

文章编号: 1001-0920(2008)08-0924-05

基于遗传规划的作业车间调度算法研究

张国辉, 高亮, 李培根

(华中科技大学 数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 遗传规划很少应用于解决调度问题, 对此, 研究一种进化算法——遗传规划算法在作业车间调度中的应用, 并对其做了改进. 结合 Read 线性编码和基于工序的编码设计了新的编码策略, 使编码后的个体更容易进行遗传操作, 大大提高了运算效率; 同时对交叉算子进行了改进, 以防子代中非法解的产生. 通过对作业车间调度问题标准测试集的求解, 所得结果验证了该算法求解作业车间调度问题的有效性.

关键词: 遗传规划; 作业车间调度; Read 线性编码

中图分类号: TP301

文献标识码: A

Job-shop scheduling based on genetic programming algorithm

ZHANG Guo-hui, GAO Liang, LI Pei-gen

(The State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China. Correspondent: LI Pei-gen, E-mail: pgli@mail.hust.edu.cn)

Abstract: Genetic programming (GP) is rarely applied to scheduling problems. Therefore, the improved GP algorithm is proposed and applied to solve the job-shop scheduling problems (JSP). The read linear coding and the operation-based representation are combined to design new coding method, which makes the coded individuals be processed more easily and improves the efficiency of the calculation. The crossover operation is improved to avoid the appearance of invalid schedule. Finally, the effectiveness of the improved GP to solve the JSP is verified through the benchmark test.

Key words: Genetic programming; Job-shop scheduling; Read linear code

1 引言

随着市场竞争的加剧, 制造业逐渐向多品种、小批量的生产方式发展. 企业的生产作业计划与调度问题也越来越复杂, 对制造过程的合理调度, 可有效提高资源的利用率和生产的效率. 作业车间调度 (JSP) 是典型的 NP-hard 问题, 也是最困难的约束组合优化问题之一.

遗传规划 (GP, 也称为遗传编程) 是由美国斯坦福大学 Koza^[1-3] 博士提出的, 是利用达尔文生物进化思想设计的一种进化算法, 与遗传算法在进化结构上有类似之处. 从本质上讲, 遗传规划是一种搜索寻优的非解析算法, 它的搜索是一种有指导的自适应搜索, 效率很高, 在工程上得到了成功的应用, 如优化控制、寻求博弈策略和进化自发行等.

GP 很少应用于解决调度问题, 文献 [4] 应用 GP 仅解决了单机鲁棒性调度问题. 本文改进了传

统的遗传规划算法, 并研究其在作业车间调度问题中的应用. 首先利用 Read 线性编码, 使得复杂的树型操作变成字符串操作, 提高了程序运行效率, 然后将变长染色体交叉后变成定长染色体, 可防止非法解的产生; 最后对标准问题进行测试, 实验结果与传统简单 GA 的比较表明, 利用遗传规划解决作业车间调度问题是可行且有效的.

2 遗传规划算法

遗传规划仿效生物进化的思想, 随机产生初始种群, 种群中的每个个体采用层次的结构化语言进行表达, 计算每个个体的适应值, 依据优胜劣汰的原则, 经过复制、交叉、变异等遗传操作, 使问题经过多次迭代逐渐逼近最优解或近似最优解^[5]. 由于采用类似于计算机程序的结构化语言来表达可行解, 产生的染色体长度动态可变, 能够很好地解决邻域搜索问题, 加快搜索速度.

收稿日期: 2007-05-14; 修回日期: 2007-08-21.

基金项目: 国家 863 计划项目 (2006AA04Z131).

作者简介: 张国辉 (1980—), 男, 河南新乡人, 博士生, 从事进化计算和车间调度的研究; 李培根 (1948—), 男, 武汉人, 教授, 博士生导师, 从事智能制造等研究.

2.1 函数集和终止符集

遗传规划主要采用结构层次可变的形式来表达可行解. 表达式主要由函数集和终止符集两类组成. 函数集表示对数值如何处理, 而终止符集则表示终端值.

函数集 F 包含 N_f 个函数, 即

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_{N_f}\}, \quad (1)$$

其中 $1 \leq i \leq N_f$.

函数集内的函数 f_i 可以是算术运算符 (如 +, -, × 等), 标准数学函数 (如 sin, cos, exp, log 等), 布尔运算符 (如 and, or, not 等) 和迭代函数 (如 do-while 等). 其中 F 中还可能出现算子“%”, 它表示保护性除法, 除以 0 将产生 0 结果而不会出错. 函数集必须满足闭合性和充分性.

终止符集 T 包含 N_t 个终止符, 即

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_{N_t}\}, \quad (2)$$

其中 $1 \leq i \leq N_t$.

终止符集内的终止符 t_i 可以是常量, 也可以是变量. 如图 1 中的 $x, y, 2$ 等就是终止符.

遗传规划一般采用二叉树来表达一个个体, 如图 1 所示二叉树中的非终端节点为函数集 F 中的元素, 而其终端节点 (也称为叶子) 为终止符集 T 中的元素. 图 1 表示的函数为 $f(x, y) = 2 - x/y + y^2$.

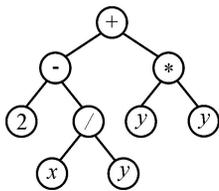


图 1 遗传规划个体表示

2.2 遗传算子

遗传规划与标准的遗传算法一样, 主要有复制、交叉和变异 3 个遗传算子, 但由于其树型结构, 它的交叉和变异操作又不同于标准遗传算子.

2.2.1 复制

复制操作的目的是把当前群体中适应度较高的个体按照某种规则遗传到下一代群体中. 一般而言, 个体的适应度越高, 被选择复制的机会就越大. 适应度的选择方法主要有轮赌盘选择法、随机遍历抽样法、局部选择法和锦标赛选择法等. 轮赌盘选择法是最基本也是最常用的选择方法.

2.2.2 交叉

交叉操作的目的是增加群体中的新个体, 从而扩大群体的搜索空间. 交叉时, 每个父代个体随机选择一个交换点, 于是便产生一个以交换点为根的子树, 该子树包括交换点以下的所有子树, 此子树称为交换段. 有时一个交换段是一片叶子. 将第 1 个父代

个体删除其交换段后, 再把第 2 个父代个体的交换段插入其交换点处, 这样就产生了第 1 个子代个体, 同样操作可产生第 2 个子代个体.

2.2.3 变异

变异的目的是维持群体的多样性, 但是遗传规划中变异算子是次要算子. 因为一个个体由函数集和终止符集组成, 所以变异也分函数变异和终止符变异两种形式.

3 基于 GP 的作业车间调度算法

传统 GP 算法主要是针对树结构的操作, 对资源的消耗比较严重. 结合作业车间调度问题的特点, 它将无法直接应用, 必须对编码策略的设计有所改进. 另外, 将传统 GP 算法的交叉直接应用于作业车间调度问题时会产生非法解, 本文对交叉作了改进, 以防止非法解的产生.

3.1 作业车间调度问题描述

作业车间调度可描述为集合 $\{J, M, Op, T\}$ (其中: J 代表工件, M 代表机器, Op 代表工序, T 代表工件的加工时间), 即如何将工件的工序按照合理的顺序分配到机器上, 以达到目标函数的要求. 而且问题应满足下列假设条件^[6]:

- 1) 每个工件使用每台机器不多于 1 次;
- 2) 每个工件利用每台机器的顺序可以不同;
- 3) 任何工件没有抢先加工的优先权, 服从任何生产顺序;
- 4) 工件一旦加工, 加工过程中没有新工件加入, 并且不能临时取消工件的加工.

目标函数是在所有工件 J 排序后产生的序列集合 $\{S_1, S_2, \dots, S_s, \dots, S_n\}$ 中, 依据不同的目标值, 选出一个符合的排序序列 S_s , 使目标函数值最小, 即

$$f(S) = \min(S_1, S_2, \dots, S_s, \dots, S_n), \quad (3)$$

其中 S_s 代表生成的多种排序方案.

本文采用最小化最大完工时间为目标函数, 即

$$f(S) = \min\{\max_{1 \leq k \leq m} C_k\}. \quad (4)$$

其中: m 为机器数, C_k 为机器 k 上的完工时间.

3.2 编码策略

编码策略的设计在进化算法对搜索解空间和解码运算时的效率影响非常大. 考虑到作业车间调度问题的组合特性和工艺约束特性, 其调度解的编码不但复杂而且多样, 解空间巨大, 而传统的遗传规划所有遗传操作又是针对树结构进行的, 树的构造要通过指针和递归算法来实现, 这势必会进一步增加算法的复杂度和延长算法的执行时间. 为提高编码和运算的效率, 本文采用 Read 线性编码^[7]和基于工序的编码相结合的编码策略进行编码设计.

Read 线性编码是用一组非负整数组成的向量

(a_1, a_2, \dots, a_p) (其中 p 为节点数) 按照一定的规则对树 $T = T(V, E)$ (其中 V 是顶点, E 是边) 进行编码, 以便于编程. 图 2 显示了树 (a) 的 Read 线性编码过程. 图 2(a) 为初始树; 图 2(b) 对每一个顶点根据节点值进行赋值; 图 2(c) 在树根处显示该树的 Read 编码向量, 它代表整个树, 即一个染色体.

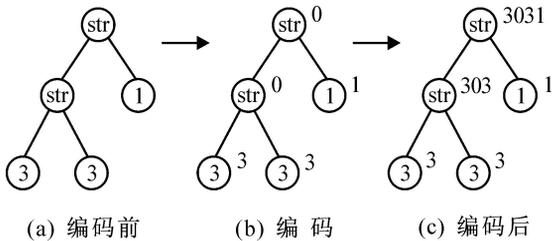


图 2 Read 线性编码过程

采用基于工序编码方式进行编码, 一个染色体表达一种调度方案; 每个染色体由所有工件的工序排序构成, 其中包含 $n \times m$ (n 为工件数, m 为机器数) 个基因, 每个基因代表一个工序; 同一工件的所有工序采用同一工件号表示; 工件号出现的顺序表示该工件工序间的先后加工顺序, 即对染色体从左到右进行编译, 对于第 j 次出现的工件号, 表示该工件的第 j 道工序, 并且工件号的出现次数等于该工件的工序数.

本文对上述两种编码方式进行结合, 确定遗传规划算法的函数集和终止符集: 函数集为一个连接函数“str”将终止符进行连接; 终止符集为从 1 到 m 的十进制整数, 每个整数出现的次数为 m 次, m 为机器数. 以图 3(a) 为例, 对二叉树结构表示的一个个体, 先利用 Read 线性编码, 变成 [302001020301]; 然后将“0”去掉, 剩下的 [321231] 就是基于工序编码的染色体, 生成可行解.

3.3 改进的交叉

利用 Read 线性编码后, 虽然方便了遗传操作, 提高了程序运算的效率, 但交叉后的子代可能为非法解. 为防止非法解的产生, 对交叉后的染色体作了改进. 如图 3 所示, 以 3 个工件 2 台机器为例进行交叉操作. 图 3 中第 1 层为选择出的父代, 最下面一层为交叉后的子代, 中间是交叉过程. 具体步骤如下:

- 1) 分别对两个父代个体产生两个随机交叉点, 如图 3(a) 和 3(b) 中虚线所示. 其中图下面为利用 Read 线性编码转换后的染色体数组.
- 2) 对产生的两个随机交叉点进行交叉, 产生两个新的子代树, 如图 3(c) 和 3(d) 所示.
- 3) 对 2) 中新产生的两个子代染色体进行检查, 若超过染色体长度 (染色体长度为 $n \times m$), 则舍弃掉超过的部分, 如图 3(c) 所示; 而对不够染色体长度的染色体, 补充一个合理的随机数, 如图 3(d)

所示.

4) 本文采用基于工序的编码, 对经过 3) 操作后的染色体进行各工件出现次数的统计. 超过机器数的, 将其重新随机生成一个合理的数, 直到两个染色体中各工件出现的次数等于机器数, 生成两个新的合法个体, 如图 3(e) 和 3(f).

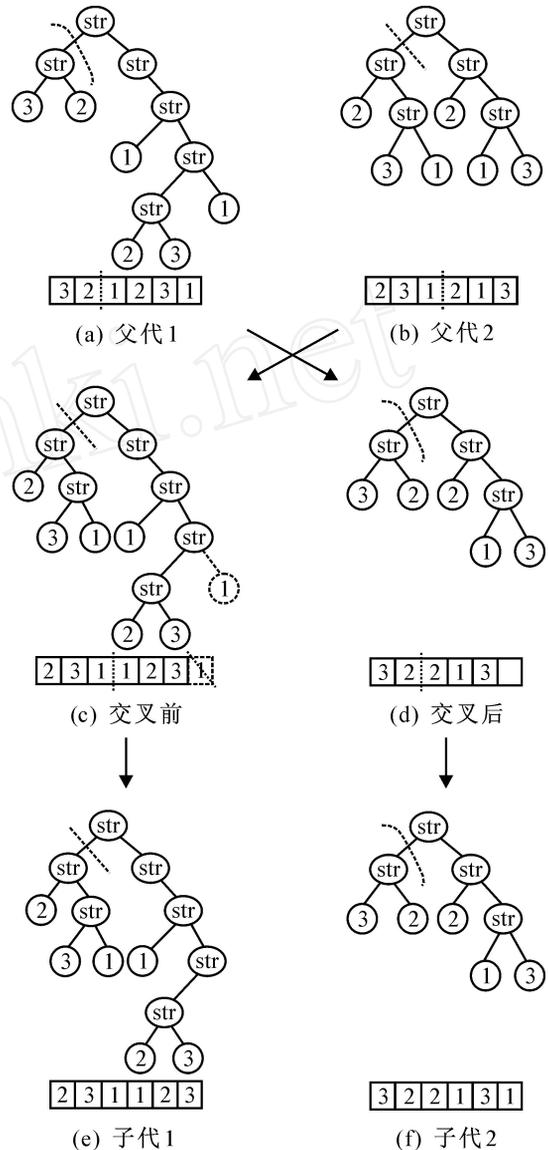


图 3 交叉过程

3.4 改进后遗传规划操作步骤

基于本文设计的编码策略和改进的交叉操作, GP 算法的操作步骤如下:

Step1: 确定个体的表达方式, 包括函数集 F 和终止符集 T . 函数集为“str”, 终止符集为不大于机器数的整数集.

Step2: 初始化群体, 每个初始个体都是用随机方法产生. 生成每个个体时, 先从函数集 F 中随机选取一个函数作为二叉树的根节点. 之后, 再从函数集 F 和终止符集 T 的并集 $C = F \cup T$ 中, 按均匀分布的随机方法选出一个元素作为树的终端节点. 如果

选出的仍是函数运算符,则重复执行上述过程;若是终止符,则该分支上的树便停止生长.上述过程从上到下、从左到右不断重复,直至生成一个完整的树为止.在树的生长过程中应注意生成树的深度不能大于给定的最大深度.

Step3: 依据适应度函数计算各个体的适应度,并评价个体适应度的优良.判断是否满足停止条件,满足,则输出结果并停止计算;未满足,则进行遗传操作.

Step4: 执行遗传操作,复制、交叉、变异,生成新的个体,形成新一代.

Step5: 反复执行 Step3 和 Step4,直至满足终止

条件,输出结果.

4 应用实例

为了验证改进后的遗传规划算法求解作业车间调度问题的性能,在 VC++ 6.0 环境下,编写遗传规划程序优化作业车间调度问题,以最大完工时间为目标函数,解码成主动调动,用 15 个经典的 JSP 标准测试问题实例进行实验,并与传统的简单遗传算法(SGA)^[8] 进行比较.对于每个例子,分别用 GP 和 SGA 运行 30 次.在每次测试时,尽量采用相同的参数,交叉概率 $p_c = 0.9$,变异概率 $p_m = 0.1$.计算结果见表 1.收敛曲线如图 4 和图 5 所示.

表 1 GP 和传统 SGA 的性能比较

序号	问题	规模 ($n \times m$)	c^{**}	种群大小	迭代次数	GP		传统 SGA	
						c^*	t_a	c^*	t_a
1	FT06	6 × 6	55	50	100	55	10	55	12
2	FT10	10 × 10	930	100	100	936	110	960	120
3	FT20	20 × 5	1 165	100	150	1 178	83	1 249	101
4	LA01	10 × 5	666	100	50	666	9	666	12
5	LA02	10 × 5	655	100	100	666	10	689	15
6	LA03	10 × 5	597	100	100	604	19	620	22
7	LA06	15 × 5	926	50	50	926	2	934	5
8	LA07	15 × 5	890	50	50	890	27	890	35
9	LA08	15 × 5	863	100	100	863	25	868	30
10	LA11	20 × 5	1 222	150	100	1 222	67	1 248	85
11	LA16	10 × 10	945	100	100	977	72	1 026	93
12	LA18	10 × 10	848	100	100	848	75	916	95
13	LA20	10 × 10	902	100	100	912	91	928	98
14	LA21	15 × 10	1 046	150	100	1 091	312	1 139	385
15	LA25	15 × 10	977	150	100	1 014	163	1 076	189

注: n 为工件数, m 为机器数, c^{**} 为目前为止已发现的最优值, c^* 为对应的算法所发现的最优值, t_a 为算法的平均收敛时间(s).

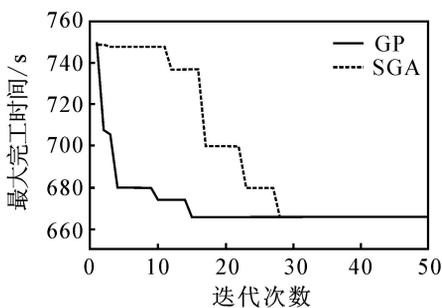


图 4 GP 和 SGA 收敛曲线(LA01)

由表 1 可知,传统简单 GA 在解决小规模问题时,搜索效果还比较理想,但当问题规模扩大时则不够理想.对于复杂问题,受早熟制约,GA 不能收敛到最优解.GP 算法与之比较,在小规模问题上与传统简单 GA 的搜索精度和时间差不多,但当问题规

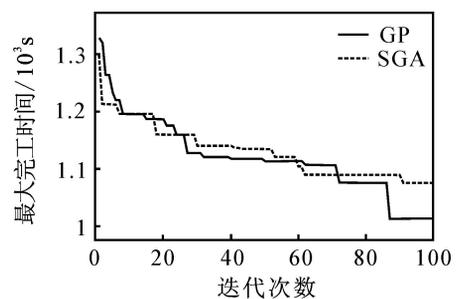


图 5 GP 和 SGA 收敛曲线(LA25)

模扩大时,GP 的优势便显现出来,并且在整个搜索效率上也有较明显的优势.

由图 4 和图 5 可知,GP 的收敛速度比传统简单 GA 的收敛速度快.

5 结 论

本文将遗传规划用于作业车间调度问题,并对其作了改进,使之适合解决作业车间调度问题.层次结构表达和染色体长度可变是遗传规划的特点.利用 Read 线性编码和基于工序的编码相结合进行有效的编码,使复杂的树型结构变成对一串数组的遗传操作,提高了运算效率,而且解码过程产生的主动调度减小了搜索空间.同时,对变长染色体在交叉运算时进行了改进,以保证新产生的子代是可行解,防止了无效解的产生.利用典型实例进行了实验,与传统的简单遗传算法进行比较的结果表明,遗传规划可有效求解作业车间调度问题,是一种解决该问题的新途径.当然,仍需进一步改进遗传操作方法,以提高解的质量.

参考文献(References)

- [1] Koza J R. Genetic programming: On the programming of computers by natural selection[M]. Cambridge: MIT Press, 1992.
- [2] Koza J R. Genetic programming : Automatic discovery of reusable programs [M]. Cambridge: MIT Press, 1994.
- [3] Koza J R, Bennet F, Andre D. Genetic programming : Darwinian invention and problem solving[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1999.
- [4] Yin W J, Liu M, Wu C. Learning single-machine scheduling heuristics subject to machine [J]. Evolutionary Computation, 2003, 2: 1050-1055.
- [5] 轩建平, 史铁林, 廖广兰, 等. 利用遗传编程提取齿轮多重故障分类特征[J]. 振动工程学报, 2006, 19(1): 70-74.
(Xuan J P, Shi T L, Liao G L, et al. Classification feature extraction of multiple gear faults using genetic programming[J]. J of Vibration Engineering, 2006, 19(1): 70-74.)
- [6] 何霆, 刘飞, 马玉林, 等. 车间生产调度问题研究[J]. 机械工程学报, 2000, 36(5): 97-102.
(He T, Liu F, Ma Y L, et al. Study on shop-floor scheduling [J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2000, 36(5): 97-102.)
- [7] Alaa F S, Ahmed M. Forecasting using genetic programming [C]. Proc of the 33rd Southeastern Symposium on System Theory. Athens, 2001: 343-347.
- [8] Goncalves, Jose Fernando, De Magalhaes Mendes, et al. A hybrid genetic algorithm for the job shop scheduling problem[J]. European J of Operational Research, 2005, 167(1): 77-95.
- [3] 胡春海, 王晓丽, 邹晓红. DS 证据理论和粗集理论在数据融合中的应用[J]. 现代雷达, 2004, 26(9): 53-55.
(Hu C H, Wang X L, Zou X H. Application of DS evidential theory and rough set theory in data fusion[J]. Modern Radar, 2004, 26(9): 53-55.)
- [4] 杨万海. 多传感器数据融合及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
(Yang W H. Multi-sensor data fusion and its applications[M]. Xi'an: Publishing House of University of Electronic Science and Technology, 2004.)
- [5] Pawlak Z. Rough sets theory and its applications to data analysis[J]. Cybernetics and Systems, 1998, 29(7): 661-688.
- [6] 张文修, 吴伟志, 梁吉业. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
(Zhang W X, Wu W Z, Liang J Y. The theory and method of rough set[M]. Beijing: Publishing House of Science, 2001.)
- [7] 刘清. Rough 集及 Rough 推理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
(Liu Q. Rough set and rough reasoning[M]. Beijing: Publishing House of Science, 2001.)
- [8] 宋元. 目标战术意图推理理论及其应用研究[D]. 大连: 海军大连舰艇学院, 2005.
(Song Y. Research on target's tactical intention inference theory and its applications[D]. Dalian: Dalian Naval Academy, 2005.)
- [9] 李进军, 丛蓉, 熊吉光. 融合目标战术特征的空中目标类型识别模型[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(3): 53-55.
(Li J J, Cong R, Xiong J G. Differentiating model of aerial targets type integrated with targets tactical characteristic[J]. Ship Science and Technology, 2005, 27(3): 53-55.)
- [10] Newman D J, Hettich S, Blake C L. UCI repository of machine learning databases [BD/OL]. (1998-03-20). <http://www.ics.uci.edu/~mllearn/MLRepository.html>.

(上接第 918 页)