

面向注塑车间的高效作业调度方法

李启锐^{1*}, 彭志平¹, 陈晓龙²

(1. 广东石油化工学院 计算机与电子信息学院, 广东 茂名 525000; 2. 金华职业技术学院 信息工程学院, 浙江 金华 321017)

(*通信作者电子邮箱 liquirui@foxmail.com)

摘要:针对注塑生产车间作业调度效率较低的问题,在“归模”的基础上提出一种改进的作业调度方法。该方法通过合并具有相同模具清单作业减少生产所需时间,再通过小机型注塑机优先排产降低车间能耗。理论分析和实验评测结果表明,该方法可以提高生产能力,降低耗电量超过 50%,使注塑车间作业调度效率更高。

关键词:车间作业;归模;合单;小机型优先;数学模型

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Efficient job scheduling method for injection molding workshop

LI Qirui^{1*}, PENG Zhiping¹, CHEN Xiaolong²

(1. College of Computer and Electronic Information,
Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming Guangdong 525000, China;
2. Information Engineering College, Jinhua Polytechnic, Jinhua Zhejiang 321017, China)

Abstract: To solve the low efficiency of scheduling in injection molding workshop, an improved job-shop scheduling method was proposed based on clustering mold. The production time was reduced by merging jobs with the same tool list, and the energy consumption was reduced through small model injection machine preferred scheduling. The theoretical analysis and the experimental results show that the proposed method can improve productivity and reduce power consumption more than 50%, making injection molding shop job scheduling be more efficient.

Key words: job-shop; clustering mold; jobs merging; small model preferred; mathematical model

0 引言

车间作业调度问题是企业生产优化管理中的一个重要课题^[1]。在注塑车间,要完成一个作业,必须按照作业要求的生产工艺和模具清单先确立一套模具,然后选择机型适合该模具的注塑机进行加工处理。由于注塑车间的设备昂贵,设备的数量远不如注塑产品数量多,存在产品竞争用模具、模具竞争用注塑机的情况。随着生产规模的扩大,注塑车间已经成为一些制造企业提高产能的瓶颈^[2-3],迫切需要一种高效的车间作业调度方法以使注塑车间从有限的生产资源中获得最大的生产能力,减少注塑车间的瓶颈约束的影响,从而提高企业的整体生产能力和经济效益。

车间作业调度是一类满足任务配置和顺序约束要求的资源分配问题,是一种典型的 NP 难题,长期以来一直是学术界广泛研究的热点^[4],主要有精确算法和启发式算法车间作业调度方法。对于小规模作业调度,精确算法优化解的精度高;而对于大规模作业调度,计算时间长,因此启发式算法是车间作业调度的主要研究方向^[5]。启发式算法主要有遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法、蚁群算法、免疫算法等,这些算法能力强,取得了一定的优化效果,基本上能够满足现代制造企业的要求^[6-9]。但是由于车间作业调度优化问题的复杂性,

以及以上算法存在的各种不足,至今尚未形成系统的理论与方法^[10]。如何寻求更加有效的切合实际车间的作业调度求解算法,一直是人工智能领域的研究难点及热点^[11]。车间作业调度问题的实质是在资源约束和工艺顺序约束的条件下,确定待调度工序在相关机器上的加工顺序和开工时间,以保证所选定的生产目标最优^[12]。研究的主要对象是工序与机器之间的关系。但是在注塑车间,每一个工件的工序基本上都是一样的,要经过射胶、冷却、开模、取出、合模五道工序,它们的顺序是不可变的且需连续完成。注塑车间真正要解决的问题是如何安排作业的顺序以及协调模具与注塑机之间的关系。文献[2]提出 6S(6S 是指整理、整顿、清扫、清洁、素养和安全)现场管理理论,从 6S 现场管理入手去研究换模的流程,通过 ECSIRR (Elimination, Combination, Simplification, Improvement, Re-organization, Re-arrangement) 以及内外部时间的转换,最终实现了快速换型,提高设备的利用率。文献[3]提出了对作业进行“归模”操作,不再严格根据作业的完成日期安排生产,而是对使用同一模具生产的物料进行归类汇总,使得需要同样模具的作业能够连续生产,以减少因频繁换模而造成注塑机空等的情况。

本文在文献[3]的基础上,深入分析注塑机的机型的大小对生产成本的影响以及可以合单生产的情况,对算法进行

收稿日期: 2013-11-18; **修回日期:** 2013-12-26。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61272382); 广东高校石油化工故障诊断与信息控制工程技术开发中心开放基金资助项目(512014); 茂名市科技计划项目(2012B01036)。

作者简介: 李启锐(1982-),男,广西玉林人,讲师,硕士,主要研究方向:企业生产管理; 彭志平(1969-),男,福建泉州人,教授,博士,主要研究方向:人工智能、生产流程算法; 陈晓龙(1972-),男,福建南平人,副教授,博士,主要研究方向:计算机网络、生产流程算法。

了进一步改进,使得注塑车间的生产能力和生产成本(耗电量方面)分别改善50%以上。

1 注塑车间作业调度问题及数学模型

1.1 注塑车间作业调度问题描述

计划部门下发给注塑车间 n 道作业,每道作业需要生产 q 个注塑件, n 道作业涉及到 m 套模具,注塑车间有 u 台注塑机。已知每台注塑机的机型和模具适用的注塑机机型的范围。在保证作业按时完成的前提下可以适当修改作业的加工顺序。注塑车间作业调度问题描述为通过一定优化策略确定作业的加工顺序和方式,确定模具与注塑机器的分配关系,使得作业的总调度时间最短以及所耗费的电量最少。对应的已知条件描述如下:

- 1) 需要完成的 n 道作业集为 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$,其中 $o_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为第 i 道要加工的作业。
- 2) 作业要加工的注塑件集为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$,其中 p_i 为 o_i 作业要加工的注塑件。
- 3) 作业完成的数量为 $Q(P) = \{Q(p_1), Q(p_2), \dots, Q(p_n)\}$,其中 $Q(p_i)$ 为 o_i 作业要加工的注塑件 p_i 的数量。
- 4) 车间作业所需要的模具集为 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$,其中 m_i 为注塑件 p_i 要求的模具。
- 5) 车间的注塑机集为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_u\}$,其中 $a_j (j = 1, 2, \dots, u)$ 为第 j 台注塑机,对应的机型为 y_j ,功率为 P_j 。
- 6) 模具 m 的注塑周期为 T_m ,适合的机型(以射流量为标准)范围为 $[y_{m1}, y_{m2}]$,其中 $y_{m1} \leq y_{m2}$ 。
- 7) 注塑机换模所需要时间为 T_{cm} 。
- 8) 注塑件 p 的出模件数为 $M(p)$,所需要的用料清单为 $B(p)$ 。

注塑车间作业调度必须满足如下的约束条件:

- 1) 保证作业按时完成;
- 2) 尽量减少换模操作,以减少机器空等;
- 3) 尽可能安排机型小的注塑机生产,以节约耗电量;
- 4) 尽可能合单生产,以节省生产时间。

1.2 注塑车间作业调度问题的数学模型

1.2.1 作业总调度时间计算

设在调度 s 中,注塑机 a 的换模次数、生产时间和作业序列分别定义为 Z_a, T_a 和 $(o_1, o_2, \dots, o_k; k \leq n)$ 。

如果相邻两道作业所要求的模具不相同,则说明需要进行换模操作。令 o_0 表示注塑机初始状态,则注塑机上的换模次数为:

$$Z_a = \sum_{i=0}^{k-1} f(o_i, o_{i+1}) \quad (1)$$

其中:

$$f(o_i, o_j) = \begin{cases} 1, & m_i \neq m_j \\ 0, & m_i = m_j \end{cases} \quad (2)$$

由此可得注塑机 a 的换模时的等待时间 T_{aw} 为:

$$T_{aw} = Z_a * T_{cm} = \sum_{i=0}^{k-1} f(o_i, o_{i+1}) * T_{cm} \quad (3)$$

设作业 o 所需的注塑成型次数(简称模数)定义为 $C(o)$,则:

$$C(o) = Q(p)/M(p) \quad (4)$$

由此可得注塑机 a 的生产时间 T_{ap} 为:

$$T_{ap} = \sum_{i=1}^k T_{m_i} * C(o_i) = \sum_{i=1}^k T_{m_i} * \frac{Q(p_i)}{M(p_i)} \quad (5)$$

车间作业的总调度时间由生产时间和换模具时间组成,即:

$$T(s) = \sum_{j=1}^m T_{a_j w} + \sum_{j=1}^m T_{a_j p} \quad (6)$$

把式(3)和式(5)代入式(6)得 s 的总调度时间为:

$$T(s) = \sum_{j=1}^u \sum_{i=0}^{k-1} f(o_i, o_{i+1}) * T_{cm} + \sum_{j=1}^u \sum_{i=1}^k T_{m_i} * \frac{Q(p_i)}{M(p_i)} \quad (7)$$

1.2.2 作业的总耗电量计算

车间作业的总耗电量为每台注塑台生产时所耗电量之和,即:

$$E(s) = \sum_{j=1}^u w_j * T_{a_j p} \quad (8)$$

1.2.3 作业调度的目标函数

车间作业调度的目标是在所有可行的调度方法中找到总调度时间最短以及所耗费的电量最少的调度策略。设计针对作业集 O 共有 (s_1, s_2, \dots, s_d) 种调度方法,则作业调度的目标函数为:

$$\min(F(s_j)) = \min(T(s_j)) + \min(E(s_j)); \quad 1 \leq j \leq d \quad (9)$$

2 注塑车间作业调度优化

2.1 用合单策略降低作业的生产环节所需时间

在式(7)中, s 的总调度时间由两部分组成,一部分为换模时机器的空等待时间,另一部分为作业生产环节所需要的时间。对于第一部分,可以通过“归模”算法减少换模次数以达到时间优化的目的。对于另一部分,由于 $M(p_i)$ 是在设计模具时设定的,不能改变; T_{m_i} 是由 p_i 的生产工艺决定的,在不改变工艺的情况下也不能改变;为了使 T_{ap} 达到最小,可以考虑对 $Q(p_i)$ 进行优化。

在注塑车间,有如下生产规律:对于作业 o_i 和 o_j ,如果 $m_i = m_j, B(p_i) = B(p_j)$,则 p_i 和 p_j 可以合单生产。

定理1 如果 $p_i = p_j$,合单后作业的模数为 o_i 和 o_j 的模数之和。如果 $p_i \neq p_j$,合单后作业的模数为 o_i 与 o_j 的模数之间的最大值。

证明 设模具 m 的一次成型的同时可生产出的产品集为 $P_m = \{p_{m1}, p_{m2}, \dots, p_{mm}\}$, $p_i \in P_m, p_j \in P_m$ 。如果 $p_i = p_j$,说明 p_i 与 p_j 为同一产品,不可以并行生产,只能串行生产,因此合单后作业的模数为 o_i 与 o_j 的模数之和;如果 $p_i \neq p_j$,说明 p_i 与 p_j 为不同产品,可以并行生产,因此合单后作业的模数为 o_i 与 o_j 的之间模数的最大值。

在作业集 O 中,如果 $m_1 = m_2 = \dots = m_i, B(p_1) =$

$B(p_2) = \dots = B(p_i)$, $p_i \neq p_j (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq i)$, 由定理1可知, (o_1, o_2, \dots, o_i) 可以合单生产。设合单前的调度为 s , 合单后的调度为 s' , 合单后的作业为 o' , 则 o' 的生产时间为:

$$T(s') = Tm_i * C(o') \quad (10)$$

推论1 合单以后所需的生时间不大于合单前的生产时间, 即 $T(s') \leq T(s)$ 。

证明 由定理1可知, $C(o') \leq \sum_{j=1}^i C(o_j)$, 所以,

$$Tm_i * C(o') \leq Tm_i * \sum_{j=1}^i C(o_j) \text{。因为 } m_1 = m_2 = \dots = m_i, \text{ 所以 } Tm_i * \sum_{j=1}^i C(o_j) = \sum_{j=1}^i Tm_j * C(o_j), \text{ 因此有 } T(s') \leq T(s) \text{。}$$

当注塑车间接收到计划部门发出的作业集后, 对其中的每一道作业计算它的模具清单, 然后按照“规模”算法把作业集划分为若干个小作业集, 接着对每一个小作业集根据定理1进行合单运算, 最后得到一个新作业集, 以新的作业集为基础进行排产。由推论1可知新作业集所需要的生产时间小于或等于原作业集, 排产结果得到优化。

2.2 利用小机型优先策略降低作业所耗电量

对于给定的模具 m , 它适合的注塑机器有 a_i 和 a_j 。设在调度 s_1 中把 m 分配给 a_i , 在调度 s_2 中把 m 分配给 a_j 。由式(5)可知有 $T_{a_i, p} = T_{a_j, p}$ 。

在注塑车间, 用注塑机 a_i 和 a_j 生产同样的注塑件, 如果 $y_i < y_j$, 一般有 $w_i \leq w_j$ 。因此, 根据式(8)有 $E(s_1) \leq E(s_2)$ 。

从以上分析可知, 当要给模具 m 分配注塑机时, 首先根据已知条件(6)找出其适合的机型区间 $[y_{m1}, y_{m2}]$, 从 y_{m1} 开始以约束条件(1)进行试探是否存在注塑机可以安排生产。如果试探成功, 则确定把 m 分配给的机型为 y_{m1} 的注塑机; 否则继续试探下一种机型, 依次搜索, 直到 y_{m2} 为止。

3 实验评测

3.1 实验环境

本文设定的实验环境如下: 在5台注塑机和7套模具的实际生产环境中, 注塑机的已知条件如表1所示(机型以射胶量命名)。模具的已知条件如表2所示, 产品的模具清单如表3所示。

表1 注塑机列表

序号	机器编码	射胶量 (机型)/oz	功率/kW	序号	机器编码	射胶量 (机型)/oz	功率/kW
1	M1	5	2	4	M4	14	4
2	M2	9	3	5	M5	19	5
3	M3	9	3				

表2 模具列表

序号	模具编码	注塑周期	机型范围	序号	模具编码	注塑周期	机型范围
1	M001	20	5~14	5	M005	21	9~14
2	M002	15	5	6	M006	28	9~14
3	M003	28	9~14	7	M007	18	14~21
4	M004	24	5~9				

表3 模具清单

序号	注塑件编码	用料清单	模具编码	出模件数
1	001-01	ABS + 灰色色粉	M001	2
2	001-02	ABS + 灰色色粉	M001	2
3	001-07	ABS + 灰色色粉	M001	2
4	001-03	PVC + 蓝色色粉	M001	2
5	001-04	PVC + 蓝色色粉	M001	2
6	001-06	PVC + 蓝色色粉	M001	2
7	002-01	亚加力	M002	8
8	003-16	ABS + 蓝色色粉	M003	1
9	003-17	ABS + 蓝色色粉	M003	1
10	003-18	ABS + 蓝色色粉	M003	1
11	003-19	ABS + 蓝色色粉	M003	1
12	003-20	ABS + 蓝色色粉	M003	2
13	004-01	ABS + 黑种 905	M004	2
14	004-02	ABS + 黑种 905	M004	1
15	005-01	PP 原料	M005	4
16	006-01	470 + GP + 黑种 905	M006	1
17	007-04	PVC + 黑种 905	M007	2

计划部门给注塑车间下发了一批作业如表4所示。从表3~4可看出作业子集 $S1 = \{MO142, MO143, MO144\}$, 子集 $S2 = \{MO145, MO146, MO147\}$, 子集 $S3 = \{MO149, MO150, MO151, MO152, MO153\}$ 和子集 $S4 = \{MO154, MO155\}$ 中的注塑件使用的模具相同、用料也相同, 因此可以合单生产。 $S1$ 和 $S4$ 中各个工单所需要的模数相同, 生产过程中不需要塞模, 合单后只会产生一张新的作业; 而 $S2$ 和 $S3$ 中各工单所需要的模数有所不同, 需要塞模, 会产生多道新的作业; 其他的作业不存在合单的情况。

表4 作业集

序号	作业编号	注塑件编码	交货日期	数量	模数
1	MO142	001-01	08-25	800	400
2	MO143	001-02	08-25	800	400
3	MO144	001-07	08-25	800	400
4	MO145	001-03	08-28	600	300
5	MO146	001-04	08-28	600	300
6	MO147	001-06	08-28	1000	500
7	MO148	002-01	08-28	1600	200
8	MO149	003-16	08-27	2000	2000
9	MO150	003-17	08-27	2000	2000
10	MO151	003-18	08-27	2000	2000
11	MO152	003-19	08-27	2000	2000
12	MO153	003-20	08-27	2000	1000
13	MO154	004-01	08-29	1200	600
14	MO155	004-02	08-29	600	600
15	MO156	005-01	08-29	3000	750
16	MO157	006-01	08-29	2500	2500
17	MO158	007-04	08-30	5000	2500

3.2 实验结果对比分析

本文方法是在文献[3]基础上增加了合单和小机型优先两种调度策略。经过实验, 两种方法的结果如下: 两种方法的换模次数同为7次; 文献[3]方法所需调度总时间为

127.93 h, 本文方法所需要调度总时间为 61.71 h; 文献[3]方法所需耗电量为 440.18 kWh, 本文方法所需耗电量为 187.79 kWh。

基于合单策略和小机型优先策略的注塑车间调度方法是在归模的基础上, 利用相同的模具清单相同的作业必定可以合单生产的原理和小机型的耗电量相对较小的规律, 对原始作业集进行重新调度优化, 使得优化后的作业集既保证交货期和数量上的要求, 又可以减少总的调度时间和车间的耗电量。

实验结果表明, 使用本文方法, 在作业总调度时间方面减少了 51.8%, 在耗电量生产成本方面减少了 57.3%, 能够有效地提高作业调度的整体效率。

4 结语

针对注塑车间生产的特殊性, 在已有“归模”的基础上提出了基于合单生产策略和小机型优先的车间作业调度方法。实验结果表明, 该方法在调度时间和耗电量两项指标中获得了更优的解, 改善幅度都超过 50%, 证明了该方法的有效性和可行性。同时, 本文对该方法建立了数学模型, 并对优化方法进行了推导和证明, 为研究其他具有类似约束条件作业的调度方法提供了理论依据和方向。方法容易程序实现, 为注塑车间提供了一种可参考的高效的自动排产方法, 具有一定的实际应用价值。

参考文献:

- [1] XU X, HU K. Genetic algorithm based multiple objective flexible job shop scheduling method [J]. Computer Application and Software, 2012, 29(7): 266 - 270. (许秀林, 胡克雄. 基于遗传算法的多目标柔性车间作业调度方法[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(7): 266 - 270.)
- [2] LI H. The current molding production management status and improvement in BSL [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012. (李海蓝. BSL 公司注塑车间生产管理的现状研究及改善[D]. 上海: 华东理工大学, 2012.)
- [3] CHEN X, YU S, PENG Z. Injection workshop scheduling algorithm [J]. Microcomputer Applications, 2013, 30(5): 48 - 50. (陈晓龙, 庾善日, 彭志平. 注塑车间排产算法[J]. 微型电脑应用, 2013, 30(5): 48 - 50.)
- [4] WANG C, JI Z, LI X. Research on improved job-shop scheduling algorithm [J]. Journal of Jiangnan University: Natural Science, 2013, 12(3): 268 - 271. (王聪, 纪志成, 李欣明. 一种改进的车间调度算法[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2013, 12(3): 268 - 271.)
- [5] ZHANG F, GENG H. Optimization of job-shop scheduling problem based on chaos particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2013, 43(3): 19 - 22. (张飞, 耿红琴. 基于混沌粒子群算法的车间作业调度优化[J]. 山东大学学报: 工学版, 2013, 43(3): 19 - 22.)
- [6] HE F, WANG M, TANG Y. Application of flow shop scheduling based on genetic algorithm [J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(S2): 274 - 276. (何法江, 王明红, 汤以范. 遗传算法在车间流水作业调度中的应用[J]. 计算机应用, 2010, 30(S2): 274 - 276.)
- [7] LIANG X, HUANG M, CHANG Z. New genetic annealing hybrid strategy for job-shop scheduling problem [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(6): 851 - 854. (梁旭, 黄明, 常征. 求解车间调度问题的一种新遗传退火混合策略[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(6): 851 - 854.)
- [8] CHEN C, XING L. GA-ACO for solving flexible job-shop scheduling problem [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(3): 615 - 621. (陈成, 邢立宁. 求解柔性作业车间调度问题的遗传-蚁群算法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3): 615 - 621.)
- [9] HUANG Y, YU C, DUAN F. A survey of the methods for the immune algorithm to solve the job shop scheduling problem [J]. Computer Engineering and Science, 2010, 32(6): 135 - 137. (黄雨田, 于彩燕, 段富. 免疫算法解决车间生产调度问题方法综述[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(6): 135 - 137.)
- [10] GAO J, SUN L, GEN M. A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for flexible job shop scheduling problems [J]. Computer & Operations Research, 2008, 35(9): 2892 - 2907.
- [11] QIAO X, ZHANG J. Traveling salesman problem solving based on an improved genetic simulated annealing algorithm [J]. Computer Simulation, 2009, 26(5): 205 - 208. (乔彦平, 张骏. 基于一种改进遗传模拟退火算法的 TSP 求解[J]. 计算机仿真, 2009, 26(5): 205 - 208.)
- [12] GUO D, LI T. Constraint-based algorithm for job shop scheduling [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(1): 117 - 125. (郭冬芬, 李铁克. 基于约束满足的车间调度算法综述[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(1): 117 - 125.)
- [13] LI N, REN Q. An improved hybrid algorithm for job shop scheduling [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(22): 176 - 181. (李娜, 仁庆道尔吉. 改进的混合算法求解车间作业调度问题[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(22): 176 - 181.)
- [14] QIN N, YUE X, LIU W. Particle swarm optimization algorithm of JSP based on Petri net [J]. Journal of Computer Applications, 2008, 28(8): 2167 - 2169. (秦娜, 乐晓波, 刘武. 基于 Petri 网模型的 JSP 粒子群优化调度[J]. 计算机应用, 2008, 28(8): 2167 - 2169.)
- [15] LIN H, CHEN X, WU L, et al. Scheduling of flexible flow-shop for mold manufacturing with processing time uncertainty [J]. Industrial Engineering Journal, 2012, 15(1): 120 - 124. (林汉华, 陈新度, 吴立华, 等. 工期不确定的模具车间柔性 Flow-shop 调度问题[J]. 工业工程, 2012, 15(2): 120 - 124.)
- [16] QIAO P, MA L, ZHENG L. Research on job-shop scheduling problem based on improved particle swarm optimization [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16(2): 35 - 39. (乔佩利, 马丽丽, 郑林. 基于改进粒子群算法的车间作业调度问题研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(2): 35 - 39.)