

基于进化算法和模拟退火算法的 混合调度算法*

潘全科

(聊城大学计算机学院 聊城 252000)

朱剑英

(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘要：将进化算法与模拟退火算法相结合，提出四种有效的混合调度算法，即遗传退火算法、改进遗传算法、改进进化规划和并行模拟退火算法。两种算法搜索机制的互补增强了全局探索能力，基于关键路径的邻域函数运用提高了算法的效率。仿真结果表明：混合算法在求解质量和求解效率方面均有优势，优于国外同类研究成果；基于模拟退火的变异算子的搜索能力优于交叉算子；改进进化规划优于其他混合算法。

关键词：作业调度 进化算法 模拟退火算法 遗传算法 进化规划

中图分类号：F406

0 前言

作业车间调度问题(Job shop scheduling problem, JSSP)是许多实际问题的简化模型，是最典型、最困难的组合优化问题。近年来发展起来的进化算法(EA)和模拟退火(SA)等智能优化方法为解决这类复杂问题提供了新的思路 and 手段。然而，这些基本的局域搜索方法源于对某些自然过程的直接模拟，在求解问题时不可避免地存在着一定的缺陷。将两种算法混合使用的算法因为能发扬它们各自的优点正显出广阔的应用前景^[1]。深入地分析了 JSSP 的特征，提出了 EA 和 SA 相结合的四种种调度算法，计算结果表明，混合算法具有良好的求解性能。

1 调度模型及邻域

JSSP 可描述为加工系统中有 n 个工件和 m 台机床，每个工件均需要不重复地经历所有机床加工。工件的工艺路线和加工时间事先已知，问题是如何安排生产，使生产周期最短。

生产过程中，由连续加工的若干工序组成的持续时间最长的路径称为关键路径。关键路径上在同一台机床上加工的相邻工序组成块。

定理 1^[2]：交换块中相邻两工序的次序，得到的调度是可行调度。

设 X 、 Y 是两个可行调度，称 Y 是 X 的改进，如果通过交换 X 中同一机床上相邻两个工序的次序得到 Y ，并且 Y 的生产周期小于 X 。

定理 2^[3]：若 Y 是 X 的改进，则 Y 一定是通过下列两种方式之一得到的。

(1) 交换 X 中某个块的第一个工序和第二个工序。

(2) 交换 X 中某个块的最后一个工序和倒数第二工序。

通过上述分析，可以给出基于关键路径的邻域构造方法：若 Y 是由可行解 X 的某个块的第一工序与第二工序交换次序或最后工序与倒数第二工序交换次序得到的调度，则 Y 是 X 的邻居。所有这样得到的邻居称为 X 的邻域，显然这种邻域是非常小的。

2 算法设计

EA 是对生物进化过程的模拟，它从初始的群体出发，通过选择、复制、变异和交叉等操作，使群体进化到搜索空间中越来越好的区域。使用过程中，种群规模和进化次数都有一定限制，这就常造成早熟。SA 起源于统计物理学中对固体退火过程的模拟，它从某个起点开始在邻域内搜索，采用 Boltzmann 接受准则接受新解，用退火温度控制着求解过程向最小值方向优化。SA 的通用性强，算法易于实现，但计算时间长，效率低。鉴于 EA 和 SA 的缺陷，单一算法难以实现高效优化。如何将两者结合得到高效的混合算法是近年来的研究热点之一。结合两种算法的特点，提出了四种混合调度方法。

* 国家自然科学基金(50275078)和山东省自然科学基金(2004ZX14)资助项目。20040630 收到初稿，20041203 收到修改稿

2.1 GSA 的设计

考察 GA 的进化过程可知，GA 收敛的速度非常快，经若干代进化，多数染色体相同，复制和交叉操作不再起作用。虽然变异可引入新的结构，但由于变异的随机性和变异率小，经选择后，只有很少新个体保留下来，这时算法长期徘徊在若干旧状态上，进而造成早熟。为了克服早熟，可将 GA 与 SA 结合起来，把算法分成两个步骤：先利用 GA 的快速搜索能力得到一个较优的群体，然后用 SA 的突跳能力对整个群体进行优化。这种混合算法称为遗传退火算法(GSA)，它充分利用了 GA 和 SA 的优点，把串行搜索的 SA 转化成了并行搜索的 SA，提高了收敛到最优解的概率和速度。算法的结构如图 1 所示。图 1 中的 GA 源于参考文献[4]，4-2 选择机制既保证了优秀个体进入下一代，又维持了群体多样性。SA 中采用基于关键路径的邻域状态产生函数，提高了算法搜索效率。

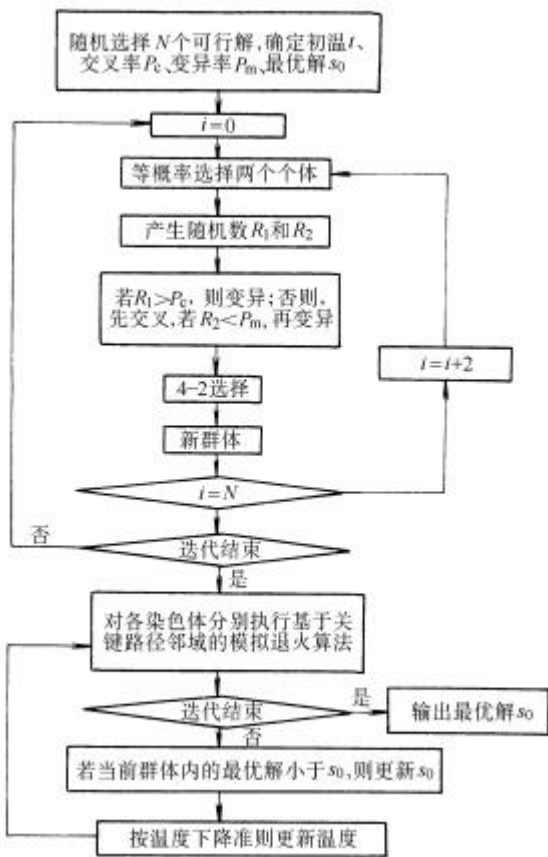


图 1 GSA 算法的结构

2.2 EGA 的设计

传统 GA 中，变异操作的随机性和变异率小是造成 GA 早熟的主要原因之一。如采用基于关键路径的 SA 代替 GA 中的变异算子，并设定变异率为 1，则得到一种改进遗传算法，简称 EGA，如图 2 所示。

算法中，交叉操作能够使后代在一定程度上继承父代的优良模式，变异操作能加强种群中个体的多样性。这些不同作用的优化操作，丰富了优化过程中的邻域结构，增强了全空间的搜索能力。

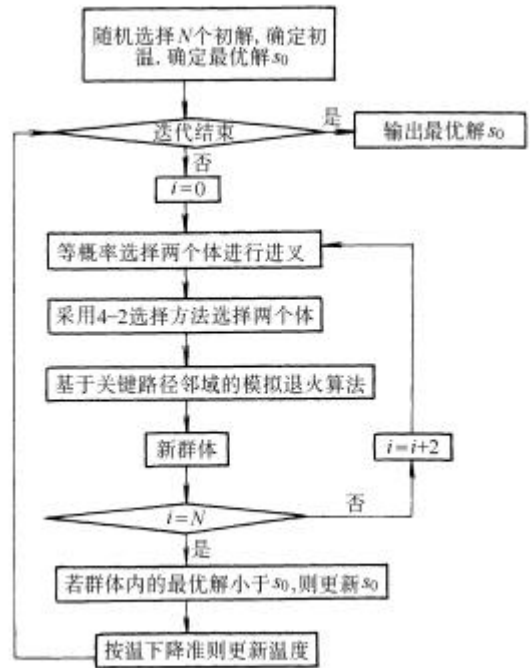


图 2 EGA 算法的结构

2.3 EEP 的设计

与 GA 不同，进化规划(EP)强调变异算子的重要性，侧重父代与子代表现行为上的联系，强调物种层的行为变化。图 3 所示是 EP 和 SA 相结合的调度算法，称为改进进化规划(EEP)。算法中采用 SA 代替 EP 的变异操作，高温下的 SA 有利于状态的全局大范围迁移，低温下的 SA 有利于状态的局部小范围内趋化性移动，从而增加了算法在解空间中的探索能力和效率。

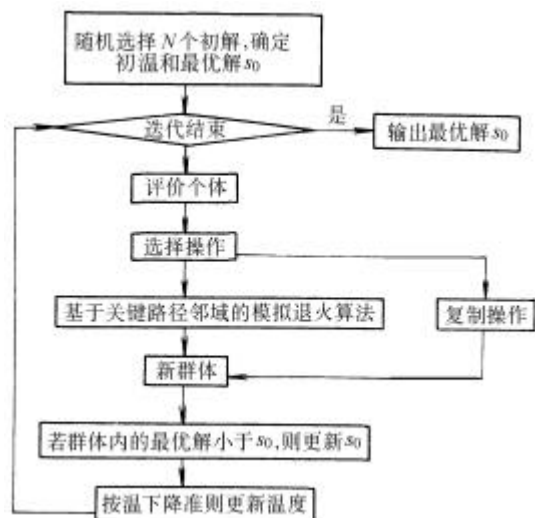


图 3 EEP 算法的结构

2.4 PSA 的设计

EA 是一种并行算法。如果用 SA 算法代替 EA 中的变异操作, 并去除选择和交叉算子, 则得到并行的模拟退火算法, 称为 PSA。这种算法的性能也较传统 GA 和 SA 有较大改善。

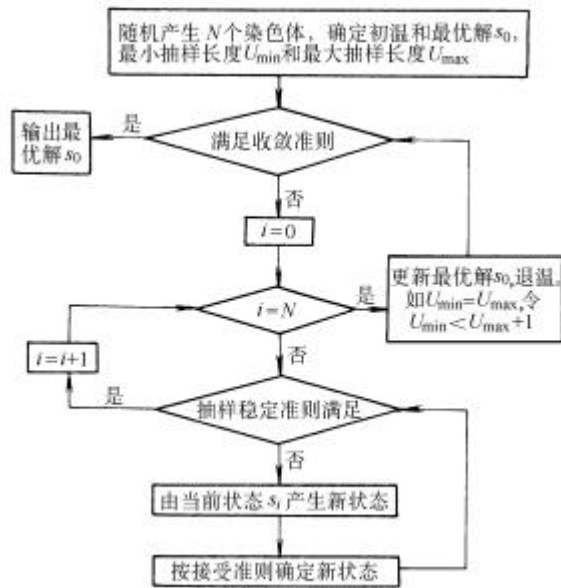


图 4 PSA 算法的结构

3 基于典型算例的仿真研究

3.1 混合算法与 GA 和 SA 的比较

以 VC++ 为开发环境, 采用 P /2.4 G、256 MB RAM 的计算机, 对 18 个不同规模的典型问题, 比较了 GSA、EGA、EEP、PSA 和 GA^[4] 及 SA 的性能。其中 GSA、EGA、EEP 和 PSA 的参数为: 种群规模为 20, $U_{\max}=2mn$, $U_{\max}=4mn$ 。GA 参数为: 交叉率为 0.7, 变异率为 0.1, 群体规模为 $5mn$, 迭代次数为 $5mn$ 。SA 参数为: $U_{\max}=mn(mn-1)/2$, $U_{\max}=mn(mn-1)$ 。每个问题随机计算 20 次。比较各算法得到的最小值和平均值相对问题最优值的偏差、方均差及平均计算时间可以得出以下结论。

(1) 四种混合算法得到的最优值和平均值优于 GA 和 SA, 而计算时间小于 GA 和 SA。说明混合算法能实现两种算法的互补, 提高求解效率和质量。

(2) EEP 得到的最优值、平均值和时间性能优于其他混合算法, 但方均差劣于其他混合算法。这说明 SA 代替 EA 的变异算子后, 变异算子起主导作用。变异算子与自然选择机制的合理配合使算法搜索能力极大地提高。但 EEP 的计算结果发散性大, 鲁棒性稍差。

(3) GSA 的最小值优于 PSA, 但平均值、方均

差和时间稍劣于 PSA。这说明对于 JSSP 这种很困难的组合优化问题, 选择一个较好的初值并不总能提高算法的性能。由于 GA 提供的一组初解往往具有某些相同特性, 个体差异度小, 不利于并行 SA 的群体搜索。因此, 如何确定 GA 的停止条件并维持群体多样性是一个值得研究的课题。

(4) EGA 的平均值偏差和平均时间性能劣于其他混合算法, 但最小值与方均差均优于 PSA 和 GSA。表明交叉适合于已知模式的探测, 变异适合于未知区域的开发, 二者是一对矛盾。为在探测与开发之间达到平衡, EGA 需要专门设计。

3.2 混合算法与若干权威文献比较

将混合算法的最优结果与 JSSP 研究的若干权威文献比较, 如表 1 所示。表 1 中的问题是研究 JSSP 的常用算例, 可以从 Internet 网站点 <ftp://mscmga.ms.ic.ac.uk/pub> 下载。表 1 中数据为各算法得到的最小生产周期。经比较可知: EEP 算法除了 LA16 得到的结果比 TS 算法稍差外, 其他问题都优于 TS (禁忌搜索) 算法; EGA 算法除了 LA21 外, 其他问题优于 TS 算法; 对所有问题, EGA 和 EEP 优于 SA 和 GA 算法。GSA 和 PSA 稍逊于 TS 算法, 但优于 SA 和 GA 算法。

表 1 混合算法与参考文献[5~7]中结果比较

典型问题	GSA	EGA	EEP	PSA	SA ^[5]	GA ^[6]	TS ^[7]
T06	55	55	55	55	55	55	55
MT10	935	930	930	935	930	946	935
MT20	1 165	1 165	1 165	1 165	1 165	1 178	1 165
LA01	666	666	666	666	666	666	666
LA06	926	926	926	926	926	926	926
LA11	1 222	1 222	1 222	1 222	1 222	1 222	1 222
LA16	946	945	946	945	956	979	945
LA21	1 057	1 057	1 048	1 059	1 063	1 097	1 048
LA26	1 218	1 218	1 218	1 218	1 218	1 231	1 218
LA31	1 784	1 784	1 784	1 784	1 784	1 784	1 784
LA36	1 278	1 278	1 276	1 281	1 293	1 305	1 278

3.3 EGA 对若干困难问题研究

对于一些很困难的典型问题, 如 LA21 和 LA36, 很多算法都没能得到最优解, 混合算法对两个问题都得了多个最优解。表 2 所示为 LA36 的一个最优解对应的机床加工工件序列。

4 结论

系统地研究了进化算法与模拟退火相结合的混合调度算法。仿真结果表明混合算法在求解质量和求解效率方面均有优势; 基于模拟退火的变异算子起主导作用; EEP 优于其他混合算法。

表 2 LA36 的一个最佳调度(生产周期 1 268 min)

机床编号	加工工件序列
0	FDKGOJEACBHILNM
1	LIBHAGKOEMFNDCJ
2	LFC AEMHIODNKJGB
3	MKAHLGJFIBCE NOD
4	HAGJKEBCDFMLNIO
5	DJIMCNLGKABEHOF
6	AIGDJOECLFBHMNK
7	KMNGJCHOB ADEILF
8	GOJEIBADHKLCFMN
9	OCNDHJAEKLBFMIG
10	OEAGKNIJMCLH BDF
11	BJOHMGEDINCLFKA
12	GKMCHOBFD ALEJNI
13	HMGIDFC KJOELNBA
14	OANKJEBFHIGMDCL

注：A~O 代表工件。

参 考 文 献

- 1 王凌, 郑大钟. Meta-heuristic 算法研究进展. 控制与决策, 2000, 15(3): 257 ~ 262
- 2 Chu C, Proth J M, Wang C. Improving job-shop schedules through critical pairwise exchanges. International Journal of Production Research, 1998, 36(3): 683 ~ 694
- 3 Nowicki E, Smutnicki C. A fast taboo search algorithm for the job shop scheduling. Management Science, 1996, 42(6): 797 ~ 813
- 4 Shi G Y. A genetic algorithm applied to a classic job-shop scheduling problem. International Journal of Systems Science, 1997, 28(1): 25 ~ 32
- 5 Laarhoven P V, Aarts E, Lenstra J K. Job shop scheduling by simulated annealing. Operations Research, 1992, 40: 113 ~ 125
- 6 Corce F D, Tadei R, Volta G. A genetic algorithm for the job shop problem. Computers and Operations Research, 1995, 22: 15 ~ 24
- 7 Amico M D, Trubian M. Applying tabu search to the job shop scheduling problems. Annual Operations Research, 1993, 40: 231 ~ 252

EFFECTIVE HYBRID PROCEDURES BASED ON EVOLUTIONARY ALGORITHMS AND SIMULATED ANNEALING ALGORITHMS FOR JOB SHOP SCHEDULING PROBLEMS

Pan Quanke

*(College of Computer Science, Liaocheng
University, Liaocheng 252059)*

Zhu Jianying

*(College of Mechanical & Electrical Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016)*

Abstract: Four effective hybrid procedures are proposed for the job shop scheduling problems by combining evolutionary algorithms (EA) with simulated annealing algorithms (SA). These are genetic-simulated annealing algorithms (GSA), enhanced genetic algorithms (EGA), enhanced evolutionary programming (EEP) and parallel simulated annealing algorithms (PSA). The cooperation of EA and SA intensify the neighborhood search and to avoid premature convergence. The neighborhood search template that employs a critical path is adopted to decrease the search area and improve the efficiency of the exploration. Numerical simulation demonstrates that within the framework of the newly designed hybrid algorithms, the NP-hard classic job-shop scheduling problem can be efficiently solved with higher quality, and that the optimization performances of hybrid procedures are superior to the algorithm reported in the literature. The simulation also indicates that the search ability of mutations based on SA is stronger than crossover operation and that the optimization power of EEP is better than other hybrid procedures.

Key words: Job shop scheduling Evolutionary algorithms
Simulated annealing algorithms
Genetic algorithms
Evolutionary programming

作者简介：潘全科，男，1971 年出生，博士，副教授。研究方向为智能优化理论和算法，发表论文 10 余篇。

E-mail: qkpan@lctu.edu.cn