

面向大规模定制的再制造集约生产计划模型

翟勇洪^{1,2}, 梁 玲¹, 刘宇熹³, 谢家平¹

(1. 上海财经大学 国际工商管理学院, 上海 200433; 2. 安徽商贸职业技术学院 工商管理系, 芜湖 241002; 3. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 针对大规模定制(MC)的废旧产品回收再制造的生产方式,考虑再制造系统的复杂性以及各种不确定因素,构造了闭环供应链下面向 MC 的再制造集约生产计划(RAPP)模型.根据模糊集理论,采用模糊线性规划的方法,将不确定模型转化为清晰的确定型大规模整数线性规划(MILP)模型,试图找出最大利润下,企业在各计划期内的最优零部件外购批量、自制零部件批量以及生产批量.通过一算例来验证该模型的有效性,并分析了相关因子变动对总利润的影响,便于企业经营管理决策者在最优利润下选择相应的 RAPP.

关键词: 大规模定制; 再制造; 集约生产计划; 闭环供应链; 模糊规划

中图分类号: F 830 **文献标志码:** A

Optimization Model of Mass Customization-oriented Remanufacturing Aggregate Production Planning

ZHAI Yong-hong^{1,2}, LIANG Ling¹, LIU Yu-xi³, XIE Jia-ping¹

(1. School of International Business Administration, Shanghai University of Finance & Economics, Shanghai 200433, China; 2. Department of Business Administration, Anhui Business College, Wuhu 241002, China; 3. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Considering the remanufacturing system with complex features and multiple uncertainties under closed-loop supply chain environment, an optimization model of MC-oriented remanufacturing aggregate production planning (RAPP) was established. By using fuzzy set theory, a fuzzy liner programming method was adopted to change the uncertainty problem into an equivalent deterministic mass integer linear programming (MILP) problem. The remanufacturing aggregate production planning can not only maximize profits but also find the optimal purchasing size, the homemade parts size and products manufacturing size. An example was proposed to validate the actual effectiveness of the model in remanufacturing enterprises' production. The analysis on the influences of correlation factors on the total profits will contribute to remanufacturing enterprise management decision-makers to arrange corresponding RAPP to gain the optimal profit.

收稿日期: 2014-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71272015, 70972062)

第一作者: 翟勇洪(1974-),男,助教.研究方向:运营与供应链管理. E-mail: zyh_workemail@126.com

Key words: *mass customization (MC); remanufacturing; aggregate production planning; closed-loop supply chain; fuzzy liner programming*

随着经济全球化发展,市场竞争逐渐白热化,顾客需求日益个性化,传统大量生产方式难以快速适应终端客户个性化的需求.同时,单件定制生产方式因其价高、交货期长等缺点,也无法在激烈的市场竞争中取得效率优势.为了解决个性化需求与生产效率之间的矛盾,集成大量生产和定制优点的大规模定制应运而生,成为现代生产的主流模式之一. Pine^[1]认为大规模定制(mass customization, MC)是以大批量生产的成本和速度,提供定制的个性化产品和服务的生产模式.

随着技术的飞速发展,产品更新换代日趋频繁,越来越多的废旧产品进入寿命终结的末端(end-of-life, EOL).从2003年起,我国每年至少有500万台电视机、400万台冰箱、600万台洗衣机面临废弃.今后10年内,全球将有15亿台电脑被淘汰.这些废旧EOL产品要是不能及时正确处理,就会造成极大的资源浪费和严重的环境污染.有效而经济的解决途径就是进行废旧产品回收再制造.因此,探讨再制造集约生产计划显得非常有必要.

对于集约生产计划问题,许多学者都进行了较深入的研究.文献[2-4]研究了传统生产方式下的正向物流下的生产计划问题;文献[5-7]探讨了一般性逆向物流下的生产计划问题,模型的参数是确定的.对于不确定环境下的生产计划问题,祝勇等^[8]在模糊环境下基于可信性规划的生产计划方法,用非固定多段映射罚函数法,将模糊生产计划模型转化为无约束两目标优化问题的清晰等价形式;朱海平等^[9]运用随机模糊机会约束规划理论,研究了随

机和模糊约束下扩展集约生产计划方法; Al-e-Hashem等^[10]建立了不确定环境下的多目标模型,用于处理多期多产品多站点集约生产规划问题.

从以上学者们的研究方向及领域来看,首先,由于再制造是个起步较晚的新兴学科,学者们涉及再制造生产领域的研究甚少;其次,他们往往将MC和再制造生产二者分开来研究,缺少将二者结合起来的文献;最后,学者们构造的模型多是确定型的,但是再制造生产系统是复杂随机性系统,不确定因素有很多^[11],参数往往是模糊的.鉴于此,本文针对MC和废旧产品回收再制造的不确定因素,构造闭环供应链下面向MC的再制造集约生产计划(RAPP)模型;利用模糊规划的方法,试图找出企业在某一计划期内利润最大化的生产批量决策;然后,通过一算例来验证该模型的有效性,以期能指导企业实践.

1 面向MC的再制造生产方式

MC的实质是个性化产品的规模化效应生产,即分为基于物料推动式的大批量零部件生产和基于订单拉动式的产品定制两个阶段.为了满足客户个性化、多样化需求,通过产品重组和过程重组,应尽量减少定制零部件数和定制环节,把共用的通用化部件转化为批量生产问题.面向MC的废旧产品回收再制造生产方式通常采用绿色模块化设计、备货型生产(MTS)和订货型生产(MTO)组合以及顾客延迟策略.

根据MC下废旧产品再制造的特点,本文构建了面向MC的再制造方式示意图,如图1所示.

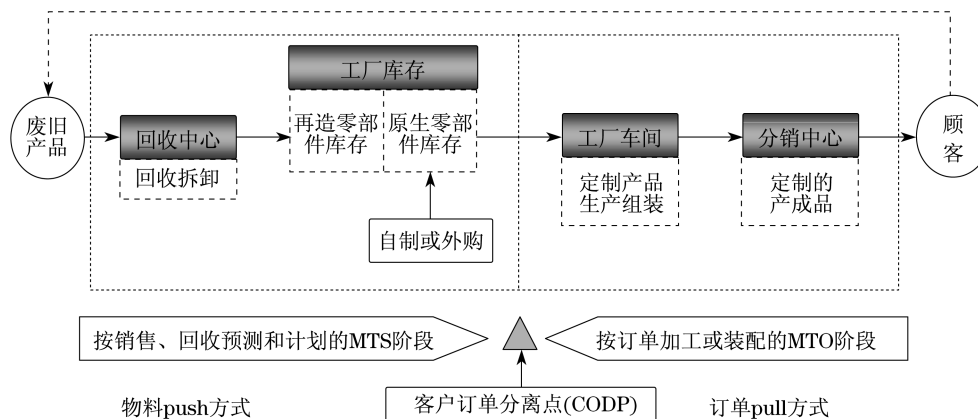


图1 面向MC的废旧产品回收再制造生产方式示意图

Fig.1 End-of-life products recycling for MC-oriented remanufacturing mode

首先,面向 MC 的再制造产品是绿色设计与模块化设计的有机结合.在产品研发阶段,就要考虑产品设计要满足绿色功能属性、可拆卸性、易于修复和升级性、易于装配性等再制造性指标和性能要求.模块化设计把产品的多变性与零部件的标准化有效地结合起来.绿色设计的关键性技术,如可回收性、可拆卸性正需要用模块化的思想来实现,而模块化在绿色设计中能充分体现系统和个体的灵活性.

其次,面向 MC 的再制造生产是由备货型生产(MTS)和订货型生产(MTO)组合成的生产方式,关键是确定备货生产与订货生产的顾客订单分离点(CODP).分离点的上游是备货型生产,基于销售预测、旧品回收预测以及零件再制造或外购计划驱动的 push 方式;下游是订货型生产,基于顾客订单驱动的 pull 方式^[12].

最后,面向 MC 的再制造生产采用顾客延迟策略.在生产策略上,采用顾客延迟技术,推迟定制组装开始的时间,尽量采用标准的生产环节,减少定制环节模块化.通过设计产品和生产工艺,把产品的定制活动尽量推迟到供应链的下游进行.通过延迟 CODP 来降低制造过程的复杂程度,减少供应链的不确定性,以及降低成品库存和成本,缩短定制时间,提高企业柔性.

2 模型假设

本模型考虑 L 个回收中心、 K 个分布式多工厂、 S 个分销中心的面向 MC 的废旧产品再制造集约生产计划问题,对不确定的总利润进行优化.

假设 1 零部件及产品需求是可以预测的.回收中心预测零部件需求;分销中心预测产品需求.

假设 2 回收是不确定的.回收产品在回收中心进行拆卸;回收的产品全部都能用于拆卸;在拆卸可得率给定的情况下,拆卸后不能用于再制造的废弃零部件将进行相关处理.

假设 3 回收拆卸后的零部件不满足生产需要时才考虑自制或外购.如果某零部件自制的单位成本大于单位外购成本,则该零部件全部外购;反之,则先自制,不够的部分再考虑外购.

假设 4 计划期各时间段内回收中心和工厂库存的零部件单位库存相同.

假设 5 目前工厂组装产品时一般都会使用 JIT 方式,因此定制情况下产成品安全库存可忽略.

假设 6 在生产者责任延伸制(EPR)下,政府对不能及时回收的废旧 EOF 产品将会征收一定惩罚成本,假定征收的处罚费用在各阶段期是固定的.

假设 7 因为 MC 方式下实行顾客延迟化策略,所以假定生产不会拖期进行.

假设 8 在 MC 模式下,客户选择不同零部件组合而形成不同的产品,这种零部件排列组合有多少种,对应产品就有多少种,如果零部件很多的话,对应的产品种类将是庞大的数目.实践中厂家往往给客户确定一定的选择范围,如产品系列,在此范围内,客户充分展示个性化.此模型将产品分类为大的产品系列,从而确定每个产品系列的单价变动范围.

本模型考虑的再制造系统示意图如图 2 所示.其中,回收中心从客户手中回收废旧产品后,在回收中心进行拆卸,如果拆卸后的零部件不能满足再制造需要时才考虑外购.拆卸后的零部件分别运送到各个工厂进行再制造,产成品运往分销中心,分销中心负责销售和预测需求.

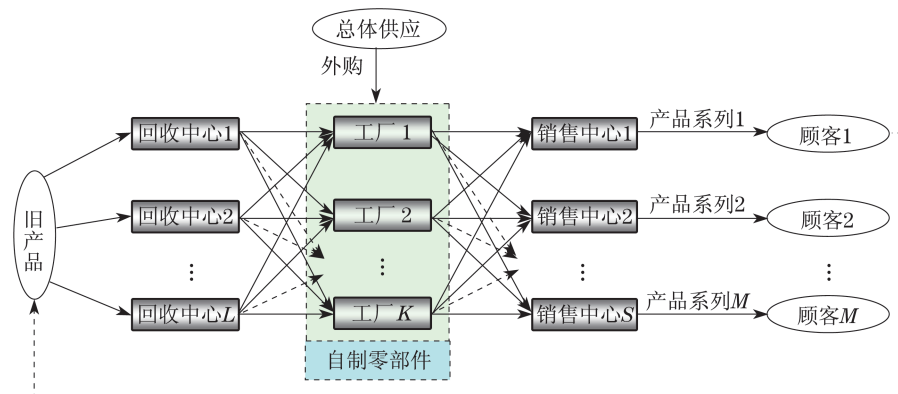


图 2 闭环供应链下面向 MC 的再制造系统示意图

Fig.2 MC-oriented remanufacture system under CLSC environment

3 再制造集约生产计划的优化模型

在面向 MC 的废旧产品回收再制造系统中,零部件需求量是根据历史数据预测而来的,库存不够的部分采用拆卸回收产品、外购或自制而获得.同时,系统中回收中心、多工厂和分销中心等各节点均产生相应的成本.由于回收和拆卸是再制造系统的特色,所以在对再制造集约生产计划进行优化时,不仅要考虑废旧产品的回收成本和相应的库存成本,还得考虑拆卸率、拆卸成本、拆卸零部件库存成本,以及计划期内惩罚成本和拆卸后不能用于再制造的废弃零部件的相关处理成本.

以下为模型所用符号的含义说明.

a. 参数符号.

r 为回收中心数, $r = 1, 2, \dots, L$; k 为工厂总数, $k = 1, 2, \dots, K$; s 为销售中心总数, $s = 1, 2, \dots, S$; i 为产品系列/顾客类型, $i = 1, 2, \dots, M$; j 为零部件种类, $j = 1, 2, \dots, N$; t 为计划期, $t = 1, 2, \dots, T$; μ 为废旧产品的回收率; η 为回收产品的拆卸可得率; ρ 为产品生命周期末因没及时回收可能受到惩罚的概率; $\widetilde{D}_{it}$ 为第 t 期产品系列 i 的预测需求量; O_{it} 为第 t 期产品系列 i 的实际订单量; NP_i 为产品系列 i 所含零部件数; $\widetilde{DR}_{rit}$ 为第 t 期回收中心 r 回收产品系列 i 的预期数量; $\widetilde{P}_i$ 为产品系列 i 的销售单价; $\widetilde{UR}_i$ 为产品 i 的回收单价; $\widetilde{UD}_i$ 为回收产品系列 i 的单位拆卸成本; $\widetilde{UPR}_i$ 为产品系列 i 生命周期末因没及时回收的单位惩罚成本; $\widetilde{UUR}_i$ 为回收拆卸后不能用于再制造的零部件单位处理成本; B_{kjt} 为第 t 期工厂 k 外购零部件 j 的数量; UB_j 为外购零部件 j 的单位成本; M_{kjt} 为第 t 期工厂 k 自制零部件 j 的数量; UM_j 为自制零部件 j 的单位成本; Q_{kit} 为第 t 期工厂 k 组装产品 i 的数量; $\widetilde{UC}_i$ 为组装产品系列 i 的单位成本.

b. 储运符号.

I_{kit} 为第 t 期工厂 k 产品系列 i 库存数; IP_{kjt} 为第 t 期工厂 k 零部件 j 的库存量; IR_{rit} 为第 t 期回收中心 r 回收产品系列 i 的库存数量; ID_{rjt} 为第 t 期回收中心 r 零部件 j 的库存数量; IS_{sit} 为第 t 期分销中心 s 产品系列 i 的库存量; SS_{kj} 为工厂 k 零部件 j 的安全库存量; UI_j 为零部件 j 的单位库存成本;

UI_i 为产品系列 i 的单位库存成本; $\max RI_r$ 为回收中心 r 库存最大容量; $\max WI_k$ 为工厂 k 的库存最大容量; $\max SI_s$ 为分销中心 s 库存最大容量; UU_i 为单位产品系列 i 的容积; UU_j 为单位零部件 j 的容积; QTW_{rkjt} 为第 t 期将零部件 j 从回收中心 r 运往工厂 k 的数量; QTS_{kist} 为第 t 期将产品系列 i 从工厂 k 运往分销中心 s 的数量; UT_j 为零部件 j 的单位运输成本; UT_i 为产品系列 i 的单位运输成本.

c. 产能符号.

$\max PM_{kj}$ 为工厂 k 零部件 j 的最大生产线额定量; $\max R_r$ 为回收中心 r 的最大拆卸能力; $\max W_k$ 为工厂 k 的最大人工产能; $\max M_k$ 为工厂 k 的最大机器产能; UDC_i 为产品系列 i 的单位拆卸能力; UWC_i 为产品系列 i 的单位人工产能; UMC_i 为产品系列 i 的单位机器产能.

3.1 目标函数

目标函数为最大化整个再制造系统的利润水平,即

$$\begin{aligned} \max Z = & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \widetilde{D}_{it} \widetilde{P}_i - \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M \widetilde{DR}_{rit} \widetilde{UR}_i - \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M \widetilde{DR}_{rit} UI_i - \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M \widetilde{DR}_{rit} \widetilde{UD}_i - \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \eta \widetilde{DR}_{rit} NP_i UI_j - \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M \rho \left[\frac{\widetilde{DR}_{rit}}{\mu} (1 - \mu) \right] \widetilde{UPR}_i - \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M \widetilde{DR}_{rit} NP_i (1 - \eta) \widetilde{UUR}_i - \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N B_{kjt} UB_j - \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N M_{kjt} UM_j - \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N IP_{kjt} UI_j - \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M Q_{kit} UC_i - \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M I_{kit} UI_i - \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{s=1}^S QTS_{kist} UI_i - \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N QTW_{rkjt} UT_j - \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{s=1}^S QTS_{kist} UT_i \end{aligned} \quad (1)$$

式中,第一项为计划期内产品的销售收入;第二项为废旧产品的回收成本;第三项为回收中心的旧品库存成本;第四项为旧品的拆卸成本;第五项为回收中心拆卸回收的旧品所得零部件的库存成本,其中

$\eta \widetilde{DR}_{rit} NP_i$ 为在拆卸可得率 η 下回收产品拆卸可得的零部件数;第六项为在EPR(生产者责任延伸制)下与旧品有关的惩罚成本,其中 $\widetilde{DR}_{rit}(1-\mu)/\mu$ 为在回收率为 μ 时未回收的产品数量;第七项为回收拆卸后不能用于再制造的处理成本,其中 $\widetilde{DR}_{rit} NP_i \cdot (1-\eta)$ 为在回收率为 η 时回收后不能用于再制造的零部件数;第八项为零部件的外购成本;第九项为自制零部件的成本;第十项为工厂零部件库存成本;第十一项为组装成产品的成本;第十二项为工厂产成品的库存成本;第十三项为分销中心的库存成本;第十四项为将回收中心的零部件运往工厂的运输成本;第十五项为从工厂运往分销中心的运输成本。

3.2 约束条件

a. 需求与供给的平衡约束.

MC下需求和供给的平衡约束条件是在预测基础上尽可能地使需求和供给相平衡。

预测零部件需求量 = 预测回收拆卸得到的零部件数 + 自制零部件数 + 外购零部件数 + 上期零部件库存数(回收中心上期零部件库存和工厂上期零部件库存),即

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \widetilde{D}_{it} NP_i &= \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M \eta \widetilde{DR}_{rit} NP_i + \\ &\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N M_{kjt} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N B_{kjt} + \\ &\sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{j=1}^N ID_{rjt(t-1)} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N IP_{kjt(t-1)} \quad (2) \end{aligned}$$

满足市场需求,预测需求量要不低于客户订单数,即

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \widetilde{D}_{it} \geq \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M O_{it} \quad (3)$$

当期组装产品的数量 = 客户实际订单数,即

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M Q_{kit} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M O_{it} \quad (4)$$

b. 回收中心库存约束.

这包括回收产品的库存和拆卸后的零部件库存两部分。

回收中心废旧产品的现期库存量 = 上期库存量 + 当期预测回收量,即

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M IR_{rit} &= \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M IR_{rit(t-1)} + \\ &\sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M \widetilde{DR}_{rit} \quad (5) \end{aligned}$$

回收中心的零部件库存 = 上期库存量 + 当期拆卸所得量 - 发往各个工厂的数量,即

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{j=1}^N ID_{rjt} &= \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{j=1}^N ID_{rj(t-1)} + \\ &\sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M \eta \widetilde{DR}_{rit} NP_i - \\ &\sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N QTW_{rkjt} \quad (6) \end{aligned}$$

回收中心 r 的库存容量约束

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M UU_i IR_{rit} &+ \\ \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N UU_j ID_{rjt} &\leq \max I \quad (7) \end{aligned}$$

c. 工厂库存约束.

工厂的库存包括回收中心运送的零部件库存、外购的零部件库存、自制零部件库存和产成品库存4部分.由于MC定制下,工厂只是按订单组装产品,因此理论上不存在上期产成品库存的情况。

工厂产成品库存 = 当期生产数量 - 发往分销中心的数量,即

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M I_{kit} &= \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M Q_{kit} - \\ &\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{s=1}^S QTS_{kist} \quad (8) \end{aligned}$$

工厂的现期零部件库存 = 上期零部件库存 + 从回收中心运往工厂的零部件 + 外购的零部件 + 工厂自制零部件库存 - 当期生产消耗量,即

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N IP_{kjt} &= \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N IP_{kjt(t-1)} + \\ &\sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N QTW_{rkjt} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N B_{kjt} + \\ &\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N M_{kjt} - \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M Q_{kit} NP_i \quad (9) \end{aligned}$$

工厂 k 的库存容量约束

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M I_{kit} UU_i + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N IP_{kjt} UU_j \leq \max I_k \quad (10)$$

工厂 k 的零部件库存量不低于零部件安全库存

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N IP_{kjt} \geq \sum_{j=1}^N SS_{kj} \quad (11)$$

d. 分销中心库存约束.

分销中心 s 的产品库存等于由各工厂运来的产品量

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M IS_{sit} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M QTS_{kist} \quad (12)$$

分销中心 s 库存容量约束

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M IS_{sit} UU_i \leq \max I_s \quad (13)$$

e. 运输约束.

从回收中心 r 运往工厂 k 的零部件 j 不能超过其最大库存量减去安全库存之后的剩余量,即

$$\sum_{r=1}^L \sum_{j=1}^M QTW_{rkjt} UU_j \leq \max I_k - \sum_{j=1}^M UU_j SS_{kj} \quad (14)$$

从回收中心 r 运往各工厂的零部件总数不大于回收中心 r 现有库存量,即

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N QTW_{rkjt} \leq \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N ID_{rjt} \quad (15)$$

f. 产能约束.

工厂 k 生产产品 i 的人工产能不能超过总人工产能,即

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M Q_{kit} UWC_i \leq \max W_k \quad (16)$$

生产各个产品的机器产能不能超过总机器产能,即

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M Q_{kit} UMC_i \leq \max M_k \quad (17)$$

回收中心 r 的拆卸能力不能超过最大拆卸能力,即

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \widetilde{DR}_{rit} UDC_i \leq \max R_r \quad (18)$$

g. 非负整数约束.

$L, K, S, M, N, T, \widetilde{D}_{it}, O_{it}, NP_i, \widetilde{DR}_{rit}, IR_{rit}, Q_{kit}, ID_{rjt}, B_{kjt}, M_{kjt}, I_{kit}, IP_{kjt}, IS_{sit}, QTS_{kist}, QTW_{rkjt}, SS_{kj}, \widetilde{P}_i, \widetilde{UC}_i, \widetilde{UR}_i, \widetilde{UD}_i, \widetilde{UPR}_i, \widetilde{UUR}_i$ 均为非负整数.

4 带模糊参数的混合整数规划求解

再制造系统中,许多影响因素不能用精确的数字来描述,但可以识别这些数量的范围以及属于该范围的程度,模糊数为描述这些不确定因素提供了一个有效的数学工具;而具有模糊系数的线性规划理论能够比概率理论更好地描述信息的本质特征^[13].因此,本文采用模糊集理论来描述大规模定制的再制造/制造系统的复杂性和不确定性有着较好的优势.

本文模型是带有不确定性的模糊参数的混合整数规划,可转化成确定的线性规划,即

$$\begin{aligned} \max Z &= \mathbf{C}^T \mathbf{X} \\ \text{s. t. } &\widetilde{\mathbf{A}} \mathbf{X} \widetilde{\mathbf{B}}, \mathbf{X} \geq 0 \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $\widetilde{\mathbf{A}}$ 和 $\widetilde{\mathbf{B}}$ 的元素 $\widetilde{a}_{ij}, \widetilde{b}_i (i=1,2,\dots,M; j=1,2,\dots,N)$ 是三角模糊数,记为 $\widetilde{a}_{ij} = (\underline{a}_{ij}, a_{ij}, \overline{a}_{ij})$, $\widetilde{b}_i = (\underline{b}_i, b_i, \overline{b}_i)$.

由三角模糊数运算法则, $\forall x_j \geq 0, j=1,2,\dots,N$, $\sum_{j=1}^N \widetilde{a}_{ij} x_j$ 也是三角模糊数.且

$$\sum_{j=1}^N \widetilde{a}_{ij} x_j = (\sum_{j=1}^N \underline{a}_{ij} x_j, \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j, \sum_{j=1}^N \overline{a}_{ij} x_j)$$

由三角模糊数运算法则及定义,模数约束条件可转化为

$$\lambda_1 \sum_{j=1}^N \underline{a}_{ij} x_j + \lambda_2 \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j + \lambda_3 \sum_{j=1}^N \overline{a}_{ij} x_j \leq \lambda_1 \underline{b}_i + \lambda_2 b_i + \lambda_3 \overline{b}_i$$

式中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为权重系数,一般来说, λ_2 具有较高的权重.

于是,式(19)可转化为

$$\begin{aligned} \max Z &= \sum_{j=1}^N c_j x_j \\ \text{s. t. } &\lambda_1 \sum_{j=1}^N \underline{a}_{ij} x_j + \lambda_2 \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j + \lambda_3 \sum_{j=1}^N \overline{a}_{ij} x_j \leq \lambda_1 \underline{b}_i + \lambda_2 b_i + \lambda_3 \overline{b}_i, x_j \geq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

对于式(20)可用单纯形法求解.

根据模糊集理论,每个不确定的模糊参数都可以用具有可能性分布的三角模糊数来表示,即再制造生产决策者可根据知识和经验将不确定的模糊参数估计为最小值、最可能值和最大值3种.本模型中的决策变量为 $Q_{kit}, B_{kjt}, M_{kjt}, QTW_{rkjt}, QTS_{kist}$; 不确定的模糊参数为 $\widetilde{D}_{it}, \widetilde{DR}_{rit}, \widetilde{P}_i, \widetilde{UC}_i, \widetilde{UR}_i, \widetilde{UD}_i, \widetilde{UPR}_i, \widetilde{UUR}_i$. 各不确定模糊参数的三角模糊数为

$$\begin{aligned} \widetilde{D}_{it} &= (\underline{D}_{it}, D_{it}, \overline{D}_{it}); \widetilde{DR}_{rit} = (\underline{DR}_{rit}, DR_{rit}, \overline{DR}_{rit}) \\ \widetilde{P}_i &= (\underline{P}_i, P_i, \overline{P}_i); \widetilde{UC}_i = (\underline{UC}_i, UC_i, \overline{UC}_i) \\ \widetilde{UR}_i &= (\underline{UR}_i, UR_i, \overline{UR}_i); \widetilde{UD}_i = (\underline{UD}_i, UD_i, \overline{UD}_i) \\ \widetilde{UPR}_i &= (\underline{UPR}_i, UPR_i, \overline{UPR}_i) \\ \widetilde{UUR}_i &= (\underline{UUR}_i, UUR_i, \overline{UUR}_i) \end{aligned}$$

对于带有不确定性的模糊参数的混合整数规划问题的求解,学者曾进行过研究^[14-18],提出了各种模糊规则.本文将采用文献[14-15]的规则和方法,将模糊参数化为清晰参数,即根据再制造决策者的知识和经验引入权系数($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$).不同的模糊参数赋予不同的权系数,如回收量的不确定性非常大,

最小值、最可能值和最大值三者的权重就相差不大;而销售单价尽管是模糊的,但能够较好地估计最可能值,所以最可能值的权重要大;总体上来说要给最可能值赋较大权重.于是

$$\begin{aligned}\widetilde{D}_{it} &= \lambda_1 \underline{D}_{it} + \lambda_2 D_{it} + \lambda_3 \overline{D}_{it}; \\ \widetilde{DR}_{rit} &= \lambda_1 \underline{DR}_{rit} + \lambda_2 DR_{rit} + \lambda_3 \overline{DR}_{rit}; \\ \widetilde{P}_i &= \lambda_1 \underline{P}_i + \lambda_2 P_i + \lambda_3 \overline{P}_i; \\ \widetilde{UC}_i &= \lambda_1 \underline{UC}_i + \lambda_2 UC_i + \lambda_3 \overline{UC}_i; \\ \widetilde{UR}_i &= \lambda_1 \underline{UR}_i + \lambda_2 UR_i + \lambda_3 \overline{UR}_i; \\ \widetilde{UD}_i &= \lambda_1 \underline{UD}_i + \lambda_2 UD_i + \lambda_3 \overline{UD}_i; \\ \widetilde{UPR}_i &= \lambda_1 \underline{UPR}_i + \lambda_2 UPR_i + \lambda_3 \overline{UPR}_i; \\ \widetilde{UUR}_i &= \lambda_1 \underline{UUR}_i + \lambda_2 UUR_i + \lambda_3 \overline{UUR}_i\end{aligned}$$

将这些参数代入式(1)将原目标函数清晰化,同时,清晰化的约束条件为

$$\begin{aligned}\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M (\lambda_1 \underline{D}_{it} + \lambda_2 D_{it} + \lambda_3 \overline{D}_{it}) NP_i = \\ \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M \eta (\lambda_1 \underline{DR}_{rit} + \lambda_2 DR_{rit} + \\ \lambda_3 \overline{DR}_{rit}) NP_i + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N M_{kjt} + \\ \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N B_{kjt} + \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{j=1}^N ID_{rj(t-1)} + \\ \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N IP_{kj(t-1)}\end{aligned}\quad (21)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M (\lambda_1 \underline{D}_{it} + \lambda_2 D_{it} + \lambda_3 \overline{D}_{it}) \geq \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M O_{it} \quad (22)$$

$$\begin{aligned}\sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M IR_{rit} = \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M IR_{ri(t-1)} + \\ \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M (\lambda_1 \underline{DR}_{rit} + \\ \lambda_2 DR_{rit} + \lambda_3 \overline{DR}_{rit})\end{aligned}\quad (23)$$

$$\begin{aligned}\sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{j=1}^N ID_{rjt} = \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{j=1}^N ID_{rj(t-1)} + \\ \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^M (\lambda_1 \underline{DR}_{rit} + \lambda_2 DR_{rit} + \lambda_3 \overline{DR}_{rit}) \cdot \\ \eta NP_i - \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^L \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N QTW_{rkjt}\end{aligned}\quad (24)$$

$$\begin{aligned}\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M (\lambda_1 \underline{DR}_{rit} + \lambda_2 DR_{rit} + \\ \lambda_3 \overline{DR}_{rit}) UDC_i \leq \max R_r\end{aligned}\quad (25)$$

于是原带有模糊参数的 LP 问题就转化成为确定型单目标的 LP 问题,其约束条件为式(4),(7)~

(17),(21)~(23)以及非负整数约束.可以用常用的线性规划优化软件 LINDO/LINGO 求解,从而得出最优的决策目标.

5 带模糊参数的再制造生产决策案例

5.1 仿真案例描述

为适应新的经营形势,某企业采用 MC 生产方式以应对日益增长的客户个性化、多样化的需求.同时,该企业属于机械电子类行业,其产品如不能及时回收将会造成相应的重金属污染.因此,在 EPR 环境下对自己生产的旧品进行回收再制造.

该企业共有 2 个回收中心、2 个分工厂和 2 个分销中心,主要生产 A,B,C,D 这 4 种系列的产品.其中,产品系列 A 由 2 个主要零部件构成;产品系列 B 由 2 个主要零部件构成;产品系列 C 由 3 个主要零部件构成,为季节性产品,冬季需求量较大;产品系列 D 由 2 个主要零部件构成.假设单位产品所需要的每种主要的零部件数量均为 1.

该企业以季度为计划时间单位,即 $T=4$.假定每季的单位惩罚成本和单位库存成本不变.零部件的供给量是决策者根据历史和经验预测得来的,产品的生产是在订单驱动下,采用顾客延迟策略进行组装.有关的基础数据(数量的单位是件,费用的单位是元)如表 1~5 所示(见下页).

假定回收率 $\mu=60\%$;产品生命周期末因没及时回收可能受到惩罚的概率 $\rho=60\%$;拆卸可得率 $\eta=80\%$;由于各期回收量、回收单价以及单位拆卸成本不确定性较大,最悲观预测值和最乐观预测值会相差较大.因此,其权重系数和别的模糊参数不同,假定模糊参数 DR_{rit} , UR_i 和 UD_i 的权重系数 λ_1 , λ_2 , λ_3 分别为 0.3, 0.4, 0.3, 其它模糊参数的权重系数 λ_1 , λ_2 , λ_3 为 0.2, 0.6, 0.2.

5.2 仿真案例求解

采用 LINGO 11.0 软件求解,得到企业预期的最优利润为 38 820 417 元,最优再制造计划如表 6 所示(见下页).

决策者可根据以上最优再制造集约生产计划进行回收拆卸、外购和自制零部件以应对未来计划期内产品的大量定制,从而获得最优的再制造生产利润.

5.3 因子变动分析

影响定制式再制造集约生产计划决策的重要因子有 $\widetilde{D}_{it}$, $\widetilde{DR}_{rit}$, $\widetilde{P}_i$, $\widetilde{UR}_i$, μ , η , 它们的变动直接影

表 1 4 个季度预测需求量的模糊参数表
Tab.1 Fuzzy parameters to forecast demand

项目	产品系列	时间			
		$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$
产品的需求量	A 系列 D_{1t}	(2 600,3 050,3 200)	(3 100,3 500,3 600)	(3 000,3 200,3 500)	(2 200,2 800,3 000)
	B 系列 D_{2t}	(3 800,4 200,4 300)	(3 800,3 900,4 150)	(3 600,3 800,4 000)	(4 200,4 400,4 500)
	C 系列 D_{3t}	(1 900,2 000,2 200)	(1 900,2 200,2 400)	(2 200,2 800,3 200)	(4 100,4 600,5 200)
	D 系列 D_{4t}	(900,1 050,1 200)	(960,1 100,1 300)	(1 100,1 300,1 450)	(1 000,1 200,1 250)
回收站 1 回收数量	A 系列 DR_{11t}	(300,915,1 150)	(400,1 050,1 300)	(500,960,1 000)	(300,840,1 100)
	B 系列 DR_{12t}	(700,1 260,1 450)	(650,1 170,1 300)	(450,1 140,1 350)	(680,1 320,1 600)
	C 系列 DR_{13t}	(300,600,780)	(250,660,920)	(260,840,1 100)	(650,1 380,1 500)
	D 系列 DR_{14t}	(200,315,500)	(150,330,480)	(240,390,560)	(230,360,500)
回收站 2 回收数量	A 系列 DR_{11t}	(300,610,780)	(330,700,980)	(350,640,800)	(320,560,760)
	B 系列 DR_{12t}	(380,840,1 100)	(300,780,910)	(280,760,960)	(360,880,1 250)
	C 系列 DR_{13t}	(160,400,580)	(150,440,550)	(230,560,670)	(400,920,1 140)
	D 系列 DR_{14t}	(125,210,400)	(140,220,350)	(110,260,440)	(200,240,300)

表 2 单位售价和作业成本的模糊参数表
Tab.2 Fuzzy parameters of price and unit cost

价格/成本	产品系列			
	A 系列	B 系列	C 系列	D 系列
销售单价 P_i	(2 400,2 500,2 550)	(1 350,1 400,1 550)	(2 650,2 800,2 980)	(4 800,5 000,5 500)
单位组装成本 UC_i	(190,210,230)	(110,150,160)	(210,250,255)	(345,360,380)
单位回收成本 UR_i	(200,480,600)	(110,220,300)	(220,560,680)	(650,1 100,1 650)
单位拆卸成本 UD_i	(40,120,180)	(45,95,120)	(38,130,150)	(115,180,400)
单位惩罚成本 UPR_i	(45,50,58)	(22,30,36)	(44,50,60)	(180,200,230)
单位处理成本 UUR_i	(30,35,45)	(16,20,30)	(34,40,48)	(100,120,145)

表 3 有关零部件的数据
Tab.3 Parameters of parts

零部件参加项	A 系列		B 系列		C 系列			D 系列	
	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	$j = 6$	$j = 7$	$j = 8$	$j = 9$
工厂 1 期初库存 IP_{1j}	220	250	290	260	250	240	210	130	120
工厂 1 安全库存 SS_{1j}	200	200	250	250	200	200	200	100	100
工厂 2 期初库存 IP_{2j}	200	230	260	250	210	220	220	100	110
工厂 2 安全库存 SS_{2j}	200	200	250	250	200	200	200	100	100
单位库存成本 UI_j	8	10	8	4	4	6	14	20	15
单位运输成本 UT_j	20	30	20	30	20	20	40	60	80
单位自制成本 UM_j	750	900	450	300	500	1 000	400	2 000	1 600
单位外购成本 UB_j	800	920	400	350	520	960	440	1 800	1 620
单位零部件的容积 UU_j	1	4	3	2	1	2	3	2	4
工厂 1 自制零部件 max PM_{1j}	800	800	1 300	1 300	600	600	600	300	300
工厂 2 自制零部件 max PM_{2j}	400	400	700	700	400	400	400	200	200

表 4 有关产品的数据
Tab.4 Parameters of products

产品系列	期初库存		成本数据		单位产品容积 UU_i	单位产能数据		
	回收中心 1	回收中心 2	单位库存费 UI_i	单位运费 UT_i		UDC_i	UWC_i	UMC_i
系列 A	120	100	20	60	6	6	8	8
系列 B	200	220	14	50	7	4	12	14
系列 C	100	60	25	90	9	5	7	15
系列 D	40	50	40	150	8	2	4	4

表 5 最大产能及容量数据
Tab.5 Parameters of maximum capacity and volume

工厂	$\max WI_k$	$\max W_k$	$\max M_k$	回收中心	$\max RI_r$	$\max R_r$	销售中心	$\max SI_s$
工厂 1	70 000	80 000	100 000	回收中心 1	40 000	20 000	销售中心 1	20 000
工厂 2	40 000	45 000	70 000	回收中心 2	25 000	10 000	销售中心 2	10 000

表 6 再制造工厂的最优 RAPP
Tab.6 Remanufacturing aggregate production planning optimization of remanufacturing factories

决策变量	工厂 1	时 间				工厂 2	时 间			
		$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$		$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$
计划组装产品数量	Q_{11t}	1 944	2 236	2 093	1 768	Q_{21t}	1 047	1 204	1 127	952
	Q_{12t}	2 691	2 555	2 470	2 847	Q_{22t}	1 449	1 376	1 330	1 533
	Q_{13t}	1 313	1 417	1 794	3 003	Q_{23t}	707	763	966	1 617
	Q_{14t}	683	723	839	761	Q_{24t}	368	389	452	410
自制零部件数量	M_{11t}	800	800	800	800	M_{21t}	400	400	400	400
	M_{12t}	800	800	800	800	M_{22t}	400	400	400	400
	M_{13t}	0	0	0	0	M_{23t}	0	0	0	0
	M_{14t}	1 300	1 300	1 300	1 300	M_{24t}	700	700	700	700
	M_{15t}	543	600	600	600	M_{25t}	369	400	400	400
	M_{16t}	0	0	0	0	M_{26t}	0	0	0	0
	M_{17t}	562	600	600	600	M_{27t}	380	400	400	400
	M_{18t}	0	0	0	0	M_{28t}	0	0	0	0
	M_{19t}	288	300	300	300	M_{29t}	194	200	200	200
外购零部件数量	B_{11t}	296	623	567	310	B_{21t}	160	335	305	167
	B_{12t}	257	623	567	310	B_{22t}	139	335	305	167
	B_{13t}	1 338	1 656	1 600	1 782	B_{23t}	744	892	862	960
	B_{14t}	109	356	300	482	B_{24t}	58	192	162	260
	B_{15t}	0	246	501	1 299	B_{25t}	0	133	270	699
	B_{16t}	593	896	1 151	1 949	B_{26t}	319	483	620	1 049
	B_{17t}	0	246	501	1 299	B_{27t}	0	133	270	699
	B_{18t}	313	434	493	444	B_{28t}	169	233	265	239
	B_{19t}	0	109	168	119	B_{29t}	0	58	90	64

响再制造的盈利. 为了选择最优利润来组织生产, 应该制定相应的预测、回收、自制、外购甚至外协的再制造集约生产计划. 因此, 探求不同计划因子对再制造企业最优利润的影响有着现实的意义.

本文按照案例仿真的相关数据进行因子变动分

析, 以确定这些因子变动时对总利润的实际影响, 以助管理决策者进行相关决策选择.

a. 产品需求和价格变动分析.

一般来说, 各期预测需求量 $\widetilde{D}_{it}$ 及产品预测单

价 $\tilde{P}_i$ 对总利润影响很大. 预测需求量越大、单价越高则总利润相对越高, 反之亦然. 但由于再制造是具有多重不确定性的复杂系统, 约束条件众多, 同时考虑总利润也是各种因素相作用的结果, 如图 3 表示的总利润空间点阵. 因此, 考虑相关约束条件下, 就 $\tilde{D}_u$ 和 $\tilde{P}_i$ 对总利润影响而言, 实际不可能线性增加达到最高值, 而是存在一个相对最优值, 如本例在 (11 060, 3 200) 处所得最优利润值.

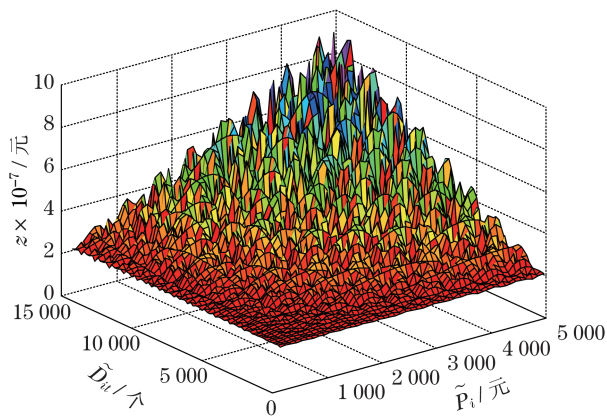


图 3 $\tilde{D}_u, \tilde{P}_i$ 对总利润的影响

Fig.3 Influence of $\tilde{D}_u$ and $\tilde{P}_i$ on the total profits

b. 回收价和回收量的变动分析.

一般来说, 在拆卸可得率一定时, 若回收价不变, 回收量越大, 则可拆卸零部件越多, 利润就越大; 相反, 拆卸可得率和回收量一定的条件下, 回收价越大, 则总利润越低. 但是当拆卸可得率变化时, 同时考虑其它各种约束条件及相关因子的变动, 则获得一系列的总利润空间点阵, 如图 4 所示. 如果回收量越大, 可外购物料就相对少, 总利润相对高, 但是如果回收价进一步提高则总利润下降. 这些因素共同作用时, 会导致总利润不断变化, 而本文方法可以计算出总利润的最优值, 即本例在 (3 900, 620) 处的最优总利润.

c. 回收率和拆卸率的变动分析.

不考虑其它因素时, 产品回收率和拆卸率共同影响总利润. 回收率低时, 无论拆卸率多高, 总利润都不会高; 当然, 即使产品能全部回收 (回收率 100%), 但若拆卸率较低, 总利润依然不会高. 回收率或拆卸率低, 近似传统制造系统; 当回收率和拆卸率高, 则达到近似完全的再制造系统. 由于旧品质量降级, 拆卸再制造的成本节约随再制造程度提高存在先升后急剧下降, 则存在着一个拐点. 本例在 (0.6, 0.6) 处的总利润值最大, 如图 5 所示, 即回收和拆

卸要适度.

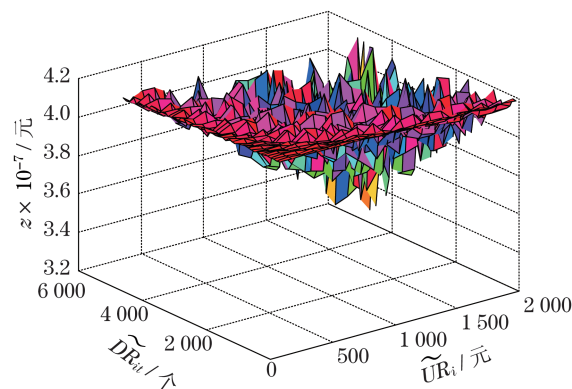


图 4 $\tilde{D}_u, \tilde{P}_i$ 对总利润的影响

Fig.4 Influence of $\tilde{D}_u$ and $\tilde{P}_i$ on the total profits

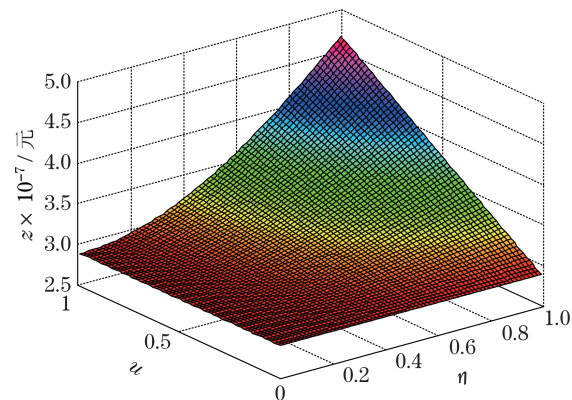


图 5 回收率 μ , 拆卸可得率 η 对总利润的影响

Fig.5 Influence of μ and η on the total profits

6 结束语

与传统生产计划相比, 制定再制造生产计划需要考虑的不确定性变量和参数更多, 其优化模型更复杂. 本文针对 MC 和废旧产品回收再制造这两种现代生产方式和策略, 考虑再制造系统的特点, 构造了闭环供应链下面向 MC 的再制造集约生产计划模型. 在模型的求解方面, 根据模糊集理论, 采用较容易的模糊排序规则, 将不确定的因素转化成可控的确定性参数, 用一般的线性规划软件包就能很好地求解, 从而能够被大多数企业管理决策者容易地掌握. 通过算例分析, 此模型能够较好地仿真现代企业的生产计划问题. 新形势下的企业管理决策者可根据此模型科学合理地制定企业集约生产计划, 以期降低企业运营成本, 取得最优利润, 最终增强企业竞争力.

参考文献:

- [1] Pine B J. Mass customization: the new frontier in business competition[M]. Boston: Harvard Business School Press, 1993.
- [2] Ganesh K, Punniyamoorthy M. Optimization of continuous-time production planning using hybrid genetic algorithms-simulated annealing[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2005, 26(1/2): 148 - 154.
- [3] Wang R C, Liang T F. Applying possibilistic linear programming to aggregate production planning[J]. International Journal of Production Economics, 2005, 98(3): 328 - 341.
- [4] Aghezzaf E H. Production planning and warehouse management in supply networks with inter-facility mold transfers[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 182(3): 1122 - 1139.
- [5] Li Y J, Chen J, Cai X Q. Uncapacitated production planning with multiple product types, returned product remanufacturing, and demand substitution[J]. OR Spectrum, 2006, 28(1): 101 - 125.
- [6] Kim K, Song I, Kim J Y, et al. Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment[J]. Computers & Industrial Engineering, 2006, 51(2): 279 - 287.
- [7] Qu X L, Williams J A S. An analytical model for reverse automotive production planning and pricing[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 190(3): 756 - 767.
- [8] 祝勇, 潘晓弘. 模糊环境下基于可信性规划的生产计划方法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(2): 344 - 352.
- [9] 朱海平, 华菲菲, 邓宇浩, 等. 随机和模糊约束下的扩展型集约生产计划方法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(2): 1 - 7.
- [10] Al-e-Hashem S M J M, Aryanezhad M B, Sadjadi S J. An efficient algorithm to solve a multi-objective robust aggregate production planning in an uncertain environment[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2012, 58(5/6/7/8): 765 - 782.
- [11] Guide V D R. Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs[J]. Journal of Operations Management, 2000, 18(4): 467 - 483.
- [12] 陈荣秋, 马士华. 生产运作管理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [13] 胡宝清. 模糊理论基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- [14] Lai Y J, Hwang C L. A new approach to some possibilistic linear programming problems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 49(2): 121 - 133.
- [15] Ramik J, Rimanek J. Inequality relation between fuzzy numbers and its use in fuzzy optimization[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1985, 16(2): 123 - 138.
- [16] Zimmermann H J. Fuzzy programming and linear programming with several objective functions[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1978, 1(1): 45 - 56.
- [17] Lee E S, Li R J. Comparison of fuzzy numbers based on the probability measure of fuzzy events[J]. Comp Math Applic, 1988, 15(10): 887 - 896.
- [18] 彭国樑, 姚俭. 不确定性供应链风险的模糊综合评判[J]. 上海理工大学学报, 2010, 32(4): 373 - 377.

(编辑: 丁红艺)