

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.03.016

## 绿色作业车间机器与 AGV 的集成调度研究

戴敏, 张玉伟, 曾励

(扬州大学机械工程学院, 扬州, 225127)

**摘要:** 针对加工资源和运输资源集成下绿色作业车间调度问题, 通过研究生产车间综合能耗模型, 建立了机器和自动导引小车 (Automated guided vehicle, AGV) 集成调度下多目标优化模型。提出一种改进分布估计算法 (Improved estimation of distribution algorithm, IEDA) 对模型进行求解。首先, 采用优良种群作为样本学习来构建概率分布模型以提高 IEDA 的全局搜索能力; 然后基于一种类似激素调控机制的速度冷却控制方法设计出新的模拟退火函数, 并将其融入到分布估计算法中以提高 IEDA 的局部搜索能力。最后通过数值实验来验证所提模型和算法的可行性和有效性。

**关键词:** 绿色作业车间; 集成调度; 综合能耗; 分布估计算法

**中图分类号:** TP278      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2020)03-0468-10

## Integrated Scheduling of Machines and AGVs in Green Job Shop

DAI Min, ZHANG Yuwei, ZENG Li

(College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, 225127, China)

**Abstract:** Aiming at the green job shop scheduling problem under the integration of processing resources and transportation resources, a multi-objective optimization model based on the integrated scheduling of machines and automated guided vehicle (AGV) is established by studying the comprehensive energy consumption in production workshop. An improved estimation of distribution algorithm (IEDA) is proposed to solve the problem. First, excellent individuals are generated as sample learning to construct the probability distribution model for improving the global search ability of IEDA. Then, inspired by the hormone regulation mechanism, a new speed cooling control method is designed in simulated annealing algorithm to improve the local search ability of IEDA. Finally, numerical experiments are conducted and the results show the feasibility and effectiveness of the proposed model and algorithm.

**Key words:** green job shop; integrated scheduling; comprehensive energy consumption; estimation of distribution algorithm

生产调度作为智能制造系统的重要环节, 其调度过程中各类制造资源, 如: 加工资源-机床、运输

资源-自动导引小车 (Automated guided vehicle, AGV) 等的联动与协同优化是智能制造系统高效

**基金项目:** 国家科技部重点研发 (2016YFD0700903) 资助项目; 江苏省高等学校自然科学研究面上 (17KJB460018) 资助项目; 扬州市创新能力计划项目-高等院校合作专项 (YZ2017278) 资助项目; 扬州大学教学改革研究课题 (YZUJX2018-28B) 资助项目。

**收稿日期:** 2019-06-03; **修订日期:** 2019-07-17

**通信作者:** 戴敏, 男, 博士, 讲师, E-mail: daimin@yzu.edu.cn。

**引用格式:** 戴敏, 张玉伟, 曾励. 绿色作业车间机器与 AGV 的集成调度研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 468-477. DAI Min, ZHANG Yuwei, ZENG Li. Integrated scheduling of machines and AGVs in green job shop [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 468-477.

运转的关键。近年来,在全球能源日益紧张、自然环境持续恶化的情况下,绿色车间调度研究受到了极大关注。绿色车间调度问题是通过资源分配、操作排序和运行模式的合理优化,提高生产效率、降低能耗,实现经济指标和绿色指标的综合优化<sup>[1]</sup>。在生产调度过程中引入节能、低碳作为评价绿色制造的新指标,结合传统经济指标共同构建了面向绿色车间调度模型,并获得高度关注和广泛研究<sup>[2-3]</sup>。

车间执行加工任务调度时,通常需要经过生产加工与物料配送等多个生产环节。生产加工环节需要各类型的机床参与其中,而物料配送环节需要AGV、机器人和行车等参与其中。已有学者针对生产加工与物料配送等多个生产环节开展了加工资源和运输资源的集成调度优化方面的研究。Saidi-Mehrabad等<sup>[4]</sup>建立了一种同时考虑AGV无冲突的路径选择与车间作业调度的混合整数规划模型,以总的完工时间为优化目标,提出两阶段蚁群算法求解该问题;Nouri等<sup>[5]</sup>对柔性作业车间调度和搬运设备(机器人)路径选择进行了集成优化,以完工时间为优化目标,设计混合算法进行优化求解;王雷等<sup>[6]</sup>将AGV运输加入到柔性作业车间调度中,建立了带有AGV约束的柔性作业车间调度模型,并采用改进的遗传算法进行求解;刘二辉等<sup>[7]</sup>构建了加工设备与多AGV集成调度数学模型,以任务最大完工时间最小和所有AGV利用率之和最大为优化目标,提出一种改进花授粉算法对模型进行了研究。贺长征等<sup>[8]</sup>针对柔性作业车间AGV与机器集成调度问题,建立了以工件最大完工时间最优为目标的双资源调度数学模型,设计一种混合遗传算法对模型进行求解。

另外,有学者开始研究在高效低碳制造模式下加工资源和运输资源集成调度问题,如Lu等<sup>[9]</sup>综合考虑经济指标和绿色指标,以带有运输资源的绿色置换流水车间为研究对象,构建了一个以最小化车间总能量消耗和最小化完工时间为优化函数的多目标调度模型,并采用一种混合的多目标回溯搜索算法进行了节能求解;Liu等<sup>[10]</sup>针对柔性作业车间,通过研究设备加工能耗和行车运输能耗构建了一种综合能耗模型;以综合能耗成本和完工时间为多目标建立了混合整数规划模型,并设计一种混合启发式算法对此问题进行求解。

通过分析可以发现,上述研究主要从数学模型

和算法设计两方面探讨车间调度问题。在数学建模方面,更多集中于从经济效益的角度关注加工资源和运输资源的集成调度优化。但是从绿色制造角度,基于绿色车间调度的加工、运输资源集成优化模型的研究尚未深入开展。在算法设计方面,由于问题的复杂性和规模性,文献中多采用元启发式算法进行求解。而面向绿色车间的集成调度问题更为复杂,需要设计合适的算法进行求解。

本文在上述研究的基础上,通过研究加工资源和运输资源集成下绿色作业车间调度问题,建立机器和AGV集成调度的多目标节能优化模型。针对此类问题的复杂性,提出一种改进分布估计算法,基于算法在全局搜索能力和局部搜索能力两者平衡方面的加强,以求得所研究问题的最优解。最后,通过数值实验验证所提模型和算法的可行性和有效性。

## 1 机器与AGV集成下绿色作业车间调度问题描述及建模

### 1.1 问题描述

机器与AGV集成下绿色作业车间调度问题描述如下:假设存在 $n$ 个任务组成的任务集 $T=\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 和 $m$ 台机器组成的机器集 $M=\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ ,每个任务 $T_i$ 有 $N_i$ 道工序,所有工序按照规定的加工工艺路线在 $m$ 台机器上完成操作,其中,任务 $T_i$ 的一道工序 $O_{ij}$ 完工后,其下一道工序加工之前要考虑AGV在不同工位间的任务运输过程。

在调度过程中,一方面,机器除了在加工每道工序的过程中消耗能量,在等待工序的过程也消耗能量;另一方面,AGV协助任务运输过程中期间消耗的能量不可忽略。调度目标是在机器和AGV协同下确定每台机器上工序的排列次序,以同时实现最大完工时间最小化和总的能量消耗最少化。此外,生产调度过程中满足以下假设:(1)所有任务在零时刻均可加工;(2)所有机器在零时刻均可进行操作;(3)同一任务的工序间有先后约束关系;(4)每一台机器每一时刻只能加工一道工序;(5)工序一旦开始加工就不允许中断;(6)AGV数量充足,能确保任务在上一道工序完成后立刻运输到其他机器上进行下一道工序的操作。图1为考虑机器与AGV集成下一个调度甘特图。

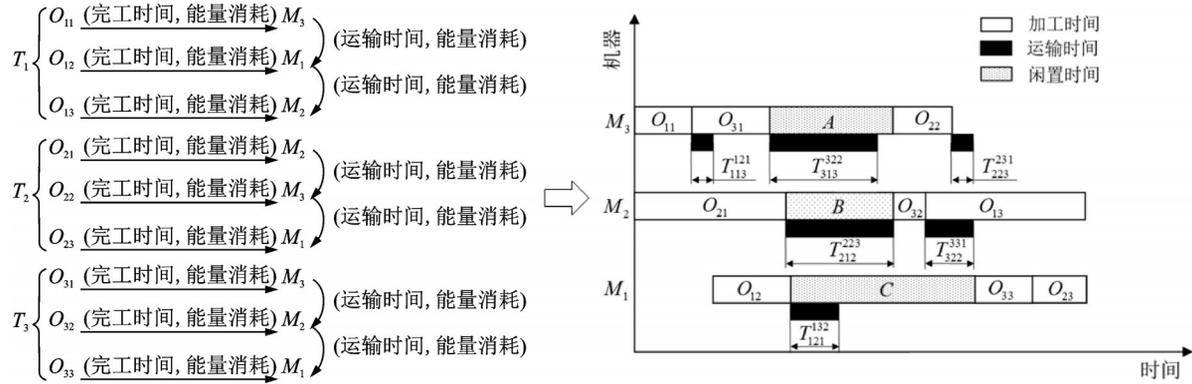


图1 机器与AGV集成下调度甘特图

Fig.1 Schedule Gantt of machines integrated AGV

1.2 参数和变量定义

表1列出了绿色作业车间调度建模中所需的参数、变量符号说明。

表1 参数和变量符号说明

Table 1 Description for parameter and variable symbols

参量	符号	描述
索引号	$i, i^-$	任务标号
	$j, j^-$	工序标号
	$k, w$	机器标号
	$q$	位置标号
	$m$	机器总数
	$n$	任务总数
	$O_{ij}$	任务 $T_i$ 的第 $j$ 道工序
	$N_i$	任务 $T_i$ 的工序总数
	$Q_k$	机器 $M_k$ 上加工工序总数
	$L$	一个无穷大的正整数
参数	$P_0$	AGV 运输过程的平均功耗
	$P_{ijk}$	工序 $O_{ij}$ 在机器 $M_k$ 上的切削功耗
	$P_k$	机器 $M_k$ 的空载功耗
	$E$	车间综合能耗
	CECM	切削能耗模块
	IECM	空转能耗模块
	TECM	运输能耗模块
变量	AECM	辅助能耗模块
	$e$	辅助设备单位时间能耗
	$C_i$	任务 $T_i$ 的完工时间
	$C_{max}$	最后一个任务的完工时间
	$B_{kq}$	机器 $M_k$ 的第 $q$ 个位置上工序的开始时间
	$S_{ijk}$	工序 $O_{ij}$ 在机器 $M_k$ 上的开始时间
	$C_{ijk}$	工序 $O_{ij}$ 在机器 $M_k$ 上的完工时间
	$C_{i-1jk}$	$M_k$ 上安排工序 $O_{ij}$ 加工之前上一道工序的完工时间
	$T_{ijk}$	工序 $O_{ij}$ 在机器 $M_k$ 上的加工时间
$T_{i(j-1)w}^{ijk}$	任务 $T_i$ 的连续工序 ( $O_{i(j-1)}$ , $O_{ij}$ ) 在所需加工机器 ( $M_w$ , $M_k$ ) 之间的运输时间	
$Y_{ijkq}$	排序决策变量: 若工序 $O_{ij}$ 排在机器 $M_k$ 上第 $q$ 个位置加工, 则 $Y_{ijkq}=1$ ; 否则 $Y_{ijkq}=0$	

1.3 能耗建模

车间设备加工生产任务过程中呈现出耗能特性。从节能减排角度, 整个车间生产调度过程中能

量消耗可归类为以下4种能耗模块: 切削能耗模块 (Cutting energy consumption module, CECM)、空转能耗模块 (Idle energy consumption module,

IECM)、运输能耗模块(Transportation energy consumption module,TECM)和辅助能耗模块(Auxiliary energy consumption module,AECM)。

(1)切削能耗模块:任务在加工状态下由刀具切除多余材料时,加工设备所提供的能量消耗。CECM可通过二次多项式拟合曲线求得,即有

$$CECM = \sum_{k=1}^m P_k \cdot \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} T_{ijk} \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=1}^m (1 + \alpha_1) \cdot P_{ijk} \cdot T_{ijk} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=1}^m \alpha_2 \cdot P_{ijk}^2 \cdot T_{ijk} \quad (1)$$

式中: $\alpha_1, \alpha_2$ 为二次多项式拟合曲线系数。

(2)空转能耗模块:加工设备在等待该设备上

$$E = CECM + IECM + AECM + TECM =$$

$$\sum_{k=1}^m P_k \cdot \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} T_{ijk} \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=1}^m (1 + \alpha_1) \cdot P_{ijk} \cdot T_{ijk} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=1}^m \alpha_2 \cdot P_{ijk}^2 \cdot T_{ijk} + \sum_{k=1}^m P_k \cdot \left( \max_{i,j} C_{ijk} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} (C_{ijk} - S_{ijk}) \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^{N_i} \sum_{k=1}^m \sum_{w=1}^m P_0 \cdot T_{i(j-1)w}^{ijk} + e \cdot \max_{1 \leq i \leq n} (C_i) \quad (5)$$

### 1.4 多目标优化模型

根据上述问题描述及能耗模型,给出绿色柔性作业车间调度多目标函数及其约束条件为

$$\begin{cases} \min f_1 = C_{\max} \\ \min f_2 = E \end{cases} \quad (6)$$

$$C_{ijk} - C_{i(j-1)w} \geq T_{ijk} \quad (7)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n; j=2, \dots, N_i; k, w=1, 2, \dots, m$ 。

$$S_{ijk} \geq \max (C_{i(j-1)w} + T_{i(j-1)w}, C_{i^-j^-k}) \quad (8)$$

式中: $i, i^-=1, 2, \dots, n; j=2, 3, \dots, N_i; j^-=1, 2, \dots, N_i; k, w=1, 2, \dots, m$ 。

$$B_{kq} \leq T_{ijk} + L \cdot (1 - Y_{ijkq}) \quad (9)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, N_i; k=1, 2, \dots, m; q=1, 2, \dots, Q_k$ 。

$$B_{kq} \geq T_{ijk} - L \cdot (1 - Y_{ijkq}) \quad (10)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, N_i; k=1, 2, \dots, m; q=1, 2, \dots, Q_k$ 。

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} Y_{ijkq} = 1 \quad (11)$$

式中: $k=1, 2, \dots, m; q=1, 2, \dots, Q_k$ 。

式(6)为多目标优化函数,其中, $f_1$ 为最小化完工时间, $f_2$ 为最小化总的能量消耗;式(7)用于描述同一任务间工序有先后约束关系;式(8)考虑了AGV协同运输下加工设备资源约束;式(9)和(10)

下一道工序来加工,期间所消耗的能量。该部分能耗表示为

$$IECM = \sum_{k=1}^m P_k \cdot \left( \max_{i,j} C_{ijk} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} (C_{ijk} - S_{ijk}) \right) \quad (2)$$

(3)运输能耗模块:任务在不同机器之间加工时由AGV搬运所需的能量消耗。TECM表示为

$$TECM = \sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^{N_i} \sum_{k=1}^m \sum_{w=1}^m P_0 \cdot T_{i(j-1)w}^{ijk} \quad (3)$$

(4)辅助能耗模块:支持整个生产车间生产所需辅助设备如风扇、空调等的能量消耗。AECM表示为

$$AECM = e \cdot \max_{1 \leq i \leq n} C_i \quad (4)$$

综上,可以得到整个生产车间的综合能量消耗

表达式为

表示工序开始时间和机器开始时间之间的约束关系;式(11)表示工序被分配到机器上确定的位置顺序上进行加工。

目前,关于多目标优化问题求解主要分为两类:一是传统优化方法,如加权和效用函数法、 $\epsilon$ -约束方法、最小-最大方法等;二是基于启发式算法,如非支配排序遗传算法。鉴于加权和效用函数法具有操作简单,使用广泛和容易获取Pareto解等特性,本文采用加权和效用函数法将上述多目标调度问题转为单目标问题,式(6)可以进一步描述为

$$F(k) = \omega \cdot \frac{f_{1,\max} - f_1(k)}{f_{1,\max} - f_{1,\min}} + (1 - \omega) \cdot \frac{f_{2,\max} - f_2(k)}{f_{2,\max} - f_{2,\min}} \quad (12)$$

式中: $\omega$ 为目标函数完工时间的权重系数,权重的分配与决策者对目标偏好有关。在更多关注生产效率的情况下,即完工时间,则设计权重 $\omega \geq 0.6$ 较为合理;在完工时间满足实际需求的同时,能耗权重尽可能大( $0.5 \geq \omega \geq 0.3$ ),从而使生产满足完工时间最优的同时达到节能的效果。能耗和完工时间作为单目标进行优化时均是NP-hard问题,有限迭代次数内求不出最优值,本文通过调整 $\omega$ 分别等于0和1转为能耗单目标问题和完工时间单目标问题求解20次,最终找出单目标函数完工时间的最大值和最小值 $f_{1,\max}$ 和 $f_{1,\min}$ ,以及单目标函数综合能

耗的最大值和最小值 $f_{2,\max}$ 和 $f_{2,\min}$ 。

## 2 基于改进分布估计算法求解绿色作业车间调度

分布估计算法(Estimation of distribution algorithm, EDA)是一种基于概率模型的全局优化算法,但容易出现早熟现象;而模拟退火算法(Simulated annealing, SA)采用单点迭代搜索,在局部范围内有较强搜索能力。因此,综合两者的优点提出了一种改进的分布估计算法(Improved estimation of distribution algorithm, IEDA)对绿色作业车间调度进行了求解。

### 2.1 基于关键路径的状态产生函数设计

状态产生函数的设计首先要确保SA产生的候选解尽可能遍布全部解空间,本文采用基于关键路径的领域结构设计状态产生函数:设 $A, B$ 是两个可行解,若 $B$ 是通过移动 $A$ 中的某个关键块中任一道工序(不包括 $A$ 中该关键块的首、尾工序)到该关键块的首工序的前面,或是尾工序的后面得到的可行解,则 $B$ 是 $A$ 的邻居,这样得到的邻居为 $A$ 的邻域,由此获得的邻域是非常小的。

### 2.2 概率模型

根据本文研究问题的特点设计了一个 $n$ 行 $m \times n$ 列的矩阵 $P$ 用于描述解空间分布的概率模型,如式(13)所示为第 $k$ 代概率模型 $P(k)$ 。 $P(k)$ 中元素 $P_{ij}^k \in [0, 1]$  ( $1 \leq i \leq n; 1 \leq j \leq m \times n$ )代表第 $k$ 代中任务 $i$ 位于第 $j$ 个位置的概率,且有 $P_{ij}^k = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N I_{ij}^s$  ( $N$ 为优秀个体数量; $I_{ij}^s$ 为空间统计函数,用0或1来描述,若 $I_{ij}^s = 1$ 表示第 $s$ 个优秀个体中任务 $i$ 位于第 $j$ 个位置上,否则 $I_{ij}^s = 0$ )。

$$P(k) = \begin{bmatrix} P_{11}^k & P_{12}^k & \cdots & P_{1l}^k \\ P_{21}^k & P_{22}^k & \cdots & P_{2l}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1}^k & P_{n2}^k & \cdots & P_{nl}^k \end{bmatrix} \quad (13)$$

### 2.3 更新机制

为了使上述概率模型矩阵 $P$ 更准确地反应解空间的分布情况以及变化趋势,采用基于机器学习的Hebb规则来更新概率矩阵中的所有元素。因此,通过对第 $k$ 代概率模型 $P(k)$ 更新后,第 $k+1$ 代概率模型 $P(k+1)$ 中每个元素 $P_{ij}^{k+1}$ 可以表示为

$$P_{ij}^{k+1} = (1 - \alpha)P_{ij}^k + \alpha \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N I_{ij}^s \quad (14)$$

式中: $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ )表示学习率。

### 2.4 基于模拟退火函数设计

在模拟退火温度更新操作中,一般采用指数退温函数,即 $T_{k+1} = \lambda \times T_k$ , ( $0 < \lambda < 1$ )。采用这种方法,温度下降的速度完全取决 $\lambda$ 值的选取,实际中动态选值比较难,且存在低温阶段难以获取更多优秀个体的现象。因此,本文受激素调节人体血糖行为的启发,提出激素调节规律,即Hill函数分布规律调控SA的温度更新,其数学表达式为

$$T(k+1) = \epsilon \times \frac{1}{1+k^n} - \frac{k \times \Delta T}{\exp(k)} \quad (15)$$

式中: $\epsilon$ 表示常量系数,一般可取初始设定温度值; $k$ 为迭代次数; $n$ 为Hill函数系数; $\Delta T$ 为当前温度与上一次温度的差值。

### 2.5 算法流程

首先设定算法的各种参数和终止条件。根据所研究问题的特点,给出概率模型式(13)和概率更新模型函数式(14);然后根据式(12)目标函数计算适应度值,并对适应度值进行最优排序;其次通过设计状态产生函数产生新的邻域,用于产生新的染色体;最后基于模拟退火函数式(15)产生更多优秀的个体,并对其进行适应度值计算,以获得最优解。具体流程如图2所示。

## 3 数值实验

本节研究IEDA求解绿色车间调度,具体包括:(1)算法性能分析;(2)节能调度分析。问题求解之前给出实验设计环境,配置如下: Intel Core i7-6700HQ, 2.6 GHz CPU, 16 GB RAM, Win10 64位操作系统,程序编译和运行环境:为MATLAB R2009a。

### 3.1 性能分析

为了验证IEDA算法性能的有效性,本文对影响算法性能的4个主要参数,即种群大小(NIND)、最大迭代次数(Maxgen)、学习率( $\alpha$ )和Hill系数( $n$ ),进行了敏感性分析,基于田口参数实验方法,最终得到的参数配置情况如下:种群大小NIND=20,最大迭代次数Maxgen=2000,学习率 $\alpha=0.5$ ,Hill系数 $n=2$ 。本文对基准事件进行了测试。本文考虑两类基准事件:(1)Fisher和Thompson设计的事件FT06, FT10和FT20;(2)Lawrence设计的事件LA01-LA40。为便于和文献中相关算法进行了比较,选择最小化完工时间为目标函数,即式(12)中权重设置为 $w=1$ ,实验结果如表2所示。

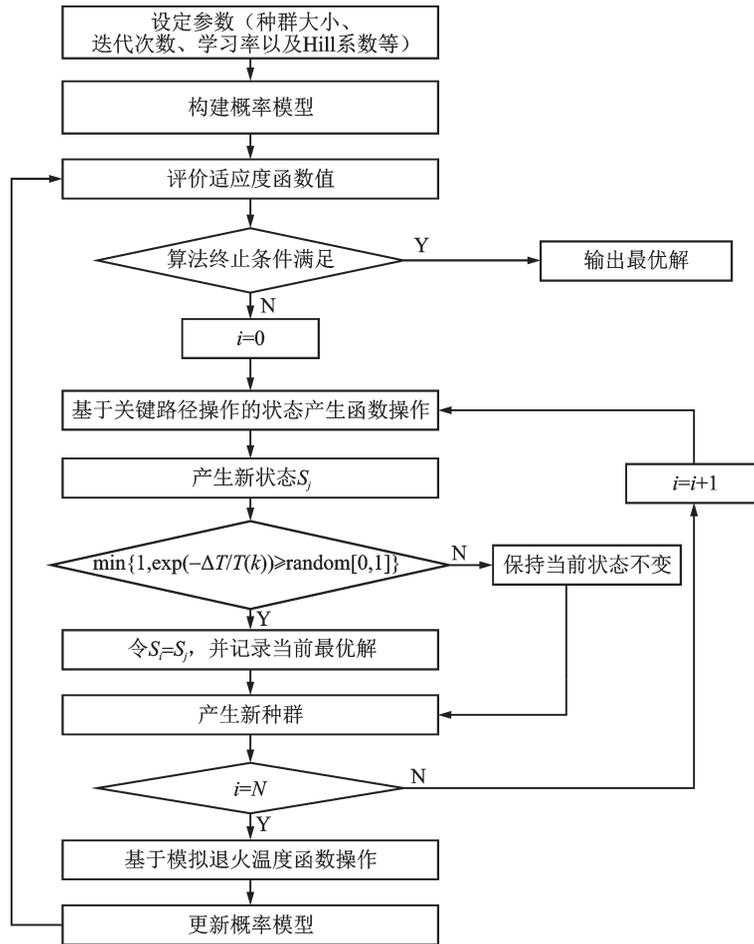


图 2 IEDA 算法流程

Fig.2 Algorithm flow of IEDA

进一步,给出平均相对百分比偏差 ARPD 评估算法的性能,具体为

$$ARPD = \left( \sum_{z=1}^{NIS} \frac{f(z) - S_{best}}{S_{best}} \times 100 \right) / NIS \quad (16)$$

式中: $f(z)$ 表示由某种算法获得的最优结果; $S_{best}$ 表示测试事件的最优解; $NIS$ 表示由算法求解的测试事件的数目。

另外,相对文献中其他算法,定义了由 IEDA 获取的 ARPD 的改进率 IR 来验证算法的有效性,IR 表示为

$$IR = \frac{\text{某一算法的 ARPD} - \text{IEDA 算法的 ARPD}}{\text{某一算法的 ARPD}} \quad (17)$$

根据上述评价指标,由 IEDA 算法和文献中其它算法比较求得的实验结果如表 3 所示。由表 3 可知,IEDA 算法在求解的 43 个事件中平均相对百分比偏差是 0.54,整体优于其他算法,并且和其他算法相比,IEDA 算法的改进率显著。因此所提算法有效,下文将用其求解绿色车间调度问题。

### 3.2 节能调度

为了评估所提模型的节能潜力,本文随机选取上述一个基准事件 FT10 构造生产车间调度情形。考虑到任务在不同机器之间的运输,车间配置足够的 AGV 小车以确保任务的连续加工,AGV 在不同机器之间的运输时间如表 4 所示。同时给出 10 台机器的加工信息如表 5 所示。设置 AGV 的平均功耗为 1.89 kW,整个车间其他辅助设备平均功耗为 1 kW。

设定 AGV 速度分高速、中速和低速 3 种情形,分析 AGV 在不同运输速度下对整个生产车间能耗的影响。根据决策者的偏好考虑权重系数  $w$  分别等于 0, 0.5, 1 时,整个生产车间能耗分布情况,实验统计结果如图 3 所示。

从图 3 中可知:(1)在给定权重系数下,运输阶段产生的能量消耗占整个车间综合能耗的比重随着 AGV 运输速度的提高而降低,并且综合能耗也会随着 AGV 运输速度提高而降低;(2)在给定 AGV 运输速度下,综合能耗  $E$  随着权重系数增大而降低;(3)AGV 运输速度对空闲能耗 IECM 和辅

表2 不同算法获得的实验结果

Table 2 Experimental results obtained by different algorithms

事件 类型	问题 规模	最优 解						GA <sup>[15]</sup>			HGA <sup>[16]</sup>		
			IEDA	EDA <sup>[11]</sup>	EDA-DE <sup>[12]</sup>	SA <sup>[13]</sup>	GA-SA <sup>[14]</sup>	P-GA	SBGA-	SBGA-	HGA-	HGA-No	HGA-
			40	60	Param	n-delay	Active						
FT06	6 × 6	55	55	55	55	55	55	—	—	—	55	55	55
FT10	10 × 10	930	930	937	937	930	930	960	—	—	930	951	945
FT20	20 × 5	1 165	1 165	1 184	1 178	1 165	1 165	1 249	—	—	1 165	1 178	1 173
LA01	10 × 5	666	666	666	666	666	666	666	666	—	666	666	666
LA02	10 × 5	655	655	—	655	655	—	681	666	—	655	665	655
LA03	10 × 5	597	597	—	597	606	—	620	604	—	597	604	603
LA04	10 × 5	590	590	—	590	590	—	620	590	—	590	590	598
LA05	10 × 5	593	593	—	593	593	—	593	593	—	593	593	593
LA06	15 × 5	926	926	926	926	926	926	926	926	—	926	926	926
LA07	15 × 5	890	890	—	890	890	—	890	890	—	890	890	890
LA08	15 × 5	863	863	—	863	863	—	863	863	—	863	863	863
LA09	15 × 5	951	951	—	951	951	—	951	951	—	951	951	951
LA10	15 × 5	958	985	—	958	958	—	958	958	—	958	958	958
LA11	20 × 5	1 222	1 222	1 222	1 222	1 222	1 222	1 222	1 222	—	1 222	1 222	1 222
LA12	20 × 5	1 039	1 039	—	1 039	1 039	—	1 039	1 039	—	1 039	1 039	1 039
LA13	20 × 5	1 150	1 150	—	1 150	1 150	—	1 150	1 150	—	1 150	1 150	1 150
LA14	20 × 5	1 292	1 292	—	1 292	1 292	—	1 292	1 292	—	1 292	1 292	1 292
LA15	20 × 5	1 207	1 207	—	1 207	1 207	—	1 237	1 207	—	1 207	1 207	1 207
LA16	10 × 10	945	945	945	956	956	945	1 008	961	961	945	973	947
LA17	10 × 10	784	784	—	784	784	—	809	787	784	784	792	784
LA18	10 × 10	848	859	—	855	861	—	916	848	848	848	855	848
LA19	10 × 10	842	842	—	852	848	—	880	863	848	842	851	852
LA20	10 × 10	902	902	—	907	902	—	928	911	910	907	926	912
LA21	15 × 10	1 046	1 060	1 071	1 058	1 063	1 058	1 139	1 074	1 074	1 046	1 079	1 074
LA22	15 × 10	927	935	—	952	938	—	998	935	936	935	950	962
LA23	15 × 10	1 032	1 032	—	1 038	1 032	—	1 072	1 032	1 032	1 032	1 032	1 032
LA24	15 × 10	935	948	—	973	952	—	1 014	960	957	953	970	955
LA25	15 × 10	977	989	—	1 000	992	—	1 014	1 008	1 007	986	1 013	1 014
LA26	20 × 10	1 218	1 218	1 257	1 229	1 218	1 218	1 278	1 219	1 218	1 218	1 218	1 237
LA27	20 × 10	1 235	1 270	—	1 287	1 269	—	1 378	1 272	1 269	1 256	1 282	1 280
LA28	20 × 10	1 216	1 218	—	1 275	1 224	—	1 327	1 240	1 241	1 232	1 250	1 250
LA29	20 × 10	1 152	1 200	—	1 220	1 203	—	1 336	1 204	1 210	1 196	1 206	1 226
LA30	20 × 10	1 355	1 355	—	1 371	1 355	—	1 411	1 355	1 355	1 355	1 355	1 355
LA31	30 × 10	1 784	1 784	1 789	1 784	1 784	1 784	—	—	—	1 784	1 784	1 784
LA32	30 × 10	1 850	1 850	—	1 850	1 850	—	—	—	—	1 850	1 850	1 850
LA33	30 × 10	1 719	1 719	—	1 719	1 719	—	—	—	—	1 719	1 719	1 719
LA34	30 × 10	1 721	1 721	—	1 721	1 721	—	—	—	—	1 721	1 721	1 721
LA35	30 × 10	1 888	1 888	—	1 888	1 888	—	—	—	—	1 888	1 888	1 888
LA36	15 × 15	1 268	1 287	1 292	1 315	1 293	1 292	1 373	1 317	1 317	1 279	1 303	1 313
LA37	15 × 15	1 397	1 440	—	1 465	1 433	—	1 498	1 484	1 446	1 408	1 437	1 444
LA38	15 × 15	1 196	1 210	—	1 244	1 215	—	1 296	1 251	1 241	1 219	1 252	1 228
LA39	15 × 15	1 233	1 242	—	1 291	1 248	—	1 351	1 282	1 277	1 246	1 250	1 265
LA40	15 × 15	1 222	1 228	—	1 277	1 234	—	1 321	1 274	1 252	1 241	1 252	1 246

表 3 IEDA 算法和其他算法比较的实验结果

Table 3 Experimental results of IEDA compared with other algorithms

算 法	NIS	ARPD		IR
		其他 算法	IEDA 算法	
EDA <sup>[11]</sup>	11	0.92	0.26	0.72
EDA-DE <sup>[12]</sup>	43	0.80	0.51	0.36
SA <sup>[13]</sup>	43	0.63	0.58	0.08
GA-SA <sup>[14]</sup>	11	0.28	0.26	0.07
P-GA <sup>[15]</sup>	37	4.62	0.60	0.87
SBGA-40 <sup>[15]</sup>	35	1.43	0.66	0.54
SBGA-60 <sup>[15]</sup>	20	1.97	1.09	0.45
HGA-Param <sup>[16]</sup>	43	0.40	0.38	-0.05
HGA-Non-delay <sup>[16]</sup>	43	1.23	0.56	0.54
HGA-Active <sup>[16]</sup>	43	1.12	0.52	0.53

表 4 AGV 在不同机器之间的运输时间

Table 4 Transportation time of AGV between different machines

机器 编号	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$	$M_7$	$M_8$	$M_9$	$M_{10}$
$M_1$	0	152	170	193	100	112	173	165	142	133
$M_2$	152	0	131	138	152	169	120	170	162	143
$M_3$	170	131	0	160	151	140	132	171	122	140
$M_4$	193	138	160	0	140	140	165	170	140	198
$M_5$	100	152	151	140	0	103	102	170	180	192
$M_6$	112	169	140	140	103	0	142	140	148	150
$M_7$	173	120	132	165	102	142	0	150	162	160
$M_8$	165	170	171	170	170	140	150	0	141	120
$M_9$	142	162	122	140	180	148	162	141	0	153
$M_{10}$	133	143	140	198	192	150	160	120	153	0

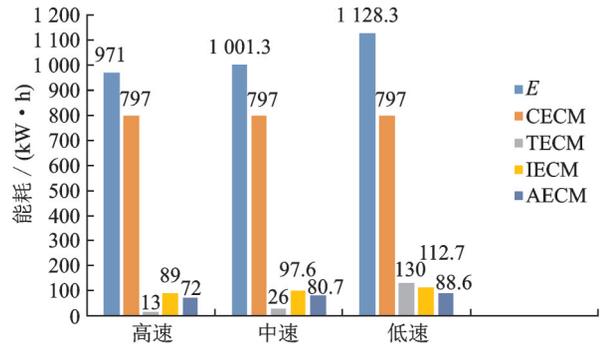
表 5 每台机器的功耗信息

Table 5 Power information of each machine kW

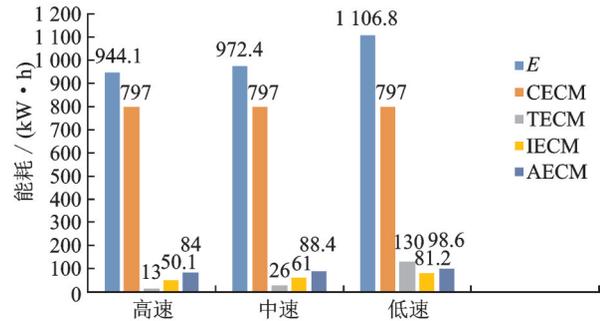
机器 编号	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$	$M_7$	$M_8$	$M_9$	$M_{10}$
额定 功率	20	15	6	12	10	5.5	7.5	3	5.5	10
空载 功率	3.45	2.82	0.84	1.58	1.41	0.55	1.02	0.37	1.16	1.80

助能耗 AECM 均有不同程度影响,如在设定权重系数  $w=0.5$  时,AGV 运输速度由低速调至高速,IECM 减少 38.30%,AECM 减少 14.80%;同时可以计算出综合能耗占比减少 14.70%。因此,决策者可以通过考虑提升 AGV 运输速度来实现车间的节能调度。

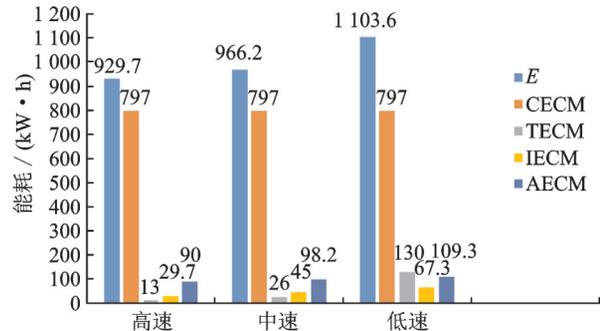
其次,为了验证所提算法在求解上述节能调度



(a) Breakdown of energy consumption of different transportation speeds at  $w=0$



(b) Breakdown of energy consumption of different transportation speeds at  $w=0.5$



(c) Breakdown of energy consumption of different transportation speeds at  $w=1$

图 3 不同运输速度下能耗分解图

Fig.3 Breakdown of energy consumption of different transportation speeds

模型的优越性,提出将 IEDA 算法与分布估计算法 (Estimation of distribution algorithm, EDA) 进行比较。通过设置权重系数  $w$  在  $[0, 1]$  之间变化,求解模型中完工时间和能量消耗目标,实验结果如表 6 所示。同时给出两种算法求出的最优解的分布情况如图 4 所示。

## 4 结 论

本文以绿色作业车间为研究对象,对加工资源和运输资源集成环境下调度优化问题进行了研究。首先建立了机器与 AGV 集成调度下多目标节能调度数学模型;然后提出采用改进的分布估计算法对模型进行了有效求解;最后采用数值实验对

表6 不同权重系数下由IEDA和EDA求得的优化结果

Table 6 Optimization results with different weighted importance by IEDA and EDA

%

$w$	IEDA			EDA			Solution gap		
	$f_1$	$f_2$	$F$	$f_1$	$f_2$	$F$	$f_1$	$f_2$	$F$
0	960.2	971	0.019 6	978.22	990.2	0.029 0	1.88	1.98	32.41
0.1	977.4	969.2	0.035 1	990.28	985.39	0.037 2	1.32	1.67	5.57
0.2	990.13	960.3	0.044 6	1 021.2	982.1	0.050 3	3.14	2.27	11.39
0.3	1 035.17	953.09	0.049 0	1 046.36	980.5	0.058 2	1.08	2.88	15.73
0.4	1 054.78	947.5	0.053 1	1 065.04	978.1	0.063 9	0.97	3.23	16.82
0.5	1 063.2	944.1	0.055 6	1 092.3	974.05	0.067 7	2.74	3.17	17.79
0.6	1 095.06	940.09	0.056 1	1 110.22	970.58	0.068 1	1.38	3.24	17.71
0.7	1 130.4	938.02	0.054 5	1 121.5	968.6	0.065 6	-0.79	3.26	16.90
0.8	1 166.21	935.4	0.048 8	1 150.42	963.4	0.061 5	-1.35	2.99	20.56
0.9	1 183.5	934.11	0.039 7	1 178.2	958.03	0.058 4	-0.45	2.56	31.97
1	1 201.2	929.7	0.023 1	1 219.3	950.2	0.054 3	1.51	2.21	57.56

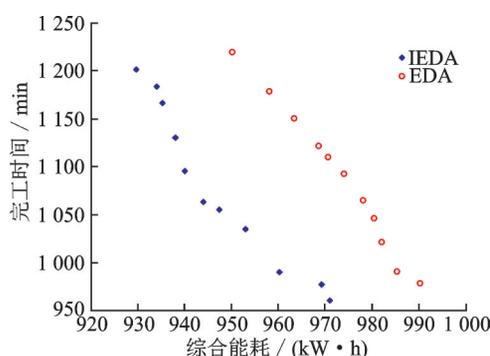


图4 不同权重系数下由IEDA和EDA获取最优解的分布图

Fig.4 Distribution of solutions with different weighted importance by IEDA and EDA

模型和算法进行了验证。通过研究得出如下结论：(1)AGV的运输速度对整个生产车间的综合能量消耗有直接的影响,在设定目标权重下通过考虑提升AGV运输速度可实现整个生产车间的节能调度;(2)企业可以通过交货紧张程度来调节权重系数和AGV速度,在满足交货期的前提下实现节能,这有利于企业在当下节能减排的背景下实现可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 王凌,王晶晶,吴楚格.绿色车间调度优化研究进展[J].控制与决策,2018,33(3):385-391.  
WANG Ling, WANG Jingjing, WU Chuge. Advances in green shop scheduling and optimization[J]. Control and Decision, 2018, 33(3): 385-391.
- [2] AKBAR M, IROHARA T. Scheduling for sustainable manufacturing: A review[J]. Journal of Cleaner

Production, 2018, 205: 866-883.

- [3] 黄志清,唐敦兵,戴敏.基于改进算法的工艺规划与车间调度的双目标优化模型[J].南京航空航天大学学报,2015,47(1):88-95.  
HUANG Zhiqing, TANG Dunbing, DAI Min. Bi-objective optimization model for integrated process planning and scheduling based on improved algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(1): 88-95.
- [4] SAIDI-MEHRABAD M, DEHNAVI-ARANI S, EVAZABADIAN F, et al. An ant colony algorithm (ACA) for solving the new integrated model of job shop scheduling and conflict-free routing of AGVs[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 86: 2-13.
- [5] NOURI H E, BELKAHLA DRISS O, GHÉDIRA K. Simultaneous scheduling of machines and transport robots in flexible job shop environment using hybrid metaheuristics based on clustered holonic multiagent model[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 102: 488-501.
- [6] 王雷,蔡劲草,唐敦兵,等.基于改进遗传算法的柔性作业车间调度[J].南京航空航天大学学报,2017,49(6):779-785.  
WANG Lei, CAI Jincan, TANG Dunbing, et al. Flexible job shop scheduling problem based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(6): 779-785.
- [7] 刘二辉,姚锡凡,陶韬,等.基于改进花授粉算法的共融AGV作业车间调度[J].计算机集成制造系统,2019,25(9):2219-2236.

- LIU Erhui, YAO Xifan, TAO Tao, et al. Improved flower pollination algorithm for job shop scheduling problems integrated with AGVs[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(9): 2219-2236.
- [8] 贺长征, 宋豫川, 雷琦, 等. 柔性作业车间多自动导引小车和机器的集成调度[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(4): 438-447.
- HE Changzheng, SONG Yuchuan, LEI Qi, et al. Integrated scheduling of multiple AGVs and machines in flexible job shops[J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(4): 438-447.
- [9] LU C, GAO L, LI X, et al. Energy-efficient permutation flow shop scheduling problem using a hybrid multi-objective backtracking search algorithm[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 144: 228-238.
- [10] LIU Z, GUO S, WANG L. Integrated green scheduling optimization of flexible job shop and crane transportation considering comprehensive energy consumption [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 765-786.
- [11] HE X J, ZENG J C, XUE S D, et al. An efficient estimation of distribution algorithm for job shop scheduling problem[C]//*Proceedings of the First International Conference on Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing, SEMCCO 2010*. Chennai, India: DBLP, 2010: 656-663.
- [12] ZHAO F, SHAO Z, WANG J, et al. A hybrid differential evolution and estimation of distribution algorithm based on neighbourhood search for job shop scheduling problems[J]. *International Journal of Production Research*, 2016, 54(4): 1-22.
- [13] LAARHOVEN P J M V, AARTS E H L. Job shop scheduling by simulated annealing[J]. *Operations Research*, 1992, 40(1): 113-125.
- [14] WANG L, ZHENG D Z. An effective hybrid optimization strategy for job-shop scheduling problems [J]. *Computers & Operations Research*, 2001, 28(6): 585-596.
- [15] DORNDORF U, PESCH E. Evolution based learning in a job shop scheduling environment[J]. *Computers & Operations Research*, 1995, 22(1): 25-40.
- [16] PARK B J, CHOI H R, KIM H S. A hybrid genetic algorithm for the job shop scheduling problems [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2003, 45(4): 597-613.

(编辑:刘彦东)