

基于 e-制造模式的动态工艺规划技术研究

陈 冰, 江平宇, 郑 镁, 张定红, 牛瑞峰

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: e-制造工艺系统要求及时准确地根据资源动态信息进行工艺路线的实时决策。该文将工艺规划过程划分为零件信息输入、特征工艺选择和工艺路线的决策等 3 个阶段, 采用神经网络 BP 算法解决了特征工艺链模糊匹配问题, 将资源动态信息与工艺规则共同作为约束条件, 采用 GA 算法实现基于资源动态信息的工艺路线优化选择, 有效地解决了调度中的资源冲突问题。采用 Java 技术开发了软件原型系统, 通过实例分析验证了设计方法的可行性。

关键词: e-制造; 动态工艺规划; BP 算法; 遗传算法

Research on Dynamic Process Plan Technologies for E-manufacture Mode

CHEN Bing, JIANG Pingyu, ZHENG Mei, ZHANG Dinghong, NIU Ruifeng

(National Key Inst. of Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong Univ., Xi'an 710049)

【Abstract】 According to the dynamic information of manufacture resource, the process plan system should make process plan decision accurately and timely for e-manufacture. The process plan includes three stages, part information input, feature process selection and process plan decision-making. Error back propagation neural network algorithm has been used to solve feature process chains fuzzy match. The dynamic information of resources and rules of process plan are regarded as the integrated restriction conditions, and the genetic algorithm is adopted to realize the process route optimization selection based on the dynamic resource information. It is effective to solve resource conflict in production schedule. Finally, the feasibility of this design method is proved by a case running on the prototype that is developed by Java.

【Key words】 E-manufacture; Dynamic process plan; Back propagation algorithm; Genetic algorithm

e-制造模式是在网络信息技术高速发展、全球化竞争日益加剧的环境下产生的一种新的企业制造模式。它是以订单驱动的或市场预测驱动的、基于协同制造商务的在线型网络化制造, 是网络化制造系统的一种外延与拓展^[1,2]。

工艺规划系统是连接设计与生产的纽带, 是整个制造系统的信息中枢, e-制造模式对工艺规划系统提出了新的要求, 一方面, 要能够及时准确地进行工艺路线的规划, 为制造成本的估算提供支撑, 以支持 e-制造系统的形成; 另一方面, 由于 e-制造设备信息的透明性以及自底而上的反馈能力, 工艺系统要根据资源动态信息进行工艺路线的实时决策, 同时通过与调度系统的动态协调, 保证调度结果的最优化。据此, 本文提出一种适应上述要求的动态工艺规划系统。

1 e-制造模式下的动态工艺规划系统架构

e-制造模式下动态工艺规划系统的总体结构如图 1 所示。系统分为零件信息输入层、特征工艺选择层、工艺路线规划层和工艺信息管理层。

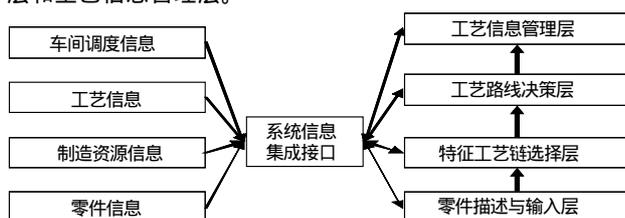


图 1 e-制造模式下的动态工艺规划系统架构

零件信息输入层对零件设计信息进行基于特征模型的分

解, 零件的总体信息、特征信息以及特征关系信息输入; 特征工艺选择层根据零件信息按顺序提取零件的每一个特征, 按照特征的类型及参数, 启动相应的计算智能方法选择特征的可行工艺链方案; 工艺路线规划层对所有特征的工艺链进行工艺链分解, 得到零件的加工单元集合。按照加工约束条件, 对集合中的某些加工单元进行工序合并。在此基础上, 进行加工单元排序, 输出其中最优的几条排序结果, 作为零件的“基本可行”工艺路线; 为保证工艺规划能够实时反映制造资源和调度信息, 在这个层面还提供了系统信息集成接口, 该接口主要负责到该系统与制造环境中其它子系统的集成, 如与车间调度系统的集成; 工艺信息管理层负责工艺路线的编辑修改以及维护和管理当前系统中的所有信息。

2 系统实现的关键使能技术

2.1 基于神经网络的特征工艺链决策

加工方法选择是工艺设计中最基础也是最关键的工作。它依赖于工艺设计人员在长期生产实践中积累的工艺知识。在传统的CAPP专家系统中, 常常采用基于规则的知识表达方法对工艺知识加以描述, 然后系统根据特征模型输入的特征参数推理出各特征面对应的工艺链, 把工艺链进一步处理成

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50575174)

作者简介: 陈 冰(1972 -), 男, 博士后, 主研方向: 数字化制造, 工序质量控制; 江平宇, 博士、教授、博导; 郑 镁, 教授、硕士; 张定红, 副教授、硕士; 牛瑞峰, 硕士生

收稿日期: 2006-08-30 **E-mail:** bingchen@mail.xjtu.edu.cn

加工单元集合，再按一定的工艺设计原则进行排序。这种基于规则的知识推理思路清晰，易于理解，但是存在“匹配冲突”和“组合爆炸”等问题，从而导致推理效率低下，无法对企业的资源变化作出及时的响应，缺乏应有的灵活性^[4]。

为解决上述问题，本文引入神经网络中的BP算法，将产生式规则的前件与结论转化为神经网络的“输入-输出”向量对，将基于规则的推理过程转化为神经网络的模式识别过程。从而实现了知识表示和推理过程的模糊化处理。

2.1.1 工艺知识表达

因为各种机械零件都可看作是由一定数量、种类的特征面所构成，每一种特征面一般要经过不同的加工工序来达到它的各方面要求。加工方法的选择实际上是组成零件的各特征面的加工序列的选择。图2描述了基于规则的内圆柱面加工典型工艺知识。

规则 1: IF (IT13-IT11) & (12.5<Ra<25) & (D<20) & (未淬硬) THEN (钻)
规则 2: IF (IT8-IT7) & (1.6<Ra<3.2) & (D<20) & (未淬硬) THEN (钻-铰)
规则 3: IF (IT8-IT7) & (0.8<Ra<1.6) & (D>20) & (未淬硬) THEN (钻-扩-铰)
规则 4: IF (IT7-IT6) & (0.4<Ra<0.8) & (D>20) & (未淬硬) THEN (钻-扩-铰-精铰)
规则 5: IF (IT10-IT9) & (3.2<Ra<6.3) & (D>60) & (淬硬) THEN (粗镗-细镗)
规则 6: IF (IT8-IT7) & (0.8<Ra<1.6) & (D>60) & (淬硬) THEN (粗镗-细镗-精镗-浮动镗)
规则 7: IF (IT8-IT7) & (0.8<Ra<1.6) & (D>60) & (淬硬) THEN (粗镗-半精镗-磨孔)
规则 8: IF (IT7-IT6) & (0.8<Ra<1.6) & (D>60) & (淬硬) THEN (粗镗-细镗-粗磨-精磨)
规则 9: IF (IT7-IT6) & (0.4<Ra<0.8) & (D>60) & (有色金属) THEN (粗镗-细镗-精镗-金刚石镗)
规则 10: IF (IT7-IT6) & (0.4<Ra<0.8) & (未注明要求) & (淬硬) THEN (钻-铰-精铰-珩磨)
规则 11: IF (IT7-IT6) & (0.4<Ra<0.8) & (D>60) & (淬硬) THEN (粗镗-细镗-精镗-珩磨)

图2 基于规则描述的工艺知识

由于需要将规则描述的知识作为BP网络的输入条件，因此需要把上述规则信息转化为数字信息，通过分析这些规则，可以发现影响内圆柱面工艺链选择的主要有特征尺寸、精度要求、粗糙度要求、材料这4类因素。据此，本文对这4类信息进行抽取，分别制定相应的编码原则，规则的前件就会转化为能够反映加工要求的二进制码链。规则结论的编码可按规则的先后顺序，规定有m条规则的规则库结论码长度为m，第n条规则的结论码第n位上的值为1，其余位上均为零。

在前述原则的指导下，对内圆柱面工艺链选择规则进行二进制编码处理，处理后的结果如表1所示，左半部分为前件编码，为BP网络的输入向量，右半部分为结论编码，为网络的理想输出向量。由表中的11对二进制码链组成一个训练样本，用于神经网络训练。

表1 内圆柱面工艺链规则编码结果

项目 序号	输入				输出																	
	精度	Ra	尺寸	材料																		
1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

2.1.2 特征工艺子网络结构设计

BP网络的结构设计，就是要确定网络互连的一些参数，包括输入、输出层的神经元个数，隐含层层数以及隐含层的神经元数目等。这些参数要视所解决问题的不同而合理选择。首先，BP网络的输入层和输出层是与外界联系的接口，这两层的神经元数一般由应用对象的实际问题决定，不能任意选取。由表1的编码形式，容易确定内圆柱面加工方法决策子

网络的输入层为8个神经元，输出层为11个神经元。因此，问题的关键在于确定隐含层层数以及每层的神经元个数。

实验表明，隐含层数量的适当增加可以减小网络的训练误差，提高网络的识别精度，而另一方面，随着隐层的增多网络的训练速度变慢，导致培训时间较长。可见，在选择隐含层数时要从网络精度和培训时间上综合考虑。在实际工作中常采用实验的方法来确定隐含层神经元数。这里本文根据相应的经验公式最终确定的隐层神经元数为9个。

2.1.3 特征工艺子网络训练及其工作过程

BP网络必须经过训练才能具备模式划分能力，本文采用一种推广的Delta学习算法来完成BP网络的训练。通过对网络的训练，工艺知识以权矩阵的形式分布存储在网络中。对于任意的环境输入，经过网络的内部计算，都会有相应的输出模式，这种模式的对应关系客观上也反映了网络权值的分布情况，并且能够起到模糊分类的作用，从而适合于解决工艺链的选择问题。

用训练好的网络在进行特征工艺链选择前，首先要对特征的参数信息进行抽取编码，编码后的向量输入相应的BP网络中，网络经过逐层的前向计算，得到一个实际输出向量，比较该输出向量与规则结论编码向量的相似程度，与输出向量相似程度最高的向量对应的工艺链为该特征的最优工艺链。

本系统采用平均均方差计算向量的相似度，设相似度为 α ，则有

$$\alpha = 1 - \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d (o_i - t_i)^2 \quad (1)$$

其中， d 为输出向量维数， o_i 、 t_i 分别为实际输出分量和理想输出分量。

2.2 基于遗传算法的工艺路线决策

零件工艺路线的制定，是在考虑加工条件的情况下，按照一定的工艺约束规则，对组成零件各个特征面的加工方法进行重新排序的过程。这里通过使用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)获取当前资源状态下的最优或接近最优的几条工艺路线。用户可以根据制造环境的需求，选择合适的工艺路线进行排序作业^[5,6]。

2.2.1 工艺排序问题的数学描述

(1) 设加工单元的集合形式描述为

$$M = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$$

(2) 设工艺约束条件的集合形式描述为

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$$

(3) 如果M中有n个元素，那么就存在n!种可能的加工单元序列，即排序问题存在n!个可能解。所有的可能解构成GA算法的搜索空间。适应度函数约束集合进行表示，则工艺路线的排序问题就可描述为，在搜索空间内寻找若干组加工单元的序列，使得适应度函数达到或接近最大值。

2.2.2 基于实时资源信息的基因编码

在e制造模式下，工艺系统可根据制造资源的状态信息，进行相应的工艺路线决策。同时在制造资源出现异常的情况下，工艺系统还可适当调整规划的结果，动态产生适合当前生产情况的最优工艺规划。这样就可以提高规划结果的可执行程度。设备选择的条件是当前制造环境中相对空闲并且能够正常运行的e-制造设备。根据当前制造任务的需要及设备负荷情况(甘特图描述)，可以采用人工干预方式或由系统自

动选择若干符合条件的设备。选择的结果以集合的形式表示出来。

如果当前的可用资源有 m 台，记为 $E = \{m_1, m_2, \dots, m_m\}$ 。每一个加工单元所对应的制造设备可能有多台，可以采取加工单元与设备组合编码的方式，编码形式为“ $i-j$ ”， i 代表加工单元在 M 中的序列号， j 代表制造设备在 E 中序列号。如， M 中的某一单元 p_s ，假设完成该加工的可选设备有 $m_1, m_2, m_k (k < m)$ ，那么对应的编码可以有“ $s-1$ ”、“ $s-2$ ”、“ $s-k$ ”，由这3组编码聚类形成的集合，表示完成单元 p_s 的可能工序/设备组合，记为 $E_s = \{p_s | s-1, s-2, s-k\}$ 。对 M 中的其它单元可进行类似操作，得到 n 个集合 E_1, E_2, \dots, E_n 。排序染色体按照如下方式生成：从 E_1, E_2, \dots, E_n 中各选取一组编码，然后以随机方式进行排序，从而形成一条染色体。图3为一条染色体的生成过程。

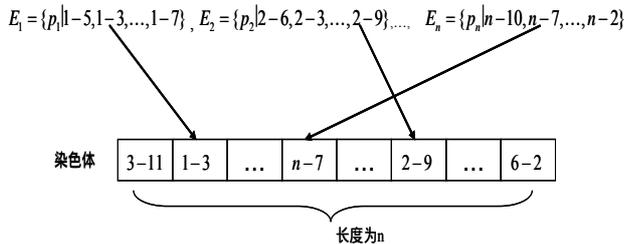


图3 染色体生成示例

2.2.3 适应度的计算

本算法在设计中主要从工艺规则约束条件和资源约束条件考虑适应度函数的计算。总的适应度函数可表示为

$$F = \alpha_r F_r + \alpha_m F_m \quad (2)$$

其中： F_r 、 F_m 分别为工艺、资源约束子适应度， α_r 、 α_m 为各自对应的权值。

$$F_r = \alpha_i F_i + \alpha_j F_j + \alpha_k F_k \quad (3)$$

其中： α_i 为先后次序约束权值； F_i 为先后次序约束子适应度； α_j 为聚类约束权值； F_j 为聚类约束子适应度； α_k 为邻接约束权值； F_k 为邻接约束子适应度

由于在进行工艺设计中，往往不可能完全满足所有约束条件的要求，因此本文把约束条件分为两类：强制约束和附加约束。在实际操作中，以权值的方式来体现它们作用强弱。

2.2.4 算法运行流程

(1)初始种群是由一定数量的染色体组成的集合。每条染色体代表一种可能的工艺路线规划方案。为了保证GA算法的全局搜索性，初始种群中的个体一般采用随机方法得到。

(2)对初始群体个体分别计算其适应度值，然后按照适应度的大小进行排序，并且计算本代个体的平均适应度。个体适应度越高，表明其对应的排序方案满足的约束条件越多，因而也就越合理。

(3)根据群体评价的结果，按照个体适应度值在群体适应度值总和中所占的比例，作为该个体在选择过程中被选中的概率。这样适应度越高的个体总是以较大的概率被选中，从而保证整个群体能以较快的速度向最优方向进化。

(4)通过选择、交叉和变异遗传算子的反复作用，不断淘汰适应度小的排序码链，使得群体的平均适应度以及最优个

体适应度都不断提高。当进化过程满足设定的中止条件时，则输出当前的最优排序方案。

3 运行实例

依据上述理论和方法，本文开发了一个e-制造环境下动态工艺规划原型系统，首先实现了零件信息描述与输入；然后利用BP算法完成了特征加工方法的优化选择，最后结合工艺路线规划、制造资源和调度信息，使用遗传算法对工艺路线进行了排序。其主要功能模块及其运行流程如图4所示。

(1)零件信息描述与输入模块。如图4(a)所示；

(2)特征工艺链选择模块。如图4(b)所示，使用BP算法实现特征加工方法的优化选择；

(3)工艺路线决策模块。如图4(c)所示，结合工艺路线规划、制造资源和调度信息。使用遗传算法实现工艺路线排序。在工艺路线决策前，可以获取制造资源和调度信息。

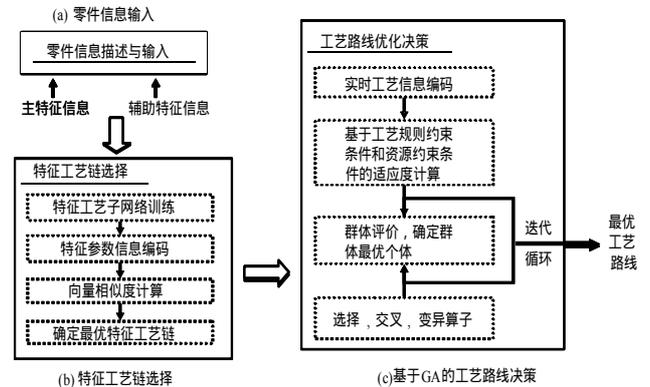


图4 原型系统运行流程

4 结论

本文针对e-制造环境对工艺系统提出新的要求，提出了一种BP算法和遗传算法支持下的动态工艺规划系统模型，并讨论了其实现的关键使能技术，最后开发了一个原型系统加以例证。本文的研究为e-制造工艺系统在企业内的实现奠定了基础。

参考文献

- 江平宇. e-制造系统的实现方法与应用[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2003, 9(4): 254-259.
- Lee J. E-manufacturing — Fundamental, Tools and Transformation[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2003, 19(6): 501- 507.
- 赵汝嘉, 严隽琪. 计算机辅助工艺设计(CAPP)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 15-93.
- 常伟, 刘文剑. 基于人工神经网络的工艺知识表示方法的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 6(3): 132-136.
- Lee H, Kim S S. Integration of Process Planning and Scheduling Using Simulation Based Genetic Algorithms[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18(8): 586-590.
- 张志英, 唐承统. 遗传算法在柔性CAPP与生产调度集成中的应用[J]. 计算机集成制造系统, 2003, 8(8): 621-624.