

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202204008



应用禁忌粒子群算法的车间调度 及其并行化实现

郑天华, 王佳斌, 蔡宇翔, 彭凯

(华侨大学 工学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 为了解决批量生产、制造、装配等车间调度问题,基于 Hadoop 集群,提出应用禁忌粒子群算法的车间调度及其并行化实现.以某装载机制造车间最小化完成时间为目标,通过使用禁忌粒子群算法对车间调度问题进行求解.结果表明:在车间批量大的情况下,禁忌粒子群算法可得出有效的调度方案,避免算法陷入局部最优解.与现有的智能算法相比,禁忌粒子群算法更有利于实现全局最优解.

关键词: 车间调度; 并行化; 禁忌粒子群算法; 智能算法; Hadoop 集群

中图分类号: TP 301.6; F 406.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2023)01-0104-07

Workshop Scheduling Using Forbidden Particle Swarm Algorithm and Its Parallel Implementation

ZHENG Tianhua, WANG Jiabin, CAI Yuxiang, PENG Kai

(College of Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: In order to solve the workshop scheduling problems of mass production, manufacturing and assembly, workshop scheduling using forbidden particle swarm algorithm and its parallel implementation is proposed based on Hadoop colony. A loader manufacturing workshop aims to minimize the completion time, the forbidden particle swarm algorithm is used to solve the workshop scheduling problem. The results show that the forbidden particle swarm algorithm can obtained an effective scheduling and avoid the algorithm from falling into a local optimal solution in case of large batch in the workshop. Compared with the existing intelligent algorithms, the forbidden particle swarm algorithm is more beneficial to achieve the global optimal solution.

Keywords: workshop scheduling; parallelization; forbidden particle swarm algorithm; intelligent algorithm; Hadoop colony

混流混合车间调度涉及作业车间调度和流水车间调度,生产过程包括零件加工、部件装配、产品总装配.由于作业车间和流水车间联系紧密,对某一个车间进行单独优化都可能导致大量库存和生产周期延长.因此,混流混合车间调度需要考虑作业车间调度和流水车间调度.

目前,对车间调度的研究处于快速的发展阶段.一些学者采用精确算法对车间调度问题进行研究,如拉格朗日松弛算法^[1-3]和分支定界算法^[4-6].随着车间调度规模扩大,精确算法效率降低,而智能算法得到更广泛的应用.Figielska^[7]采用禁忌搜索算法研究两个阶段混合流水车间问题.Marichelvam 等^[8]采用离散萤火虫算法求解双目标混合流水车间问题.Naderi 等^[9]采用帝国主义竞争算法求解带有子模

收稿日期: 2022-04-08

通信作者: 王佳斌(1974-),男,副教授,主要从事激光应用、嵌入式系统开发、测量技术、智能仪器的研究. E-mail: fat-wang@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61505059)

块和准备书简窗的车间调度问题. 此外, 混合人工蜂群算法^[10]、混合果蝇优化算法^[11]、混合松鼠搜索算法^[12]等也都应用于车间调度问题中.

李修琳等^[13]采用混合遗传算法, 以最小化缓存区库存为目标, 研究混流混合车间集成调度问题. 鲁建厦等^[14]采用博弈粒子群算法, 以最小化部件车间齐套性和库存为目标, 研究混流混合车间调度. 王猛^[15]提出免疫遗传算法, 以最小化最大完工时间为目标, 研究多级车间集成调度问题. Lou 等^[16]采用免疫克隆算法解决混合车间调度优化问题, 并取得有效的解决方案.

Hadoop 集群是目前广泛使用的大数据处理主流技术和系统平台, 在大规模分布式的存储和批处理上有强大能力. 刘佳耀等^[17]针对大数据时代下 Slope One 算法推荐效率不高的问题, 改进算法并将其在大数据平台上实现并行化. 蔡春晓等^[18]结合车牌识别算法和 Hadoop 集群, 实现算法的并行化, 有效地改进算法的运行效率. 王诚等^[19]结合孤立森林算法和大数据平台, 实现算法的并行化, 提高了算法运行的效率.

三段式^[13-14]编码的算法可以有效解决混流混合车间内小批量的调度问题. 面对大批量问题时, 采用现有的智能算法易陷入局部最优的问题, 无法得出最佳的调度的方案. 基于此, 本文研究禁忌粒子群车间调度算法及其并行化实现.

1 问题的建模

混流混合车间, 如图 1 所示. 为研究混流混合车间调度问题, 给出以下 5 个假设^[13]:

- 1) 在流水车间, 只对自制件进行加工, 不考虑外购外协件;
- 2) 生产之前, 车间内的设备和工位没有制品且已经准备就绪;
- 3) 加工时间包括准备时间、搬运时间;
- 4) 车间内相同的零件之间有工序的约束, 不同的零件不存在工序的约束;
- 5) 零件加工车间为部件装配车间、产品总装配车间加工一批零件, 部件装配车间为产品总装配车间加工一批部件, 装配工将不满足装配工位的零件或部件放在缓冲区中, 配送的时间假定为零.

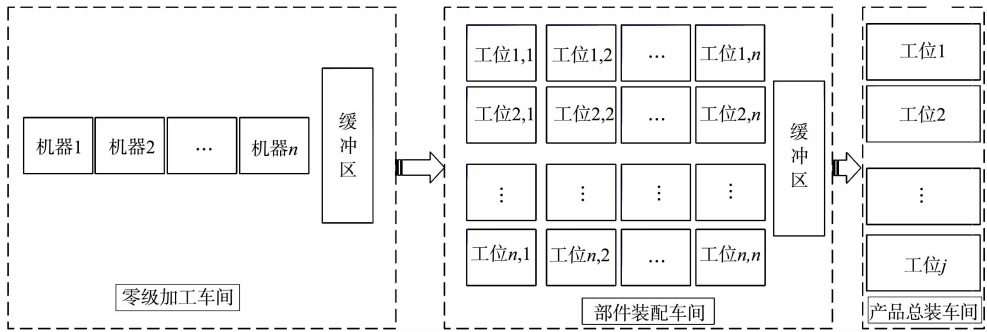


图 1 混流混合车间
Fig. 1 Mixed flow mixing workshop

在加工过程中, 零件加工车间要满足工序约束和设备约束. 零件在对应的设备机器上按照工序进行加工; 部件装配车间和产品总装配车间在装配过程中, 要满足工序约束和工位约束, 零件在对应的工位上操作, 前置工序操作完成才能进行下一步的工序操作. 零件加工车间的设备约束为

$$E_{i,j} - t_{i,j} + r \times c_{i,h,j} \geq E_{i,h}, \tag{1}$$

零件加工车间的工序约束为

$$E_{g,i} - t_{i,g} + r \times d_{i,g,j} \geq t_{g,i}, \tag{2}$$

部门装配车间和产品总装配车间的工位约束为

$$E_{x,k} - t_{x,k} + r(1 - c_{x,h,k}) \geq E_{x,h}, \tag{3}$$

部门装配车间和产品总装配车间的工序约束为

$$E_{g,k} - E_{x,k} + r(1 - d_{x,g,k}) \geq t_{g,k}, \tag{4}$$

部门装配车间和产品总装配车间的时间约束为

$$E_{x,k}=t_{x,k}+\max(E_{x-1,k},E_{x,k-1}). \tag{5}$$

式(1)~(5)中: $E_{i,j}$ 为零件加工车间零件*i*在设备*j*上加工的最大完成时间约束; $E_{x,k}$ 代表部门装配车间部件*x*在设备*k*上装配的最大完成时间约束; $c_{i,h,j}$ 的取值为0和1,0代表设备*h*前置于设备*j*,1代表其他情况; $d_{i,g,j}$ 取值为0和1,0代表零件*i*前置于零件*g*,由设备*j*加工,1代表其他情况; $t_{i,j}$ 为零件*i*在设备*j*上加工的时间; $c'_{x,h,k}$ 的取值为0和1,1表示设备*h*前置于设备*k*作业,0表示其他情况; $d'_{x,g,k}$ 的取值为0和1,1表示部件*x*前置于零件*g*,在设备*k*作业,0表示其他情况.

2 粒子群算法

2.1 传统粒子群算法

传统粒子群算法(PSO)模拟鸟群觅食过程.在这个过程中,每个粒子的解对应粒子相对应的位置.传统粒子群算法对应的速度(v_{nex})^[20]为

$$v_{nex}=\omega v_{cur}+c_1r_1(p^*-x_{cur})+c_2r_2(g^*-x_{cur}), \tag{6}$$

$$x_{nex}=x_{cur}+v_{nex}. \tag{7}$$

式(6),(7)中: ω,c_1,c_2 分别为惯性系数,个体认知系数和社会认知系数; v_{cur} 和 x_{cur} 为当前的速度和位移; v_{nex} 和 x_{nex} 为下一步的速度和位移; p^* 为个体经历过最好的位置; g^* 为全局最优位置; r_1,r_2 为一组(0,1)内的随机数.

2.2 禁忌粒子群算法

传统粒子群算法搜索速度快、收敛效率好,但容易陷入局部最优的情况.针对传统粒子群算法中存在的问题,对粒子群算法进行改进.在传统粒子群算法寻优的过程中,加入禁忌算法,对粒子种群进行随机交换组合,加强算法寻优的能力,防止算法陷入局部最优的可能.

2.3 禁忌粒子算法流程

禁忌粒子群算法流程,如图2所示.禁忌粒子群算法(TSPSO)算法有如下7个流程:

- 1) 设置 PSO 的相关参数,置空禁忌表;
- 2) 对 PSO 中的每个粒子计算适应度值,更新个体的最优解及群体的最优解;
- 3) 更新粒子群中的位置及速度;
- 4) 将粒子群中的每个粒子进行随机交叉变异,计算变异后的粒子适应度;
- 5) 若新的适应度比群体最优解好,则更新禁忌表中,更新群体最优解,若不满足,就转到流程6);
- 6) 若新的解比变换前的粒子对应的解更好,则将这个粒子及对应的解放入禁忌表,即更新禁忌表;
- 7) 若迭代次数大于所设定的最大迭代次数,则将这个最优解输出,若不满足,则转到流程2)中.

2.4 禁忌粒子群车间调度算法

2.4.1 编码 对3个车间的零件和部件及产品进行编码,编码完成后,对车间进行统一优化调度.首先,确定产品总装配车间、部件装配车间及零件加工车间产品数量最小比例,对其进行统一编码.其次,用字母代表产品、部件和零件,相同字母代表同样的产品、部件和零件.如零件加工车间所生产的零件为A,B,C;部件装配车间的部件为D,E;产品总装车间的产品为F,G,H,那么,算法编码为(A,B,C,D,E,F,G,H).

2.4.2 适应度函数 适应度函数(G)为

$$G=\min(E_{i,j}+E_{x,k}+E_{y,s}). \tag{8}$$

式(8)中: $E_{y,s}$ 代表产品总装配车间所有产品*y*在设备*s*完成装配的最大完工时间约束.

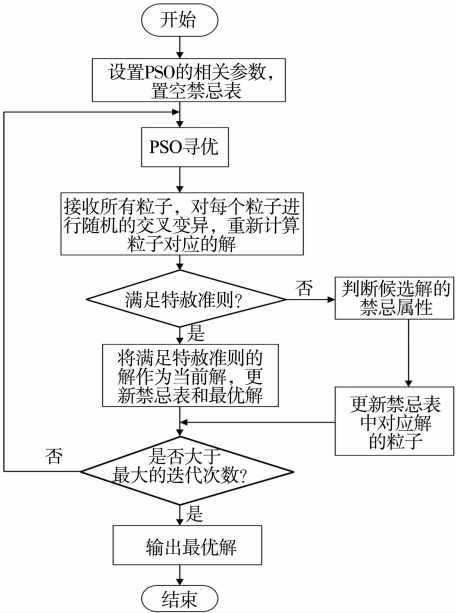


图2 禁忌粒子群算法流程

Fig. 2 Forbidden particle swarm algorithm flow

2.4.3 粒子更新 采用式(6),(7)对粒子种群进行更新. 将禁忌算法加入传统粒子群算法中,对粒子群进行随机的交换组合,增强算法寻优的能力,防止算法进入局部最优的可能.

2.4.4 算法并行化实现 采用Java 软件编写对应的 Map 函数和 Reduce 函数,并调用 Hadoop 集群环境,结合禁忌粒子群算法和 Hadoop 集群,解决混流混合车间调度的问题. 禁忌粒子群算法在运行过程中,读取相关的车间数据,设定启动多个 Map 函数和 Reduce 函数进行处理. 在 Map 函数阶段,计算禁忌粒子群算法中每个粒子,即根据所设置的目标函数,计算相对应的适应度;在 Reduce 函数阶段,输出粒子群中最优的适应度. 算法并行化思路,如图 3 所示.

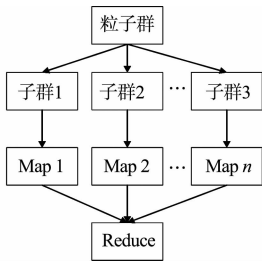


图 3 算法并行化思路

Fig. 3 Idea of algorithm parallelization

3 实例验证

3.1 混流混合车间调度实例

以装载机制造车间为例^[15],对算法进行验证. 装载机制造车间是由零件加工车间、部件装配车间、产品总装配车间组成的. 产品需求矩阵,如表 1 所示. 表 1 中: Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 为生产的产品. $A \sim H$ 为零件; X, Y 为部件;—表示产品和需求的部件没有关系;1 表示产品和需求的部件有对应关系.

表 1 产品需求矩阵

Tab. 1 Product demand matrix

零部件	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	X	Y
A	1	1	—	—	—	—
B	—	—	1	1	—	—
C	1	1	—	—	—	—
D	—	—	1	1	—	—
E	1	1	—	—	—	—
F	—	—	1	1	—	—
G	—	—	—	—	1	—
H	—	—	—	—	—	1
X	1	1	—	—	—	—
Y	—	—	1	1	—	—

零件按 A,B,C,D,E,F,G,H 的顺序进行加工,零件加工时间 (t_p) ,如表 2 所示. 表 2 中: $M_1 \sim M_{10}$ 分别表示设备.

表 2 零件加工时间和工序

Tab. 2 Part processing time and processing sequences

设备	t_p/s , 工序							
	A	B	C	D	E	F	G	H
M_1	300,1	375,1	0	0	0	0	0	0
M_2	375,2	450,2	0	0	0	0	0	0
M_3	375,3	450,3	0	0	0	0	0	0
M_4	0	0	450,1	450,1	0	0	450,1	525,1
M_5	0	0	0	0	450,1	525,1	375,2	450,2
M_6	0	0	525,2	600,2	0	0	0	0
M_7	0	0	0	0	525,2	450,2	0	0
M_8	0	0	375,3	0	375,3	375,3	0	0
M_9	0	0	0	600,3	0	0	600,3	600,3
M_{10}	0	0	375,4	0	600,4	600,4	0	0

部件装配车间主要负责的是部件 X,Y 的装配,部件装配时间 (t_c) ,如表 3 所示.

产品总装配车间流水线共有 33 个装配工位,工序按工位的顺序进行排序,产品总装配时间 (t_t) 如表 4 所示.

表 3 部件装配时间
Tab. 3 Assembly time of components

工序	$t_c(X)/s$	$t_c(Y)/s$	工序	$t_c(X)/s$	$t_c(Y)/s$
1	147	126	6	126	105
2	126	147	7	168	168
3	126	168	8	147	126
4	105	105	9	147	168
5	157	168			

表 4 产品总装配时间
Tab. 4 Total assembly time of products

工序	t_i/s			
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
1	105	84	91	105
2	140	147	133	126
3	154	161	140	175
4	140	126	140	147
5	133	147	126	140
6	147	154	147	161
7	126	133	133	140
8	147	140	154	147
9	147	133	133	140
10	140	140	133	140
11	140	147	147	154
12	154	161	147	154
13	126	133	133	126
14	147	157	147	161
15	126	133	133	140
16	140	147	140	133
17	147	154	140	147
18	140	147	147	140
19	140	133	140	133
20	154	161	147	161
21	140	133	140	168
22	168	161	161	168
23	161	161	154	147
24	168	175	161	168
25	161	168	161	168
26	140	147	147	147
27	126	133	140	133
28	126	126	126	119
29	154	154	147	140
30	161	154	154	161
31	161	147	168	161
32	140	133	126	133
33	161	168	161	161

生产计划期内产品 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 的任务分别为 320,160,320,320 台,最小生产循环为 2 : 1 : 2 : 2 ; 2. 根据已知条件,部件 X,Y 分为 480,640 个,最小的生产循环为 3 : 4 ;零件 A~H 分别为 480,640, 480,640,480,640,480,640 个,最小生产循环为 3 : 4 : 3 : 4 : 3 : 4 : 3 : 4 .

Hadoop 集群由 4 台机器组成,选取其中一台机器作为 Master 节点,其他 3 台作为 Slave 节点. 设置禁忌粒子群算法的有关参数如下:种群的大小为 20;迭代次数为 300 次; ω 为 0.1; c_1, c_2 都为 1. TSP-

SO 运行的最优解为 15 583 s;遗传算法(GA)的最优解为 15 700 s;免疫遗传算法(IA)^[15]的最优解为 15 679 s. 实验结果表明,禁忌粒子群算法(TSPSO)可有效避免局部最优的可能. 算法进化曲线,如图 4 所示. 图 4 中: t_b 为最优解; k 为迭代次数.

3.2 算法对比

在种群大小为 20,迭代次数为 50 的情况下,分别用最优解(t_b)、平均值(t_{var})对比 3 种算法的性能. 结果表明,TSPSO 收敛性能好、收敛的速度快且不易陷入局部最优. 3 种算法性能对比,如表 5 所示.

禁忌粒子群算法和遗传算法及免疫遗传算法的每个车间运行时间(t_r)对比,如表 6 所示. 表 6 中: δ 为对比差比例.

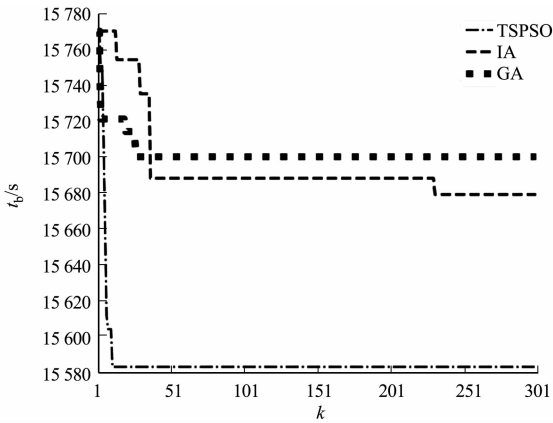


图 4 算法进化曲线
Fig. 4 Algorithm evolution curve

表 5 3 种算法性能对比

Tab. 5 Performance comparison of three algorithms

TSPSO		GA		IA	
t_b/s	t_{var}/s	t_b/s	t_{var}/s	t_b/s	t_{var}/s
15 583.00	15 602.92	15 700.00	15 711.90	15 688.00	15 734.38

表 6 3 种算法的每个车间运行时间对比

Tab. 6 Running time comparison of each workshop of three algorithms

算法	车间	t_r/s	$\delta/\%$
TSPSO	零件加工	7 575	0
	部件装配	2 247	0
	产品总装配	5 761	0
GA	零件加工	7 650	0.99
	部件装配	2 247	0
	产品总装配	5 803	0.72
IA	零件加工	7 650	0.99
	部件装配	2 247	0
	产品总装配	5 782	0.36

由表 6 可知:TSPSO 在产品批量大的情况下,在零件加工车间、产品总装配车间车间所得出的效果都比 GA 和 IA 更优. 因此,TSPSO 在大批量的情况下可对总体的调度进行优化.

4 结束语

并行化的禁忌粒子群算法,在面对产品批量较大的情况下,可以有效地避免陷入局部最优的问题,解决了批量大的情况下车间调度的问题. 未来考虑对 3 个车间进行独立编码,进一步对车间调度进行优化,得到更好的调度的方案;对粒子群算法进一步改进,结合大数据平台提高算法的效率.

参考文献:

[1] TANG Lixin,HUA Xuan. Lagrangian relaxation algorithms for real-time hybrid flowshop scheduling with finite intermediate buffers[J]. Journal of the Operational Research Society,2006,57(3):316-324. DOI:10. 1057/palgrave.jors. 2602033.

[2] TANG Lixin,HUA Xuan,LIU Jiyin. A new Lagrangian relaxation algorithm for hybrid flowshop scheduling to minimize total weighted completion time[J]. Computers and Operations Research,2006,33(11):3344-3359. DOI:10. 1016/j. cor. 2005. 03. 028.

[3] PORTMANN M C,VIGNIER A,DARDILHAC D,*et al.* Branch and bound crossed with GA to solve hybrid flow-

- shops[J]. *European Journal of Operational Research*, 1998, 107(2): 389-400. DOI: 10. 1016/S0377-2217(97)00333-0.
- [4] FATTAHI P, HOSSEINI S M H, JOLAI F, *et al.* A branch and bound algorithm for hybrid flow shop scheduling problem with setup time and assembly operations[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(1): 119-134. DOI: 10. 1016/j. apm. 2013. 06. 005.
- [5] WANG Shijin, LIU Ming, CHU Chengbin. A branch-and-bound algorithm for two-stage no-wait hybrid flow-shop scheduling[J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(4): 1143-1167. DOI: 10. 1080/00207543. 2014. 949363.
- [6] ZHANG Wei, YIN Changyu, LIU Jiyin, *et al.* Multi-job lot streaming to minimize the mean completion time in m-1 hybrid flowshops[J]. *International Journal of Production Economics*, 2005, 96(2): 189-200. DOI: 10. 1016/j. ijpe. 2004. 04. 005.
- [7] FIGIELSKA E. A heuristic for scheduling in a two-stage hybrid flowshop with renewable resources shared among the stages[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 236(2): 433-444. DOI: 10. 1016/j. ejor. 2013. 12. 003.
- [8] MARICHELVAM M K, PRABAHARAN T, YANG Xinshe. A discrete firefly algorithm for the multi-objective hybrid flowshop scheduling problems[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2013, 18(2): 301-305. DOI: 10. 1109/TEVC. 2013. 2240304.
- [9] NADERI B, YAZDANI M. A model and imperialist competitive algorithm for hybrid flow shops with sublots and setup times[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2014, 33(4): 647-653. DOI: 10. 1016/j. jmsy. 2014. 06. 002.
- [10] SONG Meixian, LI Junqing, HAN Yunqi, *et al.* Metaheuristics for solving the vehicle routing problem with the time windows and energy consumption in cold chain logistics[J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 95(2): 106561. DOI: 10. 1016/j. asoc. 2020. 106561.
- [11] LI Junqing, PAN Quanke, MAO Kun. A hybrid fruit fly optimization algorithm for the realistic hybrid flowshop re-scheduling problem in steelmaking systems[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, 13(2): 932-949. DOI: 10. 1109/TASE. 2015. 2425404.
- [12] KHARE A, AGRAWAL S. Scheduling hybrid flowshop with sequence-dependent setup times and due windows to minimize total weighted earliness and tardiness[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2019, 135: 780-792. DOI: 10. 1016/j. cie. 2019. 06. 057.
- [13] 李修琳, 鲁建厦, 柴国钟, 等. 基于混合遗传算法的混流混合车间协同调度问题[J]. *中国机械工程*, 2012, 23(8): 935-940. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-132X. 2012. 08. 012.
- [14] 鲁建厦, 胡海芬, 董巧英. 基于博弈粒子群算法的混流混合车间调度研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2015, 43(4): 398-404. DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-4303. 2015. 04. 010.
- [15] 王猛. 基于免疫遗传算法的多级混合车间集成调度研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [16] LOU Gaoxiang, CAI Zongyan. Improved hybrid immune clonal selection genetic algorithm and its application in hybrid shop scheduling[J]. *Cluster Computing*, 2019, 22(2): 3419-3429. DOI: 10. 1007/s10586-018-2189-9.
- [17] 刘佳耀, 王佳斌. Slope One-BI 算法的改进及其在大数据平台的并行化[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(6): 786-792. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201812074.
- [18] 蔡春晓, 李燕龙, 陈晓. 基于 Hadoop 的 Java 调用 Matlab 混合编程的车牌识别[J]. *桂林理工大学学报*, 2016, 36(2): 383-387. DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-9057. 2016. 02. 033.
- [19] 王诚, 狄莹. 孤立森林算法研究及并行化实现[J]. *计算机技术与发展*, 2021, 31(6): 13-18. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-629X. 2021. 06. 003.
- [20] 顾幸生, 潘晔, 卢胜利. 基于改进支持向量机的作物叶水势软测量建模[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(11): 1669-1674. DOI: 10. 3969/j. issn. 0253-374x. 2010. 11. 021.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)