

一种库存控制策略¹⁾

沈 挺 赵千川 郑大钟

(清华大学自动化系 北京 100084)

摘 要 运用动态规划的思想,提出了一种柔性制造系统库存的优化控制策略. 其最优性根据庞德里亚金最小值原理导出. 这种优化策略具有解析形式,并具有计算复杂度低和状态反馈的优点,可用于生产的实时调度.

关键词 柔性制造系统(FMS),生产流模型,库存控制.

AN INVENTORY CONTROL POLICY

SHEN Ting ZHAO Qianchuan ZHENG Dazhong

(Dept. of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract In this paper, we establish an optimal inventory control policy for FMS, following the idea of dynamic programming. Its optimality is derived by using Pontryagin's Minimum Principle. This scheduling policy is in analytical form and can be realized with small computation effort and in state feedback form. It can be used in real-time production scheduling.

Key words FMS, production flow model, inventory control.

1 引言

近年来, FMS 的生产调度和控制引起了很大关注. 80年代初, 文[1]提出了 FMS 的生产流模型. 此后, 基于这种模型的生产调度和控制研究取得了一定的进展^[2-5]. 但是, 研究的难点在于难以获得解析解. 最近, Hui Yun 和 Sherman X Bai²⁾应用庞德里亚金极小值原理得到了只生产两种产品的库存控制策略的解析解形式, 但所用方法难以用于三种产品以上库存控制问题. 本文应用动态规划, 得到一种生产 n 种产品系统的库存控制策略. 该策略具有解析解形式, 不依赖优化的时间区间, 仅仅取决于当前时刻的各产品库存, 具

1)国家自然科学基金和国家攀登计划资助项目.

2)Hui Yun, Sherman X Bai. Optimal production flow control for a flexible manufacturing system, research report 96-5, Dept. Industrial & Systems Engineering, Univ. of Florida.

收稿日期 1997-07-14 收修改稿日期 1998-05-25

有状态反馈形式. 本文结果包含了 Hui Yun 和 Sherman X Bai 针对二维情形得到的优化策略.

2 模型及问题描述

讨论 n 维生产流模型, 即能生产 n 种产品的 FMS 加工中心. 对产品 $i (i=1, \dots, n)$, 控制变量取为瞬时生产速度 $u_i(t)$, 即单位时间生产产品 i 的个数, τ_i 为生产单个第 i 种产品所需时间. 设系统生产能力满足约束

$$\sum_{i=1}^n u_i(t) \tau_i \leq 1, \quad (1)$$

产品 i 的市场需求速度为 $d_i (d_i > 0)$, 模型中可认为是常数, 且满足

$$\sum_{i=1}^n d_i \tau_i < 1, \quad (2)$$

即系统生产能力可保证供求平衡. 取产品 i 瞬时库存为系统状态变量 x_i , 它与 u_i, d_i 存在关系

$$dx_i/dt = u_i(t) - d_i. \quad (3)$$

直观上, 当 $x_i(t) > 0$, 库存过剩, 供过于求; 当 $x_i(t) < 0$, 库存不足, 供不应求; 当 $x_i(t) = 0$ 且

$u_i(t) = d_i$, 即为理想的供求平衡状态. 定义费用函数 $g(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) = \sum_{i=1}^n c_i x_i^2(t)$, $c_i > 0$ 为费用系数. 在给定的调度时间长度 T 下, 目标函数取为

$$J(\mathbf{u}(t)) = \int_0^T g(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) dt. \quad (4)$$

库存控制对应的优化问题如下.

问题 P. 给定初始库存 $\mathbf{x}(0) = (x_1(0), \dots, x_n(0))^T$, 寻找 $\mathbf{u}(t) = (u_1(t), \dots, u_n(t))^T$ 使满足(1)和(3)条件下, 目标函数 $J(\mathbf{u}(t))$ 为最小.

在模型中, 采用二次型指标 $\sum_{i=1}^n c_i x_i^2(t)$ 具有一定的实际意义; 在库存 $x_i(t) > 0$ 时, 产品过剩会造成资金积压并需支付仓储费用; 在库存 $x_i(t) < 0$ 时, 由于库存不足不能及时满足市场需求会造成利润上的损失; 费用系数 c_i 是两种情况下付出代价的综合. 在这种指标下, 零库存是理想状态. 因此, 我们的基本决策原则是, 所有产品的库存一旦同时达到零, 就使 $u_i(t) = d_i (i=1, \dots, n)$ 并一直持续到 T , 从而维持零库存状态, 同时也满足了供求平衡.

3 优化策略

考虑 n 维生产系统. 各产品初始库存为 $\mathbf{x}(0) = (x_1(0), \dots, x_n(0))^T$, 每种产品的参数 c_i, d_i 为给定且满足约束要求. 定义变量 $y_k(t) = c_k \tau_k^{-1} x_k(t)$, 构造一个集合

$$\mathbf{K}_t = \{k | y_k(t) = \min_{i \in \{1, \dots, n\}} y_i(t)\}. \quad (5)$$

库存控制策略(库存状态驱动的生产调度策略):

1) 对所有产品库存同时为非负的情形, 有 $\min_{i \in \{1, \dots, n\}} y_i(t) \geq 0$,

1a) 如果 $\min_{i \in \{1, \dots, n\}} y_i(t) = 0$, 则对 $k \in K_t$ 取控制为 $u_k(t) = d_k$, 对 $k \notin K_t$ 取控制为 $u_k(t) = 0$, 在区间 $(t, T]$ 的整个调度过程中, 维持零库存和供求平衡;

1b) 如果 $\min_{i \in \{1, \dots, n\}} y_i(t) > 0$, 则取 $u_k(t) = 0, k = 1, \dots, n$.

2) 对有负库存产品的情形, 有 $\min_{i \in \{1, \dots, n\}} y_i(t) < 0$,

2a) 不生产“当前库存为非负产品”, 即如果 $y_i(t) \geq 0$, 则取控制为 $u_i(t) = 0$;

2b) “对当前库存小于零产品”进行调度, 由于每种库存不足产品都应以尽可能大速度生产. 但由各产品短缺引起的费用不同, 有必要对短缺产品的生产速度引入分配判据及相应分配方案.

生产速度分配判据:

(i) 只生产 K_t 中的短缺产品, 且生产速度取为 ξ_k , 即 $u_k(t) = \xi_k, k \in K_t$;

(ii) 不生产 K_t 以外的短缺产品, 取 $u_k(t) = 0, k \notin K_t$.

生产速度 ξ_k 根据如下分配方案确定. 对 $k \in K_t, \xi_k$ 为如下非齐次线性方程组的唯一解

$$\begin{cases} \sum_{k \in K_t} (\xi_k \tau_k) = 1, \\ (c_i/\tau_i)(\xi_i - d_i) = (c_j/\tau_j)(\xi_j - d_j), \forall i, j \in K_t. \end{cases} \quad (6)$$

通过简单运算, 容易确定其解为

$$\xi_k = d_k + (1 - \sum_{i \in K_t} d_i \tau_i) [(c_k/\tau_k) (\sum_{i \in K_t} \tau_i^2/c_i)]^{-1}, \forall k \in K_t. \quad (7)$$

可以看出, 在给定生产速度约束和参数 c_i, τ_i 下, 分配方案中的生产速度分配关系由集合 K_t 决定. 上述库存控制策略中生产速度分配方案根据短缺产品的费用系数和相应的生产时间确定. 而短缺产品的生产速度所满足的方程(6)是由生产能力约束和庞德里亚金最优性必要条件导出, 具体步骤见下节.

4 库存控制策略的动态规划解释和最优性

定义 Hamilton 函数为 $H(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{p}(t)) = g(t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) + \sum_{i=1}^n p_i(t) [u_i(t) - d_i]$, 其中 $\mathbf{p}(t)$ 是协状态. 根据庞德里亚金最小值原理, 最优控制应满足如下必要条件:

$$\dot{x}_i^*(t) = \partial H / \partial p_i = u_i^*(t) - d_i, i = 1, \dots, n, \quad (8)$$

$$\dot{p}_i^*(t) = -\partial H / \partial x_i = -2c_i x_i^*(t), i = 1, \dots, n, \quad (9)$$

协状态满足末值条件 $\mathbf{p}(T) = 0$,

$$H(\mathbf{x}^*(t), \mathbf{u}^*(t), \mathbf{p}^*(t)) = \min_{\mathbf{u} \in \Omega} H(\mathbf{x}^*(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{p}^*(t)). \quad (10)$$

鉴于本文研究费用函数 $g(t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))$ 只显式依赖于状态, 故此处 $H(\mathbf{x}^*(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{p}^*(t))$ 第一项与控制 $\mathbf{u}(t)$ 无关, 条件(10)等价于最小化

$$\min_{\mathbf{u} \in \Omega} \sum_{i=1}^n p_i^*(t) [u_i(t) - d_i], \quad (11)$$

其中 Ω 代表问题 P 的允许控制集合, 取为满足约束(1)的非负分段右连续向量. 由于 d_i 均为常数, 最小化式(11)可进一步简化为线性规划问题如下:

$$\text{问题 LP.} \quad \min_{\mathbf{u} \in \Omega} \sum_{i=1}^n p_i^*(t) u_i(t), \quad (12)$$

subject to

$$\sum_{i=1}^n u_i(t)\tau_i = 1, \quad u_i(t) \geq 0, \quad \forall t \in [0, T], i = 1, \dots, n.$$

容易验证, 如果将 $y_i(t)$ 重新定义为 $p_i^*(t)/\tau_i$, 那么前节给出的反馈控制策略满足上述必要条件. 下面出现的 K_i 和 ξ_i 指的都是 $y_i(t)$ 取作 $p_i^*(t)/\tau_i$ 时按照式(5)和(6)计算所得的结果. 定义 $U_i = (\tau_i)^{-1} (i=1, \dots, n)$, 表示生产单一产品时的最大生产速度. 我们把 U_i 看作 K_i 集合为单点集 $\{i\}$ 时 ξ_i 的特例.

在动态规划中涉及值函数的概念. 对 $\forall t \in [0, T]$, 值函数定义为

$$V(t, x) = \inf_{u \in \Omega_t} \int_t^T g(s, x(s), u(s)) ds.$$

在较强假定下, 协态与值函数对状态的偏导数之间存在如下关系

$$p_i^*(t) = \partial V(t, x^*(t)) / \partial x_i. \quad (13)$$

因此粗略地讲, 上节提出的库存控制策略可理解为无短缺产品时停止生产; 有短缺产品时, 对单位时间内降低费用最有效的短缺产品按比例分配生产能力, 同时不生产其他短缺产品和非负库存产品. 下面根据最优控制应满足的必要条件论证库存控制策略的最优性.

推论1. 最优控制只可能取值 $u_i^*(t) \in \{0, U_i, d_i, \xi_i\}$.

证明. 根据 $p_i^*(t)$ 的符号, 可分别讨论线性规划问题 LP 解的结构. 这里仅讨论 $K_i = \{k \mid p_k^*(t)/\tau_k = \min_{i \in \{1, \dots, n\}} p_i^*(t)/\tau_i\}$ 为非空且 $p_k^*(t)/\tau_k < 0$ 及 $k \in K_i$ 的情形, 其他情况可类似讨论. 考虑到库存, 从而协状态的导数连续, 只需讨论协状态符号在有限区间上的变化情况. 假定在区间 (t_1, t_2) 内成立比例关系

$$p_i^*(t)/\tau_i = p_k^*(t)/\tau_k, \quad t \in (t_1, t_2), \quad (14)$$

在 (t_1, t_2) 上对式(14)两边求导并结合协态方程(9)可导出 (t_1, t_2) 上状态间的比例关系

$$c_i x_i^*(t)/\tau_i = c_k x_k^*(t)/\tau_k. \quad (15)$$

在 (t_1, t_2) 上对式(15)两边求导并结合状态方程可有

$$c_i (u_i^*(t) - d_i)/\tau_i = c_k (u_k^*(t) - d_k)/\tau_k. \quad (16)$$

任取满足条件 $\sum_{k \in K_i} u_k \tau_k < 1$ 的容许控制 $u(t)$, 并记 $r = p_k^*(t)/\tau_k, k \in K_i$, 简单计算后有

$$\sum_{j=1}^n p_j^*(t) u_j(t) = \sum_{j=1}^n p_j^*(t)/\tau_j u_j(t) \tau_j \geq r \sum_{j=1}^n u_j(t) \tau_j > r = \sum_{k \in K_i} p_k^*(t)/\tau_k u_k^*(t) \tau_k. \quad (17)$$

上述非最小性表明控制 $u(t)$ 不可能成为最优控制. 因此, 最优控制必然满足式(6)和

$$\sum_{k \in K_i} u_k \tau_k = 1, \quad u_j^*(t) = 0, \quad j \notin K_i. \quad (18)$$

式(16)和(18)恰好构成了生产速度分配方程组(6). 容易验证这个方程组的解是唯一的. 因此, 在 (t_1, t_2) 上最优控制在 $k \in K_i$ 上只能取方程组(6)所确定的解 ξ_k . 证毕.

推论2. 若 $(t_1, t_2] \subset [0, T]$ 上最优控制为 $u_i^*(t) = d_i$, 则 $x_i^*(t) = 0, p_i^*(t) = 0, t \in (t_1, t_2)$.

引理1. 对初始库存 x 开始于 t 的生产过程, 若 $\min_{i \in \{1, \dots, n\}} x_i < 0$, 则存在区间 (t, t_1) 使最优协态满足 $\min_{i \in \{1, \dots, n\}} p_i^*(s) < 0, s \in (t, t_1)$.

证明. 采用反证法. 反设 $\min_{i \in \{1, \dots, n\}} p_i^*(s) \geq 0, s \in (t, t_1)$.

1)首先考虑 $\min_{i \in \{1, \dots, n\}} p_i^*(s) > 0$ 在某区间 $[t, t_1)$ 上成立. 从最优性必要条件(12)可推断在 $[t, t_1)$ 上 $u_i^*(s) = 0, i = 1, \dots, n$. 注意到对属于集合 $D_i^- = \{k | x_k(t) < 0\}$ 的产品, 其生产速度为零, 状态单调减, 而协态却在增加(方程(9)的右边符号为正), 故到 t_1 时刻, D_i^- 中的产品的协态保持为正, 状态保持为负, $D_i^- \subset D_{t_1}^- = \{k | x_k^*(t_1) < 0\}$. 这个过程可重复直到出现 $\min_{i \in \{1, \dots, n\}} p_i^*(t_m) = 0$ 的时刻, 则有 $u_k^*(s) = 0, s \in (t, t_m), k \in D_i^-$, 因此, 只需对 $\min_{i \in \{1, \dots, n\}} p_i^*(t) = 0$ 的情形导出矛盾.

2)设 $\min_{i \in \{1, \dots, n\}} p_i^*(t) = 0$. 不失一般性, 考虑协态不全为零的情况. 若 $\min_{i \in \{1, \dots, n\}} p_i^*(s)$ 在 t 开始的某区间 $[t, t_1)$ 上为零, 则 D_i^- 中的产品协态将在 $[t, t_1)$ 上保持为正, 除非出现某个时刻 $s_1 \geq t$ 起的区间 (s_1, s_2) 上 $\min_{i \in \{1, \dots, n\}} p_i^*(s) < 0$ ($\min_{i \in \{1, \dots, n\}} p_i^*(s)$ 在区间上大于零将回到情形1))的情况. 注意到对 $k \in K_{s_1}$ 均有 $\dot{p}_k^*(s_1) = -2c_k x_k^*(s_1) < 0$, 而 D_i^- 中产品的状态在 s_1 时刻均为负, 故 $K_{s_1} \cap D_i^- = \emptyset$. 于是 $u_k^*(s) = 0, s \in (s_1, s_2), k \in D_i^-$, D_i^- 中的产品状态继续递减, 协态递增, 在 (s_1, s_2) 上同样保持为正. 总之, $[t, T)$ 上 D_i^- 中产品的协态始终为正, 这与协态在 T 时刻全为零的边值条件矛盾. 证毕.

对某些产品的库存为正的情形, 即存在 i 使 $x_i(t) > 0$, 下面一个命题是显然的.

命题1. 若 $\min_{i \in \{1, \dots, n\}} c_i x_i(t) / \tau_i \geq 0$, 则最优控制为

$$u_i^*(t) = \begin{cases} 0, & \text{若 } x_i(t) > 0, \\ d_i, & \text{若 } x_i(t) = 0. \end{cases} \tag{19}$$

上述命题针对库存均为非负的情形确定了最优控制. 下面来考虑有部分产品库存为负时, 针对正库存的产品应采取的控制.

命题2. 若 $x_i^*(t) > 0$, 则 $u_i^*(s) = 0$ 对某个区间 (t, t_1) 成立.

证明. 由命题1, 只需要考虑有负库存的情形. 首先, 由最优控制必要条件可知 $u_i^*(s) \neq d_i$ (若不然, 则 $u_i^*(s) = d_i$ 在 (t, t_1) 上成立蕴含着 $p_i^*(t) = -2c_i x_i^*(t) > 0$, 表明在某个 (t, t_2) 上 $p_i^*(t) \neq 0$. 这与 $u_i^*(s) = d_i$ 在区间 (t, t_1) 成立仅当在同一区间上 $p_i^*(s) = 0$ 矛盾). 为证 $u_i^*(s) = 0$, 只需证 $u_i^*(s) \leq d_i$ 在某个区间上成立. 采用反证法, 设在 (t, t_1) 上 $u_i^*(s) > d_i$, $[t, t_1)$ 是使 $u_i^*(s) > d_i$ 成立的最大区间. 易证 (t, t_1) 上 $u_i^*(s) = \xi_i$ 蕴含 $p_i^*(t) / \tau_i = \min_{j \in \{1, \dots, n\}} p_j^*(t) / \tau_j < 0$ 和 $c_i x_i^*(s) / \tau_i = c_k x_k^*(s) / \tau_k$ 对 $k \in K_i, s \in [t, t_1)$ 成立. 并且 $\sum_{u_j^*(t) > 0} \tau_j \xi_j = 1$. 这表明在 $[t, t_1)$ 上 K_i 中的产品库存同为正号. 考虑状态和协态方程(8)和(9)可知, t 时刻负库存的产品的协态在 $[t, t_1)$ 内单调增; t 时刻正库存产品在库存减到零之前其协态在 $[t, t_1)$ 内单调减; 特别地 $k \in K_i, p_k^*(s) / \tau_k$ 单调减. 于是 (t, T) 中的生产速度切换将始终只发生在 t 时刻具有正库存的产品之间. 这必然导致 $\min_{j \in \{1, \dots, n\}} p_j^*(s) / \tau_j$ 在 $[t, T)$ 上始终为负并且单调减. 这与 $\min_{j \in \{1, \dots, n\}} p_j^*(T) / \tau_j = 0$ 的边值条件矛盾. 证毕.

现给出关于库存控制策略的最优性结果.

定理1. 问题 P 的最优解必具有库存控制策略的形式.

证明. 由命题1和2知若 $x_i^*(t) > 0$, 则必有 $u_i^*(t) = 0$. 现考虑存在负库存情形下控制策略的最优性. 由引理1, $\min_{j \in \{1, \dots, n\}} p_j^*(s) / \tau_j < 0$ 在某区间 (t, t_1) 上成立, 故 $u_k^*(s) > d_k$ 在 (t, t_1) 上对集合 K_i 成立. 根据问题 P 的最优控制应满足的必要条件, 可由协态导出最优控制为 $u_k^*(s) = \xi_k, k \in K_i, s \in (t, t_1)$, 其中 $K_i = \{k | p_k^*(t) / \tau_k = \min_{j \in \{1, \dots, n\}} p_j^*(t) / \tau_j\}$. 下面证明

$$c_k x_k^*(s)/\tau_k < c_i x_i^*(s)/\tau_i, \quad k \in K_t, \quad i \notin K_t, \quad s \in (t, t_1). \quad (20)$$

采用反证法,反设 $0 > c_k x_k^*(t)/\tau_k > c_i x_i^*(t)/\tau_i$ 对某个 $k \in K_t, i \notin K_t$ 成立. 因为 $p_k^*(t)/\tau_k < p_i^*(t)/\tau_i < 0$ 和 $u_i^*(t) = 0, u_k^*(t) > d_k$, 利用协态方程得

$$p_i^*(s)/\tau_i - p_k^*(s)/\tau_k \geq p_i^*(t)/\tau_i - p_k^*(t)/\tau_k > 0, s \in (t, t_1). \quad (21)$$

设 t_1 时刻发生生产速度切换, 由 $p_k^*(s)/\tau_k$ 在 (t, t_1) 上的最小性可知存在 $q \in K_{t_1}$, 使 $\dot{p}_q^*(t_1^-)/\tau_q < \dot{p}_k^*(t_1^-)/\tau_k$, 即 $c_q x_q^*(t_1)/\tau_q \geq c_k x_k^*(t_1)/\tau_k$. 考虑到 $x_i^*(s)$ 和 $x_k^*(t)$ 分别在 (t, t_1) 上单调减和单调增, $0 > c_q x_q^*(t_1)/\tau_q > c_i x_i^*(t_1)/\tau_i$ (小于零是由于 $u_q^*(s) > d_q$ 在 t_1 开始的某区间成立), 若 $\min_{j \in \{1, \dots, n\}} p_j^*(s)/\tau_j$ 在 (t, T) 上始终为负, 则反复运用上述推理过程将导出产品 i 协态与另一产品协态在 T 时刻不相等, 这与所有协态在 T 时刻均相等(均为零)矛盾. 注意到在 $\min_{j \in \{1, \dots, n\}} p_j^*(s)/\tau_j < 0$ 的从 t 开始的区间上, $x_i^*(s) < x_i^*(t)$ 始终保持为负, 若在 T 之前某时刻 s_1 , $\min_{j \in \{1, \dots, n\}} p_j^*(s)/\tau_j$ 达到零, 则由引理1知此时必有 $x_i^*(s_1) \geq 0$. 矛盾. 因此式(20)成立. 另外, 容易验证若 $p_i^*(s)/\tau_i = p_k^*(s)/\tau_k, s \in (t, t_1)$, 则 $c_i x_i^*(s)/\tau_i = c_k x_k^*(s)/\tau_k, s \in (t, t_1)$, 结合式(20)可知 $x_k^*(t) < 0$ 时, $c_k x_k^*(t)/\tau_k = \min_{j \in \{1, \dots, n\}} c_j x_j^*(t)/\tau_j$ 的充分必要条件是 $p_k^*(t)/\tau_k = \min_{j \in \{1, \dots, n\}} p_j^*(t)/\tau_j$. 于是有负库存产品情形时,

$$\{k | p_k^*(t)/\tau_k = \min_{j \in \{1, \dots, n\}} p_j^*(t)/\tau_j\} = \{k | c_k x_k^*(t)/\tau_k = \min_{j \in \{1, \dots, n\}} c_j x_j^*(t)/\tau_j\} \quad (22)$$

成立, 即控制策略中的生产速度分配方案满足最优性必要条件(12). 结合命题2、引理1和推论1, 定理得证.

5 计算实例

一个生产八种产品的系统, 其初始库存及参数如表1所示.

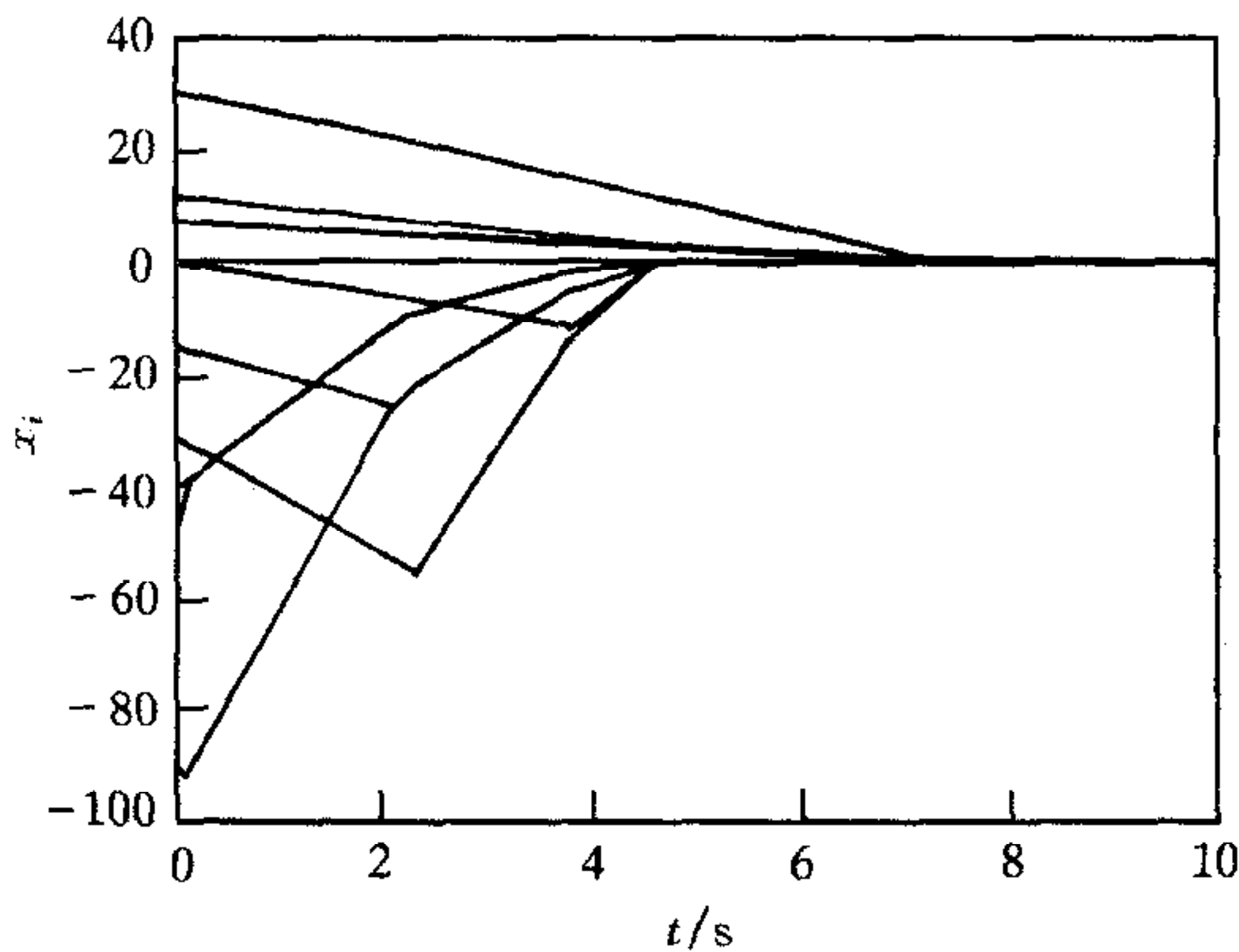


图1 各产品库存变化曲线

表1 FMS 的最大产品生产速度、产品需求速度、库存费用系数和初始库存状态

Type	1	2	3	4	5	6	7	8
τ_i^{-1}	11	25	44	67	111	56	90	131
d_i	1	2	4	3	8	12	5	11
c_i	3	5	11	7	21	18	11	3
$x_i(0)$	8	12	30	0	-50	-90	-14	-30

考虑生产阶段为 $[0, 10]$ 的以库存的加权二次型积分为最小化目标的优化调度问题. 通过计算可知, $\sum_{i=1}^n d_i \tau_i = 0.7325 < 1$, 这表明系统满足稳定性条件(2), 图1给出了采用本文提出的状态反馈型库存控制策略所得到的各产品在生产阶段内的库存时间轨迹, 其中状态单位是1, 离散仿真时间步长取为0.01秒.

图中库存的转折点对应于生产速度的切换时刻, 可以看出产品是按照若干离散的最优生产速度进行的, 随着时间推移, 生产能力总在单位时间内降低费用最有效的短缺产品类型之间按比例分配. 这些短缺产品的库存缺口在减小, 非负库存产品的库存在以需求速

度下降,引起费用降低不快的短缺产品库存缺口在扩大.

6 结论

本文提出的库存控制策略具有解析解的形式,适合于一般性的 FMS. 其2维下的结论与用庞德里亚金极小值原理得到的最优解结论完全一致,而对 n 维策略的优化特性有明显的物理意义. 这种策略在思想上运用了动态规划原理,但在具体调度过程只涉及状态判断及简单的线性方程组求解,可以直接给出解的代数表达式,与一般的数值动态规划方法相比,其计算量较小. 尤其对高维情况,避免了因组合爆炸而造成的不可解性. 控制策略具有状态反馈形式,使生产系统有了一定的抑制库存及生产扰动能力,因而可以用于产品种类很多的生产系统的实时调度.

参 考 文 献

- 1 Kimemia J, Gershwin S B. An algorithm for the computer control of a flexible manufacturing system. *IIE Transactions*, 1983, **15**(4): 353—362
- 2 Akella R, Kumar P R. Optimal control of production rate in a failure prone manufacturing system, *IEEE Trans. Autom. Control*, 1986, **31**(2): 116—126
- 3 Sharifnia A, Caramanis M, Gershwin S B. Dynamic setup scheduling and flow control in manufacturing systems. *Discret Event Dynamic System, Theory and Applications*, 1991, **1**(2): 149—175
- 4 Srimivatsan N, Gershwin S B. Selection of setup times in a hierarchically controlled manufacturing systems. In: Proc. of the 29th IEEE CDC, 1990, Hawaii: 575—581
- 5 Gershwin S B. *Manufacturing Systems Engineering*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice, Hall, 1994

沈 挺 1975年11月生,1998年在清华大学自动化系获学士学位,现就读于斯坦福大学工程经济系统及运筹学系. 目前研究兴趣是 FMS 的调度优化.

赵千川 郑大钟 简介见本刊第23卷第4期.