



装备再制造工程的 理论与技术

□ 徐滨士 等编著 □



国防工业出版社

National Defense Industry Press

本书得到总装备部“1153”人才工程专项经费资助

装备再制造工程的 理论与技术

徐滨士 等编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

装备再制造工程的理论与技术 / 徐滨士等编著. —北京:
国防工业出版社, 2007. 7

总装备部研究生教育精品教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 04984 - 8

I. 装... II. 徐... III. 机械制造工艺 - 研究生 - 教材
IV. TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 021327 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 15 1/4 字数 440 千字

2007 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3200 册 定价 39.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

《装备再制造工程的理论与技术》

编 写 组

主 编 徐滨士

参编人员 (按章节顺序排列)

徐滨士	刘世参	朱绍华	朱 胜
姚巨坤	李晓延	朱有利	董世运
王海斗	吕耀辉	朱子新	胡仲翔
向永华	张 伟	许 一	邢 忠
梁志杰	李蕴学	马世宁	孙晓峰

序

党中央和国务院坚持科学发展观,作出了发展循环经济,保护生态环境,加快建设资源节约型、环境友好型社会,促进经济发展与人口、资源、环境相协调的战略决策,在有关的战略部署中明确提出支持机械装备再制造,并把绿色再制造技术列为支持循环经济的共性和关键技术之一。

我国是一个人口众多、人均资源相对缺乏的国家,当前机电产品、特别是废旧机电产品的报废正在进入高峰期,如何有效使废旧机电产品资源化,是我们当前面临的重要任务。21 世纪前 20 年是我国综合实力提高的关键,我们要认真贯彻和落实中央提出的各项要求,坚定不移地走新型工业化道路,实现可持续发展。在我国经济结构调整的同时,我们要从过去单纯追求规模、效益的模式转向建设 4R (Reduce 减量化、Reuse 再利用、Recycle 再循环、Remanufacture 再制造)的循环经济发展模式。

再制造是机械维修业进入高级阶段的具体表现,也是提高机械装备服役年限和现场维修的有效途径之一。推动我国再制造产业的发展,要从产品的设计研发阶段抓起,为产品到寿命后的再制造创造良好的条件;要坚持理论和技术创新,攻克关键技术;要建立完善和严格的质量保证体系和认证制度;要动员广大科技工作者的积极参与和广大用户的理解与支持。

徐滨士院士率领的研究团队在我国率先倡导、并积极推动再制造工程的发展,结合国家发展与改革委员会的论证项目、中国工程院的咨询研究项目、国家自然科学基金的科研项目以及国防预研项目对再制造工程的理论基础、关键技术、组织实施进行了较为系统的研究,为再制造工程深入发展奠定了良好的基础。由他编著的《装备再制造工程的理论与技术》一书,较为全面地介绍了他及其团队多年来的研究和国内外其他学者的研究结果。该书内容较为充实,取材广泛,具有一定的理论性、创新性和实用性,基本反映了我国再制造工程的现状和进展情况。

我相信,这本书的出版将有助于我国再制造工程的发展,同时也希望我国工程技术界,特别是工程师们能够积极参与到再制造工程的行列中,为我国再制造工程有序、健康的发展做出应有的贡献。

全国政协副主席

中国工程院院长

A large, bold, handwritten signature in black ink, reading '徐济迪' (Xu Jidi).

2006 年 6 月 2 日

前 言

《装备再制造工程的理论与技术》一书是总装备部研究生教育精品专业教材建设工程中的立项教材。

该书贯彻中共中央十六届五中全会精神,以科学发展观为指导,紧密联系武器装备现代化建设的需求,阐述了再制造工程的内涵、学科体系及再制造在装备建设中的地位 and 作用,综述了美军装备再制造的发展情况,从装备多寿命周期理论、再制造装备的可靠性、装备的再制造特性、再制造装备的寿命评估、装备再制造模拟与仿真等5个方面讲述了装备再制造的基本理论,介绍了装备再制造工程的先进关键技术,分析了装备再制造的物流管理,列举了装备再制造的实例。

该书在编写过程中力图紧扣新时期军事变革、紧扣武器装备、紧扣国家建设节约型社会,突出了科学性、先进性和启迪性,编入了作者在相关理论与技术方面的创新性成果,并汇集了外国、外军的重要资料。该书的出版不仅为我军高层次人才培养提供了适用的教材,而且对促进我军武器装备保障现代化建设具有重要意义。

全书由徐滨士院士指导编写并亲自执笔,书中各章的执笔者是:第1章 徐滨士、刘世参;第2章 徐滨士、朱绍华;第3章 朱绍华;第4章 朱胜、姚巨坤、李晓延、朱有利;第5章 徐滨士、董世运、王海斗、吕耀辉、朱子新、胡仲翔、刘世参、向永华;第6章 徐滨士、张伟、许一;第7章 刘世参、向永华;第8章 邢忠、姚巨坤、梁志杰、朱绍华、李蕴学、马世宁、孙晓峰。全书由徐滨士、刘世参、董世运统稿。

该书适用于我军院校机械工程类、材料科学与工程类及装备维修保养专业研究生使用,并可供我军装备管理干部参阅。限于作者水平,且书中内容又是发展很快的新思想、新技术,不妥之处敬请斧正。

本书的编写基础是国家自然科学基金委员会工程与材料学部机械学科研究项目、国家自然科学基金重点项目“再制造基础理论与关键技

术”;中国工程院咨询项目“绿色再制造工程在我国应用的前景”、“废旧机电产品资源化”和“建设节约型社会战略研究”;国家发改委论证项目“开展发动机再制造示范试点研究”、“废旧计算机产品资源化再利用可行性研究”和“推进再制造产业发展实施方案研究”;总装备部“十五”预研项目“装备表面微损伤自修复技术研究”和维修改革项目。

借该书出版之际,向国家自然科学基金委、中国工程院、国家发改委、总装备部科技委、总装备部综合计划部、总装备部维修工程技术专业组表示衷心感谢。

感谢总装备部司令部军训局和装甲兵工程学院领导对该教材的指导与资助。

向书中参考文献的各位作者致以诚挚的敬意。

编著者

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 再制造工程的内涵	1
1.1.1 再制造工程	1
1.1.2 再制造在产品全寿命周期中的地位	2
1.1.3 武器装备再制造工程	3
1.1.4 再制造在装备维修保障中的地位与作用	4
1.2 再制造工程发展的背景	5
1.2.1 紧迫的社会发展需求	5
1.2.2 充足的再制造资源	6
1.2.3 良好的物质基础	7
1.2.4 显著的综合效益	8
1.2.5 先进的技术支撑	9
1.3 再制造在装备建设中的地位和作用	10
1.3.1 使装备及时适应作战需求	10
1.3.2 提高装备建设经费使用效益	11
1.3.3 为新一代装备的研制奠定实践基础	12
1.4 再制造工程在循环经济中的地位和作用	13
1.5 装备再制造工程的学科体系	16
1.5.1 再制造工程的研究对象	18
1.5.2 再制造工程的基础理论	18
1.5.3 再制造工程的关键技术	18
1.5.4 再制造工程的质量控制、技术设计与 物流管理	19
1.5.5 装备备件现场保障及现场抢修	19
1.6 美军装备再制造	20

1.7 再制造工程的国内研究和应用现状	24
1.7.1 我军装备再制造工程发展现状及前景展望	24
1.7.2 再制造工程在民用领域发展现状	25
参考文献	28
第2章 装备多寿命周期理论	31
2.1 装备寿命周期理论	31
2.1.1 装备寿命周期概念	31
2.1.2 装备寿命周期设计	32
2.1.3 装备寿命周期评价技术	35
2.2 装备多寿命周期工程与再制造工程	41
2.2.1 装备多寿命周期工程	41
2.2.2 再制造形成废旧装备新的寿命周期	42
2.3 再制造装备的环境与技术经济分析	45
2.3.1 再制造装备寿命周期评价的优势	45
2.3.2 装备经济寿命的确定	48
2.3.3 装备再制造的技术经济分析	52
2.3.4 装备寿命周期环境费用	57
2.3.5 装备再制造的综合效益评价	59
2.3.6 装备应急再制造的有关特点	61
参考文献	63
第3章 再制造装备的可靠性	64
3.1 可靠性、维修性和保障性概述	64
3.1.1 可靠性基础知识	64
3.1.2 维修性基础知识	68
3.1.3 保障性基础知识	70
3.2 再制造装备的可靠性问题	72
3.2.1 装备再制造的质量要求	72
3.2.2 一般装备的故障规律	73
3.2.3 常见故障分布的数学模型	75
3.2.4 可再制造系统可靠性统计分析	77

3.2.5	复杂设备故障率曲线	79
3.2.6	再制造系统的可靠性分析	81
3.3	提高再制造装备可靠性的措施	87
3.3.1	在设计阶段统筹考虑装备的可再制造性及其 可靠性	87
3.3.2	在装备再制造中保证其可靠性要求	88
3.3.3	在装备的使用中做好延寿工作	90
	参考文献	91
第4章	装备再制造设计基础	92
4.1	装备的再制造性	92
4.1.1	装备的再制造特性	92
4.1.2	再制造性与再制造性工程的定义	93
4.1.3	再制造性的要求及其确定	97
4.1.4	再制造性建模	105
4.1.5	再制造性分配	111
4.1.6	再制造性预计	114
4.1.7	再制造性分析与综合权衡	118
4.1.8	再制造性设计准则	121
4.1.9	再制造性试验与评定	124
4.1.10	废旧装备的再制造性评价	128
4.2	寿命预测	136
4.2.1	寿命预测在再制造中的地位与作用	136
4.2.2	材料的失效模式	137
4.2.3	寿命预测方法	143
4.3	装备再制造模拟与仿真	176
4.3.1	再制造工程中计算机辅助技术的 特殊问题	176
4.3.2	再制造计算机辅助工程中的常用数值方法 I —— 有限单元法应用举例	190
4.3.3	再制造计算机辅助工程中的常用数值方法 II ——	

有限差分法应用举例	211
参考文献	223
第5章 装备再制造技术	227
5.1 微纳米表面工程技术	227
5.1.1 微纳米表面工程技术分类	228
5.1.2 纳米复合电刷镀技术	232
5.1.3 微纳米等离子喷涂技术	253
5.2 材料制备与成形一体化技术	266
5.2.1 高速电弧喷涂技术	266
5.2.2 激光再制造技术	286
5.3 再制造快速成形技术	301
5.3.1 传统非金属材料快速成形技术概述	301
5.3.2 传统非金属材料快速成形技术及其在制造业 中的应用	305
5.3.3 金属直接快速成形技术及其在制造业中的应用 ...	306
5.3.4 我军装备再制造快速成形探索研究	316
5.3.5 外军装备再制造快速成形探索研究	318
5.3.6 微束等离子快速成形	319
5.4 修复热处理	323
5.4.1 概述	323
5.4.2 修复热处理原理	325
5.4.3 蠕变损伤材料的修复热处理	333
5.4.4 疲劳损伤材料的修复热处理	342
5.4.5 工具钢的修复热处理	346
5.4.6 金属材料内部裂纹高温愈合	353
5.5 虚拟再制造技术	357
5.5.1 虚拟再制造概念	357
5.5.2 虚拟再制造体系	359
5.5.3 虚拟再制造技术与相关学科技术的关系	364
5.5.4 虚拟再制造应用前景	365

5.6 装备性能提升再制造	367
5.6.1 装备性能提升再制造的内涵	367
5.6.2 装备性能提升再制造的基本原则	367
5.6.3 装备性能提升再制造的主要内容	369
参考文献	371
第6章 自修复技术	379
6.1 自修复技术内涵	379
6.1.1 智能自修复技术在装备全寿命周期中的地位	380
6.1.2 装备智能自修复技术的重要作用	380
6.2 国内外研究现状和发展趋势	381
6.3 自修复技术研究	383
6.3.1 埋伏型自修复技术	383
6.3.2 微纳米摩擦损伤自修复技术	391
6.3.3 矿物微粉摩擦磨损修复技术	404
6.4 自修复技术应用实例	410
6.5 自修复技术展望	414
参考文献	416
第7章 装备再制造工程中的物流管理	419
7.1 装备再制造物流的内涵及意义	419
7.2 装备再制造物流的特点	420
7.3 装备再制造生产中的物流管理	422
7.4 装备再制造物流管理发展	427
参考文献	429
第8章 装备再制造工程应用	430
8.1 装备车辆发动机再制造	430
8.1.1 发动机再制造的内涵及意义	430
8.1.2 装备车辆发动机再制造工艺流程	433
8.1.3 发动机再制造质量保证体系	436
8.1.4 发动机再制造的效益分析	439
8.1.5 表面工程技术在发动机再制造中的应用	442

8.1.6 装备车辆发动机再制造研究内容及应用前景	449
8.2 装甲装备再制造	450
8.2.1 装甲车辆再制造工艺过程	450
8.2.2 坦克零件的再制造	451
8.2.3 装甲装备的升级性再制造	458
8.3 修理分队旧机床再制造	461
8.3.1 旧机床再制造的背景	461
8.3.2 旧机床再制造工艺	462
8.3.3 旧机床再制造实例	467
参考文献	472

第 1 章 概 论

1.1 再制造工程的内涵

再制造产业在国际上已有 50 年的历史。我国历来也十分重视修旧利废。在进入 21 世纪后,人口、资源、环境协调发展的任务更加突出,为建设节约型社会、环境友好型社会和发展循环经济,对再制造的需求更加迫切,随着科学技术的迅速发展,人们对再制造工程的认识进一步深化,再制造工程的内涵也进一步拓展。

1.1.1 再制造工程

再制造工程是以机电产品全寿命周期设计和管理为指导,以废旧机电产品实现性能跨越式提升为目标,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,对废旧机电产品进行修复和改造的一系列技术措施或工程活动的总称。简单概括,再制造就是废旧机电产品高技术维修的产业化。再制造的重要特征是再制造产品的质量和性能要达到或超过新品,成本仅是新品的 50% 左右,节能 60%、节材 70% 以上,对保护环境贡献显著。在国家可持续发展战略和科学发展观指导下,再制造工程已成为发展循环经济、构建节约型社会的重要组成部分。

再制造的对象是广义的。它既可以是设备、系统、设施,也可以是其零部件;既包括硬件,也包括软件。

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,甚至超过

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。

1.1.2 再制造在产品全寿命周期中的地位

传统的产品寿命周期是“研制—使用—报废”,其物流是一个开环系统;而理想的绿色产品寿命周期是“研制—使用—再生”,其物流是一个闭环系统,如图1-1所示。

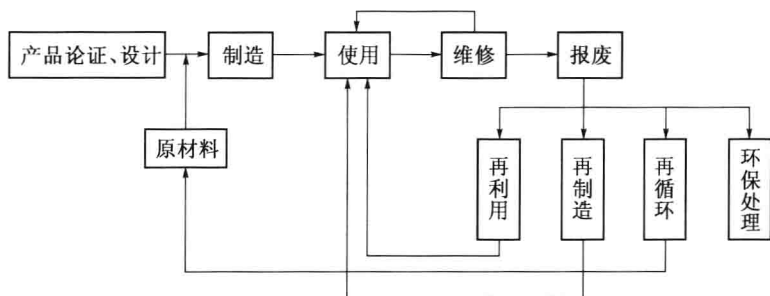


图 1-1 再制造在产品全寿命周期中的位置

在产品到达寿命后,一部分零部件可以直接再利用,一部分零部件通过再制造加工或技术改造可以继续使用,另一部分零部件是受当前技术条件的限制无法再制造,或者进行再制造的经济性很差,则通过熔炼等再循环的方法变成原材料重新使用。最后一部分是既不能再利用、再制造,也不能进行再循环的零件,只能进行环保处理。对废旧机电产品的再利用、再制造和再循环统称为废旧机电产品资源化。废旧机电产品资源化的目标是使再利用、再制造的部分尽量增多,使再循环的部分尽量减少,使需要环保处理的部分尽可能没有。

1.1.3 武器装备再制造工程

武器装备再制造相对于民用产品再制造有其特殊的内涵。民用产品更新换代快、报废数量大,如汽车、电脑、电视等,因此民用产品再制造的主要对象是报废的机电产品,其再制造产品具有与原型机新品一样的质量和质保期,如图1-2所示。



图1-2 民用机电产品再制造的内涵

武器装备更新换代相对较慢,但作战需求变化很快,武器装备再制造是使现役装备性能恢复、功能提升的加工过程。武器装备再制造的对象是现役装备,包括有故障的、不适应作战需求的、战伤损坏的,以及达到使用寿命的现役装备,武器装备再制造的效果是使装备性能恢复并通过技术改造使装备的功能提升,如图1-3所示。

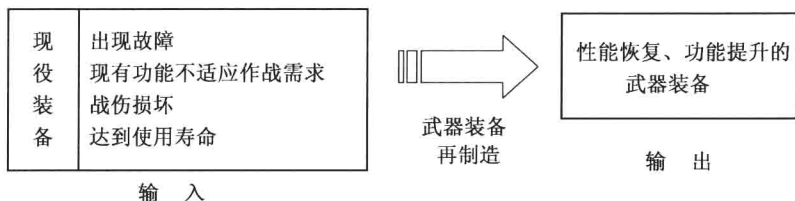


图1-3 武器装备再制造的内涵

世界各国的装备发展历程均表明,武器装备更新换代周期相对较长,多数武器装备在服役期间均经历过一次或者若干次以性能恢复和升级改造为主要内容的再制造,以适应新的作战需求。立足现有装备打赢高技术条件下的局部战争是我军的既定方针。武器装备再制造是解决新装备研制周期长、新装备列装形成战斗力的进程慢而作战需求变化很快这一矛盾的有效途径。新装备与老装备以再制造为纽带发挥着双向支持作用,新装备上的部分成果通过再制造可以使老装备功能提升,老装备通过再制造可以为新装备的发展提供新的技术和实验数据。