE K P, BLACKHURST J. Supply chain disruption propagation: A systemic risk and normal accident theory perspective. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(1/2): 43 – 59.
- [83] WANG Y, ZHANG F. Modeling and analysis of under-load-based cascading failures in supply chain networks. *Nonlinear Dynamics*, 2018, 92(3): 1403 – 1417.
- [84] DOLGUI A, IVANOV D, ROZHKOV M. Does the ripple effect influence the bullwhip effect? An integrated analysis of structural and operational dynamics in the supply chain. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(5): 1285 – 1301.
- [85] IVANOV D, SOKOLOV B, DOLGUI A. The ripple effect in supply chains: Trade-off 'efficiency-flexibility-resilience' in disruption management. *International Journal of Production Research*, 2014, 52(7): 2154 – 2172.
- [86] SPIEGLER V L M, NAIM M M, JOAKIM W. A control engineering approach to the assessment of supply chain resilience. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(21): 6162 – 6187.
- [87] LI Chong, LIU Sifeng, FANG Zhigeng, et al. Bullwhip effect in supply chain networks with lead time delays and its inventory control strategy. *Chinese Journal of Management Science*, 2013, 21(2): 107 – 113.
(李翀, 刘思峰, 方志耕, 等. 供应链网络系统的牛鞭效应时滞因素分析与库存控制策略研究. 中国管理科学, 2013, 21(2): 107 – 113.)
- [88] LI Qingkui, LI Mei, JIA Xinchun. Switching control of closed-loop supply chain systems with Markovian jumping parameters. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(12): 2081 – 2091.
(李庆奎, 李梅, 贾新春. 具有markov跳变参数的闭环供应链系统切换控制. 自动化学报, 2015, 41(12): 2081 – 2091.)
- [89] LI Q K, LI Y G, LIN H. H_∞ control of two-time-scale Markovian switching production-inventory systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 26(3): 1065 – 1073.
- [90] YUE D, TIAN E, HAN Q L. A delay system method for designing event-triggered controllers of networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic control*, 2013, 58(2): 475 – 481.
- [91] GE X, HAN Q L, DING L, et al. Dynamic event-triggered distributed coordination control and its applications: A survey of trends and

- techniques. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(9): 3112 – 3125.
- [92] PENG C, LI F. A survey on recent advances in event-triggered communication and control. *Information Sciences*, 2018, 457: 113 – 125.
- [93] ZHANG X-M, HAN Q L, GE X, et al. Networked control systems: A survey of trends and techniques. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, 7(1): 1 – 17.
- [94] PENG C, SUN H, YANG M, et al. A survey on security communication and control for smart grids under malicious cyber attacks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(8): 1554 – 1569.
- [95] DING D, HAN Q L, XING Y, et al. A survey on security control and attack detection for industrial cyber-physical systems. *Neurocomputing*, 2018, 275: 1674 – 1683.
- [96] HOU Zhongsheng. On model-free adaptive control: The state of the art and perspective. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(4): 586 – 592.
(侯忠生. 无模型自适应控制的现状与展望. 控制理论与应用, 2006, 23(4): 586 – 592.)
- [97] BAGGIO G, BASSETT D S, PASQUALETTI F. Data-driven control of complex networks. *Nature Communications*, 2021, 12: 1429.

作者简介:

李庆奎 博士, 教授, 目前研究方向为切换控制系统、网络控制系统、供应链系统、非线性控制等, E-mail: sdlqk01@bistu.edu.cn;

曹恩智 博士研究生, 目前研究方向为网络控制系统、供应链系统等, E-mail: ezcao1996@163.com;

彭晨 博士, 教授, 研究方向为网络控制系统、电力系统、供应链系统等, E-mail: peng@i.shu.edu.cn.