

doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2023.04.011

基于量子蚁群算法的智能制造调度问题研究

吴昌钱¹, 黄 锐², 罗志伟³

(1. 闽南科技学院计算机信息学院, 福建 泉州 366200)

(2. 北京理工大学计算机学院, 北京 100081)

(3. 厦门大学机电学院, 福建 厦门 361000)

[摘要] 近年来, 工业互联网技术逐渐得到普及, 复杂构件生产车间的制造环境逐渐复杂化, 提出一种基于量子蚁群算法的智能制造调度方案(QACA-AMJSP)。首先, 结合智能制造车间的特点, 构建了相应的车间调度数学模型。然后, 将量子计算与模拟自然界蚁群行为的蚁群算法相结合求解智能制造车间调度问题, 利用量子比特表示信息素并以量子旋转门更新, 保留了量子计算的高效性, 提高了蚁群全局寻优能力, 避免了蚂蚁易陷局部最优解问题。实验结果表明, 相比粒子群优化算法和遗传算法, 量子蚁群算法对解决智能制造车间调度问题具有较高的搜索效率和较快的收敛速度。

[关键词] 车间调度, 智能制造, 量子计算, 蚁群算法, 全局搜索

[中图分类号] TP301 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2023)04-0074-06

Research on Intelligent Manufacturing Scheduling Problem Based on Quantum Ant Colony Algorithm

Wu Changqian¹, Huang Rui², Luo Zhiwei³

(1. College of Computer and Information Engineering, Minnan Science and Technology University, Quanzhou 362000, China)

(2. School of Computer Science & Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361000, China)

Abstract: In recent years, the industrial Internet technology has been gradually popularized, and the manufacturing environment of complex component production workshop has gradually become complicated. This paper proposes an intelligent manufacturing scheduling scheme based on quantum ant colony algorithm(QACA-AMJSP). Firstly, according to the characteristics of aviation manufacturing workshop, the corresponding workshop scheduling mathematical model is constructed. Then, quantum computing and ant colony algorithm, which simulates the behavior of ant colony in nature, are combined to solve the scheduling problem of aviation manufacturing workshop. Quantum bits are used to represent pheromones and are updated by quantum revolving doors, which keeps the efficiency of quantum computing, improves the global optimization ability of ant colony, and avoids the problem that ants are easily trapped in local optimal solutions. The experimental results show that, compared with particle swarm optimization algorithm and genetic algorithm, quantum ant colony algorithm has higher search efficiency and faster convergence speed for solving the aviation manufacturing workshop scheduling problem.

Key words: workshop scheduling, smart manufacturing, quantum computing, ant colony algorithm, global search

随着我国科技的迅速发展, 带动了高端制造业市场, 相关设施装备的需求量也逐渐扩大。先进的大型机械设备由各个重要的构件组成, 这些构件的制造工艺复杂且加工精度非常高, 因此, 构件的制造过程是高端制造业的关键之处。

精密复杂构件的生产模式特点是典型的生产品种多, 每种品种加工数量较少, 交货周期长, 成本高。而且, 精密复杂构件的制造工艺较为复杂, 且加工的精度较高, 加工工序不同, 并且工件间无约束, 但

收稿日期: 2022-06-21.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61871204)、福建省自然科学基金面上项目(2019J01863)、福建省教育科学“十三五”规划项目(FJJKCG20-014)、福建省本科教育教学改革研究项目(FBJG20200327)、新工科重点建设项目(MKXGK-2021-02)。

通讯作者: 吴昌钱, 博士, 副教授, 研究方向: 人工智能与大数据, 物联网技术。E-mail: wuchangqian@mku.edu.cn

同一工件的工序有顺序^[1]. 由此可见,制造车间调度问题(Aviation Manufacturing Job Shop Scheduling Problem, AMJSP)的特点与作业车间调度问题(Job Shop Scheduling Problem, JSP)的特点近似相等,因此,本文将 AMJSP 考虑为 JSP. JSP 对高端制造业的发展和进步的作用至关重要,如今的科技已较为发达,从而车间调度问题也逐渐复杂化,而传统模式车间调度方案已经无法高效解决 JSP 问题,因此相应的各种求解车间调度问题的智能算法应运而生,例如遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)等.

崔琪等^[2]为了求解混合流水车间调度问题,提出了利用变邻域搜索的方式来改进 GA,该方案可有效求解车间调度问题,但其收敛速度较慢. 刘洪铭等^[3]提出了一种改进 PSO 算法的方案,该算法基于自适应权重,提高了粒子利用率,加入了混沌以平衡全局与局部,但其容易丢失种群多样性. 刘胜辉等^[4]提出了一种双禁忌表禁忌搜索算法,该算法避免了在搜索中容易出现循环的情况,提高了寻优能力. 黄海松等^[5]提出了一种改进模拟退火算法以求解双目标柔性 JSP,该算法融合搜索与编码方法提高了运行速度,避免了传统的模拟退火算法陷入早熟,提高了算法的全局寻优能力. 施文章等^[6]提出一种退火下布谷鸟算法求解 JSP 问题方案,该方案改善了种群的多样性. 上述智能算法各有各的特点,以不同程度的效率解决 JSP 问题,但是随着车间调度问题的复杂化加上算法的某些局限性,还需进一步对算法进行优化.

综上所述,本文根据复杂构件制造车间的特点,结合量子计算和蚁群算法提出一种基于量子蚁群算法的智能制造车间调度问题方案,该方案保留了量子计算的高效性,提高了蚁群全局寻优能力,避免了蚂蚁易陷局部最优解问题.

1 车间调度问题描述及数学模型

1.1 智能制作业车间调度问题描述

在智能制作业车间调度问题 AMJSP 当中,根据每个工件和每台机器的信息特点,研究如何安排 n 个工件在 m 台机器上的加工的顺序,使得最大完工时间最小. 其加工过程中的基本假设和约束条件为:

- (1) 加工时,不考虑员工、机器、用电等意外因素;
- (2) 计算加工时间,不加入材料运输、工件设备安装拆卸等时间;
- (3) 工件的设计工艺都是提前确定好的,都是零时刻到达;
- (4) 工件工序按照工序顺序加工且过程不中断,对应的机器都是提前确定好的;
- (5) 一个机器同时只对一个工件的一道工序且该工序只能由该机器完成.

1.2 数学模型

基于上述问题描述和约束条件,建立 JSP 的数学模型,并构造相应的矩阵. 从上述描述可知,一般概括有 n 个工件, m 台机器,每个工件最多有 m 道工序,则对 JSP 问题的参数的集合分别有:

(1) n 个工件的工序集合为 $J = (J_1, J_2, \dots, J_n)^T$, 其中 $J_i = (j_{i1}, j_{i2}, \dots, j_{ik}, \dots, j_{im})^T, i \in [1, n], k \in [1, m], j_{ik}$ 表示第 i 个工件的第 k 道工序. 相应地,工件的工序排列矩阵 J :

$$J = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} & \cdots & j_{1m} \\ j_{21} & j_{22} & \cdots & j_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ j_{n1} & j_{n2} & \cdots & j_{nm} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

(2) n 个工件加工使用的机器集合为 $M = (M_1, M_2, \dots, M_n)^T$, 其中 $M_i = (m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{ik}, \dots, m_{im}), i \in [1, n], k \in [1, m], m_{ik}$ 表示为第 i 个工件的第 k 道工序所加工的机器. 相应地,工序所需机器的加工机器矩阵 M_j 为:

$$M_j = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1m} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nm} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

(3) n 个工件的各个工序加工时间的集合为: $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)^T$, 其中 $T_i = (t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{ik}, \dots, t_{im}), i \in$

$[1, n], k \in [1, m], t_{ik}$ 表示第 i 个工件的第 k 道工序加工所需要的时间. 相应地, 工序的加工时间矩阵 T_j 为:

$$T_j = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1m} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ t_{n1} & t_{n2} & \cdots & t_{nm} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

综上所述, 在智能制造车间调度问题中, 给定工件的工序矩阵和相应的生产时间矩阵, 求出最短生产时间的目标函数公式定义为:

$$\min[\max(T_x)]. \quad (4)$$

根据上述的约束条件和矩阵, 可得出相应的约束公式为:

$$C_{ij} - K_{ij} - t_{ij} = 0, \quad (5)$$

式中, $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$. 式(5)对应的约束条件是工件工序对应的机器是确定的, 按照工序顺序加工且过程不中断. C_{ij} 是指工件的完工时间.

$$K_{ij} + t_{ij} \leq K_{i(j+1)}, \quad (6)$$

式中, $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$. 式(6)对应的约束条件是加工的工序按着一定的顺序开始进行.

$$K_{ij} + t_{ij} \leq K_{weq}, \quad (7)$$

式中, $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$. 式(7)对应的约束条件是一个机器同时只能进行一个工件的一道工序且该工序只能由该机器完成. K_{weq} 是指加工 w 工件的第 e 道工序在机器 q 上的进行生产的开始时间.

2 量子蚁群算法的优化机理

量子蚁群算法(Quantum Ant Colony Algorithm, QACA)是由量子计算和蚁群算法结合而成的, 以量子计算^[7-9]为基础, 可以提高蚁群全局寻优能力, 避免蚂蚁易陷局部最优解问题.

2.1 量子计算

在 QACA 中, 量子比特对信息素进行编码, 它是一个二维复向量空间中由标准正交基 $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ 所组成的向量单位, 其状态可表示为 $|\psi\rangle = |\alpha\rangle + |\beta\rangle$, 其中 α 和 β 满足 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, 表示 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的概率幅. 通过利用量子旋转门来改变相位可以实现对量子比特的状态改变, 其表示式为(8):

$$\begin{pmatrix} \alpha'_i \\ \beta'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中, $i \in [1, m], (\alpha_i \ \beta_i)^T$ 表示第 i 个量子位的概率幅, 量子比特的相位为 θ_i . 利用量子旋转门不断更新量子比特, 就可得出不同解, 比较不同解的函数值, 从而得到最优解.

2.2 量子蚁群算法基本思想

根据文献[10-12]提出的基于蚁群的启发式进化算法, 可得蚂蚁 k 转移相邻节点的概率为式(9):

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{s \in W(k)} [\tau_s]^\alpha [\eta_s]^\beta}, & s \in W(k) \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (9)$$

式中, τ_{ij} 表示蚂蚁 k 经过路径 (i, j) 的轨迹强度; 启发函数 η_{ij} 表示为工件的加工工序的倒数, 即为 $\eta_{ij} = T_{ij}^{-1}$; α 表示蚂蚁移动的信息权重; β 表示为蚂蚁决策权重; $W(k)$ 表示蚂蚁可选择的节点集合, 即 $W(k) \in [0, n-1] - \text{tabu}_k$, 其中 tabu_k 为蚂蚁已经走过的节点集合.

信息素强度更新方程为:

$$\tau_{ij}(\text{new}) = (1-\rho)\tau_{ij}(\text{old}) + \Delta\tau_{ij}(k), \quad (10)$$

$$\Delta\tau_{ij}(k) = QT_{ij}^{-1}, \quad (11)$$

式中, $\tau_{ij}(\text{new})$ 表示蚂蚁移动的下一个节点; ρ 为信息素的挥发性, $0 \leq \rho < 1$; $\tau_{ij}(\text{old})$ 表示蚂蚁所在当前的节点; Q 为常数.

- 综上所述,量子蚁群算法流程为:
- 步骤 1: 蚂蚁利用转移概率移动节点;
 - 步骤 2: 计算各个蚂蚁目标函数最优值;
 - 步骤 3: 利用量子旋转门、信息素强度方程式更新;
 - 步骤 4: 若当前满足迭代次数,则输出最优解,否则返回步骤 1.

3 基于量子蚁群算法的制造车间调度问题求解

将量子蚁群算法 (Quantum Ant Colony Algorithm, QACA) 应用到求解制造车间调度问题当中, 根据工件的工序的加工时间矩阵 T_j , 可构造一个有向图, 如图 2 所示. 在图 2 中, 蚂蚁从左边的开始处开始向 t_{i1} 移动, 下一个移动节点为 $t_{ij}(new)$, 其可移动节点集合表示为:

$$t_{ij}(new) = \{t_{pq} \mid i \neq p\}.$$
 (12)

蚂蚁横向移动时, 只能向相邻的右节点进行移动, 向其他节点移动时, 移动到的节点不约束. 直至蚂蚁移动到结束. 其中, 蚂蚁移动过的节点不可能重复移动.

其算法实现步骤如下.

步骤 1: 初始化, 设置各个参数值, 其中, 蚂蚁数与机器数 m 相同, 最大迭代次数 DD_{max} , 信息素 $\tau_{ij}(0) = 1$, 蚂蚁量子信息素编码所有 α_{ij} 和 β_{ij} 初始值都设置为 $2^{-1/2}$. 设置基于量子蚂蚁的 AMJSP 有向图, 共 $n \times m$ 个节点.

步骤 2: 在开始处放入 n 个蚂蚁, 最终蚂蚁向结束节点移动. 节点移动的概率为式 (9).

步骤 3: 设置每个蚂蚁所走的节点数组 $A_k [n \times m]$, 即第 k 个蚂蚁所走的节点放入数组中. 根据式 (9) 和式 (12) 设置可选节点数组 $K_k [n \times m]$, 即第 k 个蚂蚁还未走过的路径节点的集合.

步骤 4: 如果蚂蚁走完所有节点, 则计算出该蚂蚁的目标函数值即最短完工时间, 记录当前最低值, 否则, 执行步骤 2.

步骤 5: 根据式 (8) 改变量子信息、式 (10) 和式 (11) 改变轨迹信息素强度.

步骤 6: 若当前满足迭代次数 DD_{max} , 则输出最优解, 否则执行步骤 2.

4 实验结果与分析

关于 JSP 求解若干典型问题, 国内外学者专家设计了不同参数, 以便测试比较各自的优化性能^[13], 如表 1 所示.

表 1 不同参数的 JSP 调度案例

Table 1 JSP scheduling case with different parameters

类别	问题个数	问题符号	规模(工件数量×机器数)	类别	问题个数	问题符号	规模(工件数量×机器数)
LA	40	LA1-5	10×5	FT	3	FT06	6×6
		LA6-10	15×5			FT10	10×10
		LA11-15	20×5			FT20	20×5
		LA16-20	10×10				
		LA21-25	15×10	ABZ	5	ABZ5-6	10×10
		LA26-30	20×10			ABZ7-9	20×15
		LA31-35	30×10	ORB	10	ORB1-10	10×10
		LA36-40	15×15				

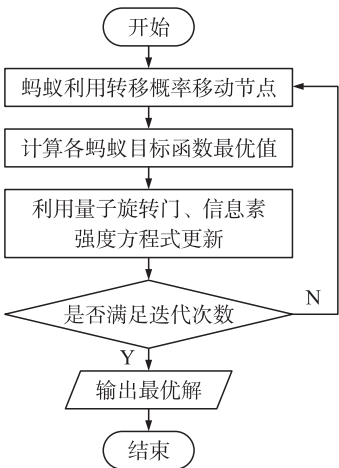


图 1 量子蚁群算法流程图
Fig. 1 Flowchart of quantum ant colony algorithm

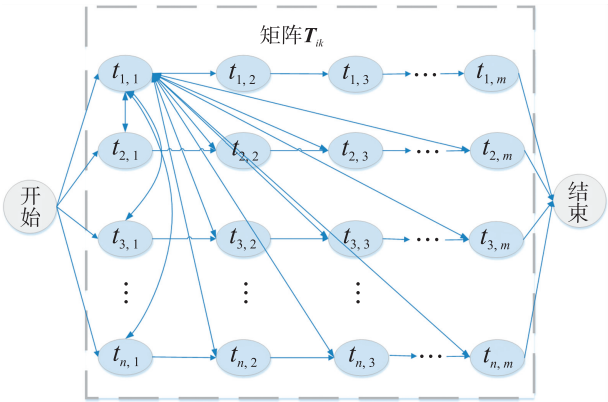


图 2 基于量子蚂蚁的 AMJSP 有向图
Fig. 2 AMJSP directed graph based on quantum ants

在众多案例中,关于 JSP 运用最多的是 LA 类和 FT 类,因此,本文选择该两类数据案例对基于量子蚁群算法的求解制造车间调度问题进行性能测试. 为了更好的评估,实验平台为 Windows 10,CPU i7,8G 内存,Matlab R2018b 仿真软件,其他实验仿真环境相关参数如表 2 所示.

表 2 实验参数

Table 2 Experimental parameters					
参数	数值	参数	数值	参数	数值
蚂蚁数量	m	信息素权重 α	1	信息素的挥发性 ρ	0.8
最大迭代次数 DD_{max}	200	启发式信息素权重 β	5	信息素总量常数 Q	200

首先对 FT06 案例进行调度寻优,将所提方案对其进行求解得到的最优解,如图 3 所示. 可以看出,基于量子蚁群算法的 FT06 寻优效率比较快,在执行 4 次后就可得到最优解,在执行 5 次的时候就可得到平均解,从此可见,量子蚁群算法在制造车间调度的收敛性能上有优势,最优解为 55.

将 QACA-AMJSP 与 GA 方案^[14-15]、PSO 算法方案^[16-18]在 FT06 案例上进行对比,如图 4 所示. 可以看出,GA 方案的收敛速度较慢且低于 PSO 方案的收敛速度,而 QACA-AMJSP 方案的算法收敛速度最快. QACA-AMJSP 方案在执行 4 次时,达到了最优解 55. GA 在执行 6 次的时候,达到了最优解 58,PSO 方案在执行次数到 7 次时,最优解也达到了 55,但总体而言,与 GA 和 PSO 方案相比,QACA-AMJSP 方案的全局寻优能力较强,收敛速度较快.

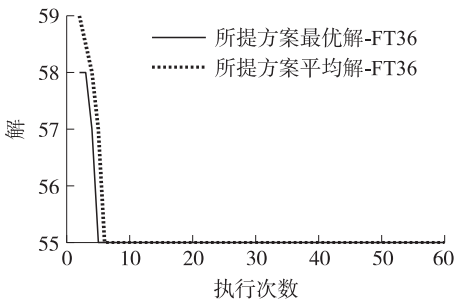


图 3 基于 QACA-AMJSP 的 FT06 寻优过程
Fig. 3 QACA-AMJSP based FT06 seeking optimal solution process

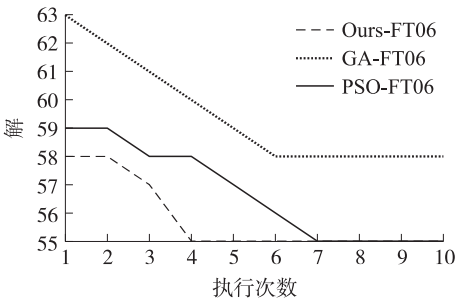


图 4 与其他方案的 FT06 最优解对比图
Fig. 4 Comparison of FT06 optimal solution with others

然后对 LA36 案例进行调度寻优,将所提方案对其进行求解得到的最优解,如图 5 所示. 可以看出,基于量子蚁群算法的 LA36 寻优效率比较快,在执行 23 次后就可得到最优解,在执行 24 次的时候就可得到平均解,由此可见,量子蚁群算法在制造车间调度的收敛性能上有优势,最优解为 1 268.

将 QACA-AMJSP 与 GA 方案、PSO 方案在 LA36 案例上进行对比,如图 6 所示. 可以看出,GA 方案的收敛速度较慢,远低于 PSO 方案的收敛速度,而 QACA-AMJSP 方案的算法收敛速度最快. GA 在执行 24 次的时候,达到了最优解 1 574,QACA-AMJSP 方案在执行 23 次时最优解达到了 1 268,PSO 方案在执行次数到 24 次时,最优解也达到了 1268,但总体而言,与 GA 和 PSO 方案相比,QACA-AMJSP 方案的全局寻优能力较强,收敛速度较快.

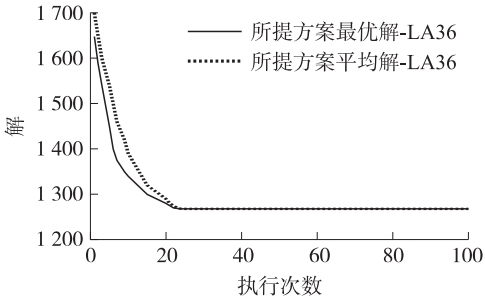


图 5 基于 QACA-AMJSP 的 LA36 寻优过程
Fig. 5 QACA-AMJSP based LA36 search for optimal solution process

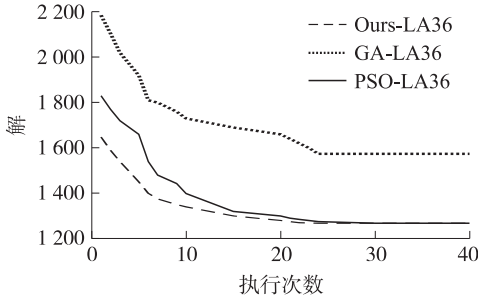


图 6 与其他方案的 LA36 最优解对比图
Fig. 6 Comparison of LA36 optimal solution with others

5 结论

提出量子计算与模拟自然界蚁群行为的蚁群算法相结合求解智能制造车间调度问题. 根据智能制造车间的特点,构建了相应的车间调度数学模型. 然后利用量子蚁群算法求解 AMJSP,提高了蚁群全局寻优能力,避免了蚂蚁易陷局部最优解问题. 实验结果表明,相比 GA 和 PSO,量子蚁群算法对解决智能制造车间调度问题具有较高的搜索效率和较快的收敛速度. 但是未来智能制造车间会逐渐复杂化,复杂构件的加工精度会越来越细,还需要人工全程参与,因此,下一步研究将人员因素考虑到智能制造车间调度问题中进行求解.

[参考文献]

- [1] 杨小东,康雁,柳青,等. 求解作业车间调度问题的禁忌分布估计算法[J]. 计算机工程与应用,2016(7):1-8.
- [2] 崔琪,吴秀丽,余建军. 变邻域改进遗传算法求解混合流水车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统,2017,23(9):1917-1927.
- [3] 刘洪铭,曾鸿雁,周伟,等. 基于改进粒子群算法作业车间调度问题的优化[J]. 山东大学学报(工学版),2019,49(1):75-82.
- [4] 刘胜辉,李小阳,张淑丽. 求解车间调度问题的双禁忌表禁忌搜索算法[J]. 哈尔滨理工大学学报,2016,21(6):50-54.
- [5] 黄海松,刘凯,初光勇. 改进模拟退火算法在柔性调度中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术,2018,2:148-156.
- [6] 施文章,韩伟,戴睿闻. 模拟退火下布谷鸟算法求解车间作业调度问题[J]. 计算机工程与应用,2017,53(17):249-259.
- [7] 朱小伶. 2020 年量子计算技术发展综述[J]. 无人系统技术,2021,4(2):26-32.
- [8] 中国科学技术大学. “九章”问世,实现“量子计算优越性”里程碑[J]. 国际人才交流,2021(1):58-59.
- [9] 杜欣泽. 量子计算掌握未来的算力引擎[J]. 互联网经济,2020(12):36-37.
- [10] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE transactions on system, man and cybernetics, 1996, 26(1):29-41.
- [11] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 1997, 1(1):53-66.
- [12] COLORNI A, DORIGO M, MANIEZZO V. Ant system for job-shop scheduling[J]. Belgian journal of operations research, statistics and computer science, 1994, 34(1):39-53.
- [13] 王凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京:清华大学出版社,2003:59-67.
- [14] 王玉芳,缪昇,马铭阳,等. 改进混合遗传算法的作业车间调度研究[J]. 现代制造工程,2021(5):32-38.
- [15] 陈金广,马玲叶,马丽丽. 求解作业车间调度问题的改进遗传算法[J]. 计算机系统应用,2021,30(5):190-195.
- [16] 居凤霞. 粒子群优化算法的改进及应用[D]. 广州:华南理工大学,2014.
- [17] 杨文理,李长云. 改进粒子群算法在柔性作业车间调度中的应用[J]. 科学技术创新,2021(12):5-6.
- [18] 顾幸生,丁豪杰. 面向柔性作业车间调度问题的改进博弈粒子群算法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2020,48(12):1782-1789.

[责任编辑:陆炳新]