

基于关键特性的数字化容差分配技术研究*

Research of Digital Tolerance Distribution Technology Based on Key Characteristics

沈阳航空航天大学 尹峰 王巍 梁涛 惠帅 贺平

[摘要] 飞机柔性装配技术具有鲜明的数字化特点,在并行工程环境下以面向柔性装配的设计思想为指导,对决定飞机质量的关键特性进行定义;通过对制造装配过程中误差累积的分析,将关键特性分解传递到零件和工艺过程;运用数字化技术对各个部段的关键特征进行容差分配,经分配的容差信息将被融入柔性装配数据集作为产品与工装制造、检验的依据。通过对零件和各装配阶段关键特性的检测和监控,可以显著提高飞机装配质量和效率。

关键词: 柔性装配 关键特性 容差分配

[ABSTRACT] Flexible assembly is characterized by the digitization, in the phase of the concurrent engineering, according to the idea of design for the flexible assembly, the key characteristics which influences the aircraft quality are defined. Through the analysis of the error accumulation, the key characteristics are decomposed to the components and process. Digital technology is used to distribute the tolerance, the tolerance information is added into the dataset of flexible assembly to coordinate the product and tooling's manufacturing and checkout. By measuring and controlling the key characteristics of the components and process, the quality and efficiency of the assembly could be conspicuously improved.

Keywords: Flexible assembly Key characteristics Tolerance distribution

在航空产品多样化的今天,飞机柔性装配技术通过对数字化装配、装配工艺优化、自动化定位与控制技术等综合运用,提高了装配效率、准确度和快速响应能力,是缩小飞机装配周期,以高质量、低成本适应多品种产品生产要求的有效手段^[1]。在飞机的制造装配过程中,零部件数量多、精度要求高、协调过程多。要实现对航空产品的快速响应,并保证高质量就必须对零部件质量特性进行合理的容差分配和有效的误差控制。然而飞机零部件数目众多,对每个质量特性进行控制是不现实的,需要找出对产品质量有重要影响作用的关键特性加以控制。关键特性指的是零部件及其制造过程的特

征的变化对产品的制造和装配协调准确度影响最大的特性。采用数字化协调技术将关键特性分解传递到具体零件和工艺过程,通过对各阶段关键特性进行合理的容差分配,实现对关键特性的有效控制,从而提高飞机的装配质量与效率。

1 关键特性的识别

在飞机数字化装配体系中确定关键特性,需要在并行工程环境下以面向柔性装配的设计(Design for Flexible Assembly, DFFA)理念为指导,通过尽早考虑相关环节对装配质量的制约来识别。柔性装配技术具有鲜明的数字量传递和数字化协调的特点,实现了装配的数字化、柔性化、模块化、自动化。在定义关键特性时,DFFA要求产品协同设计人员综合柔性装配的特点和需求,从零件制造的加工定位、装配过程中的定位基准选择、柔性工装的确定、数字化测量等各个方面细致考虑。例如为使用激光跟踪仪和光学目标对部件进行精确定位,可以对主要结构件建立装配定位特征,如装配导孔、槽口、和形成定位表面,把用来安放光学目标的工艺定位件设计到结构件上等,也就是将采用柔性装配的各零部件的定位点、参考点和测量点作为关键特性来考量。

在并行工程的概念设计阶段,关键特性定义在飞机整体性能之上,此时的关键特性是产品级的,随着并行设计的深入,在工艺规划阶段,通过建立制造树,产品级的关键特性将被分解传递到零件和工艺过程。在建立制造树的过程中,要依据产品结构和制造资源,考虑数字化协调和装配顺序的要求,以便于关键特性的顺畅传递。关键特性的定义是在产品的特性中找到对产品质量影响最大的,并沿制造树逐级分解传递,最后形成关键特性树^[2]。通过关键特性树可以直观反映关键特性的误差累积,并以此为依据对各阶段的关键特性进行检测,使其处于可控状态。根据飞机制造过程多级装配的特点,可将关键特性按产品结构分解传递,形成包括产品级、部件级、组件级、零件级4个层次的关键特性树^[3-4]。图1为某型号飞机机翼的关键特性树。

2 关键特性的分解传递

沿制造树分解传递的关键特性由装配件传递到组成它的零件上,在数量上是递增的过程,控制关键特性

* 辽宁省教育厅科学研究项目(2008542)资助。

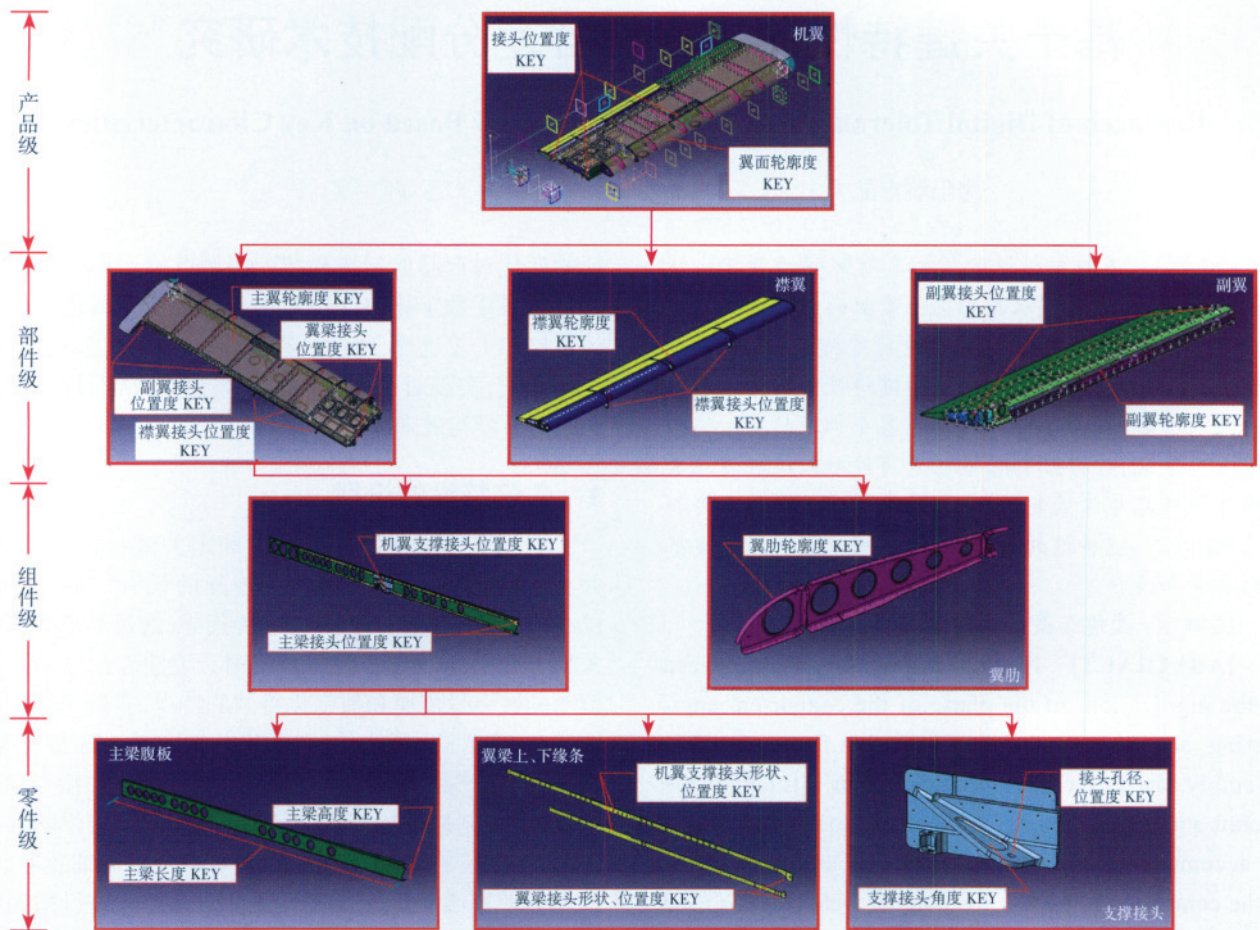


图1 某型飞机机翼的关键特性树

Fig.1 Tree of key characteristics for aircraft aerofoil

的数量和范围是一件复杂而谨慎的工作。一般情况下，零部件相连接的部位都属于关键特性，但考虑到加工制造和保证产品性能等因素，还需分析找出潜在的关键特性。因此关键特性的分解传递需要协同设计人员，包括设计、制造、工装、材料等部门都参与其中。关键特性树与所建立制造树相适应，而制造树是产品结构细化的体现，关键特性则是在此基础上的分析与筛选。

根据波音的质量控制文件^[5]对关键特性进行识别没有绝对通行的方法，针对不同的特性类型采用不同方法进行识别，包括风险分析法，历史数据分析法，产品、工艺和问题分析法，统计数据分析法等。为实现对质量特性进行合理的容差分配和有效的误差控制，理顺产品的误差累积路线是根本办法，因此，根据制造协调路线和装配方案建立起尺寸和基准传递链，明确误差累积路线，有助于实现关键特性的分解传递。

关键特性的分解传递过程大致可按以下几个步骤进行。

(1) 建立制造树。

对飞机产品进行结构分解，并结合制造企业的制造

资源建立制造树。制造树的每个节点代表一个零部件的装配，最顶级是飞机产品，最后一级代表零件的生产及工艺。上级节点对下级节点提供基准与需求，下级节点对上级节点负责并将本节点的基准与需求提供给下一级节点。建立起的制造树显示出飞机装配顺序，是关键特性分解传递的依据。

(2) 关键特性的初步确定。

根据制造树内容初步选定关键特性，一般将协调部位定义为关键特性，然后根据可测量性和可控制性决定是否沿制造树向下传递，如需传递则直接传递到可测量的具体零部件上或工序参数上^[6]。

(3) 明确误差累积路线。

依据误差累积路线，找出制造和装配过程中误差积累最多的环节，有助于下一步判定其是否应作为潜在关键特性进行控制。由于不同的装配方案决定了不同的零部件定位关系，也决定了装配误差的累积方向。根据产品结构与定位方式建立基准传递链，对装配过程中的定位、连接方式进行描述，可以明确装配误差累积路线^[7]。而零部件的制造协调误差则取决于所采取的

协调路线,根据制造原则建立尺寸传递链,准确描述制造过程中的加工定位和工艺参数,明确制造误差累积路线。

(4) 分析判定关键特性。

根据误差累积路线,采取定性的办法,即通过技术人员对误差累积环节进行分析,剔除造成制造、装配问题较小的误差积累环节,或比较相似方案中所发生的问题,选出易出现问题的环节,缩小分析判定的范围;采用定量的办法,即根据经验数据,对各环节的误差积累进行误差预估,最后判定出对质量特性影响较大的潜在关键特性加以控制。

由关键特性的分解传递过程可知,通过分析误差累积路线的方式,以控制下级关键特性为手段来保证上级关键特性,可达到最终控制顶级关键特性的目的。

3 关键特性的容差建模与分析

关键特性的容差分配即将关键特性的目标容差值,按一定的准则分配到组成零件和相关工艺的过程。数字化环境下的容差分配工作流程如图2所示,从中可以看出容差建模与分析是进行容差分配的基本依据和效果检验,是容差分配的基础与核心。

3.1 关键特性的容差建模

尺寸链作为容差模型的支撑,对关键特性进行容差建模,即依据制造树的结构,在分析关键特性的误差组成环和误差累积路线的基础上,形成以关键特性的误差为封闭环的尺寸链。在飞机装配中一般将外形准确度作为关键特性控制,因此需要建立起以外形准确度为封闭环的装配尺寸链,然而装配尺寸链与装配方案相联系,装配方案则包含了定位基准和装配顺序等。从制造

树所包含的信息中可以提取出包含各级关键特性的零部件之间的相互定位关系以及定位基准,而制造树的结构也是装配顺序的反映,因此通过制造树可以直观分析影响关键特性的误差组成环和误差累积路线。装配尺寸链则可以通过从制造树中提取出零部件间的所有装配约束关系,并获得相关尺寸信息,生成面向尺寸链的几何约束网络,然后搜索其最短路径来生成。飞机结构外形误差的尺寸链方程一般形式为:

$$\Delta \Sigma = \sum_{i=1}^n A_i \Delta_i + \sum_{j=1}^m C_j \quad (1)$$

式中, Δ_i 为第 i 个基本环随机误差, A_i 为它对 $\Delta \Sigma$ 的传递系数, C_j 为第 j 个组成系统误差。以飞机机翼的外形误差为例,若采取以骨架为装配基准,则其外形误差的尺寸链为:

$$\Delta J = \Delta L + \sum \Delta M + \Delta D \quad (2)$$

若采取以蒙皮为装配基准,则其外形误差的尺寸链为:

$$\Delta J = \Delta C + \sum \Delta I + \Delta L + \sum \Delta M + \Delta D \quad (3)$$

式中, ΔJ 为机翼的外形误差; ΔL 为翼肋的外形误差; $\sum \Delta M$ 为蒙皮厚度误差累积; ΔC 为外形夹具制造误差; $\sum \Delta I$ 蒙皮与外形夹具之间不贴合同隙误差; ΔD 为变形和其他因素引起的误差。

3.2 关键特性的容差分析

经分配到零件和工艺的容差需要通过容差分析来判断关键特性是否达到设计的质量控制要求,并将分析结果作为调整各组成环容差的依据。通常采用数理统计的方法进行分析仿真,分析方法包括极值法、概率法和蒙特卡罗模拟法等。在容差分析方面,蒙特卡罗模拟法相比于极值法和概率法,具有计算精度高且符合实际生产情况的优势。

假设容差设计函数为 $A_0 = f(A_1, A_2, \dots, A_n)$, 其中 A_1, A_2, \dots, A_n 是相互独立的组成环尺寸,使用蒙特卡罗模拟法进行容差分析的方法如下:首先根据已建立的容差模型,明确各组成环尺寸的分布规律;其次根据计算精度的要求确定随机模拟次数 N ; 随后根据各组成环尺寸的分布规律和范围,采用一定的算法进行抽样,生成相应的随机数,模拟组成环的误差变化;然后将一组各组成环尺寸的随机数 $\{A_{1i}, A_{2i}, \dots, A_{ni}\}$ 代入容差设计函数,得到封闭环尺寸 A_0 的一个子样 Y_i ; 当产生足够多的 Y 值后,再求出 Y 的各阶中心矩;最后,对所得到的封闭环尺寸样本进行统计处理,从而确定封闭环尺寸的平均值、极限值、公差等。

3.3 应用实例

某型飞机机翼的翼肋长度需作为关键特性进行控制,其装配尺寸链如图3所示。

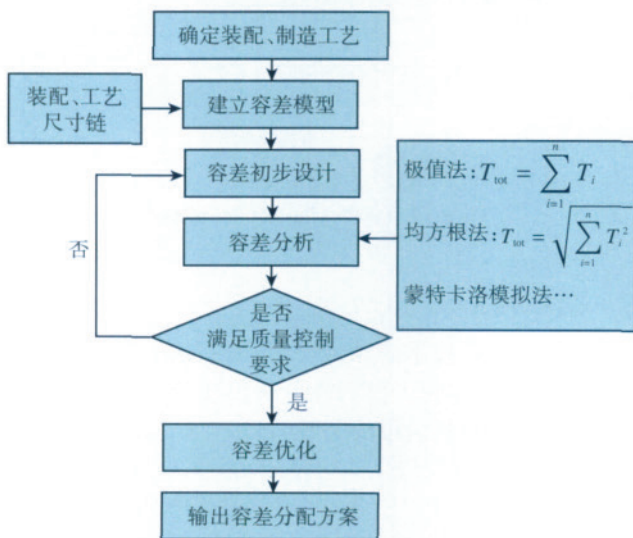


图2 容差分配流程示意图
Fig.2 Steps of tolerance distribution

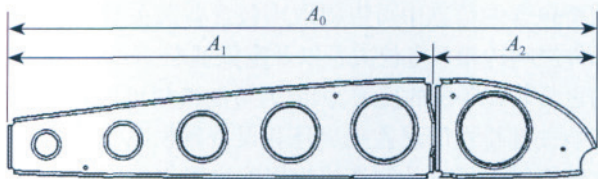


图3 翼肋的尺寸链

Fig.3 Dimension chain of a wing rib

装配时要求封闭环的公差 ≤ 2mm, 以便于安装与修配, 其中的尺寸链信息包括: A_0 为封闭环, 基本尺寸为 870mm; A_1 为增环, 尺寸公差为 630^{0}_{-2} mm; A_2 为增环, 尺寸公差为 240^{0}_{-1} mm. 假设各环都服从正态分布, 其公差设计函数为:

$$A_0 = A_1 + A_2 \quad (4)$$

采用蒙特卡罗模拟法求解尺寸链方程, 模拟次数设为 100000 次, 由计算机根据组成环的尺寸分布规律和范围产生随机数计算出封闭环的一阶、二阶中心矩分别为:

$$m_{1A_0} = \sum_{i=1}^N A_{0i} / N, \quad m_{2A_0} = \sum_{i=1}^N (A_{0i} - m_{1A_0})^2 / N$$

由于各环都服从正态分布, 则封闭环的公差为 $T_{A_0} = \sqrt{m_{2A_0}} / 6$, 其中 m_{2A_0} 为封闭环的二阶中心矩. 用 MATLAB 编程以蒙特卡罗模拟法进行公差分析, 其公差分析的仿真结果如图 4 所示. 生成的公差分析结果将提供给工艺人员作为公差修改和优化的依据, 经分析模拟, 封闭环的尺寸公差为 870^{0}_{-2} mm, 最大尺寸为 870mm, 最小尺寸为 868mm, 由分析结果可知封闭环公差满足控制要求. 当封闭环公差不能满足控制要求时, 则可根据各组成环对封闭环的贡献率对各组成环的尺寸进行调整, 其贡献率的计算公式为:

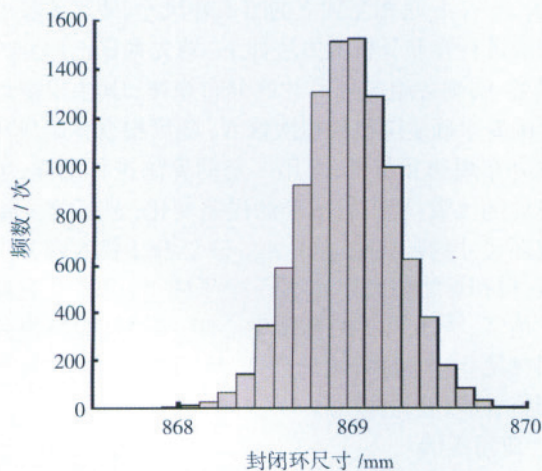


图4 公差分析的仿真结果

Fig.4 Simulation result of tolerance analysis

$$S_i = \frac{X_i^2}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \times 100\% \quad (5)$$

其中, S_i 为第 i 个组成环的贡献率, X_i 为第 i 个组成环的公差, n 为组成环个数. 各组成环的贡献率如表 1 所示.

表1 组成环的贡献率

组成环名称	公差	贡献率 / %
增环 A_1	2	80
增环 A_2	1	20

4 公差分配信息在柔性装配数据集中的应用

经过公差分配流程获得的零部件公差信息最终将集成在三维数字化模型中, 用于协调零部件的数字化制造与装配. 在飞机数字化装配体系中, 基于 MBD 技术的装配数据集采用三维数字化模型进行产品数字化信息的完整描述, 实现了以三维数字化模型为核心的设计制造信息传递模式. 柔性装配数据集作为飞机组件、部件装配时所需的工装模型、产品模型、工艺模型、工序信息、装配顺序等信息的集合, 如图 5 所示, 将公差分配信息集成在其中, 可以实现飞机几何控制信息传递的协调一致性, 为零件与工装的加工制造、部件装配和检验起到协调控制的作用.

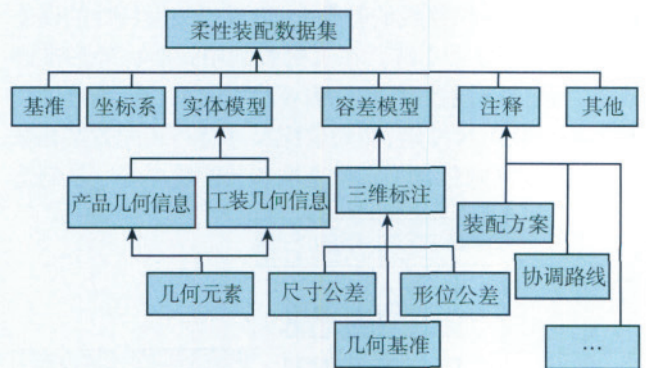


图5 柔性装配数据集

Fig.5 Dataset of flexible assembly

5 结束语

随着 MBD 技术的深入应用, 采用基于关键特性的数字化协调技术把关键特性分解传递到具体零件和工艺过程, 通过对各阶段的关键特性进行公差分配, 并将公差分配的仿真结果反馈给设计、制造、装配等部门, 用以调整设计和改进工艺方法, 即可完善产品数据集的内容. 在生产中以产品数据集为依据协调零部件的制造

(下转第 80 页)



图6 制孔现场
Fig.6 Drilling spot

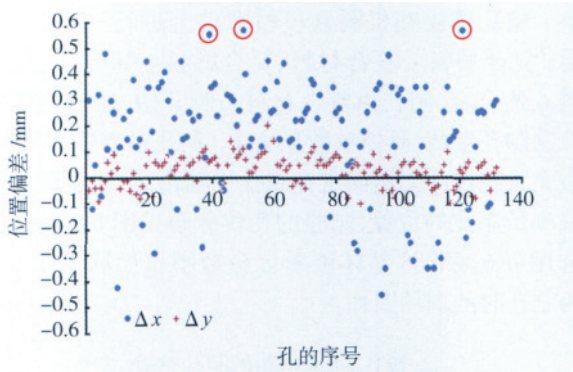


图7 自动制孔后孔的位置偏差
Fig.7 Position deviation of hole after automatic drilling

从图7的试验数据可以看出只有3个孔x向偏差超出0.5mm。

目前高性能飞机对紧固件的位置公差普遍要求为±0.5mm,如果从此要求来看,工艺试验所制出的紧固孔合格率为97.7%。

6.2 孔质量结果

试验制孔涉及到复合材料、钛合金和铝合金3种材料不同组合的混合夹层,每种材料的钻孔参数均不相同。柔性导轨自动制孔设备为CNC自动控制,可以精确控制钻孔的钻速和进给速度及刀具加工位置,这样可以把复杂的混合夹层结构制孔分解为单一材料的分别制孔。孔质量试验结果见表2。

目前高质量紧固孔的质量要求一般为:铆钉孔的孔表面粗糙度 R_a 值不大于 $3.2\mu m$,金属材料毛刺高度不大于0.13mm,复合材料无毛刺,孔径精度为H11;螺栓孔的孔表面粗糙度 R_a 值不大于 $3.2\mu m$,金属材料毛刺高度不大于0.13mm,复合材料无毛刺,孔径精度为H9。从试验结果可以看出,柔性导轨自动制孔设备完成的孔质量满足要求。

7 结束语

随着我国飞机制造业的发展,对柔性导轨自动制孔设备的需求越来越紧迫。中航工业北京航空制造工程

表2 孔质量指标和试验结果

项目	孔表面粗糙度 $R_a/\mu m$	毛刺高度/ mm	孔径
试验结果	≤ 3.2	≤ 0.13 (金属)/无毛刺(复合材料)	H9 通止规检测合格
达到的等级	$\frac{3.2}{\nabla}$	-	H9

研究所研制的BAA300柔性导轨自动制孔设备共完成132个孔的加工,加工材料包括复合材料+复合材料、复合材料+钛合金、复合材料+铝合金,孔位置精度和孔质量都达到了较高的指标,经过后期的设备改进可以满足新型飞机装配的需要。如果将设备导轨的最小弯曲半径提高到1600mm,此类设备即可应用于ARJ21和C919机身段对接区的自动制孔。

参考文献

[1] Boeing Commercial公司. 柔性导轨式钻孔机. 中航工业北京航空制造工程研究所,译. 北京:中航工业北京航空制造工程研究所,2005.
[2] Reid E. Development of portable and flexible track positioning system for aircraft manufacturing processes. 2007 SAE Aerospace Automated Fastening Conference. 2007.
[3] Thompson P, Oberoi H, Draper A. Robotic drilling system for 737 Aileron. 2003 SAE Aerospace Automated Fastening Conference. 2003.
(责编 夏宛)

(上接第56页)

与装配,通过对零件和各阶段装配过程中的关键特性的检测和监控,不断减少关键特性的波动范围,从而实现质量特性的精确控制,达到提高产品装配质量和效率的目的。

参考文献

[1] 贾玉红,何景武. 现代飞行器制造工艺学. 北京:北京航空航天大学出版社,2010:208-209.
[2] 王巍. AQS在波音飞机舱门上的应用. 航空制造技术,2003(7):62-67.
[3] Lee J D, Thornton C A. The identification and use of key characteristics in the product development process. Proceedings of the 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference. New York, USA: ASME, 1996: 12-14.
[4] 刘志存,邹冀华,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] Boeing Commercial Airplane Group. Advanced quality system tools. [2010-01-02]. http://www.boeing-suppliers.com/supplier/index.html.
[6] 刘志存,范玉青. 飞机制造中新型质量控制模式——关键特性统计过程控制. 航空制造技术,2007(11):90-92.
[7] 刘平. 数字化预装配系统公差技术的研究[D]. 南京:南京理工大学,2006.
(责编 良辰)