

再制造升级

REMANUFACTURING UPGRADE

姚巨坤 朱胜◎著

如何使废旧产品的性能得到快速提升？

如何实现产品自身的可持续发展和多寿命周期升级使用？

！本书提供完整的路线图和解决方案！



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

再制造升级

姚巨坤 朱 胜 著



机械工业出版社

再制造升级是再制造工程的重要内容,是废旧产品再制造的重要发展方向,对于实现功能落后产品的升级改造具有重要意义,可以促进产品由机械化向信息化的发展。本书详细介绍了再制造升级的概念内涵、技术体系、实施模式、设计方法、资源优化、效益评价及工程应用等内容,丰富和发展了再制造工程理论体系,填补了再制造升级领域的研究空白。

本书内容丰富,逻辑严谨,体系完备,图文并茂,理论与实践相结合,对再制造升级理论技术研究和工程实践应用具有较强的指导价值,可供从事机械产品设计、再制造、维修、资源化、设备改造等领域的工程技术人员、管理人员、研究人员参考,也可作为再制造、维修、设备管理等专业的学习培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

再制造升级 / 姚巨坤, 朱胜著. —北京: 机械工业出版社, 2016.12
ISBN 978-7-111-55523-0

I. ①再… II. ①姚… ②朱… III. ①制造业-工业企业-企业升级-研究-中国 IV. ①F426.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 287362 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: 吕德齐 责任编辑: 吕德齐 雷云辉

责任校对: 张玉琴 封面设计: 马精明

责任印制: 李 洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2017 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·11.5 印张·276 千字

0001—2000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-55523-0

定价: 69.00 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

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

前 言

再制造可使废旧产品中蕴含的价值得到最大限度的再利用，是废旧产品资源化的最佳形式和首选途径，是实现循环经济、资源节约和环境保护的重要手段。传统的再制造以恢复产品的性能作为主要目标，但随着科技的快速发展，越来越多的产品由于技术功能的落后而退役，仅仅恢复产品的性能已无法适应产品的使用要求。因此，以提升产品性能和功能的再制造升级应运而生，成为再制造工程的重要发展方向和应用领域。

再制造升级是以需要提升性能或功能的老旧产品作为对象，以产品再制造为手段，以先进技术应用、功能模块嵌入和产品结构改造为方法，以全面的再制造生产质量要求为保证，来实现老旧产品性能恢复和功能提升，促进机电产品自身的可持续发展和多寿命周期升级使用。再制造升级是再制造的重要内容，是产品改造的重要方式，是高效益提升旧品性能和功能的最佳途径，涉及在升级过程中应用的技术、方法、组织、管理等内容。

随着再制造升级在再制造工程中受到的重视日益增加和应用的拓展，迫切需要建立再制造升级的理论技术体系及设计、实施、评价等方法，来指导再制造升级过程的工程实践，满足大量功能退役产品的再制造需求。在此背景下，作者作为装备再制造技术国防科技重点实验室的核心研究人员，充分利用本单位在再制造领域的研究成果，结合多年来在再制造升级领域的研究成果和工程实践，并结合其他相关经验，总结撰写了本书。

全书共7章，详细介绍了再制造升级的概念内涵、技术体系、实施模式、设计方法、资源优化、效益评价及工程应用等内容，具体内容包括再制造升级理论与技术体系，再制造升级实施模式，再制造升级设计与评价方法，再制造升级资源分析与优化确定，再制造升级效益评价方法，典型再制造升级的实践与分析等，详细阐述了再制造升级领域各方面的具体内容，对开展再制造升级的工程实践和技术研究都具有积极的参考作用。全书由装备再制造技术国防科技重点实验室姚巨坤副教授与朱胜教授撰写并统稿，王晓明博士、崔培枝博士、殷风良博士参与了部分章节内容的撰写，研究生韩国峰、刘玉项、周超极、杨绪啟、江宏亮等参与了文献收集整理及书稿校对工作，在此一并表示感谢。

本书在编写过程中，既考虑到再制造升级的理论性，提出了相关技术理论及评价方法，也考虑到实践性，给出了具体的应用案例，对生产实践具有较强的指导意义。本书可供从事机械产品设计、再制造、维修、资源化、设备改造等领域的工程技术人员、管理人员、研究人员参考，也可作为再制造、维修、设备管理等专业的学习培训教材。

特别感谢装备再制造技术国防科技重点实验室等单位给予的大力支持，并衷心感谢军队“2110工程”重点建设学科和军内科研项目的支持。本书部分内容参考了同行的著作及研究报告，在此谨向各位作者致以诚挚的谢意。

由于作者水平有限，且再制造升级涉及内容丰富、发展迅速，不足之处在所难免，衷心希望得到读者的指正。

作 者
2016年6月

目 录

前 言

第1章 绪论 1

1.1 再制造及其发展 1

1.1.1 再制造概念 1

1.1.2 国内外再制造模式对比 1

1.1.3 国内外再制造的发展 3

1.2 再制造升级的内涵 5

1.2.1 再制造升级的发展背景 5

1.2.2 基本概念 6

1.2.3 本质属性 7

1.2.4 概念辨析 7

1.3 再制造及再制造升级的研究 8

1.3.1 再制造升级内涵及其实施模式研究 8

1.3.2 再制造升级设计研究 9

1.3.3 再制造升级保障资源研究 11

1.3.4 再制造升级评价研究 12

1.4 再制造升级的应用与发展 13

1.4.1 再制造升级的应用 13

1.4.2 再制造升级发展需求 14

参考文献 15

第2章 再制造升级理论与技术体系 19

2.1 再制造升级基础 19

2.1.1 再制造升级发展的必然性 19

2.1.2 再制造升级的发展基础 21

2.1.3 再制造升级的影响要素 22

2.1.4 再制造升级的基本观点 23

2.2 再制造升级技术体系及其内容 23

2.2.1 再制造升级技术体系 23

2.2.2 再制造升级全域技术层 25

2.2.3 再制造升级性设计技术 25

2.2.4 再制造升级规划技术 26

2.2.5 再制造升级工艺技术 27

2.2.6 再制造升级质量控制技术 28

2.2.7 再制造升级评估监控技术层 28

2.2.8 再制造升级支撑技术层 29

2.3 面向产品多寿命周期的再制造升级

体系理论 29

2.3.1 基于再制造的产品多寿命周期 29

2.3.2 产品多寿命周期的再制造升级内容 30

2.3.3 面向多寿命周期的再制造升级体系理论 31

参考文献 32

第3章 再制造升级实施模式 33

3.1 再制造升级系统实施分析 33

3.1.1 再制造升级系统及其类型 33

3.1.2 再制造升级作业方式 34

3.1.3 再制造升级系统的循环流 35

3.1.4 基于作业的再制造升级 workflow 35

3.2 再制造升级系统实施建模及目标

评价 38

3.2.1 再制造升级实施模式规划 38

3.2.2 总体实施模型框架 40

3.2.3 实施过程目标层评价 41

3.3 再制造升级系统实施方案决策 44

3.3.1 再制造升级需求论证确定 44

3.3.2 基于质量功能展开的再制造升级产品需求特性评价 45

3.3.3 基于态势分析法的再制造升级实施策略抉择 51

参考文献 55

第4章 再制造升级设计与评价 56

4.1 再制造升级设计内涵体系 56

4.1.1 再制造升级设计内涵及其特征 56

4.1.2 再制造升级设计的内容体系 58

4.1.3 再制造升级设计关键技术 58

4.2 再制造升级性设计基础研究 60

4.2.1 再制造升级性设计内涵 60

4.2.2 面向产品全寿命周期过程的再

制造升级性活动	62	6.2 基于工程估算法的再制造升级费用	
4.3 再制造升级性定性设计方法	63	预测方法	125
4.3.1 再制造升级性定性设计内容	63	6.2.1 基本概念	125
4.3.2 面向再制造升级的产品可拆解		6.2.2 基于工程估算法的产品再制造	
性设计	65	升级费用分析流程	125
4.3.3 面向再制造升级的产品模块化		6.2.3 再制造升级费用解析模型	127
设计	68	6.3 基于清单分析法的产品再制造升级	
4.4 再制造升级性定量设计方法	73	环境影响评价	129
4.4.1 再制造升级性定量参数确定	73	6.3.1 再制造升级环境效益预测	129
4.4.2 再制造升级性建模分析	75	6.3.2 再制造升级周期环境评价指标	
4.4.3 再制造升级性指标分配	79	体系	130
4.4.4 再制造升级性指标预计方法	81	6.3.3 再制造升级周期环境影响评价	
4.4.5 再制造升级性设计的参数映射		方法	135
机制	83	6.4 基于多级模糊综合评价法的再制造	
4.5 再制造升级性设计评价方法	88	升级效益评价	139
4.5.1 面向再制造升级的产品材料设计		6.4.1 基本描述	139
评价	88	6.4.2 多级模糊综合评价法的数学	
4.5.2 基于模糊层次分析法的再制造		原理	139
升级性综合评价	92	6.4.3 产品再制造升级效益评价模型的	
参考文献	97	构建	140
第5章 再制造升级资源分析与优化		参考文献	142
确定	98	第7章 典型再制造升级的实践与	
5.1 再制造升级系统保障资源分析	98	分析	144
5.1.1 再制造升级系统保障内涵	98	7.1 机床数控化再制造升级综合分析	144
5.1.2 再制造升级系统资源分析	100	7.1.1 机床数控化再制造升级概念	144
5.1.3 再制造升级备件保障资源分析		7.1.2 机床再制造升级的总体设计及	
确定	101	路线	144
5.1.4 再制造升级实施人员分析确定		7.1.3 机床数控化再制造升级实施	
方法	105	技术方案	145
5.1.5 再制造升级生产质量控制方法	107	7.1.4 机床数控化再制造升级方案	
5.2 再制造升级保障资源优化管理方法	109	评价	150
5.2.1 再制造升级生产资源优化管理		7.1.5 机床数控化再制造升级辅助	
方法	109	决策信息系统	151
5.2.2 基于精益生产的产品再制造		7.1.6 机床数控化再制造升级效益	
升级优化管理	112	分析	153
5.2.3 成组再制造升级管理方法	115	7.1.7 老旧机床再制造升级性评估	158
5.2.4 柔性再制造升级及资源分配		7.2 重载车辆发动机再制造升级延寿应用	
方法	116	分析	160
参考文献	121	7.2.1 发动机再制造升级延寿背景	
第6章 再制造升级效益评价方法	122	分析	160
6.1 基于综合效益的再制造升级技术方案		7.2.2 发动机再制造升级延寿技术可行	
评价	122	性分析	160
		7.2.3 面向性能升级的再制造升级方案	

设计	161	7.3.4 轴流泵的再制造升级案例	170
7.2.4 发动机再制造升级延寿关键技术		7.4 产品零部件性能的再制造升级	
工艺	162	应用	172
7.3 废旧工业泵的再制造升级	165	7.4.1 油田储罐的再制造升级延寿	172
7.3.1 概述	165	7.4.2 发酵罐内壁再制造升级延寿	173
7.3.2 工业泵再制造升级的可行性		7.4.3 绞吸挖泥船绞刀片再制造升级	
分析	165	应用	174
7.3.3 工业泵的再制造升级工艺	166	参考文献	176

第 1 章

绪 论

进入 21 世纪以来,保护地球环境、构建循环经济、保持社会可持续发展已成为世界各国共同关注的话题。再制造作为废旧产品再利用的最佳模式,可使废旧资源中蕴含的价值得到最大限度的开发和利用,缓解资源短缺与资源浪费的矛盾,减少产品对环境的危害,是实现循环经济和资源节约的重要手段。再制造工程高度契合了国家构建循环经济的战略需求,并为其提供了关键技术支撑,大力开展绿色再制造工程是废旧机电产品资源化的最佳途径和首选模式,是促进节能减排、发展碳经济的重要手段,也是实现循环经济和可持续发展的主要途径。

1.1 再制造及其发展

1.1.1 再制造概念

再制造是指以废旧产品作为生产毛坯,通过专业化修复或升级改造的方法来使其质量特性不低于原有新品水平的制造过程,属于先进制造和绿色制造。再制造产品成本为新品的 50%,节能 60%,对环境的不良影响与制造新品相比降低 70%,为资源节约型、环境友好型社会的建设提供了技术支持^[1]。再制造工程包括以下两个主要部分:

1) 再制造加工。主要针对达到物理寿命和经济寿命而报废的产品,在失效分析和寿命评估的基础上,把有剩余寿命的废旧零部件作为再制造毛坯,采用表面工程等先进技术进行加工,使其性能恢复到新品。

2) 过时产品的性能升级。主要针对已达到技术寿命的产品,或是不符合可持续发展要求的产品,通过技术改造、局部更新,特别是通过使用新材料、新技术、新工艺等,改善产品的技术性能、延长产品的使用寿命、减少环境污染。性能过时的机电产品往往只是某几项关键指标落后,并非所有的零部件都不能再使用,采用新技术镶嵌的方式进行局部改造,就可以使原产品的性能跟上时代的要求。

其中,过时产品的性能升级即为产品的再制造升级(Remufacturing Upgrade, RMU),随着产品技术更新的加快,再制造升级将会成为再制造中越来越重要的生产模式。

1.1.2 国内外再制造模式对比

1. 外国的主要再制造模式及特点

以美国为代表的欧美国家的机械产品再制造,主要以“换件修理法和尺寸修理法”为技

术理念来恢复零部件的配合公差，即对损伤程度较重或修复难度较大的零件直接更换新件，对损伤程度较轻的零件，以新品在设计制造时就预留的尺寸余量为基础，利用车、磨、镗等冷加工技术，以减小零件尺寸为代价达到恢复零件表面精度的目的，再与大尺寸的新品零件重新配副。如英国 Lister Petter 公司，他们每年为英、美军方再制造 3000 多台废旧发动机，再制造时，对于磨损超差的缸套、凸轮轴等关键零件都予以更换新件，并不修复^[2]。美国最大的发动机再制造企业康明斯（Cummins）公司，以及中国与欧美合资的再制造企业，如东风康明斯发动机公司、上海大众瑞贝德动力总成有限公司等，均采用的是这种技术理念。

换件修理法和尺寸修理法的工艺流程包含：旧件拆解清洗、分类检测、机械加工（或换件）、再装配和台架试验等，其主要的优点是方法成熟，技术较简单，易为起步阶段的企业采用，有利于企业快速形成再制造能力。但其不足也非常明显，首先是更换新件浪费很大；其次是尺寸修理破坏了零件的互换性，且削弱了零件再一次再制造的能力，降低了产品使役中的维修保障能力；第三是只能对表面轻度损伤零件进行再制造，无法对表面重度损伤零件以及三维体积损伤零件（如掉块、“缺肉”）进行再制造。上述不足导致大量零件报废。目前在欧美国家最成熟的汽车发动机再制造领域，其旧件利用率尚无法达到 70%，在其他不太成熟的再制造领域，旧件利用率更低。对于中国这样一个资源能源极度短缺的国家，要实现深度的节能减排，必须从再制造的技术理念源头实现原始创新。

2. 中国的再制造模式与特点

我国的再制造产业通过把先进的无损检测理论与技术、表面工程理论与技术和熔覆成形理论与技术引入再制造，最终将“尺寸恢复和性能提升”定位为中国自主创新的再制造理念，形成了以高新技术为支撑、产学研相结合、既循环又经济的自主创新的中国特色再制造模式。

中国特色的再制造工程可以简单概括为废旧产品高技术修复、改造的产业化。中国特色再制造模式的核心是：利用特征信号（磁、电、声等）确定废旧零件的损伤阈值，评判其是否具有足够的剩余疲劳寿命、磨损寿命及腐蚀寿命，即是否值得再制造。对于可再制造的零件，利用表面工程技术完成其表面的磨损与腐蚀损伤修复，利用熔覆成形技术完成其体积损伤修复及疲劳损伤修复。修复层材料均为通过特殊选择的优质材料，因而再制造零件比原型新品零件具有更为优异的耐磨、耐腐蚀和抗疲劳性能。

中国特色的再制造工程是在维修工程、表面工程基础上发展起来的，主要基于复合表面工程技术、纳米表面技术和自动化表面技术，这些先进的表面技术是国外再制造时所不曾采用的。

中国特色再制造模式注重基础研究与工程实践结合，创新发展了中国特色的再制造关键技术，构建了废旧产品的再制造质量控制体系，保证了再制造产品的性能质量和可靠性；注重企业需求与学科建设融合，提升了企业与实验室的核心竞争力；注重社会效益与经济效益兼顾，促进了国家循环经济建设。

中国特色的再制造模式主要具有四个特色：一是可以显著提升旧件利用率，对于用机械加工方法不能再恢复的旧件损伤，可以通过表面技术实现性能的恢复，显著提升旧件再制造率；二是利用表面技术可实现零件原几何参数精度的恢复，保证零件的互换性；三是利用表面技术，可以根据产品使役工况要求，改善零件表面质量，提升再制造产品质量性能，例如通过提高零件的耐磨、耐腐蚀、抗疲劳等性能，来保证再制造产品零部件的性能质量超过原

型新品；四是通过大量的毛坯件剩余寿命评估技术，可以科学判定毛坯件的质量，确保再制造产品质量的可靠。

十余年的实践证明，利用中国自主创新的再制造技术理念，不仅能对表面轻度损伤零件进行再制造，还能对表面重度损伤及三维体积损伤的零件进行再制造；不仅可恢复零件损伤部位的尺寸超差，而且可明显提升零件的整体性能；不仅再制造产品的质量达到甚至超过了原型新品，而且旧件利用率提高到了 90% 以上，节能减排效果显著提升。目前，基于本项目提出的再制造技术理念的再制造产业在中国已得到蓬勃发展。据初步统计，起步仅仅十余年的中国再制造产业的年产值已超过了 100 亿元。

1.1.3 国内外再制造的发展

1. 国外再制造的发展

20 世纪 30 年代的经济萧条导致的资源匮乏极大刺激了再制造业的发展，尤其第二次世界大战的巨大战争消耗，导致钢铁等原材料严重不足，需要重新利用诸如报废产品及汽车上耐用零部件来迅速再制造出新的产品，促进了再制造的发展。至 20 世纪 80 年代初，美国正式提出“再制造”。此后，欧美各国开始大力发展再制造产业。

在过去的几十年里，生产技术和制造工艺的快速进步也大大扩充了再制造工业的范围，汽车、医学设备、电气设备、电子设备以及办公家具等领域都开展了较大规模的再制造工作，已经形成了规模庞大的再制造产业群。1996 年，美国发布了再制造产业调查报告《再制造业：潜在的巨人》。报告显示，1996 年美国专业化再制造公司达 73000 家，年销售额 530 亿美元，直接雇员 48 万人，见表 1-1^[3]。同年美国再制造产业的产值与制药业、计算机制造业和钢铁业基本相当，但就业人数明显多于后者，说明再制造产业不仅能够创造巨大财富，而且能够显著解决就业问题。2003 年和 2008 年，美国发布了再制造产业调查报告《再制造产业：巨人的剖析》和《再制造：运行实践及策略》，对再制造产业的发展及其存在的问题及应对策略进一步做了跟踪分析^[4,5]。2003 年，美国 Ron Giuntini 等撰文将再制造作为振兴美国制造生产力的机遇，阐述了再制造发展中的利益及问题，推动了再制造产业的发展^[6]。2005 年全球再制造产业产值已超过 1000 亿美元，美国的再制造产业规模最大，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^[2]。

表 1-1 1996 年美国再制造产业基本情况评估

领 域	公 司 总 数	销售额/百万美元	雇 员
汽车	50538	36546	337571
压缩机	155	249	2878
电子仪器	13231	4633	47280
机械	120	434	3155
办公用具	720	1663	12148
轮胎	1390	4308	27907
墨盒	6501	2475	31872
阀门	410	589	4577
其他	250	2009	14372
总 计	73315	52906	481760

英国的 Oakdene Hollins 和英国的再制造与再利用中心分别于 2004 年、2009 年对英国的再制造行业发展情况进行了调研分析,并对英国促进再制造发展的相关政策措施进行了分析^[7-9]。

在德国,至 2004 年,大众汽车公司已再制造汽车发动机 748 万台,变速器 240 万台,公司销售的再制造发动机及其配件和新机的比例达到了 9 : 1^[2]。

2. 国内再制造的发展

我国的再制造产业发展至今已经近 20 年。最初,我国仅有的几个再制造企业面临重重困难、各项工作难以开展,发展到目前已得到国家政府机关、行业领域和社会各界的广泛认可与大力支持。由于再制造是落实国家节约资源、节省能源和发展循环经济政策的重要举措,而且再制造在落实可持续发展战略方面发挥了重要作用,因此前景广阔。

1999 年,我国徐滨士院士率先在国内倡导并积极推动再制造工程的发展,并先后在 1999 年 6 月西安“先进制造技术国际会议”和 2000 年 3 月瑞典“第 15 届欧洲维修国际会议”上,提出在中国发展再制造工程的思想。随着资源枯竭、环境污染日益紧迫,在徐滨士院士等知名专家学者的呼吁推动下,中国再制造得到了快速发展。再制造工程领域的研究受到了政府部门、科研单位、企业界的共同重视,中国工程院、国家自然科学基金委员会、国家政府机关、军队总部机关都先后支持开展再制造理论、技术及实践的研究和活动。

2000 年至 2006 年,中国工程院开展的咨询项目《绿色再制造工程及其在我国的应用前景》《废旧机电产品资源化》和《建设节约型社会战略研究》,对再制造的内涵、意义、关键技术、国内外情况、未来发展前景以及政策建议等进行了深刻的论述,将“机电产品的回收利用与再制造工程”列为支撑建设节约型社会的 17 项重大工程之一。时任中国工程院院长徐匡迪在上海“世界工程师大会”上做报告时指出,我国构建循环经济应以“4R”原则(Reduce 减量化,Reuse 再利用,Recycle 再循环,Remanufacture 再制造)为指导,随后又撰文阐述了 4R 原则。国家自然科学基金委员会将“再制造工程技术及理论研究”列为机械学科发展前沿与优先资助领域,并先后批准将《再制造基础理论与关键技术》《机电产品可持续性设计与复合再制造的基础研究》列为国家自然科学基金重点项目,支持对再制造设计和再制造过程中的多项基础理论与关键技术进行了深入细致的研究。

我国政府同时也积极在国家政策及法律层面支持开展再制造活动。2003 年,再制造作为制造领域的优先发展主题和关键技术被列入《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年)》。2005 年,国务院颁布的 21、22 号文件中均指出,国家将支持废旧机电产品再制造,并把绿色再制造技术列为国务院有关部门和地方各级人民政府要加大经费支持力度的关键、共性项目之一。2009 年 1 月实施的《中华人民共和国循环经济促进法》指出,国家支持企业开展机动车零部件、工程机械、机床等产品的再制造,这标志着再制造已进入国家法律。2010 年 10 月,国务院发布《国务院关于加强培育和发展战略性新兴产业的决定》,在节能环保产业中提出,要提高资源综合利用水平和再制造产业化水平。2011 年 3 月,国家发布的《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》提出,加快完善再制造旧件回收体系,推进再制造产业发展;开发应用再制造等关键技术,推广循环经济典型模式。

2005 年 11 月,国家发改委等 6 部委联合颁布的《关于组织开展循环经济试点(第一批)工作的通知》中,将再制造列为四个重点领域之一。2006 年,科技部将《汽车零部件再制造关键技术与应用》纳入“十一五”国家科技支撑计划。2008 年,发改委启动了由 14

家企业组成的全国第一批汽车零部件再制造产业试点工作。2009年11月,工业与信息化部启动了8大领域35家企业参加的再制造试点工作。2010年,国家发改委和工信部先后发布了《汽车零部件再制造试点管理办法》和《再制造产品认定实施指南》,规范了再制造业管理。2011年8月,工信部公布2011年第一批再制造产品目录。2011年9月,国家发改委发布《关于深化再制造试点工作的通知》,扩大再制造试点的产品种类和范围。2010年5月,国家发改委、科技部、工信部、公安部、财政部、商务部等11个部委联合下发《关于推进再制造产业发展的意见》,明确了我国未来一段时期再制造产业发展的指导思想、重点领域和主要任务,指导加快我国的再制造产业发展,并将再制造产业作为国家新的经济增长点予以培育。

在国家积极倡导、全力推进再制造产业发展的同时,学术研究与学术交流也相继开展。2003年建成了我国第一个从事再制造领域研究的国家级重点实验室“装备再制造技术国防科技重点实验室”,目前该实验室已在再制造理论及关键技术研究方面取得了一批重要成果,先后出版了《再制造工程基础及其应用》《再制造与循环经济》《装备再制造工程的理论与技术》《再制造设计理论及应用》和《再制造技术与工艺》等再制造领域专著,形成了具有中国特色的再制造模式。中国机械工程学会成立了再制造分会,中国设备管理协会成立了再制造技术委员会等。清华大学、合肥工业大学、重庆大学等也针对不同机电产品开展了再制造理论技术与实践应用研究。

在大众认识层面,再制造作为一个新的理念还没有被人们广泛认识,消费者没有真正认识到使用再制造产品的好处,不少制造企业对发展再制造产业积极性不高,没有看到再制造对企业可持续发展的深远影响;在物流回收层面,目前我国仍然规定报废汽车五大总成必须材料循环,这些政策切断了再制造企业旧件的来源,是当前制约再制造产业发展的瓶颈;在关键技术层面,当前以发动机再制造为主要应用对象的关键技术无法完全满足短期内迅速扩展的各个再制造行业(如工程机械、机床等再制造)对再制造关键技术的多层次需求;在再制造模式层面,国内还有相当多的再制造企业,因引进国外再制造生产线,仍简单地套用着国外的尺寸修理模式和换件修理模式,对具有中国特色的尺寸恢复和性能提升模式认识不足;在中试平台层面,由于缺乏中间转换环节,如国家工程中心、再制造中试基地等,实验室里研发的再制造关键技术未经中试,直接应用于再制造工厂的生产线,影响了生产效率和可靠性;在监管方面,还没有相应的市场准入制度来对再制造企业管理,尚未全面实行再制造企业认证、产品标识、产品信息备案等制度。未来的几年中,必须迎难而上,应对挑战,突破瓶颈,牢牢抓住再制造发展难得的大好机遇,实现再制造的重大突破。

机遇与挑战并存。在国家宏观政策为再制造的发展提供重大机遇的同时,今后的任务仍很繁重。

1.2 再制造升级的内涵

1.2.1 再制造升级的发展背景

随着技术更新的日益加快,大量尚未达到物理寿命的产品面临着因技术原因而退役的境况,这不但造成了大量的资源浪费和环境污染,还增加了企业的经济负担,并影响了企业的

生产能力。传统的再制造方式能够恢复产品原来的性能,但无法实现因功能而废弃产品的重新再制造利用,即因功能而废弃的产品在采用传统的性能恢复的方式进行再制造后,虽然能够得到性能恢复,但无法满足用户对产品更高性能的需求,因此,越来越多产品因功能废弃的现状,对传统性能恢复的再制造方式提出了巨大的挑战。再制造升级因为要在再制造中使用大量的新技术,其实施模式、设计要求、保障资源及工程应用,都具有一定的独特性,复杂于传统的再制造模式,因此,需要进一步针对这些问题进行研究,探索科学的再制造升级内涵体系及其在实施应用中的问题,来提高再制造升级研究与应用水平。

通过在产品再制造中进行性能或功能升级的再制造方式,即进行功能废弃产品的再制造升级,可使旧品的性能得到快速提升,实现旧品中蕴含的资源和价值得到最大限度的再利用,缓解资源短缺与资源浪费的矛盾,减少大量的失效、报废产品对环境的危害,并因再制造升级产品的费用较低,可以高效益满足人们生活和企业生产的需求。以欧美等国为代表的发达国家已经实现了对汽车、工程机械、铁路机车、国防产品、医疗设备、复印机等机电产品的再制造升级。

徐滨士院士在 1999 年的中国工程院咨询报告中就将再制造升级作为再制造的一种重要模式提出,但当前再制造升级并未得到应有的重视,大多仍然是以产品性能恢复为目的开展再制造生产。我国也可以重点在老旧机床再制造及其数控化升级、汽车及其零部件、重大技术产品、工程机械、农用机械、矿山机械及典型军用产品中开展再制造升级,来实现工业化向信息化的跨越式转变,支持发展节能环保的战略型新兴产业。

1.2.2 基本概念

产品再制造升级是指以功能或性能退役的老旧产品作为加工对象,通过专业化升级改造的方法来使其性能超过原有新品水平的制造过程。其生产对象主要是功能或性能退役的老旧产品,其专业化升级改造方法主要包括先进技术应用、功能模块嵌入或更换、产品结构改造等,其升级后的性能要求优于原产品的性能,最终可以实现产品自身的可持续发展和多寿命周期升级使用,再制造升级包括在升级过程中所涉及的所有技术、方法、组织、管理等内容。产品再制造升级是产品改造的重要高品质组成部分,是高效益提升旧品性能的最佳途径。

再制造升级是再制造的重要技术模式,是提升再制造产品质量和市场适应性的主要技术手段。其是以需提升性能或功能的老旧机电产品作为对象,以产品再制造为手段,以先进技术应用、功能模块嵌入和产品结构改造为方法,以全面的机电产品再制造生产质量要求为保证,来实现老旧机电产品性能的恢复或功能的提升,最终实现机电产品自身的可持续发展和多寿命周期升级使用。

再制造升级是人们对提升旧品性能所共同认知基础上的实现方法论,主要强调的是基于产品再制造过程基础上的产品性能提升。由于再制造升级本身是一种旧品的高品质再制造生产过程系统,对它的描述可以参考相应的系统论的分析原理,归纳出产品再制造升级具有以下主要特征:

- 1) 再制造升级是实现产品性能升级的一种有效方式,通过过时产品的再制造过程来实现产品性能增长。

- 2) 再制造升级具有工程的完整性、复制性和可操作性。

- 3) 再制造升级具有毛坯性能的个体性和数量与质量的不确定性。
- 4) 再制造升级具有性能可认知性和升级目标多样性。
- 5) 再制造升级具有市场需求性和产品自身发展的规律性。
- 6) 再制造升级可视为一种认识产品生长的广义模型或框架。

1.2.3 本质属性

对再制造升级基本概念的分析和认识,可以给出再制造升级的本质属性:

1) 再制造升级是实现产品自身生长的方法论,是在较少资源消耗情况下高效益满足用户、企业与社会功能需求的重要手段。

2) 再制造升级是科技快速发展时代,产品功能急剧更新环境条件下,减少原生资源消耗的重要手段,它采用制造与再制造系统的组织结构、规模化的生产方式、规范化的工作流程管理、系统化的运作机制、量化的目标评价方法、先进的技术工艺手段和系统再设计的现代设计思想,持续提升产品性能,实现产品满足用户和生产需求情况下的产品功能先进化、资源消耗减量化、环境污染最小化、综合效益最大化。

3) 再制造升级的核心观念是源于对事物循环发展观和可持续生长观的认识,核心手段是再制造优化设计、模块的可替换性、技术的可更新性,其过程需要应用到多种领域的科学知识,是制造、机械、材料、环境、信息和管理等多学科的综合,要实现多学科知识在产品再制造升级工作中的有效融合和有序协调发展。

4) 再制造升级的实施应用,可以有效应对快速科技发展对产品功能需求的快速变化所带来产品淘汰速度加快的挑战,在满足人类生活和生产要求的情况下,避免产品大量生产所带来资源匮乏加剧、环境污染恶化等问题。

实施再制造升级,是一个系统性和综合性都很强的问题,与再制造技术、企业管理、公共管理、社会学、环境学、法学以及社会伦理等科学知识密切相关,需要解决多维度、多层次诸多问题的优化协调。从维度上看,再制造升级要解决产品从原材料、设计、制造、销售、使用以及旧品的回收、拆解及再制造升级等环节的长时间维度、广空间维度的优化运行问题;从层次上看,要解决较高层次的再制造升级战略问题,其次要解决实施再制造升级的目标问题和技术策略问题。因此,需要从系统工程角度,深入研究再制造升级的理论体系、运行模式、实施方法和设计保障等,建立再制造升级实施的实用模型和方法,探讨建立再制造升级的运行模式、实施方法、技术选择等的方法,为实施再制造升级提供直接支持。

1.2.4 概念辨析

1. 与再制造的关系

从再制造概念内涵可知,再制造包括两个主要部分:一是再制造恢复,二是再制造升级。因此,再制造升级是再制造工程的重要组成部分,是实现旧品高品质再制造利用的最佳模式,尤其随着技术的快速发展,产品因功能落后而退役的情况越来越多,再制造升级也必将在再制造实施中发挥越来越重要的作用。

作为再制造的重要技术方法,再制造升级在逆向物流、实施工艺等方面都和恢复性的再制造具有相同之处,即回收的物流都具备时间、品质、数量的不确定性,都需要进行拆解、

清洗、检测、加工、装配、涂装等步骤，其与恢复性再制造主要的不同之处为：

1) 在旧品要求上更严格，即既要能够拥有足够的剩余寿命，又要能够进行模块的替换、结构的改造等，满足新品功能的需求。

2) 在工艺设计方面一般要求恢复原来的性能，所以工序设计内容较少，而再制造升级要求更高，是要在原来的约束基础上，进行相应的对结构或模块的重新配置或改造，设计内容相对复杂。

3) 在加工阶段，传统的再制造要求进行零件尺寸或性能的恢复，而再制造升级除了性能恢复外，许多还要求进行功能提升、结构改造、模块替换，要求标准更高。

总的来说，除了拥有全部的再制造工艺技术外，再制造升级还需要新增加许多特殊的技术要求，在产品设计、生产加工、销售等步骤都具有一定的特殊性，对其进行深入研究，可以丰富再制造工程理论，为再制造升级的实施提供支撑。

2. 与产品改造的关系

产品升级改造可有三种模式，一是通过直接在原产品上加装或改装新模块来增加功能，一般增加功能后并不延长原产品的剩余使用寿命；二是通过改变产品结构来改变产品用途；三是在改造中对原产品通过全面的拆解、清洗、加工、装配等类似再制造的工艺步骤，使改造后产品使役寿命等于或超过原新产品的使役寿命，同时在此改造过程中通过增加新模块和利用新技术来提升产品的性能和功能。我们将第三种升级改造方法称为再制造升级。与前两种产品改造方法相比，再制造升级有以下特点：一是更加规范的操作要求，即再制造升级需要按照标准的产品再制造工艺来进行操作，需对产品全面拆解，将所有零件都恢复到或超过新件质量要求并按新品质量进行装配，更利于保证产品升级后的质量；二是更高的质量要求，即产品再制造升级是一种对产品全面的性能恢复和功能的升级，再制造升级后产品使役寿命要求达到或超过新产品的使役寿命，属于全新产品的重新使用^[10]。

因此，产品再制造升级是产品再制造和改造的重要组成部分和实施手段，在产品质量上标准更高，是废旧产品再制造和改造发展的高品质选择。

1.3 再制造及再制造升级的研究

1.3.1 再制造升级内涵及其实施模式研究

再制造升级作为再制造的重要模式，已经得到了一定的关注，并在不同的领域进行了基础研究。Jacobsson Nicholas 在其学位论文《兴起的产品策略——再制造产品的功能销售》中，对再制造的概念、工艺、影响因素、实施模式等方面进行了分析，并论述了再制造升级在再制造过程中的地位作用及提升产品性能的重要性，论述了再制造升级的相关因素，明确了再制造升级是实现产品具有市场竞争力的重要再制造手段^[12]。Gray Casper 和 Charter Martin 在《再制造和产品设计》报告中，对再制造升级进行了描述，指出了再制造升级设计的重要作用及实施方法^[13]。

徐滨士院士将再制造升级作为再制造的重要模式，初步给出了其应用内容。装备再制造技术国防科技重点实验室学者还对再制造升级的相关内涵进行了探讨，给出了再制造升级的概念特征及主要模式，研究了再制造升级在维修中的地位作用、实施方法，明确了信息化是

实现再制造升级的重要途径,建立了再制造升级的理论技术体系^[10]。机床数控化再制造作为再制造升级的重要内容,重庆大学刘飞教授和曹华军教授等研究阐述了机床数控化再制造的定义、内涵及其与零部件再制造、机床维修改造等概念的区别和联系,并提出了机床再制造与综合提升的运作流程和技术框架^[14]。中国人民解放军装甲兵工程学院时小军等人也研究介绍了老旧机床再制造的过程和表面工程技术在机床再制造中的应用^[15]。

以上是国内外学者对再制造升级内涵进行的初步探讨,并将之作为再制造的未来重要发展方向,同时以具体案例分析为基础,进行了部分产品的再制造升级模式应用分析,对于再制造升级的理论研究具有重要的启示作用。但总体上来看,研究内容还比较浅,没有深入揭示再制造升级的本质,更没有建立系统的再制造升级理论与技术体系,尚未提出再制造升级通用实施模式的基本理论。

1.3.2 再制造升级设计研究

产品能否再制造,如何提高再制造的实施效益,产品再制造设计(Design for Remanufacturing)是一个很重要的环节。产品再制造性设计(Design for Remanufacturability)是实现再制造设计的重要指标^[16],而产品的再制造升级设计(Design for Remanufacturing Upgrade)与产品的再制造升级性设计(Design for Remanufacturing Upgradability)是再制造设计与再制造性设计的重要内容。

1. 再制造设计领域的国内外研究

国外在再制造设计领域开展了不同方向的研究。瑞典 Erik Sundin 在其学位论文《易于再制造的产品和工艺设计》中,将再制造设计作为生态设计的一部分,对易于产品再制造的拆解、清洗、分类、检测等再制造工艺过程进行了分析,提出了易于再制造的改进方法^[17]。Hatcher 综述了再制造设计领域的研究成果,并指出再制造设计的目标是提高再制造性^[18]。Bras Bert 和 McIntosh Mark W 对再制造设计中的产品、工艺、组织等领域的研究成果进行了综述,指出了再制造设计中的热点研究领域^[19]。其他一些文献也对再制造设计给予了相关研究。

我国也在再制造设计领域取得了一些显著的成果。装备再制造技术国防科技重点实验室最早在再制造设计领域开展了研究,完成了我国再制造领域的首个国家自然科学基金项目《再制造设计理论与方法》,研究总结了再制造设计的分析因素及其设计方法,系统构建了再制造设计的理论体系,并出版了专著《再制造设计理论及应用》。合肥工业大学、重庆大学、清华大学也都在再制造设计领域开展了卓有成效的工作,合肥工业大学的刘志峰教授采用质量功能展开(Quality Function Deployment, QFD)法,对变速箱再制造设计中的要素进行了分析;刘涛研究提出了面向主动再制造的可持续设计概念,对主动再制造设计参数到再制造特征的映射机制、约束条件下不同再制造设计目标冲突协调和转化等关键问题进行了探讨;杨继荣等研究探讨了面向再制造的模块化设计方法^[20,21];李娟等分析了再制造设计过程中的质量信息传递,建立了以 QFD 和故障模式与效应分析(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)为质量设计工具,以物料清单为质量信息管理支持的再制造产品设计系统模型^[22]。

2. 再制造性设计领域的国内外研究

国外部分学者也从定性和定量的角度对该领域进行了研究分析。Lund Robot T 对适合再

制造的产品的标准进行了总结,提出了易于再制造的七项标准:耐用产品;功能性报废产品;按标准化要求生产的产品;残余附加值高的产品;获得报废产品成本较低;技术寿命持久的产品;消费者认同再制造产品,对再制造性进行了定性描述^[23]。Bras B 等从产品设计的角度考虑产品的再制造性,他们从再制造的工艺过程,即拆解、清洗、检测、修复或更换、再装配和测试等方面提出了对再制造性定量的评价方法,以此衡量评价和指导产品再制造性设计,其评价模型框图如图 1-1 所示^[24]。Amezquita Tony 等人对工程系统再制造性特征开展研究,辨识易于再制造的设计特征,如拆解、清洗、检测、更换、修复等,并以汽车车门为例,给出了提高再制造性的设计改进方案^[25]。其他一些学者还对拆解性等再制造性领域的内容进行了研究。

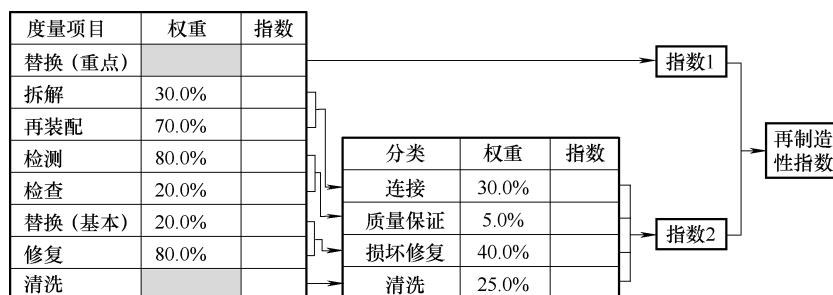


图 1-1 Bras B 构建的再制造性指数评价模型框图^[26]

我国也对产品的再制造性设计及评价进行了研究,最早徐滨士院士提出了废旧产品的再制造性要立足于技术性、经济性、环境性三个方面进行评价;装备再制造技术国防科技重点实验室研究建立了基于三者的废旧产品再制造性评价方法,并提出了再制造性工程的概念及体系。储伟俊等提出了再制造工程中产品的可回收性设计准则^[26,27];钟俊杰等对 Bras B 的再制造性评价模型进行了改进,建立了再制造性的综合指标评价方式^[28];张国庆等也基于该模型建立了一种基于技术、经济、环境三因素的再制造性评价方法,并对桑塔纳汽车发动机的再制造性进行了评价^[29,30]。刘涛等人提出了一种基于模糊综合评价的系统再制造性分配方法,通过综合考虑多重评价指标,建立了系统再制造性分配模型^[31]。曾寿金等人通过对影响废旧机电产品再制造的技术、经济、质量、资源、能源、时间、环境和使役性等因素进行分析,建立了废旧机电产品绿色再制造的微观评价模型、宏观评价模型和综合评价模型^[32]。毛果平等人从产品再制造的资源利用可行性、环境可行性、经济可行性和技术可行性等四个方面进行了分析考虑,提出了一种机电产品可再制造性的评价模型^[33]。刘韶光以物元评价模型为基础,确定了曲轴可再制造性评价指标体系,并将物元评价方法应用于汽车曲轴可再制造性评价^[34]。张宗翔等人基于产品自身特性,提出了产品可再制造性指标体系,确定了各指标之间的层次和结构,建立了各指标量化计算公式和产品可再制造性评价体系^[35]。侯贞贞采用层次分析法,提出了一种可再制造性分析评价模型,并据此得出了最优的设计方案^[36]。

3. 再制造升级设计与再制造升级性设计领域

在再制造升级设计和再制造升级性评价方面,也有部分文献对其开展了研究。英国的 Gray Casper 和 Charter Martin 在其研究报告《再制造和产品设计》中,详细给出了再制造的