

基于有限元法的柔性件装配偏差分析

苏成阳,王志国,徐辉

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:传统柔性件装配偏差分析所使用的超元刚度矩阵以文件形式存在,导致装配偏差计算流程操作复杂,分析人工成本大大增加。使用有限元法封装装配偏差计算,根据边界条件直接输出装配偏差,从而简化装配偏差计算流程。开展薄板装配试验,通过与仿真装配偏差数据进行对比,验证了该装配偏差计算方法的正确性。

关键词:柔性件;装配偏差;超元矩阵;有限元

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)04-0079-05

Assembly Deviation Analysis of Flexible Parts Based on Finite Element Method

SU Chengyang, WANG Zhiguo, XU Hui

(College of Mechanic and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The hyper stiffness matrix used in flexible assembly deviation analysis exists in the form of a document, which makes the procedure of the assembly deviation complicated and the labor cost increase. To simplify the calculation procedure, this paper uses finite element method to encapsulate the deviation calculation, thus implementing the output of the assembly deviation directly. Sheet assembly test is carried out finally, the assembly deviation data of simulation is compared with and the correctness of this method is verified.

Keywords: flexible parts; assembly deviation; hyper stiffness matrix; finite element method

0 引言

飞机装配过程中使用了大量刚性低、形状复杂的钣金件,受定位误差、制造误差、夹具误差等耦合因素影响,装配过程往往会产生一定的装配偏差。装配偏差的累积与传递对飞机外形准确度和生产质量的影响极大。因此,对装配偏差进行合理预测和尺寸协调分配工作具有必要性,国内外就针对飞机柔性件装配偏差分析展开了一系列的研究。

密歇根大学的 Liu 和 Hu^[1-3] 率先对该领域展开研究,将柔性件装配偏差过程分为定位、夹紧、装配、回弹释放 4 个过程,并针对直接有限元法计算量较大的情况,提出了影响系数法(method of influence coefficient, MIC),使用超元刚度矩阵建立装配偏差与柔性件制造误差的线性关系,从而掀起了柔性件装配偏差分析的研究热潮,但是上述研究并未考虑到零件接触力的影响。Liao 和 Wang^[4] 考虑了柔性件在铆接和回弹过程中的接触情况,并在此基础上使用 ANSYS 建立了基于非线性接触下的柔性件装配偏差分析模型。Kang xie^[5] 等研究了装配过程中考虑接触情况下的尺寸偏差传递,结合有限元软件,使用增强的维度减小方法,建立了零件偏差与装配偏差之间统计特征之间的关系。Camelio^[6] 对单工位下的装配偏差分析理论进行进一步扩充,对多工位柔性件装配过程进行力学建模,研究了装配偏差在尺寸链中的传递规律,并根据零件偏差、夹具偏差和焊枪偏差的传播机理提出多工位柔性件偏差分析方法。

国内林忠钦团队^[7] 率先对柔性件装配展开了研究,深入开展了针对车身柔性薄板件装配的建模方法。田兆青等^[8] 研究了多工位车身薄板件装配过程中偏差流传递、变换和累积的状态空间模型。陈晖^[9] 将勒让多多项式与正弦多项式结合,利用柔性件表面误差的连续性和相关性建立零件表面偏差模型,以准确表达零件表面形状。张玮^[10] 提出了使用夹具主动补偿进行飞机装配偏差优化建模,有效减少了装配回弹后产生的装配偏差。

当柔性件数量较多时,以往的研究常采用超元刚度矩阵缩小有限元矩阵求解规模。然而超元刚度矩阵的使用也具有一定的局限性,具体表现在以下 2 个方面:1) 装配偏差计算方法封装难度大;超元刚度矩阵以文件形式(图 1)存在,计算元素(超元刚度矩阵、载荷、位移)缺少相应的数据存储结构,计算流程很难封装,需要大量人工操作才能构造基于超元刚度矩阵的求解方程。2) 计算流程可复用性差;超元刚度矩阵是由边界条件在整体刚度矩阵上进行行列式变化得到的,因此当边界节点或受力方向改变时,必须提取新的超元刚度矩阵进行装配偏差计算。

本文考虑使用有限元方法替代超元刚度矩阵理论,封装装配偏差计算过程,以关键点处的偏差源为输入量,直接输出装配偏差,从而简化柔性件装配偏差分析流程。通过开发柔性件装配偏差分析系统,实现基于有限元法的装配偏差计算。最后,开展薄板装配算例与仿真数据进行对比,验证本方法的有效性和正确性。

基金项目:国家自然科学基金(51275236);航空科学基金(2012ZE66016)

作者简介:苏成阳(1992—),男,江苏无锡人,硕士研究生,研究方向为飞机装配技术。

```

** GENERATION OF SUBSTRUCTURE Z21
**USER ELEMENT, NODES=      3, LINEAR
** ELEMENT NODES
**      894,      238,      884
      1,      2,      3
**MATRIX, TYPE=STIFFNESS
461504.17098456
-.36214687159755E-15,      398.81638200243
-6004.9034820028,      0.34094487823342E-14,
-43903.724837544,      -.95877537880355E-14,
0.17935201757400E-13,      2.2410868065911,
108.98783525685,
-3235.4200979289,      0.42548604702400E-13,
-.31757095143806E-14,      356802.08332161
-205349.27400315,      -.71525248498278E-15,
0.157429546888670E-13,      24960.433845817,
-.71423287005240E-14,      -154.647848884412,

```

图1 超元刚度矩阵文件形式

1 柔性件装配偏差计算框架

柔性件装配偏差分析可分为定位、夹紧、装配以及回弹释放4个步骤。本文首先介绍基于有限元法的装配偏差计算流程。

1) 确定性定位

使用3-2-1定位将柔性件固定在夹具上,如图2所示。

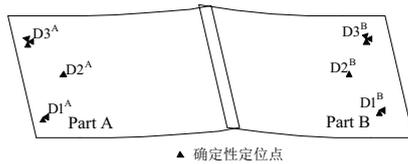


图2 确定性定位示意图

在该过程中,以A板为例,A板所受的零位移约束为 $C_D^A = [C_{D1}^A, C_{D2}^A, C_{D3}^A]$, D1-D3 为确定性定位点的索引号, C 为节点处位移约束的方向以及大小,后文位移约束的含义以此类推。使用对角元置大数法构造有限元求解方程:

$$K_A^1 a_A = F_A^1 \quad (1)$$

式中 K_A^1, F_A^1 是根据确定性定位约束条件修正后的整体刚度矩阵和整体载荷列阵。 a_A 为整体位移向量,为一未知量。同理可得 B 板的有限元求解方程:

$$K_B^1 a_B = F_B^1 \quad (2)$$

2) 过定位与夹紧

对该柔性件施加外力,将过定位点夹持至名义位置,以保证零件装配的稳定性,该过程可视为在过定位点处施加强制位移压至名义位置;另外对 A、B 板的铆接点施加强制位移约束,使得两板之间产生搭接区域,如图3所示。

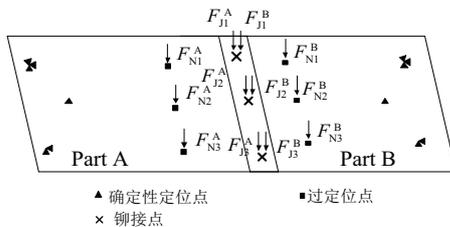


图3 过定位与夹紧示意图

记 A 板在过定位点、铆接点所受的位移约束分别为 $C_N^A = [C_{N1}^A, C_{N2}^A, \dots, C_{Nm}^A]$, $C_J^A = [C_{J1}^A, C_{J2}^A, \dots, C_{Jn}^A]$, 其中, m 为 A 板上过定位点的数量, n 为铆接点数量。使用对角元置大数法对式(1)、式(2)进行再次修正得到该过程的有限元关系式:

$$\begin{cases} K_A^2 a_A = F_A^2 \\ K_B^2 a_B = F_B^2 \end{cases} \quad (3)$$

求解上式后可以得到 A 板在该过程的整体位移列阵 a_A 。设过定位点、铆接点处在该过程中所受夹具夹持力为 $F_N^A = [F_{N1}^A, F_{N2}^A, \dots, F_{Nm}^A]$, $F_J^A = [F_{J1}^A, F_{J2}^A, \dots, F_{Jn}^A]$, 可视为夹具施加的等效节点力。在有限元方法中,与强制位移约束等效的整体载荷列阵 F_A 可通过式(4)得到:

$$F_A = K_A a_A \quad (4)$$

F_N^A, F_J^A 为 F_A 在过定位、铆接点自由度位置对应的子向量。同理,等效整体载荷列阵 F_B 为:

$$F_B = K_B a_B \quad (5)$$

3) 铆接及释放回弹

零件夹紧后,使用工具在铆接点处进行铆接以形成装配体,此过程中由温度或铆钉挤压力等因素导致的装配偏差,本文不予考虑。

由于零件存在不可避免的制造误差,装配过程中必然会在装配应力,当铆接完成后,需要释放过定位处以及装配点处的夹具,装配体则会产生回弹变形,如图4所示。

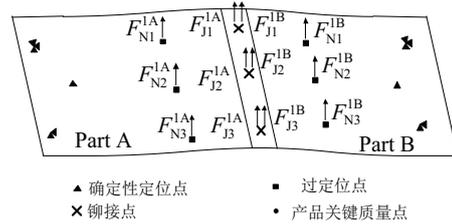


图4 装配回弹示意图

A 板和 B 板在过定位点以及铆接点处的回弹力可定义为式(4)、式(5)中的夹具夹持力,大小相等且方向相反^[3],如式(6)所示。

$$\begin{cases} F_N^{1A} = -F_N^A \\ F_N^{1B} = -F_N^B \\ F_J^{1A} = -F_J^A \\ F_J^{1B} = -F_J^B \end{cases} \quad (6)$$

回弹力作为外力可构成 A、B 板的回弹载荷列阵 F_A^r, F_B^r , 由 $K_A^1, K_B^1, F_A^r, F_B^r$ 可构成装配体回弹有限元关系式,如式(7)、式(8)所示。

$$\begin{bmatrix} K_A^1 & 0 \\ 0 & K_B^1 \end{bmatrix} a_R = \begin{bmatrix} F_A^r \\ F_B^r \end{bmatrix} \quad (7)$$

上式简写为式(8):

$$K_{AB} a_R = F_{AB}^r \quad (8)$$

在回弹过程中,铆接点在该过程中的位移一致,系统使用直接引入法使铆接点约束得到精确的满足,实现步骤如下:计算模型的整体位移向量可表示为 $a_R = (a_m, a_s, a_d)$ 。 a_m 表示 A 零件铆接点处的自由度, a_s 表示 B 零件上铆接点的从自由度, a_d 表示装配体上其余节点的自由度。主从自由度的关系可表示为:

$$a_m = a_s \quad (9)$$

装配体在回弹中的整体位移向量可表示为:

$$a_R = \begin{bmatrix} a_m \\ a_s \\ a_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m \\ I_m \\ I_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_m \\ a_d \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} a_m \\ a_d \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, I_m, I_d 是阶数为 m 和 d 的单位矩阵,引入有限元法

势能的最小泛函,可得式(11)、式(12):

$$\Pi = \frac{1}{2} \mathbf{a}_R^T K_{AB} \mathbf{a}_R - \mathbf{a}_R^T \mathbf{F}'_{AB} \quad (11)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} \mathbf{a}_R^T \mathbf{C}^T K_{AB} \mathbf{C} \mathbf{a}_R - \mathbf{a}_R^T \mathbf{C}^T \mathbf{F}'_{AB} \quad (12)$$

由 $\partial\Pi=0$,可得式(13)

$$\begin{bmatrix} I_m & I_m \\ & I_d \end{bmatrix} K_{AB} \begin{bmatrix} I_m \\ I_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{a}_m \\ \mathbf{a}_d \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m & I_m \\ & I_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_m \\ \mathbf{F}_s \\ \mathbf{F}_d \end{Bmatrix} \quad (13)$$

求解上式可得到装配体从名义位置到回弹过程中所有节点的位移,即装配偏差。

2 整体刚度矩阵的存储与组集

整体刚度矩阵是有限元法中重要的计算元素。当柔性件划分的网格数较多时,计算机存储空间将制约整体刚度矩阵大小,限制了有限元矩阵求解规模。因此,本文对整体刚度矩阵的存储数据机构和组集方式展开研究。

2.1 一阶邻域的概念

设 N 表示网格中节点总数, N^e 表示每个单元中节点数, d 表示每个单元的自由度。在有限元方法中,每个单元刚度矩阵由 $N^e \times N^e$ 个 $d \times d$ 的块构成,这些块是集成过程中最小的单元,再次称它们为“基本元”,将基本元看成整体刚度矩阵 K 的一个元素,后文所说的元素指的都是基本元,将 K 中第 i 行,第 j 列元素标记为 $K(i,j)$,其中 $i,j=0,1,\dots,N-1$ 。

图5是一个单元刚度矩阵的示例,本文采用三角形壳单元集成总体刚度矩阵。在集成过程中,对应第 i 号与第 j 号节点的基本元 $K_{ij}^{d \times d}$ 应被累加至 $K(i,j)$ 的位置。

$$\mathbf{K}^e = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots \\ \dots & K_{ij}^{d \times d} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}^{N^e \times N^e}$$

图5 单元刚度矩阵示例

如果两个节点出现在同一单元中,则称它们是关联的。显然,每个节点都与自身关联,只有当两个节点关联时,它们才会对总体刚度矩阵产生影响。在这里引入一阶邻域的概念,一阶邻域为包含一个节点的所有单元体内的节点(包含自身)。在 K 中,第 i 行所有非零元素的列索引集合即构成了 i 点的一阶广义邻域。可以为 K 的每一行设计存储一阶广义邻域的数据结构:

1) 整数 Rid ,表示行号。

2) 整型数组 Cid ,存储一阶广义邻域的节点编号,并且包含 Rid ,每个与 Rid 相关联的节点只记录一次,这是因为它们对应的基本元将累加至 K 的同一位置,该数组以升序排列。

3) 整数 C ,表示数组 Cid 的长度。

图6展示了节点的广义邻域:

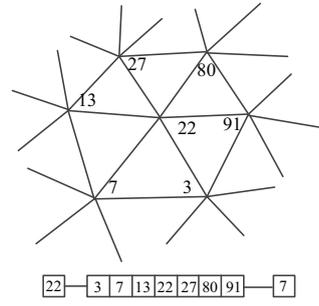


图6 一阶广义邻域

2.2 一维向量存储结构

1) 非零元素的表达式

由上节可知,整体刚度矩阵中非零元素数量 $Sum = C_0 + C_1 + \dots + C_{N-1}$ 。如果只存储其非零元素可以大大减少内存空间,系统使用3个一维向量存储整体刚度矩阵的非零元素信息,分别是:

Value:长度为 Sum 的双精度向量,用来存储刚度矩阵中所有非零元素,其存储顺序是从第一行首元素开始根据列索引从小到大依次存储,直到整体刚度矩阵最后一行中的末元素结束。记向量中第 i 个元素的值为 VA_i 。

First_Column:长度为 $N+1$ 的整型向量,用来存储整体刚度矩阵中每一行非零首元素在 $Value$ 中对应的索引,记向量中第 i 个元素的值为 FC_i 。

Column:长度为 Sum 的整数向量,存储 $Value$ 向量中每个元素对应的列索引号。记向量中第 i 个元素值为 Col_i 。

2) 整体刚度矩阵的集成

首先,根据一阶广义邻域数据可定义 $First_Column$,其首元素 $FC_0=0$,每个元素值通过式(9)初始化:

$$FC_i = FC_{i-1} + C_{i-1} \quad (1 \leq i \leq N) \quad (14)$$

使用 FC_i 到 $FC_{i+1}-1$ 的元素值,结合广义邻域数据可初始化 $Column$ 向量,见式(15)和图7。

$$Col_{FC_i+j} = Cid_j \quad (0 \leq j \leq FC_{i+1} - FC_i - 1) \quad (15)$$

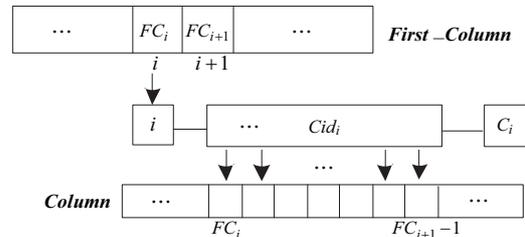


图7 Column向量初始化

$First_Column$ 以及 $Column$ 向量初始化过程完成后,可确定任意基本元 K_{ij} 在 $Value$ 中的对应位置,过程如下:由 $First_Column$ 获取 i 行中非零元素在 $Value$ 和 $Column$ 中对应的索引值 FC_i 到 $FC_{i+1}-1$,遍历 $Column$ 的 FC_i 到 $FC_{i+1}-1$ 元素值,若 $Col_a = j$,将 K_{ij} 添加至 VA_a 中,如图8所示。

$Value$ 一维向量中的每个值 a 可表示为:

$$VA_a = VA_a + K_{ij} \quad (j = Col_a, FC_i \leq a \leq FC_{i+1} - 1) \quad (16)$$

将所有单元刚度矩阵中的基本元按上式添加至 $Value$ 向量后,即完成了整体刚度矩阵的组集。

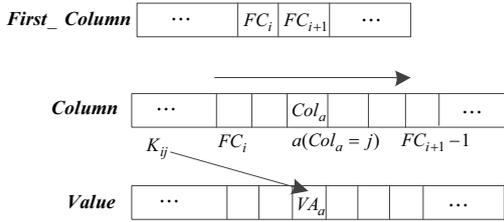


图 8 Value 向量初始化

3 柔性件装配偏差分析的实现

本文结合 VC++、OpenGL,开发柔性件装配偏差分析系统,实现基于有限元法的装配偏差分析。系统的算法和数据结构已在 2.3 节中介绍。下面对系统的重要模块进行阐述:

1) 文件读取模块:模型信息的输入通过处理 ABAQUS 导出的 inp 文件完成,文件中保存了模型的单元信息和节点信息,如图 9 所示。建模和划分网格等前处理工作通过 ABAQUS 软件完成。

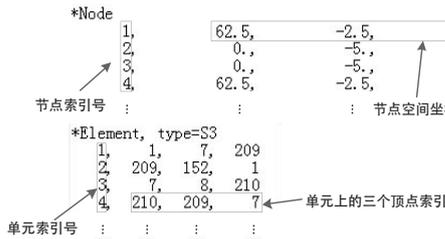


图 9 inp 文件中的三角网格模型信息

2) 边界条件输入模块:选取确定性定位点、过定位点以及铆接点,并输入关键点所受的强制约束,使用位移约束数据结构存储节点索引号以及位移约束信息,作为边界条件。图 10 展示了系统选取节点并定义位移约束。

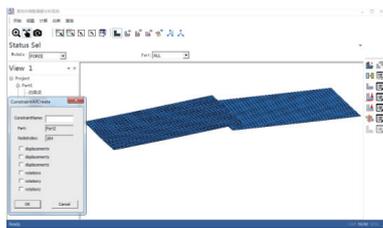


图 10 边界条件输入模块

3) 结果查询模块:显示夹紧、回弹状态下的装配体,根据选取节点的索引号,在整体位移列阵中提取该节点对应的装配偏差值,如图 11 所示。

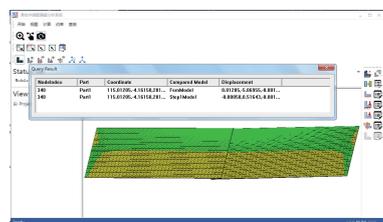


图 11 装配偏差结果查询模块

4 铝板装配试验

设计铝板搭接装配试验。实验采用柔性零件装配实验夹具对柔性件薄板进行装配。装配夹具如图 12 所示。

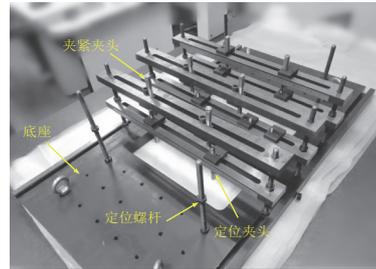


图 12 试验夹具

试验夹具由底座、定位螺杆、定位夹头、夹紧夹头等零部件组成。底座是固定所有夹具的平台。金属薄板的定位由确定性定位夹具和过约束定位夹具组成。利用双螺母将金属薄板夹紧固定在螺杆上完成零件确定性定位。利用定位夹头和夹紧夹头之间的配合夹紧零件,实现零件的过约束定位。零件装配铆接点处同样利用定位夹头和夹紧夹头,将装配连接点压紧至名义位置。零件的铆接通过螺栓-双螺母夹紧的形式完成。

试验的定位夹紧方法如图 13 所示,夹具夹头采用对顶形式,下部为定位夹头,上部为夹紧夹头。定位夹头的高度确定了柔性件在过定位点处的理想位置,在夹紧夹头的夹紧力作用下,可将柔性零件压紧直到与定位夹头贴合。定位夹头与夹紧夹头均采用可调节的 M10 螺杆结构,实现不同柔性零件的过约束定位。

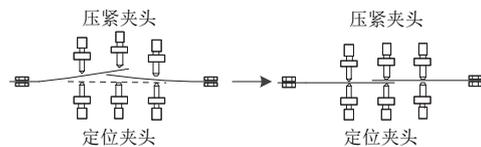


图 13 夹具夹紧方法示意图

试验采用铝合金板 A、B 进行搭接装配,其材料参数如下:弹性模量为 68.9 GPa,泊松比为 0.330,理论尺寸均为 400 mm × 400 mm,厚度为 1 mm。图 14 展示了使用 ATOS 光学扫描仪测量薄板零件确定性定位后的外形,得到薄板零件点云数据。使用商业软件 CATIA 中的逆向模块对点云数据进行处理,导入至 ABAQUS 后,使用 S3R 三角形壳单元划分单元格,得到铝板有限元装配模型,如图 15 所示。

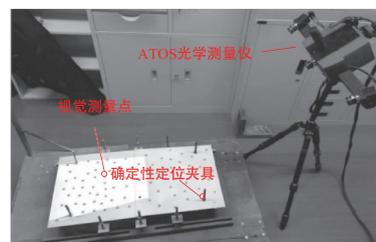


图 14 ATOS 测量铝板外形

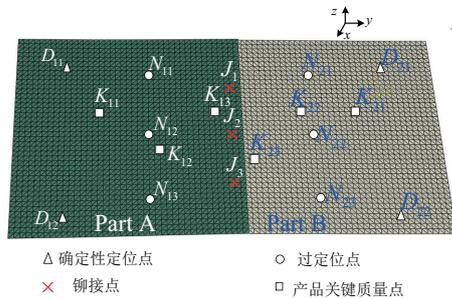


图 15 铝板装配有限元模型

图 15 中,关键点由试验实际装配过程中的夹具位置确定的, D_{11} - D_{22} 为确定性夹具夹持位置,试验过程中的确定性定位点处于同一高度,构成一理想平面。过约束定位夹具与铆接点处的夹具将薄板压至理想平面。过定位点(N_{11} - N_{23})、铆接点(J_1 - J_3)的距离与该平面的距离可视为法向初始制造误差(表 1)。 K_{11} - K_{23} 为 A、B 板上观测回弹偏差的 KPC(key product character 关键产品特征)点。表 2 展示了铝板装配时的边界约束条件。

表 1 A、B 板 Z 向初始制造误差 mm

关键点	过约束定位点			铆接点		
	N_1	N_2	N_3	J_1	J_2	J_3
A 板	2.30	2.17	2.78	5.27	5.07	5.59
B 板	0.89	0.96	1.18	3.28	3.15	3.54

表 2 铝板边界约束条件

约束自由度	节点
X/Y/Z/RX/RZ	$D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$
Z	$N_{11}, N_{12}, N_{13}, N_{21}, N_{22}, N_{23}, J_1, J_2, J_3$

使用装配偏差分析系统导入 inp 文件,并根据表 1、表 2 定义边界约束条件,计算得到装配偏差。使用 ATOS 测量装配体点云数据(图 16),重复点云数据处理工作,得到 KPC 点、铆接点处的装配偏差。

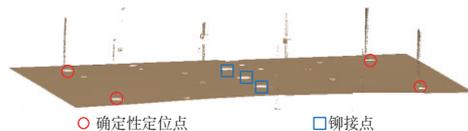


图 16 铝板装配体点云数据

图 17 展示了试验、系统计算、有限元仿真的装配偏差数据对比, J_1 - J_3 为装配体上的连接点。

ABAQUS 仿真是基于有限元法进行的,系统计算结果和仿真结果误差率在 5% 以内,说明了本计算方法的准确性。另外,受夹具定位误差、铝板质量、铝板材料误差、板材接触作用等因素耦合作用,试验数据与计算结果存在一定的误差,但大体趋势相近,因此本文方法是一种良好的装配偏差预测方法,预测准确性的提升需要理论研究以及试验方案进一步完善。

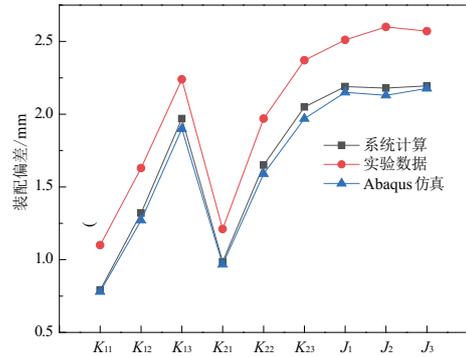


图 17 装配偏差数据对比

5 结语

本文提出了基于有限元法的柔性件装配偏差分析计算流程,通过开发柔性件装配偏差分析系统实现装配偏差计算,由边界约束条件直接得到装配偏差,从而简化了使用超元刚度矩阵分析的传统操作步骤,为理论逐步完善提供了良好的实现平台。在薄板装配试验中,获取各类装配偏差分析数据后,通过对比验证本文计算方法的准确性,从而提升了柔性件装配偏差分析的应用价值。

参考文献:

- [1] Liu C, Hu S J. An offset finite element model and its applications in predicting sheet metal assembly variation [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1995, 35(11): 1545-1557.
- [2] Liu S.C., Hu S.J., Woo, T.C. Tolerance analysis for sheet metal assembly [J]. Transactions of the ASME, 1996, 118(1): 62-67.
- [3] Liu C, Hu S J. Variation simulation for deformable sheet metal assemblies using finite element methods [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 1997, 119(3): 368-374.
- [4] Liao X, Wang G G. Non-linear dimensional variation analysis for sheet metal assemblies by contact modeling [J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2007, 44(1): 34-44.
- [5] Xie K, Wells L, Camelio J A, et al. Variation Propagation Analysis on Compliant Assemblies Considering Contact Interaction [C]// ASME 2006 International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2007: 743-752.
- [6] Camelio J, Hu S J, Ceglarek D. Modeling variation propagation of multi-Station assembly systems with compliant parts [J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125: 673-681.
- [7] 林忠钦, 胡敏, 陈关龙, 等. 轿车车体装配偏差研究方法综述 [J]. 机械设计与研究, 1999(3): 58-60.
- [8] 田兆青, 来新民, 林忠钦. 多工位薄板装配偏差流传递的状态空间模型 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(2): 202-209.
- [9] 陈晖, 谭昌柏, 王志国. 耦合几何与材料误差的柔性装配偏差统计分析 [J]. 航空学报, 2015, 36(9): 3176-3186.
- [10] 张玮, 王志国, 谭昌柏, 等. 基于夹具主动定位补偿的飞机柔性件装配偏差优化方法 [J]. 航空学报, 2017, 38(6): 258-266.

收稿日期: 2018-01-17