

面向定单交货期窗的连续生产过程生产调度

双 兵, 顾幸生

(华东理工大学 自动化研究所, 上海, 200237)

摘要: 针对连续工业生产过程中的调度, 把各个订单的交货期考虑为一个连续时间窗, 并根据订单交货期的约束, 把一段连续的生产时间进行离散化, 在允许拖期交货的情况下, 建立面向订单交货期窗约束的连续过程生产调度数学模型, 使企业的生产不仅满足订单需求量和交货期的要求, 而且使企业在生产中获得最大的生产利润; 对各个时间段的设备生产率进行实数编码, 采用遗传算法对模型进行优化求解, 并讨论了拖期惩罚系数的选择对调度结果的影响. 仿真结果表明, 所提出的模型具有可行性和有效性.

关键词: 连续生产过程调度; 定单; 交货期窗; 遗传算法

中图分类号: F273

文献标识码: A

文章编号: 1005-9792(2003)04-0420-04

实际生产调度存在许多不确定的因素^[1]. K. R. Backer 将交货期当作固定的值^[2], 但是实际上不同客户对交货期的要求不同, 一般并不是一个固定时间, 而是一个给定的时间范围. 同时, 由于设备生产能力的限制以及生产中的一些不确定性因素的存在, 往往使得定单不能在客户规定的时间内完成, 使企业受到一定的惩罚. 因此, 合理地根据定单要求安排生产, 在尽量满足客户要求的情况下, 使得生产获得最大的利润, 对企业来讲是至关重要的. 许多研究者对离散和间歇过程的提前-拖期调度问题进行了研究^[3-9], 而对连续生产过程的订单交货时间窗问题则研究甚少. 在此, 作者研究了连续生产过程面向定单交货期窗的生产调度问题, 建立了面向定单交货期约束的生产调度模型, 并用遗传算法进行求解.

1 问题描述

考虑一个连续生产过程, 根据已经收到的定单来安排生产, 使得在满足定单要求的情况下生产以获得最大利润(或者说使生产的费用最少).

1.1 问题定义

设 J 为定单的集合, 定单数为 n , $J = \{1, 2, \dots, n\}$, d_i 为订单 i ($i = 1, \dots, n$) 的需求量; T_i 为定单 i 的实际完工时间; T 为完成这批订单所需的生产时间, $T = \text{Max}(T_i)$; $[E_i, L_i]$ 为订单 i 的交货期窗(其

中 E_i 为订单 i 的最早交货时间, L_i 为订单 i 的最迟交货时间; 若 $T_i < E_i$, 则称定单 i 提前; 若 $T_i > L_i$, 则称定单 i 拖期; 若定单在交货期窗口内完工, 则没有惩罚, 否则, 不论定单 i 是提前还是拖期都要进行惩罚); ω_i 为定单 i 的拖期惩罚权重; p_t 为时间 t 内的设备生产率(其中, p_t 满足生产能力约束 $P_{\min} \leq p_t \leq P_{\max}$, P_{\min} 和 P_{\max} 分别为设备的最小、最大生产能力); s_t 为时间 t 末端的库存量(满足库存能力约束 $s_{\min} \leq s_t \leq s_{\max}$, s_{\min} 和 s_{\max} 分别为最小、最大库存容量); ρ 为单位库存费用; C 为总的生产花费, $C = C_p + C_s + C_f$ (其中, C_p , C_s 和 C_f 分别为完成订单的生产费用、库存费用和定单拖期交付的惩罚费用, 若定单都按时交付, 则 $C_f = 0$).

求解的目标就是确定每天的设备生产率 p_t , 使得整个生产过程中的费用最小, 即取最小值, 同时使得订单的实际交货期满足客户的交货期窗的要求.

1.2 数学模型

根据定单的实际交货期将生产时间 T 分为 n 段, 如图 1 所示, 每个时间段的长度为 Δt_i ($i = 1, \dots, n$), 每个时间段的设备生产率为 p_i .

在时间段 Δt_i 内的生产费用可以表示为:

$$C_p^i = (\alpha \cdot p_i + \beta) \Delta t_i.$$

其中: α 为单位生产费用, 与生产中原料、能源、人力等资源消耗有关; β 为常数, 与设备磨损、折旧等有关. 可以得到整个生产时间内总生产费用为:

收稿日期: 2003-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60274043); 国家高技术发展计划项目(2002AA412610)

作者简介: 双 兵(1979-), 男, 湖北宜昌人, 华东理工大学硕士研究生, 从事流程工业中的生产调度和生产计划研究.

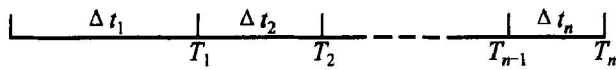


图 1 时间段的划分

$$C_p = \sum_{i=1}^n C_p^i.$$

第 k ($k = 1, 2, \dots, T$) 天末的库存可以表示为:

$$s_k = s_{k-1} + \sum_{i=1}^n p_i \zeta_{ik} - \sum_{i=1}^n d_i y_{ik}.$$

其中:

$$\zeta_{ik} = \begin{cases} 1, & k \in \Delta t, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{订单 } i \text{ 在 } k \text{ 末端交货,} \\ & i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, T; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

s_{k-1} 为第 $k-1$ 天末的库存量; $\sum_{i=1}^n p_i \zeta_{ik}$ 表示该天生
产的产品量; $\sum_{i=1}^n d_i y_{ik}$ 表示若在第 k 天末有定单要交
货, 则从库存中减去该天所要交货的所有定单的需求
量.

由此可以得到当天的库存费用为: $C_s^k = \rho \cdot s_k$, 则
整个生产时间内总的库存费用为: $C_s = \sum_{k=1}^T C_s^k$.

由于定单实际交货时间超出交货期窗以后要进行
惩罚, 因此, 还需要确定定单的实际交货时间. 定
单的实际交货时间为: 对于定单 i , 其最小生产时间
可以表示为 $\Delta t_{\min}^i = \frac{d_i - s_{i-1} + s_{\min}}{P_i}$, 则其最早完成时
间为 $T_{\min}^i = T_{i-1} + \Delta t_{\min}^i$; 若约定定单只能拖期不能
提前完成, 则当 $T_{\min}^i < E_i$ 时, 令 $T_i = E_i$; 否则定单 i
的实际交货时间为: $T_i = T_{\min}^i$.

故定单 i 拖期后的惩罚可以表示为:

$$C_t^i = \begin{cases} 0, & T_i \in [E_i, L_i], \\ \omega_i \cdot (T_i - L_i) \cdot d_i, & T_i > L_i. \end{cases}$$

则整个生产时间 T 内总的拖期惩罚费用为:

$$C_t = \sum_{i=1}^n C_t^i.$$

在生产中要合理安排每个时间段的生产率, 使
得整个生产过程总的花费最小, 即求 p_i , 使得:

$$C = \min(C_p + C_s + C_t).$$

同时满足约束:

$$P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max}, s_{\min} \leq s_k \leq s_{\max}, T_i \in [E_i, L_i].$$

2 遗传算法求解

遗传算法源于生物遗传学和适者生存的自然规
律的思想, 它将问题求解表示成“染色体”适者生存
的过程, 通过“染色体”群一代代不断地进化, 最终求
得最优解. 对不同的问题, 它的选择、交叉、变异 3 个

基本算子也不同. 所采用的遗传算法主要要素如下.

2.1 编码

由于所求的生产率是一组实数, 当订单数量很
大时, 如果采用二进制编码, 会使编码的规模相当
大, 耗费计算资源. 因此, 采用实数编码.

2.2 初始化种群

染色体编码确定后, 应选取初始群体, 其中包
括群体规模的确定, 即确定群体中个体的数量、遗传代
数和初始群体中个体的选取办法. 这里考虑到问题的
规模并不是很大, 因此, 采取随机选取初始群体的
方法是可行的.

2.3 选择算子

选择是将父代的个体信息遗传到后代, 在算
法中采用赌轮选择法. 个体的选择概率为 $P_k =$
 $f_k / (\sum_{j=1}^N f_j + 1)$. 其中 f_k 为个体 k 的适应值, N 为种
群规模.

2.4 交叉算子

在求解中采用单点算术交叉, 对基因进行线
性组合, 如设: $p_i = (\dots, u_k, \dots)$, $p_j = (\dots, v_k, \dots)$ 分
别为某一代种群中的 2 个个体, k 是随机产生的交叉
点, 则交叉后成为: $p_i' = (\dots, u_k', \dots)$, $p_j' = (\dots,$
 $v_k', \dots)$.

其中:

$$\begin{cases} u_k' = au_k + (1-a)v_k \\ v_k' = (1-a)u_k + av_k \end{cases}; 0 < a < 1.$$

2.5 变异算子

采用非一致变异, 设 $p_t = (u_1, u_2, \dots, u_k, \dots)$ 是
第 t 代种群中的一个个体, 则对 u_k 进行变异, k 为
随机产生的变异点, 变异后 $p_t = (u_1, u_2, \dots, u_k',$
 $\dots)$. 其中:

$$u_k' = \begin{cases} u_k + \Delta(t, U_B - u_k), & r \geq 0, \\ u_k - \Delta(t, u_k - L_B), & r < 0; \end{cases}$$

r 为随机数, $\Delta(t, y) = y(1 - \delta^{1-t/T})^b$; δ 为 $[0, 1]$ 间
的随机数; U_B 和 L_B 分别为 u_k 的最大值和最小值;
 T 为算法的最大代数; b 为确定非一致度的系统参
数. 显然, 当 t 增大时, $\Delta(t, y)$ 趋向于 0 的概率增大,
也就是说, t 增大时, 变异操作对 u_k 的影响减小.

2.6 适应值函数

由于选用最小化生产费用作为生产目标, 故个
体 k 的适应值可以表示为 $f_k = \frac{1}{a \cdot C_k + 1}$. 其中 a 为
常数, 用于调节种群的收敛速度.

3 仿真与分析

假设某厂收到一批订单, 如表 1 所示, 其中各订
单的需求量为 d_i (单位: t), 最早交货时间 E_i 和最晚
交货时间 L_i 分别表示订单交货时间距当前时间的
天数. 要求根据订单的需求安排设备生产率, 使得在

表 1 产品订单

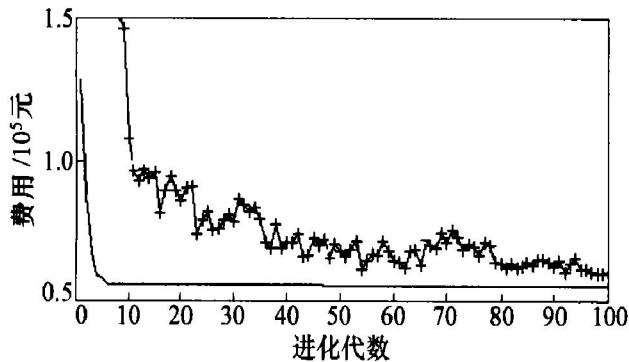
	订单号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
需求量/t	430	460	475	450	445	380	490	480	400	390
最早交货时间/d	3	4	6	12	14	16	18	20	22	24
最晚交货时间/d	5	7	10	13	16	20	22	25	25	30

满足订单要求的同时生产费用最低,企业获得最大利润.

设备以及库存约束参数为: $P_{min} = 80, P_{max} = 150, s_{min} = 100, s_{max} = 2\ 000$; 库存初始值 $s_0 = 300, \rho = 1, \alpha = 10, \beta = 100$, 惩罚权重为

$$\omega = [2, 3, 1, 5, 4, 2.5, 3, 3.3, 6, 4].$$

采用上述算法通过 MATLAB 语言进行编程仿真, 取种群数为 80, 进化代数为 100, 变异概率 $p_m = 0.3$, 交叉概率 $p_c = 0.8$, 对问题进行 20 次仿真, 其最佳仿真结果如图 2 所示.



— 最优值; + 一平均值

图 2 最佳仿真结果

各订单实际交货期为

$$T = [3, 5, 8, 12, 14, 17, 20, 23, 26, 29];$$

每个时间段的设备生产率为

$$P = [150, 135, 137, 145, 146, 145, 150, 150, 150, 118];$$

最小花费为 $C_{min} = 55\ 086$.

由以上数据可以看出, 定单的实际交货时间并不完全满足客户的要求(订单 9 拖期完成), 使得总费用中出现拖期惩罚费用. 调整订单拖期惩罚权重为

$$\omega = [2, 3, 1, 5, 4, 2.5, 3, 3.3, 12, 4].$$

即对订单 9 进行调整, 使 $\omega_9 = 12$, 重新计算 20 次, 其最佳仿真结果见图 3.

相应的各订单实际交货期为

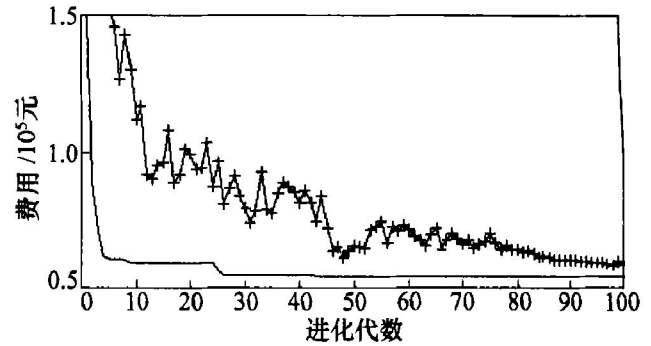
$$T = [3, 5, 8, 12, 14, 17, 20, 23, 25, 28];$$

每个时间段的设备生产率为

$$P = [148, 150, 150, 150, 149, 150, 150, 150, 131];$$

最小花费为 $C_{min} = 53\ 662$.

图 2、图 3 显示了 ω 调整前、后每代最优值和平



— 最优值; + 一平均值

图 3 调整后的仿真结果

均值的演化过程. 可以看出: 此时订单的交货期完全满足客户的需求, 同时调整以后设备的生产率大幅度提高, 既提高了生产设备的利用率, 又降低了总的生产费用; 随着算法的不断演化, 目标函数越来越趋于最优并稳定, 说明了算法的收敛性.

表 2 给出了调整 ω 前、后按本算法得出的最优调度进行生产所需各种费用. 可以看出, ω 调整前最优解的生产、库存费用虽然低于调整后的生产、库存费用, 但是前者有拖期惩罚费用, 使得总的费用明显大于后者. 显然, 当 ω 调整以后, 虽然生产、库存费用提高, 但是总的费用减小. 因此, 选择合理的 ω 值, 可以使结果更趋于全局最优解.

表 2 调整前、后各种费用 费用/元

	生产费用	库存费用	拖期惩罚	总费用
ω 调整前	45 370	7 316	2 400	55 086
ω 调整后	45 400	8 262	0	53 662

参考文献:

[1] 顾幸生, 不确定性条件下的生产计划与调度[J]. 华东理工大学学报, 2000, 26(5): 4-12.
 [2] Backer K R. Sequencing with earliness and tardiness penalties: A Review [J]. Oper Res, 1990, 38: 22-36.
 [3] Li C L, Cheng T C E. Due date determination with resequencing [J]. IIE Transaction, 1999, 31: 183-188.

- [4] 汪定伟, 方述城. 准时化生产计划的半无限模型及其遗传算法 [J]. 控制与决策, 1996, 11(4): 446-451.
- [5] 刘兴初, 赵千川, 郑大钟. 用 GA 算法解不同交货期窗下的 E/T 调度问题[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(7): 59-62.
- [6] Ishii H, Tada M, Masuda T. Two machine scheduling problems with fuzzy due dates [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 46(3): 339-347.
- [7] Sung C S, Min J I. Scheduling in a two-machine flowshop with batch processing machine(s) for earliness/tardiness measure under a common due date[J]. Euro J of Oper Res, 2001, 131: 95-106.
- [8] 李 平. 不确定条件下的提前/拖期调度问题研究[D]. 上海: 华东理工大学自动化研究所, 2002.
- [9] 王正志, 薄 涛. 进化计算[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000.

Order-oriented scheduling for continuous production process with due-date windows

SHUANG Bing, GU Xing-sheng

(Research Institute of Automation, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: With the development of JIT (just in time), more and more attention has been paid to production scheduling with due-date. In this paper, an order-oriented scheduling model for continuous industrial process is proposed, in which each due-date corresponds to a continuous time-window. In accordance the constraints of due-date, continuous time is discretized, and then in the case of delay-allowed, an order-oriented scheduling model satisfying the constraints of due-date window is obtained. This schedule scheme can not only fulfill order demand in due-date but maximize the profit. A genetic algorithm is adopted in this schedule problem in which the productivity of equipment at each interval is coded with real number. The influence on the scheduling results caused by the different selection of delay-penalty coefficients is also discussed. The simulation results demonstrate the feasibility and efficiency of the model.

Key words: scheduling for continuous production process; order-oriented; due-date windows; genetic algorithm