

分布式车间调度优化算法研究综述

王 凌, 邓 瑾, 王圣尧

(清华大学自动化系, 北京 100084)

摘 要: 在分布式制造环境下, 分布式车间调度着重研究工件在工厂间的合理分配以及各工厂内的合理加工顺序, 以实现调度指标的最优化. 分布式车间调度的研究具有重要的学术意义和应用价值, 已成为生产调度领域的热点. 对此, 围绕分布式并行机调度、分布式流水线调度、分布式作业车间调度、分布式装配调度和分布式柔性车间调度等问题, 重点综述分布式调度优化算法方面的代表性成果, 介绍分布式调度的若干应用, 最后指出有待于进一步研究的若干方向和内容.

关键词: 分布式车间调度; 优化算法; 工厂分配; 工件排序

中图分类号: TP18

文献标志码: A

Survey on optimization algorithms for distributed shop scheduling

WANG Ling, DENG Jin, WANG Sheng-yao

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Correspondent: WANG Ling, E-mail: wangling@tsinghua.edu.cn)

Abstract: Under the distributed manufacturing environment, the distributed shop scheduling is to allocate jobs to suitable factories and to determine a reasonable processing sequence in each factory to optimize certain scheduling objectives. The study on the distributed shop scheduling is of great academic significance and application value, which has been a hot topic in production scheduling field. In this paper, the state-of-the-art achievements of optimization algorithms in the distributed parallel machine scheduling, distributed flow shop scheduling, distributed job shop scheduling, distributed assembly scheduling and distributed flexible scheduling problems are mainly reviewed, and several applications of the distributed scheduling are introduced. Finally, some future research directions and contents are pointed out.

Keywords: distributed shop scheduling; optimization algorithm; factory allocation; job sequencing

0 引 言

智能化生产系统是智能工厂的重要研究内容, 而智能生产必须考虑整个企业的生产、调度、物流和管理. 在全球化背景下, 随着公司之间的合作生产以及企业之间的兼并收购日益普遍, 分布式制造已成为一种常见的生产模式^[1]. 分布式制造可以充分利用多个企业或工厂的资源, 通过实现资源的合理配置、优化组合及共享, 以合理的成本快速实现产品的生产制造. 由于各工厂间存在诸如机器数量、机器工艺、原料供应和运输条件等差别, 工厂之间的任务分配需要满足一定的约束条件. 不同生产规模和能力或是不同地域的多个工厂通过建立合作关系, 采用合理的分工和协作方式, 使企业在低成本、低风险的情况下生产出高质量的产品^[2-3].

生产调度是制造系统的重要环节, 直接影响企业的效益和竞争力^[4]. 高效的优化技术与调度方法的研究与应用, 是实现节能、降耗、减排、降低成本和提高生产系统最优性的关键, 是提高生产效率和经济效益的核心环节. 分布式车间调度问题 (DSSP) 是以不同公司之间的合作生产或不同工厂之间协作生产等分布式制造为背景, 研究工件在工厂间的分配和各工厂内的加工顺序, 以实现调度指标的最优化. 在数学上, DSSP 属于 NP-hard 问题, 求解难度很大, 其研究具有重要的学术意义. 在工程上, 实现 DSSP 的最优或次优化可以大幅减少工期或降低生产成本, 其研究具有重要的应用价值. 由于分布式生产调度过程包含多个分散的车间, 除了具有传统车间调度的特征外, DSSP 还具有若干更为复杂的特征, 其求解复杂性主要体现在

收稿日期: 2014-12-24; **修回日期:** 2015-03-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61174189); 高等学校博士学科点专项科研项目(20130002110057).

作者简介: 王凌(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能优化调度理论与方法等研究; 邓瑾(1991-), 女, 硕士生, 从事智能优化调度的研究.

以下几个方面:

1) DSSP 需要考虑多个分布式车间之间以及各车间内部的工件排序和机器分配. 由于实际生产过程往往存在诸多机器和大量工件, 调度过程涉及的工序数量庞大, 调度方案的规模巨大. 问题的大规模性, 是难以实现高效、全局优化的主要复杂性之一. 如何降低计算复杂度、提高求解效率、改善优化质量, 无疑对算法设计形成了挑战.

2) 对于 DSSP, 车间之间工件的分配、车间内部机器的分配、车间内部工件的排序, 这些因素相互耦合. 首先, 算法必须保证所生成的调度方案的可行性; 其次, 只有统筹考虑各方面因素, 实现各种决策量的协同优化, 才能取得全局优化的效果.

3) 一方面, 车间分布的分散性使得生产系统更为复杂, 制造环境存在多样性和多变性, 有时难以获得完全确切的生产作业信息. 另一方面, 为了适应市场需求的变化以及制造系统的特殊情况, 经常会出现若干不确定性因素, 例如突发的生产订单、设备故障、交货期的提前或滞后、制造资源的短缺等. 这些不确定因素无疑将增加调度问题求解的难度, 有效的优化方法必须考虑问题的不确定性, 保证调度方案的鲁棒性.

4) 在分布式生产系统中, 优化调度的目标除了传统调度追求的工期最小化, 还必须考虑各个分布车间的工作负荷的均匀性以及总加工成本等性能指标. 考虑到市场因素, 常需考虑基于订单的性能指标. 尤其是, 在不确定环境下还必须考虑调度方案的鲁棒性指标或稳定性指标. 因此, 如何综合多方面性能指标, 从多目标优化的角度研究 DSSP, 将更具现实意义.

DSSP 比传统的单一车间调度问题更为复杂, 其研究具有更重要的学术意义与应用价值, 必将成为生产调度及相关领域的研究热点^[5]. 在学术界, Wang 等^[1]介绍了分布式制造的工艺计划与调度的研究进展; Toptal 等^[6]介绍了分布式调度的概念, 提出了基于信息流结构、通信机制、局部智能体类型、分配方式、调度生产、优化目标和机器环境等 7 个属性的分类方法; 近期, 国际制造协会会刊《Int J of Production Research》出版了分布式调度优化算法的专刊^[7]. 现有算法主要包括精确求解方法、启发式方法、智能优化方法和多智能体方法四大类. 虽然精确求解方法在理论上能得到最优解, 但其时间复杂性和空间复杂性对于中大规模的问题均难以接受, 因此通常只适用于小规模问题. 启发式方法基于调度规则快速构造可行解^[8], 但通常难以保证解的质量. 智能优化方法基于特定操作通过迭代搜索不断改善解的质量, 设计有

效、高效、鲁棒的搜索操作是关键^[9]. 多智能体方法是分布式人工智能研究的一个重要分支^[10], 基于问题的分解和多智能体的协同实现调度问题的求解.

以分布式制造为背景, 围绕分布式并行机调度、分布式流水线调度、分布式作业车间调度、分布式装配调度和分布式柔性调度等制造系统优化调度问题, 本文重点综述分布式调度优化算法具有代表性的成果, 介绍分布式车间调度的若干应用, 最后提出若干进一步研究的方向和内容, 为分布式调度的研究提供指导, 有助于推动生产调度和相关优化研究的发展.

1 分布式并行机调度

并行机调度是一类典型的调度问题^[4]. 对于经典并行机调度, 每个工件只需完成一道工序, 可以选择任意一台并行机完成加工^[11]. 在分布式制造环境下, 分布式并行机调度问题 (DPMSPP) 需同时考虑 3 个子问题: 为工件分配工厂; 在每个工厂内为工件分配机器; 确定各机器上工件的加工顺序. 图 1 为 DPMSPP 的示意图. 显然, 当每个工厂内只有一台机器时, 问题将简化为分布式单机调度.

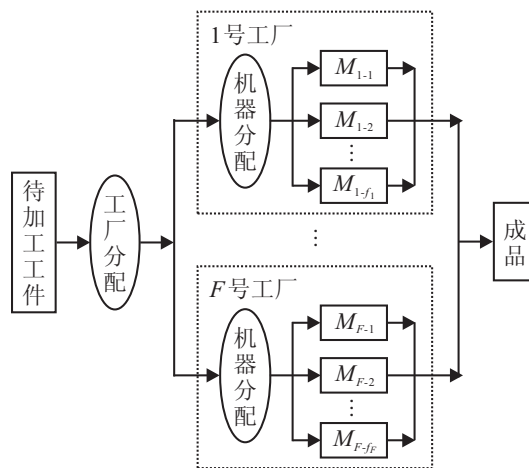


图 1 分布式并行机调度

1.1 分布式单机调度

如果将每个供应商视为一台机器, 则供应链管理问题中的订单分配和排序相当于分布式单机调度问题, 由于供应链管理包括订单的运输和交付, 还需考虑批量运输调度和车辆分配问题. 以最小化提前/拖期惩罚费用、生产成本和运输费用之和为目标, 周金宏等^[12]利用遗传算法 (GA) 得到订单分配方案和资源优先权, 并利用基于量化的模糊规则算法得到工厂内部的调度方案. 为了最小化包括运输时间在内的最大完工时间, Zegordi 等^[13]建立了混合整数线性规划 (MILP) 模型, 利用 LINGO 软件求解, 同时提出了一种动态 GA (DGA), 采用多基因片段的染色体编码方式体现工件的工厂和车辆分配, 并通过交叉和变异操

作调整工件的加工机器/运输车辆分配和加工/运输优先级, 以最小化工件的最长订货提前期和总成本为目标, 蒋大奎等^[14]提出了一种禁忌搜索 (TS) 算法, 采用矢量组编码方式表示订单到工厂的分配以及工厂内部的工件排序, 批量运输方案则利用文中提出的分批运输最优性定理确定, 进而通过 TS 操作调整订单的分配和各工厂内部的调度方案. 针对大规模定制模式下的供应链调度问题, 以最小化生产成本和加工时间为目标, 刘小华等^[15]通过有向图映射将问题转化为带约束的最短路径问题, 并提出了一种两阶段算法: 第1阶段利用粒子群优化算法产生初始种群, 第2阶段利用 GA 得到优化调度解. 张鹏等^[16]提出了一种多种群蚁群算法, 将蚁群分为一个核心制造商蚁群和多个供应商蚁群. 其中, 各供应商蚁群独立进化, 并由核心制造商蚁群提供的信息交流方案进行种群间的信息交换.

在多智能体方法方面, Azevedo 等^[17]为每个企业分配一组智能体, 包括信息整合者、通信员、能力评估员、监控者和合作规划者, 各智能体根据协议进行交互, 并通过谈判方式制定全局调度方案. 针对供应链网络, 为了优化生产成本, Lau 等^[18]提出了一种改进的合同网协议^[19], 采用多个项目管理智能体和承包商智能体, 并通过通告、投标、判定和确认4个阶段完成调度.

1.2 分布式多并行机调度

当工厂内存在多台机器时, 必须同时考虑工件的工厂分配和工厂内的机器分配.

对于工厂分配方案可事先给定, 但允许负荷较重的工厂将订单转运至其他工厂进行生产的情况. 考虑各工厂机器数量、加工速度或生产成本不同, 文献[20-23]针对不同的调度目标建立了 MILP 模型, 并采用不同的方法进行求解. 对于小规模问题, Behnamian 等^[20-21]分别以优化生产成本与利润、优化完工时间之和与最大完工时间为目标, 利用改进-约束方法和 CPLEX 软件求解. 对于更大规模的问题, 基于分解方法将 MILP 模型分解为多个子问题, 虽然不能实现全空间搜索, 但计算量和时间复杂度大大减小. 如 Behnamian 等^[22]以最小化生产成本为目标, 利用 Benders 分解^[24]算法将模型分解为分配子问题和单工厂调度子问题, 进而分别利用线性规划和 MILP 进行求解. Behnamian 等^[20]通过加权和的方式将多目标优化转化为单目标优化, 并利用 Benders 分解得到松弛模型和邻域排序, 进而利用变邻域搜索 (VNS) 和 TS 进行搜索.

此外, Behnamian 等^[23]提出了最大完工时间的下界计算公式, 并设计了基于水平算法^[25]和最长加工时间优先 (LPT) 规则^[26]的一种改进 LPT 规则, 优先将加工时间长的工件分配到当前加工速度最快的空闲机器上; 另外, 设计了一种 GA, 通过在矩阵编码中加入断点的形式体现工厂分配和机器分配情况, 并设计了适用于该编码方式的交叉和变异操作. Behnamian 等^[21]提出了一种多种群帝国主义竞争算法^[27-28], 通过为种群分配不同的目标权重来获取 Pareto 解集.

同样基于分解算法, Terrazas-Moreno 等^[29]针对化学品供应链中的计划与调度问题, 以最大化生产利润为目标建立了 MILP 模型, 利用双层分解和拉格朗日分解, 将其分解为上层计划问题和下层调度问题进行求解. 另外, 针对具有 just-in-time 和无等待特性的生产及运输调度问题, 通过将每个工厂的生产能力等价为该工厂拥有一定数量的相同并行机, Garcia 等^[30]以最大化利润为目标, 提出了基于最小费用流问题求解思想和有向图方法的精确求解方法以及启发式方法, 其中, 启发式方法通过逐步调整初始解的订单分配来获得可行解并优化利润目标. 将文献[14]的问题扩展到多并行机车间结构, 蒋大奎等^[31]利用 CPLEX 软件求解 MILP 模型, 并提出了一种基于向量组编码结构的 TS 算法.

2 分布式流水线调度

分布式流水线中每一个工厂为一个流水车间^[32], 如图2所示. 目前, 分布式流水线调度的研究主要集中在分布式置换流水线调度问题 (DPFSP), 或称并行流水线问题 (PFP).

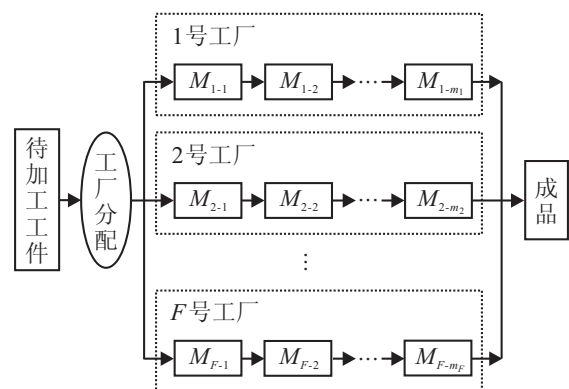


图2 分布式流水线调度

假设每条流水线仅含两台机器, Johnson's 法^[33]可以最优求解单工厂工件排序子问题, 因此算法的重点在于工厂分配环节的设计. 对于两条两机流水线的情况, Vairaktarakis 等^[34]提出了优化最大完工时间的一种动态规划算法; 进而针对多条两机流水线

的情况,提出了下界计算公式,并基于最早可用机器规则、最早完成工厂优先规则、二分搜索和动态规划等方法设计了若干种用于工厂分配的启发式方法.针对两条流水线的加工速度为一固定比例的情况,Sundararaghavan等^[35]建立了以最小化最大完工时间为目标的MILP模型,采用SAS-OR软件求解小规模问题,并基于最短加工时间优先(SPT)规则^[26]、LPT规则和最早完成工厂优先规则构造了两种启发式算法. Al-Salem^[36]提出了一种两阶段启发式算法:第1阶段通过改进文献[35]中的方法确定车间分配的初步方案;第2阶段利用关键工厂信息以及工厂间的插入和交换操作对初步方案进行调整.不同于上述启发式方法,Cao等^[37]以最小化生产成本和拖期罚款之和为目标,利用TS算法优化工件的工厂分配.

对于更普遍的多机DPFSP,许多启发式方法基于求解传统PFSP的规则,并利用适当的工厂分配规则逐步构建调度解.例如,以最小化最大完工时间为目标,Naderi等^[38]建立了6种MILP模型,并利用CPLEX求解结果比较了各模型的性能,同时设计了两种简单的工厂分配规则,并结合LPT、SPT、Johnson's规则、指数启发式^[39]、CDS方法^[40]和NEH方法^[41]提出了若干种启发式方法.Gao等^[42]基于工厂分配规则^[38]和NEH提出了一种启发式方法,每次通过调整多个工件的工厂分配及其加工位置来改善调度方案.

在利用启发式规则构建调度方案的基础上,采用迭代搜索算法能够简单快速地改善解的性能.例如,Naderi等^[38,43]利用工厂分配规则和NEH构建初始解,设计了工厂内部工件插入和基于关键工厂信息的工厂间工件插入两种邻域操作,并利用变邻域下降(VND)算法执行邻域搜索.在此基础上,Gao等^[44]依据文献[42]的思路设计了另一种VND算法.同样利用工厂分配规则和NEH构建初始解,文献[45-46]提出了两种迭代贪婪(IG)算法,每次迭代中将多个工件从调度解中取出,并采用贪婪的方式依次将各工件分配至使完工时间最短的工厂的相应位置.

在利用工厂分配规则和NEH^[38]构建调度方案的基础上,还可采用智能优化算法对其进行优化.Gao等^[47]提出了一种TS算法,通过工厂内的多工件插入、工厂间单工件插入和交换、工厂间工件序列的交换以及基于多邻域的局部搜索操作优化调度.对于群智能优化算法,随机初始化是常用的初始化方法.Liu等^[48]提出了一种离散类电磁机制算法,采用设置断点的工件序列编码方式随机生成工厂分配方案,进而通过交换和插入操作执行电荷的移动与变异,

并基于关键工厂信息通过VNS执行局部搜索.除此之外,根据工件编码序列利用规则进行工厂分配的方式,能够在解码过程中初步均衡各工厂的负荷.例如,Wang等^[49]提出了一种分布估计算法(EDA),基于文献[38]中的工厂分配规则,提出了最早完成工厂(ECF)的解码方法,按照编码序列的优先顺序依次为每个工件选择工厂,并设计了多种基于关键工厂信息的局部搜索策略.Xu等^[50]提出了一种混合免疫算法,根据个体的性能将种群分为3个部分,分别执行改进的优先级操作交叉^[51]、变异和接种操作、随机替换操作.随后,Deng等^[52]提出了一种竞争混合算法,利用多个子种群分别搜索不同邻域,通过竞争调整对邻域的搜索强度,通过分享策略实现种群间的信息交互.结合启发式方法和随机方法的特点,Gao等^[53]采用混合初始化的方法,设计了一种基于知识的GA,利用精英解的局部信息指导算法的搜索过程.Naderi等^[54]提出了一种分散搜索算法,通过多元初始化、更新参考集、选择个体、生成新解和局部搜索5个步骤执行搜索操作.

3 分布式作业车间调度

在分布式作业车间调度问题(DJSP)中,每个工厂均为一个作业车间,不同工件的工艺路径可能不同^[55],如图3所示.

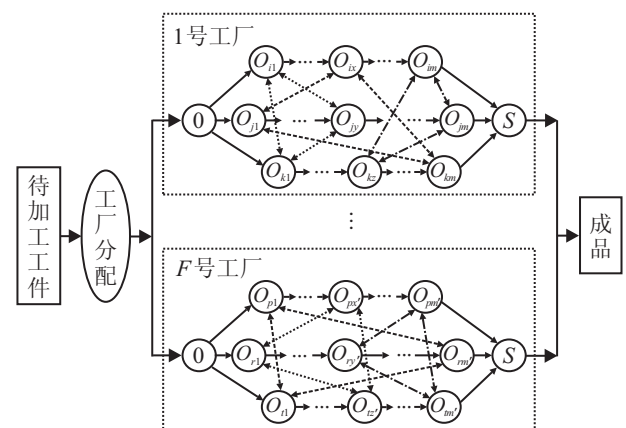


图3 分布式作业车间调度

针对由相同工厂组成的DJSP,以最小化最大完工时间为目标,Naderi等^[56]建立了两种MILP模型,并利用CPLEX软件求解;为了平衡工厂和机器的负荷,提出了一种工件-机器负荷计算方式,设计了分配工厂的一种规则和确定工件加工顺序的3种贪婪启发式方法.

在智能优化方法方面,针对各工厂内机器数量和类型不同的分布式制造问题,Jia等^[57]设计了一个基于网络的多功能调度系统,包括基于GA的调度核心模块、单机调度模块、调度智能体模块和网络调度模

块. 进而, 针对由异类工厂组成的一类DJSP, 分别以最小化最大完工时间、生产成本以及二者之和为目标, Jia等^[58]提出了一种改进GA, 采用工厂号-工件号的编码方式随机生成工厂分配方案, 利用交叉和变异操作调整工件加工顺序和工厂分配, 并将GA与甘特图法相集成^[59]. 以最小化最大完工时间为目标, Chan等^[60]提出了一种主导基因GA(GADG), 采用工厂号-机器号-工件号-操作号-主导基因的五元基因编码方式, 遗传操作主要针对主导基因执行, 该编码可体现各操作与机器的对应关系, 但解码时需考虑操作的优先级关系. 考虑到生产过程中可能出现非预见性的急件加工、故障处理等动态事件, 在满足交货期条件下以最小化生产成本为目标, Wang等^[61]提出了一种GA, 但没有给出动态事件的处理操作.

在多智能体方法方面, 针对虚拟作业车间制造系统, 以最小化最大完工时间为目标, Lou等^[62]提出了一种基于谈判的分布式调度方法, 由机器智能体利用分支定界算法制定单机调度方案, 进而由任务智能体通过谈判过程得到全局调度. 为了优化批量生产制造的总成本, Lim等^[63]提出了一种基于货币的迭代竞价机制以促进智能体之间的合作, 并利用GA调整货币取值.

4 分布式装配调度

对于分布式装配线, 每个工厂有加工机器和装配机器, 待工件加工完毕后组装成最终的产品^[64]. 分布式装配调度问题(DASP)如图4所示. 目前, 对DASP的研究尚处于起步阶段, 主要针对的是分布式流水线装配调度问题.

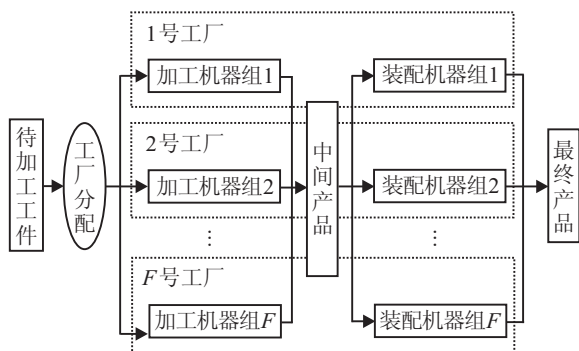


图4 分布式装配调度

对于分布式置换流水线装配调度问题(DAPFSP), 各工厂通过置换流水线加工得到中间产品, 再由一台装配机器对多个工厂得到的中间产品组装得到最终产品. 由于产品的装配受到相应工件加工的制约, 在构建启发式规则时除考虑产品装配顺序、工件的工厂分配和加工顺序外, 还应将隶属同一产品的工件在集中时段进行加工. Hatami等^[65]以最

小化最大完工时间为目标构建了MILP模型, 并利用CPLEX软件求解; 同时基于两种工厂分配规则^[38]、SPT规则和Framinan & Leisten启发式方法^[66]提出了若干种启发式方法; 进而利用启发式方法构建初始解, 并利用VND算法对产品序列和工件序列进行搜索.

对于分布式两阶段装配流水线调度问题(DTSAFSP), 每个工厂中均有一台装配机器, 且每个产品的零件可以并行加工, 此类问题中产品的装配顺序与其加工顺序一致. 为了最小化最大完工时间和平均完成时间, Xiong等^[67]利用权重法将问题转化为单目标优化问题, 建立了MILP模型, 设计了一种简化VNS策略, 并提出了相应的VNS算法和混合GA. 以最小化所有工厂的完工时间之和为目标, Xiong等^[68]提出了一种扩展SPT规则, 并与离散差分进化算法相混合.

针对多阶段分布式制造系统, 单汨源等^[69]构造了基于多智能体的协同生产系统框架, 包含装配级智能体、制造级智能体、制造公司智能体以及制造公司内部的批量决策模型智能体和排序决策模型智能体, 每个智能体由通信管理器、协同控制器、功能构件和知识库组成. 不同于上述多智能体的组织架构, Chen等^[70]设计了阶段智能体和站点智能体, 分别制定各阶段的生产计划和各工厂的调度方案, 并提出了多种协议以促进各智能体之间的协作.

5 分布式柔性制造调度

机器的多功能特性^[71]使得柔性制造更具灵活性. 分布式柔性制造调度问题(DFMSP)需要解决3个问题: 为工件分配工厂; 为操作选择机器; 确定各机器上所有操作的加工顺序. 图5为DFMSP的示意图.

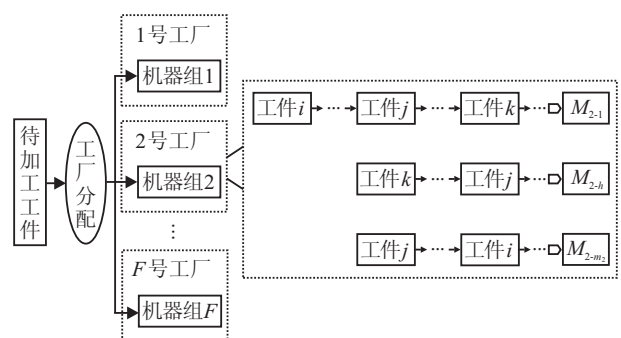


图5 分布式柔性制造调度

在进行工厂分配和机器选择时, 可以利用与调度目标相关的指标指导决策. Ziace等^[72]研究了各工厂加工速度不等的分布式柔性作业车间调度问题, 给出了与优化最大完工时间相关的若干指标, 并依据各指标值分别将工厂、机器和工件排序, 进而依照排序

顺序和规则进行工厂分配和机器选择. 但对于高度复杂的DFMSP, 该方法的寻优性能不佳, 可考虑作为智能优化算法的初始化方法. 针对供应链中的计划与调度问题, 考虑各工厂为柔性开放式车间结构, 且允许同一个工件的各个操作在不同工厂内加工, Moon等^[73]以最小化总拖期时间为目标建立了数学模型, 设计了基于操作优先级编码的GA, 利用有向图和操作优先约束关系确定各工件的操作序列, 进而依据若干机器和工件指标及分配规则为操作选择合适的机器, 并通过遗传操作进行优化. 在此基础上, Moon等^[74]将解码中的机器分配规则修改为选择总加工时间最短的可用机器, 用以优化最大完工时间.

在分布式作业车间调度研究^[60]的基础上, Chan等^[75]将GADG算法推广到分布式柔性作业车间调度问题, 但并未根据柔性特性修改算法操作. Chan等^[76]假设机器在达到最大加工时限时需进行维护操作, 在GADG^[60]的编码中加入表示机器是否进行维护的参数. 而Chung等^[77]则对GADG执行多步变异以增强局部搜索能力. 为了同时优化生产时间和生产成本, Yadollahi等^[78]将GA与TS混合, 采用3个禁忌表分别记录适应度值最好、生产时间最短和生产成本最低的个体, 采用选择、交叉和变异等遗传操作执行搜索. Chung等^[79]针对允许工件的各个操作在不同工厂加工的情况, 采用操作号-机器号-主导基因的三元基因编码方式, 并利用GADG执行搜索. Zhang等^[80]采用两阶段编码方式, 首先生成基于优先级关系的操作序列, 进而在各操作可选择的机器范围内随机生成机器分配序列, 从而对操作序列进行单点交叉和交换变异以改变操作的优先级, 对机器序列进行邻域搜索变异以保证调度的可行性. Chan等^[81]提出了一种基于TS和样本分类模拟退火^[82]的混合算法, 采用操作-机器双序列的编码方式, 通过多个采样器并行搜索以增强算法的寻优性能. 考虑到同一工件在不同工厂的工序数可能不同的情况, De Giovanni等^[83]采用工厂号-工件号的编码确定工厂分配方案, 采用规则解码来为各操作选择机器, 进而利用遗传操作调整工序加工顺序、工厂分配和机器选择, 并基于关键工厂信息和交换操作执行局部搜索.

6 分布式车间调度应用

虽然分布式车间调度的研究大多处于学术层面, 但在若干工程领域中也得到了实际应用, 尤其是生产制造和运输问题.

在运输方面, 针对具有多品种、多机器、多站点特性的木材干燥窑调度问题, Gascon等^[84]提出了一

种启发式调度方法, 根据预期需求量、各品种木材的存货量、各站点到交货地点的运输时间以及各机器(干燥窑)的负荷等因素进行工厂分配和机器选择, 进而在满足订单需求的前提下实现存货的最小化. 针对分布式砼生产输送浇筑生产调度问题, 赵广社等^[85]将其转化为有限等待时间的混合流水线调度问题, 通过构造砼生产输送浇筑生产调度系统, 采用启发式知识、专家系统、调度算法和人机交互集成的策略生成调度方案. 另外, 针对分布式预拌混凝土的生产与运输调度问题, 为了最小化生产成本和提高调度鲁棒性, Naso等^[86]提出了一种基于构造性启发式方法(CHA)的混合多目标GA. 该算法通过遗传操作得到初始订单分配与优先级, 进而采用CHA优化生产与运输调度方案, 并进一步将GA与CHA的混合算法应用于优化生产成本^[87-88].

在生产制造方面, Yamaha等^[89]针对一个塑料薄膜制造企业实例设计了基于人机合作与远程控制的计算机生产系统, 利用行为模型制定计划和调度方案, 进而通过基于强化学习的调度规则制定有效的调度方案^[90]. 为了最大化渔网制造过程的利润, Lee等^[91]利用整数规划求解工厂分配问题. 针对薄膜晶体管-液晶显示屏生产过程, 以最大化利润为目标, Chen等^[92]利用数学规划求解订单分配问题, 利用基于约束的仿真调度算法得到工厂内的调度方案. 为了优化钢铁生产铣削过程的最大完工时间和平均流程时间, Zhao等^[93]设计了一个基于通讯智能体和调度智能体的分布式调度系统, 采用3种启发式规则生成调度. 为了最小化混合分布式钢铁制造系统的生产成本, Liu等^[94]针对计划和调度问题提出了一种并行GA, 采用多个子种群协同优化. 针对如服装、制造等劳动密集型制造业中的生产监控及调度问题, Guo等^[95]设计了一种基于射频识别的智能决策支持系统架构, 利用射频识别技术收集各工厂的实时生产数据, 并利用基于非支配排序GA-II(NSGA-II)^[96]、蒙特卡洛模拟模型和启发式方法的智能优化技术制定分配及调度方案.

另外, 针对计算网络资源的管理和调度问题, Attanasio等^[97]将其转化为以最小化完工时间为目标的分布式单机调度问题, 进而采用基于拉格朗日启发式的拍卖方法进行求解.

7 展望

纵观分布式车间调度的研究现状, 分布式调度已成为诸多领域的热点研究课题, 但许多工作仍有待深入研究及拓展. 下面就问题、算法和应用等层面给予

展望.

1) 问题层面.

一方面, 目前 DSSP 的研究通常对问题假设过多, 与实际情况差距较大. 许多研究都假设工厂之间不存在差异, 即同构的生产环境, 但在实际生产中各工厂的加工能力、机器数量和加工环境都可能不同, 因此, 研究异构工厂环境下的分布式生产调度问题更具有现实意义. 同时, 现有分布式调度讨论的车间环境相对简单, 很有必要将相关研究扩展到有限等待时间、零空闲、有限缓冲区、能力退化等复杂工况. 另外, 现有工作大多只考虑静态问题, 即生产数据和环境固定, 但实际生产常伴有不确定性, 如订单变化、机器随机故障和机器维护等动态因素. 因此, 研究不确定环境下的分布式调度问题更具挑战性, 包括随机调度、模糊调度、区间数调度、在线调度与重调度等.

另一方面, 目前针对 DSSP 的理论研究很少, 而且大多针对分布式单机调度问题. 围绕分布式调度问题, 分析问题的特性, 剖析解空间的特征, 研究高效调度规则、快速性能评价机制、调度方案的有效调整策略, 无疑将有助于推动分布式调度理论与方法的发展.

2) 算法层面.

分布式调度问题的求解复杂性远大于传统问题, 目前的算法大多局限于启发式方法和智能优化方法, 而基于数学模型和商业软件的方法只适于小规模问题. 启发式方法因其原理简单、求解速度快的特点而广为接受, 尤其是在线生产和动态调度, 研究的关键在于如何取得满意的性能. 对于特定分布式调度问题, 充分理解问题的特征, 有针对性地提出高效实用的规则很重要, 这也将为智能算法的设计提供思路. 尤其是, 鉴于工厂分配与工件排序的耦合性, 问题的分解策略与相关规则的研究意义重大. 在学术层面, 分析启发式方法的计算复杂性、最坏情况性能等很有指导价值.

对于智能优化方法而言, 目前的方法主要是 GA 和 TS. 一方面, 针对分布式调度问题的特征提出特定的智能优化算法, 包括基于多智能体的人工智能方法; 另一方面, 将目前流行的粒子群优化、差分进化、蚁群算法、分布估计算法等推广应用于分布式调度, 均是很有意义的研究工作. 智能算法的关键在于操作的设计、参数的设定以及全局搜索与局部搜索的均衡. 因此, 重点的研究在于合理的搜索框架、新颖的编码和解码策略、基于问题特征的有效优化操作、基于性能动态变化的参数自适应设定机制、结合启发式规则的混合智能算法以及协同智能算法. 另外, 综合

多方面的性能指标, 开展多目标分布式车间调度算法的研究也很重要. 当然, 智能算法的计算复杂性、收敛性、下界等理论问题也值得关注.

3) 应用层面.

理论研究能指导实际应用, 同时应用研究也将促进理论研究的发展. 虽然 DSSP 的相关理论和方法在某些实际问题中得到了初步应用, 但还很有限. 一方面, 要加强对实际问题的理解和深入研究, 建模、算法设计、系统设计等工作均要注重实用性; 另一方面, 要拓展现有应用研究的范畴, 从分布式调度角度理解不同领域的实际问题, 进而间接或直接开展相关的分布式调度应用.

在全球化的背景下, 随着分布式制造和智能工厂的发展, 相信分布式生产调度的理论、方法和应用研究均将得到发展和完善, 前景光明.

参考文献(References)

- [1] Wang L, Shen W. Process planning and scheduling for distributed manufacturing[M]. London: Springer, 2007: V-VI.
- [2] Wang B. Integrated product, process and enterprise design[M]. London: Chapman & Hall, 1997: 1-2.
- [3] Kahn K B, Castellion G A, Griffin A. The PDMA handbook of new product development[M]. New York: Wiley, 2004: 203-204.
- [4] 王凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 1-2.
(Wang L. Shop scheduling with genetic algorithms[M]. Beijing: Tsinghua University & Springer Press, 2003: 1-2.)
- [5] Behnamian J, Fatemi Ghomi S M T. A survey of multi-factory scheduling[J]. J of Intelligent Manufacturing, 2014, <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-014-0890-y>.
- [6] Toptal A, Sabuncuoglu I. Distributed scheduling: A review of concepts and applications[J]. Int J of Production Research, 2010, 48(18): 5235-5262.
- [7] Chan H K, Chun S H. Optimisation approaches for distributed scheduling problems[J]. Int J of Production Research, 2013, 51(9): 2571-2577.
- [8] 常俊林, 邵惠鹤. 两机零等待流水车间调度问题的启发式算法[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(8): 1147-1153.
(Chang J L, Shao H H. Heuristic algorithm for two-machine no-wait flowshop scheduling problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(8): 1147-1153.)

- [9] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 12-14.
(Wang L. Intelligent optimization algorithms with applications[M]. Beijing: Tsinghua University & Springer Press, 2001: 12-14.)
- [10] 刘金琨, 尔联洁. 多智能体技术应用综述[J]. 控制与决策, 2001, 16(2): 133-140.
(Liu J K, Er L J. Overview of application of multiagent technology[J]. Control and Decision, 2001, 16(2): 133-140.)
- [11] 于艾清, 顾幸生. 一种求解同等并行机调度的混合量子衍生进化规划算法[J]. 控制与决策, 2011, 26(10): 1473-1478.
(Yu A Q, Gu X S. Hybrid quantum-inspired evolutionary programming for identical parallel machines scheduling[J]. Control and Decision, 2011, 26(10): 1473-1478.)
- [12] 周金宏, 汪定伟, 徐洋. 软计算求解分布式多工厂多顾客的供应链准时化生产计划问题[J]. 控制与决策, 2001, 16(6): 894-897.
(Zhou J H, Wang D W, Xu Y. Soft computing for JIT production planning of supply chain of multi-location manufacturing systems[J]. Control and Decision, 2001, 16(6): 894-897.)
- [13] Zegordi S H, Nia M A B. Integrating production and transportation scheduling in a two-stage supply chain considering order assignment[J]. Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 44(9/10): 928-939.
- [14] 蒋大奎, 李波. 基于混合禁忌搜索算法的供应链排序问题[J]. 机械工程学报, 2011, 47(20): 53-59.
(Jiang D K, Li B. Supply chain scheduling based on hybrid taboo search algorithm[J]. J of Mechanical Engineering, 2011, 47(20): 53-59.)
- [15] 刘小华, 林杰. 基于遗传粒子群混合算法的供应链调度优化[J]. 控制与决策, 2011, 26(4): 501-506.
(Liu X H, Lin J. Scheduling optimization in supply chain based on GA-PSO hybrid algorithm[J]. Control and Decision, 2011, 26(4): 501-506.)
- [16] 张鹏, 林杰, 刘思伟. 基于多种群蚁群算法的大规模定制供应链调度[J]. 计算机工程, 2011, 37(7): 196-198.
(Zhang P, Lin J, Liu S W. Mass customization supply chain schedule based on multiple ant colony algorithm[J]. Computer Engineering, 2011, 37(7): 196-198.)
- [17] Azevedo A L, Toscano C, Sousa J P, et al. An advanced agent-based order planning system for dynamic networked enterprises[J]. Production Planning & Control, 2004, 15(2): 133-144.
- [18] Lau J S K, Huang G Q, Mak K L, et al. Agent-based modeling of supply chains for distributed scheduling[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2006, 36(5): 847-861.
- [19] Smith R G. The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver[J]. IEEE Trans on Computers, 1980, 29(12): 1104-1113.
- [20] Behnamian J. Decomposition based hybrid VNS-TS algorithm for distributed parallel factories scheduling with virtual corporation[J]. Computers & Operations Research, 2014, 52(B): 181-191.
- [21] Behnamian J, Fatemi Ghomi S M T F. Incorporating transportation time in multi-agent production network scheduling[J]. Int J of Computer Integrated Manufacturing, 2012, 25(12): 1111-1128.
- [22] Behnamian J. Multi-cut benders decomposition approach to collaborative scheduling[J]. Int J of Computer Integrated Manufacturing, 2014, <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2014.961963>.
- [23] Behnamian J, Fatemi Ghomi S M T. The heterogeneous multi-factory production network scheduling with adaptive communication policy and parallel machine[J]. Information Sciences, 2013, 219(1): 181-196.
- [24] Benders J F. Partitioning procedures for solving mixed variables programming problems[J]. Numerische Mathematik, 1962, 4(1): 238-252.
- [25] Brucker P. Scheduling algorithms[M]. Berlin: Springer, 2007: 107-154.
- [26] Panwalkar S S, Iskander W. A survey of scheduling rules[J]. Operations Research, 1977, 25(1): 45-61.
- [27] Atashpaz-Gargari E, Lucas C. Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition[C]. Proc of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. Singapore, 2007: 4661-4667.
- [28] Gargari E A, Hashemzadeh F, Rajabioun R, et al. Colonial competitive algorithm: A novel approach for PID controller design in MIMO distillation column process[J]. Int J of Intelligent Computing and Cybernetics, 2008, 1(3): 337-355.
- [29] Terrazas-Moreno S, Grossmann I E. A multiscale decomposition method for the optimal planning and scheduling of multi-site continuous multiproduct plants[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(19): 4307-4318.
- [30] Garcia J M, Lozano S, Canca D. Coordinated scheduling of production and delivery from multiple plants[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2004, 20(3): 191-198.
- [31] 蒋大奎, 李波. 基于禁忌搜索的并行机多工厂供应链调度[J]. 中国机械工程, 2012, 23(6): 688-693.

- (Jiang D K, Li B. Multi-plant supply chain scheduling with parallel machines based on taboo search algorithm[J]. China Machine Engineering, 2012, 23(6): 688-693.)
- [32] 钱斌, 王凌, 黄德先, 等. 动态零等待流水线调度问题的滚动策略及优化算法[J]. 控制与决策, 2009, 24(4): 481-487.
- (Qian B, Wang L, Huang D X. Rolling strategy and optimization algorithm for dynamic no-wait flow shop scheduling problem[J]. Control and Decision, 2009, 24(4): 481-487.)
- [33] Johnson S. Optimal two and three stage production schedules with set-up times included[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1954, 1(1): 61-68.
- [34] Vairaktarakis G, Elhafi M. The use of flowlines to simplify routing complexity in two-stage flowshops[J]. IIE Trans, 2000, 32(8): 687-699.
- [35] Sundararaghavan P S, Kunnathur A S, Viswanathan I. Minimizing makespan in parallel flowshops[J]. J of the Operational Research Society, 1997, 48(8): 834-842.
- [36] Al-Salem A. A heuristic to minimize makespan in proportional parallel flow shops[J]. Int J of Computing & Information Sciences, 2004, 2(2): 98-107.
- [37] Cao D, Chen M. Parallel flowshop scheduling using Tabu search[J]. Int J of Production Research, 2003, 41(13): 3059-3073.
- [38] Naderi B, Ruiz R. The distributed permutation flowshop scheduling problem[J]. Computers & Operations Research, 2010, 37(4): 754-768.
- [39] Palmer D S. Sequencing jobs through a multi-stage process in the minimum total time: A quick method of obtaining a near optimum[J]. Operational Research, 1965, 16(1): 101-107.
- [40] Campbell H G, Dudek R A, Smith M L. A heuristic algorithm for the n job, m machine sequencing problem[J]. Management Science, 1970, 16(10): B630-B637.
- [41] Nawaz M, Ensore Jr E E, Ham I. A heuristic algorithm for the m machine, n job flowshop sequencing problem[J]. Omega, 1983, 11(1): 91-95.
- [42] Gao J, Chen R. An NEH-based heuristic algorithm for distributed permutation flowshop scheduling problems[J]. Scientific Research and Essays, 2011, 6(14): 3094-3100.
- [43] Ruiz R, Naderi B. Variable neighborhood descent methods for the distributed permutation flowshop problem[C]. Multidisciplinary Int Conf on Scheduling: Theory and Applications. Dublin, 2009: 834-836.
- [44] Gao J, Chen R, Deng W, et al. Solving multi-factory flowshop problems with a novel variable neighbourhood descent algorithm[J]. J of Computational Information Systems, 2012, 8(5): 2025-2032.
- [45] Lin S W, Ying K C, Huang C Y. Minimising makespan in distributed permutation flowshops using a modified iterated greedy algorithm[J]. Int J of Production Research, 2013, 51(16): 5029-5038.
- [46] Fernandez-Viagas V, Framinan J M. A bounded-search iterated greedy algorithm for the distributed permutation flowshop scheduling problem[J]. Int J of Production Research, 2015, 53(4): 1111-1123.
- [47] Gao J, Chen R, Deng W. An efficient tabu search algorithm for the distributed permutation flowshop scheduling problem[J]. Int J of Production Research, 2013, 51(3): 641-651.
- [48] Liu H, Gao L. A discrete electromagnetism-like mechanism algorithm for solving distributed permutation flowshop scheduling problem[C]. Proc of the Int Conf on Manufacturing Automation. Hong Kong, 2010: 156-163.
- [49] Wang S Y, Wang L, Liu M, et al. An effective estimation of distribution algorithm for solving the distributed permutation flow-shop scheduling problem[J]. Int J of Production Economics, 2013, 145(1): 387-396.
- [50] Xu Y, Wang L, Wang S, et al. An effective hybrid immune algorithm for solving the distributed permutation flow-shop scheduling problem[J]. Engineering Optimization, 2014, 46(9): 1269-1283.
- [51] Wang X, Gao L, Zhang C, et al. A multi-objective genetic algorithm based on immune and entropy principle for flexible job-shop scheduling problem[J]. Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 51(5): 757-767.
- [52] Deng J, Wang L, Wang S Y. A competitive memetic algorithm for the distributed flow shop scheduling problem[C]. Proc of the 2014 IEEE Int Conf on Automation Science and Engineering. Taipei, 2014: 107-112.
- [53] Gao J, Chen R, Liu Y. A knowledge-based genetic algorithm for permutation flowshop scheduling problems with multiple factories[J]. Int J of Advancements in Computing Technology, 2012, 4(7): 121-129.
- [54] Naderi B, Ruiz R. A scatter search algorithm for the distributed permutation flowshop scheduling problem[J]. European J of Operational Research, 2014, 239(2): 323-334.
- [55] 王凌, 郑大钟. 基于遗传算法的 Job Shop 调度研究进展[J]. 控制与决策, 2001, 16(11): 641-646.
- (Wang L, Zheng D Z. Advances in job shop scheduling based on genetic algorithm[J]. Control and Decision, 2001, 16(11): 641-646.)

- [56] Naderi B, Azab A. Modeling and heuristics for scheduling of distributed job shops[J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(17): 7754-7763.
- [57] Jia H Z, Fuh J Y H, Nee A Y C, et al. Web-based multi-functional scheduling system for a distributed manufacturing environment[J]. *Concurrent Engineering*, 2002, 10(1): 27-39.
- [58] Jia H Z, Nee A Y C, Fuh J Y H, et al. A modified genetic algorithm for distributed scheduling problems[J]. *J of Intelligent Manufacturing*, 2003, 14(3/4): 351-362.
- [59] Jia H Z, Fuh J Y H, Nee A Y C, et al. Integration of genetic algorithm and gantt chart for job shop scheduling in distributed manufacturing systems[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2007, 53(2): 313-320.
- [60] Chan F T S, Chung S H, Chan P L Y. An adaptive genetic algorithm with dominated genes for distributed scheduling problems[J]. *Expert Systems with Applications*, 2005, 29(2): 364-371.
- [61] Wang Y H, Yan L X, Zhu H Y, et al. A genetic algorithm for solving dynamic scheduling problems in distributed manufacturing systems[C]. *Proc of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Dalian, 2006: 7343-7347.
- [62] Lou P, Ong S K, Nee A Y C. Agent-based distributed scheduling for virtual job shops[J]. *Int J of Production Research*, 2010, 48(13): 3889-3910.
- [63] Lim M K, Tan K, Leung S C H. Using a multi-agent system to optimise resource utilisation in multi-site manufacturing facilities[J]. *Int J of Production Research*, 2013, 51(9): 2620-2638.
- [64] 苏平, 于兆勤. 基于混合遗传算法的混合装配线排序问题研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(5): 1001-1007.
(Su P, Yu Z Q. Hybrid genetic algorithm for sequencing problems in mixed model assembly line[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2008, 14(5): 1001-1007.)
- [65] Hatami S, Ruiz R, Andrés-Romano C. The distributed assembly permutation flowshop scheduling problem[J]. *Int J of Production Research*, 2013, 51(17): 5292-5308.
- [66] Framinan J M, Leisten R. An efficient constructive heuristic for flowtime minimisation in permutation flow shops[J]. *Omega*, 2003, 31(4): 311-317.
- [67] Xiong F L, Xing K Y. Meta-heuristics for the distributed two-stage assembly scheduling problem with bi-criteria of makespan and mean completion time[J]. *Int J of Production Research*, 2014, 52(9): 2743-2766.
- [68] Xiong F L, Xing K Y, Wang F, et al. Minimizing the total completion time in a distributed two stage assembly system with setup times[J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 47(1): 92-105.
- [69] 单汨源, 蔡自兴, 高阳. 一种多级分布式制造系统的多智能体协同生产机制[J]. *控制与决策*, 2001, 16(4): 410-414.
(Shan M Y, Cai Z X, Gao Y. The synergic production mechanism based on multi-agent for a multi-stage distributed manufacturing system[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(4): 410-414.)
- [70] Chen W L, Huang C Y, Lai Y C. Multi-tier and multi-site collaborative production: Illustrated by a case example of TFT-LCD manufacturing[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 57(1): 61-72.
- [71] Jain A K, Elmaraghy H A. Production scheduling/rescheduling in flexible manufacturing[J]. *Int J of Production Research*, 1997, 35(1): 281-309.
- [72] Ziaee M. A heuristic algorithm for the distributed and flexible job-shop scheduling problem[J]. *J of Supercomputing*, 2014, 67(1): 69-83.
- [73] Moon C, Kim J, Hur S. Integrated process planning and scheduling with minimizing total tardiness in multi-plants supply chain[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2002, 43(1): 331-349.
- [74] Moon C, Seo Y. Evolutionary algorithm for advanced process planning and scheduling in a multi-plant[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2005, 48(2): 311-325.
- [75] Chan F T S, Chung S H, Chan P L Y. Application of genetic algorithms with dominant genes in a distributed scheduling problem in flexible manufacturing systems[J]. *Int J of Production Research*, 2006, 44(3): 523-543.
- [76] Chan F T S, Chung S H, Chan L Y, et al. Solving distributed FMS scheduling problems subject to maintenance: Genetic algorithms approach[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2006, 22(5): 493-504.
- [77] Chung S H, Chan F T S, Chan H K. A modified genetic algorithm approach for scheduling of perfect maintenance in distributed production scheduling[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, 22(7): 1005-1014.
- [78] Yadollahi M, Rahmani A M. Solving distributed flexible manufacturing systems scheduling problems subject to maintenance: Memetic algorithms approach[C]. *Proc of the 9th IEEE Int Conf on Computer and Information Technology*. Xiamen, 2009: 36-41.

- [79] Chung S H, Lau H C W, Choy K L, et al. Application of genetic approach for advanced planning in multi-factory environment[J]. *Int J of Production Economics*, 2010, 127(2): 300-308.
- [80] Zhang H, Gen M. Effective genetic approach for optimizing advanced planning and scheduling in flexible manufacturing system[C]. *Proc of the 8th Annual Conf on Genetic and Evolutionary Computation*. Seattle, 2006: 1841-1848.
- [81] Chan F T S, Prakash A, Ma H L, et al. A hybrid tabu sample-sort simulated annealing approach for solving distributed scheduling problem[J]. *Int J of Production Research*, 2013, 51(9): 2602-2619.
- [82] Thompson D R, Bilbro G L. Sample-sort simulated annealing[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2005, 35(3): 625-632.
- [83] De Giovanni L, Pezzella F. An improved genetic algorithm for the distributed and flexible job-shop scheduling problem[J]. *European J of Operational Research*, 2010, 200(2): 395-408.
- [84] Gascon A, Lefrancois P, Cloutier L. Computer-assisted multi-item, multi-machine and multi-site scheduling in a hardwood flooring factory[J]. *Computers in Industry*, 1998, 36(3): 231-244.
- [85] 赵广社, 韩崇昭, 王立琦, 等. 分布式砼生产输送浇筑在线生产调度系统[J]. *信息与控制*, 2002, 31(2): 166-170. (Zhao G S, Han C Z, Wang L Q, et al. Distributive production supervision and scheduling system for concrete making and pouring process[J]. *Information and Control*, 2002, 31(2): 166-170.)
- [86] Naso D, Surico M. Multi-objective evolutionary scheduling of distributed supply networks[C]. *Proc of the 16th IFAC World Congress*. Czech, 2005, 16(1): 1483-1488.
- [87] Naso D, Surico M, Turchiano B, et al. Genetic algorithms for supply-chain scheduling: A case study in the distribution of ready-mixed concrete[J]. *European J of Operational Research*, 2007, 177(3): 2069-2099.
- [88] Naso D, Surico M, Turchiano B. Scheduling production and distribution of rapidly perishable materials with hybrid GA's[C]. *Evolutionary scheduling*. Berlin: Springer, 2007: 465-483.
- [89] Yamaba H, Kaneizumi S, Tomita S. Network-based support system for decentralized scheduling of distributed production systems through man-machine collaboration[C]. *Proc of the IEEE Int Conf on Industrial Informatics*. Singapore, 2006: 1285-1290.
- [90] Yamaba H, Matsumoto S, Tomita S. An attempt to obtain scheduling rules of network-based support system for decentralized scheduling of distributed production systems[C]. *Proc of the 6th IEEE Int Conf on Industrial Informatics*. Daejeon, 2008: 506-511.
- [91] Lee C K, Shen Y A, Yang T, et al. An effective two-phase approach in solving a practical multi-site order scheduling problem[J]. *J of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 2011, 28(7): 543-552.
- [92] Chen Y Y. The order fulfillment planning problem considering multi-site order allocation and single-site shop floor scheduling[J]. *J of Intelligent Manufacturing*, 2014, 25(3): 441-458.
- [93] Zhao H, Liu G W, Xu J, et al. Agent-oriented distributed scheduling systems based on DCOM: An application to flexible scheduling systems[C]. *Proc of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Hangzhou, 2004: 2980-2984.
- [94] Liu X B, Bo H G, Ma Y, et al. A new approach for planning and scheduling problems in hybrid distributed manufacturing execution system[C]. *Proc of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Dalian, 2006: 7357-7361.
- [95] Guo Z X, Ngai E W T, Yang C, et al. An RFID-based intelligent decision support system architecture for production monitoring and scheduling in a distributed manufacturing environment[J]. *Int J of Production Economics*, 2015, 159: 16-28.
- [96] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [97] Attanasio A, Ghiani G, Grandinetti L, et al. Auction algorithms for decentralized parallel machine scheduling[J]. *Parallel Computing*, 2006, 32(9): 701-709.

(责任编辑: 李君玲)