

# 供应链中控制多级存储的射频辨识 Push/Pull混合策略设计与仿真

李国家<sup>†</sup>, 汪定伟

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 由于射频辨识(radio frequency identification, RFID)激励的电子看板系统能够从远端看见供应链节点企业库存的状况, 使得广域分布的供应链多级存储能够实现RFID激励的Pull控制. 本文根据供应链分销网络多级存储的结构特点, 以及系统运作期间各阶段节点企业的功能, 在不同阶段采用不同的控制策略. 因此, 设计了多种不同的RFID激励的Push/Pull混合控制策略. 为了比较和验证各混合策略对多级存储的控制性能, 建立了以总库存成本、总缺货损失、总运行成本和库存周转率作为评价策略性能的指标体系. 由于供应链系统的动态性与随机性, 难以进行数学建模和精确求解, 因此基于离散事件系统仿真原理, 设计并实现了仿真模型. 通过对各策略下多种结构的供应链分销网络多级存储的仿真, 验证并分析了制造商阶段采用Push控制, 分销商和零售商阶段采用Pull控制的策略的有效性和最优性.

**关键词:** 射频辨识; 供应链; 多级存储; Push/Pull; 仿真

**中图分类号:** TP319.9      **文献标识码:** A

## Design and simulation of radio frequency identification-enabled hybrid Push/Pull strategy for multi-echelon inventory of supply chain

LI Guo-jia<sup>†</sup>, WANG Ding-wei

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China)

**Abstract:** Radio frequency identification (RFID)-enabled electronic visual system can view, from the remote terminal, the real-time inventory status of all enterprises in the supply chain. This technology facilitates the control for the wide-area distributed multi-echelon inventory of supply chain by using RFID-enabled Pull strategy. Push and RFID-enabled Pull strategies are adopted in different stages. Thus, a number of different RFID-enabled hybrid Push/Pull control strategies are designed according to the structural character and the function of the enterprises in each stage. To compare and test the performance of these hybrid strategies, we build an evaluation-indication system which includes the total inventory cost, the total shortage loss, the total operating cost and the inventory turnover rate. Because of the dynamic and stochastic nature of the supply chain system, it is difficult to build the mathematical model and solve it precisely, so the simulation model based on the principle of discrete event system simulation is designed and built. Many different structural multi-echelon inventory systems of supply chain distribution network controlled by thus designed hybrid strategies are simulated. Simulation results show it is desirable or even optimal when the manufactures are controlled by Push strategy, and the distributors and retailers are controlled by RFID-enabled Pull strategy.

**Key words:** radio frequency identification (RFID); supply chain; multi-echelon inventory; Push/Pull; simulation

### 1 引言(Introduction)

多阶段生产存储系统的Push/Pull混合控制策略是制造系统中成功应用的库存控制方式<sup>[1-3]</sup>. 所谓的Push策略是用物料的投入来“推”动系统运行, 而Pull策略则是用产品或零件的取出来“拉”动系统运行. 在采用Pull策略的看板系统中, 工人必须“看到”空的看板才能触发加工作业. 远处存储看板的不可见使得看板系统难以运用到广域分布的供应链存

储控制中. 2000年后, 有人开始将Pull控制模式从单工厂推广到供应链多级库存中<sup>[4-6]</sup>. 但是, 由于供应链中不能在多个企业间采用“看板”系统, 所谓的“Pull”其实只是“订单拉动”或者“合同拉动”, 并不能真正发挥“看板系统”降低库存, 提高服务水平的作用.

物联网和射频识别技术(radio frequency identification, RFID)的产生, 为供应链存储控制提供了新的方法. RFID和物联网技术以其能够对库存产品和运

输的途中量进行精确计量和定位, 为实现供应链库存的可视化提供了技术途径, 文献[7-9]将其称为RFID使能的供应链可视化. 借助RFID技术开发“RFID使能的电子看板”<sup>[3]</sup>能够实现广域分布的供应链库存远程实时可视. 本文基于“RFID使能的电子看板”提出供应链分销网络多级存储的RFID使能的Pull控制策略, 并根据供应链分销网络多级存储的结构特点及系统运作时各阶段节点企业的功能, 将RFID使能的Pull策略与Push策略结合, 在不同阶段采用不同策略, 设计了多种供应链分销网络多级存储的RFID使能的Push/Pull混合控制策略.

为比较和验证各混合控制策略对供应链多级存储控制的性能, 从降低系统库存成本, 提高服务水平, 建立了以总库存成本、总缺货损失、总运行成本和库存周转率作为评价控制策略性能的指标体系, 然而由于顾客到达的随机性, 运输车辆行驶时间的随机性, 市场价格变化的波动性, 存储系统中各种异常事件的突发性, 使得供应链系统具有动态性和随机性, 难以对各策略下的系统进行数学建模和精确求解. 为此, 本文在假设顾客到达数量服从泊松分布, 购买行为随机等的基础上, 基于离散事件系统仿真原理, 设计并实现了系统的仿真模型, 通过分别对各策略下多种结构的供应链分销网络多级存储的仿真, 验证并分析了制造商阶段的存储采用Push控制, 分销商和零售商阶段的存储采用Pull控制策略的有效性和最优性.

## 2 供应链分销网络多级存储的RFID使能的Push/Pull混合控制策略设计及性能评价指标建立(RFID-enable hybrid Push/Pull control strategies design and performance evaluation indicators establishing)

### 2.1 RFID使能的Push/Pull混合控制策略设计(RFID-enable hybrid Push/Pull control strategies design)

供应链分销网络多级存储的控制是指根据供应链的结构特点及供应链运作时各阶段节点企业的功能及存储状况来下达各节点企业的订发货或生产指令, 通过对各节点企业库存的调整使系统达到理想的状态, 不同的控制策略具有不同的控制机理, 或不同的控制算法.

供应链多级存储的Push控制方式根据一定时期的预测需求量驱动, 以物料的投入推动物流系统运行, 具有良好的组织性和计划性, 能够保证生产和物流平稳, 物料的投入量可按照: “净需求量=毛需求量-在线存储量”来计算. 按公式可简略地写为

$$P(t) = \sum_{\tau=t}^{t+T} d(\tau) - \sum_{i \in L} [I_i(t) + S_i(t)], \quad (1)$$

其中:  $P(t)$ 为发货节点 $t$ 时刻的发货量;  $d(\tau)$ 为最终节

点 $\tau$ 时刻的毛需求;  $T$ 为投入节点到最终节点的提前期;  $i \in L$ 表示 $i$ 为投入节点到最终节点的路径中的一个节点;  $I_i(t) + S_i(t)$ 表示节点 $i$ 在 $t$ 时刻的存储量和运输的途中量.

RFID使能的电子看板既具有RFID对库存项目的非接触自动识别功能, 节省库存盘点和项目查找的人工劳动, 提高工作效率和工作质量, 同时能够避免因盗窃、位置错放等原因造成的库存损失, 使供应链管理系统中的库存记录与实际库存量相符, 又能够实现供应链中各节点企业的库存量、途中运输量、定发货量等的远程实时可视. 上述优点使得RFID使能的电子看板能够大大降低库存系统中的不确定性和不精确性, 为各节点企业进行科学合理的库存决策提供实时可靠的数据支持. 基于此实现的RFID使能的Pull策略通过物料的取出来拉动物流系统运行. 能够避免在变化的市场环境下, 节点企业之间由于协调不顺而造成的多阶段响应周期的延长, 实现上游企业实时响应, 多阶段响应周期紧凑合理. 物料投入量可以直接根据其下游节点企业的空看板数来决定. 而“空看板数=看板总数-库中存储量”. 按公式可以简略写为

$$P(t) = K_i - I_i(t), \quad (2)$$

其中:  $P(t)$ 为发货节点 $t$ 时刻的发货量;  $i$ 为发货节点的下游阶段节点;  $K_i$ 为预先设定的节点 $i$ 的看板总数;  $I_i(t)$ 表示节点 $i$ 在 $t$ 时刻的库中存储量.

为充分发挥Push策略和RFID使能的Pull策略的各自优势以降低供应链多级存储中的不确定性, 根据供应链分销网络多级存储系统的结构特点及系统运作时各阶段节点企业的功能, 将RFID使能的Pull策略与Push策略结合, 在不同阶段采用不同策略, 形成合理的库存控制结构, 以降低库存成本, 提高服务水平.

下面以由制造商、分销商和零售商构成的供应链分销网络存储系统为例说明RFID使能的Push/Pull混合控制策略的设计, 其中分销商可包含一级或多级分销商, 在本研究的策略设计中均采用相同策略统称为分销商的控制策略, 为便于描述由RFID使能的Pull策略和Push策略组合而成的RFID使能的Push/Pull混合策略, 将系统控制策略记为 $H$ , 各节点企业的RFID使能的Pull控制方式记为0, Push控制方式记为1,  $H$ 采用3位二进制编码, 从左至右3位二进制编码分别表示制造商、分销商和零售商3个阶段各节点企业均采用的库存控制方式, 以 $H = [0 \ 1]$ 为例, 表示制造商、分销商阶段各节点企业均采用RFID使能的Pull控制方式, 零售商阶段各节点企业均采用Push控制方式, 当 $H = [0 \ 0 \ 0], [0 \ 1 \ 0], [0 \ 1 \ 1], [1 \ 0 \ 0], [1 \ 0 \ 1], [1 \ 1 \ 0], [1 \ 1 \ 1]$ 时类似, 不再赘述.

### 2.2 性能评价指标建立(Performance evaluation indicators establishing)

为评价不同策略对供应链多级存储的控制性能,

引入如下符号和变量:  $m(m = 1, 2, \dots, M)$ ,  $n(n = 1, 2, \dots, N)$ 和 $p(p = 1, 2, \dots, P)$ 分别表示供应链中的制造商、分销商和零售商的标号;  $t(t = 1, 2, \dots, T)$ 表示运行天数的标号;  $I_j(t)$  ( $j$ 为 $m, n$ 或 $p$ , 以下均同)表示第 $t$ 天结束时刻节点 $j$ 的库存量;  $S_j(t)$ 表示第 $t$ 天运往节点 $j$ 的途中量;  $h_j$ 表示节点 $j$ 的单位存储成本;  $V_p(t)$ 表示第 $t$ 天结束时刻零售商 $p$ 的缺货量;  $u_p$ 表示 $p$ 的单位缺货损失;  $L_p(t)$ 表示第 $t$ 天结束时刻 $p$ 的销售量; 在RFID使能的Pull策略下, 决策变量为各节点的最大电子看板数, 记为 $KB_{\max_j}$ ; 在Push策略下, 决策变量为各节点的订货/生产提前期, 记为 $T_j$ ;  $C_S$ 表示总缺货损失;  $C_I$ 表示总库存成本;  $C_T$ 表示系统总运行成本. 由于本文主要研究对比各RFID使能的Push/Pull混合策略对系统存储控制性能的影响, 各RFID使能的Pull/Push混合控制策略对运输成本, 订货成本和生产成本影响差别很小, 可忽略不计, 故只将总库存成本和总缺货损失计入总运行成本;  $R_I$ 表示库存周转率. 从降低供应链库存成本, 提高服务水平出发, 以总库存成本、总缺货损失、总运行成本和库存周转率作为指标来评价各RFID使能的Push/Pull混合策略对系统库存和服务水平的影响, 其定义和计算公式分别如下:

总库存成本即系统运行一个周期零售商、分销商和制造商的库存成本之和, 计算公式为

$$C_I = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{p=1}^P I_p(t) \times h_p + \sum_{n=1}^N I_n(t) \times h_n + \sum_{m=1}^M I_m(t) \times h_m \right), \quad (3)$$

该值能够直接反映各策略对系统库存的影响.

总缺货损失即系统运行一个周期各零售商缺货损失之和, 计算公式为

$$C_S = \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P u_p \times V_p(t), \quad (4)$$

该值能够直接反映各策略对系统服务水平的影响.

总运行成本即总库存成本与总缺货损失之和为

$$C_T = C_S + C_I, \quad (5)$$

该值反映了各策略对系统的库存和服务水平的综合影响.

库存周转率为系统运行一个周期内零售商销售产品总量与库存成本的比值, 即单位库存成本对应的销售量, 计算公式为

$$R_I = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P L_p(t)}{C_I}, \quad (6)$$

该值反映了各策略下单位库存成本发挥的效益. 零售商销售产品总量作为分子, 其值越大, 说明系统对顾

客需求的满足程度越好, 其服务水平越高, 库存成本作为分母, 其值越小, 表明系统库存成本越低. 该值与服务水平成正比, 与库存成本成反比, 能够较好地反映策略是否具有降低库存成本, 提高服务水平的优良性能.

由式(3)–(6)可见, 4个评价指标 $C_S, C_I, C_T, R_I$ 均是变量 $I_j(t), V_p(t), L_p(t)$ 的函数, 但供应链中的各种随机因素使这些变量具有不确定性, 导致其与RFID使能的Push/Pull混合策略下决策变量的准确函数关系难以给出; 另外, 供应链系统具有动态性和复杂性, 运用解析法建模和求解时, 须对原问题进行假设和简化, 而简化后的问题会与实际问题相差较大, 对求解结果造成很大误差. 仿真方法以其良好的动态适应性, 能够更好地描述供应链的随机性, 动态性和复杂性且供应链分销网络多级存储系统状态的变化都是在离散时间点上发生的, 故本文采用离散事件系统仿真方法对系统进行仿真建模<sup>[10–11]</sup>.

### 3 仿真模型设计与实现 (Simulation model design and implementation)

应用离散事件系统仿真方法建立仿真模型需要进行仿真策略设计、仿真模型构造、仿真程序开发等. 本节将在简述仿真策略设计和仿真程序开发后, 着重阐述仿真模型构造.

由于在供应链库存系统中, 事件类型比较少, 事件之间关系比较简单, 因此采用事件调度法作为仿真策略<sup>[12]</sup>.

本文采用面向对象技术在2010/C#平台上开发了供应链分销网络仿真系统, 对象类主要包括顾客类、零售商类、分销商类、制造商类和统计类等, 并将状态变量和统计变量设定为相关类的成员变量进行更新处理, 使得整个程序结构清晰, 便于实现、修改和维护.

#### 3.1 仿真模型构造 (Simulation model establishing)

1) 确定系统中的控制变量、状态变量和统计变量, 本文研究的系统中的控制变量为各RFID使能的Pull/Push混合策略的决策变量, 即 $KB_{\max_j}$ 或 $T_j$ ; 状态变量为各节点企业的库存量 $I_j(t)$ 和运输的途中量 $S_j(t)$ 等; 统计变量为总库存成本 $C_I$ , 总缺货损失 $C_S$ , 总运行成本 $C_T$ , 库存周转率 $R_I$ .

2) 分析系统中可能存在的事件, 本文研究的系统中可能存在的事件主要包括顾客到达, 零售商订、缺货及订货到达, 分销商定、发、缺货及订货到达, 制造商生产、发、缺货, 仿真结束等.

3) 确定事件的属性值, 2)中所列事件的属性值分别为顾客需求量, 零售商订、缺货量及订货到达量, 分销商定、发、缺货量及订货到达量, 制造商生产、发、缺货量, 仿真结束时间.

4) 确定事件执行优先度即运算顺序, 由于本文研究系统中的状态变量的各节点企业库存量 $I_j(t)$ , 途中运输途中量 $S_j(t)$ 等具有基于时间从前向后和基于供应链下游节点向上游节点自下而上的递推关系. 因此, 正确的运算顺序为从下游节点向上游节点, 首先计算零售商节点, 接着计算分销商节点, 最后计算制造商节点, 对于每个节点, 变量的计算顺序为从需求量再到库存量和订货量.

#### 4 仿真实验与结果分析(Simulation experiment and result analysis)

##### 4.1 仿真案例参数设置(Simulation cases parameters setting)

为比较和验证各混合策略对供应链多级存储系统控制的性能, 本文分别对8种混合策略下多种不同结构的供应链分销网络多级存储系统进行了仿真和对比分析, 限于篇幅, 图1(a)–(d)只给出其中的4种系统的结构图.

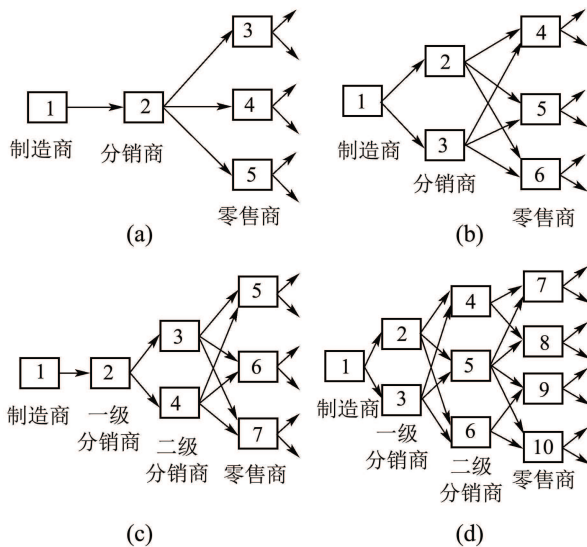


图1 4种供应链分销网络多级存储结构图

Fig. 1 Schematic diagram for the four kinds of multi-echelon inventory system of supply chain distribution network

在仿真中假设制造商具有最大日生产能力限制, 生产产品所需时间很短相对于运往分销商的途中运输时间可忽略不计, 且原材料供应充足; 各零售商每天顾客到达数量服从泊松分布; 各节点企业允许缺货, 但只在零售商处计算缺货损失成本, 系统内其它各级节点企业间的缺货不再计算缺货损失成本, 当顾客到达的零售商无法满足顾客需求时, 顾客选择放弃购买, 发生缺货; 仿真案例参数分为供应链系统属性参数和策略参数两类, 系统属性参数包括各节点企业单位库存成本, 单位缺货损失, 顾客到达数量泊松分布参数, 制造商最大日生产能力, 初始库存量等参照实零售行业的分销网络系统给定, 作为策略参数的各阶段各企业Pull策略最大看板数, 各阶段各企业Push策略提前

订货(生产)天数在上述给定的属性参数下, 采用基于仿真的粒子群优化方法得到其最优参数设置, 且在大量仿真实验中得到验证. 限于篇幅, 本文不再详述. 将上述基于仿真的粒子群优化方法得到的各阶段不同策略下各企业策略最优参数进行组合即得到各RFID使能的Push/Pull混合策略参数. 4个系统的仿真案例参数如表1所示, 仿真时间设为100d, 各节点企业初始库存量均设为100.

##### 4.2 结果的分析与比较(Results analysis and comparison)

为避免仿真实验中存在的随机变量误差对结果的真实性和准确性造成影响, 每种结构在各混合策略下分别运行100次, 得到各项统计变量的均值, 图1所示4种结构的仿真结果如表2–3所示, 小数点后均保留两位有效数字. 此外, 各统计变量标准差占期望百分比反映了仿真模型具有足够的稳定性, 且仿真次数选取合理<sup>[10]</sup>.

表2–3实验结果表明:

1) 多级供应链的Push/Pull混合策略加入RFID使能的特征后实现了各节点企业库存及途中运输情况的可视化, 实现库存和途中运输项目的精确计量和定位, 精确计量能够实现供应链库存管理系统中的库存量和途中运输量与供应链系统中实际库存量和途中运输量一致, 为各节点企业定发货决策提供可靠数据依据, 有利于各节点企业的定发货决策. 对于库存项目的精确定位能够节省库存盘点和项目查找的人工劳动, 对于途中运输时间较长的供应链来说, 途中运输项目的精确定位有利于各节点企业更加合理优化地进行定发货相关决策, 从而提高决策质量、水平和效益<sup>[13–15]</sup>. 将RFID用于RFID使能的电子看板, 把RFID使能的特征引入供应链多级库存的Push/Pull混合控制策略后, 不仅实现了库存和途中运输项目数量与位置的可视, 而且实现了实时可视, 有利于各节点企业定发货决策的优化和针对性的提高, 既能有效降低库存成本, 又能提高供应链的服务水平.

2) 在相同的供应链结构和参数下, 8种RFID使能的Push/Pull混合策略中100策略的总运行成本总是最低, 库存周转率总是最高, 为各混合策略中最优, 验证了制造商阶段的存储采用Push控制, 分销商和零售商阶段的存储采用Pull控制策略的有效性和最优性. Push策略根据一定时期的预测需求量下达生产指令, 能够有效保证生产良好的计划性和组织性, 物流的平稳性, 其库存量及产量的安排能够有效兼顾所有下游节点企业, Push策略的上述特点适合处于供应链最上游, 作为核心企业和物流源头的制造商; RFID使能的Pull控制策略, 通过RFID使能的电子看板能够实现各节点企业的库存量、途中运输量、订货量等的远程实时可视, 减少了订货的盲目性, 能够有效避免在变

化的市场环境下,节点企业之间由于协调不顺而造成的多阶段响应周期的延长,实现上游企业实时响应,多阶段响应周期紧凑合理, Pull策略的上述特点适合

在供应链中处于中转地位,具有物流分流作用的分销商和零售商,两种策略的各得其所能够有效降低库存,提升服务水平.

表1 4种系统参数  
Table 1 Parameters of the four systems

参数	类型	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
单位库存成本	a	0.2	0.3	0.5	0.6	0.8	—	—	—	—	—
	b	0.2	0.3	0.7	0.5	0.6	0.8	—	—	—	—
	c	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.4	0.6	—	—	—
	d	0.2	0.3	0.7	0.5	0.6	0.8	0.7	0.4	0.6	0.5
单位缺货损失	a	—	—	3	6	4	—	—	—	—	—
	b	—	—	—	3	6	4	—	—	—	—
	c	—	—	—	—	3	6	4	—	—	—
	d	—	—	—	—	—	—	3	6	4	5
顾客到达数量泊松分布参数	a	—	—	30	40	50	—	—	—	—	—
	b	—	—	—	30	40	50	—	—	—	—
	c	—	—	—	—	30	40	50	—	—	—
	d	—	—	—	—	—	—	30	40	50	60
制造商最大日生产能力	a	110	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	b	110	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	c	110	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	d	180	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pull策略各企业最大看板数	a	180	150	45	55	65	—	—	—	—	—
	b	180	100	80	45	65	60	—	—	—	—
	c	180	180	90	90	50	60	70	—	—	—
	d	260	130	130	90	90	90	55	65	75	85
Push策略各企业提前订货/生产天数	a	1	2	3	3	3	—	—	—	—	—
	b	1	2	2	2	3	2	—	—	—	—
	c	1	2	2	2	3	3	3	—	—	—
	d	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3

3) 通过比较策略100与策略000可以看出,制造商采用Push策略,更能够有效降低总运行成本,提高库存周转率,验证了以需求预测为特征的Push策略较以库存远程实时可视为特征的Pull策略更适用于作为供应链物流源头的制造商的库存控制.

4) 通过比较策略100与策略111可以看出,分销商和零售商采用Pull策略,更能够有效降低总运行成本,提高库存周转率,验证了以库存远程实时可视为特征的Pull策略较以需求预测为特征的Push策略更适用于具有分流中转作用的分销商和零售商的库存控制.

5) 通过各策略的综合比较可以看出,以库存远程实时可视为特征的Pull策略和以需求预测为特征的Push策略对库存控制虽各具优势,但不完全适应供应链的各不同阶段.在供应链的不同阶段有针对性地采用不同的库存控制方式能够更有效降低库

存,提高服务水平.

此外,在大量的仿真中还发现:

1) 在供应链各阶段采用不同策略对系统整体性能有较大影响;各阶段采用同一策略时,不同的策略参数对性能也有较大影响,各阶段在Push和Pull两种策略下各企业的策略参数均有其最佳设置,验证了前述对各阶段Pull和Push策略下各企业策略参数进行基于仿真的优化的必要性和有效性.

2) 库存成本和缺货损失在同一策略下在某一取值范围内存在此消彼长的关系,即策略参数在一定范围内降低缺货损失会造成存储成本的升高,反之亦然,各策略各参数设置均有其最优值,例如最大看板数的设置有最优值,到达一定值时,增加零售商看板数不再能够有效降低缺货损失,这进一步验证了对各阶段Pull和Push策略下各企业策略参数进行基于仿真的优化的必要性和有效性.

表 2 a, b供应链结构在各策略下的统计变量  
Table 2 Variables for the two kinds of systems a, b controlled by each strategy

策略	统计变量	a			b		
		期望	标准差	标准差占期望百分比	期望	标准差	标准差占期望百分比
000	库存成本	5454.24	569.92	10.45%	8547.18	359.14	4.20%
	缺货损失	9484.11	2582.033	27.22%	10905.92	634.31	5.82%
	总运行成本	14938.35	2865.30	19.18%	19453.10	874.22	4.49%
	库存周转率	1.84	0.41	22.11%	1.10	0.063	5.73%
001	库存成本	6018.22	1787.94	29.71%	8687.54	376.65	4.34%
	缺货损失	4587.66	921.73	20.09%	10797.71	774.25	7.17%
	总运行成本	10605.88	1265.25	11.93%	19485.25	968.32	4.97%
	库存周转率	2.029	0.75	37.19%	1.065	0.062	5.85%
010	库存成本	6091.87	132.38	2.17%	7726.93	174.45	2.26%
	缺货损失	14081.9	693.49	4.92%	12384.71	788.60	6.37%
	总运行成本	20173.77	657.44	3.26%	20111.64	679.94	3.38%
	库存周转率	1.44	0.039	2.73%	1.17	0.025	2.12%
011	库存成本	7242.93	340.94	4.71%	7097.20	343.38	4.84%
	缺货损失	9724.75	1516.61	15.60%	15020.45	1783.53	11.87%
	总运行成本	16967.68	1642.96	9.68%	22117.65	2042.64	9.24%
	库存周转率	1.35	0.095	7.06%	1.17	0.10	8.66%
100	库存成本	2459.62	1112.68	45.24%	1831.86	163.91	8.95%
	缺货损失	6153.72	1036.40	16.84%	9486.16	633.088	6.67%
	总运行成本	8613.34	1682.65	19.54%	11318.02	548.06	4.84%
	库存周转率	5.14	1.96	38.20%	5.31	0.48	9.11%
101	库存成本	3378.94	1104.64	32.69%	2421.82	192.079	7.93%
	缺货损失	5717.26	776.092	13.57%	9147.97	505.017	5.52%
	总运行成本	9096.2	889.16	9.78%	11569.79	437.48	3.78%
	库存周转率	3.44	0.95	27.44%	3.97	0.32	8.04%
110	库存成本	3430.186	284.43	8.29%	3865.53	217.70	5.63%
	缺货损失	18237.92	752.76	4.13%	18617.45	978.0075	5.25%
	总运行成本	21668.11	813.97	3.76%	22482.98	913.25	4.06%
	库存周转率	2.30	0.20	8.89%	1.98	0.13	6.73%
111	库存成本	5722.95	454.016	7.93%	4455.94	396.66	8.90%
	缺货损失	13899.56	1495.30	10.76%	19620.78	1184.79	6.04%
	总运行成本	19622.51	1671.57	8.52%	24076.72	1352.76	5.62%
	库存周转率	1.54	0.15	9.84%	1.65	0.18	10.68%

3) 供应链中大量随机因素的存在使得系统的每次仿真结果存在一定偏差, 且反应偏离程度的偏差(即标准差)也有较大随机性, 较为明显的是结构a对应的标准差占期望百分比普遍较高, 原因在于结构a较b, c, d简单, 节点企业数量少, 其各项统计变量(库存成本、缺货损失、总运行成本、库存周转率)的期望较b, c, d低, 故各策略下结构a对应的标准差占期望百分比普遍较高。

综合以上的比较分析, 总结得出: a) 能够对库存产品和运输的途中量精确计量和定位的RFID技术为广域分布的供应链分销网络多级存储控制提供了

新的有效方法, 基于“RFID使能的电子看板”的RFID使能的Pull策略较以往的“订单拉动”或“合同拉动”更能发挥出“看板系统”降低库存, 提高服务水平的作用. b) Push策略和RFID使能的Pull策略对供应链存储控制各具不同优势, 根据供应链结构特点及各阶段企业在供应链运作中的不同地位和作用, 进行合适的策略选择, 形成合理的库存控制结构, 能够有效降低库存, 提高服务水平. 对于作为供应链物流源头的核心企业的制造商采用Push策略更为合适, 对物流起分流中转作用的分销商和零售商采用RFID使能的Pull策略更为合适。

表3 c, d供应链结构在各策略下的统计变量

Table 3 Variables for the two kinds of systems c, d controlled by each strategy

策略	统计变量	c			d		
		期望	标准差	标准差占期望百分比	期望	标准差	标准差占期望百分比
000	库存成本	12052.56	302.36	2.51%	21739.37	586.00	2.70%
	缺货损失	10505.14	914.65	8.71%	18852.75	1817.22	9.64%
	总运行成本	22557.7	981.82	4.35%	40592.12	2213.65	5.45%
	库存周转率	0.80	0.030	3.71%	0.64	0.04	5.55%
001	库存成本	14200.27	324.014	2.28%	23762.18	377.27	1.59%
	缺货损失	10072.2	867.24	8.61%	18706.06	1400.48	7.49%
	总运行成本	24272.47	936.85	3.86%	42468.24	1562.17	3.68%
	库存周转率	0.68	0.022	3.26%	0.58	0.019	3.30%
010	库存成本	10855.52	368.71	3.40%	18702.15	670.92	3.59%
	缺货损失	13517.66	1514.85	11.21%	18393.02	2215.046	12.04%
	总运行成本	24373.18	1652.75	6.78%	37095.17	2559.43	6.90%
	库存周转率	0.82	0.048	5.85%	0.75	0.044	5.82%
011	库存成本	13992.82	751.97	5.37%	23047.51	1271.87	5.52%
	缺货损失	8869.29	1489.61	16.80%	14182.47	2282.66	16.09%
	总运行成本	22862.11	1661.49	7.27%	37229.98	2720.99	7.31%
	库存周转率	0.71	0.045	6.29%	0.65	0.046	7.04%
100	库存成本	9796.50	350.21	3.57%	17254.68	1035.71	6.00%
	缺货损失	9529.47	1094.0044	11.48%	15453.3	3755.68	24.30%
	总运行成本	19325.97	1198.82	6.20%	32707.98	45848.50	13.91%
	库存周转率	1.00053	0.051	5.13%	0.85	0.095	11.15%
101	库存成本	11716.37	519.87	4.44%	18830.29	731.29	3.88%
	缺货损失	10343.72	1210.10	11.70%	14808.78	4860.53	32.82%
	总运行成本	22060.088	1326.80	6.01%	33639.065	5305.23	15.77%
	库存周转率	0.82	0.045	5.46%	0.78	0.080	10.23%
110	库存成本	8791.23	279.68	3.18%	16262.36	652.94	4.02%
	缺货损失	15549.86	1166.41	7.50%	21096.07	1913.23	9.07%
	总运行成本	24341.093	1171.54	4.81%	37358.43	2226.76	5.96%
	库存周转率	0.96	0.041	4.27%	0.83	0.049	5.92%
111	库存成本	12015.61	777.67	6.47%	20824.16	1696.020	8.14%
	缺货损失	11984.98	1263.45	10.54%	18738.5	1652.84	8.82%
	总运行成本	24000.59	1487.74	6.20%	39562.66	2519.20	6.37%
	库存周转率	0.77	0.056	7.29%	0.67	0.059	8.83%

## 5 结论和工作展望 (Conclusion and future work)

本文根据供应链分销网络多级存储的结构特点及系统运作时各阶段节点企业的功能, 将基于RFID使能的电子看板实现的RFID使能的Pull策略与Push策略结合, 在不同阶段采用不同策略, 形成不同的库存控制结构, 设计出多种RFID使能的供应链分销网络多级存储的Push/Pull混合控制策略, 建立了以总库存成本、总缺货损失、总运行成本和库存周转率作为评价策略性能的指标体系, 并基于离散事件系统仿真原理, 设计并实现了系统的仿真模型,

通过对各混合策略下多种结构的供应链分销网络多级存储系统仿真, 验证并分析了制造商阶段的存储采用Push控制, 分销商和零售商阶段的存储采用Pull控制策略的有效性和最优性. 此外, 本文从供应链结构出发研究了不同阶段节点企业存储策略的选择, 而对于同阶段企业参数的不同对库存策略选择的影响有待进一步研究.

## 参考文献 (References):

- [1] WANG D W, XU C G. Hybrid Push/Pull control strategy simulation and its applications [J]. *Production Planning & Control*, 1997, 8(2): 142 - 151.

- [2] SELCUK B. Adaptive lead time quotation in a pull production system with lead time responsive demand [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2013, 32(1): 138 – 146.
- [3] JUNIOR M L, FILHO M G. Variations of the kanban system: Literature review and classification [J]. *International Journal Production Economics*, 2010, 125(1): 13 – 21.
- [4] LEE Y H. Supply chain model for the semiconductor industry of global market [J]. *Journal of Systems Integration*, 2000, 10(3): 189 – 206.
- [5] AHN H S, KAMINSKY P. Production and distribution policy in a two-stage stochastic push-pull supply chain [J]. *IIE Transactions*, 2005, 37(7): 609 – 621.
- [6] CACHON G P. The allocation of inventory risk in a supply chain: Push, pull, and advance-purchase discount contracts [J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 222 – 238.
- [7] WANG S, LIU S, WANG W. The simulated impact of RFID-enabled supply chain on pull-based inventory replenishment in TFT-LCD industry [J]. *International Journal of Production Economics*, 2008, 112(2): 577 – 586.
- [8] SARAC A, ABSI N, DAUZERE-PERES S. A literature review on the impact of RFID technologies on supply chain management [J]. *International Journal Production Economics*, 2010, 128(1): 77 – 95.
- [9] MELSKI A, MUELLER J, ZEIER A, et al. Assessing the effects of enhanced supply chain visibility through RFID [C] // *Proceedings of the Fourteenth Americas Conference on Information Systems*. Toronto: AIS/ICIS Administrative Office, 2008: 1 – 12.
- [10] 高镜媚, 汪定伟. 三级网状随机性库存控制策略的仿真优化 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(11): 1218 – 1224.  
(GAO Jingmei, WANG Dingwei. Simulation-based optimization on three-echelon network stochastic inventory control policies [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(11): 1218 – 1224.)
- [11] 李新, 王宛山, 韩洋, 等. 一种柔性供应链仿真系统的研究与实现 [J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(6): 1270 – 1278.  
(LI Xin, WANG Wanshan, HAN Yang, et al. Novel flexible supply chain simulation system [J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(6): 1270 – 1278.)
- [12] 刘勇, 王德才, 冯正超. 离散事件系统仿真建模与仿真策略 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 30(6): 1019 – 1025.  
(LIU Yong, WANG Decai, FENG Zhengchao. Simulation modeling and simulation diplomacy of discrete event system [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)*, 2005, 30(6): 1019 – 1025.)
- [13] FRANCISCO B N, ÁNGELES P, et al. Static and dynamic policies with RFID for the scheduling of retrieval and storage warehouse operations [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2013, 66(49): 696 – 709.
- [14] USTUNDAG, TANYAS M. The impacts of radio frequency identification (RFID) technology on supply chain costs [J]. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2009, 45(1): 29 – 38.
- [15] ZHOU W. RFID and item-level information visibility [J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 198(1): 252 – 258.

#### 作者简介:

**李国家** (1985–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为RFID技术在供应链管理中的应用, E-mail: guojia\_li@163.com;

**汪定伟** (1948–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为ERP/MRP/JIT、生产计划与调度、建模与优化、软计算与智能优化方法等, E-mail: dwwang@mail.neu.edu.cn.