

定制医疗器械增材制造的负载均衡进化调度方法*

沈 喆 吴 川 孙伟琴 刘付龙 张 潇

(徐州医科大学医学信息与工程学院 徐州 221004)

〔摘要〕 目的/意义 提出并利用负载均衡进化调度方法, 缩短定制医疗器械增材制造生产活动中的等待时间、均衡各机器负载。方法/过程 通过分析时间维度下的影响因素, 建立双目标多约束优化问题的数学模型, 引入负载均衡算子, 采用负载均衡进化调度算法求解模型。结果/结论 含有负载均衡算子的负载均衡进化调度方法在任务等待时间和负载均衡性能方面优于其他算法, 特别是在大规模任务下效果显著。该方法能够有效缩短任务等待时间并实现机器负载均衡。

〔关键词〕 医疗器械; 增材制造; 负载均衡; 任务调度

〔中图分类号〕 R-058 〔文献标识码〕 A 〔DOI〕 10.3969/j.issn.1673-6036.2024.06.015

The Load Balancing Scheduling Method for Additive Manufacturing of Customized Medical Devices

SHEN Zhe, WU Chuan, SUN Weiqin, LIU Fulong, ZHANG Xiao

College of Medical Information and Engineering, Xuzhou Medical University, Xuzhou 221004, China

〔Abstract〕 **Purpose/Significance** The load balancing scheduling method is proposed to shorten the waiting time and balance the load of each machine in additive manufacturing of customized medical devices. **Method/Process** By analyzing the influencing factors in the time dimension, the mathematical model of the two-objective multi-constraint optimization problem is established. The load balancing operator is introduced and the load balancing scheduling algorithm is used to solve the model. **Result/Conclusion** The load balancing scheduling method with load balancing operators is superior to other algorithms in terms of task waiting time and load balancing performance, especially for large-scale tasks. This method can effectively shorten task waiting time and realize machine load balancing.

〔Keywords〕 medical devices; additive manufacturing; load balancing; task scheduling

1 引言

增材制造也称为 3D 打印, 具有快速原型、高效生产和无需模具等特点, 在航空航天、汽车制造、生物医学^[1]等领域有广泛应用。与单件大批量生产不同, 增材制造可通过定制满足个性化需求^[2]。在医疗领域, 医疗器械增材制造为患者提供了更适合其身体结构和病情的医疗器械解决方案。

当前在医疗器械大规模定制化生产中, 面临的

〔修回日期〕 2024-03-22

〔作者简介〕 沈喆, 硕士研究生, 发表论文 1 篇; 通信作者: 吴川, 张潇。

〔基金项目〕 国家重点研发计划 (项目编号: 2020YFB1711500); 国家自然科学基金项目 (项目编号: 62003291)。

挑战是如何通过采集不同类型工件生产过程中的历史数据、实时数据,实现高效的资源分配。一个有效的措施是负载均衡调度,即在有限的资源条件下,使每个任务的完成时间趋近于相同,提高定制化生产的整体效率^[3]。实际情况下,由于涉及复杂的资源分配和异构的任务调度,传统资源调度方案会使打印任务分配不均,出现任务等待时间过长或机器负载过重的情况,导致部分机器性能下降甚至损坏,难以保证后续的有效生产,因此开发定制化医疗器械生产活动的负载均衡调度方法尤为重要。

本文建立以任务平均等待时间最小化、单位时间内机器负载均衡最优化的双目标优化模型,给出模型求解方法,通过设计负载均衡等进化算子,根据资源的可用情况和机器的负载情况,合理安排任务的执行顺序,平衡机器的负载,避免出现资源浪费和机器闲置的情况,解决定制医疗器械增材制造中的负载均衡调度问题。

2 相关工作

近年来,随着 3D 打印技术应用越来越广泛,大规模的 3D 打印生产出现了资源难以高效利用的问题。针对上述问题,优化负载均衡调度策略的研究已经取得一些进展。在 3D 打印任务调度中,负载均衡是影响增材制造生产效率的重要因素,已有遗传算法(genetic algorithm, GA)、禁忌搜索算法(tabu search algorithm, TSA)、模拟退火算法(simulated annealing, SA)等被应用,吴传峰等^[4]提出面向完成时间与负载均衡的蚁群算法获得局部最优解,应用非支配排序获得 Pareto 前沿解集,从而达到较高的吞吐率和资源利用率;Mohit A 等^[5]针对云计算中的任务调度问题,提出一种新的元启发式负载均衡感知任务调度算法,有助于缩短任务完成时间、提高资源利用率;Zhao H 等^[6]提出一种基于改进 GA 的 3D 打印多目标优化任务调度方法,解决 3D 打印多目标优化任务调度问题。Jin H 等^[7]提出基于深度强化学习模型框架的 DQS 任务调度算法,为云环境下的任务调度方法提供全新的方案。但这些算法在优化负载均衡调度策略方面仍有不足。本文提出一种定制医疗器械增材制造的负载均衡进化调度方法,以满足生产活动

中对负载均衡和实时任务调度的需求。

3 数学模型

3.1 问题描述

为了方便研究定制医疗器械增材制造中的负载均衡调度问题,不考虑打印机成本、材料、部件等因素,假设一台打印机可以同时执行多个任务,以任务平均等待时间最短、单位时间内机器负载均衡最优为优化目标,建立负载均衡调度优化模型。首先明确以下 5 点假设条件:一是每个任务均有一个完成时间(即打印时间)和截止时间;二是所有任务的打印时间均已知且固定;三是所有任务的截止时间相同;四是每个任务之间相互独立,每台打印机之间相互独立;五是不考虑打印机故障等不确定因素。

基于以上假设,从时间维度考虑,可以将定制医疗器械增材制造中的负载均衡调度问题描述为:将 n 个任务分配给 m 台 3D 打印机,为了保证生产效率的同时,合理分配资源,充分发挥硬件设备的潜力,提升整个生产活动的运行水平,选择任务平均等待时间最短和单位时间内机器负载均衡最优作为优化目标。短的平均等待时间意味着更高的资源利用率和更快地完成客户需求;更均衡的调度策略应当尽可能地使每台 3D 打印机的工作负载接近,避免部分设备过负荷运行而其他设备空闲的情况,从而降低能耗、延长设备寿命,并提高整体工作效率。

3.2 模型构建

3.2.1 任务平均等待时间 任务执行打印工作的平均等待时间 WT_{avg} 计算方式如下。

$$WT_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m WT_{i,j} x_{i,j}}{mn} \quad (1)$$

其中, $x_{i,j}$ 为决策变量,变量值表示第 i 个任务是否被分配到第 j 台 3D 打印机上,其中 $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, m$ 。当 $x_{i,j}=1$ 时,说明任务 i 被分配到 3D 打印机 j 上;当 $x_{i,j}=0$ 时,说明任务 i 没有被分配到 3D 打印机 j 上。 $WT_{i,j}$ 表示第 i 个任务在其所分配的第 j 台打印机执行打印工作的等待时间,从执行时间角度考虑, $WT_{i,j}$ 等于该任务在第 j 台打印机执行的开始时间 $ST_{i,j}$, 设 $PT_{i,j}$ 表示该任务在第 j 台打

印机上的打印时间，则 $ST_{i,j}$ 计算方式如下。

$$ST_{i,j} = ST_{i-1,j-1} + PT_{i-1,j-1} \tag{2}$$

3.2.2 单位执行时间内机器负载率 定义每台打印机在同一执行时间内的分配任务数量为 $L_j = \sum_{i=1}^n x_{i,j}$ ，计算所有打印机在单位执行时间内的平均分配任务数量 $\bar{L}$ 。

$$\bar{L} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{i,j} \tag{3}$$

计算所有打印机在单位执行时间内负载平衡差异的平均值。

$$L_{\text{avg}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{\left| \sum_{i=1}^n x_{i,j} - \bar{L} \right|}{\bar{L}} \tag{4}$$

3.2.3 目标函数转化 将上述双目标优化问题转换为单目标优化问题，记转化后的目标函数为 F ，计算方法如下。其中 α 为时间权重系数， β 为负载均衡权重系数，分别表示任务调度中平均等待时间和负载均衡的重要性，且 $\alpha + \beta = 1$ 。当 F 越小，每个任务 i 在每台打印机 j 上完成调度所用的等待时间越短，机器的负载均衡越优。

$$F = \alpha \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m WT_{i,j} x_{i,j}}{mn} \right) + \beta \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{\left| \sum_{i=1}^n x_{i,j} - \bar{L} \right|}{\bar{L}} \right) \tag{5}$$

针对定制医疗器械增材制造生产活动中负载均衡调度问题构建数学模型。其中，约束条件中 $\sum_{j=1}^m x_{i,j} = 1, i = 1, 2, \dots, n$ 表示每个任务只能被分配到一台 3D 打印机上； $\sum_{i=1}^n x_{i,j} t_i \leq t_j, j = 1, 2, \dots, m$ 表示所有任务的等待时间均不得超过截止时间 t_j ， t_i 是指第 i 个任务的截止时间； $x_{i,j} \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ 表示决策变量 $x_{i,j}$ 必须满足二进制整数规划的要求。

$$\begin{cases} \text{MIN } F = \alpha \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m WT_{i,j} x_{i,j}}{mn} \right) + \beta \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{\left| \sum_{i=1}^n x_{i,j} - \bar{L} \right|}{\bar{L}} \right) \\ \text{s.t.} & \sum_{j=1}^m x_{i,j} = 1, i = 1, 2, \dots, n \\ & \sum_{i=1}^n x_{i,j} t_i \leq t_j, j = 1, 2, \dots, m \\ & x_{i,j} \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \tag{6}$$

4 负载均衡进化调度方法

根据构建的数学模型可知本文涉及的问题是一个 NP-hard 问题，传统的数学方法难以解决，因此提出一种含有负载均衡算子的负载均衡进化调度方法（load balancing evolutionary scheduling algorithm, LBESA）来求解此问题。

4.1 染色体编码

一份染色体代表一个任务分配方案^[8]。本文采用自然数编码方式，自然数编码有助于解决传统二进制编码中搜索范围过大的问题，并且有效减少个体解码的时间^[9]。设 3D 打印机集合为 $M = \{M_1, M_2, M_3, \dots, M_m\}$ ， m 为打印机数量，任务集合为 $J = \{J_1, J_2, J_3, \dots, J_n\}$ ， n 为任务数量，则解 $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_n\}$ 为任务到打印机的一组映射^[2]，例如有 3 台可用 3D 打印机，5 个待分配任务，那么任务与打印机的映射关系表示，见表 1，对应的一组解为 $\{2, 1, 3, 2, 3\}$ 。

表 1 染色体编码示例

待分配任务	可用 3D 打印机
J_1	M_2
J_2	M_1
J_3	M_3
J_4	M_2
J_5	M_3

4.2 初始化种群

采用随机法产生初始种群^[10]，通过随机生成初始种群中每个个体的编码，保证每个任务都被分配到且只被分配到一台 3D 打印机上。

4.3 适应度函数

为了更好地评价种群个体优劣，采用公式（7）作为 GA 的适应度函数，其中 WT_{max} 表示该任务执行打印工作的最大等待时间，将所有任务执行打印工作的平均等待时间与最大等待时间的比率用于反映

任务等待时间的分布情况。如公式 (7) 所示, 分别将前文公式 (1)、(4) 表示的双目标值标准化, 确保其处于 $[0, 1]$, 并转化为最大值问题。适应度越高, 说明基因越优, 任务调度效率越高^[6], 单位执行时间内机器负载均衡越优。

$$fitness = \alpha \max \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m WT_{i,j} x_{i,j}}{mn WT_{\max}}, 0 \right) + \beta \left(1 - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{\left| \sum_{i=1}^n x_{i,j} - \bar{L} \right|}{L} \right) \quad (7)$$

4.4 选择操作

选择算子的作用是选择父代染色体中适应度高的遗传给下一代, 即“适者生存”法则。为了算法的快速收敛, 避免其陷入局部最优解, 采用一种轮盘赌选择策略^[11], 不仅增加了优秀基因进入下一代的概率, 也确保了种群的多样性^[9]。

4.5 进化操作

所提方法的进化操作包括交叉和变异, 为了避免一般交叉变异操作搜索速度缓慢^[12], 维持种群的多样性^[13], 采用自适应的进化参数提高种群适应性以及全局搜索能力, 交叉概率 P_c 设置方法: 定义交叉率的最大值 $Cr_{\max}$ 和最小值 $Cr_{\min}$, 并将初始交叉率设为两者平均值 Cr_{avg} ; 利用自适应交叉概率函数计算交叉概率。如果当前种群的适应度函数值相比过去 10 代中最好表现的值增加了 5% 或以上, 则将交叉概率设置为 Cr_{avg} ; 反之, 则增加交叉概率 0.05, 直到达到上限 $Cr_{\max}$, 否则降低交叉概率 0.05, 直到达到下限 $Cr_{\min}$ 。自适应变异概率 P_m 具体实现方式与交叉操作类似, 其值随适应度函数值变化如下。其中 $P_m \in [Mu_{\min}, Mu_{\max}]$, i 表示迭代次数, f_i 表示当前代种群的适应度函数值。

$$P_m = \begin{cases} Mu_{\text{avg}}, \frac{f_i}{\max(f_{i-20:i-1})} \geq 1.05 \\ Mu + 0.01, 0.95 < \frac{f_i}{\max(f_{i-20:i-1})} < 1.05 \\ Mu - 0.01, \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

4.6 负载均衡操作

本文设计的负载均衡算子, 目的是使每台机器

的工作负载尽可能接近。负载均衡操作^[14]分为 4 步。第 1 步: 统计每台机器当前的任务数量, 并按如下方式根据任务数量评估机器的负载等级。其中, G_k 为机器 m 的负载等级, $G_k \in \{G_1, G_2, G_3\}$, 其中 G_1, G_2, G_3 均为常量, $\gamma_1, \gamma_2 (0 < \gamma_1 < \gamma_2)$ 为预设的负载等级阈值。

$$G_k = \begin{cases} G_1, |L_j - \bar{L}| \leq \gamma_1 \\ G_2, \gamma_1 < |L_j - \bar{L}| < \gamma_2 \\ G_3, \gamma_2 \leq |L_j - \bar{L}| \end{cases} \quad (9)$$

第 2 步: 随机选择一台需要减轻负载的机器, 评估该机器所负载任务的分配优先级。

第 3 步: 根据机器的负载等级计算该机器可分配的任务数量。选择分配优先级最高的任务, 分配到负载较小的机器上, 重复此过程, 直到机器达到预设的分配数量并完成任务分配, 得到新的分配方案。每个任务被分配到机器上的概率如下, 其中 θ_1, θ_2 均为常量, $0 < \theta_1 < \theta_2 < 1$ 。

$$\mu_k = \begin{cases} 0, G_k = G_3 \\ \theta_1, G_k = G_2 \\ \theta_2, G_k = G_1 \end{cases} \quad (10)$$

通过每个任务的分配概率得出机器被分配的任务总数 R_k 。

$$R_k = \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (11)$$

第 4 步: 比较新的任务分配方案和原始方案的适应度值, 选择适应度值更优的方案作为负载均衡处理后的方案。

4.7 精英保留策略

为了提高算法的收敛速度, 避免算法陷入局部最优, 将选择、交叉、变异和负载均衡操作产生的新后代以及精英个体合并作为下一代群体, 通过保留最高适应度前 10% 的个体作为精英解并利用直接复制方法, 控制种群的多样性和方向使种群更快地接近全局最优解^[15]。

5 实验仿真与结果

5.1 实验仿真

通过 3 个角度验证 LBESA 的优越性: 一是负载

均衡算子角度,分析LBESA对3D打印机的负载均衡度、任务平均等待时间的结果;二是算法效率角度,将LBESA与GA、TSA、SA应用到定制医疗器械增材制造生产调度过程中,比较在机器是否满足负载均衡条件下的负载均衡度、任务的平均等待时间;三是算法收敛角度,比较LBESA和GA的收敛结果。

实验仿真环境为Windows 10操作系统,采用Python 3.10实现算法编程。为了公平起见,上述实验中,GA、TSA、SA均以前文公式(6)作为优化目标,并采用相同的实验环境以及参数设置:任务数量与3D打印机数量若干个,所有任务打印时间20~40分钟,每个任务执行打印工作的最大等待时间为60分钟,权重系数 α 和 β 均取0.5,交叉概率参数值为[0.5, 0.9],变异概率参数值为[0.01,

0.1],最大迭代次数取值为200,种群大小为100。

5.2 结果分析

5.2.1 实验一结果分析 通过设置不同任务数和打印机总数评估LBESA的性能,主要考察该算法在任务平均等待时间和负载均衡度的结果,体现其在该生产调度过程中优越的均衡表现。本文将任务数量小于或等于每台打印机平均分配任务数量的打印机数量 m' 与总打印机数 m 的比率作为负载均衡度,值越高,表明打印机负载越均衡。任务平均等待时间随任务数量和3D打印机数量的变化曲线,见图1,可以发现,当打印机总数不变和总任务数不变时,含有负载均衡算子相较于无负载均衡算子的任务平均等待时间分别缩短了2.57%和4.58%。

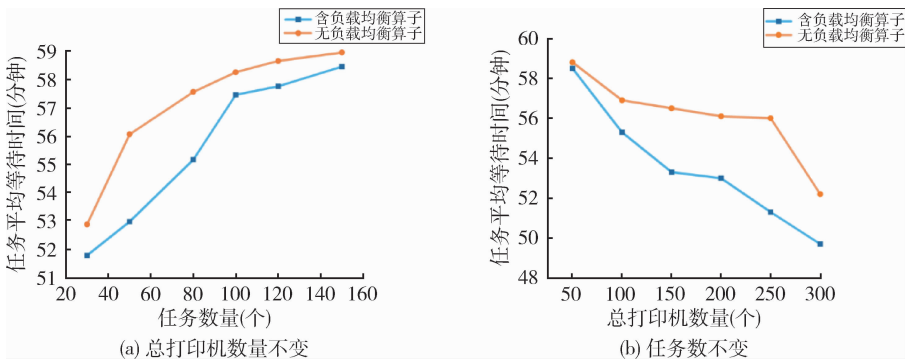


图1 实验一任务平均等待时间比较

LBESA中是否具有负载均衡算子两种情况下的负载均衡度,见图2。具有负载均衡算子的LBESA能够一直保持较好的负载均衡度,在相同打印机数

或任务数量的情况下,有负载均衡算子相对于无负载均衡算子的负载均衡度分别提高了3.12%和3.02%。

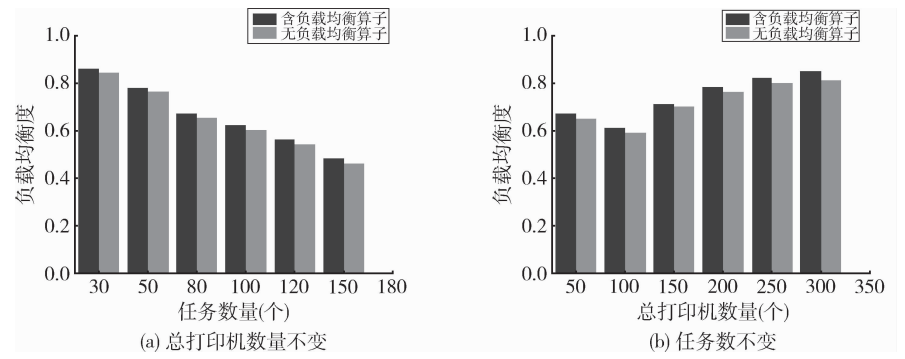


图2 实验一负载均衡度比较

5.2.2 实验二结果分析 实验二打印机总数恒定为200个,通过设置不同规模大小的任务数,比较

在相同实验环境和参数下的LBESA、GA、TSA、SA的负载均衡度和任务的平均等待时间。4种算法在

小规模任务数实验中的平均任务等待时间和负载均衡性能，见图 3。发现 4 种算法在处理 10 个任务时表现相似，是因为在较小的任务规模下，各算法能

够轻易地在解空间中找到最优解，当任务规模增加到 30 时，LBESA 开始显现其优势。

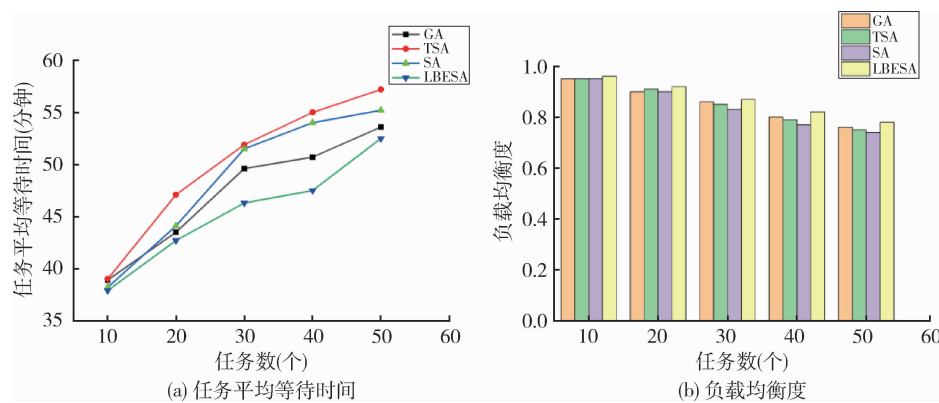


图 3 小规模任务实验结果

在大规模任务下，4 种算法在任务平均等待时间和负载均衡度方面的表现，见图 4。可以看出

LBESA 在处理大量任务时，任务的平均等待时间和系统的负载均衡性能方面显著优于其他 3 种算法。

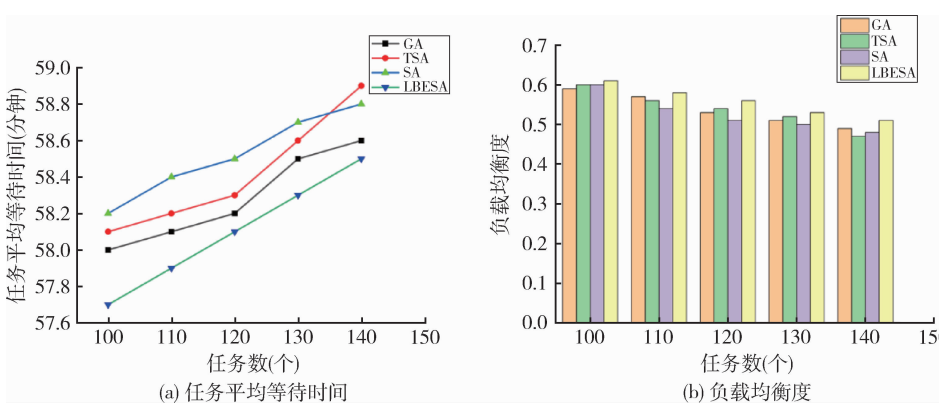


图 4 大规模任务实验结果

5.2.3 实验三结果分析 GA 和 LBESA 在任务数量为 50 和 100 时的算法收敛结果，见图 5。随着迭代次数增加，收敛曲线均趋于平稳，相比于 GA，

LBESA 具有更高的适应度值。LBESA 有不亚于 GA 的收敛速度，这一结果也反映了其优越性。

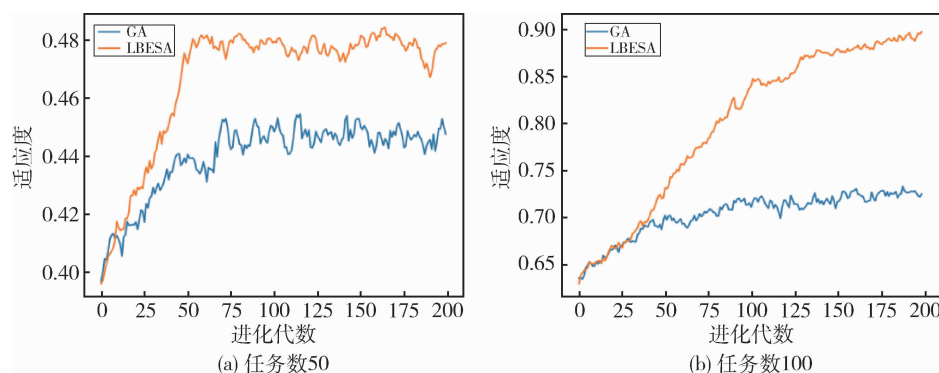


图 5 算法收敛结果比较

相对于算法 GA、TSA 和 SA，本文所提出的 LBESA 能够得到更优的负载均衡调度策略，更好地适应增材制造生产活动负载均衡调度问题的需求。

6 结语

针对定制医疗器械增材制造生产过程中存在的任务等待时间长、打印机负载均衡的问题，本文建立以任务平均等待时间最短和单位时间内机器负载均衡最优为目标的优化模型，提出一种负载均衡调度优化算法求解该模型。仿真实验表明，该算法在生产调度过程中具有良好的均衡表现，在相同的实验环境下，该算法在负载均衡度、任务的平均等待时间和收敛速度等方面均优于对比算法，在一定程度上避免了多个任务长时间等待、个别 3D 打印机负载过重的情况，实现了任务的合理分配与打印机的负载均衡。随着 3D 打印技术和医疗技术的不断发展，定制医疗器械增材制造中的负载均衡调度问题将越来越复杂，因此结合蚁群算法等其他智能算法，进一步缩短任务的平均等待时间和提高打印机的负载均衡度将是接下来的研究工作。

作者贡献：沈喆负责实验设计与实施，初稿撰写；吴川负责研究指导、论文审核与项目管理；孙伟琴负责数据收集、数据可视化；刘付龙负责实验验证；张潇负责项目管理。

利益声明：所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

1 张梦月, 雷瑾亮, 赵政. 医用 3D 打印技术及材料发展现状与趋势 [J]. 科技中国, 2020 (3): 21 - 24.

2 杨越, 阮雅端, 陈启美. 基于优化遗传算法的负载均衡策略研究 [J]. 电子测量技术, 2014, 37 (6): 26 - 29, 33.

3 王琳琳. 群智能算法优化改进及其在电力调度中的应用研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2020.

4 吴传峰, 朱伟. 一种面向完成时间与负载均衡的任务调度算法 [J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45 (2): 82 - 87.

5 MOHIT A, SHIKHA G. An adaptive genetic algorithm - based load balancing - aware task scheduling technique for cloud computing [J]. Computers, materials & continua, 2022 (12): 6103 - 6119

6 ZHAO H, YU H. Improved genetic algorithm for 3D printing multi - objective optimization task scheduling [J]. MATEC web of conferences, 2021, 336: 1 - 4.

7 JIN H, FU Y, YANG G, et al. An intelligent scheduling algorithm for resource management of cloud platform [J]. Multimedia tools and applications: an international journal, 2020, 79 (5): 5335 - 5353.

8 黄超, 胡德敏, 余星. 多目标遗传算法在云计算任务调度中的应用 [J]. 信息技术, 2014 (5): 130 - 134.

9 李春晖, 谢永斌. 云计算环境下资源负载均衡调度优化仿真 [J]. 计算机仿真, 2017, 34 (12): 420 - 425.

10 马冬青, 王蔚. 基于改进遗传算法的星地任务优化调度研究 [J]. 计算机工程与应用, 2014, 50 (6): 246 - 249, 254.

11 王欣欣, 刘晓彦. 基于双适应度动态遗传算法的云计算资源调度 [J]. 计算机工程与设计, 2018, 39 (5): 1372 - 1376, 1421.

12 于莹莹, 陈燕, 李桃迎. 改进的遗传算法求解旅行商问题 [J]. 控制与决策, 2014, 29 (8): 1483 - 1488.

13 张国辉, 高亮, 李培根, 等. 改进遗传算法求解柔性作业车间调度问题 [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (7): 145 - 151.

14 许斌, 赵云凯, 朱剑鸣, 等. 移动边缘计算不确定性任务持续卸载及资源分配方法 [J]. 软件学报, 2024, 35 (3): 1466 - 1484.

15 吴振, 吴红兰. 基于改进遗传算法的无人机航路规划 [J]. 电子测量技术, 2021, 44 (24): 52 - 58.