

压气机机匣零件切削刀具配置专家系统开发*

赵 威, 张 征, 李 亮

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 现代航空发动机零件结构越来越复杂,涉及的刀具种类与数量也越来越多,给刀具选择与工艺制定带来了严峻挑战。以某型压气机机匣零件为研究对象,以最佳刀具配置为研究目标,在压气机机匣零件切削数据库的基础上,设计开发了基于B/S结构的压气机机匣零件切削刀具配置专家系统,并进行了实例演示。该系统首先根据被加工对象特征及其需求,运用规则推理方法初选刀具;进而应用人工神经网络预测初选刀具的耐用度及被加工特征的表面粗糙度;最后以该预测结果作为参考,应用综合评判技术进行刀具性能评价,并对所选刀具进行优化排序和完成推荐。系统运行实例验证了所开发系统能够实现压气机机匣零件切削加工刀具的智能选取。

关键词: 压气机机匣; 刀具选配; 专家系统; 人工神经网络; 刀具性能评价

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.16.104



赵 威

南京航空航天大学,副教授。主要研究方向为难加工材料与难加工结构的高性能切削技术、高性能冷却润滑技术等。主持在研和完成国家自然科学基金、国家科技重大专项子课题、博士点基金、航空科学基金等 10 余项。

* 基金项目:“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项子课题(2014ZX04012014)。

压气机机匣零件作为航空发动机典型零件,因其结构复杂、工件材料难加工等因素导致在实际加工中切削刀具的快速磨损以及加工表面粗糙度难以满足实际加工要求^[1]。合理的刀具选择方案不仅可以提高压气机机匣零件的加工效率,而且可以保证其加工质量的稳定性。

自 1964 年世界上第一个切削数据库 AFMDC 诞生以来,经过近半个世纪的发展,全世界已建立了 30 多个金属切削数据库,并且在航空零件制造方面的应用越来越广泛。例如针对航空零件典型难加工材料与工艺所建立的切削数据库系统^[2-3]。同时为了提高切削刀具利用率、降低零件加工成本,人们在切削数据库的基础上对刀具选择方式进行了大量研究并开发了一系列刀具选择系统。如文献[4]通过采用规则推理方式,为多工序车削选择合适的车削刀片。

文献[5]通过采用计算相似度的实例推理方法,实现了切削刀具的选配。文献[6]通过实例推理与规则推理方式实现高速铣削刀具的选择。文献[7]采用模糊推理技术,实现淬硬钢铣削刀具的选择等。然而,以往的刀具选择系统类似于刀具电子手册,只输出满足用户要求的一系列刀具,并未综合考虑到零件材料及其零件结构特征对所选刀具的加工性要求,如推荐刀具应用时的耐用度、加工表面粗糙度、金属去除率等。

此外,影响刀具切削性能的因素很复杂,而且各因素之间通常还存在着相互作用,因而难以定量地去评价刀具的切削性能。层次分析法作为一种定量分析和定性分析相结合的决策方法,可以有效确定各评价指标的重要性及其权重,通过加权平均方法建立刀具评价标准,能够解决针对压气机机匣特征的刀具性能综合评

判问题^[8]。除此之外,人工神经网络技术具有高度非线性拟合能力,能够解决刀具耐用度、表面粗糙度及其影响因素间的非线性问题,目前已广泛应用于解决刀具耐用度以及表面粗糙度预测问题^[9-10],该方法可集成于刀具选择系统,预测结果可以作为刀具性能评判的评判指标量值指导刀具选择过程。

为此,本文针对压气机机匣零件切削加工特点,对系统需求进行分析,以提高材料去除率、刀具耐用度、加工表面粗糙度为目标,在压气机机匣切削数据库与大量刀具选配规则的基础上,设计开发出了压气机机匣零件切削刀具配置专家系统,该系统包括刀具耐用度及加工表面粗糙度预测和刀具优化配置两个主要功能模块,最终通过实例,对系统的运行进行了验证。

系统需求分析

随着发动机性能的改进与提高,压气机机匣零件加工特征与机匣零件材料也发生了很大变化。如图1所示,其加工过程涵盖了车、铣、钻等多种复杂加工方式,每种加工方式下又包含多种加工特征,因此压气机机匣零件的制造难度越来越大。压气机机匣零件不仅设计结构复杂,而且

多采用钛合金、镍基高温合金等具有高强度、高硬度、高韧性等特性的难加工材料作为零件材料,以传统切削加工方式加工这类材料时,由于刀具与工件之间的相互作用产生严重的工件塑性变形以及刀具、工件接触区的强烈摩擦,从而导致刀具的剧烈磨损及表面质量难以保证等问题。

通过以上分析,目前压气机机匣加工面临的问题主要体现在以下几个方面:

- (1)加工效率难以保证。
- (2)加工表面完整性,特别是加工表面粗糙度难以保证。
- (3)切削刀具的刀具耐用度难以保证。

在压气机机匣零件的切削加工中,选择合适的切削刀具,不仅能提高加工效率,还能延长刀具的使用寿命,提升刀具加工质量稳定性。为了解决压气机机匣零件特征加工过程中刀具选择问题,同时满足所选刀具对材料去除率、刀具耐用度、加工表面粗糙度的要求,亟需开发出一种以材料去除率、刀具耐用度、加工表面粗糙度为参考的压气机机匣零件切削刀具配置专家系统。

根据系统需求,将系统分为3个功能模块,模块对应系统需求及技术指标如下:

(1)刀具耐用度及加工表面粗糙度预测模块。

模块的对应系统需求:能够存储和充分利用实际加工数据(如刀具耐用度、表面粗糙度)来进行加工结果预测。

模块对应的技术指标:刀具耐用度、表面粗糙度预测值与实际值误差在10%以内。

(2)刀具优化配置模块。

模块对应系统需求:能够存储和充分利用压气机机匣零件加工中所积累的刀具选择的经验知识,并且使所选取的刀具满足实际加工需求(刀具耐用度、表面粗糙度)。

模块对应技术指标:能够以不同的刀具选择策略快速、准确地输出满足用户需要的切削刀具。

(3)数据管理模块。

模块对应的系统需求:能够实现刀具信息、刀具规则、预测数据等数据信息的管理。

模块对应的技术指标:能够实现对数据的查询、添加、删除、修改等操作。

通过需求分析确定压气机机匣零件切削刀具配置专家系统应包括刀具耐用度及加工表面粗糙度预测和刀具优化配置两个功能模块,以及为功能模块提供数据支持的数据管理模块。

系统总体设计

1 系统逻辑结构

通常刀具选择系统只具有刀具的选择功能,考虑到压气机机匣零件加工过程中对刀具耐用度、表面粗糙度和材料去除率的要求,首先对以往切削数据以及刀具选择规则进行采集,以此为基础建立压气机机匣零件切削刀具配置专家系统。为了解决系统的可扩展性以及可维护性,用当今软件普遍采用的层次结构来设计本系统。将系统分为3层结构,即应用层、逻辑层和数据层,如图2所示,

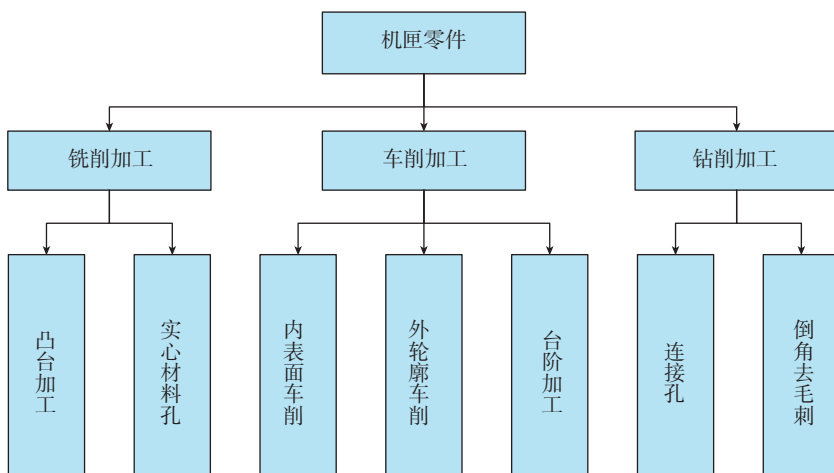


图1 机匣零件加工特征
Fig.1 Machining feature of casing parts

分别介绍如下。

应用层即用户界面层,采用 B/S 结构来开发压气机机匣零件切削刀具配置专家系统,用户在任何地方只需根据管理员分配的用户名和密码在客户端浏览器上输入系统首页的网址即可完成与服务器的数据通信,进而应用该刀具配置专家系统进行刀具的选择。此外,应用层还包括对用户角色权限的管理。

逻辑层是系统的核心层,它一方面通过引入 MLAPP.dll 动态链接库调用 Matlab 引擎,实现与 Matlab 的无缝集成,并且从数据层获取数据,实现基于 GA-BP 神经网络算法的预测功能和刀具选择推理功能;另一方面,它通过 CLIPS.dll 动态链接库实现与 CLIPS 专家系统进行链接,实现规则推理功能^[1]。此外,为了保证系统安全性、可控性,执行运行监测、系统帮助以及数据维护等功能。逻辑层的主要功能包括刀具的选择、刀具耐用度以及加工表面粗糙度的预测、刀具性能评判、基础数据的添加、删除、修改、查询等功能。

数据层主要管理基本数据、刀具选择规则及实际加工过程中的预测数据并与逻辑层进行交互。逻辑层的计算生成数据存入数据层;数据层为逻辑层的运算提供基本数据。

2 系统总体流程

系统主要包括加工结果预测及刀具优化选择两个功能模块。首先,由用户输入加工条件以及加工信息,依据规则库中相关的规则选出满足加工特征要求的一系列刀具。根据用户选择的相应刀具优化策略来确定预测变量。然后,预测模块利用最终给定的预测变量,调用数据库中数据,建立预测数学模型,估计加工性能,例如刀具耐用度、加工表面粗糙度等指标。本系统软件流程如图 3 所示,由用户输入相应的加工信息后开始运行。在确定了预测变量后,预测模块开始工作,根据预测变量的最

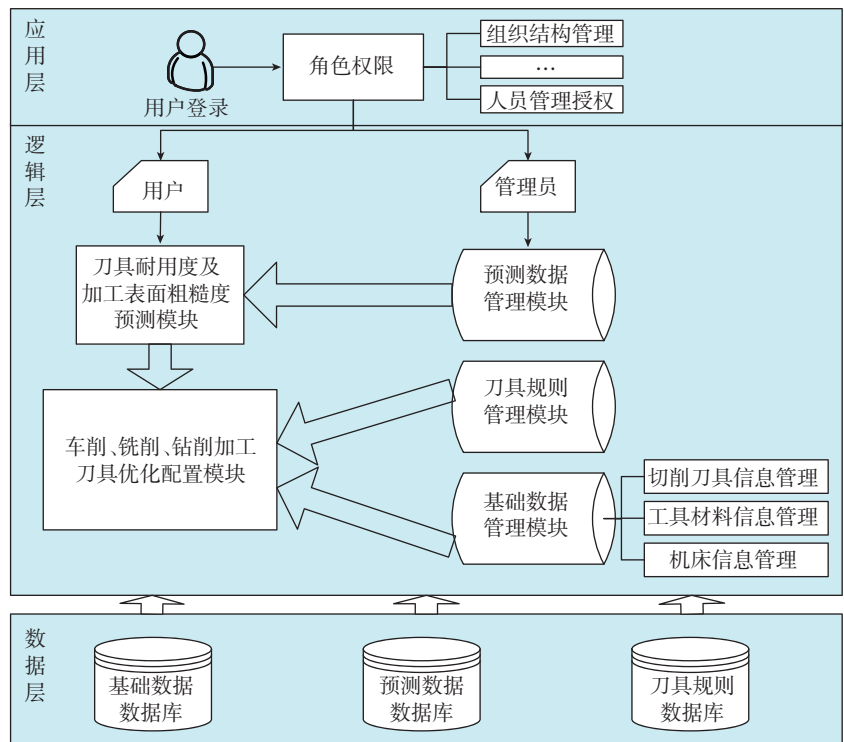


图2 系统结构模型
Fig.2 Structure of system

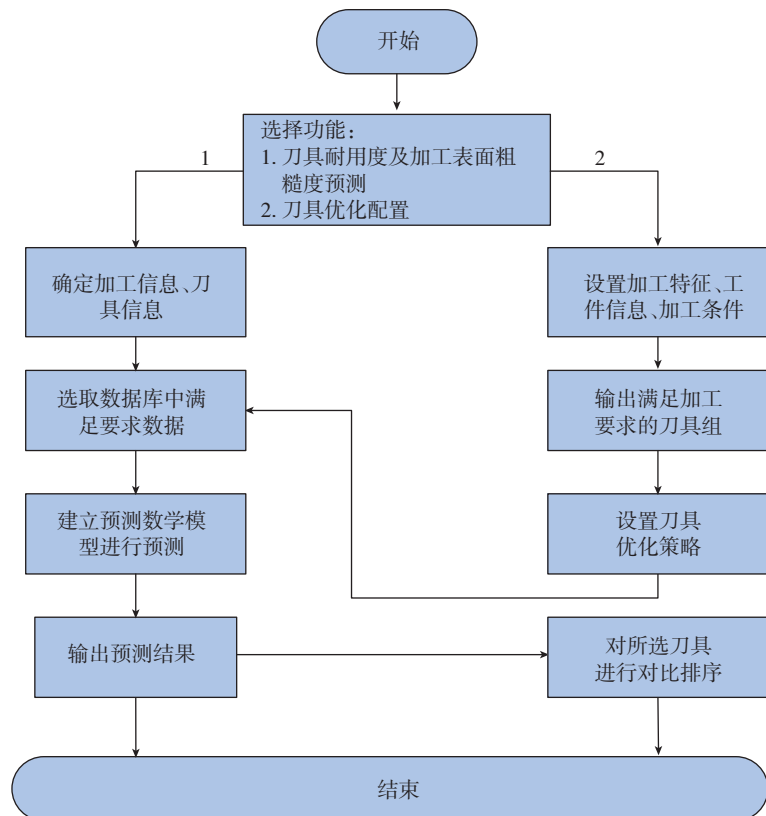


图3 系统流程
Fig.3 Flow chart of system

终结果,根据相应的优化策略对刀具组中的刀具进行优化排序,选取最适合该加工特征的刀具。用户可以选择3种刀具优化策略:最长刀具耐用度、最佳加工表面粗糙度和综合因素选择策略。

系统关键功能模块设计

1 刀具耐用度及加工表面粗糙度预测模块

刀具耐用度及加工表面粗糙度预测模型的建立是刀具优化配置模块中对所选刀具进行优化排序的基础。由于影响压气机机匣零件加工刀具耐用度与表面粗糙度的变量很多,归纳起来可以分为4个方面:刀具材料、工件材料、刀具几何参数以及切削参数。

传统的通过构建数学经验公式的方法实现加工结果的预测功能需要大量的数据支持。选用具有高度非线性拟合能力的BP神经网络,并通过遗传算法优化BP神经网络的初始权值与阈值以解决BP神经网络的收敛速度慢、容易陷入局部最小值等问题,即构建GA-BP神经网络作为网络训练模型。根据用户输入的刀具信息,查找预测数据库中满足条件的数据作为训练数据,通过MLAPP.dll动态链接库实现数据接口的链接,在服务器端调用MATLAB中的神经网络工具箱及遗传算法工具箱,对数据进行网络训练,实现刀具耐用度与加工表面粗糙度的预测功能。此外,通过对实际生产数据的收集,训练数据会更加丰富,从而使所建立的神经网络预测模型具有更高的拟合度,预测结果更加接近生产过程中的真实值。加工结果预测模块实现流程如图4所示。

2 刀具优化配置模块

传统开发的刀具选择数据库从根本上只能说是电子手册,通过这种方式查询刀具准确度和效率都很低,基于规则的推理技术(Rule-Based

Reasoning, RBR)类似于人类的思考方式,具有易推理的优点。

其一般形式为:IF 前提 THEN 结论。

通常压气机机匣加工过程中,首先需要知道机匣工件材料、机匣加工特征、加工条件、加工精度等,即为条件,然后根据以上条件进行刀具选择,即为结论。可以通过逻辑运算符AND或OR组成的表达式,将加工信息组合在一起,提高推理效率。例如,在铣削方式下实心材料孔特征加工中的刀具选择规则可以是:

IF 加工特征 = 实心材料孔 AND 工件材料 = TC4 AND 加工条件 = 良好 AND 加工精度 = 精加工。

THEN 刀具型号 = “CoroMill210” OR “CoroMill490”。

在系统中,刀具选择规则可以存储在规则数据库中,CLIPS专家系统可以作为推理机进行规则推理,实现刀具选择过程。

规则推理方式能够选出满足加工要求的一系列刀具,但并未考虑到用户对刀具加工性能的需求,包括刀具耐用度、加工表面粗糙度、材料去除率等,因此在刀具选择系统中加入刀具性能优劣分析是必要的。由于机匣加工中,加工刀具的性能通常受到很多因素的共同影响,无法根据一个因素单独作为刀具性能优劣的评判标准。

除此之外,压气机机匣零件在粗加工过程中在保证加工效率的基础上兼顾刀具耐用度,而对加工表面质量要求不高。精加工过程要保证零

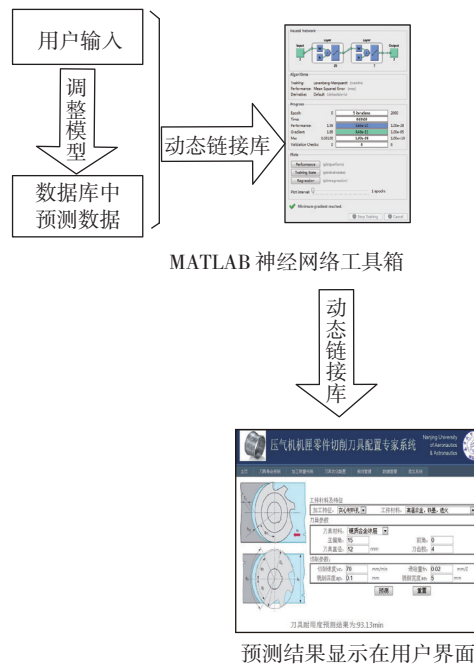


图4 预测模块实现流程
Fig.4 Flow of prediction module

表1 各评判指标权重值

加工方式	评判指标	权重值
粗加工	刀具耐用度 ($V_b=0.3\text{mm}$)	0.6
	金属去除率	0.4
精加工	加工质量 (表面粗糙度 R_a)	0.7
	刀具耐用度 ($V_b=0.3\text{mm}$)	0.3

件的加工质量达到规定要求的同时兼顾刀具耐用度,而不考虑材料去除率。因此,在精加工时着重考虑加工质量并兼顾刀具寿命,以加工表面粗糙度和刀具耐用度作为精加工刀具性能的评判指标^[12]。针对机匣零件粗、精加工的不同特点采用层次分析法中的10/10~18/2标度方法,分别建立粗、精加工压气机机匣零件切削刀具评判标准^[13]。使用该方法最终确定的各评判指标权重如表1所示。

根据以上指标权重,通过加权平均法建立刀具性能综合评价模型。刀具性能评价价值C得计算公式为:

$$C = \omega_1 \cdot \frac{a_i}{a_1} + \omega_2 \cdot \frac{b_i}{b_1} \quad (1)$$

式中, ω_1, ω_2 为评判指标1与评判指标2所对应的权重系数; a_i, b_i 为第*i*把刀具所对应的评判指标1与评判指标2的值。

上式中,对每把刀具评判指标值除以第一把刀具所对应的评判指标值,是为了消除不同评判指标间单位差异的影响。

此外,刀具耐用度与金属去除率值越高,证明刀具对应的性能越好,而表面粗糙度值越低,证明刀具加工质量性能越好。因此,当评判指标为加工质量(表面粗糙度)时,以其真实值的负值作为评判指标的标量值。通过上述方法建立刀具性能综合评判标准。

本系统结合压气机机匣零件加工特点以及实际生产中对于刀具的不同需求,确定3种刀具优选策略,包括:

- (1) 根据刀具耐用度预测值进行排序。
- (2) 根据表面粗糙度预测值进

行排序。

- (3) 根据综合评判标准进行排序。

根据用户选择的相应刀具优化策略来确定预测变量,预测模块利用最终给定的预测变量,调用数据库中的数据,获得评价指标预测值作为评价指标标量值,通过计算对比,进而对刀具进行优化排序。

系统刀具选择实例

压气机机匣零件切削刀具配置专家系统采用C#作为开发语言,数据库使用SQL Server2010,在Windows系统环境下的Internet浏览器上运行的为具体系统的运行实例,如图5所示。

以实心材料孔加工特征为例,假设输入采用以下参数:

- (1) 设置加工信息: 包括加工特征基本尺寸,设置切削时间为60min、刀具耐用度为30min以及加工表面粗糙度 $6.3 \mu\text{m}$,选择工件材料为TC4钛合金,设置机床夹具和工作系统的稳定性为良好,加工精度



图5 系统运行实例

Fig.5 Application case of system

选择精加工。通过以上设置,系统通过计算确定加工初始切削参数及加工要求。

(2) 设置刀具优化选择策略: 根据综合评判标准进行排序作为刀具选择策略。点击搜索刀具按钮,系统会根据输入信息,基于前述刀具优化选择方式,匹配规则库中的规则,输出满足要求的刀具,调用加工结果预测模块,对评价指标进行预测,根据所选优化策略进行刀具选择优化,其结果如图5所示。

按照刀具评价顺序输出满足加工要求的刀具包括CoroMill490和CoroMill210两把刀具,同时输出两把刀具耐用度预测值分别为:89.40min和41.32min,两把刀具的加工表面粗糙度 R_a 预测值分别为: $3.614 \mu\text{m}$ 和 $2.253 \mu\text{m}$ 。将预测数值带入公式(1)中,分别对两把刀具进行刀具性能综合评价,其结果如表2所示。

由于 $C_{\text{CoroMill490}} < C_{\text{CoroMill210}}$,则CoroMill210的综合切削性能优于CoroMill490,如图5所示,所选刀具按照综合评价策略排序为CoroMill210、CoreMill490。通过点击查看刀具信息链接,可以查看刀具的详细信息。

结束语

根据压气机机匣零件加工特点及生产需求分析,在针对压气机机匣零件所建立的切削数据库基础上,设计开发了基于B/S结构的压气机机匣零件切削刀具配置专家系统。

(1) 刀具耐用度及加工表面粗糙度预测模块能够通过用户需求,实现刀具耐用度及加工表面粗糙度的精准预测功能。

(2) 刀具优化配置模块能够通过规则推理技术选取刀具库中满足加工要求的切削刀具,用户可以根据多种刀具优选策略对所选刀具进行优化排序,以满足加工中对刀具性能的不同需求。

表2 所选刀具预测值及综合评判结果

刀具	刀具耐用度预测值 /min	表面粗糙度预测值 / μm	评估值 C
CoroMill490	89.40	3.614	-0.400
CoroMill210	41.32	2.253	-0.297

该系统的建立有利于提高生产效率、降低生产成本、增强压气机机匣零件加工质量稳定性及刀具利用率。

参考文献

- [1] 赵玉坤. 高效加工在航空机匣零件制造中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2012(6): 4-5.
- ZHAO Yukun. The application of high efficiency machining in the manufacturing of aviation casing parts[J]. New Technologies and Products, 2012(6): 4-5.
- [2] 丁明娜. 航空航天典型材料切削数据库系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- DING Mingna. Study on cutting database system for aerospace typical materials[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [3] 高航, 孙长乐, 杜宝瑞. 复合材料典型构件加工工艺数据库的构建[J]. 航空制造技术, 2011(21): 87-91.
- GAO Hang, SUN Changle, DU Baorui. Construction of process database for typical composite component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(21): 87-91.
- [4] AREZOO B, RIDGWAY K, AL-AHMARI M A. Selection of cutting tools and conditions of machining operations using an expert system[J]. Computers in Industry, 2000, 42(1): 43-58.
- [5] 王力. 基于相似度的刀具选配方法研究[J]. 工具技术, 2014, 48(6): 44-47.
- WANG Li. Milling tools selecting method research based on case-based reasoning[J]. Tool Engineering, 2014, 48(6): 44-47.
- [6] 张建. 基于网络的高速铣削工艺专家系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- ZHANG Jian. Research on web-based expert system for high speed milling process[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [7] IQBAL A. 淬硬钢铣削优化自适应专家系统的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- IQBAL A. A self-developing expert system for optimizing hard-milling process[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [8] 吴丹, 王先逵. 面向刀具优选的权重决策[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998(2): 69-71.
- WU Dan, WANG Xiankui. Weight decision for cutting tool selection[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1998(2): 69-71.
- [9] 胡金平, 高淑琴, 齐立涛. 应用BP神经网络预测高速铣削表面粗糙度[J]. 装备制造技术, 2012(6): 237-238.
- HU Jinping, GAO Shuqin, QI Litao. Prediction of surface roughness of high speed milling using BP neural network[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2012(6): 237-238.
- [10] AL-ZUBAIDI S, GHANI J. Prediction of tool life in end milling of Ti-6Al-4V alloy using artificial neural network and multiple regression models[J]. Sains Malaysiana, 2013, 42(12): 1735-1741.
- [11] 王华, 李鹏波. CLIPS嵌入.NET平台技术与实现[J]. 计算机系统应用, 2006(11): 45-48.
- WANG Hua, LI Pengbo. The realization and application of the technology embedding CLIPS within .Net platform[J]. Computer Systems & Applications, 2006(11): 45-48.
- [12] 赵威, 王盛璋, 何宁, 等. 航空钛合金结构件铣削刀具性能模糊综合评判[J]. 中国机械工程, 2015(6): 711-715.
- ZHAO Wei, WANG Shengzhang, HE Ning, et al. Comprehensive fuzzy evaluation of cutting tool performance in milling of aviation titanium alloy components[J]. China Mechanical Engineering, 2015(6): 711-715.
- [13] 高晓红, 信春华. 提高层次分析法有效性的一种方法[J]. 技术经济, 2004(8): 59-62.
- GAO Xiaohong, XIN Chunhua. An approach to improve the validity of the analytic hierarchy process[J]. Technology Economics, 2004(8): 59-62.

Development of Cutting Tool Selection Expert System for Compressor Casing Parts

ZHAO Wei, ZHANG Zheng, LI Liang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Nowadays, the structure of modern aircraft engine parts becomes more complex, resulting in more categories and quantities of cutting tools. Therefore, this phenomenon brings tremendous challenge to select the cutting tools and to develop processing technology. Taking a type of compressor casing and its best cutting tool selection as research object, a cutting tool selection expert system for compressor casing parts based on B/S structure is designed on the basis of cutting database of compressor casing parts. In this system, considering the characteristics of processed objects and its requirements, the selection of cutting tools is achieved by rule-based reasoning method firstly. And then the tool life and surface roughness prediction module of processed objects based on artificial neural network is built. At last, the best cutting tool could be selected through comparison of tool performance with the value of prediction model. An example is brought to verify the intelligent selection of the cutting tool in compressor casing parts manufacturing.

Keywords: Compressor casing; Tool selection; Expert system; Artificial neural network; Cutting tool performance evaluation (责编 古索)