

面向订单生产的制造单元动态重构方法研究

Study on Dynamic Reconfiguration Approach of Manufacturing Cell for Make-to-order

韩文民¹ 曾里义¹ 魏允德² 裴春¹ 程龙成¹

(江苏科技大学经济管理学院¹,江苏 镇江 212003;湖南长丰汽车塑料制品有限公司²,湖南 永州 425000)

摘要: 为提高单元制造系统的灵活性和敏捷性,提出了面向订单生产情况下的制造单元动态重构的总体框架,设计了单元内部零件-设备可动态重组的优化算法。在满足约束的前提下,建立了以最小加工成本和最大生产工艺能力系数为目标的设备选择数学模型;同时,考虑重构成本和重构后带来的收益大小,引入新的相似系数,实现了新零件-设备的快速重组。最后,以某企业机加工车间为例,验证了算法的有效性。

关键词: 虚拟制造单元 动态重构 相似系数 聚类算法 资源选择

中图分类号: TH163 **文献标志码:** A

Abstract: In order to enhance the flexibility and agility of the cellular manufacturing system, the general framework of dynamic reconfiguration of the manufacturing cell for make-to-order is proposed, and the dynamically re-configurable optimization algorithm for the part-device inside the cell has been designed. The mathematical model that with minimum producing cost and maximum coefficient of process capability as the goal is established under the condition of constraints satisfaction. In addition, new similarity coefficient is introduced with consideration of reconfiguration cost and the benefits after reconfiguration for achieving reconfiguration for new part-device. With the workshop in certain enterprise as example, the effectiveness of this algorithm has been verified.

Keywords: Virtual manufacturing cell Dynamic reconfiguration Similarity coefficient Clustering algorithm Resource selection

0 引言

在面向订单的多品种、小批量生产环境中,产品品种繁多、批量组合复杂和需求变动频繁的特点在很大程度上限制了固定制造单元模式的推广和实施。虚拟制造单元在逻辑上的一致性以及在物理上的固定,可以避免机床的经常性移动;虚拟制造单元充分结合了车间加工和制造单元的优点,能够适应市场动态多变的需求及客户的个性化要求,实现面向订单生产的多品种、小批量生产^[1]。

1 动态重构的总体框架

对于一般制造单元的构建,国际上已提出不少方法和策略^[2],如数学规划方法、遗传算法和分步策略等。由于这些方法和策略是面向长期生产需求的,没有考虑工艺路线的多样性,并且过度强调单元加工的完整性,造成了设备的冗余,降低了设备的利用率^[4],

所以无法完全满足面向订单生产的制造单元动态重构的需要。

制造单元动态重构的总体流程如图1所示。

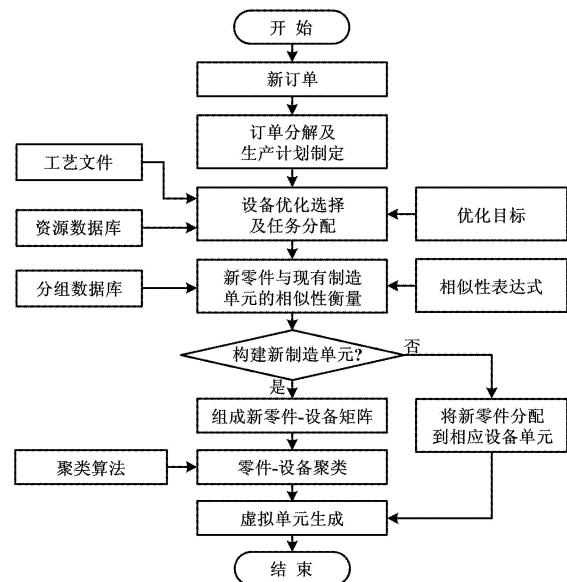


图1 重构流程图

Fig. 1 Reconfiguration flowchart

在面向订单的多品种、小批量生产环境中,由于产品品种和客户需求经常发生变化,制造单元承担的加

教育部人文社会科学研究规划基金资助项目(编号:08JA630033);

江苏省高校哲学社会科学研究基金资助项目(编号:07SJB630009)。

修改稿收到日期:2010-11-06。

第一作者韩文民,男,1963年生,2008年毕业于南京航空航天大学管理科学与工程专业,获博士学位,教授;主要从事现代工业工程方面的研究。

工任务也是动态多变的,这种多变性使单元生产所需的设备资源和设备负荷也不断变化。重组单元是单元化生产的新形式。制造单元重构是一个状态变迁过程,需要耗用一定的时间和成本。因此,制造单元重构应该充分考虑制造单元重构以后带来的增值效应的大小。

本文提出的面向订单生产的制造单元动态重构方法就是基于现有制造单元,根据生产任务的动态变化,引进新的相似系数,快速重构制造单元,以减少重构成本,增加单元生产效益。

2 动态重构算法的设计与实现

面向订单生产的制造单元动态重构的实质有以下三方面:①设备优化选择及任务分配;②新零件与现有制造单元的相似性衡量;③新零件的分配及新零件-设备的聚类。因此,这里提出的重构问题的求解方法也可分为以下三方面:①设备选择及任务分配算法;②新零件与现有制造单元的相似性衡量算法;③制造资源的聚类算法。

2.1 设备选择算法

以多工艺路线安排为前提,面向订单生产的制造单元动态重构中的设备选择问题描述如下:在多加工路径下加工一定数量的产品,当各工序有多种加工设备可供选择时,在满足各台设备生产能力和满足交货期要求的情况下,如何选择加工任务设备和如何确定加工数量,以及如何安排合适的设备加工合适的产品,使得加工产品质量最好,制造成本最低。

针对解决设备资源的选择与优化加工过程的问题,同时以最小加工成本和最大生产工艺能力系数为目标,提出如下改进的数学模型^[4]:

$$\min Z = w_1 \sum_p \sum_r (N_{pr} \sum_m MC_{mpr}) - w_2 \sum_p \sum_r (N_{pr} \sum_m C_{p,m}) \quad (1)$$

约束条件为:

$$\sum_p \sum_r N_{pr} MT_{mpr} \leq C_m, m \in S_{pr} \quad (2)$$

$$\sum_r \sum_m N_{pr} MT_{mpr} \leq D_p, m \in S_{pr} \quad (3)$$

$$\sum_r N_{pr} = N_p, N_{pr} \geq 0, \text{并且为整数}, \forall p \quad (4)$$

式中: p 为工件, $p=1,2,\dots,P$; m 为可用于完成工件加工任务的加工设备, $m=1,2,\dots,M$; r 为每个工件存在的可替代的加工路径, $r=1,2,\dots,R_p$; D_p 为工件的交货期; S_{pr} 为采用第 r 种加工路径加工工件 p 时所需的制造资源集合; C_m 为设备 m 在交货期内的加工能力,即设备 m 在交货期 D_p 到来之前能够用于完成该加工任务的加工时间; MC_{mpr} 为采用第 r 种加工路径的工件 p 在设备 m 上完成工序任务的单件加工成本, $m \in S_{pr}$; MT_{mpr} 为采用第 r

种加工路径的工件 p 在设备 m 上完成工序任务的单件加工时间, $m \in S_{pr}$; N_{pr} 为采用第 r 种加工路径加工工件 p 的数量; $C_{p,m}$ 为制造资源 m 加工工件 p 的工艺能力系数,指工艺能力满足加工精度要求的强度, $C_{p,m}$ 值越大,工艺能力越强,产品合格率也越高,但可能会相应地增加生产成本; N_p 为工件 P 的产量; w_1 为加工成本的重要程度, w_2 为质量的重要程度, w_1, w_2 可根据客户订单的具体要求授予不同的权重,一般取 $w_1 = w_2 = 0.5$ 。

式(1)说明目标函数是最小化加工成本与最大化工艺能力系数,求解变量是每种工件在各种可能的加工路径上的加工数量;式(2)说明每个制造资源在加工任务的交货期内必须有足够的加工能力完成分配的加工任务;式(3)和式(4)分别为交货期约束和工件数量约束。

2.2 相似性衡量算法

现有的有关相似系数的测度表达式,如 Jaccard 相似系数、Hamann 相似系数和 Ravichandran and Rao 相似系数等^[5],大多都是针对单元制造系统设计之初,利用零件或机床的相似性,采用聚类的方法把具有某些相似特征的零件或机床分在一组。但在制造单元构建之后,根据生产任务的变化把新零件(新产品)引入到现有制造单元中时,这些相似系数的测度表达式就失去了其有效性。

对此,本文提出了一种新的相似系数^[6-7]。该相似系数是从新零件和现有制造单元的角度进行衡量的。根据相似系数值可以快速地吧新零件引入到对应的制造单元中,并帮助判断是否需要构建新的制造单元,以获得更多的单元生产效益。

通过仿真研究和企业实际调查,确定了一个临界值 λ ,一般取 $\lambda = 0.68$ 。当新零件和现有制造单元的相似度大于 λ 时,说明现有制造单元能很好地兼容新零件,并能减少因重构引起的额外成本的发生和生产时间的流失;当新零件和现有制造单元的相似度小于 λ 时,说明把新零件插入现有制造单元中会产生过多的单元间移动,增加系统物流,使单元调度和单元管理变得更复杂,此时,需要把这些新零件重新组成新的族。

新零件与现有单元的相似性可用式(5)~式(7)进行测度:

$$S_{NP,EMC} = \omega S_{NP,PF_i} + (1 - \omega) S_{NP,MC} \quad (5)$$

$$S_{NP,PF_i} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{NP,PF_i}} t_{NP,PF_i}}{\sum_{i=1}^{n_Q} (t_{i,QPF_i}/Q)} \times \frac{n_{ONP,PF_i}}{\sum_i (n_{QPF_i}/Q)} \times \frac{D_{NP}}{\sum_i (D_{QPF_i}/Q)} \quad (6)$$

$$S_{NP,MC_i} = \frac{\sum_{o'} n_{NP,MC_i} t_{NP,MC_i}}{\sum_{o=1}^{n_{NP}} t_{NP}} \times \frac{MC_{iNP}}{M_{NP}} \quad (7)$$

式中:NP 为新零件;PF 为零件族;MC 为机器单元;EMC 为现有的制造单元; S_{NP,EMC_i} 为选用第 r 条工艺路线加工的新零件 NP 和现有制造单元 EMC_i 的相似系数; S_{NP,PF_i} 为选用第 r 条工艺路线加工的新零件 NP 和零件族 PF_i 的相似系数; S_{NP,MC_i} 为选用第 r 条工艺路线加工的新零件 NP 和机器单元 MC_i 的相似系数; t_{NP,PF_i} 为零件族 PF_i 包含新零件 NP 采用第 r 条工艺路线加工的时间; t_{NP,MC_i} 为新零件 NP 采用第 r 条工艺路线加工需要机器单元 i 加工的时间; n_{NP,PF_i} 为零件族 PF_i 包含新零件 NP 采用第 r 条工艺路线加工的操作数之和; n_{NP,MC_i} 为新零件 NP 采用第 r 条工艺路线加工需要机器单元 MC_i 的操作数之和; n_{NP} 为新零件 NP 采用第 r 条工艺路线加工所需要的操作数之和; $t_{n_{QPF_i}}$ 为零件族 PF_i 中所有零件 Q 的加工时间之和; t_{NP} 为新零件 NP 采用第 r 条工艺路线加工所需要的加工时间之和; n_{QPF_i} 为零件族 PF_i 中所有零件 Q 的操作数之和; D_{NP} 为新零件 NP 采用第 r 条工艺路线加工的数量; D_{QPF_i} 为零件族 PF_i 中所有零件 Q 加工的数量; Q 为现有零件的总数; o 为现有零件的操作索引, $o = 1, \dots, O$; o' 为新零件的操作索引, $o' = 1, \dots, O$; MC_{iNP} 为新零件 NP 采用第 r 条工艺路线加工需要单元 MC_i 中的机器数; M_{NP} 为新零件 NP 为第 r 条工艺路线加工所需要的机器总数; ω 为与现有零件族相关的权重,一般取 $\omega = 0.5$ 。

式(6)表示新零件 NP 和零件族 PF_i 的相似性;式(7)表示新零件和机器单元 MC_i 的相似性;式(5)则表示该相似系数综合了新零件 NP 与零件族 PF_i 及机器单元 MC_i 的相似性。

2.3 基于启发式规则的聚类算法

聚类的目的就是将生产过程相似的制造资源聚合成制造单元。聚类的方法有很多,如矩阵聚类、模糊聚类和神经网络聚类等,这里采用的是基于启发式规则的单元矩阵聚类算法 HRBLA^[8]。

HRBLA 的具体步骤如下。

① 根据公式 $q_{ij} = (ts_{ij} \times nr_i + tp_{ij} \times d_i)u_{ij}$, 计算出零件 i 在设备 j 上加工所需要的流程时间 q_{ij} , 构成设备-零件矩阵。其中, q_{ij} 为零件 i 在设备 j 上加工所需要的流程时间,由 q_{ij} 构成设备-零件矩阵(MCM); ts_{ij} 为零件 i 单位批次需要在设备 j 上加工时的准备时间,包括工装夹具的调整和毛坯装夹时间; nr_i 为零件 i 单位批次下的加工批次; tp_{ij} 为零件 i 在设备 j 上加工的加工时间; d_i 为零件 i 的计划加工总件数; u_{ij} 为零件 i 非连续多次在设备 j 上加工的次数。

② 先从设备-零件矩阵第 1 行开始,寻找 $q_{ij} \neq 0$ 的元素所在的列,如 j' 列,然后在 j' 列中,从第 1 行开始,寻找非 0 元素,将对应行的元素值相加,并移到矩阵上部,合并构成设备组 S_1 ,放入新设备组-零件矩阵中。

③ 将已成组的行从原矩阵中删除。

④ 重复步骤①~③,直到所有设备均已成组。

⑤ 在设备组-零件矩阵中,从第 1 列开始依次寻找每列中元素值最大的元素,并将元素所在的列移至矩阵的左边,合并构成零件组 L_1 ,放入新的矩阵中。

⑥ 重复步骤⑤,完成所有零件成组。

⑦ 重写设备-零件组矩阵,将零件组中每行对应的元素相加,并在行(设备)中值最大的列的数字上加下划线。

⑧ 将最大值属于同一零件组的各行(设备)聚类,得到的聚类矩阵则为最终聚类结果。

经上述步骤,由最后排定的设备-零件矩阵,即可得零件与设备的分组以及虚拟制造单元的数目与构成。

3 案例分析

某加工车间现有 9 台加工设备($M_1 \sim M_9$)、2 个制造单元(EMC_1 和 EMC_2)。设现有制造单元 EMC_1 包含设备集 $MC_1 \{M_1, M_2, M_3, M_4\}$ 和零件集 $PF_1 \{P_1, P_2, P_3\}$,其中工件 P_1 的生产量为 350,需依次在设备 M_2 、 M_3 、 M_4 上加工,单件加工时间分别 1.5 min、1.5 min、1 min,其相关信息如表 1 所示。

表 1 现有制造单元的相关信息

Tab. 1 Related information of existing manufacturing cell

工件	生产量	单件加工时间/min							
		MC ₁				MC ₂			
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₇	M ₈	M ₉
P ₁	350		1.5	1.5	1.0				
P ₂	250	2.5	1.0	1.5					
P ₃	300	2.0	1.0		2.0				
P ₄	320					1.6	1.4	1.0	
P ₅	350						2.0	1.5	
P ₆	280							1.6 0.9	

现企业接到一个新订单,需加工 3 个钣金类新零件 $NP_1 \sim NP_3$,其加工数量分别为 $N_1 = 400$ 、 $N_2 = 300$ 和 $N_3 = 340$,交货期分别为 2 000 min、1 800 min、2 000 min。可用制造资源集合包括 $M_1 \sim M_6$ 的 6 台设备,各台设备在交货期内的加工能力分别为 900 min、800 min、900 min、1 000 min、2 400 min、1 000 min,则零件的加工工艺信息如表 2 所示。

表2 零件的工艺信息

Tab.2 Process data of the parts

零件	路径	工序	设备	时间/min	工序能力系数	成本
NP ₁	1-1	1	M ₁	1.0	1.5	7
		2	M ₂	1.8	1.2	6
		3	M ₃	2.2	1.2	7
	1-2	1	M ₅	1.8	1.1	8
		2	M ₆	2.2	0.9	10
		3	M ₃	2.2	1.2	7
NP ₂	2-1	1	M ₁	2.0	1.2	6
		2	M ₂	2.0	1.4	7
		3	M ₄	1.5	1.2	6
	2-2	1	M ₃	2.4	0.8	9
		2	M ₄	1.6	1.2	12
		3	M ₆	2.0	1.3	10
NP ₃	3-1	1	M ₅	3.3	1.2	9
		2	M ₆	2.7	1.3	10
		3	M ₅	2.0	1.3	8
	3-2	1	M ₅	2.0	1.3	8
		2	M ₄	1.5	1.4	7
		3	M ₆	2.0	1.3	6

从表2中可以看出,新零件 NP₁、NP₂、NP₃各存在两条加工路径。用 $x_1 \sim x_6$ 分别表示工件 P₁、P₂、P₃ 在各个加工路径上的数量,则所建立的数学模型如下:

$$\min Z = 0.5(C_1H - C_2H) \quad (8)$$

约束条件为:

$$HX - N_p = 0, AX - D_p \leq 0, BX - C_m \leq 0$$

式中: $X \geq 0$, 且为整数;

$$C_1 = [20, 18, 19, 21, 19, 21];$$

$$C_2 = [3.9, 2, 3.8, 2, 2.5, 4];$$

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)^T;$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$N = [400, 300, 340]^T;$$

A、D_p 为交货期约束矩阵,且

$$A = \begin{bmatrix} 5 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5.5 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 5.5 \end{bmatrix};$$

$$D_p = [2\ 000, 1\ 800, 2\ 000]^T;$$

B、C_m 为加工能力约束矩阵,且

$$B = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1.8 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1.2 & 0 & 0 & 2.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.5 & 1.6 & 0 & 1.5 \\ 0 & 1.8 & 0 & 0 & 3.3 & 2 \\ 0 & 2.2 & 0 & 0 & 2.7 & 2 \end{bmatrix};$$

$$C_m = [900, 800, 900, 1\ 000, 2\ 400, 1\ 000]^T。$$

在 Matlab7.5 软件平台上,利用其遗传工具箱对该模型进行优化求解。遗传参数选择为:种群大小 $popsiz$ = 30、交叉概率 $P_c = 0.6$ 、变异概率 $P_m = 0.6$ 、进化代数 $gen_{max} = 50$ 。设备选择及任务分配优化结果如表3所示。

表3 优化结果

Tab.3 Optimized results

零件	路径	数量	设备	成本	时间/min
1	1-1	300	M ₁ 、M ₂ 、M ₃	7 800	1 900
	1-2	100	M ₅ 、M ₆		
2	2-1	130	M ₁ 、M ₂ 、M ₄	6 040	1 395
	2-2	170	M ₃ 、M ₄		
3	3-1	0	M ₅ 、M ₆	7 140	1 870
	3-2	340	M ₄ 、M ₅ 、M ₆		

根据上述优化结果及相似系数公式(5)~式(7),通过 C 语言编程,可以得到各零件在各路径上与现有制造单元的相似度为:

$$S_{1-1EMC_1} = 0.929, S_{1-1EMC_2} = 0;$$

$$S_{1-2EMC_1} = 0, S_{1-2EMC_2} = 0.238;$$

$$S_{2-1EMC_1} = 0.755, S_{2-1EMC_2} = 0;$$

$$S_{2-2EMC_1} = 0.743, S_{2-2EMC_2} = 0;$$

$$S_{3-2EMC_1} = 0.106, S_{3-2EMC_2} = 0.445。$$

根据新零件与现有制造单元的相似性判断依据,本例中取 $\lambda = 0.68$,则可知加工任务 NP₁₋₁、NP₂₋₁、NP₂₋₂ 被直接分配到现有制造单元 EMC₁ 中,加工任务 NP₁₋₂ 和 NP₃₋₂ 需重构形成新的制造单元,显然加工任务 NP₁₋₂ 和 NP₃₋₂ 具有很大的相似性,可以聚类为一个新的制造单元 EMC₃,包含机器 M₄、M₅、M₆。该车间接受新任务后,重构的制造单元为:EMC₁ # {MC₁(M₁, M₂, M₃, M₄) 和 FC₁(P₁, P₂, P₃, NP₁₋₁, NP₂₋₁, NP₂₋₂)}; EMC₂ # {MC₂(M₅, M₇, M₈, M₉) 和 FC₂(P₄, P₅, P₆)}; EMC₃ # {MC₃(M₅, M₆) 和 FC₃(NP₁₋₂, NP₃₋₂)}。

4 结束语

制造单元动态重构是实现快速响应制造的基础。本文所提出的算法考虑了可选择加工路线、加工设备的生产能力和任务交货期等因素,充分重视加工设备的优化选择和加工任务的合理分配,并根据新任务和现有制造单元的相似性动态重构制造单元,因此,减少了重构成本,实现了快速反应动态多变的市场需求及客户个性化需求,提高了制造系统的柔性和敏捷性。

参考文献

[1] Slomp J, Chowdary B V, Suresh N C. Design of virtual manufacturing cells: a mathematical programming approach[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2005, 21(3): 273-288.

(下转第35页)

表1 发动机原始数据与预测数据
Tab.1 Original and forecast data of engine fault diagnosis system

样本序号	发动机特征参数						实际工作状态	PNN 预测值	诊断结果
	TR	PR	AI	MA	DI	MD			
1	0.999	0.999	1.001	0.997	0.999	1.000	正常状态	A	正确
2	1.001	1.002	0.999	1.000	1.006	0.997	正常状态	A	正确
3	0.221	0.192	0.149	0.107	0.120	0.111	气缸漏气	D	正确
4	0.112	0.124	0.021	0.080	0.119	0.192	气门漏气	C	正确
5	0.102	0.091	0.036	0.087	0.078	0.107	油路故障	B	正确
6	0.219	0.184	0.153	0.099	0.115	0.113	气缸漏气	D	正确
7	0.220	0.188	0.019	0.075	0.119	0.185	气门、气缸故障	G	正确
8	0.215	0.184	0.021	0.079	0.080	0.105	油路、气门故障	E	正确
9*	0.111	0.102	0.033	0.090	0.081	0.098	油路故障	B	正确
10*	0.115	0.132	0.020	0.083	0.123	0.205	气门漏气	C	正确

2.3 仿真结果讨论

由表1可以看出,对于训练样本和检验样本,故障诊断识别率都达到了100%。由此表明,基于PNN的发动机运行系统故障诊断方法无论在模型拟合效果还是模型推广能力方面都具有良好的性质,可以应用于实际的故障诊断。

3 结束语

本文提出了采用概率神经网络的发动机运行系统的故障诊断方法。PNN可以最大程度地利用故障先验知识,在贝叶斯最小风险准则下对发动机的单故障进行定性诊断;PNN学习规则简单,训练速度快,样本追加能力强,且可以容忍个别错误的样本,故障诊断可以减少误报率和漏报率,实时性好^[7]。从测试效果上看,训练样本与检验样本的分类准确率均能达到100%,

这表明PNN模型解决发动机运行系统的故障诊断问题不但可行,且具有良好的外延性和推广性。

参考文献

- [1] 张德丰. MATLAB神经网络应用设计[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [2] 张威. MATLAB基础与编程入门[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2004.
- [3] 熊建秋,李祚泳,汪嘉杨,等. 基于PNN的水轮发电机组振动故障诊断[J]. 水力发电,2005,31(7):58-60.
- [4] 杜红斌,郭巧占. 概率神经网络及其在储层产能预测中的应用[J]. 石油仪器,2005,19(4):63-65.
- [5] 徐裘,李浩军,范学鑫. 概率神经网络故障诊断的粗糙集优化方法[J]. 微计算机信息,2007(19):209-211.
- [6] 谷雷,杨青,王大志. 概率神经网络在化工过程故障检测中的应用[J]. 控制工程,2008(s1):128-130.
- [7] 付芹,谷立臣. PNN在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 煤矿机械,2009,30(11):243-245.

(上接第32页)

- [2] Papaioannou G, Wilson J M. The evolution of cell formation problem methodologies based on recent studies (1997-2008): review and directions for future research[J]. European Journal of Operational Research,2010,206(3):509-521.
- [3] Selim H M, Askin R G, Vakharia A J. Cell formation in group technology: review, evaluation and directions for future research[J]. Computers and Industrial Engineering,1998,34(1):3-20.
- [4] 冷晟,魏孝斌,王宁生,等. 基于ACGA的虚拟制造单元重构中资源选择与分配问题研究[J]. 机械科学与技术,2006,25(8):922-927.
- [5] Yin Y, Yausuda K. Similarity coefficient methods applied to the cell formation problem: a comparative investigation[J]. Computers and Industrial Engineering,2005,48(3).
- [6] Garbie I H, Parsaei H R, Leep H R. Introducing new parts into

- existing cellular manufacturing systems based on a novel similarity coefficient[J]. International Journal of Production Research,2005,43(5):1007-1037.
- [7] Khilwani N, Ulutas B H, Islier A, et al. A methodology to design virtual cellular manufacturing systems[J]. Intelligent Manufacturing,2009(1):1-12.
- [8] 祝恒云,叶文华. 基于流程时间矩阵的单元化制造系统设计[J]. 应用科学学报,2008,26(1):100-105.
- [9] Shambu G, Suresh N C, Pegels C C. Performance evaluation of cellular manufacturing systems: a taxonomy and review of research[J]. International Journal of Operational and Production Management,1996,16(8):81-103.
- [10] Mak K L, Lau J S K, Wang X X. A genetic scheduling methodology for virtual cellular manufacturing systems: an industrial application[J]. International Journal of Production Research,2005,43(12):2423-2450.