

基于和声搜索算法的 RGV 动态调度优化模型

王志刚, 郭钰卓, 周启昕, 张博涵

(海南大学理学院, 海南海口, 570228)

摘要: 本文以 2018 年全国大学生数学建模竞赛 B 题为例, 针对 RGV 车间调度的具体案例, 采用和声搜索算法和遗传算法, 建立了 RGV 动态调度模型, 解决车间 CNC 最优排布问题和 RGV 最短路径问题, 得到了一个班次的 RGV 动态调度策略, 以优化工业生产的实际过程。并代入 3 组系统作业参数, 验证了模型的实用性和算法的有效性。

关键词: RGV 的动态调度, 和声搜索算法, 遗传算法

中图分类号: O141.4 **文献标志码:** A

随着当代工程制造技术的发展, 全面自动化、智能化是未来制造业的发展方向。在工程制造过程的各个环节几乎都广泛应用了各种优化的数学模型, 这些模型可以用于工程设计, 工艺过程设计, 生产调度, 故障诊断等^[1-3]。现如今, 越来越多的企业利用轨道式自动引导车 (Rail Guide Vehicle, RGV) 在车间内运输计算机数控机床 (Computer Number Controller, CNC) 上所加工的材料。2011 年, Minis 和 Tatarakis^[4]提出一种动态编程算法, 以小车拾取物品的路径成本为目标进行优化; Soyly 等^[5]人开发了一种基于人工神经网络算法, 以寻求执行拾取和传递请求的单个多容量 AGV 的最短路径; 刘永强、张富生等^[6-7]设计了基于遗传算法的 RGV 动态调度研究, 通过对比运用改进的遗传和运用基本遗传算法求解模型得到的仿真结果; Gultekin 等^[8]开发了机器人单元调度问题的数学模型, 他们认为这个问题是一个特殊的旅行商问题 (TSP)。Nejad 等^[9]开发了一种模拟退火算法来研究机器人将材料转移到机器上的问题, 考虑了机器人单元的调度问题, 同时也确定了行动的顺序。然而, 以上文献在研究 RGV 的调度问题时, 均采用了单目标优化模型, 这不能完全满足实际生产系统的要求。本文以 2018 年全国大学生数学建模 B 题为例, 以解决未加工生料需要两道工序的物料加工完成, 且每个物料的第一和第二道工序分别由两台不同的 CNC 依次加工完成的具体情况为例, 提出一种改进的基于和声搜索算法的 RGV-CNC 动态调度模型, 得出相应的求解算法, 代入作业参数, 并验证了模型的实用性和算法的有效性。

1、RGV-CNC 动态调度模型

本文的具体案例为未加工生料需要两道工序的物料加工完成, 由于不同的工序需要有不同的 CNC 安装不同的刀具分别加工完成, 且在加工过程中不能更换刀具, 第一和第二道工序需要在不同的 CNC 上依次加工完成, 这就存在一个最优排布问题和一个最短路径问题。

收稿日期: 2019-03-01

基金项目: 海南省科协青年科技英才创新计划项目 (QCXM201806); 海南省自然科学基金 (118MS002)

作者简介: 王志刚 (1968-), 男, 湖北罗田人, 海南大学数学系教授, 研究方向: 随机分析及其应用。

郭钰卓 (1997-), 女, 浙江宁波人, 海南大学数学系, 数学与应用数学。

为解决最优排布问题，采用和声搜索算法。和声搜索（Harmony Search）算法是一种新颖的智能优化算法，是 2001 年由韩国学者 Geem Z.W 等^[10]提出的，在很多领域表现出比遗传算法，模拟退火算法和禁忌搜索更好的性能^[11-15]。RGV 的动态调度问题是一个离散的优化问题，RGV 的每次运动都可看成是一个局部运动，而要得到的结果是全局性的，和声搜索算法即采用局部最优逐渐逼近全局最优，这大大缩小了解空间中的搜索范围，且具有较快的收敛速度。

对于本文的具体案例，要想在一个班次的时间范围内尽可能多的得到成品，可以将时间周期化，即以 8 台 CNC 均经历过一次完整的加工作业定义为一个周期，该周期时间最少，说明完成固定成品数所用的时间最少，则在一个班次便可以完成较多的成品，因此将问题转化为如何排布可以使一个周期的时间最少的优化问题。其中，排布问题包括两个方面：确定完成一、二两道工序的 CNC 的数量比例；确定此比例下 CNC 的分布位置。即需要同时考虑着两个方面的问题使得一个周期的时间最小。此外，为保证模型的通用性，本文建立的模型，均采用参数建模，再通过数值模拟进行验证。

首先，建立目标函数为：

$$\text{Min } f(x) = n_1 t_1 + n_2 t_2 \quad (1)$$

(1)式中， $\text{Min } f(x)$ 是作业一个周期的最小时间， n_1 表示完成第一道工序的 CNC 数量， n_2 表示完成第二道工序的 CNC 数量， t_1 表示完成第一道工序所需要的时间， t_2 表示完成第二道工序所需要的时间。

对于完成第一道工序的 CNC，下料开始时间与上料开始时间之差至少应等于 RGV 的移动时间、一次上下料时间长度与加工一个物料时间长度之和，第二道工序的 CNC 与第一道工序的 CNC 相同，对于 RGV 的作业时间，存在一个循环迭代过程，即完成第 k 个物料的第一道工序后，立刻开始第 $k+1$ 个物料的第一道工序，接着 RGV 进行移动，对第 k 个物料进行第二道工序。此处选用坐标的方法来量化 RGV 的位置，规定 1 号 RGV 的位置为原点坐标 $(0,0)$ ，左右两个相邻的 RGV 的距离设为一个单位，上下两个相邻的 RGV 的距离设为一个单位。相应的， $\text{pos}(x_0)$ 为 RGV 的初始位置。因此可得到如下关系式：

$$wT_i = \begin{cases} T_{\text{initial}} - T_{\text{Service}}(x_1) + \frac{\text{abs}(\text{pos}(x_1) - \text{pos}(x_0))}{V_{\text{RGV}}} + rT + sT & , i = 1 \\ T_{\text{Service}}(x_{i-1}) - T_{\text{Service}}(x_i) + \frac{\text{abs}(\text{pos}(x_i) - \text{pos}(x_{i-1}))}{V_{\text{RGV}}} + wT(x_{i-1}) + sT & , i \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\overline{wT} = \frac{\sum_{i=1}^n wT(x_i)}{n} \quad (3)$$

$$pos(x_0) = pos(RGV) \quad (4)$$

(2)式中, wT_i 是 CNC 的平均等待时间, 考虑到 CNC 的加工时间远大于 RGV 移动、RGV 进行一次上下料和对工件进行清洗作业的时间, 一个周期过后, RGV 将回到起始位置 $pos(x_0)$, 等待相应 CNC 的呼叫需求, 因此可以消除等待时间。设 $T_{Service}(x_i)$ 表示物料的服务时间, 包括对物料进行一次下料、加工、一次下料、清洗作业四个环节。 V_{RGV} 表示 RGV 的平均移动速度, rT 表示 CNC 完成一次下料的时间, sT 表示 CNC 完成一次上料的时间, $T_{initial}$ 为设定的初始时间为 28800 秒 (8 小时, 即一日内的工作时长), 虽然一个周期的时间远远小于一个班次的工作时间, 但由于无法确定一个周期所需的工作时间, 这里只能选取时间的上限, 设 $pos(x_i)$ 表示呼叫 CNC 所处位置, $pos(RGV)$ 表示当前 RGV 的位置。

由于 CNC 的总台数为 8 台, 且应该为正整数, 因此得到如下约束条件:

$$\begin{cases} n_1 + n_2 = 8 \\ 1 \leq n_1 \leq 8 \\ 1 \leq n_2 \leq 8 \\ n_1, n_2 \in N^* \end{cases} \quad (5)$$

综合目标函数和相应约束条件得到基于和声搜索算法的最优排布模型:

$$\text{Min } f(x) = n_1 t_1 + n_2 t_2$$

$$\left. \begin{aligned}
 &wT_i = \begin{cases} T_{initial} - T_{Service}(x_1) + \frac{abs(pos(x_1) - pos(x_0))}{V_{RGV}} + rT + sT, & i=1 \\
 T_{Service}(x_{i-1}) - T_{Service}(x_i) + \frac{abs(pos(x_i) - pos(x_{i-1}))}{V_{RGV}} + wT(x_{i-1}) + sT, & i \geq 2 \end{cases} \\
 &s.t. \left\{ \begin{aligned}
 &\bar{wT} = \frac{\sum_{i=1}^n wT(x_i)}{n} \\
 &pos(x_0) = pos(RGV) \\
 &n_1 + n_2 = 8 \\
 &1 \leq n_1 \leq 8 \\
 &1 \leq n_2 \leq 8 \\
 &n_1, n_2 \in N^*
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}
 \right.$$

为解决最短路径问题，采用遗传算法。遗传算法是基于生物进化论中优胜劣汰思想来寻找全局最优解的一种概率优化算法^[16-17]。该算法最初是参照进化生物学中的一些现象演化和发展而来，其包括选择、交叉和变异等过程，运行时通过迭代，使用交叉算子和变异算子打破局部最优，从而获得全局最优。

针对本文具体案例，可将 RGV 动态调度问题抽象为旅行商问题（TSP），要求 RGV 在一个周期内下料的效率最高，即求 RGV 经历所有 CNC 所需的时间最短，得到代价度量函数：

$$g(i, j) = w_1 t_1 + w_2 t_2 + w_3 t_3 \quad (6)$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1 \quad (7)$$

(6)式中， w_i 为 t_i 所占权重， t_1 是 RGV 为 CNC 一次上下料所需的时间， t_2 是 RGV 一次移动过程所花费时间， t_3 是完成一个物料的清洗作业时间。计算出每个 $g(i, j)$ 填写邻接矩阵，求出最短路径。

在本文中首先确定决策变量及其约束条件：

$$X = \{CNC1, CNC2, CNC3, CNC4, CNC5, CNC6, CNC7, CNC8\} \quad (8)$$

特别的，在一个周期的路程中，每个 CNC 只能被遍历一次，即 $table[i, j]$ 中的 i, j 互不相等。由上述约束建立优化模型：

$$Min f(x) = dist(CNC2, CNC1) + \sum dist(CNCi, CNCj) + dist(CNCj, CNC2) \quad (9)$$

用随机数随机生成若干组元素各异的 1-8 的数据串，采用十进制编码，随机选取各串中

的两个交叉点并将交叉点中间的基因数据子串互换，将互换的基因段以外的部分与互换后基因段中元素冲突的用另一父代的相应位置替代，直到没有冲突发生为止。经过多次实验仿真模拟，最终确定群体大小 $N=80$ ，终止代数 $ger=200$ ，交叉概率 $pc=0.9$ ，变异概率 $pm=0.1$ ，选择时的保留比例 $ps=0.6$ 。如图 1.1 所示。

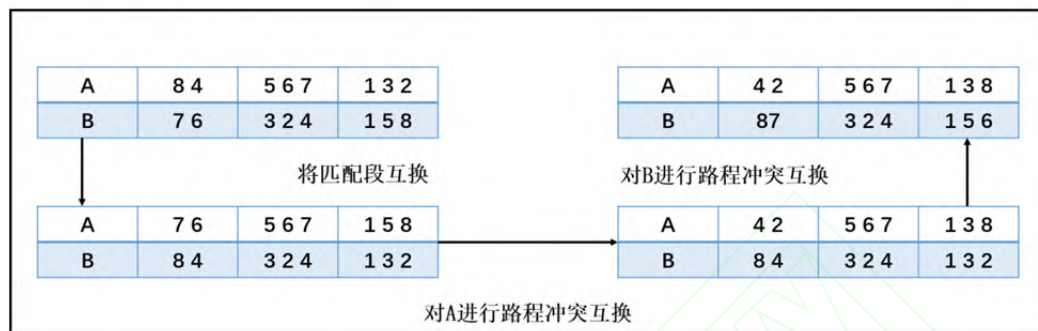


图 1.1 用遗传算法求解的 TSP 过程

2、具体作业参数求解

按上述和声搜索算法思想可编写出 MATLAB 程序，来解决最优排布问题，依次代入 3 组系统的作业参数，可以分别得到完成第一道工序和第二道工序的 CNC 数量，如表 2-1 所示，和相应 CNC 的分布，如图 2.2 所示。

表 2-1 CNC 最优排布表

所需 CNC 数	第 1 组	第 2 组	第 3 组
第一道工序	4	3	5
第二道工序	4	5	3

由表 2-1 可以清晰地看出每组数据对应的完成第一道工序和做第二道工序所需的 CNC 数量有明显不同，这与 CNC 加工完成第一道工序所需时间和完成第二道工序所需时间的多少有直接关系，若完成第一道工序所需时间与完成第二道工序时间大致相同时，完成两道工序所需 CNC 数量也相同，若完成第一道工序所需时间远小于完成第二道工序所需时间，完成第一道工序的 CNC 数就相应减少，反之亦然。这样便很好地解决了最优排布问题，该部分算法收敛速度曲线如图 2.1。从中可以看出和声搜索算法具有较快的收敛速度。

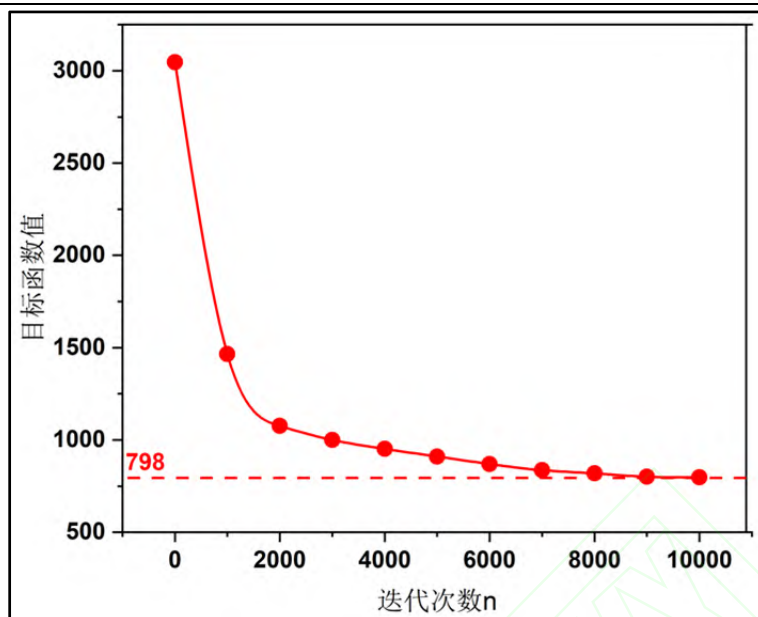


图 2.1 和声搜索算法收敛速度曲线图

由上述遗传算法的思想, 可以通过 Dev-C++ 编写 C 程序, 来解决最短路径问题, 依次代入 3 组系统的作业参数, 可以输出对应的三条路径。结合完成第一道工序和做第二道工序所需的 CNC 数量和分布情况, 可得到最短路径示意图, 如图 2.2 所示。过程中 RGV 需先对完成工序 1 的 CNC 进行上料, 等待工序 1 完成后再选择完成工序 2 的 CNC 进行加工。

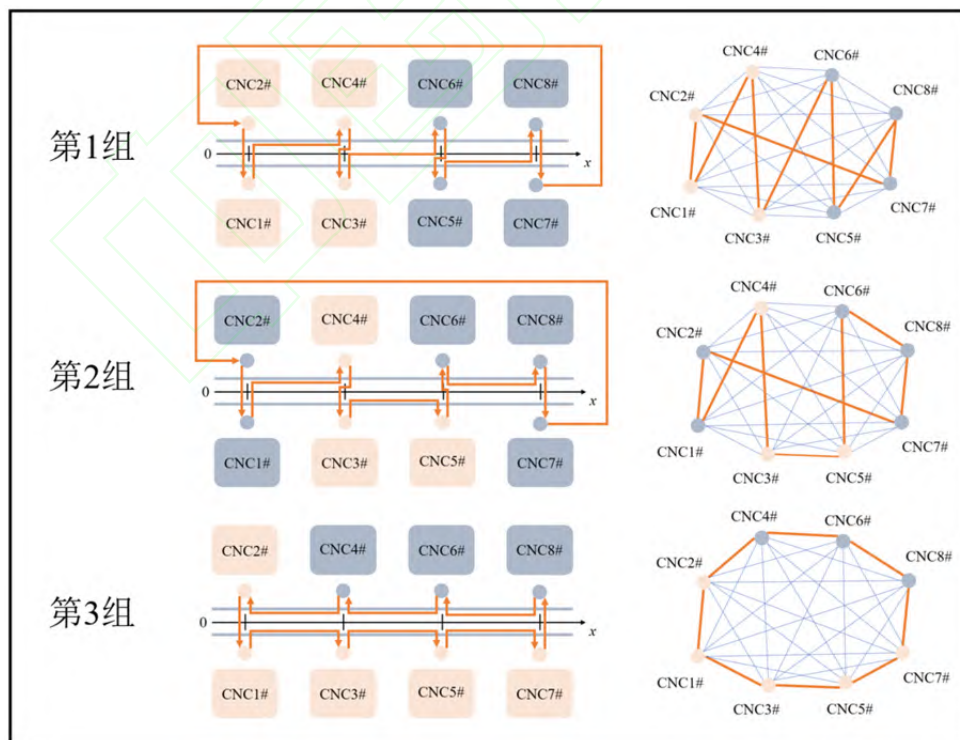


图 2.2 最短路径示意图

接着, 可通过 MATLAB 编写程序, 得到一个周期内 RGV 的动态调度策略数据, 如表 2-2

所示（以第一组数据为例）。从表 2-3 中可以清晰地看出一个工作周期完成两道工序的 CNC 的编号以及其上、下料开始时间，对应得到 RGV 的动态调度策略，在这个周期能加工的成品数量为 4 个。

表 2-2 工作周期时间表

加工物料 序号	工序 1 的 CNC 编号	上料开始 时间	下料开始 时间	工序 2 的 CNC 编号	上料开始 时间	下料开始 时间
1	2	0	415.5	6	415.5	1124
2	1	15.5	512.5	5	528	1274
3	4	49.5	593.5	8	643	1411
4	3	65	690.5	7	755.5	1575

因得到的数据为一个周期内的完成工序 1、2 的 CNC 上、下料开始时间的数据，下面采用 SPSS 函数拟合的方法得到拟合函数，预测出一个班次的 CNC 上、下料开始的时间数据，从而得到 RGV 在一个班次内的动态调度策略，具体拟合函数可见表 2-4。表 2-3 中， x_i 表示对应一个周期内 CNC 上、下料开始的时间。再利用 MATLAB 中的 find 函数，可以找到下料结束时间不超过 28800 的数据对应的物料编号，从而得到 3 组不同的系统作业参数的作业效率依次为每班次 187、214、238 个成品。

表 2-3 第一组拟合函数表

数据列	拟合函数
工序 1 的 CNC 上料开始时间	$y_1 = -348.78 + 153.883x_1$
工序 2 的 CNC 下料开始时间	$y_2 = -348.78 + 153.883x_2$
工序 1 的 CNC 上料开始时间	$y_3 = -498.893 + 269.56x_3$
工序 2 的 CNC 下料开始时间	$y_4 = 937.5 + 149x_4$

3、算法有效性验证

为验证本算法的有效性，本节采用单因素敏感性分析法^[18-19]，即单个不确定因素的变动对方案经济效果的影响所作的分析。在上文给出的模型中，影响 RGV 运行的各个系统作业参数也可看作互相独立的单个不确定因素，以研究这些因素对一条生产线上的日加工零件数的敏感性，是典型的基于偏微分模型思想的单因素敏感性分析的变形与升华，即在计算某个因素的变动对研究目标指标的影响的时候，假设各个因素相互独立，且除变动因素外的其它因素均不发生变化。

在确定各个因素的敏感度时，本模型采用相对测定法，即设定要分析的因素均从第一组因素开始变动，计算各因素变动的幅度，比较各因素的变动对目标指标变动的影响，据此判断方案目标指标对各因素变动的敏感程度。本模型将日完成加工的工件数为目标指标，其中各系统作业参数的参数值与变化值如表 3-1 所示。

表 3-1 各系统作业参数的参数值与变化值数据表

系统作业参数		1	2	3	4	5	6	7	8	完成工 件数
第 1 组	参数值	20	33	46	400	378	28	31	25	187
	变化率	23	41	59	280	500	30	35	30	214
第 2 组	参数值	15.00%	24.24%	28.26%	30.00%	32.28%	7.14%	12.90%	20.00%	1.12%
	变化率	18	32	46	455	182	27	32	25	238
第 3 组	参数值	10.00%	3.03%	0.00%	13.75%	51.85%	3.57%	3.23%	0.00%	5.06%
	变化率									

*系统作业参数指标：

- 1 - RGV 移动 1 个单位所需时间；
- 2 - RGV 移动 2 个单位所需时间；
- 3 - RGV 移动 3 个单位所需时间；
- 4 - CNC 加工完成一个两道工序物料的第一道工序所需时间；
- 5 - CNC 加工完成一个两道工序物料的第二道工序所需时间；
- 6 - RGV 为 CNC1#，3#，5#，7#一次上下料所需时间；
- 7 - RGV 为 CNC2#，4#，6#，8#一次上下料所需时间；
- 8 - RGV 完成一个物料的清洗作业所需时间，本节内下同，本表中所有变化率均取绝对值。

由 Origin 2018 软件对上述 8 个指标变化率对日完成加工工件数作函数关系图，如图 3.1。图上直线的斜率的绝对值越大，证明该目标指标对该因素的灵敏度越高，其中当斜率大于 1 时可认为方案目标指标对该因素的变动敏感。

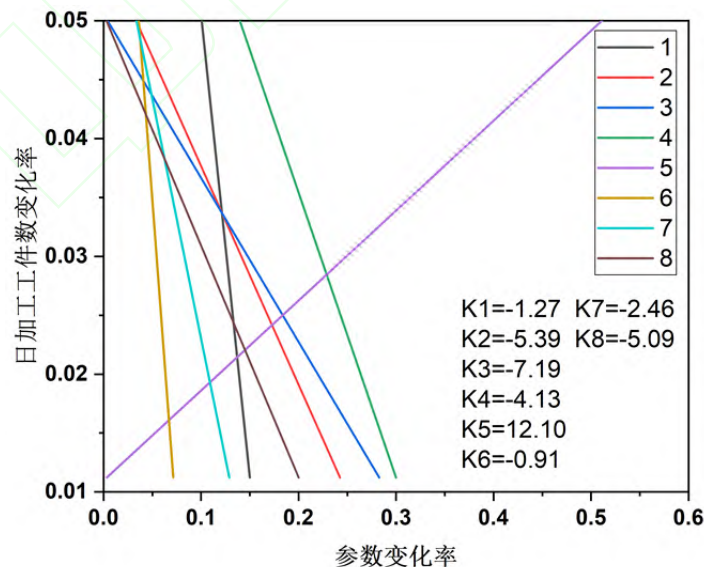


图 3.1 不确定因素相对变化幅度图

分析可见，整体敏感度都保持一个较高的水平，则验证该算法得出的结果具有较高的有

效性, 其中仅有因素“RGV 为 CNC1#, 3#, 5#, 7#一次上下料所需时间”的敏感度偏低, 其余七个因素均对目标指标十分敏感, 故在整体上验证了本情况中所给出的算法具有较高的有效性。

参考文献

- [1] Shehzad N, Zeeshan A, Ellahi R, et al. Convective heat transfer of nanofluid in a wavy channel: Buongiorno's mathematical model[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, 222: 446-455.
- [2] Bourne D W A. Mathematical modeling of pharmacokinetic data[M]. Routledge, 2018.
- [3] Sheremet M A, Pop I, Rahman M M. Three-dimensional natural convection in a porous enclosure filled with a nanofluid using Buongiorno's mathematical model[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 82: 396-405.
- [4] Minis I and Tatarakis A. Stochastic single vehicle routing problem with delivery and pick up and a predefined customer sequence. *Eur J Oper Res* 2011; 213: 37-51.
- [5] Soylu M, Ozdemirel NE and Kayaligil S. A self-organizing neural network approach for the single AGV routing problem. *Eur J Oper Res* 2000; 121: 124-137.
- [6] 刘永强. 基于遗传算法的 RGV 动态调度研究[D]. 合肥工业大学, 2012.
- [7] 张富生. 基于遗传算法的车间动态调度研究[D]. 山东大学, 2013.
- [8] Gultekin H, Karasan OE and Akturk MS. Pure cycles inflexible robotic cells. *Comput Oper Res* 2009; 36: 329-343.
- [9] Nejad MG, Guden H, Vizva' ri B, et al. A mathematical model and simulated annealing algorithm for solving the cyclic scheduling problem of a flexible robotic cell. *Adv Mech Eng* 2018; 10: 1-12.
- [10] Geem Z H, Kim J H, Loganathan G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search[J]. *Simulation*, 2001, 76(2): 60-68.
- [11] Geem Z W, Yoon Y. Harmony search optimization of renewable energy charging with energy storage system[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, 86: 120-126.
- [12] Gao K Z, Suganthan P N, Pan Q K, et al. Discrete harmony search algorithm for flexible job shop scheduling problem with multiple objectives[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2016, 27(2): 363-374.
- [13] Papa J P, Scheirer W, Cox D D. Fine-tuning deep belief networks using harmony search[J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 46: 875-885.
- [14] Wang G G, Gandomi A H, Zhao X, et al. Hybridizing harmony search algorithm with cuckoo search for global numerical optimization[J]. *Soft Computing*, 2016, 20(1): 273-285.
- [15] Ambia M N, Hasanien H M, Al-Durra A, et al. Harmony search algorithm-based controller parameters optimization for a distributed-generation system[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(1): 246-255.

- [16] Qiu M, Ming Z, Li J, et al. Phase-change memory optimization for green cloud with genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 64(12): 3528-3540.
- [17] Kadri R L, Boctor F F. An efficient genetic algorithm to solve the resource-constrained project scheduling problem with transfer times: The single mode case[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 265(2): 454-462.
- [18] Bates J, Teh I, McClymont D, et al. Monte Carlo simulations of diffusion weighted MRI in myocardium: validation and sensitivity analysis[J]. IEEE transactions on medical imaging, 2017, 36(6): 1316-1325.
- [19] Bates J, Teh I, McClymont D, et al. Monte Carlo simulations of diffusion weighted MRI in myocardium: validation and sensitivity analysis[J]. IEEE transactions on medical imaging, 2017, 36(6): 1316-1325.

RGV dynamic scheduling optimization model based on harmony search algorithm

Wang Zhi-gang, Guo Yu-zhuo, Zhou Qi-xin, Zhang Bo-han

School of science, Hainan university, Haikou, Hainan, 570228

Abstract: This article takes the 2018 National College Students Mathematical Modeling Contest B as an example. For the specific case of RGV workshop scheduling, the RGV dynamic scheduling model is established by using the harmony search algorithm and genetic algorithm. Solving the optimal layout problem of the CNC in the workshop and the shortest path problem of RGV, the RGV dynamic scheduling strategy of a shift was obtained to optimize the actual process of industrial production. And the three sets of system operation parameters are substituted, which verifies the practicability of the model and the effectiveness of the algorithm.

Keywords: RGV dynamic scheduling, harmony search algorithm, genetic algorithm