

多品种、小批量离散型制造企业生产车间 零件/机床成组方法研究*

刘颖, 宋光辉, 谢玉荣, 魏金江

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 针对多品种、小批量离散型制造企业生产车间零件种类多、可选加工工艺路线集合空间大等特点, 从零件加工工艺路线角度出发, 构建车间零件加工的物流成本和时间函数模型。利用遗传算法良好的收敛性、强全局寻优能力和径向基函数神经网络(RBFNN)较高的鲁棒性、数据分类能力强的优势, 提出 GA-RBFNN 混合算法, 解决了零件在其可行加工工艺路线集合内的最佳分配和零件/机床最优分组问题。最后, 结合实例验证了该模型和方法的有效性和可行性。

关键词: 多品种小批量; 生产车间; 遗传算法; RBF 神经网络; 零件成组; 机床成组

中图分类号: TH163

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)02-0546-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.02.038

Part/machine grouping method study for multi-variety & small-batch discrete manufacturing enterprise production workshop

LIU Ying, SONG Guang-hui, XIE Yu-rong, WEI Jin-jiang

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: There is a variety of parts which have many complex processing routes in the production workshop for multi-variety & small-batch discrete manufacturing enterprises. Aiming at the former questions, the paper from parts processing routes' angle constructed the mathematical function model of cost and time. Applying the strong convergence, good global optimization ability of GA and high robustness and data classification ability of RBFNN, this paper put forward the GA-RBFNN hybrid algorithm. It solved the problem of the optimal parts distribution in the feasible processing route sets and parts/machine grouping. Then it calculated the match degree of parts/machine grouping. Finally, demonstrated the feasibility of the model and method by the actual case.

Key words: multi-variety and small-batch; production workshop; genetic algorithm; RBF neural network; part grouping; machine grouping

0 引言

多品种、小批量离散型制造企业生产车间零件种类、加工工艺路线多,且工艺路线间存在较大的相似性,而将车间各种零件在其可选加工工艺路线集合下进行合理的分配和成组,重新布置车间生产设备,有效划分制造单元,对降低车间物流成本和缩短物流时间、保证产品质量、降低价格和快速响应客户需求、提高市场竞争力都有着重要的意义。有关零件/机床成组问题研究,主要通过建立零件—机床关联矩阵^[13],采用改进的 FCM 算法^[4]、遗传算法和 BP 网络相结合混合优化算法^[5]解决了零件/机床成组和新零件的插入问题,并给出了零件和机床聚类成组的评价指标。许多学者在研究中考虑到加工时间、批量、机器能力^[6]约束条件以及零件特点和安装条件等因素^[7],建立数学模型,采用改进遗传算法^[8]、模拟退火算法^[9]、粒子群算法^[10,11]或者混合优化算法(QFHN 算法^[12])等方法

进行求解,划分制造单元。以上研究实现了零件合理分组或者制造单元划分,但对零件加工工艺路线物流因素影响的研究并不深入。本文根据多品种、小批量制造型企业生产车间的特点,从工艺路线出发,将 GA 和 RBFNN 各自优点结合起来,建立了车间物流动态参数,构建了零件物流成本和时间函数的非线性、多目标多约束数学模型,采用遗传算法和径向基函数神经网络算法相结合的混合算法进行分析求解,实现车间零件、加工设备的合理分组,并且提出了具体衡量分组效果的指标。

1 基于 GA-RBFNN 混合算法数学模型

针对多品种、小批量离散型制造企业生产车间零件、加工工艺路线多等特点,本文在制造能力约束、车间运输能力等约束条件下,以车间各种零件在其加工工艺路线集上的物流成本和物流时间最小为优化目标,选择最优加工工艺路线集合内零件分配量并实现零件/机床分组,并以零件/机床组的匹配度来衡量分配成组效果,从而利于组织生产。模型涉及车间零件物

收稿日期: 2011-07-22; 修回日期: 2011-09-05 基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(CDJZR10 11 00 14)

作者简介: 刘颖(1973-),女,重庆人,副教授,硕导,主要研究方向为网络化制造、大规模定制、电子商务(ljyfb@sina.com);宋光辉(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为网络化制造、车间物流管理、企业信息化;谢玉容(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为车间物流管理、制造执行系统研究;魏金江(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为车间物流管理、制造执行系统研究。

流参数如表 1 所示。

表 1 模型所涉及参数

相关参数	内容描述
V	某加工制造车间零件种类数
$N(i)$	工件 i 种类的个数, $i=1,2,\dots,v$
$R(i)$	加工 i 种零件的工艺路线集合
$P(i,j)$	第 i 种零件采取 $R(i)$ 中第 j 条加工工艺路线的零部件个数 $j=1,2,\dots,N(i);k=1,2,\dots,P(i)$
m	完成零件加工的加工机床, $m=1,2,\dots,M$
$s(p)$	采用 r 生产线加工 p 个 i 种零件所需要的机床集合, $i=1,2,\dots,v;s(p)\subseteq M$
$MT(p,m)$	第 i 类零件采取 r 工艺路线在机床 m 上加工的单位加工时间, $m\subseteq s(i,r,p)$
$MC(p,m)$	第 i 类零件采取 r 工艺路线在机床 m 上的单位加工成本, $m\subseteq s(i,r,p)$
$F(m)$	机床 m 在交货期 d 内的加工能力,用于在规定的期限内完成产品的加工
d	订单规定的交货期
A_t	第 t 个零件组, $t=1,2,\dots,F$
B_t	第 t 个零件组所对应的机床组, $t=1,2,\dots,F$
(M_i, M_j)	机床 M_i 与 M_j 组成的机床对,其间的物流量作为 RBFNN 的输入向量
F	车间零件/机床组组合个数
$Td(m,n)$	交货期 d 内机床 m,n 之间的运输能力
$ET(p,m,n)$	第 i 类零件采取 r 工艺路线在机床 m,n 之间的额外单位物流成本, $m,n\subseteq s(p)$
$TT(p,m,n)$	第 i 类零件采取 r 工艺路线在设备 m,n 之间的单位运输时间, $m,n\subseteq s(i,r,p)$; 根据零件—机床分组结果调整 $TT(p,m,n)$, 具体如下所述: a) $ET(p,m,n) = E(p,f), m,n\subseteq f$, 为机床组 B_f 内任两个机床的运输时间, $f=1,2,\dots,F$; b) $ET(p,m,n) = E(p,x,y), m\subseteq x, n\subseteq y$ 。当 m,n 为跨机床组 B_x, B_y 时的物流成本, $x,y=1,2,\dots,F$ 且 $x\neq y$
$AT(p,m,n)$	第 i 类零件采取 r 工艺路线在设备 m,n 运输路线间单位所需额外时间, 比如检查、等待、装卸等, $m,n\subseteq s(i,r,p)$
$CT(p,m,n)$	第 i 类零件采取 r 工艺路线在机床 m,n 之间的单位运输成本, $m,n\subseteq s(i,r,p)$ 根据零件—机床分组结果调整 $CT(p,m,n)$, 具体如下所述: a) $CT(p,m,n) = C(p,f), m,n\subseteq f$ 为机床组 B_f 内任两个机床的物流成本, $f=1,2,\dots,F$; b) $CT(p,m,n) = C(p,x,y), m\subseteq x, n\subseteq y$ 。当 m,n 为跨机床组 B_x, B_y 时的物流成本, $x,y=1,2,\dots,F$ 且 $x\neq y$

建立多目标多约束数学模型为

$$\min f(c) = \sum_{i=1}^V \sum_{j=1}^{R(i)} \{ P(i,j) [\sum_{m \in s(p)} MC(p,m) + \sum_{m \in s(p)} \sum_{n \in s(p)} (ET(p,m,n) + CT(p,m,n))] \} \quad (1)$$

$$\min f(t) = \sum_{i=1}^V \sum_{j=1}^{R(i)} P(i,j) \sum_{m \in s(p)} MT(p,m) + \sum_{m \in s(p)} \sum_{n \in s(p)} TT(p,m,n) + AT(p,m,n) \quad (2)$$

$$s. t. \sum_{j=1}^{R(i)} P(i,j) = Ni, i=1,2,\dots,V \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^V \sum_{j=1}^{R(i)} P(i,j) MT(p,m) \leq F(m) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^V \sum_{j=1}^{R(i)} P(i,j) TT(p,m,n) \leq Td(m,n) N_{ij} \quad (5)$$

$$N(i) \geq 0 \text{ 且为整数} \quad (6)$$

式(1)使得加工成本、运输成本和额外物流成本也即车间物流成本最小。根据零件—机床分组结果估计零件在各机床组内、外的物流成本,调整 $CT(p,m,n)$, 即机床组内部物流成本和跨机床组物流成本。统一机床组内部的物流成本,加大跨机床组的物流成本的惩罚,即, $CT(p,x,y) = wCT(p,f), w \geq 1$, 使车间物流成本最小。式(2)使得零件加工时间、运输时间和额外所需时间也即车间零件物流时间最小,根据零件的分配及

零件—机床成组情况,估计机床组内、外加工机床对之间的运输时间,使车间物流时间最小,同样如式(1)所述, $TT(p,m,n)$ 可分为两部分:机床组内部的机床对之间的运输时间和跨机床组的机床对之间的运输时间, $TT(p,x,y) = wTT(p,f), w \geq 1$ 。式(3)是指每种零件在其允许的工艺路线上的分配量总和等于该种类零件总和。式(4)在交货期内分配到该加工机床的总加工任务不能超过其加工能力。式(5)在交货期内分配到该机床对之间的运输任务不能超过其运输能力。式(6)是指每种零件在其可行加工工艺路线上的分配量为大于等于 0 的整数。

该数学模型属非线性、多目标多约束函数优化问题,且对模型中动态参数 $TT(p,m,n)$ 、 $CT(p,m,n)$ 的衡量,用传统的优化方法较难解决。本文引入 GA-RBFNN 混合算法,该方法具有良好的鲁棒性、数据分类能力强以及收敛速度快、在大规模解空间内自动寻求全局最优解能力强等优点,采用该方法能较好地解决该问题。

2 GA-RBFNN 混合算法

RBFNN^[13] 结构通常分三层:输入层、隐含层和输出层,它能够逼近任意的非线性函数,处理系统内在的难以解析的规律性,学习收敛速度快,很好地实现数据分类等。同时,GA 将问题中的可能解看做是群体的一个染色体,对每个个体进行编码组成初始群体,群体中个体按照适应度施加遗传操作,反复迭代优化得到更优的群体,逐步逼近最优解。它具有直接对结构对象进行操作、内在的隐并行性和较好的全局寻优能力,自动获取和指导优化的搜索空间,自适应调整搜索方向等特点。GA-RBFNN 混合将二者优点结合起来,具有收敛速度快、数据分类能力强且准确、良好的鲁棒性和较强的自动全局寻优能力。

该混合算法实现车间零件分配及零件/机床成组的数学模型步骤描述如下:

a) 初始含 NP 个个体的种群 $X(0)$, 并对每个个体进行编码。设 $N(i)$ 为零件 i 种类的个数, $P(i,j)$ 表示第 i 种零件采取 $R(i)$ 中第 j 条加工工艺路线的零件个数。每种零件在各可行的加工工艺路线上的分配数量为 $(p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1n}, \dots, p_{R(i)})$, 以该种零件在其可行加工工艺路线数的分配数量进行整数编码, p_i 基因片段编码记为 $(g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{ij}, \dots, g_{iR(i)})$, $j=1,2,\dots,R(i)$; 该条染色体记做 $(g^1, g^2, \dots, g^n, \dots, g^v)$, v 为零件种类数, 设进化代数 $t:0$ 。

b) 初始种群筛选。判断初始种群中每个个体是否满足式(3), 若满足, 则进入下一步, 否则返回 a)。

c) 车间物流动态参数确定。设生产车间加工机床 M , 数量为 n , 构建机床配对组合个数为 C_n^2 , 每个机床对记为 $(M_i, M_j), i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,n$ 。根据初始种群中零件的分配情况, 统计各 (M_i, M_j) 之间的物流属性值, 即物流量大小, 并量化输入向量, 输入 RBFNN 进行训练和测试, 得出零件和机床的所属组。据此衡量零件/机床组内、外的物流成本和物流时间。RBFNN 的相关参数^[14] 具体描述如下:

(a) RBFNN 结构。RBFNN 是一种三层前馈网络, 第一层为输入层, 输入点为网络输入矢量, 本文中输入点数为 1; 第二层为隐含层, 本文采取 K-means 聚类算法确定 RBFNN 的中心和隐层神经元的个数; 第三层为输出层, 输出节点个数选为 3,

即分组数。

(b)RBFNN 映射关系。首先是输入空间到隐含层空间的非线性变换层,第 i 隐单元的 RBF 函数形式采用高斯函数,它的可调参数包括中心和宽度参数。其次是从隐含层空间到输出层空间的线性合并层,第 j 个输出为 $y_j = \sum_{i=1}^p h_i w_{ij}$, p 为隐单元个数, $j = 1, 2, 3$ 。

(c)RBFNN 训练准则。在 RBFNN 训练过程中,参数训练的焦点集中在 RBF 的中心和宽度,中心的确定采用 a) 中的 K-means 聚类算法;宽度的确定采用固定法,当中心由训练数据确定后,RBF 的宽度可由 $\sigma = \frac{d}{\sqrt{2M}}$ 确定,其中 d 为所有类的最大距离, M 为 RBF 中心的数目。

d) 个体评价。将单位时间内车间物流成本作为适应度函数,计算获估价种群 $X(t)$ 中每一个个体的适应度值 $f(x) = \frac{f(c)}{f(t)}$, 然后采用界限构造法进行适应度的尺度变换,

$$Fit(f(x)) = \begin{cases} c_{max} - f(x) & f(x) < c_{max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$
 ,式中, c_{max} 为 $f(x)$ 的最大估计值。

计算种群中每个个体的适应度值,判断是否达到了终止准则要求的迭代次数,满足就停止迭代,输出最优结果,然后计算零件组—机床组的匹配度(衡量零件分配量和分组的质量),计算公式如下: $I(A_i, B_i) = \frac{L_{at}}{L_{gt}}$, L_{at} 为零件组 A_i 在机床组 B_i 内的物流量; L_{gt} 为该完成零件组 A_i 加工的总物流量。否则进入下一步。

e) 选择。选择策略采用轮盘赌策略,令 $PP_i = \sum_{j=1}^i p_j$, $PP_0 = 0$, 其中 PP_i 为累计概率, p_i 为个体的选择概率,其计算公式为 $p_i = \frac{Fit(f(x_i))}{\sum_{i=1}^{NP} Fit(f(x_i))}$, 每次转轮时,随机产生 01 的随机数 r , 当 $PP_{i-1} \leq r < PP_i$ 时选择个体 i 。

f) 交叉。确定交叉的算法和交叉概率,交叉算法选用中间重组,子个体 = 父个体 1 + $a \times$ (父个体 2 - 父个体 1), a 是比例因子,由 $[-d, 1 + d]$ 上均匀分布的随机数产生,一般 $d = 0.25$, 子代的每个变量均产生一个 a 。交叉的概率 P_c 随适应度自动改变,其计算公式为

$$P_c = \begin{cases} \frac{k_1 (fit(f)_{max} - fit)}{fit(f)_{max} - fit} & fit \geq fit_{avg} \\ k_2 & fit < fit_{avg} \end{cases}$$

其中: $fit(f)_{max}$ 为群体中的最大适应值; fit_{avg} 为群体平均适应值; fit 为交叉的两个个体中较大的适应度值; k_1, k_2 为常数。

g) 变异。确定变异的算法和变异概率,变异算法选用实值变异, $X' = X \pm 0.5L\Delta$, 其中, $\Delta = \sum_{i=0}^m \frac{a(i)}{2^i}$, $a(i)$ 是以概率 $\frac{1}{m}$ 取值 1, 以概率 $1 - \frac{1}{m}$ 取值 0, 通常 $m = 20$; L 为变量的取值范围。

变异的概率 P_m 随适应度自动改变,其计算公式为

$$P_m = \begin{cases} \frac{k_3 (fit(f)_{max} - fit')}{fit(f)_{max} - fit} & fit' \geq fit_{avg} \\ k_4 & fit' < fit_{avg} \end{cases}$$

其中: $fit(f)_{max}$ 为群体中的最大适应值; fit_{avg} 为群体平均适应

值; fit' 为要变异个体的适应度值; k_3, k_4 为常数。

h) 产生新一代种群。由选择、交叉和变异产生新一代的种群,返回 c)。

GA-RBFNN 混合算法实现步骤如图 1 所示。

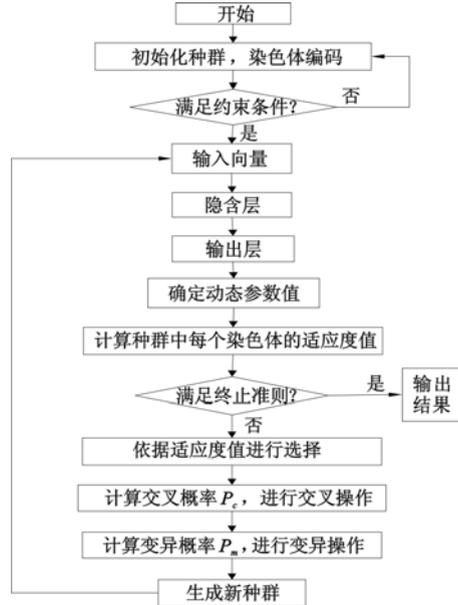


图1 零件/机床成组混合算法的实现

3 实例验证及分析

本文以重庆某门业制造企业生产车间为例进行验证,该车间有 11 台可用的加工设备,车床(6,7,11)、钻床(1,3,4)、磨床(5,8)、铣床(2,9,10),共有六种零部件, $N1 = 23, N2 = 30, N3 = 12, N4 = 17, N5 = 6, N6 = 20$, 零件加工数量及工艺路线集合如表 2 所示。

表 2 工艺流程

零件种类	数量/个	工艺路线编号	工序号(机床)
N1	23	1-1	6-7
		1-2	6-11
		1-3	6-7-2
N2	30	2-1	5-1-11
		2-2	8-3
		2-3	4-3
N3	12	3-1	11-9-6
		3-2	6-10
N4	17	3-3	7-2
		4-1	3-4
N5	6	4-2	2-3-9
		5-1	7-1-9
N6	20	5-2	7-4-2
		6-1	5-11-9
		6-2	8-7-11-10

按照该混合算法进行计算求解,初始种群数目为 100, 杂交常数 k_1 取 0.4, 杂交常数 k_2 取 0.9, 变异常数 k_3 取 0.02, 变异常数 k_4 取 0.05, 离散精度取 0.01, 最大迭代进化数为 400, 输入神经元数为 1, 隐节点数为 6, 输出神经元数为 3。用 MATLAB R2008a 进行仿真,满足迭代次数后,经过计算得出最优的零件分配量、零件/机床组。算法实现了零件在其可行加工工艺路线上的最佳分配,并以其分配量量化值及其所属机床组物流量量化值为纵、横坐标,得到最佳的分配成组及所属机床组的映射,本文组数取 3,结果如图 2 所示。经过优化的该生产车间零件物

流的最小成本和最少时间的计算结果如图 3 所示。

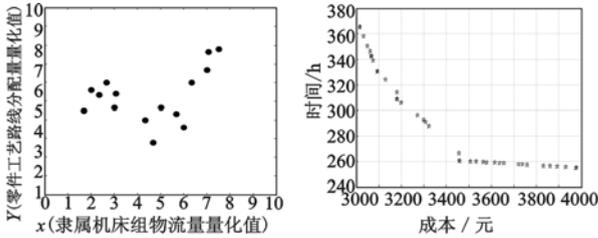


图2 零件分配成组和对机床组 图3 该生产车间零件物流成本和时间计算结果

由图 3 可知,曲线的左端和右端的解都只能满足一个目标较好,另一个目标较差。考虑到需求多变、企业内部问题导致推迟生产等原因,设置生产车间物流在最迟交货期内的物流宽松系数 $\lambda, f(t) = \frac{d}{1+\lambda}$ 。本文 $d = 380$ h,取 $\lambda = 0.2$,由图 3 可得最优结果为(3180,316)。用 N_{ij} 表示第 i 种零件采用 j 种工艺路线加工的零件数量,所有零件在其可行加工工艺路线上的最佳分配是: $N_{11} = 5, N_{12} = 10, N_{13} = 8; N_{21} = 13, N_{22} = 10, N_{23} = 7; N_{31} = 4, N_{32} = 6, N_{33} = 2; N_{41} = 10, N_{42} = 7; N_{51} = 4, N_{52} = 2; N_{61} = 14, N_{62} = 6$ 。零件分配、零件/机床分组及其之间的匹配度如表 3 所示。

表 3 最佳零件分配、分组及其匹配度

零件组	分配量	匹配度		
		机床组 B1 (2,3,4,7)	机床组 B2 (6,8,10)	机床组 B3 (1,8,9,11)
A ₁	N_{13}	8	0.72	0.28
	N_{42}	7	0.66	0.34
	N_{52}	2	1.00	
	N_{33}	2	1.00	
	N_{41}	10	1.00	
A ₂	N_{23}	7	1.00	
	N_{11}	5	0.46	0.54
	N_{12}	10		0.69
	N_{32}	6		1.00
	N_{22}	10	0.37	0.62
A ₃	N_{62}	6	0.22	0.57
	N_{31}	4		0.32
	N_{51}	4	0.39	0.61
	N_{21}	13		1.00
	N_{61}	14		1.00

根据优化结果,则零件组可分组为 A1 ($N_{13}, N_{42}, N_{52}, N_{33}, N_{41}, N_{23}$)、A2 ($N_{11}, N_{12}, N_{32}, N_{22}, N_{62}$)、A3 ($N_{31}, N_{51}, N_{21}, N_{61}$);机床组可分组为 B1(2,3,4,7)、B2(6,8,10)、B3(11,1,9,5)。经过该混合算法得到的该生产车间所有零件物流成本为 3 180,车间所有零件物流时间为 316,在降低该生产车间零件的物流成本和缩短物流时间上取得了良好效果。(A1, B1)、(A2, B2)、(A3, B3)的平均匹配度分别为 0.897、0.684、0.8225,分组质量良好。

为了证明 GA-RBFNN 混合方法在寻求最优解的优越性,本文选取 GA、BPNN、PSO 在迭代次数、仿真时间、车间零件物流成本、车间零件物流时间四个方面进行对比,结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出,从迭代次数、仿真时间、车间物流成本区间、车间物流时间区间四个方面来看,GA-RBFNN 混合算法均优于其他三种算法。其中,车间物流时间区间跨度为 140(大于其他三种算法),为应付紧急订单、突发状况等提供了较大的柔性空间。在最优取值上,GA-RBFNN 的(3180,316)和 BPNN 的(3800,300)与 PSO 算法最佳取值为(3560,310)相比,

物流时间相差 16 和 6,但成本相差 620 和 380。所以取(3 180, 316)为最优取值,证明了本文提出的 GA-RBFNN 混合算法的优越性。

表 4 GA-RBFNN 与其他算法结果对比

算法	迭代次数	仿真时间/s	物流成本区间/元	物流时间区间/h	最佳取值
GA-RBFNN	400	923.5	[3000,4000]	[240,380]	(3180,316)
GA	467	1429.1	[3500,4500]	[250,390]	(3680,320)
BPNN	683	1172.3	[3700,5000]	[270,390]	(3800,300)
PSO	513	1006.8	[3300,4100]	[260,370]	(3560,310)

4 结束语

本文针对多品种、小批量离散型制造企业生产车间零件种类多、可选加工工艺路线集合空间大等问题,从零件的加工工艺路线角度出发,构建了车间物流成本和时间数学模型,针对此问题提出了 GA-RBFNN 混合算法,优化了车间物流动态参数,实现了零件在其可行加工工艺路线集上的最优分配、零件/机床组最优划分问题,并提出了零件/机床成组质量评价指标。最后,结合重庆某门业制造企业生产车间,验证了该模型和方法的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] YANG M, YANG J. Machine-part cell formation in group technology using a modified ART1 method[J]. *European Journal of Operational Research*,2008,188(1):140-152.
- [2] 王东成,何卫平.神经网络在制造单元构建中的研究与应用[J]. *中国机械工程*,2006,17(10):1040-1043.
- [3] 王国新,阎艳.模糊神经网络与启发式算法相结合的制造单元构建方法[J]. *计算机集成制造系统*,2008,14(11):2176-2183.
- [4] 李杰,王云峰.基于模糊技术的制造单元构建方法研究[J]. *计算机集成制造系统*,2004,10(12):1562-1566.
- [5] 常建娥,刘飞.基于工艺流程的零部件成组方法及其实现[J]. *武汉大学学报:工学版*,2008,41(4):92-95.
- [6] ZOLFAGHARI S,LIANG M. A new genetic algorithm for the machine/part grouping problem involving processing times and lot sizes[J]. *Computers & Industrial Engineering*,2003,45(4):713-731.
- [7] GONG Bing-zhou. The processing of parts with group technology in an individual CNC machining center[J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2002,129(1-3):645-648.
- [8] TARIQ A,HUSSAIN I,GHAFOOR A. A hybrid genetic algorithm for machine-part grouping[J]. *Computers & Industrial Engineering*,2009,56(1):347-356.
- [9] 刘世平,魏迎军.基于模拟退火算法的敏捷化制造单元重构方法[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*,2003,31(11):58-60.
- [10] 王素欣,高利.基于粒子群优化的制造单元重构研究[J]. *现代制造工程*,2007(1):76-79.
- [11] 王雷,唐敦兵.基于粒子群算法的研究的制造单元聚类研究[J]. *计算机集成系统*,2009,15(2):328-332.
- [12] ATEME-NGUEMA B, DAO T M. Quantized hopfield networks and tabu search for manufacturing cell formation problems[J]. *Production Economics*,2009,121(1):88-98.
- [13] 孙丹,万李明.一种改进的 RBF 神经网络混合学习算法[J]. *吉林大学学报:理学版*,2010,48(5):817-821.
- [14] 钟路,饶文碧,邹承明.人工神经网络及其融合技术应用研究[M].北京:科学出版社,2007:20-25.