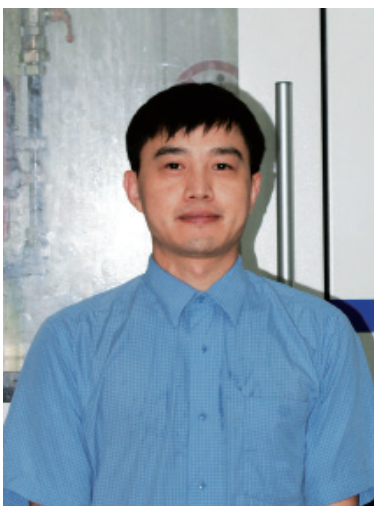


基于知识的高速硬铣削 工艺专家系统

High-Speed Hard Milling Expert System Based on Knowledge

南京航空航天大学机电学院 李亮 何宁 赵威



李亮

南京航空航天大学副教授,主要从事难加工材料高性能切削技术、智能加工技术和微细切削方面的学术研究,发表学术论文 30 余篇,获省部级奖 6 项,授权发明专利 2 项。

本文提出一种新的高速硬铣削工艺专家系统的设计思路,该系统具有处理新的硬切削变量、模糊数组的建立、自动生成优化和预测规则库、解决对立规则的冲突问题以及保持界面的自动更新等功能。

超高强度钢 ($\sigma_b \geq 1380\text{MPa}$) 具有极高的比强度和良好的韧性,是航空航天领域常用的关键结构材料,用于航空航天结构的重要承力件,如飞机结构中的各种高负荷承力构件,包括起落架、作动筒、连接件、大梁以及战术导弹固体火箭发动机壳体等。低合金超高强度钢 30CrMnSiNi2A、300M,中合金超高强度钢 H11mod、H13 以及高合金超高强度钢 AF1410、Aermet100、15-5PH、17-7PH、PH13-8Mo 等材料是飞机结构中主要的超高强度

钢,在热处理后的强度和硬度很高,切削加工极为困难。

超高强度钢飞机零件不仅形状复杂,而且加工精度高,同时对加工表面完整性也有很高的要求,生产中常采用磨削作为热处理后精加工的最终手段。如典型的超高强度 300M 钢起落架的制造工艺为:锻造成形-正火-回火-粗加工外形-回火-热处理(淬火+回火)-精加工(磨削)-光整-表面强化。由于淬火后的钢硬度较高($> \text{HRC}50$),生产中采用磨削工序加工效率低,砂轮

及磨削液消耗量大、成本高、粉尘和废液污染程度严重,而且对于复杂型面磨削困难;此外由于超高强度钢的切削力和切削热较常规材料大得多,在磨削和光整打磨阶段极易产生磨削烧伤和表层裂纹,为避免上述问题,只能采用小余量磨削,导致工艺周期长,加工质量难以控制。同时超高强度钢磨削表面常有白层出现,表层为残余拉应力状态,对起落架等飞机主承力结构的疲劳性能具有很大的影响。由此可见,磨削烧伤和表层裂纹一直是生产中难以控制的主要问题。

硬铣削是近年来在模具制造业中广泛应用的技术,此项工艺基于高速铣削(HSM),以小切深、高切削速度为特征,应用于淬火后的钢(硬度 $>HR C35$)的加工。随着聚晶立方氮化硼(PCBN)性能的提高和价格的调整,使得精密切削加工淬硬钢已更经济,采用陶瓷和PCBN刀具直接切削硬度大于 $HR C50$ 的淬硬钢,可获得 $4 \sim 10 \mu m$ 的尺寸精度和 $R_a 0.3 \mu m$ 的表面粗糙度,从而有效地减少淬硬钢的精磨工序,采用高速硬切削工艺,实现“以切代磨”,是加工超高强度钢复杂零件的主要发展方向。与采用陶瓷和PCBN刀具进行传统“硬车削”的工艺相比,在加工复杂曲面零件时,采用涂层硬质合金进行硬铣削是近年来在模具制造业广泛应用的技术,其基于高速铣削(HSM),以小切深、高切削速度为特征,直接应用于淬火后的钢(硬度 $>HR C35$)的加工,实现高硬度钢的以切代磨,并在很大程度上取代了电火花加工。硬铣削技术有很多优点,如减小切削力,获得更好的尺寸精度,已加工表面为残余压应力且金相变化小,等等。另一方面,硬铣削也有一个很大的缺点,那就是刀具耐用度短。

目前硬铣削技术面临的问题主要有以下方面:(1)寻求能够抑制刀

具磨损的铣削条件;(2)寻求能够获得较好的工件加工表面完整性的,特别是较好的表面粗糙度的铣削条件;(3)在刀具耐用度、表面粗糙度和材料去除率3个互相矛盾的目标之间寻求亚优解。

由于硬铣削技术在应用中,易受各种不确定的工艺参数的干扰,生产中迫切需求一种能够快速提供有关硬铣削刀具材料选择、刀具设计、工艺参数优化等信息的工具,同时能够在实际加工过程之前对加工结果进行较为精确的预测。

为此我们针对高速硬铣削工艺技术开展了全面的研究,以提高刀具耐用度、加工表面质量和材料去除率为目标,全面系统研究了高速硬铣削工艺参数优化,在大量试验研究的基础上,开发出一种基于知识的高速硬铣削工艺专家系统,可为用户提供刀具角度选择、工艺参数优化和加工效果预测等功能,并能根据用户的数据反馈,自动调整优化策略和推理规则。

高速硬铣削专家系统设计

通常机械加工工艺专家系统主要有工艺相关数据采集与存储、推荐工艺参数及工艺过程、加工结果预测

等功能,考虑到硬铣削工艺的特点,首先进行前期的数据分析以及数据采集,根据获得的基础数据以及专家知识进行规则分类、数据优化,而后在上述工作的基础上开发与实现硬铣削工艺专家系统。该专家系统的功能主要包括2部分:根据实际需要优化选择和组合典型变量;根据既定或选择的变量提供加工性能预测值。图1为所设计的硬铣削专家系统结构示意图。

高速硬铣削专家系统包括2套规则,各由一个独立的模块控制和操作。首先,优化模块依据相关规则找出包括铣削方式、刀具螺旋角、冷却润滑方式等参数(预测变量)最优组合。对参数的选择根据用户的实际需要完成,如材料硬度和预测变量。然后,预测模块利用最终给定的预测变量以及相关规则估计加工性能,例如刀具寿命、工件表面粗糙度以及切削力等指标。该基于知识的专家系统通过一个前向链接专家系统 Fuzzy CLIPS 开发而成。专家系统软件流程(图2)由用户输入实际对象参数以及变量后开始运行。在确定了预测变量后,预测模块开始工作,根据预测变量的最终给定值对相应变量值同时进行估计。用户可以

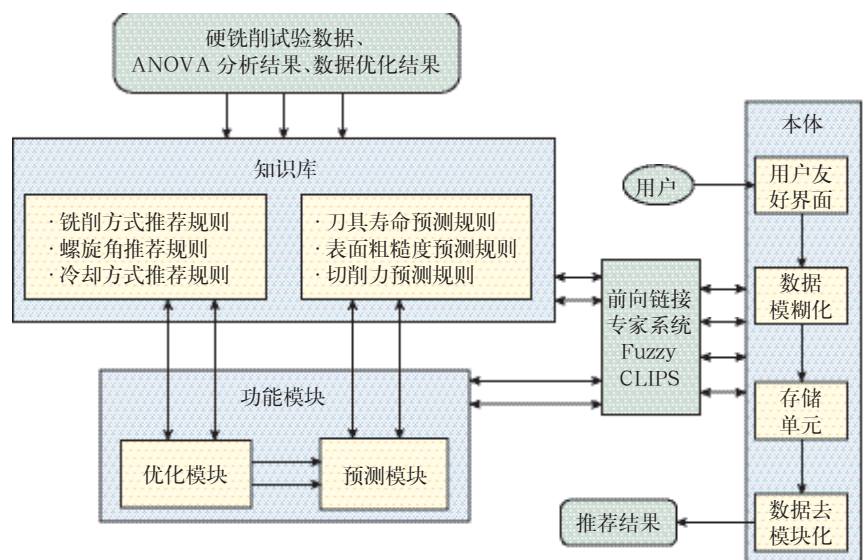


图1 硬铣削专家系统结构

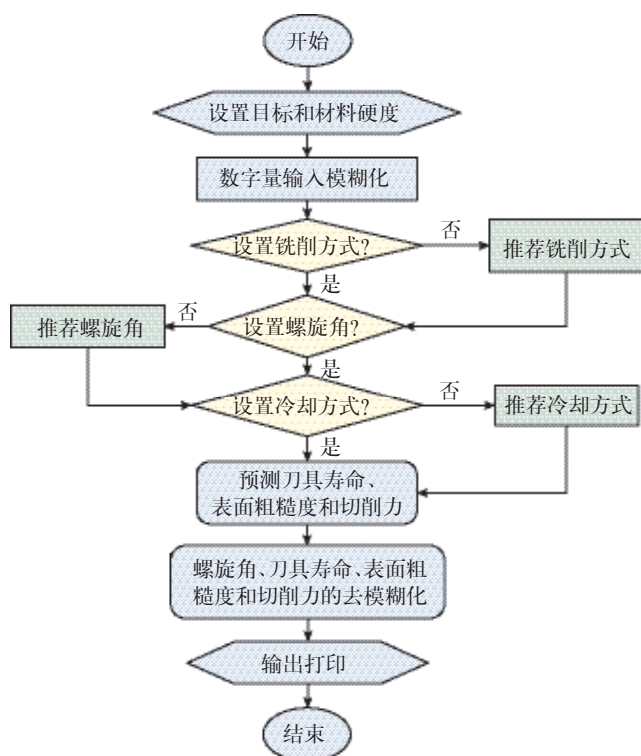


图2 硬铣削工艺专家系统流程

选择以下3个目标: 最长刀具寿命、最佳工件表面粗糙度和两者同时满足。

高速硬铣削切削参数优化及规则获取

由于影响高速硬铣削的变量很多,如切削用量、铣削方式、刀具参数、机床结构、零件材料和种类以及装夹方式等,因此必须通过大量试验对刀具参数、铣削用量和其他参数进行优化,并从试验数据分析中提炼专家系统的推理规则。

笔者前期进行了大量的试验对刀具角度、刀具涂层、铣削用量、切削方式等参数进行了研究,通过对这些试验数据的分析和优化,进而获得专家系统的模糊推理规则。通过大量高速铣削淬硬钢的试验,系统研究了工件材料的结构和硬度、刀具涂层、螺旋角、前角、铣削方式、冷却润滑方式、切削速度、进给量、径向切深、工件倾斜角度等对刀具磨损、刀具侧刃和底刃加工表面的表面粗糙度以及

切削力等参数的影响。使用方差分析和显著性分析方法分析了上述各种因素对切削性能的影响程度。试验研究表明,对于高速硬铣削而言,工件材料的结构和硬度、刀具涂层、铣削方式对刀具耐用度的影响最大,切削速度、冷却润滑方式、进给量、螺旋角等的影响次之,前角和径向切深对刀具耐用度的影响最小;铣削方式、工件倾斜角度、切削速度、径向切深对侧向表面粗糙度和底面表面粗糙度的影响较大。为此在前期对高速硬铣削刀具角度、铣削方式和工件硬度等参数的试验优化基础上,对优化后的硬铣削刀具进行切削参数优化试验。

试验用刀具直径8mm、螺旋角 55° 、前角 -8° 、TiAlN涂层;工件材料为H13(硬度HRC62~63)、轴向切深4mm、顺铣、微量润滑冷却

10ml/h。刀具磨钝标准为最大后刀面磨损达到0.2mm或发生严重崩刃或剥落。

试验方案采用全因素中心旋转设计法,共设计16组,见表1,主要考察切削速度、每齿进给量、径向切深对刀具耐用度和表面粗糙度的影响,采用方差分析和显著性分析方法进行试验数据分析。

在此基础上,建立了刀具耐用度和表面粗糙度的经验公式,通过对上述试验数据的分析和优化,进而获得专家系统的模糊推理规则。

模糊化是将输入数据转化为一种易于被人理解的语言格式的过程。专家系统根据这些模糊化的数据应答不精确的含糊的提问。模糊规则提供模糊集中变量的模糊隶属度值。但是在铣削过程中需要采用单一的离散值,因此有必要从模糊分布中选取一个最佳值点。从模糊集中选取一点的过程就是所谓的去模糊化。本课题的专家系统采用了重心算法实现去模糊化。

表1 铣削参数优化试验设计表

试件	切削速度 $v_c/m \cdot \min^{-1}$	每齿进给量 $f_z/mm \cdot z^{-1}$	径向切深 α_e/mm
1	175	0.08	0.15
2	175	0.08	0.4
3	175	0.12	0.15
4	175	0.12	0.4
5	275	0.08	0.15
6	275	0.08	0.4
7	275	0.12	0.15
8	275	0.12	0.4
9	225	0.1	0.275
10	225	0.1	0.275
11	141	0.1	0.275
12	309	0.1	0.275
13	225	0.07	0.275
14	225	0.13	0.275
15	225	0.1	0.065
16	225	0.1	0.485

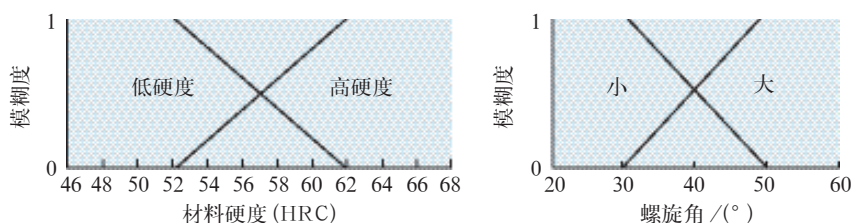


图3 数值化变量的模糊集示例

模糊系统中模糊规则的数目和每个输入变量模糊集的数目有关。本课题采用的方式是材料硬度和螺旋角各有两个模糊集(图3)。铣削方式和冷却润滑方式同样各具有两个可能的值。因此,专家系统预测模块中规则可能的最大值是 $16(=2 \times 2 \times 2 \times 2)$ 。一个重要问题出现了:哪一个刀具寿命或者表面粗糙度模糊集对应于16种可能的输入变量/集合的组合呢?对于简单的2输入1输出模糊模型来说,设计者必须从超过10000的组合中选出最优的模糊集。本文叙述的刀具寿命输出变量共有16个模糊规则并各具有7种可能性(刀具寿命有7个模糊集,见图4),为了估计刀具寿命共需 $7^{16}=3.323 \times 10^{13}$ 个模糊规则组合。为了获得最佳可能规则组合,采用模拟退火算法分配每一输出变量各自最优的模糊集到16种规则。

由于实际加工过程中工艺数据具有很高的不确定性,按照既定模型与实验获得加工数据、加工知识和推理规则等构成的工艺专家系统在实际应用中具有很大的局限性。虽然可以通过对专家系统内的工艺数据进行扩充使其具有更好的应用性,但是对于目前的专家系统来说,绝大部分的逻辑推理规则是根据已有知

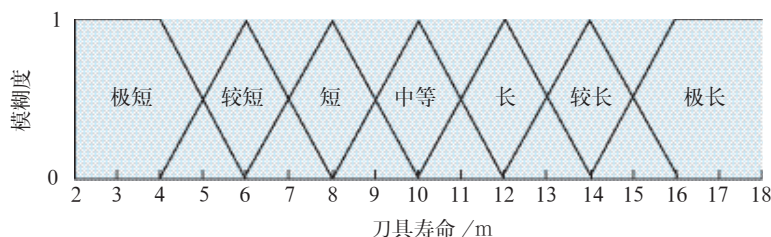


图4 刀具耐用度的模糊集示例

识事先预定的。为促进该专家系统在工业生产中的应用,还开发了专家系统的学习功能,使其具备自发展能力,如自动输入和存储试验数据、自动生成所含的数字变量的模糊集、自动产生优化和预测的规则,使该专家系统能有效适应生产中多变的加工环境和条件。

硬铣削工艺专家系统实例

图5为具体专家系统的运行实例。界面滑动条提示用户设定输出变量最大/最小值的权重。用户根据期望得到的目标值,对数字变量旁边的选择框进行勾选,以确定是对这些变量值进行预设置还是需要对其进行优化。下面还有一个定值变量的选择框,包括了该变量所有可能的值,以及“待优化”选择,允许用户对该变量的值留空,利用系统进行优化。

选择输出变量材料去除率、刀具寿命、表面粗糙度为同步优化目标。可以得知,此时专家系统需要处理9个输入变量,其中6个为数字量,3个为描述量。假设专家系统输入采用如下参数。

(1) 设置各项性能指标: 设置MRR权重为70%;设置刀具寿命

权重为100%;设置 Ra_avg(along)权重为95%。

(2) 设置工件材料硬度为HRC62,铣刀前角为 -8° ,刀具涂层为TiAlN,进给量为 $0.12\text{mm}/z$;其余输入变量为空以待优化,这些变量为:螺旋角、铣削方式、冷却润滑方式、切削速度、径向切深。专家系统基于前述推理规则和已有试验数据给出如下推荐参数和预测结果(图5)。

推荐冷却润滑方式MQL(最少量润滑),顺铣,刀具螺旋角 56° ,径向切深 0.154mm ,切削速度 $133\text{m}/\text{min}$;金属去除率预测为 $1878\text{mm}^3/\text{min}$,刀具耐用度预测为 9.3m ,表面粗糙度 R_a 预测值为 $0.216\mu\text{m}$ 。



图5 专家系统运行实例

结束语

本文提出一种新的高速硬铣削工艺专家系统的设计思路,该系统具有处理新的硬切削变量、模糊数组的建立、自动生成优化和预测规则库、解决对立规则的冲突问题以及保持界面的自动更新等功能。同时对该专家系统的应用进行了举例说明,描述了基于成熟知识库的专家系统的结构和运行过程,在对输入变量给出推荐优化的同时还能够对要求权重的输出变量进行精确的预测。

(责编 微凉)