

457-08

准时生产方式下混流装配线的调度问题^①赵伟¹, 韩文秀¹, 罗永泰² ✓

(1. 天津大学系统工程研究所, 天津 300072; 2. 天津财经学院, 天津 300222)

F273
F406.2

摘要:混流装配线的调度问题是 JIT 生产方式中的一个重要问题, 本文建立了多级混流装配线的调度模型, 其目标是使不同生产级上各零部件的消耗量尽可能保持均匀, 并用遗传算法和模拟退火进行求解。试验表明: 遗传算法和模拟退火算法的求解质量比“目标追随法”有所提高。

关键词: 准时生产; 混流装配线; 遗传算法; 模拟退火算法

中图分类号: F273

文献标识码: A

文章编号: 1007-9807(2000)04-0023-06

0 引言

混流装配线是 JIT 生产方式的具体应用之一, 在国外许多制造企业已广泛采用, 它能在不引起大的产品库存的条件下满足用户的多样化需求。所谓混流装配线, 有时也特指混合车型组装线, 是指在一定时间内, 在一条生产线上生产出多种不同型号的产品, 产品的品种可以随顾客需求的变化而变化。例如, 在丰田汽车厂的 Coronas 生产线上, 可以生产 4000 多种类型的汽车, 每种车型的发动机、变速器、加速器、空调、车门或其它部件不同。8 小时的班必须生产 250 辆 sedan, 125 辆 hardtop, 125 辆 wagon。当前, 我国汽车厂家基本上仍以单一车型为主, 但可以预料在不久的将来必然会向多种车型发展, 开发复杂的混合车型组装线势在必行。

很多学者从不同的角度研究了混流装配线的调度问题。文[1]对混合车型组装线中的车辆及工人的移动轨迹进行模型化, 分析了混流装配线上车型调度问题的几种目标函数, 并对相应的算法进行了评价。文[2]综述了对混流装配线调度问题的研究状况, 指出目前的启发式算法很难满足要求。文[3]研究了在 JIT 环境下使混流装配线停止时间最小的问题, 并建立了相应的模型。文[4]从物流管理的角度分析了一家汽车装配厂生

不同组问题, 制造业

产线的调度问题。文[5]用遗传算法求解单级混流装配线的调度问题。文[6]证明了混流车型组装线调度问题的最优解具有循环排序的形式, 更进一步, 在每个循环中生产的每种车型数是每种车型的需求数在整个车型需求总数中所占比例的倍数, 并指出, 寻找有效的混流装配线调度算法是提高该系统性能的关键要素之一。本文着重研究多级混流装配线的调度问题。

1 问题描述

混流装配线的调度问题主要解决装配线以及整个生产系统的生产负荷均衡问题, 以避免系统产生瓶颈。典型的汽车装配线包括控制板装配, 头灯装配, 车轮装配, 车窗装配, 车座装配, 机械结构装配等工序。由于不同车型对不同零部件的需求不同, 因此对各种零部件的消耗就不同, 各工位根据车型的不同在需要的时刻生产或组装不同的零部件。

图 1 为 JIT 生产环境下混流组装线的直观描述。如图 1 所示, 生产线上正在组装两辆 B 型车, 一辆 C 型车, 一辆 A 型车正要进入组装线。子装配单元根据进入组装线车型的不同, 向前一工序取出适当的零部件。由于不同零部件的需求随车型的不同而不同, 因此很难保证所有的单元生产平

① 收稿日期: 1999-09-29; 修订日期: 2000-09-28。
作者简介: 赵伟(1971-), 男, 河南人, 博士生。

顺化并保持低的在制品库存. 在 JIT 生产环境下, 这种情况会进一步恶化, 因为每道工序间几乎没有在制品库存, 只有在下道工序需要时, 才进行生产. 因此, 总装线的调度对整个生产系统的负荷均

衡和 JIT 目标的实施具有重要的影响.

用以下例子来进一步对问题进行直观的描述. 假定有四种车型 A, B, C, D 要进行装配, 对这四种车型的需求量如表 1 所示.

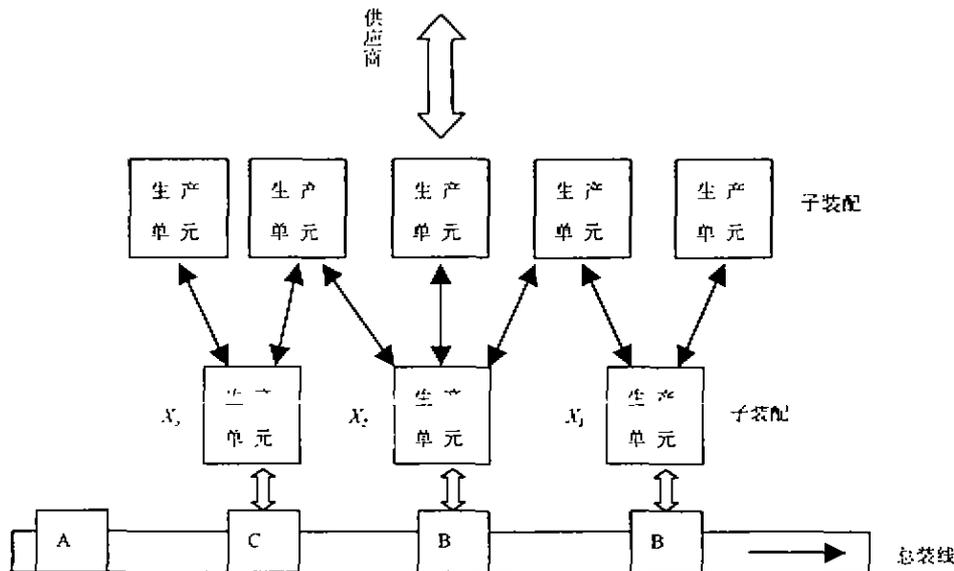


图 1 JIT 环境下的总装线

表 1 四种车型的需求数

车 型	需 求	每个生产循环中生产的各种车型数
A	2000	2
B	3000	3
C	4000	4
D	2000	2
总 计	11000	11

由于对四种车型的需求比是 2 比 3 比 4 比 2, 按照生产比例数法来确定数量节拍, 则一个生产循环可以定义为生产两辆 A 型车, 三辆 B 型车, 四辆 C 型车, 两辆 D 型车. 在一个生产循环中, 一个

可能但不一定为最好的车型组装顺序为: A-A-B-B-B-C-C-C-C-D-D. 对各级子装配需求的不同, 导致不同的调度结果(即排序)对生产有不同的影响. 表 2 为本例中各车型对子装配的需求.

表 2 各车型需求的子装配

车 型	每个生产循环中生产的每种车型的数量	子 装 配		
		X_1	X_2	X_3
A	2	10	0	5
B	3	2	1	4
C	4	1	17	0
D	2	0	4	1
每个生产循环中需要的子装配数		30	79	24

为了简化问题的表达, 假定此时只有两种车型 A(每生产循环 2 辆) 和 C(每生产循环 4 辆) 需

要装配,车型C需要17个子装配操作 X_2 ,而车型A不需要子装配操作 X_2 .假定组装线上车型的调度结果为C-C-C-A-A,则在生产循环的开始阶段需要进行 $17 \times 4 = 48$ 个子装配 X_2 操作;然后,在接下来的生产中,由于没有对它的需求,进行子装配操作 X_2 的工人将处于“休息”状态,这严重违反了JIT生产方式中“生产平顺化”的目标.因此,合理安排总装线上车型的调度顺序是保证JIT目标实现的重要手段.当然,除了寻找好的调度方案外,也有其它解决方法.例如在需要的时候分配尽量多的工人;或者在空闲的时候进行生产,保持一定的库存,在需要的时候再从库存中取出;可以看出,这两种方法都不十分令人满意.因此,在总装线的调度问题中,需要找到一种调度方案,尽可能使所有的子装配和部件生产的变化率最小,以保障生产平顺化的实施^[5],从而最终达到准时生产

的目标.

2 数学模型

混流装配过程由一系列不同生产级上的子装配过程组成.假定有 L 个生产级,一个特定的生产级用 h 表示,其中 $h = 1, 2, \dots, L$.最高的生产级是第1级.第 h 生产级上的不同子装配工序(或产品)数用 n_h 表示.

对于多级装配类型的产品结构可用一有向图 $G(V, E)$ 表示, V 表示节点(或项目)的集合,即装配或生产工序集;有向弧集合 E 表示装配工序之间联系的集合,弧 $(n_{i,h}, n_{j,h-1})$ 表示装配项目 $n_{i,h}$ 需要装配项目 $n_{j,h-1}$.假定每生产级上的节点按照 $1, 2, \dots, n_h$ 的拓扑顺序编号,如图2所示,定义如下概念:

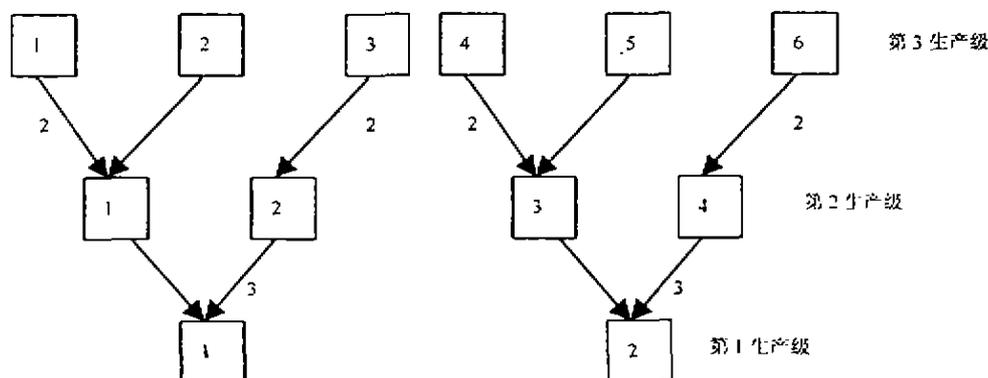


图2 子装配结构拓扑图

定义1 装配项目之间的关联系数为装配项目 $n_{i,h}$ 需要装配项目 $n_{j,h-1}$ 的数量,表示为 $R_{ij,h}$.在图2中, $R_{111} = 1, R_{121} = 3, R_{112} = 2, R_{122} = 4, R_{132} = 2$ 等.

定义2 与第 h 生产级上装配项目 i 直接相连的后序装配项目的集合为 h 生产级上 i 节点的紧邻后序集合,表示为 $A(i,h), h > 1$.在图2中, $A(1,3) = \{1\}, A(2,3) = \{1\}, A(1,2) = \{1\}, A(4,3) = \{3\}$ 等.

定义3 与第 h 生产级上装配项目 i 直接相连的前序装配项目的集合为 h 生产级上 i 的紧邻前序集合,表示为 $B(i,h), h < L - 1$.在图2中, $B(1,1) = \{1, 2\}, B(2,1) = \{3, 4\}, B(2,3) = \{4, 5\}$ 等.

以上定义均对某种车型而言,不同车型则相应的数值有所不同.

假定 $b_{i,1}$ 代表每组装一辆车型 i 在第1生产级上需要子装配 j 的数量, $j = 1, 2, \dots, n_1$.则 $b_{i,j,2} = \sum_{j'=1}^{n_1} b_{i,1} R_{j'j,2}, j' = 1, 2, \dots, n_2$,表示每组装一辆车型 i 在第2生产级上需要子装配 j' 的数量.由于JIT为拉式生产系统,每一级上每一个子装配的消耗数量由第一级上的生产调度决定.只要最后装配线上的调度结果确定,利用产品装配拓扑关系图,很容易确定各生产级上子装配的消耗量.

本文采用丰田公司提出的调度目标函数,即在组装所有车辆的过程中,所确定的组装顺序应使各零部件的使用速率均匀化,建立模型如下

$$\min \sum_{k=1}^D \sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^L \sum_{i=1}^{n_h} (ka_{jh} - b_{jh} - \beta_{k-1,j,h})^2 x_k \quad (1)$$

目标函数式(1)表示调度结果应使不同生产级上每一个零部件的实际使用速率($b_{jh} + \beta_{k-1,j,h}$)和理想使用速率(ka_{jh})之间的差别最小化。

其中,各符号含义如下:

- i —— 车型数的标号
- n —— 需要装配的车型数
- j —— 某生产级上子装配的标号
- n_h —— 第 h 生产级上的不同子装配工序(或产品)数

k —— 车型调度结果(即排序位置)的标号

D —— 在一个生产循环中需要组装的各种车型的总和

L —— 生产级数,某一个特定的生产级用 h 表示, $h = 1, 2, \dots, L$

d_i —— 在一个生产循环中车型 i 的数量

b_{jh} —— 生产每辆 i 车型需要第 h 生产级上子装配 j 的数量

$$\sum d_i b_{jh}$$

$a_{jh} = \frac{\sum d_i b_{jh}}{D}$, 表示第 h 生产级上零部件 j 的理想使用速率

$$x_k = \begin{cases} 1 & \text{如果车型 } i \text{ 在调度中的 } k \text{ 位置} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$\beta_{k-1,j,h}$ = 在组装线调度中前 $k-1$ 辆车总共消耗 h 生产线上零部件 j 的数量和;

$$\beta_{k,h} = \beta_{k-1,j,h} + x_k b_{jh}, \text{ 并且 } \beta_{0,j,h} = 0$$

如果不同型号的产品消耗零部件的种类大致相同,由于调度的目标是使所有生产级上零部件的消耗量保持均匀,则原问题可简化为单级混流

调度问题,此时,问题可描述为

$$\min \sum_{k=1}^D \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (ka_j - b_{ij} - \beta_{k-1,i,j})^2 x_k \quad (2)$$

式中各符号含义如下:

- m —— 装配线上需要的零部件种类总数
- b_{ij} —— 生产每辆 i 车型需要零部件 j 的数量

$$a_j = \frac{\sum d_i b_{ij}}{D} \text{ 零部件 } j \text{ 的理想使用速率}$$

$\beta_{k-1,i,j}$ —— 在组装线调度中前 $k-1$ 台车消耗零部件 j 的数量和

$$\beta_{k,j} = \beta_{k-1,i,j} + x_k b_{ij}, \text{ 并且 } \beta_{0,j} = 0$$

其它符号含义同上。

3 算法描述

上述问题为组合优化问题,在多项式时间内不可能得到最优解。因此,在实践中人们采用各种启发式方法。丰田汽车公司是首先采用混流生产方式的企业,并对这种生产方式进行了大量的研究。他们研究出一种启发式算法“目标追随法(goal chasing algorithm,简称 GCA 算法)”,在实践中已广泛采用。这种算法实际上是一种贪婪算法,算法的每一步均从当前可选择策略中选取使目标函数值增加最少的策略,即在确定第 $n+1$ 台车辆的车型时,如有多种车型可供选择,则从中选择一种车型,使第 $n+1$ 台车辆组装时各零部件的使用速率最为均匀。每步只考虑当前的状态,而不考虑全局状态,因此这样得到的结果常常为局部最优解。本文使用文[5]中的数据,用遗传算法和模拟退火算法与该算法进行了对比实验。试验数据如下表。

表 3 各车型的物料单和需求的子装配数

车 型	每个生产循环生产的各种车型数	子 装 配									
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
A	5	0	17	9	0	4	0	0	18	0	0
B	2	12	13	0	11	0	0	0	1	17	17
C	3	2	4	0	19	0	12	6	4	9	3
D	3	0	15	0	19	0	15	9	9	0	6
E	3	0	0	5	7	8	10	4	0	0	0
每个生产循环需求的子装配数		30	168	60	157	44	111	57	131	61	61

“目标追随法”得到的结果为 C-A-C-A-E-

D-B-A-E-D-A-C-B-E-A-D, 目标函数值为 3293。

3.1 遗传算法

本研究中染色体采用字符编码,如用“A”代表“A”型车.选择算子采用比例选择.交叉算子采用部分映射杂交,即在两个父代向量上随机选取一段,利用两个父代向量在所选段内相应位的对应来定义一系列交换,这些交换可在每个父代向量上分别执行.如:

父代1 A A B C D E / E C D / A B A C A E D

父代2 B E D A C A / E D B / C A D A E C A

其中对应是:E;E,C;D,D;B,经部分映射杂交后生成如下两个有效的排列:

父代1 A A D C C E / E D B / A B A C A E D

父代2 B E B A D A / E C D / C A D A E C A

采用任意交换一个染色体上两个位来实现变异算子.

实验参数:交叉概率0.7,变异概率0.02,种群大小20,最大代数1500,用遗传算法得到的车型排序结果为C-A-D-B-E-A-D-E-A-C-A-B-E-D-A-C,相应的目标函数值为3073,与GCA算法相比改进7%.

3.2 模拟退火算法

对于模拟退火算法,本文实验了两种邻域变

换策略.一种是二邻域变换策略,即随机地交换两种车型的位置;第二种是逆序策略,即任意选择两个位置,把两个位置之间的车型按原来顺序的逆序重新排列.

实验参数:初始温度 $T_0 = 10$,温度下降率 $\alpha = 0.99$,终止温度 $T_f = 0.01$,马尔可夫链长 $L = 20$.在二邻域变换策略下,得到的排序结果为C-A-D-E-B-A-D-E-A-C-B-E-A-D-A-C,目标函数值为2859.8,与GCA算法相比改进15%;在逆序变换策略下,得到的排序结果为:C-A-D-E-B-A-D-E-A-C-C-A-B-D-A-E,目标函数值为3162,与GCA算法相比改进4%.

为进一步研究各算法求解混流生产线调度问题的能力,还以随机产生的问题对各算法进行了测试,这里随机产生8类问题,每类问题为以下条件的组合:车型数为5或10个,子装配数为10或20,部件数为[1-20]上均匀分布的随机数,零部件共享比例为0-20%或0-40%之间均匀分布的随机数.每类各产生20个问题,共有160个问题.各算法试验参数仍如前所述.

以丰田GCA算法为基准,模拟退火实验结果如表4所示,遗传算法试验结果如表5所示.

表4 实验结果(模拟退火算法)

车型数		相对GCA求解质量的改善程度		优于GCA的比例		劣于GCA的比例	
		5	10	5	10	5	10
10	20%	8.49%	5.42%	70%	45%	0%	15%
	40%	10.6%	9.57%	60%	80%	15%	10%
20	20%	6.50%	6.07%	65%	65%	20%	0%
	40%	3.33%	8.31%	80%	70%	0%	20%

表5 实验结果(遗传算法)

车型数		相对GCA求解质量的改善程度		优于GCA的比例		劣于GCA的比例	
		5	10	5	10	5	10
10	20%	2.95%	0.55%	60%	50%	7%	10%
	40%	3.48%	0.79%	60%	60%	20%	15%
20	20%	2%	1.46%	50%	80%	15%	0%
	40%	2.4%	0.9%	50%	90%	15%	0%

试验结果表明:模拟退火算法、遗传算法均不同程度的提高了混流生产线调度问题的求解质量.

4 结束语

本文研究了准时生产方式下混流生产线的调

度问题,建立了尽可能使各零部件消耗量保持均匀的多级混流装配线调度模型,并以 GCA 算法为基准,比较研究了遗传算法、模拟退火算法的求解

质量.实验表明,遗传算法和模拟退火算法得到的结果比“目标追随法”有一定程度的提高.

参 考 文 献:

- [1] 赵晓波、周兆英. 混合车型组装线的投入顺序问题[J]. 中国机械工程,1998,9(3):28-31
- [2] Kubiak W. Minimizing variation of production rates in just-in-time systems; a survey[J]. European Journal of Operational Research, 1993,66(3): 259-271
- [3] Xiaobo Z, Ohno K. Algorithms for sequencing mixed models on an assembly line in a JIT production system[J]. Computers and Industry Engineering, 1997,32(1): 47-56
- [4] Agnetis A, Pacifici A, etc. Scheduling of flexible flow lines in an automobile assembly plant[J]. European Journal of Operational Research, 1997,97(2): 348-362
- [5] Leu Y, Matheson L A, Ress L P. Sequencing mixed model assembly lines with genetic algorithms[J]. Computers and Industry Engineering, 1996,30(4): 1027-1036
- [6] Miltenburg G J. A theoretical basis for scheduling mixed model production lines[J]. Mgmt Sci. ,1989(35): 192-207
- [7] 沈希瑾等. 改变世界的生产方式[J]. 北京:中国经济出版社, 1996
- [8] 唐立新等. 新的 Lagrangian 松弛法求解 CLSP 问题[J]. 系统工程学报,1999,14(1):9-14
- [9] 郑明春等. ERP 中的能力平衡策略与辅助决策研究[J]. 管理科学学报,1999,2(1):92-95

Scheduling mixed-model assembly lines in JIT production systems

ZHAO Wei¹, HAN Wen-xiu¹, LUO Yong-tai²

1. Institute of Systems Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Academy of Finance and Economics, Tianjin 300222, China

Abstract: Solving the mixed-model scheduling problem is the most important goal for Just-in-time production systems. This paper built the multi-level mixed-model scheduling model whose objective is the minimization of the variability in parts consumption. Then the genetic algorithm and the simulation annealing are used to solve the problem. The results show that the solution which GA and SA produces is better than the one Toyota's Goal Chasing Algorithm.

Key words: JIT; mixed-model assembly line; genetic algorithm; simulated annealing algorithm