

# 基于三维数模的关键特性构建及可视化研究<sup>\*</sup>

## Research of Key Characteristic's Construct and Visualization Based on 3D Model

南京航空航天大学 贺 鹏 王志国 谭昌柏

**[摘要]** 针对关键特性及其分解信息在飞机数字化设计、装配和容差分配中如何应用和实施的问题,以CATIA及CAA平台、Oracle9i和VSA公差仿真软件为基础,研究了一种基于三维模型的关键特性数据构建、存储和表达方法,并开发了可视化平台来直观地描述关键特性信息在飞机数字化装配工艺设计中的应用。以某型飞机减速板为对象,验证了关键特性数据从定义、存储至容差仿真的整个应用流程。实例表明,提出的方法可为飞机装配工艺设计人员提供有效的分析工具。

**关键词:** 三维模型 关键特性 飞机制造 装配

**[ABSTRACT]** Aiming at how to apply and implement key characteristics and its structure in the process of aircraft's digital design, assembly and tolerance distribution, in the foundation of CATIA and its secondary development platform CAA, Oracle9i and tolerance simulation software VSA, a method is proposed to construct, store and express key characteristic's information based on 3D model, an visual platform is developed to clearly describe its flowdown in the aircraft's digital assembly progress. The example of aircraft braking is tested and verified in the whole application which includes key characteristic's definition, storage and tolerance simulation, and the practice indicates that it is an effective method to assist assembly process designers.

**Keywords:** 3D model Key characteristics Aircraft manufacture Assembly

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.15.029

关键特性(Key Characteristics, KC)是指对产品性能、功能、配合及形成有显著影响的产品特性、制造流程和装配特征。在产品的设计、装配、制造过程中,Thornton将各阶段的需求和影响因素定义为关键特性,依次可分为产品关键特性(PKC)、装配关键特性(AKC)及制造关键特性(MKC)<sup>[1-2]</sup>。关于关键特性的鉴定、分解及其使用方法国内外已经做了大量的研究:刘志存<sup>[3-4]</sup>等人提出的基于并行工程的关键特性定义

与管理的方法,依据制造树对关键特性进行分解,以达到在制造阶段通过控制关键特性提高产品质量的目的;冯子明<sup>[5]</sup>提出的关键装配特性的概念,以飞机装配中的误差累计最多的环节为关键特性,通过向下分解与补偿的方法加以控制,提高装配准确性;唐文斌<sup>[6]</sup>通过量化关键特性备选集对上层关键特性的影响度筛选出关键特性,进而实现关键特性的筛选与分解;尹峰<sup>[7]</sup>通过对制造装配中误差累计的分析,将关键特性分解到零件和工艺工程,然后融入到柔性装配数据集作为产品与工装备制造、检验的依据;Whitney<sup>[8]</sup>提出基准流链(Datum Flow Chain, DFC)的概念,结合关键特性的分解、装配顺序、容差分析等信息设计最优化的装配方法,减少装配过程中的误差累积带来的损失。

在已有研究成果的基础上,运用CATIA、CAA二次开发平台和Oracle数据库,研究了一种基于三维数模的关键特性构建和定义方法,并开发了可视化平台用以直观地表达装配过程中关键特性分解的流程。最后,以某型飞机的减速板为研究对象,运用VSA软件对产品的装配过程进行了仿真分析。实例表明,本文提出的方法可为技术人员提供有效的工艺设计工具,从而达到提高装配准确度的目的。

## 1 关键特性的特点及其在三维模型中的表达

根据所属行业和部门的不同,关键特性所指定的内容也具有差异性,可以分为几何特性、机械特性、化学特性、物理特性和经济特性。本文研究飞机装配过程中的关键特性指几何特性,主要包括产品或零件形状、尺寸及协调要求等相关特征。

### 1.1 关键特性的特点

根据关键特性定义及其在设计生产制造过程中的应用,关键特性具有以下特点。

(1) 关键特性是可变的。伴随着生产制造水平的提升、产品质量的优化,旧的关键特性将被淘汰,新的关键特性被提出。

(2) 关键特性是可测量和可控的。根据波音公司先进质量体系对关键特性的说明,当某层次的关键特性无法测量和控制时,则应向下层分解到可测量和控制的特征上,通过保证下层的关键特性来满足上层要求。

<sup>\*</sup> 江西省博士后择优支柱项目航空科学基金(2012ZE66016)、国家自然科学基金(51275236)资助。

(3) 关键特性是可分解的。产品初期设计过程中,对于关键特性的识别没有绝对通行的办法,一般设计人员根据客户需求、相似产品说明、现有技术、生产数据等信息首先确定产品关键特性(PKC),然后依次向下分解。伴随分解的深入,关键特性的数量积累,这就要求集成产品开发团队(Integrated Product Team, IPT)精而优地选取关键特性。

结合关键特性的特点,由于关键特性的分解是沿制造树逐级进行分解传递的,随着分解的深入,形成关键特性树结构,而制造树的创建是以飞机产品结构和制造企业制造资源为依据,每个节点代表一个工位,上下级关系反应了客户与供应商的关系,因此关键特性树可描述关键特性与客户、供应商之间的关系<sup>[9]</sup>。如图1所示,从图中可清晰辨别出关键特性与客户及供应商的所属关系。

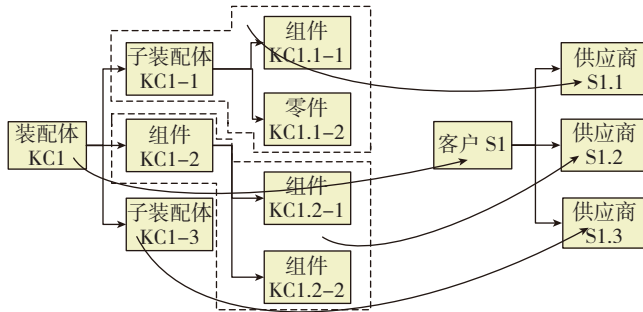


图1 关键特性树结构与客户及供应商关系

Fig.1 Relationship between tree of key characteristics and customer, supplier

从图1可以看出,假设在某装配层*i*关键特性集为 $KC_i$ ,关键特性的数目记为*n*,第*j*个关键特性表示为 $KC_{ij}$ ,则 $KC_i = \bigcup_{j=1}^n KC_{ij}$ ;相邻层之间关键特性关系可用如下矩阵表达<sup>[9]</sup>:

$$KC_{i-1} = \begin{pmatrix} KC_{i-1}^1 \\ KC_{i-1}^2 \\ \vdots \\ KC_{i-1}^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} KC_i^1 \\ KC_i^2 \\ \vdots \\ KC_i^m \end{pmatrix}$$

$$= C_{nm} KC_i$$

如果 $KC_{i-1}^j$ 有子关键特性,  $\sum_{k=1}^m c_{jk} \neq 0 (j = 1, 2, \dots, n)$ ,

如果 $KC_{i-1}^j$ 没有子关键特性,  $\sum_{k=1}^m c_{jk} = 0 (j = 1, 2, \dots, n)$ 。

### 1.2 关键特性在三维模型中的表达

随着MBD技术在国内航空业的不断推广和实施,迫切希望寻求一种在三维数模上直接描述关键特性的方法。CATIA软件的FT&A模块提供了强大的功能,使得用户可在三维数模上以标注或旗注的方式直接定义尺寸、公差、文本和文件等,而其中难点在于如何将关键

特性的分解和层次信息表达在三维数模上。

结合现阶段关键特性的表达方式,为解决以上问题,论文定义关键特性属性集包括:所属产品编号、产品名称、关键特性内容、父关键特性名、工位信息及与其相关的父级关键特性名等,从而建立起关键特性的树结构关系。本文借助CATIA FT&A模块的旗注功能,对关键特性进行统一格式的编码,以旗注说明的方式直接创建在三维数模上,编码格式如下:

关键特性名 = 所属产品编号 | 产品名称 | 关键特性内容 | 工位信息 | 父关键特性名 | 相关父级关键特性名。

本文中,一个关键特性往往包含多个关键特性内容,如一架飞机的产品关键特性包括飞行距离、飞机质量、最大存储油量等,其关键特性内容可表示为:飞行距离 + 飞机质量 + 最大存储油量。

同理,与某关键特性相关的父级关键特性多余1个,也可采用类似的方法表述,例如“相关父级关键特性名1 + 相关父级关键特性名2”。关键特性在三维模型中的表达及其编码实例如图2、图3所示。

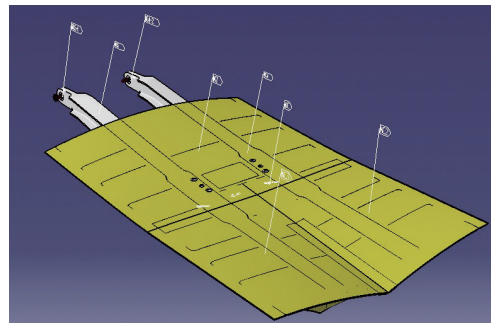


图2 数模中创建的关键特性旗注

Fig.2 Created flag of key characteristics in model

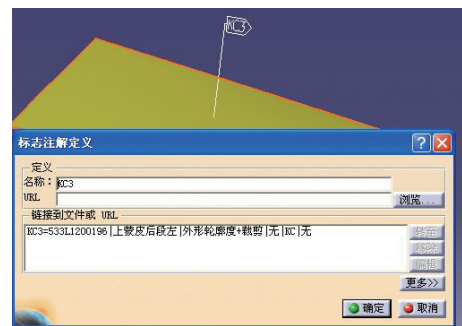


图3 关键特性编码示意图

Fig.3 Code of key characteristics

## 2 关键特性数据的管理

采用编码和旗注的方式可在三维模型上定义关键特性信息,然而还是难以直观地表达其层次化的分解特征。因而,本文将关键特性数据存入Oracle数据库,并开发了关键特性显示平台,实现了关键特性的可视化管

理,基本流程如下:首先,利用达索公司提供的 CATIA 二次开发平台 CAA 开发出提取关键特性注解信息的功能模块;其次,建立与 Oracle 数据库的连接,将提取出的关键特性信息存储到数据库中;最终,开发关键特性显示平台,从数据库中导入数据进行可视化管理。图 4 为关键特性信息管理的流程图。

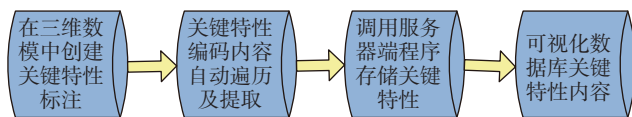


图4 关键特性信息流程图

Fig.4 Information flow of key characteristics

## 2.1 三维模型中关键特性信息的提取

为实现产品的关键特性可视化,本文利用 CATIA 的二次开发平台 CAA 开发了关键特性提取及存储的工具。CAA 的 Tolerancing 模块提供了丰富的接口和 API 函数,涵盖了标注及公差创建和提取的流程。本课题中为获得创建旗注中关键特性的编码信息,首先需要依次访问 CATITPSDocument、CATITPSList、CATITPSComponent 接口来寻求新建的标注集 CATITPSSet,然后通过 CATITPSSet 的函数 GetTPSs (piTPSList) 获得此标注集中所建标注的数目 piTPSList,利用 piTPSList->Item (i,&piTPSComponent) 逐一获得每个标注信息的接口,最后通过成功访问 CATITPSFlagNote 接口,提取出旗注中关键特性编码内容。

## 2.2 关键特性数据结构的构建及存储

为了将提取出的关键特性信息存储于 Oracle 9i 数据库,首先必须构造合理的数据结构。简洁合理的数据结构不仅有利于关键特性信息的高效存储,也为后续可视化平台的开发提供极大的便利。

关键特性结构属于典型的树结构,Oracle 9i 数据库作为关键特性的存储平台,可采用常用的左右值法构建关键特性表,依据实体、属性关系,关键特性表应包括关键特性名称、所属产品编号、产品名称、关键特性内容、左值、右值等主要字段。

综合以上步骤,搭建了如图 5 所示的关键特性信息窗口,具体操作过程中首先遍历出新建所有旗注中关键特性编码信息,而对关键特性进行存储时,还必须为关键特性选择对应的图片,从而将关键特性文字及图片信息成套地保存在搭建的数据结构中。

## 3 可视化应用实例

关键特性树的可视化是指以图片附加文字说明的方式呈现关键特性的分解过程,还包括关键特性内容及其工位信息,为工艺人员在具体实施过程中提供直观的

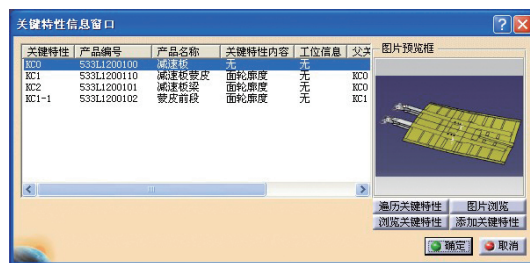


图5 关键特性信息窗口

Fig.5 Information window of key characteristics

参考资料,以达到提高装配质量的目的。关键特性可视化平台的搭建以前期存储于 Oracle 9i 数据库中的数据为信息源,结合 VC++6.0 开发平台搭建可视化的界面,该平台除了能表达关键特性树的分解过程外,还应能实现关键特性的修改、删除、添加及其关键特性图片的放大、缩小等基本功能。

以某型飞机的减速板为例,外形的微弱变化直接影响到飞机的力学性能,蒙皮裁剪余量的合理设置有利于减少装配时间、提高装配质量;此外减速板梁通过螺栓连接方式与其他部件相约束,螺孔细小的偏移也会导致与其他部件协调不当,因此,选择外形准确度、裁剪余量、螺孔的同轴度作为产品级的关键特性,并以此向下分解。某机型减速板如图 6 所示。

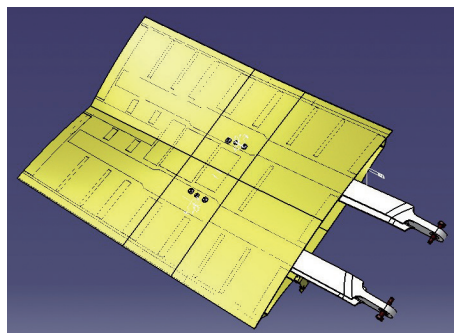


图6 某机型减速板

Fig.6 Aircraft braking

根据制造树确定关键特性树结构后,借助 CATIA FT&A 模块的旗注功能,以统一编码的格式建立所有关键特性信息,如外形准确度可以向下分解到上蒙皮前段和上蒙皮后端,同轴度要求可分解到减速板梁及衬套等。

以创建的旗注关键特性内容为信息源头,利用二次开发出的关键特性提取和存储功能,将关键特性编码信息存储于构建好的 Oracle 9i 数据库中。关键特性的提取及存储关键特性窗口如图 7 所示。

以数据库为关键特性信息传递的枢纽,结合 VC++6.0 开发的关键特性可视化平台,清晰直观地描述装配阶段关键特性的分解过程,为工艺人员提供极大的便利,该示例关键特性的可视化效果图如图 8 所示。

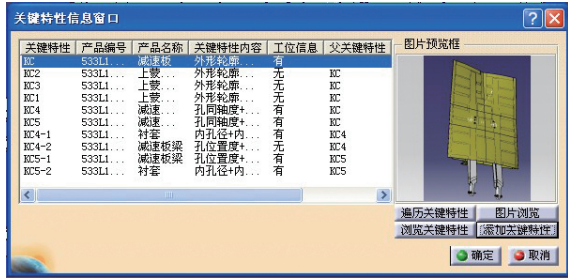


图7 提取及存储关键特性窗口

Fig.7 Extracted and stored window of key characteristics

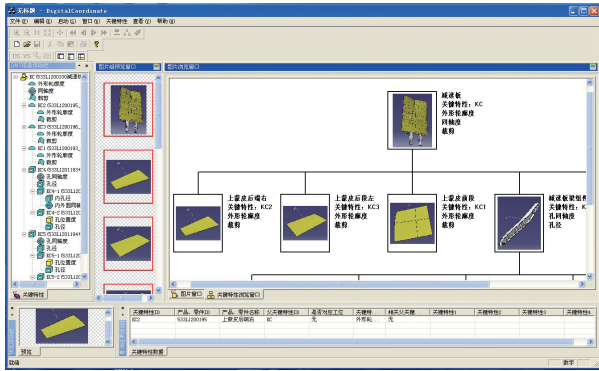


图8 关键特性可视化平台

Fig.8 Visual platform of key characteristics

可视化平台左侧浮动栏以常用的树结构描述各级关键特性的内容及父子关系,而主窗口则以图片方式直观清晰地表达关键特性的分解流程。实践证明该方法有效地展现了关键特性的分解及其分布,从宏观方面为装配工艺人员辅助飞机装配提供了便利。

#### 4 减速板模型的容差仿真

以产品 3D 数模为媒介,构建了关键特性分解信息。以此信息为基础,运用 VSA 公差仿真软件对减速板的装配过程进行建模和容差仿真分析(具体过程不在本文中赘述),其中图 9 演示了减速板的数字化装配模型,图 10 演示了容差分析的仿真图表,包括对装配影响因素较大的零件特征及其贡献度、装配成功率的统计数据等。众所周知,关键特性是可动态改变的,而这些分析数据可帮助工艺人员对已构建的关键特性数据集进行合理评价。

#### 5 结束语

结合现阶段对关键特性的理解和使用方法,在确定关键特性树的基础上,依靠 CATIA 自身功能及其提供的二次开发 CAA 平台,借助 Oracle 9i 数据库,以 VC++ 6.0 为开发工具搭建关键特性的可视化平台表达关键特性的分解过程,最后以 VSA 软件、参照关键特性数据集对减速板的装配过程进行建模和仿真。本文对关键特

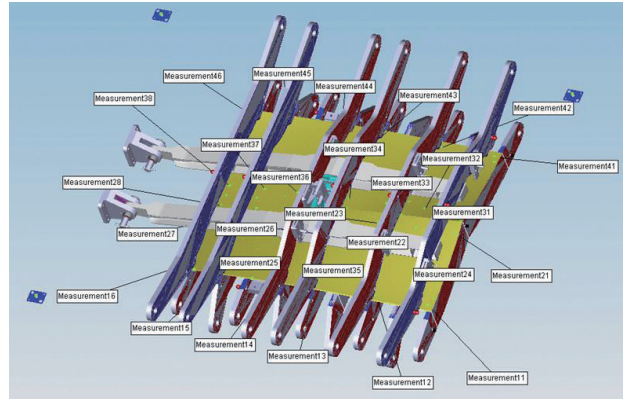


图9 减速板装配工艺公差仿真图

Fig.9 Tolerance simulation diagram of aircraft braking assembly progress

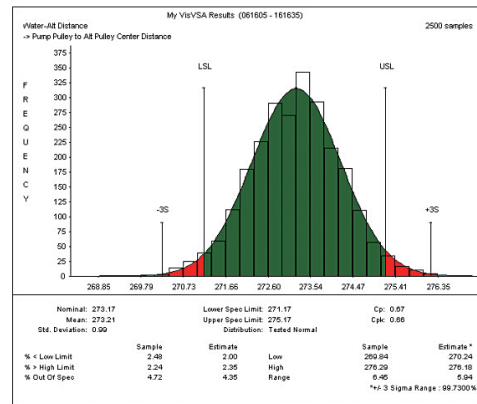


图10 容差分析的仿真结果

Fig.10 Simulation result of tolerance analysis

性如何在飞机数字化装配中实施进行了一次尝试,还存在一些有待深入解决的问题,体现在以下方面。

(1) 研究的关键特性是装配过程中的形状、尺寸及协调相关的特征,为了满足这些要求,还需要制定具体相关的实施措施,例如工装的设计、装配工艺方法的设计、检验方法等。

(2) 对于关键特性中涉及到的尺寸及协调相关的装配特征,后续研究将引入容差分配的方法,并依靠二次开发技术打通 CATIA、VSA 容差仿真平台间的信息流,极大的提高容差模拟效率和装配准确度。

#### 参考文献

[1] LEE D J, Thornton A C. The identification and use of key characteristics in the product development process. Proceeding of the 1996 ASME Design Engineering Technical Conference and Computers in Engineering Conference, Irvine: California, 1996.  
 [2] Thornton A C. A mathematical framework for the key characteristic process. Research in Engineering Design, 1999, 11: 145-157.  
 [3] 刘志存, 范玉青. 飞机制造中新型质量控制模式——关键

(下转第 35 页)

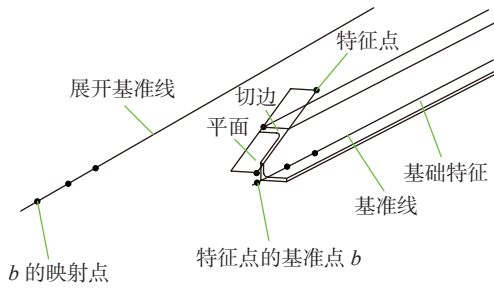


图4 特征点的提取与映射

Fig.4 Selecting and mapping of characteristic points

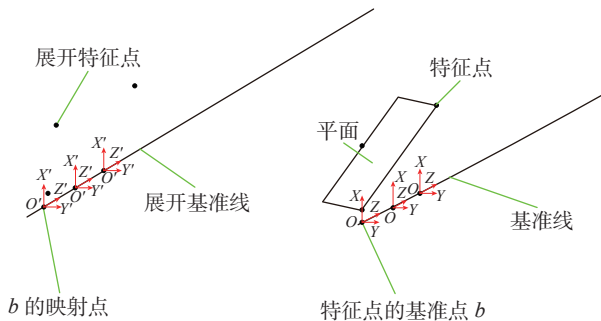


图5 特征点的局部笛卡尔坐标系转换

Fig.5 Transformation of character points by local Cartesian reference frame

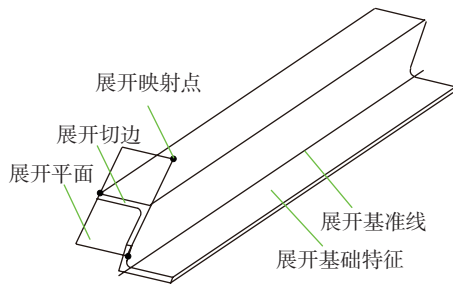


图6 局部特征的展开结果

Fig.6 Spread-modeling result of local feature

上,零件在弯扭成形过程中,外部作用力迫使零件内部材料发生延展变形,导致零件成形后尺寸大于设计值。

处理这种延展变形的传统方法是,成形前在零件端头预留一定加工余量,装配过程中将加工余量和延展变形量一并切除。然而,随着产品设计复杂度的不断提高,零件局部特征的制造精度要求越来越高,传统方法已经难以满足现代高性能飞机零件的精度要求。在工艺数模设计过程中对零件的成形延展进行前置补偿是提高零件制造精度和实现无余量装配的有效途径。

环境温度、成形工艺参数以及材料本身应力状态等因素的交错影响,导致零件延展变形的随机性大,变形量难以精确计算。由于国内关于这类延展变形产生机理的研究还不够深入,通过试验测量获取变形量是目前相对折中的方法。获得变形值后,在零件展开设计过程中,通过下式修正映射点在展开基准线的位置,即可实

现延展变形的前置补偿。

$$L = \frac{M^2}{N}$$

式中,对于基础特征, $L$ 指板坯数模中相邻两映射点之间的展开基准线的长度, $M$ 指原设计数模中对应于 $L$ 的基准线的长度,试验测量数值 $N$ 指将原设计数模不经延展补偿直接展开为板坯数模,并加工成形后 $M$ 对应的长度。对于局部特征, $L$ 指板坯数模中基准点的映射点与展开基础特征中的某一映射点之间的展开基准线的长度, $M$ 指设计数模中对应于 $L$ 的基准线的长度,试验测量数值 $N$ 指将原设计数模不经延展补偿直接展开为板坯数模,并加工成形后 $M$ 对应的长度。

## 4 结束语

(1)快速准确的长桁类零件工艺板坯展开设计方法,对于提高飞机数字化制造水平,缩短飞机研制周期具有重要意义;(2)文中描述的展开设计过程是以零件基准线为基准进行的。对于部分没有设计基准线的零件,可尝试通过人为构造基准线的方法实现展开设计;(3)目前的延展变形补偿方法需要通过试验件获得变形值,工艺成本大、制造周期长。基于试验数据研究延展变形的解析计算或有限元仿真方法,是进一步完善长桁类零件成形工艺的必经之路。

## 参考文献

- [1] 裴蕾,黄翔,王强,等. 基于特征的飞机长桁类结构件快速建模系统研究. 飞机数字化制造技术学术会议. 南京:2011.
- [2] 田爱萍. ARJ21 复杂双曲面长桁类零件弯扭复合冷成型方法. 西安航空技术高等专科学校学报, 2008(26):11-13.
- [3] 张贤杰,裴广勇,王俊彪. 基于UG的飞机整体壁板类零件数字化展开. 航空制造技术, 2003(2):57-60.
- [4] 曹蔚,甘忠,李立军. 带下陷航空钣金零件展开及参数化建模研究. 锻压技术, 2010,35(5):148-151. (责编 叶枫)

(上接第 32 页)

特性统计过程控制. 航空制造技术, 2007 (11):90-96.

[4] 刘志存,邹翼华,范玉青. 飞机制造中关键特性的定义与管理. 计算机集成制造系统, 2007,13(10):2013-2018.

[5] 冯子明,邹成,刘继红. 飞机关键装配特性的识别与控制. 计算机集成制造系统, 2010, 16(12):2552-2556.

[6] 唐文斌,余剑锋,李原,等. 产品关键特性量化鉴别与分解方法应用研究. 计算机集成制造系统, 2011,17(10):2383-2388.

[7] 尹峰,王巍,梁涛,等. 基于关键特性的数字化公差分配技术研究. 航空制造技术, 2011(22):53-56.

[8] Mantripragada R, Whitney D E. The datum flow chain: a systematic approach to assembly design and modeling. Research in Engineering Design, 1998,10:150-165.

[9] YANG F. A key characteristics-based model for quality assurance in supply chain. IEEE, 2011:1428-1432. (责编 亿霖)