

基于布谷鸟算法的压缩机装配调度项目优化方法

曹圣武,陈再良

(苏州大学 机电工程学院,江苏 苏州 215000)

摘 要:针对制造型企业生产项目调度优化,提出一种基于自适应布谷鸟算法的调度策略。该策略采用全局搜索能力强的布谷鸟算法为框架模型,以任务调度顺序优先级编码,对影响算法性能的重要参数——步长因子设定动态自适应策略,提升算法的运算性能和全局收敛速度。以跨国S公司大型空气压缩机装配项目为例进行调度优化,结果表明该调度方案拥有更短的工期和平衡的资源利用率。此外,通过自动生成的人力配置甘特图,项目经理能够动态调整人员配置以减少人力资源的浪费。

关键词:生产项目调度;布谷鸟算法;自适应步长;最小化工期

中图分类号:TP202⁺.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)04-0084-04

Compressor Assembly Project Scheduling Optimization Method Based on Cuckoo Algorithm

CAO Shengwu, CHEN Zailiang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215000, China)

Abstract: For the optimization of production project scheduling in manufacturing enterprises, a scheduling strategy based on adaptive cuckoo algorithm is proposed. In the strategy, the cuckoo algorithm with strong global search ability is adopted as framework model. The priority is given to task scheduling order, and the important parameter step factor affecting the performance of the algorithm is set for the dynamic adaptive strategy which is used to improve the computing performance and global convergence speed of the algorithm. This paper takes the large-scale air compressor assembly project of multinational company as an example. The results show that the scheduling scheme can be used to shorten the construction period and balance the resource utilization. In addition, with the manpower configuration Gantt chart automatically generated, the project manager can dynamically adjust staff, thus reducing the waste of human resources.

Keywords: production project scheduling; cuckoo algorithm; adaptive stepsize; project makespan optimization

0 引言

随着工业全球化的推行和日益加剧的市场竞争,多品种、小批量、定制化加工已经成为制造业发展的新趋势,订单式生产成为制造型企业的主要运作模式,订单式项目管理应运而生。

生产项目调度本质上属于资源受限项目调度问题(resource-constrained project scheduling problem, RCPSP),即项目的各活动间需要满足两种约束关系,一是前后活动的逻辑约束,二是资源约束。RCPSP是近年来项目调度的热点问题,众多智能算法被引入到求解该问题中来,LI H等^[1]改进了遗传算法并重新设计编码方案,提高了该算法求解RCPSP的性能;ZHENG X, WANG L^[2]提出了一种MAOA智能算法,通过自主学习来强化搜索能力;DENG L等^[3]引入混合蚁群算法,应用活动拆分来预测时间表,有效提高了调度质量;王凌和郑环宇^[4]将教学算法用于多目

标资源受限项目,仿真结果验证了算法的有效性。

1 问题描述

实际生产项目由 n 个活动构成 $V = \{1, \dots, n, n+1, n+2\}$,活动1和 $n+2$ 是虚任务。项目各活动共用 R 种有限的可更新资源,并受到两类约束,一是紧前约束,即活动 $i \in V$ 必须在其所有紧前活动全部完工之后才能开始;二是资源约束,即任意时刻活动对第 k 种资源的需求量不得超过其上限 R_k 。已知活动 i 的执行时间为 $d_i (i=1, 2, \dots, n+2)$,对第 k 种资源的需求为 r_{ik} ,在满足两类约束的前提下调度各活动的开始时间 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{n+2}\}$,目标函数是项目工期 S_{n+2} 最短。数学模型如下:

$$\min S_{n+2} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } S_j + d_j \leq S_i, \quad j \in P(i) \quad (2)$$

$$\sum_{i \in A_k} r_{ik} \leq R_k, \quad k=1, 2, \dots, R \quad (3)$$

基金项目:国家自然科学基金(51475313);江苏省科技厅资助项目(BY2016043-02;BA2014004)

第一作者简介:曹圣武(1992—),男,江苏镇江人,硕士,研究方向为项目调度。

$$S_i \geq 0, \quad i=1,2,\dots,n+2 \quad (4)$$

其中: $P(i)$ 是活动 i 的所有紧前任务; A_i 是 t 时刻正在进行的所有活动; r_{ik} 是 t 时刻活动 i 所需资源 k 的数量。

2 算法描述

2.1 布谷鸟算法基本原理

布谷鸟通过寄生育雏的方式将自己的蛋偷偷下在其他鸟类的巢穴中,甚至可以模仿宿主的蛋而不被发现。剑桥大学的YANG X S和DEB S^[5]从布谷鸟这种繁殖行为中得到启示,提出布谷鸟算法(cuckoo search, CS)。该算法具有涉及参数少、全局寻优能力强、随机搜索路径优等特点,首先设定如下3种理想状态:

1)每只布谷鸟每次下1个蛋,并将其放入随机选择的巢中;

2)具有优质蛋的最佳巢会被带到下一代;

3)可用的寄主巢数量是固定的,且寄主以 $P_a \in (0,1)$ 的概率发现布谷鸟放的蛋。

该算法还可以通过莱维飞行(Lévy flight)来增强全局搜索能力,搜索路径和更新位置公式如下:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + a \otimes L(s, \lambda), \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

$$L(s, \lambda) = \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\pi\lambda/2)}{\pi} \left(\frac{1}{s^{1+\lambda}} \right), (s \geq 0) \quad (6)$$

式中: x_i^t 和 x_i^{t+1} 代表第 t 代和第 $(t+1)$ 代的位置; $\otimes$ 为点对点乘法; a 代表步长控制因子; $L(s, \lambda)$ 为Lévy随机搜索路径,与时间 t 的关系服从Lévy分布。

位置更新后,用随机数 $r \in [0,1]$ 与 P_a (P_a 为发现概率)对比,若 $r > P_a$,则对 x_i^{t+1} 采用偏好随机游动方式进行改变,偏好随机游动公式如下:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + r(X_j^t - X_k^t) \quad (7)$$

式中: r 是缩放因子在 $(0,1)$ 区间上的均匀分布; X_j^t 和 X_k^t 代表第 t 代的两个随机解。

2.2 算法改进

布谷鸟算法在运算后期会产生搜索性能下降、搜索速度变慢的现象^[6]。因此针对算法重要影响参数——步长控制因子加入自适应策略,提出一种自适应的布谷鸟算法(ICS)。根据提出的自适应策略,在运算的前期,步长控制因子取较大值以增强莱维飞行的跳跃能力,提升全局搜索性能^[7];当种群的最佳个体靠近当代最优解时,自适应策略使控制因子取较小值以收缩步长变动幅度,使其能够更快收敛到全局最优解或次优解。自适应步长公式如下:

$$a = a_{\max} - (a_{\max} - a_{\min}) \exp \left[- \left| \frac{F_i^t - F_{\text{best}}^t}{F_{\text{best}}^t - F_{\text{worst}}^t} \right| \right] \quad (8)$$

自适应的更新位置公式就变成:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + [a_{\max} - (a_{\max} - a_{\min}) \exp \left[- \left| \frac{F_i^t - F_{\text{best}}^t}{F_{\text{best}}^t - F_{\text{worst}}^t} \right| \right]] \otimes L(s, \lambda) \quad (9)$$

其中: $a_{\max}$ 和 $a_{\min}$ 分别为步长因子 a 的上界和下界; F_i^t 、 F_{best}^t 和 F_{worst}^t 分别为 t 代种群中第 i 个个体、最优个体以及最差个体的适应值。

3 自适应布谷鸟算法生产项目调度

3.1 编码方案

采用基于优先权的实数编码,生成串型调度方案。一条链代表生成的调度方案,基因为整数,如 $X = [0, 1, 2, \dots, n+1]$,其中0和 $n+1$ 是虚任务;另一条链代表任务的优先权,基因是随机分配的实数。表1为优先权分配示意图。

表1 随机优先权列表

活动编号	1	2	3	...	n
优先权	P_1	P_2	P_3	...	P_n

3.2 调度流程

Step1:初始化参数,随机产生 n 个鸟巢;

Step2:计算初始种群适应度;

Step3:保留上代最优值,利用式(5)和式(6)更新出一组新解并计算适应度;

Step4:新解与上代解进行比较,用较优新解替换旧解;

Step5:利用式(7)丢弃部分解并产生新解;

Step6:部分较优解保留到下一代;

Step7:是否满足终止条件,若满足则停止迭代输出最优解,若不满足转Step3。

4 实验与分析

4.1 项目描述

S企业是一家专业从事中大型压缩机制造的跨国企业,以该企业一典型压缩机装配项目为例。该项目原计划工期160天,涉及项目工程师3人、采购工程师2人、机械工程师4人、装配工程师4人。简化的项目BOM和活动资源需求如表2,要求在满足活动约束和人员限制的情况下找到工期最短的调度方案。

表2 压缩机装配项目信息

编号	活动描述	紧后活动	活动工期	工程师需求			
				项目	采购	机械	装配
1	客户订单下达	2,3	0	0	0	0	0
2	电机图样绘制	7	5	0	2	0	0
3	EBOM导入SAP系统	4,5	10	2	2	1	0

续表 2

编号	活动描述	紧后活动	活动工期	工程师需求			
				项目	采购	机械	装配
4	MCN16 导入 SAP 系统	6	6	2	0	1	0
5	P10 任务检测	6	7	0	2	1	0
6	生成 MBOM	8,9,10	4	2	1	2	1
7	电机供应商确认参数交期	12,17	18	2	1	1	0
8	支架供应商确认参数交期	12	16	1	0	1	2
9	控制系统零部件供应	11	7	1	2	0	0
10	进气口过滤器供应	11	7	1	2	0	0
11	压差传感器供应	12	14	2	2	1	0
12	机身底架初装	13,15	18	1	0	2	3
13	机身底架总装	14	10	1	0	2	2
14	机身部件初装	17	5	2	0	2	3
15	机身部件总装	16	16	1	0	2	2
16	机架与电机对接	17	12	1	0	2	3
17	整机运行测试	18,19	6	1	2	1	0
18	整机一级能效测试	20	4	2	0	2	1
19	整机二、三级能效测试	20	4	2	0	2	0
20	喷漆及出库检测	21	8	1	1	2	1
21	包装待发运		0	0	0	0	0

4.2 调度方案

使用 Matlab_R2018B 版本编写算法程序,参考文献[8]的参数寻优方法,经多次运算的结果表明,自适应式步长影响因子上、下界取 0.01 和 0.9 时算法性能较好。初始种群数设定 25,最大迭代数设定为 50,发现概率设定为 0.25。

该算法计算出的最短工期为 141 天,比原计划的完工时间提前了 19 天,工期缩短率为 11.87%,验证了算法在处理生产项目调度问题的有效性。图 1 为运算过程中最短工期与平均工期收敛图,可以看到工期随迭代数稳步降低,在第 16 代时收敛到最优值;图 2 为最短工期与平均工期偏差,在第 4 代到 37 代间种群较为活跃,38 代后趋于稳定;图 3 为人力资源利用率图,以资源利用率超过 80% 为风险点,该调度方案下资源利用率平衡且未超风险点;图 4 是人员配置甘特图,直观、清晰地呈现了各工程师在项目全期的工作安排;表 3 给出了具体的项目调度顺序和各活动的开始-完成时间;表 4 将自适应布谷鸟算法与布谷鸟算

法相比较,结果验证了自适应布谷鸟算法具有更高的运算精度和收敛速度。

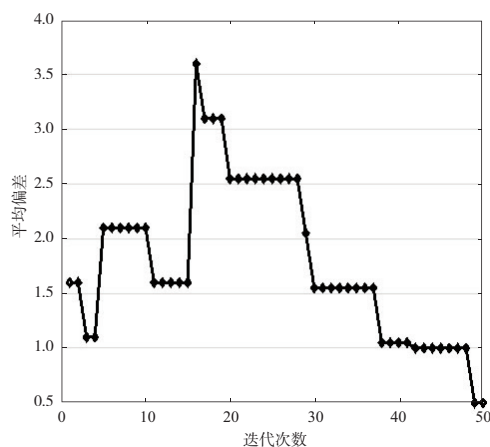


图2 最短工期与平均工期偏差

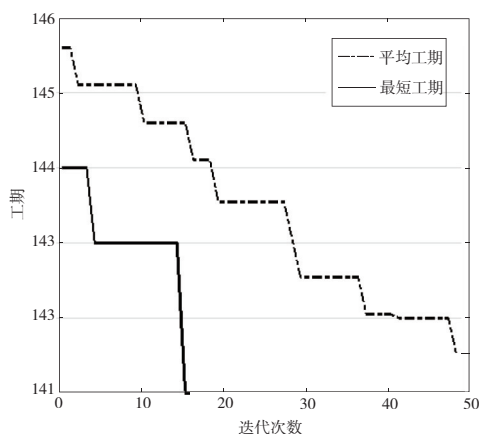


图1 最短工期与平均工期收敛图

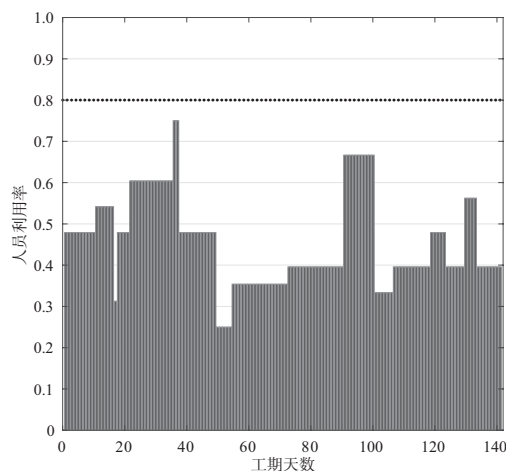


图3 人力资源利用率

表 3 优化调度方案

活动时间	调度顺序																				
	1	3	5	4	6	8	9	10	11	2	7	12	13	15	16	14	17	18	19	20	21
开始时间	0	1	11	11	18	22	22	29	36	50	55	73	91	91	107	119	124	130	130	134	0
结束时间	0	10	16	17	21	37	28	35	49	54	72	90	100	106	118	123	129	133	133	141	0

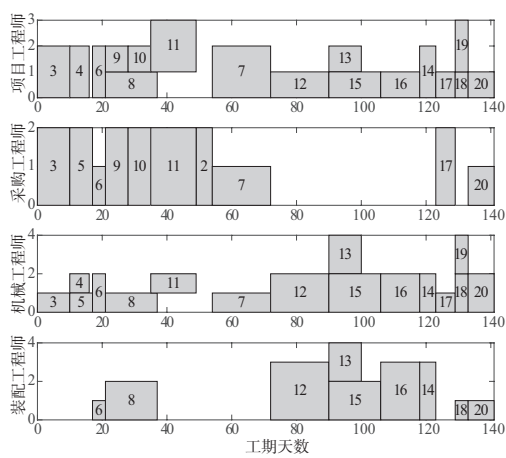


图 4 人员配置甘特图

表 4 布谷鸟算法与自适应布谷鸟算法比较

算法	收敛代数	最优值	耗时/s
CS	42	153	24
ICS	16	141	26

可以看到在当前的人力配置下,该方案已经达到了最优化,但是在项目的某些时段还存在着大量的人力浪费。项目经理可以通过观察人员配置甘特图来提前对具体的工程师做资源补偿安排,比如在项目第 72 天~129 天的这个时间段把采购工程师调配到其他项目中;在项目前 20 天和第 38~89 天这两个时间段也可把装配工程师调到其他项目中。

5 结语

本文提出了一种新的基于自适应步长因子的布谷鸟

算法(ICS)。以 S 公司生产调度项目实例为基础,验证了该算法在处理此类问题的有效性。还将改进算法与原算法对比,验证了改进算法拥有更好的精度和收敛速度。此外,通过观测软件自动生成的资源利用率图和资源配置甘特图,项目经理能够准确地监控资源配置情况,动态调整人员安排。ICS 算法需求参数少,适用性强,经过简单的参数调整,就可以运用到其他制造型企业的实际生产调度中,为项目经理制订项目计划提供参考。

参考文献:

[1] LI H, XIONG L, LIU Y, et al. An effective genetic algorithm for the resource levelling problem with generalised precedence relations[J]. International Journal of Production Research, 2018, 56(5): 2054-2075.

[2] ZHENG X, WANG L. A multi-agent optimization algorithm for resource constrained project scheduling problem[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(15/16): 6039-6049.

[3] DENG L, LIN V, CHEN M. Hybrid ant colony optimization for the resource-constrained project scheduling problem[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(1): 67-71.

[4] 王凌,郑环宇.一种多目标资源受限项目调度问题的教学算法[J].控制与决策,2015(10):1868-1872.

[5] YANG X S, DEB S. Cuckoo search via Lévy flights[C]//2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC). IEEE, 2009: 210-214.

[6] 兰少峰,刘升.布谷鸟搜索算法研究综述[J].计算机工程与设计,2015,36(4):1063-1067.

[7] LAYEB A. A novel quantum inspired cuckoo search for knapsack problems[J]. International Journal of bio-inspired Computation, 2011, 3(5): 297-305.

[8] 杨萍,赵珍,郑海霞.基于改进蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法研究[J].机械制造与自动化,2017,46(6):161-163,198.

收稿日期:2019-03-21