

# 基于层次泳道的业务流程最优化建模

钟明洋<sup>1</sup> 符云清<sup>1,2</sup> 蒋盼<sup>2</sup>

(重庆大学软件学院 重庆 400044)<sup>1</sup> (重庆大学计算机学院 重庆 400044)<sup>2</sup>

**摘要** 业务流程技术是企业管理、应用和集成领域的一个研究热点,而业务流程建模是其应用中的关键问题之一。针对流程建模自动化程度低、缺乏有效评价等不足,提出了基于层次泳道的最优化建模方法。该方法只需给出流程各活动的描述,便可根据活动间的推演关系自动构建流程全图;然后对可能流程进行层次泳道化;最后,综合流程的执行代价和泳道的均衡度,从层次泳道化模型中选择最优者为最终的业务流程建模。结合遗传算法对港口集装箱业务流程进行了最优化建模。实际应用表明,该方法建立的业务流程能有效地均衡码头的业务负载,提高码头的作业效率。

**关键词** 业务流程,业务流程建模,层次泳道,最优化建模,遗传算法

**中图分类号** TP311.51 **文献标识码** A

## Business Process Optimization Modeling Based on Leveled-lanes

ZHONG Ming-yang<sup>1</sup> FU Yun-qing<sup>1,2</sup> JIANG Pan<sup>2</sup>

(College of Software, Chongqing University, Chongqing 400044, China)<sup>1</sup>

(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Business process is a hot topic in enterprise management, application and integration, and business process modeling is one of the key points in the application of business process. The paper presented a lane-based optimization modeling to the low degree of automation for process modeling and the lack of effective evaluation. This method can automatically model the whole business process graph according to the activities' extrapolation on the premise that the description of activities in every process is given. Then a lane process graph levelly for the possible process was made. At last, the execution cost and lane equilibrium were integrated, the best one from the leveled lane models was selected as the final business process. Combining the genetic algorithm, the author modeled the container business process. The applications show that the business process built using this modeling can effectively balance the business load and improve the operational efficiency.

**Keywords** Business process, Business process modeling, Leveled-lanes, Optimization modeling, Genetic algorithm

业务流程是指全部或者部分由计算机支持或自动处理的业务过程,而业务流程系统则是详细定义、管理并执行业务流程的系统。图 1 展示了业务流程系统的特征及功能间的关系。从 1968 年 Fritz Nordsieck 提出使用信息技术实现业务流程的自动化至今,业务流程已成为企业管理、应用、集成等领域研究热点之一,而业务流程建模是其应用中的一个关键问题。

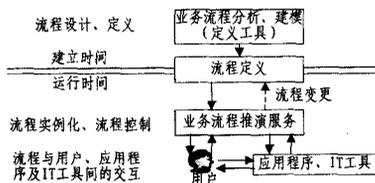


图 1 业务流程系统及其功能关系

业务流程的开发通常是一个迭代过程,其一个周期由业务流程分析、业务流程建模、流程执行、反馈与改进等阶段组

成,业务流程建模则是其中最重要的一个环节。本文针对流程建模自动化程度低、缺乏有效评价等不足,提出了基于层次泳道的最优化建模方法。该方法为业务流程建模技术提供了实用有效的指导,并应用于实际码头集装箱系统中,以提高码头的作业效率。本文首先分析了目前主流的业务流程建模技术,然后针对其存在的建模效率和流程优化等问题,提出了基于层次泳道的业务流程自动建模技术;最后,通过在集装箱业务系统中的应用和评价,验证了该自动建模方法的可行和有效。

### 1 现有业务流程建模技术及发展趋势

当前,有关业务流程建模的研究有很多,根据应用的需要和突出的要素不同,大致可将其分为以下 4 大类:

1) 基于 Petri 网的业务流程建模<sup>[1-3]</sup>。将 Petri 网引入到业务流程建模中,通过定义库所集、变迁集,以及这两者间的有向弧集来形式化描述业务流程;

到稿日期:2010-05-30 返修日期:2010-08-24 本文受国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAH02A20),国家自然科学基金(60803027)资助。

钟明洋(1985—),男,硕士生,主要研究领域为计算机网络、SOA, E-mail: my.zhong@hotmail.com;符云清(1969—),男,博士,教授,主要研究领域为网格计算、计算机协同、网络安全、远程教育;蒋盼(1985—),男,硕士生,主要研究领域为 SOA, EAI。

2) 基于 EPC 的业务流程建模<sup>[4]</sup>。该方法广泛应用于描述业务流程事件和业务流程过程,它提供了 6 种工作流原语来描述事件-功能流,并可在模型中附加相关信息;

3) 基于活动网络的业务流程建模<sup>[5,6]</sup>。它以活动为中心,通过建立活动与活动之间的关系来完成业务流程的建模。该方法能直观地反映业务过程,易于理解、分析、管理和控制过程的执行。目前大多数业务流程管理系统都采用这种建模方法;

4) 扩展的业务流程建模方法<sup>[7-10]</sup>。它是在前三类方法的基础上,运用一些算法和理论而衍生出的,如基于 ECA 规则的业务流程建模、基于算法/理论的业务流程建模等。

上述这些主流的业务流程建模针对传统方法在描述能力、并行性、柔性等方面的不足进行了一定的改进,但在实际开发过程中,其还存在许多不足,如建模的自动化程度低、缺乏对模型的优劣评价、模型的动态适应性差等,从而制约了业务流程系统的应用和进一步发展。

对业务流程自动建模、建模的效率、模型评价及建模最优化的研究目前比较少见,而这些研究又具有挑战性,是很有价值的研究领域。随着 Web Service、SOA、Agent 等众多新技术的发展,其为异构环境下分布式业务流程自动建模、重组、集成和应用提供了技术支撑和基础条件。

## 2 基于层次泳道的业务流程自动建模

业务流程的核心是活动,一个好的活动定义将简化业务流程中的相应部分,如条件路径的描述等。对活动而言,最重要的是活动大小的确定,不合适的活动粒度可能会降低流程的执行效率或增加维护代价。活动粒度过大会使之难以操作和执行<sup>[11,12]</sup>;而粒度过小则会增加流程的步骤,从而增加执行、维护和管理成本<sup>[12,13]</sup>。根据高内聚、松耦合的原则,先给出以下扩展的活动及泳道的定义。

**定义 1** 一个活动(activity)是一个九元组  $\langle n, t, I, O, f, w, e, P, C \rangle$ 。

其中:

$n$ (name):活动的名称;

$t$ (type):活动的类型;

$I$ (input):活动可接受的输入状态集合,以及描述集中多个输入状态应满足的条件(主要为 AND 和 OR 关系的组合);

$O$ (output):活动执行后的输出状态集合;

$f$ (function):活动的功能描述;

$w$ (weight):活动的权重,即该活动执行的代价。权重越大,则活动的执行代价越高;

$e$ (execute probability):活动被执行的概率。由于流程中并非所有活动都一定会被执行,因此每个活动可有不同的执行概率;

$P$ (parents):其输出可以是与当前活动的输入匹配的活动的集合,其最初为空集合,只有流程建模完成后,才能唯一确定。

$C$ (children):其输入可以是与当前活动的输出匹配的活动的集合,其最初为空集合,只有流程建模完成后,才能唯一确定。

**定义 2** 一个泳道(Lane)是一个二元组  $\langle A, l \rangle$ 。

其中:

$A$ (activities):泳道所包含的活动的集合;

$l$ (level):泳道所处的层次,我们用一个递增的整数来表示一个泳道对应的层次编号。

与传统的基于活动网络的业务流程建模方法中涉及到的泳道概念不同,我们在本文中层次泳道的约束更为严格,具体主要包括:

1) 若  $\exists$  泳道  $L_i \langle A_i, i \rangle$ , 则  $A_i \neq \emptyset$ ;

2) 已有泳道  $L_i \langle A_i, i \rangle$ , 活动  $a_i \in A_i$ , 则对  $\forall L \langle A_j, j \rangle (j \neq i)$ , 有  $a_i \notin A_j$ ;

3) 已有  $L_i \langle A_i, i \rangle$  和  $L_j \langle A_j, j \rangle$ , 且  $j \neq i, a_i \in A_i, a_j \in A_j$ , 若  $a_j$  为  $a_i$  后续活动, 则  $j \geq i$ 。

基于层次泳道的业务流程自动建模将重心放在活动和泳道上,利用这种方法描述出的业务流程可从活动上直观地看到流程关系,且层次化泳道不仅能为活动对应的企业部门及角色分工提供指导,还可为后续的流程优化奠定基础。

图 2 展示了基于层次泳道的业务流程模型,其中所有的活动被组织成流程,且各活动被分配在相应的泳道中。

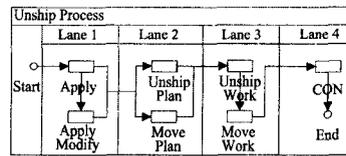


图 2 层次泳道业务流程模型图

根据已知业务的活动情况,基于层次泳道自动建立最优的业务流程模型过程分为以下 3 个步骤:

1) 首先进行业务流程的全图建模,即根据活动之间的输入和输出的关系,将活动进行关联,从而构建出覆盖所有业务流转情况的流程全图;

2) 基于约束的流程层次泳道化,即在建立好的流程全图中选择一条覆盖所有活动的路径,并将其转化为层次泳道流程模型;

3) 对所有可能的层次泳道化模型进行评价,选择最优的流程层次泳道模型作为最终的流程建模。

### 2.1 业务流程全图建模

业务流程全图建模是将已知活动组织成能覆盖所有业务流转情况的流程全图,其关键是根据活动的输入和输出状态,在活动之间建立可能的关联。下面先阐述如何在两个相关的活动间建立关联:

假设流程的活动集合  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , 活动  $a_i, a_j \in A$ , 且  $j \neq i$ ,  $a_i$  的输入和输出状态集合分别为  $I_{a_i} = \{i_{i1}, i_{i2}, \dots, i_{im}\}$ ,  $O_{a_i} = \{o_{i1}, o_{i2}, \dots, o_{in}\}$ , 其中  $m, n$  分别为  $a_i$  的输入状态数和输出状态数;  $a_j$  的输入和输出状态集合分别为  $I_{a_j} = \{i_{j1}, i_{j2}, \dots, i_{jk}\}$ ,  $O_{a_j} = \{o_{j1}, o_{j2}, \dots, o_{jl}\}$ , 其中  $k, l$  分别为  $a_j$  的输入状态数和输出状态数。

在活动  $a_i$  和  $a_j$  之间按以下两个步骤来建立关联:

1)  $\forall o_{ix} \in O_{a_i}, 1 \leq x \leq n, \exists i_{jy} \in I_{a_j}, 1 \leq y \leq k$ , 且  $o_{ix} = i_{jy}$ , 则在  $a_i$  的  $o_{ix}$  与  $a_j$  的  $i_{jy}$  之间建立一条有向边  $(o_{ix}, i_{jy})$ ;

2)  $\forall o_{jx} \in O_{a_j}, 1 \leq x \leq l, \exists i_{iy} \in I_{a_i}, 1 \leq y \leq m$ , 且  $o_{jx} = i_{iy}$ , 则在  $a_j$  的  $o_{jx}$  与  $a_i$  的  $i_{iy}$  之间建立一条有向边  $(o_{jx}, i_{iy})$ 。

在上述基础上,我们就可根据流程已知的活动集合  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , 利用下列方法来构建业务流程全图:

1) 依次从活动集合  $A$  中取出活动  $a_i (i=1, 2, \dots, n-1)$ ;

2) 对  $\forall a_j \in A$ , 且  $i < j \leq n$ , 按照上述的两个步骤在活动

$a_i$  和  $a_j$  之间的建立关联。

## 2.2 基于约束的流程层次泳道化

层次泳道化是将经过业务流程全图建模形成的业务流程全图中选择出的覆盖所有活动的可能流程进行层次泳道化的过程,其关键是根据流程全图中的活动的推演关系,将活动放入不同的泳道中。下面先阐述如何将两个已形成推演关系的活动放入泳道中:

假设流程全图所包含活动集合  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , 活动  $a_i, a_j \in A$ , 且  $a_i$  是  $a_j$  的父活动,  $a_1, a_2, \dots, a_i$  已被放入泳道中, 其中  $a_i$  被放入泳道  $L_k$  中, 给定泳道数为  $m$ 。

按以下两个步骤将活动  $a_j$  放入泳道中:

- 1) 若未被放入泳道的活动数  $n-i$  大于未使用的泳道数  $m-k$ , 则  $a_j$  可被放入泳道  $L_k$  或  $L_{k+1}$  中;
- 2) 若未被放入泳道的活动数  $n-i$  等于未使用的泳道数  $m-k$ , 则  $a_j$  只能被放入泳道  $L_{k+1}$  中。

在上述基础上,我们就可根据流程全图包含的活动集合  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , 利用下列方法来进行层次泳道化:

- 1) 将  $a_0$  放入第一层泳道  $L_1$  中;
- 2) 依次从活动集合  $A$  中取出活动  $a_i (i=2, \dots, n)$ ;
- 3) 按照上述的两个步骤将活动  $a_i$  放入泳道中。

层次泳道化方法随着活动数的增加、泳道数的变化,其组合情况会呈指数级增长,从中选出最优的模型是组合优化问题,即 NPC 问题。此类问题的解决方案众多,如启发式算法、遗传算法(Genetic Algorithm)<sup>[14-16]</sup>等。

## 2.3 流程模型的评价

我们主要从以下 3 个方面对流程模型进行评价:

- 1) 活动的完整性,即模型应包含所有的活动;
- 2) 流程的执行代价,即流程执行所花费的时间  $T$ 。由于流程的路径不唯一,因此我们考虑权重最大的关键路径的执行代价,其可形式化表示为  $T = T_a + T_w$ , 其中  $T_a$  表示在流程中所有活动执行的累计时间,  $T_w$  表示在流程在执行中因某些活动需等待资源或其他原因产生的时间总和。由于活动的触发是随机的,资源数以及资源上的负载情况也是变化的,即是一种随机服务的系统模型。计算这类模型的时间花费是比较复杂的,可采用排队论等方法来求解。为简化这一问题,我们假设所有泳道具有相等的资源数,且这些资源平均分配给泳道中的活动;每个活动上等待的任务实例数相等;选取可能流程上的关键路径活动作为均衡度计算的活动节点集。基于上述假设的执行代价计算如下:

$$T = \sum_{i=1}^n (w_{a_{k_i}} + \frac{S \times C \times w_{a_{k_i}}}{R}) \quad (1)$$

式中,  $w_{a_{k_i}}$  表示活动  $a_{k_i}$  的权重,  $a_{k_i}$  属于关键路径活动集  $A_k = \{a_{k_1}, a_{k_2}, \dots, a_{k_n}\}$ ,  $S$  表示  $a_{k_i}$  上等待的尚未执行的实例,  $C$  表示  $a_{k_i}$  所处的泳道  $L_k$  包含的活动个数,  $R$  表示  $L_k$  所持有的资源个数。

3) 均衡度,即衡量各泳道的负载情况指标。由于流程中活动执行的不确定性,因此提出了概率权重的概念,对活动  $a_i$  来说,其概率权重  $\omega$  为活动的权重与其被执行的概率的乘积,即  $\omega = w_{a_i} \times e_{a_i}$ 。然后根据反映一个数据集的离散程度的标准差的思想来表示均衡度。该值越小表示离散程度越低,即负载分布越均衡。假设泳道总数为  $n$ , 泳道  $L_1, L_2, \dots, L_n$  其活动数分别为  $k_1, k_2, \dots, k_n$ , 均衡度计算公式如下:

$$D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中,

$$L_i = \sum_{j=1}^{k_i} w_{a_{ij}} \times e_{a_{ij}} \quad (3)$$

$$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} w_{a_{ij}} \times e_{a_{ij}}}{n} \quad (4)$$

式中,  $n$  表示泳道的个数,  $m$  表示处于泳道  $i$  的活动个数,  $a_{ij}$  表示第  $i$  泳道的第  $j$  个活动。  $L_i$  表示处于泳道  $i$  的所有活动的概率权重和, 概率权重即活动的权重与被执行的概率的乘积,  $\bar{L}$  表示所有泳道的平均概率权重。

## 3 实例应用

我们针对实际的码头集装箱综合管理系统的卸船流程,应用上述方法在 J2EE 集成开发环境下得到了最优的流程。本文采用遗传算法进行最优层次泳道模型的搜索,由于应用的特殊性需要对遗传算法的编码、遗传算子、评价函数等进行特定的改造,下面将先说明这些改造,对遗传本身不过多说明。

### 1) 编码

我们采用浮点数编码,它能保证将业务流程编译成为浮点数码的同时,比二进制编码在变异操作上更能保证种群的多样性。将每个活动和活动处于的泳道进行编码,每条染色体的长度等于活动总数的 2 倍,染色体中的每一位都是正整数,0 到  $n-1$  位代表的是活动编号,  $n$  到  $2n-1$  位分别对应 0 到  $n-1$  位的活动所处的泳道,如图 3 所示。

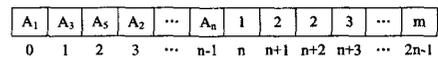


图 3 基因编码

其中  $a_i$  表示第  $i$  个活动,活动总数为  $n$ ,泳道总数为  $m$ 。染色体都是以数组形式存放的,在这种编码方式中,每个染色体向量被编码成一个与解向量长度相同的浮点数向量,在执行时遗传空间就是问题空间,染色体能够直接反映问题的规律和特性。

### 2) 基于约束的遗传操作

在进行交叉和变异时,传统的单点或多点交叉和变异的方法产生的个体可能不能保证流程的正确性。我们给出了如下的约束:

被选交叉或变异的位对应的活动所处的泳道中不能只包含该活动。

被选交叉或变异的位的活动当要向前一个或后一个相邻的泳道移动时,在它移动的反方向必须存在与它处于同一泳道的活动。

向上一泳道移动时,需将与该活动处在同一泳道的且是该活动的父活动全部移动;向下一泳道移动时,需将与该活动处在同一泳道的且是该活动的子活动全部移动。

### 3) 权重概率均衡的适应度函数

根据 2.3 节中给出的评价标准,我们定义了如下的加权评价函数:

$$f(x) = \frac{1}{\frac{\alpha}{n} \times T + \beta \times D} \quad (5)$$

式中,  $n$  表示活动的个数,  $\alpha$  表示执行代价的权重系数,  $\beta$  表示均衡度的权重系数,  $T$  表示该流程的执行代价,  $D$  表示该流程的均衡度。

图4中给出了集装箱综合管理系统中卸船流程所涉及的主要活动情况。根据这些活动建立流程的全图,再应用遗传算法搜索最优的层次泳道流程。

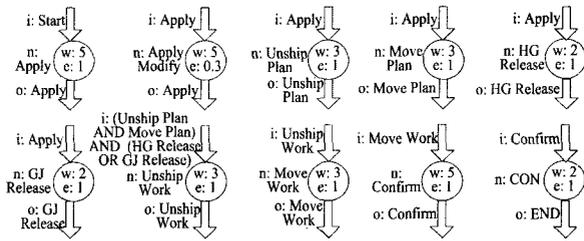


图4 卸船流程所涉及的活动

本文遗传算子分别定为:选择操作基于最优解保存策略;交叉概率为0.2;变异概率为0.01;在加权适应度的计算中, $\alpha$ 和 $\beta$ 都取值为0.5;进化代数为30。图5是遗传算法搜索过程中第6代的结果,图6是根据遗传算法搜索出的适应度最大的结果。表1是两个结果特征的对比情况。

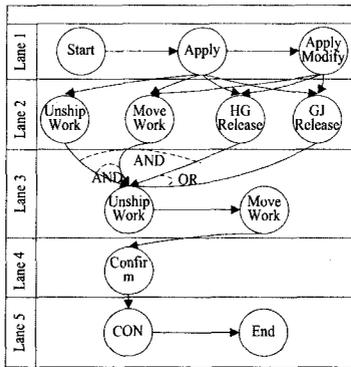


图5 第6代的流程结果

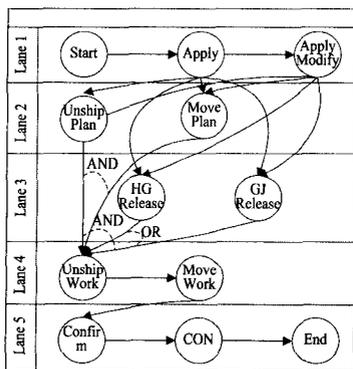


图6 适应度最高的流程结果

表1 结果对比情况

代数	执行代价	均衡度	加权适应度
3	38	3.676	0.268
6	30	2.882	0.360
9	30	2.457	0.366
12	27.75	1.883	0.430
15	28.5	1.433	0.470
18	28.5	1.433	0.470
20	24	1.140	0.564
30	24	1.140	0.564

注:在执行代价的计算中,关键路径所包含的活动集合  $A_{key} = \{a_{Apply}, a_{UnshipPlan}, a_{MovePlan}, a_{HGRelease}, a_{UnshipWork}, a_{MoveWork}, a_{Confirm}, a_{CON}\}$ ,假定每个泳道4个资源,每个活动各有1个等待的实例。

在系统实施后,我们调查了用户的使用情况。对比以前

的系统 and 基于层次泳道流程最优化建模方法得到的流程所开发的系统,新系统的使用使得码头生产作业效率显著提高,且具有明显优势,同时大大改善了以往有的部门人力资源忙闲分布不均的情况。表2是在不改变码头原有部门设置和员工人数情况下的3项指标对比。

表2 系统部署后对比情况

对比项目	老系统	新系统
各业务完成时间	1~3 小时	0.8~2 小时
各部门员工分布标准差	1.304	0.837
员工平均满意度	80.91%	86.36%

注:表2中的结果均由实际数据计算得出,码头部门数为5,员工总数为11,每个员工最高满意度为100%。

**结束语** 基于层次泳道的最优化建模方法只需给出流程各活动的描述,便可根据活动间的推演关系自动构建流程全图,对可能流程进行层次泳道化,综合流程的执行代价和泳道的均衡度,从层次泳道化模型中选择最优的业务流程建模。同时,本文通过一个实例,介绍了一种结合遗传算法的解决方案。实际应用表明,该方法建立的业务流程能有效地均衡业务负载,提高流程执行效率。

## 参考文献

- [1] van der Aalst W M P. The application of Petri nets to workflow management [J]. The Journal of Circuits Systems and Computers, 1998, 8(1): 21-66
- [2] van der Aalst W M P. BASTEN T. Inheritance of workflows; an approach to tackling problems related to change [J]. Theoretical Computer Science, 2002, 270(3): 125-203
- [3] 范玉顺,李慧芳. 基于时间 Petri 网的工作流模型分析[J]. 软件学报, 2004, 15(1): 20-29
- [4] Keller G, Meinhardt S. SAP R/3 analyzer [J]. Business process reengineering based on the R/3 reference model, 1994, 43(2): 530-546
- [5] 陈冬梅,王忠群. 基于 UML 活动图的动态工作流过程模型的研究[J]. 安徽工程技术学院学报, 2009, 24(2): 61-63
- [6] 申利民,隋峰,等. 基于扩展 UML 活动图的工作流模型研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(2): 587-590
- [7] Goh A, Koh Y K, Domazet D S. ECA rule-based support for workflow [J]. Artificial Intelligence in Engineering, 2001(15): 37-46
- [8] 贺春林,滕云,彭仁明. 一种基于 ECA 规则的 Web Service 工作流模型的研究[J]. 计算机科学, 2009, 36(8): 112-115
- [9] Alonso G, Agrawal D, Abbadi A E, et al. Advanced transaction models in workflow context [C]// Proceedings of the International Conference on Data Engineering (ICDE). New Orleans: IEEE, 1996: 574-581
- [10] 齐祺,杨路明. 基于 Web 服务的工作流事物处理研究[J]. 电脑与信息技术, 2007(1): 25-28
- [11] Curtis B, Kellner M I, Over J. Process modeling [J]. Communications of the ACM, 1992, 35(9): 75-90
- [12] Reijers H A. Design and control of workflow processes; business process management of the service industry [C]// Lecture Notes in Computer Science 2617. Berlin: Springer-Verlag, 2003
- [13] Seidmann A, Sundararajan A. The effects of task and information asymmetry on business process redesign [J]. International Journal of Production Economics, 1997, 50(2/3): 117-128
- [14] Mitchell M. An introduction to genetic algorithms [M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 1996
- [15] 王小平,曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002