

飞机整体壁板智能数控编程系统

Intelligent NC Programming System of Aircraft Integral Panel

北京航空航天大学机械学院 于芳芳 郑国磊 陈树林
沈阳飞机工业(集团)有限公司 杜宝瑞 初宏震

[摘要] 结合飞机整体壁板结构特点、典型加工工艺路线,针对目前数控编程中存在的问题,对智能数控编程相关技术作了一定的探索。主要内容包括飞机整体壁板智能数控编程系统结构建立、数控加工知识综合表示、广义槽加工单元分层识别、基于几何特性加工刀具自动选取、基于知识推理的加工自动排序等。最后应用上述技术开发了飞机整体壁板快速数控编程系统。

关键词: 数控编程 飞机整体壁板 知识表示 特征识别 加工操作

[ABSTRACT] The techniques about intelligent NC programming of aircraft integral panel are discussed according to the aircraft panel characteristics, typical machining process route and problems in NC programming. The techniques include the construction of the intelligent NC programming system of aircraft integral panel, comprehensive knowledge representation of NC machining, slicing recognition of generalized pocket, automatic cutting tool selection based on geometrical characteristics and automatic sequencing based on knowledge reasoning. By using the above techniques, the rapid NC programming system of aircraft integral panel is developed.

Keywords: NC programming Aircraft integral panel Knowledge representation Feature recognition Machining operation

近年来,新一代战机中大量采用了性能优越的整体薄壁结构^[1],由于其结构复杂,制造精度高,加工难度大,飞机整体结构件普遍采用数控加工。而决定数控加工质量和效率的一个重要因素是数控加工程序编制的质量和时间。就飞机整体壁板类零件而言,数控加工的时间一般在2~3天,而编制该类零件的数控程序却需1~2个月的时间,编程时间远大于加工时间,故数控技术的核心问题是数控程序编制的自动化问题。

在应用需求推动及高新技术的支持下,数控编程技术经历了由手工编程发展为数控语言自动编程(APT),进而上升至图形交互式数控自动编程。图形交互式数控自动编程是目前主流的编程方式。该方法较手工和语言编程及试切验证方法有了质的飞跃,但其使用方便程度远远不够,主要存在以下问题:(1)对编程人员专业要求过高,不仅要求编程人员具有丰富的工艺知识,还要有很高的编程技巧,导致编制的程序质量无法保证;(2)系统只能通过交互方式点取产品几何信息,无法自动获取加工区域信息;(3)缺乏数控编程资源库支持,无法根据加工区域自动选取刀具和切削参数,自动化程度低;(4)缺少操作步间的继承和关联机制,重复劳动大;(5)无法实现数控加工程序中几何约束关系维护。随着加工对象日益丰富和复杂,这种单纯依靠编程人员的经验,采用交互方式完成工艺处理和大量数据输入,已满足不了实践的需求。因此旨在提高自动化程度的智能数控编程技术成为人们关注的焦点。

目前智能数控编程技术的研究尚处于起步阶段。人们没有从系统的角度研究智能数控编程系统的实现,当然这并不意味着没有进行与数控编程有关的外围单项技术的研究。譬如特征识别技术最早可追溯到20世纪70年代,学者们先后将神经网络、证据推理等^[2-4]智能方法引入到识别中,但算法主要针对结构规则的多面体类机械零件,且对加工特征生成合理解释比较困难,至今仍成为制约智能数控编程实现的一个瓶颈问题。

飞机壁板类零件加工往往需上百个数控程序,无论程序编制还是修改,工作量都是惊人的。结合其结构特点、典型工艺路线,并针对当前数控编程中存在的某些问题,本文采用面向对象,基于加工单元特性及加工知识的处理方法实现飞机壁板类零件智能数控编程。

1 系统结构

为满足飞机整体壁板数控编程自动化和智能化

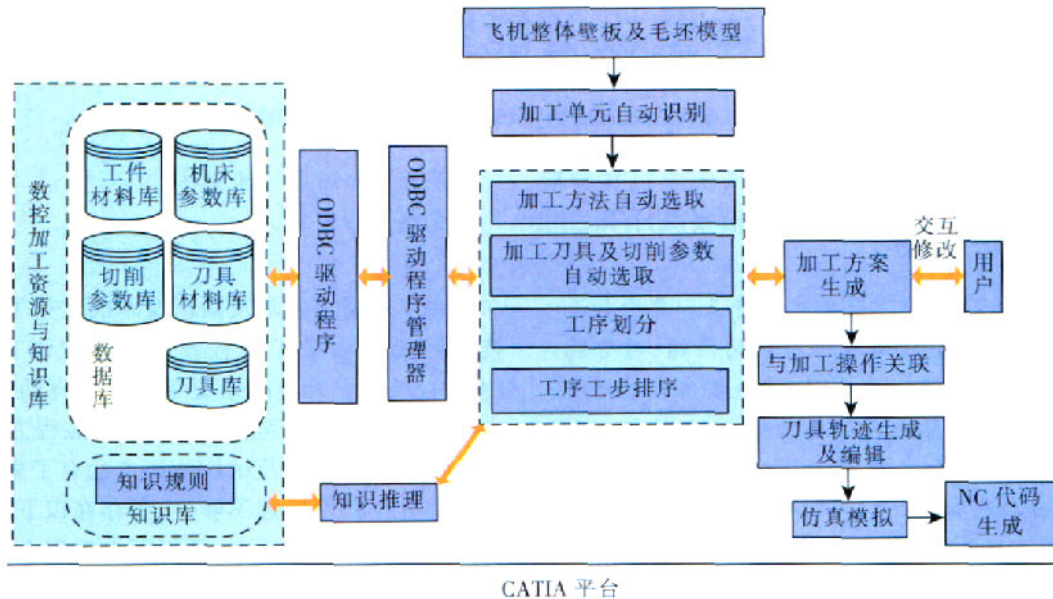


图1 飞机整体壁板智能数控编程系统结构

Fig.1 Structure of intelligent NC programming system of aircraft integral panel

的要求,本文在CATIA V5“数控加工”子系统中,集成“工艺资源与知识库”,建立了智能数控编程系统结构,如图1所示。

该方法是将专家系统中的智能技术引入到CATIA数控编程子系统中,既充分利用CATIA强大的刀具轨迹计算及模拟仿真功能,又对其不足进行改进,提高了系统自动化和智能化水平。最终目的是系统根据零件、毛坯、机床及刀具等因素自动生成零件的数控加工程序。为此,系统首先必须能够自动获取和设定加工区域,加工单元自动识别是整个系统实现的前提。此外,加工方案的自动生成是数控加工程序编制自动化、智能化的关键。加工单元作为智能编程系统的核心,本文在建立数控加工资源库和加工单元自动识别的基础上根据加工单元几何特性等,配合专家知识完成加工方法、加工刀具自动选取、工序/工步自动排序等。再将具体的加工单元与加工操作关联起来,利用CATIA系统刀具轨迹生成及仿真模拟功能,完成数控程序编制。在开发过程中始终贯彻贴合实际和实用化的原则,系统既提供智能决策功能,又提供加工方案浏览和编辑修改功能,使用户能够通过交互式参与加工方案制定。

2 关键技术

2.1 数控加工知识综合表示法

飞机整体壁板数控加工程序编制中所涉及的加

工知识种类多,数据量大,数据关系复杂,因此如何从纷繁复杂的加工数据中找到符合数控编程特点的数据模型是一个难点。按其在加工决策中的作用,加工知识分为事实知识和规则知识。前者包括机床、工件材料、数控切削参数、刀具及刀具材料等与加工环境密切相关的数据,称之为数控加工资源知识。后者则包括了加工方法选择、工序划分、加工顺序安排、刀具和加工参数选取五类规则,其中相当一部分是领域专家在长期的生产实践中总结的经验知识,具有模糊性和不确定性。因此针对此两类知识的特点,本文借用具有成熟理论的数据库技术和面向对象技术分别对其进行表示。

通过分析飞机整体壁板数控加工资源数据间的关系,建立图2所示的加工资源知识概念模型,共包含了6个实体、6个关联。系统以数据库的形式存放和表示此类知识,实现由数据库统一管理。工艺资源知识数据库与系统连接采用开放数据库连接ODBC(Open Data Base Connectivity)接口,见图1,通过一组标准函数(ODBC API)调用实现对数据库的访问。

对于规则知识,本文将面向对象方法与产生式规则有机结合起来,利用面向对象技术中类、封装、继承及消息传递等机制,以类的形式表示产生式规则知识。其结构用C++描述如下:

```
Class RuleObject {
    Condition *premise; //前提
```

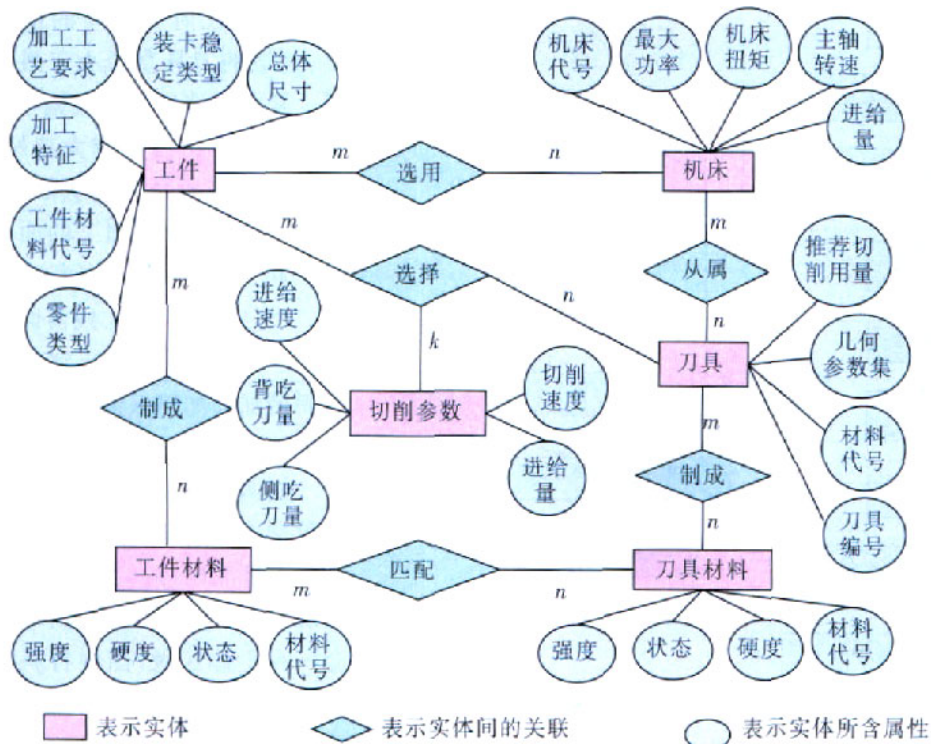


图2 数控加工资源知识 E-R 模型

Fig.2 E-R model of NC machining resource knowledge

广义上来说,飞机壁板加工为广义槽加工,槽必有一个最外轮廓称为导引轮廓,某些槽中还包含岛屿轮廓。槽切除体积即为导引轮廓与岛屿轮廓间的区域。由于分层面上的交线组合形成的封闭轮廓恰好对应了某广义槽的轮廓;而通过反求交线环所在的零件表面类型及拓扑位置关系,能够判断出广义槽中是否含有筋或内/外敛面等附属加工项,并作为修正相应的槽轮廓的依据;根据交线环所在的零件表面是否相同,建立槽的纵向联系,并以树状结构存储各层的广义槽,沿着树的路径即可得到完整的加工特征。因此,层切法应

```

Conclusion *result; //结论
HRESULT Method(); //方法
RuleObject *next; //下一规则指针
}
    
```

其中,Condition 和 Conclusion 结构类似,分别存放前提和结论,Condition 描述为:

```

struct Condition{
    char reason[len];
    struct Condition *next;
} Condition;
    
```

对象中的方法为规则推理算法或对数据库的访问、基于几何特性刀具选取算法等。整个知识库中的知识采用链表结构组织,这样不仅表达清晰,节省空间,而且可以实现知识快速有效查询。

2.2 基于广义槽加工单元自动识别

从加工看,飞机壁板内外型面的粗加工均采用分层槽加工。从结构上来看,筋、缘条、凸台、壁上槽等在结构上依赖槽;开口从拓扑构成上可看成是一种无底槽,可作为一类特殊槽标识。综上所述,建立图3所示的飞机整体壁板广义槽结构模型,其中槽为主要加工项,而与槽相关的筋、缘条、下陷等作为附属加工项。

用于广义槽加工单元识别中为解决加工单元自动识别问题提供了一条新的思路。如图4所示,通过在槽底面位置创建一系列的加工层面与零件和毛坯相交产生的交线环及判断交线环所在加工面信息来识别和提取加工单元,过程如下:

- (1)搜索零件中的横向表面,记录并保存其Z坐标,作为加工层面位置;
- (2)根据Z坐标,创建与Z轴垂直的一组平行平面分别与零件和毛坯求交,同层交线组织成封闭交线环,判断环的内外属性,构建广义槽轮廓;
- (3)对交线环所处零件表面进行面识别,判断是否含有筋或壁上槽等,据此修正导引轮廓,且按照广

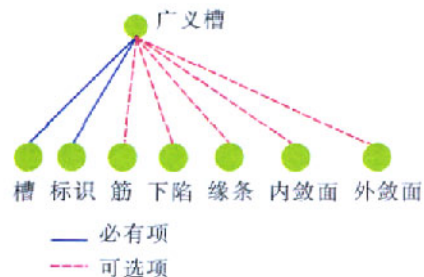


图3 广义槽结构模型

Fig.3 Generalized pocket structure model

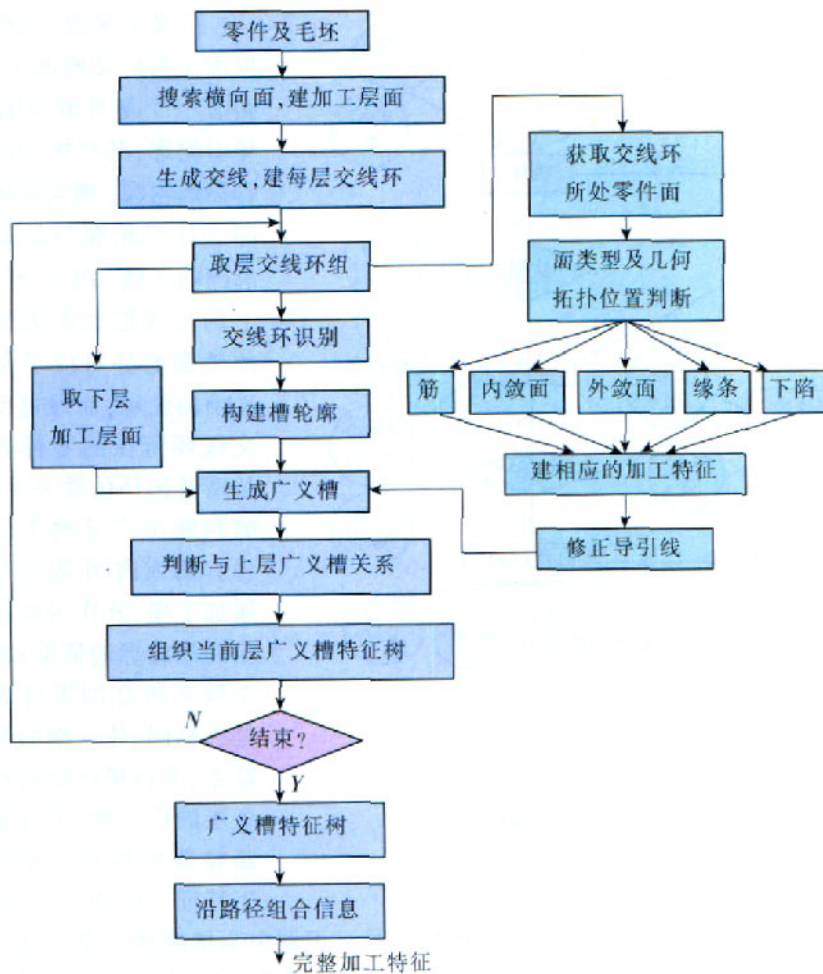


图4 广义槽识别算法

Fig.4 Recognition algorithm of generalized pocket

义槽结构模型对其设置;

(4)从广义槽加工树的上层节点搜索与其有相同表面的广义槽节点, 作为其父节点进行纵向关联, 构建广义槽加工树;

(5)沿广义槽加工树路径进行信息组合, 获取完整加工特征。

按照此方法获得的加工单元信息实现了加工区域自动获取, 同时又为实现刀具自动选取和工序工步排序提供了几何前提。

2.3 基于几何特性的刀具自动选取

随着高速切削加工技术的引入, 飞机整体壁板数控加工通常分为粗、精 2 个阶段。保证质量是精加工的首要任务, 因而精加工刀具选取方法为从刀具库中选出半径不大于加工单元最小曲率半径的最大刀具。本文主要确定粗加工刀具规格。

粗加工刀具的选取通常是采用 Voronoi^[9]图求出

加工单元几何要素间的最小距离, 选取的刀具直径小于最小距离。缺点是选出的刀具偏小。对粗加工而言, 刀具越大越好, 然而受加工单元几何形状限制, 刀具越大, 残留给精加工的面积越大, 单元整体加工效率反而降低。反之, 刀具越小, 残留面积越小, 但刀具半径减小导致粗加工时间增加。如何保证加工效率是粗加工选刀的关键。

如图 5 所示, 以刀具半径做槽轮廓内外偏置线(图中虚线), 称为外环和内环。当刀具半径过大时, 内环与外环以及内环之间会出现干涉区域(图中打斜线的区域), 刀具在此区域内移动时将产生过切。为避免过切, 刀具应在除干涉区域以外的虚线包围区域内移动, 形成的可加工区域为外轮廓与岛屿之间的空白区域。

可加工区域的面积 $A_m = \cup A_{mi}$, 则可加工率为 $\eta = A_m / A$ 。其中, A_{mi} 为第 i 个可加工区域的面积, A 为加工单元总面积。 η 的大小由刀具大小决定, 反映了残留面积的大小, η 可根据加工实际

经验确定。由刀具库中的最大刀具开始, 依次求 η , 当其值满足实际要求时则把当前刀具作为该加工单元的粗加工刀具, 算法如图 6。

在确定单个加工单元的刀具后, 根据刀具将加工单元分组, 然后对这一系列刀具进行优化, 确定最优刀具组合。为提高加工效率, 减少换刀次数, 引入优化算法:

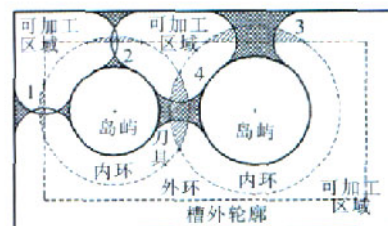


图5 刀具与可加工域

Fig.5 Cutting tool and machinable area

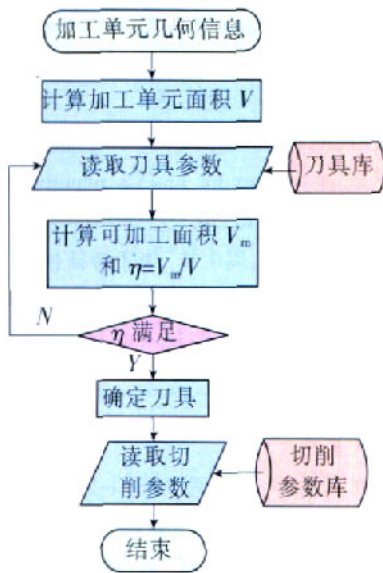


图6 粗加工刀具自动选取流程
Fig.6 Automatic selection flow chart of rough-machine cutting tool

$$\text{单层切削时间 } t = \frac{A}{wfn} \quad (1)$$

$$\text{切削层数 } N = \begin{cases} nn(H - a_p \times nn < \delta) \\ nn+1 (\text{else}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, w 为切削宽度; f 进给速度; n 为主轴转速; A 加工单元面积; $nn = \text{int}(H/a_p)$, H 槽深, a_p 切削深度, δ 加工余量。单元总加工时间 $T = t \times N$, 采用组合刀具加工时间与其中小刀具加工时间比值为:

$$\mu = \frac{\left(\sum_{i=1}^n T_i + \sum_{j=1}^m T_j \right)}{\sum_{k=1}^{n+m} T_k} \quad (3)$$

式中, n 为用第一把刀具加工的单元数, m 为用第二把刀具加工的单元数量, 分母表示采用其中小刀具切削这 $n+m$ 个单元的加工时间。当 $\mu > 0.7$ 时, 两组加工单元合并选其中小刀具。

2.4 基于知识推理的加工自动排序

不同于普通机床加工, 本文根据飞机壁板数控加工工艺特点将工序定义为在一台机床上, 采用同一把刀具通过一次安装所能连续完成的工步集合。识别的加工单元与加工操作关联形成的一个切削加工称为一个工步 m 。学者们将知识推理、遗传算法、神经网络及模糊理论等^[6-7]引入到工步排序研究中。本文采用基于知识推理方法, 根据飞机壁板类零件的数控加工工

艺知识, 建立工序/工步排序规则。

工序排序原则:

规则 1: IF $\exists m_1 \in P_1, m_2 \in P_2$, 有 $m_1 > m_2$ THEN $P_1 > P_2$ ELSE IF $\phi_1 > \phi_2$ THEN $P_1 > P_2$ 。

工步排序规则:

规则 2: IF $m_1 = -1 \wedge m_2 = 0$ THEN $m_1 > m_2$ 。

规则 3: IF $m_1 \vdash m_2 \wedge z_1 > z_2$ THEN $m_1 > m_2$ 。

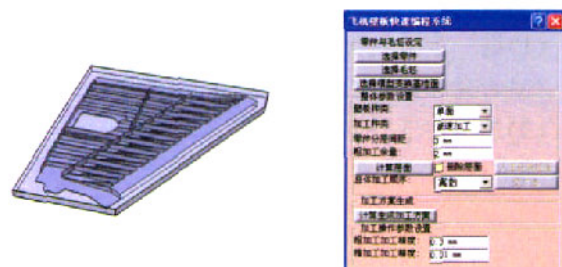
规则 4: IF $m_1 = 1, m_2 = 2, m_3 = 3, m_4 = 4$ THEN $m_2 > m_1 > m_4 > m_3$ 。

规则 5: IF $m_1 < > m_2$ THEN 本着减少加工变形的原则, 根据用户设置的对称等原则和加工单元坐标, 安排工步顺序。

上述规则中, m_1 表示工步 1; m_2 表示工步 2; P_1 表示工序 1; P_2 表示工序 2; ϕ_1 表示加工工序 1 的刀具直径; ϕ_2 表示加工工序 2 的刀具直径; $>$ 表示优先加工; $m_1 = -1$ 表示外轮廓加工; $m_2 = 0$ 表示内型加工; \vdash 表示拓扑相关; z_2 表示工步 m_2 的加工单元 Z 坐标, $m_1 = 1$ 表示工步的加工单元 Z 坐标; 表示加工槽, $m_3 = 3$ 表示加工肋, 表示加工壁上槽, $m_4 = 4$ 表示加工内外敛面或缘条; $< >$ 表示无优先约束。

3 实现及验证

应用上述方法, 课题组成员采用 VC++6.0 工具在 CATIA CAA 环境中开发了飞机壁板类零件的快速数控编程系统。图 7(a)所示的零件, 在对其进行数控程序编制的过程中, 编程人员只需通过图 7(b)所示界面



(a)零件及毛坯 (b)界面



(c)数据加工程序

图7 零件数控编程实例

Fig.7 Example of NC programming of part

交互指定待加工的零件和毛坯模型、分层深度、加工精度要求和排序原则等,其余的包括加工区域设置、加工顺序安排、加工刀具及切削用量选取等设计工作均可由系统自动完成,从而大大简化设计过程,明显减少交互工作量,显著提高设计效率。图7(c)为(a)零件在快速数控编程系统中生成的数控加工程序,粗加工采用 $\phi 50$ 的刀具加工左边的14个槽及外轮廓,右半部分则采用 $\phi 20$ 的刀具加工,并采用 $\phi 16$ 和 $\phi 12$ 的刀具进行精加工,满足实际加工要求。

4 结论

飞机整体壁板作为现代飞机结构中重要而复杂的一类零件,数控程序编制的效率和时间是影响其加工效率和质量的一个关键因素。为此本文研究了飞机整体壁板智能数控编程方法。其特点是将专家系统等智能技术引入到现有的CAM系统中,减少了对编程人员经验的依赖,提高了系统的智能化和自动化。但完全智能化也是难以实现的,因而开发过程中结合实用化,为用户提供了交互修改功能。根据系统结构、算法及实例验证,得出如下结论:

(1)广义槽加工单元分层识别解决了数控程序编制中自动获取加工区域的问题;

(2)在切削数据库及知识库的支持下能够完成刀具自动选取;

(3)能够自动安排工序工步顺序。

本课题就数控智能编程相关技术作了一定的探索,但仍有大量工作有待于进一步研究,包括:

(1)进一步研究切削变参数优化选取方法;

(2)研究和建立工步优化排序算法;

(3)进退刀下刀点自动确定。

参 考 文 献

[1] 范玉青. 航空宇航制造工程:飞行器制造技术. 重庆:重庆出版社,2001.

[2] Balic J, Korosec M. Intelligent tool path generation for milling of free surfaces using neural networks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42 (10): 1 171-1 179.

[3] Lian Ding, Yong Yue. Novel ANN-based feature recognition incorporating design by features. *Computers in Industry*, 2004, 55(2): 197-222.

[4] Rahmani K, Arezoo B.A hybrid hint-based and graph-based framework for recognition of interacting milling features. *Computers in Industry*, 2006, 58(4): 304-312.

[5] Yao Zhiyang, Satyandra K, Gupta, et al. A Geometric algorithm for finding the largest milling cutter. *Journal of Manufacturing Processes*, 2001, 3(1): 1-16.

[6] Liu Zhenkai, Wang Lihui. Sequencing of interacting prismatic machining features for process planning. *Computers in Industry*, 2007, 58(4): 295-303.

[7] 潘双夏,冯培恩,周生祥. 加工特征排序及NC代码映射. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2000, 12(2): 90-95.

(责编 微凉)

(上接第82页)

[2] 谢群良,汪建林. 工艺对Ti-3Al-2.5V钛合金无缝管的表面和性能的影响. *上海钢研*, 2002(2): 9-14.

[3] 杨英丽,张树启,张鹏省. Ti-3Al-2.5V合金的热稳定性研究. *钛工业进展*, 2000(5): 33-35.

[4] 李连诗,韩观昌,邢维基. 钢管变形原理. 北京:冶金工业出版社,1989.

[5] 李耀群. 周期式冷轧管机的发展. *钢管*, 2002, 31(4): 1-8.

[6] 张国平,朱旭. 我国两辊式冷轧管的发展回顾与展望. *有色金属加工*, 1997, 143(5): 1-5.

[7] 杜厚益编译. 新型周期式冷轧管机. *钢管*, 1998, 27(4): 61-62.

[8] Yoshida H, Matsui T, Otani T, et al. Experimental investigation of the cold pilgering of tubes. *Annals CIRP*, 1975, 24: 191-197.

[9] Siebel E, Neumann F W. Das Kaltpilgern von Rohren-versuchergebnis und Untersuchungen über dem Walzvorgang. *Stahl und Eisen*, 1954, 74(3): 139-145.

[10] Geleji A. Die Berechnung der Kräfte und des Leistungsbedarfs beim Kaltpilgern von Rohren. *Acta Technical Budapest*. 1955, 11: 461-478.

[11] Martin J. Methods, models, and assumptions used in finite element simulation of a pilger metal forming process. *Computer Technology and Applications*, 2003, 458: 109-119.

[12] Mulot S, Hacquin A, Montmitonnet P, et al. A fully 3D finite element simulation of cold pilgering. *Journal of Material Processing Technology*. 1996, 60: 505-512.

[13] Lodej B, Niang K, Montmitonnet P, et al. Aubin. Accelerated 3D FEM computation of the mechanical history of the metal deformation in cold pilgering of tubes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, 177: 188-191.

[14] Girard E, Guillen R, Weisbecker P, et al. Effect of plastic shearing on damage and texture on Zircaloy-4 cladding tubes: experimental and numerical study. *Journal of Nuclear Materials*. 2001, 294: 330-338.

(责编 金卯 晓霏)