

# 基于 MBD 的容差分析技术\*

## Tolerance Analysis Technology Based on MBD

沈阳航空航天大学航空航天工程学部 王巍 梁涛  
解放军 95503 部队 刘中文 陈军



王巍

沈阳航空航天大学航空航天学部航空系主任,教授,硕士生导师,主要研究方向:数字化飞机制造技术、飞机装配工装的通用性及模块化设计。

基于 MBD 的容差分析技术综合考虑了数字化装配协调方案对产品性能的影响,实现了基于三维数模的完整工艺信息表达,并列入企业生产资源库和  $6\sigma$  理论对容差分析方法进行了优化完善,从而为提高容差设计的合理性和良好的制造工艺性提供了有力支持。

性能的影响,实现了基于三维数模的完整工艺信息表达,并列入企业生产资源库和  $6\sigma$  理论对容差分析方法进行了完善,从而为提高容差设计的合理性和良好的制造工艺性提供了有力支持。

容差分析是检验产品工艺性的好坏,调整优化容差分配和相关工艺方案的重要依据,决定了产品的质量,生产效率和制造成本。传统的容差分析技术主要依靠工艺人员的知识和经验,在二维图纸上根据相关行业标准、技术条件、控制性文件和规定性文件等采用概率法进行容差的分析核算,在工作效率和问题估计上存在严重不足,制约了飞机制造水平的提高。随着数字化制造技术在航空制造中的应用,迫切

需要一种基于三维数字样机和虚拟仿真技术的容差分析方法进行容差分配方案的分析检验,提高产品的质量和效率。而 MBD(Model Based Definition) 技术通过采用一个集成的三维实体模型来完整表达产品的几何属性、工艺属性、质量检测属性以及管理属性等信息,体现了产品面向制造和装配设计 (DFMA) 的思想,为实现基于三维数字样机进行容差的分析与仿真,验证制造的合理性和可达性提供了支持。

### 基于 MBD 的容差分析原理

MBD (基于模型的工程定义) 包含了制造过程中所需的各种信息,如制造、装配基准,材料属性,加工制造方法,装配协调方法,准确度及容差

随着数字化技术的深入发展,MBD 技术通过将产品制造过程中所需的各类信息在三维产品数模上进行统一表示,为实现运用虚拟技术进行容差的分析仿真、优化提供了可能。基于 MBD 的容差分析技术综合考虑了数字化装配协调方案对产品

\* 航空科学基金(2012ZE54)资助。

信息。基于 MBD 的容差分析即在虚拟环境中模拟在现有的容差分配方案和工艺方案的条件下完成制造装配过程后,飞机的装配性能和工艺性可否达到所规定的要求。基于 MBD 的容差分析通过将包含丰富制造信息的三维实体模型作为唯一制造依据的标准体,利用计算机虚拟仿真技术,对产品的容差信息和装配工艺过程建模,在计算机上模拟产品从零件制造到组件装配,直至总装成产品的整个误差累积过程,找出容差设计中的问题缺陷,并以此优化容差分配方案、工艺过程和资源规划,以达到容差设计的最优化和生产效率最高化。

基于 MBD 的容差分析原理如图 1 所示,可以看出产品 MBD 模型所包含的工艺和容差信息作为容差分析的输入,是进行容差分析的基础;包含数字化容差模拟分析方法的 3D 容差分析软件作为实现工具,是进行容差分析与仿真检验的核心。因此,为实现基于 MBD 模型对产品容差进行分析与仿真验证,需要对基于 MBD 的数字化协调方案、装配 MBD 模型和数字化的容差模拟分析方法进行研究。

## 基于 MBD 的数字化协调方案

基于 MBD 的数字化协调不同于

传统以模拟量传递的协调方法,而是通过将全三维的 MBD 模型作为制造过程的唯一数据来源驱动各类数字化设备和软件,实现了产品数据的精确传递。构建基于 MBD 的数字化协调方案要求以飞机三维数模为基础,通过建立全机坐标系和局部坐标系来作为设计、制造、检验所有零件、加工工装、装配工装和检验工装的数字量标准,用计算机来表示产品之间、工装之间、产品与工装之间的协调关系,将三维形状与尺寸数据信息直接传递给数控设备进行加工制造,实现数据到产品的物化;通过数字化测量设备对产品进行检测,又将产品转化为数据信息,形成三维数据闭环,实现工装与产品的精确制造、安装和检测<sup>[1]</sup>。基于 MBD 的部件数字化装配协调流程如图 2 所示。

零组件制造的数字化协调方案可以通过将产品三维数据信息传递给数控加工设备,生成数字量的 NC 加工指令对零件毛坯进行加工来实现。如对机加零件采用数控磨削、数控切割等方法进行加工;对钣金件采用数控激光切割、数控型材拉弯、数控蒙皮拉伸、数控喷丸成形等方法进行加工,并尽量采用一步成形法工艺,以提高零件的制造与协调准确度。产品装配的数字化协调方案可以通过采用自定位装配、激

光定位装配、柔性装配工装、数控自动钻铆等数字化装配技术来实现。如将产品装配定位信息传递给数控机床机械随动装置,并配合激光跟踪仪和控制软件实现产品的精确定位;将产品的几何外形信息传递给阵列式柔性工装进行机翼、壁板类部件的柔性装配,提高装配的精度和工装的通用性。

此外,构建基于 MBD 的数字化协调方案还需要对制造、装配过程中的关键特性进行确定。因为飞机零部件数目众多,协调关系复杂,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。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有助于在保证产品质量的前提下提高工作效率<sup>[2]</sup>。

## 装配 MBD 模型

装配 MBD 模型作为容差分析的输入,为容差分析提供了包括分析依据、分析对象等信息。因此以产品 MBD 模型为基础,根据生产资源和制造、装配方案建立装配 MBD 模型有助于提高容差分析的准确性和产品制造的工艺性。

### 1 基于生产资源的误差累积分析

飞机的制造过程实质上是设计数据向最终产品数据的传递过程,其中所积累的误差来自于生产过程中所采用的生产设备和工艺过程,产品通常可以按不同的工艺方案进行制造和装配,而不同方案中所选用的设备、夹具和

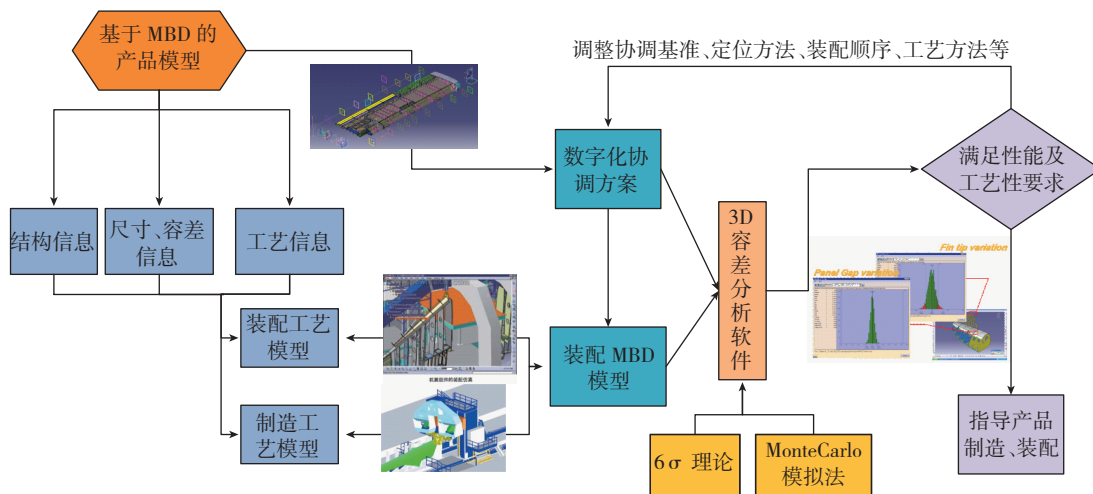


图1 基于MBD的工艺容差分析原理

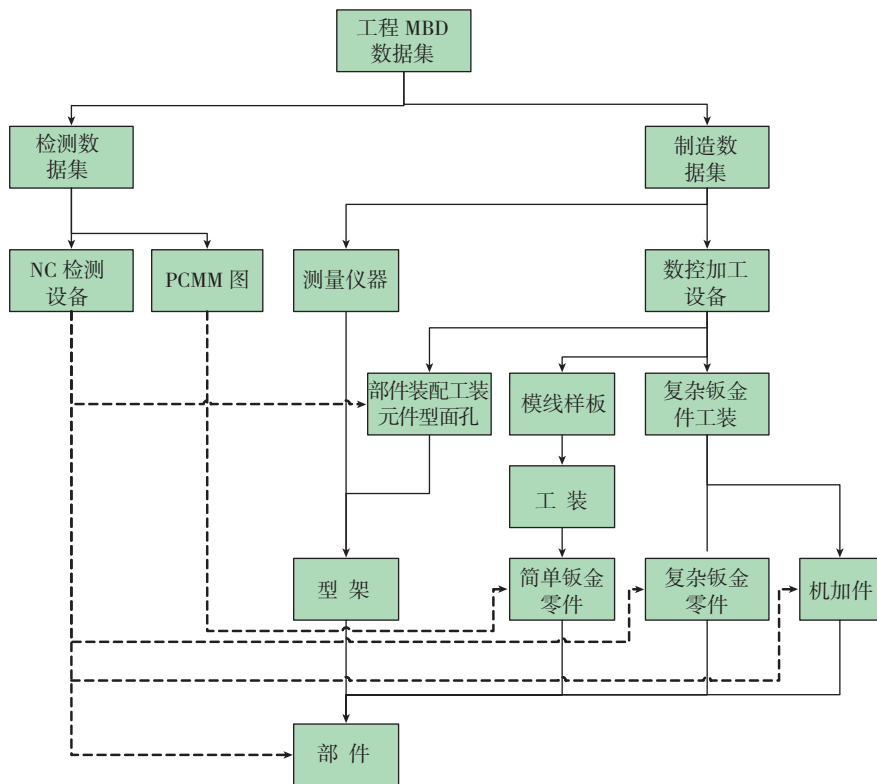


图2 基于MBD的部件数字化装配协调流程

方法也不同,建立在生产资源基础上的误差累积分析通过对企业现有物质技术基础和工艺方法等信息进行

调研,为容差分析提供了可靠的分析依据,有助于提高容差分析的准确度和生产工艺性。生产资源库的建立

包括统计各类制造加工设备的加工精度,加工范围;各类制造、装配工艺方法的适用范围、误差来源、误差分布等综合信息,是对企业多年的实践经验的总结和生产能力的反映<sup>[3]</sup>。图3反映了基于生产资源的装配误差累积过程。

## 2 基于装配方案的装配容差模型

MBD 技术是对产品设计、工艺、检验等各类信息的综合,是一种便于工艺技术人员清晰理解和有效利用的设计信息表达方式。将 MBD 技术应用于装配容差建模,有助于在三维产品数模上对研制过程中包含容差信息在内的各类综合信息进行统一表示和组织管理,从而避免采用二维工程图纸所容易造成的容差信息表示不清和歧义。在以装配方案为参考建立装配容差模型的过程中需要注意 2 个问题:一是要定义精确的特征元素信息,以准确表达产品容差信息与设计、工艺、检验信息之间关联性;二是要建立完善的装配语义信息,以精确表达装配顺序、装配基准、装配准确度等工程语义信息。

建立装配容差模型是进行容差分析的基础,而尺寸链作为容差模型的支撑和容差分析的对象,是研究零部件之间的相互几何尺寸关系,分析影响装配精度的重要因素<sup>[4]</sup>,所以要首先建立起以产品装配准确度为封闭环的尺寸链为容差分析提供基础。而

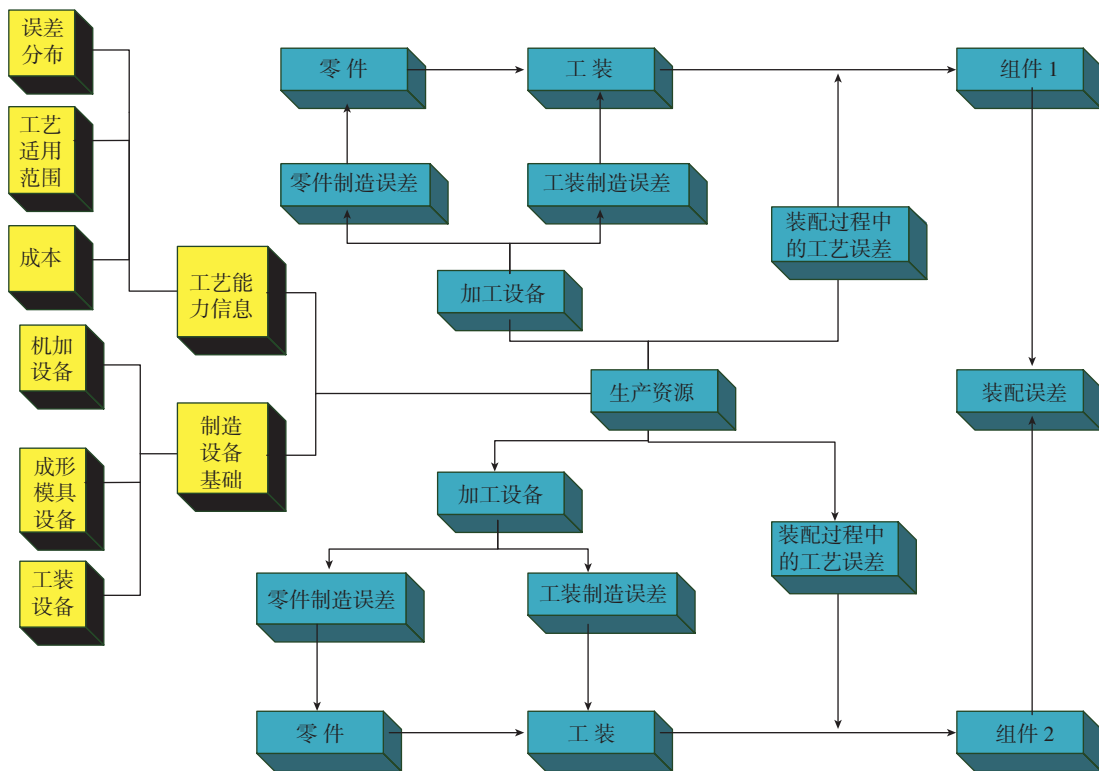


图3 基于生产资源的误差累积

产品 MBD 模型提供了一个描述和分析产品零部件结构和装配关系的有效手段,为实现根据三维数字样机建立工艺容差模型提供了支持。建立装配容差模型可按以下方法进行:首先根据 MBD 模型,明确产品的结构组成;根据生产资源库明确产品的制造、装配方案,建立装配 MBD 模型;通过装配 MBD 模型中所包含的零部件之间的相互定位关系、定位基准以及装配方案,可以直观地分析影响产品质量的误差组成环和误差累积路线;装配尺寸链则可以通过从装配 MBD 模型提取出零部件间的所有装配约束关系,并获得相关尺寸约束信息,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。

以机身壁板为例,其制造装配方案包括采用数控加工中心进行整体壁板切削成形,以及采用钣料加工与装配工装来完成装配。若采用前种方案,其外形误差的尺寸链为:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{加工}}(\Delta_{\text{插补}} + \Delta_{\text{刀具}} + \Delta_{\text{基准}} + \Delta_{\text{机床}}) + \Delta_{\text{变形}} \quad (1)$$

若采用后种方案,其外形误差的尺寸链为:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{卡板}} + \Delta_{\text{蒙皮}} + \Delta_{\text{桁条}} + \Delta_{\text{变形}} \quad (2)$$

其中,工装卡板属于机加成型, $\Delta_{\text{卡板}}$ 受 $\Delta_{\text{加工}}$ 的影响;蒙皮和桁条属于模具成型, $\Delta_{\text{蒙皮}}$ 和 $\Delta_{\text{桁条}}$ 受 $\Delta_{\text{模具}}$ 的影响, $\Delta_{\text{变形}}$ 为零部件塑形变形引起的误差。

## 数字化的容差模拟分析方法

容差分析主要是对装配尺寸链采用一定的方法进行计算,采用数学计算的方式模拟各组成环的误差累积对封闭环的影响,并计算出相关的工艺性指标,生成容差分析报告作为执行和修改工艺设计的依据。

### 1 基于 MonteCarlo 模拟的容差分析方法

MonteCarlo 模拟法是一种统计

试验法,其原理是采用一个随机数发生器来模拟各组成环容差的变化,求解出封闭环容差的一系列随机变量,并分析所得到的这些封闭环容差随机变量以计算出相应的分析结果。作为一种统计试验法,为保证容差分析的准确性,需要大量统计样本进行重复计算。由于其计算精度高且符合实际生产情况的优势,常用于解决一般试验分析方法所解决不了的复杂问题,已被广泛应用于 3DCS 等商用软件之中。

假设装配容差函数为 $X_0=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ,其中 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 是相互独立的组成环尺寸,采用 MonteCarlo 模拟法进行容差分析的处理流程如图 4 所示。首先根据已建立的生产资源库和容差模型,明确各组成环容差的分布规律作为容差分析的输入;其次根据计算精度的要求确定随机模拟次数 $N$ ;随后由随机数发生器模拟组成环的误差变化,并求解尺寸链计算出装配封闭环尺寸 $X_0$ 的一个子样 $Y_i$ ;当产生 $N$ 个 $Y$ 值后,再求出 $Y$ 的各阶中心矩<sup>[5]</sup>,如式(3)~(6)所示;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、容差等。

$$m_1 X_0 = \sum_{i=1}^N X_{0i} / N, \quad (3)$$

$$m_2 X_0 = \sum_{i=1}^N (X_{0i} - m_1 X_0)^2 / N, \quad (4)$$

$$m_3 X_0 = \sum_{i=1}^N (X_{0i} - m_1 X_0)^3 / N, \quad (5)$$

$$m_4 X_0 = \sum_{i=1}^N (X_{0i} - m_1 X_0)^4 / N. \quad (6)$$

封闭环尺寸的均值为:

$$\bar{X}_0 = \frac{\sum_{i=1}^N X_{0i}}{N}. \quad (7)$$

若各组成环容差都服从正态分布,则封闭环容差为:

$$T_{X_0} = \sqrt{m_2 X_0} / 6. \quad (8)$$

### 2 6 $\sigma$ 理论在容差分析中的作用

6 $\sigma$ ( $\sigma$ 为正态分布的标准差)质量管理理论是一种以数量概念表示产品质量水平的方法,“6 $\sigma$ ”代表着品质合格率达 99.9997% 以上,对容差分析而言,6 $\sigma$ 理论是用来解决工艺问题和消除质量偏差的有效工具。基于 6 $\sigma$ 的容差分析要求容差宽度不得小于 $\pm 6\sigma$ ,并引入反映制造工艺性的工艺过程能力指数作为衡量产品可制造性的标准<sup>[6-7]</sup>。

在对尺寸链进行计算时,假设组成环尺寸服从正态分布, $X_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$ ;则封闭环尺寸分布的 $\sigma \approx \sum (\partial f / \partial x_i)^2 \sigma_i^2$ 。

工艺过程能力指数 $C_p = (T_U - T_L) / (6\sigma)$ ;  $C_{pk} = C_p(1-k)$ ;  
 $k = \frac{|(T_U + T_L) / 2 - \mu|}{T}$ 。

其中, $T_U$ 和 $T_L$ 表示封闭环容差的上、下极限偏差, $T$ 表示容差的一半, $C_{pk}$ 是质量分布中心与容差中心有偏离的工艺过程能力指数, $k$ 表示名义尺寸的相对偏移系数。

从 $C_p$ 和 $C_{pk}$ 计算公式的工程意义上讲, $T_U$ 和 $T_L$ 是由设计人员决定的,而分母 6 $\sigma$ 与工艺设计的制造过程有关, $\sigma$ 反映了制造工艺对产品质量所造成的偏差,如果 $\pm 6\sigma$ 都在容差的上下限以内或者更小,说明质量误差分布集中,工艺过程能力比较高,也预示 6 $\sigma$ 目标的实现。反之,则说明存在一定的超差率,6 $\sigma$ 目标未实现,必须采取措施减小 $\sigma$ 的数值。过程能力指数的值越大,表明产品质量的离散程度相对于技术标准的容差范围越小,因而工艺可行性就越高;过程能力指数的值越小,表明产品质量的离散程度相对容差范围越大,因而工艺可行性就越低。从制造成本和产品质量 2 个分析角度来看,工艺过程能力指数值不是越大越好,应当处于一个适当的范围。因此包括平均值 $\mu$ 和标准差 $\sigma$ 在内,都应该根据不同的加工件和工艺规程,参照

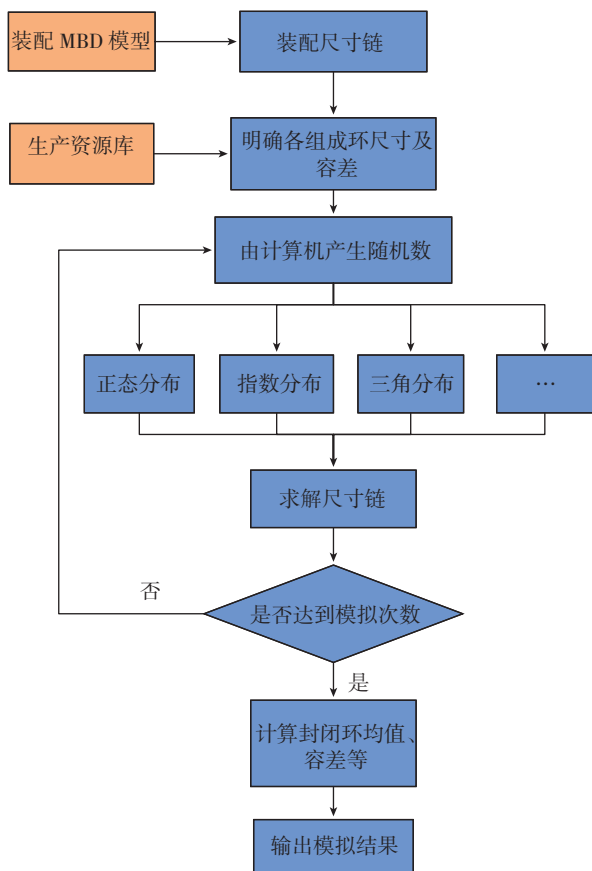


图4 基于MonteCarlo模拟法的容差分析流程

企业及行业标准,精确计算出相应的数值<sup>[8]</sup>。

因此,可以从过程能力指数的数值大小来判断工艺可行性的高低。利用  $C_p$ 、 $C_{pk}$  将容差设计与制造工艺性联系起来,在容差设计的同时考虑企业的制造能力,使得产品在制造过程中具有较高的工艺可行性,这也是并行工程思想的具体体现。所以,通过  $6\sigma$  理论来衡量容差设计的合理性,进而优化工艺过程,可以达到提高产品质量和降低成本的目的<sup>[9]</sup>。

### 实例分析

以机身壁板外形准确度为研究对象,根据三维 MBD 模型和装配方案建立式(3)和式(4)的容差分析模型,采用 MonteCarlo 模拟法进行容差模拟仿真分析得到的分析结果包括:封闭环容差的概率分布、装配合

格率以及反映工程制造能力的工艺过程能力指数。

根据装配方案和加工设备等相关工艺信息,从生产资源库中提取各组成环容差的分布规律,采用 MonteCarlo 模拟法对式(1)进行容差分析的结果如图 5 (a) 所示,图 5 (b) 为式(2)的容差分析的结果。根据民用飞机气动外缘公差标准 (HB 7086-1994),机身气动外缘型值容差控制在  $\pm 2.0\text{mm}$  内,局部容差在  $\pm (2.0\sim 3.0)\text{mm}$  内的不得超过 15%。图 5 中反映的是装配质量的分布情况,根据该分布情况可以计算出反映工程制造能力的工艺过程能力指数,

装配合格率可根据产品的质量落在规定的容差范围内的概率以封闭环误差概率密度函数  $\varphi(X_0)$  采用式(9)求出,则各项工艺性指标如表 1 所

示。将此分析结果提供给工艺人员,以判定装配质量和各项工艺性指标是否到达规定的技术要求,如果不满足要求,则根据容差分析报告做出相应的容差和工艺修改意见,以指导零件容差和工艺方案的重新设计。

$$p(R_r) = \int_{X_0 \in R_r} \varphi(X_0) dX_0 \quad (9)$$

### 结束语

基于 MBD 的容差分析技术对提高容差设计的合理性、产品制造的工艺性和经济性都具有十分重要的意义。在并行工程的工艺设计环节,基于 MBD 的容差分析技术使得工艺设计人员能够在产品数字样机上模拟可能获得的装配误差,并检验制造、装配的工艺可行性,避免了通过产品试制来确定合理的容差值而造成的浪费以及研制周期过长等不利因素;通过在虚拟仿真环境中及时地发现工艺中可能存在问题并进行修改、完善以获得经济合理的容差分配方案,降低了由于设计不合理所造成的负面影响,为提高产品质量和效率、降低制造成本提供了有利支持。

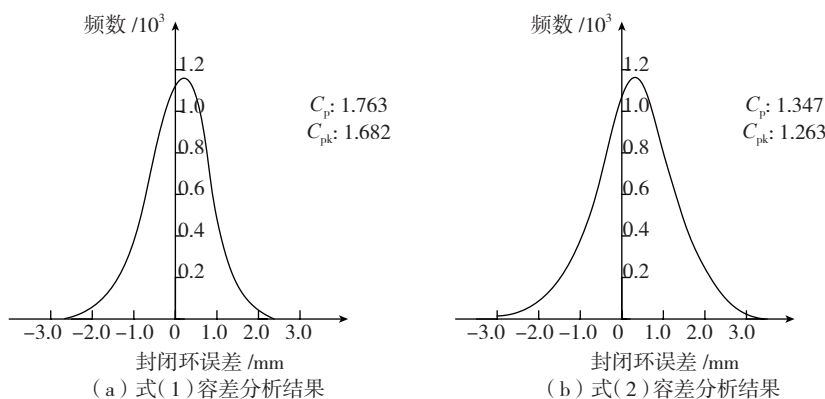


图5 MonteCarlo模拟法容差分析结果

表1 各项工艺性指标

容差模型	$C_p$	$C_{pk}$	$p(R_r)$
a	1.763	1.682	97.36%
b	1.347	1.263	89.27%

本文共有参考文献 9 篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 深蓝)