

复合材料构件模具材料选择模糊决策研究

陈 功^{1,2} 周来水¹ 安鲁陵¹ 邓冬梅¹

(1 南京航空航天大学 CAD/CAM 工程研究中心,南京 210016)

(2 中国矿业大学,徐州 221008)

文 摘 为了实现复合材料构件模具材料的计算机辅助决策,在分析研究复合材料构件模具材料选择的知识和经验的基础上,运用加权多因素模糊模式识别技术,同时结合基于规则的推理(RBR)技术和权重动态调整技术,实现了具有一定自适应功能的复合材料构件模具材料选择模糊决策方法。实践表明,该决策方法能够很好地实现复合材料构件模具材料选用的快速智能化决策。

关键词 复合材料构件,模具材料,加权模糊模式识别,RBR,权重动态调整

Study of Fuzzy Decision Making for Selecting Composite Component Mold Material

Chen Gong^{1,2} Zhou Laishui¹ An Luling¹ Deng Dongmei¹

(1 Research Center of CAD/CAM Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

(2 China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008)

Abstract In order to carry out computer-aided decision-making of composite component mold material, this paper presents a fuzzy decision-making method for selecting composite component mold material based on the study of the knowledge and experiences of composite components mold material. The method uses technologies of fuzzy pattern recognition with the weights, technologies of RBR and technologies of dynamic adjusting weights. And the decision-making method possesses some self-adapting abilities. Practices prove that this Decision-making method can commendably carry out rapid and intellectualized decision-making for selecting composite component mold material.

Key words Composite component, Mold material, Fuzzy pattern recognition with weights, RBR, Dynamic adjusting of weights

1 引言

复合材料因其独特的性能^[1],如质量轻、比强度高、耐热性好、性能可设计性好等,日益受到各行各业的高度重视,并在汽车、兵器、电子,尤其是航空航天^[2~4]等领域得到越来越广泛的应用。最近成功完成试飞的空客 A380,由于扩大了碳纤维增强复合

材料的使用,提高了飞机液压系统的能力,从而使其净质量减少到 240 t 左右,比采用波音 747 技术制造的近似尺寸的飞机轻 10~15 t^[5]。

复合材料技术性能可以根据使用要求进行设计,材料与结构同时形成。采用复合材料容易成型复杂形状的构件,可有效减少零件数,提高结构的整

收稿日期:2005-07-14

基金项目:国防基础科研项目和高等学校优秀青年教师科研奖励计划资助

作者简介:陈功,1972年出生,博士研究生,主要从事 CAD/CAPP/CAM、反求工程方面的研究工作

体性。制造复合材料构件需要专门设计、制造相应的模具工装,其结构设计、材料选用有其自身特点。复合材料构件成型固化后,应在几乎不作任何加工的条件下满足其力学性能、表面质量、尺寸精度等设计要求,因此模具的完善与否是成型高性能复合材料构件的基础。

目前对复合材料的研究主要集中在新材料的研制、材料性能的研究、先进成型工艺的开发等方面,对复合材料构件模具的快速设计的研究几乎还处于空白。而模具材料的选择作为模具设计的关键因素之一,其结果直接关系到模具设计的很多方面,对复合材料构件的质量和成本等有很大的影响。本文在复合材料构件模具材料的快速、智能化选择上做了一些探索性的研究。

2 复合材料构件模具材料的多因素模糊模式识别

现有的复合材料构件模具材料选择的各个决定因素的描述中,绝大部分是一种“模糊”的描述,如“导热性好”、“质量轻”、“线膨胀系数相对较大”、“成本高等,因此本文根据复合材料构件模具材料选择中的相关知识,选用了一种加权多因素模糊模式识别的方法来进行推理决策。

2.1 多因素模糊模式识别^[6]

已知 n 个标准模型(模糊集): $A_1, A_2, \dots, A_n, A_n$ $F(X)$ 。待识别的对象不是 X 中的元素 x ,而是 X 上的模糊集 $B \in F(X)$,为 $F(X)$ 上的贴近度,若 $(A_i, B) = \max \{ (A_k, B) \mid k = 1, 2, \dots, n \}$ (1) 则认为 B 与 A 最贴近,判定 B 属于 A_i 一类。

(1)式中 $F(X)$ 上的贴近度 (A_k, B) 的常用表示方法有 Hamming 贴近度、Euclid 贴近度、模糊度贴近度、内积与外积贴近度等。而复合材料构件模具材料选择中各个因素的重要程度是不一样的,本文根据模具材料选择中各个因素在数学模型中的特点,提出了在模糊决策中采用加权 Hamming 贴近度的方法,即:

$$(A_k, B) = 1 - \sum_{j=1}^m w(u_j) |A_k(u_j) - B(u_j)|, k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中,

$$\sum_{j=1}^m w(u_j) = 1, w(u_j) \geq 0, j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

2.2 数学模型

复合材料构件模具常用的材料有铝、钢、铸铁

(或铸钢)、玻璃纤维复合材料、碳纤维复合材料、木材、增强石墨材料、单晶石墨、硅橡胶、陶瓷等,而模具材料的选择因素主要有导热性、耐热性、线膨胀系数匹配性(是指与复合材料构件线膨胀系数的匹配)、比模量、模具成本、精度(表面质量)、比强度、使用次数要求、构件的成型方法等,而模具结构质量因素可综合体现在比模量、比强度两个因素中。在综合分析了各种模具材料的特性、选择原则和实际经验的基础上^[7~11],结合多因素模糊模式识别数学模型的表达要求,本文提炼了如下的复合材料构件模具材料选择的数学模型和知识模型。

数学模型可由式(1)~式(3)表示。式(1)中 $A_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 表示第 k 种材料的材料特性模糊集,模糊集包含了模具材料选择的各个因素的模糊值。而 B 则为用户对选择模具材料的一些具体要求提炼出的模糊集,同样包含了模具材料选择的各个因素的模糊值。式(2)、(3)中的 $u_j, w(u_j) (j = 1, 2, \dots, m)$ 则表示了模具材料选择的数学模型中的各个模具材料选择的决定因素和对应的权因子。

建立数学模型以后,还需抽取适合模具材料选择数学模型的知识模型。在结合文献[7~11]和国内某大型航空企业模具材料选择经验的基础上,本文抽取了一个适合模糊推理的知识模型,即常用模具材料选择因素表(表1)和模具材料选择各个因素值及意义(表2)。由于篇幅所限,表中只列出了几种常用的材料。用户还可以动态添加自己的材料类型、定义材料的各个选择因素值。一旦添加设置完成,新的材料或因素便自动添加到模糊决策系统中。

模具材料选择的因素取值的一般原则是根据模具材料库中各种材料的相关物理量,如热导率、线膨胀系数、密度、拉伸强度、弹性模量等的取值情况,确定出导热性、耐热性、线膨胀系数匹配性、比模量等因素取表2中各值所对应的物理量的取值区间,同时结合实际经验、工程参数和有关资料,确定模具成本、精度、使用次数等因素的取值,从而最终确定每一材料各因素的取值。

根据各选择因素对复合材料构件模具材料模糊决策的影响程度不同,可以设定各因素的权因子 $w(u_j), j = 1, 2, \dots, 8$ 。根据各因素在材料选择中的重要程度,在文献[10]的基础上,同时结合该企业的实际使用经验和需求,将权因子初始值设置为:

$w = [0.12 \quad 0.14 \quad 0.14 \quad 0.1 \quad 0.14 \quad 0.12 \quad 0.1 \quad 0.14]$

依次表示模具材料选择决定因素的权因子值,即导热性、耐热性、线膨胀系数匹配性、比模量、模具成本、精度(表面质量)、比强度和使用次数。用户

可以根据自身特殊需求调整权因子的大小。权因子的使用,加强了模糊决策系统的灵活性,同时使系统具有了更强的自适应性和智能性。

表 1 常用模具材料选择因素表

Tab 1 Factors for selecting common mold material

材料	因素取值							
	导热性	耐热性	线膨胀系数匹配性	比模量	模具成本	精度(表面质量)	比强度	使用次数要求
铝	0.9	0.5	0.3	0.3	0.5	0.5	0.3	0.7
钢	0.5	0.7	0.5	0.3	0.3	0.9	0.3	0.9
铸铁	0.5	0.7	0.5	0.9	0.5	0.3	0.1	0.7
玻璃纤维复合材料	0.1	0.3	0.5	0.1	0.9	0.3	0.5	0.3
碳纤维复合材料	0.1	0.7	0.9	0.9	0.1	0.9	0.9	0.5
整体石墨	0.7	0.9	0.9	0.3	0.7	0.7	0.7	0.5
可铸陶瓷	0.3	0.9	0.7	0.5	0.7	0.5	0.5	0.3

表 2 模具材料选择的各个因素值及意义

Tab 2 Values and meanings of factors for selecting of mold material

取值	因素的意义							
	导热性	耐热性	线膨胀系数匹配性	比模量	模具成本	精度(表面质量)	比强度	使用次数要求
0.9	较好	较好	较好	很大	很低	很高	很大	很多次
0.7	较好	较好	较好	较大	较低	较高	较大	较多次
0.5	一般	一般	一般	一般	一般	一般	一般	一般
0.3	不好	不好	较差	较小	较高	较低	较小	较少
0.1	很差	很差	很差	很小	很高	很低	很小	很少

2.3 数学模型的求解

根据表 1,可建立的单因素评价矩阵见(4)式:

$$R = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.5 & 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0.7 & 0.3 \\ 0.5 & 0.7 & 0.7 & 0.3 & 0.7 & 0.9 & 0.9 \\ 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.9 & 0.9 & 0.7 \\ 0.3 & 0.3 & 0.9 & 0.1 & 0.9 & 0.3 & 0.5 \\ 0.5 & 0.3 & 0.5 & 0.9 & 0.1 & 0.7 & 0.7 \\ 0.5 & 0.9 & 0.3 & 0.3 & 0.9 & 0.7 & 0.5 \\ 0.3 & 0.3 & 0.1 & 0.5 & 0.9 & 0.7 & 0.5 \\ 0.7 & 0.9 & 0.7 & 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$(A_k, B) = B \quad R, k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中“ B ”表示由(2)式所进行的贴近度计算操作。

如果用户设定了如下的模具材料选择要求(各因素取值的意义见表 2):

$$B = [0.9 \quad 0.7 \quad 0.5 \quad 0.3 \quad 0.5 \quad 0.9 \quad 0.3 \quad 0.9] \quad (6)$$

$$B \cdot R = [0.868 \quad 0.924 \quad 0.772 \quad 0.596 \quad 0.616 \quad 0.744 \quad 0.672] \quad (7)$$

从该模具材料多因素加权模糊模式识别数学模型的求解结果,得出满足用户要求的模具材料选用优先序列为:钢、铝、铸铁、整体石墨、可铸陶瓷、碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料。

3 基于规则的材料选择合理性检查

复合材料构件模具材料模糊决策系统各个部分

之间的关系及运作流程如图 1 所示。

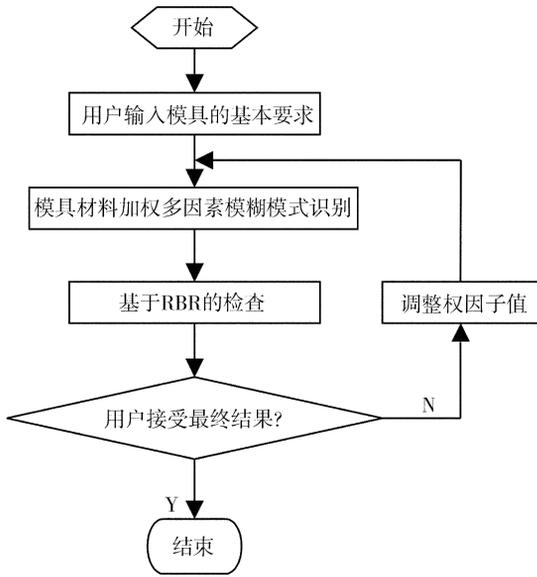


图 1 复合材料构件模具材料选择模糊决策流程图
Fig 1 Flow chart of fuzzy decision making for selecting composite component mold material

基于规则推理 (RBR) 是专家系统和基于知识的工程 (KBE) 中常用的一种推理方法。由于在复合材料构件模具材料决策中不仅要考虑以上的导热性、耐热性等 8 个因素, 还要受到如成型工艺、复合材料构件本身的特性及要求等条件的制约。本文将这些制约因素用规则来表示, 并将这些规则组织起来, 形成复合材料模具材料决策系统的规则库。典型的规则如下所示^[7]:

IF 成型方法 = 热压罐成型 THEN 模具材料 = 铝 OR 钢 OR 碳纤维复合材料
IF 成型方法 = 真空袋成型 THEN 模具材料 = 铝 OR 木材
.....

规则库中的规则主要是用于检查上面多因素加权模糊模式识别数学模型求解结果中得到的优选系列中的材料是否合理, 从优选值较高的开始, 一旦当前材料检验通过或所有材料库中的材料已经检查完毕, 则停止检验, 并输出最终的模糊决策系统所得出的材料选择结果。

4 加权模糊模式识别中的权重调整

前面设置了各因素权值的初始值, 但由于应用场合不同、客观条件改变、用户对领域知识认识不一致等原因, 这些权值最好能动态调整, 以增强系统的适应性和智能性。

在不同的应用领域关于特征权重自学习的研究很多, 比如权重的自省学习法、CBL 方法等。本文基于 David W. Aha 等人在 CBR 系统中动态调整实例的特征项权因子方法^[12], 提出了一种权重动态调整方法。

模糊决策系统权重调整的过程如下: 首先如果用户接受了模具材料模糊决策系统给出的材料选择结果, 则说明权重设置对该模具材料的选择是合理的, 保持各因素特征权重值不变; 如果用户认为模具材料模糊决策系统给出的材料选择结果与其期望的材料不符, 则说明各因素的初始权重设置有一定出入, 需要对其进行修改。修改的规则: (1) 用户输入的“材料选择要求”中的某个因素值与“期望材料”的对应因素的因素值相同, 但是与“系统决策材料”的对应因素值不同, 则提高此特征的权重值; (2) “材料选择要求”中某个因素值与“期望材料”的对应特征值不同, 但是与“系统决策材料”的对应因素相同, 则降低此因素的权重值; (3) 如果它们三者之间某项因素的值的关系不属于前面两种情况, 则此项因素的权重保持不变。

假设用户选择输入的“材料选择要求”对应的模糊集为:

$$B = [0.9 \quad 0.7 \quad 0.5 \quad 0.3 \quad 0.5 \quad 0.9 \quad 0.3 \quad 0.9]$$

“系统决策优选材料”的结果为“钢”, 而用户并没有接受该决策结果, 而是根据其自身特殊需求选择了“铝”。则此时需要对各因素的权重值进行调整, 具体调整情况如表 3 所示。

根据以上要求将权因子由

$$w = [0.12 \quad 0.14 \quad 0.14 \quad 0.1 \quad 0.14 \quad 0.12 \quad 0.1 \quad 0.14]$$

调整为:

$$w = [0.18 \quad 0.11 \quad 0.11 \quad 0.1 \quad 0.2 \quad 0.09 \quad 0.1 \quad 0.11]$$

$$B \quad R = [0.898 \quad 0.888 \quad 0.772 \quad 0.572$$

$$0.568 \quad 0.756 \quad 0.666]$$

则权因子调整后, 决策结果为“铝”。

表 3 模具材料选择各因素权重调整实例
Tab 3 Case of adjusting weights of each factor for selecting mold material

因素名称	因素值			权重调整
	材料选择要求	期望材料(铝)	系统决策材料(钢)	
导热性	0.9	0.9	0.5	增加
耐热性	0.7	0.5	0.7	减小
线膨胀系数匹配性	0.5	0.3	0.5	减小
比模量	0.3	0.3	0.3	不变
模具成本	0.5	0.5	0.3	增加
精度(表面质量)	0.9	0.5	0.9	减小
比强度	0.3	0.3	0.3	不变
使用次数要求	0.9	0.7	0.9	减小

5 结论

在分析研究复合材料构件模具材料选择的知识和经验的基础上,运用加权多因素模糊模式识别技术,同时结合基于规则的推理(RBR)技术和权重动态调整技术,实现了具有一定自适应功能的复合材料构件模具材料选择的模糊决策。该系统已集成在本课题组开发的“复合材料构件工装快速设计系统”中,并在国内某大型航空企业中得到了初步应用,取得了很好的应用效果。今后将针对模具材料的选择决策,进一步扩充模具材料库中的材料种类,结合不同工艺、工件大小、形状特征等因素和经验知识,探索各种材料因素值的设置合理性,完善决策推理方法,以便更好地服务于复合材料构件工装的快

速智能化设计。

参考文献

- 1 Baillargeon Y, Vu-Khanh T. Prediction of fiber orientation and microstructure of woven fabric composites after forming Composite Structures, 2001; 52(3~4): 475~481
- 2 Florence Roudloff, Michael Gädke. Damage tolerance of composite structures for large transport aircraft Aerospace Science and Technology, 2000; (4): 23~32
- 3 Dieter Petersen, Raimund Rolfes, Rolf Zimmernann. Thermo-mechanical design aspects for primary composite structures of large transport aircraft Aerospace Science and Technology, 2001; (5): 135~146
- 4 Rolfes R, Petersen D, Block J et al. Experimental determination of the convection coefficient at the surface of a composite aircraft wing Braunschweig, 2000
- 5 <http://www.people.com.cn/GB/jingji/8215/41174/41176/3020514.html>
- 6 朱剑英. 智能系统费经典数学方法. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001
- 7 航空航天部科学技术研究院(编). 复合材料设计手册. 北京: 航空工业出版社, 1999
- 8 赵渠森等. 先进复合材料手册. 北京: 机械工业出版社, 2003
- 9 田嘉生, 王枫. 复合材料制件成形用模具材料研究. 沈阳航空工业学院学报, 1997; 14(2): 34~36
- 10 牛春匀著, 西安飞机工业公司译. 飞机复合材料结构设计及制造. 第1版. 西安: 西北工业大学出版社, 1995
- 11 电机工程手册编辑委员会. 机械工程手册. 工程材料卷. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 1996
- 12 Aha D W. Case-based learning algorithms. In: Proceedings of the 1991 DARPA case based reasoning work shop. Morgan Kaufmann Publishers, Inc.

(编辑 李洪泉)