

文章编号: 1001-0920(2001)0S-0641-06

基于遗传算法的 Job Shop 调度研究进展

王 凌, 郑大钟

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘 要: Job Shop 是典型的调度问题, 遗传算法一直是计算智能的主要研究对象, 因此基于遗传算法的 Job Shop 研究在学术界和工程界受到极大的关注。对近年来这方面的研究情况进行了较全面的综述, 其中涉及编码、算法改进和比较、特征分析、混合算法、拓宽性、实际应用和调度器开发等, 并讨论了进一步研究的若干方向。

关键词: 遗传算法; Job Shop; 调度; 优化

中图分类号: TP 29 **文献标识码:** A

Advances in Job Shop Scheduling Based on Genetic Algorithm

WANG Ling, ZHENG Da-zhong

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

Abstract: Job shop is a class of typical scheduling problem, while genetic algorithm is one major object of computational intelligence. The study on genetic algorithm based job shop scheduling has been paid much attention both in academic and engineering fields. A comprehensive survey on such issue is presented, including encoding, improvement, comparison, property analysis, generalization, real application and scheduler development. Some further research directions are discussed.

Key words: genetic algorithm; job shop; scheduling; optimization

1 引 言

Job Shop (JSP) 是一类典型的生产调度问题^[1,2], 具有很强的工程背景, 许多实际工程问题均可与之相转化。典型的 JSP 通常可描述为: n 个工件在 m 台机器上加工, 各工件在各机器上的操作时间已知, 事先给定各工件在各机器上的加工次序(即技术约束条件), 要求确定与技术约束条件相容的各机器上所有工件的加工次序, 使某些加工性能指标达到最优。近年来, 随着先进制造技术的发展, JSP 的含义有所拓展, 增加了随机性、动态性、不确定性、约

束性、多目标等, 与实际生产更为接近。JSP 属于 NP-Complete 类^[1], 因此开发求解 JSP 的有效算法一直是调度和优化领域的重要课题。迄今, 研究 JSP 的方法包括传统运筹学方法、启发式规则、DEDS 方法、人工智能、仿真方法、神经网络、模糊理论、Lagrangian 松弛法、Meta-heuristic (如模拟退火 SA、遗传算法 GA、禁忌搜索 TS、蚁群系统) 和混合算法等^[3-5]。

遗传算法是基于“优胜劣汰、适者生存”的一种高度并行、随机和自适应优化算法。它将问题的求解表示成染色体的适者生存过程, 通过染色体群的一

收稿日期: 2001-04-10; 修回日期: 2001-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(60074012); 973 基础研究项目(G1998020310)

作者简介: 王凌(1972—), 男, 江苏武进人, 博士, 从事智能优化方法理论及应用研究; 郑大钟(1935—), 男, 浙江绍兴人, 教授, 博士生导师, 从事 HDS、DEDS 和优化调度研究。

代代不断进化,包括复制、交叉和变异等操作,最终收敛到“最适应环境”的个体,从而求得问题的最优解或满意解。GA原理和操作简单,通用性强,不受限制性条件的约束,且具有隐含并行性和全局解空间搜索能力,在机器学习、模式识别、控制工程、VLSI设计等领域,尤其是在生产调度领域得到广泛的应用。如何利用GA高效求解JSP,一直被认为是一个具有挑战意义的难题并成为研究的热点,近年来涌现出大量论文并取得较大进展。因此,本文对基于GA的JSP研究进行较全面的综述,其中涉及算法编码、改进及比较、特征分析、混合算法、拓宽性、实际应用和调度器开发等,并讨论了进一步研究的若干方向。

2 针对JSP的GA编码

编码是GA实施优化的首要和关键问题。鉴于JSP的约束性,编码技术必须考虑其合法性和可行性。目前,编码研究已成为利用GA求解JSP的关键内容和瓶颈。有针对性地设计有效的编码方式并开发高效的遗传操作,无疑有助于GA搜索效率和质量的提高。JSP的编码包括直接和间接编码。直接编码将各调度排列作为状态,通过状态演化达到寻优目的;间接编码将一组工件的分配处理规则作为状态,算法优化的结果是一组最佳的分配规则序列,再由分配规则序列构造调度。JSP的编码可简要归纳为^[6]:

1) 基于操作的编码:状态由 $n \times m$ (标准长度)个代表操作的基因组成,是所有操作的一个排列。任意基因串的排列均能表示可行调度,但只具有半Lamarckian性(L特性)^[6],即GA利用遗传操作使后代继承父代优良模式的能力较弱。解码时先将状态转化为有序调度表,然后产生调度方案。

2) 基于工件的编码:状态由 n 个代表工件的基因组成,是所有工件的一个排列。任意工件的排列均能表示可行调度,且具有L性,但仅能表征部分解空间,不能保证全局最优解的存在。解码时先加工第1号工件的所有操作,然后依次以其最早允许时间加工后面各工件的所有操作。

3) 基于优先表的编码:状态由分别对应于 m 台不同机器的 m 个子串构成,长度为 n 的子串用于表示一种优先表,各符号表示相应机器上的加工操作。码长为标准长度,各状态均能表示可行调度,但不具有L性。解码时通过分析机器上当前等待队列的状

态,结合优先表决定相应的操作。

4) 基于工件对关系的编码:调度由二元矩阵表示,矩阵决定相应机器上工件对的优先关系。此编码L性较差,应用较少,码长大于标准长度,存在较大冗余,必须考虑合法性。

5) 基于优先规则的编码:状态由一个优先分配规则序列构成,优化结果是一个规则序列,然后基于此产生调度。它具有L性,码长为标准长度,能保证调度的可行性,但一般性能较差。

6) 基于析取图的编码:状态(由各边的操作顺序组成)作为优先决策,以决定同台机器上发生操作冲突时各操作的顺序。码长为标准长度,能保证调度的可行性,但只具有半L性,解码较复杂。

7) 基于完成时间的编码:利用各操作完成时间的有序表表示状态,它无需解码过程,但不具有L性,必须考虑状态的合法性,且需要设计特殊的状态转移算子。

8) 基于机器的编码:状态为所有机器的排列,并通过移动瓶颈方法构造调度。它只具有半L性,码长小于标准长度,解码较复杂,且仅能表征部分解空间,不能保证全局最优解的存在。

3 JSP和GA的特征分析

通过分析JSP的特征使其适应GA的优化过程,通过分析GA的特征使其适应JSP的特点,或是二者结合使其互相适应,所有这些研究均有助于利用GA更好地解决JSP。JSP是NP-Complete问题,并具有强关联性和强约束性。分析JSP的特征可得到指导搜索的有效启发式知识或规则,进而在结合基于知识的系统下构成知识驱动的调度系统。Jain等^[2]通过对大量典型问题的分析,基于工件和机器数的关系提出区分JSP难易的准则。纪树新等^[7]通过分析JSP的数学模型和特点,研究了基因的若干概念,并详细论述了连锁基因编码法的机理和可行性。段黎明等^[8]对基于约束分析的调度算法进行综述,其中包括一致性增强方案、变量排序启发式和值排序启发式算法,向后看方案中的主要方法,而基于修改的约束分析方法则是有待发展的方法。Wang等^[9]定量分析了JSP的不可行解的结构,并给出了JSP发生死锁的一个充分必要条件,同时对两机问题提出一个不可行解的计算公式。此外,研究调度特性(如活动调度、半活动调度、非延迟调度等)与性能指标(如makespan等正规性能指标、E/T等非正规

性能指标)的关系,有助于算法编码和操作的设计。

近年来,GA 应用于 JSP 大都局限于少数几个问题,所得结论是否具有普遍性呢? Hart 等^[10]为了深入调查 GA 求解 JSP 的优化性能,分析 GA 的优势和弱点,设计了一个可调整难度的可配置问题发生器,研究表明 GA 具有相当好的鲁棒性,即 GA 能在绝大多数情况下得到大部分问题的理想解,从而使得 GA 在实际工程领域极具吸引力。但不可否认,其前提是算法必须得到很好的设计,从而又涉及到许多 GA 的理论和实现问题的研究。此外,鉴于 GA 的自然选择和进化操作机制,若干代进化后的幸存者必然具有相似的特性。就 JSP 而言,GA 得到的优良个体在操作和排序的特征方面存在相似的联系,通过探索这种属性来构造规则将能模拟 GA 的行为性能,进而利用所构造的规则求解类似的问题。Koonce 等^[11]利用数据挖掘算法从由 GA 生成的调度集中抽取知识,从而开发一个规则集调度器来逼近 GA 的行为,求解类似问题时其性能普遍优于一般的简单分配规则。

4 Benchmark 问题和算法改进及比较

Benchmark 问题的研究有助于有效和公平地比较算法的优化性能。Muth 等提出了 3 个著名的难题^[12];Lawrence^[13]提出的一批不同规模和难度的典型问题,至今仍广泛应用并可通过互联网得到。此外,Jain 等^[2]还提出了区分问题难易的基于问题特征的准则。尽管 GA 的并行搜索在总体上把握了进化方向,但其局部搜索能力较差,容易出现早熟现象。

GA 的改进主要表现在编码、初始化、操作、结构等方面。Cheng 等^[14]综述了求解 JSP 的交叉和变异操作的设计。Dellacroce 等^[15]提出一种基于优先规则编码的 GA。Dorndorf 等^[16]用 GA 进化工件分配的优先规则序列和 SB 方法意义下的单机解序列。Shi^[17]针对基于操作的编码提出了有效的交叉方式,在保证可行性的基础上取得了较好的性能。Ombuki 等^[18]通过在遗传码中嵌入启发式的知识提出一种 gkGA 方法,使启发式规则在优化过程中同样得到优胜劣汰。Varela 等^[19]构造出一种利用概率方法提供的特定知识信息来产生初始种群的启发式方法。Wang 等^[20]提出一种简单而通用的编码方式和相应的遗传操作,并在算法中嵌入启发式规则来

改善算法质量和效率。Hajri 等^[21]提出一种受控 GA,用并行机编码,用启发式方法产生初始种群,用多交叉进行操作,基于模糊逻辑和置信函数来估计遗传操作的参数。Qi 等^[22]提出一种并行多种群的遗传算法来满足 JSP 的动态特性。

近年来,算法比较一直是一个重要的研究内容,它不仅有助于验证算法性能,而且有助于对算法的行为特点有更感性的认识,为更好地应用和改进算法提供条件。Tadei 等^[23]比较了 SB,TS,SA,GA 和 Lagrangian 松弛法等先进方法的性能。Kurbel 等^[24]将 SA,GA 和混合整数线性优化应用于 JSP,并对二者的优化和时间性能做了比较。

5 混合遗传算法

算法混合是提高 GA 搜索效率和质量的有效手段。如在 GA 中嵌入局部搜索,能改善其局部搜索能力;嵌入基于知识的启发式方法,则能将一些问题的相关信息融入到 GA 的全局搜索中,进而增强 GA 整体的搜索潜力。

王凌等^[3]较全面地讨论了混合算法的结构和设计问题,求解 JSP 的混合遗传算法主要表现在为产生初始种群的混合,为评价个体适配值的混合,为增强局部搜索能力和克服早熟收敛的混合等方面。Dagli 等^[25]针对非线性多准则目标函数的离散调度环境提出了 GA 和神经网络的混合,其中 GA 用于从一组随机可行调度搜索得到最优调度,而经训练后的神经网络则作为一个多准则评价器,通过建立由调度准则集到专家提供的评价值之间的映射模型来得到个体的适配值。Lee 等^[26]结合 GA 和一种诱导决策树的机器学习技术的互补能力,开发出一个 JSP 调度系统,这种由 GA 分配各机器上的工件和由机器学习技术释放工件到车间层的做法,对于动态调度问题是很有前景的。杨圣祥等^[27]用 GA 结合基于约束满足的自适应神经网络求解 JSP,其中 GA 用于迭代优化,当交叉和变异生成的个体为不可行解时,由自适应神经网络运算后得到可行解,从而生成新一代种群。Kolnko^[28]将小种群 SA 运行于 GA 框架,利用自适应温控和重升温以及面向时间的交叉来解决 JSP 问题。Mesghouni 等^[29]结合 GA、约束逻辑编程(CLP)和多准则决策(MCDM)来解决 JSP,其中 CLP 为 GA 提供一组包含问题约束的初始解,GA 用于得到一组优良调度,MCDM 则基于多准则从中选择最满意的调度。李小平等^[30]

提出一种定界-遗传算法,首先用一个定界算法排出一个初始加工顺序,并以其目标值为界随机产生用于GA进化的初始种群,减小了GA在低适配值种群中搜索的盲目性。Cheng等^[14]介绍了一些求解JSP的混合算法,包括自适应遗传算子、基于启发式特征的遗传算子和混合遗传算法的设计。Wu等^[31]提出了GA和成组技术的混合方法,成组技术的应用降低了问题的复杂性,JSP在一定程度上转化为Flow Shop问题。姚伟力等^[32]在求解E/T指标下的JSP时,首先用GA确定可行调度序列,然后用模糊控制器对开工时间加以调整。Wang等^[33]结合GA和SA提出一类混合优化策略,通过对Benchmark问题的研究验证了混合算法较单一算法的优越性。

6 JSP的推广和动态调度

如果JSP的研究仅局限于理想的数学模型,那么大量具有建模困难、计算复杂、存在动态性、随机性、约束性以及多目标等难点的实际调度问题仍无法得到解决。生产过程的随机性、不确定性往往要求不断进行重新调度,这不仅需要处理各种突发事件以适应各种复杂多变的加工环境,而且还应避免因追求全局优化带来的巨大计算量。因此,近年来JSP的研究延伸到更具实际意义的动态调度和更具实际特性的VLSI装配线、间歇调度等问题。

方剑等^[34]借助于预测控制中滚动优化的思想提出了周期性和事件驱动的滚动调度策略,将GA与分配规则相结合,用于处理与操作序列有关的工件安装时间和工件到期时间约束的复杂调度问题。Lee等^[35]研究了GA在批量可变的柔性流水线加工问题的应用,将工件的批量和排序同时进行优化,并与SA、TS等方法加以比较。翁妙凤^[36]针对具有路径柔性的动态JSP提出了基于进化规划、周期性和事件驱动的两类有/无窗口的重调度策略。Prins^[37]针对一类具有自由工件路径的open-shop问题,给出了几种相应的GA解决方案。

鉴于JIT技术的成功应用,基于交货期的E/T调度成为一个新的JSP研究热点。童刚等^[38]讨论了不同交货期窗口下的E/T并行机调度问题,并给出了相应的稳步遗传算法。顾黎明等^[39]研究了基于交货期要求、优先级要求和有限资源约束下JSP的自适应遗传算法。Sakawa等^[40]讨论了双目标下的具有模糊加工时间和模糊交货期的模糊JSP,并提出了结合模糊技术和GA的有效方案。此外,间歇化工

过程中的multipurpose问题作为JSP的一种扩展,它除包含JSP的组合特性外,还需确定一些受约束的连续变量,其优化过程更为复杂。将解决JSP的方法移植到该问题,显然有助于间歇化工调度的发展^[41]。

7 调度器开发及实际应用

将理论成果转化为实用技术并加以应用是十分有价值的工作。近年来,开发基于GA的仿真系统和调度器取得较大进展。Maturana等^[42]提出一种集成交货期算法、GA和生产单元仿真器的面向对象的调度系统,各模块通过交互信息完成遗传优化并同时满足时间依赖和技术约束,其中交货期算法利用工件的产品顺序和操作时间产生产品优先权,GA产生可行机器路径和调度种群并传给生产单元仿真器,后者在不同的生产组态下履行生产计划。Kim等^[43]提出了遗传增强学习(GRL)方法,把增强学习策略加入遗传编码,进而开发出基于GRL的进化调度器,并用于多种类型的调度问题。

鉴于手工建立JSP的仿真模型十分繁琐,王宇等^[44]给出一种动画仿真程序自动生成系统,用以方便地生成标准JSP的动画仿真模型程序。Cardon等^[45]将GA和Multiagent技术应用于JSP中,提出一个基于合同网协议的动态模型。Khoo等^[46]开发出一个生产系统的GA-enhanced多目标调度器原型,该原型包括一个调度模型构成的调度工具箱,系统通过接受数据库或文件的输入数据产生次优的调度方案。此外,Candido等^[47]将GA应用于一系列实际JSP问题。Hart等^[48]将GA用于一个鸡肉加工厂,研究表明对于这个具有强约束的实际问题,GA能在几分钟内有效地产生日调度。Baudet等^[49]将GA与离散事件仿真模型相结合,用于处理不连续精细化工厂的短期调度。

8 进一步研究的几个方向

JSP是生产调度领域的典型代表,GA则是智能优化技术的代表,因而基于GA的JSP研究具有重要的理论意义和工程价值。通过本文对编码、特征分析、算法改进及比较、混合算法、问题推广、调度器开发及实际应用等有关研究的介绍,该问题的重要性和关注程度可见一斑。然而,大量的工作还有待进一步深入和完善。

首先,“Why do metaheuristics work as well as

they do? ”至今仍是有关 GA 等 metaheuristics 的一个重要的开放性理论问题^[50]。结合研究 JSP 的特性及其局部极小拓扑结构与 GA 遗传算子的特性分析和结构设计, 有助于更好地利用 GA 解决 JSP 问题, 而这方面的研究目前还很少, 对于具有很强工程背景的 JSP 这个代表性问题, 这无疑是一个重要的研究方向。同时, 进一步开展 GA 的理论研究, 如编码、参数选取、操作设计、收敛速度估计、算法比较等, 并利用数据挖掘、智能体等先进技术进行分析和研究, 能使我们更深入地认识 GA, 并推动其体系的发展, 拓宽其应用的领域。

其次, 将 JSP 的数学模型更加现实化, 尤其是动态调度问题, 并将已有的理论成果推广到实际工程领域, 用实践来检验技术的潜力, 这不仅能推动先进生产的发展, 而且可促使优化技术的进一步完善。同时, 鉴于生产技术人员对 GA 较为陌生, 开发相关的实用化、集成化调度平台和优化技术, 无疑具有很强的工程意义。

最后, 国际学术界对混合系统及算法日益重视, Davis^[51]对 GA 提出了“hybridize where possible”; Dimopoulos 等^[51]则认定混合算法的研究是一个新的发展趋向。因此, 混合优化策略以及相应仿真环境的开发无疑是一个值得关注的方向, 尤其是将已有各种方法的优点与 GA 有效地融合。

总之, 随着计算技术、优化技术、数学理论和计算机软硬件的发展, GA、JSP 本身及其结合的研究将更加完善, 研究与应用领域将更宽广, 理论研究将更系统化并更接近于实际, 并朝着集成化、实用化、最优化、多目标化、动态化、规模化的方向发展。

参考文献

- [1] Garey E L, Johnson D S, Sethi R. The complexity of flow shop and job-shop scheduling[J]. *Math Oper Res*, 1976, 1: 117-129.
- [2] Jain A S, Meeran S. Deterministic job-shop scheduling: Past, present and future[J]. *Eur J Oper Res*, 1999, 113(2): 390-434.
- [3] 王凌. 混合优化策略和神经网络中若干问题的研究[D]. 北京: 清华大学自动化系, 1999.
- [4] 王凌, 郑大钟. Meta-heuristic 算法研究进展[J]. *控制与决策*, 2000, 15(3): 257-262.
- [5] Davis L. *Handbook of genetic algorithm* [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [6] Cheng R W, Gen M, Tsujimura Y. A tutorial survey of job-shop scheduling problems using genetic algorithms (I): Representation[J]. *Comp Ind Eng*, 1996, 30(4): 983-997.
- [7] 纪树新, 钱积新, 孙优贤. 车间作业调度遗传算法中的编码研究[J]. *信息与控制*, 1997, 26(5): 393-400.
- [8] 段黎明, 陈进, 刘飞. 基于约束分析的 Job Shop 调度算法的综述[J]. *重庆大学学报*, 1998, 21(1): 133-138.
- [9] Wang B, Wang F, Zhang Q *et al*. Primary structural and quantitative analysis of infeasible solution to job shop scheduling problem [J]. *J Syst Sci and Syst Eng*, 2000, 9(2): 164-170.
- [10] Hart E, Ross P. A systematic investigation of GA performance on job shop scheduling problems [J]. *Lecture Notes in Comp Sci*, 2000, 1803: 277-286.
- [11] Koonce D A, Tsai S C. Using data mining to find patterns in genetic algorithm solutions to a job shop scheduling[J]. *Comp Ind Eng*, 2000, 38(3): 361-374.
- [12] Muth J F, Thompson G. *Industrial scheduling* [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1963.
- [13] Lawrence S. *Resource constrained project scheduling: An experimental investigation of heuristic scheduling techniques* [M]. Pittsburgh: Carnegie Mellon Univ, 1984.
- [14] Cheng R W, Gen M, Tsujimura Y. A tutorial survey of job-shop scheduling problems using genetic algorithms (II): Hybrid genetic search strategies [J]. *Comp Ind Eng*, 1999, 36(2): 343-364.
- [15] Dellacroce F, Tadei R, Volta G. A genetic algorithm for the job-shop problem [J]. *Comp Oper Res*, 1995, 22(1): 15-24.
- [16] Dorndorf U, Pesch E. Evolutionary based learning in a job-shop scheduling environment [J]. *Comp Oper Res*, 1995, 22(1): 25-40.
- [17] Shi G. A genetic algorithm applied to a classic job-shop scheduling problem [J]. *Int J Syst Sci*, 1997, 28(1): 25-32.
- [18] Ombuki B M, Nakamura M, Onaga K. An evolutionary scheduling scheme based on gkGA approach to the job shop scheduling problem [J]. *IEICE Trans Fund Electr Comm Comp Sci*, 1998, 81(6): 1063-1071.
- [19] Varela R, Gomez A, Vela C R *et al*. Heuristic generation of the initial population in solving job shop problems by evolutionary strategies [J]. *Lecture Notes in Comp Sci*, 1999, 1606: 690-699.
- [20] Wang W, Brunn P. An effective genetic algorithm for job shop scheduling [J]. *Proc Inst Mech Eng*, 2000, 214(4): 293-300.
- [21] Hajri S, Louane N, Hammadi S *et al*. A controlled genetic algorithm by fuzzy logic and belief functions

- for job-shop scheduling [J]. IEEE Trans Syst Man Cybern-B, 2000, 30(5): 812-818
- [22] Qi J G, Burns G R, Harrison D K. The application of parallel multipopulation genetic algorithms to dynamic job-shop scheduling [J]. Int J Adv Manuf Tec, 2000, 16(8): 609-615
- [23] Tadei R, Dellacroce F, Menga G. Advanced search techniques for the job-shop problem — A comparison [J]. Rairo-RO Oper Res, 1995, 29(2): 179-194
- [24] Kurbel K, Rohmann T. A comparison of job-shop scheduling techniques: Simulated annealing, genetic algorithms and mathematical optimization [J]. Wirtschaftsinfomatik, 1995, 37(6): 581-593
- [25] Dagli C H, Sittisathanchai S. Genetic neuro-scheduler for job-shop scheduling [J]. Comp Ind Eng, 1993, 25(1-4): 267-270
- [26] Lee C Y, Piramuthu S, Tsai Y K. Job shop scheduling with a genetic algorithm and machine learning [J]. Int J Prod Res, 1997, 35(4): 1171-1191
- [27] 杨圣祥, 汪定伟. 用遗传算法与自适应神经网络混合方法解 Job-shop 调度问题 [J]. 控制与决策, 1998, 13(S): 402-407.
- [28] Kolonko M. Some new results on simulated annealing applied to the job shop scheduling problem [J]. Eur J Oper Res, 1999, 113(1): 123-136
- [29] Mesghouni K, Pesin P, Trentesaux D *et al*. Hybrid approach to decision making for job-shop scheduling [J]. Prod Plan Control, 1999, 10(7): 690-706
- [30] 李小平, 王凤儒, 常会友. 用定界-遗传算法解 Job-shop 调度问题 [J]. 电机与控制学报, 1999, 3(2): 93-96
- [31] Wu Z M, Zhao C W. Genetic algorithm approach to job shop scheduling and its use in real-time cases [J]. Int J Comp Integ Manuf, 2000, 13(5): 422-429
- [32] 姚伟力, 杨德礼, 胡祥培. Job-shop 提前/拖期调度问题的研究 [J]. 控制与决策, 2000, 15(3): 322-324
- [33] Wang L, Zheng D Z. An effective hybrid optimization strategy for job-shop scheduling problems [J]. Comp Oper Res, 2001, 28(6): 585-596
- [34] 方剑, 席裕庚. 周期性和事件驱动的 Job Shop 滚动调度策略 [J]. 控制与决策, 1997, 12(2): 159-162
- [35] Lee I, Sikora R, Shaw M J. A genetic algorithm-based approach to flexible flow-line scheduling with variable lot sizes [J]. IEEE Trans Syst Man Cybern-B, 1997, 27(1): 36-54
- [36] 翁妙凤. 基于并行进化规划的 Job Shop 动态调度策略 [J]. 小型微型计算机系统, 2000, 21(6): 620-622
- [37] Prins C. Competitive genetic algorithms for the open-shop scheduling problem [J]. Math Meth Oper Res, 2000, 52(3): 389-411
- [38] 董刚, 李光泉, 刘宝坤. 用遗传算法解决在并行机上带有不同交货期窗口的 Job-shop 调度问题 [J]. 系统工程, 2000, 18(3): 37-42
- [39] 顾黎明, 曹丽娟, 宋文忠. 解 Job-shop 调度问题的自适应遗传方法 [J]. 控制与决策, 1998, 13(5): 589-593
- [40] Sakawa M, Kubota R. Two-objective fuzzy job shop scheduling through genetic algorithm [J]. Electr and Comm Jpn Pt III, 2001, 84(4): 60-68
- [41] 王凌, 王雄. 间歇化工过程最优化的研究进展 [J]. 清华大学学报, 2000, 40(S2): 265-269
- [42] Maturana F, Gu P, Naumann A *et al*. Object-oriented job-shop scheduling using genetic algorithms [J]. Comp Ind, 1997, 32(3): 281-294
- [43] Kim G H, Lee G S G. Genetic reinforcement learning approach to the heterogeneous machine scheduling problem [J]. IEEE Trans Robot Autom, 1998, 14(6): 879-893
- [44] 王宇, 冯允成, 韦有双. Job-shop 问题中动画仿真模型的自动生成系统 [J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(1): 80-84
- [45] Cardon A, Galinho T, Vacher J P. Genetic algorithms using multi-objectives in a multi-agent system [J]. Rob Autom Syst, 2000, 33(2-3), 179-190
- [46] Khoo L P, Lee S G, Yin X F. A prototype genetic algorithm-enhanced multi-objective scheduler for manufacturing systems [J]. Int J Adv Manuf Tec, 2000, 16(2): 131-138
- [47] Candido M A B, Khator S K, Barcia R M. A genetic algorithm based procedure for more realistic job shop scheduling problem [J]. Int J Prod Res, 1998, 36(12): 3437-3457.
- [48] Hart E, Ross P, Nelson J A D. Scheduling chicken catching — An investigation into the success of a genetic algorithm on a real-world scheduling problem [J]. Ann Oper Res, 1999, 92: 363-380
- [49] Baudet P, Azzaro P C, Pibouleau L *et al*. Coupling of a genetic algorithm and a simulation model for short-term scheduling in a discontinuous fine chemistry plant [J]. Rairo-RO Oper Res, 1999, 33(3): 299-338
- [50] Hansen P, Mladenovic N. Variable neighborhood search: Principles and applications [J]. Eur J Oper Res, 2001, 130: 449-467.
- [51] Dinopoulos C, Zalzal A M S. Recent developments in evolutionary computation for manufacturing optimization: Problems, solutions and comparisons [J]. IEEE Trans Evol Comp, 2000, 4(2): 93-113