

文章编号: 1001-0920(2004)04-0393-04

# MTO 管理模式下钢铁企业生产合同计划建模与优化

刘士新<sup>1</sup>, 宋健海<sup>2</sup>, 唐加福<sup>1</sup>, 王梦光<sup>1</sup>

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 上海宝信软件股份有限公司 ERP 事业部, 上海 201900)

**摘要:** 基于对钢铁企业 MTO 管理模式下合同计划的编制策略、约束条件和优化目标的研究, 建立了合同计划优化模型. 模型综合考虑了拖期惩罚费用、设备能力均衡利用和库存成本等优化目标, 并采用加权法将多目标优化模型转换为单目标优化模型. 针对模型的特点设计了求解模型的特殊 PSO 算法. 以某钢铁企业的实际合同计划问题作为实例, 在算法不同参数组合下进行了系统的测试, 实验结果表明模型和算法是令人满意的.

**关键词:** 依订单生产; 合同计划; 多目标; 颗粒群最优化

**中图分类号:** C934      **文献标识码:** A

## Order planning modelling and algorithm for MTO production in steel plant

LIU Shi-xin<sup>1</sup>, SONG Jian-hai<sup>2</sup>, TANG Jia-fu<sup>1</sup>, WANG Meng-guang<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. ERP Business Department, Shanghai Baosight Software Limited Company, Shanghai 201900, China. Correspondent: LIU Shi-xin, E-mail: sxliu@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** An order planning optimizing model is formulated based on studies on the order planning strategies, constraints and objectives under make-to-order (MTO) management mode in steel plant. The multiple objectives including minimizing tardiness cost, balancing utility of capacities and minimizing inventory cost are taken into account in the model. The weighted-sum approach is used for transferring the multi-objective model into a single objective one. Specific particle swarm optimization (PSO) algorithm is designed to solve the model. Taking a practical order planning problem as instance, different parameter combinations are systemically tested for effectiveness and efficiency of the algorithm. The results show that the model and algorithm are satisfactory.

**Key words:** MTO; order planning; multi-objective; PSO

## 1 引言

现代钢铁企业为了迅速响应由用户拉动的市场需求变化, 纷纷采用先进的管理模式和计划方法, 以降低生产成本、提高客户服务水平, 从而最大限度地提高企业竞争力. 钢铁企业的 MTO 管理模式和计划方法正是为了适应这一新形式, 改进企业生产效率的一种有效方法. MTO 的含义是面向市场和客

户需求, 考虑企业生产能力和特点, 实现生产管理的最优化, 以求得经营和生产的优化运行, 达到产品交货快、质量好、成本低和服务好的目的.

## 2 问题背景

钢铁企业在 MTO 管理体制下, 典型的生产组织过程如下: 生产系统从销售系统接收到用户合同, 根据用户的质量需求进行工艺和质量的设计, 决定

收稿日期: 2003-06-03; 修回日期: 2003-09-02.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(70002009; 70301007); 国家 863 计划 CIMS 主题项目(2002AA412010); 辽宁省博士启动基金资助项目(20021011); 沈阳市自然科学基金资助项目(1022036-1-04).

**作者简介:** 刘士新(1968—), 男, 辽宁铁法人, 副教授, 博士, 从事制造执行系统、项目调度等研究; 王梦光(1936—), 女, 吉林省吉林市人, 教授, 博士生导师, 从事生产计划与调度、智能优化算法等研究.

用户合同所需通过的工序路径,同时制定合同在各个工艺点的物料需求数量、规格、质量标准.工艺和质量的设计保证了每件产成品都能满足用户的要求,但合同在各工序的生产时间则需要合理的合同计划和日生产计划来确定.合同计划的主要任务是根据合同的交货期、各生产工序上机组的生产能力等来安排一个合同的生产周期,即确定每道工序的生产时间,保证整条生产线的顺利生产.

合同计划的人工编制步骤如下:首先根据合同的交货期、工序通过时间表(合同在各工序的加工时间,以天为单位)计算合同在各工序的最晚、最早完成时间;然后综合考虑设备能力限制、库存能力限制、品种规格搭配限制,在最早至最晚加工时间区间内,选择每个合同在各工序的加工时间(以半旬为单位).合同计划的优化目标主要是:1)合同拖期惩罚费用最小;2)设备能力均衡利用;3)在制品/成品库存费用最低.

合同计划是钢铁企业生产管理的一个关键环节,一直受到国内外学者的研究和关注.文献[1]应用混合整数规划模型解决轧钢厂合同计划问题,目标是 minimized 合同总拖期.文献[2]对钢管厂热轧机组的生产过程进行分析,建立了合同分配模型,并进行了优化分析和实验.文献[3]建立了钢厂合同计划编制的单目标整数规划模型,针对模型特点设计了基于可重复自然数编码和三变异算子的遗传算法,得到了较好的计划效果.本文根据当前市场环境下钢铁企业合同计划的新需求,建立了制定合同计划的多目标优化模型,并设计了 PSO 算法对模型进行求解.

### 3 钢铁企业合同计划模型

#### 3.1 合同计划编制模型

假设合同在每个工序的生产时间不跨越阶段,即如果合同  $i(i=1, \dots, N)$  在工序  $j(j=1, \dots, J)$  的完成时间为  $t$ ,则认为合同  $i$  在工序  $j$  的加工过程都落在阶段  $t$  内.

记  $T$  为计划展望期;  $EF_j$  和  $LF_j$  分别为合同  $i$  在工序  $j$  的最早、最晚完成时间;  $D_i$  为合同  $i$  的交货期;  $p_{ij}$  为合同  $i$  在工序  $j$  的加工时间;  $S_{ij}^{\min}$  和  $S_{ij}^{\max}$  分别为合同  $i$  从工序  $j-1$  完成到工序  $j$  开始的最小、最大间隔时间;  $A$  为合同  $i$  单位重量拖期惩罚系数;  $B_j$  为工序  $j$  生产能力使用偏离目标消耗时的惩罚系数;  $G$  为工序  $j$  的单位重量在制品/成品库存费用;  $w_{ij}$  为合同  $i$  在工序  $j$  的生产量( $t$ );  $E_{jt}$  为工序  $j$  在阶段  $t$  内的最大生产能力( $t$ );  $E_{jt}$  为工序  $j$  在阶段  $t$  内的

生产能力目标消耗( $t$ );  $I_{jt}$  为工序  $j$  在阶段  $t$  内的在制品/成品库存水平( $t$ );  $I_{j0}$  为工序  $j$  计划初期库存水平( $t$ );  $I_j^{\max}$  为工序  $j$  在阶段  $t$  内的在制品/成品最大库存能力( $t$ ).则钢铁企业生产合同计划可以建立如下数学模型:

$$\min f_1(x_{ijt}) = \sum_{i=1}^N A w_{ij} \max \left( \sum_{t=EF_{ij}}^{LF_{ij}} x_{ijt} t - D_i, 0 \right), \quad (1)$$

$$\min f_2(x_{ijt}) = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T B_j \sum_{i=1}^N w_{ij} x_{ijt} - E_{jt}, \quad (2)$$

$$\min f_3(x_{ijt}) = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T K I_{jt}, \quad (3)$$

s. t.

$$\sum_{t=EF_{ij}}^{LF_{ij}} x_{ijt} = 1, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, J, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N w_{ij} x_{ijt} \leq E_{jt}, j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T, \quad (5)$$

$$I_{j0} + \sum_{i=1}^N \left( \sum_{q=1}^t w_{ij} x_{ijq} - \sum_{q=1}^t w_{ij} x_{i(j+1)q} \right) \leq I_j^{\max}, \quad (6)$$

$$S_j^{\min} \leq \sum_{t=EF_{ij}}^{LF_{ij}} t x_{ijt} - p_{ij} + 1 - \sum_{t=EF_{j-1}}^{LF_{j-1}} t x_{i(j-1)t} \leq S_j^{\max}, \quad (7)$$

$$x_{ijt} = \begin{cases} 1, & \text{合同 } i \text{ 在工序 } j \text{ 的完成时间为 } t, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (8)$$

$$i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T. \quad (8)$$

其中:目标函数(1)代表拖期惩罚费用最小;目标函数(2)代表设备能力均衡利用;目标函数(3)代表库存费用最小;约束(4)表示每个合同的每一工序必须且仅能在一个时间段完成;约束(5)表示每个阶段的设备使用能力不能超过设备最大生产能力;约束(6)表示各阶段各工序在制品/成品库存不能超过库存能力限制;约束(7)表示合同各生产工序间的时间关系;约束(8)表示变量的取值范围.

模型(1)~(8)属于多目标 0-1 规划问题.为了对模型进行有效的求解,本文采用加权方法将式(1)~(3)的多目标函数转化为单目标形式.根据现场调研,在实际编制合同计划时,对目标函数的重视程度是不同的.本文相应地选取各目标的权重系数为  $X_1, X_2, X_3$ ,于是,目标函数(1)~(3)就转换成如下形式:

$$\min f(x_{ijt}) = X_1 f_1(x_{ijt}) + X_2 f_2(x_{ijt}) + X_3 f_3(x_{ijt}). \quad (9)$$

于是,模型(4)~(8)和(9)转化为单目标 0-1 规划

问题. 设计计划展望期为一个月, 即包含 6 个半旬, 生产线包含 4 个工序, 计划合同数为 100 个. 则模型中变量个数最多为  $6 \times 4 \times 100 = 2400$  个, 约束个数为  $100 \times 4 + 4 \times 6 + 4 \times 6 + 100 \times 3 \times 2 = 1048$  个, 这一规模的 0-1 规划问题求解将是困难的.

### 3.2 合同计划预处理

为了降低问题的求解难度, 本文对模型(4)~(8)和(9)中的变量  $x_{ijt}$  作如下转换:

$$y_{ij} = \sum_{t=EF_{ij}}^{LF_{ij}} tx_{ijt}.$$

根据  $x_{ijt}$  的定义, 有  $EF_{ij} \leq y_{ij} \leq LF_{ij}$ , 且  $y_{ij}$  与  $x_{ijt}$  存在一一对应关系, 即

$$x_{ijt} = \begin{cases} 1, & y_{ij} = t; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

$$i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, J, EF_{ij} \leq t \leq LF_{ij}. \quad (10)$$

采用式(10)定义的转换过程后, 对于前面同样规模的问题, 模型中变量个数变为  $4 \times 100 = 400$  个, 而且由于约束(4)自然满足, 因此约束个数减少为  $4 \times 6 + 4 \times 6 + 100 \times 3 \times 2 = 648$  个. 可见, 问题的规模大大地降低. 尽管如此, 转换后的模型直接应用一般整数规划优化软件进行求解仍是困难的. 本文根据问题的特点, 设计了求解此模型的 PSO 算法.

## 4 PSO 算法

### 4.1 算法基本定义

PSO 算法起源于对鸟群觅食行为的研究, 由 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年首次提出<sup>[4,5]</sup>. 设在一个 D 维求解空间中, D 维向量  $Y_i = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{iD})$  代表 PSO 算法第 i 个颗粒(对应问题的一个解)的位置. 颗粒 i 在飞行过程中经过的最好解为  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ , 整个颗粒群中经历过最好解的颗粒编号为 g, 颗粒 i 的飞行速度为  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ . 则 PSO 算法在迭代过程中根据如下规则调整颗粒的飞行属性:

$$V_i^{n+1} = wV_i^n + c_1r_1^n(P_i^n - Y_i^n) + c_2r_2^n(P_g^n - Y_i^n), \quad (11)$$

$$Y_i^{n+1} = Y_i^n + V_i^{n+1}. \quad (12)$$

其中:  $M(i = 1, 2, \dots, M)$  为颗粒群的规模; n 为迭代次数;  $c_1$  和  $c_2$  分别为认知参数和社会参数;  $r_1^n$  和  $r_2^n$  是在  $[0, 1]$  区间均匀分布的随机数; w 是惯性系数. 现有研究表明, 较大的惯性系数有利于算法在整个求解空间的探索, 较小的惯性系数有利于提高算法

的局部搜索能力<sup>[6]</sup>. 因此本文对惯性系数的初始值设置较大, 然后采用线性衰减的方式变化. w,  $c_1$  和  $c_2$  的合理选择有利于平衡算法的探索能力和学习能力.

### 4.2 算法设计

PSO 算法最早用来求解无约束的实数优化问题, 但本文模型存在严格的不等式约束, 并且变量为整数形式. 因此, 本文针对模型特点设计了一种特殊的 PSO 算法.

通过对模型约束的分析发现: 约束(4)通过式(10)的转换后在求解过程中自然得到满足, 约束(5)和(6)在实际应用中约束较松; 对于约束(7), 虽然各合同各工序都有自己的最早、最晚完成时间区间  $[EF_{ij}, LF_{ij}]$ , 但同一合同不同工序的完成时间区间很可能重叠. 由于约束(7)的限制, 某合同的一个工序完成时间确定后, 其前序工序和(或)后序工序的完成时间区间会改变, 甚至当某合同某工序的完成时间确定得不合理时, 会导致前序工序和(或)后序工序的完成时间无法安排, 即导致不可行解的产生.

基于以上分析, 本文采用如下策略处理约束. 对于约束(5)和(6), 转换成如下形式:

$$P = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T V_1 \max \left\{ \left( \sum_{i=1}^N w_{ij} X_{ijt} - E_{jt} \right), 0 \right\} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T V_2 \max \left\{ \left( I_{j0} + \sum_{i=1}^N \left( \sum_{q=1}^t w_{ij} X_{ijq} - \sum_{q=1}^t w_{ij} X_{i(j+1)q} \right) - I_j^{\max} \right), 0 \right\}, \quad (13)$$

并加入到目标函数(9)中, 其中  $V_1$  和  $V_2$  分别为违反约束(5)和(6)的惩罚系数. 于是, 原问题可转换成具有如下目标函数的问题:

$$\min f(x_{ijt}) = X_1 f_1(x_{ijt}) + X_2 f_2(x_{ijt}) + X_3 f_3(x_{ijt}) + P. \quad (14)$$

对于约束(7), 在初始解的生成和算法迭代过程中, 采用淘汰不可行解的办法处理. 在初始解的产生过程中, 合同 i 在工序 j 的完成时间  $y_{ij}$  随机生成: 取正态分布随机数  $r \sim N((EF_{ij} + (LF_{ij} - EF_{ij})/2), (LF_{ij} - EF_{ij})/2)$ ,  $y_{ij}$  取在  $(EF_{ij}, LF_{ij})$  区间内最接近 r 的整数. 如果生成的初始解中某合同各工序完成时间不满足约束(7), 则对该合同重新生成各工序的完成时间. 重复以上过程, 直至生成 M 个初始可行解, 其中 M 为颗粒群规模.

根据以上处理, 本文设计的 PSO 算法流程如下(其中  $Vel_{\max}$  为颗粒在各方向的最大飞行速度,  $vo$

为初始惯性系数,  $\maxIter$  为最大迭代代数, 其他参数意义同前):

Step1: 初始化  $Vel_{\max}, w_0, g = 1, c_1 = c_2 = 2.0, M, \maxIter$ ;

Step2: 随机生成  $M$  个可行颗粒, 颗粒速度  $V_{id} \sim U(0, Vel_{\max}), d = 1, \dots, D$ ;

Step3: 依式(14) 计算对应解目标函数值, 初始化每个颗粒最好解为当前解;

Step4: For  $n = 1$  to  $\maxIter$

For  $i = 1$  to  $M$

$$V_i^{n+1} = wV_i^n + c_1r_{i1}(P_i^n - Y_i^n) + c_2r_{i2}(P_g^n - Y_i^n)$$

If  $V_{id} > Vel_{\max}, d = 1, \dots, D$

Then  $V_{id} = Vel_{\max}, d = 1, \dots, D$

If  $V_{id} < -Vel_{\max}, d = 1, \dots, D$

Then  $V_{id} = -Vel_{\max}, d = 1, \dots, D$

End For

For  $i = 1$  To  $M$

$$Y_i^{n+1} = Y_i^n + V_i^{n+1}$$

$y_{ij}(j = 1, \dots, J)$  取其在  $(EF_{ij}, LF_{ij})$  内最近的整数;

依式(7) 判断颗粒可行性, 淘汰不可行颗粒, 生成新颗粒代替;

依式(14) 计算颗粒对应解的目标函数值;

End for

更新  $P_i^n$  和  $P_g^n$ ;

$$w = w_0 - (w_0 - 0.4) \times n / \maxIter$$

End for

Step5: 输出  $P_g^n$  其目标函数值.

## 5 实验结果

为了测试模型和算法的优化效果及时间效率, 以某钢铁企业某段时间内的 51 个实际生产合同数据为例, 应用本文设计的模型和算法编制合同计划. 算法应用 Java 语言编写, 运行于使用 Windows 2000 操作系统的 Pentium E (1G/ 128M) PC 机上. 算法参数设置如下: 颗粒群规模  $M$  分别取 {50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400}, 最大迭代代数  $\maxIter = 2000$ , 最大速度  $Vel_{\max} = 2$ , 惯性系数初始值为  $w_0 = 1.0, c_1 = c_2 = 2.0$ , 违反约束惩罚系数  $V_1 = V_2 = 10$ .

实验中, 在每种  $M$  取值下算法运行 10 次. 为进

一步分析 PSO 算法的有效性, 试验中随机生成了 800 000 个解. 实验结果统计如表 1 所示. 其中: 第 2 列是不同  $M$  值下算法收敛时的平均迭代次数; 第 3 列是不同  $M$  值下算法最好解目标函数(依式(9) 计算) 的平均值; 第 4 列是不同  $M$  值下算法获得的最好解目标函数最小值; 第 5 列是不同  $M$  值下算法每次平均运行 CPU 时间. 表 1 中最后一行是随机生成解的各项统计值. 由表 1 可见, 当颗粒群规模为 200 和 400 时, 算法获得了最好解. 当颗粒群规模为 400 时, 算法获得的最好解目标函数平均值最小. 与随机方法比较, 本文算法优化效果明显, 在各种  $M$  的取值下, 算法在迭代 1 000 次以内都能收敛. 图 1 显示了当  $M = 400$  时, 获得最好解的一次算法运行过程. 其中:  $^{\circ}$  为代内目标函数最好值;  $^{\bullet}$  为代内目标函数平均值.

表 1 试验结果统计

M	平均收敛代数	平均值	最小值	CPU/s
50	814.5	1 681.9	1 525	56.405
100	830.2	1 626.8	1 435	113.048
150	906.5	1 494.5	1 405	172.843
200	877.2	1 543.2	1 360	225.275
250	862.9	1 503.5	1 405	278.786
300	819.8	1 595.7	1 455	331.826
350	828.5	1 577.6	1 435	388.723
400	857.8	1 486.4	1 360	444.909
800 000	1	2 318.3	2 020	941.003

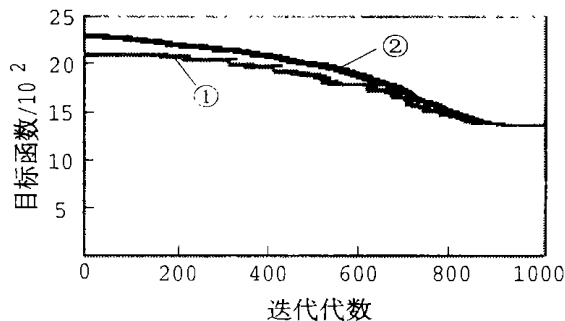


图 1  $M = 400$  时算法的一次执行过程

将本文方法编制的合同计划与该企业实际应用的合同计划在拖期惩罚费用、设备能力均衡利用和库存费用等几方面指标进行对比, 结果表明: 合同拖期惩罚费用与现场计划相当, 在设备能力均衡利用和库存费用方面较现场计划有明显改进.

(下转第 401 页)

的采样周期整合为基准周期的  $2^k$  倍, 则  $A = 4.5 > r = 4$ , 说明在相同的带宽条件下, 该调度算法无法实现对所有控制闭环的调度. 若要实现对该 NCSs 的可行调度, 只能通过提高对带宽资源的需求, 或改变系统结构减少传输节点数量, 这必然造成设计和运行成本的增加, 不够经济.

## 5 结 语

借助“窗口”概念描述网络带宽资源, 根据令牌牌的运行特性、网络带宽资源状况(即窗口数量)和 NCSs 的系统性能要求, 本文研究了 NCSs 的可调度条件, 提出折衷网络带宽资源占用和传输周期抖动的两步优化调度算法, 在可调度条件下确定 NCSs 中各控制闭环的采样周期; 将系统周期抖动最小的带宽优化调度归结为在一个最小倍周期时段内各控制闭环节点数据传输的排序问题. 仿真试验证明, 作者提出的抖动优化调度算法既合理、充分地利用了网络资源, 使系统具有较高的网络资源利用率, 又在满足系统时延要求的同时实现了采样数据的周期抖动优化调度, 从而保证了系统的动态性能要求.

## 参考文献(References):

- [1] Walsh G C, Beldiman O, Bushnell L G. Asymptotic behavior of nonlinear networked control systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2001, 46(7): 1093-1097.
- [2] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control system [J]. IEEE Contrd Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.
- [3] Coutinho F, Fonseca J, Barreiros J, et al. Using genetic algorithms to reduce jitter in control variables transmitted over CAN [EB/OL]. <http://www.ieeta.pt/~jaf/papers/Ano2000/icc-coutin.pdf>, 2003-09-25.
- [4] Hong S H. Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems [J]. IEEE Trans on Control System Technology, 1995, 3(2): 225-231.
- [5] Hong S H. Bandwidth allocation scheme for cyclic-service fieldbus networks [J]. IEEE Trans on Mechatronics, 2001, 6(2): 197-204.
- [6] Ray A, Halevi Y. Integrated communication and control Systems: Part I-Analysis and Part II-Design consideration [J]. ASME J of Dynamic System Measurement & Control, 1988, 110: 367-381.

(上接第 396 页)

## 6 结 语

本文基于钢铁企业在 MTO 管理模式下的合同计划的编制方法和优化目标, 建立了钢铁企业合同计划优化模型, 基于进化计算的最新技术, 设计了求解模型的 PSO 算法. 与企业实际应用的合同计划相比, 本文方法编制的合同计划在设备能力均衡利用和库存费用指标上有明显改进. 实验中发现, 在不同的颗粒群规模下, PSO 算法在 1000 代以内都会收敛. 针对这种情况, 可以进一步改进算法的控制策略和控制参数, 减慢算法的收敛速度, 提高算法的优化效果.

## 参考文献(References):

- [1] Redwine C N, Wismer D A. A mixed integer programming model for scheduling orders in a steel mill [J]. J of Optimization Theory and Applications, 1974, 14(3): 305-318.
- [2] 滕学. 钢管厂热轧机组产品结构模型、合同分配模型及其优化分析 [J]. 系统工程理论与实践, 1985, 5(2): 40-48.

(Teng X. Model and optimizing analysis for hot rolling product structure and order assigning in pipe plant [J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 1985, 5(2): 40-48.)

- [3] 张涛, 王梦光, 唐立新. 钢厂合同计划的模型与算法 [J]. 控制理论与应用, 2000, 17(5): 711-715.  
(Zhang T, Wang M G, Tang L X. The model and algorithm for the order planning of the steel plant [J]. Control Theory and Applications, 2000, 17(5): 711-715.)
- [4] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [A]. Proc IEEE Int Conf on Neural Networks [C]. Piscataway: IEEE Service Center, 1995. 4: 1942-1948.
- [5] Eberhart R C, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory [A]. Proc of the Sixth Int Symposium on Micro Machine and Human Science [C]. Piscataway: IEEE Service Center, 1995. 39-43.
- [6] Eberhart R C, Shi Y. Particle swarm optimization: Developments, applications and resources [A]. Proc Congress on Evolutionary Computation [C]. Piscataway: IEEE Service Center, 2001. 81-86.