

# 复合材料加工工艺模糊推理方法<sup>\*</sup>

于佳 张博明 王殿富 武湛君

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

**文 摘** 针对复合材料加工方法,在 CAPP 的基础上,总结出适于复合材料加工工艺的推理方法,即基于特征的模糊推理算法。先提取复合材料制品的特征,然后将影响复合材料加工工艺方法的因素模糊化,给出具体模糊值,得到适合的隶属函数。经过模糊推理之后得到最佳的加工方法。同时给出具体复合材料加工推理的例子对模糊化推理方法进行研究,推理结果与实际吻合较好。

**关键词** CAPP,复合材料,模糊化,工艺方法

## Fuzzy Inference Method of Composite Processing on CAPP

Yu Jia Zhang Boming Wang Dianfu Wu Zhanjun

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** For the composite processing method, the inference method suitable for composite processing technic, i. e., fuzzy algorithmic approach based on feature, is concluded on CAPP. Extraction of the feature of composite products and then fuzzification of the factors influencing composite processing method are made to give the concrete fuzzy values and get suitable membership function. After fuzzy inference, the optimum processing method is obtained. This paper gives examples of the concrete composite processing and studies fuzzy inference methods. The result shows that the method coincides well with facts.

**Key words** CAPP, Composite, Fuzzification, Processing method

### 1 前言

提高制造技术水平、降低制造成本是扩大复合材料应用范围的重要措施<sup>[1]</sup>。先进复合材料的制造成本是影响复合材料制造技术广泛使用的最大障碍,因此如何降低制造成本是当前研究工作的重点。

随着机械制造生产技术的发展及多品种小批量生产的要求,特别是 CAD/CAM 系统向集成化、智能化方向发展,传统的工艺设计方法已远远不能满足要求。计算机辅助工艺设计(CAPP)也就应运而生,用 CAPP 可以克服传统的工艺设计的缺点,可以大大地缩短工艺设计周期,保证工艺设计的质量,可以

提高企业工艺设计的标准化,并有利于工艺设计的最优化工作。目前这一概念已经被成功的引入复合材料生产过程当中,它将先进复合材料生产的设计过程与生产过程有机的联系起来,使设计过程所使用的知识及信息尽可能的应用于生产过程。CAPP 对于复合材料生产工艺的自动化具有至关重要的作用,可以说,没有 CAPP,就不可能有复合材料的自动化生产。

文献[2,3]列出了现有的 156 个 CAPP 系统,其中 49 个可以通过商业途径获得。CAPP 的主要任务之一就是确定加工顺序,工序规划是一个复杂的过

收稿日期:2003-05-06

<sup>\*</sup>国家“十五”项目:0141312

于佳,1974 年出生,博士研究生,主要从事复合材料工艺的研究工作

程,规划的自动实现需要为加工知识和工艺信息建立一个统一的结构。对加工特征的分析 and 自动制造的工艺规划已提出了许多方案和方法。Cherng 等人<sup>[4]</sup>提出了基于事例的工艺规划模型和基于知识的工艺规划模型。Chep 等人<sup>[5]</sup>通过用面向对象的系统分析方法来确定加工操作顺序。所有这些方法都没有考虑到工业上广泛应用的柔性制造单元环境。J. Huang 等人<sup>[6]</sup>对柔性制造单元环境下的工艺规划提出了一个面向对象的结构,工艺的规划包括产品特征分析、个别加工工艺和总体制造单元操作,用 AND/OR 搜索法推断加工顺序。Hide、Fujimoto 等人<sup>[7]</sup>研究了任意形状的三维制造产品的 CAPP 实现过程。

工艺规划的实现必须采用一定的算法。Business 等<sup>[8]</sup>大学提出用协同分布式问题解答(CDPS)方法实现 CAPP。CDPS 是将所要解答的问题分解为若干子问题,每个子问题负责解答一个子任务,最后将所有解答进行优化组合就解答了初始问题。CDPS 技术适应能力强,系统表现为模块化,处理速度快,可靠性强。Rocha 等人<sup>[9]</sup>研究用遗传算法(Genetic Algorithm)来实现 CAPP,遗传算法是一类借鉴生物界的进化规律(适者生存,优胜劣汰遗传机制)演化而来的随机化搜索方法。其主要特点是直接对结构对象进行操作,不存在求导和函数连续性的限定;具有内在的隐并行性和更好的全局寻优能力;采用概率化的寻优方法,能自动获取和指导优化的搜索空间,自适应地调整搜索方向,不需要确定的规则。另外,D. M. A. Lee 等人<sup>[10]</sup>采用神经网络算法来实现工艺规划,均在一定程度上取得了成功。

目前国内外已经出现一些以专家系统为核心的智能型 CAPP 系统,其中的知识表达是基于产生式规则的,这种知识表达方法单一,随着工艺知识规则

$$\mu_h(x) = \begin{cases} 1, & 0 < x < a \\ e^{-k(x-a)^2}, & x > a, k > 0 \end{cases} \quad \text{模糊降半正态函数, } a = 0.4$$

$$\mu_m(x) = e^{-k(x-a)^2}, \quad k > 0 \quad a = 1.6$$

$$\mu_l(x) = \begin{cases} 1, & x > a \\ e^{-k(x-a)^2}, & x < a, k > 0 \end{cases} \quad a = 12.5$$

从公式中可以看出一个工字形制品的厚度既可属于中挡 MT,又可属于低档 LT(表 1),只是模糊值不同而已,因此厚度的模糊值同时存在两种情况,对

库的不断增长,工艺知识规则库往往十分臃肿,推理速度会越来越慢,工艺知识规则库的好坏直接影响推理结果的正确性,其规则之间有可能产生矛盾或局部知识空缺,而这常常使推理结果矛盾或无结果。由于以专家系统为核心的智能型 CAPP 系统未能很好地解决工艺知识获取、表示以及工艺决策算法等方面问题,不能发挥联想记忆的功能,无法实现自我优化和创新,一些专家开始探讨把模糊知识和不确定推理应用在 CAPP 中的可行性。

## 2 基于特征的工艺方法推理

### 2.1 工艺特征的模糊化及模糊推理算法

复合材料加工方法的制定是一个复杂的过程,不仅要受工艺要求的影响,同时还要受设备、人员的经验、工艺知识的多少以及习惯的影响,一个相同零件,不同的人可以产生不同的工艺路线,所以用纯数学的推理方式,以及基于 IF—THEN 的固定数值为阈值的知识表述<sup>[11]</sup>,显得极为单一和不可靠。基于模糊的知识描述推理以及神经网络的层次联想功能是解决这一问题的一种较好的方法。对于一个特征要素来说,其加工工艺方法主要由几何尺寸、强度、厚度等因素决定。我们把每个因素模糊地划分为高、中、低三挡。例如对于工字形制品这个特征,几何尺寸划分为大尺寸 LD、中尺寸 MD、小尺寸 SD,强度可分为大数值强度 LS、中数值强度 MS、小数值强度 SS,厚度分为大数值厚度 LT、中等数值厚度 MT、小数值厚度 ST。每一因素的每一档都可以用一个模糊函数来表示。因此,每一档次都有一个介于 0~1 间的可信度模糊值  $\mu$ 。具体模糊值由一个适合的模糊成员函数或模糊器给出。例如工字形制品的厚度模糊函数可以认为按正态分布函数表示,其模糊正态分布函数的计算公式如下所示。

于厚度、强度和几何尺寸三种因素来说,其可信度模糊值的排列组合最多有  $C_2^1 \times C_2^1 \times C_2^1 = 8$  种情况。显然,第  $i$  项规则各个影响因素的总的加工工艺影

响因素可信度模糊值为  $x_i = \prod_{k=1}^n \mu_k$ , 由此可以得到某

一特征的各项规则的可信度模糊矢量为  $X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ 。

表 1 影响工字形制品的加工方法选择的三种因素的可信度模糊值举例

Tab. 1 Credible fuzzy values of three factor affecting shaft machining of composite Ftype beam

规则	强度 $\mu_1$			厚度 $\mu_2$			几何尺寸 $\mu_3$			$x_i = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3$
	ST	MT	LT	SS	MS	LS	SD	MD	LD	
1	0	0.16	0	0.74	0	0	0.85	0	0	$x_1 = 0.1006$
2	0	0.16	0	0	0.2	0	0.85	0	0	$x_2 = 0.0272$
3	0	0.16	0	0.74	0	0	0	0.12	0	$x_3 = 0.0142$
4	0	0.16	0	0	0.2	0	0	0.12	0	$x_4 = 0.0038$
5	0.8	0	0	0.74	0	0	0.85	0	0	$x_5 = 0.5032$
6	0.8	0	0	0	0.2	0	0.85	0	0	$x_6 = 0.1360$
7	0.8	0	0	0.74	0	0	0	0.12	0	$x_7 = 0.0710$
8	0.8	0	0	0	0.12	0	0	0.12	0	$x_8 = 0.0192$

我们引入 Mycin 不确定推理方法<sup>[12]</sup>, 其中信任度  $MB[h, e] = c$ , 表示由于模糊规则  $e$  的存在, 对  $h$  加工方法选择的相信程度增长  $c$ , 即  $MB[h, e] = \frac{P(h|e) - P(h)}{1 - P(h)}$ ,  $P(h)$  为预测概率, 这里  $P(h) = 0$ , 即  $MB[h, e] = P(h|e)$ 。

对于两个以上的相互独立的模糊规则  $e_1, e_2$ , 分别支持  $h$  加工方法, 则信任增长度  $MB[h, e_1 \& e_2] = MB[h, e_1] + MB[h, e_2] \times (1 - MB[h, e_1])$ , 显然  $e_1, e_2$ , 与次序无关, 满足交换率, 总信任度小于 1, 并且随  $e$  个数的增加而不断增大, 当支持的规则大于 3 个时, 公式依次类推, 即

$$\begin{aligned}
 MB_2 &= MB_1[h_k, e_1^k] + MB[h_k, e_2^k] \times (1 - MB_1[h_k, e_1^k]) \\
 MB_3 &= MB_2 + (1 - MB_2) \times MB[h_k, e_3^k] \\
 &\dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
 MB_n &= MB_{n-1} + (1 - MB_{n-1}) \times MB[h_k, e_n^k]
 \end{aligned} \tag{1}$$

$e_i (i = 1, 2, \dots, n)$  代表模糊规则,  $h_k$  代表加工方法。显然, 随着规则  $e_n$  支持  $h_k$  加工方法的增多, 加工方法的信任度将不断增大。

设  $E$  和  $H$  是两个有限论域,  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ ,  $H = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$ 。  $E$  与  $H$  的一个模糊关系定义为笛卡尔积  $E \times H$  的一个模糊子集。若用隶属函数来表示模糊子集, 一个模糊关系可用矩阵  $R_{E \times H}$  来表示

$$R_{E \times H} = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1m} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{n1} & u_{n2} & \dots & u_{nm} \end{pmatrix}$$

对于 CAPP 应用来说,  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  表示选择加工方法的规则项,  $H = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$  表

示某一特征要素所对应的可供选择的加工方法。

例如, 对于工字形制品的加工来说,  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\} = \{\text{规则 1, 规则 2, } \dots, \text{规则 8}\}$ ,  $H = \{h_1, h_2, \dots, h_m\} = \{\text{手糊, RTM, } \dots, \text{纤维缠绕}\}$ ,  $u_{ij}$  代表第  $i$  条规则中选择加工方法  $j$  的理想状态下模糊可信度值 (值域  $[0, 1]$ ), 理想状态是指影响因素可信度模糊值  $x_i = 1$  的情况。理想状态下加工方法的可信度模糊值由工艺方法的知识库确定。实际上矩阵  $R_{E \times H}$  即为理想状态下加工方法选择的模糊规则矩阵。

设矢量  $X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$  是论域  $E$  上的隶属函数, 矢量  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m)$  是论域  $H$  上的一个隶属函数, 其中  $Y_j = \bigotimes_{i=1}^n u_{ij} \otimes x_i$ , ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) 是  $x$  经模糊变换  $R_{E \times H}$  所得结果。

和 $\otimes$ 表示两种运算, $x_j$ 代表特征的第*i*项规则可信度模糊值, $Y_j$ 代表第*j*项加工方法总的信任度,一次模糊变换相当于对特征的一次模糊推理选择过程,这里 $\otimes$ 表示如下运算:

$$C_n \times m = (v_{ij})_{n \times m} = (u_{ij} \times x_i)_{n \times m} \quad (2)$$

根据方程(1),代表如下运算:

$$\begin{cases} MB_2^j = v_{1j} + (1 - v_{1j}) \times v_{2j} \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ Y_j = MB_n^j = MB_{n-1}^j + (1 - MB_{n-1}^j) \times v_{nj} \end{cases} \quad (3)$$

于是得到加工方法的信任度矢量  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m)$ , 则最优加工方法为:

$$D = \max(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (4)$$

## 2.2 加工方法的模糊推理应用举例

从上一层的设计中提取工艺特征要素后,通过模糊器对其进行模糊化操作,使其分别按高、中、低三档分类。同时,按不同的工艺特征要素分别对不同种类的加工方法进行模糊评价。例如,工字形制品的加工暂定为六种工艺方法<sup>[13,14]</sup>,即手糊成型、模压成型、RTM成型、纤维缠绕成型、拉挤成型、热压罐成型。前面已经提到过,一个工字形特征的模糊值最多有  $c_2^1 \times c_2^1 \times c_2^1 = 8$  种排列,而对于模糊矩阵来说,需要建立  $c_3^1 \times c_3^1 \times c_3^1 = 27$  种规则。每一规则产生评价6种不同的加工方法的模糊值(值域0~1),这样就建立起  $27 \times 6$  的工字形制品加工的总模糊规则矩阵(表2)。

表2 工字形制品加工的总模糊规则矩阵

Tab.2 Matrix of machining fuzzy rules of composite Ftype beam

规则	IF			THEN					
	强度	厚度	尺寸	手糊	模压	RTM	热压罐	拉挤	纤维缠绕
1	中	低	小	0.5	0.7	0.6	0.8	0	0
2	中	中	小	0.4	0.5	0.9	0.6	0.1	0
3	中	低	中	0.2	0.9	0.7	0.8	0	0
4	中	中	中	0.1	0.5	0.9	0.4	0	0
5	小	低	小	0.5	0.8	0.7	0.8	0.5	0
6	小	中	小	0.4	0.6	0.8	0.5	0	0
7	小	低	中	0.3	0.4	0.7	0.5	0.2	0
8	小	中	中	0.2	0.3	0.9	0.4	0.3	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
27	小	高	大	0	0	0.7	0	0	0

在模糊推理方法之前,我们需要建立加工方法的模糊矩阵,也就是规则矩阵,如表2所示。对于工字形制品的加工推理,需要27个规则,才能适应各种工字形制品的加工推理。从上一级的基于特征的

设计中提取特征的工艺要素,经过模糊函数或模糊器的模糊分类,对应每一条规则,产生各个规则的模糊可信度矢量  $X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ ,如表1所示。于是由公式2,经计算得表3所示结果。

表3 工字形制品的加工规则支持各种加工方法的模糊矩阵举例

Tab.3 Samples of machining fuzzy rules set of composite Ftype beam

规则	手糊	模压	RTM	热压罐	拉挤	纤维缠绕
1	0.0503	0.0704	0.0604	0.0805	0	0
2	0.0109	0.0136	0.0245	0.0163	0.0027	0
3	0.0028	0.0128	0.0099	0.0114	0	0
4	0.0004	0.0019	0.0034	0.0015	0	0
5	0.2516	0.4026	0.3522	0.4026	0.2516	0
6	0.0544	0.0816	0.1088	0.0680	0	0
7	0.0213	0.0284	0.0497	0.0355	0.014	0
8	0.0038	0.0058	0.0173	0.0077	0.0058	0
综合	0.3955	0.6171	0.6262	0.6235	0.2743	0

从表 3 可以看出,每一条规则支持某一种加工方法的程度是不同的,则由公式(3)能够得到多条规则支持同一种加工方法的综合模糊值,这样我们就求得加工方法的信任度模糊值矢量:

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_6) = (0.3955, 0.6171, 0.6262, 0.6235, 0.2743, 0)$$

表 4 工字形制品加工优化推理结果

Tab. 4 Result of optimal machining of composite I-type beam

工字形特征	工艺要求		手糊	模压	RTM	热压罐	拉挤	纤维缠绕	模糊推理的优化结果	实际选择结果
	长 × 宽 × 厚/mm <sup>3</sup>	强度/MPa								
特征 1	300 × 300 × 2	400	0.3955	0.6171	0.6262	0.6235	0.2743	0	RTM, 热压罐	RTM
特征 2	600 × 600 × 12	800	0.0246	0.4785	0.6876	0.4572	0.0047	0	RTM	RTM

### 3 结论

由于 CAPP 与复合材料的制作过程都是极为复杂的过程,不确定因素多,影响因素多,传统的 IF-THEN 推理方法有很大的缺陷,基于规则学习的模糊推理方法不同于传统的产生式的推理,它可以把像尺寸大小、强度、厚度等这些数值量自动转换为模糊变量,也就是根据模糊器或模糊函数,把实际的大范围的数值量压缩为有限的模糊量,通过模糊规则矩阵的推理,完成加工方法优化选择的任务,减少了计算机的计算量,加快了运算速度,对加工方法的选择也比较合理。模糊器或模糊函数以及模糊规则矩阵可以从领域专家的实际经验中或大量的实际加工的统计中产生,也可以利用神经网络的方法来产生,本文在基于特征建模的基础上,把模糊推理算法——Mycin 算法应用于复合材料加工工艺方法的选取上,并且选取结果与实际结果一致。在上面选取结果中,对于一般尺寸的制品,模压、RTM、热压罐工艺的信任值均较高,在实际生产过程中通常采用 RTM 工艺,因为在热压罐工艺工字形制品的模具制作难度较高;而对于第二个例子,尺寸较大、制品较厚、要求的强度较高,RTM 工艺的信任度模糊值最高,与实际生产相吻合。综上所述,初步解决了复合材料工艺推理的难点问题,预计模糊推理在基于 CAPP 的复合材料自动化制造技术中有广阔的应用前景。

#### 参考文献

- 1 陈祥宝. 先进树脂基复合材料的发展. 航空制造工程与维修, 2001; 3(1): 3 ~ 7
- 2 赵汝嘉. 计算机辅助工艺设计 (CAPP). 机械工业出版社, 1995: 3 ~ 6

经过以上模糊推理之后,我们就得到了各种加工方法的综合模糊评价值,根据公式(4),选择最大模糊值所对应的加工方法为最佳的加工方法。表 4 是两个特征工字形制品经过实际模糊推理后的模糊推理结果。

- 3 Zhang Y F, Nee A Y C. A hybrid approach for set-up planning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1988; 6(3): 183 ~ 190
- 4 Cherng J G, Shao X Y, Serpo R P. Feature-based part modeling and planning for rapid response manufacturing. Computers in Engineering, 1998; 34(2): 515 ~ 530
- 5 Chep C L, Westhoven T E, Episodal P. Associative memory approach for engineering. Design, Analyze and Manufacture. 1992; 6(3): 177 ~ 197
- 6 Huang J, Niekerk T I van. Computer-aided process planning an object oriented structure. IEEE Trans, On Computers, 1999; 5(1): 531 ~ 536
- 7 Hide I, Fujimoto R, Tanaka H. Neural networks that learn from fuzzy if-then rules. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1993; 1(2): 85 ~ 97
- 8 董红军. 基于多 Agent 的分布式 CAPP 及工艺信息管理研究. 西北工业大学博士学位论文, 2000: 12 ~ 17
- 9 Rocha B J, Usher J M. Application of genetic algorithms to operation sequencing for use in computer-aided process planning. Computers & Industrial Engineering, 1996; 30(4): 999 ~ 1 013
- 10 Lee D M A, Gu Z. Generic form feature recognition for process planning using neural networks, Annals of Numerical Mathematics, 1996; 3(3): 117 ~ 126
- 11 Sun W, Lin F, Hu X. Computer-aided design and modeling of composite unit cells. Journal of Composite Science and Technology, 2001; 61(10): 289 ~ 299
- 12 何新贵. 模糊知识处理的理论与技术. 国防工业出版社, 1999: 27 ~ 28
- 13 黄家康, 董永祺等. 复合材料成型技术. 化学工业出版社, 1999: 336 ~ 370
- 14 陈祥宝, 包建文等. 树脂基复合材料制造技术. 化学工业出版社, 2000: 1 ~ 3

(编辑 马晓艳)

宇航材料工艺 2003 年 第 6 期