

一种求解无等待流水车间调度优化的启发式算法*

孙强强¹, 高开周², 董 斌¹

(1. 滨州学院 计算机科学技术系, 山东 滨州 256603; 2. 聊城大学 计算机学院, 山东 聊城 252059)

摘要: 提出了一种新的启发式算法, 用于求解无等待流水车间调度问题的总流水时间指标。该算法命名为标准差启发, 基于著名的 NEH 启发算法。首先阐述了总流水时间指标; 其次描述了标准差启发算法的过程; 最后用标准差启发算法求解标准实验案例, 通过实验并与其他启发式算法比较, 验证了标准差启发算法在求解无等待流水车间调度问题总流水时间指标的有效性。

关键词: 无等待; 流水车间调度; 总流水时间; 标准差启发

中图分类号: TP278 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)06-2072-02

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.06.017

Heuristic for no-wait flow shop scheduling optimization

SUN Qiang-qiang¹, GAO Kai-zhou², DONG Bin¹

(1. Dept. of Computer Science & Technology, Binzhou University, Binzhou Shandong 256603, China; 2. College of Computer Science, Liaocheng University, Liaocheng Shandong 252059, China)

Abstract: This paper proposed a new heuristic algorithm, named SDH heuristic, for solving the no-wait flow shop scheduling problem with the objective to minimize total flowtime. The SDH heuristic was based on the well-known NEH heuristic. Firstly, elaborated the total flowtime. Secondly, it presented the SDH heuristic. It carried out extensive computational experiments based on a set of well-known benchmark instances at last. Computational results and comparison show the effectiveness of the SDH heuristic in solving the no-wait flow shop scheduling with total flowtime criterion.

Key words: no-wait; flow shop scheduling; total flowtime; SDH heuristic

0 引言

无等待流水车间调度问题是一种典型的调度问题, 工程应用背景很强, 广泛存在于化工^[1]、食品^[2]、陶瓷^[3]、医药加工^[4]等行业。无等待流水车间中, 每个加工工件有多个加工工序, 工件必须连续加工, 即一旦进入加工中就不能停止, 直至所有工序完成。因此, 为了满足无等待的约束条件, 工件在第一个机器上的加工时间可能被推迟。无等待流水车间调度问题的目标就是找出一个工件加工序列, 使得工件的最大完成时间或总流水时间最小。

对于无等待流水车间调度问题的复杂性, Garey 等人^[5]证明了该问题是 NP 难题。因此, 只有小规模问题可以通过确切算法在合理的时间内找到最优解。随着问题规模的增大, 计算复杂度会迅速增加, 但是启发式算法可以在合理的时间内找到问题的最优解或次优解。针对最大完成时间指标, 文献[6~8]都提出了不同的启发式算法。针对流水时间指标, Rajendran 等人^[9]提出了一种简单的结构化启发式算法, 该算法有两个优先规则; Fink 等人^[10]则组合了 NN 启发、Chins 启发和 Pilot 等简单的结构化启发。至于总流水时间指标, Chen 等人^[11]提出一种遗传算法, Taillard^[12]则提出了模拟退火和禁忌搜索的组合算法, 并通过标准案例验证。Hall 等人^[13]则撰写了无等待流水车间调度问题的综述文章。

1 总流水时间指标

无等待流水车间调度(NWFS)问题可描述为: n 个工件在 m 个机器上加工, 所有工件在各机器上的加工时间均相同。同时约定, 某一时刻一个工件只能在一台机器上加工; 一台机器在某一时刻只能加工一个工件; 同一工件在相邻两道工序之间没有等待时间。每个工件在每道工序的加工时间已知, 问题是如何安排各工件的生产次序, 使调度目标最优。NWFS 调度问题的模型如下:

令 $P(i, j)$ 为工件 i 在机器 j 上的加工时间, $\pi = \{1, \dots, i-1, i, i+1, \dots, n\}$ 为一个调度, Π 为所有调度的集合, $d_{i,i+1}$ 为任意两个工件的开工时间耽搁, 则 $d_{i,i+1}$ 的计算公式为

$$d_{i,i+1} = \max \left\{ \max_{2 \leq j \leq m} \left\{ \sum_{k=1}^j t_{i,k} - \sum_{k=1}^{j-1} t_{i+1,k} \right\}, t_{i,1} \right\} \quad (1)$$

F 是调度 π 的目标函数, 调度目标是找到调度 π^* 使公式的值最小。

$$F(\pi) = \sum_{i=1}^n L_i = \sum_{i=1}^{n-1} (n-i) d_{i,i+1} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{i,j} \quad (2)$$

2 SDH 启发式算法

NEH 启发式算法是由 Nawaz 等人^[14]提出的一种求解流

收稿日期: 2011-11-20; **修回日期:** 2011-12-30 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60874075); 山东省教育厅科研发展计划资助项目(J09LG29); 滨州学院青年人才创新基金资助项目(BZXYQNLG200809)

作者简介: 孙强强(1981-), 男, 山东潍坊人, 讲师, 硕士, 主要研究方向为模式识别、计算机应用(sunqiang6417@163.com); 高开周(1983-), 男, 山东临沂人, 讲师, 硕士, 主要研究方向为智能优化、知识工程; 董斌(1982-), 男, 山东滨州人, 讲师, 硕士, 主要研究方向为计算机应用。

水车间调度问题的有效算法。在 NEH 算法中,工件的总处理时间越高,其优先权也越高。NEH 算法分为两个阶段:

a) 工件按照总处理时间排序。

b) 将 a) 中得到序列的前两个工件排序,然后将剩下的工件逐个插入到已排序的子序列中,直到所有的工件都插入到新序列中。插入具体位置的评价标准即总处理时间最小。

NEH 算法中,更长的工件总处理时间对应更高的优先权,这是该算法高效的一个重要因素。然而在无等待流水车间中,一个工件在所有机器上处理时间的标准差对工件之间的开工时间差和总流水时间的影响是很大的。实验证明,标准差越大,总处理时间也越大。因此,本文在 NEH 算法的基础上,提出标准差启发算法(SDH),该算法的具体步骤如下:

a) 对所有工件,计算其在某个机器加工时间的标准差。

b) 将工件按照标准差非增排序,得到序列 $\pi = \{\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(i), \pi(i+1), \dots, \pi(n)\}$ 。

c) 对 π 中序列的前两个工件的两种排序方式进行评估,确定前两个工件的加工顺序,并作为新序列 π' 的前两个工序。

d) π 中下一个工件插入到 π' 中。

e) π' 中的第 $\lfloor \sqrt{k} \rfloor$ 个工件随机插入到该序列的 $\lfloor \sqrt{k} \rfloor$ 个位

置,并将总处理时间最小的子序列作为下次插入的序列。

f) 重复步骤 d) 和 e) 直到所有工件都被插入到 π' 中,算法结束。

步骤 e) 的时间复杂度是 $(\lfloor \sqrt{k} \rfloor)^2$, 显然,SDH 启发算法的时间复杂度和 NEH 算法是一样的。

3 计算结果及比较

为评价算法的性能,本文将 SDH 和 NEH 算法及 Edy^[15] 启发算法作比较,以验证 SDH 算法的有效性。程序运行环境为 VC++ . NET, 机器的处理器为双核 Genuine Intel 1.6 GHz CPU, 内存为 1 GB, 实验数据为 Taillard 标准算例,共 120 个。对每个算法及算例计算其 RPI 值如下:

$$RPI(O_i) = \frac{O_i - C^*}{C^*} \times 100 \quad (3)$$

其中: O_i 是第 i 个算法的结果, C^* 是所有比较算法中最好的结果。三种算法的 RPI 值如表 1 所示。通过比较可以看出,在相同条件下,SDH 算法比 NEH、Edy 启发算法具有更高的求解质量,而且优势明显。

表 1 NEH、Edy 和 SDH 三种启发算法的 RPI 值

Instance	NEH	Edy	SDH	Instance	NEH	Edy	SDH	Instance	NEH	Edy	SDH
tail1	8.292	2.909	0.000	tail41	5.184	0.000	2.145	tail81	4.694	0.000	0.388
tail2	3.091	0.000	2.160	tail42	4.150	0.000	1.843	tail82	5.722	0.553	0.000
tail3	1.007	0.882	0.000	tail43	6.550	6.674	0.000	tail83	8.986	4.903	0.000
tail4	2.611	1.929	0.000	tail44	5.539	3.090	0.000	tail84	5.045	2.384	0.000
tail5	3.352	2.204	0.000	tail45	5.516	0.000	0.110	tail85	9.275	2.027	0.000
tail6	3.247	1.314	0.000	tail46	4.439	0.000	1.350	tail86	5.905	1.749	0.000
tail7	7.868	4.245	0.000	tail47	4.596	0.000	0.468	tail87	5.246	2.111	0.000
tail8	8.108	5.019	0.000	tail48	5.318	0.000	0.104	tail88	3.894	2.317	0.000
tail9	4.461	0.000	2.321	tail49	4.408	1.268	0.000	tail89	14.130	9.290	0.000
tail10	0.000	0.168	0.935	tail50	4.113	0.450	0.000	tail90	7.286	2.472	0.000
tail11	5.555	1.429	0.000	tail51	2.666	0.000	0.420	tail91	7.128	2.784	0.000
tail12	0.000	0.142	0.704	tail52	3.468	1.756	0.000	tail92	7.516	3.980	0.000
tail13	6.401	0.000	0.251	tail53	2.296	1.490	0.000	tail93	8.156	4.143	0.000
tail14	5.944	0.000	2.028	tail54	7.091	3.088	0.000	tail94	16.615	9.509	0.000
tail15	3.173	0.000	2.882	tail55	10.026	9.453	0.000	tail95	11.894	9.472	0.000
tail16	4.850	1.838	0.000	tail56	0.000	0.854	0.541	tail96	7.844	5.215	0.000
tail17	4.638	0.837	0.000	tail57	2.717	1.494	0.000	tail97	10.719	5.424	0.000
tail18	13.263	4.851	0.000	tail58	10.356	5.070	0.000	tail98	8.646	3.559	0.000
tail19	6.456	2.769	0.000	tail59	5.974	2.614	0.000	tail99	7.791	1.179	0.000
tail20	1.705	0.000	0.746	tail60	8.658	6.919	0.000	tail100	11.051	5.873	0.000
tail21	1.055	0.000	5.490	tail61	13.149	9.230	0.000	tail101	7.967	3.172	0.000
tail22	5.400	4.090	0.000	tail62	8.823	7.349	0.000	tail102	10.458	6.297	0.000
tail23	1.219	0.000	0.633	tail63	5.126	3.144	0.000	tail103	9.513	4.328	0.000
tail24	0.000	2.828	5.845	tail64	11.520	9.783	0.000	tail104	7.813	2.859	0.000
tail25	1.342	0.000	0.160	tail65	11.698	5.059	0.000	tail105	8.357	4.775	0.000
tail26	1.954	0.000	2.207	tail66	7.000	1.823	0.000	tail106	8.768	3.960	0.000
tail27	1.940	0.230	0.000	tail67	9.309	5.734	0.000	tail107	10.489	5.666	0.000
tail28	5.102	0.000	2.321	tail68	16.221	15.381	0.000	tail108	5.838	0.177	0.000
tail29	3.913	1.741	0.000	tail69	9.676	7.496	0.000	tail109	5.896	3.425	0.000
tail30	2.415	2.185	0.000	tail70	9.666	7.553	0.000	tail110	12.285	6.891	0.000
tail31	5.852	0.847	0.000	tail71	4.317	1.842	0.000	tail111	12.758	8.764	0.000
tail32	10.025	2.773	0.000	tail72	8.994	3.906	0.000	tail112	9.167	5.634	0.000
tail33	4.936	4.631	0.000	tail73	8.830	1.411	0.000	tail113	12.038	6.605	0.000
tail34	11.338	6.593	0.000	tail74	6.956	3.904	0.000	tail114	9.079	5.545	0.000
tail35	5.116	4.216	0.000	tail75	6.131	3.249	0.000	tail115	9.325	4.396	0.000
tail36	9.102	8.177	0.000	tail76	4.230	0.736	0.000	tail116	7.565	2.641	0.000
tail37	6.109	4.208	0.000	tail77	8.637	4.348	0.000	tail117	10.166	5.665	0.000
tail38	5.411	0.864	0.000	tail78	8.211	3.446	0.000	tail118	9.446	4.891	0.000
tail39	7.738	3.847	0.000	tail79	7.142	4.685	0.000	tail119	12.034	6.816	0.000
tail40	8.332	2.595	0.000	tail80	9.432	6.133	0.000	tail120	8.954	4.040	0.000
mean	6.883	3.386	0.300								

4 结束语

一般衡量一个算法的优劣有两个方面,一是该算法的求解能力,二是对解的评估能力。这两个方面直接反映了一个算法求解问题的效率和性能。本文提出了一种启发式算法求解无等待流水车间调度问题的总流水时间指标,以 Taillard 标准算例作仿真,将 SDH 与 NEH、Edy 启发算法作比较。实验结果表明,在相同条件下,SDH 比 NEH 算法及 Edy 启发算法具有更高的求解质量,从而验证了 SDH 算法在求解无等待流水车间调度问题总流水时间指标的有效性。下一步工作将重点关注混合启发式算法及多目标调度复杂问题。

参考文献:

- [1] RAJENDRAN C. A no-wait flowshop scheduling heuristic to minimize makespan[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1994, 45(4): 472-478.
- [2] HALL N G, SRISKANDARAYAH C. A survey of machine scheduling problems with blocking and no-wait in process[J]. *Operations Research*, 1996, 44(3): 510-525.
- [3] GRABOWSKI J, PEMPERA J. Sequencing of jobs in some production system[J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 125(3): 535-550.
- [4] RAAJMAKERS W, HOOGEVEEN J. Scheduling multipurpose batch process industries with no-wait restrictions by simulated annealing[J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 126(1): 131-151.
- [5] GAREY M R, JOHNSON D S. *Computers and intractability, a guide to the theory of NP-completeness*[M]. New York: Freeman, 1990.
- [6] BONNEY M C, GUNDRY S W. Solutions to the constrained flow shop sequencing problem[J]. *Operational Research Quarterly*, 2000, 27(4): 869-883.
- [7] KING J R, SPACHIS A S. Heuristics for flow shop scheduling[J]. *International Journal of Production Research*, 2008, 18(3): 343-357.
- [8] GANGADHARAN R, RAJENDRAN C. Heuristic algorithms for scheduling in no-wait flow shop[J]. *International Journal of Production Economics*, 1993, 32(3): 285-290.
- [9] RAJENDRAN C, CHAUDHURI D. Heuristic algorithms for continuous flow-shop problem[J]. *Naval Research Logistics*, 1990, 37(5): 695-705.
- [10] FINK A, VOB S. Solving the continuous flow-shop scheduling problem by metaheuristics[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 151(2): 400-414.
- [11] CHEN C L, NEPPALLI R V, ALJABER N. Genetic algorithms applied to the continuous flow shop problem[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 1996, 30(4): 919-929.
- [12] TAILLARD E. Benchmarks for basic scheduling problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 1993, 64(2): 278-285.
- [13] HALL N G, SRISKANDARAYAH C. A survey of machine scheduling problems with blocking and no-wait in process[J]. *Operations Research*, 1996, 44(3): 510-525.
- [14] NAWAZ M, JR ENSCORE E E, HAM I. A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow shop sequencing problem[J]. *Omega*, 1983, 11(1): 91-95.
- [15] BERTOLISSI E. Heuristic algorithm for scheduling in the no-wait flow shop[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 1(3): 459-465.