

文章编号: 1001-0920(2003)01-0034-06

柔性 Job shop 集成化计划调度模型及其求解算法

庞哈利

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 考虑不同加工工艺路径的成本因素, 从集成化的角度研究了柔性 Job shop 计划和调度问题, 针对问题的结构特点, 建立了两层混合整数规划模型。提出门槛接受、遗传算法与启发式规则相结合的混合求解算法, 综合考虑各层次决策问题进行求解。实例计算表明, 该算法可迅速求得问题的近优解, 表现出良好的求解性能。

关键词: 集成化; 计划; 调度; 柔性 Job shop; 混合算法

中图分类号: F273

文献标识码: A

Integrated planning and scheduling model and hybrid heuristic algorithm for flexible job shop

PANG H a-li

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: An integrated planning and scheduling problem of job-shop type flexible manufacturing system is investigated by considering the cost of processing routes. The problem is characterized by that each job can have alternative process plans that indicate the operation needed, and each operation can be performed on alternative machines. A two level mixed integer programming model is presented according to structural features of the problem. A hybrid heuristic algorithm based on threshold accepting, genetic algorithm and heuristics rules is developed to solve the problem. This algorithm is performed on some randomly generated problems, and the results show that proposed algorithm is efficient.

Key words: Integrated; Planning; Scheduling; Flexible job shop; Hybrid heuristic algorithm

1 引言

Job shop 是一类最具一般性的生产加工环境, 该类调度问题已得到广泛的关注和研究^[1-3]。在传统的 Job shop 调度问题研究中, 仅考虑每一工件具有唯一确定加工工艺路线的情况。随着加工技术、自动化技术的发展, 特别是柔性加工系统(FMS)的出现, 工件加工工艺路线必须唯一确定的传统限制已被突破, 工件具有多个可选择的加工路线, 即路径柔性已成为生产的实际需求。因此, 研究具有路径柔性的车间调度问题具有重要的理论和应用意义。

路径柔性是 FMS 的一个重要特性, 它可有效地平衡工序负荷, 缩短加工时间, 减少在制品库存, 大大提高加工系统的整体性能。一般说, 加工路径确定问题属工艺计划研究的范畴, 而生产调度问题则属车间作业控制研究的范畴。由于计划和控制结构的复杂性, 前期研究中二者往往分开或按一定的层次顺序进行^[4,5], 这种分而治之的决策模式影响了加工系统的整体运行性能。注意到上述局限性, Jiang 等^[6]研究了一类具有多个可选加工机器的 FMS 调度问题, 考虑了各工件的加工操作工序确定但每一

收稿日期: 2002-01-08; 修回日期: 2002-04-25。

基金项目: 辽宁省博士启动基金资助项目(200112020)。

作者简介: 庞哈利(1963—), 男, 辽宁沈阳人, 副教授, 博士, 从事生产计划与调度、智能优化算法等研究。

工序可在多台可选机器上完成的情况。Logendran 等^[7]进一步扩展了路径柔性的概念, 认为加工工艺计划是关于工件所需加工操作及完成这些操作所需机器的描述, 即工件可有多种加工操作工序选择, 而每一操作工序又可从多台可选机器中选择一台完成。

考虑到实际生产过程中, 采用不同的加工工艺计划将引起不同的附加费用(如机器设置、加工成本、消耗等), 本文扩展了文献[7]的研究, 在引入加工工艺路径成本因素的前提下, 研究了柔性 Job shop 计划与调度集成化问题, 建立了两层混合整数规划模型。综合运用门槛接受算法、遗传算法和启发式规则, 提出了混合启发式求解算法。实例计算表明了该算法的有效性。

2 问题描述与建模

柔性 Job shop 集成计划调度问题描述如下: N 个工件在具有 M 台机器的加工环境中加工, 每一工件均有多种可选择的工艺加工计划, 每一加工计划可包含不同的加工操作工序, 每一操作工序可选择不同的机器进行加工。要求为每一工件确定合适的加工路径, 即由加工计划限定的操作工序集合以及每一操作的承担机器, 确定各工件的所有加工工序在相应机器上的加工顺序, 使得生产总费用目标最小。

柔性 Job shop 集成计划调度问题包含以下 3 方面内容: 1) 为每一工件选定加工工艺计划(所需加工操作工序); 2) 确定该加工计划所包含的加工操作的执行机器(加工工艺路径); 3) 在工件加工工艺路径限定下, 确定各工件的每一操作在相应机器上的加工顺序。这 3 方面内容逻辑上具有递阶关系, 可以划分为两个层次的决策问题。上层问题确定工件的加工工艺路径; 下层问题则确定工件各加工操作的加工顺序。下层问题的求解依赖于上层问题的决策结果, 而下层问题的求解结果对于上层决策具有反馈作用。

为便于描述, 定义符号与变量如下:

i —工件编号, $i \in I = \{i: i = 1, 2, \dots, N\}$; j —加工计划编号, $j \in P(i) = \{j: j = 1, 2, \dots, P_i\}$; m —机器编号, $m \in M = \{m: m = 1, 2, \dots, M\}$; k —加工操作编号, $k \in \Omega = \{k: k = 1, 2, \dots, K\}$; $P(i)$ —工件 i 的加工计划集合; $O(i, j)$ —工件 i 采用第 j 个加工计划所确定的加工操作集合, $O(i, j) \subseteq \Omega$, $|O(i, j)| = O_{ij}$; $M(k)$ — k 操作的可选机器集合; N_p —足够大

的正数; C_{ik}^m —工件 i 采用 j 计划加工, k 操作在 m 机器上加工的附加成本; Z_{ij} —若工件 i 采用第 j 个加工计划则 $Z_{ij} = 1$, 否则 $Z_{ij} = 0$; X_{ijk} —若工件 i 的第 j 个计划包含 k 操作, 即当 $k \in O(i, j)$ 时 $X_{ijk} = 1$, 否则 $X_{ijk} = 0$; Y_{ijkn} —若工件 i 采用第 j 个加工计划且其第 k 个操作在 m 机器上完成则 $Y_{ijkn} = 1$, 否则 $Y_{ijkn} = 0$; W_{ilrs}^{jgn} —工件 i 采用第 j 个加工计划, 其第 l 个操作在 m 机器上领先于工件 r 的 q 加工计划的第 s 个操作则 $W_{ilrs}^{jgn} = 1$, 否则 $W_{ilrs}^{jgn} = 0$; t_{il}^m —工件 i 采用 j 计划加工, 其第 l 个操作在 m 机器上的加工时间; f_{il}^m —工件 i 采用 j 计划加工, 其第 l 个操作在 m 机器上的完工时间。

令

$$Mks = \max_{i \in I, j \in P(i), k \in O(i, j)} \left\{ \sum_{m=1}^M f_{ik}^m \cdot Y_{ijkn} \right\} \quad (1)$$

则最小化加工总费用目标函数为

$$\min \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j \in P(i)} \sum_{k \in O(i, j)} \sum_{m=1}^M C_{ijkn} \cdot Y_{ijkn} \right) + Mks \quad (2)$$

$$s.t. \quad Z_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$Y_{ijkn} = X_{ijk} \cdot Z_{ij} \quad (4)$$

$$i = 1, \dots, N, j \in P(i), k \in O(i, j) \quad (4)$$

$$X_{ijk} = O_{ij}, \quad i = 1, \dots, N, j \in P(i), k = 1 \quad (5)$$

其中 Mks 由如下问题解出。

$$\min Mks \quad (6)$$

$$s.t. \quad f_{i(l+1)}^m - f_{il}^{jh} - t_{i(l+1)}^m \quad (7)$$

$$i = 1, \dots, N, l = 1, \dots, O_{ij} - 1$$

$$f_{il}^{jm} - f_{rs}^{qn} + W_{ilrs}^{jgn} \cdot N_p - t_{il}^{jm} \quad (8)$$

$$i, r = 1, \dots, N, l = 1, \dots, O_{ij} - 1$$

$$s = 1, \dots, O_{rq} - 1 \quad (9)$$

$$f_{il}^{jm} - N_p \cdot Y_{ijkn} \quad (10)$$

$$i = 1, \dots, N, j \in P(i), k \in O(i, j), m \in M(1) \quad (10)$$

$$f_{il}^{jm} - Mks \quad (11)$$

$$i = 1, \dots, N, j \in P(i), k \in O, m \in M \quad (11)$$

上述问题模型为两层混合整数规划模型: 上层

表 1 工件 - 加工计划 工序操作 - 机器选择

操作	工件 1		工件 2		工件 3		机 器		
	$p = 1$	$p = 2$	$p = 1$	$p = 2$	$p = 1$	$p = 2$	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$
$k = 1$	1		1		1	1	1	1	
$k = 2$	1	1	1	1		1	1		1
$k = 3$		1	1	1	1			1	1

规划为每一工件选定加工计划, 确定完成各操作工序的加工机器; 下层规划则确定各工件的每一工序在相应机器上的加工顺序。式(2) 描述了由工艺加工路径和加工时间联合确定的加工总费用目标函数; 式(3) 表明每一工件只能选择一种加工计划; 式(4) 和(5) 描述了由选定加工计划确定的各工件的每一工序必有且仅有一台机器进行加工; 式(6) 为最小化 $Makespan$ 目标函数, 体现了操作层追求的目标, 同时也是操作层对工件加工计划决策的反应; 式(7) 表示同一工件不同工序间的加工顺序约束 - 工艺约束; 式(8) 和(9) 反映同一机器上不同工件加工的顺序, 体现了每一机器在同一时间只能完成一道工序加工, 每道工序同一时间只能在一台机器上加工; 式(10) 将上层问题的工艺路径决策结果与下层问题中工件完工时间计算联系起来; 式(11) 表明所有工件的完工时间均小于 $Makespan$ 。

3 求解算法

柔性 Job shop 集成计划调度问题包括确定工件加工计划、工序加工机器和各机器上工序排序 3 方面决策问题。求解算法既要解决上述 3 方面问题, 又要考虑它们之间的递阶关系。为便于理解, 结合具体实例, 分别给出以上 3 方面问题的可行解邻域结构和相应的求解算法。

考虑 3 个工件、3 台机器的柔性 Job shop 集成计划调度问题, 表 1 给出了每一工件的可选加工计划和每一工序操作的可选加工机器。

3.1 可行解结构

1) 工件加工计划的确定: 以每一工件的可选加工计划编号构造行向量 $[P_{1j} P_{2j} \dots P_{ij} \dots P_{Nj}]$, 表示 N 个工件的加工计划选择。例如 $[2\ 1\ 1]$ 表示工件 1, 2, 3 分别选定 2, 1, 1 工艺加工计划。由此各工件确定的加工操作工序为: $\{J_1: k_2, k_3\}$, $\{J_2: k_1, k_2, k_3\}$, $\{J_3: k_1, k_3\}$ 。

2) 加工操作机器的确定: 以 $N \times \max_{i,j} \{O_{ij}\}$ 维矩阵形式表达解的结构。其中: 每一元素值代表选择的机器号, 所在行列分别标识不同的工件和操作工序, 元素值为 0 表示工件所选择的加工计划中不包

含此操作。如上加工计划选择下的一种机器选择方案如图 1 所示。

工件	操作工序	选择机器编号
1	3 2 0	
2	1 3 2	
3	1 0 3	

图 1 工件各加工操作的机器配置

由工件加工操作的机器配置, 可以得到所有工件采用的加工工艺路线。在图 1 的机器配置下, 工件 1 的加工路线为: 机器 3 2 0。工件 2 的加工路线为: 机器 1 3 2; 工件 3 的加工路线为: 机器 1 0 3。其中 0 表示此工序为虚工序, 没有任何机器参与加工。这是一个典型的 Job shop 问题。

3) 工件加工顺序的确定: 采用工件号结合加工操作序号构造复合编码, 标识各工件的每一操作。满足加工工序工艺顺序关系要求的所有操作的任一排列, 对应一可行调度方案。例如: $[11\ 21\ 31\ 22\ 12\ 33\ 23]$ 或 $[21\ 31\ 22\ 11\ 33\ 12\ 23]$, 前者对应的各机器上工件各工序加工顺序如图 2 所示。按机器无冲突可确定各工件最早开始加工时间, 生成调度甘特图, 从而计算出调度指标。

机器	工件/工序
1	2/1 3/1
2	1/2 2/3
3	1/1 2/2 3/3

图 2 各机器上工件加工顺序

3.2 求解算法流程

TA 是一种邻域搜索寻优算法^[8], 以预先设置的门槛值控制接受邻域移动, 允许接受一定的劣化解, 实现全局寻优机制, 有关收敛性证明参见文献^[9]。GA 是基于自然选择的种群进化过程^[10], 将问题的可行解集映射为染色体集合, 通过一系列遗传操作, 使之自适应收敛到最优或近优解上。TA 为单一邻域搜索过程, 而 GA 具有潜在的并行搜索机制。综合考虑算法的特点, 将其分别用于求解工艺计划

确定问题和加工路径确定问题

设 P 为工件加工计划确定问题的可行解, $N(P)$ 为 P 的邻域摄动解, $R(P)$ 为计划决策 P 下的工件加工路径可行解, $S(R(P))$ 为加工路径决策 $R(P)$ 下的加工顺序(调度方案), $C(P, R)$ 和 $Mks(S)$ 分别为加工路径决策 P 的费用和调度方案 S 的 Makespan 目标函数值. 算法描述如下:

第 1 步: 初始化:

- 1) 给定初始门槛值 T , 终止门槛值 ϵ , 门槛值衰减系数 α
- 2) 给定交叉率 P_c , 变异率 P_m , 种群规模 Pop-size, 进化代数 Max-gen, 进化代数计数置 0;
- 3) 最优目标函数值 $F^* =$, 工件最优加工路径决策 $B(P)^* = 0$;
- 4) 随机给定一工件加工计划决策初始解 P ;
- 5) 随机给定工件加工路径 $R(P)_i, i = 1, 2, \dots,$

Pop-size.

第 2 步: 调度排序与加工路径评价:

- 1) 对于每一 $R(P)_i$, 调用排序子过程, 求解 $S(R(P)_i)$ 和 $Mks(S_i)$;
- 2) 计算总目标函数值 $F_i = C(P, R) +$

$Mks(S_i)$.

第 3 步: 对 $R(P)_i$ 进行遗传运算:

- 1) 选择运算;
- 2) 交叉运算;
- 3) 变异运算;
- 4) 若未达进化代数, 则进化代数计数加 1, 转第 2 步; 否则, $F = \min\{F_i\}, R(P) = Opt\{R(P)_i\}$, 进化代数计数置 0.

第 4 步: 若 $(F - F^*) / \min\{F, F^*\} < T$, 则 $F^* = F, R(P)^* = R(P)$.

第 5 步: 若 $T > \epsilon$, 则 $T = \alpha \cdot T$, 摄动加工计划决策, $P := P \in N(P)$, 转第 1 步 5); 否则, 算法终止并输出.

3.3 算法子过程

上述算法流程中包含遗传运算、调度排序算法子过程, 现分述如下:

3.3.1 遗传运算

遗传运算子过程用于确定工件路径选择, 主要由交叉、变异、选择构成.

1) 交叉: 选取两个加工路径决策 $R(P)_i$ 和 $R(P)_j$, 作为进行交叉运算的父代个体; 随机确定一工件 r 作为交叉基因, 交换 $R(P)_i$ 和 $R(P)_j$ 的 r 工件加工工序机器配置, 生成子代个体 $R(P)_i$ 和 $R(P)_j$.

图 3 给出了交叉过程示意.

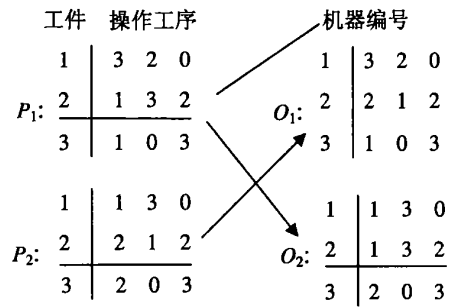


图 3 交叉过程示意

2) 变异: 对于加工路径决策 $R(P)_i$, 随机选取一工件 r 的第 k 个操作作为变异基因, 在可选机器集合中摄动其机器选择. 图 4 给出了变异过程示意.

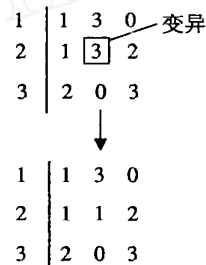


图 4 变异过程示意

3) 选择: 设加工路径决策 $R(P)_i$ 对应的目标函数值为 F_i , 种群平均目标函数值为 \bar{F} , 按 $f_i = (\bar{F}/F_i)^2 \cdot \bar{F}$ 进行标度变换, 并求适应值 f_i , 然后由转轮方式选择子代种群.

3.3.2 调度排序子过程

由调度问题可行解的结构特点知, 当工件 / 操作对的相对位置发生变化时, 将引起以下结果:

- 1) 若工件号相同的子项交换位置, 则必引起不可行解;
- 2) 工件号不同、相应操作的执行机器也不同的子项交换位置, 解不发生改变;
- 3) 工件号不同、相应操作的执行机器相同的子项交换位置, 解发生改变.

调度排序算法子过程仅处理解发生改变的情况. 为保证解的可行性, 在进行工件 / 操作对位置变换时, 每一工件 / 操作对必须在其可变换范围内进行位置变换. 关于 Job shop 调度问题的研究发现, 按 SPT 准则进行工序操作排序, 对于最小化 Makespan 目标是有效的^[11]. 因此, 调度排序子过程采用 SPT 准则分别处理各机器上的工序操作排序. 算法描述

表 2 算例 1 (3 × 3 柔性 Job shop)

操作	机器	工件 1		工件 2		工件 3	
		$p = 1$	$p = 2$	$p = 1$	$p = 2$	$p = 1$	$p = 2$
$k = 1$	$m = 1$	11(4)	12(5)	19(7)		10(4)	
$k = 1$	$m = 2$	13(4)	10(4)	18(5)		15(5)	
$k = 2$	$m = 1$		11(4)	11(4)	13(5)	12(4)	16(5)
$k = 2$	$m = 3$		14(7)	19(6)	10(4)	17(5)	17(5)
$k = 3$	$m = 2$	20(8)		17(5)	11(4)		14(4)
$k = 3$	$m = 3$	15(6)		14(4)	14(6)		19(6)

表内数据表示加工时间(附加费用)。

表 3 算例 2 (4 × 3 柔性 Job shop)

操作	机器	工件 1		工件 2		工件 3		工件 4		
		$p = 1$	$p = 2$	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 1$	$p = 2$	$p = 1$	$p = 2$
$k = 1$	$m = 1$	3(1)		2(2)	8(3)		5(2)		1(1)	9(3)
$k = 1$	$m = 3$	4(2)		2(2)	9(4)		7(3)		2(1)	6(2)
$k = 2$	$m = 2$	7(3)	3(1)	3(3)	5(2)	1(1)	3(1)	6(2)	2(2)	7(2)
$k = 2$	$m = 3$	6(2)	2(1)	4(3)	4(2)	2(1)	4(2)	7(3)	2(1)	9(3)
$k = 3$	$m = 1$	9(4)	6(3)		7(3)	9(4)		8(4)	3(2)	
$k = 3$	$m = 2$	8(3)	6(3)		8(4)	8(3)		6(2)	2(1)	

如下:

第 1 步: 生成初始可行解:

- 1) 设工件操作工序 $t = 1$;
- 2) 取所有工件的第 t 操作工序, 求出加工机器;
- 3) 对加工机器相同的操作, 按 SPT 准则排序;
- 4) 若有未处理操作工序, 则 $t = t + 1$, 转 2)。

第 2 步: 改进邻域移动:

- 1) 依次对初始可行解中的工件 / 操作对 (i, k)

确定可变换范围: $(i, k - 1) \sim (i, k + 1)$;

- 2) 在上述范围内, 若存在工件号不同但机器号相同的工件 / 操作对, 则转 3); 否则, 转第 3 步;

- 3) 交换两工件 / 操作对位置后, 若解有所改进, 则交换; 否则, 不交换;

第 3 步: 若存在未处理工件 / 操作对, 则取下一工件 / 操作对, 转第 2 步 1); 否则, 结束并返回。

4 实例计算

本章通过对实例进行计算, 以考察所提出的混合启发式算法的有效性。两个算例分别由表 2 和表 3 给出。

TA 算法参数选取如下: 初始值 $T = 0.9$, 终止值 $\epsilon = 0.05$, T 值衰减系数 $\alpha = 0.9$; GA 算法参数种群规模 $Pop-size = N \times M$ (N 和 M 分别为工件数和机器数), 交叉率 $P_c = 0.6$, 变异率 $P_m = 0.1$, 遗传进化代数 $Max-gen = 10 \times N \times M$ 。计算结果由表 4、图 5 和图 6 给出。

表 4 算例计算结果

问题	加工计划决策	加工路径决策	Mks	目标值
1	221	230/032/110	24	51
2	2 111	310/320/120/122	12	28

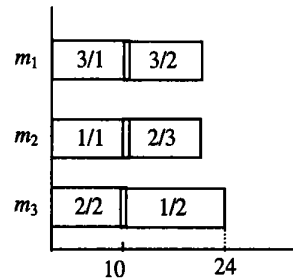


图 5 算例 1 调度方案

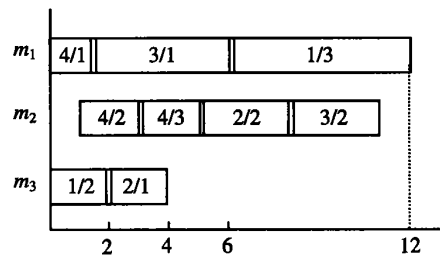


图 6 算例 2 调度方案

5 结 语

本文在考虑不同加工工艺路径成本因素的前提

下,研究了柔性 Job shop 计划与调度集成化问题,针对问题的结构特点,建立了两层数学规划模型。根据模型求解涉及的决策问题的特点,综合运用门檻接受算法、遗传算法和启发式规则,提出了混合启发式求解算法。实例计算表明,所提出的算法能综合考虑各层次决策问题并求得问题的近优解,表现出良好的求解性能和应用前景。

参考文献(References):

- [1] Conway R W, Maxwell W L, Miller L W. *Theory of Scheduling* [M]. Massachusetts: Addison-Wesley, 1967.
- [2] Adams J, Balas E, Uzsoy R. The shifting bottleneck procedure for job shop scheduling[J]. *Mgmt Sci*, 1988, 34(3): 391-401.
- [3] Lourenco H R. Job shop scheduling: Computational study of local search and large step optimization methods[J]. *Eur J Opns Res*, 1995, 83: 347-364.
- [4] Chen IJ, Chung C H. Effects of loading and routing decisions on performance of flexible manufacturing systems[J]. *Int J Prod Res*, 1991, 29(11): 2209-2225.

- [5] Hutchison J, Leong K, Snyder D, et al. Scheduling approach for random job shop flexible manufacturing systems[J]. *Int J Prod Res*, 1991, 29(5): 1053-1067.
- [6] Jiang J C, Hsiao W C. Mathematical programming for the scheduling problem with alternate process plans in FMS[A]. *Proc 16th ICC IE[C]* Ashikaga, 1993 368-371.
- [7] Logendran R, Sonthinen A. A tabu search-based approach for scheduling job-shop type flexible manufacturing systems[J]. *J Op l Res*, 1997, 48(3): 264-277.
- [8] Dueck G, Scheuer T. Threshold accepting: A general purpose optimization algorithm appearing superior to simulated annealing[J]. *J Comput Physics*, 1990, 90: 161-175.
- [9] Althofer I, Koschnick K U. On the convergence of "Threshold Accepting"[J]. *Appl Math Optim*, 1991, 24: 183-195.
- [10] Lawrence D. *Handbook of Genetic Algorithms* [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [11] Panwalker S S, Iskander W. A survey of scheduling rules[J]. *Ops Res*, 1977, 25: 45-61.

(上接第 33 页)

$$G(s) = \frac{1}{(s^2 + s + 1)(s + 2)^2} e^{-0.1s}$$

利用文献[3]提出的方法,通过两个连续继电器反馈实验可辨识出二阶加纯滞后模型

$$\hat{G}(s) = \frac{0.222}{1.256s^2 + 1.101s + 1} e^{-0.837s}$$

则 $k_{plw} = -4.5045$, $k_{pup} = 10.0995$ 。PD 控制器为

$$C(s) = 4.2579 + \frac{4.2745}{s} + 7.910s, \text{最大内切圆半径 } r = 4.2745。$$

文献[3]提出的 PD 控制器为 $C(s) = 1.503 + \frac{1.366}{s} + 1.715s$ 。对于本文和文献[3]的两种控制器,所得闭环系统单位阶跃响应如图 3 所示。其中实线为本文方法,虚线为文献[3]方法。从图 3 可以看出,本文方法在控制器参数产生一定摄动时,系统仍具有较高的稳定性。

6 结 语

本文利用经典的 Hermite-Biehler 稳定性定理

在准多项式稳定性问题上的推广,给出使得二阶加纯滞后过程闭环稳定的 PD 参数区域。以最大内切圆半径为目标函数,通过求解线性规划问题来确定非脆弱 PD 控制器的参数。仿真实验验证了理论结果的有效性。为获得更为理想的系统响应的动态性能,可利用线性规划的方法,在系统闭环稳定的 PD 参数区域内,通过满足多个目标要求来进行优化设计。

参考文献(References):

- [1] Datta A, Ho Ming Tzu, Bhattacharyya S P. *Structure and Synthesis of PID Controllers* [M]. London: Springer-Verlag, 2000.
- [2] Silva G J, Datta A, Bhattacharyya S P. PI stabilization of first-order systems with time delay[J]. *Automatica*, 2001, 37(12): 2025-2031.
- [3] Wang Q G, Lee T H, Fung H W, et al. PD tuning for improved performance [J]. *IEEE Trans Contr Syst Tech*, 1999, 7(4): 457-465.