

文章编号: 1001-0920(2011)09-1303-07

双源渠道闭环供应链生产计划的一种干扰恢复模型

方晗炜¹, 肖人彬¹, 蔡政英²

(1. 华中科技大学 系统工程研究所, 武汉 430074; 2. 三峡大学 计算机与信息学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 研究双源渠道闭环供应链生产计划调度中的干扰问题, 从双源渠道供应、正向制造和逆向再制造等5个方面分析了供应链中的不确定性和干扰问题; 然后建立一种干扰恢复模型, 采用基于干扰恢复思想的双模糊PID控制器, 针对各种随机离散型和连续型干扰事件的参数进行优化和干扰恢复, 并从鲁棒性、干扰损失、库存扰动3个指标对系统稳定性和干扰进行量化分析; 最后通过一个仿真案例, 表明所提出的方案比无干扰恢复的方案具有更高的鲁棒性和更低的干扰损失。

关键词: 双源渠道; 闭环供应链; 模糊; 干扰恢复模型

中图分类号: F062; F224

文献标识码: A

Disruption restoration model in production planning with the closed-loop supply chain between dual-channel

FANG Han-wei¹, XIAO Ren-bin¹, CAI Zheng-ying²

(1. Institute of Systems Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. College of Computer and Information Technology, China Three Gorges University, Yichang 443002, China. Correspondent: XIAO Ren-bin, E-mail: rbxiao@163.com)

Abstract: Disruption problem in production planning dispatching with the closed-loop supply chain between dual-channel (CLSCDC) is studied. Five aspects of supply chain uncertainty and interference are analyzed, such as the dual channel supply, the manufacturing and the reverse remanufacturing, etc. Then, a disruption restoration model is constructed, by using a two-fuzzy proportional-integral-derivative (PID) control based on disruption restoration thought, according to various random discrete and continuous interference events parameters optimization and disruption recovery, with a quantification analysis to the system stability and disruption from the robustness, to the disturbance loses, the stock disruption three targets. Finally, simulation result shows that the proposed scheme has higher robustness and lower disturbance loss.

Key words: dual-channel; the closed-loop supply chain; fuzzy; disruption restoration model

1 引言

在供应链系统中存在的干扰和不确定性因素容易给供应链运作带来风险和损失。近年来, 一种供应链干扰管理 (SCDM) 模式开始得到了一些学者的重视^[1-4]。SCDM通过快速处理供应链运作中的各种实际问题和干扰信息, 建立相应的优化模型和求解算法, 以达到减少干扰和损失的目的。随着逆向供应链和逆向物流的出现, 一些学者也发现其中存在干扰和不确定因素, 并且证实其可能影响逆向供应链运作的效率^[5,7]。

电子网络技术的介入改变了原有传统渠道成员之间的合作关系, 形成了多源渠道 (双源以上) 的供应

链, 其不确定方面与传统单源渠道有着明显不同^[8-10]。在可靠和不可靠的多源渠道供应商选择的过程中, 面对供应的干扰管理, 可靠渠道伙伴会带来更高的服务和客户满意度。文献 [11] 给出了一个非平稳和需求价格敏感的二阶段供应链模型, 并分析了供应干扰风险对单源和双源渠道的影响。目前的双源渠道供应链干扰管理的研究主要存在以下几个问题: 1) 缺乏逆向供应链和闭环供应的干扰管理。2) 多是围绕单源渠道和需求扰动展开研究, 较少考虑电子渠道和多源渠道的干扰管理问题。3) 缺乏干扰恢复方法, 供应链干扰管理的目的就是要针对干扰事件快速形成恢复策略。4) 缺少干扰损失评估, 极少研究系统的稳定性和干扰

收稿日期: 2010-05-14; 修回日期: 2010-09-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60974076).

作者简介: 方晗炜(1981—), 男, 博士生, 从事供应链管理、干扰管理等研究; 肖人彬(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统建模与仿真、群集智能与涌现计算等研究。

的量化评估.

本文主要研究了基于传统渠道和网络渠道的闭环供应链生产计划调度模型,分析了双源渠道供应、正向制造、逆向再制造、第三方外包和应急程度的不确定性和干扰因素,提出了基于干扰思想的双模糊PID控制器,建立了一种干扰恢复机制,用3个波动性指标对系统稳定性和干扰进行了量化评估.最后,通过一个仿真案例将本方案与无干扰恢复的方案进行了对比和分析.

2 双源渠道闭环供应链生产计划干扰分析

2.1 双源渠道闭环供应链结构描述

双源渠道闭环供应链(CLSCDC)结构中任一节点 N_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$) 均可以表达为包含一个核心生产企业的实体营销和网络直销的 CLSCDC 系统,如图1所示.

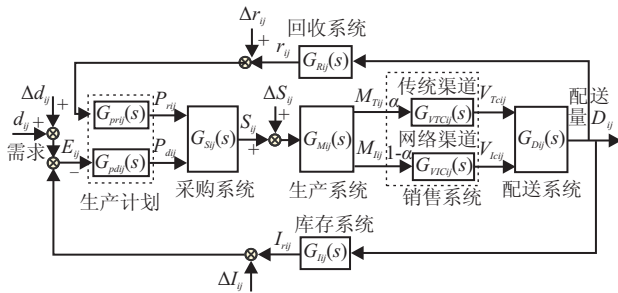


图1 节点 N_{ij} 的生产单元模型

图1中的多个系统通过 CLSCDC 生产计划互连和信息交互,形成复杂网状的逆向回收、闭环再制造的供应链 CLSCDC ($m \times n$). 生产单元基于市场实际需求 d_{ij} 协调供应链的运作,开始环节为生产计划 P ,由市场需求 d_{ij} 和回收系统的逆向需求量 r_{ij} 确定生产系统所需的各类原材料和半成品,指导采购系统 S 进行相应的运作,运回的材料交由制造流程 M . 双源渠道的销售系统分为传统渠道营销系统 G_{VTCij} 和网络渠道营销系统 G_{VICij} ,生产系统 G_{Mij} 产出量 M_{ij} 中的 M_{Tij} 提供传统渠道营销的产品, M_{Nij} 提供网络渠道营销的产品. 销售流程 V 后的配送流程 D 以相应的分销量 D_{ij} 满足用户实际需求 d_{ij} 和逆向需求量 r_{ij} ,超出的生产量转入库存系统 I_{ij} ,未满足的用户需求 E_{ij} 重新组织供应链生产. 图1中, $P_{pdij}(t)$ 为一般生产计划量, $P_{rdij}(t)$ 为逆向生产量. $G_{prij}(s)$ 量化了需逆向回收、再利用和闭环再制造的旧产品, $G_{pdij}(s)$ 根据需求量 $d_{ij}(t)$ 以及上期末库存量 $I_{ij}(t-1)$ 量化需生产的新产品,进行快速补货. 供应商 $G_s(s)$ 根据 $P_{ij}(t)$ 的大小采购所需的供应量 $S_{ij}(s)$, $G_{Mij}(s)$ 主要是根据生产计划 $P_{ij}(t)$ 的要求组织生产制造,假设生产系统的产品有百分比 α ($0 < \alpha < 1$) 为传统渠道供应,有 $1 - \alpha$ 为网络渠道供应. $V_{TCij}(s)$ 为

传统营销渠道销售系统, $V_{ICij}(s)$ 为网络直销渠道销售系统; $M_{Tij}(s)$ 为传统渠道生产量, $M_{Nij}(s)$ 为网络渠道生产量. 配送系统 D_{ij} 负责配送双源渠道的产品,回收环节的回收能力为 $G_{Rij}(s)$. 库存存储能力为 I_{ij} . 因此,该节点 N_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$) 生产单元的传递函数 $G_{Nij}(s)$ 可以表达为

$$G_{Nij}(s) = D_{ij}(s)/d_{ij}(s) = \frac{\Gamma \cdot G_{pdij}(s) \cdot G_{Sij}(s) \cdot G_{Dij}(s)}{1 + \Lambda \cdot \Gamma \cdot G_{Sij}(s) \cdot G_{Dij}(s)}, \quad (1)$$

其中

$$\Lambda = G_{Iij}(s) \cdot G_{pij}(s) + G_{Rij}(s) \cdot G_{pij}(s),$$

$$\Gamma = \alpha \cdot G_{Mij}(s) \cdot G_{VICij}(s) +$$

$$(1 - \alpha) \cdot G_{Iij}(s) \cdot G_{VICij}(s).$$

2.2 双源渠道闭环供应链的干扰分析

1) 双源渠道供给的不确定. 对于双源渠道闭环供应链系统,订单由于天气、时尚和地理位置等不确定因素,经常发生变化. 以气候为例,正常的情况下,传统渠道的销售情况好于网络渠道,所以传统渠道的库存冗余和配送供给也会较充足;气候恶劣的情况下,消费者较多选择闭门在家、网络购物的方式,所以网络渠道的库存冗余和配送供给会较高. 这便给准确制定渠道配送增加了难度.

2) 正向制造过程的不确定. 正向制造过程首先要采购原材料和半成品,然后运到库存中心,经过制造中心的半加工和加工,成为产品. 产品经过测试中心后由销售系统批量或者零售直销后,最后由配送中心及时送到消费者手中.

3) 逆向再制造过程的不确定. 回收产品一般经过检测后放入库存中心分类,再通过清理站进入工厂维修、分拆、加工或者升级,送入标签站后再被封装,最后经过配送中心再销售. 这个环节扰动最频繁,涉及的因素多而复杂,对系统造成了直接影响. 加上越来越多的厂家为了提高在电子商务中的竞争力,在网络营销渠道允许顾客在购买后的一段时间内退货,更加剧了闭环供应的不确定性,使得制定网络营销渠道和传统营销渠道的闭环再制造生产计划有一定难度.

4) 第三方外包业务的不确定. 由于厂家专注于核心业务,将很多非关键业务外包,有的厂商采用第三方外包业务来减轻负担和挽留顾客. 对于正向和负向的外包业务,在订单和价格方面都有扰动的情况,因为外包订单量和第三方产量经常发生变化,所以外包价格也时有波动.

5) 应急程度的不确定. 针对以上系统的扰动,避免系统单个或多个节点的失效,应加强库存扰动管理,一般采用应急战略备件冗余库存、实物期权来防范,

但是针对扰动的不确定性, 应急战略备件冗余库存的等级、实物期权的程度也不同, 造成了应急措施程度的不确定性。

2.3 双源渠道闭环供应链的综合干扰补偿原理

1) 双源渠道供给扰动的干扰补偿. 当双源渠道需求变化未影响到市场规模时, 可通过调整各渠道零售价格来缓解对原生产计划的影响, 增加或减少相应渠道的价格仍能维持原计划一定的鲁棒性. 当市场规模发生变化时, 可通过干扰恢复控制快速制定新的生产计划, 调整生产水平和新的渠道零售价格, 保持变化的系统产量带来最优的收益。

2) 正向和逆向制造过程扰动的干扰补偿. 正向和逆向制造过程的扰动一般指库存中心的扰动管理, 提前期是库存干扰管理的重要环节. 当某一环节库存扰动时, 干扰恢复控制快速调整得到准确的提前期来适应市场战略. 对于正向/逆向采购、正向/逆向制造和正向/逆向配送等环节发生的库存变化的扰动, 可通过动态调整相应的正向/逆向采购库存提前期、正向/逆向制造库存提前期和正向/逆向配送库存提前期等环节来维持生产计划的鲁棒性。

3) 第三方外包业务扰动的干扰补偿. 在制造商和第三方外包厂家之间建立信息共享机制, 减少信息传递过程中存在的信息偏差和信息丢失. 利用干扰恢复模型建立模糊契约来激励外包第三方的积极性, 保证合作方的最大收益。

4) 应急程度扰动的干扰补偿. 系统单个或多个节点的扰动、失效和干扰程度所造成的应急补偿程度也不一样, 可通过干扰恢复模型进行应急战略模糊冗余库存干扰管理、模糊期权等管理机制来动态调整应急程度扰动对生产计划的影响。

3 双源渠道闭环供应链干扰恢复模型

本文针对 CLSCDC 系统的 5 个方面的不确定扰动, 提出了一种基于干扰恢复技术的干扰恢复模型. 干扰恢复技术基于自调整可控因子的模糊控制技术, 通过干扰恢复控制跟踪补偿随机不确定扰动对原系统的影响, 使系统具备一定的鲁棒性. 它不同于一般控制手段的区别在于: 对于干扰较大的情况, 能快速响应; 干扰较小的情况, 能准确跟踪定位. 干扰恢复模型包括干扰恢复目标函数、干扰恢复控制器(双模糊结构)和干扰损失分析。

干扰恢复目标函数在 CLSCDC 系统运行初期, 分析系统在生产周期可能会面对各种离散型和连续性扰动; 干扰恢复控制器在系统运行中期, 整合双源正负方向的生产计划调度, 调整生产进度安排, 达到迅速响应和准确制定的效果; 干扰损失分

析则在 CLSCDC 系统运行后期, 通过鲁棒性、干扰损失、库存扰动 3 个指标对系统稳定性和干扰进行量化分析, 评估系统受扰动的影响程度和制定新的生产计划安排。

3.1 干扰恢复目标函数

目前通用的干扰管理数学模型的基本形式为

$$\begin{aligned} \min f(x), \\ \text{s.t. } x \in X. \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $f(x)$ 为扰动程度的函数. 干扰发生后, 若要使新方案较原方案偏离的程度最小, 则客户从扰动中恢复的满意度应最大, 成本或者可靠性等方面也需要考虑. 在双源渠道闭环供应链干扰管理问题中的数学模型, 可通过多方面均衡来达到总体优化。

$$\begin{aligned} \min k_1 C(x) + k_2 M(x) + k_3 RM(x) + k_4 O(x) + k_5 E(x); \\ \text{s.t. } \begin{cases} x \in \hat{X}, \\ k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 = 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: x 为原系统生产计划出现干扰后的新的生产计划, \hat{X} 为 x 的可行集; $k_1 \sim k_5$ 为权系数; 这里给出的一般性的 CLSCDC 模型, 对于单渠道结构、单向结构或者无第三方外包系统, 只需要将 k_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) 赋值为 0; $C(x)$ 为双源渠道或多源渠道的供应系统的扰动, 假设包括网络营销渠道的需求扰动 $\Delta C_1(k)$, 传统营销渠道需求扰动 $\Delta C_2(k)$; r_1 和 r_2 为各自的比例系数, $r_1 + r_2 = 1$, 有

$$C(k) = C(k-1) + \sum_{\eta=1}^2 r_{\eta} \Delta C_{\eta}(k). \quad (4)$$

$M(x)$ 为单个生产单元制造过程的扰动, 包括采购、生产、销售、配送、库存和回收几个系统的扰动. 这里假设有 m 个部门负责制造的加工过程, m 个部门的加工工序相对独立且没有先后, 回收的产品种类为 n 种, 回收的产品由 m 个部门加工以后送到配送中心. 扰动变量设置如下:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 种产品送到第 } j \text{ 个制造加工部门;} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases} \\ i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m.$$

ΔB_{ij} 为第 i 种产品送到第 j 个部门制造加工的扰动收益, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$.

ΔC_{jk} 为第 j 种部门与第 k 个部门每次输送产品的配送扰动产量, $j, k = 1, 2, \dots, m$.

ΔD_{jk} 为第 j 种部门与第 k 个部门每次输送产品的物流成本扰动费用, $j, k = 1, 2, \dots, m$.

$\Delta M(k)$ 为扰动总收益, 有

$$\Delta M(k) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta B_{ij} x_{ij} -$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \Delta C_{jk} \Delta D_{jk} x_{ij}, \quad (5)$$

$$M(k) = M(k-1) + \Delta M(k). \quad (6)$$

$RM(x)$ 为单个生产单元再制造过程的扰动, 包括逆向采购、逆向测试、逆向维修、逆向生产、逆向销售、逆向配送、库存和回收几个系统的扰动, 细分则包括库存中心、清洁站测试中心、维修中心、标签站、封装站和配送中心等工作站的扰动. 这里假设有 p 个部门负责回收再制造的加工过程, 其中有外包公司, 也有自己的再制造部门. p 个部门的加工工序相对独立且没有先后, 回收的产品种类为 q 种, 回收的产品由 p 个部门加工以后送到配送中心. 扰动变量设置如下:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 种产品送到第 } j \text{ 个再制造加工部门;} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases} \\ i = 1, 2, \dots, q, j = 1, 2, \dots, p.$$

ΔRB_{ij} 为第 i 种产品送到第 j 个部门再制造加工的扰动收益, $i = 1, 2, \dots, q, j = 1, 2, \dots, p$.

ΔRC_{jk} 为第 j 种部门与第 k 个部门每次输送产品的配送扰动产量, $j, k = 1, 2, \dots, p$.

ΔRD_{jk} 为第 j 种部门与第 k 个部门每次输送产品的物流成本扰动费用, $j, k = 1, 2, \dots, p$.

$\Delta RM(k)$ 为扰动总收益, 有

$$\Delta RM(k) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta RB_{ij} x_{ij} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \Delta RC_{jk} \Delta RD_{jk} x_{ij}, \quad (7)$$

$$RM(k) = RM(k-1) + \Delta RM(k). \quad (8)$$

$O(x)$ 为第三方外包正向制造过程和逆向再制造过程的供应系统的扰动. 假设包括正向制造过程的需求扰动 $\Delta O_1(k)$, 逆向再制造过程的需求扰动 $\Delta O_2(k)$; 正向制造过程的价格扰动 $\Delta P_1(k)$, 逆向再制造过程的价格扰动 $\Delta P_2(k)$; w_1 和 w_2 为各自的比例系数, $w_1 + w_2 = 1$, 即

$$O(k) = O(k-1) + \sum_{t=1}^2 w_t \Delta P_t(k) \Delta O_t(k). \quad (9)$$

$E(x)$ 为针对系统扰动后的回收失效, 采用应急战略备件库存、实物期权等弥补措施的成本, 即

$$E(k) = E(k-1) + \Delta E(k). \quad (10)$$

目标函数是使 $C(x), M(x), RM(x), O(x)$ 和 $E(x)$ 加权和最小, 从而使系统扰动程度最小.

3.2 干扰恢复的双模糊控制器结构设计

由前文可知 CLSCDC 系统在订单和产量制定方面主要受双源渠道供应、正向制造、逆向再制造、第

三方外包和应急程度 5 个方面的影响. 当传统渠道需求波动、随机事故等较大扰动情况发生时, CLSCDC 生产系统希望能快速响应, 迅速调整生产进度; 当网络渠道促销、逆向退货或机器随机故障等较小扰动情况发生时, CLSCDC 生产系统希望能准确估计, 制定精确的生产进度安排. 然而目前的 CLSCDC 系统并没有生产计划的干扰恢复控制, 传统方式是根据以前的库存情况和客户需求, 采用一般控制方案(单模糊控制或 PID 控制)来制定生产计划安排, 并不能适应 CLSCDC 系统的抗干扰恢复的要求^[12].

干扰恢复控制器在设计时往往采用在订单偏差较小时保证较好的控制精度; 在订单偏差较大时保证快速的增产和减产效果. 这两个要求是相互矛盾的, 而且发生在不同的时域. 如果按快速增产和减产设计模糊控制器, 往往在订单偏差较小时会出现超调或振荡, 导致控制效果差, 反之亦然. 考虑到双源渠道闭环供应链生产计划控制系统的特点, 根据时域时不同规则生成模糊控制规则表, 以满足偏差较大时的快速性, 偏差较小时的精确控制要求, 设计了双模糊控制器, 如图 2 所示.

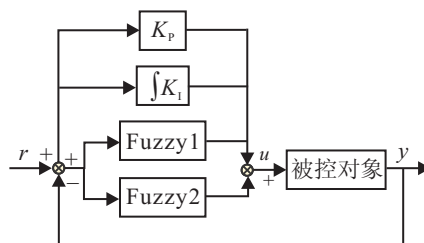


图 2 双模糊控制器

将干扰恢复控制器(双模糊结构)引入 CLSCDC 系统, 使得系统具备了多方面抗干扰的能力. 当订单扰动高于 β 时, 采用干扰恢复控制器 1 来调整生产计划, 达到了快速响应、迅速调整生产进度的要求; 当订单扰动低于 β 时, 采用干扰恢复控制器 2 来调整生产计划, 达到了准确估计、制定精确的生产进度安排的要求.

在单模糊控制器设计中, 订单误差 E 及其变化率 C 对模糊控制器的影响是等同的. 通过对 E 及 C 在控制的不同阶段所起作用的分析可知, 二者在不同控制阶段对控制器的影响是不同的. 在初期阶段, CLSCDC 系统订单误差较大, 消除订单误差是主要目的, 因此应加大订单误差在控制规则中的权重; 在中期阶段, CLSCDC 系统订单误差减小, 系统的上升速度加快, 为减少系统的超调, 应突出对订单误差变化的控制作用; 当 CLSCDC 系统响应接近期望值时, 由于此时订单误差及其变化都较小, 二者可取相同的权

重.

基于以上考虑, 决定采用带自调整因子的模糊控制策略, 以达到性能更高的控制效果. 整个 CLSCDC 系统包括采购、生产、销售、配送、回收和库存 6 个子系统, 网络渠道和传统渠道的订单情况都直接反馈给库存系统, 回收的产品重新进入再制造系统. 将客户需求和生产计划的订单误差 β 作为双模糊 PID 控制切换的分界线, 形成了 Fuzzy 1 粗调控制表和 Fuzzy 2 细调控制表. 为此, 可提出如下的控制规则:

$$U = \begin{cases} \theta < a_0 E + (1 - a_0) C >, E = 0; \\ \theta < a_1 E + (1 - a_1) C >, E \pm 1; \\ \theta < a_2 E + (1 - a_2) C >, E \pm 2; \\ \theta < a_3 E + (1 - a_3) C >, E \pm 3. \end{cases}$$

式中: $a_0, a_1, a_2, a_3 \in [0, 1]$; $\theta = \pm 1$.

这样有利于满足控制系统在不同被控系统下对修正因子的不同要求. 采用将生产计划订单需求采样时刻的误差 E 及其变化率 C 作为输入, 生产系统产量 U 作为输出的二维模糊控制器. 二维控制规则的生成如下.

3.2.1 Fuzzy 1 控制规则的生成

当生产计划订单需求采样时刻的误差 E 的偏差大于 β 时, 将 E, C, U 的量化论域和词集各取为 $\{E\} = \{C\} = \{U\} = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$; $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$. 采用带调整因子的控制表达式

$$U = \begin{cases} - < a_0 E + (1 - a_0) C >, E = 0; \\ - < a_1 E + (1 - a_1) C >, E \pm 1; \\ - < a_2 E + (1 - a_2) C >, E \pm 2. \end{cases} \quad (11)$$

基于以上分析, 选择 $\theta = -1, a_0 = 0.37, a_1 = 0.54, a_2 = 0.78$ (见文献 10), 可得模糊控制规则 1.

3.2.2 Fuzzy 2 控制规则的生成

当生产计划订单需求采样时刻的误差 E 的偏差小于 β 时, 将 E, C, U 的量化论域和词集各取为 $\{E\} = \{C\} = \{U\} = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$; $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$. 采用带调整因子的控制表达式

$$U = \begin{cases} - < a_0 E + (1 - a_0) C >, E = 0; \\ - < a_1 E + (1 - a_1) C >, E \pm 1; \\ - < a_2 E + (1 - a_2) C >, E \pm 2; \\ - < a_3 E + (1 - a_3) C >, E \pm 3. \end{cases} \quad (12)$$

经以上分析, 选择 $\theta = -1, a_0 = 0.35, a_1 = 0.45, a_2 = 0.55, a_3 = 0.65$ (见文献 10), 可得模糊控制规则 2.

对常规模糊控制系统, 一般不能消除稳态偏差 E 和偏差变化率 C , 可采取增大量化因子 Ke 和

Kc 的取值来减小 E 和 C , 但 Ke 和 Kc 不可能任意增大, 因为还要与比例因子 Ku 协调匹配. 这样必然存在稳态偏差. 又由于模糊控制器的输入和输出特性等效于多值继电器特性, 采用该类控制器的系统有可能获得良好的动态特性, 但无法消除静态误差且易产生振荡. 为改善模糊控制器的稳态性能和消除振荡, 通常在模糊控制器中引入积分器. 引入控制器的方式有很多, 这里采用的是将比例积分器与模糊控制器并联的方式. 比例积分器对未模糊化处理的偏差信号进行积分, 再与模糊控制器的输出进行叠加, 形成总的控制作用; 因为偏差是连续变化的, 故比例积分控制作用也是连续的, 所以控制器的输出不再具有继电器的特性. 由以上分析可知: 采用这种校正方式可以提高控制的稳态精度, 当 CLSCDC 系统的扰动较小时, 干扰恢复控制器也能准确估计, 制定精确的生产进度安排.

3.3 干扰恢复的波动性指标分析

1) 鲁棒性指标. 生产计划的鲁棒性是指生产系统抗干扰的能力, 波动后恢复的响应速度. 产量干扰一般包括需求扰动引起的库存冗余、缺货和退货对产量的影响. 具体要看扰动后的振荡程度和扰动分布直方图. 振荡强度大表示鲁棒性较差, 扰动分布在强度大的区间表示系统受影响的程度较深.

2) 干扰损失指标. 将缺货或者库存积压的扰动额度按级别分类, 计算相应的惩罚费用, 然后设定风险权重并统计总的损失费用.

3) 库存扰动指标. 给定生产系统的采购周期, 设定库存的存储量和最低风险值. 观察一段时间下的库存变化周期, 分析扰动后的平均库存水平.

4 案例分析

4.1 案例描述

以创新型消费品中某品牌智能手机 CLSCDC 产品为例, 保修期内的产品负责维修和升级, 保修期外的产品循环再制造和废品处理. 给定生产系统的传递函数 $G_M(s) = 3/s$, 销售系统传统渠道的传递函数 $G_{VTC}(s) = 33/(s + 25)$, 销售系统网络渠道的传递函数 $G_{VIC}(s) = 11/(s + 25)$. 这里设时间常数 $T_s = 0.005$, 随机数 $g(1) = g(2) = \text{rand}(1)$. 具体的模拟干扰参数假设设置如下:

在第 20~30 周, 传统渠道和网络渠道的销售代理同时开展打折和会员等业务, 需求扰动 $\Delta D = |0.009 \times \sin(2 \times k \times T_s)|$; 第 40~60 周, 港口随机事故导致了生产扰动 $\Delta P = 0.525 \times (-1)k \times \sin(3 \times k \times T_s)$; 在 70 周由于电子商务网站团购促销, 订单扰动 $\Delta D = 0.075 + (-1)k \times 0.15 \times \sin(3 \times k \times T_s)$; 在 75 周退货换货,

$\Delta D = |0.002 + 0.045 \times \sin(3 \times k \times T_s)|$; 在 80~88 周之间, 新产品的推出使得网络渠道发生退物流的逆向扰动 $\Delta D = 0.012 \times \text{sign}(\sin(3 \times k \times 0.001))$; 在 100~120 周, 生产系统设备保障 $\Delta P = 0.133 \times (-1)k \times \sin(2 \times k \times T_s)$; 在 140~150 周, 原材料供应短缺, 部分生产设备停工, 有效生产设备和配送供给同时受到干扰, $\Delta D = \Delta P = 0.00018 \times \sin(30 \times k \times T_s)$.

4.2 仿真求解

设定订单误差在 $[0, 50]$ 之间扰动, 取 $\beta = 25$ 作为干扰恢复控制器的控制参数, 得到供应链干扰恢复生产系统输出曲线(双源渠道闭环供应链干扰恢复生产系统输出曲线), 如图 3(a). 其中, 虚线代表干扰恢复生产系统生产计划输出曲线(PSWDR), 实线代表消费者需求-回收输入(CDR). 由图 3 可以看出, PSWDR 在前 20 周之内快速阶跃; CDR 在第 20~40 周内, 由于需求的波动产生了负扰动; 恢复到第 40 周时, 港口随机事故使得产量 PSWDR 在 40~60 周产生了 6 个周期的持续震荡; CDR 在 70 周和 75 周有离散的两次扰动, 在 80~88 周生产了一个周期的方波信号的扰动; 从 100~120 周 PSWDR 有 4 个周期的生产扰动, 从 140~150 周有微弱的扰动. 总的说来, 从 120 周开始 PSWDR 已基本进入稳定状态.

由图 3(a) 可以看出, 对于第 20~30 周、第 70 周/75 周、第 80~88 周的需求扰动, 干扰恢复模型快速调整了生产水平和零售价格; 对于第 40~60 周、第 100~120 周的随机事件引起的制造/再制造库存扰动, 干扰恢复模型调整了产品提前期; 对于第 140~150 周的需求和生产同时扰动, 制造商在干扰恢复后调整产量,

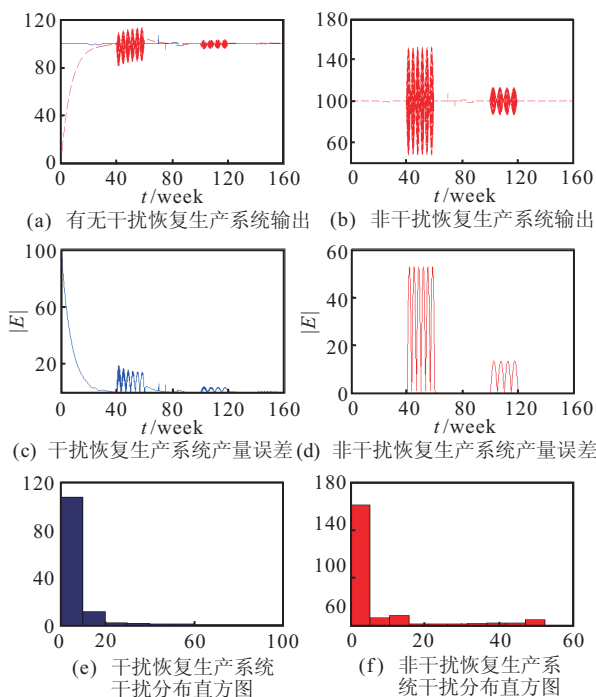


图 3 生产计划在多重扰动下的调节情况

与第三方厂商信息共享并合作, 缓解了对原生产计划的影响. 可以看出, 干扰恢复控制器对生产计划受干扰情况下的恢复补偿, 有明显效果, 保证了生产计划具有一定的鲁棒性.

4.3 波动性指标分析

1) 鲁棒性指标分析: 由图 3(b) 非干扰恢复生产系统生产计划输出响应曲线可以看出, 不带干扰恢复的生产系统在 40~60 周、100~120 周的扰动程度比干扰恢复的生产系统强度要大, 鲁棒性较差. 在图 3(c)~图 3(f) 中分别比较了带干扰恢复控制器和非干扰恢复生产系统产量误差绝对值的变化曲线和干扰分布直方图, 以便更好地观察生产计划在多重扰动下的调节情况.

由图 3(c) 和图 3(d) 可知, 干扰恢复的生产系统(图 3(c)) 在前 20 周, 误差的绝对值信号 $|E|$ 从初值 100 锐减到 10, 又分别在 20~30 周经历从 0~5 的扰动、40~60 周经历从 0~20 的扰动, 进而归零. 在 100~120 周增高到 10 以上, 又迅速归零, 在 140~150 周有密集轻微的小规模扰动, 经过调整以后又归零, 最后误差绝对值信号持续为零. 非干扰恢复的生产系统(图 3(d)) 显示, 不带干扰恢复的生产系统在 50 周左右、110 周左右大幅度剧烈振荡. 图 3(e) 和图 3(f) 给出了两种系统的误差绝对值的干扰分布直方图, 可以看出干扰恢复(图 3(e)) 的扰动一般分布在 0~30 之间, 而不带干扰恢复(图 3(f)) 的扰动则有一部分会分布在 40~60 之间.

2) 干扰损失指标分析: 假设延时交货的冗余库存和缺货的损失一样. 首先根据图 3(c) 和图 3(d) 的干扰/非干扰恢复生产系统产量误差曲线定义扰动分布在 0~10 的次数和为 $\text{Sum}L$, 扰动分布在 10~50 的次数和为 $\text{Sum}M$ 以及扰动分布在 50 以上的次数和为 $\text{Sum}H$. 定义产量扰动发生在 0~10, 10~50, 50 以上 3 种情况使得发生冗余库存或缺货的损失费用分别为 $\text{Fee}L$, $\text{Fee}M$ 和 $\text{Fee}H$, 得出生产系统的总成本损失 $\text{SystemFee} = \text{Sum}L \times \text{Fee}L + \text{Sum}M \times \text{Fee}M + \text{Sum}H \times \text{Fee}H$.

由表 1 依次比较低等水平成本损失、中等水平成本损失和高等水平成本损失, 得出干扰恢复生产系统成本损失均低于非干扰恢复生产系统, 且成本损失惩罚级别越高, 两者的差距越大, 干扰恢复生产系统优势越明显.

3) 库存扰动指标分析: 给出了两种控制器下的库存扰动情景, 假设正常库存扰动系数 $I_N = [3.0 \times \text{rand}(1) + 0.6] \times \sin(2 \times k \times T_s)$, 战略冗余库存补偿扰动系数 $I_E = 3.0 \times \text{rand}(1) + 0.6$, 综合库存扰动系数 $I_{NM} = 1.3366 + (-1)k \times (I_N - I + E)$; 库存损失

系数为0.02, 则生产系统累加供应量 $S(k) = S(k - 1) + 0.98 \times I_{NM} \times Y_{out}$, Y_{out} 为配送系统的输出。

表1 成本损失分析

产量扰动范围	成本损失					
	低等水平		中等水平		高等水平	
	干扰恢复	非干扰恢复	干扰恢复	非干扰恢复	干扰恢复	非干扰恢复
(0, 10]	10	10	20	20	30	30
(10, 50]	30	30	50	50	70	70
(50, +∞)	50	50	70	70	90	90
总成本损失费用	32 000	128 040	64 000	176 060	96 000	224 080

假定初始库存为7, 最低库存量为0.8, 最大库存量为7, 采购周期为8. 库存量 $I(k)$ 曲线如图4所示。

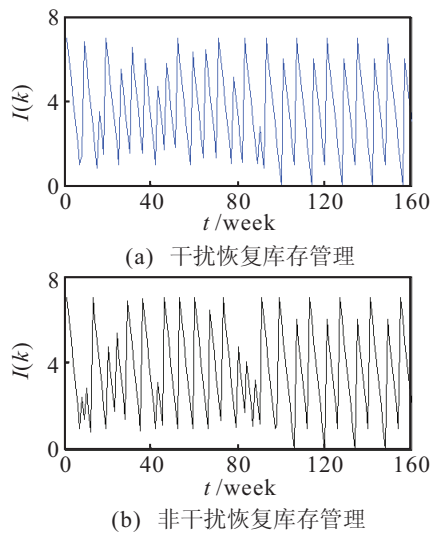


图4 生产系统库存扰动管理

对比可知, 生产初期前10周对于扰动的响应, 干扰恢复方案平均响应较快, 非干扰恢复方案平均响应较慢. 干扰恢复方案总体库存水平最低, 非干扰恢复方案较高. 非干扰恢复方案在响应速度、库存水平方面明显逊于干扰恢复方案, 各方面的性能都难以达到生产计划优化的效用。

经上述分析, 结果如下: 分析了 CLSCDC 系统中传统渠道和电子渠道需求发生随机扰动的情况, 进行了有效的跟踪补偿和干扰管理; 分析了逆向闭环供应(再利用、回收和再制造)随机扰动对 CLSCDC 系统的影响, 干扰恢复的效果明显; 有效恢复了各种随机离散型扰动和随机连续型扰动对于生产计划的影响, 抗干扰性明显优于引入干扰恢复控制器前; 干扰分析引入了各项指标, 对干扰模型进行了损失分析评估, 显示本方案在各种不确定扰动后的生产计划仍能够达到最小的偏差, 扰动补偿效果明显, 库存扰动管

理的响应速度和库存水平要优于非干扰恢复方案; 干扰恢复方法能够达到快速响应, 模糊 PID 控制规则表和双模糊控制器开关选择系数 E 可根据生产系统的扰动情况自行设定, 有效地提高了双源渠道生产系统的鲁棒性。

5 结 论

本文的 CLSCDC 系统对双源渠道需求干扰、闭环供应干扰(再利用、闭环回收和再制造)进行跟踪补偿和干扰管理, 能够快速响应并恢复各种随机离散型或连续性干扰事件. 干扰损失评估从鲁棒性、干扰损失、库存扰动3个指标对系统稳定性和干扰进行量化分析, 量化评估指标显示干扰恢复生产系统优于非干扰恢复系统, 模型鲁棒性明显, 可有效地应用于双源渠道生产计划干扰管理中。

参考文献(References)

- [1] Qi X T, Bard J, Yu G. Supply chain coordination with demand disruption[J]. Omega, 2004, 32(4): 301-312.
- [2] Xiao T J, Yu G. Supply chain disruption management and evolutionarily stable strategies of retailers in the quantity-setting duopoly situation with homogeneous goods[J]. European J of Operational Research, 2006, 173(2): 648-668.
- [3] Chen K B, Xiao T J. Demand disruption and coordination of the supply chain with a dominant retailer[J]. European J of Operational Research, 2009, 197(1): 225-234.
- [4] 秦绪伟, 唐立新. 面向干扰事件的可靠物流系统设计研究进展[J]. 控制与决策, 2010, 25(2): 161-165. (Qin X W, Tang L X. Reliable logistics system design research under disruptions: Review[J]. Control and Decision, 2010, 25(2): 161-165.)
- [5] Andy S, Daniel J L, et al. Expert-based scenarios for strategic waste and resource management planning-C&D waste recycling in the Canton of Zurich, Switzerland[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2009, 53(10): 592-600.
- [6] 蔡政英, 肖人彬, 谭勇, 等. 不确定条件下循环供应链模糊自适应生产计划调度[J]. 控制与决策, 2008, 23(5): 525-529. (Cai Z Y, Xiao R B, Tan Y, et al. Fuzzy adaptive production plan dispatching of cycle supply chain under uncertainty conditions[J]. Control and Decision, 2008, 23(5): 525-529.)
- [7] Chien-Chih Yu, Chen-Shu Wang. A hybrid mining approach for optimizing returns policies in etailing[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35(4): 1575-1582.