

车间绿色调度研究综述

高亮^{1*}, 余飞², 卢超²

(1. 华中科技大学智能制造装备与技术全国重点实验室, 湖北武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)计算机学院, 湖北武汉 430078)

摘要:随着制造业的蓬勃发展,环境污染和资源短缺等问题逐渐凸显,严重影响了社会的可持续发展。因此,制造业节能减排转型是全球绿色低碳发展的必然要求。而生产调度作为制造系统中最重要的环节之一,可通过资源的合理分配来实现制造系统运行的高效化和绿色化。在绿色制造的背景下,车间绿色调度已成为生产调度领域的研究热点。为此,拟从并行机绿色调度问题、流水车间绿色调度问题、作业车间绿色调度问题、柔性作业车间绿色调度问题以及分布式车间绿色调度问题多个方面,对2018年至今的研究成果进行系统性的综述,总结现有研究的不足,指出未来的研究方向。

关键词:车间调度;绿色调度;智能制造;优化算法

中图分类号:TH186 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2025)02-001-23



Review of green shop scheduling problem

GAO Liang^{1*}, YU Fei², LU Chao²

(1. State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Computer Science, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430078, China)

Abstract: With the vigorous development of the manufacturing industry, the problems such as environmental pollution and resource shortage have gradually become prominent, seriously affecting the sustainable development of society. Therefore, the transformation of manufacturing energy saving and carbon reduction is an inevitable requirement for global green and low-carbon development. As one of the most important parts of the manufacturing systems, production scheduling can realize efficient and green operation of the manufacturing systems through the reasonable allocation of resources. Under the context of green manufacturing, the research of green shop scheduling problem has become a hot spot in the field of production scheduling. Therefore, a systematic review of the existing research since 2018 from the aspects of the green parallel machine scheduling problem, the green flow shop scheduling problem, the green job shop scheduling problem, the green flexible job shop scheduling problem, and the green distributed shop scheduling problem was conducted, the shortcomings of the existing research was summed up, and the direction of future research was pointed out.

Keywords: shop scheduling; green scheduling; intelligent manufacturing; optimization algorithm

制造系统的高效运转是社会经济发展的重要保障。然而,进入21世纪,人类面临着前所未有的全球性能源资源危机、生态环境危机以及气候变化危机等多重挑战。制造业本质上是一个资源转化的过程,需要投入大量的原材料和能源,同时产出大量的污染物^[1]。由此,制造业中的能源消耗和环境污染问题日益突出,严重影响了制造系统的正常运转,阻碍了制造业的可持续发展。为此,世界各国相继提出了应对措施,以推动制造业

向低碳、环保和可持续方向发展,实现经济发展和环境保护的双赢。德国提出“工业4.0”国家发展战略,希望利用信息技术推动产业变革,提升制造业的智能化,解决能源消耗等社会问题^[2]。中国提出制造强国战略的第一个十年行动纲领“中国制造2025”,将智能制造作为主攻方向,全面推行绿色制造,实施绿色制造工程,并将其列入九大战略任务和五大重大工程之中^[3]。

在这一时代背景下,制造业必须采用新的技

收稿日期:2024-03-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51825502,52175490,51805495);湖北省重点研发计划资助项目(2022BAD121)

*第一作者:高亮(1974—),男,山东临清人,教授,博士,博士生导师,E-mail:gaoliang@mail.hust.edu.cn

引用格式:高亮,余飞,卢超. 车间绿色调度研究综述[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(2): 1-23.

Citation: GAO L, YU F, LU C. Review of green shop scheduling problem[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(2): 1-23.

术和手段以实现节能减排。在制造业中实现节能减排的方法主要有两种:一种是设计出需要更少能源和排放更少污染物的产品或机器。然而,绿色产品或机器的设计制造需要大量的人力资源、巨大的资金投入和较长的开发时间,很难在短时间内产生满意的结果。另一种是在生产车间中进行绿色调度,生产调度作为制造系统中最重要的环节之一,可通过资源的合理分配来实现制造系统运行的高效化和绿色化。与前一种方法相比,车间绿色调度不需要大量的资金投入就可以显著提高能源利用效率。俨然,在绿色制造的背景下,车间绿色调度问题的研究具备理论和实践价值,已成为生产调度领域的研究热点^[4]。

车间绿色调度问题可以看作传统车间调度问题的延伸。在数学上,它们都属于 NP-hard 问题^[5-6]。车间调度问题可以定义为在遵循一定的工艺约束情况下,将多个工件按一定次序分配给机器加工,以达到某些调度指标的最优^[7]。而车间绿色调度问题可以定义为在满足生产约束的前提下通过资源的合理分配,实现节能、减排、降耗以及降成本,减少生产对环境的影响,取得生产指标和绿色指标的协同优化^[8]。传统车间调度问题的研究主要专注生产指标,例如完工时间和交货期等,而忽视了能源消耗和环境影响,这使得传统车间调度问题的研究很难满足当前制造业可持续发展的要求。因此,车间绿色调度问题的研究旨在通过合理资源分配,在提高生产效率的同时,降低能耗和污染物排放,从而实现经济发展和环境保护的双赢,以推动制造业的可持续发展。车间绿色调度问题的具体物理应用场景有很多,包括钢铁、半导体以及汽车等高能耗高污染的生产场景^[4]。通过在生产车间中合理调度加工工序,能够避免某些环节的过度等待和高负荷运行,减少生产过程中的资源消耗和废物排放,从而降低企业生产成本,提升企业形象和市场竞争能力。因此,车间绿色调度问题的研究具备工程应用价值。

此外,在生产调度过程中合理考虑节能减排策略可以进一步推动制造系统的绿色化。节能减排策略在制造体系中主要分为三类:①机器开关机,即机器可以在空闲期间关闭,在加工期间重启,从而减少机器空闲期间的能耗;②分时电价,即通过电价的灵活性将生产时间从用电高峰期转移到用电低峰期,从而减少用电成本及能源消耗;③速度缩放策略,即机器可以以不同的速度加工工件,一般认为降低加工速度可以减少能源消耗,但也会延长加工时间,因此,在不影响其他工序加

工的情况下,可以通过降低某些工序的机器加工速度来减少能源消耗。这三种节能减排策略是独立的,可以同时存在于加工环境中。因此,结合实际生产情况,在生产调度过程中考虑这些节能减排策略对于制造系统的绿色化是十分有必要的。

绿色指标主要包括资源消耗和废弃物排放两方面^[1]。由于绿色指标的引入,车间绿色调度问题比传统车间调度问题更复杂。其复杂性体现在以下几个方面:①绿色指标的建模——绿色指标的建模受生产设备、状态、时间、环境等诸多因素的影响,这些生产影响因素具有耦合性、不确定性和针对性,使得绿色指标的建模复杂,没有统一的标准;②引入节能减排策略——在生产调度过程中考虑节能减排策略可以进一步推动制造系统的绿色化,但由于需要考虑机器开关机时间、速度挡位选择以及生产区间电价等问题,极大增加了解空间及解的搜索难度;③多目标优化——由于需要同时兼顾生产和环境指标,车间绿色调度问题在大部分情况下是一个多目标优化问题。这使得解的评价指标更复杂,需要兼顾收敛性和多样性。

目前,用于求解车间绿色调度问题的算法主要有三种,分别是精确算法、启发式算法和元启发式算法。精确算法虽然在理论上可以得到最优解,但由于车间调度问题的 NP-hard 复杂性,通常只适用于小规模问题的求解。对于大规模问题,启发式算法和元启发式算法的应用更为广泛。启发式算法基于调度规则能够快速构造出一个可行解,求解效率高,不受问题规模限制,但是难以保证解的质量,同时调度规则的设计依赖人工经验。元启发式算法是启发式算法的改进,通过迭代搜索不断改善解的质量,兼顾了时间效率和解的质量。

在 2018 年 3 月,王凌等^[8]在《控制与决策》上发表了“绿色车间调度优化研究进展”。本文在此基础上,以(2018—2024 年)车间绿色调度问题研究作为重点。按照车间类型分类,本文拟从并行机绿色调度问题、流水车间绿色调度问题、作业车间绿色调度问题、柔性作业车间绿色调度问题以及分布式车间绿色调度问题多个方面,对现有研究进行系统性的综述,总结现有研究的不足,指出未来的研究方向,为后续的车间绿色调度问题相关研究提供指导。

1 并行机绿色调度问题

并行机调度问题是所有车间调度问题中最简单的问题之一,也是其他复杂调度问题的特例。

在并行机调度问题中,每个工件只需完成一道工序,可以选择任意一台加工机器完成加工。对于并行机的研究主要分为相关并行机和不相关并行机。

1.1 相关并行机绿色调度问题

在相关并行机中,所有的加工机器是完全相同的。相关并行机绿色调度问题 (green identical parallel machine scheduling problem, GIPMSP) 是在相关并行机生产调度系统中进一步关注绿色指标。当前,对于 GIPMSP 的研究,大部分文献主要是在基本问题基础上,针对不同生产场景引入了分时电价和速度缩放策略。此外,少部分文献进一步考虑了更为复杂的调度场景,例如区间工时、准备时间、学习效应、恶化效应等。

Anghinolfi 等^[9] 针对带有分时电价的 GIPMSP 构建了一个以最小化完工时间和总能耗的混合整数线性规划 (mixed integer linear programming, MILP),同时设计了一种双目标启发式算法来求解该问题,该算法包含了一个改进的构造启发式策略和一个新颖的局部搜索策略,实验结果证实了该算法在 D_R 、Purity 和 Spacing 指标上优于构造启发式算法、基于分解的多目标进化算法 (multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition, MOEA/D) 和非支配排序遗传算法 III (non-dominated sorting genetic algorithm III, NSGA-III); Gaggero 等^[10] 在 Anghinolfi 等^[9] 提出的 MILP 模型的基础上进一步分析问题解空间的分布,并提出了一个对称打破性质,然后基于此性质提出了一个紧凑 MILP 模型,由于问题性质的引入,该模型在求解时间上明显优于普通的 MILP 模型,另外在 Anghinolfi 等^[9] 提出的启发式方法的基础上,通过引入分配机制和重调度策略改造出了一种新的启发式方法,该启发式方法在 HV 和 IGD⁺ 指标上优于 Anghinolfi 等^[9] 所提出的启发式方法,最后设计了一种新的动态规划算法,该算法能够计算每台机器上调度作业的最佳时间。在考虑分时电价的 GIPMSP 的基础上, Feng 和 Peng^[11] 进一步研究了区间工时和机器开启的选择问题,首先构建了一个最小最大后悔模型以最小化总电力成本,然后提出了一种基于迭代松弛的精确算法和一种基于模因差分进化的元启发式算法来求解该问题。

对于考虑速度缩放策略的 GIPMSP, Xiao 等^[12] 为了优化时间成本和总能耗,首先通过线性加权的方法将多目标问题转换成单目标问题,然后为了有效地求解该问题,提出并证明了一些性

质,并将这些性质纳入所提出的分支界限算法中,以限制空间搜索树中的节点数量; Safarzadeh 等^[13] 通过严谨的理论分析,基于 Ji 等^[14] 提出的启发式算法设计了一种改进的启发式算法以优化完工时间和总绿色成本,其中总绿色成本由单位加工时间绿色成本计算得到; Arash 等^[15] 建立了一个双目标模型和一种启发式算法以最小化总完工时间和总能耗,其中启发式算法能以多项式复杂度求出这两个目标的精确帕累托前沿。Bektur^[16] 在 GIPMSP 基础上考虑了速度缩放策略、准备时间及学习效应,同时设计了一种模因算法来优化完工时间和总能耗。

对于带有恶化效应的 GIPMSP,为了优化总拖期和总能耗, Wu 等^[17] 提出了一种基于逻辑的 Benders 分解方法以最小化总拖期和总能耗,该方法的思想是将多目标优化的问题分解成多个独立的子问题并分别求解; 薛聪等^[18] 通过加权的方式将多目标问题转换为单目标问题,然后提出了一种遗传变邻域搜索算法来优化总拖期和总能耗。该算法通过遗传操作获得变邻域搜索操作的解集,然后通过设计的变邻域结构进行寻优操作。

1.2 不相关并行机绿色调度问题

在不相关并行机中,不同的加工机器在加工时间、加工能耗或加工速度等方面有所不同。不相关并行机绿色调度问题 (green non-identical parallel machine scheduling problem, GNIPMSP) 比 GIPMSP 更为复杂,进一步考虑了加工机器的异质性。同时,与 GIPMSP 类似,现有文献主要也是在 GNIPMSP 基础上引入了分时电价和速度缩放策略进行研究。另外,少部分文献进一步考虑了批处理机、学习效应、恶化效应等复杂调度场景。

雷德明等^[19] 提出了一种新型帝国竞争算法求解 GNIPMSP,该算法利用字典序方法将总拖期作为主要优化目标,将总能耗作为次要优化目标。

对于考虑分时电价的 GNIPMSP, Pei 等^[20] 引入了一种近似算法去减少电力成本同时提高生产率,实验结果表明,所提出的近似算法与 CPLEX 求解器得到的结果差距大多在 4% 以内。Heydar 等^[21] 设计了一种基于仿真的近似动态规划算法来优化完工时间和总能耗,该算法使用决策后状态的概念来应对贝尔曼方程中的期望,从而帮助算法得到最优决策。实验结果证实所提出的算法在运行时间和解的质量上优于整数规划模型和

Paolucci 等^[22]提出的启发式算法; Saberi-Aliabad 等^[23]首先构建了一个以最小化总能耗为优化目标的 MILP 模型, 然后根据问题的假设提出了一些支配规则和有效不等式去改善该模型的计算时间, 最后构建了一种松弛固定约束的启发式算法以求解大规模问题。

对于考虑速度缩放策略的 GNIPMSP, Xue 等^[24]提出了一种分布估计进化模因算法来优化完工时间和总碳排放量, 其中总碳排放量与总能耗正相关, 而总能耗与设置时间和加工时间正相关; Wu 和 Che^[25]设计了一种模因差分进化算法来优化完工时间和总能耗, 该算法包括高效的编解码方案, 舍入和选择算子, 以及结合自适应元标记学习策略的局部搜索算子; 王永琦等^[26]引入了一种教与学优化算法来优化总拖期和总能耗, 该算法通过设计特殊的编解码方法来解决标准教与学算法无法直接适用于离散问题的缺点。

此外, Fallahi 等^[27]在 GNIPMSP 中考虑了批处理机, 同时引入了一种非支配排序遗传算法 II (non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II) 和一种多目标灰狼算法以最小化完工时间和生产系统总成本, 其中生产系统成本包括总延迟和提前成本、机器采购成本以及碳排放成本。而碳排放成本的建模考虑了两种政策: 碳税政策和排放配额交易政策。在碳税政策下, 碳排放成本与总能耗正相关, 而总能耗又与加工时间正相关。在排放配额交易政策下, 碳排放成本与碳排放配额上界与下界的差值正相关。

Batista Abikarram 等^[28]在 GNIPMSP 基础上考虑实时和按需收费定价, 并提出了一个 MILP 模型来优化总电力成本。其中总电力成本包括总的需求和消费费用。总消耗费用是每台机器在每个时间段内消耗的总能量乘以每个时间段的能源成本的总和。总需求收费是指在指定的滚动时间窗口内的最大平均电力需求乘以需求收费。

基于劳动密集型的纺织业, Wang 等^[29]研究带有恶化效应的 GNIPMSP, 首先构建一个以总能耗为优化目标的 MILP 模型, 其中完工时间给定上界作为约束条件, 然后提出了一种迭代启发式算法进行求解。齐玉欣等^[30]在 GNIPMSP 中研究学习效应和加工时间不确定性, 并设计了一种 MOEA/D 来优化完工时间和总能耗。

综上所述, 并行机绿色调度问题的研究已经受到了国内外学者的广泛关注。但是现存的研究仍然存在不足。在被统计的文献中, 目前研究主

要关注分时电价和速度缩放策略, 而忽视机器开关机。这与并行机调度问题的特点有关, 即工件只有一道工序需要选择一台机器进行加工, 当机器分配到的所有工件还没有加工完成时, 该机器不存在空闲时间, 因此, 不需要考虑机器开关机。对于绿色指标, 目前文献主要关注总能耗, 同时总能耗的建模主要是通过设置单位时间能量消耗系数来构建与加工时间的线性关系, 这种建模方式简单直接且易于计算, 但过于理想化。在实际场景, 总能耗和加工时间之间很难用线性关系直接关联。尽管有少部分文献考虑了碳排放和电力资源相关指标, 但是在建模过程中却是通过设置与能耗之间的转换系数构建与总能耗的线性关系或者直接与时间建立线性关系, 建模方式同样过于理想化, 难以满足实际需求。此外, 从研究问题上看, 大部分文献的研究过于简单, 只关注了基本的并行机调度问题, 只有小部分文献在并行机调度问题基础上考虑了批处理机、工时恶化和准备时间等, 但是在实际生产中还会出现不确定加工环境、资源约束等其他情况。当前并行机绿色调度问题的研究主要停留在理论研究, 问题建模与实际工程需求的结合还不够, 因此, 未来仍然可以基于上述几点不足对并行机绿色调度问题开展进一步的研究。

2 流水车间绿色调度问题

在流水车间中, 不同的生产阶段是连续存在的, 每个工件依次经过各个生产阶段进行加工。由于流水车间调度问题及其变种很多, 分类也很多。在此, 主要对一般流水车间、置换流水车间和混合流水车间这三类问题进行探讨和分析。

2.1 一般流水车间绿色调度问题

在一般流水车间中, 没有明确要求工件在各阶段的加工顺序和机器柔性。对于一般流水车间绿色调度问题 (green flow shop scheduling problem, GFSP), 现有文献除了考虑节能减排策略, 还关注了准备时间、组调度、动态事件等复杂问题。

李龙等^[31]为了优化 GFSP 中车间运行时间、生产成本和总能耗, 首先通过线性加权方法将多目标问题转换为单目标问题, 然后根据企业需求, 通过层次分析法决策各指标权重, 最后利用遗传算法 (genetic algorithm, GA) 对此问题进行求解。汪和平等^[32]在装配式预制构件的生产过程中研究 GFSP, 同时提出了一种 NSGA-III 来最小化总等待时间、总损失、预制构件的变化程度、完工时间

和总能耗。

对于考虑分时电价的 GFSP, Xue 和 Wang^[33] 为了最小化总电力成本和平均拖期,设计了一种多目标离散差分进化算法,其中总电力成本和加工时间正相关;基于美国的一个案例, Wang 等^[34] 在此基础上还考虑了准备时间,同时提出了一个两阶段多目标抽样模型以优化总加权完工时间和能耗成本。其中能耗成本等于从电网购买电力的成本加上在储能系统中储存能源的成本,再减去向电网出售电力所产生的收入。Ghorbanzade 和 Ranjbar^[35] 在此基础上还考虑了准备时间、组调度、可再生能源约束,并构建了两个 MILP 模型和一种基于分解的启发式算法来优化总能耗成本。

对于带有批调度和速度缩放策略的 GFSP, Goli 等^[36] 设计了三种多目标元启发式算法,包括多目标蚁狮优化算法、多目标 Keshtel 算法和多目标 Keshtel 和社会工程优化算法,用于同时最小化完工时间和总能耗,这些算法的设计基于高效的搜索框架,使得实验结果在求解时间和解的质量上优于 ε 约束、NSGA-II 和多目标粒子群算法。

Zhang 等^[37] 在 GFSP 基础上研究组调度、一致子批和速度缩放策略,为了优化完工时间和总能耗,提出了一种多种群协同多目标进化算法。Babae Tirkolaee 等^[38] 在 GFSP 中研究外包选择和速度缩放策略,为了优化总生产成本和总能耗,提出了一种自适应的人工鱼群算法。

Guo 等^[39] 在 GFSP 中提出了机器超低待机状态,即在不停机的情况下降低机器加工状态的功率,避免机器频繁启停,同时设计了一种混合 GA 来优化完工时间和总能耗,其中总能耗在建模过程中包括加工能耗、空闲能耗和超低待机能耗。王黎明等^[40] 同样在 GFSP 中考虑了机床超低待机状态,并也设计了一种混合 GA 来优化总能耗。

Marichelvam 和 Geetha^[41] 在 GFSP 中考虑了动态事件(订单取消、订单插入和工人旷工),同时引入了一种改进模因算法来优化总能耗。钱伟康等^[42] 研究带有恶化效应的 GFSP,同时引入了一种两阶段鲸鱼优化算法来最小化完工时间和总能耗。

2.2 置换流水车间绿色调度问题

置换流水车间是一般流水车间的一个特例,要求工件在每个阶段的加工顺序都相同。与 GFSP 类似,目前对于置换流水车间绿色调度问题(green permutation flow shop scheduling problem, GPFSP)的研究除了引入节能减排策略,还考虑了准备时间、运输时间、学习效应、无等待约束等复

杂问题。

Zhu 等^[43] 提出了一种结合模糊相对熵的最优觅食算法,在 GPFSP 中优化完工时间、总拖期、库存持有成本和总消耗;罗聪和龚文引^[44] 提出了一种混合 MOEA/D 来最小化完工时间和总能耗;张洪亮等^[45] 在 GPFSP 中进一步考虑学习效应,并引入了一种混合蛙跳算法来最小化完工时间和总能耗。

对于考虑机器开关机的 GPFSP,张雨晨和熊福力^[46] 提出了一种混合禁忌搜索算法来最大化企业生产总净利润(能耗和拖期越小,净利润越大);Jiang 和 Wang^[47] 在此基础上还考虑了准备时间和速度可控的运输时间,并提出了一个改进的 MOEA/D 来优化完工时间和总能耗,该算法通过引入动态交配策略和局部强化机制来增强其性能,实验结果证实了这两种改进机制的有效性,同时所提出的方法在 C-metric 指标上优于 Lu 等^[48] 所提出的算法和 NSGA-II; Xin 等^[49] 在 Jiang 和 Wang^[47] 研究的基础上还考虑了学习效应,并提出了一种多目标迭代贪婪算法来优化完工时间和总能耗;Xin 等^[50] 在 Jiang 和 Wang^[47] 研究的基础上进一步考虑了运输速度在生产期间可调节的情况,同时提出了一种改进离散鲸群算法来求解该问题。

Ho 等^[51] 在 GPFSP 中考虑分时电价,同时设计了一种精确算法来优化总电力成本,其中总电力成本由单位时间空闲成本和单位时间加工成本计算得到。

对于考虑速度缩放策略的 GPFSP,为了优化总拖期和总碳排放量,Goebani Saber 和 Ranjbar^[52] 设计了一种基于分解的多目标启发式规则,其中总碳排放量与总能耗正相关;Fernandez-Viagas 等^[53] 设计了一种基于关键路径的迭代局部搜索算法以优化完工时间和总能耗;Zhong 等^[54] 提出了一种改进的离散布谷鸟搜索算法来优化完工时间和总能耗,该算法通过使用离散的编码机制和高效的局部搜索策略来增强其性能,实验结果表明所提出的算法在 D_r 指标上优于 NSGA-II、混合蛙跳算法和人工蜂群算法;Wu 和 Che^[55] 在此基础上进一步考虑无等待约束,为了优化完工时间和总能耗,设计了一种自适应多目标变邻域搜索策略,该算法通过设计速度调整启发式策略、领域算子、自适应选择机制、问题特定的扰动策略和加速机制来改善算法性能,实验结果证实所提出的算法在解的质量和数量上优于 NSGA-II 和强度帕累托进化算法 II(strength

Pareto evolutionary algorithm II, SPEA-II)。

2.3 混合流水车间绿色调度问题

混合流水车间指至少存在一个阶段具有机器柔性的流水车间,又称柔性流水车间。混合流水车间是一般流水车间的衍生,更为复杂。相比于 GFSP 和 GPFSP,对于混合流水车间绿色调度问题 (green hybrid flow shop scheduling problem, GHFSP) 的研究更为充分。现有文献不仅在 GHFSP 中充分考虑了各种节能减排策略,还关注了阻塞约束、有限缓冲区、工人约束、模糊加工时间、可重入工序等复杂调度场景。

Lian 等^[56]基于钢铁厂中的实例研究 GHFSP,为了优化完工时间、平均充电综合能耗和生产与能耗之间的波动,设计了一种改进 MOEA/D,其中该问题在能耗建模时考虑了消耗能量(如氧气、电、水和惰性气体)、二次能量(如转炉气体),以及空闲时由于温度下降带来的能量损耗。

对于考虑机器开关机的 GHFSP, Meng 等^[57]首先建立了五个 MILP 模型,然后提出了一个改进的 GA 来优化总能耗,通过设计一个能量高效的解码机制来改进 GA 性能,实验结果表明,所提出的算法在优化总能耗上优于传统的 GA、模拟退火算法和候鸟优化算法; Liu 等^[58]进一步考虑了多时间因素和混合生产,并设计了一种基于加权和方法的进化算法来优化完工时间和总能耗; Wu 等^[59]进一步考虑了可重入工序,同时设计了一种基于逆优化与分解的改进多目标进化算法来最小化完工时间和总能耗; 孟磊磊等^[60]进一步考虑了阻塞约束,同时构建了一个 MILP 模型来优化总能耗; 温廷新和关婷誉^[61]进一步考虑了有限缓冲区和运输时间,并设计了一种狮群算法来优化完工时间和总能耗。

对于考虑分时电价的 GHFSP, Schulz 等^[62]设计了一种多目标迭代局部搜索算法来优化完工时间、总能源成本和峰值负荷,其中总能源成本等于总能源需求乘以实时电价,峰值负荷反映生产过程中能源需求的峰值; Mokhtari-Moghadam 等^[63]还考虑了工人约束和准备时间,同时提出了一种多目标 GA 来优化完工时间和总成本,其中总成本包括电力消耗成本和工人成本,而电力消耗成本由设置时间、加工时间和空闲时间三方面带来的电力消耗构成; 耿凯峰等^[64]进一步考虑可重入工序,为了优化完工时间、总能耗成本和总碳排放量,提出了一种多目标模因算法,其中能耗成本由加工成本和生产成本构成,总碳排放量与总能耗正相关。

对于考虑速度缩放策略的 GHFSP, Lei 等^[65]引入了一种新颖的教与学优化算法来最小化总拖期和总能耗; Wang 等^[66]提出了一种基于模糊相对熵的 NSGA-II 来优化完工时间和总能耗; 雷德明和杨冬婧^[67]提出了一种新型蛙跳算法来优化总拖期和总能耗; Li 等^[68]提出了一种两级帝国竞争算法来优化总拖期、完工时间和总能耗,此外,在优化过程中,总能耗相比于总拖期和完工时间有更低的重要性; Chen 等^[69]进一步考虑了批量流,并提出了一种多目标 GA 来优化完工时间和耗电量,其中耗电量由加工能耗、设置能耗和空闲能耗构成; Wang 等^[70]还考虑了设备动态重构和工件返工,为了最小化完工时间和数字化车间总能耗,提出了一个自适应多目标动态哈里斯鹰优化器,该算法最后用于热水器内胆的生产线; Wang 等^[71]进一步考虑模糊加工时间,为了优化模糊完工时间和模糊总能耗,提出了一种扩展的 NSGA-II; 耿凯峰和叶春明^[72]进一步考虑工序跳跃和自动引导运输车 (automated guided vehicle, AGV) 联合调度,为了解决该问题,提出了一种改进模因算法来优化完工时间和总能耗。

Li 等^[73]在 GHFSP 中考虑了机器开关机和速度缩放两种节能减排策略,为了优化总拖期、总能耗成本和碳交易成本,设计了一种 Q 学习和一般变邻域搜索驱动的 NSGA-II,其中总能耗成本和碳交易成本都与总能耗正相关。Wang 等^[74]基于玻璃的生产加工过程,研究了带有批处理机、机器开关机和分时电价的 GHFSP,并提出了一个 ε 约束数学模型、一个问题特定的构造启发式方法和一种双目标的蚁群算法以针对不同的问题规模最小化完工时间和总能耗。

Zhang 等^[75]在 GHFSP 中考虑机器间不同的能源利用率、准备时间和运输时间,同时设计了一种两阶段的基于分解的多目标方法来优化完工时间和总能耗。Qin 等^[76]提出了一种改进的迭代贪婪算法,在阻塞 GHFSP 中优化总能耗,该算法结合了高效的初始化策略、局部扰动策略和全局扰动策略来提升其性能,实验结果证实所提出的算法优于 GA、离散人工蜂群算法、改进候鸟优化算法、离散粒子群算法、迭代贪婪算法及迭代贪婪算法的四种变体。Wu 和 Cao^[77]在 GHFSP 基础上考虑批处理机,同时引入了一种改进的 MOEA/D 以优化完工时间和总能耗。秦红斌等^[78]研究带有批处理机的可重入 GHFSP,为了最小化完工时间、机器负载和总碳排放量,引入了一种改进的多目标蜉蝣算法,其中总碳排放量由机器加工、空

闲和设置状态下所消耗的电能产生。

Shi 等^[79]在 GHFSP 中引入动态事件(机器故障、工件插入和工件返工),为了优化完工时间、总能耗和总碳排放量,构建了一种基于 GA 的可变优先级动态调度优化算法,其中总碳排放量与加工时间正相关。吴秀丽和闫晓燕^[80]在可重入 GHFSP 中考虑动态扰动事件(机器故障和工件随机到达),为了优化完工时间、总能耗和总拖期,提出了一种改进的 Q 学习算法,该算法通过将各个加工阶段抽象为智能体,搭建了多智能体强化学习模型,通过均值漂移算法对历史状态进行聚类,从而实现全局优化。

综上所述,相比于并行机绿色调度问题,对于流水车间绿色调度问题的研究更加充分。例如,从研究问题上,很多文献在流水车间绿色调度问题的基础上考虑了资源约束、动态事件、不确定加工时间等生产影响因素。但是仍然存在一些不足。在优化指标上,大部分文献还是以能耗作为绿色指标,小部分文献考虑了碳排放和电力消耗相关的绿色指标,而缺乏对于污染物排放等其他绿色指标的相关文献。另外,相比于其他两种流水车间,混合流水车间绿色调度问题的研究更全面,受到的关注也更多。对于一般流水车间,统计的文献主要关注速度缩放策略和分时电价,而对于机器开关机关注较少。对于置换流水车间,相比于速度缩放策略,对于机器开关机和分时电价研究的文章较少。尽管有部分文献对于流水车间绿色调度问题的研究结合了实际生产场景,例如装配式预制构件的生产和钢铁厂中的实例,但是大部分文献仍然主要进行理论研究,与实际工程问题的结合度不够。未来可以从优化目标、节能减排策略和工程背景等方面对流水车间绿色调度问题开展进一步的研究。

3 作业车间绿色调度问题

在作业车间中,每个工件工艺序列可以不同,各工件的工序之间存在次序约束。由此,作业车间相比于流水车间,在工件加工顺序上有更高的灵活性。目前,对于作业车间绿色调度问题(green job shop scheduling problem, GJSP),现有文献除了考虑机器开关机和速度缩放策略,还关注了运输资源约束、AGV 运输、模糊加工时间、机器故障等复杂情形。

Zhang 等^[81]提出了一个基于基因表达式编程的规则挖掘算法,在 GJSP 中优化总能耗,实验结果表明所提出的算法能明显提高节能效率和生

产效率。

对于考虑机器开关机的 GJSP,戴敏和王辉^[82]为了优化完工时间和总能耗,通过设置权重系数的方式来调节优化目标决策偏好,然后提出了一种遗传退火算法;吕海利等^[83]基于问题的特点设计了一种 GA 来优化总能耗;乔东平等^[84]设计了一种改进的 NSGA-II 来优化完工时间、总能耗和生产成本;魏鑫等^[85]基于导弹结构件混线生产过程研究该问题,并提出了一种二元混合的改进 GA 来优化完工时间和总能耗,将算法用于上海航天精密机械研究所结构件生产车间的生产实例,取得了较好的生产指导效果。

对于考虑速度缩放策略的 GJSP, Lu 等^[86]通过挖掘问题领域知识,设计了一种基于知识的多目标模因算法来优化完工时间和总能耗;顾九春等^[87]提出了一种多目标离散灰狼优化算法来优化完工时间和总能耗;Fontes 等^[88]进一步考虑了运输资源约束,并提出了一种多目标偏置随机密钥 GA 来优化完工时间和总能耗;Abedi 等^[89]进一步考虑了恶化工时,同时提出了一种多种群多目标的模因算法来优化总加权拖期和总能耗;He 等^[90]进一步研究了准备时间,为了有效地评价和选择多目标优化问题的解,建立了一种基于模糊相对熵的适应度评价机制来优化完工时间、总拖期和总能耗;李峥峰等^[91]进一步考虑了 AGV 运输,为了优化完工时间和总能耗,设计了一种改进麻雀搜索算法;Li 等^[92]进一步研究了工人资源约束,从而优化完工时间、总拖期、总空闲时间、总工人成本和总能耗,引入了一种基于参考点模糊相关熵的多目标进化算法。

谢法吾等^[93]考虑带有混排可变分批的 GJSP,通过将 Jaya 算法中的种群更新机制引入 MOEA/D,设计了一种多目标混合进化算法来优化完工时间和总能耗。张明伟和牛占文^[94]在 GJSP 基础上考虑可变分批和异质 AGV 运输,通过将粒子群与蚁群算法混合,提出了一种混合元启发式算法来优化完工时间和 AGV 的总能耗,其中 AGV 的总能耗在建模时充分考虑了行驶速度、载重、阻力等多方面影响因素。

对于带有模糊加工时间的 GJSP, Afsar 等^[95]提出了一种多目标增强的模因算法来优化完工时间和机器空闲时能耗;Wang 等^[96]设计了一种混合自适应差分进化算法来优化完工时间、总拖期和总能耗,该算法结合了变异策略、参数自适应策略和加权模糊相对熵来增强算法性能,实验结果证实所提出的算法在求解质量上优于蚁群算法、

人工蜂群算法和粒子群算法;Zhao 等^[97]进一步研究加工路径的不确定性,利用激素调节机制,提出了一种改进的自适应遗传算法来优化总能耗。

李稚和周双牛^[98]在 GJSP 基础上考虑了机器故障,为了优化总能耗、完工时间、机器总负荷和产品质量稳定性,提出了一种改进的灰狼优化算法,该算法引入反向学习初始化策略、交叉变异和精英保留策略等优化机制来提升其求解能力,实验结果表明所提出的算法在 Spacing 和 GD 指标上优于多目标灰狼算法和多目标粒子群算法。

综上所述,尽管作业车间绿色调度问题的相关研究已经受到了国内外学者的广泛关注,但是仍然存在一些不足。在优化目标上,几乎所有的文献都将总能耗作为绿色指标,忽视了碳排放量、污染物排放量等其他绿色指标,同时主要通过构建与时间的线性关系来对总能耗建模,过于理想化。在节能减排策略上看,大部分文献只考虑了机器开关机和速度缩放策略,而忽视了分时电价。通过将生产时间从用电高峰期转移到用电低峰期可以有效减少用电成本及能源消耗,这在实际生产中很常见,但目前相关研究不足。另外,从研究问题上看,大部分文献研究的问题过于简单,主要是通过节能减排策略相结合来研究作业车间绿色调度问题,小部分文献在作业车间绿色调度问题的基础上进一步考虑了模糊加工时间、工件分批、资源约束等,但是在实际生产中还会出现工件的随机到达、机器故障等动态扰动事件。从工程背景上看,只有少部分文献考虑了实际生产场景,例如导弹结构件混线生产过程,大部分文献缺乏实际的工程应用背景。因此,未来仍然可以从优化目标、节能减排策略、研究问题和工程背景等方面对作业车间绿色调度问题开展进一步的研究。

4 柔性作业车间绿色调度问题

柔性作业车间是作业车间的衍生问题,在作业车间基础上进一步考虑了工件在加工过程中的机器柔性。目前,对于柔性作业车间绿色调度问题 (green flexible job shop scheduling problem, GFJSP) 的研究极为充分。不仅对基本问题进行了大量研究,还充分考虑了各种节能减排策略和复杂生产场景。

为了在 GFJSP 中优化完工时间、总拖期和总能耗,Luan 等^[99]提出了一种增强 NSGA-II。欧阳洪才等^[100]提出了一个改进 NSGA-III,在 GFJSP 中优化完工时间、总机器负荷、总拖期和总能耗。张亮等^[101]设计了一种多目标水母算法,在 GFJSP

中最小化完工时间、总能耗和机器总负荷。为了优化 GFJSP 中总碳排放量、完工时间和生产成本,姜一啸等^[102]提出了一个改进的 NSGA-II。其中总碳排放量由设备加工和待机两种状态下产生的碳排放构成。陆心屹和韩晓龙^[103]提出了一种基于强化学习的 NSGA-II 来优化 GFJSP 中的完工时间、总能耗和机器总负载。为了优化 GFJSP 中的完工时间、总碳排放量和机器总负载,金志斌等^[104]提出了一种基于支配强度的改进 NSGA-II,该算法采用新型拥挤度算子与基于外部档案集的自适应精英保留策略来改善其搜索能力,实验结果表明所提出的算法在求解质量和求解效率上优于 NSGA-II 和 GA,同时总碳排放量由加工过程中能耗、刀具磨损、切削液和润滑油消耗所产生。朱光宇和徐文婕^[105]基于机床构件的生产,提出了一种基于直觉模糊集相似度的 GA 来优化 GFJSP 中的完工时间、空闲时间、加工质量和总能耗。为了优化 GFJSP 中的完工时间、碳排放量和噪声污染,聂文倩和王婷^[106]提出了一种基于精英策略的自适应多种群 Jaya 算法,其中碳排放量与总能耗正相关。丁宇等^[107]提出了一个 NSGA-II 来在 GFJSP 中优化完工时间、总能耗、生产成本和机器总负载。赵慧娟等^[108]设计了一种改进 GA 以优化 GFJSP 中的完工时间、总能耗和质量。

对于考虑机器开关机的 GFJSP, Meng 等^[109]构建了六个新颖的 MILP 模型来优化总能耗;Gong 等^[110]为了优化完工时间、总能耗和机器总重启次数,设计了一种两阶段模因算法;Wu 等^[111]进一步研究恶化效应,同时引入了一种多目标混合鸽子优化和模拟退火算法来同时最小化完工时间和总能耗;Caldeira 等^[112]进一步考虑工件插入,同时提出了一种回溯搜索算法来最小化完工时间和总能耗;Yang 等^[113]进一步考虑了模糊加工时间,为了优化完工时间和总能耗,提出了一种基于分解的模因算法。

对于考虑分时电价的 GFJSP, Park 和 Ham^[114]构建了一个 MILP 模型和一个约束规划 (constraint programming, CP) 模型以最小化完工时间和总能耗;Shen 等^[115]首先基于问题的性质提出了两个启发式规则,然后基于这两个启发式规则,提出了一种迭代的禁忌搜索算法来优化总能耗成本。

对于考虑速度缩放策略的 GFJSP, Luo 等^[116]设计了一种多目标灰狼算法来优化完工时间和总能耗,该算法通过设计新颖的解码机制和基于帕

累托的优化机制来增强算法性能,实验结果表明所提算法在 GD、IGD、Spread 和 CR 指标上优于 NSGA-II 和 SPEA-II;Li 等^[117]提出了一种改进的人工蜂群算法来优化完工时间、总碳排放量和机器负载,其中总碳排放量与总能耗正相关;杨冬婧和雷德明^[118]引入了一种新型蛙跳算法来优化完工时间和总能耗;Chen 等^[119]进一步考虑了模糊加工时间,并引入了一种混合进化免疫算法来优化完工时间和总能耗;Li 和 Lei^[120]进一步研究了运输时间和准备时间,同时提出了一种带有反馈的帝国竞争算法来优化完工时间、总拖期和总能耗;Zhou 等^[121]进一步考虑了隐形扰动,同时设计了一个基于自适应集成深度森林的动态调度策略来优化完工时间、总碳排放量和稳定指数,其中总碳排放量由机器在加工和空转两种生产状态下产生。

对于考虑机器开关机和速度缩放策略的 GFJSP, Wu 和 Sun^[122]设计了一种 NSGA-II 以优化完工时间和总能耗;Wei 等^[123]首先构建了一个能量估计模型去计算不同运行状态下机器的能量消耗,然后设计了一个多目标优化模型来最小化完工时间和总能耗;孟磊磊等^[124]构建了一个 MILP 模型来优化总能耗;吴秀丽和孙阳君^[125]引入了一种 NSGA-II 来优化完工时间和总能耗;閻泰梓等^[126]提出了一种基于 DQN 的协同进化算法来优化总能耗;马训德等^[127]设计了一种离散冠状病毒群体免疫算法来最小化完工时间和总能耗;Luo 等^[128]进一步考虑机器故障,并设计了一种知识驱动的两阶段模因算法来优化完工时间和总能耗。

对于考虑起重机运输的 GFJSP, Liu 等^[129]为了优化完工时间和综合能耗,提出了一种混合元启发式算法,其中综合能耗包括了机器加工能耗以及起重机运输、负载和待机三种状态下的能耗;Li 等^[130]在 GFJSP 中考虑起重机运输,同时基于线性加权的方法提出了一种混合迭代贪婪算法来优化完工时间和总能耗,其中总能耗的建模方式与 Liu 等^[129]的综合能耗的建模方式一样。Du 等^[131]进一步考虑了准备时间,并设计了一种基于加权的强化学习方法来优化完工时间和总能耗,其中总能耗的建模进一步考虑了机器的设置能耗。对于考虑 AGV 运输的 GFJSP, Xu 等^[132]设计了一种增强启发式算法来优化完工时间和总能耗,该算法结合高效的编码机制、初始化策略和局部搜索策略来提高算法求解能力,实验结果证实增强启发式算法在 C-metric 和 IGD 指标上优于

NSGA-II、MOEA/D、改进的 SPEA、多目标离散 Jaya 算法和改进的人工蜂群算法。

基于中国航空航天工业复杂部件的一个案例, Jiang 等^[133]在 GFJSP 中考虑了分批调度,并提出了一种改进的人工蜂群算法来优化完工时间、总能耗和生产成本。Tian 等^[134]基于航空航天工业案例在 GFJSP 中考虑动态事件(机器故障和工件插入)和多品种小批量生产,提出了一种双种群差分进化算法来优化完工时间、总能耗和机器成本。田志强等^[135]同样基于航天复杂构件生产案例,在 GFJSP 中考虑分批调度,同时提出了一种 NSGA-II 来优化完工时间、总能耗和生产成本。Tian 等^[136]研究考虑批量分解的 GFJSP,并提出了一种基于知识的优化算法来最小化完工时间和总能耗。Li 等^[137]在 GFJSP 基础上考虑尺寸可变的子批,并设计了一种混合帝国竞争算法以优化完工时间和总能耗。

对于带有运输约束的 GFJSP, Dai 等^[138]提出了一种增强的 GA 来优化完工时间和总能耗,该算法混合了粒子群算法和模拟退火算法来提高算法性能,实验结果表明所提出的算法在解的数量和质量上明显优于多目标 GA;李俊青等^[139]基于线性加权的方法,引入了一种人工蜂群算法来优化完工时间和总能耗;王亚昆等^[140]设计了一种改进的 NSGA-II 来优化完工时间、总能耗、机器负载和总拖期。对于带有工人约束的 GFJSP, Gong 等^[141]为了优化完工时间、工人成本和绿色指标,提出了一种新的非支配集成适应度排序算法,其中绿色指标的建模考虑了能量消耗、噪声、刀屑回收和安全性;张洪亮等^[142]为了优化总提前拖期惩罚值和总能耗,提出了一种改进的 NSGA-II。对于考虑双资源约束、运输时间和学习效应的 GFJSP, Peng 等^[143]为了最小化完工时间、总能耗和噪音,设计了一种混合离散的多目标帝国竞争算法;刘璐等^[144]设计了一种改进生物迁徙算法来优化总能耗。

对于考虑调整时间的 GFJSP, 卫少鹏等^[145]基于线性加权的方式,引入了一种头脑风暴算法来优化完工时间和总能耗;张国辉等^[146]为了优化完工时间、总调整时间和总能耗,设计了一种改进的 NSGA-II 与禁忌搜索结合的多目标混合算法。对于带有运输时间和准备时间的 GFJSP, Li 等^[147]提出了一种改进的 Jaya 算法来优化完工时间和总能耗。Jiang 等^[148]研究带有运输时间和恶化效应的 GFJSP, 同时基于问题的特点,提出了一种改进的动物迁移优化算法来最小化总能耗。

李聪波等^[149]研究考虑设备预维护的 GFJSP, 并设计了一种多目标模拟退火算法来最小化完工时间和总能耗。为了最小化带有运输时间和设备预维护的 GFJSP 中的完工时间和总能耗, 张洪亮等^[150]和郭顺生等^[151]分别提出了一种多目标离散 Jaya 和一种 NSGA-II。

考虑到加工时间的不确定性, 张洪亮等^[152]在 GFJSP 中使用区间工时表示不确定加工时间, 同时提出了一种多目标进化算法来优化完工时间和总能耗。对于带有模糊加工时间的 GFJSP, Pan 等^[153]为了最小化完工时间和总能耗, 最大化最小一致指数, 设计了一种带有反馈的双种群进化算法; Li 等^[154]在 GFJSP 中考虑模糊加工时间, 同时提出了一种基于学习的模因算法来优化完工时间和总能耗; Li 等^[155]进一步研究了运输时间, 提出了一种双种群平衡多目标算法来最小化完工时间和总能耗。

对于考虑动态事件和备选生产方案的 GFJSP, Lü 等^[156]在启发式算法的框架下提出了一种重调度算法来优化完工时间和总能耗, 实验结果证实所提出的算法在 HV 和 Spacing 指标上优于多目标 GA 和多目标粒子群算法。唐亮等^[157]在 GFJSP 中研究插单重调度, 为了最小化完工时间、总能耗、总延迟时间和总设备变更次数, 提出了一种帝国竞争算法。李聪波等^[158]在 GFJSP 基础上考虑紧急插单和机床故障动态事件, 并提出了一种多目标引力搜索算法来优化完工时间和总能耗。

综上所述, 相比于作业车间绿色调度问题的研究, 国内外学者对于柔性作业车间绿色调度问题的研究更加充分。例如很多文献在柔性作业车间绿色调度问题基础上考虑了资源约束、动态事件、不确定加工时间等生产影响因素。同时, 不少文献也与机床构件、航天复杂构件等实际工程背景相结合。现有文献在机器开关机、速度缩放策略和分时电价三种节能减排策略方面都有涉及。但是, 在优化目标上, 大部分文献还是将能耗和碳排放作为绿色指标, 对于其他绿色指标的研究不足。同时绿色指标的建模主要通过构建与时间的线性关系, 仍然过于理想化。

5 分布式车间绿色调度问题

随着经济全球化发展, 制造体系逐渐从集中化生产过渡到分布式协同生产。相对于集中化生产, 分布式制造能够灵活地响应市场需求, 通过生产资源的合理利用来降低生产成本、减少库存, 在

市场竞争中取得优势^[159]。同时, 除了具有传统集中式车间绿色调度问题的特征外, 分布式车间绿色调度问题还具有若干更为复杂的特征, 例如: ①需要同时考虑各车间之间的生产协同问题和车间内部的加工顺序和机器分配问题。这极大提高了问题的复杂性和解空间的规模。②车间分布的分散性使得生产系统更为复杂, 例如通信延迟导致的生产信息的不确定性, 生产资源的短缺, 生产订单突然插入、加工机器故障等。这些生产过程中的不确定因素增加了问题求解的难度。③制造环境存在多样性和多变性, 各个车间内部的生产环境和加工资源可能是不同的。这种生产车间的异构性提高了分布式车间协同优化的难度。

事实上, 分布式车间绿色调度问题是车间绿色调度问题在分布式协同生产场景下的拓展。由于分布式车间绿色调度问题涉及很多车间类型, 本文只对分布式车间绿色调度问题的以下几类问题开展研究与分析。

5.1 分布式并行机绿色调度问题

分布式并行机绿色调度问题是并行机绿色调度问题在分布式生产场景下的拓展。对于分布式相关并行机绿色调度问题 (green distributed identical parallel machine scheduling problem, GDIPMSP), 在指定时间范围内, 未检索到相关文献。对于分布式不相关并行机绿色调度问题 (green distributed non-identical parallel machine scheduling problem, GDNIPMSP), Zhang 等^[160]在此基础上考虑速度缩放策略和恶化效应, 同时提出了一种模因算法来最小化制造端总能耗, 最大化需求端运行效用。Pan 等^[161]在 GDNIPMSP 中考虑速度缩放策略, 同时提出了一种知识指导的双种群优化算法来最小化总拖期和总能耗。潘子肖和雷德明^[162]同样在 GDNIPMSP 中考虑速度缩放策略, 并设计了一种基于问题性质的 NSGA-II 来优化完工时间和总能耗。

5.2 分布式一般流水车间绿色调度问题

分布式一般流水车间由位于不同地理位置上的多个一般流水车间组成。对于分布式一般流水车间绿色调度问题 (green distributed flow shop scheduling problem, GDFSP), 目前大部分文献主要是在速度缩放策略的基础上研究该问题, 少部分文献考虑机器开关机。此外, 除了对基本问题的研究, 现有文献还关注了装配阶段、阻塞约束、无等待约束等复杂情形。

Wang 等^[163]在 GDFSP 基础上考虑了准备时

间、运输时间和柔性装配阶段,同时提出了一种协同模因算法来优化总拖期和总能耗。

Lu 等^[164]在 GDFSP 中研究异构工厂和机器开关机,为了最小化完工时间和总能耗,提出了一种混合多目标迭代贪婪算法。

对于考虑速度缩放策略的 GDFSP, Zhang 等^[165]提出了一种基于 Q 学习的多目标粒子群算法来最小化完工时间和总能耗; Pan 等^[166]进一步考虑分批,同时设计了一种改进 Jaya 算法来优化完工时间和总能耗; Li 等^[167]进一步研究了批量发货,为了最小化完工时间和总能耗,引入了一种鲸鱼优化算法; 张梓琪等^[168]进一步考虑了工件到产品的装配阶段,并提出了一种多维分布式估计算法来最小化完工时间和总能耗,将提出的算法与改进多目标迭代贪婪算法和 NSGA-II 对比,验证了多维分布式估计算法的有效性。

对于考虑速度缩放策略的阻塞 GDFSP, 为了优化完工时间和总能耗, Zhao 等^[169]提出了一种多目标离散差分进化算法; 为了优化总拖期和总能耗, Zhao 等^[170]提出了一种基于 Q 学习的超启发式算法, 该算法通过结合 Q 学习、初始化策略、 ε 贪婪策略和加速算子来增强优化能力, 实验结果证明所提出的算法在 ONVG 和 C -metric 指标上优于基于知识的协同算法; Chen 等^[171]进一步考虑了工厂的异构性, 同时提出了一种基于知识的迭代贪婪算法来最小化完工时间和总能耗; Zhao 等^[172]和 Bao 等^[173]进一步考虑了准备时间, 同时, 前者提出了一种协同鲸鱼优化算法来最小化总拖期和总能耗, 后者设计了一种基于 Q 学习的协同迭代贪婪算法来优化完工时间和总能耗。Niu 和 Li^[174]进一步研究组调度和准备时间, 为了优化完工时间和总能耗, 设计了一种两阶段协同进化算法。

对于考虑速度缩放策略和装配阶段的无等待 GDFSP, Zhao 等^[175-176]分别提出了一种改进的迭代贪婪算法和一种强化学习驱动的头脑风暴算法来优化完工时间和总能耗。Zhao 等^[177]在无等待 GDFSP 基础上还考虑了速度缩放策略和准备时间, 并提出了一种强化学习驱动的元启发式算法来优化完工时间和总能耗。Zhao 等^[178]在无等待 GDFSP 中考虑速度缩放策略和异构工厂, 并设计了一种自学习离散的 Jaya 算法来最小化总拖期、总能耗和工厂负载均衡。

5.3 分布式置换流水车间绿色调度问题

分布式置换流水车间由多个置换流水车间构成。与 GDFSP 类似, 当前对于分布式置换流水车

间绿色调度问题 (green distributed permutation flow shop scheduling problem, GDPFSP) 的研究也主要通过引入速度缩放策略。同时, 部分文献还考虑了逆调度、有限缓冲区、装配阶段等复杂问题。

Mou 等^[179]在 GDPFSP 中考虑逆调度问题, 为了优化所有工件加工时间的调整和总能耗, 提出了一种混合协同算法。

对于考虑有异构工厂和机器开关机的 GDPFSP, Luo 等^[180]提出了一种知识驱动的 MOEA/D 来优化完工时间和总能耗; Lu 等^[181]提出了一种知识指导的模因算法来优化完工时间、负面社会影响和总能耗。

对于考虑速度缩放策略的 GDPFSP, Wang 等^[182]引入了一种多目标鲸群算法来最小化完工时间和总能耗; Wang 等^[183]为了优化完工时间和总能耗, 提出了一种基于知识的协同算法; 曾亮等^[184]提出了一种双种群算法来优化完工时间和总能耗。

Lu 等^[185]在 GDPFSP 中考虑速度缩放策略和有限缓冲区, 同时设计了一种基于帕累托的协同多目标优化算法来最小化完工时间和总能耗。为了解决考虑速度缩放策略和装配阶段的 GDPFSP, Zhang 等^[186]提出了一种基于矩阵立方的分布估计算法来优化完工时间和总碳排放量, 其中总碳排放量与总能耗正相关。Fu 等^[187]在 GDPFSP 中考虑速度缩放策略和加工时间的不确定性, 为了优化完工时间和总能耗, 设计了一种结合随机模拟方法的多目标头脑风暴优化算法。Schulz 等^[188]在 GDPFSP 中考虑速度缩放策略和运输影响, 并提出了一种多目标迭代贪婪算法优化完工时间和总碳排放量, 其中总碳排放量由运输和加工碳排放量构成。Chen 等^[189]研究考虑速度缩放策略的无等待 GDPFSP, 同时提出了一种协同优化算法来最小化完工时间和总能耗。

Huang 等^[190]在 GDPFSP 中同时考虑速度缩放策略和机器开关机, 并引入了一种协同进化算法来优化完工时间和总能耗。

对于考虑准备时间和混合零等待约束的 GDPFSP, 陈水琳和郑建国^[191]提出了一种多目标灰狼算法来优化完工时间、总拖期和总能耗。

5.4 分布式混合流水车间绿色调度问题

分布式混合流水车间是混合流水车间在分布式协同生产场景下的拓展。目前, 对于分布式混合流水车间绿色调度问题 (green distributed hybrid flow shop scheduling problem, GDHFSP) 主

要针对不同生产场景引入了分时电价和速度缩放策略,此外,部分文献在 GDHFSP 基础上进一步考虑了可重入工序、异构工厂、工人约束等问题。

对于考虑分时电价的 GDHFSP,许天鹏等^[192]提出了一种基于自学习机制的多目标帝王蝶优化算法来最小化完工时间和总电力成本,其中总电力成本包括机器在运行状态和待机状态的电力成本;Dong 和 Ye^[193]进一步考虑可重入工序和异构工厂,并提出了一种混合元启发式算法来优化完工时间、总碳排放量和总能耗成本,其中总碳排放量由加工状态、空闲状态和润滑油的使用所产生,总能耗成本等于电能消耗成本减去分布式能源资源的反馈收入。

为了解决带有速度缩放策略的 GDHFSP, Wang 等^[194]提出了一种基于学习的协同模因算法来优化完工时间和总能耗;Li 等^[195]提出了一种基于知识的多目标算法来优化完工时间和总能耗;Shao 等^[196]提出了一种基于多邻域的多目标模因算法来优化总加权拖期和总能耗;Zhang 等^[197]考虑带有速度缩放策略和异构工厂的 GDHFSP,同时提出了一种混合元启发式算法来优化完工时间和总能耗。Yu 等^[198]研究考虑了速度缩放策略、装配阶段和工人约束的 GDHFSP,为了优化完工时间和总能耗,提出了一个 MILP 模型和一个多目标模因算法。

Shao 等^[199]在 GDHFSP 基础上考虑分时电价、速度缩放策略和异构工厂,为了优化总拖期、总碳排放量和总生产成本,提出了一种网络模因算法,其中总碳排放量由机器在加工、空闲和普通模式下产生的碳排放量构成。

Qin 等^[200]设计了一种改进的迭代贪婪算法,在阻塞 GDHFSP 中最小化总能耗。Jiang 等^[201]在 GDHFSP 基础上考虑多处理器任务,同时提出了一种 MOEA/D 来优化完工时间和总能耗。Cai 和 Lei^[202]研究带有模糊加工时间的 GDHFSP,为了优化完工时间、总满意度和总能耗,引入了一种协同蛙跳算法。Geng 等^[203]在 GDHFSP 基础上考虑可重入工序、准备时间和工厂资格,并提出了一种多目标人工蜂群算法来优化完工时间和总能耗。

5.5 分布式作业车间绿色调度问题

分布式作业车间由多个作业车间构成。对于分布式作业车间绿色调度问题 (green distributed job shop scheduling problem, GDJSP),目前研究较少。Jiang 等^[204]在 GDJSP 基础上考虑速度缩放策略,同时提出了一种改进 MOEA/D 来优化完工时间和总能耗。

5.6 分布式柔性作业车间绿色调度问题

分布式柔性作业车间绿色调度问题 (green distributed flexible job shop scheduling problem, GDFJSP) 是 GFJSP 的拓展,其研究除了要解决车间内部的资源分配调度问题,还要考虑各车间之间的生产协同问题。目前,现有文献除了关注基本问题的研究外,还关注了节能减排策略及起重机运输、异构工厂、工序检测等复杂问题。

对于基本的 GDFJSP,为了优化完工时间和总能耗, Li 等^[205]提出了一种令人惊讶的流行自适应模因算法,该算法通过引入一种流行的基于反馈的自适应选择机制来增强算法性能;陈文洲等^[206]提出一种基于帕雷托优化方法的人工蜂群算法来最小化完工时间和总碳排放量,其中总碳排放量与加工时间正相关;李瑞等^[207]提出了一种知识驱动的模因算法来优化完工时间和总能耗,该算法通过设计高效的全局搜索策略和局部搜索策略来平衡算法的探索和开采能力。

Meng 等^[208]在 GDFJSP 基础上考虑机器开关机,并建立了一个 MILP 模型和一种混合蛙跳算法来优化完工时间和总能耗。

Yu 等^[209]在 GDFJSP 基础上考虑速度缩放策略,首先构建了一个以完工时间和总能耗为优化目标的 MILP 模型,然后基于问题知识,提出了一个知识指导的双种群算法。

对于带有起重机运输的 GDFJSP, Zhang 等^[210]和 Du 等^[211]分别设计了一种基于 Q 学习的超启发式进化算法和一种混合分布估计算法来最小化完工时间和总能耗。对于考虑运输时间的 GDFJSP,为了优化完工时间和总能耗, Chen 和 Du^[212]提出了一种混合人工免疫算法;王凌和王晶晶^[213]提出了一种协同群智能算法;张洪亮等^[214]提出了一种改进的 NSGA-II。

Li 等^[215]在 GDFJSP 中考虑异构工厂,为了优化完工时间和总能耗,提出了一种基于深度强化学习的协同进化算法。Zhu 等^[216]在 GDFJSP 中考虑工序检测,同时提出了一种改进的模因算法来优化完工时间和总能耗。Luo 等^[217]在 GDFJSP 中考虑可转移工序,为了最小化完工时间、总能耗和工厂最大负载,提出了一种改进模因算法。张等^[218]在 GDFJSP 中考虑双资源约束,同时提出了一种变邻域模因算法来最大化客户满意度,最小化总能耗。Li 等^[219]研究考虑模糊加工时间的 GDFJSP,并提出了一种两阶段知识驱动进化算法来最小化完工时间和总能耗。Zhu 等^[220]在 GDFJSP 的基础上考虑订单取消因素,同时提出

了一种改良的模因算法来优化完工时间和总能耗。

综上所述,随着经济全球化的发展,分布式绿色车间调度问题的研究已经受到了国内外学者的关注,但是现存的研究仍然不足。分布式车间绿色调度问题文章数目统计如图1所示,目前对于分布式车间绿色调度问题的研究主要集中在流水线车间和柔性作业车间,对于并行机和作业车间,现存的研究较少。另外,在优化目标上,总能耗是目前大部分文献所考虑的绿色指标,现有研究对于其他绿色指标研究不足。在节能减排策略上,大部分文献只考虑速度缩放策略,对于分时电价和机器开关机的研究较少。从研究问题上,尽管很多文献在分布式车间绿色调度问题基础上考虑了阻塞约束、无等待约束、装配阶段、运输时间、准备时间等,但在实际生产中还会出现机器故障、订单插入等动态扰动事件。大部分文献主要是进行理论研究,缺乏实际的工程应用背景。因此,在未来的研究中可以结合实际生产情况,基于上述不足,对分布式车间绿色调度问题开展进一步的研究。

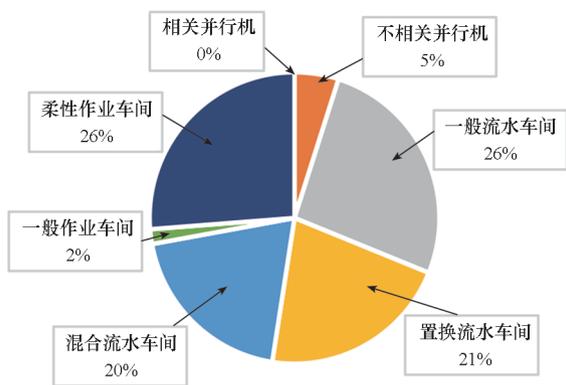


图1 分布式车间绿色调度问题文章数目统计(2018—2024)

Fig. 1 Articles count for green distributed shop scheduling problem(2018—2024)

6 总结与展望

制造业节能减排转型是全球绿色低碳发展的必然要求。在绿色制造的背景下,制造车间需要兼顾生产效率和环境可持续性,而车间绿色调度是绿色制造中最重要的一环之一,旨在保证产品功能与质量,降低生产成本,提高生产效益,同时减少环境污染与能源浪费,实现生产指标和绿色指标的协同优化。由此,车间绿色调度已成为生产调度领域的研究热点。在这一背景下,本文综述了绿色调度在并行机、流水车间、作业车间、柔

性作业车间和分布式车间的相关研究,共统计了208篇国内外相关文献。绿色调度已在各种车间类型中被广泛研究。但是经过前文的分析,当前的研究仍然存在不足。未来可以从问题和算法两个层面展开进一步的研究。

6.1 问题层面

1)更多的绿色指标有待探索。目前大多数的研究只关注了能耗目标。随着可持续发展与绿色制造理念在制造系统中的深入,碳排放量和污染物排放量等其他绿色指标应当受到关注。另外,碳排放量等绿色指标的模型构建方法没有统一的标准。因此,未来可以结合实际生产情况,分析绿色指标和生产指标的关系。在生产调度中,构建绿色指标的数学建模并加以优化。

2)考虑加工环境的不确定性以及动态事件等生产扰动因素。对于车间绿色调度问题的研究通常对问题假设过多,与实际情况差距较大。许多研究只考虑静态问题,即生产数据和加工环境确定。但是,实际生产常伴有不确定性,如加工时间不确定、订单变化、机器故障和机器维护等。因此,研究不确定环境下的车间绿色调度问题可以提升生产调度的鲁棒性,同时也更具挑战性。

3)基于先进智能的制造环境研究车间绿色调度问题。近年来,由于新技术的出现,特别是随着工业4.0的出现,制造系统发生了许多变化。工业4.0将信息通信技术与实时生产和虚拟仿真方法相结合,使运营管理越来越高效。信息物理(生产)系统、物联网和服务、横向和纵向集成、自适应制造、大数据和云是工业4.0的主要概念和技术。这些技术已逐步应用到实际制造环境中,实现了自动化生产。因此,结合大数据、物联网、云计算等技术,通过实时采集的生产数据来解决车间绿色调度问题是一个未来研究的趋势。

4)与工程需求相结合,基于实际的生产车间研究绿色调度问题。对于半导体、钢铁以及汽车等目前社会发展迫切需要但又高污染的行业,引入绿色调度实现生产过程中的高效化和绿色化是一项重要的工作。但是由于实际生产车间中的复杂性,目前很少有文章涉及这一问题,但该研究方向可有效促进产学研合作,是未来研究的重点。

6.2 算法层面

1)设计有效的绿色生产策略。一般情况下,生产指标与绿色指标间通常是相互冲突的。一个指标的优化通常会导致另一个指标性能的降低。处理冲突的一般方法是在控制一个目标不变的情

况下优化另一个目标。因此,基于具体的生产环境,在生产车间中考虑机器开关机、分时电价和速度缩放策略。进而挖掘问题领域知识,分析绿色指标和生产指标间的联系,在不影响生产指标的前提下设计有效的绿色生产策略来优化绿色指标。

2)探索车间绿色调度问题领域知识,设计知识驱动的智能调度算法。传统车间调度问题经过多年的研究,在求解方法和领域知识方面积累了大量理论成果,但这些成果很难直接用于车间绿色调度问题,因此急需挖掘新的领域知识,设计知识驱动的智能调度算法,解决车间绿色调度问题。

3)设计通用绿色调度算法框架。不同的优化目标和车间类型会衍生出不同的车间调度问题,同时目前的绿色调度算法没有很好的迁移性,这极大提升了绿色调度算法的开发应用成本。因此建立一个通用的框架,特别是智能调度框架,对车间绿色调度问题的研究和发展具有指导意义。

参考文献 (References)

- [1] LI M, WANG G G. A review of green shop scheduling problem[J]. *Information Sciences*, 2022, 589: 478–496.
- [2] 张曙. 工业 4.0 和智能制造[J]. *机械设计与制造工程*, 2014, 43(8): 1–5.
ZHANG S. The industry 4.0 and intelligent manufacturing[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2014, 43(8): 1–5. (in Chinese)
- [3] 周济. 智能制造:“中国制造 2025”的主攻方向[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(17): 2273–2284.
ZHOU J. Intelligent manufacturing: main direction of “made in China 2025”[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(17): 2273–2284. (in Chinese)
- [4] BÄNSCH K, BUSSE J, MEISEL F, et al. Energy-aware decision support models in production environments: a systematic literature review [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 159: 107456.
- [5] GAREY M R, JOHNSON D S, SETHI R. The complexity of flowshop and jobshop scheduling [J]. *Mathematics of Operations Research*, 1976, 1(2): 117–129.
- [6] LENSTRA J K, RINNOOY KAN A H G, BRUCKER P. Complexity of machine scheduling problems[J]. *Annals of Discrete Mathematics*, 1977, 1: 343–362.
- [7] 王思涵, 李新宇, 高亮, 等. 分布式车间调度研究综述[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(6): 1–10.
WANG S H, LI X Y, GAO L, et al. A review of distributed shop scheduling problems[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(6): 1–10. (in Chinese)
- [8] 王凌, 王晶晶, 吴楚格. 绿色车间调度优化研究进展[J]. *控制与决策*, 2018, 33(3): 385–391.
WANG L, WANG J J, WU C G. Advances in green shop scheduling and optimization [J]. *Control and Decision*, 2018, 33(3): 385–391. (in Chinese)
- [9] ANGHINOLFI D, PAOLUCCI M, RONCO R. A bi-objective heuristic approach for green identical parallel machine scheduling[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 289(2): 416–434.
- [10] GAGGERO M, PAOLUCCI M, RONCO R. Exact and heuristic solution approaches for energy-efficient identical parallel machine scheduling with time-of-use costs [J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 311(3): 845–866.
- [11] FENG X, PENG H J. Robust identical parallel machine scheduling with two-stage time-of-use tariff and not-all-machine option [J]. *International Journal of Production Research*, 2024, 62(1/2): 380–403.
- [12] XIAO Y J, ZHENG Y, YU Y T, et al. A branch and bound algorithm for a parallel machine scheduling problem in green manufacturing industry considering time cost and power consumption [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 320: 128867.
- [13] SAFARZADEH H, NIAKI S T A. Bi-objective green scheduling in uniform parallel machine environments [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 217: 559–572.
- [14] JI M, WANG J Y, LEE W C. Minimizing resource consumption on uniform parallel machines with a bound on makespan[J]. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(12): 2970–2974.
- [15] ARASH Z, REZA R, LESLIE M. Green parallel machines scheduling problem: a bi-objective model and a heuristic algorithm to obtain Pareto frontier [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2020, 71(6): 967–978.
- [16] BEKTUR G. An NSGA-II-based memetic algorithm for an energy-efficient unrelated parallel machine scheduling problem with machine-sequence dependent setup times and learning effect[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022, 47: 3773–3788.
- [17] WU X, GUO P, WANG Y, et al. Decomposition approaches for parallel machine scheduling of step-deteriorating jobs to minimize total tardiness and energy consumption [J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2022, 8: 1339–1354.
- [18] 薛聪, 郭鹏, 陈宓, 等. 考虑能耗与工时恶化作用下的并行机调度优化[J]. *计算机系统应用*, 2020, 29(9): 66–74.
XUE C, GUO P, CHEN M, et al. Parallel machine scheduling with step-deteriorating jobs and energy consumption[J]. *Computer Systems & Applications*, 2020, 29(9): 66–74. (in Chinese)
- [19] 雷德明, 潘子肖, 张清勇. 多目标低碳并行机调度研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(8): 104–109.
LEI D M, PAN Z X, ZHANG Q Y. Researches on multi-objective low carbon parallel machines scheduling [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 46(8): 104–109. (in Chinese)
- [20] PEI Z, WAN M Z, JIANG Z Z, et al. An approximation algorithm for unrelated parallel machine scheduling under TOU electricity tariffs[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2021, 18(2): 743–756.
- [21] HEYDAR M, MARDANEH E, LOXTON R. Approximate dynamic programming for an energy-efficient parallel machine scheduling problem [J]. *European Journal of Operational*

- Research, 2022, 302(1): 363 – 380.
- [22] PAOLUCCI M, ANGHINOLFI D, TONELLI F. Facing energy-aware scheduling: a multi-objective extension of a scheduling support system for improving energy efficiency in a moulding industry[J]. *Soft Computing*, 2017, 21: 3687 – 3698.
- [23] SABERI-ALIABAD H, REISI-NAFCHI M, MOSLEHI G. Energy-efficient scheduling in an unrelated parallel-machine environment under time-of-use electricity tariffs[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 249: 119393.
- [24] XUE Y, RUI Z J, YU X Y, et al. Estimation of distribution evolution memetic algorithm for the unrelated parallel-machine green scheduling problem[J]. *Memetic Computing*, 2019, 11: 423 – 437.
- [25] WU X Q, CHE A D. A memetic differential evolution algorithm for energy-efficient parallel machine scheduling[J]. *Omega*, 2019, 82: 155 – 165.
- [26] 王永琦, 吴飞, 江潇潇, 等. 求解并行机拖期与能耗成本优化调度的混合教—学算法[J]. *计算机应用研究*, 2019, 36(3): 673 – 676.
WANG Y Q, WU F, JIANG X X, et al. Hybrid teaching-learning-based optimization algorithm for optimizing tardiness and energy cost on parallel machine scheduling [J]. *Application Research of Computers*, 2019, 36(3): 673 – 676. (in Chinese)
- [27] FALLAHI A, SHAHIDI-ZADEH B, NIAKI S T A. Unrelated parallel batch processing machine scheduling for production systems under carbon reduction policies: NSGA-II and MOGWO metaheuristics [J]. *Soft Computing*, 2023, 27: 17063 – 17091.
- [28] BATISTA ABIKARRAM J, MCCONKY K, PROANO R. Energy cost minimization for unrelated parallel machine scheduling under real time and demand charge pricing[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 208: 232 – 242.
- [29] WANG Y S, CHE A D, FENG J G. Energy-efficient unrelated parallel machine scheduling with general position-based deterioration [J]. *International Journal of Production Research*, 2023, 61(17): 5886 – 5900.
- [30] 齐玉欣, 付亚平, 孙翠华. 考虑能耗优化和学习效应的随机多目标并行机调度问题研究[J]. *青岛大学学报(自然科学版)*, 2021, 34(1): 82 – 86.
QI Y X, FU Y P, SUN C H. Research on a stochastic multi-objective parallel-machine scheduling considering energy consumption and learning effect [J]. *Journal of Qingdao University (Natural Science Edition)*, 2021, 34(1): 82 – 86. (in Chinese)
- [31] 李龙, 王黎明, 李方义. 面向流水车间的绿色生产多目标调度优化研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(7): 164 – 168.
LI L, WANG L M, LI F Y. A multi-objective model of flow-shop for sustainable scheduling[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2018(7): 164 – 168. (in Chinese)
- [32] 汪和平, 齐欣然, 陈梦凯. 基于NSGA-III的装配式预制构件流水车间混合生产优化研究[J]. *管理工程学报*, 2022, 36(1): 240 – 251.
WANG H P, QI X R, CHEN M K. Research on mixed production optimization of prefabricated component flow shop based on NSGA-III [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2022, 36(1): 240 – 251. (in Chinese)
- [33] XUE L, WANG X L. A multi-objective discrete differential evolution algorithm for energy-efficient two-stage flow shop scheduling under time-of-use electricity tariffs [J]. *Applied Soft Computing*, 2023, 133: 109946.
- [34] WANG S S, MASON S J, GANGAMMANAVAR H. Stochastic optimization for flow-shop scheduling with on-site renewable energy generation using a case in the United States[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 149: 106812.
- [35] GHORBANZADEH M, RANJBAR M. Energy-aware production scheduling in the flow shop environment under sequence-dependent setup times, group scheduling and renewable energy constraints [J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 307(2): 519 – 537.
- [36] GOLI A, ALA A, HAJIAGHAEI-KESHTALI M. Efficient multi-objective meta-heuristic algorithms for energy-aware non-permutation flow-shop scheduling problem [J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 213: 119077.
- [37] ZHANG Y Y, LI J Q, XU Y, et al. Multi-population cooperative multi-objective evolutionary algorithm for sequence-dependent group flow shop with consistent sublots[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 237: 121594.
- [38] BABAEI TIRKOLAEI E, GOLI A, WEBER G W. Fuzzy mathematical programming and self-adaptive artificial fish swarm algorithm for just-in-time energy-aware flow shop scheduling problem with outsourcing option [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2020, 28(11): 2772 – 2783.
- [39] GUO J, WANG L M, KONG L, et al. Energy-efficient flow-shop scheduling with the strategy of switching the power statuses of machines [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 53: 102649.
- [40] 王黎明, 刘欣玥, 李方义, 等. 基于机床超待机状态的流水车间能耗调度[J]. *控制与决策*, 2021, 36(1): 143 – 151.
WANG L M, LIU X Y, LI F Y, et al. Energy consumption scheduling in flow shop based on ultra-low idle state of numerical control machine tools [J]. *Control and Decision*, 2021, 36(1): 143 – 151. (in Chinese)
- [41] MARICHELVA M K, GEETHA M. A memetic algorithm to solve uncertain energy-efficient flow shop scheduling problems[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 115: 515 – 530.
- [42] 钱伟康, 唐红涛. 考虑恶化效应的多目标非置换流水车间调度研究[J]. *工业工程*, 2022, 25(2): 128 – 136.
QIAN W K, TANG H T. A research on multi-objective non-permutation flow-shop scheduling considering deterioration effect [J]. *Industrial Engineering Journal*, 2022, 25(2): 128 – 136. (in Chinese)
- [43] ZHU G Y, DING C, ZHANG W B. Optimal foraging algorithm that incorporates fuzzy relative entropy for solving many-objective permutation flow shop scheduling problems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2020, 28(11): 2738 – 2746.
- [44] 罗聪, 龚文引. 混合分解多目标进化算法求解绿色置换流水车间调度问题[J]. *控制与决策*, 2024, 39(8): 2737 – 2745.
LUO C, GONG W Y. A hybrid multi-objective evolutionary

- algorithm based on decomposition for green permutation flow shop-scheduling problem[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(8): 2737–2745. (in Chinese)
- [45] 张洪亮, 张金春, 盖海江. 带有学习效应的多目标置换流水车间调度问题研究[J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2020, 34(5): 77–86.
ZHANG H L, ZHANG J C, GAI H J. Research on multi-objective permutation flow-shop scheduling problem with learning effect[J]. *Journal of University of South China (Science and Technology)*, 2020, 34(5): 77–86. (in Chinese)
- [46] 张雨晨, 熊福力. 一种用于 PFSP 节能优化的混合禁忌搜索算法[J]. *计算机测量与控制*, 2020, 28(12): 166–171.
ZHANG Y C, XIONG F L. A hybrid tabu search algorithm for PFSP energy-saving optimization[J]. *Computer Measurement & Control*, 2020, 28(12): 166–171. (in Chinese)
- [47] JIANG E D, WANG L. An improved multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition for energy-efficient permutation flow shop scheduling problem with sequence-dependent setup time[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(6): 1756–1771.
- [48] LU C, GAO L, LI X Y, et al. Energy-efficient permutation flow shop scheduling problem using a hybrid multi-objective backtracking search algorithm[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 144: 228–238.
- [49] XIN X, JIANG Q Q, LI C, et al. Permutation flow shop energy-efficient scheduling with a position-based learning effect[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 61(2): 382–409.
- [50] XIN X, JIANG Q Q, LI S H, et al. Energy-efficient scheduling for a permutation flow shop with variable transportation time using an improved discrete whale swarm optimization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 293: 126121.
- [51] HO M H, HNAIEN F, DUGARDIN F. Exact method to optimize the total electricity cost in two-machine permutation flow shop scheduling problem under time-of-use tariff[J]. *Computers & Operations Research*, 2022, 144: 105788.
- [52] GHORBANI SABER R, RANJBAR M. Minimizing the total tardiness and the total carbon emissions in the permutation flow shop scheduling problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2022, 138: 105604.
- [53] FERNANDEZ-VIAGAS V, DE ATHAYDE PRATA B, FRAMINAN J M. A critical-path based iterated local search for the green permutation flowshop problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 169: 108276.
- [54] ZHONG L C, LI W F, QIAN B, et al. Improved discrete cuckoo-search algorithm for mixed no-idle permutation flow shop scheduling with consideration of energy consumption[J]. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 2021, 3(4): 345–355.
- [55] WU X Q, CHE A D. Energy-efficient no-wait permutation flow shop scheduling by adaptive multi-objective variable neighborhood search[J]. *Omega*, 2020, 94: 102117.
- [56] LIAN X Y, ZHENG Z, WANG C, et al. An energy-efficient hybrid flow shop scheduling problem in steelmaking plants[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 162: 107683.
- [57] MENG L L, ZHANG C Y, SHAO X Y, et al. Mathematical modelling and optimisation of energy-conscious hybrid flow shop scheduling problem with unrelated parallel machines[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(4): 1119–1145.
- [58] LIU Z F, YAN J, CHENG Q, et al. The mixed production mode considering continuous and intermittent processing for an energy-efficient hybrid flow shop scheduling[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246: 119071.
- [59] WU X L, YAN X Y, WANG L. Optimizing job release and scheduling jointly in a reentrant hybrid flow shop[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 209: 118278.
- [60] 孟磊磊, 张超勇, 张彪, 等. 面向节能的阻塞混合流水车间调度问题建模[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(7): 127–132.
MENG L L, ZHANG C Y, ZHANG B, et al. Modeling of energy-saving blocking hybrid flow shop scheduling problem[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49(7): 127–132. (in Chinese)
- [61] 温廷新, 关婷誉. 考虑能耗和运输的有限缓冲区混合流水车间调度[J]. *系统仿真学报*, 2024, 36(6): 1344–1358.
WEN T X, GUAN T Y. Hybrid flow shop scheduling with limited buffers considering energy consumption and transportation[J]. *Journal of System Simulation*, 2024, 36(6): 1344–1358. (in Chinese)
- [62] SCHULZ S, NEUFELD J S, BUSCHER U. A multi-objective iterated local search algorithm for comprehensive energy-aware hybrid flow shop scheduling[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 224: 421–434.
- [63] MOKHTARI-MOGHADAM A, POURHEJAZY P, GUPTA D. Integrating sustainability into production scheduling in hybrid flow-shop environments[J/OL]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023 [2024–01–03]. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11356-023-26986-3.pdf>. DOI: 10.1007/s11356-023-26986-3.
- [64] 耿凯峰, 叶春明, 吴绍兴, 等. 分时电价下多目标绿色可重入混合流水车间调度[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(12): 1469–1480.
GENG K F, YE C M, WU S X, et al. Multi-objective green re-entrant hybrid flow shop scheduling under time-of-use electricity tariffs[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(12): 1469–1480. (in Chinese)
- [65] LEI D M, GAO L, ZHENG Y L. A novel teaching-learning-based optimization algorithm for energy-efficient scheduling in hybrid flow shop[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2018, 65(2): 330–340.
- [66] WANG Y J, LI J, WANG G G. Fuzzy correlation entropy-based NSGA-II for energy-efficient hybrid flow-shop scheduling problem[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2023, 277: 110808.
- [67] 雷德明, 杨冬婧. 基于新型蛙跳算法的低碳混合流水车间调度[J]. *控制与决策*, 2020, 35(6): 1329–1337.
LEI D M, YANG D J. A novel shuffled frog-leaping algorithm for low carbon hybrid flow shop scheduling[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(6): 1329–1337. (in Chinese)
- [68] LI M, LEI D M, CAI J C. Two-level imperialist competitive algorithm for energy-efficient hybrid flow shop scheduling problem with relative importance of objectives[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2019, 49: 34–43.

- [69] CHEN T L, CHENG C Y, CHOU Y H. Multi-objective genetic algorithm for energy-efficient hybrid flow shop scheduling with lot streaming [J]. *Annals of Operations Research*, 2020, 290: 813–836.
- [70] WANG Y K, WANG S L, YANG W H, et al. A digital-twin-based adaptive multi-objective Harris Hawks Optimizer for dynamic hybrid flow green scheduling problem with dynamic events[J]. *Applied Soft Computing*, 2023, 143: 110274.
- [71] WANG Y J, WANG G G, TIAN F M, et al. Solving energy-efficient fuzzy hybrid flow-shop scheduling problem at a variable machine speed using an extended NSGA-II [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 121: 105977.
- [72] 耿凯峰, 叶春明. 带工序跳跃的绿色混合流水车间机器与AGV联合调度[J]. *控制与决策*, 2022, 37(10): 2723–2732.
- GENG K F, YE C M. Joint scheduling of machines and AGVs in green hybrid flow shop with missing operations[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(10): 2723–2732. (in Chinese)
- [73] LI P Z, XUE Q, ZHANG Z T, et al. Multi-objective energy-efficient hybrid flow shop scheduling using Q -learning and GVNS driven NSGA-II [J]. *Computers & Operations Research*, 2023, 159: 106360.
- [74] WANG S J, WANG X D, CHU F, et al. An energy-efficient two-stage hybrid flow shop scheduling problem in a glass production[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(8): 2283–2314.
- [75] ZHANG B, PAN Q K, GAO L, et al. A three-stage multiobjective approach based on decomposition for an energy-efficient hybrid flow shop scheduling problem [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(12): 4984–4999.
- [76] QIN H X, HAN Y Y, ZHANG B, et al. An improved iterated greedy algorithm for the energy-efficient blocking hybrid flow shop scheduling problem [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2022, 69: 100992.
- [77] WU X L, CAO Z. An improved multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition for solving re-entrant hybrid flow shop scheduling problem with batch processing machines[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 169: 108236.
- [78] 秦红斌, 李晨晓, 唐锦涛, 等. 基于MOMA的可重入混合流水车间调度问题研究[J]. *系统仿真学报*, 2024, 36(1): 131–148.
- QIN H B, LI C X, TANG H T, et al. Reentrant hybrid flow shop scheduling problem based on MOMA [J]. *Journal of System Simulation*, 2024, 36(1): 131–148. (in Chinese)
- [79] SHI L, GUO G, SONG X H. Multi-agent based dynamic scheduling optimisation of the sustainable hybrid flow shop in a ubiquitous environment [J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(2): 576–597.
- [80] 吴秀丽, 闫晓燕. 基于改进 Q 学习的可重入混合流水车间绿色动态调度[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(13): 246–259.
- WU X L, YAN X Y. An improved Q learning algorithm to optimize green dynamic scheduling problem in a reentrant hybrid flow shop [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(13): 246–259. (in Chinese)
- [81] ZHANG L P, LI Z X, KRÓLCZYK G, et al. Mathematical modeling and multi-attribute rule mining for energy efficient job-shop scheduling [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241: 118289.
- [82] 戴敏, 王辉. 基于遗传退火算法的绿色作业车间调度[J]. *现代制造工程*, 2021(5): 26–31.
- DAI M, WANG H. Green job shop scheduling based on genetic annealing algorithm [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2021(5): 26–31. (in Chinese)
- [83] 吕海利, 孙佳祺, 吴姝. 考虑机器能耗的绿色作业车间调度问题[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(12): 220–225.
- LYU H L, SUN J Q, WU S. Green job shop scheduling problem considering machine energy consumption [J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30(12): 220–225. (in Chinese)
- [84] 乔东平, 柏文通, 王雅静, 等. 考虑生产过程能耗的多目标绿色作业车间调度问题研究[J]. *机械设计与制造*. 2022(12): 238–244, 249.
- QIAO D P, BAI W T, WANG Y J, et al. Research on multi-objective green job shop scheduling problems considering energy consumption of production process [J]. *Machinery Design & Manufacture*. 2022(12): 238–244, 249. (in Chinese)
- [85] 魏鑫, 张泽群, 唐敦兵, 等. 面向节能的导弹结构件混线生产作业车间多目标调度研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(9): 45–54.
- WEI X, ZHANG Z Q, TANG D B, et al. Energy-saving oriented multi-objective shop floor scheduling for mixed-line production of missile components[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(9): 45–54. (in Chinese)
- [86] LU C, ZHANG B, GAO L, et al. A knowledge-based multiobjective memetic algorithm for green job shop scheduling with variable machining speeds[J]. *IEEE Systems Journal*, 2022, 16(1): 844–855.
- [87] 顾立春, 姜天华, 朱惠琦. 多目标离散灰狼优化算法求解作业车间节能调度问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(8): 2295–2306.
- GU J C, JIANG T H, ZHU H Q. Energy-saving job shop scheduling problem with multi-objective discrete grey wolf optimization algorithm [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(8): 2295–2306. (in Chinese)
- [88] FONTES D B M M, HOMAYOUNI S M, FERNANDES J C. Energy-efficient job shop scheduling problem with transport resources considering speed adjustable resources [J]. *International Journal of Production Research*, 2024, 62(3): 867–890.
- [89] ABEDI M, CHIONG R, NOMAN N, et al. A multi-population, multi-objective memetic algorithm for energy-efficient job-shop scheduling with deteriorating machines[J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 157: 113348.
- [90] HE L J, CHIONG R, LI W F, et al. Multiobjective optimization of energy-efficient JOB-shop scheduling with dynamic reference point-based fuzzy relative entropy [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(1): 600–610.
- [91] 李峥峰, 张东方, 丁其聪, 等. 考虑AGV运输和机器转速的作业车间绿色调度研究[J]. *机电工程*, 2024, 41(2): 327–336.
- LI Z F, ZHANG D F, DING Q C, et al. Green scheduling of job shop considering AGV transportation and machine

- speed[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2024, 41(2): 327–336. (in Chinese)
- [92] LI W F, HE L J, CAO Y L. Many-objective evolutionary algorithm with reference point-based fuzzy correlation entropy for energy-efficient job shop scheduling with limited workers[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(10): 10721–10734.
- [93] 谢法吾, 李玲玲, 李丽, 等. 基于多目标混合进化算法的作业车间混排可变分批节能调度方法[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(13): 1576–1588, 1598.
XIE F W, LI L L, LI L, et al. Energy-efficient job shop scheduling with variable lot splitting and sublots intermingling based on multi-objective hybrid evolutionary algorithm[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(13): 1576–1588, 1598. (in Chinese)
- [94] 张明伟, 牛占文. 考虑异质 AGV 运输的可变分批绿色作业车间调度[J]. *机械设计*, 2023, 40(4): 64–73.
ZHANG M W, NIU Z W. Variable lot-splitting green job-shop scheduling with heterogeneous AGV transportation taken into account[J]. *Journal of Machine Design*, 2023, 40(4): 64–73. (in Chinese)
- [95] AFSAR S, PALACIOS J J, PUENTE J, et al. Multi-objective enhanced memetic algorithm for green job shop scheduling with uncertain times [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2022, 68: 101016.
- [96] WANG G G, GAO D, PEDRYCZ W. Solving multiobjective fuzzy job-shop scheduling problem by a hybrid adaptive differential evolution algorithm [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(12): 8519–8528.
- [97] ZHAO J L, PENG S T, LI T, et al. Energy-aware fuzzy job-shop scheduling for engine remanufacturing at the multi-machine level [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2019, 14: 474–488.
- [98] 李稚, 周双牛. 面向绿色智能制造的高维多目标动态作业车间调度优化[J]. *运筹与管理*, 2023, 32(1): 47–53.
LI Z, ZHOU S N. High dimensional multi-objective dynamic job shop scheduling optimization for green intelligent manufacturing [J]. *Operations Research and Management Science*, 2023, 32(1): 47–53. (in Chinese)
- [99] LUAN F, ZHAO H X, LIU S Q, et al. Enhanced NSGA-II for multi-objective energy-saving flexible job shop scheduling[J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2023, 39: 100901.
- [100] 欧阳洪才, 张桐瑞, 吴定会. 基于改进 NSGA-III 算法的多目标柔性作业车间调度[J]. *控制工程*, 2023, 30(1): 105–112.
OUYANG H C, ZHANG T R, WU D H. Multi-objective flexible job shop scheduling based on improved NSGA-III algorithm[J]. *Control Engineering of China*, 2023, 30(1): 105–112. (in Chinese)
- [101] 张亮, 王妮妮, 毛剑琳, 等. 基于改进多目标水母算法的低碳柔性作业车间调度方法[J]. *机电工程*, 2023, 40(7): 1086–1092.
ZHANG L, WANG N Y, MAO J L, et al. Low carbon flexible job shop scheduling based on improved multi-objective jellyfish search algorithm [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2023, 40(7): 1086–1092. (in Chinese)
- [102] 姜一啸, 吉卫喜, 何鑫, 等. 基于改进非支配排序遗传算法的多目标柔性作业车间低碳调度[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(21): 2564–2577.
JIANG Y X, JI W X, HE X, et al. Low-carbon scheduling of multi-objective flexible job-shop based on improved NSGA-II [J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(21): 2564–2577. (in Chinese)
- [103] 陆心屹, 韩晓龙. 基于强化学习的改进 NSGA-II 求解柔性作业车间节能调度问题[J]. *现代制造工程*, 2023(8): 22–35.
LU X Y, HAN X L. Improved NSGA-II based on reinforcement learning to solve energy-saving scheduling problem of flexible job shop [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2023(8): 22–35. (in Chinese)
- [104] 金志斌, 吉卫喜, 苏璇, 等. 结合支配强度的 NSGA-II 的柔性车间低碳调度[J]. *现代制造工程*, 2023(5): 6–14.
JIN Z B, JI W X, SU X, et al. Low-carbon flexible shop scheduling based on dominant strength NSGA-II algorithm[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2023(5): 6–14. (in Chinese)
- [105] 朱光宇, 徐文婕. 考虑能耗与质量的机床构件生产线多目标柔性作业车间调度方法[J]. *控制与决策*, 2019, 34(2): 252–260.
ZHU G Y, XU W J. Multi-objective flexible job shop scheduling method for machine tool component production line considering energy consumption and quality[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(2): 252–260. (in Chinese)
- [106] 聂文倩, 王婷. 考虑碳排放量和噪声污染的柔性作业车间调度研究[J]. *物流工程与管理*, 2023, 45(8): 57–62, 20.
NIE W Q, WANG T. Flexible job shop scheduling study considering carbon emissions and noise pollution [J]. *Logistics Engineering and Management*, 2023, 45(8): 57–62, 20. (in Chinese)
- [107] 丁宇, 王艳, 纪志成. 柔性作业车间生产与能耗协同优化决策方法[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(12): 2426–2437.
DING Y, WANG Y, JI Z C. Collaborative optimization of production and energy consumption in flexible workshop[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(12): 2426–2437. (in Chinese)
- [108] 赵慧娟, 范明霞, 姜盼松, 等. 时间-能耗-质量权衡优化的柔性作业车间多目标调度研究[J]. *计算机应用与软件*, 2023, 40(5): 67–75.
ZHAO H J, FAN M X, JIANG P S, et al. Multi-objective scheduling of flexible job-shop based on time-energy-quality tradeoff optimization [J]. *Computer Applications and Software*, 2023, 40(5): 67–75. (in Chinese)
- [109] MENG L L, ZHANG C Y, SHAO X Y, et al. MILP models for energy-aware flexible job shop scheduling problem[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210: 710–723.
- [110] GONG G L, CHIONG R, DENG Q W, et al. A two-stage memetic algorithm for energy-efficient flexible job shop scheduling by means of decreasing the total number of machine restarts[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2022, 75: 101131.
- [111] WU X L, SHEN X L, LI C B. The flexible job-shop scheduling problem considering deterioration effect and energy consumption simultaneously [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 135: 1004–1024.

- [112] CALDEIRA R H, GNANAVELBABU A, VAIDYANATHAN T. An effective backtracking search algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling considering new job arrivals and energy consumption[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 149: 106863.
- [113] YANG J F, XU H, CHENG J H, et al. A decomposition-based memetic algorithm to solve the biobjective green flexible job shop scheduling problem with interval type-2 fuzzy processing time [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 183: 109513.
- [114] PARK M J, HAM A. Energy-aware flexible job shop scheduling under time-of-use pricing [J]. *International Journal of Production Economics*, 2022, 248: 108507.
- [115] SHEN L J, DAUZÈRE-PÉRÈS S, MAECKER S. Energy cost efficient scheduling in flexible job-shop manufacturing systems [J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 310(3): 992 – 1016.
- [116] LUO S, ZHANG L X, FAN Y S. Energy-efficient scheduling for multi-objective flexible job shops with variable processing speeds by grey wolf optimization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 234: 1365 – 1384.
- [117] LI Y B, HUANG W X, WU R, et al. An improved artificial bee colony algorithm for solving multi-objective low-carbon flexible job shop scheduling problem [J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 95: 106544.
- [118] 杨冬婧, 雷德明. 新型蛙跳算法求解总能耗约束 FJSP[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(22): 2682 – 2689.
YANG D J, LEI D M. A novel shuffled frog-leaping algorithm for FJSP with total energy consumption constraints[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(22): 2682 – 2689. (in Chinese)
- [119] CHEN X L, LI J Q, DU Y. A hybrid evolutionary immune algorithm for fuzzy flexible job shop scheduling problem with variable processing speeds [J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 233: 120891.
- [120] LI M, LEI D M. An imperialist competitive algorithm with feedback for energy-efficient flexible job shop scheduling with transportation and sequence-dependent setup times[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2021, 103: 104307.
- [121] ZHOU G H, CHEN Z H, ZHANG C, et al. An adaptive ensemble deep forest based dynamic scheduling strategy for low carbon flexible job shop under recessive disturbance[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 337: 130541.
- [122] WU X L, SUN Y J. A green scheduling algorithm for flexible job shop with energy-saving measures[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 3249 – 3264.
- [123] WEI Z Z, LIAO W Z, ZHANG L Y. Hybrid energy-efficient scheduling measures for flexible job-shop problem with variable machining speeds [J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 197: 116785.
- [124] 孟磊磊, 张超勇, 肖华军, 等. 面向加工时间可控的柔性作业车间节能调度问题建模[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(5): 1062 – 1074.
MENG L L, ZHANG C Y, XIAO H J, et al. Mathematical modeling of energy-efficient flexible job shop scheduling problem with controllable processing times [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(5): 1062 – 1074. (in Chinese)
- [125] 吴秀丽, 孙阳君. 机器多转速的柔性作业车间绿色调度问题 [J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(4): 862 – 875.
WU X L, SUN Y J. Flexible job shop green scheduling problem with multi-speed machine[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(4): 862 – 875. (in Chinese)
- [126] 閻泰梓, 唐秋华, 成丽新. 基于 DQN 协同进化算法的柔性作业车间能效调度优化 [J/OL]. *计算机集成制造系统*, 2023 [2024 – 01 – 07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230224.1901.011.html>.
- XIA T Z, TANG Q H, CHENG L X. Energy-efficient optimization of flexible job-shop scheduling based on DQN co-evolutionary algorithm [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023 [2024 – 01 – 07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230224.1901.011.html>. (in Chinese)
- [127] 马训德, 毕利, 王俊杰. 基于离散冠状病毒群体免疫算法的多转速绿色柔性车间调度研究 [J/OL]. *系统仿真学报*, 2023 [2025 – 01 – 07]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0896>.
- MA X D, BI L, WANG J J. Discrete coronavirus herd immunity optimizer algorithm for green flexible job shop scheduling with multi-speed machines [J/OL]. *Journal of System Simulation*, 2023 [2025 – 01 – 07]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0896>. (in Chinese)
- [128] LUO C, GONG W Y, LU C. Knowledge-driven two-stage memetic algorithm for energy-efficient flexible job shop scheduling with machine breakdowns [J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 235: 121149.
- [129] LIU Z C, GUO S S, WANG L. Integrated green scheduling optimization of flexible job shop and crane transportation considering comprehensive energy consumption [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 765 – 786.
- [130] LI J Q, DU Y, GAO K Z, et al. A hybrid iterated greedy algorithm for a crane transportation flexible job shop problem [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, 19(3): 2153 – 2170.
- [131] DU Y, LI J Q, LI C D, et al. A reinforcement learning approach for flexible job shop scheduling problem with crane transportation and setup times [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2024, 35(4): 5695 – 5709.
- [132] XU G J, BAO Q, ZHANG H L. Multi-objective green scheduling of integrated flexible job shop and automated guided vehicles [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 126: 106864.
- [133] JIANG X Y, TIAN Z Q, LIU W J, et al. Energy-efficient scheduling of flexible job shops with complex processes; a case study for the aerospace industry complex components in China [J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2022, 27: 100293.
- [134] TIAN Z Q, JIANG X Y, LIU W J, et al. Dynamic energy-efficient scheduling of multi-variety and small batch flexible job-shop; a case study for the aerospace industry [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 178: 109111.
- [135] 田志强, 姜兴宇, 杨国哲, 等. 一种面向航天复杂构件的柔性作业车间能耗优化调度问题研究 [J]. *机械工程学报*, 2023, 59(8): 273 – 287.
TIAN Z Q, JIANG X Y, YANG G Z, et al. Energy efficient

- scheduling of flexible job shop with aerospace complex components[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(8): 273 - 287. (in Chinese)
- [136] TIAN Z Q, JIANG X Y, TIAN G D, et al. Knowledge-based lot-splitting optimization method for flexible job shops considering energy consumption[J]. *IEEE Transactions On Automation Science and Engineering*, 2023, 21(3): 4864 - 4875.
- [137] LI Y B, YANG Z P, WANG L, et al. A hybrid imperialist competitive algorithm for energy-efficient flexible job shop scheduling problem with variable-size sublots [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 172: 108641.
- [138] DAI M, TANG D B, ADRIANA G, et al. Multi-objective optimization for energy-efficient flexible job shop scheduling problem with transportation constraints [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 59: 143 - 157.
- [139] 李俊青, 杜宇, 田杰, 等. 带运输资源约束柔性作业车间调度问题的人工蜂群算法[J]. *电子学报*, 2021, 49(2): 324 - 330.
- LI J Q, DU Y, TIAN J, et al. An artificial bee colony algorithm for flexible job shop scheduling with transportation resource constraints [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(2): 324 - 330. (in Chinese)
- [140] 王亚昆, 刘应波, 吴永明, 等. 改进 NSGA-II 算法求解考虑运输约束的柔性作业车间节能调度问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(9): 3028 - 3040.
- WANG Y K, LIU Y B, WU Y M, et al. Improved NSGA-II algorithm to solve energy-saving scheduling problem of flexible job shop considering transportation constraints[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(9): 3028 - 3040. (in Chinese)
- [141] GONG G L, DENG Q W, GONG X R, et al. A non-dominated ensemble fitness ranking algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problem considering worker flexibility and green factors [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2021, 231: 107430.
- [142] 张洪亮, 徐静茹, 谈波, 等. 考虑交货期的双资源柔性作业车间节能调度[J]. *系统仿真学报*, 2023, 35(4): 734 - 746.
- ZHANG H L, XU J R, TAN B, et al. Dual resource constrained flexible job shop energy-saving scheduling considering delivery time[J]. *Journal of System Simulation*, 2023, 35(4): 734 - 746. (in Chinese)
- [143] PENG Z, ZHANG H, TANG H T, et al. Research on flexible job-shop scheduling problem in green sustainable manufacturing based on learning effect [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2022, 33: 1725 - 1746.
- [144] 刘璐, 宋海草, 姜天华, 等. 基于改进生物迁徙算法的双资源柔性作业车间节能调度问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2024, 30(9): 3125 - 3141.
- LIU L, SONG H C, JIANG T H, et al. Modified biology migration algorithm for dual-resource energy-saving flexible job shop scheduling problem [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2024, 30(9): 3125 - 3141. (in Chinese)
- [145] 卫少鹏, 王婷, 周彤. 考虑调整时间的绿色柔性作业车间调度研究[J]. *机电工程*, 2021, 38(2): 158 - 168.
- WEI S P, WANG T, ZHOU T. Green job shop scheduling considering adjustment time [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2021, 38(2): 158 - 168. (in Chinese)
- [146] 张国辉, 卫世文, 张海军, 等. 考虑时间与能耗约束的柔性作业车间调度优化[J]. *计算机应用研究*, 2022, 39(12): 3673 - 3677.
- ZHANG G H, WEI S W, ZHANG H J, et al. Optimization of flexible job-shop scheduling considering time and energy constraints [J]. *Application Research of Computers*, 2022, 39(12): 3673 - 3677. (in Chinese)
- [147] LI J Q, DENG J W, LI C Y, et al. An improved Jaya algorithm for solving the flexible job shop scheduling problem with transportation and setup times [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2020, 200: 106032.
- [148] JIANG T H, ZHU H Q, LIU L, et al. Energy-conscious flexible job shop scheduling problem considering transportation time and deterioration effect simultaneously [J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2022, 35: 100680.
- [149] 李聪波, 王睿, 寇阳, 等. 考虑设备预维护的柔性作业车间调度节能优化方法[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(10): 220 - 230.
- LI C B, WANG R, KOU Y, et al. Energy saving optimization method of flexible job shop scheduling considering preventive maintenance [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(10): 220 - 230. (in Chinese)
- [150] 张洪亮, 徐公杰, 鲍蕾, 等. 考虑运输时间和机器预维护的柔性作业车间绿色调度[J]. *计算机集成制造系统*, 2024, 30(9): 3111 - 3124.
- ZHANG H L, XU G J, BAO Q, et al. Flexible job-shop green scheduling considering transportation time and machine preventive maintenance [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2024, 30(9): 3111 - 3124. (in Chinese)
- [151] 郭顺生, 徐少帅, 陈志鹏, 等. 考虑运输与维护的柔性作业车间绿色调度[J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2023, 45(1): 109 - 116.
- GUO S S, XU S S, CHEN Z P, et al. Flexible job shop green scheduling with transportation time and preventive maintenance [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)*, 2023, 45(1): 109 - 116. (in Chinese)
- [152] 张洪亮, 丁仁曼, 徐公杰. 考虑区间工时的多目标柔性作业车间节能调度[J]. *系统仿真学报*, 2022, 34(9): 1976 - 1987.
- ZHANG H L, DING R M, XU G J. Energy-efficient scheduling of multi-objective flexible job shop considering interval processing time [J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34(9): 1976 - 1987. (in Chinese)
- [153] PAN Z X, LEI D M, WANG L. A bi-population evolutionary algorithm with feedback for energy-efficient fuzzy flexible job shop scheduling [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 52(8): 5295 - 5307.
- [154] LI R, GONG W Y, LU C, et al. A learning-based memetic algorithm for energy-efficient flexible job-shop scheduling with type-2 fuzzy processing time [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2023, 27(3): 610 - 620.
- [155] LI J Q, HAN Y Y, GAO K Z, et al. Bi-population balancing multi-objective algorithm for fuzzy flexible job shop with energy and transportation [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, 21(3):

- 4686 – 4702.
- [156] LYU Y, LI C B, TANG Y, et al. Toward energy-efficient rescheduling decision mechanisms for flexible job shop with dynamic events and alternative process plans [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, 19(4): 3259 – 3275.
- [157] 唐亮,程峰,吉卫喜,等.改进ICA求解柔性作业车间插单重调度问题[J].*计算机工程与应用*, 2023, 59(21): 303 – 311.
- TANG L, CHENG F, JI W X, et al. Improved ICA for rush order insertion rescheduling problem under flexible job shops[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2023, 59(21): 303 – 311. (in Chinese)
- [158] 李聪波,寇阳,雷焱绯,等.基于动态事件的柔性作业车间重调度节能优化[J].*计算机集成制造系统*, 2020, 26(2): 288 – 299.
- LI C B, KOU Y, LEI Y F, et al. Flexible job shop rescheduling optimization method for energy-saving based on dynamic events [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(2): 288 – 299. (in Chinese)
- [159] 王凌,邓瑾,王圣尧.分布式车间调度优化算法研究综述[J].*控制与决策*, 2016, 31(1): 1 – 11.
- WANG L, DENG J, WANG S Y. Survey on optimization algorithms for distributed shop scheduling[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(1): 1 – 11. (in Chinese)
- [160] ZHANG L K, DENG Q W, ZHAO Y, et al. Joint optimization of demand-side operational utility and manufacture-side energy consumption in a distributed parallel machine environment [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 164: 107863.
- [161] PAN Z X, LEI D M, WANG L. A knowledge-based two-population optimization algorithm for distributed energy-efficient parallel machines scheduling [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(6): 5051 – 5063.
- [162] 潘子肖,雷德明.基于问题性质的分布式低碳并行机调度算法研究[J].*自动化学报*, 2020, 46(11): 2427 – 2438.
- PAN Z X, LEI D M. Research on property-based distributed low carbon parallel machines scheduling algorithm[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(11): 2427 – 2438. (in Chinese)
- [163] WANG J J, WANG L. A cooperative memetic algorithm with feedback for the energy-aware distributed flow-shops with flexible assembly scheduling [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 168: 108126.
- [164] LU C, GAO L, YI J, et al. Energy-efficient scheduling of distributed flow shop with heterogeneous factories: a real-world case from automobile industry in China [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(10): 6687 – 6696.
- [165] ZHANG W Q, GENG H L, LI C, et al. Q-learning-based multi-objective particle swarm optimization with local search within factories for energy-efficient distributed flow-shop scheduling problem [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2023, 36: 185 – 208.
- [166] PAN Y X, GAO K Z, LI Z W, et al. Solving biobjective distributed flow-shop scheduling problems with lot-streaming using an improved jaya algorithm[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2023, 53(6): 3818 – 3828.
- [167] LI Q H, LI J Q, ZHANG X J, et al. A wale optimization algorithm for distributed flow shop with batch delivery [J]. *Soft Computing*, 2021, 25: 13181 – 13194.
- [168] 张梓琪,钱斌,胡蓉,等.基于多维EDA算法的低碳分布式装配流水车间调度[J].*控制与决策*, 2022, 37(5): 1367 – 1377.
- ZHANG Z Q, QIAN B, HU R, et al. Multidimensional estimation of distribution algorithm for low carbon scheduling of distributed assembly permutation flow-shop [J]. *Control and Decision*, 2022, 37(5): 1367 – 1377. (in Chinese)
- [169] ZHAO F Q, ZHANG H, WANG L, et al. A multi-objective discrete differential evolution algorithm for energy-efficient distributed blocking flow shop scheduling problem [J]. *International Journal of Production Research*, 2024, 62(12): 4226 – 4244.
- [170] ZHAO F Q, DI S L, WANG L. A hyperheuristic with Q-learning for the multiobjective energy-efficient distributed blocking flow shop scheduling problem [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2023, 53(5): 3337 – 3350.
- [171] CHEN S, PAN Q K, GAO L, et al. Energy-efficient distributed heterogeneous blocking flowshop scheduling problem using a knowledge-based iterated Pareto greedy algorithm[J]. *Neural Computing and Applications*, 2023, 35: 6361 – 6381.
- [172] ZHAO F Q, XU Z S, BAO H Z, et al. A cooperative whale optimization algorithm for energy-efficient scheduling of the distributed blocking flow-shop with sequence-dependent setup time [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 178: 109082.
- [173] BAO H Z, PAN Q K, RUIZ R, et al. A collaborative iterated greedy algorithm with reinforcement learning for energy-aware distributed blocking flow-shop scheduling [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2023, 83: 101399.
- [174] NIU W, LI J Q. A two-stage cooperative evolutionary algorithm for energy-efficient distributed group blocking flow shop with setup carryover in precast systems [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2022, 257: 109890.
- [175] ZHAO F Q, XU Z S, HU X T, et al. An improved iterative greedy athm for energy-efficient distributed assembly no-wait flow-shop scheduling problem [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2023, 81: 101355.
- [176] ZHAO F Q, HU X T, WANG L, et al. A reinforcement learning-driven brain storm optimisation algorithm for multi-objective energy-efficient distributed assembly no-wait flow shop scheduling problem [J]. *International Journal of Production Research*, 2023, 61(9): 2854 – 2872.
- [177] ZHAO F Q, JIANG T, WANG L. A reinforcement learning driven cooperative meta-heuristic algorithm for energy-efficient distributed no-wait flow-shop scheduling with sequence-dependent setup time [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(7): 8427 – 8440.
- [178] ZHAO F Q, MA R, WANG L. A self-learning discrete jaya algorithm for multiobjective energy-efficient distributed no-idle flow-shop scheduling problem in heterogeneous factory system [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(12): 12675 – 12686.
- [179] MOU J H, DUAN P Y, GAO L, et al. An effective hybrid collaborative algorithm for energy-efficient distributed permutation flow-shop inverse scheduling [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2022, 128: 521 – 537.
- [180] LUO C, GONG W Y, LI R, et al. Problem-specific

- knowledge MOEA/D for energy-efficient scheduling of distributed permutation flow shop in heterogeneous factories[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 123: 106454.
- [181] LU C, GAO L, GONG W Y, et al. Sustainable scheduling of distributed permutation flow-shop with non-identical factory using a knowledge-based multi-objective memetic optimization algorithm [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2021, 60: 100803.
- [182] WANG G C, GAO L, LI X Y, et al. Energy-efficient distributed permutation flow shop scheduling problem using a multi-objective whale swarm algorithm [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2020, 57: 100716.
- [183] WANG J J, WANG L. A knowledge-based cooperative algorithm for energy-efficient scheduling of distributed flow-shop [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics; Systems*, 2020, 50(5): 1805–1819.
- [184] 曾亮, 石俊洋, 胡迈, 等. 用于分布式置换流水变速车间的双种群算法[J/OL]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2023 [2024-01-07]. <https://doi.org/10.13878/j.cnki.jnuist.20230905003>.
ZENG L, SHI J Y, HU M, et al. Dual population algorithm for distributed permutation flow shop with variable processing speed [J/OL]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2023 [2024-01-07]. <https://doi.org/10.13878/j.cnki.jnuist.20230905003>. (in Chinese)
- [185] LU C, HUANG Y X, MENG L L, et al. A Pareto-based collaborative multi-objective optimization algorithm for energy-efficient scheduling of distributed permutation flow-shop with limited buffers [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2022, 74: 102277.
- [186] ZHANG Z Q, HU R, QIAN B, et al. A matrix cube-based estimation of distribution algorithm for the energy-efficient distributed assembly permutation flow-shop scheduling problem[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 194: 116484.
- [187] FU Y P, TIAN G D, FATHOLLAHI-FARD A M, et al. Stochastic multi-objective modelling and optimization of an energy-conscious distributed permutation flow shop scheduling problem with the total tardiness constraint[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226: 515–525.
- [188] SCHULZ S, SCHÖNHEIT M, NEUFELD J S. Multi-objective carbon-efficient scheduling in distributed permutation flow shops under consideration of transportation efforts [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 365: 132551.
- [189] CHEN J F, WANG L, PENG Z P. A collaborative optimization algorithm for energy-efficient multi-objective distributed no-idle flow-shop scheduling [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2019, 50: 100557.
- [190] HUANG K H, LI R, GONG W Y, et al. BRCE: bi-roles co-evolution for energy-efficient distributed heterogeneous permutation flow shop scheduling with flexible machine speed[J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2023, 9: 4805–4816.
- [191] 陈水琳, 郑建国. 考虑准备时间的分布式混合零空闲置换流水车间调度问题[J/OL]. *计算机集成制造系统*, 2023[2025-01-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230927.1142.010.html>.
- CHENG S L, ZHENG J G. Distributed mixed no-idle permutation flowshop scheduling problem with setup times[J/OL]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023[2025-01-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230927.1142.010.html>. (in Chinese)
- [192] 许天鹏, 赵付青, 张建新, 等. 带分时电价约束的分布式柔性流水车间调度问题及其求解算法[J/OL]. *计算机集成制造系统*, 2023[2025-01-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20230728.1737.012.html>.
- XU T P, ZHAO F Q, ZHANG J L, et al. Distributed flexible flow-shop scheduling problem with time-of-use electricity tariffs constraint and its solving algorithm[J/OL]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023 [2025-01-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20230728.1737.012.html>. (in Chinese)
- [193] DONG J, YE C M. Green scheduling of distributed two-stage reentrant hybrid flow shop considering distributed energy resources and energy storage system[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 169: 108146.
- [194] WANG J J, WANG L. A cooperative memetic algorithm with learning-based agent for energy-aware distributed hybrid flow-shop scheduling [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2022, 26(3): 461–475.
- [195] LI J Q, CHEN X L, DUAN P Y, et al. KMOEA: a knowledge-based multiobjective algorithm for distributed hybrid flow shop in a prefabricated system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(8): 5318–5329.
- [196] SHAO W S, SHAO Z S, PI D C. A multi-neighborhood-based multi-objective memetic algorithm for the energy-efficient distributed flexible flow shop scheduling problem[J]. *Neural Computing and Applications*, 2022, 34: 22303–22330.
- [197] ZHANG W Q, LI C, GEN M, et al. A multiobjective memetic algorithm with particle swarm optimization and Q -learning-based local search for energy-efficient distributed heterogeneous hybrid flow-shop scheduling problem [J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 237: 121570.
- [198] YU F, LU C, YIN L J, et al. Modeling and optimization algorithm for energy-efficient distributed assembly hybrid flowshop scheduling problem considering worker resources[J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2024, 40: 100620.
- [199] SHAO W S, SHAO Z S, PI D C. A network memetic algorithm for energy and labor-aware distributed heterogeneous hybrid flow shop scheduling problem [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2022, 75: 101190.
- [200] QIN H X, HAN Y Y, CHEN Q D, et al. Energy-efficient iterative greedy algorithm for the distributed hybrid flow shop scheduling with blocking constraints[J]. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 2023, 7(5): 1442–1457.
- [201] JIANG E D, WANG L, WANG J J. Decomposition-based multi-objective optimization for energy-aware distributed hybrid flow shop scheduling with multiprocessor tasks [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2021, 26(5): 646–663.
- [202] CAI J C, LEI D M. A cooperated shuffled frog-leaping algorithm for distributed energy-efficient hybrid flow shop scheduling with fuzzy processing time [J]. *Complex &*

- Intelligent Systems, 2021, 7: 2235 – 2253.
- [203] GENG K F, LIU L, WU Z Y. Energy-efficient distributed heterogeneous re-entrant hybrid flow shop scheduling problem with sequence dependent setup times considering factory eligibility constraints[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 18741.
- [204] JIANG E D, WANG L, PENG Z P. Solving energy-efficient distributed job shop scheduling via multi-objective evolutionary algorithm with decomposition[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2020, 58: 100745.
- [205] LI R, GONG W Y, WANG L, et al. Surprisingly popular-based adaptive memetic algorithm for energy-efficient distributed flexible job shop scheduling [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(12): 8013 – 8023.
- [206] 陈文洲, 李登峰, 郑小雪. 考虑低碳的分布式柔性作业车间调度优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(11): 164 – 168.
- CHEN W Z, LI D F, ZHENG X X. Optimization of distributed flexible job-shop scheduling problem with low carbon [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021 (11): 164 – 168. (in Chinese)
- [207] 李瑞, 王凌, 龚文引. 知识驱动的模因算法求解分布式绿色柔性调度[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 55 – 60.
- LI R, WANG L, GONG W Y. Knowledge-driven memetic algorithm for distributed green flexible job shop scheduling problem[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(6): 55 – 60. (in Chinese)
- [208] MENG L L, REN Y P, ZHANG B, et al. MILP modeling and optimization of energy-efficient distributed flexible job shop scheduling problem [J]. IEEE Access, 2020, 8: 191191 – 191203.
- [209] YU F, LU C, ZHOU J J, et al. A knowledge-guided bi-population evolutionary algorithm for energy-efficient scheduling of distributed flexible job shop problem [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 128: 107458.
- [210] ZHANG Z Q, WU F C, QIAN B, et al. A Q-learning-based hyper-heuristic evolutionary algorithm for the distributed flexible job-shop scheduling problem with crane transportation[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 234: 121050.
- [211] DU Y, LI J Q, LUO C, et al. A hybrid estimation of distribution algorithm for distributed flexible job shop scheduling with crane transportations [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2021, 62: 100861.
- [212] CHEN X L, DU Y. Hybrid artificial immune algorithm for energy-efficient distributed flexible job shop in semiconductor manufacturing[J]. Cluster Computing, 2024, 27: 3075 – 3098.
- [213] 王凌, 王晶晶. 考虑运输时间的分布式绿色柔性作业车间调度协同群智能优化[J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 53(2): 243 – 257.
- WANG L, WANG J J. A cooperative memetic algorithm for the distributed green flexible job shop with transportation time[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2023, 53(2): 243 – 257. (in Chinese)
- [214] 张洪亮, 徐公杰, 鲍蕾, 等. 考虑运输时间的分布式柔性作业车间绿色调度[J]. 中国机械工程, 2022, 33(21): 2554 – 2563, 2645.
- ZHANG H L, XU G J, BAO Q, et al. Distributed flexible job shop green scheduling with transportation time [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33 (21): 2554 – 2563, 2645. (in Chinese)
- [215] LI R, GONG W Y, WANG L, et al. Co-evolution with deep reinforcement learning for energy-aware distributed heterogeneous flexible job shop scheduling [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics; Systems, 2024, 54(1): 201 – 211.
- [216] ZHU K K, GONG G L, PENG N T, et al. Dynamic distributed flexible job-shop scheduling problem considering operation inspection[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 224: 119840.
- [217] LUO Q, DENG Q W, GONG G L, et al. An efficient memetic algorithm for distributed flexible job shop scheduling problem with transfers [J]. Expert Systems with Applications, 2020, 160: 113721.
- [218] 张洪亮, 徐静茹, 徐公杰. 分布式双资源柔性作业车间节能调度[J]. 系统科学与数学, 2023, 43(6): 1468 – 1485.
- ZHANG H L, XU J R, XU G J. Distributed flexible job shop energy-saving scheduling with dual resource constraints[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2023, 43(6): 1468 – 1485. (in Chinese)
- [219] LI R, GONG W Y, WANG L, et al. Two-stage knowledge-driven evolutionary algorithm for distributed green flexible job shop scheduling with type-2 fuzzy processing time [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2022, 74: 101139.
- [220] ZHU N, GONG G L, LU D, et al. An effective reformative memetic algorithm for distributed flexible job-shop scheduling problem with order cancellation[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 237: 121205.