

机械产品回收与再制造系统中 绿色影响因子关联仿真模型

邓乾旺 李卫明 李 珣 刘霞辉

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室,长沙,410082

摘要:从系统工程的角度分析提炼了系统的绿色影响因子,从技术、过程、主体等多维度归纳了控制因素集,从经济、资源、环境、人因等维度归纳了绿色绩效输出集。提出关联规则并进行关联仿真,结合仿真结果对绿色绩效输出集进行聚类分析,最终得到了50个系统因素。建立了系统结构有向图,基于解释结构矩阵建立了整体结构,分析了要素之间的层级关联以及对比关系,为回收与再制造系统绿色绩效输出提供了优化方向。

关键词:回收与再制造;绿色绩效;关联仿真建模;解释结构模型

中图分类号:N945.23

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2015.22.014

Associated Simulation Model of Key Green Factors in Recycling and Remanufacturing System of Mechanical Products

Deng Qianwang Li Weiming Li Xun Liu Xiahui

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing
for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, 410082

Abstract: This paper analyzed the green factors of system from the perspective of systems engineering, then they were divided into one sets of control factors in view of technology and process and put into the other sets of green performance in light of economy, resources, environment, human factors. An associated simulation model was also proposed via establishing the association rules, and the output sets of green performance was studied by using clustering analysis based on the simulation results, thus obtaining 50 system factors. Then the system architecture was established on the basis of interpretative structural matrix, after proposing a directed graph of the system structure. Finally, this structure was utilized to analyze hierarchical relationships between the factors, in order to provide an optimization direction to the green outputs of the recycling and remanufacturing system.

Key words: recycling and remanufacturing; green performance; associated simulation modeling; interpretative structural modeling (ISM)

0 引言

废旧产品经过回收、拆卸、清洗、检测、分类、再制造等过程得到新产品,可实现资源的重复利用,减少环境污染。回收与再制造方面的研究已有许多研究成果,并集中在两个方面:内部控制因素和绿色绩效输出^[1]。内部控制因素为回收与再制造系统的内部状态集合,绿色绩效为系统输出集合。在控制方面,文献[2-3]研究了政府政策奖惩、经济激励、教育宣传以及消费者意识等限制条件下回收与再制造问题;文献[4]研究了回收产品中回收定价策略;文献[5-7]论述了数量及时间不确定性条件下运输库存控制、物流设施选址、逆向物流网络优化等;文献[8-10]对再制造决策、再制

造计划以及工艺路线设计等问题进行了研究;文献[11-12]对不同限制条件下再制品定价以及供应链问题进行了研究。而在绿色绩效方面,文献[13-16]对经济、环境、资源、人因等方面作出了综合评价。现有的研究成果,从经济角度主要包含回收成本、运输与库存成本、拆卸回收成本与利润^[17]等方面;从环境角度,研究了三废排放、能耗问题,噪声污染等问题;从资源消耗角度,研究了电力资源、人力资源、设施资源和物质资源等;从人因角度,研究了工作环境改善以及环境污染改善、行业规模以及可持续性等人因因素。通过分析上述研究可知,目前文献对回收与再制造系统因素的研究日益广泛,但是研究中并未涉及回收与再制造系统整个框架模型以及系统边界问题,对回收与再制造系统中控制因素和绿色影响输出因素之间的关系缺乏因果表述,且对影响系统输出的主要关键性因素缺乏明确研究表述,只是从

收稿日期:2014-06-11

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA040206);国家自然科学基金资助项目(71473077);湖南省自然科学基金资助项目(13JJ A003)

某一个角度考虑因素对系统的影响,缺乏系统因素整体结构框架以及系统因素之间的比对关系。本文从系统角度构建回收与再制造系统结构模型,进行系统结构仿真研究,分析了系统内部状态集合以及输出集合,并利用结构模型化技术建立了整体模型,分析了要素之间关联关系以及相互重要性程度。本文建立的系统结构模型,运用了关联仿真^[18-19]、结构模型化技术^[20-21],并进行了数学形式化处理^[22],具有较好的通用性。

1 回收与再制造绿色系统因素选取

1.1 回收与再制造绿色系统控制因素

在回收与再制造系统控制因素的研究中,阳成虎等^[4]考虑了废旧产品的质量和用户心理回收价格等因素,制定了基于回收价格、回收数量和再制造成本阈值的最优回收策略。赵忠等^[10]论述了国内外废旧产品回收计划、拆卸计划、生产计划等方面的研究现状,阐述了再制造中不确定性特征、产品回收后状态、再制造生产计划控制方面的不足。倪霖等^[13]指出当前逆向物流研究主要集中于体系结构研究、回收策略、网络优化和逆向物流供应商选择上。王旭等^[14]讨论了技术属性所包含的装备先进性、管理手段先进性、物流技术先进性。韩小花等^[23]分析了闭环供应链回收渠道决策,得出制造商竞争、废旧产品回收的难易和再制造成本共同影响回收渠道演化结果的结论。代应等^[24-25]对回收系统的主体功能,系统要素(主体、物流、信息、回收渠道),组织结构和内外环境因素进行了研究,建立了由生产商、消费者、报废回收中心等多节点集成的绿色回收系统结构模型;认为实现绿色回收需要提高全民意识且法律手段与经济杠杆并行,提高再制造技术理论应用,推行汽车绿色设计。周丹等^[26]研究了回收中EPR(extended producer responsibility)的实施手段,包括强制法律手段以及非强制经济(价格补贴等)和教育手段(环境意识、绿色消费)等。刘笑萍等^[27]分析了用户主动返回的激励性因素,其中回收距离、手续的便利性、经济性、再制造能力、企业形象规模、个人的经济状况、社会责任感都与用户主动参与回收息息相关。周育红等^[28]从法制建设、回收网络构建、回收技术研究、宣传教育等方面提出了针对回收与再制造的建议。赵宜等^[29]针对回收产品收集、预处理和再制造等问题,建立了回收物流设施选址模型。毛玉如等^[30]从立法、循环经济、政策和回收体系等方面探讨了回收处理情况。周永圣等^[31]对政府监控行为进

行了定量描述,研究了政府监视下的三种回收模式。刘志峰等^[32]探讨了废旧产品有效的回收途径,并基于工艺、环境、经济、设备等相关数据和专家知识,建立了回收工艺流程评价决策系统。谢家平等^[33]构建了废弃产品返回数量及时间、回收处理过程中的再造零部件和可再生材料的比例等预测模型。李清等^[34]从产品维(产品磨损),市场维(认可度、销售水平、价格水平),过程维(环境和处理成本、投资、处理能力、经济效益),政策维(政府支持与关注),环境维五个方面研究了回收处理策略的决策要素。顾巧论等^[35]在再制造系统信息网络模型研究过程中发现,再制造政策法规、废旧产品信息、新产品需求以及回收方式价格、相关宣传等会严重影响再制造与制造系统之间的博弈,此外,他们还研究了再制造库存问题。曹华军等^[36]以低成本、节能、环境友好为改进目标,提出了再制造技术框架。张萌等^[37]阐述了回收成本包括回收能力建设和投资以及支付给消费者的成本。

综上所述,回收与再制造系统是考虑回收、拆解、再制造、再利用各个过程环节,围绕主体、过程、技术、物流、资源、资本、政策、社会、人因等不同维度,将过程、主体、结构、功能等要素集成的系统。因此回收与再制造系统是在资本和技术的支撑控制下,寻找系统所需信息,将系统组织集成,在主体参与下实现绿色绩效输出的过程。本文从技术、过程、主体、组织、控制、信息、资本七个维度归纳出回收与再制造绿色系统中控制因素属性集,并提炼出分类属性集因素,形成回收与再制造系统项目控制因素集,如表1所示。

1.2 回收与再制造绿色系统绿色绩效输出因素

经济因素方面,倪霖等^[13]从利润率、运输储存、拆卸清洗、废品处理、管理服务等成本经济角度评价了回收与再制造价值;代应等^[24-25]提出经济绩效水平包含盈利能力如资金周转、净资产利用率、总资产利用率,成本水平包含运输成本、投资成本、运营成本、补偿和监督成本,以及惩罚成本和环境污染治理成本;魏洁等^[38]考虑了回收物流主体的利润;黄祖庆等^[39]研究了回收中主体间期望收益及税收价格;李响等^[40]分析了回收价格对再制造企业收益的影响;董景峰等^[41]以物流成本最小为目标进行了网络设计;范体军等^[42]分析了考虑激励与不考虑激励情况下再制造产品成本对回收率和利润关系;李丽等^[43]分析了系统中回收价格、转移价格、回收量、制造商利益、分销商利益、消费者利益和政府利益之间的相互制约关系;

表 1 回收与再制造系统项目控制因素集

项目控制集 (I_t)	项目控制因素具体分类
技术集 (T)	T_1 , 回收设施 / 技术 ^[16,36] ; T_2 , 物流设施 / 技术 ^[14] ; T_3 , 拆卸清洗设施 / 技术 ^[16,36] ; T_4 , 检测分类设施 / 技术 ^[16] ; T_5 , 再制造设施 / 技术 ^[16,36] ; T_6 , 优化设计技术 ^[16] ; T_7 , 环境友好性改进技术 ^[36]
过程集 (P)	P_1 , 产品回收; P_2 , 拆卸清洗; P_3 , 检测评估; P_4 , 再处理; P_5 , 再制造; P_6 , 质量检测; P_7 , 装配; P_8 , 停滞 ^[29]
主体集 (S)	S_1 , 消费者; S_2 , 政府; S_3 , 回收商; S_4 , 物流供应商; S_5 , 制造商; S_6 , 再制造商; S_7 , 处理商; S_8 , 其余 ^[24-25]
组织集 (O)	O_1 , 回收网络 ^[28] ; O_2 , 运输路径 ^[41] ; O_3 , 企业规模与分布 ^[27] ; O_4 , 再制造工艺 ^[8,32] ; O_5 , 设施与车间布局 ^[32] ; O_6 , 逆向物流网络 ^[29] ; O_7 , 回收体系 ^[13,30] ; O_8 , 再制造体系 ^[4,34] ; O_9 , 再制造供应链 ^[12,23]
控制集 (C)	C_1 , 认知行为控制 ^[44] ; C_2 , 回收策略 ^[4,13] ; C_3 , 拆卸评估及计划 ^[23] ; C_4 , 生产计划 ^[23] ; C_5 , 库存运输控制 ^[35] ; C_6 , 质量控制 ^[33] ; C_7 , 强制性法律约束 ^[26] ; C_8 , 非强制性经济激励与教育宣传 ^[26,35] ; C_9 , 企业管理 ^[14]
信息集 (I)	I_1 , 回收产品结构 ^[23] ; I_2 , 回收产品质量 ^[33,35] ; I_3 , 回收时间 ^[33] ; I_4 , 信息共享 ^[35] ; I_5 , 市场分布 ^[29] ; I_6 , 经济水平及人口分布 ^[27] ; I_7 , 报废总量 ^[4] ; I_8 , 消费者接受程度 ^[27] ; I_9 , 回收数量 ^[4]
资本集 (F)	F_1 , 基础设施建设 ^[37] ; F_2 , 适应性扩建投资 ^[37] ; F_3 , 回收价格 ^[4,35] ; F_4 , 销售价格 ^[27,29,35] ; F_5 , 政府投入 ^[31]

谢家平等^[45] 分析了废弃处理策略的成本和效益, 从制造费用、销售收入、材料采购费用、环保费用等方面量化分析了再用收益、再生收益、填埋成本、回收净收益、再生项数等目标。在人因方面, 倪霖等^[13] 评价了体系中企业核心竞争力, 包括顾客满意度、信誉度、快速响应、品牌保护、拆解利用技术水平、三废处理能力, 社会角度涉及满足国家法律要求、改善环境等; 代应等^[24-25] 提出改善员工素质、信誉度、工作环境等相关内容; 陆莹莹等^[46] 讨论了消费者的态度、主观性意识、习惯和回收信息及经济因素等主导回收行为的发生条件; 余福茂等^[44] 探究了知觉行为控制、环境意识、舆论宣传等因素对回收行为的影响。在环境方面, 胡剑波等^[16] 分析了基于绿色再制造的企业运营, 从资源综合利用率、排放物利用率、环境污染率、原材料减量使用、减少三废排放、减少噪声产生、减少对工人健康危害等方面对环境污染进行了阐述; 代应等^[24-25] 从环境方面出发提出研究总能耗以及三废处理问题的方法; 刘志峰等^[47] 提出环境污染包含大气影响、水质影响、固体废弃物排放和噪声影响。在资源方面, 倪霖等^[13] 研究了废

旧汽车回收率、材料再利用率等指标; 王旭等^[14] 指出绿色资源属性方面包含人力、设备、再利用三个方面, 具体包括员工素质、拆解设施利用率、环保设施利用率、材料回收率; 代应等^[24-25] 讨论了材料利用率和包装利用率以及增加就业岗位等指标。结合引言中关于文献^[13-16] 的总结以及经济^[48]、环境^[49]、资源数据库^[50] 对上述绩效指标进行总结归纳, 最终得到绿色绩效输出为以下四个方面——经济集、环境集、资源集、人因集。表 2 归纳出了绿色绩效输出 T_r , 包含经济集 E_c 、环境集 E_n 、资源集 R_c 、人因集 H_f 。

表 2 回收与再制造系统绿色绩效输出因素集

绿色绩效 T_r	绿色绩效输出因素具体分类
经济 ^[13,24-25,28,39-40,43,45,48] (E_c)	主体期望收益, 物流成本, 废弃处理效益, 填埋成本, 回收净收益, 材料采购费, 销售收入, 库存成本, 运输成本, 固定资产投入, 资产折旧, 总资产利用率, 净资产利润率, 主体收益, 政府利润, 消费者利润, 零件再利用收益, 再循环收益, 再制造收益, 运营成本, 投资成本, 拆卸清洗成本, 废品管理成本, 管理服务成本, 补偿监督成本, 惩罚成本, 环境污染治理成本
环境 ^[16,24-25,47,49] (E_n)	节约总能耗, 再制造污染气体排放, 再制造污染水量, 噪声污染, 再处理(拆卸清洗) 污染, 运输尾气排放, 填埋固体废弃物, 未回收产品继续使用污染尾气排放, 未回收产品搁置污染排放
资源 ^[13,16,24-25,50] (R_c)	人力资源(员工素质, 职业岗位), 设备资源(环保设施利用率, 拆解设施利用率), 材料回收率包装再利用率, 材料再利用率, 汽车回收率, 物质资源消耗, 能源消耗, 土地占用
人因 ^[13,24-25,44,46] (H_f)	改善工作环境, 顾客满意度, 响应时间, 企业信誉度, 符合法律规范, 回收便利性, 企业形象, 社会责任, 服务水平, 工作环境质量, 行业规模产业化, 工人健康危害

2.1 关联模型

2.1.1 定义关联规则

分析系统结构因素, 定义项目控制因素集合 P, T, S, O, C, F, I ; 项目控制集合 $I_t = \{T_x, P_y, S_z, O_n, C_m, I_j, F_l\} (x, y, z, n, m, j, l \in \mathbf{N})$; 序列 $\delta = \{x, y, z, n, m, j, l\}$; 项目数据库 $D = \{I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_{l_p}\}$; I_t 中的任一子集 $X \subseteq D, Y \subseteq D$; 定义绿色事务输出集合 $T_r = \{E_c, E_n, R_c, H_f\}$, 控制函数为 f_x , 系统结构集合 $M = \{I_t, f_x, T_r\}$ 。

规则 1 系统结构关联规则。绿色事务生成

是指由主体 S 经过 P 向另一主体 S 变迁过程中产生的对特定属性影响的过程。系统形式： $\{S_x\} \xrightarrow{+T,I,F} \{P_y\} \xrightarrow{+T,I,F} \{S_z\} \xrightarrow{+T,I,F} \{P_i\} \xrightarrow{+T,I,F} \{S_j\}$ ；其中 $\{S_x\} \xrightarrow{+T,I,F} \{P_y\} \xrightarrow{+T,I,F} \{S_z\}$ 为子系统(组织 O)，进而对子系统进行分解为局部组织 O ： $\{S_a\} \xrightarrow{+T,I,F} \{C_b\} \xrightarrow{+T,I,F} \{S_c\}$ ，直到不能分解后停止，此过程中由技术 T 、信息 I 、资本 F 提供支撑，最终形成绿色事务集输出，如图 1 所示。记绿色事务集生成过程为控制函数 f_x ；参与元素组成项目集合 X ，以及元素下标序列 δ ；关联仿真表述为项目子集 X 在函数 f_x 控制下对应绿色事务输出，即： $\{X\} \xrightarrow{f_x} \{T_{r_x}\}$ ；记： $T_{r_x} = f(T_x, f_1(P_y, S_z, f_{11}(O_n, C_m)), f_2(I_j, F_l))$ 。

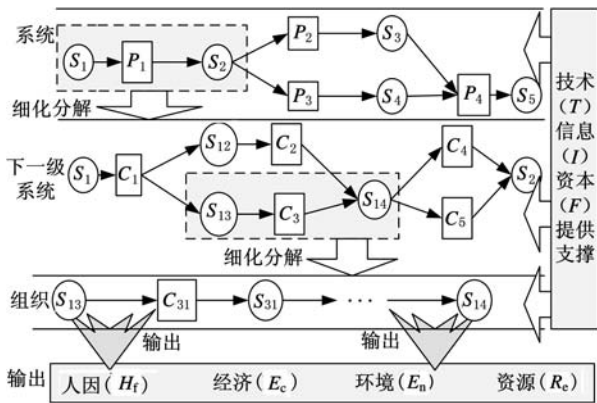


图 1 系统结构关联机理

规则 2 控制项目集优化。控制项目集 X 形成事务集 T_x ，数量为项目集 X 的支持数 σ_x ，支持度 $\text{sup}(X) = \sigma_x / \sum |T_r|$ ， $\text{sup}(X)$ 越大，则称 X 为大项目集，否则 X 为小项目集； X 中项目元素出现在各项目集中的次数称为频数，如元素 P 出现在各项目集中的次数，记为 $|P|$ ，频数越大，项目元素越重要。

规则 3 绿色事务集优化。若 $X \xrightarrow{f} T_r$ 且 $Y \xrightarrow{f} T_r$ ，则存在 $X \subseteq Y$ 或 $Y \subseteq X$ ；定义 Y 的置信度 $\text{con}(Y) = |X \cap Y| / |Y|$ ； X 的置信度 $\text{con}(X) = |X \cap Y| / |X|$ ； $|X|$ 为序列 δ 元素个数。若 $X \subseteq Y$ ，显然 $\text{con}(X) \geq \text{con}(Y)$ ，称 $X \xrightarrow{f} T_r$ 为强规则， $Y \xrightarrow{f} T_r$ 为弱规则。关联规则以强规则执行，去除弱规则。

规则 4 系统结构集合输出。根据规则 1~3 中控制项目集 I_i 与绿色事务集 T_r 以及关联控制函数 f 得到系统结构集合 $M(X, f, T_r)$ 。

2.1.2 关联仿真程序流程

根据上述规则制定系统结构仿真程序流程如图 2 所示，具体步骤如下：

(1) 数据库 D 根据规则 1 产生项目子集 X_i ，若 $X_i \neq X_{i-1}$ 转到步骤(2)，否则继续执行步骤(1)。

(2) 根据规则 1 判断 X_i 是否能通过控制函数 f_{xi} 产生事务集 $T_{r_{xi}}$ ；若不能产生事务集，则 $i \leftarrow i + 1$ ，返回步骤(1)；否则，判断支持度与频数，输出大项目集 X_i 中元素，转到步骤(3)。

(3) 判断事务目标数据库 T 中是否存在元素 $T_{r_{xi}}$ ；若存在，转步骤(4)；否则返回步骤(1)。

(4) 计算支持度 $\text{sup}(X_i)$ ，记录序列 δ ，记录关联 $M\{X_i, f_i, T_{r_i}\}$ ；转到步骤(5)。

(5) 判断是否存在 $X_i \xrightarrow{f_i} T_r$ 且 $X_{i-n} \xrightarrow{f_{i-n}} T_r (n < i)$ ；如果存在，计算 $\text{con}(X)$ ，如果不存在，记录 $M\{X_i, f_i, T_{r_i}\}$ ，删除 $\{X_{i-n}, f_{i-n}, T_{r_{i-n}}\}$ ；若 $\text{con}(X_i) \geq \text{con}(X_{i-n})$ ，则删除 M 中 $\{X_{i-n}, f_{i-n}, T_{r_{i-n}}\}$ ，记录 $\{X_i, f_i, T_{r_i}\}$ ；转到步骤(6)。

(6) 判断项目数据库 D 是否能产生有效子集；若是， $i \leftarrow i + 1$ ，跳转到步骤(1)；若不是，则输出系统结构集合 $M\{X, f, T_r\}$ ，程序结束。

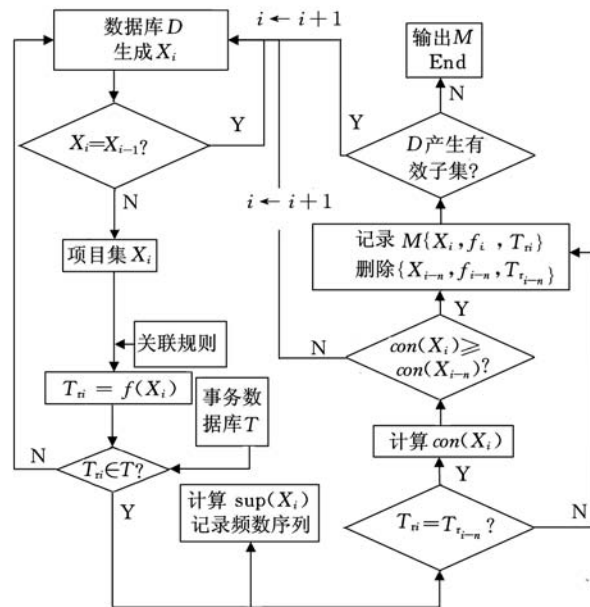


图 2 系统结构关联仿真程序流程

2.2 回收与再制造绿色系统关联仿真结果聚类分析

(1) 系统结构集合结果。根据表 1 和表 2 中因素，进行系统关联仿真，得到结构集合 $M\{X, f, T_r\}$ ，以环境事务集为例，结果如表 3 所示。

表 3 系统关联仿真结果(以绿色绩效输出-环境子系统为例)

	主体 S	过程 P	技术 T	控制 C	组织 O	信息 I	资本 F
节约总能耗 E_{n_1}	$S_{1\sim 8}$	$P_{1\sim 9}$	$T_{1\sim 7}$	$C_{1\sim 9}$	$O_{1\sim 9}$	$I_{4,9}$	$F_{1,2,5}$
运输污染 E_{n_2}	$S_{1,3,4,7,8}$	$P_{1\sim 4}$	$T_{1\sim 4}$	$C_{2,3,5}$	$O_{1,2,6,8}$	$I_{1,2,5,9}$	F_3
再制造气体水量 E_{n_3}	$S_{6,8}$	P_5	T_5	C_4	$O_{4,5,8}$	$T_{1,2,5\sim 10}$	F_1
再制造污染排放 E_{n_4}	$S_{6,8}$	P_5	T_5	C_4	$O_{4,5,8}$	$T_{1,2,5\sim 10}$	F_1
填埋固体废弃物 E_{n_5}	$S_{7,8}$	P_4	T_4	C_3	$O_{4,7,8}$	$I_{1,2}$	F_1
噪声污染 E_{n_5}	$S_{3,6,8}$	$P_{2\sim 5}$	$T_{3,4,5,7}$	C_7	$O_{4,5,8}$	$I_{1,2}$	F_1
未回收品搁置土地污染 E_{n_6}	$S_{1,3,4,8}$	$P_{1,8}$	T_1	$C_{1,2,7,8}$	$O_{1,6,7}$	$I_{5\sim 7,9}$	$F_{1,3}$
未回收品使用尾气排放 E_{n_7}	$S_{1,3,4,8}$	$P_{1,8}$	T_1	$C_{1,2,7,8}$	$O_{1,6,7}$	$I_{5\sim 7,9}$	$F_{1,3}$
再处理(拆卸清洗)污染 E_{n_8}	$S_{7,8}$	$P_{2\sim 4}$	$T_{3,4}$	C_3	$O_{4,5,8}$	I_1	$I_{1,3}$

(2) 绿色绩效输出聚类分析。针对表 3 环境子系统中未回收报废产品导致土地污染为例进行分析; 项目集 $X = \{T_1, P_{1,8}, S_{1,3,4,8}, O_{1,6,7}, C_{1,2,7,8}, I_{5\sim 7,9}, F_{1,3}\}$, 根据图 1 映射规则, 对绿色事务集生成做出解释, 在子系统 $S_1 \xrightarrow{T,I,F} P_1 \xrightarrow{T,I,F} S_3$ 中发生, 即回收体系 (O_7) 中的回收网络 (O_1) 段, 作用主体包括消费者、回收商、物流供应商和其他外部主体; 事务形成的函数表达过程如下:

$$T_{r_{550}} = f(I_7, I_9) \quad (1)$$

$$I_7 = f_1(I_6) \quad (2)$$

$$I_9 = f_2(F_3, C_2, C_1, T_1, f_1(I_6)) \quad (3)$$

$$T_1 = f_{21}(F_1) \quad (4)$$

$$C_1 = f_{22}(C_7, C_8, O_1, C_2, F_3) \quad (5)$$

$$C_2 = f_{23}(C_7, C_8, C_1) \quad (6)$$

$$F_3 = f_{24}(C_7, C_8, C_1) \quad (7)$$

$$O_1 = f_{221}(I_5) \quad (8)$$

依据绿色绩效事务形成过程(式(1)~式(8)), 对回收与再制造绿色系统内绿色绩效输出进行聚类分析。环境事务集元素 E_{n_3} 和 E_{n_4} 项目控制集均为 ($T_5, P_5, S_{6,8}, O_{4,5,8}, C_4, I_{1,2,5\sim 10}, F_1$); E_{n_6} 和 E_{n_7} 的控制集因素均为 ($T_1, P_1, S_{1,3,6,8}, O_1, C_{2,7,8}, I_{5\sim 7,9}, F_{1,3}$), E_{n_5} 与 E_{n_8} 控制集之间很相似, 且形成过程一致; 故可以将两元素进行合并, 进而对系统结果进行简化, 生成新的元素代替原有的两种元素, 如将再制造气体排放和再制造污染水量合并为再制造污染, 未回收品搁置土地污染和未回收品搁置气体排放合并为未回收产品导致污染; 填埋固体废弃物与再处理(拆卸清洗)污染实行合并构成再处理污染, 从而达到系统最简化的效果。具体聚类结果如表 4 所示。

3 回收与再制造绿色系统结构模型

3.1 回收与再制造绿色系统因素

总结系统结构集合中项目控制因素(表 1)和聚类后的绿色绩效输出因素(表 4), 得到回收与再制造绿色系统因素, 如表 5 所示。

表 4 回收与再制造系统绿色绩效输出

绿色绩效 (T_r)	绿色绩效具体分类
经济(E_c)	环境污染治理成本*, 再处理成本及收益, 运输库存成本, 再制造成本及收益, 支付消费者资金, 政府投入及收益
资源(R_c)	员工素质及职业岗位, 设施利用率, 材料回收利用率, 汽车回收率, 物质资源消耗
环境(E_n)	节约总能耗*, 运输污染及成本*, 再制造污染, 再处理污染, 噪声污染, 未回收品搁置占用土地及污染和安全隐患*
人因(H_f)	工人工作环境质量, 回收便利度, 公众满意水平, 企业形象及法律规范, 产业化企业规模

* 表示多属性因素

表 5 回收与再制造系统因素

编号	回收与再制造系统因素	编号	回收与再制造系统因素
S1	物质资源消耗	S26	环境污染治理成本
S2	再制造成本和收益	S27	企业社会形象及信誉度
S3	再制品销售价格	S28	基础设施建设成本投入
S4	消费者接受认可度	S29	拆卸评估及作业计划
S5	公众满意度	S30	拆卸清洗设施和技术
S6	噪声污染	S31	产业化企业规模
S7	再处理成本及收益	S32	运输路径规划
S8	再处理污染	S33	运输成本及污染
S9	绿色设计以及工艺路线	S34	政府管理投入以及收益
S10	产品市场需求及变化	S35	创造职业岗位数量
S11	市场退役机械产品拥有量	S36	逆向物流网络
S12	再制造设施以及技术	S37	报废产品回收便利度
S13	环境友好性技术和设备改进	S38	运输库存控制
S14	工作环境及质量	S39	报废产品回收数量
S15	再处理零部件数量	S40	回收价格及回收策略
S16	计划生产再制品数量	S41	应报废产品总量
S17	再制造过程污染	S42	选址与规模
S18	节约总能耗	S43	报废产品市场分布
S19	再制造生产计划	S44	认知行为控制
S20	检测评估技术与设备	S45	非强制性经济激励与宣传教育
S21	设施利用率	S46	强制性法律法规
S22	信息共享	S47	支付消费者资金
S23	回收产品结构以及质量	S48	报废产品回收率
S24	材料回收利用率	S49	经济水平及人口分布
S25	回收设施与技术	S50	未回收报废产品土地占用、污染及安全隐患

$C =$

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25
S26																									
S27																									
S28	1	1			1	1	1	1				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1	1
S29																									
S30					1	1							1	1								1			1
S31																									
S32																									
S33																									
S34																									
S35																									
S36																									
S37																									
S38																									
S39																							1		1
S40																							1		1
S41																							1		1
S42																									
S43																									
S44																							1		1
S45																							1		1
S46																									
S47																									
S48																									
S49	1	1									1	1					1	1	1	1		1			1
S50																									

$D =$

	S26	S27	S28	S29	S30	S31	S32	S33	S34	S35	S36	S37	S38	S39	S40	S41	S42	S43	S44	S45	S46	S47	S48	S49	S50
S26	1									1															
S27		1																							
S28	1	1	1	1	1	1		1	1	1			1	1									1		1
S29	1			1																					
S30	1			1	1					1															
S31		1				1																			
S32	1						1	1	1																
S33	1							1	1																
S34									1																
S35										1															
S36	1	1				1	1	1	1	1	1	1						1							
S37												1													
S38	1							1	1				1												
S39	1			1				1	1				1	1									1		1
S40	1			1				1	1				1	1	1				1			1	1	1	1
S41	1			1				1	1				1	1		1							1		1
S42		1					1			1							1								
S43	1	1				1	1	1	1	1	1	1						1	1						
S44	1			1				1	1				1	1	1				1			1	1	1	1
S45	1			1				1	1				1	1	1				1	1		1	1	1	1
S46	1			1				1	1				1	1	1				1		1	1	1	1	1
S47																							1		
S48																								1	
S49	1			1				1	1				1	1		1							1	1	1
S50	1								1																1

在可达矩阵的基础上,划分系统要素之间的关联类型,分析要素类型,找出整个系统中重要要素。确定系统共分 17 层,并分析系统结构如图 4 所示。

3.3 回收与再制造绿色系统解释结构模型分析

依据可达矩阵及可达集和先行集的概念,即

可达集 $R(S_i)$ 为系统要素 S_i 可达要素的集合;先行集 $A(S_i)$ 为可达系统要素 S_i 要素的集合;计算系统元素可达总数和先行总数。可达总数为系统要素 S_i 可达其他要素的总数(可达矩阵元素行 1 的个数总数),为系统驱动力因素;先行总数为可

达系统要素 S_i 要素的总数(可达矩阵中元素列 1 的个数总数),为系统依赖性因素;统计结果见图 5。

为了更清晰地分清系统要素的依赖性和驱动性,并找出关键性的要素,将元素消除自身影响,建立可达数 Y 和先行数 X 坐标系,元素坐标为 (X,Y) 。构建因素可达性与因素依赖性为相对概念。第一步,将 X,Y 分别减去 1。第二步,如果

$X=0$, 则 $X=-Y$;若 $Y=0$,则 $Y=-X$;其他情况 X,Y 值不变。得到依赖驱动因素坐标如图 6 所示。由此可知,第一象限为中间元素集,要素具有驱动性,也具有依赖性;第二象限为纯驱动元素集,第四象限为纯依赖元素集,故第二象限内不分析因素依赖性,第四象限不分析因素驱动性,即图 6 中负值不予以考虑。

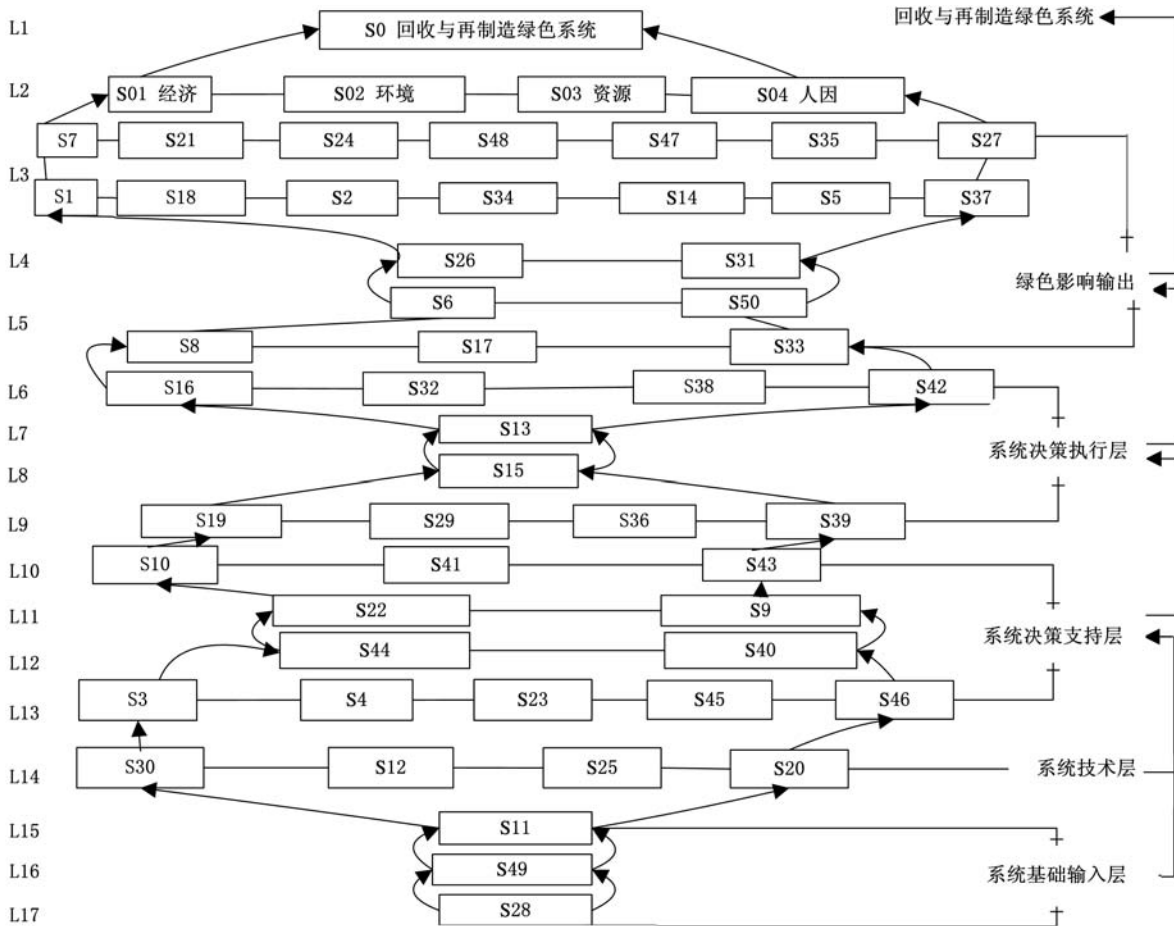


图 4 回收与再制造系统层级结构图

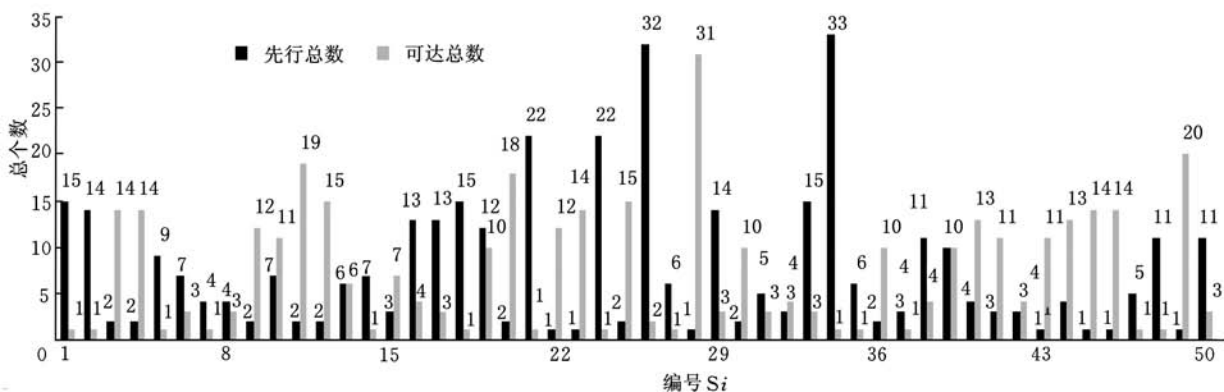


图 5 可达数与先行数统计图

从图 4 的结构角度分析, S28 基础设施建设投入成本和 S49 经济水平及人口分布以及 S11 市场退役机电产品拥有总量为回收与再制造系统的

基础输入层,经济性投入为系统人为主动发生因素,而经济水平制约下的机电产品数量是系统发生客观因素,主动发生因素以及客观因素分别对

传教育投入,增强再制造品的市场竞争力;调节再制造品销售价格以及策略,促进对再制造品的使用,提高消费者对再制造产品的接受认可度,只有在市场接受认可的情况下,再制造才能得到更深层次的发展。再次制定完善环境法律,制定行业技术规范,加强运行监管,只有强有力的市场规范,才能使再制造系统从宏观背景层上得以完善。最后,从回收与再制造系统中的骨架因素进行分析,第一,需要完善回收物流网络,保证回收产品的数量和质量,并赢得社会的认可;第二,对再制造生产系统,需要制定生产计划以实现生产过程有序控制,应用先进技术减少污染,在节约成本的同时改善生产环境;第三,建立信息化系统网络,实行节点间信息共享,充分节约资源和能源,节约成本,减少环境污染和资源浪费。

4 结语

本文从系统工程和智能仿真的角度分析回收与再制造系统绿色影响因素间的关联关系,充分挖掘出系统因素以及系统因素间的相关关系,通过制定关联规则进行关联仿真,消除主观影响,形成回收与再制造系统边界,得出回收与再制造系统内环境、资源、经济、人因等绿色影响子系统因素,并在找出因素相关性的基础上构建解释结构模型,得到系统递阶结构,清楚系统整体结构以及层级关系,找出关键影响因素,为系统结构研究优化提供理论依据。

参考文献:

- [1] 江志刚,张华. 绿色再制造管理层次网络分析模型及应用[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(12): 2417-2420.
Jiang Zhigang, Zhang Hua. Hierarchical Network Model for Green Remanufacturing Management and Case Study[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(12): 2417-2420.
- [2] 王文宾,达庆利. 奖惩机制下电子类产品制造商回收再制造决策模型[J]. 中国管理科学, 2008, 16(5): 57-63.
Wang Wenbin, Da Qingli. The Decision - making Model of the Electronic Product Manufacturer About Collection and Remanufacturing Based on Premium and Penalty Mechanism[J]. Chinese Journal of Management Science, 2008, 16(5): 57-63.
- [3] 余福茂. 情境因素对城市居民废旧家电回收行为的影响[J]. 生态经济, 2012, 249(2): 137-141.
Yu Fumao. The Effect of Situational Factors on the Relationship between Behavior and It's Influence Factors for Recycling of Electronic Waste & Applications[J]. Ecological Economy, 2012, 249(2): 137-141.
- [4] 阳成虎,刘海波,卞珊珊. 再制造系统中废旧产品回收策略[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(4): 875-880.
Yang Chenghu, Liu Haibo, Bian Shanshan. Collection Policy for Used Product in Remanufacturing System [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(4): 875-880.
- [5] Poles R. System Dynamics Model of a Production and Inventory System for Remanufacturing to Evaluate System Improvement Strategies [J]. International Journal of Production Economics, 2013, 144(1): 189-199.
- [6] Amin S H, Zhang G. A Multi-objective Facility Location Model for Closed-loop Supply Chain Network under Uncertain Demand and Return [J]. Applied Mathematical Modeling, 2013, 37(6): 4165-4176.
- [7] 高阳,刘军. 基于第三方回收再制造逆向物流网络设计[J]. 计算机系统应用, 2013, 22(7): 16-21.
Gao Yang, Liu Jun. Remanufacturing Reverse Logistics Network Design Based on the Third-party Recovery under Fuzzy Environment [J]. Computer Systems & Applications, 2013, 22(7): 16-21.
- [8] 李成川,李聪波,曹华军,等. 基于 GERT 图的废旧零部件不确定性再制造工艺路线模型[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(2): 298-305.
Li Chengchuan, Li Congbo, Cao Huajun, et al. Uncertain Remanufacturing Process Routings Model for Used Components Based on GERT Network [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(2): 298-305.
- [9] Wei C, Li Y, Cai X. Robust Optimal Policies of Production and Inventory with Uncertain Returns and Demand [J]. International Journal of Production Economics, 2011, 134(2): 357-367.
- [10] 赵忠,谢家平,任毅. 废旧产品回收再制造计划模式研究述评[J]. 管理学报, 2008, 5(2): 305-311.
Zhao Zhong, Xie Jiaping, Ren Yi. Review of the Recovery and Remanufacturing Planning for Discarded Products [J]. Chinese Journal of Management, 2008, 5(2): 305-311.
- [11] 徐峰,盛昭瀚,陈国华. 基于异质性消费群体的再制造产品的定价策略研究[J]. 中国管理科学, 2008, 16(6): 130-136.
Xu Feng, Sheng Zhaohan, Chen Guohua. The Remanufactured Products Pricing Strategy in a Heterogeneous Market [J]. Chinese Journal of Management Science, 2008, 16(6): 130-136.
- [12] 张成堂,杨善林. 双渠道回收下闭环供应链的定价

- 与协调策略[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(7):1676-1683.
- Zhang Chengtang, Yang Shanlin. Pricing and Coordination Strategy of Closed-loop Supply Chain under Dual Channel Recovery[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(7): 1676-1683.
- [13] 倪霖, 刘琳. 基于遗传神经网络的汽车回收逆向物流综合评价[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(8): 2865-2867.
- Ni Lin, Liu Lin. Comprehensive Evaluation of Vehicle Recovery of Reverse Logistics Based on Genetic Neural Network[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(8): 2865-2867.
- [14] 王旭, 杨明, 代应. 汽车回收企业绿色度评价应用研究[J]. 现代制造工程, 2008, 11(6): 35-37.
- Wang Xu, Yang Ming, Dai Ying. Research on Green Degree Evaluation of End-of-life Vehicle Enterprises[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2008, 11(6): 35-37.
- [15] 毛果平, 吴超. 基于网络层次分析的企业再制造产品评估模型[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 14(12): 2341-2345.
- Mao Guoping, Wu Chao. Evaluation Model for Remanufacturing Products Based on Analytic Network Process[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 14(12): 2341-2345.
- [16] 胡剑波, 梁工谦, 路艳. 基于绿色再制造的企业运营研究[J]. 管理现代化, 2008, 12(1): 13-15.
- Hu Jianbo, Liang Gongqian, Lu Yan. Business Operations Research Based on Green Remanufacturing[J]. Modernization of Management, 2008, 12(1): 13-15.
- [17] Farel R, Yannou B, Ghaffari A, et al. A Cost and Benefit Analysis of Future End-of-life Vehicle Glazing Recycling in France: A Systematic Approach[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2013, 74(5): 54-65.
- [18] 田志宏, 张永铮, 张伟哲, 等. 基于模式挖掘和聚类分析的自适应告警关联[J]. 计算机研究与发展, 2009, 3(8): 1304-1315.
- Tian Zhihong, Zhang Yongzheng, Zhang Weizhe, et al. An Adaptive Alert Correlation Method Based on Pattern Mining and Clustering Analysis[J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 3(8): 1304-1315.
- [19] 李杰, 徐勇, 王云峰, 等. 面向个性化推荐的强关联规则挖掘[J]. 系统工程理论与实践, 2009(8): 144-152.
- Li Jie, Xu Yong, Wang Yunfeng, et al. Strongest Association Rules Mining for Personalized Recommendation[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2009(8): 144-152.
- [20] Wan J, Zhu Y, Liang L. The Research on the Key Success Factors of Mobile Internet with Interpretative Structural Modelling [J]. I - Business, 2013, 5(3): 221-228.
- [21] Mathiyazhagan K, Govindan K, NoorulHaq A, et al. An ISM Approach for the Barrier Analysis in Implementing Green Supply Chain Management [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 47: 283-297.
- [22] 冯惠军, 冯允成. 仿真建模与形式化[J]. 系统工程理论与实践, 1995(6): 22-28.
- Feng Huijun, Feng Yuncheng. Simulation Modeling and formalism [J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 1995(6): 22-28.
- [23] 韩小花, 薛声家. 竞争的闭环供应链回收渠道的演化博弈决策[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(7): 1487-1493.
- Han Xiaohua, Xue Shengjia. Reverse Channel Decision for Competition Closed-loop Supply Chain Based on Evolutionary Game [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(7): 1487-1493.
- [24] 代应, 王旭, 邢乐斌. 基于全生命周期的汽车绿色回收体系研究[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2008, 29(11): 157-160.
- Dai Ying, Wang Xu, Xing Lebin. Research of Green Recycle System of Automobile Based on Life Cycle [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2008, 29(11): 157-160.
- [25] 代应, 王旭, 杨明. 报废汽车绿色回收系统模型研究[J]. 生态经济, 2008(2): 41-43.
- Dai Ying, Wang Xu, Yang Ming. Research on Reverse Logistics System Model Analysis and Its Application [J]. Ecological Economy, 2008(2): 41-43.
- [26] 周丹, 海热提, 夏训峰, 等. 汽车回收中实施生产者责任延伸制手段研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(9): 61-64.
- Zhou Dan, Hai Reti, Xia Xunfeng, et al. Implementary Measures of Extended Producer Responsibility in Recovery and Management of Used Automobile [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 30(9): 61-64.
- [27] 刘笑萍, 谢家平, 尹君. 用户主动返回废旧汽车回收的激励因素实证分析[J]. 当代经济管理, 2007, 29(3): 67-70.
- Liu Xiaoping, Xie Jiaping, Yin Jun. Incentive Factors of the Client's Voluntary Return of Discarded Cars [J]. Contemporary Economy & Management, 2007, 29(3): 67-70.

- [28] 周育红, 姜朝阳. 我国汽车报废回收利用体系框架初探[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(3): 94-96.
Zhou Yuhong, Jiang Chaoyang. Discussion on Junk Car Disposal and Recovery in China[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(3): 94-96.
- [29] 赵宜, 尹传忠, 蒲云. 回收物流设施多层选址模型及其算法[J]. 西南交通大学学报, 2006, 40(4): 530-534.
Zhao Yi, Yin Chuanzhong, Pu Yun. Facility Location Model for Multi-level Returned Logistics Its Algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 40(4): 530-534.
- [30] 毛玉如, 李兴. 电子废弃物现状与回收处理探讨[J]. 再生资源研究, 2004(2): 11-14.
Mao Yuru, Li Xing. Preliminary Exploring Current Condition and Recycling System of Electronic Waste[J]. Recycling Research, 2004(2): 11-14.
- [31] 周永圣, 汪寿阳. 政府监控下的退役产品回收模式[J]. 系统工程理论与实践, 2010(4): 615-621.
Zhou Yongsheng, Wang Shouyang. Calling Back EOL Products Under the Supervision of the Government[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010(4): 615-621.
- [32] 刘志峰, 林巨广. 电子电器产品的回收再利用及其关键技术研究[J]. 电机电器技术, 2003(1): 12-16.
Liu Zhifeng, Lin Juguang. Research on Recycling and Its key Technology of Waste and Used Electric and Electronic Products[J]. Electrical Appliances, 2003(1): 12-16.
- [33] 谢家平, 赵忠. 基于 GERT 随机网络的废弃回收预测模型研究[J]. 管理学报, 2010, 7(2): 294-300.
Xie Jiaping, Zhao Zhong. Forecasting Model for the Reusing Process of the Discarded Products Based on GERT Network Theory[J]. Chinese Journal of Management, 2010, 7(2): 294-300.
- [34] 李清, 谭旭, 徐大丰. 再生制造系统的问题、体系及方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(7): 1058-1063.
Li Qing, Tan Xu, Xu Dafeng. De-manufacturing Systems: Problem, Architecture, Methods [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2009, 49(7): 1058-1063.
- [35] 顾巧论, 陈秋双. 再制造/制造系统集成物流网络及信息网络研究[J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(7): 711-731.
Gu Qiaolun, Chen Qiushuang. Study on Manufacturing Cell Reconfiguration for Agile Manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004, 10(7): 711-731.
- [36] 曹华军, 杜彦斌, 张明智, 等. 机床再制造与综合提升内涵及技术框架[J]. 中国表面工程. 2010. 23(6): 75-79.
Cao Huajun, Du Yanbin, Zhang Mingzhi, et al. Connotation and Technology Framework of Machine Tool Remanufacturing and Comprehensive Upgrading[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(6): 75-79.
- [37] 张萌, 任杰, 周峰. 基于产品生命周期理论背景下的逆向物流研究[J]. 物流科技, 2013(12): 106-108.
Zhang Meng, Ren Jie, Zhou Feng. Research on Reverse Logistics Based on Product Life Cycle Theory[J]. Logistics Sci-tech, 2013(12): 106-108.
- [38] 魏洁, 李军. EPR 下的逆向物流回收模式选择研究[J]. 中国管理科学, 2005, 13(6): 18-22.
Wei Jie, Li Jun. The Choice of Different Take-back Models in Reverse Logistics with the Restriction of EPR[J]. Chinese Journal of Management Science, 2005, 13(6): 18-22.
- [39] 黄祖庆, 易荣华, 达庆利. 第三方负责回收的再制造闭环供应链决策结构的效率分析[J]. 中国管理科学, 2008, 16(3): 73-77.
Huang Zuqing, Yi Ronghua, Da Qingli. Proficiency Analysis Based on the Third Party Responsible for the Remanufacturing Closed-loop Supply Chain Decision Structure[J]. Chinese Journal of Management Science, 2008, 16(3): 73-77.
- [40] 李响, 李勇建, 蔡小强. 随机产率和随机需求下的再制造系统的回收定价决策[J]. 系统工程理论与实践, 2009(8): 19-27.
Li Xiang, Li Yongjian, Cai Xiaoqiang. Collection Pricing Decision in A Remanufacturing System Considering Random Yield and Random Demand [J]. System Engineering-Theory & Practice, 2009(8): 19-27.
- [41] 董景峰, 王刚, 吕民, 等. 产品回收多级逆向物流网络优化设计模型[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(1): 33-38.
Dong Jingfeng, Wang Gang, Lü Min, et al. Optimization Model of Multi-echelon Reverse Logistics Network Design for Production Return[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(1): 33-38.
- [42] 范体军, 楼高翔, 王晨岚, 等. 基于绿色再制造的废旧产品回收外包决策分析[J]. 管理科学学报, 2011, 14(8): 8-16.
Fan Tijun, Lou Gaoxiang, Wang Chenlan, et al. Analysis of Outsourcing Decision-making on Used Products Collection for Green Remanufacturing [J]. Journal of Management Science in China, 2011, 14(8): 8-16.

(下转第 3115 页)

[34] Nicolas L, Thierry B, Babak N M, et al. Real-time Detection of Interturn Faults in PM Drives Using Back-EMF Estimation and Residual Analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 37: 2402-2412.

[35] 蒋锐权, 吴祖育, 蔡建国. 数控机床神经元自适应位置控制算法[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(7): 1088-1092.
Jiang Ruiquan, Wu Zuyu, Cai Jianguo. Neuron Based Adaptive Control Algorithm for CNC Positioning Servo System[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35(7): 1088-1092.

[36] Irida T, Takata S, Ueda R, et al. A Novel Approach on a Parameter Self-tuning Method in an AC Servo System[J]. Automatica, 1986, 22(3): 287-294.

[37] Kuo L Y, Yen J Y. Servo Parameter Tuning for a 5-axis Machine Center Based upon GA Rules[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(11): 1535-1550.

[38] 陈鹏展. 交流伺服系统控制参数自整定策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.

[39] 李学伟. 数控机床高速加工轮廓误差成因、预测及轨迹补偿方法研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2013.

[40] 朱晓春. 切削过载的在线监控[J]. 制造技术与机床, 2002(6): 6-7.
Zhu Xiaochun. On-line Monitor and Control of Machining Overload[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2002(6): 6-7.

[41] 张根保, 彭露, 柳剑, 等. 基于清洁度熵的液压系统故障源排序方法[J]. 中国机械工程, 2014, 25(10): 1362-1368.
Zhang Genbao, Peng Lu, Liu Jian, et al. Hydraulic System Failure Source Sequencing Method Based on Cleanliness Entropy[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(10): 1362-1368.

[42] 李平, 黄泽森. 基于机床做功量的监控系统开发[J]. 机床与液压, 2013, 41(2): 113-117.
Li Ping, Huang Zesen. Development of Monitoring System Based on the Work Load of Machine Tool [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(2): 113-117.

[43] 陈宇. 面向可靠性的数控机床维修决策与评价[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 马军旭, 男, 1981年生。西安交通大学机械工程学院博士研究生。主要研究方向为数控机床精度保持性技术。
赵万华, 男, 1965年生。西安交通大学机械工程学院教授、博士研究生导师, 长江学者。
张根保, 男, 1953年生。重庆大学机械工程学院教授、博士研究生导师。

(上接第 3075 页)

[43] 李丽, 刘玉强, 王琪. 全国废旧电子电器回收处理对策研究[J]. 环境科学研究, 2009(1): 119-124.
Li Li, Liu Yuqiang, Wang Qi. National Plan for Recycling and Disposal of Waste Electrical and Electronic Equipment [J]. Research of Environmental Science, 2009(1): 119-124.

[44] 余福茂, 段显明, 梁慧娟. 居民电子废物回收行为影响因素的实证研究[J]. 中国环境科学, 2012, 31(12): 2083-2090.
Yu Fumao, Duan Xianming, Liang Huijuan. An Empirical Research on Recycling Behavior of Waste Electrical and Electronic Equipment and Its Influence Factor [J]. China Environmental Science, 2012, 31(12): 2083-2090.

[45] 谢家平, 陈荣秋. 产品回收处理策略优化的 0-1 型目标规划模型[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(3): 52-57.
Xie Jiaping, Chen Rongqiu. 0-1 Goal-programming Model on Products' Recovery Processing Policies [J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2004, 24(3): 52-57.

[46] 陆莹莹, 赵旭. 基于 TPB 理论的居民废旧家电及电子产品回收行为研究: 以上海为例[J]. 管理评论, 2009(8): 85-94.
Lu Yingying, Zhao Xu. Research on Recycling Behavior of Waste Household Appliances and Electronics Based on TPB: A Case of Shanghai [J]. Management Review, 2009(8): 85-94.

[47] 刘志峰, 林巨广. 废旧产品回收工艺流程评价决策支持系统研究与开发[J]. 中国机械工程, 2002, 13(20): 1773-1776.
Liu Zhifeng, Lin Juguang. Research and Development on Assessment and Decision-making Support System of Recycling Process of Waste and Used Products [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(20): 1773-1776.

[48] 中国经济信息网[EB/OL]. [2014. 04. 10]. <http://www.cei.gov.cn/Portals/104/Skins/127/sjk.htm>.

[49] 中国环境保护数据库[DB/OL]. [2014. 04. 10]. <http://hbk.cei.gov.cn/asp/default.aspx>.

[50] 中华人民共和国国家统计局. 2011 国际统计年鉴(地理、自然资源和环境)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011. (编辑 王艳丽)

作者简介: 邓乾旺, 男, 1972年生。湖南大学机械与运载工程学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为生产系统设计与优化、制造业信息化。出版专著 1 部, 发表论文 40 余篇。
李卫明, 男, 1990年生。湖南大学机械与运载工程学院硕士研究生。
李 珣, 男, 1973年生。湖南大学机械与运载工程学院博士研究生。
刘震辉, 女, 1989年生。湖南大学机械与运载工程学院硕士研究生。