

# 基于特征的航空发动机结构件自动数控编程技术

## Feature-Based Automatic CNC Programming Technology for Aeroengine Structural Part

南京航空航天大学机电学院 马斯博 李迎光 郝小忠 刘旭

**[摘要]** 针对航空发动机结构件数控加工程序编中存在的重复工作量大、效率低下、质量不稳定、经验依赖性强等问题,提出了基于特征的航空发动机结构件自动编程技术,将基于特征的数控编程技术应用到航空发动机领域。研究了航空发动机结构件特征定义、特征识别、自动工艺决策及轨迹自动生成技术,实现由零件导入到数控程序输出的自动化和规范化,有效提高航空发动机结构件数控编程的效率与质量,提升我国航空发动机研制能力。

**关键词:** 航空发动机结构件 数控加工 特征 自动编程

**[ABSTRACT]** Since the artificial-dependent CNC programming method based on existing commercial CAM systems always leads to massive repeat workload, low efficiency, unstable quality and lack in standardisation, a feature based automatic CNC programming method for aeroengine structural parts is presented. Feature definition and automatic recognition for aeroengine structural parts, automatic process planning and tool path generation are researched which makes aeroengine structural parts CNC programming in an automatic and standardised manner. The research of this paper is proved to be effective in improving the efficiency and quality of aeroengine structural parts CNC programming which could further enhances the capabilities of Chinese aeroengine manufacturing.

**Keywords:** Aeroengine structural part CNC machining Feature Automatic programming

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S1.045

航空发动机被称为飞机的“心脏”,其制造的质量和效率往往决定了飞机的性能以及飞机的研制周期和成本。随着发动机推重比的提高,出现了越来越多省去传统榫卯结构的发动机整体结构件(例如整体机匣<sup>[1]</sup>,由于其材料多为钛合金、高温合金等难切削材料,且具有薄壁、复杂结构等特性,导致其数控加工工艺复杂、加工难度大,尤其在其数控编程过程中需要创建大量复杂的辅助元素,编程工作量大,效率低、质量不稳定,经验依

赖性强,知识积累性差,这些问题严重制约着我国航空发动机的研制能力,不利于缩短航空发动机研制周期,因此如何能提高航空发动机零件的数控编程效率和质量一直成为航空发动机制造技术研究的重点和难点。

### 1 国内外航空发动机数控加工技术现状

欧美航空业发达国家在研制高性能航空发动机上投入了大量资源,实施了一系列技术开发和验证计划,如“先进战斗机发动机计划(ATFE)”、“综合高性能涡轮发动机技术”计划(IHPTET计划)等<sup>[2]</sup>,在新型高性能航空发动机的研制中不仅采用大量的新结构、新材料,对制造工艺的要求也进一步提高,尤其是在五坐标数控加工中,在机床性能、程序编制、变形控制、误差补偿等领域都处于世界最高水平,相关技术因此也成为国外严密封锁的核心机密。

近年来,我国的航空发动机研制与生产任务日益繁重,同时也投入了大量的人力和资源,催生了发动机制造技术的提升,尤其是在航空发动机数控加工中,例如直纹面拟合侧铣精加工技术<sup>[3]</sup>、整体叶盘高效数控加工技术<sup>[4]</sup>、整体机匣的制备技术<sup>[5]</sup>等,大大缩短了我国航空发动机研制周期,提高了我国航空发动机的生产效率,但尽管如此,在航空发动机的数控编程中仍存在效率低、经验依赖性强的问题,例如在发动机机匣安装平台间材料的去除过程中,优选采用插铣的加工方式,但由于零件结构特性复杂,插铣刀轴的构建严重依赖工艺人员的编程水平,且人工辅助几何构建繁杂,重复工作量巨大,数控编程效率低且质量难以保证。这样的编程问题严重制约着我国航空发动机的快速研制。

与传统数控编程不同,基于特征的数控编程技术以加工特征为信息载体,能有效集成加工知识和经验,是数控编程技术发展的重要趋势<sup>[6]</sup>。如南航与某大型航空企业合作开发的“基于特征的飞机结构件快速数控编程系统<sup>[7]</sup>”取得了非常成功的应用,该系统实现了CAD/CAM/CAPP集成环境下的自动数控编程,可以有效减少编程中的重复劳动,有效提高编程效率与质量。但由于航空发动机特征复杂,目前此项技术还未能很好应用于航空发动机结构件数控加工。

## 2 基于特征的航空发动机结构件自动数控编程

本文通过分析航空发动机结构件的几何结构及加工工艺特点,结合航空发动机结构件典型制造工艺和方法,实现基于特征的编程技术在航空发动机领域的应用,改变传统发动机结构件编程方式,实现从零件导入到数控程序输出的自动化,有效提高数控编程效率与质量,显著减少重复劳动,使编程规范化,有益于知识积累。

总体技术方案如图 1 所示。首先对航空发动机结构件的典型结构进行分析,并结合发动机结构件的典型加工方法与走刀策略,定义航空发动机加工特征类型,构建典型特征库。基于典型特征库、工艺规则库等一系列工艺支撑库,对导入系统中的零件进行工艺预处理,并自动识别零件中包含的加工特征,以加工特征作为几何与工艺知识的载体,进行基于特征的工艺决策,自动创建刀轨生成所需的几何驱动和工艺参数,实现加工程序编制的快速化和自动化。各模块的具体功能如下。

(1) 工件预处理模块。预处理指的是在零件导入

后,设定零件加工所需的基本信息(如加工坐标系、安全平面等)。

(2) 特征识别模块。特征识别是将零件模型中的所有点、线、面信息,根据所需识别的特征类型,按照一定规则进行组合,得到各类特征所对应的所有几何信息,将单纯的点、线、面几何信息转化成具有工程意义的特征元素,为后续自动工艺决策和程序生成奠定基础。

(3) 自动工艺决策模块。自动工艺决策是在特征识别的基础上,基于特征的几何信息、各类数据库中的制造资源信息和工艺知识信息,进行自动工艺决策,包含加工区域自动构建、加工排序、加工刀具及切削参数选取,进退刀设置等功能。

(4) 轨迹生成模块。轨迹自动生成是依据特征识别结果和工艺方案,针对不同的加工特征类型,调用与其对应的加工操作类型,以加工特征为零件几何与加工知识载体,自动构建加工驱动几何,并将其与各加工参数自动赋值到相应操作中,快速计算刀轨,生成数控加工程序。

## 3 基于特征的航空发动机结构件自动数控编程关键技术

基于特征的航空发动机自动数控编程技术主要包含航空发动机结构件特征识别、自动工艺决策以及轨迹自动生成 3 大关键技术。

### 3.1 航空发动机结构件特征识别技术

特征识别技术作为 CAD/CAPP/CAM 有效集成的工具,是特征技术的发展基础,也是基于特征的航空发动机自动数控编程技术的核心技术之一。

首先,通过分析航空发动机结构件的零件结构,定义出适用于航空发动机结构件数控加工的特征类型,本文暂只考虑铣削加工,车削不予讨论。选取航空发动机典型结构件整体机匣为例,通过分析零件结构特性,多为回转轮毂面基体上长有复杂型面岛屿的圆筒类结构,并结合整体机匣铣削加工工艺,将整体机匣加工特征定义为: 环形槽特征、凸台特征和孔特征,如图 2 所示。

基于以上特征定义,采用全息属性面边图<sup>[8]</sup>的几何拓扑信息模型,基于各特征类型的种子面定义及面拓展规则,实现整体机匣环形槽特征、凸台特征和孔特征的自动提取,具体流程如图 3 所示。其中环

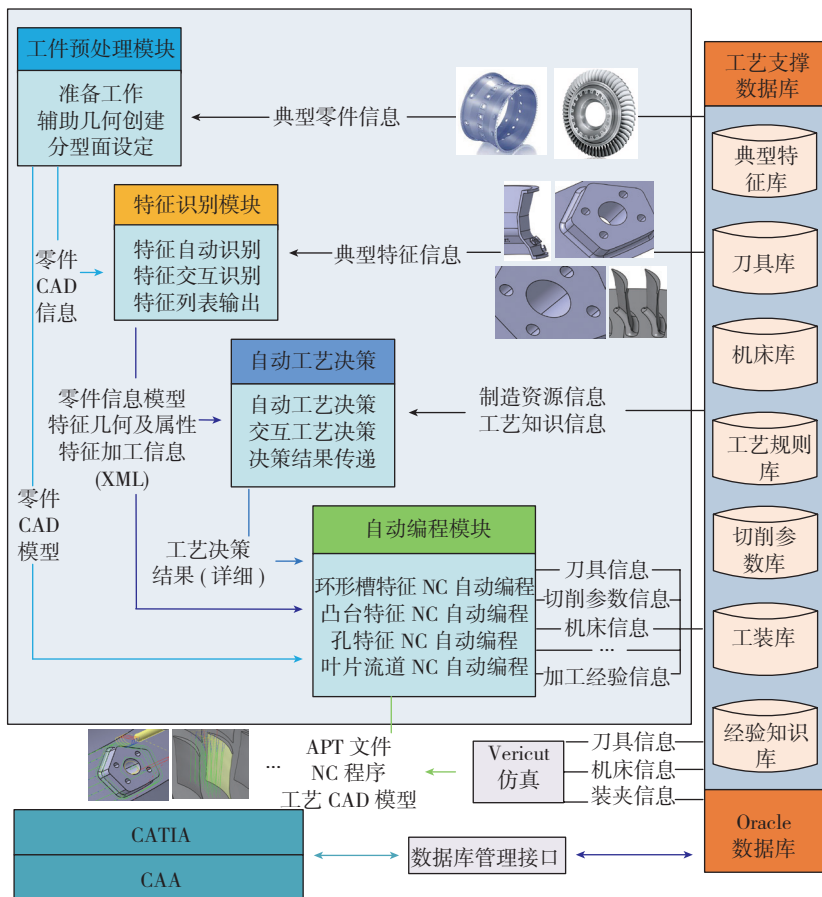


图 1 总体技术方案  
Fig.1 Framework of proposed method

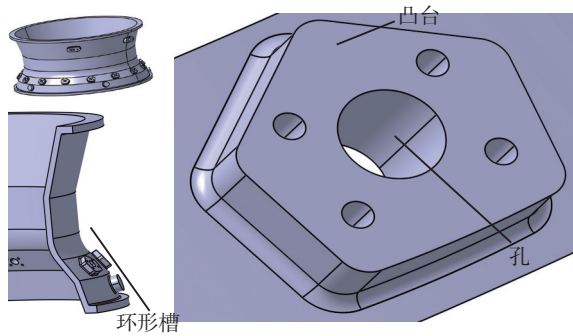


图2 机匣典型特征类型

Fig.2 Typical feature types of aeroengine case

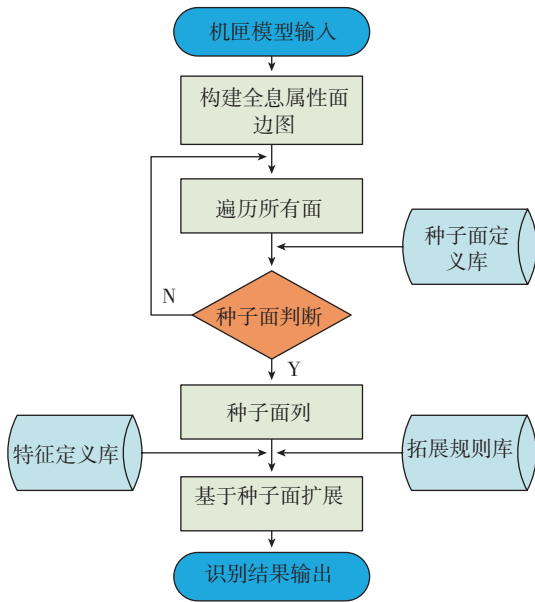


图3 机匣特征识别流程图

Fig.3 Feature recognition procedures for aeroengine case

形槽特征的种子面为圆锥、圆柱等回转轴线为机匣零件回转轴线的回转面；凸台特征的种子面为环形槽特征的底面；孔特征的种子面为凸台特征的顶面。

在零件导入后,从CAD底层将所有几何元素提取出来,并构建全息属性面边图,增加几何元素的属性,使边、面元素不仅含有几何信息还能表达此元素与周围元素的连接关系,这样便可以基于不同加工特征类型的拓展规则,将所有几何元素依据种子面进行面拓展,最终得到各种加工特征所包含的几何信息,并将特征识别结果进行保存,用于后续工艺决策和程序编制,图4所示为典型机匣的环形槽特征、凸台特征及孔特征的识别结果。

其中,环形槽特征元素包含槽底面、槽底角面、槽侧面、槽顶面以及所含凸台信息;凸台特征元素包含凸台底面、凸台底角面、凸台侧面、凸台顶面以及凸台孔信息;孔特征元素包含孔顶面、孔侧面及孔类型、孔深度等信息。

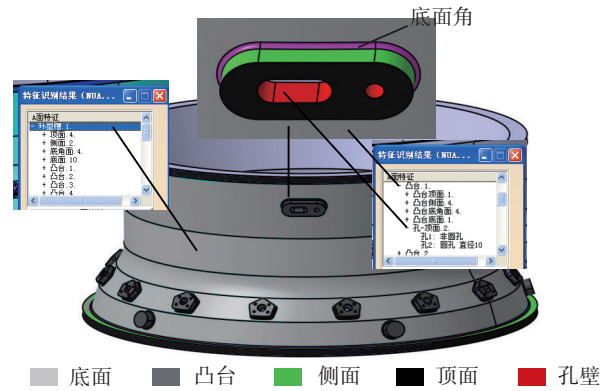


图4 典型机匣特征识别结果

Fig.4 Feature recognition result of a typical aeroengine case

### 3.2 基于特征的航空发动机结构件自动工艺决策技术

通过特征识别可以将航空发动机结构件的加工特征自动提取,将零件模型转化一系列加工特征的组合,作为自动工艺决策的输入,通过分析零件刚性以及加工资源,自动调用加工资源库数据(如工艺规则库、切削参数库、刀具库等),针对不同的特征类型,基于规则选用对应的加工方案,并选取合适的切削参数,实现航空发动机结构件的自动工艺决策,以整体机匣为例,其自动工艺决策框架如图5所示。

#### (1) 加工特征排序。

在特征识别后,得到了所有加工特征,通过分析零件加工工艺方案,将加工特征排序分为装备级排序、工序级排序和工步级排序;装备级排序通过考虑机床和装夹设备对不同特征类型的加工能力,从装备级对加工特征进行初始排序;在机床和装夹选定后,根据已有的加工知识库以加工特征的工序进行排序,最后在各个工序中,对各个特征依据最短加工时间进行排序。

#### (2) 加工区域构建。

在加工特征排序后,通过分析此加工特征所在工序工步的工艺信息(如刀具信息、加工精度、加工余量以及上一步加工刀具信息等),针对不同特征类型,分别构建所需加工区域,例如在机匣凸台间粗加工插铣工步中,通过考虑机匣铣削毛坯、插铣加工刀具以及加工余量,自动构建粗加工插铣加工区域,如图6所示, $\delta$ 为凸台侧面留有的余量。

#### (3) 切削参数选取。

通过分析加工区域限制条件以及考虑工艺规则库中的经验数据,从刀具库中选用对应的刀具类型,结合零件装夹方案、材料信息及刀具信息,从典型切削参数库中选用对应的切削参数(如切深、切宽、转速、进给速度等),在保证零件加工质量的前提下,选取加工效率较高的切削参数。

除以上工艺决策外,还包含进退刀决策等环节,这

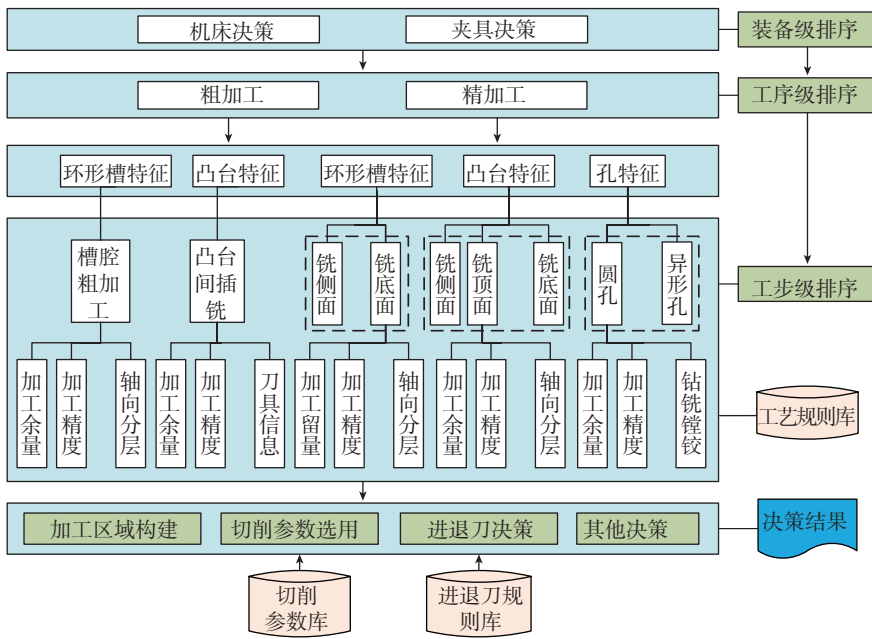


图5 自动工艺决策框架  
Fig.5 Framework of automatic process planning

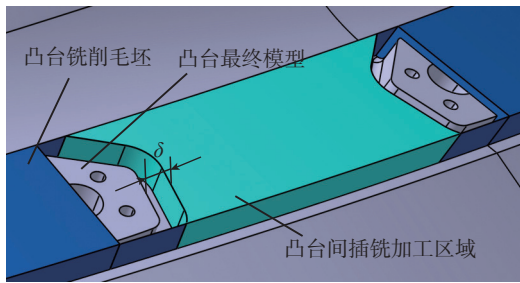


图6 机匣凸台间插铣加工区域自动构建  
Fig.6 Machining region construction for plunge milling the boss feature in aeroengine case

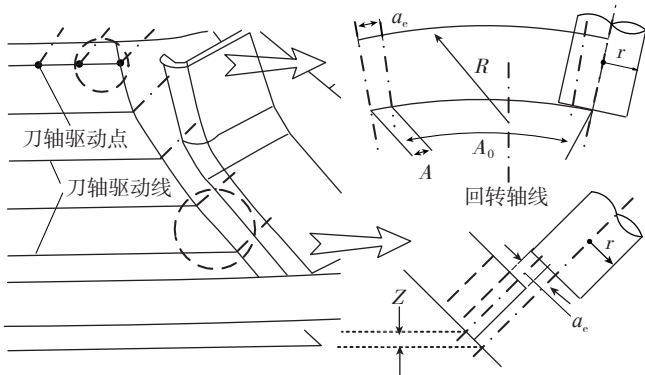


图7 机匣凸台间插铣加工驱动几何构建  
Fig.7 Drive geometry generation for plunge milling boss feature in aeroengine case

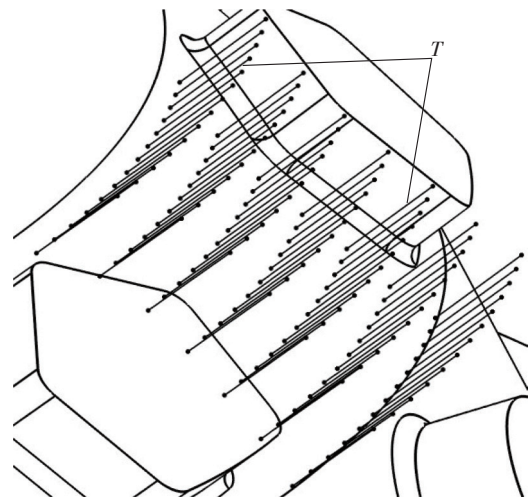


图8 机匣凸台间插铣刀轴  
Fig.8 Tool axis of plunge milling

丰富的含义,不仅包含此特征的几何信息,还包含此特征所对应的加工工艺信息,这样一来,基于特征便可以有效地将零件几何与零件几何所对应的加工工艺进行融合,实现基于特征的轨迹自动生成。

加工驱动几何的构建是自动程序编制的重中之重,构建方法因特征加工方式而异,一些特征加工方式可以直接将加工区域作为驱动几何;另一些需要根据加工区域及工艺决策结果进行构建,以机匣凸台间插铣为例,加工驱动几何为插铣的刀轴,其构建方法为以凸台间插铣加工区域为基础,结合刀具信息以及切深、切宽等工艺决策结果,自动生成插铣刀轴,具体步骤如下:

(1)轴向分层,基于加工区域底面和切削宽度决策结果,计算出插铣轴向分层距离 $Z$ ,并用一系列垂直于机匣回转轴线的平面(相邻两平面间间距为 $Z$ )与机匣加工区域底面相交,得到每层刀轴驱动线,如图7所示。

(2)每层刀轴分布,基于每层刀轴驱动线,构建出两边缘刀轴,计算两边缘刀轴间回转角度 $A_0$ ,并结合切宽决策结果计算出相邻刀轴间回转角度 $A$ ,在刀轴驱动线上按回转角 $A$ 取点,作为刀轴驱动点,如图7所示。

(3)刀轴生成,由于刀轴驱动点在加工区域底面上,计算底面在每个驱动点处的外法向,便得到了刀轴线,结合切深决策结果及余量设置,确定刀轴上下端点,得到最终刀轴,作为插铣加工的驱动几何,如图8中 $T$ 所

里不进行一一论述。

### 3.3 基于特征的航空发动机结构件轨迹自动生成技术在自动工艺决策后,每个加工特征元素便有了更为

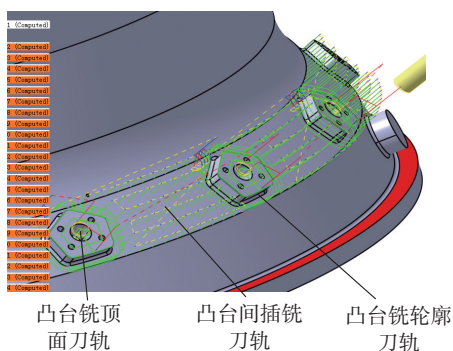


图9 机匣凸台加工特征相关刀轨  
Fig.9 Tool path for machining boss features

示。

在加工驱动几何构建完毕后,针对不同的特征类型,通过分析每种特征所对应的加工方式,自动选用相应CAM软件中较为高效的加工刀轨类型,将各加工特征的加工区域、加工顺序、切削参数、加工驱动几何等工艺信息,自动赋值到对应操作中,实现轨迹的快速自动生成。

综上所述,通过特征识别、自动工艺决策以及轨迹自动生成3个关键技术,可以实现基于特征的航空发动机快速自动数控编程。

除此之外,由于加工特征可以实现零件几何与工艺信息的有效融合,为系统使用过程中的工艺知识积累提供了有效的途径。同时,以加工特征作为工艺知识载体可以积累优秀的数控编程工艺方法,使数控加工程序的编制不再受人为编程经验的影响,有益于编程规范化及数控加工程序质量稳定性的提升。

#### 4 实例

通过分析航空发动机整体机匣的典型结构,基于相关工艺知识库和CATIA平台,开发出基于特征的航空

		特征识别结果			
		特征识别结果	特征识别结果	特征识别结果	
		环形槽特征	1	100%	
		特征识别结果	特征识别结果	100%	
		特征识别结果	特征识别结果	100%	
编程对比	凸台间插铣	凸台轮廓铣	凸台顶面铣	合计	
手动编程	2h	16min	15min	2h 31min	
自动编程	10min	4min	3min	17min	
生成率	100%	100%	100%	100%	
正确率	95%	95%	100%	96.9%	

图10 典型机匣零件应用对比  
Fig.10 Application and comparison of typical aeroengine

发动机结构件自动编程系统,实现由发动机整体结构件零件导入到数控程序自动生成的快速数控编程,主要包含特征识别模块,自动工艺决策及刀轨生成模块。图9所示为基于特征的航空发动机结构件自动编程系统生成的典型凸台加工特征相关刀轨。

针对具体发动机典型机匣零件将基于特征的航空发动机自动编程与传统手动编程进行对比,结果如图10所示。

通过对比可知,基于特征的航空发动机自动数控编程技术可以快速生成数控加工程序,大大减少编程重复工作量,有效地提高航空发动机结构件数控编程效率与编程质量。

#### 5 结束语

本文在分析我国航空发动机数控加工现状的基础上,针对航空发动机结构件数控编程重复工作量大、效率低、程序稳定性差等问题,提出了基于特征的航空发动机自动数控编程技术,从特征识别、自动工艺决策和轨迹自动生成3个方面,将基于特征的快速编程技术应用到航空发动机零件的数控加工中,具有以下优点:

- (1) 大大减少编程工作量,有效提高编程效率;
- (2) 使程序编制规范化,编制质量稳定性提高;
- (3) 为加工知识积累提供有效途径,在我国发动机快速研制的进程中必将起到推波助澜的重要作用。

所述技术已在CATIA平台开发出原型系统,并在某型号发动机整体机匣零件数控加工试验中得到了成功应用,取得了预期的试验效果。

#### 参考文献

- [1] Chen G. Several new structure of new type aero engine. AeroEngine, 2001(1): 3-10.
- [2] 王增强. 高性能航空发动机制造技术及其发展趋势. 航空制造技术, 2007(1): 52-55.
- [3] 于源, 赖天琴, 员敏, 等. 基于特征的直纹面五轴侧铣精加工刀位计算方法. 机械工程学报, 2002, 38(6): 130-133.
- [4] 任军学, 张定华, 王增强, 等. 整体叶盘数控加工技术研究. 航空学报, 2004, 25(2): 205-208.
- [5] 郝小忠, 何磊, 耿习琴, 等. 发动机整体机匣加工方法: 中国专利, 200110185236.3. 2011-11-23.
- [6] 韩雄, 汤立民. 大型航空结构件数控加工装备与先进加工技术. 航空制造技术, 2009(1): 44-47.
- [7] 王伟. 基于特征的飞机结构件快速数控编程技术研究与实践[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [8] Li Y G, Ding Y F, Mou W P, et al. Feature recognition technology for aircraft structural parts based on a holistic attribute adjacency graph. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2010, 224(2): 271-278.

(责编 玲犀)