

面向大规模个性化生产的韧性制造系统

林文广¹, 赖荣燊¹, 肖人彬^{2*}

1. 厦门理工学院机械与汽车工程学院, 厦门 361024

2. 华中科技大学人工智能与自动化学院, 武汉 430074

摘要 随着新一代信息技术和先进制造技术的发展, 大规模个性化生产逐渐取代大规模定制化生产成为当前主流生产模式。韧性制造系统突出其应对系统内外突发事件的响应和恢复能力, 成为支撑大规模个性化生产的关键技术。阐述了生产模式与制造系统的协同演化过程, 指出大规模个性化生产模式应与韧性制造系统相适应, 分析了系统韧性内涵并综述制造系统韧性研究现状; 基于供应链网络和制造企业内部加工设备网络的韧性过程分析, 构建了基于物料流视角的制造供应链网络结构模型, 讨论了制造系统韧性问题; 分析了韧性制造系统的激励来源、韧性响应过程和特征以及关键支撑技术, 提出了面向大规模个性化生产的韧性制造系统的评估指标与优化策略; 展望了面向大规模个性化生产的韧性制造系统的热点研究方向。

关键词 韧性制造系统; 大规模个性化; 开放式设计; 韧性评估; 韧性优化

科学技术的重大突破推动生产模式从定制化生产经大规模生产、大规模定制向大规模个性化演化发展^[1-2], 同时促使与之相适应的制造系统不断演变, 从面向传统手工作坊的原始制造系统, 到以福特生产线为代表的刚性制造系统, 再到 20 世纪六七十年代以数控技术为基础的柔性制造系统, 直到新近提出的韧性制造系统^[3-4]。刚性制造系统面向大规模生产, 其中“刚性”是指制造系统主要生产某种或工艺相近的某类产品, 表现为生产对象单一

性, 若生产对象发生变化, 则需要停机对工装设备进行调整, 然而刚性制造系统具有效率高、质量稳定和单位制造成本低等优点。柔性制造系统面向多品种小批量生产, 基于模块化体系结构实现在最短时间内进行重组(通过换线、增减工位等)以适应不同产品变型, 其突出优势在于提高定制化水平(即面向个性化客户需求的适应性), 然而只有与大批量定制策略(如产品平台、延迟策略等)相结合才能满足大批量定制的要求。随着新一代信息技术

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875220); 福建省社会科学基金项目(FJ2021B128); 福建省中青年教育科研项目(JAT200467)

作者简介: 林文广, 讲师, 研究方向为数据驱动产品设计, 电子信箱: linwg@xmut.edu.cn; 肖人彬(通信作者), 教授, 研究方向为制造系统工程与复杂产品设计, 电子信箱: rbxiao@hust.edu.cn

引用格式: 林文广, 赖荣燊, 肖人彬. 面向大规模个性化生产的韧性制造系统[J]. 科技导报, 2021, 39(22): 75-84; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.22.009

和先进制造技术的发展,大规模个性化生产逐渐取代大规模定制成为当前主流生产模式,与之相适应的制造系统为韧性制造系统。所谓“韧性”,是指制造系统能够有效且高效地应对客户极端个性化需求变化及其他突发事件,同时维持近似大规模生产的低成本、高效率和高质量,并打造独特的客户体验^[5]。

韧性的概念最早由 Holling^[6]引入生态学领域,指系统抵抗破坏性事件以在不同的可能状态间运行并逐渐恢复到平衡状态的能力。物理学领域中,韧性表示材料在塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力,韧性越好则发生脆性断裂的可能性越小。韧性不同于柔性(承受弯曲而不折断的能力)和弹性(物体受外力作用变形后,除去作用力时能恢复原来形状的性质)。韧性是一个动态概念,涉及系统如何通过适应和自主性恢复到平衡状态^[7-8],包含鲁棒性(对组件/环境变化的不敏感性,例如吸收破坏冲击的能力)和敏捷性(对变化和不可预测的环境的快速响应,例如恢复或重新配置能力)。系统韧性的核心内涵包括2个方面:一是吸收扰动的能力,通过扰动事件下系统性能退化程度体现;二是系统从扰动中恢复的能力,通过系统恢复速度和恢复程度体现。制造系统韧性特指制造系统应对因社会、政治和环境等变化而引起的外部压力或干扰的适应能力,以及功能或性能等快速恢复到既定水平的能力^[9]。2020年,面对突如其来的新冠肺炎疫情,各类医疗防护用品如口罩、防护服、消毒液、护目镜等供不应求,为缓解这一紧张局面,汽车、石化、服装、地产等行业企业迅速调整生产计划,转产紧缺抗疫物资,充分展现了中国制造企业非凡的韧性。

现代制造系统变得越来越复杂,并面临着外部(如自然灾害、恐怖主义、保护主义、关键供应商流失、传染病大流行等)和内部(如机器故障、工具更换、材料准备不足、旷工等)更为频繁且难以预测的变化和中断风险,加之新冠肺炎疫情冲击导致的各类衍生风险,不确定性不稳定性明显增加,制造系统正经受严峻考验。与此同时,需求个性化程度越来越高,客户参与价值共创的意愿更为强烈,对关

乎人体健康与生命安全方面的个性化产品需求日益严格。如何在不确定和不稳定环境中(尤其在后疫情时代)做好风险管控,有效平衡客户个性化需求、制造成本、效率、质量和制造系统韧性等关键因素,增强制造系统韧性以确保生产活动持续正常运行,成为企业关注的热点问题。

1 研究现状及分析

韧性是复杂系统的一个关键特征,包括鲁棒性、快速性、智能性、冗余性4个属性和物理维、服务维、社会维和经济维4个维度,并可应用于任何工程系统^[10]。国内外学者已针对诸多领域的系统韧性开展广泛研究,如能源系统韧性方面,Chaudry等^[11]指出韧性能源系统可以快速从冲击中恢复,并能在外部环境发生变化时提供满足能源服务需求的替代方法;指挥信息系统韧性方面,李凡等^[12]指出韧性指挥信息系统通过主动预防、动态适应等方法以提供持续服务和保障任务完成;地铁建设工程韧性方面,电力系统韧性方面,鞠平等^[13]对电力系统柔性、弹性和韧性内涵进行比较分析,指出韧性电力系统具有在持续的随机扰动下不发生崩溃而保持正常运行的能力等。

近年来,随着各种自然灾害和人为事故日益频繁,制造企业产品和/或服务的正常供给受到严重影响,制造系统韧性研究引起特别关注。制造系统应该具备主动防护、快速重构、动态适应等能力,而韧性包含系统的预测、吸收、抵抗和适应等特点,是表征制造系统上述能力的重要属性。

面向制造系统供应链视角,Tang^[14]提出缓解破坏性事件影响并促使供应链系统从破坏性事件中恢复的9个稳健策略,如延迟策略、战略库存、柔性供应基准等。樊雪梅等^[15]分析企业供应链的韧性影响因素,从预测能力、适应能力、反应能力、恢复能力、学习能力5个维度构建供应链韧性评价指标体系。Namdar等^[16]提出使用多元采购策略在中断情况下实现供应链韧性的方法。面向制造系统内部结构视角, Lee等^[17]提出串行生产线应对预先已知的破坏性事件的最优生产能力控制策略。Gu

等^[18-19]提出包含一个最终产品和多个通用结构的装配系统的库存策略。Caputo等^[20]针对单个制造工厂的韧性问题,提出生产能力损失、恢复时间和总经济损失等韧性指标,为制造业设施规划和应急管理提供决策支持工具。Bergmann等^[21]提出通过适应时间或空间组织提升生产系统韧性的方法。Ljasenko等^[22]对大型结构装配中固定自动化系统和移动机器人的制造韧性进行比较。

当前韧性制造系统研究的主要特点在于:一方面,根据研究对象阐明韧性内涵,提出韧性优化策略,然而大部分韧性策略涉及一定程度的系统冗余或柔性,可能导致成本高或难以在特定环境中实施;另一方面,重点针对制造系统的外部破坏性事件,如自然灾害、人为事故等,研究制造系统供应链网络韧性优化并开发风险管理工具。韧性供应链是确保制造业持续正常运行的关键,例如联想集团拥有规模庞大的核心供应商和企业自主研发的智能控制平台,应用人工智能、物联网、区块链等新技术构建包含自制和外包的双模式生产制造体系,实

现供应商、企业内部及客户信息可视化,做到风险预警、提前预判和率先行动,在应对新冠肺炎疫情冲击中起到至关重要的作用。然而,制造系统涉及面广、影响因素复杂,为构建面向大规模个性化生产的韧性制造系统以应对制造系统内外的不容扰动,势必要求综合制造系统供应链网络和内部生产系统结构2个层次开展韧性研究。

2 韧性制造系统模型

通过制造系统韧性研究现状分析不难发现,当前研究或以供应链网络为对象^[16],或以制造企业内部加工设备网络为对象^[18],而两者在本质上均以物料流为纽带连接网络节点,为此综合考虑制造企业在供应链网络中的核心地位以及制造企业内部生产系统结构,基于物流视角构建制造供应链网络结构如图1所示,将“制造企业内部加工设备网络”嵌入“供应链网络”中,以期更为系统地讨论制造系统韧性问题。

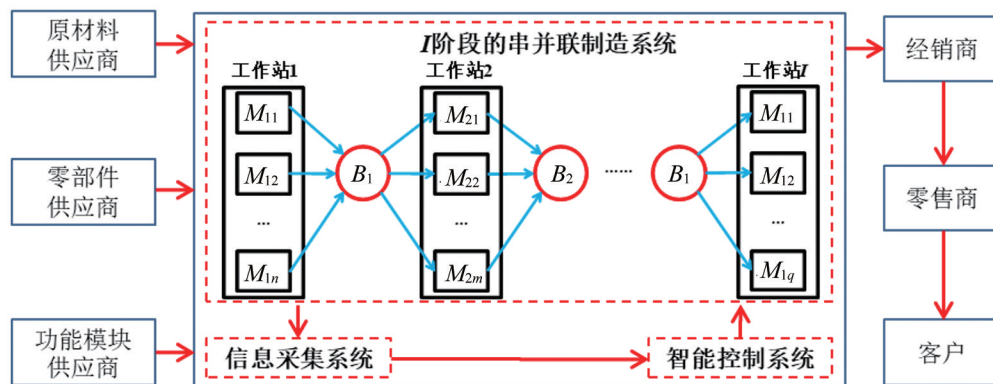


图1 基于物流的制造供应链网络结构

韧性制造系统面对机器故障、自然灾害、恐怖袭击、传染病大流行等内外部破坏性事件时必须具有极强的适应和功能恢复能力,其韧性内涵主要体现在“集中控制以建立多层防护”和“自动调节以适应环境变化”2个方面,并通过刚柔结合的制造系统结构以及基于知识和数据的实时反馈控制实现^[23]。

遵循“激励-响应-特性分析”思路,从韧性制

造系统激励来源、韧性响应过程和制造系统韧性特征等3个方面进行分析,并提出韧性制造系统的关键支撑技术。

1) 激励——制造系统破坏性事件来源。

面向产品制造全生命周期,Kusiak^[24]提出可能影响制造系统韧性的因素清单,其中包含能源、材料和组件、工艺过程和有形资产、运输方式、供应链、可重新配置性、物流、生产能力、能力、质量、可

持续性、劳动力、社会因素、自然灾害、网络安全和传染病大流行等。以核心制造企业内部生产系统作为分界线,将这些因素分为2类:内部因素,包含组织结构调整、机器故障或通信网络中断、生产规划和控制调整、计划外停机;外部因素,包含自然灾害(飓风、地震、雪灾等)、人为事故(恐怖主义、供应商破产、保护主义)等。各种激励作用于制造供应链网络结构,触发制造系统韧性响应过程。

2) 响应——制造系统韧性过程。

破坏性事件对制造系统的影响分为准备阶段、破坏性事件发生、系统第一响应、初始影响、完全影响、恢复准备、恢复过程和长期影响8个阶段^[25]。针对制造企业内部典型的包含 I 阶段的串并联制造系统模型(如图1所示,其中 S_i 表示第 I 阶段包含的机器数量, M_{ij} 表示第 i 阶段的第 j 台机器),Gu等^[18]将机器故障对制造系统吞吐量的影响过程分为破坏开始、破坏结束开始恢复、完全恢复后在新稳态

下运行3个阶段,同时对两阶段系统进行精确分析并为通用多阶段系统开发近似分析方法。

破坏性事件发生的整个过程中,制造系统的性能或状态随时间不断演变。破坏性事件的影响可以通过不同的系统性能指标进行反映,如产量、在制品库存等。根据罗森塔尔提出的危机管理模型,突发事件的发展过程可以划分为预防、准备、响应和恢复4个阶段。为了系统且清晰地描述制造系统在破坏性事件激励下的响应过程,构建制造系统韧性过程模型如图2所示,其中横轴表示时间,纵轴表示制造系统性能,分别包含初始性能 p_0 、恢复性能 p_1 以及最低性能 p_l 。根据制造系统应对破坏性事件的响应过程,将制造系统韧性过程划分为预防阶段(或稳定运行阶段)、准备阶段、响应阶段、恢复阶段和适应阶段。其中,破坏性事件发生前为制造系统稳定运行阶段,可以理解为预防制造系统发生破坏性事件的阶段。

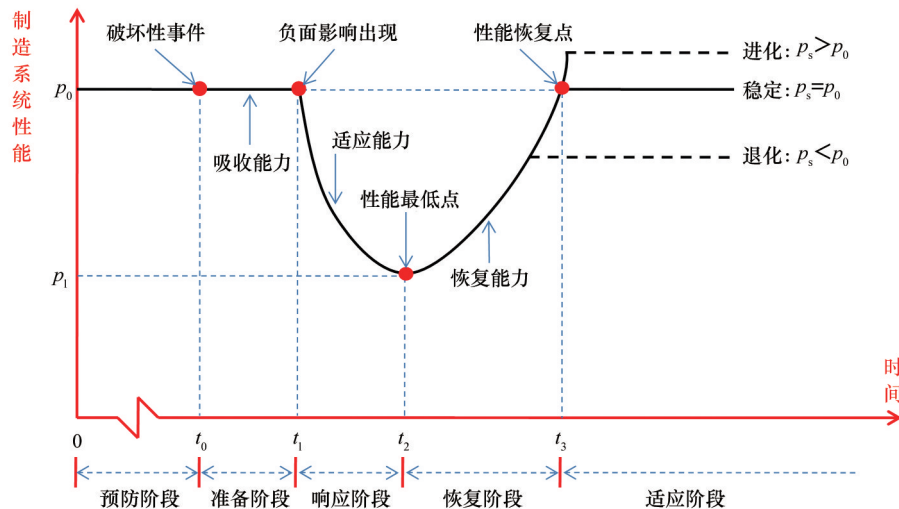


图2 制造系统韧性过程模型

3) 韧性制造系统特性分析。

对于制造系统韧性特征,可将其描述为吸收能力、适应能力和恢复能力^[26]。通过分析核心制造企业内部生产结构及其韧性过程,制造系统韧性很大程度上取决于配置(即制造系统结构),配置方案通常可分为串行线、并行线和混合系统。目前主要面向包含有限缓冲区和不可靠机器的串并行系统(图

1)开展广泛研究,针对两阶段并行系统进行系统性能精确分析^[27],其中机器包含工作、故障和闲置3种状态,并使用矩阵或精确马尔科夫^[28]等方法分析系统性能。而针对多阶段系统,目前主要通过近似方法描述稳定状态下的系统行为,导致故障环境下的一些瞬态特性可能会丢失^[29]。韧性制造系统中的韧性强调制造系统适应扰动和从扰动中恢复的能

力, Moghaddam 等^[9]通过数值分析探讨系统配置、缓冲区容量和机器可靠性对制造系统韧性指标的影响,指出并行系统韧性强于串行系统、设置缓冲区可以减轻破坏性事件影响,且缓冲区容量越大,制造系统韧性越强。

4) 韧性制造系统关键技术。

面向大规模个性化生产的韧性制造系统必须为一种开放式智能制造系统^[9],关键驱动因素有开放式设计^[2]、制造数字化(亦称数字孪生^[30])、3D 打印和智能控制等。

开放式设计:客户参与产品价值共创是满足客户个性化需求、实现积极客户体验的重要途径,主要途径包含客户参与设计的网络交互平台和开放式体系结构产品平台,前者涉及数据收集与挖掘分析、物联网与交互可视化等关键技术,后者定义模块化体系结构和通用接口,实现不同设计人员或团队的设计方案集成以有效且高效地满足客户个性化需求。开放式设计方法基于客户参与价值共创过程,通过挖掘和满足客户的显性和潜在需求、获取客户体验数据等优化个性化产品设计方案,有利于吸收客户需求变化对制造系统的干扰。

数字孪生:数字孪生技术面向物理世界中制造系统、工艺流程、产品和/或服务的全生命周期,通过智能感知和工业以太网等实现相关大数据采集,将物理实体和系统的属性、结构、状态、性能、功能和行为等映射到信息世界,构建高保真的动态多维/多尺度/多物理量模型,为观察、认识、理解、控制乃至改造物理世界提供有效手段。基于数字孪生技术模拟仿真、监控、评估、预测、优化和控制等功能,实现缩短产品设计周期、提高制造系统效率、适应环境变化和实时响应扰动等目标。

3D 打印:3D 打印(也被称为增材制造)突破传统“减材制造”局限性,通过逐层增加材料以生成三维实体,具有其独特优势,主要在于不受传统机械加工设备的限制并能按照客户高度个性化的设计方案制造出任何复杂结构的产品。3D 打印以其在定制化、低成本、高效率、变结构、灵活性等方面优势,有效且高效地响应复杂多变的市场需求,已成为实现大规模个性化产品设计与制造的关键支撑

技术,并在航空航天、生物医药、建筑和汽车等行业获得成功应用。文献[31]开展增材制造对供应链韧性的影响研究并指出,增材制造对提升供应链主动预防能力、响应能力和设计水平起着积极作用。

智能控制:智能控制系统是韧性制造系统的神经中枢,是企业正常运行的重要保障。不稳定和不确定性遍布于制造系统各个环节,不确定性越大,对智能控制系统的要求越高。基于制造系统数字孪生模型,利用大数据、机器学习、生物识别等人工智能技术使系统具备可靠的技术智能、规则智能和知识智能^[32]。随着新一代信息技术的快速发展,智能控制系统针对制造系统内外部干扰具有很强的适应能力,并能快速调整以恢复到最优状态。

此外,产品和制造系统模块化以及产品延迟差异化是实现韧性制造的重要策略,前者有利于有效跟踪模块冗余、评估模块状态和确定等效模块;后者主要从以下2个方面支持面向韧性的设计方法:(1)产品重新定位,旨在满足不断变化的产品需求,同时保留大多数产品配置;(2)根据主要产品配置的库存,在短时间内快速响应需求增长。

3 制造系统韧性评价指标

基于经典应急理论,文献[33]定义吸收力、适应力和恢复力3个韧性指标以评估电网韧性,其中吸收力指的是系统自身减少突发事件所产生消极影响的内生抗破坏能力,主要表现为从突发事件发生到破坏影响出现之间系统自身能够维持性能稳健;适应力是指从初始性能下降到最低性能期间通过被动的调整以适应破坏事件带来的消极影响的能力,主要表现为缓解和制止性能下降的能力;恢复力是指系统由外界干预从而恢复性能的能力。李凡等^[12]选取系统响应时间、系统恢复时间、系统执行任务能力的恢复度、系统执行任务能力的降级度4个指标构建指挥信息系统网络结构韧性度量的指标体系。文献[34]从抵御能力、恢复能力、再组织能力、创新能力等4个维度构建民营经济韧性的评价指标体系。文献[19]提出生产损失、生产能力稳定时间和减产状态持续时间3个重要的制造

系统韧性指标。系统补偿生产损失的通用方法是通过加班,加班时间越短意味着系统从破坏性事件中恢复的能力越强,因此将从生产损失中恢复过来的加班时间作为一个韧性指标;第二个韧性指标是系统恢复其生产能力至稳定状态的时间,时间越短,制造系统更具韧性;减产状态持续时间是指从破坏性事件导致制造系统减产开始到系统恢复到稳定状态的时间间隔,时间越短,制造系统更具韧性。基于图2所示的制造系统韧性过程模型,结合制造系统研究的基本目标TQCSE^[35]——时间(time to market)、质量(quality)、成本(cost)、服务(service)和环境(environment),分析破坏性事件对制造系统性能的影响情况,定义制造系统韧性评价指标如下。

降级度(p_0-p_1):表示破坏性事件出现前制造系统性能 p_0 与因破坏性事件负面影响导致的最低性能 p_1 之差,即制造系统性能下降幅度,其值越小,反映制造系统对破坏性事件的适应能力或吸收能力越强。降级度衡量破坏性事件对制造系统综合性能的影响程度,包含效率降级度、质量降级度和环境降级度等。

恢复度(p_s-p_1):表示制造系统进入另一稳定状态后的性能 p_s 与因负面影响导致的最低性能 p_1 之差,反映制造系统面向破坏性事件的恢复能力以及系统演化升级能力。其中, $p_s>p_1$ 表示制造系统经改进后达到某一进化状态,性能优于初始性能; $p_s=p_1$ 表示制造系统恢复到破坏性事件发生前的稳定状态;而 $p_s<p_1$ 表示制造系统退化到某一低性能稳定状态。与降级度指标类似,恢复度衡量制造系统在破坏性事件影响终止后的性能恢复水平,包含效率恢复度、质量恢复度和环境恢复度等。

准备时间(t_1-t_0):从发生破坏性事件到制造系统出现负面影响的时间间隔,其数值越大,制造系统具有更为充裕的时间进行优化调整以减轻负面影响,同时也反映制造系统对破坏性事件的适应能力或吸收能力越强。需要注意的是,出现负面影响的时刻是指制造系统TQCSE中任一性能指标开始劣化的时刻。

响应时间(t_2-t_1):从出现负面影响到制造系统

性能降至最低点的时间间隔,其数值越小,破坏性事件负面影响程度越低,同时也表明制造系统对破坏性事件负面影响的吸收能力越强。同理,制造系统性能最低点以TQCSE中所有性能指标达到最劣值的时刻为准。

恢复时间(t_3-t_2):从性能最低点到制造系统进入另一稳定状态(性能恢复点)的时间间隔,其值越小,反映制造系统从破坏性事件负面影响中恢复到稳定状态的能力越强。此时,制造系统TQCSE均进入新的稳定状态。

4 制造系统韧性优化策略

如何提升制造系统韧性?制造系统的韧性主要体现为主动防御、动态适应和快速恢复能力,具体措施包含创新、布局和控制等^[36],即通过材料、设计、制造、服务与循环利用等全链条优化创新,适应客户个性化需求的快速变化并高效率、高质量地完成生产任务以实现积极的客户体验;通过优化供应商布局、制造系统布局、产品销售和服务网络布局,平衡制造系统节拍、使用可重构机床和可移动堆栈,消除瓶颈工艺对生产效率的影响,并通过优化调度缓解或消除机器故障的负面效应;基于工业互联网、人工智能等先进技术,构建制造系统数字孪生模型,通过工业大数据挖掘快速检测故障信息并及时采取有效控制措施,实现制造系统的智能控制。

基于图3所示的制造系统韧性过程模型,综合考虑供应链网络和内部生产系统结构层面并重点关注预防、准备、响应和恢复4个阶段,较为全面、具体地分析制造系统韧性优化策略。适应阶段可视为应对下一破坏性事件的预防阶段,为免重复,不对适应阶段专门进行说明。此外,准备阶段和响应阶段处于明确发生破坏性事件之后,且在一定程度上需要快速采取应对措施以降低负面影响,可将这2个阶段所采取的韧性优化策略结合起来考虑。

聚焦核心制造企业,构建制造系统供应链网络,供应链网络包含多级多源供应商、核心制造企业、区域经销商、零售商和客户等节点。无论随机

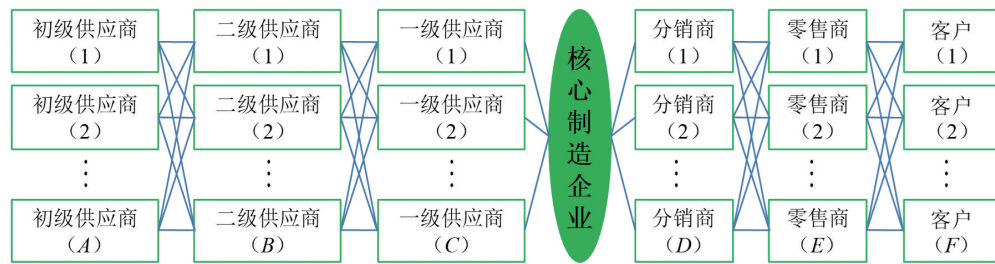


图3 制造系统供应链网络

破坏性事件作用于供应链网络任一节点或节点间任一连接纽带,都将影响制造系统综合性能。根据Manuj等^[37]提出的供应链风险管理5步模型,包括风险识别、风险评估、选择适当的风险管理策略、策略实施以及缓解供应链风险,以提升制造系统预防、应对和恢复等能力为目标,提出制造系统供应链网络韧性优化策略如下。

1) 构建供应链网络风险监控体系。首先,分析制造系统供应链网络的影响因素,基于复杂网络理论探索网络节点关联关系,构建供应链风险评价指标体系,结合节点和/或连接边重要性分析,量化风险评估以供决策;其次,推动供应链数字化和可视化,通过快速准确收集、处理和分析数据,为制造企业监测和降低供应链风险、全面掌握供应链上下游资源动态和有效采取风险应对措施等提供保障;最后,制定快速需求响应计划,根据订单重要性进行产能分配和调度优化,通过灵活性和敏捷性有效且高效应对风险挑战。

2) 建设多元化物流与销售网络。(1) 物料供应方面着眼于供求平衡,实施候选供应策略,即在某一供应商节点发生中断的情况下,灵活地从一或多个候选供应商处获取供应;通过增加缓冲库存和开发多级供应商等降低风险波动、维持稳定运营和可持续发展,保证关键材料和物资安全。(2) 核心制造企业自主提升多元产品创新能力,满足多样化、个性化市场需求,降低市场端风险;同时需加强资金流动性,为供应端提供保障。(3) 销售方面需拓展多元化消费渠道,积极采取线上线下融合的新零售模式,有效缓解制造系统供应链下游干扰或破坏性事件引发的负面影响。(4) 有效平衡和动态整合交付速度、服务水平、响应能力、可靠性和低成本

分配等物流能力,动态整合越好则韧性越强。

3) 推动供应链协同绿色发展。树立“共赢”理念,以客户个性化需求为牵引,推动需求到供应间物料、信息和资金等全链条的有效畅通。核心制造企业必须加强同上下游合作伙伴的紧密联系与协同合作,建立合理的风险共担和利益共享机制,基于信任、承诺和协议等深入合作,实现资源和信息共享并促进业务流程升级。一方面,基于生产能力、资金水平、物流服务、安全性等综合评估选择供应商,通过适度产业合作、人员外包和协同制造加强资源配置,增进与供应商协同,为抵御原材料短缺和生产进度受阻等风险做好准备。另一方面,增进与客户协同,通过客户参与价值共创方式全方位满足客户个性化需求,优化客户价值体验,提升客户满意度;构建高效的供应链服务集成平台,有效平衡供需关系、平稳资金流动和调整运输方式等,提升供应链整体效率和企业核心竞争力。

对于核心制造企业而言,企业内部生产系统的配置、运行和管理对制造系统韧性起着关键作用。面向核心制造企业的内部运行,针对图2所示的包含 I 阶段的串并联制造系统模型,重点分析生产线配置(包含物理元件及其拓扑网络等)、人员布置、订单调度等因素对制造系统性能的影响。文献[12]针对指挥信息系统网络结构提出的韧性性能优化策略,包含网络拓扑结构设计、网络节点或连边修复、冗余和替代策略、适应性重构等。同理,制造系统韧性主要取决于构成组件的物理强度、运行方式和拓扑结构,为此提出制造系统内部结构网络韧性优化策略,详细阐述如下。

1) 优化制造系统内部网络拓扑结构。制造系统内部网络主要由工作站、工作站间的缓存区、物

料传输系统以及物理元件与控制系统之间的通信网络等构成,其中,工作站包含一台或多台功能相同或相近的加工/装配设备,缓冲区主要有固定容量和无限容量两种。网络拓扑结构优化设计旨在减少系统面对风险和任务变化时的能力降级度,文献[11]已验证并联制造系统的韧性优于串联制造系统;采用网络节点或者连边修复策略可以有效缩短制造系统应对风险的响应时间,并提升制造系统性能恢复度;采用冗余和替代策略,增加并行生产线或工作站中设备能力冗余和可替代程度,若某一设备发生故障,制造系统恢复时间将明显缩短;提升制造系统适应性重构能力,有效缩短恢复时间和提升性能恢复度。

2) 改进制造系统组件的物理强度。突发事件通过制造系统内部结构网络节点或连接边起作用,增强制造系统组件及组件间连接元件的物理强度是提升韧性的最直接方式。一方面,提升加工设备、工装夹具、传感器等的可靠性,通常情况下,可靠性越高则制造系统抵御和应对干扰的能力越强,韧性越强;另一方面,增强制造系统组件的初始性能,在保证制造系统稳健运行的前提下,提升系统抗干扰的能力。此外,增强制造系统组件间的连接强度也是增强系统韧性的重要环节。

3) 改进制造系统运行模式。制造系统由多个相互关联的层级组成,包括终端组件层、控制元件层、人工操作层和检修层。终端组件层包括加工中心(机床)、物流系统、辅助系统等构成制造系统的基本功能单元;控制元件层包括制造系统中的控制单元,具有驱动制造系统运行的功能,利用控制和仪表等设备对终端元器件进行控制和监测;人工操作层接收控制元件层反馈的制造系统运行信息,对可能发生的干扰进行风险评估和预测,利用控制元件层对终端组件层发送优化应对命令;检修层相对独立,不影响制造系统的正常运行,接收人工操作层的警报后对整个制造系统的故障进行维修,增强检修人员的操作能力有利于提高制造系统修复能力。此外,采用孤岛策略以应对突发事件潜在的连锁故障。

以上策略相互补充、相互促进,策略的组合应

用有利于充分提升制造系统韧性。

5 结论

韧性制造系统以其强大的抵御灾变和功能恢复能力,成为大规模个性化设计必不可少的支撑技术。深入分析系统韧性内涵并综述制造系统韧性研究现状;面向制造系统供应链网络和内部生产系统结构2个层面分析制造系统的韧性过程,重点针对韧性制造系统的模型构建、关键技术、评估指标与优化策略等方面展开研究,提出以下韧性制造系统研究的热点方向。

1) 充分考虑各类破坏性事件发生频率以量化研究其对制造系统韧性的影响,更加精细地为企业决策行为提供指导;考虑非预期破坏性事件的传播和制造系统的恢复能力,指导韧性制造系统设计以缓解破坏性事件风险,并建立韧性制造系统相关知识库。

2) 针对制造系统破坏性事件研究韧性优化控制策略,使制造系统在更短时间内恢复稳定状态;研究如何充分利用破坏性事件持续阶段开展机会维护或成组维护,实现从长远角度来增强制造系统韧性。

3) 明确制造系统韧性研究边界,进一步开展制造系统韧性量化评估与实证研究;研究制造系统韧性评估与优化方法,实现不同制造系统之间的韧性性能比较。此外,在实际决策过程中,韧性优化策略与运营成本密切相关,如何在满足成本约束条件下优化策略组合以最大程度地提升制造系统韧性是重要研究方向之一。

参考文献(References)

- [1] 景轩,姚锡凡. 大数据驱动的云雾制造体系架构[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(9): 2119-2139.
- [2] 肖人彬,赖荣桑,李仁旺. 从大规模定制化设计到大规模个性化设计[J]. 南昌工程学院学报, 2021, 40(1): 1-12.
- [3] Tetsuo T, Florian M. Resilient architecture for cyber-physical production systems[J]. CIRP Annals - Manufac-

- turing Technology, 2018, 67(1): 161–164.
- [4] 梁福军, 宁汝新. 可重构制造系统理论研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(6): 36–43.
- [5] Moghaddam M, Deshmukh A. Resilience of cyber-physical manufacturing control systems[J]. Manufacturing Letters, 2019, 20: 40–44.
- [6] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4 (1): 1–23.
- [7] Madni A M, Jackson S. Towards a conceptual framework for resilience engineering[J]. IEEE Systems Journal, 2009, 3(2):181–191.
- [8] 李倩, 郭恩栋, 李玉芹, 等. 供水系统地震韧性评价关键问题分析[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 83–88.
- [9] Kusiak A. Open manufacturing: A design-for-resilience approach[J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(15): 4647–4658.
- [10] Bruneau M, Reinhorn A. Overview of the resilience concept[C]//The 8th US National Conference on Earthquake Engineering 2006. San Francisco: Earthquake Engineering Research Institute, 2006: 3168–3176.
- [11] Chaudry M, Ekins P, Ramachandran K, et al. Building a resilient UK energy system[R]. London: UK Energy Research Centre, 2011.
- [12] 李凡, 张杰勇. 指挥信息系统网络结构的韧性问题研究[J]. 电光与控制, 2020, 27(4): 49–54.
- [13] 鞠平, 王冲, 辛焕海, 等. 电力系统的柔性、弹性与韧性研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 1–7.
- [14] Tang C S. Robust strategies for mitigating supply chain disruptions[J]. International Journal of Logistics: Research and Applications, 2006, 9(1): 33–45.
- [15] 樊雪梅, 卢梦媛. 新冠疫情下汽车企业供应链韧性影响因素及评价[J]. 工业技术经济, 2020, 39(10): 21–28.
- [16] Namdar J, Li X, Sawhney R, et al. Supply chain resilience for single and multiple sourcing in the presence of disruption risks[J]. International Journal of Production Research, 2018, 56(6): 2339–2360.
- [17] Lee S, Gu X, Ni J. Stochastic maintenance opportunity windows for unreliable two-machine one-buffer system [J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(13): 5385–5394.
- [18] Gu X, Jin X, Ni J, et al. Manufacturing system design for resilience[J]. Procedia CIRP, 2015, 36: 135–140.
- [19] Gu X, Jin X, Ni J. Resilience measures of manufacturing systems under disruptions[C]//Proceedings of the ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC2014. Detroit: ASME, 2014: V001T04A007(10).
- [20] Caputo A C, Pelagagge P M, Salini P. A methodology to estimate resilience of manufacturing plants[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(13): 808–813.
- [21] Bergmann U, Heinicke M. Resilience of production systems by adapting temporal or spatial organization[J]. Procedia CIRP, 2016, 57: 183–188.
- [22] Ljasenko S, Lohse N, Justham L. A comparison of the manufacturing resilience between fixed automation systems and mobile robots in large structure assembly[J]. Procedia CIRP, 2016, 57: 235–240.
- [23] 杜如虚. 中美制造工程比较分析与韧性智能制造系统[R]. 深圳: OFweek维科网及高科会, 2019.
- [24] Kusiak A. Fundamentals of smart manufacturing: A multi-thread perspective[J]. Annual Reviews in Control, 2019, 47: 214–220.
- [25] Sheffi Y, Rice Jr J B. A supply chain view of the resilient enterprise[J]. MIT Sloan Management Review, 2005, 47(1): 41–48.
- [26] Vugrin E D, Warren D E, Ehlen M A. A resilience assessment framework for infrastructure and economic systems: Quantitative and qualitative resilience analysis of petrochemical supply chains to a hurricane[J]. Process Safety Progress, 2011, 30(3): 280–290.
- [27] Liu J, Yang S, Wu A, et al. Multi-state throughput analysis of a two-stage manufacturing system with parallel unreliable machines and a finite buffer[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 219(2): 296–304.
- [28] Diamantidis A C, Papadopoulos C T. Exact analysis of a two-workstation one-buffer flow line with parallel unreliable machines[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 197(2): 572–580.
- [29] Burman M H. New results in flow line analysis[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [30] 李仁旺, 肖人彬. 数字孪生驱动的大数据制造服务模式[J]. 科技导报, 2020, 38(14): 116–125.
- [31] Naghshineh B, Carvalho H. The impact of additive manufacturing on supply chain resilience[C]//Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems. Berlin: Springer, 2020: 214–221.
- [32] 张映锋, 郭振刚, 钱成, 等. 基于过程感知的底层制造资源智能化建模及其自适应协同优化方法研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 1–10.
- [33] 肖智文, 王国庆, 朱建明, 等. 面向突发事件的电网韧性能力评价及构建方法[J]. 系统工程理论与实践,

- 2019, 39(10): 189–197.
- [34] 程翔, 杨宜, 王泽然, 等. 民营经济韧性的评价体系构建与应用[J]. 北京联合大学学报(人文社会科学版), 2020, 18(3): 79–88.
- [35] 郑力, 江平宇, 乔立红, 等. 制造系统研究的挑战和前沿[J]. 机械工程学报, 2010, 46(21): 124–136.
- [36] 梁玉桃, 杜如虚. 有远见的公司都在发展韧性制造[N]. 中国科学报, 2020–09–07(004).
- [37] Manuj I, Mentzer J T. Global supply chain risk management[J]. *Journal of Business Logistics*, 2008, 29(1): 133–155.

Resilient manufacturing systems for mass personalization

LIN Wenguang¹, LAI Rongshen¹, XIAO Renbin^{2*}

1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China
2. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract With the development of the new generation information technology and the advanced manufacturing technology, the mass personalization has gradually replaced the mass customization as the current mainstream production mode. The resilient manufacturing system shows its ability to respond to and recover from the emergencies or the interruptions inside and outside the manufacturing system, and has become a key technology to support the mass personalization production. First, the co-evolution process of the production mode and the manufacturing system is discussed, focusing on the adaptive relation between the mass personalization production and the resilient manufacturing system, and the connotation of the system resilience is highlighted, as well as the research status of the resilience of the manufacturing system. Based on the analysis of the resilience process of the manufacturing system in the two levels of the supply chain network and the manufacturing enterprise's internal processing equipment network, a manufacturing supply chain network structure model is built based on the perspective of the material flow for further analyzing the resilience issues of the manufacturing system. The sources of the incentives, the resilience response processes and their characteristics, and the key supporting technologies of the resilient manufacturing systems are analyzed, and the evaluation index and the optimization strategies of the resilient manufacturing systems for the mass personalization production are suggested. Finally, the hot research directions of the resilient manufacturing systems for the mass personalization production are outlined.

Keywords resilient manufacturing system; mass personalization; open design; resilience evaluation; resilience optimization ●



(责任编辑 刘志远)