

基于曲面配准的柔性件装配偏差分析

徐辉, 王志国

(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模型未考虑实际装配过程中装配体下架对装配偏差的影响。利用总体刚度矩阵构建装配偏差力学模型,通过曲面配准技术模拟装配夹具完全释放后的装配体形态,进而求解装配体的装配偏差,并通过飞机壁板件模型进行仿真实验,验证“装配夹具完全释放”对于装配体装配偏差分析的必要性。

关键词:柔性件;装配流程;装配偏差;装配夹具完全释放;曲面配准

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)03-0019-03

Assembly Deviation Analysis of Flexible Parts Based on Surface Registration

XU Hui, WANG Zhiguo

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In the traditional assembly deviation analysis model of flexible parts. The influence of assembly fixture release on assembly deviation is not considered in actual assembly process. In this paper, the mechanical model of assembly deviation is constructed by using the overall stiffness matrix, and the assembly shape is simulated by the surface registration technology after the assembly fixture is completely released, then the assembly deviation is solved. By the simulation experiment of the aircraft panel model, the necessity for the assembly deviation analysis after the complete release of the assembly fixture is verified.

Keywords: flexible parts; assembly process; assembly deviation; full release of assembly fixture; surface registration

0 引言

装配偏差是指装配体实际装配尺寸与设计尺寸间的偏差,其受到制造精度与装配工艺等诸多因素的影响。LIU 和 HU^[1]基于有限元法建立一维悬臂梁模型,并利用该模型分析了零件制造误差、夹具定位误差以及装配顺序对装配偏差的影响。由于一维模型的局限性,随后将该模型推广至三维,并将柔性件装配流程划分为4步:定位—夹紧—装配—释放回弹,在此基础上结合有限元法与统计学方法提出了著名的影响系数法(method of influence coefficient)。该方法通过构建敏感矩阵建立输入误差源与输出装配偏差的线性关系。随后针对柔性件装配偏差的研究多以“定位—夹紧—装配—释放回弹”的装配仿真流程为基础,结合影响系数法与超元刚度理论构建力学模型^[2-4]。然而,该方法在许多方面仍需改进与完善,其仅预测了装配体在装配夹具上的装配回弹偏差,而在实际装配过程中,装配体还需进行下架操作,在装配体内部残余装配应力的作用下,装配体会再次变形,因此传统分析模型求解得到的装配偏差对实际装配的指导作用有限。

本文对“定位—夹紧—装配—释放回弹”装配仿真流程予以完善,通过添加“装配夹具完全释放”环节模拟装配体的实际下架,考虑到超元刚度矩阵理论在实际应用中存在的缺陷,利用总体刚度矩阵替代超元刚度矩阵进

行装配偏差建模,依据基准点选取原则,利用曲面配准技术将装配夹具完全释放后的装配体与名义位置进行配准以求得装配偏差。最后对飞机壁板件模型进行仿真实验,通过数据对比说明模拟装配夹具完全释放环节对于装配偏差分析的必要性。

1 柔性件装配偏差计算框架

柔性件装配仿真流程可分为4步:定位—夹紧—装配—释放回弹,但其未考虑实际装配过程中装配夹具完全释放后装配体会再次变形,因此需要在上述装配仿真流程的基础上添加装配夹具完全释放的仿真步骤,如图1所示。

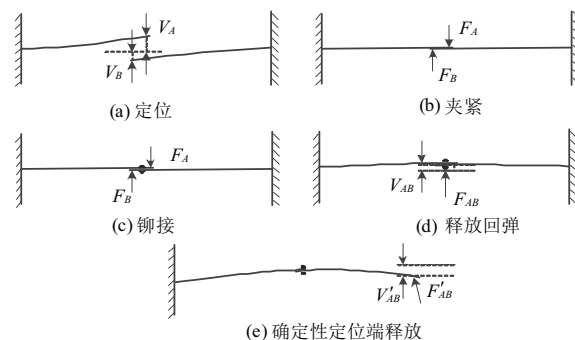


图1 柔性件装配仿真流程

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

第一作者简介:徐辉(1993—),男,湖北天门人,硕士研究生,研究方向为飞机装配技术。

1) 零件定位:利用夹具对零件进行确定性定位,定位后零件与名义位置的偏差为 V_A 、 V_B 。

2) 装配夹紧:利用额外装配夹具强迫零件位移至名义位置,施加的装配力为 F_A 、 F_B 。

3) 装配铆接:在零件装配铆接点处进行装配铆接,使之成为一个装配体,此时装配体内部存在装配应力。

4) 释放回弹:释放装配夹具,装配体在回弹力的作用下发生回弹变形。回弹力 F_{AB} 作用位置与装配力作用位置相同,大小相同,方向相反,与 F_A 、 F_B 存在线性关系,回弹偏差为 V_{AB} 。

5) 装配夹具完全释放:为得到装配体下架后形状,通过释放掉一端确定性定位点约束模拟装配夹具完全释放,回弹力 F'_{AB} 为确定端约束力反力,此约束力反力引起的回弹偏差为 V'_{AB} ,释放一端确定定位约束后装配体较名义位置的回弹偏差为 V''_{AB} 。利用总体刚度矩阵理论建立如下装配偏差力学模型:

$$\begin{cases} F_A = K_A V_A \\ F_B = K_B V_B \end{cases} \quad (1)$$

$$F_{AB} = K_{AB} V_{AB} \quad (2)$$

$$\begin{cases} F'_{AB} = K'_{AB} V'_{AB} \\ V''_{AB} = V_{AB} + V'_{AB} \end{cases} \quad (3)$$

在装配夹具完全释放后,需要通过测量基准或人为定义的基准进行装配偏差计算。当测量基准或人为定义基准与其名义位置的对应点不重合时,需利用曲面配准技术进行配准。若装配体先进行旋转操作后进行平移操作,记旋转矩阵为 \mathbf{R} ,平移矩阵为 \mathbf{T} ,装配体某关键点的名义位置为 p ,下架后该点位置为 p' ,则装配偏差为:

$$\nabla = \mathbf{R}p' + \mathbf{T} - p \quad (4)$$

2 装配夹具完全释放模拟

由于装配体模型在变形前后其对应点关系是唯一确定的,考虑装配偏差模型在采样点的偏差最小原则,建立基于最小二乘的曲面配准算法,通过 SVD 分解求解旋转矩阵和平移矩阵,进而获取装配偏差。

2.1 基准点选取

装配偏差的计算需要有参照基准的配合,在偏差测量中,基准的选择往往由人为设定,其与具体情况相关。在装配体回弹过程中,装配体的回弹量与装配体的刚度密切相关^[5]。一般而言,装配体中装配零件数量越多的位置其刚度越大,在释放回弹及装配体下架阶段的回弹量较小。由于在装配过程中装配体在特殊位置会产生塑性变形,其在释放回弹及装配体下架阶段的回弹量极小,因此本文选取装配体模型中刚度较大及产生塑性变形的点作为基准点,建立对应的点集对。

2.2 设定目标函数

在上节中设置了基准点选取规则,记源采样点点集为 $\mathbf{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$,目标采样点点集为 $\mathbf{S}' = \{s'_1, s'_2, \dots, s'_k\}$,则有:

$$s'_i = \mathbf{R}s_i + \mathbf{T} + N_i \quad (5)$$

利用最小二乘法建立目标函数:

$$f = \sum_{i=1}^k \| s'_i - (\mathbf{R}s_i + \mathbf{T}) \|^2 \quad (6)$$

其中要求 f 最小。根据最小二乘求解法,可建立下式:

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial \alpha} = 0, \frac{\partial f}{\partial \beta} = 0, \frac{\partial f}{\partial \gamma} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial t_x} = 0, \frac{\partial f}{\partial t_y} = 0, \frac{\partial f}{\partial t_z} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

结合式(5)-式(7)即可求得旋转矩阵 \mathbf{R} 与平移矩阵 \mathbf{T} 。

2.3 基于 SVD 分解求解装配偏差

上节给出了目标函数与求解方法,但由于其求解过程过于繁琐,不易通过编程实现。本节将利用 SVD 分解对式(5)-式(7)进行求解。

目标约束函数 f 的物理含义为所有采样点与对应目标点间距离的平方和最小,表示如下:

$$g = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \| s'_i - (\mathbf{R}s_i + \mathbf{T}) \|^2 \quad (8)$$

记源采样点集 \mathbf{S} 的质心为 s ,目标采样点集 \mathbf{S}' 的质心为 s' ,则:

$$\begin{cases} s = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i \\ s' = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s'_i \end{cases} \quad (9)$$

对式(8)进行展开,将式(9)代入可得:

$$g = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \| s'_i - s' - \mathbf{R}(s_i - s) \|^2 + \| s' - \mathbf{R}s - \mathbf{T} \|^2 \quad (10)$$

由于式(10)中第1项与第2项均 ≥ 0 ,且第1项只和 \mathbf{R} 相关,因此可先通过第1项求解 \mathbf{R} ,再通过第2项求解 \mathbf{T} 。

记源采样点对应去质心点坐标为 q_i ,目标采样点对应去质心坐标为 q'_i ,则:

$$\begin{cases} q_i = s_i - s \\ q'_i = s'_i - s' \end{cases} \quad (11)$$

式(10)可转化为:

$$g_R = \sum_{i=1}^k \| q'_i - \mathbf{R}q_i \|^2 \quad (12)$$

则:

$$\mathbf{T} = s' - \mathbf{R}s \quad (13)$$

展开式(12),记 \mathbf{H} 为 3×3 的矩阵,其表达式如式(14)。由于 \mathbf{R} 为正交矩阵,即 $\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}$,则上式可转化为式(15):

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^n q_i q_i^T \quad (14)$$

$$\varphi = (\max_{tr}(\mathbf{R}\mathbf{H})) \quad (15)$$

对 \mathbf{H} 进行 SVD 分解,得:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (16)$$

则旋转矩阵

$$\mathbf{R} = \mathbf{V}\mathbf{U}^T \quad (17)$$

此时 φ 最大,利用式(17)即可求得平移矩阵 \mathbf{T} 。

在求得满足最小二乘的 \mathbf{R} 与 \mathbf{T} 后,根据该变换矩阵对装配体整体进行刚性变换,通过式(4)即可获得装配

偏差。

3 飞机壁板件装配算例验证

飞机壁板件是机身结构中最常见的装配体,其具有尺寸大、弱刚性、装配精度要求高等特点。由于装配过程中涉及到的零件较多、装配工艺流程复杂,导致预测壁板件的装配偏差难度较大^[6-7]。本节针对壁板件利用有限元软件 Abaqus 及装配体偏差分析软件进行仿真,对比分析装配体下架环节对于装配体偏差分析模型必要性。

在 CATIA 中建立壁板件模型,如图 2 所示。两张蒙皮的理论曲率半径为 1990 mm,实际曲率半径分别为 1995 mm、1980 mm,且该模型不考虑除蒙皮外的零件制造误差。蒙皮、长桁、角片及钣金框的材质均为铝锂合金,材料参数如下:泊松比为 0.33,弹性模量为 $7.3 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,蒙皮、角片厚度为 2 mm,长桁与钣金框厚度为 1.6 mm。下面针对壁板件模型处于释放回弹阶段与下架阶段的装配体偏差进行对比分析。

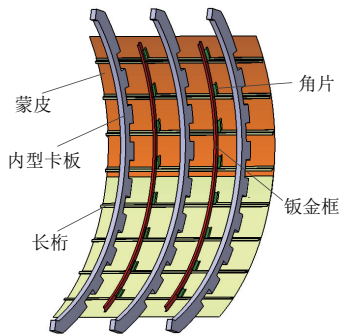


图 2 壁板件结构示意图

将理论数模导入装配体偏差分析软件,并设置壁板件各零件的材料属性,根据表 1 中目标点误差源数据拟合出蒙皮对应的实际数模。随后根据表 2、表 3 对壁板件进行边界条件设计、位移约束设置以及 MPC 绑定,如图 3 所示。

表 1 目标点误差源 单位:mm

目标点	误差源	
	y 轴分量	z 轴分量
e_{11}	-6.07	6.07
e_{12}	-1.83	3.36
e_{13}	-0.78	3.94
e_{14}	-0.52	7.68
e_{21}	-2.54	-3.44
e_{22}	-1.56	-2.10
e_{23}	-0.39	-1.97
e_{24}	0.21	-5.09

在设置完上述约束条件后,通过人为选取采样点和软件分析得到结果如图 4 所示。

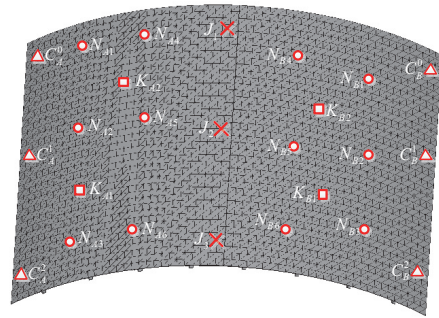


图 3 壁板件约束条件设置模型

表 2 蒙皮过约束定位点初始偏差 单位:mm

A 蒙皮过定位点	N_{A1}	N_{A2}	N_{A3}	N_{A4}	N_{A5}	N_{A6}
初始偏差	12.83	12.83	12.83	6.32	6.32	6.32
B 蒙皮过定位点	N_{B1}	N_{B2}	N_{B3}	N_{B4}	N_{B5}	N_{B6}
初始偏差	5.20	5.20	5.20	3.90	3.90	3.90

表 3 蒙皮装配铆接点初始偏差 单位:mm

铆接点	J_{A1}	J_{A2}	J_{A3}	J_{B1}	J_{B2}	J_{B3}
初始偏差	15.750	15.750	15.750	9.000	9.000	9.000

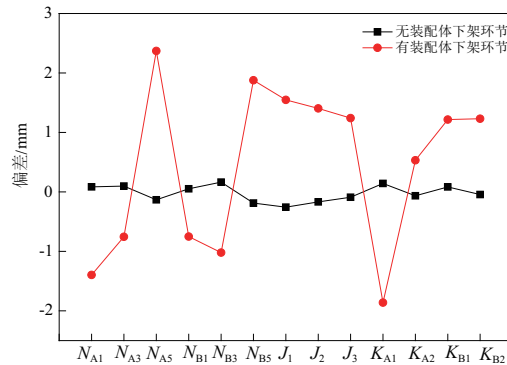


图 4 装配偏差对比折线图

对比图 4 中有、无装配体下架环节对应的折线图可发现,当无装配体下架环节与有装配体下架环节采用相同的参照基准时,最终得到的装配偏差仍具有较大的差别。其原因在于装配体下架阶段时,装配体再次发生了变形,模型中 KPC 点、铆接点及过定位点的相对位置发生了变化,当以确定性定位点作为基准匹配时,对应点处的偏差必然有所差别,这也验证了装配夹具完全释放模拟对于装配偏差分析的重要性。

4 结语

本文首先利用总体刚度矩阵建立柔性件装配偏差分析的力学模型,并通过释放一端确定性定位约束计算装配夹具完全释放后装配体的形状。然后依据装配体刚度大或塑性变形大的部位其回弹变形小的准则确定基准点的 (下转第 39 页)

2.3 拉伸断口形貌

增材结构拉伸断口形貌如图 4 所示。可以看出,有大量韧窝存在,具有明显的微孔聚集型(MVC)韧性断裂特征。当热输入为 10.66 kJ/cm 时,拉伸断口中可以看到大量含有夹杂物的等轴状韧窝;当热输入为 13.34 kJ/cm 时,韧窝分布较细小均匀,韧窝内夹杂物分布较少;当热输入为 15.70 kJ/cm 时,含有大小不均匀韧窝,部分夹杂物颗粒尺寸较大。通过 EDS 能谱分析,夹杂物主要元素为 Fe、O、Cr、Ni、Mn、Si 等元素。夹杂物通常为脆性相,容易产生应力集中而产生裂纹,随后扩展到基体中,最终发生断裂。

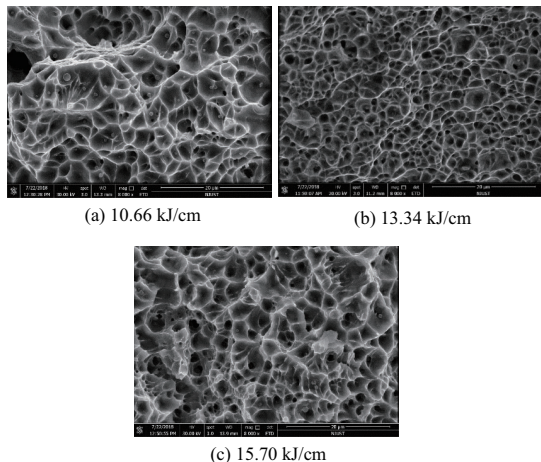


图 4 不同热输入下增材结构的拉伸断口形貌

3 结语

通过 GMAW 焊接技术增材制造 ER130S-G 低合金高

强钢,研究了热输入对增材结构组织和力学性能的影响,得到如下结论:

1) 对于 ER130S-G 低合金高强度钢,增材结构组织可分为受热区和未受热区,受热区组织主要由针状铁素体和粒状贝氏体组成,未受热区主要为粗大的柱状晶。

2) 室温下抗拉强度和断后伸长率均呈先增大后减小的趋势,在热输入为 13.34 kJ/cm 时,针状铁素体含量相对较多,力学性能最佳,拉伸断口均为韧性断口。

参考文献:

- [1] 卢秉恒,李涤尘.增材制造(3D打印)技术发展[J].机械制造与自动化,2013,42(4):1-4.
- [2] MUGHAL M P, FAWAD H, MUFTI R A. Three-dimensional finite-element modelling of deformation in weld-based rapid prototyping[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220(6):875-885.
- [3] 熊俊,薛永刚,陈辉,等.电弧增材制造成形控制技术的研究现状与展望[J].电焊机,2015,45(9):45-50.
- [4] 邹增大,李亚江,尹士科.低合金调质高强度钢焊接及工程应用[M].北京:化学工业出版社,2000.
- [5] 朱宇霆,张克静,蒋勇,等.焊接热输入对低合金高强度钢力学性能及组织的影响[J].机械制造文摘(焊接分册),2017(3):5-9.
- [6] 邓磊,尹孝辉,袁中涛,等.焊接热输入对 800 MPa 级低合金高强度钢焊接接头组织性能的影响[J].热加工工艺,2015(1):36-38.
- [7] 曹睿,冯伟,彭云,等.980 MPa 级高强度钢焊接接头 HAZ 冲击性能的分析[J].焊接学报,2010,31(8):93-96.
- [8] 尚成嘉,胡良均,杨善武,等.低碳微合金钢中针状铁素体的形成与控制[J].金属学报,2005,41(5):471-476.

收稿日期:2019-01-21

(上接第 21 页)

选取原则,通过最小二乘法确定曲面配准的目标函数,并利用 SVD 分解技术求解旋转平移矩阵,进而求解装配体的装配偏差。最后对飞机壁板件进行装配偏差分析,通过对比有、无“装配夹具完全释放”环节下关键点处的装配偏差,验证了装配夹具完全释放模拟对于装配偏差分析的必要性。

参考文献:

- [1] LIU S C, HU S J. An offset finite element model and its applications in predicting sheet metal assembly variation[J]. Machine Tools & Manufacturing. 1995, 35(11):1545-1557.
- [2] 李余兵,陈关龙,来新民,等.柔性件装配概念设计偏差分析系统架构[J].上海交通大学学报,2006,40(12):2070-2074.

- [3] 靳思源,沈利冰,金隼,等.飞机壁板件装配偏差的刚柔混合建模方法与应用[J].机械设计与研究,2013,29(3):58-61.
- [4] 张荣宁.飞机机身壁板件多工位装配偏差分析与建模[D].南京:南京航空航天大学,2016.
- [5] 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.
- [6] 孙辉鹏.飞机壁板类柔性部件的装配偏差分析与预测[D].南京:南京航空航天大学,2015.
- [7] 张媛媛.柔性薄板件装配偏差建模分析及应用研究[D].上海:上海交通大学,2009.

收稿日期:2019-01-17