

文章编号: 1001-0920(2008)05-0525-05

不确定条件下循环供应链模糊自适应生产计划调度

蔡政英¹, 肖人彬¹, 谭 勇^{1,2}, 龚凤美¹

(1. 华中科技大学 管理学院, 武汉 430074; 2. 湖北民族学院 信息工程学院, 湖北 恩施 445000)

摘 要: 首先,建立了循环供应链下生产计划调度模型和状态方程,通过模糊量化因子整合了正向和逆向生产计划,分析了循环供应链中存在的 uncertainty. 然后,设计一种模糊自适应生产计划调度模型,对循环供应链生产计划的需求信息、回收信息、库存信息和生产信息进行模糊化,通过对生产计划量的自适应比例-积分-微分处理,提高了生产系统的产出对需求信息及回收信息的快速响应. 最后,对该模型的应用进行了讨论和仿真实验.

关键词: 模糊自适应控制; 生产计划; 库存; 循环供应链

中图分类号: O22; TU313

文献标识码: A

Fuzzy adaptive production plan dispatching of cycle supply chain under uncertainty conditions

CAI Zheng-ying¹, XIAO Ren-bin¹, TAN Yong^{1,2}, GONG Feng-mei¹

(1. School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Information Engineering, Hubei Institute for Nationalities, Enshi 445000, China. Correspondent: CAI Zheng-ying, E-mail: master_cai@163.com)

Abstract: A production plan dispatching model and its state functions of cycle supply chain are constructed, and the positive and reverse production plan are integrated by using fuzzy numerical factors. Then the uncertain factors of cycle supply chain are discussed. Hence a fuzzy adaptive model of production plan dispatching is presented, in which all the information including demand, recycle, inventory and production are fuzzy. The response performance of the production system to the demand and recycle information is improved by using an adaptive proportional-integral-derivative controller. The applicability of the proposed method is discussed, and is verified by a numerical example.

Key words: Fuzzy adaptive control; Production plan; Inventory; Cycle supply chain

1 引 言

生产计划是供应链管理的重要内容之一,好的计划可实现多个企业间的协同和准时生产^[1]. 反之,容易受到供应链中的不确定因素影响,如需求预测、生产波动、信息共享等,从而导致牛鞭效应^[2],这引起了不少学者的重视. Zhao^[3]运用多级模糊决策求解过程计划中的不确定性问题, Ravi^[4]发展了模糊多目标规划运作计划. 此后,模糊约束计划^[5]和模糊生产计划^[6]开始出现并广泛运用.

近年来,不少学者将控制论引入供应链管理中,例如用 z 变换建立供应链离散时间序列模型,用比例-积分-微分 (PID) 方式控制库存^[7],或用模糊比例-积分-微分 (FPID) 管理库存^[8],以及集成计划模

型^[9]等. 但以上文献研究的均是单一方向的供应链计划. 进入 21 世纪,人们对环境和可持续性发展的呼声越来越高,出现了逆向供应链及再制造计划问题^[10],以及绿色供应链^[11]. 循环供应链 (CSC) 或绿色供应链 (GSC) 是正向和逆向供应链的整合,实现了资源的循环流动,促进了资源节约和环境保护. 但是, CSC 中的生产计划也与传统供应链有明显的不同,既有正向生产活动,也有逆向回收和处理活动,如果两个计划还是独立进行的,则必将影响循环供应链的运作效率和对用户的服务响应.

本文讨论了循环供应链中的生产计划问题,整合了正向和逆向供应链生产计划,建立了模糊自适应 PID 计划模型,给出了实现方案. 仿真结果表明,

收稿日期: 2007-03-22; 修回日期: 2007-07-02.

基金项目: 国家 863 计划项目 (2006AA04Z153); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-05-0653).

作者简介: 蔡政英 (1975—), 男, 江西会昌人, 博士生, 从事供应链、系统工程和模糊数学的研究; 肖人彬 (1965—), 男, 武汉人, 教授, 博士生导师, 从事管理决策与研究支持系统、系统方法论等研究.

循环供应链生产系统效率有所改善。

2 循环供应链生产计划模型

2.1 循环供应链生产模型

为便于分析,以单一产品为例,包含一个核心生产企业的 CSC 系统如图 1 所示。

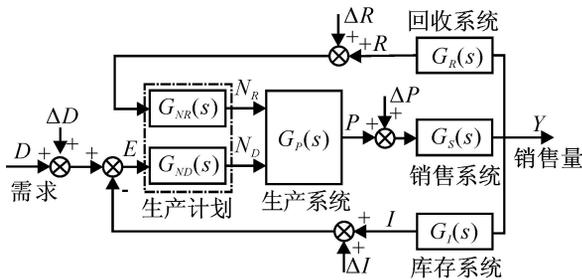


图 1 单一生产核心的循环供应链模型

图 1 中的多个模型通过供应链计划相互联接和协调,可形成更为复杂的网状 CSC。假定 k 为时间常数,扰动均为 0 时,生产计划输出

$$N(k) = N_D(k) + N_R(k).$$

其中: $N_R(k)$ 为回收生产计划量,取决于回收(需维修和分解)的产品数量 $R(k)$, $G_{NR}(s)$ 的任务是量化需维修的旧产品; $N_D(k)$ 为常规生产计划量, $G_{ND}(s)$ 的任务是根据需求量 $D(k)$ 以及上期末库存量 $I(k-1)$ 量化需生产的新产品,进行快速补货,即

$$E(k) = D(k) - I(k-1).$$

经过 Laplace 变换后,有

$$\begin{aligned} N(s) &= N_D(s) + N_R(s) = \\ &G_{ND}(s)E(s) + G_{NR}(s)R(s). \end{aligned}$$

传统的生产计划传函 $G_N(s)$ 是比例型的,如

$$G_N(s) = N(s)/E(s) = \dots,$$

其中 \dots 为常数。这种比例型(P型)计划容易根据生产批量大小进行分解计算,但在很多情况,却影响了生产系统对用户需求的响应能力。

供应/外包的生产活动也在生产计划统一协调下,并为核心生产服务,因此可将供应网络并入生产系统 $G_P(s)$ 。 $G_P(s)$ 主要是根据生产计划 $N(k)$ 的要求组织生产(包括供应),形成产量 $P(k)$,类似于一次动态环节为

$$G_P(s) = \frac{P(s)}{N(s)} = \frac{1}{T_p s + 1}$$

其中 T_p 为生产时间常数,由生产系统决定。

假定生产能力的上、下限分别为 P_{max} 和 P_{min} ,有

$$P(k) = \begin{cases} P_{max}, & P(k) > P_{max}; \\ P(k), & P_{min} \leq P(k) \leq P_{max}; \\ P_{min}, & P(k) < P_{min}. \end{cases}$$

销售系统 $G_S(s)$ 包括运输、分配产品的物流网络。设其销售能力的上、下限分别为 Y_{max} 和 Y_{min} ,有

$$Y(s) = G_S(s) \cdot P(s),$$

$$Y(k) = \begin{cases} Y_{max}, & Y(k) > Y_{max}; \\ Y(k), & Y_{min} \leq Y(k) \leq Y_{max}; \\ Y_{min}, & Y(k) < Y_{min}. \end{cases}$$

对于回收环节 $G_R(s)$,设回收能力的上、下限分别为 R_{max} 和 R_{min} ,则有

$$R(s) = G_R(s) \cdot Y(s),$$

$$R(k) = \begin{cases} R_{max}, & R(k) > R_{max}; \\ R(k), & R_{min} \leq R(k) \leq R_{max}; \\ R_{min}, & R(k) < R_{min}. \end{cases}$$

未转移到用户手中的新产品通过库存系统 $G_I(s)$ 折算后,反馈到生产计划,维修后的旧产品不存在订货与需求差造成的成品库存问题。设库存能力的上、下限分别为 I_{max} 和 I_{min} ,则有

$$I(s) = G_I(s) \cdot Y(s),$$

$$I(k) = \begin{cases} I_{max}, & I(k) > I_{max}; \\ I(k), & I_{min} \leq I(k) \leq I_{max}; \\ I_{min}, & I(k) < I_{min}. \end{cases}$$

因此,CSC 的传递函数 $G_{CSC}(s)$ 可表达为

$$G_{CSC}(s) = Y(s)/D(s) = \frac{G_N(s)G_P(s)G_S(s)}{1 + G_N(s)G_P(s)G_S(s)[G_I(s) - G_R(s)]}$$

2.2 循环供应链生产的不确定性

循环供应链下生产模型的不确定性有以下 4 个方面:

1) 用户需求不确定。用户需求包括确定的用户订单和不精确的预测订单,设 k 时需求不确定扰动为 $D(k)$,有

$$D(k) = D(k-1) + D(k).$$

2) 逆向供应链的不确定。回收数量通常不是确定的数值,设 k 时扰动为 $R(k)$,有

$$R(k) = R(k-1) + R(k).$$

3) 库存量的不确定。完工产品在循环供应链库存系统中存放和运输时都会产生各种变化,从而导致库存量信息变化。设 k 时扰动为 $I(k)$,则有

$$I(k) = I(k-1) + I(k).$$

4) 生产系统的不确定。生产系统由于本身的复杂性难以做到精确生产,供应/外包的不确定也会对生产造成直接影响。设 k 时扰动为 $P(k)$,则有

$$P(k) = P(k-1) + P(k).$$

假设 $X = \{x_i (i = 1, 2, \dots, n)\} = \{E, N, P, Y, I\}$ 是 CSC 模型内部变量空间,当 CSC 过程处于受控状态时, X 波动应满足正态分布假设。即对某一变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$,有 $x_i \sim N(\mu_i, s_i)$,对应概率分布密度函数为

$$f_i(x) = \frac{1}{\sqrt{2} s_i} e^{-\frac{(x-\mu_i)^2}{2s_i^2}}, x \in (-\infty, +\infty).$$

在不确定或模糊条件下,变量值一般难以表达为精确量.设某一变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 其均值 μ_i 和标准差 s_i 的模糊估计值可表达为 $\tilde{\mu}_i$ 和 \tilde{s}_i , 对应的模糊概率分布密度函数为

$$\tilde{f}_i(x) = \frac{1}{\sqrt{2} \tilde{s}_i} e^{-\frac{(x-\tilde{\mu}_i)^2}{2\tilde{s}_i^2}}, x \in (-\infty, +\infty).$$

因此,可根据模糊统计的结果,得到各模糊集隶属频率,以频率稳定值作为变量隶属度值.

3 生产计划的模糊自适应调度

3.1 二维自适应模糊 PID 生产计划结构

如果将 $G_{ND}(s)$ 改成 PID^[7] 型环节,对于输入变量 $E(k)$ 和 $E(k)$ 的变化 $E_c(k) = dE(k)/dk$, 则计划输出变量 $N_D(k)$ 不再是输入变量的线性函数,即

$$N_D(k) = k_p E(k) + k_i \int_0^k E(\tau) d\tau + k_d \frac{dE(k)}{dk}.$$

如果各参数为模糊数,则得到 FPID 模型^[8] 为

$$\tilde{N}_D(k) = \tilde{k}_p \tilde{E}(k) + \tilde{k}_i \int_0^k \tilde{E}(\tau) d\tau + \tilde{k}_d \tilde{E}_c(k).$$

但这些模型中的参数 k_p, k_i, k_d 是固定的,不适合不确定条件下生产运作.

模糊自适应 PID 生产计划则是根据 PID 参数 k_p, k_i, k_d 与 E 和 E_c 之间的模糊关系,在运行中不断检测 E 和 E_c , 再根据模糊控制原理对 k_p, k_i, k_d 进行在线修改,以满足不同时刻对控制参数的不同要求.假定时间 k 时的各变量为模糊语言变量,则有

$$\begin{aligned} \tilde{N}_D(k) &= \tilde{k}_p(k) \tilde{E}(k) + \tilde{k}_i(k) \int_0^k \tilde{E}(\tau) d\tau + \tilde{k}_d(k) \tilde{E}_c(k), \\ \tilde{k}_l(k) &= \tilde{k}_l(0) + [\tilde{E}^l(k) \times \tilde{E}_c^l(k)], l = p, i, d. \end{aligned}$$

具体计算过程如下:

1) 模糊化

假设 $X = \{x_i (i = 1, 2, \dots, 5)\}$ 分别表示 E, E_c, k_p, k_i, k_d , 并设模糊集语言变量为

$$\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}.$$

$X = \{x_i (i = 1, 2, \dots, 5)\} = \{E, E_c, k_p, k_i, k_d\}$ 的论域为 $\{-3 * f_i, -2 * f_i, -1 * f_i, 0, 1 * f_i, 2 * f_i, 3 * f_i\}$. 共把模糊变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 量化成 7 个等级,其中 f_i 为 $x_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 的量化因子,便于根据不同生产系统进行调整.

回收生产可根据输入变量 $R(k), R(k)$ 的变化 $R_c(k) = dR(k)/dk$, 以及回收生产的特点,设定不同的量化因子.在循环供应链中,正反向生产计划可通过不同的量化因子达到整合.

2) 隶属函数

根据模糊统计的结果以及专家经验,可将量化等级与模糊集的隶属度进行划分,得到各模糊变量相应的隶属函数.一种常用的正态分布隶属函数如图 2 所示,这里 $f_i = 1/3$.

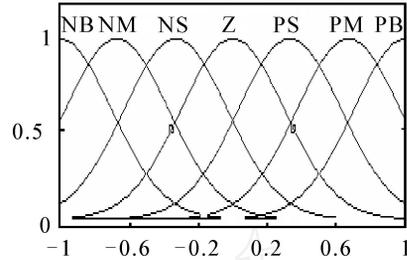


图 2 正态分布隶属函数

模糊自适应 PID 生产计划模糊化了通常的需求订单、回收信息、库存信息和生产信息,生成的计划产量 N 与传统的 P 型计划结果完全不同.

3.2 生产计划模糊控制器设计

模糊自适应生产计划的设计关键在于模糊控制器,需根据计划变量的变化建立模糊规则控制表,通过查找 E 和 E_c 与 3 个参数 k_p, k_i, k_d 的关系,实现生产计划量的在线计算. k_p, k_i, k_d 的模糊规则分别如表 1 ~ 表 3 所示.

根据以上查找表,可建立多重模糊条件 (if-then) 语句,如

$$R^l: \text{if } E \text{ is } \tilde{E}^j \text{ and } E_c \text{ is } \tilde{E}_c^l, \text{ then } k_l \text{ is } \tilde{k}_l^l.$$

生成的模糊规则为

表 1 k_p 的模糊规则表

E	E_c						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z	NS
NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NS
Z	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	PS	Z	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z	Z	NS	NM	NM	NB	NB

表 2 k_i 的模糊规则表

E	E_c						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	Z
NM	NB	NM	NM	NS	NS	Z	Z
NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PS
Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	Z	Z	PS	PS	PM	PM	PB
PB	Z	PS	PS	PM	PM	PB	PB

表3 k_a 的模糊规则表

E	E_c						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NM	NS	PS
NM	Z	NS	NB	NM	NM	NS	Z
NS	Z	NS	NM	NM	NS	NS	Z
Z	Z	NS	NS	NS	NS	NS	Z
PS	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PS	PM	PM	PS	PS	PB

$$R(E, E_c) = \prod_{j=1}^7 (\tilde{E}^j \times \tilde{E}_c^j) \times \tilde{k}_l^j, \quad l = p, i, d.$$

类似地,对于回收过程,其模糊推理规则为

$$R(R, R_c) = \prod_{j=1}^7 (\tilde{R}^j \times \tilde{R}_c^j) \times \tilde{k}_l^j, \quad l = p, i, d.$$

采用 Mamdani 型推理,常规生产计划给定输入变量 E 和 E_c ,输出变量 k_p, k_i, k_d 建立的模糊规则各包括 49 条规则,回收生产计划也有类似规则。

通过推理得到的正反向生产计划输出变量是模糊矢量,对其解模糊(反模糊化)可采用最大隶属函数法.总生产计划输出量是根据常规生产和回收生产推理的合成规则决定的。

4 案例应用分析

4.1 应用探讨

上述模糊自适应生产计划调度模型可用于工业/家用电器、设备或类似产品的循环供应链运作.此类供应链通常具有以下特点:

- 1) 属于大(中)批大(中)量生产,用户需求量和生产库存量较大;
- 2) 需求不确定性明显,生产过程可不完全只按用户订单量生产;
- 3) 产品具有可回收性和再利用价值,便于维修、拆解、重复使用,回收率不确定;
- 4) 生产周期相对较短,通常以周、月计,库存量变化频繁。

在此类循环供应链中,生产计划可不完全按照产品各组成部分进行比例计算.现以某不间断电源(UPS)供应链为例,该公司包括一个核心生产基地,上游有若干个供应商提供钢材、电子元件、蓄电池等部件,下游有若干个分销商网络代理销售,旧的 UPS 可回收并转入生产系统循环利用.在此采用简化的数值案例进行仿真验证,其中仿真参数如下:

- 1) 用户需求 $D(k)$ 采用 $k=0$ 开始的带扰动阶跃响应模拟不确定变化,即 $D(k=0)=1$,且有模拟扰动 $D(20 \leq k < 30) = 0.0 \sim 0.1$;
- 2) $0 \sim 40$ 周无回收活动,在 40 周时出现回收 $R(k=40) = 0.1$,模拟扰动 $R = 0.01 \sin(50k)$;

3) 生产系统生产时间常数 $T_p = 0.005$,在第 80 周时,用 $P(k=80) = 0.001 \sin(20k)$ 模仿生产系统不确定性扰动;

4) 生产计划初始变量: $k_p = 1.0, k_i = 0.7, k_d = 1.0$,常规生产计划量化因子 $\{1.0, 0.1, 1.0, 1.0, 1.0\}$,回收生产计划量化因子 $\{0.5, 0.1, 1.0, 0.1, 0.5\}$;

5) 生产设施可承受最大两倍的生产能力;

6) 销售网络的传函为 $1/(0.06s + 0.001)$;

7) 仿真时间精度为 $t_s = 0.0005$ s,仿真总时间为 120 周。

该 CSC 系统输出响应曲线如图 3 所示。

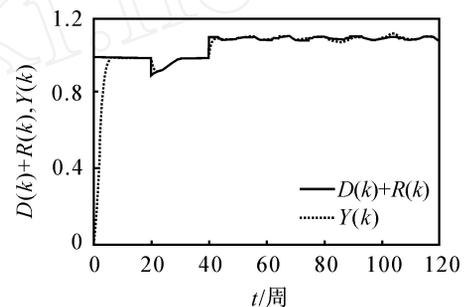
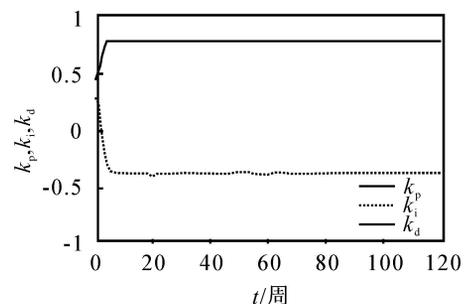


图3 模糊自适应 PID 响应曲线

由图 3 可以看出:

- 1) 需求 $D(k)$ 突然产生时, $Y(k)$ 能迅速响应,且超调量为 0.在 20 周需求产生负扰动时, $Y(k)$ 也能很好地跟踪,对需求正负向变化的响应较好。
- 2) 在 40 周 $R(k)$ 产生时,系统能根据正反向生产信息 $D(k) + R(k)$ 进行生产,并能跟踪 $R(k)$ 的波动,循环生产计划通过量化因子得到有效整合。
- 3) 在 80 周生产系统内部发生扰动时,系统也能迅速调整,虽有偏差,但非常小。
- 4) 系统稳态误差接近 0,误差变化量稳定,CSC 生产计划对内外不确定变化的抗扰能力较强。

为了进一步观察生产计划随误差调节的情况,给出了 PID 参数自整定过程,如图 4 所示。

图4 k_p, k_i, k_d 变化曲线

由图 4 可知, PID 的 3 个参数在生产过程中不是恒定不变的.在早期,3 者随阶跃响应作大范围调整,以便系统迅速进入稳定状态.在第 20 周需求波动时, k_p 产生了一个较大值;在第 40 周回收信号产

生后, k_p, k_i 产生了一个较小值, 而 k_d 产生了第 2 次峰值, 以促使系统回归稳定. 80 周以后, PID 参量随生产系统内部扰动作小范围调整.

4.2 结果分析

图 5 给出了常规 PID^[7] 和 FPID^[8] 的生产系统输出响应曲线.

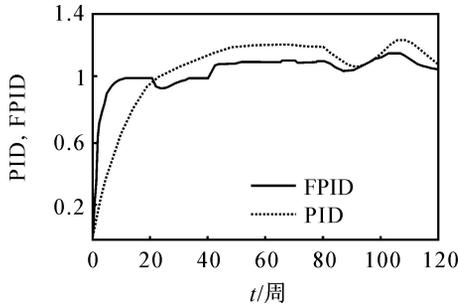


图 5 PID 与 FPID 响应曲线

由图 5 可知, 在不产生超调的情况下, 常规 PID 和 FPID 的响应速度均逊于模糊自适应 PID, 而且鲁棒性较差, 在第 80 周生产系统发生扰动时, 常规 PID 和 FPID 输出畸变明显.

为便于对比, 假定分销商当其库存量低于安全库存 0.6 时, 一次性向生产系统采购最近 5 周的货, 最大库存量为 6, 库存量 $I(k)$ 曲线如图 6 所示.

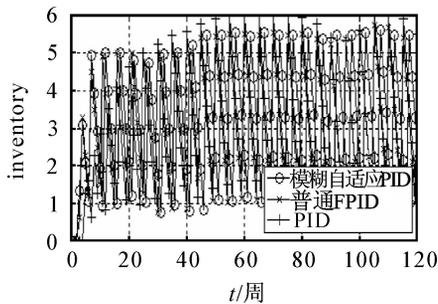


图 6 3 者的库存量对比

通过对比可知, 需求响应初期模糊自适应方案响应速度最快, 且总体库存水平最低. 常规 PID 方案库存量最高, 响应速度最慢, 且在生产系统内部扰动期间难以准确补货. 而 FPID 性能居中.

综合以上结果, 可得出以下结论:

1) CSC 的正向和逆向生产计划可通过模糊量化因子进行整合, 生产系统可及时跟踪需求信息 D 和回收信息 R .

2) 生产系统的扰动 P 被模糊自适应 PID 有效补偿, 说明生产系统参数的不确定对系统正常运行影响不大, 抗扰性能明显优于其他两种模型.

3) 生产计划的参数 k_p, k_i, k_d 能根据系统运行状态自行在线修改, 从而提高了生产计划的动静特性, 提高了系统鲁棒性.

4) 本方案的输出误差接近于 0, 减少了信息扭曲, 牛鞭效应得到了有效缓解, 库存管理要优于文献 [7] 中的 PID, 以及文献 [8] 中的 FPID 方案.

5 结 论

循环供应链中存在多种不确定信息, 传统的计划方式难以对正向和逆向生产计划进行整合. 本文建立的 CSC 模型很好地考虑了正向和逆向生产信息, 模型结构比较简单, 便于根据供应链的实际结构进行拓展. 模糊自适应生产计划调度模型能自行校正运行参数, 可有效消除循环供应链中的不确定性问题, 并可借助计算辅助手段修改现有生产计划的比例计算方式来实现.

参考文献(References)

[1] Andrea Sianesi. An analysis of the impact of plant and management variables in a multi-stage, mixed-model production system [J]. Int J Production Economics, 1998, 56-57(9): 575-585.

[2] Geary S, Disneyb S M, Towill D R. On bullwhip in supply chains — Historical review, present practice and expected future impact[J]. Int J Production Economics, 2006, 101(1): 2-18.

[3] Zhao Zheng-xu. Process planning with multi level fuzzy decision making [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 1995, 8(4): 245-254.

[4] Ravi V, Reddy P J. Fuzzy linear fractional goal programming applied to refinery operations planning[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 96(2): 173-182.

[5] Ian Miguel, Shen Qiang. Fuzzy DFCSP and planning [J]. Artificial Intelligence, 2003, 148(1/2): 11-52.

[6] Jens Leth Hougaard. A simple approximation of productivity scores of fuzzy production plans[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 152(3): 455-465.

[7] Lin Pin-Ho, David Shan-Hill Wong, Jang Shi-Shang, et al. Controller design and reduction of bullwhip for a model supply chain system using α -transform analysis [J]. J of Process Control, 2004, 14(5): 487-499.

[8] Samanta B, Al-Araimi S A. An inventory control model using fuzzy logic[J]. Int J Production Economics, 2001, 73(3): 217-226.

[9] Chauncey Starr. The ultimate uncertainty intergenerational planning[J]. Risk Analysis, 2000, 20(6): 793-800.

[10] Kibum Kim, Iksoo Song, Juyong Kim, et al. Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment [J]. Computers and Industrial Engineering, 2006, 51(2): 279-287.

[11] Yasutaka Kainuma, Nobuhiko Tawara. A multiple attribute utility theory approach to lean and green supply chain management [J]. Int J Production Economics, 2006, 101(1): 99-108.