

再制造生产系统的库存缓冲与时间缓冲控制机制

陈俊¹, 马丽丽², 胡平¹, 侯继娜³

(1. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130022; 2. 佳木斯大学机械工程学院, 黑龙江佳木斯 154007; 3. 吉林大学交通学院, 长春 130022)

摘要:从分析 DBR 用于解决再制造系统不确定性问题所存在的局限性入手, 以发动机再制造生产系统为例, 在定性分析比较库存缓冲和时间缓冲控制内涵、计算模型和适用条件的基础上, 通过仿真实验对比分析了二者的实施效果。仿真实验表明: 从 DBR 的缓冲控制原理和目标角度, 二者具有高度的目标一致性, 即两种缓冲控制机制均可使瓶颈工序资源利用率 RU 和系统单位时间产出量 SP 提高, 瓶颈工序前平均在制品库存 BW 和总流程在制品库存 TW 减少; 在缓冲效果、系统管理目标实现以及生产计划的可控性三个方面, 后者性能均优于前者。

关键词:系统工程; 再制造; DBR; 库存缓冲; 时间缓冲

中图分类号: N945.15, TP278 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2009)Sup. 2-0332-05

Inventory-buffer and time-buffer control mechanism for remanufacturing system

CHEN Jun¹, MA LI-li², HU Ping¹, HOU Ji-na³

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China; 3. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: This paper proceeds with the existed limitations analyzing as while DBR was used to solve the uncertainties in remanufacturing system and takes the end-of-life engine remanufacturing system as an example. On the basis of qualitative analysis in the aspects as definition, calculation model and applicable conditions between inventory-buffer and time-buffer control mechanism, their implementation effects were compared and analyzed by simulation experiments. Simulating experiments show that two kinds of buffer control mechanism are of high goal consistency, i. e., they both enable Resource Utilization of bottleneck (RU) and System Productivity (SP) increased, average Work In Process (WIP) in front of bottleneck (BW) and WIP in total process (TW) decreased. From the perspective of DBR principles and its goals, the latter has better performance than the former in the following three aspects as buffer effect, objective realization for management of system and controllability of production planning.

Key words: system engineering; remanufacturing; drum-buffer-rope; inventory buffer; time buffer

收稿日期: 2009-03-02.

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

作者简介: 陈俊(1970-), 男, 博士研究生. 研究方向: 生产系统仿真. E-mail: loan@jlu.edu.cn

通信作者: 马丽丽(1980-), 女, 讲师. 研究方向: 工业工程. E-mail: mll-jtys@163.com

基于 DBR 的再制造生产系统缓冲控制机制是指将 DBR 方法应用于再制造生产系统(如发动机再制造)生产作业计划与控制时,瓶颈资源处设置缓冲器所采取的缓冲控制机制。目前常用的瓶颈识别方法有基于平均负荷的瓶颈识别方法, Ronen 等资源任务与能力平衡的识别方法^[2]。这些方法均基于统计数据或定额标准,属静态确定方法。没有考虑系统内部随机因素(如:再制造加工时间、机器故障等)会显著改变系统资源的可用和利用状态,从而导致瓶颈资源位置产生漂移,即在新的位置上形成新瓶颈或临时瓶颈^[1]。缓冲量的确定方法多为经验方法^[3-4]。这些方法未考虑再制造生产系统由于原材料(即报废发动机)供应的不确定性所带来的小批量生产规模问题,以及拆卸程度的不同所带来再制造生产中间产品的多样性问题,为此不能有效保证生产系统的有效产出,不受生产活动中莫非事件(Murphy's Law)的影响。

周峰(2000)曾将缓冲类型分为能力缓冲、库存缓冲(或物料缓冲)和时间缓冲三类^[5],最常运用的是库存缓冲和时间缓冲。但是根据生产实际需要如何选择缓冲的类型,缺乏比较分析和数值实验分析。所以如何根据再制造的生产实际来选择缓冲类型是再制造生产计划与控制的重要决策问题之一。

本文拟针对 DBR 方法应用于再制造生产系统不确定性问题所存在的局限性,对库存缓冲和时间缓冲机制进行比较研究,并结合具体案例和仿真实验,分析和比较二者的实施效果差异。

1 缓冲控制机制的比较

1.1 控制对象比较

库存缓冲的控制对象为物料、在制品的数量,主要参数是在制品库存,以保持一定的安全库存来维持瓶颈资源的利用率,进而应对再制造生产过程的不确定性,避免缺货情况的发生。但在实际中往往为了生产安全而设定较高的在制品库存,不可避免出现缓冲过度的弊端,在管理控制效果上,往往由于库存成本增加带来生产成本的上升。

时间缓冲的控制对象为时间,主要参数是提前期。其控制思想是采用比实际所需投入时间提前一个保护时间单位向瓶颈投入原材料或半成品,即设置投料提前期,使得在制品能够如期地通

过机器,保护瓶颈设备的有效产出。通常时间排程通过工序安排和生产节拍控制来实现生产的可控性和精益管理,因此,时间缓冲控制机制易于和生产工艺、节拍一体化,易于精益化管理和控制,亦有助于现场工程师有效执行。

1.2 计算模型比较

1.2.1 库存缓冲量 BS_c 模型

对于工序 i ,缓冲位置确定在瓶颈工序 C 之前。 BS_c 的计算模型见式(1), BS_c 取值范围见式(2),加工时间的概率分布关系见式(3)。

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

$$\text{则: } \left[\frac{X_2 + LT}{t_{c\max}} \right] \leq BS_c \leq \left[\frac{X_1 + LT}{t_{c\min}} \right] \quad (2)$$

$$t_i \sim t_{\min} + (t_{\max} - t_{\min}) * \beta(\alpha, \beta) \quad (3)$$

式中: 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 ; $T_{i,i+1}$ 为 i 至工序 $i+1$ 的转运时间, \min ;

$X_1 = \sum_{i=1}^{c-1} (t_{\max} + T_{i,i+1})$ 为约束工序 C 上游各工序最大加工时间与工序间转运时间之和; $X_2 = \sum_{i=1}^{c-1} (t_{\min} + T_{i,i+1})$ 为约束工序 C 上游各工序最小加工时间与工序间转运时间之和; t_i 为第 i 工序的加工时间,服从 β 分布; t_c 为约束工序 C 的加工时间。

1.2.2 时间缓冲量 BT 模型

考虑到再制造加工时间、机器故障率、机器故障维修率等随机因素的影响,本文引入了修正系数 α 对最小缓冲时间 BT_{\min} 进行了修正,如下式

$$BT = \alpha BT_{\min} = \alpha \max\{BT_1, \min BT_2\} \quad (4)$$

根据对生产过程缓冲区的时间变化进行监控和分析,以最终确定 α 值。本文的确定方法为数值实验,将 α 取值为 $[1, 3]$, 集合为 $\{1.0, 1.1, \dots, 2.9, 3.0\}$ 等差为 0.1 的 30 个实验数值, BT_{\min} 确定后,即可得到修正后的 BT 集合。

BT_{\min} 的计算过程如下:

假定瓶颈工序为 B ,瓶颈设备的上游有 n 个生产工序。生产计划时间长度为 L ,在计划期 L 内某一工序的故障发生率为 $F_i(t)$, $F_i(t) = 1 - e^{-f_i t}$ (f_i 为第 i 工序的机器故障率);系统的平均维修率为 $M(t) = 1 - e^{-mt}$ (其中 $m = \sum_{i=1}^n m_i$, m_i 为第 i 工序的机器维修率);各工序的单位生产能力分别为 P_1, P_2, \dots, P_n ;除瓶颈资源外的系统平均生

产能力为 $P = \min\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 。

生产系统的工艺流程要求使得瓶颈工序 B 任一前序工序发生故障都有可能对 B 产生影响, 设再制造系统的故障发生概率为 $F(t)$, 则有

$$F(t) = 1 - (1 - F_1(t)) \cdots (1 - F_n(t)) = 1 - e^{-\sum_{j=1}^n f_j t} \quad (5)$$

整个系统连续两次发生故障的平均时间间隔为 $Q(0 \leq Q \leq L)$; 系统发生故障后的平均维修时间为 $t(t \leq L)$; 系统发生故障恢复生产前, B 的闲置时间为 T ; 瓶颈上游工序与瓶颈工序 B 之间的在制品库存量为 I ; 系统每次发生故障时的平均贡献损失值为 $W(t)$; 单位时间的库存占用成本和产出贡献损失之和为 C 。其计算公式为

$$Q = \int_0^L tF(t) dt =$$

$$\frac{1}{\sum_{j=1}^n f_j} \left[1 - \left(1 + L \sum_{j=1}^n f_j \right) e^{-L \sum_{j=1}^n f_j} \right] \quad (6)$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

$$t = \int_0^L t dM(t) = \int_0^L t d(1 - e^{-mt}) = \frac{1}{m} (1 - e^{-mL}) - L e^{-mL} \quad (7)$$

$$T = \begin{cases} 0, tP_B < I \leq LP_B \\ t - I/P_B, I \leq tP_B \end{cases} \quad (8)$$

$$W(t) = l \int_{I/P_B}^L \left[t - \frac{I}{P_B} \right] m(t) dt \quad (9)$$

$$C = C_i I + \frac{W(t)}{Q} = C_i I + \frac{l}{Q} \int_{I/P_B}^L \left[t - \frac{I}{P_B} \right] m(t) dt \quad (10)$$

令 $\partial C / \partial I = 0$, 则

$$M\left[\frac{I}{P_B}\right] = M(L) - \frac{C_i Q}{l} P_B$$

即

$$e^{-m \frac{I}{P_B}} = e^{-mL} + \frac{C_i Q}{l} P_B$$

$$\frac{I}{P_B} = -\frac{1}{m} \ln \left[e^{-mL} + \frac{C_i Q}{l} P_B \right]$$

将 Q 代入, 即可得到第一次发生故障时的时间缓冲量

$$BT_1 = \frac{I}{P_B} =$$

$$-\frac{1}{m} \ln \left\{ e^{-mL} + \frac{C_i P_B \left[1 - \left(1 + L \sum_{j=1}^n f_j \right) e^{-L \sum_{j=1}^n f_j} \right]}{l \sum_{j=1}^n f_j} \right\} \quad (11)$$

若假设瓶颈上游工序与瓶颈工序 B 之间库存恢复到平均水平所需要的最短时间为 S , BT_2 为系统第二次发生故障时的时间缓冲大小, 则有 $SP = P_B(S + BT_2)$ 。

如果 $S < Q$, 即在下次发生故障之前库存水平还没有恢复, 则 B 将同样会受到影响。所以必须满足 $S \geq Q$, 即 $BT_2 \geq Q(P - P_B) / P_B$, 才能保证第二次故障发生和修复不会影响瓶颈生产。则第二次发生故障时的时间缓冲量 BT_2 的最小值为:

$$\min BT_2 = Q \frac{P - P_B}{P_B} = \frac{(P - P_B)}{P_B \sum_{j=1}^n f_j} \left[1 - \left(1 + L \sum_{j=1}^n f_j \right) e^{-L \sum_{j=1}^n f_j} \right] \quad (12)$$

比较式 (11) 和式 (12), 可得最小的时间缓冲量 BT_{\min} 。

1.3 适用条件比较

多数计划技术采用物料缓冲。该类缓冲机制实质上是库存控制策略和机制, 很多时候是一种掩盖问题的机制, 但对于传统的 Flow Shop 类型的生产问题具有良好的控制效果。

时间缓冲一般在“协同生产”条件下常常被优先采纳, 以保护生产系统的有效产出不受生产活动中莫非事件 (Murphy's Law) 的影响, 所以能够很好地解决 Job Shop 生产波动问题。而再制造生产系统的类型因再制造产品的差异, Flow Shop 和 Job Shop 两类型兼有, 因此不能简单地通过适用条件分析来决策选择哪种缓冲控制机制。

2 缓冲控制机制仿真实验设计

仿真目的: 在相同系统输入条件下, 分别对库存缓冲和时间缓冲控制机制进行仿真实验, 将 BS_C 转化为与 BT 相同量纲, 分析系统性能评价指标, 比较二者的缓冲效果的差异。

系统边界定义: 发动机再制造生产系统包括 3 个工作区: 上料和拆解区、缸体再加工区和缸盖再加工区, 分别完成原材料 (废旧发动机) 上料拆解、缸体再加工和缸盖再加工任务, 发动机再制造产品下线, 经检测, 离开系统。

加工路径划分: 一是强制操作路径, 即每件在制品必须进行的操作, 包括: 清洗, 检测。二是概率路径, 即将零部件恢复到可用状态所经过的路

径,是所有操作路径集合的一个随机子集。再制造路径发生的概率是零件使用寿命和当前状态的函数,本文采用统计概率表征路径不确定性。

概率性输入变量:工序流程参数(原材料到达时间及其分布,在制品加工时间及其分布);确定性输入变量:各工序资源配置参数、机器故障率和故障修复时间。

仿真时长:根据生产实际,发动机再制造企业稳态生产时,每天工作 8 小时,连续生产 30 天的日常工作日,不加班、换班,暂不考虑更换机器设备或者其他的调度策略。

系统性能评价指标确定为:单位时间产出量 SP、资源利用率 RU、瓶颈前平均在制品库存 BW、总流程在制品库存 TW。因为缓冲的目的是提高瓶颈资源的利用率,进而提高工厂整体的产出量。所以 SP 和 RU 是判断效果优劣的主要参数^[6]。

3 缓冲控制机制效果数值比较

3.1 仿真实例

以 Santana 发动机再制造企业——上海 FRD 公司为仿真实例,利用 Arena 仿真工具建立了再制造生产流程仿真系统。

对概率输入变量进行 K-S 假设检验,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下,库存缓冲和时间缓冲控制机制的检测值分别为 $D_n = 0.248, D_n = 0.031$,即两种机制的原材料到达时间分布、在制品加工时间分布均通过检验,表明该输入量概率分布规律是可信的,则认为仿真系统可以反映再制造生产流程的实际运行状况。

3.2 仿真输出结果

通过流程仿真,确定系统的瓶颈资源为镗槽工序。瓶颈资源前有 6 个生产环节分别为拆解、清洗、喷丸、检测、修复和镗孔,其加工时间如表 1 所示。其中清洗、喷丸、修复、镗孔 4 个环节经常发生故障,机器故障率分别为 0.31%、0.42%、0.8%、0.8%,系统的平均维修率为 $M(t) = 1 - e^{-0.00675t}$,瓶颈资源闲置时的平均产出贡献损失为 $l = 370$ 元, $C_i = 5$ 元,单位库存占用成本为 $C_i = 5$ 元。

(1) BS_c 的计算

据调研数据,生产提前期 $LT = 1.39$ h;再由表 1,根据式(1)至(3)计算可得 $X_1 = 2.3699$ h, $X_2 = 3.4175$ h;则 BS_c 的取值范围为 $[4, 9]$ 件,仿

真实验可得,最优库存缓冲量 $BS_c = 7$ 件。

表 1 瓶颈及其前面各个工序加工时间表

Table 1 Processing time table of bottleneck and its upper processes

瓶颈前 工序	平均加工 时间/h	最小加工 时间/h	最大加工 时间/h	工序间运转 时间/min
拆解	0.7380	0.6401	0.9071	0
清洗	0.4874	0.5842	0.8928	1
喷丸	0.2135	0.1406	0.3362	1
检测	0.2401	0.2021	0.3103	1
修复	0.5529	0.4395	0.7410	1
镗孔	0.3415	0.3037	0.4077	1
镗槽	0.7219	0.5842	0.8928	1

(2) BT 和 BT_{min} 的计算

首先通过流程仿真得到瓶颈资源之间的平均在制品库存量 $I = BW = 10.6933 \approx 11$ 个;瓶颈资源的单位时间生产能力 $P_B = 1/t_B = 1/0.7219 = 1.3852$ 件/h;除瓶颈以外的系统最小产出资源为缸盖修复工序,单位时间生产能力 $P = 1/t = 1/0.5529 = 1.8086$ 件/h,仿真时长 $L = 240$ h。

由式(11)、(12)可得 $BT_{min} = 100$ min。结合再制造发动机的生产实际,可得 α 取值和 BT 的集合,即 α 取值 $[0.1, 3.0]$,步长 0.1; $BT [100, 300]$,步长 10。

(3)最优库存缓冲量和时间缓冲量对应的系统性能指标如表 2 所示。

表 2 最优库存缓冲量和时间缓冲量对应的系统性能指标

Table 2 System performance index corresponding to the optimal inventory buffer size and time buffer size

最优值	系统性能指标			
	RU	SP(件/h)	BW(件)	TW(件)
$BS_c = 7$ 件	0.9807	$326/240 \approx 1.358$	6.0255	17.7145
$BT = 250$ min	0.9856	$328/240 \approx 1.367$	5.0213	15.8239

3.3 仿真结果分析

由表 2 比较分析结果如下:

(1)库存缓冲控制机制仿真实验表明,当 $BS_c = 7$ 时,RU 达到最大的 98.07%,SP 增加至 1.358,同时,BW 和 TW 分别为 6.0255 和 17.7145,此处,BW = 6.0255 是加入时间缓冲后得到的优化的瓶颈在制品库存量,低于相同资源利用率和单位时间产出量水平下的在制品数量,库存缓冲控制起到了最佳控制效果。同理可得 $\alpha = 2.5, BT = 250$ 为系统最优时间缓冲量,即此时的时间缓

冲控制迟到了最佳控制效果。

(2)时间缓冲控制机制的系统产出量 SP 和 RU 值均大于库存缓冲控制机制,表明前者在缓冲效果上优于后者。

(3)时间缓冲控制机制的 BW、TW 值均小于库存缓冲控制机制,表明前者的在制品库存水平和总流程的在制品库存水平均低于后者。由于在制品库存量是主要的生产管理控制目标,可见前者实现和保障管理目标的作用和效果优于后者。

(4)由于再制造生产单位时间生产能力 $P=1.8086$ 件/h,效率较低;由表 1,再制造核心工序的平均加工时间都较长,如拆解为 0.7380 h,修复为 0.5529 h,镗槽为 0.7219 h,这使得库存缓冲控制机制在较长的时间间隔内才进行调控,对于生产过程的精益管理作用不显著;而时间缓冲控制机制的控制效果在生产流程的各个环节均易于观测和控制,在生产过程的精益管理、易控性方面作用明显,优于库存缓冲控制机制。

4 结束语

本文初步给出了再制造生产计划与控制如何选择缓冲类型的建议,即可在掌握二者的缓冲控制原理一致性的基础上,分析比较二者在缓冲效果、系统管理目标实现以及生产计划的易控性三个方面的具体实施效果,再予以选择;并拟对不确定性影响因素对两种缓冲控制机制缓冲效果的敏感性分析展开进一步仿真实验研究。

参考文献:

- [1] 谢家平,赵忠,孔令丞,等. 再制造生产计划的影响因素及模式[J]. 系统工程,2007,25(7):53-59.
Xie Jia-ping, Zhao Zhong, Kong Ling-cheng, et al. An affecting factors and optimizing model for the re-manufacturing production planning[J]. System Engineering,2007,25(7):53-59.
- [2] Ronen Boaz, Stair Martin K. Synchronized manufacturing as in OPT: from practice to theory[J]. Computers Industrial Engineering, 1990, 18(4): 585-600.
- [3] Radovitsky Zinovy D. A quantitative approach to estimate the size of the time buffer in the theory of constraints[J]. International Journal of Production Economics, 1998,55:113-119.
- [4] Sun Bao-feng, Jia Hong-fei, Hou, Ji-na, et al. Identifying and eliminating constraints in reverse logistics system of end-of-life home appliance[C]// Proceedings of International Conference on Transportation Engineering, Chengdu, China, 2007.
- [5] 周峰. DBR 管理模式的生产计划与控制机制探讨[J]. 中国管理科学,2000,8(1):17-21.
Zhou Feng. Study on the production schedule and control mechanism in DBR[J]. Chinese Journal of Management Science,2000,8(1):17-21.
- [6] Tu Y M, Li R K. Constraint time determination model[J]. International Journal of Production Research, 1998,36(4):1091-1103