

# 一类制造与包装流程的仿真优化

李春友

(广西财经学院 会计学院, 广西 南宁 530003)

**摘要:** 生产-包装过程存在多个相互影响的因素, 决策过程中需综合考虑以达到最优配置。通过对资源、对象、进程和它们的属性与行为进行计算机仿真, 建立了生产-包装过程计算机仿真模型。为获得最优的设备组合和生产排程, 可通过成本或利用率等指标优化求解; 重复运行模型可找到收敛的最优方案。

**关键词:** 管理工程; 制造与包装; 仿真模型; 优化

**中图分类号:** TP29

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2013)01-0010-05

## Simulation and Optimization of One Kind of Manufacturing & Packaging Processes

Li Chunyou

(Accounting College, Guangxi University of Finance and Economics, Nanning 530003, China)

**Abstract:** There exist many factors influencing one another in production-packaging processes. Resources, objects, processes and their properties and behaviors can be simulated to construct a computer simulation model covering the whole production-packaging process. Usually, the minimized cost, maximized profit or reasonable utilization are targeted as the decision objective, and concerned parameters are configured as conditions in the simulation model. With sufficient repeated running, the optimization module can seek out the best equipment combination and the best production schedule.

**Key words:** management engineering; manufacturing & packaging; simulation model; optimization

### 1 问题的描述

食品、烟草等行业的终端生产环节是产成品的包装, 其基本的工艺过程是由一条或多条生产线生产产品, 然后分批运输或传递到产品包装设备, 并在此进行初次包装, 再把经初次包装而成的较小容量的成品通过一台或多台包装设备连续或分批填充到更大的容器中, 包装成最终的成品。图1是此类生产和包装的工艺示意图, 该工艺流程由2条制造线生产同类产品, 然后通过缓冲容器(缓冲槽)将其提供给3条并列的包装线, 最后包装为产成品。

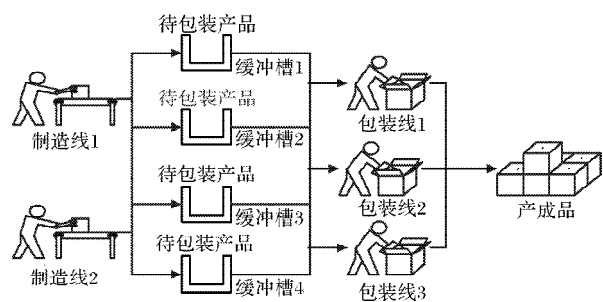


图1 生产与包装工艺示意图

Fig. 1 The schema of production & packaging process

在此类制造与包装流程问题中, 设计并制造一个新流程或管理一个现有流程时, 往往会面临如何减少

收稿日期: 2012-05-08

作者简介: 李春友(1965-), 男, 湖南耒阳人, 广西财经学院教授, 主要从事会计与管理信息化及物流与供应链管理研究,

E-mail: lcy0731@qq.com

流程失败, 缩短处理周期, 确定合理的缓冲容量和库存, 应对生产规模的变化及更多和更高能力生产线、包装线和容器的添加等问题。为了简化分析这些问题, 可针对单一进程和单一因素进行分析与决策。但整个工艺流程相对较复杂, 进程间的关系具不确定性, 并存在相互影响的多种因素, 且这些因素动态地相互作用。提出一个建议或施加一项措施时, 很难预测变动带来的实际效果及各项措施的优先顺序。如为了保持可靠性和进程间与库存的平衡操作, 设计师可选择增加进程间库存来弥补低设备可靠性的影响; 相反, 可通过提高上游设备的可靠性以减少进程间的存储。即使生产、包装或缓冲进程间的关系基本确定, 仍面临众多因素相互作用的现实, 很难评估那些相互孤立的因素对生产调度的影响程度, 如对操作顺序和节奏的控制、产品数量和结构、产品特性等。另外, 由于制造和包装可能安排在相互分离的位置, 而调度方法和企业文化的不同会对生产进程要求匹配不同的节奏, 也会增加解决此类问题的复杂性。

在多线程因素制造-包装操作的排程问题中, 有多种数理决策方法<sup>[1-2]</sup>和现场应用工具<sup>[3-5]</sup>。数理决策方法经过较严格的抽象化处理, 而具体排程工具主要用于作业管理。本文提出一种仿真方法, 模拟现实生产包装中的进程及相互作用的各种因素, 以对特定问题进行分析和评价, 预测设计或改进决策效果。通过开发制造-包装仿真模型, 为多线程因素控制提供一测试设计思路, 所得仿真模型可用于检验和优化制造-包装操作。

## 2 总体仿真建模

通过仿真建模可模拟需处理的问题, 本文的建

模基于某工厂需建立一个新的制造和包装系统。系统建模需解决如下问题: 新的设备能否处理新的生产组合和时间表, 使新设备运行最佳的调度模型, 缓冲槽数量及合理规格, 制造-包装可靠性改善的效果评价, 影响生产周期的因素, 包装或生产线数量的确定。设计2条生产线, 每条生产线能生产多种基本规格的产品; 设计3条包装线, 用于包装制造的产品, 即把产品封装在各种容器中, 并使用不同标签。生产线和包装线间有多个并列的缓冲槽, 可接受2条生产线的任一线产品, 供于任一包装线。

本模型选择在 ExtendSim 中实施仿真, 该仿真平台包含模拟器和各种模型工具套件, 用以模拟离散事件、连续过程和基于速率的离散过程。图2是系统建模的总体仿真图。

图2显示出系统模型有2条生产线、4个缓冲槽和3条包装线。模型的组成包含在一个层次模块中, 可双击该模块图像区域连续打开层次模块。模型的时间表、设备性能、故障特征、转换次数及其他数据都包含在模型内置的数据库表中, 并能通过一个逻辑调度结构访问。模型在逻辑调度器的控制下, 通过运行制造和包装设备来加工和包装产品。逻辑调度器通过一个列示产品及其数量的顺序列表进行模拟控制, 设定设备的利用率并指令设备在必要时进行转换。模型提交运行情况报告(如生产和运转利用情况报告)等同于实际经营报告, 实验者可查看这些报告, 并指出存在的问题。所设计的模拟器可用于帮助该工厂的项目小组确定新的制造线、包装线和缓冲容器安装数量与配置。开发的几个测试排程代表典型和极端情况下的生产要求。这些模型均基于现有工厂模式和推荐的一系列包装线设计方案, 并对供应商要求的敏感性进行了测试。

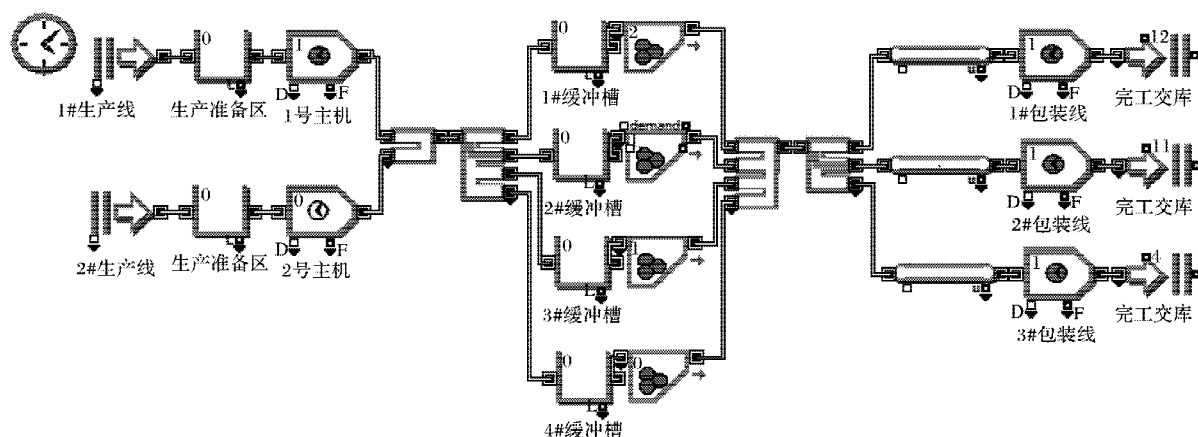


图2 制造/包装仿真模型

Fig. 2 Simulation model of manufacture & packaging

### 3 对象及其属性、进程和行为仿真

#### 3.1 对象产生与转换

仿真模型运行时,模拟时钟不断记录下随仿真步骤递增的运行时间。生产和包装步骤是由事件引起的。本模型中,仿真时投产物料由 Create 模块产生,物料产生速率即投产速率,由 2 个物料产生的时间间隔决定,该间隔可通过指定随机分布的种类及参数表示。如本例的 2 条生产线投产时间间隔均呈指数分布,其分布中值分别为 0.2, 0.4。不同的参数设置刻画了 2 条生产线不同的投产特点。

产品加工和包装过程完成后,其计量单位可能发生变化。如 5 件较小件产品经包装后,形成一件较大包装产品。该过程用 Batch 合并模块仿真,它允许多个来源物件合并成一个物件,这在协调多个资源,并将不同零件组装(融合)时非常有用。模块对话框中,可设定构成一个输出物件所需的各输入物件数量,也可指定若某输入物件未到达或数量未满足时,其他输入端口物件无须提早进入本模块。

#### 3.2 加工和包装过程

加工或包装过程可用带处理时间参数的模块仿真,如加工过程由一个“加工主机”活动模块和一个“生产准备区”排队模块组成(见图 3),模拟产品进入生产线,并经过一定时间加工后退出生产线。

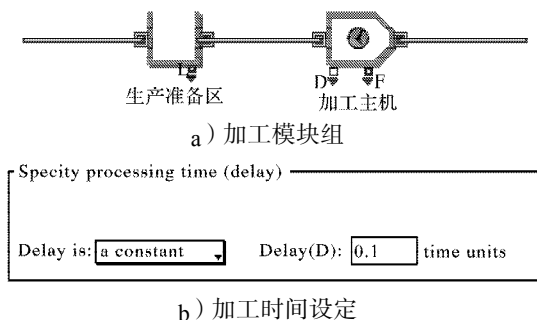


图 3 加工模型

Fig. 3 Production process model

ExtendSim 中的基本活动模块为 Activity, 参数为活动过程处理时间 Delay。此外,还可定义同时处理多个物件。模块对话框中,可设 Delay 为一个定值,或从该模块 D 端口(Demand)输入,或为另一模块属性值,也可从查询表格中获得。这些方式可更丰富、细微地对处理过程进行建模。本例最初模拟中,设 2 台生产主机的加工时间为一常数,后续根据机器情况建立更详细的时间分布表。为了协调产品输入与加工或包装过程,需在输入与处理活动间设立一前后过程缓冲排队,本例通过 Queue 排队模块实现,该模块对物件进行暂存和排队,并按设定规则释放物件。在模块对话框中可选择资源池队列、按属性

值、先入先出、后入先出、优先级等排队规则。资源池排队方式需从资源池模块中获得资源,模拟物件处理过程中受到的资源约束情况;按属性值排队方式是基于某个选择的属性对物件进行排序;先入先出排队方式模拟普通的排队方式;后入先出排队方式是一种逆向排队,也称堆栈,即最晚入栈的物件将会第一个离开;优先级队列方式利用 Priority 属性来决定产品释放次序。

#### 3.3 库存或缓冲槽

加工和包装两个先后发生的环节存在空间距离和速率差异,实际工作中常采用设立厂内库存或生产库存的方式协调其间的矛盾。库存的具体物理形式可是一个通用仓库、一些货位或存在于加工和包装线间的缓冲槽,本例采用缓冲槽方式。1 个缓冲槽同时只存放 1 种产品,但可接收来自不同生产线的同种产品,也可释放给任意一条包装线进行包装。

本例采用 Queue 实现缓冲槽仿真。因存在多个缓冲槽和多条包装线,产品加工完成后需选择进入的缓冲槽和空闲的包装线。产品路由选择通过 Select Item In 模块和 Select Item Out 模块的组合使用实现(见图 4)。Select Item In 模块从多个输入分支中选择输出物件,从输出端口离开;Select Item Out 模块则为输入的物件选择一出口分支离开。对话框中的选择依据包括基于优先级、随机选择、顺序选择或基于 Select 端口。本例中先在生产线和缓冲槽间建立一个有 2 个输入分支的 Select Item In 模块,随机输出到有 4 个输出分支的 Select Item Out 模块,实现产品从生产到缓冲槽的路由。在缓冲槽和包装线间,建立一个有 4 个输入分支的 Select Item In 模块,随机输出到有 3 个输出分支的 Select Item Out 模块,实现待包装产品从缓冲槽到包装线的路由。

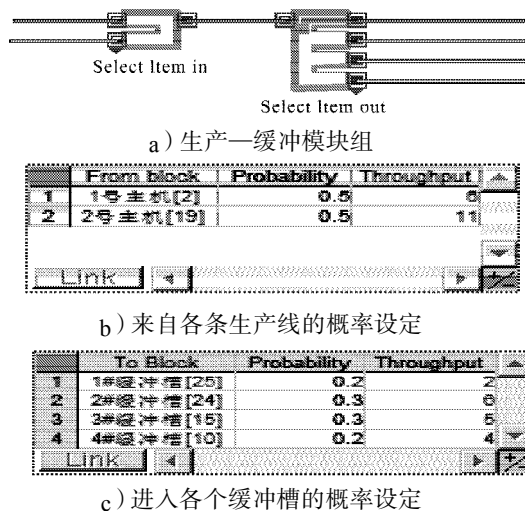


图 4 生产线——缓冲槽路由模型

Fig. 4 Routing of production lines to buffers

### 3.4 时间表问题

仿真模型按时间驱动各种操作和交互行为。模型能够对任何业务配置方案使用任何预定顺序进行测试,用来评价一个具体排程在现实中的经营潜力,也可以在评价仿真结果中,根据每种排程政策绩效的好坏,比较两个排程政策的优劣。通过采用不同的时间表进行实验,可以揭示出哪种排程最好,以及哪种排程生成规则最好。对于每个排程,模型将展示真实环境下的运行结果,如产量、利用率和停机时间等。

一个使用时间表的仿真模型,应能引入一个由内嵌的数据表或数据库创建的操作序列,也可采用外部电子表或数据库来操纵时间表。有些仿真模型有一个用于设定排程方法的内置模块,能迅速、灵活地生成典型的试验用时间表,该时间表既可基于需求条件,又可基于实际需求。这样的调度模块,可计算出一些确定性评价措施,也可把执行的时间表交给仿真模型,通过捕获现实的动态情况产生完整的运行结果。既可以生成任何确定的时间表用于整个仿真范围,也可在整个运行过程中根据事先设定的时间或条件,按照模型命令产生内部时间表。模型可显示需求满足程度,以及整个模拟时间范围内所有产品的状态。

## 4 用仿真模型评价和优化生产与包装管理

### 4.1 评价指标

根据面临问题的不同,有的仿真模型只涉及一些加工或包装操作的一个片段,而另一些则包括多个环节。应用中应根据面临的问题确定相应的仿真模型评价指标,如设备利用率、队列长短、加工成本及整个经营系统的利润等。

1) 关键资源利用率和队列长度。利用率是设备工作时间占全部运行时间的比率,由公式(1)计算。队列长度表示等待服务的顾客或等待加工商品的数量。当其他因素确定,而需对某一台(套)设备进行评价时,通常要用设备利用率或队列长度来衡量生产或服务能力是否需进行调整。过低的利用率说明该资源存在严重的闲置现象,但利用率过高说明设备能力紧张,一旦出现故障,必然引起生产停顿,延长生产周期,导致生产调度失败。

$$\eta_{\text{Uit}} = \sum_{i=1}^n t_i / T, \quad (1)$$

式(1)中: $\eta_{\text{Uit}}$ 为设备利用率; $t_i$ 为每件产品的处理

时间; $i$ 为产品序号; $T$ 为设备运行时间。

2) 成本与利润。每一个“活动”模块可设置成本和价格属性,以模拟生产和包装过程的成本与收入。整个模型各项“活动”的成本和收入变量可能呈现复杂的变化规律,综合决定最终财务成果即利润。根据成本习性,可设定为固定成本和时间成本两种。固定成本是每处理一件产品要发生的成本,这个值为常数,和物件的延迟时间无关。时间成本与处理时间有关,等于单位时间成本与运行时间的乘积。模块会将其所累积的成本自动计算并显示出来。在下文案例中,假定收入确定,从而以成本作为目标函数,其计算式见式(2);如价格和经营规模均为可变因素,则应以利润作为决策目标。

$$C_t = \sum_{i=1}^n t_i \cdot C_{\text{pu}} + q_i C_p, \quad (2)$$

式(2)中: $C_t$ 为总处理成本; $C_{\text{pu}}$ 为单位时间加工成本; $C_p$ 为每加工一件产品的固定成本; $q_i$ 为加工或包装完成的物件数量。

### 4.2 优化方法

仿真优化或称目标寻找,即自动查找问题最优答案或最优参数值。在模型给定参数范围内,通过多次运行模型搜索解空间,直至找到既满足条件又达到目标的最佳参数值。该问题通常被表述为一个目标函数或者成本利润方程,在含有 Optimizer 模块的 ExtendSim 仿真模型中进行成本最小化或者利润最大化求解,以帮助研究者脱离反复尝试不同参数值运行的冗长枯燥运算过程。

可在优化求解模型中设置求解条件,如通过限制决策的取值范围或定义约束方程来设定参数的取值空间、取值方法和约束条件。在优化求解的运行过程中,还可通过设置运行参数影响求解精度,如根据样本类型和精度要求决定运行的案例样本数、每个案例的搜寻次数、何时检查收敛情况及检查收敛情况的最优成员案例数。优化器无防错功能,可能收敛于次优解而不是最优解,特别是当其运行时间不够久的时候。所以应采用足够多个运行结果,并在实际采用最优解之前运行几次案例,以确保获得相同或接近最优解的收敛情况。

### 4.3 实验案例

根据前述制造-包装仿真模型,假定物件的总需求量固定,决策目标为总成本最低,决策变量为物件在每一个加工或包装模块的时间和数量,并根据经验确定其取值范围,变量设定及赋值见表1。单位成本资料经所建模型测算,所得结果见表2。

表 1 决策变量及其所对应的模块变量

Table 1 Decision variables and their module variables

变量	所属模块	模块变量	经济含义	最小值	最大值
$q_1$	1 号主机	totalItemsExited_prm	加工完成量	0	1
$q_2$	2 号主机	totalItemsExited_prm	加工完成量	0	1
$q_3$	1# 包装线	totalItemsExited_prm	包装完成量	100	1 000
$q_4$	2# 包装线	totalItemsExited_prm	包装完成量	100	1 000
$q_5$	3# 包装线	totalItemsExited_prm	包装完成量	150	1 000
$t_1$	1 号主机	waitDelta_prm	加工时间	150	1 000
$t_2$	2 号主机	waitDelta_prm	加工时间	100	1 000
$t_3$	1# 包装线	waitDelta_prm	包装时间	0	2
$t_4$	2# 包装线	waitDelta_prm	包装时间	0	2
$t_5$	3# 包装线	waitDelta_prm	包装时间	0	2

表 2 加工和包装单元的单位成本

Table 2 Cost per time unit and cost per item for making and package module

模块 (资源)	$C_{pu}$	$C_p$	模块 (资源)	$C_{pu}$	$C_p$
1# 包装线	1.2	4.0	1 号主机	2.0	1.0
2# 包装线	1.5	3.6	2 号主机	2.2	0.9
3# 包装线	1.3	3.9			

根据前述成本习性与公式, 可得目标函数的具体表达式为:

$$C_t = (t_1 \times 2.0 + q_1 \times 1.0) + (t_2 \times 2.2 + q_2 \times 0.9) + (t_3 \times 1.2 + q_3 \times 4.0) + (t_4 \times 1.5 + q_4 \times 3.6) + (t_5 \times 1.3 + q_5 \times 3.9) \quad (3)$$

在 Optimizer 模块对话框中输入上述变量和设置目标函数。为满足求解精度, 设置运行参数如下: 案例的最大样本数为 5 个, 成员规模为 10, 在运行 50 个案例后检查收敛情况, 运行超过 1 000 个案例或收敛率超过 95% 即终止求解运算。经某次优化运行, 所得结果如表 3 和图 5 所示。

表 3 最后 5 个仿真案例收敛情况

Table 3 The convergence of last 5 cases

案例	变 量										MinCost
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	
best	1	1	2	2	-	-	150	100	-	-	578
1	1	1	2	2	-	-	150	100	-	-	579
2	1	1	2	2	-	-	150	100	-	-	579
3	1	1	2	2	-	-	150	100	-	-	583
4	1	0	2	2	-	-	150	100	-	-	603

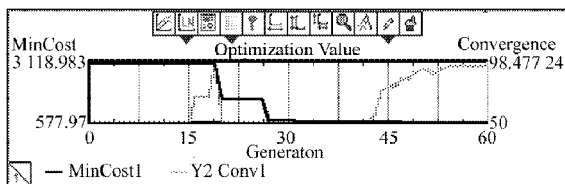


图 5 全部案例最小成本及收敛示意图

Fig. 5 The convergence for minimized cost of all cases

由表 3 和图 5 可看出, 系统最佳案例的成本为

578, 相关变量的取值结果表明, 应优先使用第二台生产主机和第一条包装线。最后 5 ~ 10 个案例显示出较高的收敛程度, 优化过程收敛率达 95.019 7%, 优化测试的结果具有较高的稳定性。

## 5 结语

仿真是研究制造与包装运作问题的良好工具。正是由于多重因素通过多种方式相互作用, 仿真模型可以提供更为真实的媒介来改进决策效果。一个仿真模型就是一个小型试验工厂, 基于利润或成本目标寻找最佳的经营环境或过程配置, 以测试新的设计思想或评价推荐项目。本文讨论的仿真模型在 ExtendSim 环境下进行设计和测试, 实验案例证明可得到可信的决策方案, 以解决工厂生产与包装的组织与内部物流安排的优化问题。

## 参考文献:

- [1] 王岩峰, 詹姆斯·帕金斯. 在新产品开发项目中的最佳资源分配: 一种控制理论方法[J]. IEEE 自动控制会刊, 2002, 47(8): 1-10.  
Wang Yanfeng, James R Perkins. Optimal Resource Allocation in New Product Development Projects: A Control-Theoretic Approach[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 2002, 47(8): 1-10.
- [2] 米切尔·平多. 排程: 理论、算法与系统[M]. 2 版. 伦敦: 普伦蒂斯霍尔出版社, 2002: 215-218.  
Michael Pinedo. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems[M]. 2nd ed. Landon: Prentice Hall, 2002: 215-218.
- [3] 米切尔·平多, 朝秀丽. 运作排程及其在制造与服务中的应用[M]. 纽约: 麦格劳希尔出版社, 1999: 263-268.  
Michael Pinedo, Chao Xiuli. Operations Scheduling with Applications in Manufacturing and Services[M]. Neyork: McGraw Hill, 1999: 263-268.
- [4] 哈勒尔. 使用离散事件仿真对饮料加工建模[C]// IEEE XPlore 会议论文集. 新泽西皮斯卡塔韦市: [出版者不详], 1993: 845-850.  
Harrell C R. Modeling Beverage Processing Using Discrete Event Simulation[C]// Proceedings of the IEEE XPlore Simulation Conference. Piscataway, NJ: [s. n.], 1993: 845-850.
- [5] 宁 凝, 钱省三, 孟志雷. 带有工艺约束的并行多机调度策略[J]. 工业工程, 2008(3): 62-65.  
Ning Ning, Qian Xingsan, Meng Zhilei. Parallel Machines' Dispatching Problems with Process Constraints[J]. Industrial Engineering Journal, 2008(3): 62-65.

(责任编辑: 廖友媛)

