

供应链存储系统无线射频识别使能的 定量在制品法控制策略仿真

韩晓菊^{1,2†}, 汪定伟¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北电力大学 自动化工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 无线射频识别(radio frequency identification, RFID)技术的出现为库存控制策略的创新提供了一条有效的途径. 本文利用RFID技术, 将原有单个制造系统的流通卡系统推广到供应链的多级库存网络中, 设计了RFID使能的电子流通卡系统. 基于电子流通卡, 实现了RFID使能的定量在制品法(constant work-in-process, CONWIP)控制策略; 并建立了CONWIP控制策略的分销网络模型. 为比较和验证CONWIP控制策略性能, 开发了三级分销网络仿真系统, 使用该系统, 将其与RFID使能的 (r, Q) 策略进行比较, 验证了CONWIP策略在一定条件下, 能够有效降低存储成本、提高服务水平.

关键词: 射频识别; 供应链; CONWIP策略; 电子流通卡; 仿真

中图分类号: TP319.9 文献标识码: A

Simulation research on radio frequency identification-enable CONWIP control strategy for inventory of supply chain

HAN Xiao-ju^{1,2†}, WANG Ding-wei¹

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China;
2. School of Automation Engineering, Northeast Dianli University, Jilin Jilin 132012, China)

Abstract: Radio frequency identification (RFID) provides an efficient way to the innovation of inventory control strategies. In this paper, by taking the advantage of RFID, we extend the original card system of single manufacturing plant to the multi-echelon inventory network of supply chain distributed in global area. By using the RFID-enable electronic card system, we realize the control strategy of CONWIP, and build the mathematical model of distribution network for the control strategy of CONWIP. To validate the efficiency of the CONWIP strategy, a simulation system of a supply chain with three echelon inventories is developed. Using this system, we compare the strategy with the (r, Q) strategy based on the RFID. Simulation results show that the RFID-enable CONWIP strategy can lower the inventory level and raise the service level effectively.

Key words: radio frequency identification; supply chain; CONWIP strategy; electronic card; simulation

1 引言(Introduction)

多阶段生产存储系统的定量在制品法(constant work-in-process, CONWIP)控制策略是制造系统中成功应用的库存控制方式. CONWIP系统由Kanban系统演化而来, 所以它具有拉式(pull)生产系统的大量优点, 在单工厂多阶段生产存储系统中, CONWIP系统使用流通卡直接控制系统的在制品(WIP)数量, 能够应用于更广泛的生产环境中^[1]. 特别对于多品种、小批量的生产情况, CONWIP控制策略能够获得更加优

越的性能^[2-5].

2000年后, 为了提高供应链的性能一些学者将CONWIP控制模式应用到供应链管理当中. 文献[6]中将CONWIP SC作为一个产销系统, 供应链上的每个企业相当于单工厂多阶段生产存储系统中的一个加工中心. 系统用一个虚拟的控制中心来取代CONWIP系统中的流通卡, 从而管理零部件或产品的流动以及供应链上每个企业的库存量. 文献通过建立供应链的物流、信息流及资金流的合理数学模型, 比

收稿日期: 2015-03-08; 录用日期: 2015-12-22.

†通信作者. E-mail: hanxiaojunedu@126.com; Tel.: +86 15506036038.

本文责任编辑: 陈增强.

国家自然科学基金重点项目(70931001), 国家自然科学基金面上项目(61273203)资助.

Supported by Major Program of National Natural Science Foundation of China (70931001) and General Projects of National Natural Science Foundation of China (61273203).

较了CONWIP SC和FI SC的性能. 此外文献[7]通过仿真对比了CONWIP及其它控制策略在装配供应链的应用. 但是, 上述研究并没有在多个企业间采用真正的“流通卡”系统, 所谓的“CONWIP”其实只是“订单拉动”或者“合同拉动”, 没有实现真正意义上的“流通卡系统”的远程可视化作用^[8-11].

物联网和射频识别技术(radio frequency identification, RFID)的产生为供应链多级库存网络的性能改善提供了有效途径. RFID能够对库存和途中运输项目进行精确计量和定位^[12-14], 从而为“RFID使能的电子看板”的实现提供了一条技术途径, 那么“RFID使能的供应链多级库存的Push/Pull混合控制策略”就有了实现的可能. 文献[15]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Push/Pull混合控制策略.

但上述策略并不适用于多产品、小批量生产情况, 所以本文在此基础上实现了“RFID使能的CONWIP控制策略”, 是RFID使能Push/Pull混合控制策略的提高与升华. 并开发了三级串行分销网络仿真系统, 该仿真系统运行速度快, 使用方便, 本文主要讨论被仿真的对象, 不对仿真系统的性能进行详细讨论. 图1为RFID使能的CONWIP控制结构.

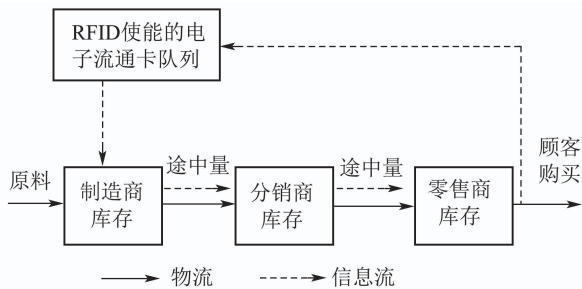


图1 RFID使能的CONWIP控制结构

Fig. 1 The structure of RFID-enable CONWIP control strategy

2 RFID使能的CONWIP策略(RFID-enable CONWIP strategy)

2.1 问题的描述与假设(Description and assumptions of the problem)

基于RFID使能的CONWIP系统, 能够实现供应链上下游节点企业库存情况的实时可视, 可以在真正意义上实现供应链多级库存网络的CONWIP控制. 为将单工厂多阶段生产存储系统CONWIP控制结构推广到广域分布的供应链多级库存网络系统中, 本文对两类系统的结构和运作特点进行对比分析, 如表1所示.

表1 系统特点比较分析

Table 1 The feature comparison of the two kinds of systems

项目	供应链多级存储系统	单工厂生产系统
距离	各企业间距离较远	各个工序间无距离
时间	相邻企业间运输时间长	相邻工序间无运输时间
结构	网状分布结构	树状分布结构

本次研究的供应链为串行供应链, 供应链上各个节点企业之间的产品运输需要一定的时间, 为了便于处理, 本文做了如下假设:

1) 原材料供应充足且及时, 由于小批量生产, 所以不考虑制造商的最大日生产能力, 而且制造商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;

2) 每个顾客的产品需求量为1, 零售商每天顾客的到达数量 x 服从参数为 λ 的泊松分布, 则第 t 天顾客到达数量 X 为 d 的概率函数为

$$P(X = d) = \frac{\lambda^d}{d!} e^{-\lambda}, \quad d = 0, 1, 2, \dots, D. \quad (1)$$

3) 制造商、分销商、零售商均允许缺货, 由于系统总运行成本中包括缺货损失成本, 本次研究只考虑零售商在缺货时产生的相应费用, 若零售商处于缺货状态时顾客到达, 由于此时不能满足顾客的需要, 顾客放弃购买行为, 此时认为一次缺货;

4) 由第三方物流负责运输各节点企业之间的产品, 所以在进行策略比较时不考虑运输成本;

5) 各企业之间可以通过网络订货, 所以不需考虑订货成本.

各个控制策略均要考虑如下4个过程: 订货、发货、运输及到货, 为了方便比较各个策略的优劣, 假设各企业在每天结束时刻发出订货申请, 其上游企业在次天初始时刻发货, 图2显示了各过程对应的时间点, 其中 T_{DR} 为分销商到零售商的运输时间, T_{MD} 为制造商到分销商的运输时间.

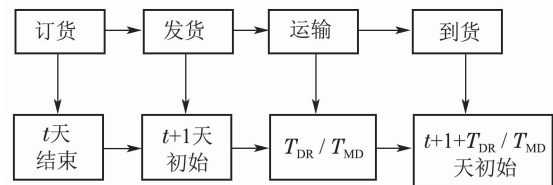


图2 各过程对应的时间点

Fig. 2 The time point of each process

2.2 CONWIP策略的数学模型及其性能评价指标(The mathematical model and the performance evaluation indicators of CONWIP strategy)

为了评价控制策略的优劣, 需要对基于RFID使能

的CONWIP策略建立数学模型及性能评价指标, 本文使用下面的符号和变量:

M : 供应链制造商;

D : 供应链分销商;

R : 供应链零售商;

$t(t = 1, 2, \dots, T)$: 系统运行的天数;

$d_R(t)$: t 天到达零售商的顾客数量;

$R_{DR}(t)$: t 天初始时刻由分销商到达零售商的产品数量;

$R_{MD}(t)$: t 天初始时刻由制造商到达分销商的产品数量;

$S_{DR}(t)$: t 天初始时刻由分销商发向零售商的产品数量;

$S_{MD}(t)$: t 天初始时刻由制造商发往分销商的产品数量;

T_{DR} : 分销商到零售商的运输时间;

T_{MD} : 制造商到分销商的运输时间;

j : 途中运输天数索引;

$u_{DR}(t)$: t 天由分销商到零售商的途中运输量;

$u_{MD}(t)$: t 天由制造商到分销商的途中运输量;

$P_M(t)$: t 天的初始时刻制造商完成的产品数;

$Q_{RD}(t)$: t 天结束时刻零售商向分销商的订货量;

$Q_{DM}(t)$: t 天结束时刻分销商向制造商的订货量;

$I_i(t)$: t 天结束时刻零售商、分销商或制造商的库存量; $i \in (M \cup D \cup R)$;

c_i : 零售商、分销商或制造商的单位产品储存成本; $i \in (M \cup D \cup R)$;

$O_R(t)$: t 天结束时刻零售商的缺货量;

O_s : 零售商单位产品的缺货损失;

$X_R(t)$: t 天结束时刻零售商的销售量;

TN_{\max} : 供应链电子流通卡总数.

1) 库存和缺货量计算.

本文主要通过制造商、分销商及零售商的库存情况来表示整个供应链的状况, 由前面定义的符号, 得到如下方程, 其中零售商存储状态方程为

$$I_R(t) = I_R(t-1) + R_{DR}(t) - d_R(t). \quad (2)$$

分销商存储状态方程:

$$I_D(t) = I_D(t-1) + R_{MD}(t) - S_{DR}(t). \quad (3)$$

制造商存储状态变化方程:

$$I_M(t) = I_M(t-1) + P_M(t) - S_{MD}(t). \quad (4)$$

t 天结束时刻零售商的缺货量为:

当 $d_R(t) \leq I_R(t-1) + R_{DR}(t)$ 时,

$$O_R(t) = 0. \quad (5)$$

当 $d_R(t) > I_R(t-1) + R_{DR}(t)$ 时,

$$O_R(t) = d_R(t) - I_R(t-1) - R_{DR}(t). \quad (6)$$

2) CONWIP控制策略.

RFID使能的CONWIP控制策略是通过RFID使能的电子流通卡数发出生产指令的, t 天结束时刻, 整个供应链产生的空电子流通卡数为

$$APC(t) = TN_{\max} - I_R(t) - I_D(t) - I_M(t) - \sum_{j=1}^{T_{DR}} u_{DR}^j(t) - \sum_{j=1}^{T_{MD}} u_{MD}^j(t). \quad (7)$$

t 天结束时刻供应链产生的空电子流通卡数与 $t+1$ 天初始时刻制造商所完成的产品数 $P_M(t+1)$ 满足关系:

$$P_M(t+1) = APC(t). \quad (8)$$

3) 发货量计算.

t 天初始时刻, 分销商发往零售商的货物数量及制造商发往分销商的货物数量分别为:

当 $Q_{RD}(t-1) < I_D(t-1) + R_{MD}(t)$ 时,

$$S_{DR}(t) = Q_{RD}(t-1); \quad (9)$$

当 $Q_{RD}(t-1) > I_D(t-1) + R_{MD}(t)$ 时,

$$S_{DR}(t) = I_D(t-1) + R_{MD}(t); \quad (10)$$

当 $Q_{DM}(t-1) < I_M(t-1) + P_M(t)$ 时,

$$S_{MD}(t) = Q_{DM}(t-1); \quad (11)$$

当 $Q_{DM}(t-1) > I_M(t-1) + P_M(t)$ 时,

$$S_{MD}(t) = I_M(t-1) + P_M(t). \quad (12)$$

4) 到货量和途中运输量.

分销商到零售商的途中运输量及到货量:

$$R_{DR}(t) = u_{DR}(t - T_{DR}), \quad (13)$$

$$u_{DR}(t-k) \rightarrow u_{DR}(t-k+1),$$

$$k = T_{DR}, T_{DR}-1, \dots, 1, \quad (14)$$

$$u_{DR}(t) = S_{DR}(t). \quad (15)$$

制造商到分销商的途中运输量及到货量:

$$R_{MD}(t) = u_{MD}(t - T_{MD}), \quad (16)$$

$$u_{MD}(t-k) \rightarrow u_{MD}(t-k+1),$$

$$k = T_{MD}, T_{MD}-1, \dots, 1, \quad (17)$$

$$u_{MD}(t) = S_{MD}(t). \quad (18)$$

5) 供应链系统的评价指标.

为了评价各种控制策略的优劣, 系统的主要性能指标有: 总库存成本 E_I , 总缺货损失 E_S , 系统的总成本 E_T 以及顾客满意率 F_T , 下面介绍各个指标如何计算:

总库存成本等于系统运行一个仿真周期时零售

商、分销商、制造商的库存成本之和, 计算公式为

$$E_I = \sum_{t=1}^T (c_R * I_R(t) + c_D * I_D(t) + c_M * I_M(t)). \quad (19)$$

通过对该值的比较, 可以评价出各种不同策略对供应链库存的影响.

系统运行一个周期, 由于零售商不能满足顾客的需要而造成的缺货损失为

$$E_S = \sum_{t=1}^T O_S * O_R(t). \quad (20)$$

通过对该值的比较, 可以看出各策略的服务水平即产品能否满足顾客的需要.

一个周期的总库存成本加总缺货成本为系统的总运行成本, 可以反映系统的总体性能, 是库存和服务水平的综合评价指标, 其计算公式为

$$E_T = E_I + E_S. \quad (21)$$

供应链的满意率只考虑最终节点的满意率(即供应链的服务水平):

$$F_r = \frac{\sum_{t=1}^T X_R(t)}{\sum_{t=1}^T d_R(t)} \times 100\%. \quad (22)$$

由于供应链中各种变量均随时间发生变化以及系统运行时存在各种随机因素, 所以无法给出确定性模型, 如果采用解析法求解模型, 必须对某一些影响较小的变量做部分假设和简化, 使不确定模型转化成确定性模型. 因此, 根据离散事件系统仿真原理^[16], 通过前面建立的仿真模型, 利用计算机对各个策略分别进行仿真, 比较各种策略的优良.

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

3.1 仿真策略(Simulation strategy)

离散事件系统3种比较成熟的仿真方法为: 事件调度法、活动扫描法以及进程交互法. 本系统中, 由于事件类型较少、事件关系比较简单, 因此仿真方法采用事件调度法. 即所有事件放在事件表中, 模型中设有一个时间控制部分, 该部分在事件表中选择最早发生的事件, 将仿真钟修改到该事件发生的时间, 再调用该事件对应的处理程序, 该事件处理完后返回时间控制部分. 这样, 事件的选择和处理不断的进行, 直到仿真终止^[17].

3.2 仿真模型(Simulation model)

构造仿真模型的基本步骤: 1) 确定控制变量、状态变量和统计变量; 2) 确定系统中存在的事件, 编写相应程序; 3) 确定未来事件表; 4) 确定事件的优先权.

本系统的控制变量为 TN_{\max} , 状态变量为各企业

库存量及途中运输量; 统计变量为总库存成本、总缺货损失、总运行成本及顾客满意率.

3.3 仿真程序(Simulation program)

本系统采用面向对象编程技术, 后台语言采用C#, 前台开发工具Microsoft Visual Studio2010, 主要包括顾客类、零售商类、分销商类以及制造商类, 类的成员变量包括各状态变量和统计变量, 各变量随着事件的执行进行更新, 整个程序结构清晰, 较好地实现了仿真模型并可以比较容易地根据实际情况对相应程序进行修改.

4 仿真实验及结果分析(Simulation experiment and result analysis)

4.1 参数设置(Parameters setting)

仿真实验中, 为了验证CONWIP控制策略对供应链多级存储系统性能的影响, 本文将它与RFID使能的 (r, Q) 策略进行对比分析. 连续性盘点库存的 (r, Q) 策略是一种常见的库存管理策略, 在该策略下, 库存管理者对库存进行连续盘点, 当现有库存量降到补货点 r 或 r 以下时, 向上游供应商订批量为 Q 的货物^[18]. 而CONWIP控制策略用电子流通卡的数量来标识整个供应链的产品数量, 每个流通卡代表一个产品, 并通过流通卡授权产品的生产, 因此, 电子流通卡数的确定是CONWIP策略运行效果的关键因素.

实验案例为串行供应链分销网络三级存储系统, 如图3所示. 其中实验案例参数包括系统策略参数和属性参数两种, 系统属性参数包括顾客到达数量泊松分布参数、各节点企业初始库存量、单位存储成本、单位缺货损失等参数均参照实际分销网络系统给定. 系统策略参数即供应链的电子流通卡总数, 该参数通过大量的仿真实验获得.

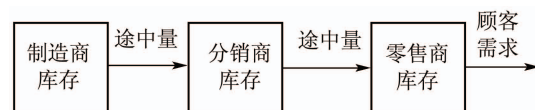


图3 串行供应链分销网络三级存储结构图
Fig. 3 Schematic diagram for the three-echelon inventory system of serial supply chain

本实验重点对单产品进行讨论, 其中系统运行一个周期为100天, 制造商到分销商和分销商到零售商的途中运输时间均为1天. 表2为选定的其中一组参数, 各节点的 r, Q 值取自文献^[19]采用基于仿真的优化方法得到. 本文通过大量的仿真实验获得电子流通卡总数为27时, 系统运行效果较好, 具有较低的运行成本及较高的顾客满意率. 为了验证上述结论, 表3给出了系统运行一个周期, 电子流通卡数不同时, 系统的运行结果.

表 2 仿真实验参数

Table 2 Parameters of the simulation experiment

参数	制造商	分销商	零售商
初始库存	8	8	8
单位库存成本	0.2	0.3	0.4
单位缺货损失	—	—	3
顾客到达数量泊松分布参数	—	—	5
基于RFID的(r, Q)策略参数	(2, 5)	(5, 8)	(9, 7)

表 3 电子流通卡总数对系统运行结果的比较分析

Table 3 The comparison of the total amount of card to the operating results of the system

流通卡总数	库存成本	缺货损失	总运行成本	满意率/%
15	45.5	597	642.5	59
27	165.3	81	246.3	94
32	297.6	33	330.6	97
40	483.7	21	504.7	98

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

对于上述情况, 当整个供应链的流通卡总数为27时, 图4给出了系统运行一个周期内缺货量的情况, 其中CONWIP控制策略缺货15次, 总缺货量为27, (r, Q)控制策略缺货17次, 总缺货量为37.

由于系统运行过程中需要考虑到在每一周期, 存在很多随机因素, 如: 顾客到达的随机性, 车辆运输时间的随机性, 存储系统中突发的各种异常事件等, 所以仅仅运行一个周期的结果反映不出控制策略的优劣, 为了得到平均意义下的结论, 每一组参数在各个策略下均运行80次, 从而观察平均意义下的各统计变量. 表4给出了各统计变量的均值及标准差(保留两位小数). 由表4可以看出CONWIP控制策略总运行成本低于(r, Q)策略, 而且具有较高的满意率.

为比较不同情形, 本文对CONWIP和(r, Q)策略在以下几种情况下分别进行仿真: 1) 三节点库存初始值均设为8, 途中运输时间均为1天; 2) 三节点库存初

始值均设为10, 途中运输时间均为1天; 3) 三节点库存初始值均设为15, 途中运输时间均为1天; 4) 三节点库存初始值均设为8, 制造商到分销商运输时间为3天, 分销商到零售商运输时间为1天; 5) 三节点库存初始值均设为8, 制造商到分销商及分销商到零售商的运输时间均为3天. 运行结果如表5所示.

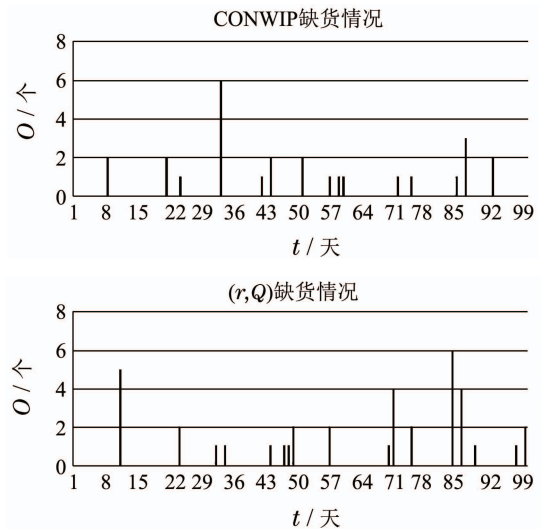


图 4 CONWIP和(r, Q)策略缺货量对比图

Fig. 4 The comparison of shortage quantity of CONWIP and (r, Q) control manners

表 4 各统计变量均值及标准差

Table 4 The average values and their standard deviations of the statistical variables

策略	统计变量	期望	标准差	标准差占期望的百分比/%
CONWIP	库存成本	165.88	22.85	13.78
	缺货损失	115.56	38.63	33.43
	总运行成本	281.44	34.07	12.11
	满意率	91.55	2.33	2.55
(r, Q)	库存成本	146.91	25.4	17.29
	缺货损失	163.26	41.62	25.49
	总运行成本	310.17	33.71	10.87
	满意率	88.39	2.46	2.78

表 5 CONWIP和(r, Q)策略性能对比

Table 5 The comparison of CONWIP and (r, Q) control manners

策略	统计变量	1	2	3	4	5
CONWIP	库存成本	165.88	170.91	211.45	280.08	469.53
	缺货损失	115.56	119.97	112.29	245.67	506.46
	总运行成本	281.44	290.88	323.74	525.75	975.99
	缺货次数	15	17	16	22	48
(r, Q)	库存成本	146.91	157.34	184.33	100.35	93.63
	缺货损失	163.26	161.91	167.61	690.18	728.04
	总运行成本	310.17	319.25	351.94	790.53	821.67
	缺货次数	23	23	23	59	62

通过表5得出以下结论: RFID使能的CONWIP控制策略在前4种情况下的总运行成本均低于 (r, Q) 策略;第5种情况CONWIP控制策略的总运行成本高于 (r, Q) 策略,但 (r, Q) 策略缺货情况严重;根据上述实验,可以看出在串行三级供应链中,当分销商到零售商的运输时间较短时,CONWIP控制策略运行效果较好,而当分销商到零售商运输时间较长时,CONWIP策略具有较高的运行成本。

4.3 多产品仿真结果分析(Simulation results analysis of multi-product)

限于篇幅,本文未对CONWIP控制策略应用于多产品的情况做详细讨论,仅给出当上述存储系统中包括两种产品及3种产品时,CONWIP控制策略与 (r, Q) 控制策略仿真结果的对比.表6-7为其他产品实验参数设置,表8给出了系统包括两种产品及3种产品时各统计变量的均值及标准差(保留两位小数).其中CONWIP控制策略电子流通卡总数分别为60及91.

表6 第2种产品参数设置

Table 6 Parameters of the second kind of product

参数	制造商	分销商	零售商
初始库存	10	10	10
单位库存成本	0.5	0.4	0.3
单位缺货损失	—	—	6
顾客到达数量	—	—	3
泊松分布参数	—	—	3
(r, Q) 策略参数	(4, 5)	(3, 7)	(10, 6)

表7 第3种产品参数设置

Table 7 Parameters of the third kind of product

参数	制造商	分销商	零售商
初始库存	6	6	6
单位库存成本	0.7	1	0.5
单位缺货损失	—	—	2
顾客到达数量	—	—	7
泊松分布参数	—	—	7
(r, Q) 策略参数	(9, 8)	(8, 6)	(7, 5)

通过上述表格可以看出:当整个系统包括两种及3种产品时,RFID使能的CONWIP控制策略能够获得较低的存储成本及总运行成本,并能够获得较高的顾客满意率.仿真结果说明了RFID使能的CONWIP控制策略在多产品情况时的适用性及优越性.

5 结束语(Conclusion)

由于CONWIP系统适用于更广泛的应用环境,

特别是多品种产品的情况,所以本文主要研究了RFID使能的供应链CONWIP控制系统.根据三级串行供应链的特点,建立了RFID使能的CONWIP控制策略仿真模型,通过对实际案例的仿真与 (r, Q) 策略进行比较,验证了基于RFID使能的CONWIP控制系统在一定条件下能够降低整个串行供应链的总成本,仿真结果对实际系统具有重要的指导意义.下一步将重点研究各种网状供应链在多产品的情况下CONWIP策略的运行情况,从而判断该策略在何种情况下能够更好地应用于实际.

表8 仿真结果

Table 8 Simulation results

类别	策略	统计变量	期望	标准差
两种产品	CONWIP	库存成本	380.74	35.38
		缺货损失	295.29	74.69
		总运行成本	676.03	70.15
		满意率	91.71	1.65
两种产品	(r, Q)	库存成本	440.43	38.38
		缺货损失	309.75	72
		总运行成本	750.18	69.65
		满意率	87.47	1.73
3种产品	CONWIP	库存成本	637.59	64.52
		缺货损失	420.25	53.54
		总运行成本	1057.84	86.63
		满意率	90.28	1.53
3种产品	(r, Q)	库存成本	669.63	70.31
		缺货损失	463.19	85.84
		总运行成本	1132.82	87.13
		满意率	87.56	1.75

参考文献(References):

- [1] HUANG M, WANG D W, IP W H. Simulation study of CONWIP for a cold rolling plant [J]. *International Journal of Production Economics*, 1998, 54(1): 257 – 266.
- [2] HUANG G D, CHEN J, WANG X L. A simulation study of CONWIP assembly with multi-loop in mass production, multi-products and low volume and OKP environments [J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(14): 4160 – 4175.
- [3] KUMAR S, ANANTH K. Performance analysis of CONWIP systems with batch size constraints [J]. *Annals of Operations Research*, 2013, 209(1): 85 – 114.
- [4] PARK C W, LEE H S. Performance evaluation of a multi-product CONWIP assembly system with correlated external demands [J]. *International Journal of Production Economics*, 2013, 144(1): 334 – 344.
- [5] CHUKWUNONYELUM E O, WANG J Y, JOSEPH K. A comparison of HK-CONWIP and BK-CONWIP control strategies in a multi-product manufacturing system [J]. *Operations Research Perspectives*, 2015, 2(1): 137 – 149.
- [6] OVALLE O R, MARQUEZ A C. Exploring the utilization of a CONWIP system for supply chain management – A comparison with fully integrated supply chains [J]. *International Journal of Production Economics*, 2003, 83(2): 195 – 215.

- [7] TAKAHASHI K, HIROTANI M D. Comparing CONWIP, synchronized CONWIP, and Kanban in complex supply chains [J]. *International Journal of Production Economics*, 2005, 93-94(Special): 25 - 40.
- [8] CACHON G. The allocation of inventory risk in a supply chain: Push, pull, and advance-purchase discount contracts [J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 222 - 238.
- [9] WANG S, SARKER B R. Optimal models for a multi-stage supply chain system controlled by kanban under just-in-time philosophy [J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 172(1): 179 - 200.
- [10] 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.
- [11] AHN H, KAMINSKY P. Production and distribution policy in a two-stage stochastic push-pull supply chain [J]. *IIE Transactions*, 2005, 37(7): 609 - 621.
- [12] SARAC A, ABSI N, DAUZERE-PERES S. A literature review on the impact of RFID technologies on supply chain management [J]. *International Journal of Production Economics*, 2010, 128(1): 77 - 95.
- [13] SARI K. Exploring the impacts of radio frequency identification (RFID) technology on supply chain performance [J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 207(1): 174 - 183.
- [14] PEI J, KLABJAN D. Inventory control in serial systems under radio frequency identification [J]. *International Journal of Production Economics*, 2010, 123(1): 118 - 136.
- [15] LI Guojia, WANG Dingwei. Design and simulation of radio frequency identification-enabled hybrid Push/Pull strategy for multi-echelon inventory of supply chain [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(10): 1302 - 1309.
(李国家, 汪定伟. 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 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(10): 1302 - 1309.)
- [16] LI Xin, WANG Wanshan, HAN Yang, et al. Novel flexible supply chain simulation system [J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(6): 1270 - 1278.
(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.)
- [17] ZHAO Xiaomin. Modeling and simulation on the MR closed-loop supply chain system of uncertain remanufacturing [J]. *Journal of Management Science*, 2012, 25(6): 23 - 34.
(赵晓敏. 再制造不确定的MR闭环供应链系统建模与仿真研究 [J]. 管理科学, 2012, 25(6): 23 - 34.)
- [18] GUAN R X. *Optimization and coordination of supply chain under (r, Q) policies* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [19] GAO Jingmei, WANG Dingwei. Simulation-based optimization on three-echelon network stochastic inventory control policies [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(11): 1218 - 1224.
(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.)

作者简介:

韩晓菊 (1981-), 女, 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: hanxiaojunedu@126.com;

汪定伟 (1948-), 男, 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.