

通过生产线向单元转化而减人的多目标优化模型

于 洋^{1,2}, 唐加福^{1,2}, 宫 俊^{1,2}

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 在电子制造业中,越来越多的企业采用了单元生产方式,即通过生产线向单元的转换来应对多批次、小批量的需求,以提高生产效率. 研究了在不增加产品流通时间的前提下,通过生产线向单元转化来减少工人数. 生产线转化成单元是一个 NP-hard 问题,针对以减人为主要目标的生产线向单元转化的特点建立数学模型,采用 NSGA-II 算法来求解. 最后,通过实例验证了通过生产线向单元转化可以使企业在不增加产品流通时间的前提下减少工人的数量.

关 键 词: 减人; 生产线向单元转化; 多目标优化; NSGA-II; 流通时间

中图分类号: N 949 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2013)01-0017-04

Multi-objective Optimization Model of Line-Cell Conversion Towards Reducing Workers

YU Yang^{1,2}, TANG Jia-fu^{1,2}, GONG Jun^{1,2}

(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YU Yang, E-mail: yuyang@ise.neu.edu.cn)

Abstract: To improve the production efficiency, considering the multi-batch and small-volume demand of the electronics manufacturing industry, more and more companies adopted the cell production converted from the traditional assembly convey line. It was researched to reduce the workers by the line-cell conversion with the constraint of not increasing the total throughput time. According to the feature of the line-cell conversion towards reducing workers, a multi-objective model was set up. The line-cell conversion was an NP-hard problem, and so an algorithm based on NSGA-II was proposed to solve it. Several numerical simulation experiments were performed to illustrate that the line-cell conversion can be used to reduce workers without increasing the total throughput time at the same time.

Key words: reducing workers; line-cell conversion; multi-objective optimization; NSGA-II; total throughput time

传统的流水生产线(assembly convey line)为大规模生产提供了高效率的生产方式,但集成了设备、工作人员、产能,使其成为一个庞大的系统.因此,传统的流水生产线对于目前出现的多批量、小批次的需求,面临着一系列问题:①生产线存在着灵活性低、投资高、回收期长等弱点.当面对多批量的需求时,因灵活性低难以快速地进行生产;当面临小批次的需求时,因投资高难以收回成本.②在生产线上,整个生产效率等于瓶颈工人的生

产效率,导致了效率高工人的空闲,即生产线不平衡,直接降低了劳动效率.③由于工序复杂、生产环节多,当任何一个工序、环节陷入到异常作业的状态下,比如人手不齐、缺料、设备异常等,整个生产线将限于停工状态.④生产线上的工人做着重复性工作,当劳动时间过长时,工人将不堪重负,经常导致过激行为的发生.

而单元生产方式(cell production system)为企业处理多批次、小批量的需求提供了良好的解

收稿日期: 2012-07-23

基金项目: 中国博士后面上基金资助项目(2011M500570, 2012M510828); 辽宁省博士启动基金资助项目(20101039); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N110404021).

作者简介: 于 洋(1980-),男,辽宁大连人,东北大学讲师,博士; 唐加福(1965-),男,湖南东安人,东北大学教授,博士生导师.

决方案. 单元生产方式具有多个单元, 每个单元安排为数不多的几个工人(需是多能工, 即工人能操作多个工序), 工人按照单元的 U 型布局从头至尾、不间断地加工一个产品. 单元生产方式具有灵活、投资低、生产平衡好(如将工作效率相近的工人放在同一个单元里)的特性, 在面临多批次、小批量的需求时, 相比流水生产线, 它能降低产品流通时间、安装时间、工人数、制品库存、生产费用和生产空间等^[1-2].

在多品种、小批量的产品生产需求日渐增加的今天, 单元生产方式提供了高效率 and 低成本的解决方案, 使其在日本盛行起来^[1], 尤其是电子装配企业. 其他国家和地区(如: 美国^[3]、欧洲、韩国^[4]和中国)的企业也通过将生产线转化成单元生产(line-cell conversion)来提高生产效率. 根据文献[5]的报道, Sony Kohda 公司采用单元生产方式后, 产品的流通时间降低多达 53%, 并且节省了 25% 的劳动力.

Line-cell conversion 的目的是提高企业的生产效率和竞争性, 目前的研究较少. 为数不多的关于 line-cell conversion 的研究有: 文献[6]最早对 line-cell conversion 问题进行了研究和建模, 模型中包括产品流通时间最短和加工时间最少两个目标; 文献[7]研究了产品在单元上的装配规则对性能的影响; 文献[8-9]研究了在 line-cell conversion 中影响产品流通时间最短和加工时间最少的显著因素.

由于缺少对利用生产线向单元生产转化而节省工人的研究, 随着劳动成本的上升, 对于节省劳动力而不降低生产效率的研究显得尤为重要. 本文研究如何利用生产线向单元生产转化并且节省工人的问题. 而当减少工人时, 往往会造成产品流通时间的增加, 因此在减人的同时还要考虑最小化产品流通时间.

1 考虑减人的生产线向单元转化的数学模型

1.1 假设条件

- 1) 有 N 个产品类型, M 个产品批次(每个批次只有 1 种产品), 且批次大小已知;
- 2) 在生产线上生产方式中, 每个工人只执行 1 个工序, 因此工人数(W)与工序数相等;
- 3) 每个单元中的工人将要承担 1 个产品的所有工序, 即 1 个产品生产全过程在 1 个单元中完成;

4) 不同单元中的工人数可以不相同;

5) 安装时间代表不同种类的产品相邻批次之间的间隔时间, 同种产品相邻批次间隔时间为 0.

1.2 参数说明

1.2.1 索引集

i 为工人的索引集; j 为单元序号的索引集; n 为产品型号的索引集; m 为产品批次的索引集; k 为产品在 1 个批次中的序列的索引集.

1.2.2 参数

V_{mn} 为二进制变量, V_{mn} 等于 1 表示 m 批次的产品类型是 n ; B_m 为 m 批次的产品数量; t_n 为 n 类型产品在生产线的平衡时间; SL_n 为在生产线上加工 n 类型产品的准备时间; SCP_n 为在单元中加工 n 类型产品的准备时间; β_{ni} 为工人 i 加工 n 类型产品的技术系数; η_i 为工人 i 有效操作工序个数的上界, 工人在单元中操作工序的个数超过这个上界, 其工序加工时间将变长; ε_i 为多能工系数; 当工人 i 加工的工序数超过 η_i , 其工序加工时间会变长.

1.2.3 决策变量

X_{ij} 为工人 i 是否已被分派到单元 j , 如果 i 工人分配到了单元 j , 则 $X_{ij} = 1$; 否则为 0. Z_{mjk} 为第 m 批产品是否被分配到单元 j 中并被第 k 个生产, 如果是, 则 $Z_{mjk} = 1$; 否则为 0.

1.2.4 变量

C_i 为第 i 个工人操作多个工序的能力系数, 见式(1); TC_m 为 m 批次的一个产品在单元中一个工序的加工时间, 与被分配的工人有关, 见式(2); SC_m 为 m 批次在单元中开始准备的时间, 见式(3); FC_m 为 m 批次的产品在单元中的流通时间, 见式(4); FCB_m 为 m 批次的产品在单元中的开始时间, 见式(5).

$$C_i = \begin{cases} 1 + \varepsilon_i (W - \eta_i) & , W > \eta_i, \forall i; \\ 1 & , W \leq \eta_i, \end{cases} \quad (1)$$

$$TC_m = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M V_{mn} T_n \beta_{ni} C_i X_{ij} Z_{mjk}}{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M X_{ij} Z_{mjk}}; \quad (2)$$

$$SC_m = \sum_{n=1}^N SCP_n V_{mn} \left(1 - \sum_{m'=1}^M V_{m'n} Z_{m'j(k-1)} \right), \quad (3)$$

$$(j, k) | Z_{mjk} = 1, \forall j, k;$$

$$FC_m = \frac{B_m TC_m W}{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M X_{ij} Z_{mjk}}; \quad (4)$$

$$FCB_m = \sum_{s=1}^{m-1} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^m (FC_s + SC_s) Z_{mjk} Z_{sj(k-1)}. \quad (5)$$

1.3 数学模型

目标函数:

$$\min \left\{ \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^W X_{ij} \right\}, \quad (6)$$

$$TTPT = \min \left\{ \max_m (FCB_m + FC_m + SC_m) \right\}. \quad (7)$$

$$\text{s. t.} \quad 1 \leq \sum_{i=1}^W X_{ij}, \forall j; \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M Z_{mjk} = 1, \forall m; \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^M Z_{mjk} = 0, \left\{ j \mid \sum_{i=1}^W X_{ij} = 0, \forall j \right\}. \quad (10)$$

式(6)表示 line-cell conversion 后最小化工人数; 式(7)表示产品的流通时间 (total throughput time, TTPT) 最小; 式(8)表示每个单元至少包含 1 个工人; 式(9)表示批次 m 只能被 1 个单元加工; 式(10)保证了如果批次 m 被加工, 那么加工它的单元至少有 1 个工人。

文献[10]证明了 line-cell conversion 中的单元构建和单元装载都是 NP-hard 问题, 为了简化, 本文采用工业界通常采用的 FCFS^[10] (批次先到先服务) 方式进行单元装载。对于采用 FCFS 的 line-cell conversion 仍然是 NP-hard 问题, 因此需要采用智能优化算法求解中大规模问题。另外该模型是多目标, 需采用多目标优化算法, 因此根据该模型的特点, 本文提出了基于 NSGA-II 的求解算法。

2 基于 NSGA-II 的求解算法

2.1 染色体编码

对于一个有 W 个工人的生产线, 很明显最多将能组建 W 个单元, 即每个单元中只有 1 个工人; 最少将能组建 1 个单元, 即所有工人都在 1 个单元中。而且根据式(2)可知, 批次 m 在任意单元中的加工时间即 TC_m 与单元中工人的排序无关^[8]。因此, 本文提出了一种顺序编码方式来表示转化后的单元构建, 即几个单元以及每个单元中的工人安排情况。

该顺序编码可用一个长度为 $2n-1$ 的整数向量表示。在这个向量中 $1 \sim n$ 表示对应的工人号, $n+1 \sim 2n-1$ 表示分隔符。另外, 整个编码的首尾默认存在着固定的分隔符。因此通过这种编码, 对于 n 个工人的生产线, 正好能形成最多 n 个单元、最少 1 个单元的单元组织形式。

假如一个有 5 个工人的生产线, 编号分别是 1 2 3 4 5, 分隔符为 6 7 8 9。染色体“1 9 3 8 2

7 4 6 5”表示有 5 个单元被构造, 每个单元中的工人分别是 1 3 2 4 5; 染色体“9 7 1 3 4 2 4 5 8 6”表示有仅有 1 个单元被构造, 所有工人都在这个单元中。

2.2 适应度函数

本文的目标函数有两个: ①工人数最小, 如式(6)所示; ②TTPT 最小, 如式(7)所示。因此采用 NSGA-II 中的非支配排序和拥挤距离评价解的适应度。

2.3 个体选择

采用锦标赛方法选择个体。通过比较从种群中挑选的两个解, 选择好的解。所谓好的解是指两个解中: 如果非支配排序小, 则解好; 如果非支配排序相等, 拥挤距离小, 则解好。

2.4 交叉与变异

本文采用 Davis 提出的顺序交叉法, 变异采用两个不相同元素交换的方式。

3 实例验证

3.1 实验数据

采用文献[10]中的标准 Benchmark 数据进行测试。这些数据包括具体的实验参数 (如: $SL_n = 2.2$; $SCP_n = 1.0$; $t_n = 1.8$; $\eta_i = 10$), ε_i 的详细值 β_{ni} 的详细值, 以及批次的详细信息。

实验针对一个有 12 个工人的生产线, 基于上述给定的参数及数据, 此时生产线的 TTPT 的值为 1 935.002。

3.2 实验结果

针对给定的实例数据, 分别计算有 12 个工人的生产线减 1 人、减 2 人和减 3 人的情况。

减 1 人的结果如表 1 所示, 为了表述清晰, 分隔符为“{”和“}”配对使用。对于利用 line-cell conversion 减 1 个工人的情况, 通过本文提出的算

表 1 12 个工人的生产线通过单元转化后减 1 人的结果
Table 1 Results of reducing one worker by the line-cell conversion for the line with 12 workers

人数	TTPT	染色体编码
11	1 672.734	{11, 1}{7, 6, 10}{9, 5, 3}{2, 8, 4}
11	1 676.550	{12, 7, 4, 8, 9}{10}{1, 6, 3, 2, 11}
11	1 678.540	{3, 4, 1, 5, 9}{10}{11, 2, 7, 8, 12}
11	1 684.398	{3, 9, 10}{4}{6, 12, 5, 2, 1}{11, 8}
11	1 685.656	{12, 10, 3}{6, 8, 1, 5, 2}{7, 11, 4}
11	1 690.757	{5, 4, 9, 3, 8}{10}{7, 2, 1, 6, 12}
11	1 692.282	{10, 5, 4, 1, 6}{7}{8, 11, 9}{12, 2}
11	1 692.282	{1, 3, 8}{5, 7, 11}{10, 9, 4}{12, 2}

法,获得 509 个满足 TTPT 比原生产线的 1 935.002 小的解. 为了简化,表 1 只列出了前 8 个解. 表 1 中的结果是根据 TTPT 由小到大排序.

表 1 说明对于 12 人的生产线,可以转换成 11 人的单元生产方式(即减掉 1 人),且 TTPT 也小于原生产线的值.

减 2 人的结果如表 2 所示. 对于 line-cell conversion 减 2 个工人的情况,通过本文提出的算法,获得 119 个满足 TTPT 比原生产线小的解,为了简化,表 2 也只列出了前 8 个解.

表 2 12 个工人的生产线通过单元转化后减 2 人的结果
Table 2 Results of reducing two workers by the line-cell conversion for the line with 12 workers

人数	TTPT	染色体编码
10	1 847.816	{1 2}{6 4}{9 12 10 8 11 5}
10	1 857.846	{1 5}{9 12 2 4}{6 8 10 11}
10	1 859.080	{2 9 1}{6 11}{3 12 5 7 8}
10	1 861.264	{5 1 9}{8 7 12}{11 3}{6 4}
10	1 863.963	{12 2}{6 11 10 9}{1 4 5 3}
10	1 864.073	{11 3 9 2}{1 10}{7 4 12 5}
10	1 866.378	{9 7}{12 2}{10 4}{11 8}{3 1}
10	1 867.245	{3 2 11 7}{6 4}{12 8 5 10}

表 2 说明对于 12 人的生产线,可以转换成 10 人的单元生产方式(即减掉 2 人),且 TTPT 也小于原生产线的值.

对于 line-cell conversion 减 3 个工人的情况,通过所提出的算法,没有获得满足 TTPT 比原生产线小的解.

4 结 语

本文研究了在不增加产品流通时间的前提下,

通过生产线向单元转化来减少工人数. 描述了以减人和产品流通时间最小的生产线向单元转化的多目标模型. 针对该多目标模型单元构造的特点,提出了基于 NSGA-Ⅱ 的求解该模型中大规模问题的算法. 通过实例验证了生产线向单元转化可以用来减少工人的数量并且不增加产品的流通时间.

参考文献:

- [1] Takeuchi N. Seru production system [M]. Tokyo: JMA Management Center 2006.
- [2] Stecke K E, Yin Y, Kaku I, et al. Seru: the organizational extension of JIT for a super-talent factory [J]. *International Journal of Strategic Decision Sciences* 2012 3(1): 105-118.
- [3] Williams M. Back to the past: some plants, especially in Japan are switching to craft work from assembly lines [N]. *The Wall Street Journal* 1994-10-24: A-1.
- [4] Yin Y. The direction of Samsung style next generation production methods [R]. Korea: Samsung Electronics at Suwon City 2006.
- [5] Yin Y, Stecke K E, Swink M, et al. Integrating lean and agile production paradigms in a highly volatile environment with seru production systems: Sony and Canon case studies [R]. Yamagata: Yamagata University 2012.
- [6] Kaku I, Gong J, Tang J, et al. A mathematical model for converting convey or assembly line to cellular manufacturing [J]. *International Journal of Industrial Engineering and Management Science* 2008 7(2): 160-170.
- [7] Yu Y, Tang J, Li J, et al. Complexity and improvement comparison of line-cell conversion problem with FCFS and SPT [C]//Asian Conference of Management Science & Applications. Sanya 2011: 1420-1433.
- [8] Kaku I, Gong J, Tang J, et al. Modeling and numerical analysis of line-cell conversion problems [J]. *International Journal of Production Research* 2009 47(8): 2055-2078.
- [9] Yu Y, Gong J, Tang J, et al. How to carry out assembly line-cell conversion: a discussion based on factor analysis of system performance improvements [J]. *International Journal of Production Research* 2012 50(18): 5259-5280.