

基于航空发动机工艺特征的动态切削数据库系统

中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 叶洪涛 贺芳

对典型工艺特征进行系统的切削物理仿真分析及试验验证，使用基于实例与规则相结合的推理方式，建立航空发动机工艺特征动态切削数据库系统。可为上万种切削条件的组合提供大量的动态数据，解决传统切削数据库普遍存在的检出率低，实用性差的瓶颈问题。

随着技术的不断进步，许多高精尖科技领域（如航空制造领域）逐步采用大量新型难加工材料，同时产品零部件的工艺结构也日趋复杂，表面完整性要求越来越高。同时，材料与结构性能的提高也给机械加工带来了新的难题。低效率、成本高且质量难以得到保证等情况成为此类产品机械加工主要问题。采用优化的切削数据是解决这类问题的首选途径。因此近年来国内外很多研究机构都在竞相开展针对包括不锈钢、钛合金及高温合金等难加工材料的切削用量优化研究并开发相应的切削数据库系统。各研究机构针对切削数据库基础技术、优化、智能化、切削仿真以及数据库系统的集成化和网络支持等方面均开展了深入的研究。许多新的计算和推理技术，如遗传算法、粒子群算法、模糊系统和实例推理等，开始应用于切削用量优化及数据库系统研究之中。一些针对特定材料、刀具或特定工艺过程的数据库系统在相关的研究项目中发挥了较好的作用。但是在工程化应用层面，通用型切削数据库系统在制造企业中的推广效果普遍不够理想，在航空难加工材料制造领域则更少有成功的案例。

航空发动机典型零件结构复杂，很多情况下工艺特征对切削用量有着显著的影响。特殊工艺特征的加工，通用数据库所推荐的优化切削参数与生产实际是存在差距的，某些特定情况下并不一定适用。此前的某些同类切削数据库研究，由于受到传统的离散式数据库设计思想的束缚，虽然加入了工艺特征的描述、设计了更为复杂的数据结构，并使用了大型关系数据库技术，但是受制于数据量严重不足和推理规则不完善限制，影响了其实用的效果。

本文所述研究成果基于对典型工艺特征进行系统的切削物理仿真分析及试验验证，使用基于实例与规则相结合的推理方式，建立航空发动机工艺特征动态切削数据库系统。由于改变传统切削数据库普遍使用的静态数据检索模式，可为上万种切削条件组合提供大量的动态数据，从而彻底解决传统切削数据库普遍存在的检出率低，实用性差的瓶颈问题。由于将数据库的核心内容从数据转向规则和推理方法，摆脱了必须以数据量来考量数据库使用程度的传统指标，可以使数据库具有更加普遍应用的价值。

一、建立切削工艺特征谱系

1. 工艺特征的概念界定

工艺特征对于切削用量选择的影响在学术界历来存在广泛争议。多数研究者及应用者认为零件的工艺特征对于切削用量的选择有着明显的影响，其影响程度与工件及刀具材料对切削用量的影响程度不相上下。也有一些研究者根据自己的研究经验认为，除了采用极为特殊的工艺结构情况下。大多数不同的工艺结构特征对于切削用量的选择没有明显的影响，远不及工件及刀具材料对切削用量的影响程度。但是无论是哪种观点，在已有的研究文献中，很少能够看到可信的定性及定量分析结论。

另外，虽然习惯上大家都使用工艺特征一词，但是对于工艺特征的概念和内涵，并没有统一的认识。以航空发动机为例，有人根据零件的功能及整体结构特点，在零件级别上划分工艺特征，如盘工艺特征、轴工艺特征、机匣工艺特征和叶片工艺特征等。有人根据不同零件中存在的类似结构来划分工艺特征，如篦齿、辐板和安装座等。也有人在基本几何要素级别上确定工艺特征，如直线工艺特征、曲线工艺特征和转角工艺特征等。

因此有必要在开展研究之前对工艺特征的概念加以明晰。本项目最终确定的工艺特征定义如下。

工艺特征：指在一道工序中经机械加工形成的可进行参数化描述的零件成品或工序半成品连续表面几何特征。工艺特征是相对于加工过程来说的，区别于产品设计中的结构要素概念及特征定义。

典型工艺特征：指其几何结构对切削用量有着显著影响，具备典型的刀具方案和走刀路线，在不同种类零件成品或工序半成品中存在的具有代表性的共性工艺特征。

基本工艺特征：具备确定工艺方法、刀具和切削用量

的简单几何特征，切削用量可通过确定的经验公式与刀具及工艺特征进行参数化描述。典型工艺特征由一项或多项基本工艺特征构成。

2. 工艺特征的分解和提取

首先通过对本企业航空发动机典型零件种类进行分析，确定盘、轴、机匣、结构件和叶片等 10 种典型零件类型。其次通过对各种典型零件类别中的典型结构进行分析，提取典型工艺特征。典型工艺特征将加工类型与零件结构特征因素同时考虑进去，以各加工类型下零件结构的特殊性为原则。再次从典型工艺特征提取基本工艺特征。切削用量选取包含工件及刀具几何因素的共同影响。因此，基本工艺特征的提取加入刀具类型、工件几何形貌（走刀路径）及工件和刀具的刚性因素。

切削用量优化综合考虑以下评价指标：切削效率（材料切除率）、刀具消耗（可切除材料量、刀具磨损）、被加工表面粗糙度、切削力、切削温度和机床可实现切削用量范围等。以上指标中，在切削试验中只要求满足控制值的作为约束条件，要求达到最优值的作为优化目标。

优化方法是以马卡洛夫的最优切削温度守恒定律为基础。以最佳切削温度（最小刀具磨损率）作为切削用量初选目标，以各切削用量参数及工艺特征参数作为研究变量，针对各工艺特征完成若干组切削过程仿真及验证试验，获得稳定切削过程时的切削温度。利用仿真结果，拟合出切削温度与切削用量及工艺特征参数之间的函数关系，函数中代入最佳切削温度，则可获得切削用量经验公式。

根据切削仿真、切削试验结果对提取的典型工艺特征及基本工艺特征分类进行整理和简化。依据原则如下：基本工艺特征的几何结构能够进行参数化描述，且能够以经验公式的形式确定各参数对切削用量的影响；使用不同刀

表 1 工艺特征谱系项目示例

零件类型	工艺方法	典型工艺特征		基本工艺特征		材料组别		切削用量经验公式
		代码	名称	代码	名称	工件	刀具	
盘	普通车削	C101	直线回转表面	1011	标准刀片直线路径	GH4169	IC908	$V_c = \frac{23.08 r^{0.07} \gamma^{0.28}}{f_n^{0.43} a_p^{0.19} \kappa^{0.19}}$
机匣	复合铣削	X012	曲面型腔	3042	球头铣刀外曲面路径	TC4	IC20	$V_c = \frac{151.7 d^{0.15} \gamma^{0.11} R_1^{0.07}}{f_z^{0.41} a_p^{0.12} a_e^{0.12} z^{0.19} \rho^{0.37} R_2^{0.07}}$

V_c : 切削速度, f_n : 每转进给量, a_p : 切削深度, a_e : 行距, R_1 : 圆弧半径 1, R_2 : 圆弧半径 2

r : 刀尖圆角, γ : 刀具前角, κ : 主偏角, z : 齿数, β : 螺旋角

具类型的相同结构作为不同基本工艺特征；经研究确定对切削用量影响很小（取值变化范围小于1倍且经验公式指数小于0.1）的几何参数舍弃，以此区分的不同工艺特征加以合并；难以进行参数化描述和无法通过仿真试验得出确定的经验公式的工艺特征不纳入工艺特征谱系。表1为工艺特征谱系项目示例。

二、建立动态切削数据库软件系统

1. 工作流程设计及推理规则的建立

基于工艺特征的动态切削数据库系统需实现以下功能：输入工艺特征、工件材料和刀具材料等信息，通过工艺边界条件、优化目标的选择与设置，可得到适合该工艺条件及加工要求的优化切削用量数据。软件系统与UG CAM集成并自动进行数据交换。软件系统的实体-关系（E-R）模型，如图1所示。

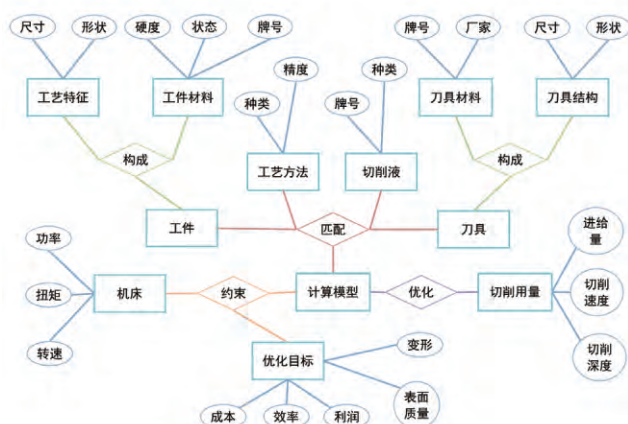


图1 工艺特征动态切削数据库系统 E-R 模型

基于典型工艺特征的智能切削数据库系统流程，如图2所示。

推理规则采用基于规则和实例的混合推理模式，如图3所示。与基于规则的推理不同，基于实例的推理（CBR）不依赖于求解问题领域的规则，而是依赖于以前的经验和成功解决问题的实例。本项目中，录入切削条件后，先行在基础数据库中检索与要求切削条件最为相近的实例，应用推理规则推荐切削用量，并在实际应用中检验其合理性。

2. 软件界面及功能设计

工艺特征切削数据库计算系统（以下简称 TFCDS）软件界面，如图4所示。

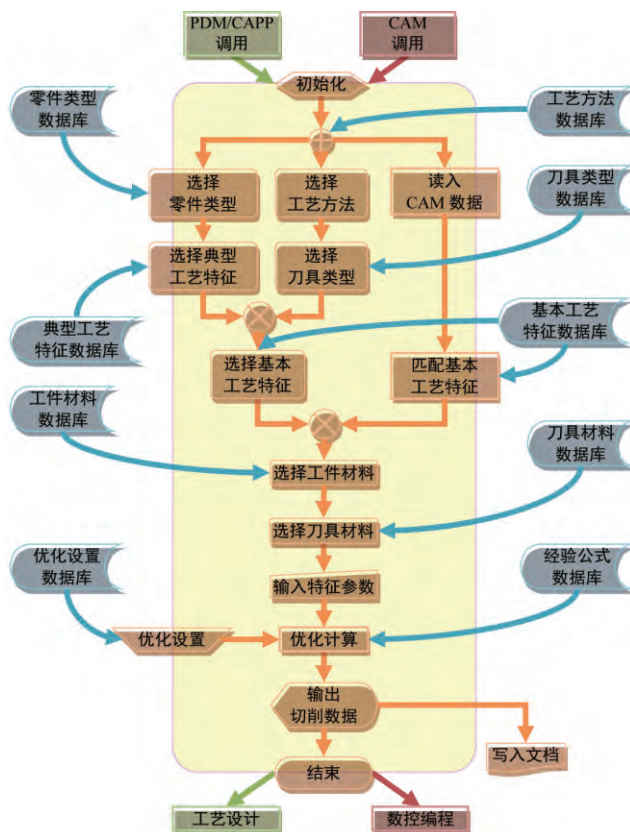


图2 基于工艺特征的动态切削数据库系统工作流程

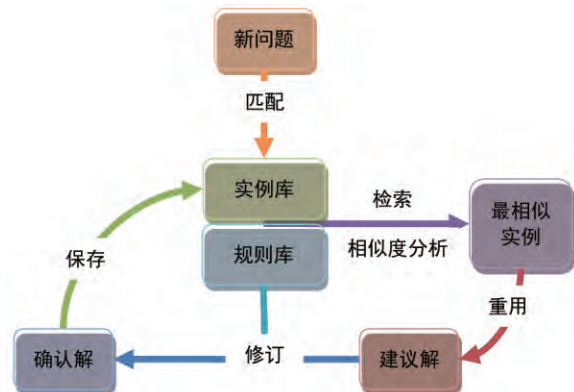


图3 基于规则和实例的混合推理模式

在UG操作导航器中直接选择已创建的操作。TFCDS将会对UG中的相应特征进行辨识并导入相关刀具及操作数据，如图5所示。从UG中导入的信息将显示在TFCDS软件界面相应的输入框中，其中刀具结构信息为只读信息。其它未从UG中读取的信息需要用户进行填写。其中标注（*）的为必填项，其余为选填项。

经TFCDS软件系统计算后的切削数据可通过单击“写



图4 与CAM系统集成的工艺特征切削数据库软件



图5 与CAM系统的数据交换与录入

入工艺参数”按钮，将参数写入UG中创建的操作，如图6所示。



图6 软件系统输出

此后可以继续UG CAM的后续工作,进行后置处理等,所生成程序已包含经软件计算的工艺参数。

TFCDS 软件在默认状态下按最低刀具成本目标提供在中等进给量条件下的切削用量组合。用户还可以对切削用量进行更为灵活的优化选择,如图7所示。

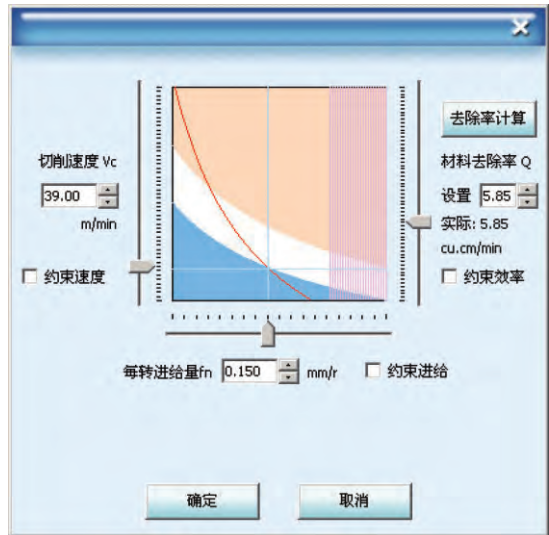


图7 优化设置

优化设置对话框可通过滑动条或输入框对切削速度、进给量和材料去除率单独进行设置。在进行调整时,可以对切削速度、进给量和材料去除率中的一项进行约束。

三、基于工艺特征动态切削数据库的生产应用和验证

TFCDS 软件在具备典型工艺特征的盘、轴颈、机匣、叶片和叶盘等航空发动机零件上进行了广泛的应用和生产验证。经统计,切削效率平均提高30%~60%左右。