

# 基于遗传算法的混合流水线车间调度多目标求解\*

姚丽丽<sup>1,2</sup>, 史海波<sup>2</sup>, 刘昶<sup>2</sup>, 韩忠华<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所 工业信息学重点实验室, 沈阳 110016)

**摘要:** 为了解决传统的多目标优化算法难以很好实现企业的实际决策需要问题, 针对混合流水线车间调度(HFSP)的多目标优化调度问题, 提出了一种新的多目标遗传算法。根据企业实际需求, 采用分模块两层建模的思想, 将多目标分为约束性目标和优化性目标。算法根据目标性质的不同分别进行不同的搜索。最后将新算法应用于 HFSP 多目标优化问题进行实例验证。结果表明, 所提出的算法具有很好的可行性, 与其他多目标优化方法相比, 该算法具有明显的优越性、实用性和可操作性。

**关键词:** 遗传算法; 混合流水线车间调度; 多目标优化; 约束性目标; 优化性目标

**中图分类号:** TP315      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2011)09-3264-04

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-3695.2011.09.016

## Solving multi-objective hybrid flow-shop scheduling problem based on genetic algorithm

YAO Li-li<sup>1,2</sup>, SHI Hai-bo<sup>2</sup>, LIU Chang<sup>2</sup>, HAN Zhong-hua<sup>1,2</sup>

(1. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Key Laboratory of Industrial Informatics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the traditional multi-objective optimization algorithm is difficult to realize the practical decision of the enterprise, brought a novel multi-objective genetic algorithm forward to solve the hybrid flow-shop scheduling problems. According to the demand of the enterprise, based on sub-module using two modeling ideas, objectives were fallen into two categories: constrained objective and optimized objective, and the different objective had the different searching process. Finally, it used the novel algorithm to solve the multi-objective hybrid flow-shop scheduling problem. The result shows that the novel algorithm has the good feasibility, and it also has an obvious advantage, the better practicability and maneuverability, compared with the traditional multi-objective optimization methods.

**Key words:** genetic algorithm(GA); hybrid flow-shop scheduling problem(HFSP); multi-object optimization; constrained objective; optimized objective

### 0 引言

混合流水线车间调度问题是传统的流水线车间调度问题(flow shop)的一个推广<sup>[1]</sup>, 其涉及任务、资源、时间的三维性, 建立精确的数学模型是非常困难的。该问题已经被证明为 NP hard 问题, 在生产过程中很难依靠人工进行良好调度。因此, 研究混合流水线车间的调度问题, 进行自动排产具有重要的实际意义。

在企业中, 对于上层决策者来说, 希望满足的目标往往具有多个, 如决策者既希望产品能够按时完工交货, 同时为了减小库存或者由于物品本身保质期限制的原因, 又希望提前完工的时间也不能太早。此外, 希望加工过程中的直接生产成本尽可能的小, 尽可能地利用现有的资源等。不同的决策者希望满足的目标不同, 对于生产调度来说, 则要求尽可能地满足所有决策者的目标要求, 从而给出合理的调度方案。对于一般的生

产调度算法, 如分支限界法, 基于瓶颈的启发式方法, 基于优先分配规则的正排、倒排算法等, 它们在实现单目标问题方面具有很好的运行效率, 但是很难解决多目标性调度问题。遗传算法作为一种自组织、自适应、自学习的全局搜索算法, 具有很强的鲁棒性和并行搜索能力, 能够很好地解决多目标优化问题。

多目标优化问题在理论界已经取得了很好的研究成果, 文献[2~9]都是近年来解决多目标问题方法的代表。然而, 这些算法设计复杂、难以实现, 同时这些研究成果真正应用到实际工程界的也很少。总结以往的多目标优化方法, 算法基本都属于以下两种: 非 Pareto 方法和 Pareto 方法。非 Pareto 方法将多目标转换为单目标, 算法设计简单、容易实现。但是一般情况下各个目标的权值设定需要企业决策人员凭借经验提前给出, 其非对象化、实例化, 决策人员难以对权值的大小进行合理的设定。Pareto 方法在搜索的过程中随机产生权系数, 最终产生一组非劣的解集, 算法设计复杂、计算量大, 且最后产生的结果需由决策人员进行再次选择, 不利于提前决策的实现。根据

**收稿日期:** 2011-02-27; **修回日期:** 2011-04-21      **基金项目:** 国家“863”计划资助项目(2007AA040702-3); 辽宁省科技攻关项目(2010020068-201)

**作者简介:** 姚丽丽(1986-), 女, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为生产计划与调度、企业自动化系统集成等(yaolili@sia.cn); 史海波(1966-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为生产与运作管理、制造过程建模与仿真、制造执行系统等; 刘昶(1973-), 女, 辽宁辽阳人, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为复杂制造系统建模与性能评价方法、生产调度理论与应用、决策分析等; 韩忠华(1977-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为生产与运作管理、企业自动化系统集成技术、车间排产与生产调度算法的工程应用研究。

企业的实际需要和目标性质的不同,本文对目标进行分类限定,提出一种新的多目标遗传算法。企业决策人员首先给出目标分类决策,新提出算法便可以根据这些目标给出满足需要的调度结果,解决实际企业的多目标优化调度需要。

### 1 混合流水线车间描述

混合流水线车间调度问题可描述为<sup>[10]</sup>:  $n$  个工件在流水线上进行  $m$  个阶段的加工,每一阶段至少有一台机器且至少有一个阶段存在多台机器,在每一阶段各工件均要完成一道工序,各个工件的每道工序可以在该阶段中的任意一台机器上加工,如图1所示。调度是根据给定的调度指标,已知各道工序在各台机器上的处理时间以及与调度指标有关的参数,确定所有工件的排序以及每一个阶段上机器的分配情况,使得其满足调度指标的要求。

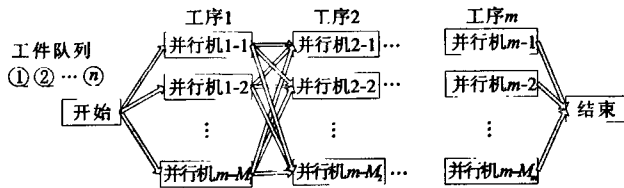


图1 HFSP调度问题

#### 1.1 变量符号介绍及约束描述

##### 1.1.1 变量符号介绍

- $n$ : 工件数;
- $m$ : 工序数;
- $C_{i,j}$ : 第  $i$  个工件的第  $j$  道工序的结束时间;
- $C_{out}^{work}$ : 机器加工成本;
- $C_{out}^{wait}$ : 机器等待成本;
- $C_{out}^{storage}$ : 机器存储成本;
- $P_{ijk}$ : 工件  $i$  在工序  $j$  第  $k$  台机器上的加工时间;
- $M_j$ : 第  $j$  道工序的机器总数;
- $F_{j-k}^r$ : 第  $j$  道工序的第  $k$  台机器的加工费率;
- $Y_{ijk}$ : 工件  $i$  被安排到第  $j$  道工序的第  $k$  台机器上加工时为 1, 否则为 0;
- $T_{j-k}^s$ : 第  $j$  道工序的第  $k$  台机器的加工前的等待时间;
- $F_{j-k}^w$ : 第  $j$  道工序的第  $k$  台机器的等待费率;
- $S_{ij}$ : 工件  $i$  的工序  $j$  的开始加工时间;
- $F_i^s$ : 工件  $i$  的存储费率;
- $D_j$ : 交货期;
- $\alpha_i$ : 提前完成惩罚因子;
- $\beta_i$ : 拖后完成惩罚因子;
- $e_i$ : 工件  $i$  的规定最早完成日期;
- $E_i$ : 提前完成时间段;
- $t_i$ : 工件  $i$  的规定最迟完成日期;
- $T_i$ : 拖后完成时间段;
- $F$ : 惩罚和的上界;
- $x_{il}$ : 0-1 变量, 如果工件  $i$  被安排在第  $l$  位置则取值为 1, 否则为 0;
- $y_{ijk}$ : 0-1 变量, 如果工件  $i$  的第  $j$  道工序被安排在第  $k$  台机器上取值为 1, 否则为 0;
- $L$ : 足够大数。

##### 1.1.2 约束描述

$$\sum_{l=1}^n x_{il} = 1 \quad l=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{il} = 1 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{M_j} y_{ijk} = 1 \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$C_{ij} = S_{ij} + P_{ijk} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$C_{ij} \leq S_{i(j+1)} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{il} S_{ij} \leq x_{i(l+1)} S_{ij} \quad i, l=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i1} y_{ijk} C_{ij} \leq \sum_{i=1}^n x_{i2} y_{ijk} S_{ij} + (1 - \sum_{i=1}^n x_{i2} y_{ijk} S_{ij}) \times L$$

$$j=1, 2, \dots, m; l_1, l_2=1, 2, \dots, n; l_1 \leq l_2; k=1, 2, \dots, M_j \quad (7)$$

式(1)(2)表示保证调度为所有工件的一个全排列;式(3)表示任何一个阶段,每个工件只能由该阶段的一台机器加工;式(4)表示同一阶段工件的完工时间等于开始时间与加工时间之和;式(5)表示后道工序的开始时间必须在前道工序完成之后开始;式(6)表示以某种优先级进行工件调度排列,排列位置越前的工件开始处理的时间越早;式(7)表示同一阶段分配在同一机器上的、排位靠后的工件必须等待排位靠前的工件加工完毕后才能开始加工。

#### 1.2 调度指标描述

混合流水线车间调度问题的性能指标与所有其他车间模型的企业一样,主要由企业的决策人员给出。不同的企业有着不同的必要指标;同样不同的决策者给出的指标也可能不同。下面对目前混合流水线车间模型的企业中常见的几种典型性能指标给出其数学描述,各公式中的具体变量含义见 1.1.1 节,对于公式的整体含义,其表达简单明了,在此不再赘述。

##### 1) Makespan 指标

即最小化最大加工完成时间:

$$\min \max_{i=1, \dots, n} \{C_{im}\} \quad (8)$$

##### 2) 交货期指标

$$\min \{ \sum_i U_i \} \quad (9)$$

if  $C_{im} \leq d_i, U_i = 0$

else  $U_i = 1$

##### 3) 生产成本指标

$$\min \{ C_{out}^{work} + C_{out}^{wait} + C_{out}^{storage} \} \quad (10)$$

其中,机器加工成本为

$$C_{out}^{work} = \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^n \left( \sum_{k=1}^{M_j} Y_{ijk} \times F_{j-k}^r P_{ijk} \right) \right)$$

机器等待成本为

$$C_{out}^{wait} = \sum_{j=1}^m \left( \sum_{k=1}^{M_j} T_{j-k}^s \times F_{j-k}^w \right)$$

工件存储成本为

$$C_{out}^{storage} = \sum_{i=1}^n \left( \left( \sum_{j=2}^m (S_{ij} - C_{i,j-1}) \right) \times F_i^s \right)$$

##### 4) 惩罚和指标

$$\min \sum_{i=1}^n (\alpha_i E_i + \beta_i T_i) \quad i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (11)$$

其中,  $E_i = \max(0, d_i - C_{im}), T_i = \max(0, C_{im} - d_i)$ 。

##### 5) 满意度(图2)指标

$$\max \mu_j(C_j) \quad (12)$$

$$\mu_j = 0 \text{ when } C_{im} = d_i$$

$$\mu_j = \frac{C_{im} - e_i}{d_i - e_i} \text{ when } C_{im} \leq d_i; \mu_j = \frac{t_i - C_{im}}{t_i - d_i} \text{ when } C_{im} = d_i$$

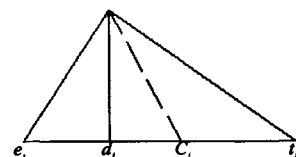


图2 三角形满意度

##### 6) 产能均衡指标

$$\min \left[ \sum_j W_j \left| \sum_k P_k - \frac{\sum_k P_k}{l_j} \right| \right] \quad (13)$$

其中:  $P_k = \sum_{j=1}^n P_{ijk} \gamma_{ijk}$ 。

对于混合流水线车间的调度问题的解决算法来说,保证式(8)~(13)中的任何一个指标之前都必须首先确保式(1)~(7)满足。

### 2 目标函数分类

一般来说,由于企业实际需要的不同,所要求的具体目标也不一样。本文采用分模块两层建模的思想,将目标分为约束性目标和优化性目标两种。

#### 2.1 约束性目标

在实际企业中,对于决策者来说,并不是要求所有的目标都要达到最优的,很可能存在有的目标必须达到某一特定值,有的目标满足某一限定范围即可的情况,这些目标归根结底都是一种存在约束条件的目标,在此定义为约束性目标。

约束性目标根据量化后值要求的不同,可分为绝对性目标和限界性目标。绝对性目标是指目标量化后等于某一固定值的目标,比如要求所有工件都必须按时完工,量化后即拖期工件数等于零的目标。限界性目标指要求的性能指标最终在某一限定范围之内的目标,如生产成本指标、满意度指标、惩罚和指标等,只要对目标进行相应范围的限定即可。

#### 2.2 优化性目标

传统多目标优化调度中的目标基本上都是优化性目标。优化性目标的主要特点就是决策者不用给出任何目标限定条件,直接利用某种方法产生调度方案,使调度指标达到最优即可。如式(8)~(13)均可作为优化性目标。

将所有目标作为优化性目标,通过调度算法使其最大化或者最小化,这是所有决策者都希望达到的。然而实际上,通过各种调度方法所给出的多目标最终解,仅仅是可行解而已,并不都是所有目标的最优解。将目标进行分类,可实现部分目标的提前决策,如果优化性目标为一个,则可实现满足约束目标的优化目标的最优解。

### 3 基于分类的多目标遗传算法

本文基于对目标分类的思想,提出一种新的多目标遗传算法,解决混合流水线车间调度多目标问题。

#### 3.1 算法基本思想

多目标遗传算法,将目标分为两层:约束性目标和优化性目标。该方法重点在于决策者首先需要目标进行划分,凭借经验初步给出约束性目标的限定条件,剩余的目标作为优化性目标。算法根据给定目标条件进行自动搜索,寻找出满足目标条件的较优解。

在算法搜索的过程中,约束性目标采用循环体内变换比较的方式进行,其存在可行解和不可行解之分。对于不可行解的情况,搜索继续在循环体内进行;当出现可行解时,跳出循环。优化性目标利用传统的多目标优化方法进行,两者嵌套循环前进,形成很好的闭环控制。

基于目标分类的多目标遗传算法在处理优化目标为一个目标的问题时效果最好。当优化目标为多个目标时,可以利用传统的优化方法进行优化,基于 Pareto 的方法或者非 Pareto 的

方法都可以。对于非 Pareto 的方法,决策者需要给出各个目标的权值设定。

#### 3.2 算法操作

鉴于混合流水线车间的特殊性,基于分类的多目标遗传算法的操作也有自己的特殊性:

a) 算法的编码采用基于矩阵的实数编码方案较为适合,整数部分代表所在工序的并行机号。工件第一道工序的加工顺序,依据实数的小数部分的大小顺序而定。在后面的工序中,对于同台机器上工件的加工顺序,结合实际情况,算法中应当加入一定的优先规则,进行工件选择加工,如先到先加工(FCFS)的优先规则。

b) 交叉、变异操作必须保证基因所代表的并行机号满足当前工序中并行机号范围的要求,保证染色体的合法性。

c) 适应度函数的计算依据该算法的搜索过程要求,在不同阶段进行计算。

#### 3.3 终止条件

与一般的多目标优化算法一样,终止条件给定为进化代数,但是由于此算法的特殊性,在给定进化代数的限制后,为了保证决策者给出目标限制的合理性,在绝对性目标和限界性目标的循环体内,也需要给出内层进化代数的限制,当超过内层进化代数之后,循环体自动跳出并给出修改约束提示。

#### 3.4 算法流程

在基于分类的多目标遗传算法的流程中存在着多层闭环循环控制,其流程图如图 3 所示。

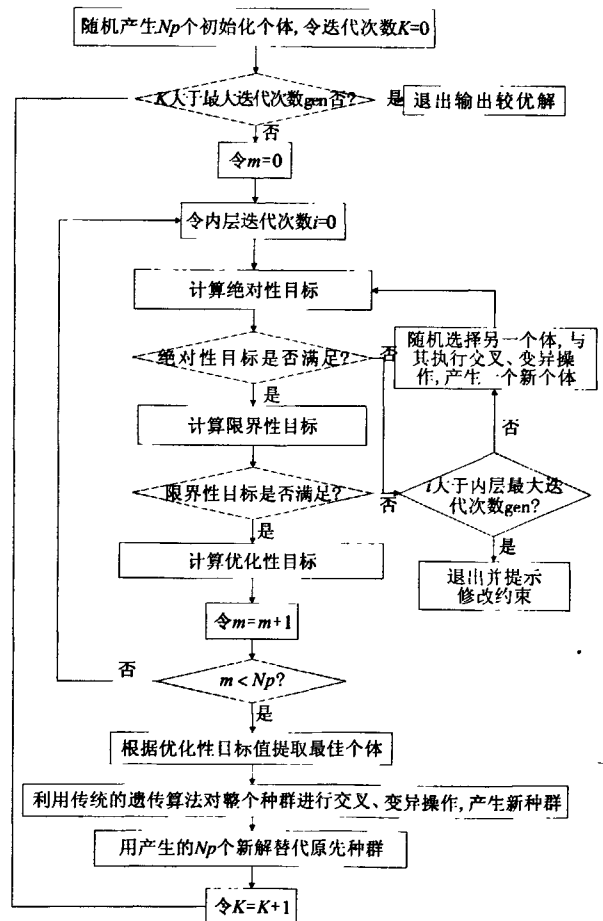


图3 基于分类的多目标遗传算法流程

### 4 仿真与比较

利用本文提出的基于分类的多目标算法与传统的基于权重设定的多目标方法进行比较。此仿真共涉及到三种目标:工件拖期目标、惩罚和目标、生产成本目标,涉及式(1)~(7)、式(9)~(11)。实例中共有八个工件,每个工件有六道流水线工序,每道工序的并行机数如表1所示,每个工件的目标完成时间如表2所示。

表1 每道工序的并行机数

工序号	01	02	03	04	05	06
并行机数	2	4	4	3	2	3

表2 每个工件的预定交货期

工件号	001	002	003	004	005	006	007	008
完成时间	410	408	417	391	415	403	393	405

一般来说,工件在同道工序的所有机器上的加工时间相同,在这里考虑到机器加工性能的不同,同道工序不同机器上的工件的加工时间不同。在仿真中,工件的加工时间为自动生成。工件的加工时间如表3所示。

表3 工件的机器加工时间

工件号	1-1	1-2	2-1	2-2	2-3	2-4	3-1	3-2	3-3
001	32	46	37	46	43	39	32	31	46
002	47	36	46	42	30	36	38	40	31
003	40	45	39	37	32	49	47	30	32
004	33	48	39	38	43	34	31	32	45
005	32	41	37	40	47	36	39	38	49
006	46	39	30	38	32	31	45	37	39
007	35	30	44	31	31	31	31	31	35
008	43	33	30	45	45	37	44	47	40
工件号	3-4	4-1	4-2	4-3	5-1	5-2	6-1	6-2	6-3
001	48	30	42	34	39	36	39	38	35
002	39	33	49	34	46	36	36	39	31
003	42	37	46	35	47	39	43	48	49
004	45	36	42	49	32	38	32	32	46
005	35	47	48	44	31	32	38	31	48
006	41	34	38	42	43	47	39	42	32
007	32	38	32	32	47	32	47	45	47
008	48	31	49	36	39	43	46	48	33

本实例相关的目标参数设置如表4~8所示。

表4 机器加工成本费率

机器号	1-1	1-2	2-1	2-2	2-3	2-4	3-1	3-2	3-3
加工费率	0.68	0.60	0.65	0.65	0.65	0.68	0.60	0.68	0.68

机器号	3-4	4-1	4-2	4-3	5-1	5-2	6-1	6-2	6-3
加工费率	0.66	0.63	0.69	0.68	0.63	0.68	0.63	0.69	0.60

表5 机器等待成本费率

机器号	1-1	1-2	2-1	2-2	2-3	2-4	3-1	3-2	3-3
等待费率	0.24	0.21	0.20	0.17	0.18	0.23	0.24	0.15	0.24

机器号	3-4	4-1	4-2	4-3	5-1	5-2	6-1	6-2	6-3
等待费率	0.17	0.16	0.22	0.20	0.24	0.17	0.23	0.15	0.23

表6 工件存储成本费率

工件号	001	002	003	004	005	006	007	008
存储费率	0.07	0.11	0.1	0.08	0.06	0.06	0.14	0.12

表7 提前完工惩罚因子

工件号	001	002	003	004	005	006	007	008
提前因子	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1

表8 拖后完工惩罚因子

工件号	001	002	003	004	005	006	007	008
拖后因子	0.7	0.6	0.5	0.5	0.7	0.5	0.5	0.5

本文采用 Visual Studio 2008 进行软件编程实现上述算法。遗传算法的参数设置:种群规模为30,迭代次数为200,交叉率为0.7,变异率为0.3。本文提出的基于分类的多目标算法的目标设定为:拖期工件数为0,惩罚和小于400,生产成本最小化。传统的基于设定权值的多目标算法目标的权值设定如表9所示。

表9 有权值多目标算法权系数

目标	min 工件拖期数	min 惩罚和	min 直接生产成本
各目标权值	0.5	0.3	0.2

程序运行结束后,各个目标结果如表10所示,产生的甘特图如图4、5所示。

搜索过程中的直接生产成本目标的迭代曲线<sup>[1]</sup>如图6所示。

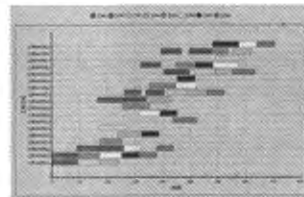


图4 基于分类的多目标遗传算法结果甘特图

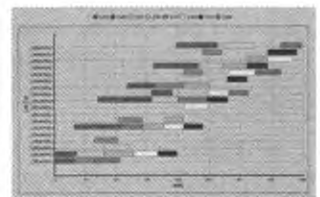


图5 传统的多目标遗传算法结果甘特图

表10 两种算法的结果展示与比较

算法	工件拖期数	惩罚和	直接生产成本
基于分类算法	0	381.05	1236.16
传统算法	0	298.7	1256.56

图6中实线为本文提出的基于分类的多目标算法的优化性目标迭代曲线,虚线为基于权重设定的多目标算法优化性目标迭代曲线。从图6可以看出,本文中提出算法的优化性目标的搜索值始终优于传统算法相对应的优化性目标值,同时新算法的搜索速率也远远大于传统的遗传算法。

随机产生初始种群,其余参数不作任何改变,分别用本文所提出的新算法与传统的算法再次进行仿真比较。迭代曲线比较如图7所示。

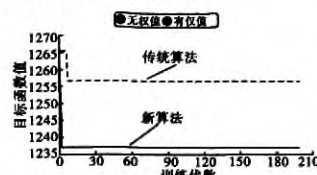


图6 迭代曲线

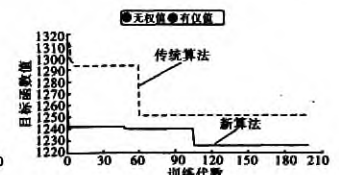


图7 迭代曲线比较

改变各个参数后,继续进行实验,所有结果都显示:本文提出的基于分类的多目标算法在满足约束性目标的条件下,优化性目标总是优于传统多目标算法的对应目 (下转第3271页)

型和算法的有效性进行了验证。进一步研究的问题包括通过调查和实验对模型涉及参数进行标定,将模型应用于实际路网,考虑出行者的异质性将模型从单用户拓展至多用户,考虑出发时间选择进行动态交通分配建模等。

#### 参考文献:

- [1] SIMON H A. Behavioral model of rational choice [J]. *Quarterly Journal of Economics*, 1955, 69(1): 99-118.
- [2] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospect theory: an analysis of decision under risk [J]. *Econometrica*, 1979, 47(2): 263-292.
- [3] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty [J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 1992, 5(4): 297-323.
- [4] FUJII S, KITAMURA R. Drivers' mental representation of travel time and departure time choice in uncertain traffic network conditions [J]. *Networks and Spatial Economics*, 2004, 4(3): 243-256.
- [5] JOU R C, KITAMURA R, WENG Mei-chuan, et al. Dynamic commuter departure time choice under uncertainty [J]. *Transportation Research Part A*, 2008, 42(5): 774-783.
- [6] 张杨. 不确定环境下城市交通中车辆路径选择研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [7] AVINERI E. The effect of reference point on stochastic network equilibrium [J]. *Transportation Science*, 2006, 40(4): 409-420.
- [8] KONSTANTINOS V K, YAWA D A, DONALD L F, et al. Risk attitude reversals in drivers' route choice when range of travel time information is provided [J]. *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2002, 44(3): 466-473.
- [9] CONNORS R D, SUMALEE A. A network equilibrium model with travelers' perception of stochastic travel times [J]. *Transportation Research Part B*, 2009, 43(16): 614-624.
- [10] XU Hong-li, LOU Ying-yan, YIN Ya-feng, et al. A prospect-based user equilibrium model with endogenous reference points and its application in congestion pricing [J]. *Transportation Research Part B*, 2011, 45(2): 311-328.
- [11] 周晶, 徐晏. 弹性需求随机用户平衡分配模型及其应用 [J]. *系统工程学报*, 2001, 16(2): 88-94.
- [12] PRELEC D. The probability weighting function [J]. *Econometrica*, 1998, 66(3): 497-527.
- [13] RIEGER M, WANG Mei. Cumulative prospect theory and the St. Petersburg paradox [J]. *Economic Theory*, 2006, 28(3): 665-679.
- [14] LEVY H, LEVY M. Prospect theory and mean-variance analysis [J]. *The Review of Financial Studies*, 2004, 17(4): 1015-1041.
- [15] RIEGER M, WANG Mei. Prospect theory for continuous distributions [J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 2008, 36(1): 83-102.
- [16] FOSGERAU M, BORGER D B. The trade-off between money and travel time: a test of the theory of reference-dependent preferences [J]. *Journal of Urban Economics*, 2008, 64(1): 101-115.
- [17] ULRICH S. Reference dependence in cumulative prospect theory [J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 2003, 47(2): 122-131.
- [18] LO H K, LUO X W, SIU B W Y. Degradable transport network: travel time budget of travelers with heterogeneous risk aversion [J]. *Transportation Research Part B*, 2006, 40(9): 792-806.
- [19] SHEFFI Y. Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985: 214-227.
- [20] NGUYEN S, DUPIUS C. An efficient method for computing traffic equilibria in networks with asymmetric transportation costs [J]. *Transport Science*, 1984, 18(2): 185-202.

(上接第3267页)标,从而表明基于分类的多目标遗传算法解决多目标问题具有很好的可行性,且算法简单、容易实现,与传统的有权值多目标优化方法相比,运行结果更好,针对性更强,而且具有很好的实用性和可操作性,能够很好地解决实际企业的多目标调度问题。

## 5 结束语

大量实际工程问题都属于多目标优化问题,生产调度问题也不例外。在理论界中,生产调度的多目标优化问题已经做了大量的研究,然而真正应用于实际工程界的却少之甚少。本文提出一种新的基于分类的多目标遗传算法,针对实际企业中的多目标要求,对实际目标划分为约束性目标和优化性目标,根据决策者的需要,提前给出目标决策,最终利用该算法产生符合条件的调度。该方法具有很好的可行性、实用性和可操作性,能够很好地对实际企业的多目标问题进行求解。

#### 参考文献:

- [1] 王凌. 车间调度及其遗传算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 138-144.
- [2] 王黎, 邱长华, 刘家国. A\_E方法的多目标车间排产方案精选决策 [J]. *工业工程与管理*, 2009, 14(6): 33-37.
- [3] 申晓宁, 郭毓, 陈庆伟, 等. 一种保持群体多样性的多目标遗传算法 [J]. *控制与决策*, 2008, 12(23): 1434-1440.
- [4] 祁荣宾, 钱锋, 杜文莉, 等. 基于精英选择和个体迁移的多目标遗传算法 [J]. *控制与决策*, 2007, 22(2): 164-168.
- [5] 连坤雷, 张超勇, 高亮, 等. 一种基于改进遗传算法的多目标动态调度优化 [J]. *企业管理与信息化*, 2010, 39(3): 13-17, 21.
- [6] 章朝勇, 刘向, 郑建国. 求解多目标 Job-Shop 生产调度问题的量子进化算法 [J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(3): 849-852.
- [7] BEHNAMIAN J, GHOMI S F M T, ZANDIEH M. A multi-phase covering Pareto-optimal front method to multi-objective scheduling in a realistic hybrid flow-shop using a hybrid meta-heuristic [J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(8): 11057-11069.
- [8] YAGMAHAN B, YENISEY M M. A multi-objective ant colony system algorithm for flow shop scheduling problem [J]. *Expert System with Applications*, 2010, 37(2): 1361-1368.
- [9] FENG Ming-yue, TANG Shao-xun, LI Hua, et al. Orthogonal particle swarm optimization for multi-objective Job-Shop scheduling problems [C] // Proc of the 2nd International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing. 2010: 256-260.
- [10] RUBEN R. The hybrid flow-shop scheduling problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 205(1): 1-18.
- [11] PESCH E, STERNA M. Late work minimization in flow shops by a genetic algorithm [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 57(4): 1202-1209.
- [12] FRAMINANA J M, LEISTEN R. A heuristic for scheduling a permutation flow-shop with makespan objective subject to maximum tardiness [J]. *International Journal of Production Economics*, 2006, 99(1/2): 28-40.
- [13] 余建军, 徐学军. 基于免疫和模拟退火原理的柔性 Job-Shop 调度研究 [J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(11): 4094-4097, 4117.