

柔性作业车间中机床与自动导引车在线调度方法*

肖海宁 楼佩煌 严伟国 钱晓明

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

摘要: 针对柔性作业车间中机床与自动导引车同时调度问题,提出了在线调度算法,将调度问题分解成机床选择和自动导引车调度两个子问题求解;首先针对机床选择子问题,根据问题规模分别采用穷举法和小生境遗传算法求解,目标是 minimized 机床最大负荷,平衡各机床负荷以及最小化搬运系统负荷;在小生境遗传算法设计过程中,采用邻域搜索以提高遗传算法的收敛速度;采用基于海明距离的小生境淘汰运算以保持种群多样性。然后针对自动导引车调度子问题,提出了一种启发式调度算法。为避免作业车间出现死锁,采用基于剩余容量的死锁避免规则。最后通过仿真实验验证了所提算法是可行的。

关键词: 自动导引车 柔性作业车间 遗传算法 调度

中图分类号: TP24; TH165+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0280-07

On-line Scheduling Method for Simultaneous Scheduling of Machines and Automated Guided Vehicles in Flexible Job Shop

Xiao Haining Lou Peihuang Yan Weiguo Qian Xiaoming

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: An on-line scheduling algorithm was proposed for simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles in flexible job shop. The problem was decomposed into two sub-problems: machine selection problem and vehicle dispatching problem. The machine selection problem was solved by enumerative method for small size and niche genetic algorithm otherwise. Local search was executed to improve the convergence speed of genetic algorithm. To keep a high degree of population diversity, Hamming distance based niche competition operation was adopted. For vehicle dispatching problem, a heuristic dispatching algorithm was proposed. To ensure the job shop to be deadlock-free, a remaining capacity based deadlock avoidance rule was employed. The simulation results showed that the proposed algorithm was feasible.

Key words: Automatic guided vehicle Flexible job shop Genetic algorithm Scheduling

引言

自动导引车系统 (Automatic guided vehicle system, AGVS)作为一种灵活高效的物流系统在制造、仓储配送等领域有着广泛的应用^[1~2]。国内外对传统作业车间中 AGV 调度的研究已有较多^[3~9],然而这些研究中均假定每个工件的工艺路线是预先

确定的。Kumar等^[10]与柳赛男等^[11]分别提出了两种智能搜索算法求解柔性作业车间中机床与 AGV 两种资源同时调度问题,然而这两种方法都属于离线静态调度方法,由于制造系统属于典型的离散事件动态系统 (Discrete event dynamic system, DEDS),很少能够达到稳定状态,因此在线实时调度更具有实际意义^[3]。

收稿日期: 2012-04-11 修回日期: 2012-05-08

* 国家自然科学基金资助项目 (61105114)、江苏省科技支撑计划资助项目 (BE2010189)和江苏省“六大人才高峰”基金资助项目
作者简介: 肖海宁,博士生,主要从事自动导引车系统规划设计与控制研究, E-mail: xiao226563@163.com

在柔性作业车间 (Flexible job shop, FJS) 调度问题中,每个工件的每一道工序可以在多个可选择的加工机床上进行加工,并且选择不同的加工机床所需要的加工时间是不同的。这增加了调度的灵活性,比较符合生产的实际情况^[12~13]。对于采用 AGVS 作为搬运系统的柔性作业车间而言,不仅面临 AGV 调度问题,而且还面临选择可选机床的问题,考虑因素较多,使调度问题非常复杂。本文针对柔性作业车间中机床与 AGV 两种资源在线调度问题的特点,将调度问题分解成两个子问题求解,即机床选择子问题和 AGV 调度子问题,针对各子问题提出相应的解决策略。并将所提在线调度方法的调度效果与静态调度相比较,验证所提调度方法的可行性。

1 柔性作业车间模型与问题描述

1.1 柔性作业车间模型

采用 AGV 系统的柔性作业车间由加工子系统和搬运子系统组成。加工子系统由输入工作站、输出工作站以及若干加工工作站组成。搬运子系统由单向导引路径网络和若干辆 AGV 组成。某柔性作业车间布局如图 1 所示,图中 IN 和 OUT 分别为输入和输出工作站。输入工作站由装载点 P_{IN} 和输出缓冲区构成,输出工作站由卸载点 D_0 和输出缓冲区构成。 W_1 到 W_8 为加工工作站,每个加工工作站 W_m 由卸载点 D_m 、输入缓冲区、机床 M_m 、输出缓冲区和装载点 P_m 构成。中间为单向导引路径网络,边上的箭头表示 AGV 在当前路径段上允许的运行方

向,边上的数字表示当前路径段的长度。

1.2 问题描述与研究思路

柔性作业车间中机床与 AGV 同时调度问题可描述为:假设有 m 台机床 $M = \{M_k | 1 \leq k \leq m\}$, n 种工件 $J = \{J_j | 1 \leq j \leq n\}$, z 辆 AGV $V = \{V_k | 1 \leq k \leq z\}$, 每种工件 J_j 由 n_j 道工序组成 $O_j = \{O_{ji} | 1 \leq i \leq n_j\}$, n_j 道工序之间有工艺上的先后约束关系,工件 J_j 的每道工序 O_{ji} 可选择 m 台机床中的多台设备加工,用 $M(O_{ji})$ 表示工序 O_{ji} 的可选机床集合, t_{jik} 表示工序 O_{ji} 在机床 M_k 上的加工时间。若某工件相邻两工序在不同机床上加工,则之间需要 AGV 的搬运。由于采用 AGVS 的柔性作业车间较复杂,故对所研究的系统作如下假设:工件按混合比随机生成,按泊松过程到达。所有工件首先进入输入工作站 IN 的输出缓冲区,等待调度系统为其分配第一道工序机床以及搬运 AGV,工件运达加工工作站后进入输入缓冲区等待机床的加工。工件每完成一道工序后进入各工作站输出缓冲区,等待调度系统为其分配下一道工序机床以及搬运 AGV。工件完成所有工序后经输出工作站 OUT 离开系统。若某工件相邻两工序在同一机床上加工则之间无需 AGV 搬运。同一时刻每台机床只能处理一个工件,每道工序一旦开始加工不能中断。输入缓冲区中的工件按先到先服务的规则顺序等待机床加工,输出缓冲区中的工件按任意顺序离开工作站。AGV 每次只能加载一个工件,沿着单向最短路径,以固定的速率运行。空闲的 AGV 停留在当前工作站,但不影响其他 AGV 通行。

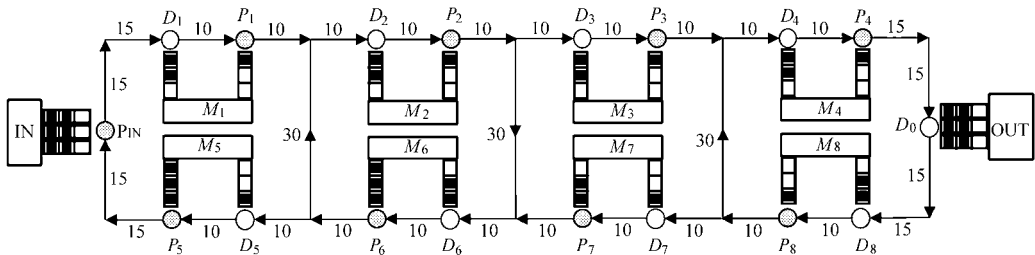


图 1 柔性作业车间布局图

Fig. 1 Layout of flexible job shop

由于问题本身较为复杂且为在线调度,因此为了降低问题复杂度,考虑将整个问题分解为两个子问题进行求解,即机床选择和 AGV 调度。机床选择子问题求解的目标是,最小化机床最大负荷,平衡各机床负荷以及最小化搬运系统负荷。AGV 调度子问题可描述为当系统中存在多个待搬运工件和空闲 AGV 时,确定搬运任务和空闲 AGV 的分配关系。为了提高搬运子系统效率,AGV 在运行过程中必须减少空载路程,每次卸载后尽量选择距离自身停靠

位置最近的工件搬运。然而由于各机床输入、输出缓冲区容量有限,若某机床输出缓冲区中工件没有及时运出,会导致机床因输出缓冲区无剩余容量而堵塞。若某机床工件没有及时送达,会导致机床因输入缓冲区中无工件加工而空闲(等待),这种堵塞与空闲会严重影响加工子系统效率。因此 AGV 调度子问题的求解目标即是在尽可能减少机床堵塞或空闲的基础上,减少空载路程,保证搬运系统效率。

2 柔性作业车间中双资源调度方法

为了达到优化系统资源分配的目标,设计的算法流程图如图 2 所示。

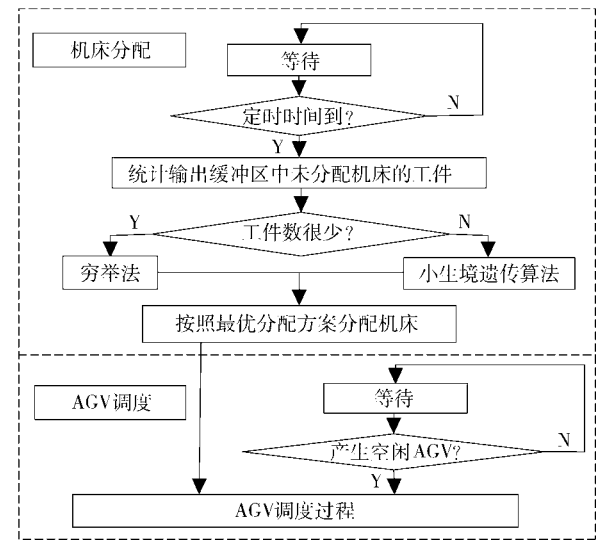


图 2 柔性作业车间中双资源调度整体流程图
Fig.2 Scheduling procedure for simultaneous scheduling of machines and AGVs in FJS

2.1 机床分配

采用周期性的触发机床分配过程,调度周期为 T_{SH} 。若定时时间到,则统计输出缓冲区中所有未分配机床的工件及位置。若工件数很少,则势必造成编码太短,不适合采用遗传算法求解,同时工件数少则解空间也较小,可使用穷举法。若需要分配机床的工件数较多则采用小生境遗传算法求解。

2.2 小生境遗传算法

针对机床选择问题设计的小生境遗传算法流程图如图 3 所示。

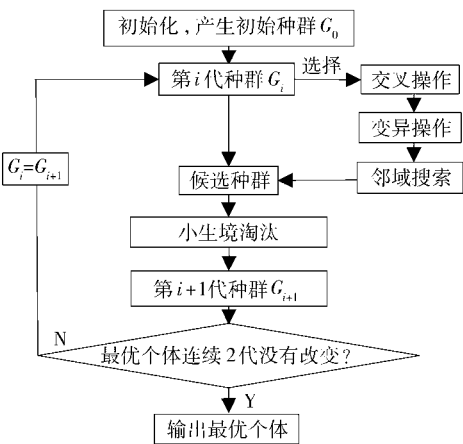


图 3 小生境遗传算法
Fig.3 Niche genetic algorithm procedure

2.2.1 染色体编码设计

采用基于机床的编码方式: $B = [b_{N_B} \cdots b_2 b_1]$, 染色体中每一位 b_i 对应输出缓冲区中某一工件 J_i

下一道工序 O_{ji} 的某可选机床。编码长度 N_B 为系统输出缓冲区中需要分配机床的工件数。例如:假定某工件集加工信息如表 1 所示,某时刻系统中需要分配机床的工件信息如表 2 所示,共有 4 件工件需要分配机床。

表 1 工件集 1 加工可选机床及其加工时间

Tab.1		Process information of job set 1								min	
工件	混合比/%	工序	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	
J_1	20	O_{11}	12	—	12	—	8	—	8	—	
		O_{12}	—	12	—	12	—	16	—	12	
		O_{13}	8	12	—	—	12	—	16	—	
		O_{14}	12	—	16	—	8	—	—	8	
J_2	20	O_{21}	—	12	—	8	—	12	12	—	
		O_{22}	8	—	8	—	16	—	—	12	
		O_{23}	—	—	—	12	—	12	12	—	
		O_{24}	—	8	12	16	—	8	—	—	
J_3	20	O_{31}	—	—	—	—	12	—	8	12	
		O_{32}	16	—	12	—	—	8	—	12	
		O_{33}	—	12	—	16	8	—	—	—	
		O_{34}	8	—	12	—	16	—	12	—	
J_4	20	O_{41}	—	12	—	8	—	12	—	12	
		O_{42}	12	—	8	—	—	—	—	12	
		O_{43}	—	12	—	—	8	—	8	—	
		O_{44}	—	—	—	16	—	12	8	—	

注:表中“—”表示无法加工。

表 2 染色体编码

Tab.2 Representation scheme				
工件	J_1	J_2	J_3	J_4
当前位置	W_1	W_3	W_5	IN
下一工序	O_{12}	O_{33}	O_{34}	O_{41}
机床编码 B	M_2	M_5	M_1	M_2

2.2.2 种群规模 N_p

由于采用无重串的稳态繁殖,在解空间不是很大的情况下若种群过大会出现死循环,因此种群规模 N_p 根据解空间规模 E 确定,即

$$N_p = \min(20, E/8)$$
 (1)

解空间规模 E 定义如下

$$E = \prod E(O_{ji})$$
 (2)

式中 $E(O_{ji})$ ——工序 O_{ji} 的可选机床的数目

2.2.3 适应度计算

选取目标函数为

$$\min f = \sigma_1 \max C_i + \sigma_2 \left(C_{AVG} + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |C_i - C_{AVG}| \right) + k_{UL} \frac{\sigma_3}{z} C_{Veh}$$
 (3)

式中 σ_1 ——负荷最大机床负荷权重系数

σ_2 ——机床平衡负荷权重系数

σ_3 ——搬运系统负荷权重系数

C_i ——机床 M_i 的负荷,由两部分组成,一是已分配给机床 M_i 但还未加工的所有工序时间之和,二是编码 B 中拟分配给机床 M_i 的所有工序加工时间之和

C_{AVG} ——所有机床负荷的平均值

k_{UL} ——AGV 空负载总路程与负载路程比值

C_{veh} ——所有待搬运工件所需的搬运时间,待搬运工件由两部分组成,一是已分配机床但还未完成搬运的工件,二是正在分配机床的工件

种群中某个体 B_i 的适应度计算方法为

$$S(B_i) = \begin{cases} f_{\max} - f(B_i) & (f_{\max} > f(B_i)) \\ AR/2 & (f_{\max} = f(B_i)) \end{cases} \quad (4)$$

式中 $f_{\max}$ ——当前种群中所有个体目标函数的最大值

$f(B_i)$ ——染色体个体 B_i 的目标函数值

A ——种群中所有个体目标函数最大值和最小值的差值,即 $f_{\max} - f_{\min}$,若 $f_{\max} = f_{\min}$ 则 A 为 1

R ——0 到 1 之间的随机数

2.2.4 选择操作

采用轮盘赌选择法,将种群中所有个体按照适应度从大到小排序,各个体被选中的概率与其适应度呈正比。从父代种群 G_i 中选择两个不相同的个体进入交叉操作。

2.2.5 交叉操作

采用双点交叉来实现这一算子。其方法为:首先随机选择两个交叉位置,两父代个体交换两交叉位置间的染色体,从而生成两个新的子个体。由于采用了没有重串的稳态繁殖,所以本文交叉概率选 1,即全部交叉,选择目标函数较小的一个新个体进入变异操作。

2.2.6 变异操作

采用双点变异,首先随机产生两个变异位置,将这两个变异位置上机床改为其他可选机床。变异概率选 0.1。

2.2.7 邻域搜索操作

为了改善新个体的质量,提高遗传算法的收敛速度,在传统遗传算法的基础上增加了邻域搜索操作,个体 B_i 的邻域解定义为:变换 B_i 中某一位染色体可选机床,其他位不变。显然个体 B_i 的邻域解的个数为 $\sum E(O_{ji})$,这些邻域解构成了 B_i 的邻域。邻域搜索即为求出个体 B_i 的所有邻域解的目标函数,取目标函数最小的邻域解代替 B_i 。并以新的 B_i 进行邻域搜索,邻域搜索的终止准则是 B_i 的所有邻

域解均劣于 B_i 。是否进行邻域搜索由邻域搜索概率 P_s 决定,本文 P_s 取 0.4。

邻域搜索后产生最优个体 B_i 需要验证父代种群或新种群中是否出现,若未出现则保存,否则重新进行选择、交叉、变异、邻域搜索操作,直至产生 N_p 个新个体。

2.2.8 小生境淘汰操作

为了衡量个体间的基因型差异,定义个体基因间的海明距离 H_{ij} , H_{ij} 表示编码 B_i 与 B_i 相同工序但不同机床的位数。为了保持种群个体间的基因型差异,避免近亲繁殖出现早熟,将经过交叉、变异、邻域搜索得到的 N_p 个新个体与父代种群中所有 N_p 个个体合并,得到 $2N_p$ 个个体作为候选种群,计算其中任意两染色体间的海明距离,对其中海明距离小于 $H_{\min}$ (本文中 $H_{\min}$ 取 1) 的两个体(即相似染色体)中适应度小的乘以排挤因子 $\eta < 1$ (本文选 0.9),将处理后的这 $2N_p$ 个个体按优劣排序,取其中最优的 N_p 个个体进入下一代。如此既保证了种群中个体间的差异性,又能够保证新一代种群中的个体是父代和进化代中的最优个体,实现了无重串的稳态繁殖。

2.2.9 遗传算法终止条件

若连续进化 N 代,种群中最优个体没有发生变化,则遗传操作停止,输出最优个体,本文取 $N = 2$ 。

穷举法只需求出所有可能方案的目标函数,输出最优方案即可。按照经过穷举法或遗传算法得到的最优分配方案将相应机床分配给对应工件,则机床选择子问题求解完毕。

2.3 AGV 调度策略

AGV 调度是为了合理的分配系统资源,确定空闲 AGV 与待搬运工件的分配关系。系统的堵塞、空闲、死锁会严重影响系统的性能,因此在调度过程中必须尽量减少或避免使系统进入这 3 种状态。调度系统流程图如图 4 所示。

2.3.1 AGV 调度过程触发事件

采用两类事件触发 AGV 调度过程,一是进行机床分配后立即进行一次,二是系统中一辆 AGV 刚完成一次搬运,状态变为空闲时。如此可保证系统中的工件或 AGV 及时分配。

2.3.2 系统死锁与死锁避免规则

当某一工作站输入缓冲区已满,机床中有工件,输出缓冲区也满,而且没有其他 AGV 加载输出缓冲区中的工件时,在此工作站等待卸载的 AGV 将因为始终无法获得释放空间而一直等待,这种状态称为 AGV 的堵塞。为了确定 AGV 的堵塞状态,需要知道工作站的剩余容量^[5]。工作站 M_m 剩余容量

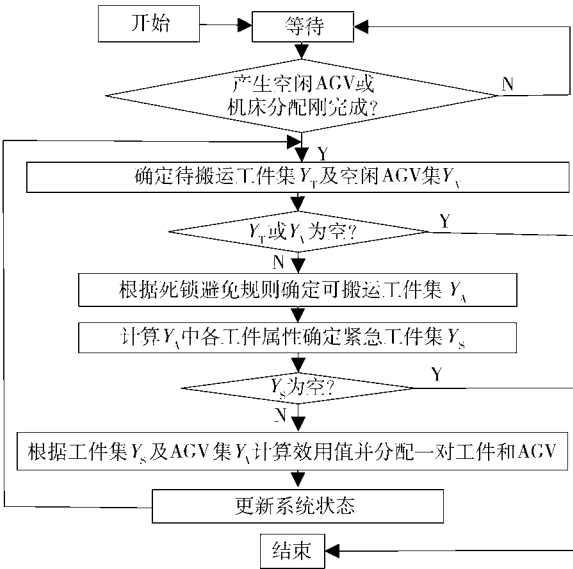


图4 AGV调度流程图

Fig.4 AGV dispatch procedure

$U(m)$ 定义为

$$U(m) = C_{in}(m) + C_{out}(m) + 1 + L_{out}(m) - L_{in}(m) - c_{in}(m) - c_{out}(m) - P(m) \quad (5)$$

式中 $C_{in}(m)$ ——输入缓冲区总容量

$C_{out}(m)$ ——输出缓冲区总容量

$c_{in}(m)$ ——输入缓冲区中的工件数

$L_{in}(m)$ ——目标工作站为 W_m ，且已分配 AGV 但还未运达工作站 W_m 的工件数量

$c_{out}(m)$ ——输出缓冲区中的工件数

$L_{out}(m)$ ——已分配 AGV 但还未离开工作站 W_m 的工件

$P(m)$ ——机床中的工件数，若加工设备中有工件为 1，否则为 0

当工作站剩余容量小于零，表示该工作站需要其他 AGV 搬运输出缓冲区中的工件，否则至少有一辆在此工作站等待卸载的 AGV 堵塞。堵塞 AGV 可以定义为：已接受任务且目标工作站的剩余容量 $U(m) < 0$ 的 AGV^[4,14]。堵塞 AGV 的数量为剩余容量的相反数，将非堵塞的 AGV 称为活动 AGV。如果所有的 AGV 都处于堵塞状态，则系统将始终无法获得释放空间，所有的 AGV 将一直堵塞，这种状态称为系统死锁。死锁会严重影响系统的性能，所以必须采用死锁避免策略^[4]。

避免死锁规则：为了避免系统死锁，当系统中只有一个活动 AGV 时，禁止搬运那些起始工作站没有输入 AGV 且目标工作站剩余容量小于等于零的工件^[4]。

2.3.3 待搬运工件紧急程度与工件属性 $a(P_i, D_j)$
待搬运工件（任务）可表示为 $T(P_i, D_j)$ ，其中

P_i 为起始工作站 W_i 的装载点， D_j 为目标工作站 W_j 的卸载点。由于实际制造系统各工作站输入、输出缓冲区容量有限，若某搬运任务 $T(P_i, D_j)$ 没有及时执行，有可能会带来 2 个后果：起始工作站 W_i 机床因输出缓冲区无剩余容量而堵塞。目标工作站 W_j 机床因输入缓冲区中无工件加工而空闲。这种堵塞与空闲会严重影响加工子系统的效率。因此有必要根据输入输出缓冲区的状态来预测其何时进入空闲（等待）状态或堵塞状态。进而衡量待搬运工件的紧急程度，将这种能够衡量待搬运工件 $T(P_i, D_j)$ 紧急程度的效用值称为工件属性，记为 $a(P_i, D_j)$ ，具体计算如下：

衡量工作站 W_m 距离空闲的指标 $F_{FR}(m)$ 为

$$F_{FR}(m) = \frac{c_{in}(m) + L_{in}(m)}{C_{in}(m)} \quad (6)$$

衡量工作站 W_m 距离堵塞的指标 $F_{BL}(m)$ 为

$$F_{BL}(m) = \begin{cases} 1 & (U(m) - C_{in}(m) > 0) \\ \frac{C_{out}(m) - c_{out}(m) + L_{out}(m)}{C_{out}(m)} & (\text{其他}) \end{cases} \quad (7)$$

工件属性 $a(P_i, D_j)$ 为

$$a(P_i, D_j) = \min(F_{BL}(i), F_{FR}(j)) + \frac{\max(F_{BL}(i), F_{FR}(j))}{10} \quad (8)$$

式中 $F_{BL}(i)$ ——任务 $T(P_i, D_j)$ 的源工作站 W_i 的堵塞剩余指标

$F_{FR}(j)$ ——任务 $T(P_i, D_j)$ 的目标工作站 W_j 的空闲剩余指标

2.3.4 空闲 AGV 与待搬运任务间的效用值与 AGV 调度

为了提高搬运子系统的效率，AGV 在运行过程中必须减少空载路程，因此有必要考虑各空闲 AGV 停靠位置与待搬运工件间的距离，并综合考虑搬运任务属性值。

假定待调度 AGV 集 Y_V 为

$$Y_V = \{ \text{agv}_1(D_n), \dots, \text{agv}_{N_V}(D_k) \} \quad (9)$$

式中 N_V ——空闲 AGV 的数量

D_n, D_k ——空闲 AGV 的停靠位置（上次任务的卸载点）

紧急任务集 Y_S 为

$$Y_S = \{ T_1(P_m, D_m), \dots, T_{N_S}(P_k, D_k) \} \quad (10)$$

式中 N_S ——紧急任务集 Y_S 中的搬运任务量
 P_k ——各搬运任务起始工作站装载点

则空闲 AGV $\text{agv}_i(D_m)$ 与紧急任务 $T_j(P_n, D_k)$ 之间的效用值 X_{ij} 为

$$X_{ij} = d_{ij} + a(P_n, D_k) \tag{11}$$

式中 d_{ij} ——空闲车辆 $agv_i(D_m)$ 的停靠位置 D_m 到搬运任务 $T_j(P_n, D_k)$ 装载点 P_n 的有向最短路程, 可通过 Dijkstra 算法^[15]求得

2.3.5 AGV 调度过程

对照如图 4 所示流程图,AGV 调度过程如下:

步骤(1) 统计所有输出缓冲区中需要搬运的工件和系统中的空闲 AGV, 这些工件和 AGV 分别构成待搬运工件(任务)集 Y_T 和空闲 AGV 集 Y_V 。若 Y_T 为空集或 Y_V 为空集, 则结束; 否则进入步骤(2)。

步骤(2) 计算各工作站剩余容量 $U(m)$, 以及堵塞 AGV 的数量, 根据死锁避免规则待分配任务集 Y_T 中去除被禁止的任务, 未被禁止的任务构成可分配任务集 Y_A , 然后执行步骤(3)。

步骤(3) 计算 Y_A 中各搬运任务属性值, 选出 Y_A 中任务属性值小于某一阈值 A_E 的所有任务, 这些紧急任务构成紧急任务集 Y_S 。至此, 那些短时间内不搬运对加工子系统性能影响不大的任务已被禁止。若 Y_S 为空集, 则结束, 否则转步骤(4)。

步骤(4) 计算空闲 AGV 集 Y_V 中所有空闲 AGV 与紧急任务集 Y_S 中所有紧急任务的效用值, 求出效用值最小的一对空闲 AGV 与紧急任务。将空闲 AGV 分配给对应紧急任务。更新相应输入输出缓冲区状态后转步骤(1)。

3 仿真实验与实验结果

3.1 仿真实验设计

为了验证所提方法的有效性,进行了仿真实验, 柔性作业车间如图 1 所示。输入、输出工作站的缓冲区容量为无穷大, 其余各输入、输出缓冲区容量为 4。设定两种工件集, 工件集 1 各工件信息如表 1 所示, 工件集 2 的各工件工艺信息与表 1 相同, 但各加工时间增加一倍。在相同工件集下, 比较本文算法在不同 AGV 数量下的调度性能指标。并将其中某一性能指标与相同制造环境下的静态调度效果作比较。获得本文算法性能指标的方法如下: 采用西门子公司 Plant Simulation 9.0, 实验界面如图 5 所示, 初始时所有 AGV 均处于输入缓冲区装载点, 各机床和缓冲区均为空, 假定 AGV 运行速度为 1 m/s, 其他参数选择如下: $T_{SH} = 120\text{ s}$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.25$, $\sigma_3 = 0.5$, $k_{UL} = 2$, 仿真运行 48 h 后, 统计 24 h 到 48 h 之间各生产性能指标。获得静态调度最优性能指标的方法如下: 由于实际生产性能不仅与加工顺序有关, 还与批量有关, 然而由于将两者结合考虑复杂度

太高, 想找出最优调度方案难度很大。因此本文只能首先确定几种批量, 利用文献[10]所提静态调度算法求出各批量下的较优调度方案。对静态调度而言, 除之前的假设条件外还应增加以下假设, 即所有 AGV 在零时刻均处于输入缓冲区装载点, 完成所有搬运任务后还回到输入工作站装载点以便为下一批次的加工服务。两种工件集在本文算法的调度效果如表 3 所示。表 3 中 K/Z 为环境参数, K 为工件集编号, Z 为 AGV 数量, Q_i 为每小时到达输入工作站缓冲区的工件数, η_{AVG} 为机床平均利用率, Q_o 为柔性作业车间平均每小时的输出工件数, 机床利用率平衡指标为

$$\eta_{BLA} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |\eta_i - \eta_{AVG}|$$

式中 η_i ——机床 M_i 的利用率

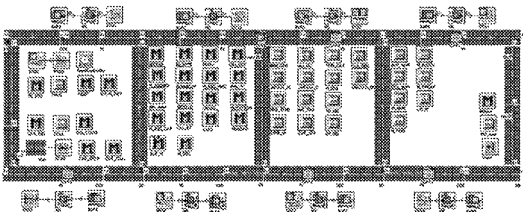


图 5 实验界面
Fig. 5 Interface of experiment

表 3 在线调度效果

Tab.3 Performance of on-line scheduling method					
K/Z	Q_i	$\eta_{AVG}/\%$	$\eta_{BLA}/\%$	$\eta_{VAVG}/\%$	Q_o
1/1	10	49.6	13.0	99.8	5.42
1/3	15	98.8	0.4	88.3	11.75
1/6	15	98.9	0.3	46.5	11.75
2/1	10	87.3	4.0	99.7	5.17
2/2	10	98.5	0.49	69.6	5.71
2/6	10	99.1	0.50	23.5	5.92

工件集 2 在几种批量下的静态调度效果如表 4 所示。表 4 中 F 为批量, 一次性投入柔性工作站的工件数, 各类型工件的数目按工件混合比确定。

表 4 工件集 2 在不同批量下的静态调度效果

Tab.4 Performance of off-line scheduling method					
K/Z	F	$\eta_{AVG}/\%$	$\eta_{BLA}/\%$	$\eta_{VAVG}/\%$	Q_o
2/6	4	46.2	15.1	13.7	2.85
2/6	8	75.3	11.4	23.7	4.65
2/6	12	90.2	3.8	26.1	5.57
2/6	16	90.1	3.7	28.9	5.78
2/6	20	91.5	1.9	29.0	5.93
2/6	24	92.9	3.2	30.3	5.94

3.2 实验结果分析

由表 3 所示, 对同一工件集分别给定 3 种 AGV 数量, 即 AGV 数量很少 (η_{VAVG} 大于 99.0%), AGV 数量满足生产需求 (η_{VAVG} 小于 99.0%), 以及 AGV

数量远大于生产需求(η_{VAVG} 小于 50.0%) 3 种情况。由表 3 所示,只要 AGV 数量充足,机床的平均利用率均很高,达到 98% 以上,各机床的负荷非常均衡。同时由表 4 可见,静态调度的效果不仅与加工顺序有关,还与批量有关,因此若要获得较优的静态调度方案,必须在不同的批量下进行大量实验,这显然是非常耗时的。对照表 3 和表 4,在环境参数 2/6 (工件集 2,6 辆 AGV) 下,在线调度方法平均每小时输出工件数为 5.92,这与静态调度的最优效果 5.94 非常接近,由此可见本文所提在线调度算法能够获得较优的调度效果,是可行的。

4 结 束 语

提出了一种柔性作业车间中机床与自动导引车

两种资源在线调度算法,将调度问题分解成两个子问题求解,即机床选择子问题和 AGV 调度子问题,首先针对机床选择子问题,以最小化机床最大负荷,平衡各机床负荷以及最小化搬运系统负荷为目标,提出了一种组合算法(小规模下采用穷举法,大规模下采用小生境遗传算法),然后针对 AGV 调度子问题,提出了一种启发式调度策略,为避免系统因输入输出缓冲区容量不足出现死锁,采用了死锁避免规则。最后通过仿真实验,并与静态调度效果比较,仿真结果表明在线调度是切实可行的。

参 考 文 献

1 Le-Anh T, De Koster M B M. A review of design and control of automated guided vehicle systems[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 171 (1): 1 ~ 23.

2 Vis I F A. Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 170(3): 677 ~ 709.

3 Bilge U, Esenduran G, Varol N, et al. Multi-attribute responsive dispatching strategies for automated guided vehicles[J]. International Journal of Production Economics, 2006, 100(1): 65 ~ 75.

4 管贤平,戴先中. 自动导引车系统避免死锁的多属性任务调度方法[J]. 中国机械工程,2009,20(19): 2 337 ~ 2 341. Guan Xianping, Dai Xianzhong, Multi-attribute dispatching method with deadlock avoidance for AGV systems [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(19): 2 337 ~ 2 341. (in Chinese)

5 Ulusoy G, Srvnkaya-serifogulg F, Bilge U. A genetic algorithm approach to the simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles[J]. Computers and Operations Research, 1997, 24(4): 335 ~ 351.

6 Abdelmaguid T F, Nassef A O, Kamal B A, et al. A hybrid GA/heuristic approach to the simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles[J]. International Journal of Production Research, 2004, 42(2): 267 ~ 281.

7 Jerald J, Asokan P, Saravanan P, et al. Simultaneous scheduling of parts and automated guided vehicles in an FMS environment using adaptive genetic algorithm [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(5): 584 ~ 589.

8 Reddy B S P, Rao C S P. A hybrid multi-objective GA for simultaneous scheduling of machines and AGVs in FMS[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 31(5 ~ 6): 602 ~ 613.

9 Deroussi L, Gourgand M, Tchernev N A. Simple metaheuristic approach to the simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(8): 2 143 ~ 2 164.

10 Kumar M V S, Janardhana R, Rao C S P. Simultaneous scheduling of machines and vehicles in an FMS environment with alternative routing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53(1 ~ 4): 339 ~ 351.

11 柳赛男,柯映林. 一种解决有 AGV 车约束的车间智能调度问题的算法[J]. 中国机械工程,2007,18(15): 1 810 ~ 1 813. Liu Sainan, Ke Yinglin. An algorithm for job shop scheduling in dual resource constrained with AGV[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(15): 1 810 ~ 1 813. (in Chinese)

12 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 Guohui, Gao Liang, Li Peigen, et al. Improved genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45 (7): 145 ~ 151. (in Chinese)

13 王云,冯毅雄,谭建荣,等. 基于多目标粒子群算法的柔性作业车间调度优化方法[J]. 农业机械学报,2011,42(2): 190 ~ 196. Wang Yun, Feng Yixiong, Tan Jianrong, et al. Optimization method of flexible job-shop scheduling based on multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 190 ~ 196. (in Chinese)

14 Guan X P, Dai X Z. Deadlock-free multi-attribute dispatching method for AGV systems[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(5 ~ 6): 603 ~ 615.

15 龚劬. 图论与网络最优化解法[M]. 重庆:重庆大学出版社,2009.