

1-2-2019

Design and Realization of RFID-Enabled CONWIP Strategy for Multi-Echelon Inventory of Distribution Network

Xiaoju Han

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

Dingwei Wang

1.College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Design and Realization of RFID-Enabled CONWIP Strategy for Multi-Echelon Inventory of Distribution Network

Abstract

Abstract: Because the RFID technology can visualize the quantity on the way and the inventory status of the supply chain remotely and in real-time, a *RFID-enabled electronic card system is designed. The CONWIP control strategy of multi-echelon production inventory system is extended to the distribution network of supply chain. The CONWIP control strategy model is established, and experimental simulation system is exploited.* The strategy is compared with the (r,Q) and Push strategies under different network structures of supply chain. The strategies' influences on the performance of supply chain are verified by calculating the evaluation index. Simulation results show that the RFID-Enabled CONWIP strategy can improve the performance of distribution networks of supply chain under a certain condition.

Keywords

supply chain, multi-echelon inventory, RFID, electronic card, CONWIP

Recommended Citation

Han Xiaojun, Wang Dingwei. Design and Realization of RFID-Enabled CONWIP Strategy for Multi-Echelon Inventory of Distribution Network[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(1): 257-265.

分销网络存储系统 RFID 使能的 CONWIP 策略的设计与实现

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: 由于无线射频识别 RFID 技术能够实现对供应链网络的途中量及库存量的远程实时可视, 设计了基于 RFID 使能的电子流通卡系统, 将多阶段生产存储系统中的 CONWIP(Constant work-in-process)控制策略推广到供应链分销网络中, 建立了 CONWIP 控制策略的模型, 开发了实验仿真系统, 使用该系统在不同的供应链网络结构下, 将其与(r, Q)、Push 等策略进行比较, 通过对评价指标的计算来验证各个策略对供应链性能的影响。仿真结果表明, 基于 RFID 使能的 CONWIP 控制策略在一定条件下, 能够有效改善供应链分销网络性能。

关键词: 供应链; 多级库存; 射频识别; 电子流通卡; CONWIP

中图分类号: TP319.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 01-0257-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201801033

Design and Realization of RFID-Enabled CONWIP Strategy for Multi-Echelon Inventory of Distribution Network

Han Xiaoju^{1,2}, Wang Dingwei¹

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. School of Automation Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: Because the RFID technology can visualize the quantity on the way and the inventory status of the supply chain remotely and in real-time, a RFID-enabled electronic card system is designed. The CONWIP control strategy of multi-echelon production inventory system is extended to the distribution network of supply chain. The CONWIP control strategy model is established, and experimental simulation system is exploited. The strategy is compared with the (r,Q) and Push strategies under different network structures of supply chain. The strategies' influences on the performance of supply chain are verified by calculating the evaluation index. Simulation results show that the RFID-Enabled CONWIP strategy can improve the performance of distribution networks of supply chain under a certain condition.

Keywords: supply chain; multi-echelon inventory; RFID; electronic card; CONWIP

引言

供应链中库存管理的主要形式之一为多级库存网络(Multi-Echelon Inventory Networks)^[1-2]。例



收稿日期: 2015-12-21 修回日期: 2016-02-25;

基金项目: 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);

作者简介: 韩晓菊(1981-), 女, 辽宁凌源, 博士, 讲师, 研究方向为 RFID 技术在供应链管理中的应用。

如, 由“制造商成品库—分销中心仓库—零售商库存”构成的分销库存网络, “原料提供商库存—采购中心仓库—制造商原料库”构成的原料库存网络, “零件制造商库存—部件制造商库存—产品组装商库存”构成的制造库存网络, 都是多级库存的典型例子。文献[3]中给出了一个典型的供应链分销网络的三级库存系统的例子。

由于多级库存间的强的关联, 安全库存可以分

<http://www.china-simulation.com>

布在不同级的仓库中，同级库存也可以相互支援，因此多级库存系统可以比单个库存效率更高^[4-5]。因此，近些年来，多级供应链库存管理构成了学术界的一个重点的研究领域之一^[6]。然而，由于供应链本身具有动态性和随机性的特点^[7]，使得供应链管理当中存在大量的不确定性，造成了整个供应链服务水平低下、库存成本过高。

由于信息技术的快速发展，无线射频识别(RFID)技术逐渐应用于供应链管理中，通过提高物流效率、增加信息精度以及减少库存损耗等改进了供应链的性能^[8-10]。由于RFID系统能够实时监控供应链上的所有环节，所以已经成功的应用于多个领域，沃尔玛就是其中一个典型的代表，借助于RFID技术，沃尔玛大大降低了缺货率并且补给速度得到了大幅度的提高^[11]。

文献[12]设计了RFID使能的电子看板系统，基于RFID技术，借鉴单工厂多阶段生产存储系统的Push/Pull策略，以供应链分销网络三级库存系统为例，在不同阶段分别采用Push或者Pull方式作为库存控制策略并开发了多级分销网络仿真系统。验证了RFID使能的Push/Pull混合策略的可行性和有效性。

但上述系统并不适用于单件、小批量生产，而由于CONWIP系统是为了克服Kanban系统只适用于批量生产的局限性而提出的，因此，它可以适用于更加广泛的环境^[13]。CONWIP系统以在制品数量为控制变量，能够保证合理的在制品量，但并不是在生产线的各工序均采用拉式方式。作为Kanban的改进方法，CONWIP比Kanban具有更加优越的性能^[14-16]。

由于CONWIP策略已经在生产领域取得了显著成效，近几年来，人们将其控制领域扩展到供应链环境当中。有学者将其在串行供应链中的应用进行了详细的阐述并且进行了仿真分析，取得了不错的效果。文献[17]详细探讨并实现了CONWIP控制策略在串行供应链中的仿真情况。但上述系统并没有真正意义上实现流通卡的远程实时可见。基于

上述工作的启迪，本文针对广域分布的供应链分销网络设计了RFID使能的电子流通卡系统，基于电子流通卡，开发了供应链分销网络的仿真系统，通过与Push以及(r, Q)策略的比较，验证了该系统在一定条件下的优越性。

1 RFID使能的电子流通卡系统

为了实现供应链分销网络的流通卡系统，必须解决流通卡的远程实时可视问题。而RFID技术利用贴在产品或集装箱上的电子标签及布置在仓库的阅读器可以帮助实现供应链的可视化。

本文所设计的RFID使能的电子流通卡系统具体实现的功能如下：

- 1) 将供应链的流通卡总数、空电子流通卡数、途中运输产品数量及各个节点企业的实时库存量等数据通过数据库服务器集中起来；
 - 2) 具有权限管理功能，管理员分别包括系统管理员及企业管理员；系统管理员具有全局管理权限，可以对各个企业的管理人员及运行数据进行管理，而企业管理员仅能修改本企业的相关数据，能够查看供应链中其它企业的运行数据，但不能修改；
 - 3) 供应链上的各企业能够使用RFID阅读器实现产品出入库、库存查询、途中量查询等功能；
 - 4) 供应链中制造商需要完成产品的登记功能，即将电子标签贴到产品或集装箱上，根据集装箱的规格装入不同的产品，产品只有登记后才能在供应链中流通；
 - 5) 建立网络电子流通卡，网页上显示各企业的需求信息，简单方便。根据需求信息启动流通卡管理程序；
 - 6) 从数据库服务器获取途中运输量或库存量信息，实时更新电子流通卡相关数据。
- 流通卡系统业务流程如图1所示。

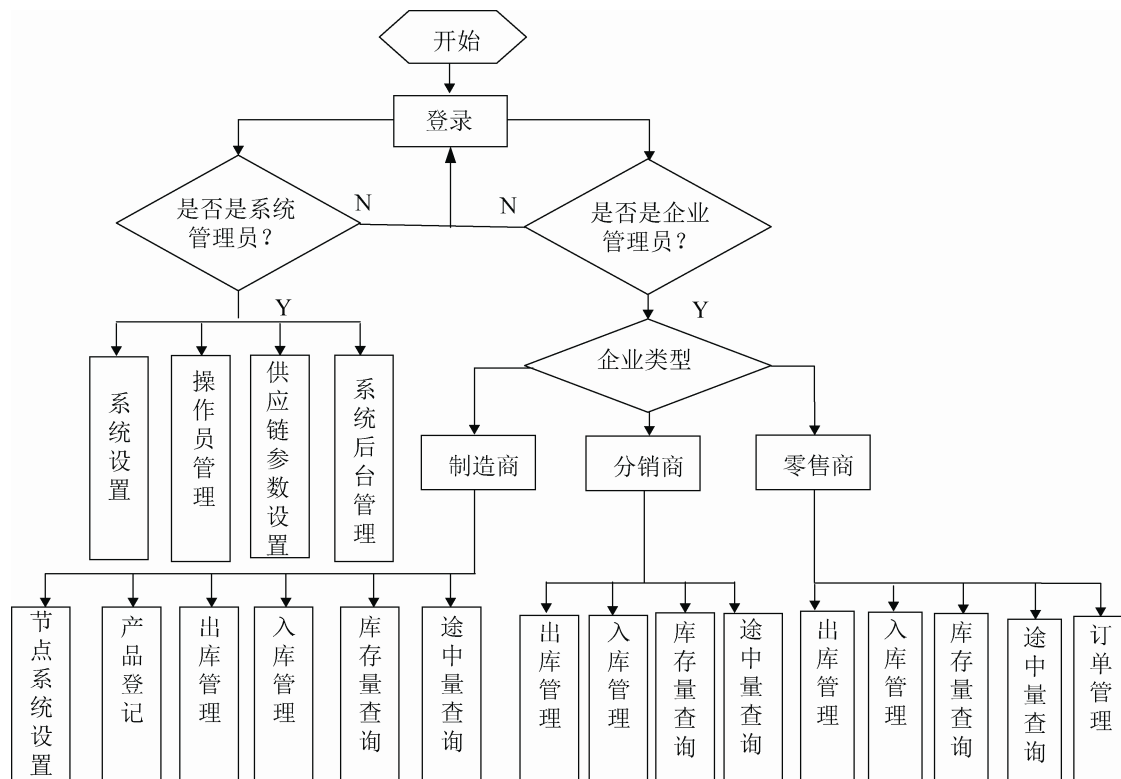


图 1 电子流通卡系统功能流程图

Fig.1 Electronic Card system functional flowchart

2 CONWIP 控制策略设计及仿真模型实现

生产控制系统包括两种典型的系统,分别为推式(push)生产系统及拉式(pull)生产系统,推式生产系统的典型应用为 MRP 及 MRP-II,拉式生产系统的典型应用为 kanban 生产系统。

CONWIP 系统是由 Kanban 系统演化而来,所以继承了拉式生产系统的优点。在 CONWIP 系统中,流通卡在整条生产线上移动,传递生产信息,即在生产线的起点,通过流通卡授权产品的生产。当有订单到达时,首先查看有没有可用的流通卡,若有,从中取出流通卡,并与订单的产品相匹配,流通卡和产品一起通过整条生产线,当在生产线的终点有产品输出时,流通卡被释放并返回生产线的起点。如果没有空流通卡存在,任何订单均不能被处理,订单排入未交付订单队列。整个系统遵循先到先服务原则^[17]。

2.1 RFID 使能的 CONWIP 控制策略设计

RFID 集成系统将 RFID 的硬件系统和软件系统集成于一体,完成物品的自动识别、信息获取及供应链优化协调管理^[18]。基于该系统的实时信息,可以精确掌握各节点企业的库存量及途中运输量,通过调整各个企业的库存规模,从而降低整个供应链的成本。

基于 RFID 使能的 CONWIP 控制策略是通过产品的取出来拉动整个系统运行的,避免了由于市场环境的变化,造成供应链各节点企业沟通不协调,从而引起多阶段响应时间的延长。物料投入量可以直接依据整个供应链的空电子流通卡数来决定。而“空流通卡数=流通卡总数-库中存储量-途中运输量”。简化公式如下:

$$E(t) = C - I(t) - S(t) \quad (1)$$

式中, $E(t)$ 为整个供应链产生的空电子流通卡数, C 为供应链总电子流通卡数, $I(t)$ 为 t 时刻供应链中所有企业的库存量, $S(t)$ 为 t 时刻供应链中的途中

运输量。本策略通过调整供应链的流通卡总数来降低库存成本、提高服务水平。本系统以由制造商、一级或多级分销商及零售商形成的供应链为例来说明 RFID 使能的 CONWIP 控制策略的设计。

2.2 仿真模型实现

由于整个供应链系统的复杂性,一般的情况下难以对其进行建模研究,为解决这一问题,离散事件仿真成为分析和设计问题中广泛使用的工具。离散事件仿真方法包括以下 3 种:事件调度法、活动扫描法以及进程交互法。由于本系统中事件类型较少,并且事件之间的关系简单,所以采用的方法为事件调度法。

供应链分销网络仿真系统采用面向对象编程技术,编程语言为 C#, 开发平台 Microsoft Visual Studio 2010, 对象类由零售商类、分销商类、制造商类及统计类构成,程序简单易读并可根据实际情况进行相应的修改。本文开发的供应链分销网络系统的仿真平台能够适用于各种结构、各种参数供应链多级库存系统,实验仿真平台如图 2 所示。



图 2 系统仿真平台界面
Fig.2 Simulation platform interface

3 CONWIP 控制策略的数学模型

本文借鉴 CONWIP 控制策略在单工厂中的应

用,建立了供应链分销网络的 RFID 使能的 CONWIP 控制策略的数学模型,在建立数学模型过程中,首先应考虑到单工厂多阶段生产存储系统与供应链分销网络存储系统的区别。所以本文具体分析了两种存储系统在运行方式及结构的差别:

1) 途中运输时间

单工厂存储系统由于各个工序间距离很近,所以零部件在相邻工序间无运输时间;而供应链中的各个节点企业广域分布,一般距离较远,所以产品在上下游企业间的运输需要若干天或若干周。因此,在建立数学模型时,必须考虑到上下游企业间的途中运输量。

2) 两种存储系统的结构

单工厂生产存储系统的结构为树状,零部件一般汇合到同一个下游生产或装配工序;而供应链存储系统的结构为网状,由于存在多个分销商及零售商,一个节点企业需要给多个下游企业供货,并且一个下游企业需要由多个上游节点企业供货,并且单工厂的需求点仅有一个,而供应链中可能有多个最终需求点,所以在建立供应链分销网络的数学模型时,需要考虑到多个分支企业间的物流分配问题。

在介绍和讨论数学模型及性能评价指标之前,首先描述一下供应链中各个变量的符号及定义,其中 M 、 D 和 R 分别表示制造商、分销商和零售商的集合, i 表示供应链上的各节点企业, $i \in (MUDUR)$ 。

$t(t=1,2,\dots,T)$: 系统运行的天数;

D_i : 由节点 i 供货的下游节点集合, $i \in (MUD)$;

U_i : 给节点 i 供货的上游节点集合, $i \in (DUR)$;

$I_i(t)$: t 天节点 i 的库存量, $i \in (MUDUR)$;

$P_i(t)$: t 天节点 i 的生产量, $i \in M$;

c_i : 节点 i 单位产品储存成本; $i \in (MUDUR)$;

$d_i(t)$: t 天节点 i 的需求量, $i \in (MUDUR)$;

$g_i(t)$: t 天到节点 i 顾客需要的产品数, $i \in R$;

$X_i(t)$: t 天节点 i 的实际销售量, $i \in R$;

$O_i(t)$: t 天节点 i 的缺货量, $i \in R$;

O_{S_i} : 节点 i 缺货时单位产品的损失; $i \in R$;

$R_i(t)$: t 天节点 i 的补货量, $i \in (M \cup D \cup R)$;

$S_{ij}(t)$: t 天由节点 i 发往节点 j 的产品数量, (i, j) 是具有定供货关系的节点对;

$A_{ij}(t)$: t 天由节点 i 到达节点 j 的产品数量, (i, j) 是具有定供货关系的节点对;

$\alpha_{ij}(t)$: t 天节点 i 向节点 j 供货的比例系数, (i, j) 为具有定供货关系的节点对;

$\beta_i(t)$: t 天空电子流通卡的分配系数, $i \in M$;

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

τ_{ij} : 节点 i 到节点 j 的运输时间, (i, j) 为具有定供货关系的节点对;

TN_{max} : 供应链中的电子流通卡总数。

(1) 需求量计算

$$d_i(t) = g_i(t), i \in R \quad (2)$$

$$d_i(t) = \sum_{j \in D_i} \alpha_{ij}(t) R_j(t), i \in (M \cup D) \quad (3)$$

下游每一个企业的供货量由供货比例系数来决定, 供货比例系数采用移动平均法计算。

(2) 供货比例系数计算

$$\alpha_{ij}(t) = \frac{\alpha_{ij}(t-1) + \alpha_{ij}(t-2) + \dots + \alpha_{ij}(t-a)}{a}, \quad i \in (M \cup D) \quad (4)$$

其中 a 为常数, 并且

$$\sum_{j \in D_i} \alpha_{ij}(t) = 1 \quad (5)$$

(3) 库存和缺货量计算

对于供应链中的所有零售商, 库存和缺货量如下式计算:

$$I_i(t-1) + \sum_{j \in U_i} A_{ji}(t) > d_i(t) \text{ 时}, \quad I_i(t) = I_i(t-1) + \sum_{j \in U_i} A_{ji}(t) - d_i(t) \quad (6)$$

$$I_i(t-1) + \sum_{j \in U_i} A_{ji}(t) < d_i(t) \text{ 时}, \quad O_i(t) = d_i(t) - (I_i(t-1) + \sum_{j \in U_i} A_{ji}(t)) \quad (7)$$

当存在缺货情况时, 零售商库存量为 0。

供应链中的制造商和分销商, 库存如下:

$$I_i(t) = I_i(t-1) + \sum_{j \in U_i} A_{ji}(t) - \sum_{j \in D_i} S_{ij}(t), i \in D \quad (8)$$

$$I_i(t) = I_i(t-1) + R_i(t) - \sum_{j \in D_i} S_{ij}(t), i \in M \quad (9)$$

(4) CONWIP 控制策略

依据 CONWIP 控制策略, t 天结束时刻整个供应链产生的空电子流通卡数为:

$$APC(t) = TN_{max} - \sum_{i \in M, D, R} I_i(t) - \sum_{i \in M, D} \sum_{j \in D_i} \sum_{T=1}^{\tau_{ij}} w_{ij}^T(t) \quad (10)$$

则 $t+1$ 天的初始时刻, 各个制造商的补货量即生产量为:

$$P_i(t+1) = R_i(t+1) = \beta_i(t) \cdot APC(t), i \in M \quad (11)$$

其中, 分配系数 $\beta_i(t)$ 的自学习公式为:

$$\beta_i(t) = \rho \beta_i(t-1) + (1-\rho) \frac{\sum_{j \in D_i} S_{ij}(t-1)}{\sum_{i \in M} \sum_{j \in D_i} S_{ij}(t-1)} \quad (12)$$

式中: ρ 为记忆系数, 仿真实验中 $\rho=0.9$ 。

(5) 发货量计算

由于 RFID 的作用, 订单能够实时的到达上游节点, 则 t 天初始时刻, 各个分销商到零售商的发货量为:

$$S_{ij}(t) = \begin{cases} \alpha_{ij}(t) R_j(t), I_i(t-1) + \sum_{j \in U_i} A_{ji}(t) > \sum_{j \in D_i} R_j(t) \\ (I_i(t-1) + \sum_{j \in U_i} A_{ji}(t)) * \alpha_{ij}(t), \text{其它} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $i \in D$ 。

各个制造商到分销商的发货量为:

$$S_{ij}(t) = \begin{cases} \alpha_{ij}(t) R_j(t), I_i(t-1) + P_i(t) > \sum_{j \in D_i} R_j \\ (I_i(t-1) + P_i(t)) * \alpha_{ij}(t), \text{其它} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $i \in M$ 。

(6) 到货量及途中运输量计算

$$A_{ij}(t) = w_{ij}(t - \tau_{ij}) \quad (15)$$

$$w_{ij}(t-k) \rightarrow w_{ij}(t-k+1), k = \tau_{ij}, \tau_{ij}-1, \dots, 1 \quad (16)$$

$$w_{ij}(t) = S_{ij}(t) \quad (17)$$

(i, j) 为具有定供货关系的节点对, 上述式子说明了两个节点之间的运输过程。

(7) 系统的评价指标

为了反映控制策略的好坏, 本系统采用如下性能指标: 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_r , 计算如下:

系统运行一个周期的总库存成本为:

$$E_I = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i \in R, D, M} c_i \cdot I_i(t) \right) \quad (18)$$

系统运行一个周期的总缺货损失为:

$$E_S = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in R} O_{S_i} \cdot O_i(t) \quad (19)$$

系统运行一个周期的总成本为总库存成本加上总缺货损失, 即:

$$E_T = E_I + E_S \quad (20)$$

供应链的满意率只考虑最终节点即零售商的满意率(供应链的服务水平):

$$F_r = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i \in R} X_i(t)}{\sum_{t=1}^T \sum_{i \in R} d_i(t)} \times 100\% \quad (21)$$

4 仿真实验与结果分析

4.1 仿真实验参数设置

为评价 CONWIP 控制策略对供应链多级存储系统的性能影响, 本文分别对多种结构的供应链分销网络进行仿真实验, 限于篇幅, 本文采用图 3 中的 4 种系统结构。

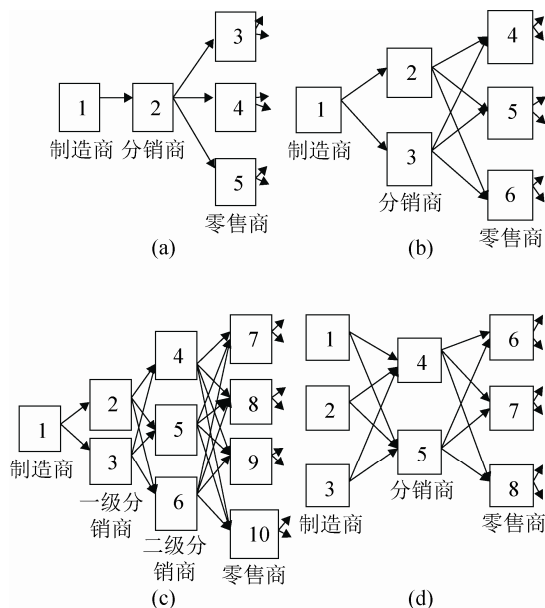


图3 供应链分销网络结构图

Fig.3 Structure diagram of supply chain distribution network

仿真实验中各个零售商的顾客需求是服从泊松分布的随机变量, 使用 CONWIP 策略时电子流通卡总数通过实验确定, 4 种结构的流通卡总数分别为: 66、96、90、96; 制造商到一级分销商运输时间为 3 天, 其它运输时间均为 1 天, 上述 4 个系统的具体参数设置如表 1 所示, 系统运行一个周期为 100 天。

4.2 仿真结果的比较分析

为了验证 RFID 使能的 CONWIP 控制策略的有效性和适用性, 本文将其与 RFID 使能的 (r, Q) 、Push 策略进行比较。其中连续性盘点库存的 (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^[19]。本文中各节点的 r 、 Q 值来自文献[3]采用基于仿真的优化方法得到。而生产存储的 Push 控制策略是用物料的投入来推动物流系统运行的, 物料的投入量是按照: “净需求量=毛需求量—在线存储量”来计算的。

考虑到系统的随机因素较多, 所以每种结构在各策略下分别运行 80 次, 从而得到各项统计变量的均值, 各仿真结果如表 2 所示。

(1)由表 2 可以看出, 当供应链结构和各个参数相同时, 基于 RFID 使能的 CONWIP 控制策略的供应链分销网络总运行成本低于基于 RFID 使能的 (r, Q) 策略与 Push 策略, 并且顾客满意率在 b、d 两种结构时高于另外两种控制策略, 而 a、c 两种结构的情况下, Push 策略由于过高的存储造成顾客满意率最高; 图 4 说明在一定供应链的结构下, CONWIP 控制策略的销售量最多。上述实验验证了 CONWIP 控制策略在一定结构下的优越性;

(2)通过实验得到, 基于 RFID 使能的 CONWIP 控制策略能够根据库存状态和市场需求状况来设置供应链的电子流通卡总数, 具有较好的灵活性和适应性。

另外通过大量实验发现:

(1) 除了控制策略本身影响系统性能外, 相同的控制策略下, 不同的策略参数对系统性能也有较大的影响;

(2) 同一策略下, 库存成本和缺货损失在一定取值范围内是相互矛盾的, 在一定范围内, 由于策略参数的改变而使缺货损失降低时, 库存成本会相应提高, 反之亦然。

表 1 4 种系统的参数设置
Tab.1 Parameters of the four systems

参数	结构	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
初始库存量	a	15	15	8	8	8					
	b	10	8	8	8	8	8				
	c	20	10	10	10	10	10	5	5	5	5
	d	10	10	10	8	8	8	8	8		
单位库存成本	a	0.2	0.3	0.5	0.6	0.8					
	b	0.4	0.5	0.6	0.4	0.7	0.6				
	c	0.2	0.5	0.6	0.8	0.3	0.7	0.7	0.4	0.6	0.5
	d	0.4	0.3	0.7	0.5	0.6	0.4	0.7	0.6		
单位缺货损失	a			6	6	6					
	b				6	6	6				
	c							3	3	3	3
	d						6	6	6		
顾客到达数量泊松分布参数	a			3	4	2					
	b				3	4	5				
	c							2	4	5	1
	d						3	4	5		
基于 RFID 的(r,Q)策略参数	a	(4, 8)	(7, 8)	(8, 4)	(7, 4)	(3,3)					
	b	(6, 7)	(13, 13)	(14, 13)	(6, 5)	(8,6)	(8,6)				
	c	(3, 7)	(3, 8)	(5, 3)	(4, 4)	(7,3)	(4,8)	(4,5)	(3,5)	(5,9)	(2,6)
	d	(2, 8)	(5, 3)	(2,3)	(12,11)	(12,12)	(6,9)	(10,7)	(14,12)		

表 2 各个策略下的统计变量
Tab.2 Statistical variables for each strategy

控制策略	库存成本	标准差	缺货损失	标准差	总成本	标准差	满意率	标准差	
a (r, Q) Push	CONWIP	516.8	51.4	555.1	119.9	1071.9	127.3	89.0	2.0
	(r, Q)	545.8	85.5	785.8	179.6	1331.6	143.6	84.8	2.9
	Push	1256.7	132.3	208.6	69.3	1465.4	184.3	95.6	1.4
b (r,Q) Push	CONWIP	1025.9	101.2	458.0	106.8	1483.9	104.2	93.0	1.4
	(r,Q)	311.9	42.0	1436.1	207.5	1748.0	180.9	79.2	2.4
	Push	3258.9	290.6	989.5	106.5	4248.4	288.5	85.7	1.4
c (r,Q) Push	CONWIP	606.4	64.9	816.1	101.6	1422.5	86.7	76.7	2.1
	(r,Q)	688.6	70.7	785.1	109.6	1473.7	88.8	77.6	2.3
	Push	5128.9	775.4	328.7	56.5	5457.6	772.1	90.2	1.6
d (r,Q) Push	CONWIP	1040.6	101.9	462.2	115.5	1502.8	107.8	93.0	1.5
	(r,Q)	1096.5	79.0	809.6	170.9	1906.1	126.6	88.1	2.1
	Push	3079.8	392.7	1516.0	138.6	4595.8	409.5	78.1	1.9

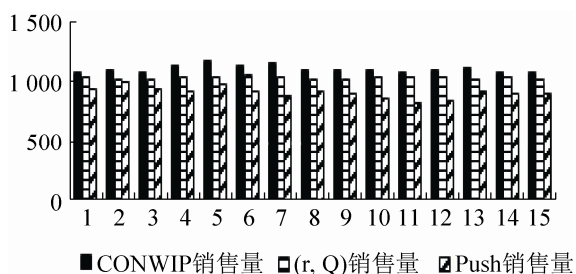


图4 d结构三种策略销售量对比

Fig.4 Sales comparison of three strategies for d structure

5 结论

由于 RFID 技术的远程实时可视性, 本文基于该技术设计了 RFID 使能的电子流通卡系统, 将在多阶段生产存储系统中成功应用的 CONWIP 控制策略推广到供应链分销网络系统中, 建立了供应链分销网络的 CONWIP 控制策略模型, 并开发了仿真系统, 借助于该系统, 可以评价 CONWIP 控制策略对供应链分销网络性能的影响。本实验中, 在供应链多种结构下, 通过与 (r, Q) 及 Push 策略进行对比分析, 验证了基于 RFID 的 CONWIP 控制策略在一定条件下能够有效改进供应链分销网络的性能, 从而为降低供应链的总运行成本提供了一种有效方法, 该方法应该能够应用于供应链库存管理的实践中。在下一步研究中, 将重点研究供应链网络在多种产品需求的情况下, CONWIP 控制策略的运行情况。

供应链多级库存控制是一个重要的研究领域, 对于它的研究还处于初级阶段。经济社会的发展, 市场竞争的日益激烈对供应链库存管理提出了新的更高的要求, 同时科技的进步与发展, 也为供应链库存管理的改进提供了新的可能和选择。为更好迎接和应对这些挑战, 从本文的研究视角出发, 仍有许多工作需要进一步展开和深入。

参考文献:

- [1] Moinzadeh K. A multi-echelon inventory system with information exchange[J]. *Management Science* (S0025-1909), 2002, 48(3): 414-426.
- [2] 赵晓煜, 汪定伟. 供应链中二级分销网络的优化设计模型[J]. *管理科学学报*, 2001, 4(4): 22-26.

Zhao X Y, Wang D W. Optimization model for bi-level distribution network design in supply chain management [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2001, 4(4): 22-26.

- [3] 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 J M, Wang D W. Simulation-based optimization on three-echelon network stochastic inventory control policies [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(11): 1218-1224.
- [4] Kiesmüller G P, De Kok T G, Smits S R, et al. Evaluation of divergent N-echelon (s,nQ)-policies under compound renewal demand[J]. *OR Spectrum* (S0171-6468), 2004, 26(4): 547-577.
- [5] Schneider H. Effect of service levels on order-points and order-levels in inventory models[J]. *International Journal of Production Research* (S0020-7543), 1981, 19: 615-631.
- [6] Lagodimos A G, Koukoumialos S. Service performance of two-echelon supply chains under linear rationing[J]. *International Journal of Production Economics* (S0925-5273), 2008, 112(1): 869-884.
- [7] 高镜媚, 汪定伟. 基于仿真的优化及其在多级库存系统中的应用[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(22): 7051-7056.
- Gao J M, Wang D W. Simulation-based Optimization and Its Application in Multi-echelon Inventory System [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(22): 7051-7056.
- [8] 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* (S0925-5273), 2010, 128(1): 77-95.
- [9] Zhu X, Mukhopadhyay S, Kurata H. A review of RFID technology and its managerial applications in different industries[J]. *Journal Engineering and Technology Management* (S0923-4748), 2012, 29(1): 152-167.
- [10] Sari K. Exploring the impacts of radio frequency identification(RFID) technology on supply chain performance[J]. *European Journal of Operational Research* (S0377-2217), 2010, 207(1): 174-183.
- [11] 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* (S0925-5273), 2008, 112(2): 577-586.
- [12] 李国家, 汪定伟. 供应链库存的 RFID 使能的 Push/Pull 控制策略优化[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(3): 336-341.

- Li G J, Wang D W. Simulation-Based Optimization on RFID-Enabled Push/Pull Control Strategy for Supply Chain[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2015, 36(3): 336-341.
- [13] Huang M, Wang D W, Ip W H. Simulation study of CONWIP for a cold rolling plant[J]. *International Journal of Production Economics (S0925-5273)*, 1998, 54(1): 257-266.
- [14] Emmanuel Onyeocha C, Wang J Y, Khoury J. A comparison of HK-CONWIP and BK-CONWIP control strategies in a multi-product manufacturing system[J]. *Operations Research Perspectives (S2214-7160)*, 2015, 2(1): 137-149.
- [15] Pettersen J A, Segerstedt A. Restricted work-in-process: a study of differences between Kanban and CONWIP[J]. *International Journal of Production Economics (S0925-5273)*, 2009, 118: 199-207.
- [16] Kumar S, Ananth K. Performance analysis of CONWIP systems with batch size constraints[J]. *Annals of Operations Research (S0254-5330)*, 2013, 209(1): 85-114.
- [17] 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 (S0925-5273)*, 2003, 83(2): 195-215.
- [18] 徐琪, 殷丽娜. RFID 集成系统支持下的供应链优化控制[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2010, 36(6): 691-696.
- Xu Q, Yin L N. Supply chain optimal control under RFID integrated system[J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2010, 36(6): 691-696.
- [19] 关若曦. 基于(r, Q)库存策略的供应链优化及协调问题研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- Guan R X. Optimization and Coordination of Supply Chain Under (r, Q) Policies[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.

(上接第 256 页)

- [7] 刘振皓, 巫世晶, 王晓笋, 等. 基于增量谐波平衡法的复合行星齿轮传动系统非线性动力学[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(3): 117-122.
- LIU Zhenhao, WU Shijing, WANG Xiaosun, et al. Nonlinear Dynamics of Compound Planetary Gear sets Based on Incremental Harmonic Balance Method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(3): 117-122.
- [8] 李同杰, 朱如鹏, 鲍和云, 等. 行星齿轮传动系的周期运动及其稳定性[J]. *振动工程学报*, 2013, 26(6): 815-822.
- LI Tongjie, ZHU Rupeng, BAO Heyun, et al. Coexisting Periodic Solutions and Their Stability of Nonlinear Planetary Gear Train[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2013, 26(6): 815-822.
- [9] 赵丽娟, 王乘云. 采煤机截割部建模与动力学仿真研究[J]. *工程设计学报*, 2010, 17(2): 119-123.
- ZHAO Lijuan, WANG Chengyun. Department of modeling and dynamics simulation of shearer cutting[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2010, 17(2): 119-123.
- [10] 徐建博. 采煤机截割部传动系统动态特性研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015.
- XU Jianbo. Study of Cutting Part Transmission System for Dynamic Characteristics [D]. Fuxin: Liaoning technical university, 2015.