



湖北经济学院学术文库

# 制造/再制造集成闭环供应链的 运作管理与控制研究

ZHIZAO ZAIZHIZAO JICHENG BIHUAN GONGYINGLIAN DE  
YUNZUO GUANLI YU KONGZHI YANJIU

■ 张曙红 初叶萍 著



湖北经济学院学术文库

# 制造/再制造集成闭环供应链的 运作管理与控制研究

ZHIZAO ZAIZHIZAO JICHENG BIHUAN GONGYINGLIAN DE  
YUNZUO GUANLI YU KONGZHI YANJIU

■ 张曙红 初叶萍 著

## 作者简介

张曙红，博士，湖北经济学院教授，入选湖北省现代服务业领军人才，主要从事物流与供应链管理、生产运作管理等领域的教学和科研工作。先后主持国家自然科学基金项目、教育部人文社科基金项目、中国博士后科学基金项目等科研课题10多项。在国际国内重要学术期刊及学术会议上发表论文30多篇,多篇被SCI、EI、CSSCI检索。

# 前 言

资源枯竭和环境恶化一直是人类生存和发展的两大威胁。我国人均资源非常匮乏，且经济发展方式极为粗放、节能减排形势十分严峻，是我国现阶段经济结构转型、发展模式调整的重大障碍，也是当前经济发展过程中需要解决的紧迫问题。我国著名的科学家钱学森曾指出，“废旧物资及资源回收利用是国家大事之一”，“如果搞好废弃物的再生，两个世界难题（资源与环境）就同时找到了解决的途径”。

再制造是指将废旧汽车零部件、工程机械、机床等进行专业化修复的批量化生产过程，再制造产品能达到与原有新品相同的质量和性能。再制造是制造业的一个重要组成部分，是企业实施绿色供应链管理，促进资源节约型、环境友好型社会建设的有效手段。作为一种先进的制造技术，再制造产业对废旧产品实施高技术修复和改造，不但节约能源、节约原材料，还能降低环境污染，是循环经济“再利用”的高级形式。特别是在当下粗放传统制造业受到能源、资源和环境的束缚越来越严重之际，再制造产业由于其生产过程几乎不产生固体废弃物，且大气污染排放量比传统制造业降低 80% 以上，因而更符合节能减排的生产模式，更值得大力提倡。根据中国工程院院士徐滨士的研究，与新品相比，再制造产品将节约成本 50%、节能 60%、节材 70%，对环境的不良影响与制造新品相比显著降低。2006 年，世界贸易组织（WTO）成员国已达成共识，将再制造产品视为新品。随着生产者责任延伸制度（EPR）的广泛推行，以及碳排放约束规制的不断发展，再制造引起各国政府的高度关注，纷纷要求企业同时承担制造与再制造的责任，对产品生命周期全过程负责。2012 年，欧盟报废的电子电气设备（WEEE）新指令规定废旧机电产品的回收率达到 85%、再利用率达到 80%，耗能产品（EuP）指令更要求耗能产品在设计阶段就要考虑环保和可回收再制造。而随着碳标签、碳税、碳交易等碳排放规制在许多国家和地区积极推行，碳排放将成为企业供应链运作成本核算的重要内容，再制造优势日益突出。

作为一种新兴战略产业，推进再制造产业不但是建设资源节约型、环境

友好型社会的客观要求，还以先进制造业、现代服务业的辐射功能，成为经济结构调整的重要组成部分。再制造产业在发达国家已有几十年的发展历史，且形成了较完整的产业链，比如在美国的高速公路上，十辆车当中就有一辆是再制造发动机；在日本，本田、日产等汽车公司到 2015 年的汽车零部件回收利用率已达到 95% 以上；在德国，大众汽车公司销售的再制造发动机及其配件和新机的比例达到 9 比 1。而来自中国汽车工业协会的统计则显示，宝马早在 1965 年就开始生产再制造汽车发动机；美国有近 50 万人从事再制造，每年可创造 530 亿美元的产值；丰田和福特等汽车巨头的回收率达到 95% 以上。目前，许多国家和政府将再制造产品优先列入政府采购范围，鼓励社会消费再制造产品，拉动产业发展。

随着低碳时代的来临，我国面临经济发展方式转型的诸多问题，以直接消耗原材料为主的粗放型生产模式的不可持续性开始凸显。我国已进入家用电器和机械装备报废的高峰期，再制造显示出在社会、资源、环境效益等方面的巨大优势，受到政府和企业的高度重视。有关咨询机构分析，我国未来再制造产业前景广阔，每年的市场规模可达 100 亿美元。我国对再制造产业发展非常重视，已经出台多项激励政策。2008 年 5 月，国家发改委正式发布《汽车零部件再制造试点管理办法》，中国正式确定了一汽、东风、江淮等 14 家整车生产企业和汽车零部件再制造企业，开展汽车零部件再制造试点。2008 年 10 月，国家发改委正式确认、启用“汽车零部件再制造标志”。2011 年 9 月，国家发改委在《关于推进再制造产业发展的意见》的基础上，公布了《关于深化再制造试点工作的通知》，国家发改委将扩大再制造试点范围，包括再制造产品种类和范围，继续组织开展再制造试点，探索再制造产业发展的政策、管理制度和监管体系，为建立再制造相关技术标准、市场准入条件、流通监管体系等提供经验。2012 年 6 月，国务院印发《“十二五”节能环保产业发展规划》，提出支持汽车零部件、工程机械、机床等再制造，完善可再制造旧件回收体系，重点支持建立 5~10 个国家级再制造产业集聚区和一批重大示范项目，到 2015 年，实现再制造发动机 80 万台，变速箱、启动机、发电机等 800 万件。2012 年 5 月，财政部、环境保护部、国家发改委、工业和信息化部、海关总署和国家税务总局联合发布《废弃电器电子产品处理基金征收使用管理办法》，使得废弃电器电子产品处理有法可依。2013 年 1 月，国务院印发《循环经济发展战略及近期行动计划》，提出支持建立以汽车 4S 店、特约维修站点为主渠道，回收拆解企业为补充的汽车零部件回收体系，支持再制造企业加快技术升级改造，重点推进机动

车零部件、机床、工程机械、矿山机械、农用机械、冶金轧辊、复印机、计算机服务器以及墨盒、硒鼓等的再制造，建立再制造产品质量保障体系和销售体系，促进再制造产品生产与售后服务一体化。2013年7月，国家五部委发布《再制造产品“以旧换再”试点实施方案》，提出开展消费者交回旧件并以置换价购买再制造产品（以旧换再）的试点工作，扩大再制造旧件回收规模，明确年内率先以汽车发动机、变速箱等再制造产品为试点。

闭环供应链（closed-loop supply chain），作为一个在逆向供应链基础上发展起来的重要研究领域，因具有节约资源和减少环境污染等优点，已成为推进节能环保和低碳经济发展的一个有效载体。与开环供应链相比，闭环供应链不仅包括“资源→制造→销售→消费”的正向过程，还包括“废旧产品→回收→再制造→再销售→消费”的逆向过程。随着全球资源环境形势日益紧张，以直接消耗原材料为主的粗放型制造模式受到严峻挑战，再制造已成为企业的重要战略选择。闭环供应链的再制造过程不仅实现了资源的循环利用，也给企业带来了可观的经济利益。IBM、宝马、施乐等知名企业的再制造实践证明再制造成本低于新产品成本，并通过再制造节约成本而获得显著收益。随着再制造技术提高，新产品和再制造产品的质量水平也越来越接近。生产制造型企业越来越重视废弃产品的回收再制造，企业供应链行为正由传统的供应链向闭环供应链转变。资源限制、环境污染恶化，促使制造企业必须把再制造和绿色管理放在重要战略地位。当前，再制造闭环供应链成为企业实施绿色供应链管理的重要运作模式。

目前，已有知名企业实施“零废弃”目标可持续管理战略，如富士施乐公司通过制定“垃圾零填埋”“零污染”“无非法丢弃”的环保目标，致力于对废旧产品进行回收、修复和再制造，2000年在日本实现了“零废弃”，2010年富士施乐爱科制造（苏州）有限公司的资源循环再利用率已达到99.5%以上，几乎做到对废旧产品的100%回收再利用。惠普公司的全球环保硒鼓回收计划，将废旧硒鼓材料的90%重新利用及再制造。在零废弃目标下，企业将努力提高废旧产品的回收率和再制造率。由于废旧产品从消费者转移到企业进行再制造，会带来管理与运营成本，为了减轻废旧产品及再制造产品的库存管理及运营成本，应采用由再制造产品优先供给市场的原则。结合知名企业案例及当前日益紧张的资源环境背景，本书提出了基于零废弃目标的闭环供应链运作模式，即为促进资源的有序利用和企业的可持续发展，以零废弃为目标而实施的一种优先利用废旧产品及零部件进行再制造来满足市场需求的“资源节约、环境友好”供应链运作模式。围绕零废弃

目标下闭环供应链运作模式，本书应用微分对策模型、博弈理论、现代控制理论等方法对闭环供应链的演化机制、协调机制与库存控制等问题展开探讨。

近些年，笔者对再制造、闭环供应链管理理论及应用等领域进行了跟踪研究，承担了一系列科研项目。本书是对科研课题相关成果的总结与拓展，主要内容包括：再制造闭环供应链的运作模式、政府回收激励环境下闭环供应链的博弈定价决策与协调机制、碳排放交易机制下再制造闭环供应链博弈定价模型、零废弃目标下闭环供应链的演化机制、基于再制造优先的闭环供应链博弈定价决策与协调机制、制造/再制造混合库存鲁棒控制以及零废弃目标下闭环供应链的切换库存控制模型等。本书是科研团队合作的研究成果，研究成员张冕博士、初叶萍博士参与完成了第二、五、八等多个章节相关内容的研究。由于笔者及课题组跟踪闭环供应链管理领域的研究时间还不长，使得本书对于再制造及其供应链管理研究的深度和广度还不够，尤其是在基于零废弃目标的闭环供应链运作机制方面的探索性研究还不够成熟，有待今后的深入研究。

另外，本书写作过程中力争全面参考和述评国内外同行学者的研究成果，由于专业水平与时间有限，难免有遗漏、理解不深乃至错误等问题，特向从事本领域的同行表示真诚的感谢和歉意，并请读者批评指正。

张曙红

2017年2月25日于湖北武汉

# 目 录

<b>1 绪 论</b> .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 制造/再制造集成闭环供应链管理研究综述 .....	4
1.3 本书的主要内容和结构 .....	18
<b>2 制造/再制造集成闭环供应链的运作模式</b> .....	21
2.1 引言 .....	21
2.2 制造/再制造混合生产决策随机仿真分析 .....	21
2.3 联网环境下闭环供应链运作模式研究 .....	25
2.4 基于零废弃目标的闭环供应链运作模式 .....	28
2.5 碳排放交易制度下闭环供应链的运作模式 .....	29
2.6 本章小结 .....	32
<b>3 考虑政府激励的闭环供应链协调定价博弈模型</b> .....	33
3.1 引言 .....	33
3.2 考虑政府回收约束的闭环供应链协调定价博弈模型 .....	34
3.3 政府“以旧换再”补贴对闭环供应链运作的影响 .....	49
3.4 考虑消费偏好的闭环供应链协调定价博弈模型 .....	53
3.5 本章小结 .....	60
<b>4 碳交易制度下闭环供应链的定价优化决策</b> .....	61
4.1 引言 .....	61
4.2 碳排放规制政策 .....	63
4.3 碳排放交易制度下闭环供应链的定价优化决策 .....	65
4.4 本章小结 .....	74
<b>5 考虑广告投入影响的闭环供应链横向合作优化决策</b> .....	75
5.1 引言 .....	75

5.2	考虑广告投入影响的再制造闭环供应链优化决策博弈模型·····	76
5.3	随机需求下闭环供应链的最优订货与柔性补货策略·····	83
5.4	本章小结·····	92
<b>6</b>	<b>基于零废弃目标的闭环供应链演化博弈模型·····</b>	<b>93</b>
6.1	引言·····	93
6.2	零废弃目标下闭环供应链市场演化微分博弈模型·····	93
6.3	基于制造/再制造收益的闭环供应链演化博弈模型·····	105
6.4	本章小结·····	107
<b>7</b>	<b>基于再制造优先的闭环供应链定价决策与协调机制·····</b>	<b>109</b>
7.1	引言·····	109
7.2	基于再制造优先的无差别定价闭环供应链决策与协调·····	109
7.3	基于再制造优先的闭环供应链差别定价协调定价博弈模型·····	115
7.4	本章小结·····	124
<b>8</b>	<b>闭环供应链混合库存模型及其控制策略·····</b>	<b>125</b>
8.1	引言·····	125
8.2	闭环供应链混合库存动态模型的鲁棒控制·····	126
8.3	制造/再制造产品交互应急补货库存模型及其鲁棒控制·····	135
8.4	基于零废弃目标的闭环供应链混合库存的切换控制策略及仿真 ·····	144
8.5	本章小结·····	159
<b>9</b>	<b>全书总结与展望·····</b>	<b>160</b>
9.1	研究主要内容与创新之处·····	160
9.2	研究展望·····	163
	参考文献·····	166
附录 I	“十三五”节能环保产业发展规划·····	188
附录 II	再制造产品“以旧换再”试点实施方案·····	201
附录 III	国家发展改革委办公厅关于深化再制造试点工作的通知·····	206
附录 IV	工业和信息化部《再制造产品认定实施指南》·····	210
附录 V	废弃电器电子产品处理基金征收使用管理办法·····	217

# 1 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

资源枯竭和环境恶化一直是人类生存和发展的两大威胁。应对这种威胁的一种较被动的办法就是单纯地限制消耗和减少排放；另一种积极的办法就是通过强化资源再生产活动，来减少人类对于福祉不断地追求所产生的资源环境压力。著名的科学家钱学森曾指出，“废旧物资及资源回收利用是国家大事之一”，“如果搞好废弃物的再生，两个世界难题（资源与环境）就同时找到了解决的途径”。

再制造作为一种先进的制造技术，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，减少大量失效、报废产品对环境的危害。相比新品，再制造产品成本是新品的 50%，同时节能 60%、节材 70%，几乎不产生固体废物，大气污染物排放量降低 80% 以上，对环境的不良影响与制造新品相比显著降低。2006 年，世界贸易组织（WTO）成员国已达成共识，将再制造产品视为新品。据美国阿贡国家实验室统计资料显示：新制造一辆汽车的能耗是再制造的 6 倍，新制造一台汽车发动机的能耗是再制造的 11 倍。随着生产者责任延伸制度（EPR）的广泛推行、废旧品回收规制的不断发展，再制造引起各国政府的高度关注，纷纷要求企业同时承担制造与再制造的责任，对产品生命周期全过程负责。2012 年，欧盟报废的电子电气设备（WEEE）新指令规定废旧电器产品的回收率达到 85%、再利用率达到 80%，耗能产品（EuP）指令更要求耗能产品在设计阶段就要考虑环保和可回收再制造。同时，碳税、碳交易、碳标签等碳排放规制已在发达国家和地区积极推行，碳排放将成为企业供应链运作成本核算的重要内容，再制造优势日益突出。许多国家和政府正积极推进再制造产业发展，并将再制造产品优先列入政府采购范围，鼓励社会消费再制造产品，推进经济结构调整和产业改造升级。

我国已进入家用电器和机械装备报废的高峰期，再制造显示出在社会、

资源、环境效益等方面的巨大优势。有关咨询机构分析,我国未来再制造产业前景广阔,每年的市场规模可达 100 亿美元。我国对再制造产业发展非常重视,已经出台多项激励政策。2008 年 5 月,国家发改委正式发布《汽车零部件再制造试点管理办法》,中国正式确定了一汽、东风、江淮等 14 家整车生产企业和汽车零部件再制造企业,开展汽车零部件再制造试点。2008 年 10 月,国家发改委正式确认、启用汽车零部件再制造标志。2009 年 12 月,工信部颁布实施《机电产品再制造试点工作要求》,制定了再制造试点企业申报的要求和实施方案。2010 年 5 月,国家发改委等 11 个部委联合印发《关于推进再制造产业发展的意见》,扩大了汽车零部件再制造试点范围。2011 年 9 月,国家发改委在《关于推进再制造产业发展的意见》的基础上,公布了《关于深化再制造试点工作的通知》,国家发改委将扩大再制造试点范围,包括再制造产品种类和范围,继续组织开展再制造试点,探索再制造产业发展的政策、管理制度和监管体系,为建立再制造相关技术标准、市场准入条件、流通监管体系等提供经验。发改委、财政部已会同有关部门组成《再制造产品目录》编制小组,将根据试点情况,把符合新品标准、规模化生产的再制造产品纳入目录,享受相应的优惠政策,并且鼓励政府机关、事业单位优先采用再制造产品。2012 年 6 月 16 日,国务院印发《“十二五”节能环保产业发展规划》,提出支持汽车零部件、工程机械、机床等再制造,完善可再制造旧件回收体系,重点支持建立 5~10 个国家级再制造产业集聚区和一批重大示范项目,到 2015 年,实现再制造发动机 80 万台,变速箱、启动机、发电机等 800 万件。2012 年 5 月,财政部、环境保护部、国家发改委、工信部、海关总署和国家税务总局联合发布《废弃电器电子产品处理基金征收使用管理办法》,使得废弃电器电子产品处理有法可依。2013 年 1 月,国务院印发《循环经济发展战略及近期行动计划》,提出支持建立以汽车 4S 店、特约维修站点为主渠道,回收拆解企业为补充的汽车零部件回收体系,支持再制造企业加快技术升级改造,重点推进机动车零部件、机床、工程机械、矿山机械、农用机械、冶金轧辊、复印机、计算机服务器以及墨盒、硒鼓等的再制造,建立再制造产品质量保障体系和销售体系,促进再制造产品生产与售后服务一体化;到 2015 年,实现年再制造发动机 80 万台,变速箱、启动机、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。2013 年 7 月,国家五部委发布《再制造产品“以旧换再”试点实施方案》,提出开展消费者交回旧件并以置换价购买再制造产品(以旧换再)的试点工作,扩

大再制造旧件回收规模，明确年内率先以汽车发动机、变速箱等再制造产品为试点。

闭环供应链（closed-loop supply chain, CLSC），是在逆向供应链基础上发展起来的重要研究领域，因具有节约资源和减少环境污染等优点，已成为推进节能环保和低碳经济发展的有效载体。与开环供应链相比，闭环供应链不仅包括“资源→制造→销售→消费”的正向过程，还包括“废旧产品→回收→再制造→再销售→消费”的逆向过程。闭环供应链的再制造过程实现了资源的循环利用，不仅为社会带来巨大的财富，同时给企业带来了可观的经济利益。IBM、宝马、施乐等知名企业的再制造实践证明再制造成本低于新产品成本，并通过再制造节约成本而获显著收益。随着再制造技术提高，新产品和再制造产品的质量水平也越来越接近。

目前，随着全球资源环境形势日益严峻，已有知名企业实施零废弃目标可持续管理战略，如富士施乐公司通过制定“垃圾零填埋”“零污染”“无非法丢弃”的环保目标，致力于对废旧产品进行回收、修复和再制造，2000年在日本实现了“零废弃”，2010年富士施乐爱科制造（苏州）有限公司的资源循环再利用率已达到99.5%以上，几乎做到对废旧产品的100%回收再利用，最大限度地利用了废旧产品资源。惠普公司的全球环保硒鼓回收计划，将废旧硒鼓材料的90%重新利用及再制造。在零废弃目标下，企业将努力提高废旧产品的回收率和再制造率。由于废旧产品从消费者转移到企业进行再制造，会带来管理与运营成本，为了避免废旧产品及再制造产品的库存管理及运营成本，应采用由再制造产品优先供给市场的原则。因此，笔者提出了基于零废弃目标的闭环供应链运作模式，即在资源日益紧张、节能减排形势日趋严峻情况下，随着再制造技术的发展、再制造成本的降低，为促进资源的有序利用和企业的可持续发展，基于零废弃为目标而实施的一种优先利用废旧产品及零部件进行再制造来满足市场需求的“资源节约、环境友好”供应链运作模式。

随着低碳时代的来临，我国面临经济发展方式转型的诸多问题，以直接消耗原材料为主的粗放型生产模式的不可持续性开始凸显。我国作为一个工业品生产与消费大国，已经进入家用电器和机械装备报废的高峰期，将废弃的产品、装备进行再制造，能以较少的成本、较小的资源消耗和环境破坏，获取较大的收益。再制造产业受到政府和企业的高度重视。笔者以再制造、闭环供应链、资源环境管理为基础，紧密跟踪国内外前沿学术动态，对制造/再制造集成闭环供应链的协调、演化与控制等问题展开研究，分析政府

回收约束及碳排放政策对闭环供应链运作的影响,探索零废弃目标、再制造优先运作模式下闭环供应链的演化与运作机制,并应用现代控制理论及计算机仿真模拟方法研究闭环供应链的制造/再制造集成库存控制问题。本研究拓展了企业的可持续发展模式,为闭环供应链的研究提供了新的视角,丰富了闭环供应链管理理论,同时分析政府回收激励措施和碳排放管理政策,促进企业与政府的良好互动,可为制造企业在资源环境约束条件下的可持续发展提供决策依据,探索企业再制造战略从“反应性”向“主动性”转变的有效途径,具有重要的理论与现实意义。

## 1.2 制造/再制造集成闭环供应链管理研究综述

闭环供应链是指在传统的正向供应链上加入逆向反馈过程(即逆向供应链)而形成的一个完整的闭环系统,是在逆向供应链基础上发展起来的一个较新的研究领域。随着环境压力的增加及资源的限制,企业越来越重视废弃产品的回收再造。企业供应链行为正由传统的供应链向闭环供应链转变。制造/再制造集成闭环供应链是再制造与制造并存情况下的供应链系统,其实施目的是在保证企业绩效的同时,高效利用资源和减少废弃产品对环境的破坏。制造/再制造集成闭环供应链最突出特点是:制造商既生产新产品,同时回收废弃产品,并将废弃产品中具有剩余功能价值的产品,经过低成本的再制造过程生产再制造产品,并推向市场,是最为复杂的闭环供应链系统。闭环供应链包含正向供应链和逆向供应链,涉及供应商、制造商、分销商、零售商、消费者、回收商等众多合作实体,是一个复杂系统问题。笔者将重点从再制造、闭环供应链物流网络、定价、库存管理、协调运作、绩效管理以及政府废弃回收及碳排放规制对闭环供应链的影响等方面对现有的国内外研究成果进行综述,并在此基础上进行研究展望。

### 1.2.1 再制造

再制造作为一种具有较大影响的生产活动,始于第二次世界大战时期,并在军事工业中取得长足的发展。美国波士顿大学的工业工程专家罗伯特·伦德,在世界银行资助的研究报告中,最先将再制造上升到理论层面,首先倡导废旧产品翻新或回收利用。其后,日本、俄罗斯、中国等国家的学术界及政府纷纷投身于再制造的理论与实践。20世纪80年代以来,再制造(re-manufacturing)作为一种新型的、节约型、环保型的生产理念和制造方式开

始出现并为越来越多的企业所接受。再制造是一个将不能再用的产品恢复到“新”状态的工业过程。目前,学术界对于再制造还没有确切的定义。国外学者将再制造定义为:它以旧产品为毛坯,采用专门的工艺和技术,在拆解原有旧产品的基础上进行一次新的制造,重新制造出来的产品无论是性能还是质量都不亚于原先的新品。对再制造问题的研究并不是一个新兴问题,目前已经有很多国外学者做了大量的研究。蒂埃里(1995)指出,产品再制造管理的目的是通过对废旧产品、零部件及原材料的循环再利用,在尽可能获取经济价值的同时,减少最终垃圾的数量。根据对返回产品再处理过程的不同,蒂埃里在概念上描述了5种再造方式:修理、翻新、再制造、拆分和再循环。弗莱施曼等(2000)认为由于产品再制造方式的不同会导致两种物流网络结构:开环结构和闭环结构。其中再循环网络实现了原材料的再造,回收的产品通常不会返回到原设备制造商处,因而其物流网络属于开环结构;而再造和再使用使回收的产品或包装物返回到原制造商手中,因而经常导致闭环结构。丹尼尔(2000)通过文献综述给出了再制造管理问题研究的七大特点:①退回来源时间和数量上的不确定性;②退回产品与正向需求之间的协调;③退回产品拆解过程的独特性;④退回产品材料价值恢复程度的不确定性;⑤对逆向物流网络的需求;⑥材料配比限制的复杂性;⑦再制造时材料处理过程的随机性以及操作时长的不确定性。这七大特点增加了再制造过程中预测、物流、计划与控制、库存管理的难度。国内关于再制造比较权威的定义是中国工程院徐滨士院士(2000)给出的,他将再制造定义为:“是以产品全寿命周期设计和管理为指导,以优质、高效、节能、节材、环保为目标,以先进技术和产业化生产为手段,来修复或改造废旧产品的一系列技术措施或工程活动的总称。”国内许多学者已开展对再制造理论与应用的研究,如马祖军等(2005)考虑再制造物流系统中废旧产品回收量和再生产需求量的不确定性,提出一种单产品、单周期、有能力限制的再制造物流网络稳健优化设计模型。顾巧论(2004)对再制造/制造系统集成情况下的物流网络及信息网络进行了研究。

## 1.2.2 闭环供应链物流网络设计

“逆向物流”的概念最早是由斯托克在1992年提出的。在逆向物流基础上,整合正向物流与逆向物流,形成一个封闭的供应链物流系统网络,即为闭环供应链物流网络设计,它是指生产、流通、回收过程中的完整供应链网络结构,包含了产品回收以及产品生命周期支援的逆向物流。

英文文献的代表性研究成果：王小璠等（2010）应用整数线性规划模型对闭环供应链物流系统中制造商、配送中心、再回收等节点选址问题进行了研究，并给出了一种高效的生成树遗传优化算法对总成本最优条件下的整数线性规划选址模型进行了求解。萨曼塔等（2010）应用混合整数规划鲁棒优化模型对不确定性条件下的闭环供应链网络进行优化设计。

中文文献的研究成果：姚卫新（2005）提出了电子商务环境下面向闭环供应链物流网络成本模型，该模型采用连续逼近法进行分析，能使企业面对变化的市场环境时拥有一个适应性强的物流网络。张锐、张纪会（2007）针对再制造系统的闭环供应链物流网络设计，基于利润最大原则建立了关于工厂、分销中心、消费区域、回收中心以及其他处理点的混合整数规划数学模型。该模型可以确定工厂、分销中心和回收中心各自的数量和设施选址，以及各条路线上的最佳物流分配量，实现了闭环供应链物流网络的优化，取得整个物流网络利润的最大化。谢家平等（2008）基于物流网络结构和混合整数线性规划构建了一个综合考虑原材料供应地、制造商、正向仓库、顾客群、回收中心、逆向仓库和再制造商的单周期闭环供应链网络选址模型。该模型以原材料供应地和顾客群需求为确定性限制条件，其他结点地址均根据闭环网络综合目标成本最小化准则进行选择，可以实现选址优化，同时能计算最优化流量分布，并发现随着废弃产品回收率的上升，企业的目标成本将逐渐降低。王雷（2008）基于混合整数线性规划方法，以运营周期内收益最大为目标，建立了汽车再制造逆向物流网络设施选址模型，以确定网络中设施的数量、位置及规模，并在由此构成的各条物流路径上合理分配物流量。元方等（2008）基于产品回收和再制造，构建了一动态闭环供应链的物流网络，并建立了混合整数非线性规划模型，以确定不同时期内闭环供应链网络中各类设施的新建和扩建数量以及各设施之间的最优流量。王雅璨（2010）将生态效率理念引入再制造闭环供应链物流网络设计中，提出经济效率和环境效率的统一是生态闭环供应链物流网络设计的基本目标，设计了制造/再制造集成闭环供应链的物流网络模型，以整合正向供应链物流和逆向供应链物流，从而实现再制造供应链物流网络的经济效率和环境效率的统一。

### 1.2.3 闭环供应链中的不确定性

相对正向供应链，闭环供应链系统具有更强的不确定性，如涉及再制造品市场需求不确定、制造提前期、回收品延迟等因素，这给闭环供应链制

造/再制造库存协调管理带来极大困难。在不确定性和外部突发事件情况下，鲁棒性成为能否确保供应链系统收益和稳定运行的重要因素。黄小原等（2007）针对具有废弃时滞和需求不确定性的闭环供应链动态模型，应用鲁棒 H 无穷控制策略抑制闭环供应链运作过程中的不确定性影响，使闭环供应链系统运作达到理想总成本。晏妮娜等（2008）在价格敏感的随机需求量和回收努力敏感的随机回收量条件下，建立了基于第三方逆向物流服务提供商（3PRLP）的多级闭环供应链模型，设计了制造商与第三方之间的目标奖惩合同，讨论了分散闭环供应链系统中制造商为主方、销售商和第三方为从方的一主多从斯塔克尔伯格对策和集成闭环供应链的联合优化策略，并结合上海宝钢公司废钢回收的实际运作情况进行了仿真计算与分析。徐家旺等（2007）针对一类由一个制造商和一个供应商构成，由制造商负责废弃物回收再处理的闭环供应链系统，采用具有已知概率的离散情景描述顾客需求的不确定性，建立了顾客需求不确定环境下基于情景分析的闭环供应链动态运作的鲁棒优化模型。韩小花（2010）应用多目标规划和非合作博弈理论，研究了再制造成本不确定条件下强势零售商领导的闭环供应链 3 种回收渠道（零售商回收、制造商回收和第三方回收）的决策，研究发现：不确定性使 3 种回收渠道的回收率降低、销售价提高以及制造商和零售商效用值减少，并指出不确定性条件下闭环供应链回收渠道的最优决策为制造商直接回收渠道。高阳等（2011）考虑废旧产品的可维修率、可拆解率、可分解率的模糊不确定性，建立闭环供应链优化模型，分析发现制造商回收模式下制造商不仅利润最大，而且可有效控制由回收质量不确定带来的风险。郭荣等（2013）综合考虑需求量、回收量的随机性以及逆向处理费用的模糊性，构建以成本 and 环境污染最小化为双目标的闭环供应链系统网络优化模型，并采用随机机会约束和模糊期望值方法对不确定模型转变为等价确定型模型进行了优化求解。

#### 1.2.4 闭环供应链的库存管理

闭环供应链系统，不仅涉及新产品与再制品库存相互影响，而且还要考虑市场需求不确定、制造提前期、回收延迟等不确定因素。目前，国内外学者已经开始展开对闭环供应链库存管理问题的研究。钟申联（2008）对由制造商、供应商、零售商、第三方回收商组成的再制造闭环供应链系统的库存优化控制策略进行了研究，分析表明采用联合库存控制策略比分散控制策略供应链总利润高。皮埃尔（2010）以制造与再制造产品的生产率为决

策变量,以制造产品库存、再制造产品库存为状态变量,应用随机动态规划优化理论,对制造设备具有随机故障与维修情况下的闭环供应链系统制造与再制造策略进行优化计算,使制造与再制造产品的库存成本最小。钟峻任(2011)在绿色产品设计和再制造意愿调研基础上,构建了再制造模式下短周期易腐品绿色供应链集成库存控制模型,模型研究表明再制造能力与产品零部件生命周期密切相关,而且绿色技术革新、回收产品绿色处理率、提升再制造能力以及减少供应链库存成本对于再制造模式下短周期产品绿色供应链非常重要。黄小原等(2007)考虑需求扰动、再制造与回收时滞以及成本参数的不确定性,建立了一类参数与时滞不确定的闭环供应链动态系统模型,并给出了解决闭环供应链动态模型的鲁棒H无穷库存控制策略,通过库存状态的静态反馈控制,抑制了供应链动态系统中的不确定性干扰,使供应链运作达到理想状态。肖迪等(2008)在生产、再制造能力都受到限制情况下,基于产品的时间价值推导出了允许缺货和不允许缺货两种情况下闭环供应链回收品和成品库存的最优策略,得出了在一般情况下商品价值衰减越快,再生产和生产订货批量就越小的结论。唐秋生等(2011)基于准时制生产模式建立了需求不确定条件下的“双源”“双渠道”多周期闭环供应链库存优化模型,并以废旧回收品的配送批量和零售商的订货周期及名义最高库存为决策变量,以系统利润最高为目标函数,计算了模型的最优库存控制策略。侯玲等(2011)在不确定需求情况下建立了两个闭环供应链跨链合作的交叉库存补充动态模型,分析了集群式闭环供应链的鲁棒运作问题,结果表明实施H无穷控制和跨链合作的交叉紧急库存补充策略可以减小库存、订货等的偏差波动及牛鞭效应。景熠等(2012)针对新产品和再制造产品存在的异质需求,建立了再制造供应链系统动态模型,并基于线性矩阵不等式算法给出了能够有效抑制再制造系统运作过程中的不确定影响的鲁棒控制策略。

### 1.2.5 闭环供应链的定价决策

王玉燕(2008)构建了基于第三方回收模式的闭环供应链定价模型,运用博弈理论分析了制造商与零售商、制造商与第三方回收商构成的斯塔克尔伯格博弈关系,研究表明:制造商只有在决策时必须分别考虑零售商、第三方回收商对自己决策的反应,才能实现自身利益最大化。反之,零售商、第三方回收商也要考虑制造商的决策才能实现自身利益的最大化。公彦德等(2008)应用博弈理论研究了由单一制造商、单一零售商和单一第三