分销网络存储系统 RFID 使能的 Pull 控制策略

汪定伟, 李国家
(东北大学系统工程研究所, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为提高供应链分销网络存储系统服务水平, 降低运作成本, 基于 射频识别(radio frequency identification, RFID)技术设计了远程实时可视的 RFID 使能的电子看板系统, 并对涉及的 RFID 标签对应的装箱规格确定、看板信息数据库设计、广域可视化看板系统构建等关键步骤进行了分析. 在对分销网络系统不同于多阶段生产存储系统具有较长订货提前期和分支节点网状结构分析的基础上, 基于 RFID 使能的电子看板系统,将多阶段生产存储系统中 Pull 控制方式推广到分销网络系统, 并建立了 Pull 控制策略的分销网络模型. 为比较和验证 Pull 控制策略性能, 开发了多级分销网络仿真系统, 通过对分销网络案例仿真与(r, Q)策略进行比较, 验证了基于 RFID 使能的电子看板的 Pull 策略在一定条件下, 能有效改进分销网络库存控制性能和所建数学模型及仿真模型的正确性和有效性.

关键词: 仿真; 分销网络; 库存控制; 拉动控制策略; 电子看板; 射频识别
中图分类号: TP319.9 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000−5781(2017)02−0265−08
doi: 10.13383/j.cnki.jse.2017.02.012

RFID-enabled Pull control strategy for multi-echelon inventory of supply chain

Wang Dingwei, Li Guojia
(Institute of System Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: To improve the service level and reduce the operation cost of multi-echelon inventory systems of distribution networks, a novel electric kanban system is designed by means of the remote vision function of radio frequency identification (RFID) technology. The three key steps to realize the kanban system include fixing the container size, designing the kanban databases and establishing the globally visible kanban system with RFID and internet. Based on the analysis of the differences between manufacturing and supply chain systems, a model of networked distribution chain system with Pull control strategies is established. Two key differences of longer lead times and bifurcated downstream loads of supply chains with manufacturing systems are described clearly in the model. The model provides a foundation to extend the optimal hybrid Pull strategies of manufacturing systems to supply chains. To verify the performances of pull strategies, a simulation system of networked distribution chain is developed. To compare the Pull and (r, Q) strategies, a simulation system for different examples is run more than hundreds times. The results show that the RFID-Enabled Pull enables to improve the performance of distribution networks under certain conditions. The mathematical and simulation models are also proved to be feasible and effective.

Key words: simulation; distribution networks; inventory control; Pull control strategy; e-kanban; RFID

收稿日期: 2014−04−30; 修订日期: 2014−10−23.
基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(70931001; 61273203).

1 引 言

制造企业的分销网络存储系统通常包含由制造商成品库存, 分销中心库存以及本地分销中心零售商库存构成的三级(四级)库存, 这些不同级别的库存由上游节点进行补货[1−3]. 为减少库存成本和改进服务水平, 多级库存系统的控制方法成为学术界备受关注的课题[4,5]. 目前最优的库存控制策略限于二级库存系统, 对于多级网状分销系统, 可用的库存控制策略限于定点订货的(s, nQ) 或基于控制策略的仿真研究[2,6].

用物料投入的方式来推动系统运行的 Push 控制策略和用产品取出的方式来拉动系统运行的 Pull 控制策略被广泛用于多阶段生产存储系统[7,8]. 2000 年后,有人开始将 Push 和 Pull 控制模式从单个工厂推广到供应链的多级库存中. 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”, 并不能发挥“看板系统”远程可视化的作用[9−12].

随着信息技术的快速发展, 新兴的 RFID 技术被广泛用于供应链, 通过减少库存损失, 改进物流效率, 提高信息精度等提高供应链效益[13−15]. Pull 策略中的看板系统自产生以来, 各种应用形式的看板系统被开发[16,17]. 基于上述研究工作的启迪, 本文针对广域分布的供应链分销网络设计了 RFID 使能的电子看板系统, 并对涉及的 RFID 标签对应的集装箱规格确定、看板信息数据库设计、广域可视化看板系统构建等关键步骤进行了分析. 在对分销网络系统不同于多阶段生产存储系统具有较长订货提前期和分支节点的网状结构分析的基础上, 基于 RFID 使能的电子看板系统, 将多阶段生产存储系统中 Pull 控制方式推广到分销网络系统, 开发了多级分销网络仿真系统, 通过对分销网络案例仿真与(r, Q)策略进行比较, 验证了基于 RFID 使能的电子看板的 Pull 策略在一定条件下, 能够有效改进分销网络库存控制性能和所建数学模型及仿真模型的正确性和有效性.

2 RFID 使能的电子看板系统

为将看板系统推广到广域分布的供应链分销网络, 首先要实现看板的远程可视. RFID 技术通过位于仓库的阅读器和贴在成品或原料装箱上的标签能够实现整个供应链物流的可视化[18−20].

本文开发的 RFID 使能的电子看板系统在原材料加工系统配备 RFID 系统后, 涉及的关键步骤如下:

1) 确定 RFID 标签对应的集装箱规格, 将产品装入具有固定规格的装箱并对装箱贴上标签. 存储在相同仓储的不同产品分装在不同装箱中, 通过 RFID 标签很容易对其区分.

2) 设计看板信息数据库. 看板数据库至少包含两个数据表, 分别为存储单个看板信息的看板表和存储包括最大看板数和空看板数等看板数量信息的数据表. 存储单个看板信息的数据表信息在阅读器读入标签信息时, 由 RFID 中间件生成.

3) 结合互联网技术建立可视化系统. 在由阅读器, 中间件, 库存管理计算机, 网络和数据库服务器等组成的使库存和看板信息可视化的 RFID 管理系统, 看板系统的可视化由 RFID 系统实现. 分销网络能够简洁地展现在计算机屏幕上, 只要任何节点企业的库存信息有所更新, 所有库存和看板信息都能够通过数据表显示, RFID 使能的看板系统的可视化实例如图 1 所示.

3 RFID 使能的 Pull 策略

3.1 单工厂多阶段生产存储系统与供应链的区别

产生于多阶段生产存储系统的 Pull 控制策略用产成品或零件的取出来拉动系统运行[21−22]. 基于远程实时可视的 RFID 使能的电子看板将多阶段生产存储系统中 Pull 控制方式推广到供应链分销网络系统, 物

料投入量可以直接根据其下游阶段的空看板数决定, 而“空看板数=看板总数−在线存储量”. 然而, 单个企业的存储系统是一个树状的装配系统, 而多级库存网络是一个网状结构的系统, 前者只有物料的汇合点没有分支点, 而后者既有物料汇合点又有分支点; 前者只有一个最终需求点, 而后者有多个最终需求点. 因此, 在建立分销网络多级存储系统模型时, 必须考虑分支节点带来的物料分流如何分配的计算问题. 为此, 本文对单工厂多阶段生产存储系统和供应链多级库存网络在结构和运作方式上的差别进行了分析.

1) 在供应链中具有较长的运输提前期

由于供应链的广域分布, 上下游节点企业间的运输需要若干天或若干周. 因此, 由于较长的运输时间, Pull 策略的需求驱动并不能实现准时制. 因此, 供应链中 Pull 策略的模型必须认真研究时间的延迟.

2) 供应链中下游节点企业具有分支点

在多阶段生产存储系统通常为树状结构, 零部件汇集到同一个下游生产或装配阶段. 由于在供应链分销网络系统中分销商和零售商的存在, 一个节点企业可能给多个下游节点企业供货, 类似地, 一个下游节点企业可能由一个或几个节点企业供货. 两者的区别如图 2 所示. 为描述供应链网状结构中的分支点, 定义供货比例系数为一个节点由另一个节点供货的比例定义为一定时期内另一个节点供货量与该节点总需求量的商.

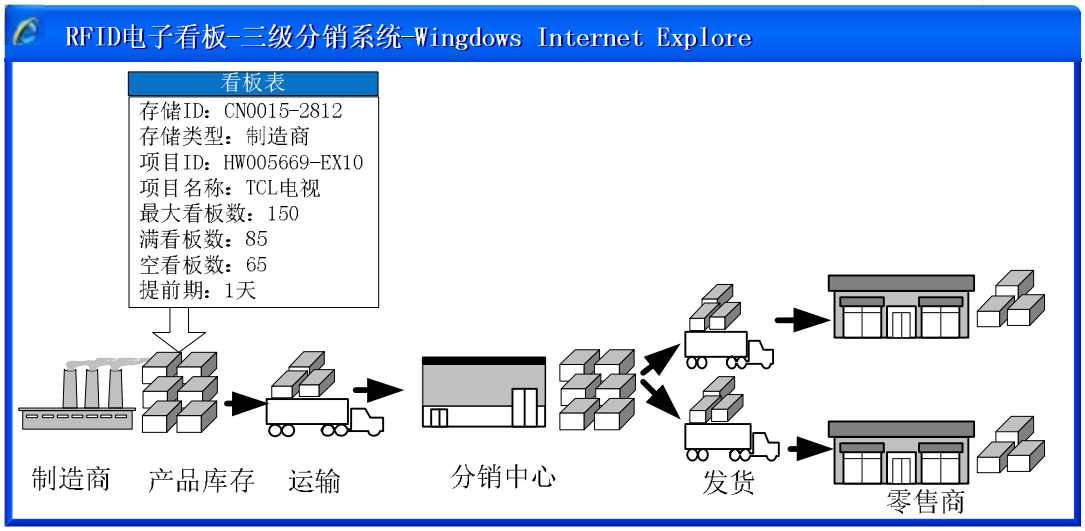

图 1　RFID 使能的看板系统的可视化实例

Fig. 1　An example of the visibility of RFID enabled kanban system

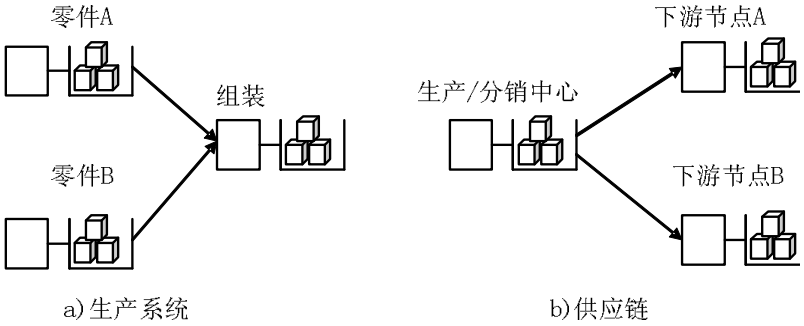

图 2　生产存储系统与供应链系统的区别

Fig. 2　The difference of downstream loads of manufacturers and supply chains

3.2 Pull 策略的模型建立

本文研究的供应链网络分销系统的节点企业由制造商, 分销商和零售商组成. 供应链运作时间为 T, 单位为 d, 记为 $t, t \in [0, T]$, 定义的其它参数和符号如下: M, D 和 R 分别表示制造商集合, 分销商和零售商的集合, i 表示供应链上的各节点企业, $i \in (M \cup D \cup R)$.

L_i 表示由节点 i 供货的下游节点集合, $i \in (M \cup D)$;

U_i 表示给节点 i 供货的的上游节点集合, $i \in (D \cup R)$;

$K_{\max_i}$ 表示节点 i 的最大电子看板数, $i \in (M \cup D \cup R)$;

$I_i(t)$表示节点 i 在 t d 的库存量, $i \in (M \cup D \cup R)$;

$d_i(t)$表示节点 i 在 t d 的需求量, $i \in (M \cup D \cup R)$;

$\tilde{d}_i(t)$表示节点 i 在 t d 的预测需求量, $i \in (M \cup D \cup R)$;

$c_i(t)$表示节点 i 在 t d 的顾客需求量, $i \in R$;

$s_i(t)$表示节点 i 在 t d 的缺货损失, $i \in R$;

$p_i(t)$表示节点 i 在 t d 的补货量, $i \in (M \cup D \cup R)$;

$q_{ij}(t)$表示在 t d 节点 i 向节点 j 的发货数量, (i, j)为具有定供货关系的节点对;

$r_{ij}(t)$表示在 t d 由节点 i 到节点 j 的到货数量, (i, j) 为具有定供货关系的节点对;

$\alpha_{ij}(t)$表示在 t d 节点 i 对节点 j 的供货比例系数, (i, j) 为具有定供货关系的节点对;

$w_{ij}(t)$表示在 t d 由节点 i 向节点 j 途中运输量, (i, j) 为具有定供货关系的节点对;

$\tau_{ij}(t)$表示由节点 i 到节点 j 发货的提前期, (i, j) 为具有定供货关系的节点对.

Push 和 Pull 模型可用如下递推公式描述:

1) 需求公式

$$d_i(t) = \begin{cases} c_i(t), & i \in R \\ d_i(t) = \sum\limits_{j \in L_i} \alpha_{ij}(t) p_j(t), & i \in (M \cup D), \end{cases}$$

下游分支节点的供货量由供货比例系数 $\alpha_{ij}(t)$决定, 该系数可设置为自学习和自适应.

2) 供货比例系数的自学习公式

$$\alpha_{ij}(t) = \rho \alpha_{ij}(t-1) + \frac{r_{ij}(t-1)}{\sum\limits_{i \in U_j} r_{ij}(t-1)}, \quad i \in (M \cup D),$$

其中 ρ 为一给定的记忆系数, 本文仿真实验中取 $\rho = 0.95$.

3) 库存和缺货公式

对于所有的零售商, $i \in R$, 如果 $I_i(t-1) + \sum\limits_{j \in U_i} r_{ji}(t) \geqslant d_i(t)$,

$$I_i(t) = I_i(t-1) + \sum_{j \in U_i} r_{ji}(t) - d_i(t), \quad i \in R.$$

如果 $I_i(t-1) + \sum\limits_{j \in U_i} r_{ji}(t) < d_i(t)$, $s_i(t) = d_i(t) - I_i(t-1) - \sum\limits_{j \in U_i} r_{ji}(t)$, $i \in R$, 且此时有 $I_i(t) = 0$.

对于制造商和分销商

$$I_i(t) = I_i(t-1) + \sum_{j \in U_i} r_{ji}(t) - \sum_{j \in L_i} q_{ij}(t), \quad i \in D,$$

$$I_i(t) = I_i(t-1) + p_i(t) - \sum_{j \in L_i} q_{ij}(t), \quad i \in M.$$

4) Pull 控制策略

根据 Pull 策略原理, 订货量为空看板数即最大看板数与库存量的差, 即

$$p_i^0(t) = K\max_i - I_i(t), \quad i \in (M \cup D \cup R),$$

其中 $p_i(t)$的角标 0 表示 Pull 策略.

5) 发货数量:

假定订单即时到达上有节点, 发货量只取决于上游节点企业的库存量, 那么

$$q_{ij}(t) = \max\left\{I_i(t),\ \alpha_{ij}(t)p_j(t)\right\}.$$

6) 到货量和途中运输量

对于具有定发货关系的节点对,

$$r_{ij}(t) = w_{ij}(t - \tau_{ij}), \tag{1}$$

$$w_{ij}(t-k) \leftarrow w_{ij}(t-k+1), \quad k = \tau_{ij}, \tau_{ij}-1, \ldots, 1, \tag{2}$$

$$w_{ij}(t) = q_{ij}(t). \tag{3}$$

从式(1)∼式(3)可以看出, 供应链较长的运输延迟由途中运输量 $w_{ij}(t)$来表示. 式(1)∼式(3)仅描述了从发货节点至到货节点的运输过程.

7) 模型的目标函数

考虑到营业额, 生产和运输成本给定, 本文只将存储成本和缺货损失作为目标函数求其最小化. 那么, 该优化问题即为通过选择各节点企业合适的库存/补货策略来最小化下面的目标函数

$$Z(p^k) = \sum_{t=1}^{T}\left(\sum_{i \in M,P,R} h_i\, I_i(t) + \sum_{i \in R} g_i\, s_i(t)\right),$$

其中 h_i 和 g_i 分别为节点 i 单位产品每天的存储成本和缺货损失.

8) 上述公式的运算顺序

由于上述递推公式中的一些变量在同一天 t 中由其它变量具有函数关系, 因此采取正确的运算顺序十分重要. 正确的运算顺序为从下有节点向上游节点. 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到到货量再到库存量和订货量, 即

$$d_i(t) \to \frac{r_{ij}(t)}{w_{ij}(t)} \to \frac{I_i(t)}{s_i(t)} \to p_i(t) \to q_{ij}(t).$$

当库存控制策略给定, 就能够根据上述递推公式仿真分销系统从 1 d∼ T d 的运作情况, 并通过累加各天的库存成本和缺货损失, 最后求得目标值.

4　仿真结果和分析

为验证上述模型的正确性及 RFID 使能的 Pull 策略对分销网络存储系统的控制性能, 在 2010 / C# 平台上开发了供应链分销网络仿真系统.

4.1　Pull 和(r, Q)策略比较

为研究 RFID 使能的 Pull 策略对分销网络存储系统的适用性和有效性, 将其与经典的(r, Q)库存控制方

式相对比. 假定供应链中各节点需求相互独立, 仿真的供应链网络如图 3 所示. 表示供货关系的箭线旁的数字为初始供货比例系数.

单位产品的存储和缺货损失成本如表 1 所示. 各节点的 r 和 Q 值取自文献[23], 采用基于仿真的优化方法得到.

三个零售商的顾客需求是服从泊松分布的随机变量,其参数分别为 30, 40, 50. 为比较不同情形, 本文对 Pull 和(r, Q)策略在下面五种情形下进行了仿真:

情形 1 各节点初始库存均设为 100, 途中运输时间均为 1 d;

情形 2 各节点初始库存均设为 150, 途中运输时间均为 1 d;

情形 3 各节点初始库存均设为 200, 途中运输时间均为 1 d;

情形 4 各节点初始库存均设为 200, 途中运输时间均为 2 d;

情形 5 各节点初始库存均设为 200, 途中运输时间均为 3 d.

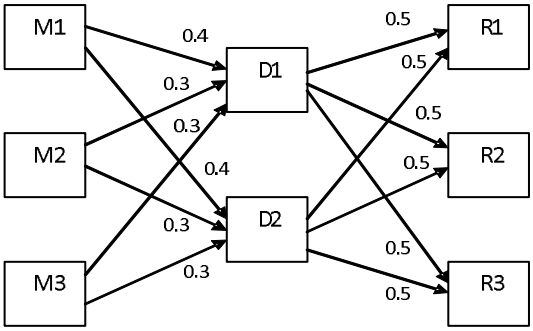

图 3 Pull 和(r, Q)策略对比案例

Fig. 3 An example to compare Pull and (r, Q) Strategies

表 1 各节点企业的单位库存和缺货损失成本

Table 1 The carry costs and shortage losses of all nodes

Node	M1	M2	M3	P1	P2	R1	R2	R3
h_i	0.2	0.1	0.5	0.3	0.7	0.5	0.6	0.8
g_i	–	–	–	–	–	6	12	8
(r, Q)	17, 50	45, 72	50, 60	28, 54	44, 62	59, 119	81, 142	74, 177

对于上述情形, Pull 和(r, Q)策略均仿真 100 次. 反映各策略性能对比的仿真结果均值如表2所示, 其中 TotalC. 与 Cty.% 和Shtg.% 分别表示总成本与总库存成本和总缺货损失成本占总成本的百分比.

表 2 Pull 和(r, Q)策略性能对比

Table 2 The comparisons of Pull and (r, Q) control manners

策略	Pull			(r, Q)		
情形	TotalC.	Cry.%	Shtg.%	TotalC.	Cry.%	Shtg.%
1	8 750	77.65%	22.36%	14 108	84.84%	15.16%
2	9 747	85.46%	14.54%	25 246	93.88%	6.12%
3	11 749	79.30%	20.70%	16 280	82.26%	17.74%
4	1 844	68.81%	31.19%	20 927	73.78%	26.22%
5	32 399	38.29%	61.71%	20 087	69.17%	30.83%

从表 2 可以看出, RFID 使能的 Pull 策略对前四种情形具有最低的总成本, 但是对于情形 5, 则高于(r, Q)策略. 上述结果表明在途中运输时间较短时, RFID 使能的 Pull 策略较(r, Q)策略更具优势, 验证了

基于 RFID 使能的电子看板的 Pull 策略在一定条件下能够有效改进分销网络库存控制性能和所建数学模型及仿真模型的正确性和有效性, 然而随着途中运输时间的增加, 随机需求波动在纯 Pull 策略下会造成更多的缺货损失, 在这种情形下, 作为订货点法的经典(r, Q)仍然是较好的库存控制策略.

5 结束语

基于远程实时可视的 RFID 技术, 本文设计了 RFID 使能的电子看板系统, 对其开发过程包括的确定 RFID 标签对应的装箱规格, 设计看板信息数据库, 构建广域可视化看板系统等关键步骤进行了详细阐述; 在对分销网络系统不同于多阶段生产存储系统具有较长订货提前期和分支节点网状结构分析的基础上, 基于 RFID 使能的电子看板系统, 将多阶段生产存储系统中成功应用的 Pull 混合控制策略推广到分销网络系统, 并建立了 Pull 控制策略下的分销网络模型. 为比较和验证 Pull 控制策略性能, 开发了多级分销网络仿真系统, 通过对多种结构分销网络案例仿真与(r, Q)策略进行比较, 验证了基于 RFID 使能的电子看板的 Pull 策略在一定条件下, 能够有效改进分销网络库存控制性能和所建数学模型及仿真模型的正确性和有效性.

RFID 使能的 Pull 控制策略为降低供应链分销网络的库存成本和缺货损失提供了一种新方法, 对供应链分销网络库存管理实践有着重要的意义, 在下一步研究中将针对 Pull 策略随途中运输时间增加, 随机需求波动会造成更多缺货损失的特点, 考虑把 Push 策略和 RFID 使能的 Pull 策略结合起来, 在分销网络不同阶段采用不同控制策略, 形成 RFID 使能的 Push / Pull 混合控制策略以改进供应链分销网络库存的控制性能.

参考文献:

[1] Moinzadeh K. A multi-echelon inventory system with information exchange. Management Science. 2002, 48(3): 414–426.

[2] Kiesmüller G, de Kok T, Smits S, et al. Evaluation of divergent N-echelon (s,nQ)-policies under compound renewal demand. OR Spectrum, 2004, 26(4): 547–577.

[3] 魏永长, 王红卫, 祁　超, 等. 横向调货策略下供应链网络中牛鞭效应的鲁棒控. 系统工程学报,2013, 28(5): 633–640.
Wei Y C, Wang H W, Qi C, et al. Robust control for the bullwhip effect of a supply network under the lateral transshipment policy. Journal of Systems Engineering, 2013, 28(5): 633–640. (in Chinese)

[4] Lagodimos A, Koukoumialos S. Service performance of two-echelon supply chains under linear rationing. International Journal of Production Economics, 2008, 112(2): 869–884.

[5] Arts J, Kiesmüller G. Analysis of a two-echelon inventory system with two supply modes. European Journal of Operational Research, 2013, 225(2): 263–272.

[6] Kochel P, Nielander U. Simulation-based optimization of multi-echelon inventory systems. International Journal of Production Economics, 2005, 93/94(1): 505–513.

[7] Wang D, Xu C. Hybrid Push / Pull production control strategy simulation and its applications. Production Planning & Control, 1997, 8(2): 142–151.

[8] Selcuk B. Adaptive lead time quotation in a pull production system with lead time responsive demand. Journal of Manufacturing Systems, 2013, 32(1): 138–146.

[9] Cachon G. The allocation of inventory risk in a supply chain: Push, Pull, and advance-purchase discount contracts. Management Science, 2004, 50(2): 222–238.

[10] Wang S, SarkerB R. Optimal models for a multi-stage supply chain system controlled by kanban under just-in-time philosophy. European Journal of Operational Research, 2006, 172(1): 179–200.

[11] Wang S, Liu S, Wang W. The simulated impact of RFID-enabled supply chain on pull-based inventory replenishment in TFT-LCD industry. International Journal of Production Economics, 2008, 112(2): 577–586.

[12] Ahn H, Kaminsky P. Production and distribution policy in a two-stage stochastic push-pull supply chain. IIE Transactions 2005, 37(7): 609–621.

[13] Sarac A, Absi N, Dauzere-Peres S. A literature review on the impact of RFID technologies on supply chain management. International Journal of Production Economics, 2010, 128(1): 77–95.

[14] Zhu X, Mukhopadhyay S, Kurata H. A review of RFID technology and its managerial applications in different industries. Journal Engineering and Technology Management, 2012, 29(1): 152–167.

[15] Sari K. Exploring the impacts of radio frequency identification (RFID) technology on supply chain performance. European Journal of Operational Research, 2010, 207(1): 174–183.

[16] Zhang Y, Jiang P, Huang G. RFID-based smart kanbans for just-in-time manufacturing. International Journal of Materials and Product Technology, 2008, 33(1 / 2): 170–184.

[17] Junior M, Filho M. Variations of the kanban system: Literature review and classification. International Journal of Production Economics, 2010, 125(1): 13–21.

[18] Sari K. Exploring the impacts of radio frequency identification (RFID) technology on supply chain performance. European Journal of Operational Research, 2010, 207(1): 174–183.

[19] Wang L, Kwok S, Ip W. A radio frequency identification and sensor-based system for the transportation of food. Journal of Food Engineering, 2010, 101(1): 120–129.

[20] Melski A, Mueller J, Zeier A, el at. Assessing the effects of enhanced supply chain visibility through RFID // Proceedings of the Fourteenth Americas Conference on Information Systems. Toronto, 2008: 1–12.

[21] Hodgson T, Wang D. Optimal hybrid Push / Pull strategies for a parallel multistage system: Part I. International Journal of Production Research, 1991, 29(6): 1279–1287.

[22] Hodgson T, Wang D. Optimal hybrid Push / Pull strategies for a Parallel multistage system: Part II. International Journal of Production Research, 1991, 29(7): 1453–1460.

[23] 高镜媚, 汪定伟. 三级网状随机性库存控制策略的仿真优化. 控制理论与应用, 2009, 26(11): 1218–1224.
Gao J M, Wang D W. Simulation-based optimization on three-echelon network stochastic inventory control policies. Control Theory & Applications, 2009, 26(11): 1218–1224. (in Chinese).

作者简介:

汪定伟 (1948—), 男, 江西彭泽人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 供应链库存管理, 建模与优化, Email: dwwang@mail.neu.edu.cn;

李国家 (1985—), 男, 吉林四平人, 博士生, 研究方向: RFID 技术在供应链管理中的应用, Email: guojia_li@163.com.