

# 基于装配关系的公差库建立及在容差分析中的应用

葛磊,陈双霁

(上海飞机制造有限公司,上海 200436)

**摘要:**飞机制造过程中,零件的制造误差、工艺方案的合理性、部件间的协调都直接影响着产品的制造精度和可制造性。通过VSA容差分析软件,建立仿真分析模型,基于零件的基准、公差值和相应的装配工艺流程进行仿真,分析同类零件在不同定位装配方式时零件制造误差对装配控制目标的影响,然后结合生产能力及仿真分析所得数据形成公差库文件,为优化工艺方案提供依据。结合实际生产数据对公差库文件进行迭代更新,积累生产经验,为后续架次及新机型提供支持。

**关键词:**制造;公差库;容差分析;尺寸链;蒙特卡罗

**中图分类号:**TH124 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2019)05-0067-04

## Tolerance Library Built Based on Assembly and Its Application in Tolerance Analysis

GE Lei, CHEN Shuang ji

(ShangHai AirCRAFT Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

**Abstract:** The precision of part, procedural rationality of process plan and coordination of each section of the plane directly affect product's manufacturing accuracy and feasibility in the process of aircraft manufacturing. This text uses tolerance analysis software VSA to build analysis model. The part's datum, tolerance and assembly relation of the products are entered into the software to simulate the process. The influence of the different assembly methods of the part of the same kind on the assembly control target is analyzed. The process production capacity and the data from the simulation are all set up in the tolerance library. Then the tolerance library is up dated in accordance with actual production data in the follow-up work, thus accumulating the production experience, and a basis is provided for the subsequent products.

**Keywords:** manufacturing; tolerance library; tolerance analysis; dimensional chain; Monte Carlo

## 0 引言

公差是产品设计不可缺少的重要组成部分,是保证产品设计功能实现的关键因素之一。对于机械制造来说,通过制定公差确定产品的几何尺寸,限定其变动量在一定的范围之内,以达到装配协调或互换等要求。公差是相对制造而言的,因此对公差的要求实际就是对制造的要求,在使用设计软件进行零件设计时如果没有对于公差的要求,此时零件的三维数据就是零件的名义尺寸,这样的三维数据并不能指导制造,因此公差的定义其实就是零件设计中的画龙点睛之笔,重中之重。如果没有合理的公差要求,就不能生产出合格的零件。公差对于产品来说具有非常重要的意义,甚至可以说左右产品的命运,过于严格的公差要求会导致零件成本增加,而公差要求过低又会导致零件在装配过程中出现不匹配的现象,导致产品性能低下。合理的公差定义是综合制造工艺、成本因素和设计目标等多种影响因素后达成的一种最佳的平衡方案。

传统的装配就是符合公差要求的零部件被生产出之后的一个组装过程,是产品生产周期的最后部分。若装配完成的产品不符合该产品的检测、评价等标准,对产品的改动则需要进行相应的重新设计和生产,这就造成了资源

的极大浪费,也延长了产品的生产周期。虚拟装配及容差分析技术在装配仿真、干涉检验、装配序列规划和装配路径规划及容差分配合理性验证等方面弥补了传统装配的不足。目前该技术广泛地应用到卫星、飞机等复杂产品的装配设计及容差分析过程,可通过软件进行虚拟装配及容差分析,将公差值进行迭代,提前发现装配过程中可能存在的问题,确定零件的公差变动范围,确保产品的可装配性,缩短产品的生产周期<sup>[1]</sup>。

## 1 容差分析及软件VSA理论基础

### 1.1 容差分析、容差分配<sup>[2]</sup>

容差分析,也称公差验证,就是已知各组成环的尺寸和公差后,确定最终装配后需保证的封闭环公差。这时,组成环公差作为输入,输出为封闭环公差。当最终性能未满足时,重新修改输入公差,直到符合要求为止。飞机产品的公差分析方法主要有极质法和统计法。

容差分配,也称公差合成,是指在保证产品装配技术要求下规定各组成环尺寸的经济合理的公差。由于封闭环公差是已知的,而尺寸链由多个组成环组成,将封

闭环的公差分配到组成环的公差数值可以有无穷多个解,所以分配方案是多种多样的。在飞机产品设计和制造中,如何合理地分配零件的尺寸公差是一个很困难的问题。

### 1.2 尺寸链

任何机器都是由若干互相关联的零件按规定的技术要求装配而成,这些零件的尺寸反映着它们之间的关系。从尺寸链的观点来看,整个机器就是一个彼此有着密切关系的尺寸链系统<sup>[3-4]</sup>。正确进行工艺尺寸链计算是工艺过程不可缺少的重要环节,其计算是否合理会直接影响加工精度和加工效率,关系到工艺过程的优劣。尺寸链计算是一项复杂、细致的工作,包括组成环与封闭环的确定、公差的分配与计算、工序尺寸及其公差的选择等。通过分析产品尺寸链,并结合产品各零部件公差将其在基于蒙特卡罗算法的 VSA 容差分析中进行仿真计算,可以分析出尺寸链中产品公差分配的合理性<sup>[5]</sup>。

### 1.3 蒙特卡罗模拟法

蒙特卡罗法又称随机模拟法<sup>[6-7]</sup>,它是一种通过随机变量的统计试验、随机模拟来求解数学、物理以及工程技术问题的近似解,它的理论基础是概率论与数理统计中的大数定理和中心极限定理。蒙特卡罗法就是把封闭环的尺寸和公差问题当作求随机变量的统计量的问题来处理,从所有组成环的分布形式中取样,并把得到的各值代入到尺寸链方程中,求得一个函数值。多次重复这一过程,便得到若干个函数值,即可估计出这些变量函数值的分布和参数。使用蒙特卡罗法进行公差分析,首先要确定组成环的分布规律,在此基础上得到均值和方差,以此确定各种分布规律的随机数。以正态分布的组成环为例,使用蒙特卡罗法进行公差分析的流程如图 1 所示。

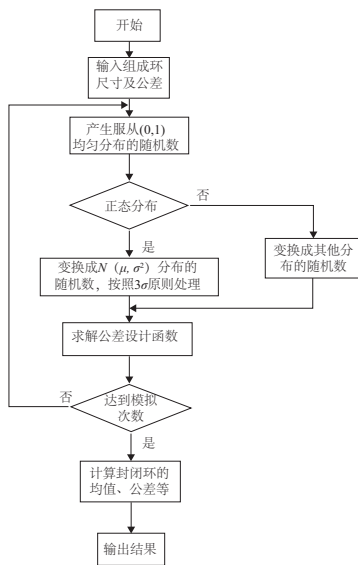


图 1 蒙特卡罗法分析流程

## 2 壁板组件容差分析

以某国产飞机装配为例,壁板组件装配时涉及蒙皮、长桁、角片、框,流程示意图见图 2。装配时蒙皮依据耳片

定位孔及外形贴合工装骨架,长桁定位根据长桁轴线定位器或端面挡块、角片两种定位方法,框位置处的所有角片在与框腹板贴合处形成面的面轮廓度会直接影响装配的精度。基于角片定位方式的不同,影响剪切角片组成面的影响因子也是不同的,可以通过 VSA 软件仿真分析对比不同的装配定位方式和不同的零件公差设置对装配结果的影响。

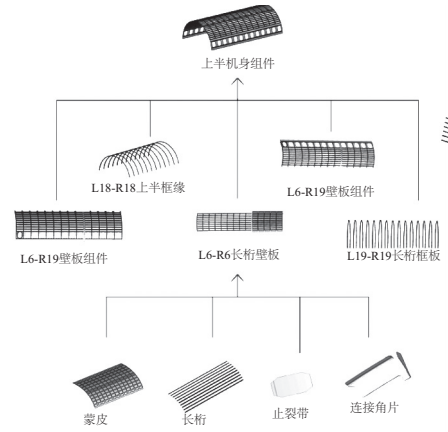


图 2 机身上半桶装配示意图

### 2.1 角片不同定位方案

方案 1:通过工装将蒙皮、长桁、角片及框进行相应的装配。定位顺序是将蒙皮定位到工装型架,然后完成长桁的定位,角片的定位为贴合工装的框位卡板、蒙皮和长桁,最后完成与框零件的定位装配。

方案 2:其定位顺序与方案 1 相同,将蒙皮定位到工装型架,依据蒙皮及长桁上的 DA 孔定位长桁,依据蒙皮及角片上 DA 孔定位角片,之后完成框零件的定位装配。

### 2.2 容差分析

根据 2 种不同的工艺方案,使用 VSA 软件建立容差分析模型,并将各级装配过程的零件制造误差、定位条件、装配顺序等条件输入到容差分析模型中,通过仿真计算,获得控制目标的流程报告和 HLM(影响因子)报告。分析出可能造成装配不匹配现象的来源,迭代优化容差分配方案、装配工艺方案。方案 1 在 VSA 中的分析结果如图 3 所示,方案 2 结果如图 4 所示。

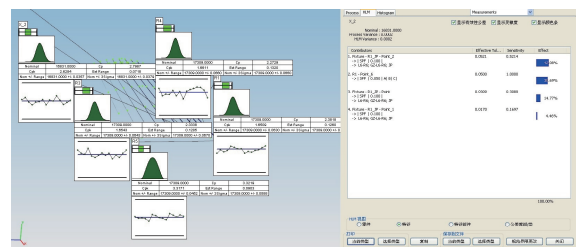


图 3 方案 1 分析结果

由图 3、图 4 可见在此 2 种装配工艺方案下,现有的零件公差都能够满足控制目标的装配要求,但是相应的影响因素及所占权重相差较大。图 3 中方案 1 的影响因子

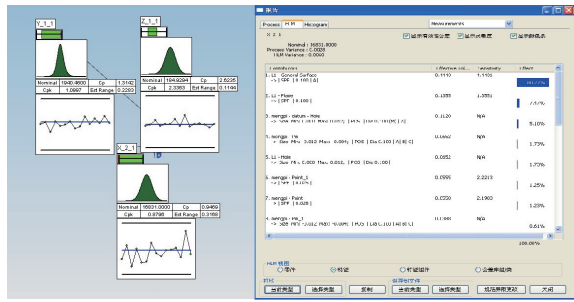


图4 方案2分析结果

图表可见,影响剪切角片在航向方向的装配误差主要是由于航向方向的工装挡块以及剪切角片的自身制造精度(与框装配面)造成。由图4中方案2的分析结果可知,通过此种装配能够保证框位置处剪切角片组成面的轮廓度要求,但是CP值低于方案1的剪切角片装配的CP值(CP值大效果好)。剪切角片制造过程中,其与蒙皮有装配关系的面的制造精度及相应2个DA孔对装配精度的影响较大。

对比方案1及方案2,零件不同的工艺方案和定位方式对于同一控制目标的影响是有差别的,且主要影响因素差别较大。图5为剪切角片的示意图。在钣金零件制造过程中,如果要同时将图中剪切角片A、B、C的制造精度都控制在较高的精度是难以实现的,但结合装配关系和制造能力,可以选择适当舍弃某一个面的部分加工精度,从而保证其他两个面的加工精度。结合VSA仿真分析结果可以得到对于方案1角片的制造精度应主要保证图中A、B 2个面的制造精度。对于方案2而言应主要保证A面及该面上2个DA孔的制造精度,其次是B面的制造精度,而适当放弃C面。这样既能保证制造出来的零件装配后的精度要求,又能相应地降低零件的制造难度及经济成本。

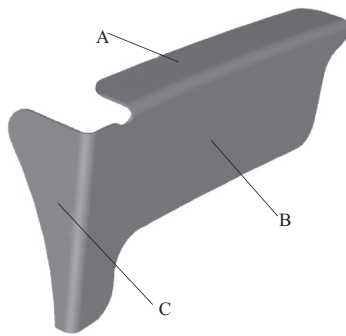


图5 剪切角片

在满足控制目标装配要求的前提下,可通过软件仿真不同公差值控制目标的满足情况,从而计算出符合要求的零件公差范围,并通过后续的生产验证,来协调对产品设计进行相应的公差优化。

### 3 公差库建立

由上一节的对比结果可见,对于同一零件由于不同的装配关系使其在生产过程中控制要素是有差别的。根据VSA软件的仿真,可以分析出要达到某一装配精度时对

于零件需要的最低控制精度。通过工艺人员可以了解零件车间的生产能力,从而获得零件的最高加工精度。将这两方面的数据分类整理到文件中保存,既为后续生产的分析提供依据,也为后续工作提供帮助。

根据上述思路建立相应的公差库文件。以国产某飞机为例,将飞机分为机头、前机身、中机身、中后机身、后机身等各部段,建立公差库文件时以这些部段为横向分类,然后在各部段内部依据仿真分析将各控制目标分类。如前机身部段内的控制目标有:框位置处端面公差、客舱地板公差,门框组件公差,然后结合工艺方案将控制目标内所需要的各零件进行相应的统计,将工艺生产能力和相应的仿真时计算需要的最低精度统一计入文件中。形成该机型公差库文件。公差库文件的具体形式如图6和图7所示。



图6 公差库横向分类

1	分类	零件	图片	基准	装配特征	公差类型	公差值 (mm)	公差值来源	备注
2	框位置处端面公差	蒙皮		基准A: 蒙皮框框面 基准B: 工艺穿片孔 基准C: 工艺穿片孔	表面	轮廓度	0.7	工艺	上、下蒙皮在对接区域(24到25段, 26到28段之间)和蒙皮最厚处的地方厚度公差: 0.3mm-0.4mm-0.4mm
3					位置度	0.4	工艺		
4		穿片孔		基准A: 长轴轴端面 基准B: 中蒙皮轴套面 基准C: 长轴轴端面	位置度	位置度	0.1	工艺	确定孔位置度 0.1
5					平面度	0.3	工艺		
6		长轴		基准A: 长轴轴端面 基准B: 中蒙皮轴套面 基准C: 长轴轴端面	与蒙皮装配面	轮廓度	0.3	工艺	
7					轮廓度	0.1	工艺		
8		连接角片		基准A: 角片工轴轴套面 基准B: 蒙皮轴套面 基准C: 长轴轴端面	与框装配面	平面度	0.2-0.3	工艺	
9					与长轴装配面	轮廓度	0.2-0.3	工艺	
10		框		基准A: 框框框面 基准B: 穿片孔 基准C: 穿片孔	与蒙皮装配面	轮廓度	0.2-0.3	工艺	
11					平面度	0.2	工艺	确定孔位置度 0.1	
12		滑轨		基准A: 滑轨上表面 基准B: 滑轨侧面的定位孔 基准C: 滑轨侧面的定位孔	空位孔	位置度	0.1 (0.09)	工艺	
13					滑轨端面	平面度	0.2	工艺	
14					滑轨孔	位置度	0.1	工艺	
15					滑轨端面	轮廓度	0.1	工艺	
16					滑轨端面	轮廓度	0.2	工艺	

图7 公差库文件控制目标示意图

根据所建立的公差库文件可以非常便捷地查找到所需零件的制造公差及相应仿真,满足控制目标对应的最小需要值。公差库文件可以在容差分析时方便地进行查询,并且能够规范后续容差分析时的公差设置,保证所设置公差的合理性有一定的合理依据。

在软件分析过程中可以将所需的公差值输入到软件公差库以便调用。在软件中的公差库形式如图8所示。在仿真过程可以将零件进行分类,并将各类零件的特征如面、孔、销、点等输入到公差库中,然后在公差库中设置相应的零件制造基准,并且按零件特征输入相应的数值如轮廓度、平面度、位置度等,且关联各自的基准。在之后的仿真过程中,对零件进行特征添加时,只需要将零件的特征与公差库关联即可。仿真时如果需要修改某一类零件的公差值,只需要将公差库中对应分类的零件公差值进行相应修改,然后选择“根据公差库更新”即可将此类零件的某类公差全部修改,而不再需要对这类零件的每一个零件都进行对应公差值的修改,因此可以大幅度缩短工作时间,提高工作效率。

公差库文件的建立,为工艺人员分析问题和优化工艺方案提供了一个依据。可以按部段、按控制目标很容易地查询到需要零件的工艺生产能力。当控制目标装配的工艺方案有了一定改变后,如果涉及到装配零件的公差值需要改变则在公差库文件中进行相应能力查询及软件上的



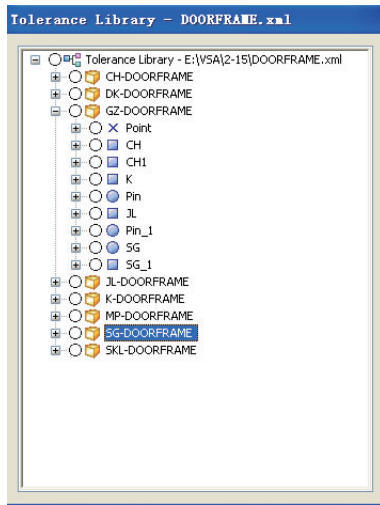


图8 VSA软件公差库

更改即可进行生产能力范围内的仿真并验证其工艺能力指数。通过这种更改、仿真、验证迭代的过程可以更加准确地建立公差库文件。

## 4 结语

1) 零件自身精度直接影响产品的装配精度,但较高的精度会增加零件的生产难度同时降低产品的经济性,所以合理地分配公差对于产品来说尤为重要,关乎着产品的可制造性和经济性。

2) 数字化制造、数字量误差传递已经成为当下的一

种趋势。利用容差分析软件结合相应的工艺方案,将零件的制造误差、产品的控制目标等进行相应的仿真分析,验证方案的可行性以及零件分配误差能否达到装配要求,同时通过仿真分析结果重点控制对装配影响较大的因素,能够优化工艺、缩短设计周期,为协调部件、部段及全机装配提供一定的支持。

3) 公差库文件的建立能够将工艺生产能力和仿真分析得出的最低生产精度相结合,为后续生产提供一定的基础,并且根据后续架次的实际生产数据优化更新公差库文件。通过这种对比优化的迭代过程,能够累积出更为合理的公差分配和零件制造数据。

### 参考文献:

- [1] 刘壮. 基于 VisVSA 技术的汽车装配公差分析[J]. 汽车技术, 2011, 1: 57-61.
- [2] 周瞳. 飞机舱段对接装配容差分析建模及工艺优化[M]. 上海:上海交通大学, 2011.
- [3] 王家海,周纲. CETOL 平台下微型断路器尺寸链及公差研究[J]. 自动化仪表, 2011, 32(9): 14-17.
- [4] 王建英. 运用工艺尺寸链计算得到制造尺寸[J]. 机械研究与应用, 2017(1): 161-163.
- [5] 林洁,王佳. 基于 VisVSA 技术的三维统计公差分析及应用[J]. 制造业自动化, 2017, 39(1): 99-101.
- [6] 郭长虹,赵炳利,郝丽霞. 基于蒙特卡罗模拟法的计算机辅助公差分析[J]. 现代制造工程, 2004(8): 74-76.
- [7] 耿国盛,李国红,肖茂华,等. 高速精密冲床可靠性的 Monte Carlo 模拟与试验验证[J]. 机械设计, 2017, 34(6): 41-46.

收稿日期:2018-06-21

(上接第 47 页)

弯轨及轨道连接处的运行情况(图 16)。整体运行情况良好,在允许范围内,由于轨道加工工艺误差小车会出现轻微抖动现象,没有发生翻车、脱轨、掉电等运行事故。

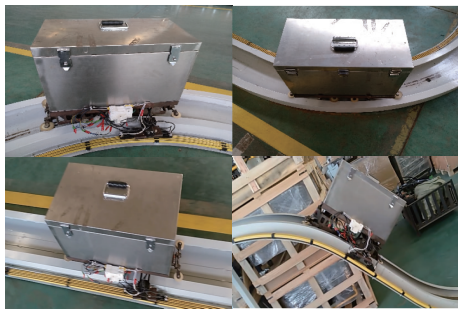


图16 小车在轨运行情况

## 6 结语

设计研制了一种高速重载双驱型轨道物流小车。其主要特点为:1) 采用两个无刷直流轮毂电动机进行无传动直接摩擦驱动,从而在获得较大的输出力矩的同时保持较小的自重系数;2) 设计了一种剪刀式车架支撑装置用以增强驱动装置和轨道系统之间的贴合度;3) 设计了周向定位装置解决小车在运行过程中左右偏移的问题;

4) 车体上增加了隐形轨齿轮配合轨道系统中的隐形轨道以应对坡道上行时驱动力不足的问题。所设计的小车已经完成制造、安装与调试,并在自行搭建的试验轨道上进行了反复运行试验。结果表明,速度与载重水平达到了预期的技术指标。

### 参考文献:

- [1] 马洪滨,刘璐,蒋英. 医院智能化轨道物流传输系统的应用[J]. 中国医学装备, 2013, 10(1): 38-40.
- [2] 徐交建. 无刷直流电动机双模式弱磁控制研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
- [3] 陈静. 轮毂盘式永磁同步电动机的设计与分析[D]. 天津:天津大学, 2010.
- [4] 袁题训,董升亮,耿丙群. 无刷直流电动机的保护电路[J]. 现代电子技术, 2011, 34(24): 41-44.
- [5] 商洪清. 钣金折弯工艺分析[J]. 金属加工(热加工), 2010(1): 46-50.
- [6] 宋永增. 轨道车辆制造工艺[M]. 北京:科学出版社, 2015: 171-172.
- [7] 刘晶波,于平良,安文宝. 谈模具弹簧的选择和使用[C]. 中国模具技术和设备展览会暨先进模具制造技术研讨会, 上海:中国模具工业协会, 2006: 101-102.

收稿日期:2018-02-09