DOI: 10.3901/JME.2021.07.138

再制造服务的广义内涵、研究现状与发展趋势*

王 蕾 郭钰瑶 张泽琳 夏绪辉

(武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室 武汉 430081)

摘要: 再制造服务是再制造与服务相融合的绿色循环产业形态。阐述了再制造服务的广义内涵, 主要包括再制造服务的基本概念、再制造服务过程、再制造服务相关关联关系、再制造服务广义产品以及再制造服务价值链等。在此基础上, 分析再制造及其服务、再制造服务需求发现与获取、再制造回收服务、再制造拆卸服务、再制造加工服务、再制造集成等相关研究应用现状。最后论述了再制造服务的发展趋势。

关键词: 再制造服务; 内涵; 研究现状; 发展

中图分类号: TG156

Extensive Concept, State-of-the Art Developing Trends of Remanufacturing Service

WANG Lei GUO Yuyao ZHANG Zelin XIA Xuhui

(Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology of Ministry of Education,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract: Remanufacturing service is a green circular industry form integrated by remanufacturing and service. The broad meaning of remanufacturing service is expounded, including the basic concept of remanufacturing service, remanufacturing service process, remanufacturing service correlation, remanufacturing service generalized product and remanufacturing service value chain. On this basis, the research and application status of remanufacturing and its service, remanufacturing service demand discovery and acquisition, remanufacturing recovery service, remanufacturing disassembly service, remanufacturing processing service and remanufacturing integration are analyzed. And, the development trend of remanufacturing service is discussed.

Key words: remanufacturing services; concept; state-of-the research; developing

0 前言

工业经济的迅猛发展为人类创造了丰富的物质财富, 促进了人类文明的进步, 但与此同时也带来了资源和环境问题, 人类面临着生态环境恶化和资源耗竭的严峻挑战。我国机电产品量大面广, 其生产制造过程消耗了大量不可再生资源, 目前已进入报废的高峰期。若这些机电产品不能在退役后合理充分利用, 将导致严重的环境污染和巨大的资源浪费。再制造作为我国战略性新兴产业, 是实现退役产品再利用和循环经济发展的重要支撑。以绿色发展为基本方针的《工业绿色发展规划(2016-2020年)》, 强调我国应“发展循环经济, 提高资源回收

利用效率”, “积极发展再制造”; 工信部节能与综合利用司在解读《高端智能再制造行动计划(2018-2020年)》时指出: “十三五”时期, 需以再制造全产业链建设为核心, 探索建立上下游链条相协调再制造生态圈; 以信息化、互联网技术应用为突破, 构建新型高端智能再制造技术、管理与服务体系^[1]。可见, 对废旧机电产品再制造及服务进行研究是贯通“资源-产品-报废-再制造产品”循环型产业链的策略之一, 也是实现其节能、环保、可持续发展的重要途径。

事实上, 在服务经济全球化和服务型制造日渐成熟的前提下, 再制造依托服务化的运作模式来提升其个性化服务能力的发展趋势已经受到了学者们的关注, 其中最直观体现再制造服务的是再制造产品服务系统(Remanufacturing product service system, RPSS)^[2], 其次, 针对再制造全链条的各个环节均有

* 国家自然科学基金(51805385)和襄阳市重大科技计划(2020AAT001420)资助项目。20200401收到初稿, 20201103收到修改稿

学者体现出服务化的思想,如:第三方回收或逆向物流、失效分析与状态监测服务、个性化方案定制、外包加工、全生命周期服务追踪与评价等。部分再制造服务相关研究已取得一些研究成果,如:刘宇熹等^[3]从收益和环境效益的视角对一种面向再制造企业 and 用户的产品租赁服务系统进行了分析;CHEN 等^[4]鼓励消费者退回旧产品,提出了一种第一期退回的产品再制造后加入第二期产品销售中的定价模式;周维浪等^[5]考虑消费者购买行为,对新产品和再制造产品定价和服务决策及协调问题进行了分析;TEIXEIRA 等^[6]为评估再制造服务合同中客户及服务者的权利与义务,建立了共生模拟系统并讨论其在再制造系统决策支持中的作用。相关研究积极推动了再制造及其服务相关研究的发展,但研究成果主要集中于单环节的再制造产品服务或再制造服务模式。从再制造服务化,整合资源分散服务和分散资源集成服务过程实现的视角,对相关基础理论体系和方法的研究相对缺乏。为了系统开展再制造服务的相关研究,王蕾等^[7]提出了再制造服务(Remufacturing services, RMS)的概念,针对服务资源数量庞大,集成调控困难的问题,提出了一种多粒度再制造服务资源模块化组织模式及其模块化方法,并对再制造服务需求获取方法进行了初步研究^[8]。为了进一步深化对再制造服务的认知,本文将从再制造服务的概念、过程、产品、价值链等角度,探讨再制造服务的广义内涵,并从再制造服务各环节梳理相关研究和应用现状,提出再制造服务研究的发展趋势,为构建再制造服务理论体系提供参考。

1 再制造服务的广义内涵

1.1 再制造服务基本概念

服务型制造是通过产品融合服务、服务需求方全程参与、企业相互提供生产性服务和服务性生产,实现分散化制造资源的整合和各自核心竞争力的高度协同^[9]。借鉴服务型制造的思想,考虑再制造自身所具有的服务特性,可将再制造服务(Remufacturing services, RMS)理解为:以再制造服务集成方/集成平台为核心的再制造服务供应方集群面向服务需求方或其他服务相关方的服务,即:以再制造服务化为基础,对再制造服务供应方在整个产业链上运作过程中与服务需求相关的价值增值活动提供服务,包括提供再制造工程整体解决方案和再制造产品服务;在再制造活动实施过程中,以

生产性服务为基础,对失效或退役的产品,提供再制造回收、可再制造性评估决策、再制造设计、再制造加工、信息化再制造等再制造生产性专业服务,是一种将整合资源分散服务和提升再制造价值的集成服务方式。再制造服务的内涵随着社会发展和技术进步不断扩展。

再制造服务过程中涉及的资源、组织、服务价值及其关联关系和动态配置等,共同构成再制造服务系统。再制造服务系统不仅包含具有明确需求的“服务需求方”、需求响应方即“服务集成方”和“服务供应方”,还包含没有直接需求却仍与服务过程相关的“其他服务相关方”,这四个服务主体共同构成再制造服务链,服务在服务链中即时产生和传递,其概念模型如图 1 所示。

图1 再制造服务概念模型

(1) 再制造服务需求方。再制造服务需求方指一切具有主动服务需求的主体,包括普通用户、再制造企业法人、政府、投资者等,其既可因单纯需要技术服务或再制造产品,主动向服务集成方提出服务需求;也可因其所拥有的在役产品部分功能故障/失效或退役产品具有重用价值,主动向服务集成方提供在/退役产品和服务需求。再制造服务需求方,作为再制造服务过程的双元环节,再制造服务过程始于其服务需求的提出,止于其服务评价的给定,从而形成标准的闭环再制造服务链。

(2) 再制造服务集成方。再制造服务集成方是掌握了再制造服务领域主要需求趋势和服务供应方技术、产品与应用方案,能依托再制造服务集成平台的支持,为服务需求方提供集成服务解决方案,并作为产业链“中游”和整个服务系统的核心,以“总包”身份,选择和组织其“上游”分散的多个服务供应方为其“下游”服务需求方提供再制造服务,同时参与再制造服务全过程,包括指导多服务供应方根据解决方案进行服务流程软重组、服务资源整合、服务过程管控、服务产品交付和服务评价等,并对整个服务响应过程进行监管。

(3) 再制造服务供应方。再制造服务供应方是

再制造服务链中再制造服务集成方“上游”的单体服务供应方,以“众包”身份参与再制造服务过程,提供服务资源并完成服务集成方指定的服务任务。再制造服务供应方,可以是拥有相关设备、技术人员和资质的企业法人,也可以是具备经验和认证的技术个人。服务供应方的服务供应方式,既可以根据集成服务解决方案,在服务集成方的指导与管理下直接将支持性服务传递给服务需求方,也可以作为服务集成方或另一服务供应方的外包单位,为其提供人、物、技术等服务资源。

(4) 其他服务相关方。其他服务相关方是再制造服务过程中涉及的退役产品拥有方或潜在市场需求方、产品原制造方、新零部件制造方等无主动服务需求或无直接再制造服务活动的其他相关个人或企业法人。如拥有退役产品的用户,虽未主动提出

服务需求,但可能因政策/市场引导而将其拥有的退役产品卖给再制造回收服务方,或因参与到“以旧换再”的活动中而成为再制造服务的原材料提供者和潜在市场用户。

1.2 再制造服务过程

再制造服务过程源于服务需求方主动提出服务需求、潜在市场用户需求的被动发现,或退役产品进入回收端;终止于“广义物理产品+广义服务”多类型服务产品包的交付和服务评价的完成。该过程以服务集成方为中心,随着服务需求和市场潜在需求的变化,再制造服务集成方不断更新集成服务方案,指导和管理再制造服务供应方不断进行服务流程软重组和分散服务资源集成服务,形成再制造服务供应方动态联盟。整个过程涉及无形活动、有形资源和服务知识等多个流,是一个复杂的动态系统过程,如图2所示。

图2 再制造服务过程模型

整个再制造服务过程包括二级服务响应,即第一级服务响应:需求性服务和第二级服务响应:生产性服务。完整的服务过程,由第一级服务响应至第二级服务响应中的各模块依序逐级执行,但根据不同需要,二级服务响应及其中的每个模块均可独立或跨序组合执行服务,并提供服务产品。

(1) 第一级服务响应:再制造服务集成方和供应方面向服务需求方的需求性服务。该需求性服务响应级,包括“主动需求性服务”和“潜在需求性服务”两类并行服务。

1) 面向服务需求方的主动需求性服务,源于服务需求方主动向服务集成方提出明确的服务需求,服务过程可分为需求分析与分解,服务匹配和集成服务方案的形成。

① 服务需求获取和分解。服务集成方对门户系

统获取的主动服务需求,进行语义表达并形成服务需求本体,需求本体映射为服务总任务后,将其分解为合理粒度的服务活动任务和服务资源元任务。

② 服务活动自适应匹配与服务供应方匹配。根据服务活动任务,确定服务约束属性,构建并求解多维 QoS(Quality of service)服务约束模型,确定服务活动抽象模块,采用启发式算法对活动抽象模块进行检索、匹配,形成服务活动抽象模块序列;对可完成同类服务活动的服务资源知识本体按元需求进行匹配,形成可执行的服务业务流程方案。

③ 集成服务方案形成。根据组合服务群决策,确定理想集成服务方案。

2) 面向其他服务相关方的潜在需求性服务,是对没有主动提出再制造服务需求的潜在市场用户等其他服务相关方,通过引导其参与再制造服务过程

的某个环节,并根据其参与效益为其提供一定价值回馈的过程,包括知识服务、销售服务等,进而使其发展为服务需求方。

① 面向其他服务相关方的知识服务。再制造服务集成方和供应方将所获取的失效信息、技术知识、产品知识等推送给潜在市场用户、新零部件制造方等其他服务相关方,为其提供购买和生产决策指导。如,拥有退役产品的潜在市场用户,可根据再制造服务供应方提供的退役产品可再制造性知识服务,在“以旧换再”或选购新产品过程中做出更科学的决策;新的零部件制造方可以将再制造集成方提供的技术知识作为零件设计与生产计划的参考,如根据失效信息改善零部件部分结构和性能等。

② 面向潜在市场用户的销售服务。再制造服务集成方通过统计分析挖掘出潜在市场用户,通过政府或市场营销策略,引导潜在市场用户参与到再制造服务过程中,并获取一定价值回馈。如以“以旧换再”的方式,让其通过提供退役产品和抵扣购买再制造产品,参与到再制造回收服务和再分销服务等过程。

(2) 第二级服务响应:再制造服务供应方面向再制造服务集成方或其他再制造服务供应方的生产性服务。再制造服务集成方根据一级响应得到的集成服务方案,组织再制造服务供应方进行“分散资源集成服务”的过程中,因单一服务供应方某项能力不足,从而产生多服务供应方面向服务集成方或

其他服务供应方的生产性服务。第二级服务响应,主要包括两个阶段。

① 面向服务任务的服务供应方业务流程软重构。服务集成方根据集成服务方案,按服务任务,组织匹配选中的多个服务供应方进行服务流程“逻辑”上的重新组织,即适应性的转变各服务供应方在总服务过程中的作业次序、供需关系及运作方式等。同时,服务供应方依据具体服务任务,对企业内部服务资源进行“逻辑”上的重新组织。

② 服务资源跨组织协同作业。服务供应方集群根据新的业务流程逻辑,在服务集成方指导下,执行跨组织的协同作业,直至整个服务过程结束。该过程中,服务集成方和各服务供应方将自身掌握的退役产品隐形知识、技术知识、产品数据知识等共享给合作方。

1.3 服务型制造、再制造、逆向供应链服务和再制造服务的关系

服务型制造,是将基于制造的服务与面向服务的制造融合,为产品全生命周期价值链中各利益相关者提供以促进价值增值为目标的服务性生产或生产性服务。再制造是机电产品逆向供应链中的重要价值增值环节,是实现产品多生命周期的关键。再制造服务衍生自服务型制造,又包含以再制造加工为核心的产品及其零部件逆向供应链服务,因此,四者在集成内容、管理模式等方面有许多相似性,对再制造服务的研究可以借鉴。四者对比如表 1 所示。

表 1 服务型制造、再制造、逆向供应链服务和再制造服务

对比指标	服务型制造	再制造	逆向供应链服务	再制造服务
主体渠道	服务需求方—服务集成方—服务供应方—服务需求方	旧产品拥有/需求方—旧产品回收/供应方—再制造方—再制造产品供应方—销售方—再制造产品需求方	旧产品拥有/服务需求方—服务集成方—服务供应方—原旧产品拥有/服务需求方或新产品服务需求方	旧产品拥有/服务需求方—服务集成方—服务供应方—原旧产品拥有/服务需求方或再制造产品服务需求方
体系核心	以制造服务集成方或产业链某供应方为核心	不同再制造产品,有多个不同的核心企业	以逆向供应链服务集成方或产业链某供应方为核心	以再制造服务集成方或产业链某供应方为核心
核心理念	制造及服务	在役产品升级或退役产品增值	废弃资源综合利用	在役/退役产品价值最大化
供应产品	物理产品、集成服务型产品、服务产品	物理产品	物理产品、服务产品、集成服务型产品	广义物理产品、广义集成服务型产品、广义服务产品
运营模式	需求拉动型	拉动型和推动型相结合	需求拉动型	需求拉动型和推动型相结合
产品生命周期	全生命周期	多生命周期	多生命周期	多生命周期
主体协调内容	服务计划协调、服务能力协调	生产计划协调、库存协调	服务计划协调、服务能力协调	服务计划协调、服务能力协调
盈利模式	提供综合性供应链服务业务	侧重在役产品升级或退役产品修复的短线/粗放盈利模式	注重可持续化盈利模式,对一切废弃物(废水、废气、废渣、废钢铁、废旧设备及零部件)资源化服务过程提供服务整体解决方案	注重可持续化盈利模式,对可再制造的废旧机电产品及零部件价值最大化服务过程提供服务整体解决方案

1.4 再制造服务广义产品

在服务型制造领域,广义产品是指根据服务需

求方多层次个性化需求,为其提供的“物理产品+多种服务”的多类型服务包。根据服务包中物理产

品和服务占比不同可将其分为 3 类: 纯物理产品、集成服务型产品(物理产品+服务)和纯服务产品。其中, 因“通过提供服务实现物理产品价值增值”的指导思想, 集成服务型产品成为服务型制造的主流产品形式。

再制造服务作为服务型制造、再制造、逆向供

应链服务的延伸, 再制造服务的广义产品继承并发展了现有广义产品的特性。再制造服务的广义产品, 是指在再制造服务的整个过程中, 为满足多层次个性化服务需求方直接需求或潜在市场用户需求, 向需求方提供的“广义物理产品+广义服务”的多类型服务包, 其产生如图 3 所示。

图 3 再制造服务广义产品的形成

(1) 广义物理产品, 是指以实现再制造物理产品对象价值最大化为目的, 依据物理产品对象内部失效特征所确定的生长规律和外部环境约束(生长需求、生长成本、生长服务能力)所确定的广义生长方案, 经过各类再制造广义生长加工过程产生的一系列物理产品, 包括: ① 退役产品性能提升或升级产生的高性能原产品; ② 退役产品中高价值部件优化选配或再设计后产生的高性能新产品; ③ 低价值废旧部件降级再制造产生的低性能新产品及零部件。其中, “高性能原产品”指再制造后物理产品与再制造前物理产品属同类产品, 即不改变原物理产品设计的前提下对其进行性能恢复或功能升级, 如某废旧发动机再制造后, 仍为原型号发动机, 且性能不低于该型号新制造发动机; “高

性能新产品”指再制造后物理产品与再制造前物理产品不属于同类产品, 即对原物理产品进行再设计, 并再制造成一种新的再制造产品; “低性能新产品及零部件”即对再制造价值低的废旧部件, 将其作为坯料使用, 再制造为与再制造前不同类产品。该低性能新产品虽与原产品相比价值降低, 但其降级再制造后的剩余价值, 仍远大于直接报废所带来的剩余价值。

再制造物理产品广义生长, 是在役/退役物理产品及其零部件, 经过再制造服务活动, 实现性能提升或恰当重用的多层级多粒度生长过程, 如图 4 所示。其中, 层级是生长对象所在物理产品拓扑结构网深度的量化描述, 粒度是各层级生长对象生长烈度的量化描述。

图 4 再制造服务广义产品多层级多粒度生长过程

(2) 广义集成服务型产品, 是基于再制造服务

化, 在整个产业链上, 对再制造服务供应方集群提

供与服务需求方相关的价值增值活动服务,包括提供再制造广义物理产品及其配套服务。

(3) 广义服务产品,是指在再制造服务过程中,以服务需求相关的再制造产品性服务为基础,对服务需求方提供再制造知识/技术咨询、再制造活动方案、再制造工程整体执行方案等纯专业服务;以及以再制造生产性服务为基础,对再制造物理产品对象或其他再制造企业,提供评估、设计、加工、信息化等再制造生产性专业服务。

1.5 再制造服务价值链

(1) 再制造服务产品价值链

在服务经济环境下,企业要提高竞争力,获得新的利润增长,需要通过销售广义产品扩展产品价值链。广义产品中的物理产品价值在主体间的转化过程中以不同的形式呈现,企业通过再制造服务网络各环节中的多种业务模式,使该资源不断增值,从而获取增值部分和提供增值服务部分(即广义产品)的利润。

再制造服务价值创造的过程中,物理产品的价值在多生命周期价值链中不同价值层之间传递和增值。广义物理产品的原始价值由旧产品服务需求方流入,通过再制造服务供应方一系列再制造服务活动实现产品价值增值,企业通过销售增值物理产品来获取利润,此时再制造服务供应方跨越了多个价值层;广义集成服务型产品的原始价值由服务需求方和旧产品共同汇入,再制造服务供应方通过单个

或多个活动提升物理产品价值和提供增值服务,企业通过销售增值产品和服务获取利润,此时再制造服务供应方既可以处于单个价值层,又可以处于多个价值层;广义服务产品的原始价值由服务需求方汇入(主要指信息,数据等),再制造服务供应方以服务需求为导向,通过提供一系列再制造服务(方案,评估等)帮助服务需求方实现再制造物理产品增值,服务需求方给与企业一定比例的增值部分价值,此时再制造服务供应方本身不处于任何价值层,却与产品多生命周期的所有价值层紧密相关。

(2) 再制造服务知识价值链

再制造服务过程中,由不同服务供应方提供的多项相互独立且分散的服务,通过服务聚合,集成成新的大粒度服务,并向外提供,以创造出全新的服务价值。整个过程伴随着服务需求正向知识流、再制造产品逆向物流和产品知识流。在该过程中,与企业价值增值类似,再制造服务知识价值由各种加值活动来达成。延伸此观念,可认为:再制造服务中的知识价值链,是由许多可让服务主体运作环节中知识增值的知识活动所组成的动态过程。其中,知识以多元管道汇入知识库中,通过知识获取、共享、应用、创新等知识活动实现增值,再以经济增长、流程优化、员工成长、服务需求方满意、全面创新等发散式的多元价值形式输出,如图 5 所示。在整个再制造服务知识价值链中,不断伴随着知识的转移及知识与服务资源的结合。

图5 再制造服务知识价值链模型

2 再制造服务相关研究应用现状

再制造服务将强化再制造与服务的融合,延长再制造产业价值链,对促进产业升级和国家生态文明建设等产生重大影响。国内外学者综合运用不同的理论和方法,对再制造及其服务流程相关的需求

发现、回收及逆向供应链、拆卸、加工、集成等问题开展了研究,并取得了一些成果,为再制造服务过程实现提供基础,不断丰富再制造服务的广义内涵。

2.1 再制造服务相关研究现状

2.1.1 再制造及其服务

再制造是实现退役产品再利用和经济可持续发

展的重要途径,自 GIUTINI 提出再制造的概念^[10]以来,国内外学者从面向再制造的设计、再制造回收、再制造拆卸、可再制造性评估、再制造决策、再制造工艺技术、再制造产品计划等多个角度对再制造开展了系列研究^[11-15],构成了再制造研究体系。服务型制造是产品、技术、用户需求、企业战略等内外部因素共同作用的结果,国内外学者对制造服务需求模型及挖掘方法^[16]、制造服务的知识表达与知识共享方法^[17]、制造服务任务调度与优化方法^[18]等智能化方法体系进行了研究,并取得了丰富的研究成果。

制造服务模式、云制造服务方式等已得到广泛应用并走向成熟。再制造在传统制造的基础上,依托服务化运作模式来提升其个性化服务能力的研究也受到了学者们的关注,如:考虑产品再制造特征,针对再制造产品服务系统模型定义及其运作模型进行研究^[19];采用动态规划和遗传算法,针对混合服务型再制造过程进行动态生产批量计划研究^[20];重庆机床集团针对企业机床维保,提出了综合机床再制造服务模式^[22]等。相关研究促进了再制造产业的发展。实际上,再制造服务实施过程涉及面向需求的再制造设计服务、再制造服务匹配、再制造服务决策等软性服务活动,以及面向再制造生产的退役产品拆卸分解、零部件性能分析与加工、再制造产品装配等硬性服务活动。对于这种复杂的再制造服务系统,需要寻求一种有效的分析方法,如:采用一种多粒度再制造服务资源模块化组织模式及其模块化方法,研究大量再制造服务资源配置问题;针对产品多生命周期的再制造服务方案决策^[23];基于 QoS 的再制造服务评价^[24]等研究都是有益的尝试。

现有相关研究主要围绕退役产品再制造及其服务展开。但是,再制造服务涉及问题众多,如:如何通过标准的虚拟化与面向服务的技术,对各类服务活动、服务资源、服务知识进行自动配置与部署,构建一个自治的、自维护的、动态扩展的再制造服务体系?如何挖掘服务对象、服务活动和服务资源在各服务业务环节的关联关系,发现服务对象特征,获取和描述服务需求?如何针对多样化的服务对象、差异化的服务需求和不确定性的系统因素,对各类服务活动、服务资源进行动态任务匹配?等等,都是需要研究的课题。

2.1.2 再制造服务需求发现与获取

制造服务搜索和匹配,也被称为制造服务发现,是平台有效并高效实现服务按需配置的重要步骤,主要依赖于搜索和匹配算法来找到合适的服务以满

足用户的请求^[25]。服务需求信息是服务型经济环境中企业开展个性化产品设计、产品配置、产品服务及服务方案决策的基础。云制造等智能制造模式与技术被提出以应对现有制造服务在及时共享、主动发现和优化配置等方面的问题。现有服务需求发现研究主要包括三个方面:服务发现机制、服务形式化描述、服务选择与匹配。目前服务需求发现的研究基本上已从单纯的语法级方法转向语义检索方法^[26],提高了服务发现与匹配的精确度,且有助于解决物联网中的异构性,结合相似度,使服务的智能发现与匹配成为可能^[27];服务形式化描述多采用模糊集并借助云系统平台识别、解析、更新^[28];服务选择与匹配正在实现自适应性,以优化配置,促进协同制造^[29]。

以上服务发现与匹配方法为再制造服务需求发现与获取提供了思路。对具有主动再制造需求的服务需求方,通过智能搜索与匹配算法实现资源的重组以提供个性服务,并为该服务需求方设定用户偏好,如:针对服务需求方个体认知局限性导致需求信息组织和表达混乱、服务需求方隐性需求知识难以抽取的问题,提出了一种服务需求方需求动态获取方法^[30];对核心再制造企业,可利用语义相似度^[31]、知识推理^[32]、映射模型^[33]、优化决策算法等实现再制造实体资源与服务资源的智能分配;针对部分无再制造意识或主动需求市场用户,可以利用 Web 数据挖掘技术^[34]等挖掘出潜在用户,结合人工智能、机器学习等技术,对信息进行准确抽取,主动发现用户需求等相关信息。

2.1.3 再制造回收服务

回收是再制造服务的重要一环,是废旧产品再制造与资源循环利用的基础。现有研究从激励机制、回收模式与渠道、逆向物流三个角度对废旧产品回收进行了系统的研究并不断结合新兴技术对其进行丰富和发展。为了协调再制造商、零售商、回收商,并达到期望收益,最优激励理论与激励机制被广泛应用到开、闭环供应链及逆向供应链的研究中^[35-36]。再制造闭环供应链回收模式,根据回收渠道不同,主要分制造商回收、零售商回收、第三方回收,为了提高回收效率和效益,部分学者基于博弈论从多角度对混合回收模式优选进行了研究^[37]。此外,“互联网+回收”模式逐步成为一种新型回收模式推动再制造回收体系发展。逆向物流的研究主要集中在以提高回收效率和收益为目标,考虑回收模式对逆向物流网络进行设计与优化,提出了多级、多类逆向供应链^[38]。

目前,面向再制造的逆向供应链回收研究涉及物流网络设计、定价和利润分配协调机制、库存管理等多领域。关于逆向供应链物流网络设计的研究大多基于回收渠道确定,中心化决策的假设进行建模,与实际情况的动态性有着一定的差距;在定价和协调研究方面,大多假定新产品和再制造产品性能无差别,在信息完全对称下进行协调研究;在库存管理研究方面,大多从设备管理和维修角度展开,库存品是通过废旧品回收、维修后形成的。逆向供应链的研究与实际情况有一定的出入,且主要以再制造供应方展开,未充分考虑到以具有主动再制造需求的服务需求方为导向。随着回收模式及逆向物流的日益成熟,现有研究逐渐开始由回收相关研究转向包含产品全生命周期甚至多生命周期的全局逆向供应链研究。包括逆向供应链的定义、内涵及体系结构^[39]、协调机制^[40]、设计与集成^[41]、库存集成优化^[42]、回收模式等各个方面及整体结构进行了一系列的研究,并取得了不错的成果。考虑收益及成本、资源、环境等因素^[43],并以服务化的运作模式满足个性化服务需求,需要从全局视角研究逆向供应链回收服务。夏绪辉等提出了一种逆向供应链服务的体系架构、逆向供应链服务模块化及服务模块匹配方法等^[44-45]。再制造服务与逆向供应链服务相辅相成,再制造服务是逆向供应链服务的重要组成部分却又有着其独特广义的内涵,更注重废旧产品的再制造加工及服务。面向再制造的回收及供应链必须考虑到产品的可再制造性及再制造效益。

2.1.4 再制造拆卸服务

再制造拆卸是再制造服务中一个必要环节,其通过合理拆卸处理退役产品零部件,提高退役产品的循环利用效益。现有研究主要集中在可拆卸性分析^[46]、拆卸序列规划^[47]、拆卸线平衡与优化^[48]等。再制造拆卸对象在回收数量、质量上的不确定性,是再制造服务需要解决的核心问题之一,考虑产品可拆卸性的再制造模式应运而生。目前智能制造技术、智能机器人、智能算法等逐渐应用到拆卸及拆卸线的研究中,产生了一系列的智能化拆卸工艺技术与工具^[49],这些研究使单个产品零部件的拆卸已相对成熟,同时也促进了批量拆卸研究的发展。为解决批量拆卸面临的不确定性等难题,合理规划拆卸作业流程,三角模糊数、正态分布等方法被广泛应用。同时,为得到最优拆卸序列,相关学者针对不同的拆卸问题不断改进应用智能求解算法,如粒子群算法^[50]、离散蜜蜂算法^[51]、模拟退火算法^[52]等,并取得了较好的研究成果。为最大化利用可再

制造零部件,降低拆卸过程消耗,不完全拆卸在部分领域逐渐取代完全拆卸^[53]。此外,考虑到退役产品种类繁多,为提高效率、节省成本,有学者提出混流作业拆卸线^[54]。但混流作业线会因产品种类、服役时间、磨损程度、工人熟练水平以及产品之间的结构差异等因素出现波动现象,具有不确定性,多准则决策、多目标优化、U型拆卸线等被用于解决此类问题^[55]。

以上的研究成果对解决传统的拆卸技术及拆卸线平衡优化问题有着极大的帮助。考虑到拆卸本质上也是一个服务过程,需要满足个性化拆卸的服务需求方需求,再制造拆卸服务生产线因此产生^[56]。再制造拆卸服务作为再制造服务的重要组成部分,是废旧产品再制造资源最大化利用的重要前提,是实现产品多生命周期的必要环节。

2.1.5 再制造加工服务

再制造加工是对失效零部件的几何尺寸和机械性能等进行恢复或升级的过程。再制造加工包括检测^[57]、再制造加工方案决策^[58]、过程规划^[59]、修复工艺^[60]、车间调度^[61]、加工系统设计等一系列活动。再制造工艺技术主要包括机械加工方法和表面工程技术方法^[62],如自动化纳米颗粒复合电刷镀技术,自动化高速电弧喷涂技术、自动化微束等离子熔覆技术、自动化激光熔覆技术,这些技术方法构成了表面工程的核心。随着先进制造技术的发展,一些学者将其应用于再制造加工研究之中,如徐滨士等^[63]在先进制造技术与自动化技术、大数据技术等智能技术的基础上,提出智能再制造,并阐述了相关关键技术体系。除再制造加工工艺技术不断发展,再制造加工包含的一系列环节与活动在现代自动化、智能化的催化下,不断演变与发展。数据驱动、仿真工具、Petri网、启发式算法等被应用于再制造加工过程模拟、工艺能力评估、再制造调度、工艺规划等再制造加工系列活动的研究中^[64-65]。

以上再制造加工的研究均集中在工艺技术与过程优化,未考虑到实际生产中单个再制造供应方可能会因某种再制造能力不足而对外产生生产性服务需求,这种需求导致了再制造加工模式的转变,产生了第三方加工服务,如基于云制造的众包运作模式和众包系统、新型大规模个性化社群制造模式等。目前已产生三种再制造模式,即原始设备制造商(OEM)再制造、第三方独立制造商(IO)再制造、OEM和IO共融再制造等,往后的再制造加工模式将会随着服务需求方需求量增大、需求多样性、智能技术提高等逐渐转变为具有服务特性的集群化企业联盟

式加工模式。

2.1.6 再制造集成

制造流程与产品全生命周期数据的互联互通,为分布异构制造资源与制造服务的动态协同联动及优化决策提供了保障。再制造具有与制造过程相似的环节,却又还包含缺陷检测、寿命评估、拆卸等一系列独特环节。再制造服务是以其集成方为核心的再制造服务供应方集群面向服务需求方的服务,涉及再制造产品的全生命周期甚至多生命周期各环节的集成。为服务需求方提供更好的产品或服务,是再制造服务的必然选择。无论是制造还是再制造的集成都离不开互联网、物联网、传感等智能技术。针对制造集成,已有一定的研究成果,包括数字化制造^[66]、网络化制造^[67]、云制造^[68]等。其中,云制造最具代表性,众多学者对云制造相关的个性化定制^[69]、资源优化配置^[70]、平台设计与管理^[71]、资源共享^[72]、制造服务评价^[73]等进行研究,不断丰富云制造的内涵,扩大了其框架和范围,为企业动态联盟服务提供指导。

这些研究成果通过改进可以移接到再制造集成之中。再制造服务增值涉及服务供应方、制造商、分销商和用户节点企业等角色的耦合关系,为了便于信息交互与管理,需要发展改进用于再制造的信息管理与融合技术;当再制造集成平台接收到服务需求,需要立即通过感知与智能决策技术^[74]处理需求信息,并将对应信息与方案发布给再制造供应方;核心再制造供应方除了提供再制造拆解技术、清洗技术、再制造加工技术^[75]、还需要通过互联网技术将一系列数据与信息传递给上下游制造商及反馈给集成方/平台;此外还需要传感技术和物联网技术^[76]提供再制造在线检测。目前深度学习,数据挖掘,物联网等智能技术已能成功用于再制造集成之中。部分学者对再制造集成制造系统、再制造集成物流网络设计、再制造加工集成控制、信息服务集成系统、资源匹配与调度集成等环节进行了研究^[77-79]。这些成果为再制造集成提供了基础,但其均从某一角度或环节出发,未考虑整个再制造服务过程的集成。如何将服务需求方与需求信息集成进行深度学习,以便挖掘服务需求方潜在需求及提供个性化服务,如何在小批量需求下通过资源配置集成来降低成本、优化产品性能等问题均为今后研究方向。现有云服务模式、平台架构、云服务集成、云服务配置和云服务利益分配等研究成果,以及智能再制造工程体系,为再制造集成提供了引导与参考,加速了再制造数字化、网络化、智能化进程,推进了再

制造服务的发展。

2.2 再制造服务的应用现状

再制造服务理论和方法的应用,可为再制造企业提供服务增值和资源优化配置,也能使用户成为再制造过程的决策者和参与者,为用户提供个性化服务。

瑞典 BT 叉车公司(丰田全资子公司,简称 BT 公司)是欧洲较早开始实践产品服务系统和再制造的公司,其建立的信息系统不仅可利用租赁服务获得电动式叉车再制造原料来源,也可为再制造性评价提供数据支撑,其服务闭环物流网络可为再制造产品提供销售渠道。该公司具有较强的数据分析能力和丰富的再制造经验,产品附加值高。

斯凯孚齿轮箱再制造服务中心(天津),其主营业务主要包括轴承、润滑系统及密封件、机电一体化和服务等,具有全球领先的技术和产品。斯凯孚可根据服务需求方个性化需求定制再制造产品和服务,以及整体解决方案,能够降低设备运行成本,提高产能和利润率。

施乐公司是复印机巨头之一,其再制造工厂遍布欧美、澳大利亚、日本和巴西等地。其再制造系统功能强大,经过使用的打印机、复印机和墨盒等都设立了相应的再制造程序和重用方式,如复印机零件经再制造后有四种,即作为新产品中某一部件的零件、作为再制造产品中同一部件的零件、作为再制造产品中某再制造部件的零件、作为原材料再循环。施乐公司利用产品拆卸和再制造等方面获取的数据,进一步开展了产品再制造升级研究,研发了新一代模块化复印机——DC265 型复印机,使得复印机再制造具有更持久的生命力。

中国印家集团有限公司提出了互联网+再制造,探索以 O2O 模式培育线上线下相融合的产业生态圈,促进再制造打印复印机向产业链前后两端延伸。线上以打印复印机为基础扩大产品服务范围,建立“互联网+企事业服务”产业资源共享平台,为销售联盟商、供应方提供一项 VIP 服务及产品,如再制造打印复印机产品推出的“合约机服务”,以“价值分享”为手段,使再制造打印复印机成为“轻资产中的轻资产”,吸引上下游企业,推出“以租代售、按张收费”和“以换代修”销售服务体系,体现了办公文印现代服务模式。线下以“再制造”重构打印复印机产业链(Ecostar 整机厂)为基础,实现产品生产低消耗,产业链上下游企业快速集聚,提升自主研发创新能力。Ecostar 印家整机厂以“柔性标准化”的生产形式,针对不同机型所需工序、工

时、工艺等要素制定规范,实现了规模化流水线生产。现已建成全球第一大规模打印复印机再制造生产线,年产能可达 40 万台。

工程机械是卡特彼勒公司的再制造对象,该公司利用先进的工艺和加工技术对废旧的零部件进行修复和再制造,产品性能和质量可达到新产品的水平。该公司建立了全球逆向物流体系,利用互联网及大数据等智能手段,实现实时旧件信息全球共享,补充了后市场产品供应类别。卡特彼勒将旧件作为原材料进行再设计和再制造,改变了传统供应链中寿命即将终结产品被报废的命运,形成了闭环供应链,使其具有可循环性和可持续性。

中国宝武设计院宝钢工程技术集团有限公司,致力于“再制造+服务”的模式转型,服务模式主要有检修及再制造服务、备件无库存模式、备件总包模式、年标模式等。公司成立了专业的备件再制造团队,主要再制造修复产品有圆盘剪、碎边剪、摆动剪、各类卷筒(包括卡罗塞尔卷取机卷筒、热轧卷筒、冷轧卷筒)、皮带助卷器、连铸框架、连铸辊等,如图 6 所示。

图 6 宝武集团再制造产品

从上述再制造服务企业的工业应用案例可知,再制造服务以“再制造+服务”为核心驱动力,使得再制造企业 and 用户双赢。再制造企业价值创造方式随着创造焦点的逐步转换发生了根本性的转变,再制造服务指明了再制造企业发展的方向。但目前再制造服务主要以原产品制造公司或集团为核心,由制造公司承担回收与再制造业务,集中于某一类产品,以零部件更换和修复为主,缺乏资源集成化、服务广泛化、技术专业化,难以实现再制造的产业化发展。

3 再制造服务研究发展趋势

再制造服务是再制造与现代服务深度融合而产生的一个新概念,在再制造服务方面的研究和应用还仅仅处于起步阶段。再制造服务是一个复杂的系统,还有很多相关的技术需要研究。分析国内外已

有研究,从中微观可操作的角度,可对再制造服务的发展趋势总结如下:

(1) 从再制造服务概念模式向应用模式发展

再制造服务作为一种促使再制造产品广义生长,从而最大化其价值的广义再制造模式,其应用模式和实现方式将向多元化发展,并成为研究的主题之一。如,面向分布式资源集成服务的网络化再制造新模式、面向服务资源供需关系多样化的产业集群柔性再制造模式、面向生产组织形态和服务流程快速可重组的快速响应再制造模式等。

(2) 从传统可再制造性设计与再设计向广义设计与众包服务设计进化

传统与再制造相关的设计,包括可再制造性设计与再设计。前者,考虑可再制造性的设计,通常强调在产品源头,注重产品本身功能、性能及可再制造性。后者,再设计,强调在再制造前以退役产品或零部件为毛坯对其进行的设计。二者随着再制造过程中服务化运作模式的融入和再制造服务广义产品的普及,不仅需要从单一提升产品可再制造性向综合优化广义生长产品性能扩展,而且需要将依附于产品的服务设计前移,在广义物理产品设计的同时考虑产品下一次生命周期的产品服务设计、运行维护服务设计、外/众包服务设计。同时,可再制造性设计与再设计的实现,均从依托单一设计团队的集中设计模式向依托网络化和服务需求方化的众包设计模式进化。

(3) 从再制造单活动定向外包向服务外包与众包发展

依托第三方再制造服务集成方/平台的再制造服务过程,凭借区块链经济模式下各利益相关者互相监控的信用保障机制,打破了再制造设计或加工等单项活动定向外包给某固定服务供应方的局限,以及外包的时空约束,支持服务全流程成本最优条件下的全部服务活动外包与众包。这将成为再制造服务运作模式的核心发展内容。

(4) 从逆向供应链向以再制造服务为核心要素的再制造服务混合逆向供应链发展

由原制造商直接或间接主导的面向再制造的传统逆向供应链,以从消费者手中回收退役产品并对其进行重用、再制造或报废处理为核心业务,其运行多以环境、政策或消费者压力驱动。而以价值增长为最终目标的再制造服务模式及其逆向供应链,以服务再制造广义产品全生命周期为基点,构建再制造服务混合逆向供应链,是保障再制造服务实现的又一核心问题。其中,由于再制造服务混合逆向供应链所包含的面向服务需求方的闭环逆向供应链

和面向市场用户的开环供应链在激励机制、运作模式上具有一定差异,因此,如何有针对性的把服务外包与众包机制、多元供需关系下的博弈与价值流模型等应用到混合逆向供应链的重构中,将是再制造服务混合逆向供应链发展亟需研究的重要内容。

(5) 从传统信息技术支撑的服务向依托新信息与智能技术的服务发展

下一代通信网络、物联网、大数据、以云计算和分布式计算为代表的高端软件平台、以及人工智能等新信息与智能技术的成熟为再制造服务的发展提供了新契机。如何将这新技术融入到再制造服务需求获取、无损检测、智能加工、智慧逆向物流等每个环节,完善基于新信息与智能技术的再制造服务价值增值机理、服务模式等理论体系,研发新信息与智能技术支撑的再制造服务关键技术及信息平台,将是提升再制造服务技术水平的需要研究的关键。

(6) 从再制造服务理念向产业化实际应用推广

再制造服务理念及其理论与技术体系是一个新的概念。尽管考虑服务的再制造已有部分研究成果,且一定规模的应用于工业实际,但仍需加强再制造服务基础理论研究力度,加强引导性的再制造服务标准体系构建,从而促使再制造服务工业应用向定量化、模块化、普适化、规模化发展。

4 结 论

从再制造服务的基本概念、服务过程、再制造服务相关关系、再制造服务广义产品及服务价值链等方面分析了再制造服务的广义内涵,阐述了再制造服务四个主体间的关联关系及广义产品的输入与输出以及两级服务响应过程。从再制造及其服务、再制造服务需求发现与获取、再制造回收及逆向供应链、再制造拆卸服务、加工服务、再制造集成等方面总结了相关研究应用现状,在此基础上,论述了再制造服务的发展趋势,主要包括:从再制造服务概念模式向应用模式发展、从再制造再设计向广义设计与众包服务设计进化、从再制造单活动定向外包向服务外包与众包发展、从逆向供应链向以再制造服务为核心要素的再制造服务混合逆向供应链发展、从传统信息技术支撑的服务向依托新信息与智能技术的服务发展、从再制造服务理念向产业化实际应用推广等。

参 考 文 献

- [1] 工信部节能与综合利用司. 关于《高端智能再制造行动计划(2018-2020 年)》的解读[J]. 表面工程与再制造, 2017, 17(6): 20-22.
- Department of energy conservation and comprehensive utilization, ministry of industry and information technology. Interpretation of high-end intelligent remanufacturing action plan (2018-2020) [J]. Information of Surface Engineering, 2017, 17(6): 20-22.
- [2] 郑汉东, 陈意, 李恩重, 等. 再制造产品服务系统生命周期评价建模及应用[J]. 中国机械工程, 2018, 29(18): 2197-2203.
- ZHENG Handong, CHEN Yi, LI Enzhong, et al. LCA modeling and applications for RPSS[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(18): 2197-2203.
- [3] 刘宇熹, 谢家平, 葛夫财. 再制造下基于努力程度的产品租赁服务系统收益共享契约研究[J]. 管理工程学报, 2018, 32(1): 33-40.
- LIU Yuxi, XIE Jiaping, GE Fucui. Effort-driven and revenue sharing contracts for leased product service system based on remanufacturing[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2018, 32(1): 33-40.
- [4] CHEN J, VENKATADRI U, DIALLO C. Optimal (re)manufacturing strategies in the presence of spontaneous consumer returns[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 237.
- [5] 周维浪, 韩小花, 沈莹. 考虑消费者行为的闭环供应链定价和服务水平决策及协调[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(10): 2241-2250.
- ZHOU Weilang, HAN Xiaohua, SHEN Ying. Price and service level decisions and coordination of closed-loop supply chain considering consumer behavior[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(10): 2241-2250.
- [6] TEIXEIRA E L S, TIAHJONO B, ALFARO C A, et al. Extending the decision-making capabilities in remanufacturing service contracts by using symbiotic simulation[J]. Computers in Industry, 2019, 111: 26-40.
- [7] 王蕾, 夏绪辉, 熊颖清, 等. 再制造服务资源模块化方法及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(9): 2204-2216.
- WANG Lei, XIA Xuhui, XIONG Yingqing, et al. Modular method of remanufacturing service resources[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(9): 2204-2216.
- [8] 王蕾, 夏绪辉, 曹建华, 等. 再制造服务需求动态获取

- 方法及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(3): 781-792.
- WANG Lei, XIA Xuhui, CAO Jianhua, et al. Dynamic requirements acquisition method and application for remanufacturing service[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2018, 24(3): 781-792.
- [9] 孙林岩, 李刚, 江志斌, 等. 21 世纪的先进制造模式—服务型制造[J]. 中国机械工程, 2007, 18(19): 2307-2312.
- Sun Linyan, LI Gang, JIANG Zhibin, et al. Service-embedded manufacturing: advanced manufacturing paradigm in 21st century[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(19): 2307-2312.
- [10] GIUTINI R, GAUDETTE K. Remanufacturing: the next great opportunity for boosting US productivity[J]. Business Horizons, 2003, 46(6): 41-48.
- [11] AGUIAR J D, OLIVEIRA L D, SILVA J O D, et al. A design tool to diagnose product recyclability during product design phase[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 141: 219-229.
- [12] 王金龙, 张元良, 赵清晨, 等. 再制造毛坯疲劳损伤临界阈值及可再制造性判断研究[J]. 机械工程学报, 2017, 3(5): 41-49.
- WANG Jinlong, ZHANG Yuanliang, ZHAO Qingchen, et al. Study of fatigue defect critical threshold of remanufacturing cores and judgment of remanufacturability based on fatigue defect[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 41-49.
- [13] GOODALL P, ROSAMOND E, HARDING J. A review of the state of the art in tools and techniques used to evaluate remanufacturing feasibility[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 81(7): 1-15.
- [14] HE Y. Acquisition pricing and remanufacturing decisions in a closed-loop supply chain[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 163: 48-60.
- [15] MATSUMOTO M, KOMATSU S. Demand forecasting for production planning in remanufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79: 161-175.
- [16] 张卫, 李仁旺, 石先蔚, 等. 基于集对分析的制造服务需求动态挖掘方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(1): 62-69.
- ZHANG Wei, LI Renwang, SHI Xianwei, et al. Dynamic mining method of manufacturing services demand based on set pair[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(1): 62-69.
- [17] LIU Jun, ZHANG Zhinan, EVANS R, et al. Web services-based knowledge sharing, reuse and integration in the design evaluation of mechanical systems[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 57: 271-281.
- [18] WU Shanyu, ZHANG Ping, LI Fang, et al. A hybrid discrete particle swarm optimization-genetic algorithm for multi-task scheduling problem in service oriented manufacturing systems[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(2): 421-429.
- [19] QUINTANILLA F G, CARDIN O, L'ANTON A, et al. A modeling framework for manufacturing services in service-oriented holonic manufacturing systems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2016, 55 (C): 26-36.
- [20] GUIDAT T, BARQUET A P, WIDERA H, et al. Guidelines for the definition of innovative industrial product-service systems (PSS) business models for remanufacturing[J]. Procedia CIRP, 2014, 16: 193-198.
- [21] 谢文明, 刘晓, 江志斌. 基于服务型制造的再制造批量计划问题[J]. 系统管理学报, 2014, 23(2): 271-276.
- XIE Wenming, LIU Xiao, JIANG Zhibin. Remanufacturing lot-sizing problem for service-oriented manufacturing[J]. Journal of Systems & Management, 2014, 23(2): 271-276.
- [22] 廖绍华, 陈时权, 李国龙, 等. 机床综合再制造服务模式及实践[J]. 金属加工(冷加工), 2009(20): 16-17.
- LIAO Shaohua, CHEN Shiquan, LI Guolong, et al. Serve mode & practice of machine tool comprehensive reconstruction[J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2009(20): 16-17.
- [23] 熊颖清, 夏绪辉, 王蕾. 面向多生命周期的再制造服务活动决策方法研究[J]. 机械设计与制造, 2017(2): 108-111.
- XIONG Yingqing, XIA Xuhui, WANG Lei, et al. Research on method of the remanufacturing service activities decision-making based on the multi-life cycle[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(2): 108-111.
- [24] 尹露, 夏绪辉, 周敏, 等. 基于 QoS 的再制造服务评价方法[J]. 机械设计与制造, 2016(11): 265-269.
- YIN Lu, XIA Xuhui, ZHOU Min, et al. Evaluation method of remanufacturing service based on QoS[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(11): 265-269.
- [25] 盛步云, 张成雷, 卢其兵, 等. 云制造服务平台供需智能匹配的研究与实现[J]. 计算机集成制造系统, 2015,

- 21(3): 822-830.
- SHENG Buyun, ZHANG Chenglei, LU Qibing, et al. Research and implementation of cloud manufacturing service platform's intelligent matching for supply and demand[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(3): 822-830.
- [26] XIA Hui, HU Chunqiang, XIAO Fu, et al. An efficient social-like semantic-aware service discovery mechanism for large-scale Internet of Things[J]. *Computer Networks*, 2019, 152: 210-220.
- [27] BOUZARY H, CHEN F F, KRISHNAIYER K. Service matching and selection in cloud manufacturing: a state-of-the-art review[J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 7(149): 1128-1136.
- [28] SARAVANA B B, KARTHIKEYAN N K, KUMAR R S R. Fuzzy service conceptual ontology system for cloud service recommendation[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2018, 69: 435-446.
- [29] 杨腾, 张映锋, 王晋, 等. 云制造模式下制造服务主动发现与敏捷配置方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(4): 1124-1133.
- YANG Teng, ZHANG Yingfeng, WANG Jin, et al. Initiative discovery and agile configuration of manufacturing services for cloud manufacturing[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(4): 1124-1133.
- [30] WANG Lei, ZHOU Wenbin, ZHANG Zelin, et al. Discovery strategy and method for remanufacturing service demand using situational semantic network[J]. *IEEE Access*, 2019, 6 (1): 76878-76890.
- [31] HUBoran, ZHOU Zhangbing, CHENG Zehui. Web services recommendation leveraging semantic similarity computing[J]. 2018, 129: 35-44.
- [32] 阴艳超, 丁卫刚, 吴磊. 基于不确定规则推理的云制造知识服务方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(4): 1114-1123.
- YIN Yanchao, DING Weigang, WU Lei. Knowledge service method of cloud manufacturing based on uncertain rule reasoning[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(4): 1114-1123.
- [33] 李新, 董朝阳. 基于本体映射的云制造资源与加工任务智能匹配[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2015(11): 157-160.
- LI Xin, DONG Zhaoyang. A method of intelligent matching technique of cloud manufacturing resources and processing tasks based on ontology mapping[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2015(11): 157-160.
- [34] 吴雪峰, 马路. 数据挖掘技术及在制造业的应用[J]. *计算机应用与软件*, 2017, 34(10): 71-77, 123.
- WU Xuefeng, MA Lu. Data mining technology and its application in manufacturing industry[J]. *Computer Applications and Software*, 2017, 34(10): 71-77, 123.
- [35] 张汉江, 甘兴, 赖明勇. 最优价格与回收努力激励的闭环供应链协调[J]. *系统工程学报*, 2015, 30(2): 201-209.
- ZHANG Hanjiang, GAN Xing, LAI Mingyong. Coordination of closed-loop supply chain with the optimal price and recycle effort incentive contract[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2015, 30(2): 201-209.
- [36] 聂佳佳, 王拓, 丁龙. 零售商回收模式下制造商回收激励合同设计[J]. *管理工程学报*, 2017, 31(4): 116-122.
- NIE Jiajia, WANG Tuo, DING Long. Design of recycling incentive contract by manufacturer with retailer take-back mode[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2017, 31(4): 116-122.
- [37] GUO Lingling, QU Ying, TSENG M L, et al. Two-echelon reverse supply chain in collecting waste electrical and electronic equipment: a game theory model[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 126: 187-195.
- [38] GOVINDAN K, SOLEIMANI H. A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a journal of cleaner production focus[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 142(1): 371-384.
- [39] 夏绪辉, 刘飞. 逆向供应链物流的内涵及研究发展趋势[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(4): 103-109.
- XIA Xuhui, LIU Fei. Connotation state of the art and research tendency of reverse supply chain logistics[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(4): 103-109.
- [40] GOVINDAN K, POPIUC M N. Reverse supply chain coordination by revenue sharing contract: A case for the personal computers industry[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 233 (2): 326-336.
- [41] DAS D, DUTTA P. A system dynamics framework for integrated reverse supply chain with three way recovery and product exchange policy[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2013, 66 (4): 720-733.
- [42] GOU Qinglong, LIANG Liang, HUANG Zhimin, et al. A joint inventory model for an open-loop reverse supply chain[J]. *International Journal of Production economics*,

- 2008, 116: 28-42.
- [43] 高举红, 侯丽婷, 王海燕, 等. 考虑碳排放的闭环供应链收益波动规律分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(2): 190-197.
- GAO Juhong, HOU Liting, WANG Haiyan, et al. Regularity research on revenue fluctuation analysis of closed-loop supply chain considered carbon emissions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(2): 190-197.
- [44] 夏绪辉, 王蕾. 逆向供应链及其服务[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- XIA Xuhui, WANG Lei. Reverse supply chain and its service[M]. Beijing: China Mechanical Press, 2018.
- [45] 王蕾, 夏绪辉, 曹建华. 逆向供应链概念性服务模块二层匹配方法及应用[J]. 机械工程学报, 2017, 53(2): 164-174.
- WANG Lei, XIA Xuhui, CAO Jianhua. A two-hierarchy conceptual module matching of reverse supply chain service[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 164-174.
- [46] 张秀芬. 复杂产品可拆卸性分析与低碳结构进化设计技术研究[D]. 浙江大学, 2011.
- ZHANG Xiufeng. Complex product disassemblability analysis and structure design for low-carbon[D]. Zhejiang University, 2011.
- [47] REN Yaping, ZHANG Chaoyong, ZHAO Fu, et al. An asynchronous parallel disassembly planning based on genetic algorithm[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 269(2): 647-660.
- [48] WANG Kaipu, LI Xinyu, GAO Liang, et al. Partial disassembly line balancing for energy consumption and profit under uncertainty[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 59: 235-251.
- [49] FAVI C, MARCONI M, GERMANI M, et al. A design for disassembly tool oriented to mechatronic product demanufacturing and recycling[J]. Advanced Engineering Informatics, 2019, 11: 62-79.
- [50] KALAYCI C B, SURENDRA M G. A particle swarm optimization algorithm with neighborhood-based mutation for sequence-dependent disassembly line balancing problem[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(1-4): 197-209.
- [51] DING Liping, FENG Yixiong, TAN Jianrong, et al. A new multi-objective ant colony algorithm for solving the disassembly line balancing problem[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48: 761-771.
- [52] LIU Jiayi, ZHOU Zude, PHAM D T, et al. An improved multi-objective discrete bees algorithm for robotic disassembly line balancing problem in remanufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(9-12): 3937-3962.
- [53] 邹宾森, 张则强, 蔡宁, 等. 工具约束下多目标拆卸线平衡问题的猫群模拟退火算法[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(9): 82-94.
- ZOU Binsen, ZHANG Zeqiang, CAI Ning, et al. Cat swarm simulated annealing algorithm for disassembly line balancing problem under tool constraints[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(9): 82-94.
- [54] WANG Hengyu, PENG Qingjin, ZHANG Jian, et al. Selective disassembly planning for the end-of-life product[J]. Procedia CIRP, 2017, 60: 512-517.
- [55] AGRAWAL S, TIWARI M K. A collaborative ant colony algorithm to stochastic mixed-model U-shaped disassembly line balancing and sequencing problem[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(6): 1405-1429.
- [56] 夏绪辉, 周萌, 王蕾, 等. 再制造拆卸服务生产线及其平衡优化[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(10): 120-129.
- XIA Xuhui, ZHOU Meng, WANG Lei, et al. Remanufacturing disassembly service line and balancing optimization method[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(10): 120-129.
- [57] 钱正春, 黄海鸿, 韩刚, 等. 面向再制造的金属磁记忆检测技术研究综述及工程应用案例[J]. 机械工程学报, 2018, 54(17): 235-245.
- QIAN Zhengchun, HUANG Haihong, HAN Gang, et al. Review on metal magnetic memory detection technology in remanufacturing and case study in engineering[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(17): 235-245.
- [58] PENG Shitong, LI Tao, LI Mengyun, et al. An integrated decision model of restoring technologies selection for engine remanufacturing practice[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 206: 598-610.
- [59] WANG Han, JIANG Zhigang, ZHANG Xugang, et al. A fault feature characterization based method for remanufacturing process planning optimization[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 161: 708-719.

- [60] ZHENG Y, QURESHI A J, AHMAD R. Algorithm for remanufacturing of damaged parts with hybrid 3D printing and machining process[J]. *Manufacturing Letters*, 2018, 15(A): 38-41.
- [61] 刘明周, 张玺, 刘从虎, 等. 不确定环境下再制造加工车间生产调度优化方法[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(10): 206-212.
- LIU Mingzhou, ZHANG Xi, LIU Conghu, et al. Optimization method of remanufacturing reprocessing shop scheduling under uncertain conditions[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(10): 206-212.
- [62] 谭俊, 陈建敏, 刘敏, 等. 面向绿色制造与再制造的表面工程[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(20): 95-103.
- TAN Jun, CHEN Jianmin, LIU Min, et al. Surface engineering towards green manufacturing and remanufacturing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(20): 95-103.
- [63] 徐滨士, 夏丹, 谭君洋, 等. 中国智能再制造的现状与发展[J]. *中国表面工程*, 2018, 31(5): 1-13.
- XU Binshi, XIA Dan, TAN Junyang, et al. Status and development of intelligent remanufacturing in China[J]. 2018, 31(5): 1-13.
- [64] GOODALL P, SHARPE R, WEST A. A data-driven simulation to support remanufacturing operations[J]. *Computers in Industry*, 2019, 105: 48-60.
- [65] PENG Shitong, LI Tao, ZHAO Jiali, et al. Petri net-based scheduling strategy and energy modeling for the cylinder block remanufacturing under uncertainty[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 58: 208-219.
- [66] SATO R S, BORSATO M, IAKSCH J S, et al. Product development, digital manufacturing, and product manufacturing information: A bibliometric and systemic analysis[J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 17: 190-197.
- [67] 姜月娟, 卢秉恒, 方学伟, 等. 基于 3D 打印的网络化集散制造模式研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(6): 1424-1433.
- JIANG Yuejuan, LU Bingheng, FANG Xuewei, et al. 3D printing-based internet collect-manufacturing mode[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(6): 1424-1433.
- [68] 李孝斌, 尹超. 面向生产过程云服务的制造执行系统[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(1): 177-188.
- LI Xiaobin, YIN Chao. Cloud services oriented manufacturing execution system for production process[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(1): 177-188.
- [69] ZHANG Shuyou, XU Jinghua, GOU Huawei, et al. A research review on the key technologies of intelligent design for customized products[J]. *Engineering*, 2017, 3(5): 631-640.
- [70] ZHANG Yingfeng, ZHANG Geng, QU Ting, et al. Analytical target cascading for optimal configuration of cloud manufacturing services[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 151: 330-343.
- [71] CHANMO J, LEE J Y, YOON J-S, et al. Applications' integration and operation platform to support smart manufacturing by small and medium-sized enterprises[J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 11: 1950-1957.
- [72] ZHANG Yongping, ZHANG Pengyuan, TAO Fei, et al. Consensus aware manufacturing service collaboration optimization under blockchain based Industrial Internet platform[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 135: 1025-1035.
- [73] 谭明智, 易树平, 曾锐. 基于服务满意度的云制造服务综合信任评价模型[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(18): 2473-2480.
- TAN Mingzhi, YI Shuping, ZENG Rui. A comprehensive trust evaluation model for cloud manufacturing service based on service satisfaction[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(18): 2473-2480.
- [74] 丁进良, 杨翠娥, 陈远东, 等. 复杂工业过程智能优化决策系统的现状与展望[J]. *自动化学报*, 2018, 44(11): 13-25.
- DING Jinliang, YANG Cuie, CHEN Yuandong, et al. Research progress and prospects of intelligent optimization decision making in complex industrial process[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(11): 1931-1943.
- [75] 朱胜. 柔性增材再制造技术[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(23): 1-5.
- ZHU Sheng. Mobile additive remanufacturing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(23): 1-5.
- [76] 黄少华, 郭宇, 查珊珊, 等. 离散车间制造物联网及其关键技术研究与应用综述[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(2): 284-302.
- HUANG Shaohua, GUO Yu, ZHA Shanshan, et al. Review on internet-of-manufacturing-things and key technologies for discrete workshop[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(2): 284-302.
- [77] KOSMAS A, KONSTANTINOS S, EVANGELOS X,

- et al. An industrial Internet of things based platform for context-aware information services in manufacturing[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2018, 31(11): 1111-1123.
- [78] BARQUET A P, ROZENFELD H, FORCELLINI A F. An integrated approach to remanufacturing: model of a remanufacturing system[J]. Journal of Remanufacturing, 2013, 3(1): 1-11.
- [79] 温海骏. 不确定环境下再制造生产计划与车间调度集成优化研究[D]. 合肥: 合肥合肥工业大学, 2015.
- WEN Haijun. Integrated optimization of remanufacturing production planning and scheduling under uncertain environment[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
-
- 作者简介: 王蕾, 女, 1987 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为制造系统工程、再制造服务、逆向供应链服务。
E-mail: candywang@wust.edu.cn
- 郭钰瑶, 女, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为再制造服务。
E-mail: Joey_Guo423@163.com
- 张泽琳(通信作者), 男, 1988 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为制造系统工程、绿色制造技术及装备、智能选矿技术及装备。
E-mail: zhangzelin@wust.edu.cn
- 夏绪辉, 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为制造系统工程、逆向供应链管理、再制造服务。
E-mail: xiaxuhui@wust.edu.cn