

研究简报

# 混流生产线的排产方法<sup>1)</sup>

华中生 梁 梁 徐晓燕

(中国科学技术大学商学院 合肥 230026)

(E-mail: zshua@ustc.edu.cn)

**关键词** 混流生产线, 排产, 整数规划, 遗传算法

**中图分类号** TH165

## PRODUCTION SCHEDULING FOR MIXED PRODUCTION LINE

HUA Zhong-Sheng LIANG Liang XU Xiao-Yan

(School of Business, University of Science & Technology of China, Hefei 230026)

(E-mail: zshua@ustc.edu.cn)

**Key words** Mixed production line, production scheduling, integer programming, genetic algorithm

## 1 引言

混流固定比例流水线(简称为混流生产线)是一种广泛应用于冰箱、电热水器等家用电器生产的流水线生产方式,其排产问题是指确定在一定时间段上(通常在冰箱行业中为一周或两周)各条生产线上各种产品的生产数量.混流生产线的主要特点是多种产品在多条流水线上同时生产,但是产品的产量受各流水线分配用于生产该产品的生产夹具数的限制.因此对于生产线的排产问题不但需要考虑满足市场需求,还需要考虑排产方案对各流水线夹具调整的要求和由此对生产能力和成本的影响.

目前的关于流水线的排产研究主要集中在柔性生产线或部分柔性生产线的夹具分配和产品到生产线的指派问题上,设备调整的成本通常是模型的主要着眼点<sup>[1~5]</sup>,而同时考虑设备(夹具)调整对生产能力影响的研究尚未见报道.我国家电企业在安排生产时一般根据经验组织生产.为此本文提出固定比例混流生产线排产问题的一般模型.由于所提出的模型是典型的 NP-完全问题而且是非线性的,即使生产规模较小时也很难求出模型精确的最优解,因此本文用提出的改进遗传算法求解此问题.

1) 国家自然科学基金(70172041)资助

## 2 混流生产线的组织特点与企业经验排产方式

本文将混流流水线 and 固定比例产出流水线统称为混流生产线,其主要特点是多种产品在多条流水线上同时生产,但是产品的产量受各流水线分配用于生产该产品的生产夹具数量所限制,即在一个生产循环内产出的比例受生产线工装、夹具决定;每个循环产出的产品数量、顺序、循环的周期相同;改变产出的比例需要调整生产线的工装、夹具的数量和比例;流水线的其他环节对产出影响不大.

混流生产线的显著优点为既能满足市场大批量的需要,又能同时生产多种产品,满足不同客户的要求.但它的最大缺点是产出受到夹具数量、比例的限制,当市场需求与产出的比例不一致时,必须要调整生产夹具,造成停工损失和废品产生.

以安徽省某著名家电制造商生产流水线为背景,总结混流生产线排产的一般假设和该企业多年来在实践中摸索出来的经验排产方法.混流生产线排产的一般假设为

a) 在生产能力允许的前提下尽量不调整夹具;调整夹具时也只影响被调整的夹具产量(调整时间为  $H$  小时),其余夹具不受影响.

b) 生产线双班,正常工作时间 16 小时,工作期间夹具均衡产出.

c) 尽量不加班;若需加班,单条生产线每天加班时间不能超过 4 小时且为整数.

企业根据经验安排生产的具体方法可概括为

1) 由产品期初库存和当期需求计算最少生产量,并与生产能力比较以确定加班时间.

2) 比较最小生产能力与期初夹具的生产能力之间的差异.

3) 按照计划期计算每天差异数及需要变更的夹具数并按一般假设调整变更的夹具数.

4) 根据变更的夹具数计算调整夹具影响的生产产量和实际的产量.

5) 比较实际的产量与需要生产的产出量,如果出现生产不足,则调整生产线夹具安排,如果仍然不能满足要求,则安排生产线加班,直至满足需求为止.

经验排产的主要问题是:1. 很难综合考虑调整夹具、库存、制造、缺货等成本之间的关系,生产计划难以成本优化;2. 依赖于安排生产人员的经验和素质.

## 3 混流生产线的排产模型

在上节排产的一般假设下,有  $m$  条生产线、 $n$  种产品,生产周期为  $W$  天,夹具的调整时间为  $H$  小时的混流生产线的排产模型如下.模型中与第  $i$  种产品( $i=1, \dots, n$ )相关的符号为:需求量  $D_i$ ,期初库存  $I_i^0$ ,期末库存  $I_i$ ,本期产量  $P_i$ ,本期可能的缺货  $Y_i$ ,单台产品库存成本  $K_i$ ,单台产品的缺货成本  $B_i$ ;与第  $j$  条生产线( $j=1, \dots, m$ )相关的符号为:期初第  $i$  种产品的夹具数  $A_{ij}^0$ ,单付夹具每日产量  $S_j$ ,生产线夹具调整数  $M_j$ ,固定成本  $C_{1j}$ ,单台变动成本  $C_{2j}$ ,每小时加班成本  $C_{3j}$ ,单付夹具调整成本  $C_{4j}$ ,生产周期内总加班时间  $T_j$ ;决策变量  $X_{ij}$  为计划期内第  $i$  种产品在第  $j$  条生产线上的生产数量.

$$\min C = \left( \sum_{j=1}^m \left( C_{1j} + C_{2j} \sum_{i=1}^n X_{ij} + C_{3j} T_j + C_{4j} M_j \right) + \sum_{i=1}^n \left( K_i \left( \sum_{j=1}^m X_{ij} + Y_i - D_i + I_i^0 \right) + B_i Y_i \right) \right) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} \quad (1)$$

$$s. t. \quad \sum_{j=1}^m X_{ij} + Y_i - D_i + I_i^0 \geq I_i, i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} + M_j * S_j * H/16 = A_{*j}^0 * S_j * (W + T_j/16), j = 1, \dots, m \quad (3)$$

$$\left( \sum_{j=1}^m X_{ij} + Y_i + I_i^0 - D_i \right) * Y_i = 0, i = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$M_j = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n |(X_{ij} - A_{ij}^0 S_j G) / S_j G (1 - H/32G)|, j = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$T_j \leq 4 * W, j = 1, \dots, m \quad (6)$$

$$X_{ij} \geq 0, Y_i \geq 0, T_j \geq 0, \text{integer } X_{ij}, Y_i, T_j, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m \quad (7)$$

在上述模型中,目标函数(1)表示单台平均成本最小化;约束(2)表示每种产品的生产量与其缺货量之和不小于其需求量与库存量的增量之和;(3)式表示每条生产线的生产时间与夹具调整时间之和等于其正常工作时间(用单产表示)与加班时间之和,其中  $A_{*j}^0$  为第  $j$  条生产线期初夹具的总数;约束(4)表示库存和缺货不能同时发生.(5)式为生产线在排产  $X_{ij}$  下夹具调整数的表达式,其本身不表示约束,引入该式主要是为了描述的方便与模型的简洁性.约束(6)式表示每条生产线每天加班不能超过 4 小时,因而在生产周期内表示每条生产线总的加班时间不能超过  $4 * W$ ; (7)式为非负与整数约束.

## 4 混流生产线排产问题的改进遗传算法

遗传算法是一种有效的解决最优化问题的方法,尤其适用于处理传统搜索方法难于解决的复杂和非线性的最优化问题.但一般遗传算法求解混流生产线排产模型存在着收敛速度慢、容易陷入局部极值等问题<sup>[6]</sup>,为此我们构造了下述改进遗传算法.

### 4.1 编码

基本遗传算法常用二进制的一维编码方式,但是对于本文的问题,由于所涉及决策变量数量较多(一般不小于 60 个),如果采用一维编码,必然会造成染色体过长而影响遗传的性能.因此本文采用计算机图形处理中常用的二进制二维编码方式,横向代表决策变量,纵向代表二进制位串.

### 4.2 对交叉和变异概率的调整

交叉与变异是遗传算法的关键算子,通过交叉与变异不但使个体能够有机会遗传优秀基因,而且更可望获得比父代更好的基因结构.对于基本遗传算法,一般选取一定的交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$ ,然后通过贝努利实验确定是否进行交叉或变异,交叉概率和变异概率的选取对算法的性能有着重要的影响,如果交叉和变异概率过大,可能使算法变为随机搜索,而交叉和变异概率过小,又可能使算法早熟收敛,陷入局部极值点.为了加快遗传算法的

搜索效率和有效地防止其陷入局部极小,改进遗传算法对交叉概率和变异概率进行如下的调整

$$P_c^1 = \begin{cases} P_c(G_{\max} - G(x))/G_{\max}, & \text{若 } G(x) > G_{\text{avg}} \\ P_c, & \text{若 } G(x) \leq G_{\text{avg}} \end{cases} \quad (8)$$

$$P_m^1 = \begin{cases} P_m(G_{\max} - G(x))/G_{\max}, & \text{若 } G(x) > G_{\text{avg}} \\ P_m, & \text{若 } G(x) \leq G_{\text{avg}} \end{cases} \quad (9)$$

在式(8),(9)中, $P_c, P_m$ 是给定的交叉概率和变异概率, $P_c^1, P_m^1$ 是调整后的交叉概率和变异概率, $G_{\max}$ 是群体最大适应度, $G_{\text{avg}}$ 是群体平均适应度, $G(x)$ 是两个交叉个体(或变异个体)的较大适应度.从上式可以看出,对于高于平均适应度的个体,其受破坏的可能性较小;而对于低于平均适应度的个体,其受破坏的可能性较大.这样可以防止遗传算法陷入局部最优.由于本文采用二进制二维编码方式,故应用了矩形交叉方法,其基本思想是分别在两个父代 0-1 矩阵中选取随机选择相同位置的一片矩形区域进行互换.实验证明矩形交叉方法有利于提高算法的收敛速度.

## 5 仿真实验与分析

某家电企业有 12 种产品和 5 条生产线(见表 1),生产周期为 7 天,夹具的调整时间为 8 小时.该企业在某期的排产中,12 种产品的生产量(单位:台)分别为 5000,2400,2250,5450,0,2340,690,230,100,0,2170,950;产品库存成本(单位:元/台)分别为 1.8,1.9,1.7,1.8,2.0,2.1,2.0,2.5,2.2,2.3,1.6,1.8;产品缺货成本(单位:元/台)分别为 450,475,425,450,500,525,500,625,550,575,400,450.生产线初期夹具的配备状况为生产线 1 有 6 付生产产品 1 和 4 付生产产品 2,生产线 2 有 6 付生产产品 2 和 5 付生产产品 4,生产线 3 有 4 付生产产品 3 和 4 付生产产品 5 和 2 付生产产品 6,生产线 4 有 5 付生产产品 3 和 1 付生产产品 7,生产线 5 有 2 付生产产品 11 和 3 付生产产品 12.

表 1 生产线数据

生产线	$A_{*j}^0$ (付)	$S_j$ (台/付*天)	$C_{1j}$ (元)	$C_{2j}$ (元/台)	$C_{3j}$ (元/小时)	$C_{4j}$ (元/付)
L1	10	98	160 000	36.9	58.3	770
L2	11	96	179 000	36.8	58.1	700
L3	10	100	302 000	38.4	61.5	380
L4	6	90	299 000	37.9	62.1	400
L5	5	94	115 000	32.5	52.7	900

根据经验排产的单台产品平均成本为 75.9954 元,而用模型法排产的单台产品平均成本为 75.709 39 元,模型法比经验排产单台产品平均成本下降了 0.29 元.造成这种差别的主要原因是:在按经验进行排产时,企业在考虑满足需求的前提下直接以夹具调整最少为目标,最终要调整 16 付夹具(参见表 2).这种方法忽略了夹具调整对生产能力的影响,因而很难达到优化的目的.模型在综合考虑夹具调整的成本及其对生产能力的影响后,仅调整 13 付夹具(参见表 2,表中空白表示无夹具配备)而达到了比经验排产法高出 159 台的产量(参见表 2 括号中的数值),因此降低了单台产品平均成本.

表 2 不同方法夹具配备对比及其对产量安排的影响(经验法/模型(经验-模型))

(单位:付/付(台))

$A_{ij}$	L1	L2	L3	L4	L5	合计
A1	8/6(-98)		0/1(50)		0/1(47)	8/8(-1)
A2	2/2	2/5				4/7
A3			0/3	4/1		4/4
A4	0/1(49)	9/5(-192)		0/3(135)		9/9(-8)
A5						0/0
A6			4/4			4/4
A7		0/1(48)		2/1(-45)		2/2(3)
A8	0/1(49)		1/0(-50)			1/1(-1)
A9				0/1(45)	1/0(-47)	1/1(-2)
A10			1/0(-50)			1/0(-50)
A11			4/2(-100)		1/2	5/4(-100)
A12					3/2	3/2
合计	10/10	11/11(-144)	10/10(-150)	6/6(135)	5/5	42/42(-159)

## 6 结束语

本文的主要贡献在于对混流生产线的排产问题给出了优化模型,该模型不仅考虑了夹具调整的成本,还考虑了夹具调整对生产能力的影响.本文的排产模型对于各种具体的混流生产线有较好的通用性,且所提出的模型在理论上可以方便地推广到多阶段问题和随机需求问题.模型的目标函数也可以为总成本最低或以库存水平最低.

## 参 考 文 献

- 1 Stecke K E, Raman N. Production planning decisions in flexible manufacturing systems with random material flows. *IIE Transactions*, 1994, **26**(1):2~17
- 2 Lee H F, Stecke K E. Production planning for flexible flow systems with limited machine flexibility. *IIE Transactions*, 1998, **30**(5):669~684
- 3 Balakrishnan A, Vanderbeck F. A tactical planning model for mixed-model electronics assembly operations. *Operations Research*, 1999, **47**(3):395~409
- 4 Qiu M M, Burch E E. Hierarchical production planning and scheduling in a multi-product, multi-machine environment. *International Journal of Production Research*, 1997, **35**(16):3023~3042
- 5 华中生, 徐晓燕. PWB 装配线综合生产能力计划模型及其近似求解算法. *自动化学报*, 2000, **26**(4):557~562
- 6 陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 王东生. 遗传算法及其应用. 北京:人民邮电出版社, 1996

**华中生** 2000年在中国科学技术大学获工学博士学位,现为管理科学系教授,博士生导师.目前主要从事工业工程与运筹学方面的研究工作.

**梁 梁** 1991年在东南大学获工学博士学位,现为中国科学技术大学信息管理与决策科学系教授,博士生导师.目前主要从事决策理论、信息管理等方面的研究工作.

**徐晓燕** 2001年毕业于中国科学技术大学商学院并获得硕士学位.目前主要研究方向为投资决策、企业管理等.