

智能再制造工程体系

梁秀兵¹, 刘渤海², 史佩京³, 李恩重³, 张志彬¹, 徐滨士^{1,3}

1. 装甲兵工程学, 院机械产品再制造国家工程研究中心, 北京 100072
2. 合肥工业大学管理学院, 合肥 230009
3. 装甲兵工程学院, 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072

摘要 基于中国再制造工程及智能技术的发展基础与趋势, 提出了智能再制造的概念, 构建了智能再制造工程体系, 并阐述了智能再制造物流、智能再制造生产、智能再制造加工、智能再制造营销等重要部分的概念、方法和体系, 指明了中国智能再制造工程的当前主要任务和未来发展方向。智能再制造工程是智能制造的重要组成部分, 智能再制造工程体系是当前中国再制造产业发展模式的全面总结和提升, 可实现再制造全系统、全流程的自动化、柔性化与数字化, 大力提高再制造企业的产品效益、生产能力和管理水平。

关键词 智能再制造; 工程体系; 智能再制造物流; 智能再制造生产; 智能再制造加工; 智能再制造营销

环境污染、生态破坏、资源能源日趋匮乏已经成为人类社会共同面临的严峻挑战, 解决这些全球性社会问题, 实现可持续发展已经成为人类的共识^[1]。由于劳动力成本上涨以及制造业领域的技术进步, 世界主要发达国家为了促进经济增长的新出路, 开始重新重视制造业。欧盟在整体上开始加大制造业科技创新扶持力度, 美国国家科学技术委员会于2012年2月正式发布了《先进制造业国家战略计划》, 德国政府在2013年4月推出了《德国工业4.0战略》, 2015年1月日本政府公布了《机器人新战略》。在全球主要大国纷纷高度重视制造业, 并用新技术重塑制造业的背景下, 2015年5月, 中国政府发布了《中国制造2025》行动纲领。《中国制造2025》提出, 全面推行绿色制造, 大力发展再制造产业, 实施高端再制造、智能再制造、在役再制造, 推进产品认定, 促进再制造产业持续健康发展^[2-4]。

再制造产业作为国家新兴战略性新兴产业, 是绿色制造的重要组成部分, 是实现节能减排和促进循环经济发展的有效途径^[5-7]。中国再制造经过几十年的发展已进入产业化发展阶段, 在技术方面已达到国际先进水平, 管理方面也已取得积极成果。发展智能再制造能够顺应中国制造业的发展趋势, 能够进一步提高再制造的产业效益及效率, 构建智能再制造工程体系并发挥其作用是再制造发展的重要内容之一。

1 智能再制造工程体系结构

智能再制造工程以产品全寿命周期设计及管理为指导, 是分析、策划、控制、决策等先进再制造过程与模式的总

称^[8-11]。智能再制造工程将互联网、物联网、大数据、云计算等新一代信息技术与再制造回收、生产、管理、服务等各环节融合, 通过人技结合、人机交互等集成方式来实现。智能再制造工程以智能再制造技术为手段, 以关键再制造环节智能化为核心, 以网通互联为支撑, 可有效缩短再制造产品生产周期、提高生产效率、提升产品质量、降低资源能源消耗, 对推动再制造业转型升级具有重要意义。

智能再制造工程体系涵盖了再制造的全过程和全系统, 包括再制造加工技术、再制造物流、再制造生产、再制造营销、再制造售后服务等, 概括起来为智能再制造物流、智能再制造生产、智能再制造加工技术与设备以及智能再制造产品营销四个方面, 四者是相辅相成且高度集成的工程体系。智能再制造工程是再制造产业链与信息技术、自动化技术、智能技术的深度融合, 涵盖再制造的全过程以及再制造企业的所有部门, 是一项系统工程, 包含硬件和软件两个部分。硬件是指高度柔性化的可用于再制造的关键技术与设备, 包括监测设备、检测设备、生产设备等。软件是指与硬件配套的信息化与智能化技术, 包括传感识别技术、策划设计技术、过程控制技术、诊断决策技术、人机交互技术等, 通过功能平台(如信息平台)和硬件设备(如高柔性再制造生产加工设备)发挥作用。智能再制造工程体系结构如图1所示。

2 智能再制造工程体系组成

2.1 智能再制造物流

再制造物流包含两个方向: 用于再制造毛坯回收的逆向

收稿日期: 2016-02-29; 修回日期: 2016-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51375492, 71301038); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-13-1068)

作者简介: 梁秀兵, 研究员, 研究方向为装备维修与再制造工程, 电子信箱: liangxb_d@163.com

引用格式: 梁秀兵, 刘渤海, 史佩京, 等. 智能再制造工程体系[J]. 科技导报, 2016, 34(24): 74-79; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.24.010

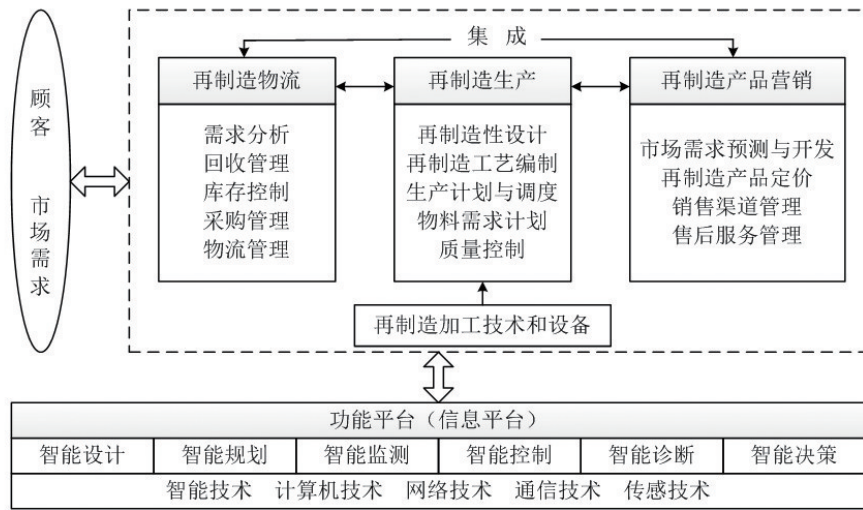


图1 智能再制造工程体系结构

Fig.1 Intelligent remanufacturing engineering architecture

物流;用于再制造产品销售的前向物流。二者相辅相成,构成再制造物流体系。目前,关于再制造物流体系的主要研究热点在于再制造逆向物流的构建,以及包含了销售物流的再制造物流体系的构建与优化,主要有再制造回收决策、再制造毛坯回收量预测与库存控制、再制造逆向物流成本优化以及再制造物流网络设计与优化等^[12]。

智能再制造物流体系应是一个网络拓扑结构,主要利用

互联网技术及各类信息通信技术。回收中心在信息平台上发布旧件信息,再制造企业可以在信息平台上进行信息浏览、检索旧件资源的品种、数量及质量状况,确定所需物品的信息,并向信息平台提出需求申请,回收中心浏览到需求信息后,将再制造企业所需的废旧产品通过物流供应商提供给再制造企业,如图2所示。

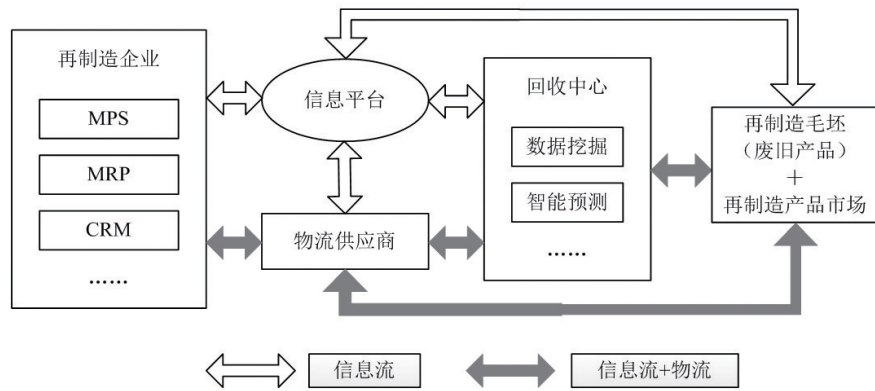


图2 智能再制造物流体系

Fig. 2 Intelligent remanufacturing logistics system

再制造企业及回收中心通过自身的物料需求计划(material requirement planning, MRP)系统或企业资源计划(enterprise resource planning, ERP)系统与信息平台实现接口互通,再制造企业根据客户关系管理(customer relationship management, CRM)系统所制定的再制造产品生产计划(master production schedule, MPS),确定再制造毛坯回收量,可直接向回收中心提出采购请求。另外,回收中心可根据所覆盖区域的

再制造企业的需求信息,利用数据挖掘、智能预测等技术,规划自身的产品回收种类及数量,增加定向提供服务,以降低运营成本并提高服务水平。在获得授权的前提下,回收中心也可开展废旧产品拆解、清洗、检测等服务,直接向再制造企业提供再制造加工所需的各种废旧产品或其零部件,以提高再制造企业的生产加工效率^[13, 14]。

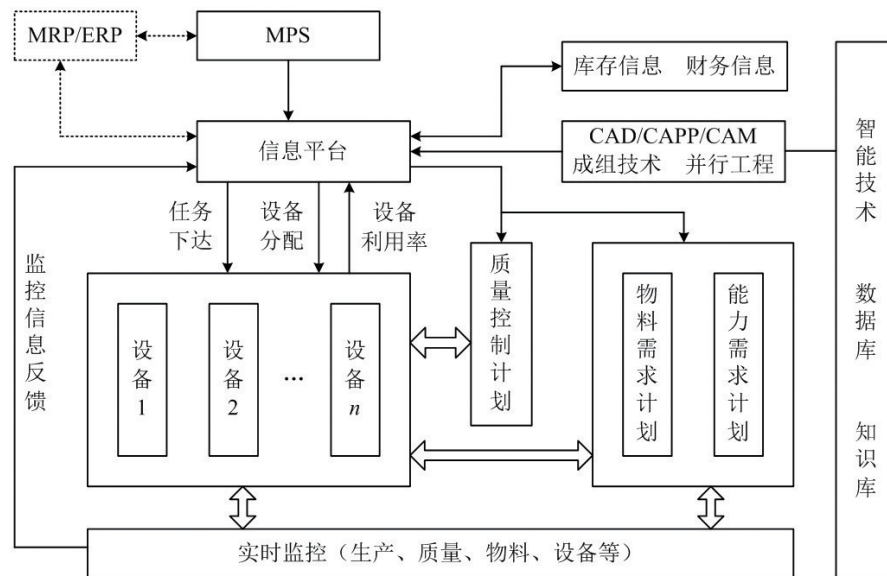
2.2 智能再制造生产

再制造生产过程不同于新品生产,面临着众多的问题。目前关于再制造生产的主要研究热点在于再制造生产影响因素及模式的分析、针对 OEM 再制造商的再制造生产决策、再制造生产需求预测、再制造生产最优批量、再制造生产系统设计、再制造生产计划制定、再制造生产调度、再制造库存控制策略及优化、再制造质量水平决策及控制策略等^[15-17]。

智能再制造生产要解决的问题是提高再制造生产系统的柔性,主要从硬件和软件两个角度开展,如图 3 所示。硬件

是指提高再制造生产设备的柔性,多采用数控设备以及柔性制造系统,增加生产设备可加工工艺、产品或零件的种类,同时缩短产品或零件生产加工的转换时间。软件是指管理方面,可采用成组技术和并行工程,利用某些特征的相似性对待加工零件进行归类,组织同类加工。

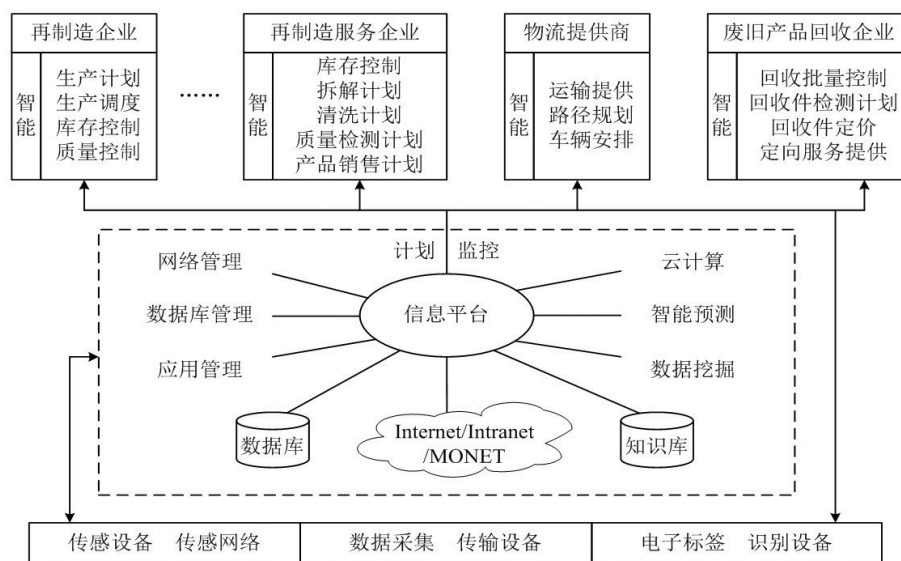
开展智能再制造生产可利用物联网、云计算等技术构建再制造虚拟企业^[13],如图 4 所示。为了节约成本,一家再制造企业不会购买所有的再制造生产加工设备,而是根据自身的技术优势及市场空间选择对自己最有利的设备。



CAD: 计算机辅助设计; CAPP: 计算机辅助工艺加工; CAM: 计算机辅助制造

图3 智能再制造生产体系

Fig. 3 Intelligent remanufacturing production system



Internet: 互联网; Intranet: 物联网; MONET: 移动网

图4 再制造虚拟企业

Fig. 4 Remanufacturing virtual enterprise

在产业集聚化发展的形式及前提下,再制造产业园区(或其他集聚方式)可看成是一个再制造虚拟企业,各家再制造企业提供自己的设备,构建再制造设备物联网,搭建信息集成平台,实现信息共享。平台供应商可通过与再制造企业、再制造回收企业等企业的信息系统接口读取相关再制造信息,利用云计算等技术对再制造生产加工进行设备选择及任务分配,提供优先权调度、工艺多样化选择及调整等功能,信息平台具有自学习、自适应功能,拥有较强的自组织能力。在再制造虚拟企业的生产任务分配及处理等过程中也可选择多智能体系统(multi-agent system, MAS),利用基于客户机与服务器(client/server, C/S)的网络架构对问题解决方案进行分析和确定,利用多种传感技术手段对生产过程进行实时监控和决策。

2.3 智能再制造加工技术

再制造产品的质量特性应不低于原型新品,先进智能的再制造加工技术及装备是确保再制造产品质量的重要条件。智能再制造技术包括废旧装备及其零部件尺寸恢复、性能提升直至重新装配和应用全过程中采用的智能技术手段的集成。智能再制造工程技术体系包括:再制造智能无损检测技术、原位智能再制造成形技术、柔性再制造数字化加工技术、智能再制造零部件装配技术、智能再制造信息管理技术等^[5,6]。

1) 再制造智能无损检测技术。未来机械装备的结构复杂、材质多样、服役工况恶劣、零部件损伤失效形式多样,对服役装备零件的智能无损检测与可靠性评估提出了巨大挑战。需要探索再制造零部件在不同力、磁、电、热等强物理场耦合作用下的劣化机制,研究提取能表征劣化程度的关键特征量,建立特定类型废旧件的损伤信息数据库,研发基于数字超声、声发射/红外、多功能涡流/磁记忆等综合无损检测技术与装备,实现机械装备损伤零部件的智能定量无损检测和再制造可靠性评估。

2) 原位智能再制造成形技术。未来机械装备零部件损伤形式复杂多样,以疲劳、蠕变、磨损、腐蚀、热损伤等为代表的失效形式对机械零部件的原位再制造成形提出巨大挑战。机械装备损伤零部件的原位智能再制造成形加工对象更复杂、前期处理更繁琐、质量控制更困难,需要研究面向再制造毛坯损伤的原位智能再制造成形技术与集约化材料体系,研究非对称、复杂曲面等结构零部件的再制造成形过程中自动化、智能化实时监控工艺对涂覆层均匀一致性及其与毛坯基体可靠结合的影响规律,实现再制造零部件的损伤控制和性能提升。

3) 柔性再制造数字化加工技术。再制造实现在损伤零部件表面的薄弱部位制备耐磨、耐蚀或抗疲劳等不同功能的强化涂层,并满足其力学性能和精度要求。智能再制造数控加工系统将具有加工工况(振动、负载、热变形)实时感知、智能负载监控、智能主轴/进给轴主动振动抑制、刀具磨/破损监控、空间几何误差与动态误差综合补偿、主轴/工作台热变形实时精确补偿、工件/刀具/机床加工安全智能保护、加工参数智能优化与选择、宜人化加工导航以及基于网络(含物联网)的生产管理服务等功能,可实现表面再制造与三维立体再制造的智能化机械加工。

4) 智能再制造零部件装配技术。装配直接影响再制造产品质量及使用寿命,基于智能机器人控制与信息管理的智能再制造装配可实现再制造零部件的高效、高精装配,满足复杂零部件的位置精度、尺寸公差等装配要求。

5) 智能再制造信息管理技术。通过嵌入式智能芯片配置以及基于卫星通信的自动识别技术,可在再制造产品中嵌入“定位系统”模块,实现再制造毛坯智能检测、生产加工、销售服务、全生命周期的智能化管理与全寿命服务,还可实现再制造产品数据快速、可靠、稳定地共享与交换,从而提升再制造产品运行的可靠性。

智能再制造加工技术体系如图5所示。

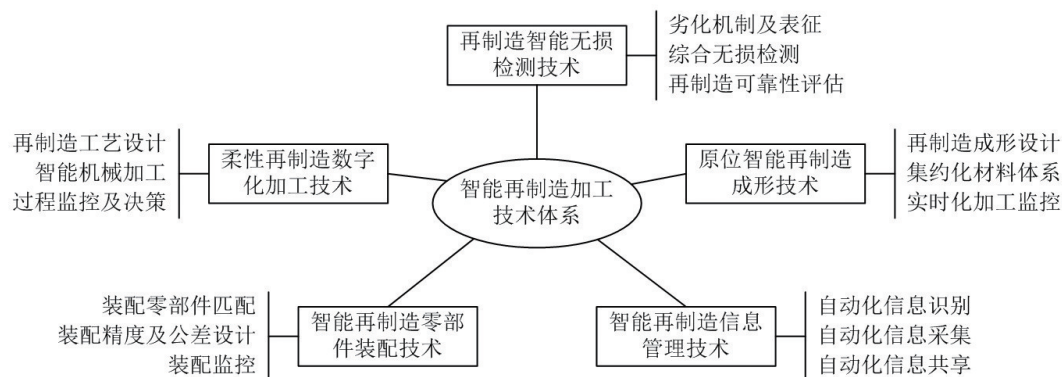


图5 智能再制造加工技术体系

Fig.5 Intelligent remanufacturing processing technology system

2.4 智能再制造产品营销

再制造产品营销并没有改变营销的本质,主要是利用现

代信息技术、智能技术开展的针对再制造产品的营销活动,包括再制造产品市场需求分析与预测、再制造产品定位与定

价、再制造产品销售与渠道管理,以及再制造产品售后服务等内容。目前,关于再制造产品营销的研究热点主要在于再制造毛坯回收量预测、再制造产品最优定价策略和再制造产品销售策略等^[18-22]。

智能再制造产品营销应结合现代网络信息技术及电子商务的发展,构建再制造产品电子商务和信息平台,积极宣传再制造产品,为再制造产品营销提供各种有用信息。首先,建立再制造产品电子商务平台,对再制造产品进行宣传和销售。其次,在电子商务平台的基础上建立客户管理系统,再制造企业可与顾客实现实时互动,开展顾客满意度测评,及时了解顾客对再制造产品的需求以及再制造产品的使用状况。再次,利用大数据、数据挖掘等技术,对再制造产品市场进行分析了解,准确把握顾客群体及市场所在,确定目标市场,结合智能再制造物流体系进行回收量预测,并结合再制造企业的发展策略及盈利目标对再制造产品进行最优定价,及时向目标市场提供有关产品信息。当用户在使用中出现质量问题时,信息平台可准确收集相关信息,并利用后台的数据库、知识库、专家系统等功能进行智能决策,提供相关解决方案;同时,可利用各类平台收集到的信息反馈给再制造企业,对产品的失效过程进行动态追溯,确定失效的原因及改进方法,用于再制造企业的质量改进。智能再制造产品营销的主要体系架构如图2和图4所示。

3 智能再制造工程体系发展

发展智能再制造工程并不是某一个企业的行为,应在全社会范围推进,可以利用国家相关政策的支持以及信息技术、智能技术的发展机会,以产业园区或产业聚集区为试点开展^[23]。考虑到中国再制造工程的发展实际,要开展智能再制造工程,当前的任务主要是推进再制造服务企业、加强再制造信息平台建设、研发推广自动化的高柔性再制造关键技术设备、提高企业现代管理水平和积极争取国家政策的支持。

1) 推进再制造服务企业。再制造服务企业包括再制造毛坯回收企业、物流提供商、各级库存提供商、废旧产品拆解企业、废旧产品及其零部件清洗企业、废旧产品及再制造产品质量检测企业、再制造生产技术提供商、再制造装备生产企业、再制造加工材料提供商和再制造产品销售商等,努力做到再制造企业与再制造服务企业合作发展,构建完善的再制造供应链网络,实现共赢。

2) 加强再制造信息平台建设。再制造信息平台应涵盖市场需求分析、废旧产品回收、再制造加工、再制造产品销售、再制造产品售后服务的全过程,包含电子商务功能,应是再制造企业、再制造服务企业、以及顾客三者实现信息共享、需求发布、任务分配等功能的平台,企业应将自身的信息系统与信息平台建立接口互通。再制造信息平台的建设主体可以是再制造企业,也可以是再制造服务企业,应融合人工智能技术、数据库/知识库技术、计算机技术,具有友好的操作

使用界面。

3) 研发推广自动化的高柔性再制造关键技术设备。自动化高柔性的再制造设备包括清洗设备、拆解设备、生产加工设备、装配设备、质量性能检测设备和废弃件处理设备等。设备要具有一机多能、应变能力强、综合利用率高、自动化水平高、转换时间短和成本低等特点,并具有较强的推广应用潜力。

4) 提高企业现代管理水平。智能再制造工程大量使用智能技术,但仍应体现人的根本作用。企业应根据智能再制造工程体系的要求,运用现代企业管理方法,改革组织结构、改善运营秩序、整合企业元素,以实现人机协调,顺应智能化管理要求。

5) 积极争取国家政策的支持。再制造产业作为国家支持的新兴产业之一,已获得良好的发展,但在社会、产业、企业、技术等层面存在若干问题,应积极争取国家层面的激励措施,尽快出台加快智能再制造发展的指导意见,编制发展规划,明确发展目标和关键环节,为智能再制造的发展提供有力支撑。

4 结论

智能再制造工程将信息技术及各类智能技术充分应用于再制造的全过程,具体包括智能再制造物流、智能再制造生产、智能再制造加工技术设备和智能再制造产品营销等,构成了高度协同集成的工程体系。智能再制造工程体系可实现再制造全系统、全流程的自动化、柔性化与数字化,可大大提高再制造企业的产品效益、生产能力和管理水平。智能再制造工程是中国再制造产业发展的新模式和新阶段。

参考文献(References)

- [1] 徐滨士, 梁秀兵, 史佩京, 等. 我国再制造工程及其产业发展[J]. 表面工程与再制造, 2015, 15(2): 6-10.
Xu Binshi, Liang Xiubing, Shi Peijing, et al. Remanufacturing engineering and its industrial development in China[J]. Surface Engineering & Remanufacturing, 2015, 15(2): 6-10.
- [2] 周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
Zhou Ji. Intelligent manufacturing: Main direction of “Made in China 2025” [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [3] 王喜文. 中国制造2025解读: 从工业大国到工业强国[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
Wang Xiwen. China Demystifying made in China 2025: From the large industrial country to the powerful industrial country[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2015.
- [4] 吴晓波, 朱克力. 读懂中国制造2025[M]. 北京: 中信出版社, 2015.
Wu Xiaobo, Zhu Keli. Read made in China 2025 [M]. Beijing: China Citic Press, 2015.
- [5] 徐滨士. 装备再制造工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
Xu Binshi. Equipment remanufacturing engineering[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2013.
- [6] 徐滨士. 再制造与循环经济[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Xu Binshi. Remanufacturing and recycling economy [M]. Beijing: Sci-

- ence Press, 2007.
- [7] 中国机械工程学会. 中国机械工程技术路线图[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2012.
Chinese Mechanical Engineering Society. Chinese mechanical engineering technology roadmap[M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2012.
- [8] Yin Z, Zhang G, Gao H, et al. A framework of intelligent remanufacturing system based on robotic arc welding[M]// *Robotic Welding, Intelligence and Automation*. Berlin: Springer-Verlag, 2011: 49-55.
- [9] 全国绿色制造技术标准化技术委员会. 再制造术语: GB/T 28619—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
National Technical Committee on Green Manufacturing Technology of Equipment Manufacturing Industry of Standardization Administration of China. Remanufacturing—terminology: GB/T 28619—2012[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [10] 全国绿色制造技术标准化技术委员会. 机械产品再制造通用技术要求: GB/T 28618—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
National Technical Committee on Green Manufacturing Technology of Equipment Manufacturing Industry of Standardization Administration of China. Remanufacturing—general technical requirements for mechanical products: GB/T 28618—2012[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [11] 徐滨士, 董世运, 史佩京. 中国特色的再制造零件质量保证技术体系现状及展望[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(20): 84-90.
Xu Binshi, Dong Shiyun, Shi Peijing. States and prospects of China characterised quality guarantee technology system for remanufacturing parts[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(20): 84-90.
- [12] Lu Z, Bostel N. A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities[J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(2): 299-323.
- [13] Alshamsi A, Diabat A. A reverse logistics network design[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2015, 37(3): 589-598.
- [14] Junior M L, Filho M G. Master disassembly scheduling in a remanufacturing system with stochastic routings[J]. *Central European Journal of Operations Research*, 2015(1): 1-16.
- [15] Naeem M A, Dias D J, Tibrewal R, et al. Production planning optimization for manufacturing and remanufacturing system in stochastic environment[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2013, 24(4): 717-728.
- [16] Ahiska S S, Kurtul E. Modeling and analysis of a product substitution strategy for a stochastic manufacturing/remanufacturing system[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, 72(4): 1-11.
- [17] Kouedou A F, Kenné J P, Dejax P, et al. Production planning of a failure-prone manufacturing/remanufacturing system with production-dependent failure rates[J]. *Applied Mathematics*, 2014, 5(10): 1557-1572.
- [18] Vercraene S, Gayon J P, Flapper S D. Coordination of manufacturing, remanufacturing and returns acceptance in hybrid manufacturing/remanufacturing systems[J]. *International Journal of Production Economics*, 2014, 148: 62-70.
- [19] Cai X, Lai M, Li X, et al. Optimal acquisition and production policy in a hybrid manufacturing/remanufacturing system with core acquisition at different quality levels[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 233(2): 374-382.
- [20] Jena S K, Sarmah S P. Price and service co-optimization under uncertain demand and condition of used items in a remanufacturing system[J]. *International Journal of Production Economics*, 2016, 173: 1-21.
- [21] Li X, Li Y, Cai X. Remanufacturing and pricing decisions with random yield and random demand[J]. *Computers & Operations Research*, 2015, 54: 195-203.
- [22] Wen H, Liu M, Liu C, et al. Remanufacturing production planning with compensation function approximation method[J]. *Applied Mathematics & Computation*, 2015, 256: 742-753.
- [23] 李恩重, 史佩京, 徐滨士. 我国再制造政策法规分析与思考[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(19): 117-123.
Li Enzhong, Shi Peijing, Xu Binshi. Analysis of policies and regulations of Chinese remanufacturing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(19): 117-123.

Intelligent remanufacturing engineering system

LIANG Xiubing¹, LIU Bohai², SHI Peijing³, LI Enzhong³, ZHANG Zhibin¹, XU Binshi^{1,3}

1. National Engineering Research Center for Mechanical Products Remanufacturing; Academy of Armed Force Engineering, Beijing 100072, China
2. School of Management, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China
3. National Key Laboratory for Remanufacturing; Academy of Armed Force Engineering, Beijing 100072, China

Abstract Based on the development and trend of remanufacture engineering in China, a concept of intelligent remanufacturing is put forward and an intelligent remanufacturing system is built accordingly. The system mainly consists of intelligent remanufacturing logistics, intelligent remanufacturing production, intelligent remanufacturing processing, intelligent remanufacturing marketing. The details of these four principal constituent parts are explained in terms of concept, method and system, respectively. Finally, the current main tasks and the future development direction of the intelligent remanufacture engineering in China are discussed. It is pointed out that remanufacture engineering is an important part of intelligent manufacturing, and the intelligent remanufacture engineering system is the comprehensive summary and promotion of the current Chinese remanufacturing industry development mode. The proposed system can realize automation, flexibility and digitization of whole remanufacturing system and processes, and energetically improve product effectiveness, production capacity and management level for remanufacturing enterprises.

Keywords intelligent remanufacturing; engineering system; intelligent remanufacturing logistics; intelligent remanufacturing production; intelligent remanufacturing processing; intelligent remanufacturing marketing (责任编辑 韩晓明)