

废旧机电产品再制造 质量控制理论与方法

姜兴宇 李丽 乔赫廷 等著

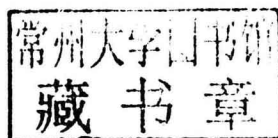


机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



废旧机电产品再制造 质量控制理论与方法

姜兴宇 李 丽 乔赫廷
王 蔚 张 凯 任会之 著
王 松 柳 青 金嘉琦



机械工业出版社

本书以废旧机床再制造过程为例,重点对废旧机电产品的可再制造质量评估、废旧机电产品的质量设计、废旧机电产品再制造过程质量控制方法等进行深入研究,从而形成面向废旧机电产品再制造全过程的质量控制理论与方法。这对于提高再制造产品质量、降低再制造成本、提高再制造系统稳定性及对于我国大力发展再制造工程都具有重要的实际意义。

本书共分为6章,主要内容包括再制造概述、废旧机电产品再制造过程质量模型、废旧零部件的可再制造质量评估与决策、基于TRIZ与可拓理论的再制造质量设计、基于二级实例推理的再制造工艺决策方法、废旧零部件再制造过程智能质量控制方法。

本书可供从事再制造及绿色设计、再制造工艺研究的科技人员和院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

废旧机电产品再制造质量控制理论与方法/姜兴宇等著. —北京:机械工业出版社, 2018.2

ISBN 978-7-111-59103-0

I. ①废… II. ①姜… III. ①机械工厂-生产管理 IV. ①TH186

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第023429号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:沈红 责任编辑:沈红

责任校对:郑婕 封面设计:张静

责任印制:常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2018年2月第1版第1次印刷

169mm×239mm·9.75印张·191千字

标准书号:ISBN 978-7-111-59103-0

定价:89.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

我国作为制造大国，机电产品保有量巨大，而再制造是机电产品资源化循环利用的最佳途径之一。目前，我国的再制造产业已初具规模，但还未规范化，且没有大规模地展开，也远未达到预期的市场前景。其原因固然很多，但不可否认，再制造的生产运作具有相当难度，且再制造技术的瓶颈是主要原因；而再制造产品质量更是制约再制造企业生存发展的重要因素。再制造产品质量的控制已成为再制造企业面临的核心问题之一，直接影响产品的销售和经济效益，质量优异的再制造产品可以凭借较低的价格优势占领用户市场，实现企业的赢利，并最大化地实现资源的循环使用、回收率及环保。因此，深入研究废旧机电产品的再制造过程质量的形成规律，构建废旧机电产品的再制造过程质量模型，并在此基础上解决复杂的、高度不确定的废旧机电产品的再制造质量控制问题，已经成为我国发展再制造工程并推进其产业化发展、构建循环经济和建设节约型社会的亟待解决的问题。

而相对于传统产品制造过程的质量控制，废旧产品再制造的毛坯是废旧零部件，其原始质量和服役工况直接决定了再制造的可行性。由于废旧件的原始质量存在较大差异，服役工况也各不相同，从而使废旧件质量具有高度的不确定性，且传统的质量管理与控制方法已很难适应再制造系统过程。基于此，本书在《中国制造 2025 专项——绿色制造系统集成项目》、国家自然科学基金（No. 51305279）和辽宁省优秀人才支持计划（No. LJQ2015078）资助下，以废旧机床再制造过程为例，重点对废旧机电产品的可再制造性评估、废旧机电产品的质量设计、废旧机电产品再制造过程质量控制方法等进行了深入研究，提出了面向废旧机电产品再制造全过程的质量控制理论与方法。这对于提高再制造产品质量、降低再制造成本、提高再制造系统稳定性及对于我国大力发展再制造工程都具有重要的实际意义。

本书共分 6 章，第 1 章由姜兴宇著，第 2、第 3 章由李丽、王松、柳青著，第 4、第 5 章由乔赫廷、王松、柳青著，第 6 章由王蔚、张凯、任会之共同著，全书由姜兴宇、金嘉琦统稿。同时，宋博学、代明明、胡东波等研究生在收集资料、整理书稿方面做了大量的工作。

本书在编写过程中参考和借鉴了不少国内外的相关文献，在此谨向文献作者表示深深的谢意！特别感谢沈阳精新再制造有限公司王松总经理、徐芳副总经理和柳青工程师为本书提供了大量再制造实例、工程数据和鼎力支持。同时，感谢东北

IV 废旧机电产品再制造质量控制理论与方法

大学于天彪教授对本书提出的宝贵意见和悉心指导，感谢沈阳工业大学王世杰教授、金嘉琦教授和张新敏教授对本书出版的大力支持。

由于废旧机电产品再制造过程复杂，且涉及多学科交叉与融合，本书中还有许多内容尚需深入细致的研究，加之著者水平有限，书中不妥之处，敬请读者批评指正。

著 者

目 录

前 言

第1章 再制造概述	1
1.1 再制造的概念、内涵与特征	1
1.1.1 再制造的概念	1
1.1.2 再制造的内涵与特征	1
1.2 再制造的关键技术	3
1.3 再制造的国内、外研究现状	4
1.3.1 国内、外再制造产业的现状	4
1.3.2 国内、外再制造相关研究现状	8
1.3.3 废旧机电产品的再制造质量控制方法的研究进展	10
参考文献	12
第2章 废旧机电产品再制造过程质量模型	16
2.1 废旧机电产品再制造流程	16
2.1.1 鉴定回收阶段	16
2.1.2 拆卸阶段	18
2.1.3 清洗阶段	18
2.1.4 检测评估阶段	18
2.1.5 再设计阶段	19
2.1.6 再制造阶段	19
2.1.7 再装配阶段	20
2.1.8 销售服务阶段	21
2.2 废旧机电产品再制造质量形成过程	21
2.2.1 传统质量形成过程分析	21
2.2.2 再制造质量形成过程	22
2.3 废旧机电产品再制造质量影响因素	24
2.4 再制造质量的内涵	27
2.5 废旧机电产品再制造全过程质量模型	29
参考文献	30

第3章 废旧零部件的可再制造质量评估与决策	32
3.1 废旧零部件可再制造质量问题分析	32
3.1.1 废旧零部件质量属性分析	33
3.1.2 废旧零部件再制造质量等级决策问题分析	33
3.2 废旧零部件的可再制造质量评估与决策方法	33
3.2.1 建立废旧零部件再制造质量等级综合评价物元模型	34
3.2.2 废旧零部件再制造质量等级论域划分	34
3.2.3 确定废旧零部件质量特征的权重	36
3.2.4 确定废旧零部件质量特征与再制造等级的关联函数与关联度	37
3.3 实例分析	37
3.3.1 确定废旧导轨各再制造质量等级的阈值	38
3.3.2 废旧机床导轨测量	39
3.3.3 废旧导轨的可再制造质量决策	40
参考文献	43
第4章 基于TRIZ与可拓理论的再制造质量设计	45
4.1 废旧机电产品再制造设计概述	45
4.1.1 废旧机电产品再制造设计基本流程	45
4.1.2 废旧机电产品再制造设计关键技术	47
4.2 面向用户满意度的废旧机电产品再制造设计质量参数规划	49
4.2.1 废旧机电产品再制造设计质量参数决策框架	49
4.2.2 用户需求与再制造设计质量参数关系分析	49
4.2.3 改进的再制造设计质量参数规划方程	54
4.2.4 实例分析	55
4.3 基于可拓发散树与TRIZ的废旧机电产品再制造质量设计	63
4.3.1 废旧机电产品的再制造设计冲突	63
4.3.2 设计冲突消解方法分析	66
4.3.3 基于可拓发散树与TRIZ的再制造设计冲突消解方法	72
4.3.4 实例分析	78
参考文献	84
第5章 基于二级实例推理的再制造工艺决策方法	89
5.1 废旧机电产品再制造工艺决策	89
5.1.1 再制造工艺决策的内涵	89
5.1.2 再制造工艺决策关键因素分析	90
5.2 废旧机电产品再制造工艺决策问题分析	91
5.2.1 再制造工艺决策面临的困难	91

5.2.2 再制造工艺决策亟待解决的问题	93
5.3 基于二级实例推理的再制造工艺决策方法	94
5.3.1 实例推理	94
5.3.2 基于二级实例推理的工艺决策框架	96
5.4 实例分析	99
参考文献	103
第6章 废旧零部件再制造过程智能质量控制方法	104
6.1 废旧机电产品再制造过程质量分析	104
6.1.1 再制造过程质量不确定性的原因	104
6.1.2 再制造过程质量分析	105
6.2 废旧机电产品再制造过程质量控制的关键问题	106
6.2.1 再制造过程质量控制的关键问题	106
6.2.2 再制造过程质量监控理论综述	106
6.3 基于动态、非正态的 EWMA 控制图的再制造过程质量监控模型	107
6.3.1 面向动态、多元非正态分布的再制造过程质量监控流程	107
6.3.2 与分布无关的非参多元 EWMA 控制图的构建	108
6.3.3 面向动态、多元非正态分布的再制造过程质量 EWMA 控制图的构建	110
6.3.4 实例分析	113
6.4 基于改进 PCA 的废旧机电产品再制造过程异常识别	117
6.4.1 废旧机电产品再制造过程质量异常分析	117
6.4.2 基于改进 PCA 的再制造过程质量异常识别	119
6.4.3 实例分析	124
6.5 基于粗糙集的再制造过程质量异常诊断与调整系统	126
6.5.1 再制造过程质量诊断	126
6.5.2 基于粗糙集的再制造过程质量异常诊断	129
6.5.3 基于专家系统的再制造过程质量异常调整	137
6.5.4 实例分析	140
参考文献	144

第 1 章 再制造概述

1.1 再制造的概念、内涵与特征

1.1.1 再制造的概念

再制造是循环经济、再利用的高级形式，是绿色制造技术研究领域的学术热点之一，受到了国内、外学术界和业界的广泛关注。国内外的一些学者对再制造做出定义，并对其内涵和特征进行了阐述。

1984 年，再制造研究的先驱、美国波士顿大学制造工程学教授 Robert T. Lund 首次在世界上提出了“再制造”（Remanufacture）概念，将其定义为：“再制造是将耗损的耐用产品恢复到既能用又经济，经过拆卸分解、清洗检查、整修加工、重新装配、调整测试的全生产过程^[1]。”

Guide JR 博士的定义为：“将一个旧产品恢复到‘新’状态，使其具有和原产品一样的使用性能和寿命，这样的过程叫再制造”^[2]。

我国学术界普遍采用的定义是：“以产品全生命周期设计和管理为指导，以优质、高效、节能、节材、环保为准则，以先进技术和产业化生产为手段，来修复改造废旧产品的一系列技术措施或工程活动的总称。”

1.1.2 再制造的内涵与特征

再制造将废旧产品作为起点，其生产流程不同于传统制造，增加了废旧产品的回收、拆解、清洗、废旧零部件质量检测及寿命评估、再制造加工、再装配等工序。再制造是把没有损坏的零件继续使用，把局部损坏的零件采用先进的表面工程技术等手段进行再制造加工后继续使用，并针对不同的失效原因采用相应的措施使其寿命延长，挖掘废旧产品潜藏的价值。

再制造的出现，完善了全寿命周期的内涵，使得产品在全寿命周期的结尾，即报废阶段，不再“一扔了之”成为固体垃圾。再制造不仅可使废旧产品获得新生，还可很好地解决资本节约和环境污染问题。因此，再制造是对产品全寿命周期的延伸和拓展，赋予了废旧产品新的寿命，形成了产品的多寿命周期循环。

随着数控化、自动化、绿色化、信息化等高新技术的不断发展，以及市场竞争的不断加剧，再制造的内涵也应与时俱进，即由“与新产品一样好的再制造”（as

good as new) 逐渐上升到“区别于新产品、有竞争力的再制造”，才能更好地适应多样化、个性化的客户需求及快速多变的市场。

再制造的重要特征是：再制造产品的质量和性能不低于原型新品，成本为新品的 50%、节能 60%、节材 70%，对环境的不良影响显著降低^[3]。再制造可以实现废旧产品或零部件的循环利用，有效缓解资源短缺和废弃产品对环境的污染问题，是我国加快发展循环经济及建设节约型社会的有效途径。

再制造与传统的维修、翻新不同，在对象、技术手段、产品质量等方面具有显著区别（见表 1-1）。

表 1-1 再制造与维修、翻新的区别

项目	再制造	维修	翻新
对象	废旧产品	故障产品	废旧产品
过程	完全拆卸	故障诊断	部分拆卸
	清洗所有部件	故障部件拆卸	部分清洗
	零件分类与检测 整机再设计	故障部件修理 或更换新零件	检测
	废旧零部件再加工 或更换新零件	零件重新安装	旧件翻新处理 或更换新零件
	产品再装配		零件重新安装
特点	达到甚至超过原新品的性能	恢复到故障前状态	基本达到原机标准
	产业化、规模化	单件、小批量零件维修	小批量翻新
	执行最新技术标准	保持原有技术标准	无法达到新品标准
	整机质量担保	维修部分质量担保	

(1) 维修 对象是有故障的产品，在产品的使用阶段使其恢复良好的状况和使用功能，多以换件为主，辅以单个或小批量的零部件修复，常具有随机性、原位性和应急性。维修的设备和技术一般相对落后，而且难以形成批量生产；维修后的产品多数在质量、性能上难以达到原机新品的水平。

(2) 翻新 对象是废旧的产品，仅是经过一定程度的拆解、清洗、检测、翻新处理和再装配等过程，没有应用高新技术对废旧产品进行性能提升，因此在技术水平上和产品质量上都无法达到新品的标准。

(3) 再制造 对象是废旧的产品, 经过完全拆卸、清洗、分类、检测、评估后, 根据客户的需求进行再设计, 将有较高剩余附加值的零部件作为再制造毛坯, 利用先进的表面工程技术, 经数控化、自动化等高新技术对其进行产业化的再制造, 使其性能升级, 达到甚至超过原新品的性能, 且执行新产品的验收标准。

此外, 再制造是规模化的生产模式, 它有利于实现自动化和产品的在线质量监控, 有利于降低成本、降低资源和能源消耗及减少环境污染, 还能以最小的投入获得最大的经济效益。

1.2 再制造的关键技术

再制造技术是实现再制造产业化的重要支撑, 是一个国家再制造业核心竞争力所在, 因此国内外对再制造关键技术的研发高度重视。欧美国家的再制造已经形成了巨大的产业, 2005 年全球再制造业产值已超过 1000 亿美元, 美国的再制造产业规模最大, 已达到 750 亿美元, 其中汽车和工程机械再制造占 2/3 以上, 约 500 亿美元。

目前, 欧、美、日等发达国家和地区的再制造技术已基本成熟, 主要体现在两个方面:

1) 再制造设计: 针对重要设计要素进行研究, 如拆卸性能、零件材料种类、设计结构与紧固方式等。

2) 再制造加工: 对于机械产品, 主要通过换件修理法和尺寸修理法来恢复零部件的性能^[4]。

从现有的国内、外文献与专利报道来看, 大多数再制造技术是在原创技术基础上结合再制造产品的特点和要求, 经过改进和调整的衍生技术。兼顾各类技术的重要性和典型性, 主要有 11 项国内、外重点研究的再制造技术, 包括激光熔覆、等离子熔覆、堆焊熔覆、感应熔覆、高速电弧喷涂、等离子喷涂、火焰喷涂、纳米复合电刷镀、表面喷丸强化、超声清洗、无损检测等技术。其中, 修复成形与加工技术又可分为熔覆层、涂层和镀层三大类^[5]。

面向 2030 年, 再制造发展在技术层面将满足更高的要求, 再制造技术呈现五大发展趋势: “绿色、优质、高效、智能、服务”^[6]。未来将要重点发展的再制造关键技术主要包括六个方面: 再制造设计技术、再制造系统规划技术、再制造拆卸与清洗技术、再制造损伤评价与寿命评估技术、再制造成形加工技术、再制造标准体系技术等 (见图 1-1)。

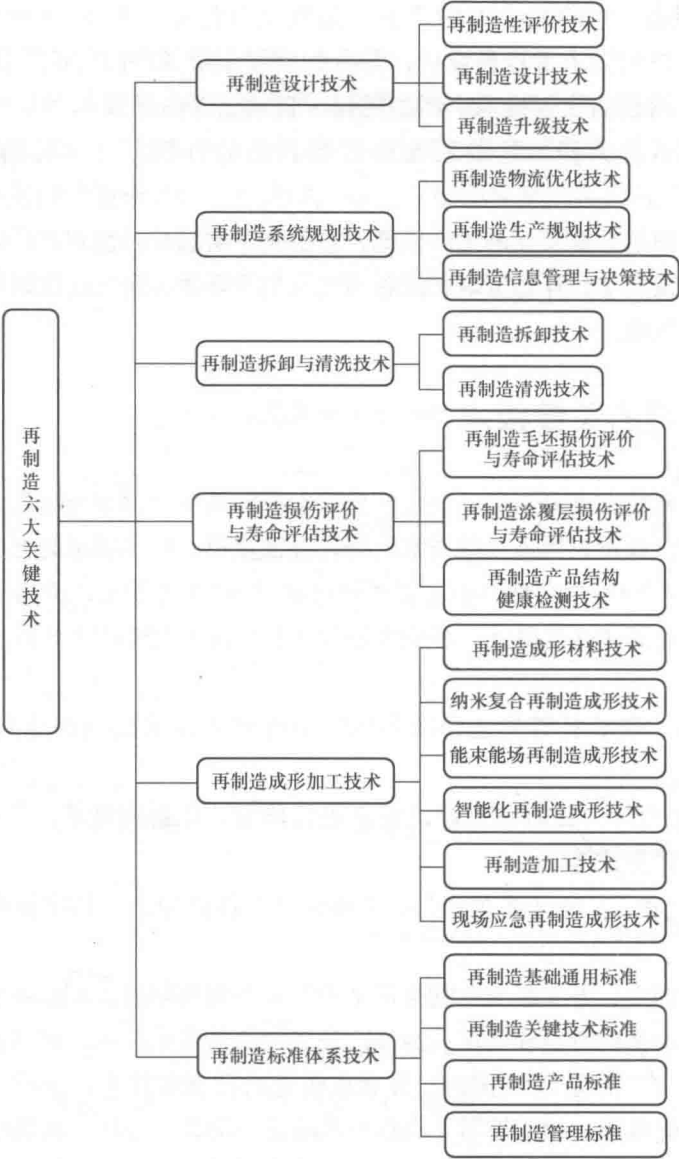


图 1-1 未来重点发展的六大关键再制造技术

1.3 再制造的国内、外研究现状

1.3.1 国内、外再制造产业的现状

1. 国外再制造产业现状

在欧美发达国家，再制造产业从 20 世纪 80 年代便已逐渐兴起，再制造产业已

具有较为完善的产业链体系,再制造产品的民众接受程度较高,因此其具有较为广阔的市场前景。此外,再制造产品的产值占比在发达国家中所占的比例同样较高,也体现出再制造对废弃资源具有较高的重用率。随着再制造研究的不断深入及其产业化的不断推进,国际上再制造的产品或零件已包括机床、医疗设备、复印机、汽车零件、计算机、办公家具、飞机、航空设备、电话设备和轮胎等。

2010年以来,美、欧、日等发达国家和地区相继制订了“再制造业化”的国家战略,不是要实现传统制造业的简单再回归,而是要进一步增强自己在传统制造业优势环节的竞争力,尤其是创造出更高端的、具有更高附加值的新兴产业,抢占21世纪先进制造业的制高点,从而能够快速增强国内实体经济的实力。

(1) 美国的再制造研究 在国外再制造理论发展方面,美国走在欧美各发达国家的前列。1984年,Robert T. Lund在世界银行的资助下完成了报告《再制造:美国的经验及对发展中国家的启示》,重点研究了绿色再制造产业的经济管理和市场导向问题,既总结了美国在绿色再制造方面的已有经验,又极大地推动了世界范围内绿色再制造产业的蓬勃发展。1996年,Robert T. Lund主持了对美国再制造业的深入调研,发布报告《再制造业:潜在的巨人》,调查范围涉及汽车、压缩机、电器、机械制造、办公设备、轮胎、墨盒、阀门8个工业领域,建立了包含9903个再制造公司的庞大数据库。

作为全球再制造产业规模最大的美国,产业规模达1000亿美元,其中汽车和工程机械再制造占2/3以上。再制造企业有近7.5万家,从业人数约50万人。美国有300多家专业从事机床再制造的企业,对大型多功能机、齿轮加工机、金属切削机床等不同的机床产品进行了专业化的分类,都有专业公司负责再制造,并提供售后服务及质量保证。

20世纪70年代初,工程机械行业元老级企业美国卡特彼勒公司开始涉足再制造领域,迄今为止开展再制造业务40多年,并在全球已建立了17座再制造工厂,拥有了完善的全球旧件回收系统和再制造产品销售系统,产品包括发动机、变速器、驱动桥、液压零部件、电子控制单元等。每年回收处理200万个旧件,再制造回收处理8万t材料,已发展成为全球最大的再制造企业。

美军也高度重视再制造,制订了2010年国防工业制造技术框架,将武器系统的再制造列为国防重要研究领域。美军是再制造的最大受益者,既重视再制造的应用,也重视再制造相关技术的研究。其车辆和武器装备大量使用了再制造零部件,不仅节约了军费、资源和能源,而且还大大延长了武器装备的使用寿命。

(2) 日本的再制造研究 20世纪90年代,日本提出了“环境立国”口号,并逐步建立了一套有利于发展循环经济、建立循环型社会的法律体系,大力发展循环经济。日本的再制造产业主要集中于汽车再制造、电子机械再制造领域。

近年来,日本加强了对工程机械的再制造,到2008年在再制造的工程机械中,58%由日本国内用户使用,34%出口到国外,其余的8%拆解后作为配件出售。故

在生活中经常可以碰到含有再制造零件的产品,大到汽车,小到手机。日本消费者对再制造产品并不排斥,而且再制造还是环保的代称。

日本拥有占世界 1/10 的汽车,每年都有 500 万辆以上报废。日本 JRC 株式会社是日本最大的汽车零部件再制造企业,在东京和大阪地区有数家分支机构。该企业 2008 年总产值 600 多亿日元(约合人民币 45 亿元),其产品涵盖发动机、转向器、变速器、转向泵、底盘、制动器等多个类别,仅转向器、转向泵的再制造年产量就在 50 万台以上。

日本机床制造业也打破传统的维修老旧机床的观念,通过再制造实现机床现代化。主要以本地制造的机床为再制造对象,大概占有再制造机床总数的 63%。据统计,日本从事机床再制造并具有一定规模的企业有 20 多家,如大隈工程公司、冈三机械公司、千代田工机公司、野崎工程公司、滨田工机公司和山本工程公司等。

如富士施乐公司,在日本全国建立了 50 个废弃旧复印机回收点,废旧复印机的零件循环利用率达到 50% 以上,拥有旧零部件的复印机产量达到总产量的 25%,而且通过再制造生产的复印机质量丝毫不受影响。

(3) 欧洲的再制造研究 欧洲也积极推动再制造产业的发展,建立了相关的扶持法规,并制订了具体再制造行业的再制造目标。2000 年 2 月欧盟委员会规定:未来所有欧盟的汽车用户将享受免费旧车回收。从 2002 年起,废旧汽车的可再生利用率将达到 85%,到 2015 年达到 95%。欧盟还在德国建立了欧洲再制造技术中心;欧洲主要工业化国家的一些大企业都相继开展了再制造,如著名的大众、宝马、梅塞德斯汽车企业均建立了汽车拆卸试验中心。

欧洲汽车零部件再制造(APRA)协会统计显示,目前欧洲可再制造的汽车零部件包括制动器(鼓式和盘式)、空调、交流发电机、离合器、气缸盖、差速齿轮、发动机、风扇电动机、加热器鼓风机、前轴、燃油泵、喷油器、发电机、总泵、动力转向、齿轮齿条、起动机、涡轮增压器、变矩器、变速器、雨刷电动机等。

德国的汽车再制造工程产业已经达到相当高的水平,至少 90% 零部件可以得到重用或合理处理。如宝马公司已建立一套完善的回收品经营连锁店的全国性网络,并从实践中得到经验,且汽车回收工作效益很好;即用过的发动机经改造后,仅是新发动机成本的 50%~80%;发动机在改造程序中,94% 被修复,5.5% 被溶化再生,只有 0.5% 被填埋处理。又如德国的大众汽车公司仅再制造原装回收发动机一项,就达 748 万台,相当于节省钢材 33.7 万 t。德国政府对机床改造及再制造非常重视,联邦政府和州政府专门拨款支持该领域的研究工作。欧洲最大的机床制造企业——德国吉特迈集团股份公司已开展机床改造服务,德国席士公司也成立了机床改造服务部。

法国的标致·雪铁龙公司联合法国废钢铁公司和维卡水泥公司,在里昂附近建

立一个汽车再生工厂；雷诺公司同法国废钢铁公司在阿蒂蒙建立了汽车报废回收中心。法国的汽车回收率，已经从前几年的80%，提高到目前95%。

英国在再制造产品无损检测、自适应修复和寿命评估方面开展了大量研究工作，并出版发行《Journal of Remanufacture》国际期刊。

2. 国内的再制造产业现状

随着经济快速发展、产品更新换代加快，我国废旧机电产品的数量出现爆发式增长。大量的机械装备进入报废高峰期，年报废汽车约500万辆；全国役龄10年以上的机床超过200万台；80%的在役工程机械已超过质保期，30%的盾构设备处于报废闲置状态；办公设备耗材大量更换，造成了大量的资源浪费和环境污染。经济社会发展要求再制造发挥更大作用，机械行业现状需要再制造扩大产业规模。

我国再制造产业起步较晚，经历了产业萌生、科学论证和政府推进三个阶段，目前正处于初级发展阶段。我国再制造工程实践起源于机电产品维修的产业实践探索。自20世纪90年代初开始，国内相继出现了一些企业开始探索再制造产业模式，如中国重汽集团济南复强动力有限公司、上海大众汽车有限公司的动力再制造分厂、柏科（常熟）电机有限公司、广州市花都全球自动变速箱有限公司等汽车零部件再制造企业，分别在重型卡车发动机、轿车发动机、车用电机，以及车用变速器等领域开展再制造业务探索。

再制造产业的持续稳定发展，离不开国家政策的支撑与法律法规的有效规范。我国再制造政策法规经历了一个从无到有、不断完善的过程，再制造产业的发展也逐渐走上了法制化道路。2005年国务院颁发的《国务院关于做好建设节约型社会近期重点工作的通知》和《国务院关于加快发展循环经济的若干意见》中首次提出支持废旧机电产品再制造。2008年《中华人民共和国循环经济促进法》明确提出再制造的含义、适用范围等，由此再制造产业发展进入法制化轨道。2010年，11个部门联合发布《关于推进再制造产业发展的意见》，指导全国加快再制造产业的发展，并将再制造产业作为国家新的经济增长点予以培育。

国务院2013年发布的《循环经济发展战略及近期行动计划》提出，到2015年实现年再制造发动机80万台，变速器、起动机、发电机等800万件，工程机械、矿山机械、农用机械等20万台套，再制造产业年产值达500亿元左右。截至2014年底全国已有77家试点再制造企业，涉及再制造产品目录已涵盖工程机械、电动机、办公设备、石油机械、机床、矿山机械、内燃机、轨道车辆、汽车零部件等9大类97种产品。2015年5月，国务院正式印发了《中国制造2025》，这是第一次从国家战略层面描绘建设制造强国的宏伟蓝图，其中重点提出了实施包括绿色制造在内的5大工程。

总体来看，我国再制造产业发展速度较快，且已经成为世界的再制造中心之一。但与发达国家和地区比，我国再制造企业数量少而弱，产业规模不大，整体技术水平不高，共性和关键技术研发滞后，同时面临市场认知度不高、政策法规、逆

向物流体系不健全等一系列阻碍和挑战,再制造发展之路任重道远。

1.3.2 国内、外再制造相关研究现状

由于再制造具有广阔的市场前景,国内、外学术界和工业界在其生产运营方式、关键技术、管理模式、产业化等方面进行了大量研究。综合国内、外再制造的研究进展,再制造的研究主要集中在以下三个方面:再制造技术、再制造产业化发展与管理策略、再制造评价。

1. 再制造技术

再制造技术主要指通过研究先进的再制造技术手段及工艺、再设计方法,使再制造的产品性能得到充分的保证。

美国罗切斯特理工学院(RIT)成立了专门从事再制造工程研究的全国再制造和资源恢复中心(NC3R),其任务是为产业界提供先进的再制造技术和手段,提高再制造效率,降低再制造成本。该中心在废旧产品失效特性分析、剩余寿命评估、再制造质量检测、面向再制造的可持续性设计、逆向物流等方面展开了研究,并开发了相关的支持工具或软件^[7]。

美国田纳西大学无污染产品和技术研究中心对汽车行业的再制造技术进行了研究。通用汽车公司的土星部与田纳西大学合作,开发了一个汽车再制造软件,该软件从汽车制造到销毁,跟踪汽车所有零部件对能源和环境的影响,以指导技术人员工作和检验回收效果。

在再制造技术创新发展方面,我国以徐滨士院士为首的一批专家学者已经将热喷涂、激光表面处理、堆焊等表面工程技术用于再制造^[8-10],并应用于汽车和机床等废旧零部件的再制造。目前,我国已形成了自主创新的、具有特色的再制造技术,即以先进的寿命评估技术、纳米表面工程和自动化表面工程技术为支撑,基于尺寸恢复及表面性能提升的“再制造成形技术”,并向自动化、智能化、复合化方向发展。但总体技术和设备配套不完善,技术发展不均衡,还不能支撑产业的发展。

另外,再设计是再制造的关键技术之一,通过应用先进的技术和设计方法,再次赋予废旧产品新的功能“适用性”、性能的恢复及提升。

在国外,Bras Bert 和 Mark W. McIntosh 对再制造设计中的产品、组织、工艺等领域的研究成果进行了综述,提出了再制造设计的热点研究领域^[11]。Hatcher 等人综述了再制造设计的研究成果,并指出再制造设计的目标是提高再制造性^[12]。Brazier 等人建立了一种基于通用设计类的任务模型来实现知识系统的再设计^[13];D. Janz 等人提出了一种提升产品全生命周期性能和优化成本的再设计方法,该方法结合了价值分析法、质量功能部署(QFD)和生命周期成本法^[14]。

在国内,朱胜、姚巨坤对再制造设计的基础理论、内容体系及应用进行了系统研究^[15],并对再制造升级的内涵、技术体系、实施模式、设计与评价方法等进行

了系统研究^[16]；刘志峰等人对基于拆卸的再制造设计进行了研究^[17]；刘涛、刘光复等人提出了面向主动再制造的产品可持续设计框架^[18]。

国内的其他高校也纷纷对再制造的关键技术展开研究工作。如清华大学在机电产品绿色设计技术和电子电器产品的回收处理技术方面进行了研究，并与企业进行产学研合作，成立了清华至卓绿色制造研发中心；合肥工业大学长期以来对家电产品的绿色设计及回收、拆卸、再利用技术进行了多方面的研究工作；上海交通大学与美国通用、福特汽车公司合作开展了轿车的回收、拆解等再制造研究；重庆大学在废旧机床再制造评价、再设计方法、再制造工艺决策等方面取得了较多的研究成果^[19-22]，并与重庆机床集团合作开展废旧机床的再制造产业实践；武汉科技大学针对再制造的不确定性进行评价与决策研究^[23,24]等。

2. 再制造的产业化发展与管理策略

再制造作为一个蕴藏着巨大经济价值的新兴产业，已受到国内、外广泛的重视，并纷纷对再制造产业化的经验、存在的问题、发展策略等进行了研究，如研究再制造的运营模式和管理问题，以保证再制造的实施。

在国外，Boyer描述了一种将销售、材料、生产及财务集成到再制造“毛坯”管理的技术，并通过对产品设计和工艺过程的精心规划，使再制造可以产生最大的经济和生态效益^[25]；Uzsoy R提出了一个由一系列模型集成的模型，用来检验不同价格的结构在再制造中长期耐久性的效果和短期管理问题^[26]；Hanson探讨了逆向物流对再制造和可持续系统的影响，并提出了规划逆向物流的原则和方法^[27]；Murayama和Shu提出了一些可靠性模型，包括材料流动仿真、生产管理和再制造^[28]。

在国内，徐滨士院士对再制造产业化的进展及管理问题进行了研究^[29,30]；江志刚、张华等人从产品多生命周期延展的技术角度，对绿色再制造管理的内涵、体系结构及实施策略进行了研究^[31]；刘飞、曹华军等人提出了机床再制造与综合提升的运作流程和技术框架，并对其产业化策略进行了研究^[32]。

另外，国内外对再制造的生产模式^[33,34]进行了探索，并对再制造的各个环节的管理^[35]展开研究，包括逆向物流管理^[36,37]、设计管理^[38]、信息管理^[39]等方面，其中逆向物流管理的研究成果较多。

3. 再制造评价

再制造评价包括对废旧产品的可再制造性进行评价，以及对再制造过程进行评价。通过建模与实验建立产品性能检测与评价系统，评估再制造产品的性能、经济性、环保性及可持续性。

Lund通过统计不同类型再制造产品的特性，总结出产品具有再制造性的七大准则^[40]：①产品具有耐用性；②产品功能性失效；③产品零部件互换性好；④产品蕴含的剩余价值高；⑤失效产品的回收成本比它的剩余价值要低；⑥产品制造技术可行；⑦消费者接受再制造产品^[40]。Guide将再制造废旧零部件进行分类，根