

绿色车间调度优化研究进展

王凌[†], 王晶晶, 吴楚格

(清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要: 当今社会环境问题日益严重, 绿色制造的研究备受关注. 作为现代化制造模式, 绿色制造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, 实现经济指标和绿色指标的协同优化. 绿色车间调度是绿色制造的重要环节, 比传统调度问题的求解难度更高, 更具学术研究意义和工程应用价值. 绿色车间调度通过资源分配、操作排序和运作模式的合理优化, 实现增效、节能、减排、降耗. 为此, 分析绿色车间调度问题的复杂性和相应的处理机制, 介绍绿色车间调度在问题、方法、应用层面的代表性研究进展, 进而指出各层面有待进一步研究的若干方向和内容, 以促进智能制造与绿色制造的研究与发展.

关键词: 绿色车间调度; 优化; 节能; 低碳

中图分类号: TP18

文献标志码: A

Advances in green shop scheduling and optimization

WANG Ling[†], WANG Jing-jing, WU Chu-ge

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Nowadays, the environmental issue gets increasingly serious, and the research of green manufacturing attracts much attention. As a modern manufacturing model, green manufacturing aims to guarantee the quality and function of products, reduce the manufacturing cost, raise the manufacturing profit, and at the same time to decrease environmental pollution and energy waste, so as to achieve the simultaneous optimization of economic and green indexes. Green shop scheduling is an important element in green manufacturing with academic significance and engineering value, which is more difficult to be solved than the classic shop scheduling problems. Via the reasonable optimization of resource allocation, operation sequence and execution pattern, profit rising, energy saving, discharge decreasing and consumption reducing can be achieved. The complexities of the green shop scheduling problems and the related handling schemes are analyzed, and the typical advances in terms of problem, method and application are reviewed, and some further research directions and contents in each aspect are pointed out to promote the research and development of the intelligent manufacturing and green manufacturing.

Keywords: green shop scheduling; optimization; energy saving; low-carbon

0 引言

绿色可持续发展是解决人与自然和谐共生的一种重要理念. 作为绿色可持续发展的具体体现, 绿色制造是实现现代化生产的一种制造模式. 绿色制造需要综合考虑环境影响和资源效益, 以同时保证企业的经济效益和社会效益^[1-2]. 针对全球日益严重的环境问题, 绿色制造业已成为制造模式的趋势. 同时, 法律法规对企业的绿色化生产要求也越来越高. 绿色制造不仅强调经济指标, 减少产品制造成本, 提高生产效益和市场竞争能力, 同时强调降低对环境的影响,

提升企业的社会形象^[3]. 绿色制造涉及产品及其生产的全过程, 譬如节约原材料、降低能源消耗、循环利用废弃物、产品重设计、减少污染排放等.

中国正处在工业化与现代化的快速发展过程中, 温室气体排放量也在迅速增长^[4-5]. 《中国制造 2025》明确提出, 全面推行绿色制造, 实施绿色制造工程, 并将之列入九大战略任务和五大重大工程^[6]. 作为制造系统的重要环节, 生产调度直接影响企业效益和竞争力^[7]. 绿色车间调度问题 (GSSP) 是面向绿色制造的车间调度问题, 高效的优化调度方法能够有效改善经

收稿日期: 2017-03-06; 修回日期: 2017-06-21.

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (61525304); 国家重点研发计划项目 (2016YFB0901901).

责任编辑: 王伟.

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; 王晶晶 (1995—), 女, 硕士生, 从事绿色智能调度的研究.

[†]通讯作者. E-mail: wangling@tsinghua.edu.cn

经济效益,实现节能、减排、降耗、降成本,减少对环境的影响,取得经济指标和绿色指标的协同优化.绿色车间调度比传统调度更复杂,求解难度更大,研究也更具有现实意义和应用价值.

除了传统车间调度的复杂性,绿色指标的引入使得GSSP增加了如下复杂性:

1) 绿色指标的定义.资源消耗与环境影响相关的指标较多,主要包括能耗、水耗、碳排放量、有毒物质和废弃物的排放等.不同工厂的生产环境有异,复杂多样,绿色指标的确定要有针对性、现实性与可操作性.

2) 绿色指标的计算.绿色指标通常涉及资源消耗和废弃物排放,与生产过程、环境和时间相关,并具有不确定性,难以建立数学模型,难以进行快速评价计算.

3) 多目标性.绿色制造需兼顾经济指标和绿色指标,其中经济指标包括工件工期、拖期、加工成本等,绿色指标包括如能耗、碳排放等.这些指标通常相互冲突,需合理权衡.因此,绿色调度必然是多目标优化(multi-objective optimization)问题.当涉及目标数量很多时,属于高维多目标优化(many-objective optimization)问题,求解难度更大.

类似于传统调度方法的研究,GSSP的求解算法主要包括数学规划算法、启发式算法和智能优化算法3大类.数学规划算法在理论上能保证获得最优解,但对问题的建模要求很高,同时受时间复杂度和空间复杂度的限制仅适用于小规模问题;启发式算法基于调度规则构造解,能够保证解的可行性与产生过程的快速性,但质量难以保证全局意义上的满意性;智能优化算法根据问题的特性设计特征模型和邻域结构,通过迭代型搜索和智能优化的处理手段高效获得满意解,譬如群体搜索、全局采样、劣化替代、禁忌冗余、知识驱动等.

本质上,GSSP属于多目标优化问题.在多目标处理方面,主要手段是将其转换为单目标问题求解,或者采用Pareto支配的关系搜索目标空间中的Pareto前沿.前者需要对每个目标设置合适的偏好,并且每次运行只能获得一个解.后者需要采用外部档案集存储并不断更新搜索过程中获得的非劣解,同时需要支配比较、分层排序等复杂度较大的运算,但通常可获得问题的一组解.近些年,目标分解的思想和做法也得到了尝试.对于一些特殊的GSSP,有些目标只需满足约束,有些目标则需重点优化,因此可将约束优化、双层优化的思想加以推广应用,降低问题的求解

复杂性.

本文分别从问题、方法和应用层面,对绿色车间调度的代表性研究给予综述与评论,并指出有待进一步研究的若干内容,为绿色调度的研究提供参考,并促进智能制造与绿色制造的研究与发展.

1 绿色车间调度的问题研究

绿色制造综合考虑经济、资源、环境影响等因素,涉及产品的整个生命周期,包括设计、制造、包装、运输、使用、报废处理和再制造等,旨在实现经济与社会的协调发展^[2].绿色调度必须反映现代制造的可持续发展策略,不仅要做到制造过程的智能化,而且要做到产品的整个生命周期的绿色化^[8-9].

绿色车间调度是绿色制造的重要环节,通过资源分配、操作排序和运作模式的合理优化,实现增效、节能、减排、降耗,提高经济效益,同时实现制造过程的绿色化^[10].典型的车间调度问题包括单机调度、批处理调度、流水车间调度、作业车间调度、柔性车间调度、并行机调度、可重入调度、分布式调度等,通常只考虑经济指标.绿色车间调度问题是传统车间调度的扩展,需协同考虑绿色生产指标和经济指标的车间调度问题,主要包括最小化对资源的消耗、最小化对环境的影响.通常,除资金消耗外,资源消耗主要包括电耗、水耗、气的消耗、煤炭消耗、原材料消耗等;环境影响主要包括温室气体排放、有毒化学物排放、废弃物排放等.

在绿色车间调度问题方面,研究者针对不同问题分别给出了相应的模型和多种指标的计算方式,代表性的研究如下:Adekola等^[11]和Capón-García等^[12]分别研究了丙烯酸纤维生产的批处理问题,考虑加热与冷却操作涉及的热集成和水回用,经济指标包括最大化利润和生产力,绿色指标包括最小化原材料消耗、废弃物、耗电量和耗水量.针对流水线调度问题,Fang等^[13]同时考虑最大完工时间(makespan)、峰值负荷(peak load)和碳足迹(carbon footprint)的最小化,对于钢板生产中的两机流水线问题讨论了问题的复杂性,并扩展到其他环境指标,如耗水量、排气量、噪音、能耗等.针对柔性作业车间调度问题,Zhang等^[14]同时考虑最大完工时间、最大相邻工件的完工时间间隔、最大机器负载和总碳排放量的最小化,其中总碳排放包括4方面因素,即机器运行能耗,冷却剂和润滑油等辅助材料导致的碳排放,切削等机器工具磨损导致的碳排放和运输过程的碳排放.针对柔性流水车间调度,Bruzzzone等^[15]将节能调度(EAS)和先进计划调度(APS)相结合研究,调度指标是最小化

最大完工时间和总加权拖期(TWT),同时将峰值能耗(PPC)作为调度的约束条件;Dai等^[16]同时考虑最大完工时间和总能耗两个指标,采用多目标算法进行优化求解.针对并行机调度问题,Li等^[17]考虑不同机器磨损程度导致加工产生耗能和污染物量的不同,以能耗和污染物处理所需费用为约束条件,优化抢占式和非抢占式问题的最大完工时间以及非抢占式问题的流经时间.针对分时电价下的不相关并行机调度问题,Ding等^[18]以产品总完工时间不超过截止时间为约束,优化生产过程的总电耗.针对作业车间调度问题,Zhang等^[19]同时考虑了加权拖期和总能耗两个指标的优化求解.

通常,机器的能耗将转换为热,从而导致机器的磨损和可靠性的降低.许多机器可有多种工作模式,在优化绿色指标时,除了对加工策略的调整,还可通过机器工作模式的切换实现节能^[20-25],譬如调整运行速度.作为节能策略中运用最广的技术之一,省电机制(power-down mechanism)通过机器在不同状态下的能耗对比,将机器设置在能够完成制造过程的低能耗状态.针对柔性流水线调度问题,Dai等^[16]将on-off策略用于权衡最大完工时间和总能耗,但仅适用于特定机器.文献[21-22]介绍了动态能耗调整算法,包括两状态机器与多状态机器的离线和在线调整^[23].离线算法主要通过机器空转能耗与其他状态所需能耗的比较来判断是否需要调整,在线算法则主要根据不同的概率模型进行判断.文献[26]假设加工速度越快时加工时间越短、能耗越大,进而给出了调速策略和部分理论分析.考虑总能耗、最高温度、最大能耗和最大速度的优化,文献[27]提出了一种在线调速算法,并通过理论分析说明其算法相对其他在线和离线算法的优越性.另外,Luo等^[28]研究了考虑机器耗电量的混合流水线调度问题,Fang等^[29]研究了加工速度可连续调整的流水线调度问题.

鉴于绿色车间调度问题层面的研究现状,面向复杂生产与工艺过程的绿色指标与建模研究还较少,并且现有研究大多针对确定性、静态的调度过程,问题层面的研究尚有待丰富与扩充.

2 绿色车间调度的方法研究

绿色车间调度问题的求解方法主要包括数学规划算法、启发式算法和智能优化算法.由于需同时考虑经济指标和绿色指标,在此介绍绿色车间调度的主要求解算法和多目标处理方法.

在数学规划算法方面,首要的工作是建立问题的数学模型.由于绿色指标涉及工厂环境、企业需求等

复杂因素,目标函数和许多约束条件往往存在非线性. Adekola等^[11]针对不同复杂性的批处理问题,建立了以利润和生产率为经济指标以及以原材料消耗、废弃物、耗电与耗水量为绿色指标的混合整数非线性规划模型,进而利用CPLEX和CONOPT求解.针对批处理调度过程, Capón-García等^[12]考虑类似的经济指标和绿色指标,建立混合整数非线性模型,并采用丙烯酸纤维生产问题加以验证. Fang等^[13]同时考虑最大完工时间、机器最大负荷和碳足迹的最小化,建立了多目标混合整数线性规划模型. Mansouri等^[30]考虑以最大完工时间和总能耗(TEC)为指标的两机流水线调度问题,通过机器调速改变能耗,提出了混合整数线性多目标优化模型. Ding等^[31]将两机问题扩展到多机流水线调度问题.李玉霞等^[32]针对作业车间多设备、多任务柔性加工的特点,将其划分为设备选择和作业顺序规划两个阶段,建立了二阶低碳优化调度模型,以实现碳排放效率优化.

在启发式算法方面, Che等^[33]在分时电价背景下针对单机调度问题提出了若干性质和贪婪插入规则(GIH),将工件按能耗比例降序排列,并依次插入到使电费最小的时间窗口内,进而最小化总电费. Li等^[17]考虑最小化最大完工时间的抢占式并行机调度问题,将能耗和污染物的处理费用作为约束,给出了一种多项式算法,进而对非抢占式问题提出了基于最长加工时间(LPT)规则的启发式算法,同时针对最小化流经时间的非抢占式问题提出了基于最小加工时间(SPT)规则的启发式算法.针对多机置换流水线调度问题, Ding等^[31]提出了多目标 Nawaz-Enscore-Ham(NEH)规则和改进的多目标迭代贪婪(IG)规则,同时根据问题的特性给出了在特定搜索过程中两个目标相互影响的性质,进而提出了带节能策略的扩展NEH规则,以获取更好的Pareto解集.

鉴于绿色车间调度问题的复杂性,智能优化算法能在合理的时间内获得满意的调度,近些年已成为主要的求解途径.文献[14]针对4种类型的机器碳排放的评价模型,基于NSGAI^[34]和邻域搜索提出了混合非支配排序遗传算法,并利用测试集验证了模型的适用性和算法的有效性. Bruzzone等^[15]提出了调整工件序列的邻域搜索算法,在降低峰值能耗的同时优化最大完工时间和拖期的加权总和. Dai等^[16]建立了基于节能机制的数学模型,提出了改进的遗传模拟退火算法,在单目标化处理的基础上通过变权重的方法获得Pareto解集. 杨海东等^[35]提出了一种基于差分遗传算法优化流水车间的能效,通过任务

的能耗差分确定个体的进化方向和进化强度. 针对作业车间调度问题, May等^[36]结合NSGAI和SPEA-II^[37]提出了一种多目标遗传算法, 通过若干机器状态调整策略权衡经济指标和能耗指标. 针对柔性作业车间调度问题, 蒋增强等^[38]基于设备状态-能耗曲线的低碳策略, 提出了优化能耗、最大完工时间和成本的调度模型, 并设计了基于血缘变异的改进NSGAI, 以避免算法早熟收敛. 针对有限缓冲区流水线问题, Masmoudi等^[39]将生产过程划分为若干时间周期, 各周期内能耗均不得超过设定值且能耗费用不相同, 进而提出了一种fix-and-relax规则并利用遗传算法最小化总能耗费用. 针对最小化最大完工时间和能耗的混合流水线问题, Du等^[40]利用带偏好向量的蚁群算法(preference vector ant colony system, PVACS)搜索可行工件序列, 利用列表调度规则(list scheduling, LS)进行解码, 通过设置偏好向量搜索重点区域. Liu等^[41]在求解批处理混合流水线问题时, 提出了一种自适应多目标遗传算法, 同时优化总加权拖期、总碳排放和最大能耗, 算法采用NSGAI得到初始Pareto前沿, 进而通过对各目标权重的搜索和分配逐步改善Pareto前沿. Ding等^[18]针对分时电价的特点, 提出了列生成算法(CG), 同时优化最大完工时间和总电耗. Zhang等^[19]提出了有效的局部搜索操作, 并将其嵌入遗传算法, 进而利用非支配排序方法得到Pareto解集. Mouzon等^[24]搜集了4个数控机床的操作数据, 通过数据挖掘表明了非关键机器闲置时会有大量能耗, 非关键机器的关闭和运行规则直接影响能耗, 进而提出了相应的调度规则并嵌入贪婪随机自适应搜索算法(GRAS), 有效优化单机问题的总拖期和总能耗^[25]. 针对以最小化最大完工时间和碳排放为指标的多资源约束项目调度问题, Zheng等^[42]提出了一种基于Pareto支配的分布估计算法(EDA), 性能优于NSGAI. 最近, Deng等^[43]针对分布式置换流水线问题, 提出了一种多目标竞争混合算法, 算法将目标空间划分为3个区域, 处于不同区域的个体执行不同的操作来改善不同的指标, 同时随着群体进化和个体分布的变化自适应调整区域范围.

鉴于绿色车间调度方法层面的研究现状, 基于群智能与知识驱动的高效算法研究还较少, 尤其是通过问题特性的分析设计多种搜索操作和指导性搜索策略, 通过多操作、多策略、多目标等多层面的协作提出协同搜索模式, 进而实现经济指标与绿色指标的协同优化.

3 绿色车间调度的应用研究

目前, 绿色制造是许多国家关注的热点问题, 在学术研究的同时不断推动着实际应用, 而且, 从传统制造业扩展到电力、物流、云计算等领域. 限于篇幅, 在此仅介绍部分应用研究.

Artigues等^[44]从实际工厂实践中抽象出能源调度问题(EnSP), 提出了两阶段带能耗约束的整数规划模型, 通过资源约束处理技术有效缩小搜索空间, 并利用基于支配规则的树搜索获取优良解. 针对化学药品的批处理调度问题, Grau等^[45]提出了任务时间的优化方法, 对于丙烯酸纤维制造过程可减少13.2%的能耗并缩短1.36%的最大完工时间. 针对土耳其某陶瓷墙和铺地砖的生产过程, Özdamar等^[46]运用层次分析法将问题分解为两个子问题, 首先综合考虑产品类型和数量以满足生产需求, 进而将综合解决方案分解为批量与调度, 其中调度方案由启发式算法产生, 可将能耗和库存相关成本减少9.5%. 针对齿轮加工调度问题, He等^[47]以最小化最大完工时间和能耗为目标, 以最小化废弃物等绿色指标为约束, 通过优化调度每加工7个工件即可节省1.88度电.

针对石油化工生产调度问题^[48], Seid等^[49]建立了考虑能耗的模型, 通过优化调度使得蒸汽和冷却水的使用量分别减少83%和80.9%, 同时收益可提高20%. 针对中国大型设备制造企业中大尺寸精密带钢轧制设备、带钢加工设备、大尺寸铸造与锻造件的生产调度问题, Liu等^[50]采用NSGAI同时优化完工时间和碳排放, 实现了在减少37.3%的碳排放的同时缩短9.1%的完工时间. 针对齿轮加工车间调度问题, 齐晓宁等^[51]建立了以最大完工时间和最小电能消耗为目标、以产品质量和环境影响为约束的调度模型, 并采用变权重遗传算法进行了优化求解.

针对云计算环境下的虚拟机资源调度管理问题, Beloglazov等^[52]提出考虑能耗的资源分配启发式算法, 有效减少了云计算数据中心的能耗和碳排放. 针对云数据中心虚拟机的能耗优化问题, Beloglazov等^[53]提出了最优在线确定性算法, 并通过对基于虚拟机资源使用的历史数据分析, 提出了用于虚拟机动态整合的自适应启发式算法, 基于上千台虚拟机的工作负载轨迹仿真, 表明了算法可确保遵守服务协议水平并显著减少能耗. 针对接送机场服务中的车次分配调度问题, 杨培颖等^[54]建立了最小碳排放量的混合整数规划模型, 给出了改进的基于时间和地域划分的极线扫描算法, 并分别从顾客点位置分布、顾客规模以及车辆容量、满意度水平分析了对碳排放的影

响. 针对铁路网络时刻表调度问题, Bärman 等^[55]建立了混合整数规划模型, 通过优化有效减少了能源费用. 针对电力系统的经济负荷分配问题, 苏鹏等^[56]建立了以系统有功网损最小和机组发电耗煤量最小为目标的多元目标负荷分配模型, 利用基于 Pareto 最优的多元目标粒子群算法进行优化求解, 并通过混沌寻优机制和聚类分析策略改善算法的收敛性和所得解的分散性, 通过对 IEEE57-bus 系统的仿真表明了满足系统安全约束的同时可有效降低系统网损和机组煤耗.

鉴于绿色车间调度应用层面的研究现状, 绿色调度优化已在一些制造与服务系统中得到了成功应用, 但在工业生产、交通运输、通讯、建筑等领域的绿色调度应用研究仍有待推广, 尤其对于有重大节能、减排、降耗需求的流程工业.

4 结论与展望

纵观研究现状, 绿色车间调度已成为制造系统的研究热点, 但尚不成熟, 有待深入与发展.

1) 问题层面.

GSSP 的现有研究大多针对传统车间调度问题, 譬如单机、并行机、流水线等, 工艺过程相对简单. 面向冶金、钢铁、石化、半导体、物流、能源互联网等领域的复杂绿色调度问题尚有待拓展, 譬如考虑多处理机、多资源约束、有限或零等待、零空闲、有限缓冲区、能力提升或退化、协同制造等复杂约束. 同时, 考虑机器故障、市场变化、概率分布、模糊数、区间数等不确定因素, 研究在线调度、重调度、不确定调度, 意义重大.

除了考虑机器运行导致的能耗和碳排放问题, 产品设计、制造、包装、运输、报废与再制造等环节的绿色调度问题均值得重视. 另外, 资源消耗、废弃物和温室气体排放等指标的计算, 调度过程与指标间的关系, 值得深入研究重视.

2) 算法层面.

由于需同时考虑经济指标和绿色指标, GSSP 必然是多元目标优化决策问题. 求解算法在决策变量空间要具有高效的搜索能力, 同时在目标空间要具有良好的均衡或协同优化能力. 在算法的理论方面, 需重视求解 GSSP 的多元目标优化算法的复杂性、有效性、参数灵敏性分析, 尤其是基于 Pareto 支配的方法、基于目标分解的策略、基于约束满足的技术、层次分析法、逼近理想解排序技术.

对于 GSSP, 性能指标的计算复杂费时. 研究指标的快速计算方法, 有助于提升算法的整体效率, 进而

在同等时间内可获取更优良的调度方案. 基于代理模型的评价与模型管理、基于特征分析的估计与比较、数据驱动的预测建模与评估、不确定环境下的性能比较等都有待深入研究. 在求解算法方面, 将新型智能优化算法在 GSSP 上加以推广值得重视, 尤其是基于学习机制的群智能算法和基于智能体的分布式优化算法. 同时, 算法设计必须问题驱动. 通过问题特性的分析, 剖析问题求解复杂性的瓶颈, 提炼求解问题的性质、规则与知识, 提出领域知识驱动的智能算法.

3) 应用层面.

虽然 GSSP 已成为生产调度领域的研究热点, 但实际应用领域还很有限, 一些先进的理论成果尚未在实际系统得到验证和应用. 通过对实际问题的深刻理解, 有助于更全面考虑实际因素, 建立更实用的模型. 通过分析问题的特性, 有助于设计更有效的算法. 通过系统设计与集成, 有助于学术成果的实际应用. 同时, 典型绿色车间调度问题是许多实际问题的一般化模型, 相关研究成果在许多领域值得应用推广. 另外, 要注重计划调度与其他模块的一体化运作, 譬如供应链、控制系统等, 进而实现生产过程的全流程优化.

总之, 在全球关注智能制造和绿色制造背景下, 绿色调度优化的研究意义重大, 充满前景.

参考文献(References)

- [1] Melnyk S A, Smith R T. Green manufacturing[M]. SME Blue Book, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, 1996: 1-7.
- [2] 刘飞, 张华, 岳红辉. 绿色制造——现代制造业的可持续发展模式[J]. 中国机械工程, 1998, 9(6): 76-78.
(Liu F, Zhang H, Yue H H. Green manufacturing—The sustainable development model of modern manufacturing industries[J]. China Mechanical Engineering, 1998, 9(6): 76-78.)
- [3] Rusinko C. Green manufacturing: An evaluation of environmentally sustainable manufacturing practices and their impact on competitive outcomes[J]. IEEE Trans on Engineering Management, 2007, 54(3): 445-454.
- [4] Jiang B, Sun Z Q, Liu M Q. China's energy development strategy under the low-carbon economy[J]. Energy, 2010, 35(11): 4257-4264.
- [5] Liu Z, Guan D, Wei W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. Nature, 2015, 524(7565): 335-338.
- [6] 中国工程院战略咨询中心. 绿色制造[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 2-5.
(Strategy Consulting Centre of Chinese Academy of Engineering. Green manufacturing[M]. Beijing:

- Publishing House of Electronics Industry, 2016: 2-5.)
- [7] 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 Press, 2003: 1-2.)
- [8] Srivastava S K. Green supplychain management: A state-of-the-art literature review[J]. *Int J of Management Reviews*, 2007, 9(1): 53-80.
- [9] Abdelaziz E A, Saidur R, Mekhilef S. A review on energy saving strategies in industrial sector[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1): 150-168.
- [10] Gahm C, Denz F, Dirr M, et al. Energy-efficient scheduling in manufacturing companies: A review and research framework[J]. *European J of Operational Research*, 2016, 248(3): 744-757.
- [11] Adekola O, Stamp J D, Majozi T, et al. Unified approach for the optimization of energy and water in multipurpose batch plants using a flexible scheduling framework[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(25): 8488-8506.
- [12] Capón-García E, Bojarski A D, Espuna A, et al. Multiobjective optimization of multiproduct batch plants scheduling under environmental and economic concerns[J]. *AIChE J*, 2011, 57(10): 2766-2782.
- [13] Fang K, Uhan N, Zhao F, et al. A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction[J]. *J of Manufacturing Systems*, 2011, 30(4): 234-240.
- [14] Zhang C, Gu P, Jiang P. Low-carbon scheduling and estimating for a flexible job shop based on carbon footprint and carbon efficiency of multi-job processing[J]. *Proc of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: J of Engineering Manufacture*, 2015, 229(2): 328-342.
- [15] Bruzzone A A G, Anghinolfi D, Paolucci M, et al. Energy-aware scheduling for improving manufacturing process sustainability: A mathematical model for flexible flow shops[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2012, 61(1): 459-462.
- [16] Dai M, Tang D, Giret A, et al. Energy-efficient scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(5): 418-429.
- [17] Li K, Zhang X, Leung J Y T, et al. Parallel machine scheduling problems in green manufacturing industry[J]. *J of Manufacturing Systems*, 2016, 38: 98-106.
- [18] Ding J Y, Song S, Zhang R, et al. Parallel machine scheduling under time-of-use electricity prices: New models and optimization approaches[J]. *IEEE Trans on Automation Science and Engineering*, 2016, 13(2): 1138-1154.
- [19] Zhang R, Chiong R. Solving the energy-efficient job shop scheduling problem: A multi-objective genetic algorithm with enhanced local search for minimizing the total weighted tardiness and total energy consumption[J]. *J of Cleaner Production*, 2016, 112(4): 3361-3375.
- [20] Albers S. Energy-efficient algorithms[J]. *Communications of the ACM*, 2010, 53(5): 86-96.
- [21] Benini L, Bogliolo A, De Micheli G. A survey of design techniques for system-level dynamic power management[J]. *IEEE Trans on Very Large Scale Integration Systems*, 2000, 8(3): 299-316.
- [22] Irani S, Singh G, Shukla S K, et al. An overview of the competitive and adversarial approaches to designing dynamic power management strategies[J]. *IEEE Trans on Very Large Scale Integration Systems*, 2005, 13(12): 1349-1361.
- [23] Sleator D D, Tarjan R E. Amortized efficiency of list update and paging rules[J]. *Communications of the ACM*, 1985, 28(2): 202-208.
- [24] Mouzon G, Yildirim M B, Twomey J. Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment[J]. *Int J of Production Research*, 2007, 45(18/19): 4247-4271.
- [25] Mouzon G, Yildirim M B. A framework to minimise total energy consumption and total tardiness on a single machine[J]. *Int J of Sustainable Engineering*, 2008, 1(2): 105-116.
- [26] Yao F, Demers A, Shenker S. A scheduling model for reduced CPU energy[C]. *The 36th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*. New York: IEEE, 1995: 374-382.
- [27] Bansal N, Kimbrel T, Pruhs K. Speed scaling to manage energy and temperature[J]. *J of the ACM*, 2007, 54(1): 1-39.
- [28] Luo H, Du B, Huang G Q, et al. Hybrid flow shop scheduling considering machine electricity consumption cost[J]. *Int J of Production Economics*, 2013, 146(2): 423-439.
- [29] Fang K, Uhan N A, Zhao F, et al. Flow shop scheduling with peak power consumption constraints[J]. *Annals of Operations Research*, 2013, 206(1): 115-145.
- [30] Mansouri S A, Aktas E, Besikci U. Green scheduling of a two-machine flowshop: Trade-off between makespan and energy consumption[J]. *European J of Operational Research*, 2016, 248(3): 772-788.
- [31] Ding J Y, Song S, Wu C. Carbon-efficient scheduling of flow shops by multi-objective optimization[J]. *European J of Operational Research*, 2016, 248(3): 758-771.
- [32] 李玉霞, 曹华军, 李洪丞, 等. 作业车间碳排放动态特性及二阶优化调度模型[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(10): 2687-2693.
(Li Y X, Cao H J, Li H C, et al. Carbon emissions dynamic characteristic and two stage optimization scheduling model for job shop[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(10): 2687-2693.)
- [33] Che A, Zeng Y, Lyu K. An efficient greedy insertion heuristic for energy-conscious single machine scheduling problem under time-of-use electricity tariffs[J]. *J of Cleaner Production*, 2016, 129: 565-577.

- [34] 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.
- [35] 杨海东, 郑庆仁, 刘国胜, 等. 基于差分遗传算法的置换流水车间低碳调度模型[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2013, 44(11): 4554-4560.
(Yang H D, Zheng Q R, Liu G S, et al. Low-carbon scheduling in permutation flow shop problem by differential genetic algorithm[J]. *J of Central South University: Science and Technology*, 2013, 44(11): 4554-4560.)
- [36] May G, Stahl B, Taisch M, et al. Multi-objective genetic algorithm for energy-efficient job shop scheduling[J]. *Int J of Production Research*, 2015, 53(23): 7071-7089.
- [37] Zitzler E, Laumanns M, Thiele L. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm[R]. Zurich: Computer Engineering and Communication Networks Lab, Swiss Federal Institute of Technology, 2001: 1-21.
- [38] 蒋增强, 左乐. 低碳策略下的多目标柔性作业车间调度[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(4): 1023-1031.
(Jiang Z Q, Zuo L. Study on multi-objective flexible job-shop scheduling problem based on low-carbon strategy[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(4): 1023-1031.)
- [39] Masmoudi O, Yalaoui A, Ouazene Y, et al. Solving a capacitated flow-shop problem with minimizing total energy costs[J]. *Int J of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(9): 2655-2667.
- [40] Du B, Chen H, Huang G Q, et al. Preference vector ant colony system for minimising make-span and energy consumption in a hybrid flow shop[C]. *Multi-objective Evolutionary Optimisation for Product Design and Manufacturing*. London: Springer, 2011: 279-304.
- [41] Liu C H, Huang D H. Reduction of power consumption and carbon footprints by applying multi-objective optimisation via genetic algorithms[J]. *Int J of Production Research*, 2014, 52(2): 337-352.
- [42] Zheng H, Wang L. Reduction of carbon emissions and project makespan by a Pareto-based estimation of distribution algorithm[J]. *Int J of Production Economics*, 2015, 164: 421-432.
- [43] Deng J, Wang L, Wu C, et al. A competitive memetic algorithm for carbon-efficient scheduling of distributed flow-shop[C]. *Int Conf on Intelligent Computing*. Berlin: Springer, 2016: 476-488.
- [44] Artigues C, Lopez P, Hait A. The energy scheduling problem: Industrial case-study and constraint propagation techniques[J]. *Int J of Production Economics*, 2013, 143(1): 13-23.
- [45] Grau R, Graells M, Corominas J, et al. Global strategy for energy and waste analysis in scheduling and planning of multiproduct batch chemical processes[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1996, 20(6): 853-868.
- [46] Özdamar L, Birbil S I. A hierarchical planning system for energy intensive production environments[J]. *Int J of Production Economics*, 1999, 58(2): 115-129.
- [47] He Y, Liu F. Methods for integrating energy consumption and environmental impact considerations into the production operation of machining processes[J]. *Chinese J of Mechanical Engineering*, 2010, 23(4): 428-435.
- [48] Kallrath J. Planning and scheduling in the process industry[J]. *OR Spectrum*, 2002, 24(3): 219-250.
- [49] Seid E R, Majozi T. Heat integration in multipurpose batch plants using a robust scheduling framework[J]. *Energy*, 2014, 71: 302-320.
- [50] Liu C G, Yang J, Lian J, et al. Sustainable performance oriented operational decision-making of single machine systems with deterministic product arrival time[J]. *J of Cleaner Production*, 2014, 85: 318-330.
- [51] 齐晓宁, 汪永超, 贾婧, 等. 基于遗传算法的面向绿色制造的车间调度优化[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2012, 10(10): 16-18.
(Qi X N, Wang Y C, Jia J, et al. The scheduling of machine for green manufacturing based on genetic algorithm[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2012, 10(10): 16-18.)
- [52] Beloglazov A, Abawajy J, Buyya R. Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for cloud computing[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2012, 28(5): 755-768.
- [53] Beloglazov A, Buyya R. Optimal online deterministic algorithms and adaptive heuristics for energy and performance efficient dynamic consolidation of virtual machines in cloud data centers[J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2012, 24(13): 1397-1420.
- [54] 杨培颖, 唐加福, 于洋, 等. 面向最小碳排放量的接送机场服务的车辆路径与调度[J]. *自动化学报*, 2013, 39(4): 424-432.
(Yang P Y, Tang J F, Yu Y, et al. Minimizing carbon emissions for vehicle routing and scheduling in picking up and delivering customers to airport service[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(4): 424-432.)
- [55] Bärmann A, Martin A, Schneider O. Optimal balancing of the power consumption of trains in a railway network via timetabling[C]. *Conf on Advanced Systems in Public Transport*. Rotterdam, 2015: 1-16.
- [56] 苏鹏, 刘天琪, 赵国波, 等. 基于改进粒子群算法的节能调度下多目标负荷最优分配[J]. *电网技术*, 2009, 33(5): 48-53.
(Su P, Liu T Q, Zhao G B, et al. An improved particle swarm optimization based multi-objective load dispatch under energy conservation dispatching[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(5): 48-53.)

(责任编辑: 曹洪武)