

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.11.005

# 物联网环境下混流生产车间两级动态调度研究\*

汤洪涛,王大国,支文全

(浙江工业大学 机械工程学院,浙江 杭州 310014)

**摘要:**针对不确定的动态事件干扰混流生产车间预先调度实施的问题,对调度信息传递、车间扰动恢复、多目标优化等问题进行了研究。建立了以 RFID 技术为支撑的物联网环境下实时工况驱动的调度-重调两级动态调度机制,在物料消耗速率均衡化、最短化最小生产循环周期的两个预调度模型基础上,构造了混合布谷鸟搜索求解算法;基于扰动事件的特性,采取事件和周期混合驱动的调度策略,通过滚动窗口技术和混合布谷鸟搜索算法对重调度进行了求解,利用仿真平台对调度模型及混合布谷鸟搜索算法进行了测试。研究表明:该物联网环境的构建符合车间实时动态调度需求,能够实现工况信息的及时传递;调度机制能够有效应对各类扰动,满足了混流车间实际调度需要;算法求解速度快,获得的解质量良好。

**关键词:**物联网;动态调度;滚动窗口;布谷鸟算法

中图分类号:TH186;TP301.6;F406.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)11-1166-06

## Two-level dynamic scheduling for hybrid flow shop in IOT environment

TANG Hong-tao, WANG Da-guo, ZHI Wen-quan

(College of Mechanical Engineering Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Aiming at the perturbation problems of hybrid flow shop when uncertain dynamic events happened, the information dissemination, the disruption recovery and the multi objects optimization were researched. A two level scheduling system which activated by real time condition in the IOT environment was established, on that basis, two pre-scheduling models which aiming at keeping the balance of consumption rate of materials and shortening minimum production cycle were built, and then a sort of mixed cuckoo algorithm was designed to solve them. According to the features of perturbations, the strategy was designed to be event-driven and period-driven simultaneously. The window rolling technology and mixed cuckoo algorithm were used to solve the rescheduling problem. Finally, a simulation platform was used to test the models and algorithm. The results indicate that the structure of IOT environment can meet the needs of dynamic scheduling in the hybrid flow shop, it can transfer the working condition information duly. The scheduling mechanism can deal with various disruptions in actual works. The algorithm can find the high-quality solutions quickly.

**Key words:** internet of things (IOT); dynamic scheduling; window rolling; cuckoo algorithm

## 0 引 言

混流车间的生产调度问题是指当不同型号的加工件到达生产线开始加工任务时,在各类诸如紧急插单、机器故障等的动态扰动下,产品的加工序列需要重新调整,以使得调度目标得到持续优化<sup>[1]</sup>。

当前,混流生产调度问题受到了广泛的关注。THOMOPOULO<sup>[2]</sup>通过最小化装配线的等待和超载时

间进行建模,并采用了一种启发式算法对其求解;HYUN 等<sup>[3]</sup>提出的数学模型关注于物料消耗速率均衡化、生产成本最小化,创新设计了以 PS-NC 选择机制为基础的改进遗传算法;MULLEN MC 等<sup>[4]</sup>将物料消耗均衡化及负荷平衡化作为优化目标进行调度,设计了改进的模拟退火算法进行了求解;蒋艳等<sup>[5]</sup>以空闲与超载时间之和值最小化为目标进行调度研究,提出了借鉴小生境技术的改进遗传算法进行求解。

收稿日期:2017-11-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605442);浙江省先进制造技术重点实验室开放基金资助项目(2016KF03)

作者简介:汤洪涛(1976-),男,湖北十堰人,副教授,主要从事生产调度、智能算法方面的研究。E-mail:tanght@zjut.edu.cn

从文献分析可以看出:以往多数研究的重调度背景是传统生产环境,信息化程度低、信息采集缓慢,调度结果存在严重的迟滞性;另外,在求解方面也存在容易陷入局部最优的问题。

在混流生产调度的问题上,本文将建立一种基于射频识别技术(RFID)的物联网制造环境,形成闭环调度系统,提升混流生产系统的鲁棒性。

## 1 基于 RFID 的物联网实时调度平台构建

混流生产的动态调度需要建立及时的信息反馈环境,因此本文提出一个在混流生产车间实现信息共享的物联网基础架构,采用 RFID 即插即用方式实现 Multi-Agent 封装,构建基于 RFID-Bus 的实时信息传递模式并提出相应部署策略,为两级动态调度提供调度数据来源。

### 1.1 Multi-Agent 封装与接入

在混流生产实际环境下,本研究对设备、工具与 RFID 阅读器等数据采集设备进行绑定,将其封装成主动智能对象;对工件、操作者与 RFID 标签绑定,构成被动智能对象,这些智能对象通过部署在车间现场的无线传感网络组成 Multi-Agent 系统,从而实现实时信息之间的交互流转<sup>[6]</sup>。RFID 设备服务提供程序应用接口(DSPI)定义了封装 RFID 设备的驱动程序,设定各设备的访问模式为同一方式,实现 RFID 设备的即插即用。

整体访问接入模型如图 1 所示。

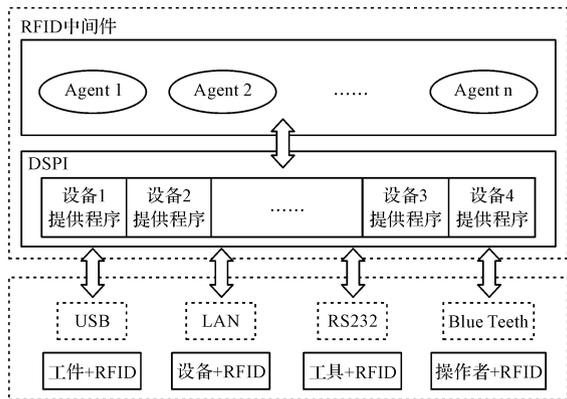


图 1 RFID 访问接入模型

### 1.2 RFID-Bus 实时响应机制

RFID 设备所传递的实时信息采用 RFID-Bus 机制进行响应处理,该机制能够对日志、订阅、动作、消息等数据库进行管理,并且可以通过原语与第三方应用连接,实现信息的响应与处理。

### 1.3 两级 RFID-Bus 物联网环境建立

为实现不同层级的业务需要,本研究在混流生产物联网环境中进行两级 RFID-Bus 的构建。底层一级

为部署在生产现场中的消息集成总线,实现 Agent 系统的信息传递与反馈响应;上层一级为业务集成总线,以 SOA 架构实现 WebService 消息服务,进而对业务实现集成。体系结构如图 2 所示。

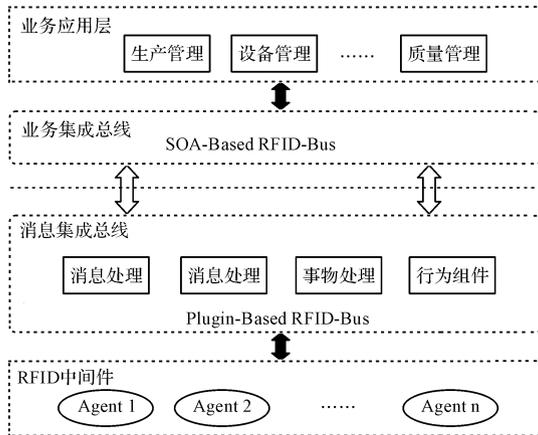


图 2 两级 RFID-Bus 体系结构

### 1.4 物联网架构组件部署

在完成 Multi-Agent 封装、明确响应机制后,本研究将物联网环境下的基础组件在混流生产环境中进行正确部署。其中,RFID 中间件和消息集成总线安置在实际环境中信息采集设备等主动智能体上,这些设备与被动智能体进行交互后将消息传送至消息集成总线进行相应反馈。业务集成总线布局在企业业务服务器上,接收底层消息总线及系统管理程序的消息,同时与 ERP 等系统进行交互。由此,建立的物联网环境即可为实时自适应调度提供反馈。

## 2 混流生产预调度与算法设计

在完成物联网环境构建之后,本研究根据车间生产能力和加工任务即开始进行车间生产的预调度,在扰动发生后可以根据此调度结果进行重调度动态优化。

### 2.1 问题描述

装配线待加工产品序列中有  $M$  种产品,总装线包含  $N$  个工作站,流水线速度  $v$  恒定,各种产品的待加工量为  $D_i (i = 1, 2, \dots, M)$ ,产品  $i$  在第  $n$  道工序的加工时间为  $t_{in}$ 。设生产循环次数为  $r$ ,则在一个最小生产单元内,每种产品的装配量  $d_i = D_i/r$ ,对其进行排序, $r$ 次循环之后,即能够实现排产期的生产调度。

### 2.2 预调度模型建立

混流生产车间的调度是一个复杂优化问题,因此,混流生产的预调度建模即考虑以物料消耗速率均衡化、最短化最小生产周期作为双重优化目标。

在最小生产循环周期中,物料消耗速率均衡化的目标为:

$$f_1 = \sum_{R=1}^d \sum_{j=1}^L \left( R \cdot \frac{\sum_{i=1}^M d_i \cdot K_{ij}}{\sum_{i=1}^M d_i} - \sum_{i=1}^M X_{Ri} \cdot K_{ij} \right)^2 \quad (1)$$

式中： $d_i$ — $M$ 种型号产品对应的需求量； $K_{ij}$ —型号  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ) 需要零件  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, L$ ) 的数量； $X_{Ri}$ —前  $R$  个产品中， $M$  种产品型号的数量。

设第  $R$  个产品在工位  $n$  的开始作业时间为  $S_{Rn}$ ，作业持续时间为  $T_{Rn}$ ，则其完成时间为  $E_{Rn} = S_{Rn} + T_{Rn}$ 。假设最小生产循环周期为  $E_{dN}$ ，则最短化最小生产循环周期的目标为：

$$f_2 = \min(E_{dN}) \quad (2)$$

具体约束如下：

在投产顺序中每个位置有且只能有一个产品， $X_{Ri}$  表示前  $R$  个位置， $i$  种产品的型号数量为：

$$\sum_{i=1}^M (X_{Ri} - X_{(R-1)i}) = 1 \quad (3)$$

每种型号的产品在调度序列中出现的次数正好等于该产品的需求产量， $X_{di}$  表示一个最小循环生产周期中， $i$  种产品型号的数量为：

$$X_{di} = d_i \quad (4)$$

在加工过程中，一个工位在同一时间能且只能加工唯一一种产品， $P_{Rn}$  为 0-1 变量，如果工位  $n$  上的产品为第  $R$  个产品，则  $P_{Rn} = 1$ ，否则为 0，即：

$$0 \leq \sum_{R=1}^d P_{Rn} \leq 1 \quad (5)$$

后一个产品只能等待该工位加工完成，才能在该工位进行加工，即：

$$S_{Rn} - E_{(R-1)n} \geq 0 \quad (6)$$

在加工过程中，同一个产品只能在上道工序生产完之后，才能送去下道工序加工，即：

$$S_{Rn} - E_{R(n-1)} \geq 0 \quad (7)$$

### 2.3 预调度求解算法设计

布谷鸟算法是由 YANG 等<sup>[7]</sup> 提出的，其在路径规划、生产调度等方面有着成熟的应用<sup>[8-11]</sup>。后来，国外 SRIVASTAVA P R 等<sup>[12-14]</sup> 对 CS 算法进行了改进，国内王李进等<sup>[15-17]</sup> 也对 CS 算法进行了研究。但原始 CS 比较适合连续型优化问题的求解，对离散性、有约束的多目标问题还需进一步研究。本文将小生境技术融入 CS 算法，将种群划分成若干块，之后依据适应度函数值挑选出每块中适应度值最佳的个体组成一个精英群体，以此来求解多目标的优化问题。算法具体设计如下：

(1) 初始化。设定解的维数  $M$ ，宿主个数  $N$ ，被宿主发现的概率  $P_a$ ，最大迭代次数为  $K$ ，搜索上界为  $ub$ ，

下界  $lb$ ，其中初始档案为空集 ( $Archive = []$ )，小生境半径为  $\sigma_s$ ，最大容量为  $ArchiveMax$ ，初始迭代次数  $t = 0$ ，并随机生成  $M * N$  的初始鸟巢位置矩阵  $y0^{(t)}$ ；

(2) 编码与解码。采用基于位置的编码方式，设定每个鸟巢都是一个  $n$  维向量，代表工序的排列；

(3) 若  $t > k$ ，则停止计算，输出  $Archive$ ，否则转 (4)；

(4) 位置更新。根据 Levy 飞行原理，将鸟巢的位置更新，新的鸟巢矩阵为  $y1^{(t)}$ ：

$$y1_i^{(t)} = y0_i^{(t)} + a \oplus L(\lambda) \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

(5) 适应度的择优。找出鸟巢的最优位置，计算鸟巢的矩阵  $y'$  的适应度值，根据适应度值进行排序，将前  $N$  个对应解作为新矩阵  $y2^{(t)}$ ；

(6) 随机淘汰。设定随机数  $w_i$ ，根据被宿主发现概率  $P_a$  来淘汰  $y2^{(t)}$  中的解，可以得到新矩阵  $y3^{(t)}$ ：

$$y3_i^{(t)} = \begin{cases} y2_i^{(t)}, & \text{if } w_i < P_a \\ lb + (ub - lb) \times rand(m, 1), & \text{else} \end{cases}$$

(7) 适应度的择优。重复 (4) 计算  $y2^{(t)}$  与  $y3^{(t)}$  组成的矩阵的适应度，择优组成新的矩阵  $y4^{(t)}$ ；

(8) 档案的更新以及预处理。将  $y4^{(t)}$  放入档案  $Archive$  中，则  $Archive = [Archive, y4^{(t)}]$ ，按照 Pareto 支配关系，剔除被支配解，并保留非支配解；

(9) 档案缩减。当档案中解的个数大于  $ArchiveMax$  时，则通过小生境技术进行档案缩减，档案中解的个数刚好在档案的限制范围内时，则得到新的档案集并返回到 (2) 中继续搜索，直至满足终止条件。

## 3 混流车间重调度研究

### 3.1 重调度策略

重调度对原有生产计划进行更新，因此也会对原有计划完成时间产生影响，在重调度实施中既要注重调度的有效性，同时也要避免调整的偏差性过大造成完工时间剧烈波动。本文选用以工件数量进行衡量的滚动窗口技术，同时基于事件驱动与周期混合的再调度策略在扰动发生后进行动态调度，先把调度过程分解成连续的静态调度区间，然后进行每个区间的调度优化。

滚动重调度窗口如图 3 所示。

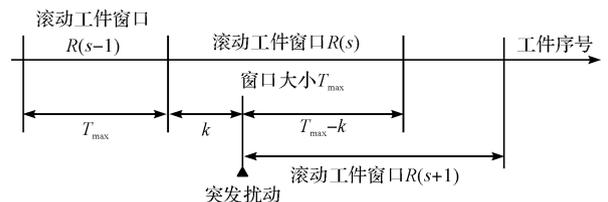


图 3 基于工件的滚动重调度窗口

### 3.2 重调度实施流程

针对机器故障、紧急插单以及物料延迟到达这 3 类问题,本研究采用完成时间的变动来评估扰动事件对预调度系统产生的影响,设定同一时间只考虑一种扰动情况,设  $t$  时刻发生扰动事件  $Z$ ,则预调度方案中的完工时间变为  $f'_2$ ,表达式为:

$$f'_2 = \begin{cases} f_2 + t_{kv} & U \text{ 为机器故障} \\ f_2 + \Delta t_{\text{insert}} & U \text{ 为插单} \\ f_2 + \Delta t_{\text{delay}} & U \text{ 为物料延迟} \end{cases} \quad (8)$$

当扰动事件发生时,本研究将还未进行调度处理的完工时间与预调度方案中完工时间的偏离度  $\theta$  代表评估扰动事件影响的指标,其计算式为:

$$\theta = \frac{|f'_2 - f_2|}{f_2} \quad (9)$$

因此,本研究设定一个效能偏差值  $\rho$ ,若  $\theta \leq \rho$ ,则不需要进行重调度,只需要利用车间内部的调整来消除扰动事件的影响。通过  $\rho$  可以消除影响较小的扰动事件,减少系统的负担,从而保持整个调度系统的稳定性。

### 3.3 重调度算法设计

重调度算法同样是基于布谷鸟算法进行改进设计,与预调度算法相较之下,重调度算法需要依据扰动事件的具体情况构建。设定扰动发生时刻为  $t$ ,则重调度从  $t$  时刻开始。对于正在加工的工件,其下一道工序的开始时间是这个工件在该工序的加工完成时间与上一个工件在下道工序的完工时间的最大值。对于未加工的工件,其第一道工序的开始时间是  $t$  时刻与

前一个工件在第一道工序加工的完成时间的最大值。算法流程如图 4 所示。

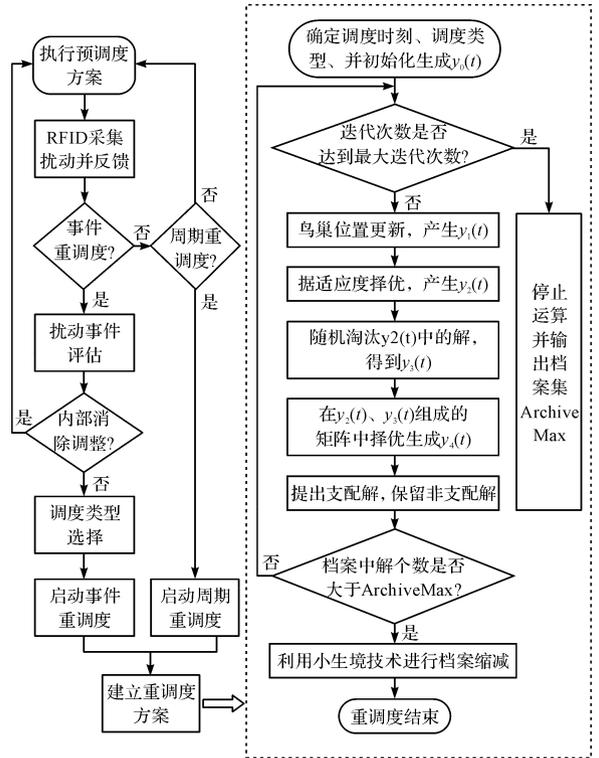


图 4 重调度算法流程

## 4 实例仿真

本研究选取某公司 5 种产量较大且工艺近似的产品(A、B、C、D、E)为调度仿真对象,对预调度、重调度的模型及算法进行验证。5 种产品的工序及工艺时间如表 1 所示。

表 1 产品工艺及时间

序号	工序	加工时间 /s				
		产品 A	产品 B	产品 C	产品 D	产品 E
1	清泡	24	22	26	24	23
2	装底座	26	25	22	25	0
3	装压机地板	23	25	26	22	25
4	装压缩机	32	26	24	26	27
5	装压缩机附件	24	27	23	24	25
6	装冷冻蒸发器	27	29	26	27	29
7	洛克环插管	25	24	27	25	0
8	接灯线	28	27	25	24	27
9	装温控器	26	24	23	24	23
10	装冷冻门	31	28	27	24	28
11	装中门	35	0	0	32	31
12	装冷藏门	33	26	23	26	29
13	装果蔬盒	25	29	28	31	28
14	装玻璃搁架	31	32	28	32	33
15	冷媒灌注	21	23	24	22	25
16	装印刷件	0	0	20	24	23
17	套管	25	24	24	28	25
18	贴铭牌	20	22	23	24	24
19	封门	22	28	23	24	24
20	套箱打包	25	26	26	29	25

同时,以上 5 种产品的月订单量已知,如表 2 所示。

表 2 各产品月订单量

产品型号	订单量	交货期	最小比率
A	5 000	22	5
B	4 000	23	4
C	4 000	22	4
D	3 000	23	3
E	2 000	22	2

### 4.1 预调度仿真

本研究选用 Matlab 作为程序开发平台,采用混合布谷鸟搜索算法对预调度模型进行求解,参数取值解的维数  $M = 10$ , 宿主个数  $N = 30$ , 被宿主发现概率  $P_a = 0.25$ , 步长因子  $a = 0.5$ , 迭代次数  $K = 100$ , 小生境半径为  $\sigma_s = 0.05$ , 最大容量为  $ArchiveMax = 100$ 。同时为了充分验证本文所提算法具备良好的搜索、收敛性能,选取遗传算法、蚁群算法算法在该算例下同步运行。其中:遗传算法的种群规模  $P = 100$ , 交叉概率  $P_c = 0.8$ , 变异概率  $P_m = 0.1$ , 终止代数数为 200; 蚁群算法中, 启发因子  $\alpha = 2$ , 期望启发式因子  $\beta = 2$ , 信息素挥发因子  $\rho = 0.15$ , 蚂蚁数量  $m = 100$ , 信息总量  $Q = 20$ , 迭代次数  $NC = 200$ 。3 种算法求得的 Pareto 解集如图 5 所示。

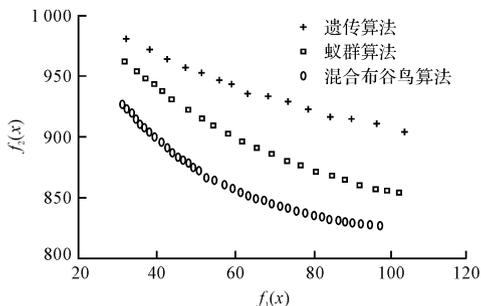


图 5 3 种算法的 Pareto 前沿求解结果

以上 3 个算法中,混合布谷鸟算法完成求解的时间为 6.49 s,蚁群算法为 9.23 s,遗传算法为 10.14 s。同时由图 5 可以看出:混合布谷鸟算法产生的解数量更多,分布较为均匀,并且能较好地靠近 Pareto 前沿。

在混合布谷鸟算法运算结果下经层次分析选出 Pareto 最优解为:  $f_1 = 51.8, f_2 = 873$ 。预调度的甘特图如图 6 所示。

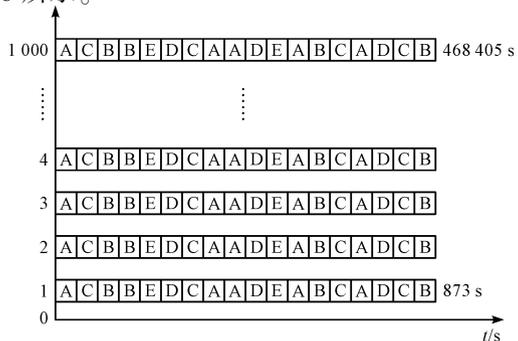


图 6 预调度甘特图

预调度第一个循环周期装配时间为 873 s,总时间为 468 405 s,而车间自主调度结果中第一个循环周期装配时间为 1 021 s,总时间为 504 517 s,可以证实预调度结果是有效可行的。

### 4.2 重调度仿真

本研究分别对插单、物料延迟到达、机器故障这 3 类扰动实施重调度仿真。重调度策略参数取值为  $p_k = 1, 1 - a = 0.05, \beta = 0.1, \rho = 0.001$ 。

(1) 插单。在  $t = 11 752$  s 时刻,接到紧急订单 F,其订单数量为 1 000,交货期为 5 d,产品在各个工序的加工时 (24, 27, 25, 31, 22, 28, 26, 25, 29, 32, 34, 31, 26, 30, 19, 0, 24, 21, 23, 27), 故一个生产循环周期生产内 A : B : C : D : E : F = 5 : 4 : 4 : 3 : 2 : 5, 循环周期数为 200,  $\theta = 0.06$ , 采用局部重调度策略,自第 25 个循环周期开始,利用混合布谷鸟搜索算法进行局部重调度,重调度后的总加工时间为 495 405 s;

(2) 机器故障。在  $t = 8 750$  s 时刻,生产设备出现故障,导致 A 生产停滞,设备修复时间为 1 500 s,则  $\theta = 0.003$ ,故采用右移重调度,重调度后的总加工时间为 468 312 s;

(3) 物料延迟。在  $t = 214 760$  s,产品 B 的物料发生延迟,延迟时间为  $t = 61 000$  s,则  $\theta = 0.13$ ,采取完全重调度策略,在第 442 个循环周期中,利用混合布谷鸟搜索算法进行重调度,重调度后的总加工时间为 478 612 s。

将各扰动事件的重调度结果与预调度方案进行比较,结果如表 3 所示。

表 3 重调度结果与预调度方案进行比较

扰动时间	有效性指标	稳定性指标
	最小生产循环周期/s	工序偏离/s
预调度方案	468 405	0
插单	495 405	65 312
机器故障	468 312	2164
物料延迟	478 612	132 050

由表 3 可知:除了物料延迟对预调度方案产生较大影响外,其余扰动的重调度方案结果与预调度差别不大且有效性良好,证明重调度的实施较好地解决了扰动对混流生产的影响。

## 5 结束语

本文以混流生产车间为研究对象,构建了以 Multi-Agent 系统、RFID-Bus 机制为基础的物联网制造环境,建立了以物料消耗速率均衡化、最小生产循环周期最短化为目标的预调度模型,并为其设计了混合布

谷鸟搜索算法,根据发生的扰动情况,重新构建了混合布谷鸟求解算法。

仿真实例验证了调度模型、策略以及混合布谷鸟搜索算法的有效性。

### 参考文献 (References):

- [1] 赵伟,韩文秀,罗永泰. 准时生产方式下混流装配线的调度问题[J]. 管理科学学报,2000,3(4):23-28.
- [2] THOMOPOULOS N T. Line balancing-sequencing for mixed-model assembly [J]. **Management Science**, 1967,14(9):59-75.
- [3] HYUN J C, KIM Y, KEUN K Y. A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines [J]. **Computers & Operations Research**, 1998,25(7-8):675-690.
- [4] MCMULLEN P R, FRAZIER G V. A simulated annealing approach to mixed-model sequencing with multiple objectives on a JIT line [J]. **TIE Transactions**, 2000,32(8):679-686.
- [5] 蒋艳,黎向锋,左敦稳. 基于改进遗传算法的混流装配线的优化设计[J]. 中国机械工程,2010(19):2322-2328.
- [6] 臧传真,范玉顺. 基于智能物件的制造企业信息系统研究[J]. 计算机集成制造系统,2007,13(1):49-56.
- [7] YANG X S, DEB S. Cuckoo search via lévy flights [C]. World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, NaBic: IEEE, 2009.
- [8] FISTER I, YANG X S, FISTER D, et al. Cuckoo search: a brief literature review [M]. London: Springer International Publishing, 2014.
- [9] YANG X S, DEB S. Cuckoo search: recent advances and applications [J]. **Neural Computing & Applications**, 2014,24(1):169-174.
- [10] GHERBOUDJ A, LAYEB A, CHIKHI S. Solving 0-1 knapsack problems by a discrete binary version of cuckoo search algorithm [J]. **International Journal of Bio-Inspired Computation**, 2012,4(4):229-236
- [11] OUAARAB A, AHIOD B, YANG X S. Discrete cuckoo search algorithm for the travelling salesman problem [J]. **Neural Computing & Applications**, 2014, 24(7-8):1659-1669.
- [12] SRIVASTAVA P R, KHANDELWAL R, KHANDELWAL S, et al. Automated test data generation using cuckoo search and tabu search (CSTS) algorithm [J]. **Journal of Intelligent Systems**, 2012,21(2):195-224.
- [13] LAYEB A, LAHOUESNA N, KIRECHE B. A multi-objective binary cuckoo search for bicriteria knapsack problem [J]. **International Journal of Information Engineering & Electronic Business**, 2013,5(4):8-15.
- [14] YANG X S, DEB S. Multi-objective cuckoo search for design optimization [J]. **Computers & Operations Research**, 2013,40(6):1616-1624.
- [15] 王李进,尹义龙,钟一文. 逐维改进的布谷鸟搜索算法[J]. 软件学报,2013,24(11):2687-2698.
- [16] 胡欣欣,尹义龙. 求解函数优化问题的合作协同进化布谷鸟搜索算法[J]. 模式识别与人工智能,2013,26(11):1041-1049.
- [17] 张永韡,汪镭,吴启迪. 动态适应布谷鸟搜索算法[J]. 控制与决策,2014,29(4):617-622.

[编辑:周昱晨]

### 本文引用格式:

汤洪涛,王大国,支文全. 物联网环境下混流生产车间两级动态调度研究[J]. 机电工程,2018,35(11):1166-1171.

TANG Hong-tao, WANG Da-guo, ZHI Wen-quan. Two-level dynamic scheduling for hybrid flow shop in IOT environment [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018,35(11):1166-1171.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>