

文章编号:1000-582X(2011)10-008-07

基于反馈控制的车用空调装配车间动态调度方法

尹 超,李 涛,刘 飞,尹 胜

(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

摘 要:为了有效解决不确定性环境下车用空调装配车间动态调度问题,通过分析固有不确定性、离散不确定性、外部环境不确定性等影响因素,制订了基于双反馈控制的信息反馈机制,在此基础上提出了一种车用空调装配车间动态调度方法,并综合考虑可重入约束、设备能力约束、时间离散化约束等,建立了以提前或延期惩罚、完工时间、加工成本和质量损失为优化目标的车用空调装配车间多目标调度模型。针对模型特点设计了分段染色体编码方式、交叉算子和变异算子,防止遗传操作过程中非法解的产生,提高了求解效率。最后以实际应用案例验证了方法的有效性与实用性。

关键词:车用空调;装配车间;反馈控制;调度;遗传算法

中图分类号:TH166

文献标志码:A

Dynamic scheduling method of vehicle air-conditioning assembly shop based on feedback control

YIN Chao, LI Tao, LIU Fei, YIN Sheng

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: By analyzing the inherent uncertainties, discrete uncertainties and external environmental uncertainties, a dual-feedback control strategy and the dynamic scheduling method are proposed to solve the dynamic scheduling problem of vehicle air-conditioning assembly shop under uncertainty. Considering the reentrant constraint, equipment capacity constraint, and time discrete constraint etc., the multi-objective scheduling model of vehicle air-conditioning assembly shop is set up, taken the earliness/tardiness, process time, production cost and quality loss as optimization objectives. According to the characteristic of the model, sectional chromosome encoding, crossover operator and mutation operator are designed to prevent the generation of illegal solutions and improve efficiency of the algorithm. An example is given to prove the feasibility and validity of the approach.

Key words: vehicle air-conditioning; assembly shop; feedback control; scheduling; genetic algorithms

车用空调制造企业是一种典型的汽车零部件制造企业,其客户(汽车主机厂)多采用准时制生产模式(just in time, JIT),要求配套企业能准时、保质、保量供货,否则将受到严厉的惩罚。车用空调装配

过程中由于存在固有不确定性、离散不确定性、外部环境不确定性等多种影响因素,使得装配计划的控制和执行困难。大多数企业不得不通过设置较大库存量的方式来满足 JIT 供货要求,然而一旦预测不

收稿日期:2011-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50775228);国家 863/CIMS 课题资助项目(2007AA040701)

作者简介:尹超(1974-),男,重庆大学教授,主要从事制造系统工程和网络化制造方向研究,(Tel)023-65112255;
(E-mail)yeh@cqmi.cn。

准或订单取消,企业将蒙受重大损失。

为了解决此类不确定性环境下的柔性装配车间动态优化调度问题,国内外学者做了大量的研究工作。如文献[1]通过分析设备故障和新订单插入时的车间动态调度特性,提出了基于动态扰动的车间动态调度框架,并设计了启发式方法求解,但仅从数学方法的角度证明其可行性,而实用性还有待验证;文献[2]提出了基于事件驱动的自适应动态调度方法,文献[3]提出了基于资源约束理论的完全重构(complete regeneration, CP)和部分重调度(partial rescheduling, PR)两种动态调度方法,文献[4]结合蚁群算法和 Agent 技术建立了基于多代理协商的动态调度方法,但均未针对事件类型制定相应的反馈机制和调度策略。笔者借鉴以上研究成果,从分析车用空调装配过程中各种不确定性影响因素出发,提出一种基于反馈控制的车用空调装配车间动态调度方法。

1 车用空调装配车间动态调度方法

1.1 车用空调装配过程的不确定性影响因素

车用空调装配过程中,存在着以下影响装配计划和调度方案正常执行的不确定性:

1)固有不确定性。由车用空调结构特征、性能特征、装配工艺等固有因素导致的不确定性。如:由于车用空调产品装配工艺复杂,整机测试后不合格品返工返修现象时有发生,一定程度上影响了正常任务的执行;

2)离散不确定性。主要指随机发生的影响车用空调装配过程正常进行的各种异常事件,包括:生产线设备故障、严重质量事故等,往往会导致车用空调装配过程暂停或终止;

3)外部环境不确定性。受市场、客户、供应商等外部环境影响产生的不确定性,包括:合同变更、紧急插单、与原材料短缺等。此类不确定性通常需要对计划做较大调整。

以上不确定性的存在,使得车用空调生产过程中产品产出与计划投入之间的比率存在较大波动。因此,应及时反馈各种不确定性因素并动态调整装配计划,从而保证实际产出与计划的一致性。

1.2 基于双反馈控制的信息反馈机制

车用空调装配过程中的不确定性影响因素可归纳为两类,一类导致实际投入量比计划投入量增加,另一类导致实际投入量比计划投入量减少。因此,采用双反馈即正反馈和负反馈两种控制方式,通过

动态反馈各种影响装配正常执行的不确定性信息,及时调整实际投入量并修正装配计划,从而实现车用空调装配过程的动态调度。图 1 所示为基于双反馈控制的车用空调装配车间动态调度策略。

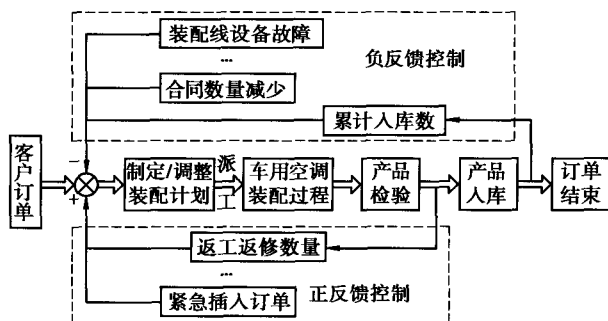


图 1 基于反馈控制的车用空调装配车间动态调度策略

1.2.1 正反馈控制

正反馈控制的信息主要包括:不合格品返工返修、紧急订单插入等。当产品检验不合格需要返工返修时,应通过正反馈及时增加原材料投入量以补充产品在后续工序的损失;当有紧急订单插入时,同样需要将新增产品和数量以正反馈的方式增加计划投入量,并针对新插入订单的优先级重新对原装配计划做出调整。

1.2.2 负反馈控制

负反馈控制的信息包括:产品累计入库、合同取消或减少、设备能力下降等。当车用空调产品检验合格入库时产生负反馈,通过负反馈减少剩余零部件的投入数量,以保证原材料投入量、产品累积入库数与在制品数之和等于计划生产数;当客户取消合同或减少合同数量时,需要及时将取消或减少的产品从计划生产数当中减去,防止或减少生产过量导致的损失;当发生装配线设备故障等导致生产能力下降的异常事件时,需要将能力损失从现有能力参数中减去,避免由于生产能力不足导致的在制品积压。

1.3 车用空调装配车间动态调度方法

基于以上调度策略,提出了基于 MES 的车用空调装配车间动态调度方法。其运行流程如图 2 所示。

1.3.1 设置信息反馈点

在各条车用空调装配线的头部、尾部以及检测工位等处设置多功能交互式信息终端作为信息反馈点^[5],用于采集完工入库信息、返工返修信息以及生产线设备故障、原材料短缺等信息。对于订单变更信息由主机厂直接通过 Internet 网传送。

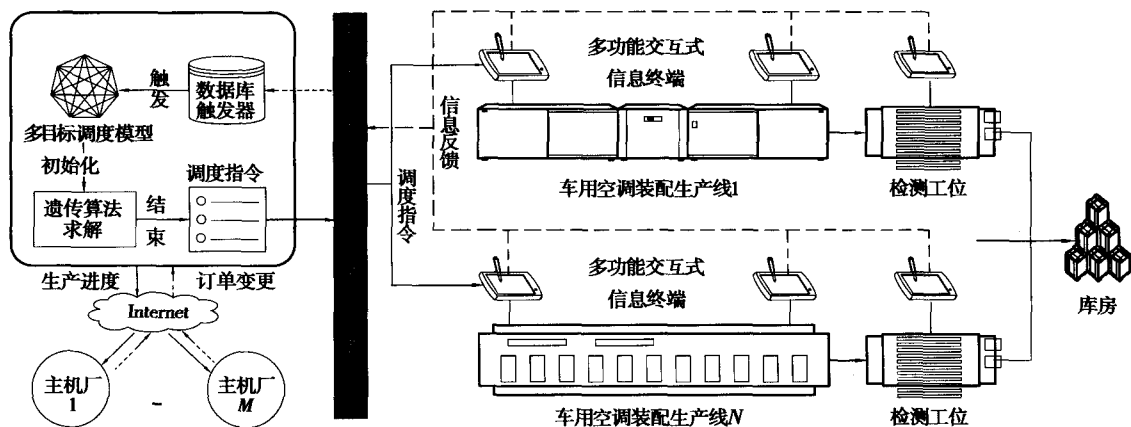


图2 车用空调装配车间生产作业管理系统业务集成运行流程

1.3.2 采集不确定信息

当不确定性事件发生时,装配线操作工人通过多功能交互式信息终端访问MES系统数据采集界面及时采集相关信息,并通过车间局域网传送到MES系统车间调度模块。同时MES系统通过网络、移动通信接口等多种方式将信息发送到管理人员的电脑或手机上。

1.3.3 动态调度

运用数据库技术提供的实时触发机制,当反馈点中任何一个点发生变化时,系统被触发并进行数值运算。首先对模型输入量和约束条件进行初始化,然后调用系统预置的遗传算法函数求解调度结果,并将调度结果转换为调度指令直接由MES系统通过多功能交互式信息终端下达到车用空调装配线。

1.4 重调度策略的性能优化

以上反馈控制过程采用的是基于事件驱动的重调度策略,调度实时性强,但在实际运行中可能会因扰动事件的频繁发生导致过度繁重的计算需求,从而影响调度系统的稳定性。为此,笔者将车用空调装配过程中各种动态扰动分为显性扰动和隐形扰动,并制定了相应的重调度策略,以此提高调度系统的稳定性。

显性扰动是指事件的发生会明显影响生产进度,并对生产系统的正常运行起到决定性作用,如设备故障,订单变更等。而隐形扰动是指发生时往往不会明显影响生产进度,但经过一段时间的累加后,同样会影响生产的正常运行,如装配工序时间误差累积,已完工工件数量累积等。对于显性扰动采用主动触发式重调度策略,当扰动发生时即时启动重调度。例如,当设备发生故障时,启动重调度并在当前可用设备中去除该故障设备,然后对当前调度方案进行重调度;对于隐形扰动采用被动触发式重调

度策略,通过预先设定的临界值触发重调度,而并非由单独一次隐性扰动触发重调度。例如,当工件实际完工时间与计划发生偏差时,不立即启动重调度,而是偏差逐渐累积达到临界值时再启动。这种重调度驱动规则与实时工况的耦合能力强,有效减少了事件驱动调度的频繁性,提高了动态调度系统的稳定性和实用性。

2 车用空调装配车间动态调度模型

车用空调装配车间调度问题可描述为: m 种产品 $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ 在 n 条装配线 $\{M_1, M_2, \dots, M_n\}$ 上装配,每种产品只能在部分可选的装配线上进行装配。调度目标是为每种产品选择最合适的装配线,确定各条装配线最佳的产品装配顺序以及装配时间,使得完成整个装配过程的提前或延期惩罚、完工时间、装配成本和质量损失等性能指标达到总体最优。

2.1 调度模型目标函数

2.1.1 提前或延期惩罚

车用空调企业均面临准时制(JIT)配送要求,产品必须在规定时间内送达客户。提前完成的产品必须保存到交货期,而延期产品必须交付违约金。因此本文将提前或者拖后惩罚作为调度优化目标之一,建立了以下惩罚函数

$$C_f = \begin{cases} \sum_{i=1}^m (T_i - b_i) \cdot F_i \cdot P_i, & b_i < T_i; \\ 0, & a_i \leq T_i \leq b_i; \\ \sum_{i=1}^m (a_i - T_i) \cdot S_i \cdot P_i, & T_i < a_i. \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_f 为提前或延期惩罚; S_i 为单位时间单位 i 产品的库存成本; F_i 为客户对延迟交货的 i 产品单位时间的惩罚金额; P_i 为客户需要的 i 产品的数量; $[a_i, b_i]$ 为客户规定的 i 产品交货时间区间; T_i 为 i

产品完工时间,即*i*产品在各装配线上加工的最晚完工时间

$$T_i = \max_{j=1}^n [Tb_{ij} + t_{ij} \cdot p_{ij} + Th_{ij} + Tr_{ij}], \quad (2)$$

式中: Tb_{ij} 为*i*产品在*j*装配线的开始加工时间; t_{ij} 为*i*产品在*j*装配线的单位装配时间; p_{ij} 为*i*产品在*j*装配线的装配数量; Th_{ij} 为*i*产品在*j*线装配的换线时间; Tr_{ij} 为*i*产品在*j*线装配时的故障时间。

2.1.2 完工时间

完工时间是完成所有装配任务所需的时间,能反映整个装配车间任务的执行速度和设备能力的平衡状况,因此将其作为调度优化目标之一,其计算公式如下

$$T_c = \max_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (t_{ij} \cdot p_{ij} + Th_{ij} + Tr_{ij}). \quad (3)$$

式中: T_c 为完工时间; $\sum_{i=1}^m (t_{ij} \cdot p_{ij} + Th_{ij} + Tr_{ij})$ 表示装配线*j*完成所有装配任务的完工时间。

2.1.3 加工成本和质量损失

在订单确定的情况下,生产变动成本主要包括加工成本和质量损失,因此本文将加工成本和质量损失作为调度优化目标之一,其计算公式如下

$$C_b = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [C_{ij} \cdot p_{ij} + (1 - Q_{ij}) \cdot p_{ij} \cdot Cs_i]. \quad (4)$$

式中: C_b 为装配成本; C_{ij} 为*i*产品在*j*装配线装配的单位成本; Q_{ij} 为*i*产品在*j*装配线装配的产品合格率; Cs_i 为单位*i*产品不合格而损失的成本。

2.1.4 总目标函数

在实际中,由于各企业对产品交货期、完工时间、加工成本和质量损失等方面要求的侧重点不同,调度过程中对各优化目标的重视程度往往也不尽相同,因此应当为各优化目标分配权重。采用经典加权法和算法建立如下总目标函数

$$\min F = w_f \cdot C_f + w_c \cdot T_c + w_b \cdot C_b. \quad (5)$$

式中, w_f 、 w_c 、 w_b 分别代表提前或延期惩罚、完工时间、加工成本和质量损失等目标变量的权重系数,且 $w_f + w_c + w_b = 1$ 。

2.2 调度模型约束条件

为了保证调度模型的可行性,通过分析车用空调装配过程的特点制定了以下约束条件。

2.2.1 可重入约束

所谓可重入,是指不同种车用空调产品可以在同一条装配线上加工,即同一条装配线可以执行多个产品装配任务,调度方案可行的必要条件是在同一装配线上装配的多个产品在可用时间分配上不能

出现重叠。因此建立如下约束条件

$$(Tb_{xj}, Tb_{xj} + t_{xj} \cdot p_{xj}) \cap (Tb_{yj}, Tb_{yj} + t_{yj} \cdot p_{yj}) = \emptyset, \quad \forall j \in n \text{ 且 } x \neq y. \quad (6)$$

2.2.2 设备能力约束

设备能力约束是指分配到某装配线的总任务量不能超过该装配线的额定加工能力 $T_{\text{额}}$,即

$$\sum_{i=1}^m (t_{ij} \cdot p_{ij} + Th_{ij} + Tr_{ij}) \leq T_{\text{额}}, \quad \forall j \in n. \quad (7)$$

2.2.3 最小批量约束

为保证产品换线时有一定的生产准备和备料反应时间,应设定最小调度批量 L_{\min}

$$L_{\min} \leq p_{ij}, \quad \forall j \in n. \quad (8)$$

2.2.4 可用时间离散化约束

可用时间离散化的含义是:在实际生产中,每条装配线不能始终连续可用,例如不同生产班次、生产停线休息等,这使得各装配线在规划时域上呈离散化分布。因此当该时间段所剩余的时间不足以完成产品装配时,产品必须在下一可用时间段内进行装配。

2.2.5 平衡条件

平衡条件是指任意产品在所有装配线的加工数量应等于客户对该产品的需求数量

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} Q_{ij} = P_i, \quad \forall i \in m. \quad (9)$$

3 基于遗传算法的模型求解

鉴于遗传算法求解多目标调度模型时具有鲁棒性好、通用性强、计算性能优良,且具有隐含并行性和全局搜索能力等特点^[9],采用遗传算法对车用空调装配车间动态调度模型进行求解。

3.1 染色体编码和解码

编码和解码是指调度方案和染色体之间的相互转换,编码质量的好坏会直接影响求解效率。本文将调度方案编码分为2部分,一部分是为产品选择装配线的装配线基因段,另一部分是为装配线产品加工排序的排序基因段,融合两部分基因的一条染色体就是车用空调装配车间调度问题的一个可行解,具体步骤如下。

1) 确定染色体长度。两段染色体的长度均为产品种类和总数量的乘积。为提高运算效率,将产品数量分为若干个相等的标准批量,从而缩短染色体长度

$$L = m \cdot \sum_{i=1}^m \zeta_i. \quad (10)$$

式中, ζ_i 为产品*i*的批次数,可表示为

$$\zeta_i = \left\lceil \frac{\sum_{j=1}^n p_{ij}}{Po_i} \right\rceil. \quad (11)$$

式中 Po_i 为产品 i 的标准批量。

2) 装配线基因段。依次为每种产品的每个标准批量选择装配线, 形成长度为 L 的可选装配线集合 $\{S_1, S_2, \dots, S_L\}$, 其中第 x 批产品的可选装配线集合用 S_x 表示, S_x 中可选装配线个数为 r_x , 表示为 $\{M_{x1}, M_{x2}, M_{x3}, \dots, M_{xrx}\}$, 于是便得到装配线基因段, 如图3所示。

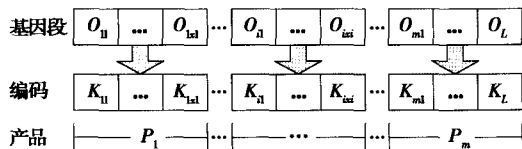


图3 装配线基因段编码示意图

图中, O_{ixi} 表示第 i 个产品的第 x_i 批次, 对应的编码数值 K_{ixi} 表示可选装配线集合中的第 K_{ixi} 条装配线。

3) 排序基因段。排序基因长度也为 L , 依次对应一串产品品种的序号, 其中每种产品的出现次数为此产品的批次数。从左到右扫描染色体, 对于第 y 次出现的某产品序号, 表示该产品的第 y 个批次。而染色体次序便是产品装配顺序。例如: 1-3-2-3-1-3 表示转配顺序为 $O_{11}-O_{31}-O_{21}-O_{32}-O_{12}-O_{33}$ 。

解码时先根据装配线基因段确定每批产品选择的装配线, 然后依据排序基因段确定每条装配线上的产品装配顺序, 即转换为1个有序的装配表, 根据此表将所有产品批次安排在适当的位置便产生可行调度方案。

3.2 种群初始化

设置种群规模 S , 根据编码规则采用不重复随机函数 $\text{Cell}(s) = [\text{Fix}_{(1)}(\text{rand}()), \dots, \text{Fix}_{(S)}(\text{rand}())]$ 生成初始种群, 将进化代数 D_0 设置为1。

3.3 选择操作

选择操作是根据个体适应度值的高低选择将适应度值高的个体遗传到下一代种群中, 淘汰适应度低的个体。通过对目标函数进行归一化处理, 得到如下适应度函数

$$f = w_f \frac{C_{f\max} - C_f}{C_{f\max} - C_{f\min}} + w_c \frac{T_{c\max} - T_c}{T_{c\max} - T_{c\min}} + w_b \frac{C_{b\max} - C_b}{C_{b\max} - C_{b\min}} \quad (12)$$

式中, $(C_{f\max}, T_{c\max}, C_{b\max})$ 、 $(C_{f\min}, T_{c\min}, C_{b\min})$ 分别为每代群体中 (C_f, T_c, C_b) 的最大和最小值。

采用轮盘赌法计算个体选择概率, 第 k 个个体的选择概率 P_s 为

$$P_s(k) = f_k / \sum_{z=1}^s f_z \quad (13)$$

3.4 交叉操作

交叉操作是保留父代个体中的优良信息, 产生新的基因组合。染色体中的两部分基因段采用同一交叉概率两种交叉策略分别进行。

装配线基因段采用两点交叉法, 即随机选择两个交叉点, 然后将位于交叉点之间的2个父代基因互换, 得到2个交叉后代。

排序基因段采用 POX 交叉法^[10], 操作过程为: 将 m 种产品随机分成两个集合 $J1$ 和 $J2$, 染色体子代1/子代2 继承父代1/父代2 中集合 $J1$ 内产品所对应的基因, 子代1/子代2 其余的基因位则分别由父代2/父代1 删除已经继承的基因后所剩的基因按顺序填充, 交叉操作过程如图4所示。

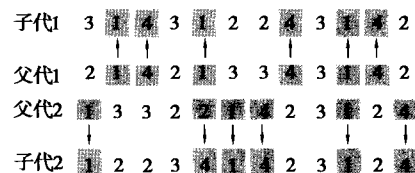


图4 排序基因段交叉操作过程示意图

3.5 变异操作

变异操作主要是为了维持群体的多样性, 防止早熟现象, 同时改善算法的局部搜索性能。针对车用空调调度问题的特点, 采用不同策略完成装配线基因段和排序基因段的变异操作。

装配线基因段变异时, 在基因串中随机选择一个位置, 在其对应的可用装配线集合中随机选择一个与它不相等的整数替换当前的基因。

排序基因段采用互换变异, 即从基因段中随机选择两个位置的基因, 然后将它们进行位置的互换, 保证变异后的染色体为可行解。

4 应用实例

研究成果已经在南方英特空调制造执行系统(SAI-MES)中实现并进行了实施和应用。南方英特公司主要生产车用空调系统、车用发动机冷却系统等系列产品, 面向长安、福特、马自达、沃尔沃、铃木等企业配套。下面介绍1个企业应用本系统解决调度问题的实例。

4.1 车用空调装配车间动态调度实例

某调度期内在装配线I、II、III上完成J48CC、CD345、PTC、CV6等四种产品的装配任务, 生产订单信息和产品加工数据分别如图5-6所示。

序号	产品	ah(h)	bi(h)	Si(元)	Fi(元)	Pi(台)	Ki(批)
1	J48CC	20	21	50	570	50	5
2	CD345	50	53	40	430	80	8
3	PTC	30	32	45	490	80	8
4	CV6	44	46	30	350	60	6

图 5 生产订单信息界面

序号	装配线	指标	J48CC	CD345	PTC	CV6
1	装配线 I	Ti1(min)	36	20	24	
		Cl1(元)	40	22	30.5	
		Qi1(%)	99	98.5	99.5	
		Csi1(元)	180	75	125	
2	装配线 II	Ti2(min)		27	33	22.5
		Cl2(元)		16	20	13.5
		Qi2(%)		97.5	98.5	97
		Csi2(元)		70	110	65
3	装配线 III	Ti3(min)	60	38	48	35
		Cl3(元)	27.5	9	13	10
		Qi3(%)	98.5	97.5	98	96.5
		Csi3(元)	130	60	80	45

图 6 产品加工基础数据界面

设定算法的初始参数:种群规模为 20,终止进化代数 100,交叉概率为 0.85,变异概率为 0.05。权重分别为 $w_f=0.4$, $w_c=0.4$, $w_b=0.2$ 。通过系统运算得到图 7 所示优化调度方案,图中 O_{ijk} 表示第 i 个产品的第 j 批次在第 k 条中配线上完成。

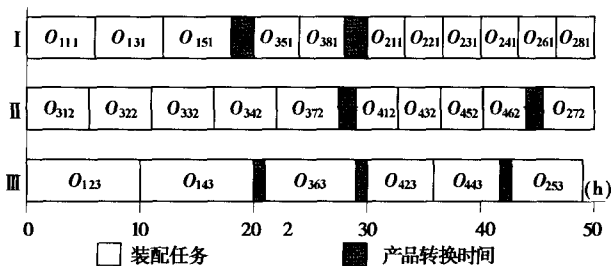


图 7 优化调度结果

生产到 22 h 时,装配线 II 发生故障,修复时间为 6 h。故障信息通过车间现场多功能交互式信息终端实时传到调度系统,调度模系统触发并立即重新执行调度运算,得到发生故障时的动态调度方案,如图 8 所示。

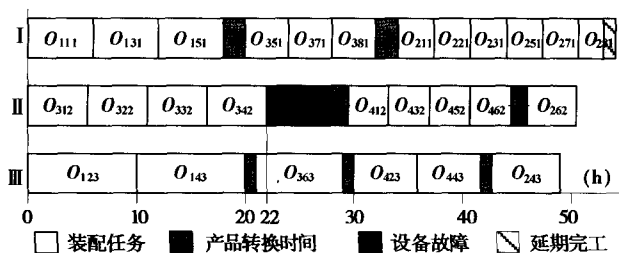


图 8 发生故障时的动态调度结果

生产到 32 h 时,客户通过 Internet 插入紧急订单,产品为 J48CC 冷凝器,数量为 20 台,交货期为 15 h。将紧急订单信息录入系统后,调度系统触发并立即重新执行调度运算,得到插入紧急订单时的动态调度方案,如图 9 所示。图中 O'_{ijk} 表示新插入的订单中第 i 个产品的第 j 批次在第 k 条中配线上完成。

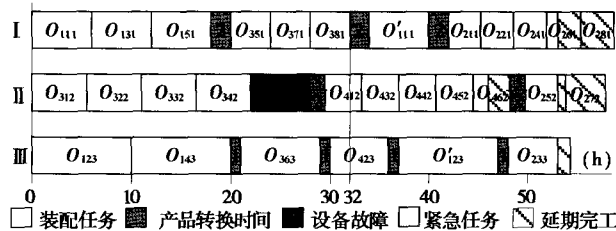


图 9 紧急插单时的动态调度结果

4.2 应用效果

系统在该企业实施后取得了较好的应用效果。通过实时采集和反馈装配车间返工返修、紧急插单、设备故障等信息,动态生成调度方案指导装配过程,使得计划完成率显著提高,因配送延期遭受惩罚由实施前的平均 4~5 次/月下降为 1 次/月。此外,实现了产品供应由备货模式向 JIT 订单拉动模式转变,成品库存降低约 30%。

5 结 论

1)通过分析车用空调装配车间调度过程中的各种不确定性影响因素,制订了基于双反馈控制的信息反馈机制,并在此基础上提出一种基于反馈控制的车用空调装配车间动态调度方法。

2)通过分析车用空调装配车间调度问题,综合考虑可重入、设备能力、时间离散化等约束,采用线性加权法建立了以提前或延期惩罚、完工时间、加工成本和质量损失为优化目标的车用空调装配车间多目标调度模型。

3)针对模型特点设计了合理的染色体编码方式、交叉算子和变异算子,防止遗传操作过程中非法解的产生,避免染色体的修复,提高求解效率。

4)通过一个应用实例验证了所提出的方法的有效性和实用性,为其他类型的企业解决装配车间动态调度问题提供了一种思路。

参考文献:

- [1] LIU S Q, ONG H L, NG K M. Metaheuristics for minimizing the makespan of the dynamic shop scheduling problem [J]. Advances in Engineering Software, 2005, 36(3):199-205.

- [2] LI L, JIANG Z. Self-adaptive dynamic scheduling of virtual production systems[J]. *International Journal of Production Research*, 2007, 45(9):1937-1951.
- [3] LIU S, SHIH K. Construction rescheduling based on a manufacturing rescheduling framework [J]. *Automation in Construction*, 2009, 18(6):715-723.
- [4] 朱琼,陈雪芳,张洁. 面向代理的车间动态调度方法[J]. *上海交通大学学报*, 2008, 42(7):1046-1050.
ZHU QIONG, CHEN XUE-FANG, ZHANG JIE. Multi-agent based dynamic job shop scheduling method [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008, 42(7): 1046-1050.
- [5] 刘飞,鄢萍,贺德强. 网络化制造系统中的多功能交互式信息终端:中国, ZL02113585.1[P]. 2003-10-22.
- [6] 程线,程森林,蒋阳. 生产调度系统实时数据库平台建设[J]. *重庆大学学报:自然科学版*, 2005, 28(2):89-92.
TANG RAN, LONG TENG-RUI, LONG XIANG-YU. Reconstruction on real-time data platform for production command dispatch system[J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2005, 28(2): 89-92.
- [7] HE L, LIU Y, XIE H, et al. Job shop dynamic scheduling model based on multi-agent[C] // *Chinese Control and Decision Conference 2008*, Yantai, China, July 2-4, 2008. [s. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2008:829-833.
- [8] GHOLAMI M, ZANDIEH M. Integrating simulation and genetic algorithm to schedule a dynamic flexible job shop[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2009, 20(4):481-498.
- [9] 张国辉,高亮,李培根,等. 改进遗传算法求解柔性作业车间调度问题[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(7): 145-151.
ZHANG GUO-HUI, GAO LIANG, LI PEI-GENG, et al. Improved genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(7):145-151.
- [10] 张超勇,饶运清,刘向军,等. 基于 POX 交叉的遗传算法求解 Job-Shop 调度问题[J]. *中国机械工程*, 2004, 15(23):2149-2153.
ZHANG CHAO-YONG, RAO YUN-QING, LIU XIANG-JUN, et al. An improved genetic algorithm for the job shop scheduling problem[J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, 15(23): 2149-2153.
- [11] LOUKIL T, TEGHEM J, TUYTTENS D. Solving multi-objective production scheduling problems using metaheuristics[J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 161(1):42-61.
- [12] CHEN K, JI P. A genetic algorithm for dynamic advanced planning and scheduling (DAPS) with a frozen interval[J]. *Expert Systems with Applications*, 2007, 33(4):1004-1010.
- [13] YANG H, YAN H. An adaptive approach to dynamic scheduling in knowledgeable manufacturing cell [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 42(3-4):312-320.
- [14] OUELHADJ D, PETROVIC S. A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems [J]. *Journal of Scheduling*, 2009, 12(4):417-431.
- [15] 张洁,王玮,方海松,等. 基于双反馈控制和分阶段调度的光纤生产调度[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(11): 125-130.
ZHANG JIE, WANG WEI, FANG HAI-SONG, et al. Double-feedback and phases based scheduling for fiber production [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(11): 125-130.
- [16] 鞠全勇,朱剑英. 多目标批量生产柔性作业车间优化调度[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(8):148-154.
JU QUAN-YONG, ZHU JIAN-YING. Multi-objective flexible job shop scheduling of batch production[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(8):148-154.
- [17] 张国辉,高亮,刘文君. 基于 Memetic 算法的车间动态调度策略研究[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(15): 1827-1831.
ZHANG GUO-HUI, GAO LIANG, LIU WEN-JUN. Dynamic scheduling optimization strategy based on memetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 19(15):1827-1831.
- [18] 唐然,龙腾锐,龙向宇. 基于模糊聚类的改进遗传算法[J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(2):166-169.
TANG RAN, LONG TENG-RUI, LONG XIANG-YU. Modified genetic algorithm based on fuzzy system[J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(2): 166-169.
- [19] CUNLI S. An assorted dynamic job-shop scheduling algorithm based on impact degree [C] // *2009 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering*, December 11-13, 2009, Wuhan, China. [s. l.]: IEEE Computer Society, 2009:5365563.
- [20] YANG H, WU Z. The application of adaptive genetic algorithms in FMS dynamic rescheduling [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2003, 16(6):382-397.

(编辑 张小强)