DOI: 10.3901/JME.2020.23.185

微铣刀参数化设计系统研究*

陈妮 闫博 袁媛 李亮 何宁

(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘要: 现阶段, 尖端装备对高精密复杂微型结构件的需求越来越大, 微铣刀的专用化需求挑战着刀具设计的灵活性和准确性。目前, 微铣刀设计领域存在以下问题: 由于尺度差异导致传统铣刀设计方法已不再适用、切削工艺优化过程与刀具设计过程相分离。针对以上问题开展了微铣刀设计方法的研究, 并开发了微铣刀参数化设计系统。首先基于 UG/Open 平台建立了微铣刀三维模型样板文件并对其几何特征进行解构, 通过表达式功能串联刀具几何特征, 借助程序编程实现驱动, 完成微铣刀三维模型的快速设计; 最终基于 UG 二次开发平台, 以加工需求为驱动, 以工件材料、加工结构、加工工艺等多种因素限制为约束条件, 通过刀具设计特征, 将刀具的设计参数与切削效果结合起来, 开发了微铣刀参数化设计系统。

关键词: 微铣刀; 参数化设计系统; 几何参数优化; UG 二次开发

中图分类号: TG506

Research on Parametric Design System of Micro-mills

CHEN Ni YAN Bo YUAN Yuan LI Liang HE Ning

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

Abstract: At present, the demand for sophisticated equipment for high precision and complex micro structural parts is increasing. The need for specialize in micro-mills challenges the flexibility and accuracy of tool design. The following problems exist in the field of micro-mills design: The design method for traditional milling cutter is no longer applicable because of scale difference, and the optimization of cutting process is separated from the tool design process. Aiming at the above problems, studying the new design method of micro-mills and develops the design system of it. Based on UG/Open, the 3D model template of the micro-mills is established and its geometric features are deconstructed. Through expression function, the geometric features of the tools are connected in series, and then driven by program programming. Finally, based on the UG secondary development platform, the system is driven by the processing needs, with the workpiece material, processing technology and other factors as the constraint conditions, through the tool geometric characteristics, the tool design parameters and cutting effect combined, and finally developed the parametric design system of micro-mills.

Key words: micro-mills; parametric design system; optimization of geometrical parameters; UG secondary development

0 前言

在精密制造领域, 微细加工的地位越来越高, 尤其是对于难加工材料的处理上例如高温合金、航空航天类钛合金等^[1]。其中, 微细铣削工艺不但能够实现从简单二维形状到复杂高深宽比三维曲面微

零件加工的无热影响区化, 而且效率较高、加工精度可控、适用材料广泛, 表现出了优良的加工性能, 在制造微小型复杂结构件中占据重要地位^[2]; 但是现阶段微细铣削技术仍然存在很多问题例如刀具易断裂、毛刺严重、表面质量差等。对于微细铣削技术来说, 微铣刀的刃口钝圆、刀具材料、刀具角度及其角度形状等基本特征参数都对刀具寿命以及工件表面质量有很大的影响, 因此微铣刀是实现微小型复杂结构零件的低成本高精密制造的关键^[3]。

微铣刀专用化程度的上升无疑对微铣刀设计制

* 国家自然科学基金(51905270, U1601204)和江苏省自然科学基金青年(BK20180435)资助项目。20200417 收到初稿, 20201009 收到修改稿

造过程中的柔性化、精准化提出了更高的要求^[4]。传统几何模型设计方法虽然能够较好地体现设计师的设计能力,但是其效率不高,模型一旦确定较难更改,很难对于已有的模型快速二次升级。SERRANO和GOSARD^[5]从实际需要出发,基于结构拓扑关系与刀具几何特征,提出了一种不同于传统理念的刀具设计方法,即参数化设计理念。参数化特征造型相对于传统几何特征造型设计方法相比,引入了全局约束和特征表达两个重要模型设计因素,BELAZIZ等^[6]针对常规立铣刀提出了一种基于几何特征识别的自适应方法,即首先通过对CAD三维图形的形态分析之后提取其重要特征来驱使几何模型变动;张辉^[7]通过对经典铣刀模型的刀刃曲线进行数学分析,推导出了适用于球头铣刀刃口特征的多类型曲线参数方程,接着依据铣刀各线条的实际特征属性通过几何表达的方法将其串联形成全局约束。从以上可以看出,进行参数化设计时,程序架构或者相关数学分析是实现重要属性特征表达及关联的关键,但是其对于一些几何特征复杂的结构模型往往程序设计过于繁杂或者适应性不高;同时参数化设计方法几乎没有涉及到微细领域,常规铣刀直接微型化做出的微铣刀切削状态很不稳定,相反,具有较强刀具使役性能的微铣刀往往具有简单几何形式刀头^[8]。

目前,软件功能由单一化向集成化逐渐转变,若想独立开发全新的平台,不仅周期长、开发难度大、而且花费也比较昂贵,因此对已有完备的商用型平台进行用户功能开发,不仅可以减少开发时间、提升开发可控性,还能更全面的满足用户需求^[9]。SHENG等^[10]借助UG二次开发实现了管理菜单的数控刀具库、集成计算模型化设计系统;毛志红等^[11]通过ObjectARX技术来优化滚刀设计参数,实现了齿轮刀具的参数化设计;SUN等^[12]在保证刀具强度刚度的条件下,通过Isight和ANSYS联合的开发进行结构优化。虽然目前存在很多借助CAD平台开发的参数化设计系统,但其几乎都没有涉及到微铣刀领域,而且没有将综合辅助设计理念与特征参数化设计开发相关联^[13]。

针对现存微铣刀设计方法与其后期的切削工艺过程相脱节问题以及专用化需求的提升,本文基于参数化设计,结合几何特征优化,提出了一种刀具设计方法,即首先对微铣刀几何特征进行解构,提取其主要特征来建立数学解析模型,借助UG/NX10.0二次开发平台串联刀具几何特征,而后通过C语言程序编程实现驱动,完成三维模型的快

速设计,最终本文借助Matlab、Visual Studio 2013、Abaqus等相关软件,将微铣刀的微铣刀几何参数优化部分和参数化设计部分相连接,同时完成了微铣刀数据库模块以及刀具性能模块的开发,构建起一个将切削工艺优化过程和刀具设计过程相结合的微铣刀参数化设计系统。

1 基于UG二次开发的微铣刀参数化设计

1.1 UG二次开发技术

本系统开发选用UG/Open API接口技术来设计系统接口模块,为实现基于UG二次开发的微铣刀参数化设计,如图1所示,将设计过程大致分为三个阶段:①解构分析微铣刀几何特征;②通过构建相应应用程序框架,完成三维模型表达式与UG/Open函数之间的相互调用;③利用UI Styler和Menu Script模块设计用户交互界面,生成相应的程序供系统调用来驱动三维模型的更新。

图1 UG二次开发程序设计流程

1.2 UG参数化设计分析

1.2.1 参数化设计方法

本文对程序设计法进行了相应的改进,采用将程序设计和用户表达式相结合的方式对微铣刀模型进行参数化设计,其参数化设计流程如图2所示。这一设计方法可方便快捷的将单一零件扩展成具有相同特征、不同尺寸的零件,同时大大地降低了程序设计的复杂性。

图2 参数化设计流程

1.2.2 微铣刀几何特征分析

平头微铣刀模型如图 3 所示, 其主要几何特征参数为刀头长度、直径; 刀柄长度、直径; 刀颈圆锥半角; 底刃倾角、前角、后角; 刀刃圆弧半径; 以及侧刃后角、前角等。

本文依据刀具结构将微铣刀三维模型的特征表达式分为四大类: 刀刃部分(dr)、刀头部分(dt)、刀颈部分(dj)、刀柄部分(db)。如图 4 所示, 各部分特征表达式分别由类别代号+刀具具体几何参数组成。

图 3 平头微铣刀模型

图 4 表达式组成

1.3 参数化程序设计

1.3.1 开发环境配置

(1) 激活开发路径。UG/Open 提供了一套标准的环境变量集, 首先在系统目录\$UG_BASE_DIR\UGII 中找到系统路径定义的 ugii_env.dat 文件以及包含 UG 系统的全部环境变量, 这将会在后续设置的命令行脚本中起到关键性的作用。然后通过激活文件中的#UG_VENDOR_DIR=\${UGALLIANCE_DIR}\vendor 语句来定义用于存放制定应用开发产品的工程路径; 激活 #UG_SITE_DIR=\${UGALLIANCE_DIR}\site 语句来定义用于存放其余应用开发产品的工程路径, 使得 UG Open 可以从该路径获得二次开发功能扩展。

(2) 定制用户目录。定义 G:\PARAMETER_DESIGN 中的子文件夹: application 用来存放对话框模版文件生成的*.dlg 文件、源文件*_template.c 文件与头文件*.h 以及 Visual Studio 编译生成的项目文件夹, 系统相应模块程序运行时可自动进行调用; startup 用来存放动态链接库文件*.dll 与菜单文件*.men, 以利于在 UG 运行时自动加载; Part 用于存

放三维模型模版文件*.prt; 而微铣刀参数化设计中生成的零件族以及相应参数信息则存放于 database 中。

(3) 注册环境变量。设置 UGII_USER_DIR 环境变量指向微铣刀参数化设计系统的用户目录, 与 SITE 和 VENDOR 相比, USER 优先级最低。

(4) Visual Studio 与 UG NX 的配置。把 Visual Studio 安装目录中原有文件替换为 UG 安装目录 Siemens\NX10\UGOPEN\vs_files 中的 VB、VC#、VC 三个文件, 实现 Visual Studio 对 UG 的 C、VB、C++ 编程语言的兼容。此外, 修改 VC\vcprojects 中的 NX10_NXOpenCPP.vsz 文件, 同时在 Visual Studio 安装目录 VC\VCWizards 中添加 UGOPEN 中的整个 NX10_Open 文件, 使得*.vsz 文件与 UG 版本相关联, 使 UG NX10.0 对 Visual Studio 2013 版本的默认设置相匹配。

完成以上操作, 即可在 Visual Studio 2013 中建立 UG NX10.0 的二次开发项目, 完成对其的编译运行。

1.3.2 应用程序框架

本系统采用 ufsta 入口函数, 随着 UG 进程结束, 系统会自动卸载。另外所编写的 UF 程序运行过程中需要得到 UG/Open API License 的支持, 从而必须设定 UF_terminate()以及 UF_initialize()来保证程序在证书的支持下正确的初始化以及结束进程。如图 5 所示为内部模式运用 ufsta 入口函数的一般应用程序框架。

```
#include <uf.h>
/*Additional include files as required*/           /*其他所需头函数*/

void ufsta( char *param, int *returnCode, int rlen ) /*入口函数选用ufsta */
{
    variable declarations;                         /*声明变量*/

    UF_initialize();                                /*程序初始化*/

    User Code
    {
        /*TODO: Add your application code here*/   /*用户程序*/
    }

    UF_terminate();                                /*结束进程*/
}
```

图 5 应用程序框架

1.3.3 程序设计功能

微铣刀参数化设计应用程序的开发, 可以实现参数特征相关表达式的获取、微铣刀三维模型的调用、驱动模型更新、将表达式与用户输入区域值相关联这几个功能。结合应用程序框架, 如图 6 所示为相应用户程序设计的搭建。

图 6 微铣刀参数化设计程序功能

2 微铣刀参数化设计系统搭建

2.1 系统需求分析

虽然前人很早就开始了三维设计CAD的研究^[13]，但目前仍然存在刀具设计过程与实际的切削加工工艺相脱离的问题，因此本文提出了开发微铣刀参数化设计系统的构想。

2.2 系统设计方案

本系统采用模块化设计架构如图 7 所示，使得结构上具有一定的灵活性，可以在后期继续丰富软件功能，有利于开发新技术。基于此模块化设计架构，其用例路线为：① 借助刀具数据库模型或者通过微铣刀参数化建模来完成微铣刀的初步设计；② 将交互界面获取的加工信息参数以及微铣刀初步模型通过系统传输到分析软件来完成三维有限元铣削仿真；③ 仿真结果通过图表曲线等形式反馈到系统界面，来实现微铣刀模型进一步的优化；④ 将相关刀具性能信息以及微铣刀模型参数添加到微铣刀设计数据库；⑤ 用户可对微铣刀设计数据库进行增添、删减、修改以及检索等操作；⑥ 最终形成微铣刀优化以及性能分析报告。

图 7 系统设计方案

2.3 系统功能模块设计

2.3.1 系统交互模块

为了保证用户即使在没有完备的专业知识能力的情况下也可以根据提示高质量完成微铣刀设计任务，本系统交互模块设计主要运用了 UG/Open 提供的 UI Styler 辅助开发包以及 Menu Script 进行程序设计。

(1) 系统导航菜单。在二次开发路径的用户目录下，通过 Menu Script 特定脚本语言编写用户应用程序*.men 文件来完成微铣刀参数化设计系统主菜单、子菜单、二级子菜单的定义，从而使开发的应用程序完全集成在 UG/NX 中，以便于与 UG 命令形成同一性，如图 8 所示。

图 8 微铣刀参数化设计系统导航菜单以及下拉列表

.men 文件采用 Add-on 菜单文件编译方法，微铣刀参数化设计系统入口可直接添加在 UG 系统主菜单中。图 9 展示了部分系统主菜单源程序，开发过程中，与微铣刀设计模式相关的.dlg 菜单文件放置在 application 应用模块文件夹中，通过系统 MENU_FILES 声明，将微铣刀设计模式按钮与菜单名称相关联以加载相关联的菜单文件；与微铣刀设计模式无关的*.men 菜单文件则放置在 UG 二次开发目录启动文件夹 startup 中，UG 平台启动时自动响应。

```

1): VERSION 120                                /*版本信息*/
2): EDIT UG_GATEWAY_MAIN_MENUBAR
3):
4): BEFORE UG_HELP
5): CASCADE_BUTTON_PARAMETER_DESIGN           /*定义菜单位置*/
6): LABEL 微铣刀参数化设计系统               /*定义主菜单*/
7): END_OF_BEFORE
8):
9): MENU PARAMETER_DESIGN                      /*定义一级子菜单*/
10):  BUTTON PARAMETER_DESIGN_1
11):  LABEL 微铣刀推荐
12):  ACTIONS RECOMMEND.dlg
13):
14):  BUTTON PARAMETER_DESIGN_2
15):  LABEL 刀具数据库
16):  ACTIONS DATABASE.dlg
17):
18):  CASCADE_BUTTON_PARAMETER
19):  LABEL 参数化设计
20):  END_OF_MENU
21):
22):  MENU PARAMETER
23):  BUTTON PARAMETER_1                      /*定义二级子菜单*/
24):  LABEL 平头微铣刀
25):  ACTION PARAMETER_DESIGN_PT             /*定义菜单响应*/
26):  BUTTON PARAMETER_2
27):  LABEL 球头微铣刀
28):  ACTIONS PARAMETER_DESIGN_QT
29):
30): END_OF_MENU
31):
32): ...

```

图 9 部分系统主菜单源程序

(2) 用户对话框。为实现设计人员对系统的更好体验，在系统导航菜单条的基础上进行了各模块

的用户对话框设计, 本着对话框数量最少的原则, 在参数化设计单一界面的基础上另外集成了两个属性页。

对话框设计完成后生成的 *.h 头文件、*_template.c 源文件以及 *.dlg 对话框框架文件将分别置于相应的系统用户目录, 以便后续程序设计。

如图 9 所示, 菜单文件通过 ACTIONS 声明指定菜单项的响应行为。本系统交互模块设计的微铣刀推荐、微铣刀参数化设计、微铣刀数据库三个主对话框的应用程序, 分别通过菜单文件 ACTION 中的“RECOMMEND”、“PARAMETER_DESIGN_PT”/“PARAMETER_DESIGN_QT”、“DATABASE”、路径来响应。

(3) 操作提示部分。前文提到在交互界面设计过程中, 辅助操作提示模块必不可少, 本系统开发的每一控件均集成了操作提示模块, 当用户触发时, UG 系统会自动做出响应, 给予相应提示。此外, 操作提示模块均放置于系统左下角, 使其在达到提示功能的同时满足基本的视觉设计原则。

2.3.2 参数设计模块

为实现微铣刀的快速设计, 提升设计效率, 系统进行了参数化设计模块的开发。第一节已经从 UG 二次开发技术的基本原理出发阐明了本模块的设计理念。为实现同一性, 接下来同样以平头微铣刀参数化设计过程为例说明本模块具体搭建过程。

(1) 前期准备。通过 NX10 Open Wizard 完成编程语言、入口函数、项目类型以及卸载方式的设定。如前所述系统使用 C 语言编程, ufsta 函数作为入口函数, 选择生成动态链接库 *.dll 文件, 而后将 UI Styler 生成的对话框相关文件添加到 PARAMETER_DESIGN 工程文件中, 并将 _template.c 对话框头文件命名为 _dialog.c, 在其中添加与微铣刀三维模型相关的头文件 #include "ptxidao.h"。

(2) 菜单响应用户程序。此处借助 UF_initialize() 和 UF_terminate() 函数实现初始化和终止。系统设计的每个操控点都内嵌有回调机制, 程序也基于事件驱动架构而设计。本文主要在项目主文件 PT.c 中完成入口函数 ufsta 的定义, 过程中使用了 UG/Open API 开发模块中与 Menu Script 有关的 UF_MB 函数, 包括实现状态和数据获取的 UF_MB_cb_status_t、UF_MB_data_t; 注册按钮响应行为的 UF_MB_activated_button_p_t、UF_MB_action_t; 用于注册用户开发菜单的 UF_MB_add_actions 等。部分源程序如图 10 所示, 可以看出在代码的 actionTable

中, 完成了菜单按钮 ACTIONS 与用户程序相关函数的关联。

```
54 /* ufsta入口函数 */
55 #extern DllExport void ufsta( char *param, int *returnCode, int rlen )
56 {
57     /* API 环境初始化 */
58     if( UF_CALL(UF_initialize()) )
59     {
60         return;
61     }
62
63     static UF_MB_cb_status_t
64     /* 菜单响应UG/Open API 程序 */
65     PT_ptxidao(UF_MB_widget_t, UF_MB_data_t, UF_MB_activated_button_p_t);
66     static UF_MB_action_t actionTable[] =
67     {
68         {PARAMETER_DESIGN_PT, PT_ptxidao, NULL },
69         { NULL, NULL, NULL }
70     };
71     int errorCode = UF_initialize();
72     if (0 == errorCode)
73     {
74         /* 注册用户开发菜单 */
75         UF_MB_add_actions(actionTable);
76         errorCode = UF_terminate();
77     }
78     /* Print out any error messages */
79
80     /* 终止 API 环境 */
81     UF_CALL(UF_terminate());
82 }
```

图 10 入口函数定义

(3) 搭建主函数框架。主函数 PT_ptxidao() 内嵌了参数化检查机制以及对话框功能响应, 同时还定义了检查函数 PRO_DESIGN_check_part() 以及对话框函数 LaunchPTDialog() 的优先级。

(4) 设立检查机制。考虑到实际操作的便捷性, 系统选用 PRO_DESIGN_check_part() 作为检查函数。

另外, 为了提升系统界面的友好性, 减少操作环节, 本系统在参数化设计交互界面还设置了访问微铣刀数据库的按钮, 实现数据库中微铣刀几何参数的一键导入。

2.3.3 仿真优化模块

在有限元切削仿真中, 采用目前较为成熟且形式简单的 Johnson-Cook 材料本构模型, 其中采用被认为较为准确的参数^[14], 同时辅以 J-C 损伤模型^[15], 能够综合考虑应力、应变、应变率以及温度等因素对材料损伤的影响, 适合模拟大应变率下的金属变形失效。

模型网格划分采取了基于分块的全局布种与边界布种相结合的方式, 微铣刀全局种子尺寸为 0.02 mm, 底刃和侧刃设置了 0.002~0.020 mm 的单精度边界布种, 从而细化刀具前、后刀面接触区域网格, 提升接触区域仿真可靠性。同时, 为了更好地实现不同区块间的网格过渡, 保证网格质量, 微铣刀网格选用了三维应力型的四结点线性四面体单元(C3D4); 工件接触区网格选用精度较高的八节点热耦合六面体单元(C3D8T)。

仿真优化过程中刀具参数测试范围的选择是在大量理论实践和仿真实验的基础上进行的, 例如由于经验上一般采用正前角, 即在有限元金属切削仿真中设置前角从 0° 变化到 12°、间隔为 1°。最

后当刀具性能指标对应的最佳刀具参数不一致时,系统会以性能指标波动大的为决定因素推荐最优参数。

在仿真优化过程中往往少不了重复性的提交与分析操作,本系统仿真优化模块主要借助 Python 脚本实现对结果数据库(Output database)的访问。

(1) 自动提交分析。本模块通过 Abaqus 的 Python 脚本设计了一个运行队列(Runlist)可以实现系统按队列自动提交分析任务的功能。程序通过查找用户设定工作目录中的*.log 文件中的关键字确认分析队列各任务的状态返回完成或者错误信息。当已提交任务完成分析(Completed)或者出现中断情况(Aborted)时会自动被踢出队列,并顺序提交队列中下一任务,同时将完成信息或者错误信息记录到*.txt 文本文件中,供设计人员参考。

(2) 分析odb数据。Abaqus在有限元仿真后处理部分一般只可一次获取一个分析步中一帧数据的最大值及最小值^[16],如Mises应力、位移U等变量,而往往一个分析步就包含数百帧数据,这给设计人员提取结果带来了大量重复性的工作。系统借助 Python脚本,自动遍历各个分析步、各个帧的数据,查找出最大值并将其添加至结果变量。

2.3.4 刀具性能模块

通过仿真得到了铣削过程中刀具切向切削力随刀具转动角度的变化,输出微铣刀上的切削力 F ,为后续中的刀具性能模块计算做铺垫。

微铣刀在铣削过程中刀柄被夹具固定,露出刀颈、刀头及部分刀颈。又因为刀柄和刀颈的刚度远大于刀头部分,所以可以将其简化为右边仅考虑刀头结构的悬臂梁模型。如 2.1 式所示,系统采用小挠度微分方程计算微铣刀的变形量。

$$EI \frac{\partial^2 w}{\partial^2 x} = -M \quad (1)$$

$$M = F(l - x) \quad (2)$$

式中, E 为与微铣刀材料有关的弹性模量、 l 为悬伸的刀头长度,两者均可通过系统用户数据获取;刀头截面近似为半圆形, r 为微铣刀刀头半径尺寸,所以相应的刀头部分惯性矩 I 为

$$I = \frac{1}{8} \pi r^2 \quad (3)$$

综上,可以得出刀具转角方程和挠度方程,根据刀头最大变形量 $w_{\max}$ 得到刀具刚度信息并,并以图表方式展现给用户,形成良好的用户交互体验。

2.3.5 刀具数据库模块

本研究通过 UG 二次开发中的表达式机制,实

现了一种可以保存在 UG 三维模型中的设计参数与产品零部件表达式之间的沟通方式。在此基础上,微铣刀相关设计参数以及应用程序计算的性参数均可在数据库中保存和读取,至此微铣刀的仿真模块和参数化设计模块借助数据库桥梁实现了数据交换,这样不仅有利于数据的维护和扩充,还达到了设计参数与仿真加工一体化的设计目标。

本模块使用 Access 2013 作为数据库管理系统,在数据库中创建部件的尺寸参数表,如图 11 所示通过 ODBC 数据源管理互连技术实现功能模块与 Access 数据库的连接。

图 11 ODBC 结构

数据库模块的建立包括以下几方面内容。

(1) 数据源配置。

微铣刀数据库按类别建立模型库子表,供设计人员快速选取,数据库创建完成后需通过 ODBC 数据源管理程序中的用户 DSN(user DSN)为建立的微铣刀数据库.mdb 文件添加 Microsoft Access Driver(*.mdb)新用户数据源驱动;接着通过一定方式完成数据源名(Data Source Name)以及相关说明的设置,其中设置的 wxdddb 即为后续程序设计中需使用的 DSN;最后选择数据源建立链接对象,在数据库管理器中找到通过 Access 创建微铣刀数据库 wxdddb.mdb,完成 ODBC 管理器(Administrator)到数据库的链接。

(2) 数据库管理。

用户需通过登录界面输入有效账户密码,经认证后进入系统。用户账户分为刀具设计人员、系统管理人员两大类,刀具设计人员可以执行数据读取以及进出库操作,系统管理员可以定向开放权限,对数据库进行相应的修改、删减,对普通账户进行管理,具有最高等级系统权限。本文采用 DB_UserManagement()用于数据库用户的管理,DB_Logout()用于数据库的注销。

(3) 数据库进出库检查。

当设计人员在系统界面进行添加模型到数据库的操作时,内嵌回调函数会启动操作检查机制,比较用户提交信息与数据库信息,确保数据库内无重复数据,同时还可实现对传入到对话框结构体 Project_workpart_edit 中的成员变量 DB_part_para_struct *p_para 进行修改。

数化设计系统搭建于 UG 二次开发平台之上,借助 Abaqus、Matlab、Access 等软件实现了各模块功能的开发。

参 考 文 献

- [1] SHARMA V, PATEL D S, JAIN V K, et al. Wire electrochemical micromachining : An overview[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 155: 103579.
- [2] SCHNEIDER F, DAS J, KIRSCH B, et al. Sustainability in ultra precision and micro machining: A review[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2019, 6(3): 601-610.
- [3] 陈明君, 陈妮, 何宁, 等. 微铣削加工机理研究新进展[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 161-172.
CHEN Mingjun, CHEN Ni, HE Ning, et al. The research progress of micromilling in machining mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 161-172.
- [4] 刘献礼, 计伟, 范梦超, 等. 基于特征的刀具“形-性-用”一体化设计方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(11): 146-153.
LIU Xianli, JI Wei, FAN Mengchao, et al. Feature based cutting tool "Shape-Performance-Application" integrating design approach[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11): 146-153.
- [5] SERRANO D, GOSARD D. Combining mathematical models with geometric models in CAE systems[C]// Computers in Engineering, Chicago IL. 1. 1986, 277-284.
- [6] BELAZIZ M, BOURAS A, BRUN J M. Morphological analysis for product design[J]. Computer Aided Design, 2000, 32(5-6): 377-388.
- [7] 张辉. 球头铣刀参数化设计及其软件开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
ZHANG Hui. Parametric design and software development of ball head miller[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2013.
- [8] YANG X M, CHENG X, WANG F, et al. Experimental study on tool wear of side cutting edge in micro-milling[J]. IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, 2019.
- [9] WANG L, LI Z, DENG C, et al. Research on the secondary development method of finite element analysis module of SIEMENS NX[C]// Methods and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems. 2019.
- [10] SHENG Z Q, XIE H L, XU Z W, et al. Design system development of tool magazine for CNC machine tools[J]. Applied Mechanics and Materials, 2009, 16-19: 155-159.
- [11] 毛志红, 周咏翎. 小模数齿轮滚刀 CAD 系统[J]. 工具技术, 2002, 36(11): 21-23.
MAO Zhihong, ZHOU Yongling. CAD system for small modulus gear hobbing[J]. Tool Engineering, 2002, 36(11): 21-23.
- [12] SUN G, LI X. The design of micro-machine tool storage and analysis of key parts[C]// 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, 2016.
- [13] FOX S. Manufacturing goes online [advanced manufacturing technology][J]. Engineering & Technology, 2009, 4(15): 62-63.
- [14] LIU G, SHAH S, ÖZEL T. Material ductile failure based finite element simulations of chip serration in orthogonal cutting of titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2019, 141(4): 041017.
- [15] SURIL R S, LIU G, ÖZEL T, et al. Finite element simulations of chip serration in titanium alloy cutting by considering material failure[J]. Procedia CIRP, 2019, 82: 320-325.
- [16] DONG H, ZHANG M. Application of ABAQUS secondary development platform in TC4 alloy cutting simulation[C]// 2019 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE). 2019.

作者简介: 陈妮(通信作者), 女, 1990 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为微细刀具设计与制造技术、微细加工、切削加工状态及刀具寿命智能监控技术。

E-mail: ni.chen@nuaa.edu.cn

何宁, 男, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为航空航天零件先进加工技术、微细/纳米加工与制造技术、可持续加工技术。

E-mail: drnhe@nuaa.edu.cn