

再制造系统的 Drum-Buffer-Rope 仿真建模

孙宝凤¹, 田小川¹, 肖伟², 马丽丽¹

(1. 吉林大学 交通学院, 长春 130022; 2. 鞍山高新技术产业开发管理委员会, 辽宁 鞍山 114044)

摘要:运用 DBR(Drum-Buffer-Rope)排程法和仿真工具 ARENA,对废旧家电产品再制造系统进行了工艺流程仿真研究,建立了 DBR 仿真模型,实现了对工艺过程的动态监测;并详细阐述了如何应用所建立的 DBR 模型识别和解除再制造系统存在的资源约束,从而提高再制造系统的资源利用率和收益。仿真实验表明:该模型能够识别和消除资源约束及其影响,通过给出库存缓冲量 BS_0 最优值,解除了约束工位排队延迟的现象,降低了供应的不确定性;同时也优化了系统的目标函数——资源利用率和净利润。

关键词:系统仿真;再制造系统;仿真建模 DBR 排程法;资源约束

中图分类号:TP391.9, TH16 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)04-0852-06

Simulation modeling with Drum-Buffer-Rope for remanufacturing system

SUN Bao-feng¹, TIAN Xiao-chuan¹, XIAO Wei², MA Li-li¹

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Management Committee, Anshan High-Tech Industry Development Zone, Anshan 114044, China)

Abstract: Drum-Buffer-Rope scheduling method (DBR) and simulation tool ARENA were used to simulate the production process in a case of end-of-life home appliance's remanufacturing system. The simulation model of DBR was established and the dynamic checking for the remanufacturing production process was implemented. It was explained in detail how to make use of the DBR model founded to identify and eliminate the resource constraints, and therefore improved the recourse utilization rate and benefits of remanufacturing system. Outcomes from experimental simulations show that the DBR model enables to come true identifying and eliminating recourse constraints and their influences. By offering the optimal value of Buffer Size of DBR model, the phenomenon of queue delaying in the unit of constraint is eliminated and the supply uncertainty of remanufacturing system goes lower, meanwhile the objective functions as Recourse Utilization rate and Net Profit are also optimized.

Key words: system simulation; remanufacturing system; simulation modeling; DBR scheduling method; resource constraints

DBR 排程法是一种稳健性良好的优化方法,将 DBR 排程法与仿真技术相结合,是目前生产运作与管理的研究热点之一。Schrageinheim^[1]将

DBR 技术应用于装配线生产环境中的车间控制;Cook^[2]对传统 JIT 系统和约束理论系统进行了深入的仿真比较研究。随着计算机仿真技术的发

收稿日期:2007-10-04.

基金项目:吉林省自然科学基金国际合作项目(20060705);吉林省资源节约型社会建设项目(200701).

作者简介:孙宝凤(1970-),女,副教授,博士.研究方向:物流系统仿真. E-mail:sunbf@jlu.edu.cn

展, DBR 的应用实践涉及到了工业流程的各类系统^[3-5]。

我国学者傅诒辉等人^[6]给出了并行工程环境下确定“瓶颈”约束的定量方法;陈雅敏等^[7]运用 DBR 方法合理设置了逆向物流回收线上的缓冲,以实现逆向物流供货的稳定性和灵活性;车建国、何桢^[8]借助 Petri 仿真建模方法对离散生产系统进行了性能分析和改进。上述研究均未针对再制造系统的特点进行仿真案例研究。

本文借助仿真工具 ARENA,应用 DBR 排程法对废旧家电产品再制造系统进行了工艺流程仿真建模,通过系统资源状况的监测以及资源约束的识别、解除,试图用一条新途径来解决再制造系统的资源利用率低和收益低的问题。

1 仿真问题描述

1.1 仿真案例简介

案例为废旧电视机再制造 P 公司。电视机主要部件为彩色显示、显像器件,包括玻屏、玻锥和附属产品三种部件。P 公司的再制造系统核心生产活动为三种部件的再制造和再生处置,即系统投入为废旧电视机,系统产出为再生玻锥、再生玻屏以及附属产品(包括荫罩、内锥、框架)。该系统分为 4 个区域:上料和拆解区、玻锥再制造处理区、玻屏再制造处理区和附属产品再制造处理区。其再制造工艺流程如图 1 所示。

1.2 仿真问题

运用 ARENA 仿真工具建立了再制造系统工艺流程的仿真模型以及 DBR 仿真模型,通过仿真实验,识别出系统中存在的资源约束,并通过所建立的 DBR 仿真控制模型来调控并最终解除资源约束。分析再制造系统的资源利用率与收益状况,寻求满足目标函数的、优化的可控输入变量,达到降低由于供应不确定性带来的生产运作风险的目标。所谓资源约束是指实际生产能力小于或者等于生产负荷的资源所产生的约束。在资源约束存在之处,会产生投料的排队等待或延迟,从而限制了整个系统的产出能力^[9]。

1.3 目标函数

本文确定的目标函数为再制造系统的资源利用率(RU)和净利润(NP)函数,表达式为

$$\begin{cases} \max(RU) = \max(t_b \times 100\%), (t_i > t_b > 0) \\ \max(NP) = \max(T - OE - I), (T > 0; OE > 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: t_b 为资源繁忙(或占用)时间; t_i 为资源额定工作时间; T 为系统有效产出,即系统在计算期内通过销售获得的收益; OE 为系统运行费用,即将投入转化为有效产出所付出的费用,如人工费用; I 为系统投入,指原材料费用和库存费用。其计算公式见式(2)至式(4)。

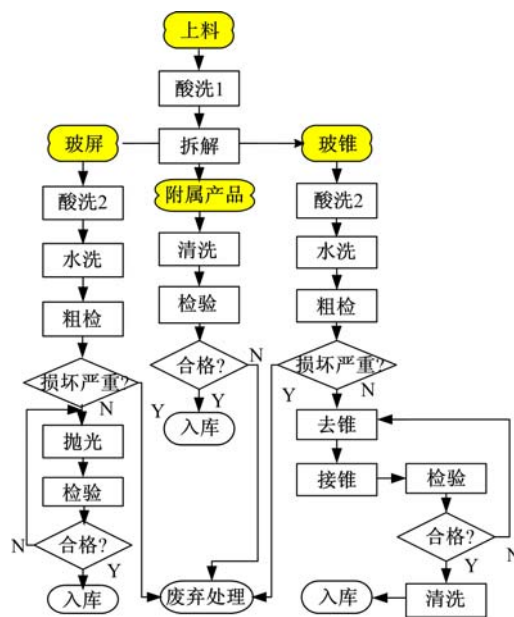


图 1 P 公司废旧电视机再制造工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart of company Ps remanufacturing system for end-of-life home appliance

$$T = \sum_{j=1}^n (P_j \times Q_j) - TVE, j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$I^* = \sum_{k=1}^r (Q_k \times P_k) + \sum_{i=1}^m C_i, k = 1, \dots, r \quad (3)$$

$$OE = \sum_{l=1}^u C_l, l = 1, \dots, u \quad (4)$$

式中: TVE 为总变动费用,元; Q_j 为产品种类 j 的销售量,件; P_j 为产品 j 的销售价格,元/件; Q_k 为原材料种类 k 的需求量,件; P_k 为原材料 k 的价格,元/件; C_i 为第 i 工序的在制品库存费用,元; C_l 为员工类型 l 的工资,元。

再制造过程中,可以根据工序的生产需求制定上游的投料计划以实现物流平衡的目标。由于每道工序的在制品量(WIP)、投料量(Rope)反映了该工序的生产需求;投料提前期(LT)反映了再制造系统的生产节奏;安全库存缓冲量(BS_c)可使约束资源不受非约束资源生产率波动的影响。所以,本文所确定的系统输入变量为 WIP, Rope, LT, BS_c 以及概率输入量 t_i 。

2 再制造系统的仿真与建模过程

2.1 实体和资源的定义

再制造系统实体包括原材料(Raw Material, 即废旧电视机)、玻锥在制品(CRT Cone in_ WIP)、玻屏在制品(Screen in_ WIP)、附属产品

在制品(Mask and CRT inner Cone in_ WIP)、再生玻锥成品(CRT Cone)、再生玻屏成品(Screen)和再生附属产品成品(Mask and CRT inner Cone);资源包括各工序所需的工人与设备。实体和资源的定义内容包括实体属性、数量、到达规律和相关成本等,如表 1 所示。

表 1 再制造系统的实体与资源定义

Table 1 Definition of entities and resources in remanufacturing system

工作区	进入系统实体		资源		离开系统实体变化
	类型	到达规律	类型	服务时间	类型
上料和拆解区	原材料	上料速率 50 件/h	酸洗池 拆解工序	60+5 * BETA(1,2)s 45+5 * BETA(1,2)s	玻锥在制品;玻屏在制品;附属产品在制品。
玻锥再制造处理区	玻锥在制品	仿真进程	酸洗池 水洗池 粗检工序 接锥工序 抽样和质检工序 最终水洗池	33 + 5 * BETA(1,2)s 20+5 * BETA(1,2)s 40+5 * BETA(1,2)s 切锥:40+5 * BETA(1,2)s 接锥:1+2 * BETA(4.89, 1.94)s 2 min 1 min	预处理后玻锥在制品。 97%可再制造玻锥;3%不可再制造玻锥。 待检玻锥成品。 25% * 97%抽样玻锥在制品 玻锥成品,[75% * 97%(未抽样玻锥在制品) +25% * 97%(抽样合格品)]
玻屏再制造处理区	玻屏在制品	仿真进程	酸洗池 水洗池 粗检工序 玻屏抛光工序 终检工序	33+5 * BETA(1,2)s 40+5 * BETA(1,2)s 30+5 * BETA(1,2)s 11+1 * BETA(1,2) min 120 + 5 * BETA(1,2)s	玻屏在制品 95.5%可再制造玻屏;4.5%不可再制造玻屏 待检玻屏成品 99%合格玻屏;1%不合格玻屏
附属产品再制造处理区	内锥在制品;荫罩在制品	仿真进程	粗检工序 清洗池 修复工序 烘干设备	1 min 60+5 * BETA(1,2)s 60+5 * BETA(1,2)s 50+5 * BETA(1,2)s	可再修复:95%内锥在制品,80%荫罩在制品;其余不可修复。 待修复内锥和荫罩在制品 95%合格内锥和荫罩成品;5%不合格 95%合格内锥和荫罩成品。

2.2 再制造系统的仿真与建模

由工艺流程图 1 构建了 Arena 顶层仿真模型,包括:上料和拆解子模型(sub-model 1),玻锥、玻屏、附属产品 3 个再制造子模型(sub-model 2-1,2-2,2-3)。图 2 sub-model 1 实现了原材料(实体 Raw Material)上料并通过浓酸洗后进行拆解的仿真过程。首先,使用 Arena 中的 Create (Putting Raw Material)模块使原材料进入系统,分别经过名称为浓酸洗(Cleanout with Acid)和拆解(Disassemble)的两个 Process 模块,占用相应的资源和系统时间,使得实体 Raw Material 原材料拆分为在制品玻锥、在制品玻屏和在制品附属产品 3 类实体,实体的类型发生了转变,这一过程

通过 3 个 Separate 模块和 4 个 Assign 模块得以实现;并且通过 4 个 Route 模块指定了相应的加工路径。由于上料和拆解在不同的工序完成,所以工序间的转移需要由 2 个 Station 实现,即投料(Station_P RW)和拆解(Station_Disassemble)两个工序。同时,运用 Record 模块来记录系统运行过程中实体数量的变化,以获得系统的各性能指标。

完成拆解的玻锥在制品实体进入到玻锥再制造处理区,执行玻锥再制造子模型(sub-model 2-1,图 3)。该模型的主要流程是通过 8 个工序上的相应作业来完成的,即 8 个 Station 模块定义了 8 个工序,8 个 Process 模块实现了 8 项作业。图 3

(5)返回至第 2 个 Hold 模块,逻辑实体将持续判断系统状态,直至系统运行结束。

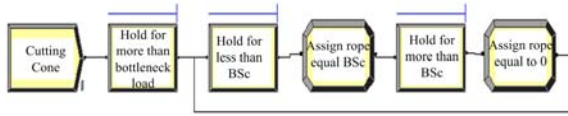


图 4 再制造生产调控逻辑模型

Fig. 4 Control logic model for production of remanufacturing

2.3.2 可控输入变量模型的建立

库存缓冲量 BS_c 和投料量 $Rope$ 的数学模型如式(5),(6)和(7)所示。式(5)给出了 BS_c 的计算公式;式(6)界定了 BS_c 的取值范围;式(7)给出了 $Rope$ 和 $Buffer(BS_c)$ 之间的关系。

$$BS_c = \left[\sum_{i=1}^{c-1} (t_i + T_{i,i+1}) + LT \right] / t_c \quad (5)$$

式中: $t_i \sim t_{\min} + (t_{\max} - t_{\min}) * \beta(\alpha, \beta)$; BS_c 为约束工序 P_c 设置的库存缓冲量,件; P_i 为第 i 工序; $i = 1, 2, \dots, m; 1 \leq c \leq m$; LT 为投料提前期,从缓冲器根据鼓的需求发出指令开始,到原材料投料到生产线为止的时间, min; t_i 为第 i 工序的加工时间, min; t_c 为 P_c 的加工时间, min; $T_{i,i+1}$ 为工序 P_i 至工序 P_{i+1} 的转运时间, min。

若将约束工序上游各工序最大加工时间与工序间转运时间之和记为 X_1 , 即 $X_1 = \sum_{i=1}^{c-1} (t_{\max} + T_{i,i+1})$; 将约束工序上游各工序最小加工时间与工序间转运时间之和记为 X_2 , 即 $X_2 = \sum_{i=1}^{c-1} (t_{\min} + T_{i,i+1})$, 则

$$\frac{X_2 + LT}{t_{c\max}} \leq BS_c \leq \frac{X_1 + LT}{t_{c\min}} \quad (6)$$

$$Rope = \begin{cases} BS_c, WIP \leq \frac{X_2 + LT}{t_{c\max}} \\ 0, WIP \geq \frac{X_1 + LT}{t_{c\min}} \end{cases} \quad (7)$$

3 仿真模型验证和确认

本文借助 ARENA 的输入分析器 Input Analyzer,对约束工序(接锥工序)进行了 K-S 检测,检测值 $D_n = 0.248$,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下,接锥工序加工时间 t_c 服从 $[1 + 2 * \beta(4.89, 1.94)]$ 概率分布。

再制造系统的主要特性是由于供应不确定带来的各工序生产的不确定性,为此,不确定性程度

大的工序在生产时将产生无料停工或排队等待的现象。仿真实验表明,约束工序为接锥工序,而实际系统中不确定性程度最高的工序也是接锥工序,仿真实验与实际情况是一致的。

4 仿真模型运行与结果分析

由仿真实验可知,接锥工序的排队最长(106个),则约束工序 P_c 为接锥工序。它的上游工序分别是:去锥、粗检、水洗、酸洗 2、拆解和酸洗 1。系统初始状态 $BS_c(0)$ 为没有设置库存缓冲量的状态。 $LT = 10$ min,各工序加工时间 t_{\min}, t_{\max} 和工序之间转运时间 $T_{i,i+1}$ 如表 2 所示。 P_c 的 $t_{c\min} = 1$ min, $t_{c\max} = 3$ min, 则 $X_1 = 383$ s, $X_2 = 353$ s, BS_c 取值范围为 $BS_c \in [6, 16]$ 。同样,设定仿真步长为 24 h,工人每天工作时间为 8 h,仿真次数为 30 次,则 BS_c 不同取值状态下的系统输出结果如表 3 所示。

表 2 P_c 上游工序 t_{\min}, t_{\max} 和 $T_{i,i+1}$ (s)

Table 2 t_{\min}, t_{\max} and $T_{i,i+1}$ in forward units of P_c (s)

工序 P_i	t_{\min}	t_{\max}	$T_{i,i+1}$
去锥	45	50	10
粗检	45	50	20
水洗	20	25	20
酸洗 2	33	38	5
拆解	45	50	30
酸洗 1	60	65	20

表 3 系统输出变量 T, I, OE, NP, RU

Table 3 T, I, OE, NP, RU of outputs in system

BS_c /个	OE/元	I/元	T/元	NP/元	RU
0(初始)	19913.53	20419.22	51581.87	31668.34	0.96
6	10380.00	15135.00	39119.00	28739.00	0.74
7	11917.34	17483.53	45107.66	33190.32	0.85
8	13334.70	19715.60	50624.20	37289.50	0.95
9	13886.93	20769.49	52333.14	38446.22	0.98
10	13855.41	20875.59	52248.17	38392.76	0.98
11	13964.71	21348.35	52441.05	38476.34	0.98
12	13998.05	21602.75	52490.95	38492.90	0.98
13	14055.92	22356.55	52472.07	38416.15	0.98
14	14057.45	22382.26	52548.95	38491.50	0.98
15	14134.81	22927.98	52593.46	38458.65	0.98
16	14152.55	23256.12	52512.53	38359.98	0.98

仿真结果分析:

(1) 当 $BS_c = 6$ 时,与不设置库存缓冲量的初始状态相比,各项输出指标都有所降低,运行费用 OE 和投入 I 降低有益于系统收益的提高,目标

函数净收益 NP 由 31 668.4 元降低至 28 739.0 元,资源利用率 RU 由 0.96 降低至 0.74,表明系统的收益和资源利用效率都处于不良状态,约束资源仍存在并影响着系统的产出能力。即建立 $BS_c=6$ 的库存缓冲并未实现解除约束的目的。

(2) 当 $6 < BS_c \leq 12$ 时,随着 BS_c 的增大,OE 和 I 增加, NP 和 RU 也增加,系统收益与资源利用状况比初始状态有所改善。例如, NP 由 33 190.32 元增加到 38 492.9 元, RU 由 0.85 增加到 0.98,该系统约束资源的利用率逐步提高;若 I 同时减小,此时的 BS_c 值进一步优化,约束解除效果就更好。当 $BS_c=9$ 时,为最优解,此时既满足 NP(38 446.22 元)和 RU(0.98)最大,同时又使得 I 较小,OE 较小,系统不仅最大限度利用了约束资源,并且也获得了最优的收益,资源约束解除效果最好。

(3) 当 $12 < BS_c \leq 16$ 时,随着 BS_c 的增大,OE 和 I 继续增加; NP 处于波动状态,时增时降,均值为 38 431.57,变化范围为 $[-0.186\%, 0.156\%]$ 。这表明,此时系统约束虽得以解除,但在相对较低的运行费用 OE 和较低的投入 I 时,系统没有实现获得较高收入 NP 的目的。

5 结束语

建立了 DBR 仿真模型通过可控输入变量 BS_c 值观察再制造系统的生产状态、系统资源利用率以及系统运行收益的变化,可以确定出既满足目标函数要求、又可解除资源约束的最优 BS_c 值,从而控制再制造系统良好运行。同时,库存缓冲量 BS_c 最优值还可以降低再制造系统的不确定性。仿真实例考虑了中国废旧家电再制造系统不确定因素较多的特点,并将 DBR 排程法与仿真工具相结合,丰富了 DBR 排程法的应用实践。

参考文献:

- [1] Schragenheim E, Cox J, Ronen B. Drum-buffer-rope shop floor control[J]. Journal of Production and Inventory Management, 1990, 31(3):18-23.
- [2] Cook D P. A simulation comparison of traditional JIT and TOC manufacturing systems in a flow shop with bottlenecks[J]. Journal of Production and Inventory Management, 1994, 35(1):73-78.
- [3] Schragenheim E, Cox J, Ronen B. Process flow industry-scheduling and control using theory of constraints[J]. International Journal of Production Research, 1994, 8:1867-1877.
- [4] Guide V D R Jr. Scheduling with priority dispatching rules and drum-buffer-rope in a recoverable manufacturing system[J]. International Journal of Production Economics, 1997, 53: 101-116.
- [5] Johnson Michael R. Evaluating remanufacturing and demanufacturing for extended producer responsibility & sustainable product management[D]. Ontario, Canada: Windsor University, 2002
- [6] 傅诒辉,戴建设,李大伟. 基于约束理论的一个管理决策 NLP 模型[J]. 系统工程学报, 1995, 10(2): 84-93.
- Fu Yi-hui, Dai Jian-she, Li Da-wei. A NLP model for management and decision making based on the theory of constraints [J]. Journal of Systems Engineering, 1995, 10(2): 84-93.
- [7] 陈雅敏,曹振宇. TOC 在逆向物流中的应用分析[J]. 物流科技, 2006, 29(6):83-85.
- Chen Ya-min, Cao Zhen-yu. Application of theory of constraints to reverse logistics [J]. Logistics Technology, 2006, 29(6):83-85.
- [8] 车建国,何桢. 基于 TOC 的离散生产系统改进[J]. 管理技术, 2005, 12:100-105.
- Che Jian-guo, He Zhen. Discrete production system improvement based on TOC[J]. Management Technology, 2005, 12:100-105.
- [9] Rogers Dale S, Tibben-Lembke Ronald S. Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practice [M]. Pittsburgh PA: Reverse Logistics Executive Council, 1999.
- [1] Schragenheim E, Cox J, Ronen B. Drum-buffer-