

引文格式: 王安洋, 王仲奇, 夏松, 等. 基于数字孪生模型的可配置装配偏差分析方法[J]. 航空制造技术, 2021, 64(20): 65-75.

WANG Anyang, WANG Zhongqi, XIA Song, et al. Configurable assembly deviation analysis technology based on digital twin model[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(20): 65-75.

基于数字孪生模型的可配置装配偏差分析方法*

王安洋, 王仲奇, 夏松, 常正平, 马之凯

(西北工业大学, 西安 710072)

[摘要] 飞机产品在实际部装和总装过程中对部件和组件的几何装配准确度有极高的要求, 预测并控制飞机装配精度一直是航空工业持续研究的课题之一。针对数字孪生目前在装配仿真领域的应用, 从几何装配准确度预测角度出发, 提出一种基于数字孪生模型的可配置装配偏差分析方法。将产品离散点云和产品设计模型作为产品孪生模型的几何表达, 使用点云约束配准理论实现零件数字孪生模型装配特征配合的位姿调整, 并根据零件数字孪生模型不同的装配关系, 构建出各类装配关系下配合零件间相对位姿变换矩阵的求解函数, 并构建函数库。在三维尺寸链模型的基础上提出可配置尺寸链模型, 实现尺寸链“即配即算”的快速求解效果。开发了一套可配置装配偏差求解系统, 以某飞机舱门试验件为例, 验证了该方法的有效性。

关键词: 数字孪生模型; 飞机装配; 装配偏差分析; 可配置; 尺寸链

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.20.065



王安洋

博士研究生, 研究方向为飞机先进装配连接技术。

由于飞机要满足飞行速度、机动性、安全性及空气动力学的要求, 在整个飞机产品制造过程中对整机的制造和零部件装配精度提出了严格要求。装配偏差指飞机实际装配完成后, 关键测量尺寸或关键测量特征的实际值相对于理论值的偏移量, 装配偏差的大小是衡量装配准确度的最直接和最重要的指标。研究飞机装配过程中偏差的传递和累积, 预测飞机装配偏差对于保障飞机结构装配准确度、提高飞机生产效率和使用寿命具有重要意义^[1-5]。

传统的偏差分析方法是基于尺寸和角度缺陷建立的偏差模型和理

论, 忽略了零件的形状误差, 因此传统的偏差分析技术无法达到飞机制造高精乃至超精密的精度预测要求^[6-8]。数字孪生(Digital twin)通过数字化的方式创建与物理实体完全一致的虚拟模型, 其中孪生模型的虚体能够反映对应产品的实际状态, 可用于描述真实产品的加工、装配和使用维护等过程要素^[9], 能有效提高装配仿真结果的准确性。因此, 运用孪生数据构建具有真实特征的零件和装配孪生体, 设计适应于数字孪生体的装配偏差分析方法, 对于准确预测产品装配精度, 指导现实零部件的装配行为具有重要意义。

* 基金项目: 国家重点研发计划资助(2020YFB1712503); 国家自然科学基金(51905443); 航空科学基金(ASFC-201916053001); 民用飞机专项科研(MJ-2017-G-68); 陕西省重点研发计划(2020ZDLGY01-04); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JQ-032); 中国博士后科学基金面上项目(2020M673325)。

基于模型的仿真是计算机集成制造的重要内容,而孪生模型的应用意义在于高精度和真实的仿真预测,因此基于孪生模型的装配偏差计算是数字孪生在飞机装配领域的一项重要研究应用^[10-13]。传统偏差计算过程针对实际装配进行装配有向图分析并通过公式计算。对于复杂的装配体,需要进行很多重复性的计算,过程复杂、繁琐且效率低下,缺乏对复杂产品设计知识的组织再利用^[14]。实际上多数企业的产品设计业务存在着功能和知识重复的过程,可配置研究^[15-16]将重用部分记录、存储的知识库以备知识重用,可配置的研究给快速偏差计算提供了借鉴基础。目前,可配置的设计模型应用在软件系统开发、机械产品配置等领域。

近年来,江伟光等^[17]提出一种将扩展与或树和装配有向图相结合的可配置产品结构模型,通过装配有向图来描述装配关系和装配方向。王炳刚等^[18]对可配置制造执行系统进行了研究,设计了装配流程配置过程的数据模型,提出了装配流程配置方法,并且已经在军品装配车间进行了应用,效果良好。黄灿^[19]在飞机自动化装配过程中针对自动钻铆系统提出了组件和参数可配置的控制软件构架,设计了结构化的文件管理系统和配置管理系统,使得集成软件在可配置的基础上达到更高的复用率。Tian等^[20]在平台上集成多个末端执行器,进行了功能扩展,根据末端执行器的功能,可配置出所需的执行指令。传统的装配偏差计算采用齐次坐标变换矩阵的形式进行偏差累积传递,而孪生模型由于装配关系与传统的“基准重合”不同,其偏差分析的每种装配关系可能需要不同的数学模型来表达,偏差传递过程将存在根据装配关系而定制求解的问题。目前可配置技术在装配偏差分析领域的应用还未见报道,本研究将从可配置方法入手,在实际产品的数字孪

生模型基础上提出一种飞机装配偏差的快速计算方法。

孪生模型的几何表达

产品模型是零件信息的载体,零件的制造工艺、制造误差等信息以数字化的形式封装在产品模型中,数字化的产品模型为计算机辅助设计制造提供了技术基础和应用条件。传统的实体模型对于实际生产中的制造缺陷只简单表示为尺寸和角度的误差,忽略了形状误差,已经不能满足高精乃至超精密制造的要求。本研究给出一种表征零件形状误差的孪生模型表达方式,作为偏差分析的模型基础^[21]。

1 点云-肤面模型

肤面模型(Skin model)由新一代GPS给出,其标准定义^[22]为:实际工件与环境之间的接触面构成的表面。从工程设计角度来说,肤面模型是物理表面模型,其相比于设计模型综合考虑了表面形貌的多重几何缺陷,可以更好地模拟物理孪生体的几何特征。然而,从技术角度来说,肤面模型的初始定义指出它是一个由工件与环境接触面构成的连续表面,由无限个点构成的面,如图1所示^[23]。

离散几何的发展使得一些学者

对肤面模型给出一个近似表达,即需要一个有限模型来处理 and 计算肤面模型。Schleich等^[24]提出肤面模型离散化的表达方式,将肤面模型用有限数量的几何参数或离散点云表达,构成SKS(Skin model shapes)。从概念层次上SKS并没有规定特定的数学表达方式,如是基于离散点云还是参数网格,而且它允许在不同尺度考虑几何偏差,从宏观到微观。因此,通过SKS将无限的肤面模型用有限个参数的数学模型表示。本研究拟用实测点云作为物理实体的表面模型,并将点云-肤面模型指定为利用离散点云实现肤面模型表达方式获得的数字化模型。

2 面向装配的产品孪生模型

产品或零件的孪生模型构建框架可参考MBD(Macrobloc design)模型,在此基础上给予一定的改进和替换。MBD技术是在一个集成的三维数字化实体模型中表达了完整的产品定义信息,包括几何模型、公差信息、工艺设计信息等,在产品预研阶段发挥了巨大作用。在MBD模型框架的基础上,本研究给出一种适用于面向装配的孪生模型框架。孪生模型构成包括:(1)必要的设计模型信息。设计阶段的几何实体模型。

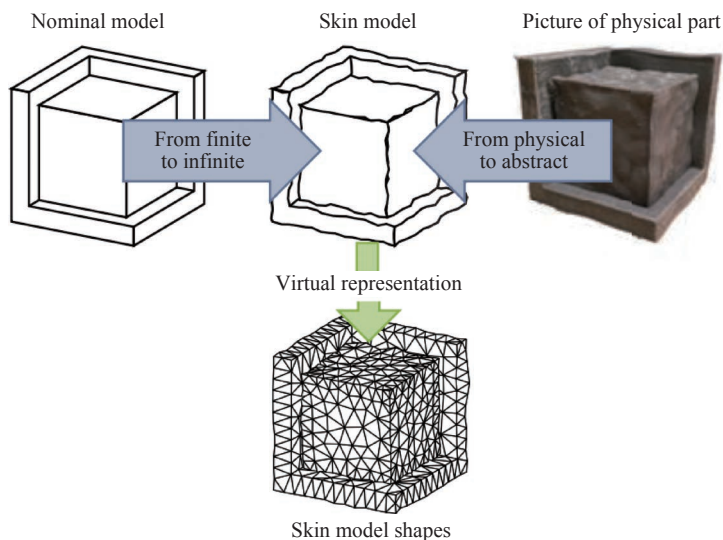


图1 肤面模型表达概念图
Fig.1 Expression concept map of skin model

(2) 物理实体映射到数字空间的几何信息。这里指经过后处理得到的肤面模型。(3) 工艺信息。设计基准、装配工艺信息、装配尺寸链传递路线等。(4) 模型融合后处理信息。制造偏差信息,为装配偏差分析提供数据基础。

面向装配偏差分析的孪生模型信息主要集中在几何方面的映射,将针对点云-肤面模型构建过程具体分析,点云-肤面模型的构建过程如图2所示。首先,分析零件特点,确定零件的关键特征,如装配特征和关键测量点等;其次,通过扫描仪获取关键特征面的三维点云数据;再次,对点云数据预处理,如去噪、滤波、插值处理;最后,将符合要求的点云数据与设计模型融合配准,完成建模过程。现阶段对于点云的处理操作相对成熟,尤其在大量离散数据的特征识别、模型构造和配准方面^[25]。下文基于部分学者的结论给出点云-肤面模型构建方面的具体应用过程。

2.1 确定关键特征

面向装配的孪生模型,其关键特征主要分为装配特征面和关键功能特性。图3显示某飞机舱门的定位挡销,其关键特征包括与舱门边框配合的配合面和定位孔,以及影响舱门开启力性能指标的末端触头圆心的位置。

2.2 扫描取点

根据实测对象的特点选用合适的点云3D扫描工具,目前飞机制造行业中扫描仪器的精度已经达到了非常高的水平。通过设定扫描步长和频率可以获得符合要求的点云数据。

2.3 过滤和拟合

去噪是为了剔除测量误差明显超差的点,该操作由软件完成。实际上由高分辨相机测得的庞大点云数据在保证几何信息充分的情况下,给后续的数学计算带来了困难。分布均匀的点云数据能较好地表达特征信息,因此将点云密度降低的任务由过滤操作来处理。本研究采用的过

滤算法为“半径过滤器”,其原理如图4所示,是以一点为圆心画球,并定义球的半径,处在球内部的点将被剔除,如此循环迭代所有点,使得最终点的疏密程度一致,完成点云的预处理工作。本研究针对不同的几何表面给出分类处理的规范过滤操作。

(1) 平面类特征。

为了较好地表征平面类特征的微观形貌,将配合表面离散化 $m \times n$

特征网格单元,网格单元均为边长为 Δ 的正方形,取网格单元角点处实测点组成表面的替代点云,参与后面的计算。同理,如图5所示,由于点云十分密集,可近乎认定布满了整个平面,同样可将点云进行球半径过滤,指定半径为 0.5Δ ,则可以获得点距为 Δ 的离散化点云。因为扫描出的点云为方阵排列,故而设定点与点之间固定距离 Δ 构成的点云作为点云-肤面

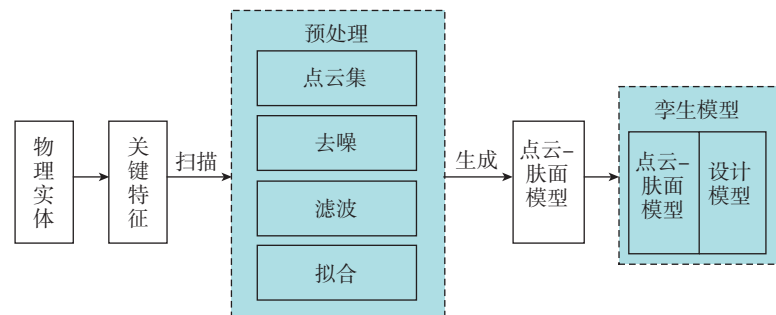


图2 点云-肤面模型构建过程

Fig.2 Construction process of point cloud-skin model

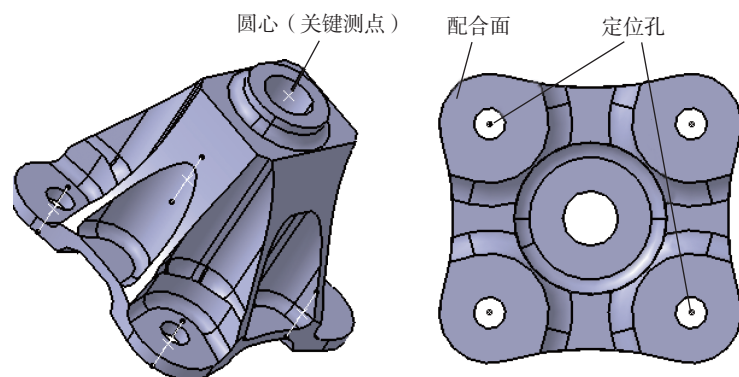


图3 飞机舱门零件关键特征

Fig.3 Key characteristics of aircraft door parts

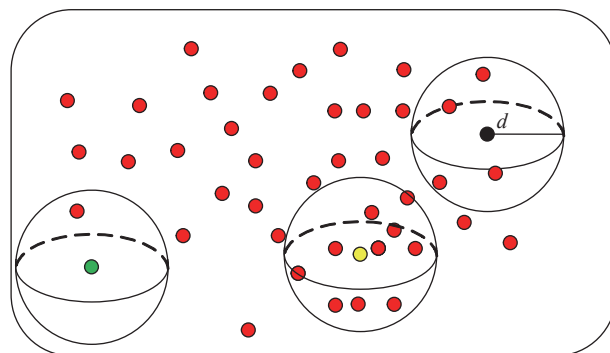


图4 半径过滤器原理

Fig.4 Principle of radius filter

模型的规范化处理结果。

(2) 长轴孔类特征。

针对轴、孔类要素,很明显其关键特征是限定轴孔位置的轴线。针对轴孔的处理可采用分层法,将一个长轴按等高 h 切成一个个小圆柱,取每个横截面的几何中心,即构成该轴轴线的离散几何元素,如图 6 所示。

对于实测点云而言,同样采用截面法,如图 7 所示,沿着轴线方向以等高 h 间距的一组等距面截取,针对每个截面上的点云,其截面是由有限个点云组成的一个近似圆,而近似圆的圆心可由最小二乘法拟合得到。

(3) 回转体特征。

对于如图 8 所示的一般的回转体特征表面,规定其点云的规范化处理方式:以一组等高截面截取点

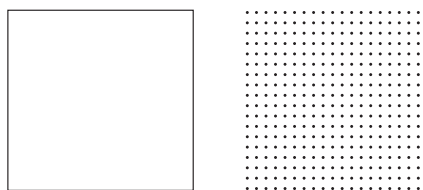


图 5 平面类特征规范化处理

Fig.5 Plane feature normalization processing

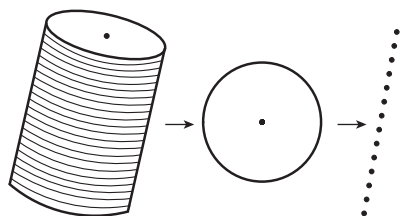


图 6 轴孔特征的分层法

Fig.6 Layered method for shaft hole characteristics

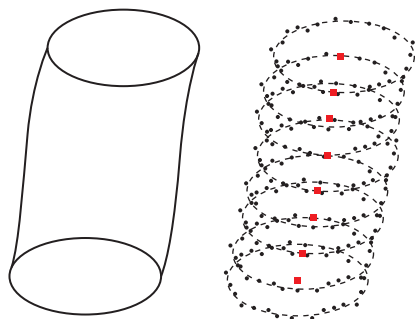


图 7 轴孔类特征处理效果

Fig.7 Processing effect of shaft hole type features

云拟合圆心,各截面圆心构成离散轴线,局部坐标系下点云坐标三维坐标从上至下排序。

装配函数库

1 孪生模型的装配分析

由数字孪生模型可知,相邻零件装配过程实际上是参与接触的装配特征表面点云配准过程。如图 9 所示,参与装配的表面 f_1 、 f_2 ,其设计模型对应的配合位置是局部坐标系的重合处,显然在局部坐标系重合下两表面的规范化点云并未达到“配合”的条件。

这里假设 f_1 是定位件表面, f_2 为被定位件表面。“配合过程”为: f_1 保持空间位置固定, f_2 沿着局部坐标系的六自由度作微调整,刚体调整位姿的六自由度,用一个六维向量 t 表示:

$$t = [d_x, d_y, d_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z] \quad (1)$$

其中, d_x, d_y, d_z 表示表面 f_2 分别沿着 x, y, z 轴的刚体位移,而 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 是分别沿着各轴的刚体旋转旋量。

这里设表面 f_1 上的某一离散点 p_1 写成齐次矩阵的形式,即:

$$p_1 = [x_{11}, y_{11}, z_{11}, 1] \quad (2)$$

则表面 f_1 的所有规范化点云构

成矩阵 P_1 :

$$P_1 = \begin{bmatrix} x_{11} & y_{11} & z_{11} & 1 \\ x_{12} & y_{12} & z_{12} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{1n} & y_{1n} & z_{1n} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

同理,表面 f_2 的规范化点云构成点云集矩阵 P_2 :

$$P_2 = \begin{bmatrix} x_{21} & y_{21} & z_{21} & 1 \\ x_{22} & y_{22} & z_{22} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{2n} & y_{2n} & z_{2n} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由空间齐次坐标变换点云集 P_2 ,按照六自由度 $t = [d_x, d_y, d_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z]$ 变换,其 x, y, z 各轴变换矩阵分别为:

$$T_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x & 0 \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T_z = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

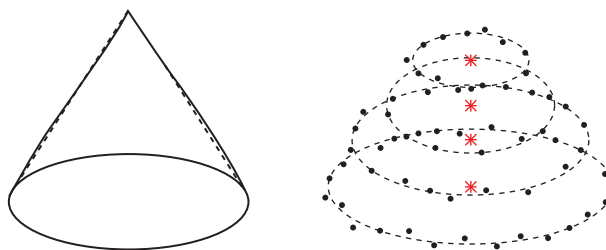


图 8 回转体特征规范化处理

Fig.8 Revolved body feature normalization processing

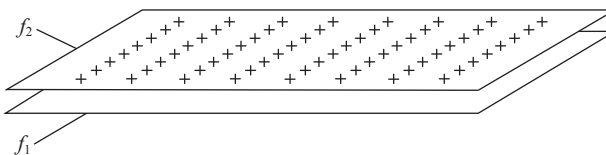


图 9 参与装配的表面

Fig.9 Surface involved in assembly

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

则整体的位姿变换矩阵为:

$$H = T \times T_x \times T_y \times T_z \quad (9)$$

从数学上表示“配合”准则: 两片点云的对应点距离最小, 例如 $\min \|H \times P_1^T - P_2^T\|_2$, 由于装配关系不同, 其数学表达略有差别, 这里以抽象函数表示:

$$\min f = f(P_1, P_2) \quad (10)$$

同时, 根据实际装配情况, 需考虑数学模型的约束条件, 如不能发生几何体渗透、孔轴的间隙配合和过盈配合等。式(10)添加约束条件情况下, 构成一个有约束的非线性优化问题:

$$\begin{cases} \min f = f(P_1, P_2) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \text{cons}(H) = 0 \\ \text{cons}(H) < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

上述优化目标和约束条件根据不同的装配关系具有不同的表示, 如长孔-轴配合关系是一个无约束非线性优化问题, 因此没有约束条件; 而面-面配合是有约束非线性优化问题, 面面贴合装配关系, 要求参与装配的两个几何体之间不存在空间上的干涉, 映射到孪生模型上, 表示为其配合点云之间不存在互相渗透的情况, 对应于数学上, 即表示为对应点坐标值差沿法向方向值不小于0, 数学表达式为:

$$\min((H \times P_2^T - P_1^T) \times \vec{n}) \geq 0 \quad (12)$$

式中, $\vec{n} = (0 \ 0 \ 1 \ 0)^T$, 表示法向(Z向)坐标最小值不小于0。式(11)可直接解出位姿变换矩阵H, 将式(11)规范化点云约束配准问题定义为孪生模型装配关系数学模型。式(11)表示一个典型的非线性优化问题。解决非线性优化问题的方法有很多, 其中无约束优化算法包括模式搜索、Powell 搜索法等直接搜索, 还

有梯度下降、牛顿迭代法等通过导数计算; 而有约束算法包括 Rosen 梯度投影、罚函数法等。

2 装配关系函数

式(11)计算目的是通过规范化点云 P_1 、 P_2 解出位姿变换矩阵H, 这里定义装配关系函数是根据孪生模型的规范化点云计算出相对位姿变换矩阵的过程:

$$H = h(P_1, P_2) \quad (13)$$

函数具体数学表达式将由具体的装配关系确定, 其非线性优化问题的求解方法也会不同, 显然, 基于孪生模型的装配关系函数求解是分类解决问题, 为了实现知识重用, 将根据不同的装配关系分析其求解方法, 并写成函数库, 这是一个知识重用的过程。函数库的创建如图10所示。

可配置尺寸链模型及偏差分析

本节所提出的可配置尺寸链模型实际上是由装配有向图转换而来, 如图11所示^[26], 一个装配体的装配有向图包括构成装配体的零件, 以及零件

之间的装配关系和装配顺序^[27-28]。装配有向图的提出和应用清晰地表达了装配体内部零件之间的定位关系, 由此可以方便地进行偏差传递分析及后续计算, 其中, $d\theta$ 为角度变量。

1 可配置尺寸链模型

取图11中装配体的某一条特定尺寸传递过程, 将构成单个组件的装配有向图, 由于该图单个节点最多只有一个前驱节点和一个后继节点, 因此在尺寸链传递模型中, 装配有向图实际上就是一个单向链表。在单向链表的基础上增加一个装配关系函数库, 即构成如图12所示的可配置尺寸链模型, 本研究定义可配置尺寸链模型为一个三元组。

(1) 组成环。Part 是构成尺寸链的所有节点的几何, 这里的每个节点在尺寸链传递中命名为组成环, 也就是配置出特定某条尺寸传递路线上的所有零件数据集合, 这里的零件也包括参与偏差传递定位工装。针对节点集合 $\text{Part}\{\text{part}_0, \text{part}_1, \text{part}_2, \dots, \text{part}_n\}$, 约定 $\text{part}_0, \text{part}_1, \text{part}_2, \dots, \text{part}_n$ 是按照装配顺序存储在集合 Part 中。

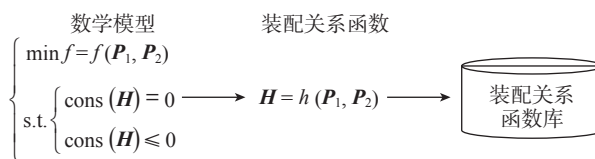


图10 创建装配关系函数库
Fig.10 Creating an assembly library

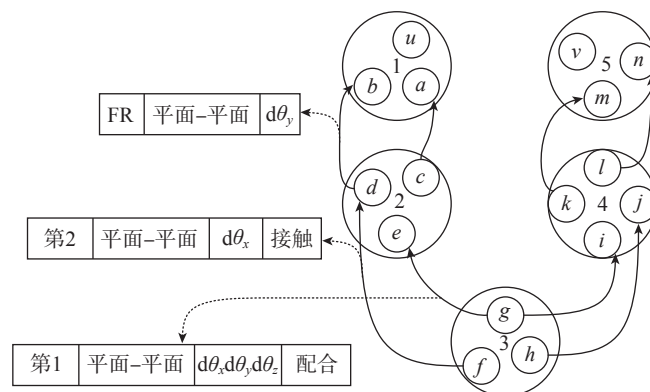


图11 装配有向图
Fig.11 Assembly directed graph

组成环是进行装配偏差计算的数据基础,提供了每个零件的制造偏差,为了实现可配置偏差求解,组成环的数据格式需要规范统一,后文将重点给出组成环的规范化定义。

(2) 多个零件组成环装配关系计算。Relation={relation₀, relation₁, relation₂, ..., relation_{n-1}} ,表示各组成环之间装配关系构成的集合。Relation 集合中,其中元素 relation_i 表示可配置三维尺寸链的第 i 个装配关系类型,具体可以用 relation_i (part_i, part_{i+1}) 表示,其装配方向为 part_i-part_{i+1},装配过程为零件 part_{i+1} 经过坐标变换以装配关系 relation_i 的准则与 part_i 完成配合。

(3) 计算库。H_Relation={h₁, h₂, h₃, ..., h_m} 集合中每个元素表示不同装配关系下孪生模型的装配准则,具体表现为:

$$H_i = h_i(P_i, P_{i+1}) \quad (14)$$

其中, P_i, P_{i+1} 表示配合的两个零件孪生模型装配接口点云数据,计算的返回值按照配置的装配关系,两零件完成配合后,零件 P_{i+1} 相对零件 P_i 发生相对位姿变换构成的位姿变换矩阵 H。

对于孪生模型,不同的装配关系下装配位姿求解思路会有不同。因此,计算库目的是适应不同的装配关系,将计算过程构成函数库,在配置出的尺寸链模型中选择调用对应的函数,实现尺寸链快速计算,大大提高偏差分析的效率。

2 尺寸链组成环定义

为便于描述如图 13 所示的装配实例,装配体的 3 个零件按照零件 A、B、C 顺序装配,以零件 B 为例,约定:零件 B 上与零件 A 构成装配关系的接口称为头部装配特征;零件 B 上定位零件 C 的装配接口称为尾部装配特征。

与传统组成环概念不同,在可配置的尺寸链中组成环是指参与偏差传递的各个零件的尺寸信息,规范化的组成环是该节点信息的数据

表达形式,在数据存储形式上以结构体的形式存在,组成环信息如图 14 所示。下面分别对 4 部分数据进行定义描述。

(1) 头部装配特征。

组成环的头部装配特征是该组成环零件头部装配特征的点云坐标:

$$\begin{bmatrix} x_{01} & y_{01} & z_{01} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{0n} & y_{0n} & z_{0n} \end{bmatrix},$$

坐标系为头部局部坐标系,指定局部坐标系下的点云坐标。图 15 表示头部坐标系和尾部坐标系。

为方便计算,一般将规范化组成环里的头部装配特征的数学形式改为齐次矩阵,为:

$$S_1 = \begin{bmatrix} x_{01} & y_{01} & z_{01} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{0n} & y_{0n} & z_{0n} & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

(2) 尾部装配特征。

类似地组成环的尾部装配特征指该组成环上零件尾部装配特征点云坐标,其数学表达式为:

$$S_2 = \begin{bmatrix} x_{11} & y_{11} & z_{11} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{1n} & y_{1n} & z_{1n} & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

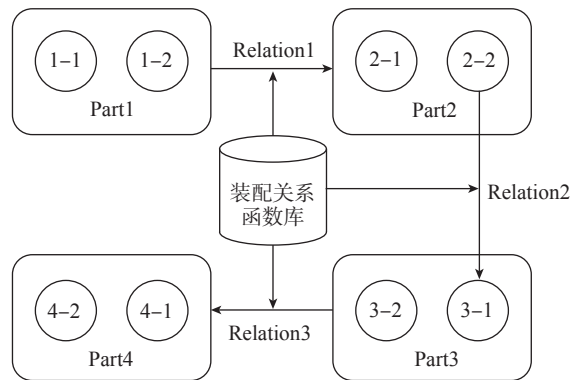


图 12 可配置尺寸链模型

Fig.12 Configurable dimensional chain model

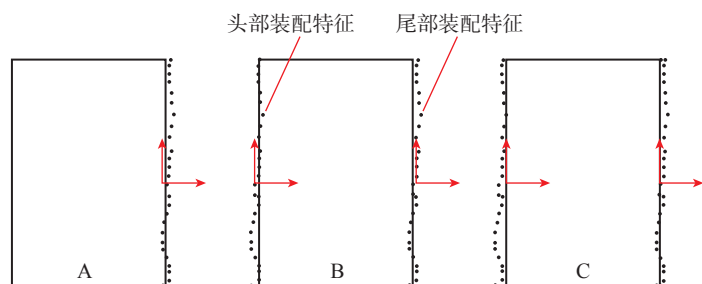


图 13 装配实例

Fig.13 Assembly instance

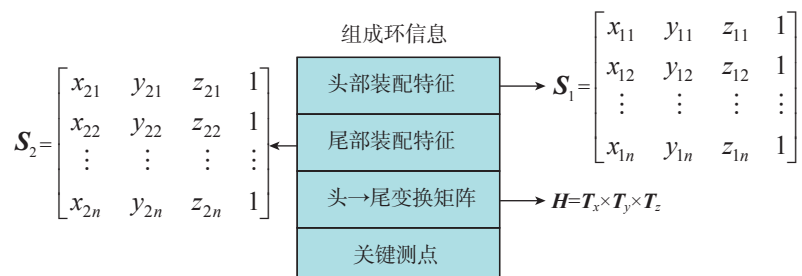


图 14 组成环信息

Fig.14 Constituent ring information

(3) 头部→尾部变换矩阵。

组成环的头部→尾部变换矩阵指该节点零件的头部到尾部的局部坐标系转换矩阵,该矩阵值由设计模型得到,头部坐标系和尾部坐标系之间的关系如图 16 所示。

当组成环为配置的尺寸链上第 1 个组成环,它不存在头部装配特征,不能按照中间位置组成环的原则定义头→尾变换矩阵,在这种情况下,默认头部坐标系与全局坐标系重合,定义全局坐标系→尾部坐标系的齐次坐标变换矩阵为尺寸链上第 1 个节点的头→尾变换矩阵。

$$T = T_{\text{全局} \rightarrow \text{尾}} \quad (17)$$

当组成环位于最后一个节点位置时,头→尾变换矩阵直接定义为空,即 $T = \text{NULL}$ 。

(4) 关键测量点。

如图 17 所示,在头部坐标系下理论模型的一个关键测量点坐标为 $P_1 = [x_1, y_1, z_1]$,实测数据构建的孪生模型下关键测量点的坐标为 $P_1' = [x_1', y_1', z_1']$,在三维空间上,将关键测量点的坐标增加一维转换为四维齐次向量:

$$P_1 = [x_1, y_1, z_1, 1]$$

$$P_1' = [x_1', y_1', z_1', 1] \quad (18)$$

当配置的尺寸链上同一个组成环上的关键测量点不止一个时,则构成表示关键测点的两个矩阵,即理论模型关键测点坐标集 P_i 和孪生模型关键测量点坐标集 P_i' :

$$P_i = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 1 \\ x_n & y_n & z_n & 1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$P_i' = \begin{bmatrix} x_1' & y_1' & z_1' & 1 \\ x_2' & y_2' & z_2' & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 1 \\ x_n' & y_n' & z_n' & 1 \end{bmatrix}$$

上述两个矩阵构成的分块矩阵 P_U ,表示规范化组成环的关键测量点数学模型:

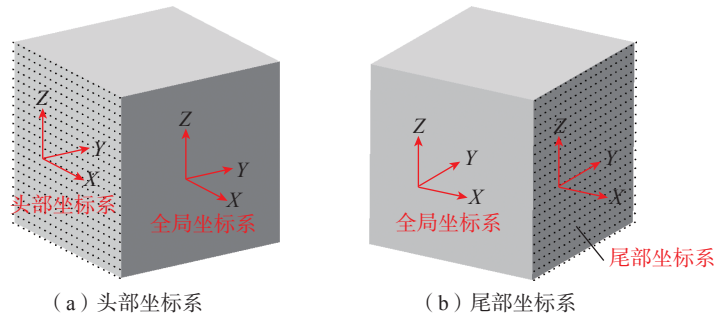


图 15 头部坐标系和尾部坐标系

Fig.15 Head coordinate system and tail coordinate system

$$P_U = \begin{bmatrix} P_i \\ P_i' \end{bmatrix} \quad (20)$$

3 可配置尺寸链的偏差计算方法

图 18 为零件 A、B、C 的装配过程,最终形成装配体 [ABC],配置尺寸链的装配偏差快速计算方法主要有以下 3 步。

(1) 配置组成环信息。

在配置的上述尺寸链中,定义零件 A、B、C 的组成环分别为 $part_A$ 、 $part_B$ 、 $part_C$,根据上文组成环的规范化定义,各组成环的信息如表 1 所示。

(2) 配置装配关系类型。

不同零件之间装配关系构成的集合表示为 $\text{Relation} = \{\text{relation}_{A-B}, \text{relation}_{B-C}\}$,集合 Relation 中 relation_{A-B} 、 relation_{B-C} 分别为组成环 $part_A$ 与 $part_B$ 、 $part_B$ 与 $part_C$ 之间的装配关系,需要用户指定。

(3) 调用函数库进行计算。

函数库作为实现搭建完成的基础计算库,其作为核心算力通过点云配准求解出零件孪生模型之间的相对位姿矩阵。调用函数库的过程,遍历函数库找到与装配关系 relation_{A-B} 、 relation_{B-C} 对应的装配关系函数。假设两个装配函数分别为 $f_{A-B}(P_1, P_2)$ 、 $f_{B-C}(P_1, P_2)$,其中, E 为单位矩阵,根据坐标齐次变换原理,可求得各关键测量点的坐标位置偏差。

若组成环 B 上存在测量点,即 $P_{UB} \neq \text{NULL}$,根据齐次坐标变换:

$$\Delta P_B = T_A \cdot f_{A-B}(S_{2A}, S_{1B}) \cdot P_B' - T_A \cdot E \cdot P_B \quad (21)$$

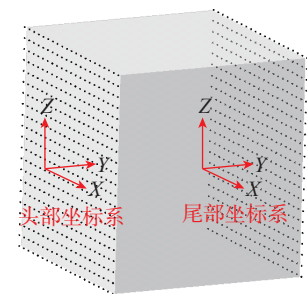


图 16 头部坐标系和尾部坐标系关系

Fig.16 Relationship between head coordinate system and tail coordinate system

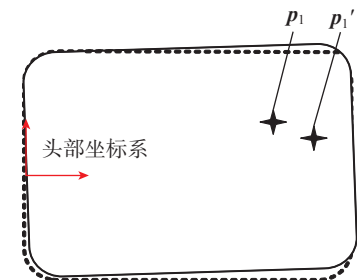


图 17 理论模型与孪生模型关键点的测量

Fig.17 Measurement of key points of theoretical model and twin model

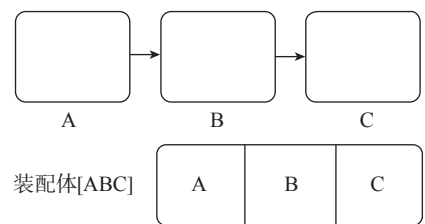


图 18 零件装配过程

Fig.18 Assembly process of parts

若不存在测量点,则无须计算。

若组成环 C 上存在测量点,即

$P_{UC} \neq \text{NULL}$,根据齐次坐标变换:

表 1 各组成环信息
Table 1 Each component ring information

组成环	头部转配特征	尾部装配特征	头→尾变换矩阵	关键测量点
part _A	S _{1A} =NULL	S _{2A}	T _A	$P_{UA} = \begin{bmatrix} P_A \\ P'_A \end{bmatrix}$
part _B	S _{1B}	S _{2B}	T _B	$P_{UB} = \begin{bmatrix} P_B \\ P'_B \end{bmatrix}$
part _C	S _{1C}	S _{2C} =NULL	T _C	$P_{UC} = \begin{bmatrix} P_C \\ P'_C \end{bmatrix}$

$$\Delta P_C = T_A \cdot f_{A-B}(S_{2A}, S_{1B}) \cdot T_B \cdot f_{B-C}(S_{2B}, S_{1C}) \cdot P'_C - T_A \cdot E \cdot T_B \cdot E \cdot P_C \quad (22)$$

若不存在测量点,则无须计算。

由上,可配置的尺寸链模型中,只要根据实际装配工况配置出组成环的数量、顺序和相邻环间的装配关系,计算的部分直接交给配置尺寸链模型里强大而丰富的装配关系函数库,可立即计算得到装配体的装配偏差。

系统的实现与应用

1 应用流程

本研究给出了基于孪生模型的装配偏差可配置求解的基本过程。图 19 在完成制造零件的孪生模型构建工作前提下,通过模型文件接口,导出可配置尺寸链模型指定的规范化组成环信息;再通过分析实际装配体的尺寸传递路线,配置出尺寸链上节点数目和具体节点对象,指定相邻节点的装配关系,完成尺寸链配置工作;按照配置计算的规则调用装配关系函数库的对应函数,即可完成装配偏差的快速计算。

2 系统实现

为了实现尺寸链配置求解的功能,以 QT5 为界面框架,借助矩阵开源库 Eigen 完成矩阵的基础计算。开发了一套装配偏差可配置计算系统,用户在系统界面上可通过交互的方式实现尺寸链的配置过程,随后单击【配置计算】按钮,即可快速计算

装配偏差,如图 20 所示。

第 1 步:单击【新建零件】按钮,界面的下方将显示零件框图,每单击一次,将建立一个零件框图,见图 21。

第 2 步:手动添加零件,并下拉显示装配关系,选择正确的装配关系,见图 22。

第 3 步:单击【加载】按钮,弹出文件选择对话框,选中预先设置好的零件组成环信息“*.xlsx”文件。零件

信息添加完成后,接下来单击【配置计算】即可完成装配偏差的配置计算。

3 实例验证

图 23 为一简易飞机舱门试验件及其装配工装的示意图,舱门的结构主要由 7 类总计 17 个零件组成,除蒙皮外其余的零件均为机加件,因此可以忽略装配过程中连接变形对装配偏差预测精度的影响,该舱门的装配工艺过程主要有以下 6 步。

(1)使用工装定位块以及卡板对蒙皮进行定位,定位方式为 N-2-1 定位。

(2)使用数控定位器对移动边框进行定位与连接。

(3)以移动边框和蒙皮为定位基准,定位连接 4 根梁。

(4)使用固定边框定位器,定位连接固定边框。

(5)角片连接隔板与梁。

(6)在固定边框与 4 根梁之间添加垫片工艺补偿,填充缝隙。

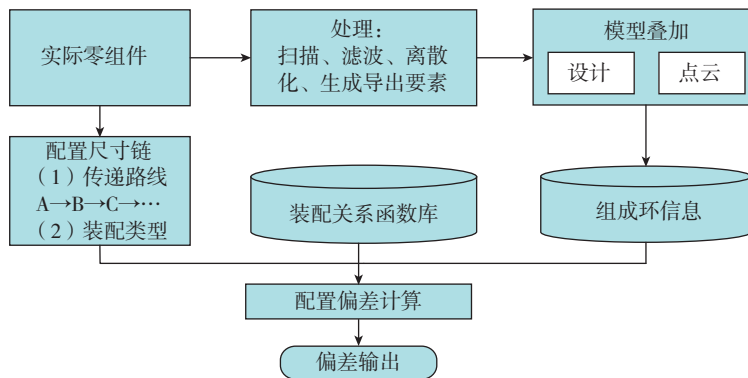


图 19 基于孪生模型的装配偏差配置求解过程

Fig.19 Assembly deviation configuration solution process based on twin model

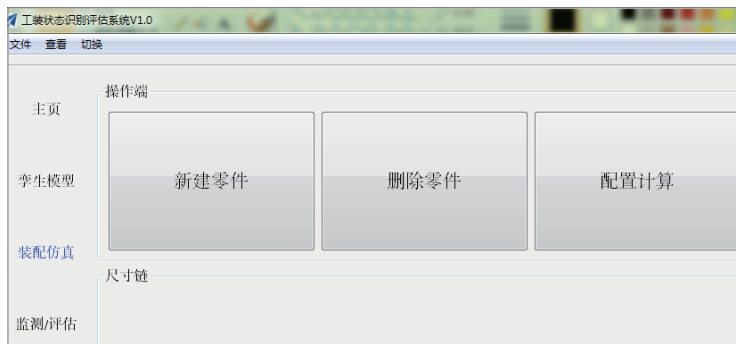


图 20 尺寸链的配置过程

Fig.20 Configuration process of dimension chain

其中舱门四周存在4个锁点作为与机身直接接触的零件,并在舱门打开和关闭的过程中锁点沿着门框上导向槽滑动实现舱门的开合,其位置准确度是影响舱门开启力的重要因素。以舱门锁点的位置装配偏差求解为对象,如图24所示,以其中1条尺寸链传递路线:数控定位器→移动边框→锁点1的尺寸链配置为例。

针对锁点1位置的装配偏差其尺寸链配置和偏差计算过程如下。

(1) 导出零件数字孪生模型的组成环信息。即定位工装调整边框,锁点1的孪生模型用于可配置偏差计算的点云数据和坐标转换矩阵等。图25为目标尺寸链上零件和工装的孪生模型。

在CATIA V5的Digital shape editor模块,选择对应的局部坐标系可将点云坐标输出,最终导出的其中一环,定位工装的孪生模型组成环信息如下。

头部装配特征: NULL;
尾部装配特征:

$$\begin{bmatrix} -27.3080 & 2.9820 & 0.1326 & 1 \\ -27.3024 & 1.9592 & 0.2943 & 1 \\ -27.3024 & 0.9361 & 0.1409 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix};$$



图21 添加需装配的零件

Fig.21 Adding parts to be assembled

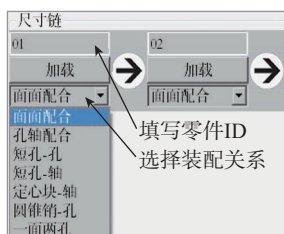


图22 设置零件之间的装配关系

Fig.22 Setting assembly relationships of parts

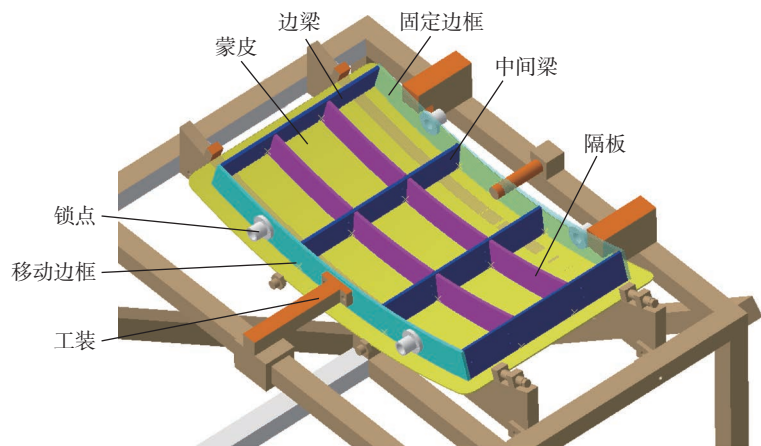


图23 舱门试验件及其装配工装的示意图

Fig.23 Diagram of hatch door test piece and its assembly tooling

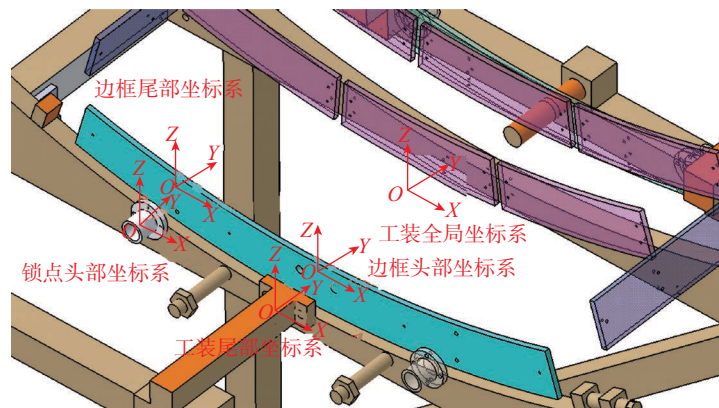
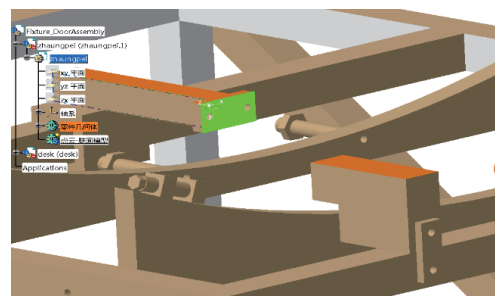
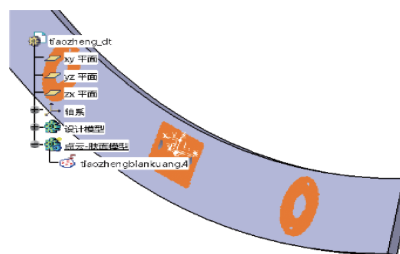


图24 舱门锁点位置装配偏差求解

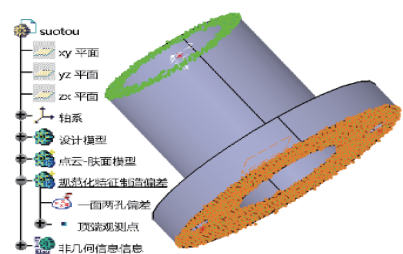
Fig.24 Solution of assembly deviation of hatch lock position



(a) 定位工装



(b) 调整边框



(c) 锁点1

图25 尺寸链上各零件孪生模型

Fig.25 Twin model of each part on dimension chain

头尾变换矩阵:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -95 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

关键测量点: NULL。

将上述组成环信息按照 Sheet1~Sheet4 依次写入一个 Excel 表中,类似地完成 3 个组成环信息文件的创建。

(2) 配置尺寸链。开发的软件系统按照工装→调整边框→锁点 1 的顺序配置尺寸链。按实际装配工况,各相邻环之间的装配关系均为一面两孔,并加载对应的组成环文件,在系统界面上交互式配置出如图 26 所示的尺寸链。

(3) 配置计算。开发的软件系统按照实例完成尺寸链配置,启动配置计算,得到如图 27 的结果,计算表明锁点 1 的圆心位置装配偏差在 3 个坐标方向分别为 0.29741、-0.01022, -0.00497。

结论

装配偏差计算是飞机装配仿真几何准确度预测的一项重要内容,也是保障飞机产品装配准确度的技术前提。传统的偏差分析忽略了零件表面的形状误差,仅仅是针对制造偏差信息进行建模,研究装配偏差的传递机理,这已经不能满足现阶段飞机制造的需求,需要更加深入地考虑飞



图 26 尺寸链配置

Fig.26 Dimension chain configuration

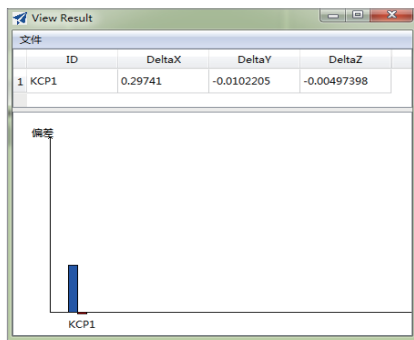


图 27 装配偏差计算结果

Fig.27 Calculation results of assembly deviation

机零件几何误差,才能进行更加精准的装配偏差求解。

(1) 用离散化的点云作为表征零件物理实体表面曲面模型的数字化表达,为基于孪生模型仿真研究提供了模型构建的基础。

(2) 影响装配准确度的偏差计算是由物理实体的表面决定的,本研究着重分析了数字孪生模型装配的特点,从点云配准的角度模拟了零件孪生模型的装配过程,针对不同的零件装配关系给出实际装配关系函数,为装配偏差的计算提供基础“算力”。

(3) 根据开发的可配置装配偏差求解软件系统完成尺寸链配置,以某飞机舱门试验件为例,计算得到了不同方向上的偏差计算结果,对该方法的有效性进行了验证。

参考文献

[1] 何胜强. 大型飞机数字化装配技术与装备[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.

[2] HE Shengqiang. Digital assembly technology and equipment for large aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013.

[2] 范玉青. 现代飞机制造技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.

[3] FAN Yuqing. Modern aircraft manufacturing techniques[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2001.

[3] 王仲奇, 杨元. 飞机装配的数字化与智能化[J]. 航空制造技术, 2016, 59(5): 36-41.

[4] WANG Zhongqi, YANG Yuan. Digitization and intellectuality of aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(5): 36-41.

[4] 张开富. 飞机部件装配误差累积分析与容差优化方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.

[5] ZHANG Kaifu. Assembly error stack-up analysis and optimum tolerancing for aircraft assembly[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.

[5] 李原, 程云勇, 杨海成, 等. 面向飞机装配的容差及尺寸链建模[C]//2001年“面向21世纪的生产工程”学术会议暨企业生产工程与产品创新专题研讨会论文集, 广州: 中国机械工程学会, 2001.

[6] LI Yuan, CHENG Yunyong, YANG Haicheng, et al. Modeling of tolerance and dimensional chain for aircraft assembly[C]//2001

"Production Engineering for the 21st Century" Academic Conference: Enterprise Production Engineering and Product Innovation Symposium. Guangzhou: Chinese Mechanical Engineering Society, 2001.

[6] 侯东旭. 飞机柔性零件装配偏差的统计分析技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

[7] HOU Dongxu. Research on statistical dimensional deviation analysis for aircraft compliant parts assembly[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[7] 苏成阳. 飞机柔性零件装配偏差分析系统研究与开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

[8] SU Chengyang. Research and development of aircraft flexible assembly deviation analysis system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[8] 杨浩然, 安鲁陵, 黎雪婷. 飞机结构中柔性件装配偏差分析与控制研究进展[J]. 航空制造技术, 2021, 64(4): 30-37.

[9] YANG Haoran, AN Luling, LI Xueting. Research progress on analysis and control of assembly deviation of flexible parts in aircraft structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(4): 30-37.

[9] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753-768.

[10] ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753-768.

[10] 周石恩. 基于数字孪生的复杂产品装配建模与精度分析方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.

[11] ZHOU Shien. Assembly modeling and accuracy analysis method of complex product based on digital twin[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

[11] CAPUTO F, GRECO A, FERA M, et al. Digital twins to enhance the integration of ergonomics in the workplace design[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2019, 71: 20-31.

[12] ZHAO D, WANG G, GUO W, et al. An integrated framework for aircraft digital assembly coordination design and simulation[J]. Procedia CIRP, 2019, 83: 330-334.

[13] 陶永, 高赫, 王田苗, 等. 移动工业机器人在飞机装配生产线中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(5): 32-41, 67.

[13] TAO Yong, GAO He, WANG Tianmiao, et al. Application of mobile industrial robot in aircraft assembly production line[J]. Aeronautical

Manufacturing Technology, 2021, 64(5): 32–41, 67.

[14] 王建, 黎荣, 武浩远, 等. 按单设计型复杂产品的配置设计技术综述[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(2): 410–425.

WANG Jian, LI Rong, WU Haoyuan, et al. Review of configuration design for complicated engineer-to-order products[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(2): 410–425.

[15] ROSEMANN M, ASLST W. A configurable reference modelling language[J]. Information Systems, 2007, 32(1): 1–23.

[16] GERTH C. Business process models: Change management[M]. Berlin: Springer, 2013.

[17] 江伟光, 武建伟, 潘双夏. 支持变型设计的可配置产品结构模型[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(5): 849–854, 903.

JIANG Weiguang, WU Jianwei, PAN Shuangxia. Configurable product structure model for variant design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(5): 849–854, 903.

[18] 王炳刚, 周伟, 饶运清, 等. 装配流程可配置的制造执行系统的研究与应用[J]. 现代制造工程, 2007(11): 8–12.

WANG Binggang, ZHOU Wei, RAO Yunqing, et al. Research and implication of assembly process flow reconfigurable manufacturing execution system[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2007(11): 8–12.

[19] 黄灿. 组件和参数可配置的自动钻铆集成控制软件设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.

HUANG Can. Design of Integrated control software for automatic drilling and riveting with configuration components and parameters[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[20] TIAN C X, ZHANG D. A new family of generalized parallel manipulators with configurable moving platforms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 153: 103997.

[21] 张冰, 李欣, 万欣欣. 从数字孪生到数字工程建模仿真迈入新时代[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 369–376.

ZHANG Bing, LI Xin, WAN Xinxin. From digital twin to digital engineering modeling and simulation entering a new era[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 369–376.

[22] DANTAN J Y, BALLU A, MATHIEU L. Geometrical product specifications: Model for product life cycle[M]. Butterworth-Heinemann, 2008.

[23] 蒋为群, 郭伟, 蒋为军, 等. 第二代 GPS (Geometrical product specification and verification) 标准与计量体系中的不确定度管理[J]. 水电站设计, 2006(3): 60–64.

JIANG Weiqun, GUO Wei, JIANG Weijun. The second generation of GPS (Geometrical product specification and verification) standard and uncertainty of measurement system[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2006(3): 60–64.

[24] SCHLEICH B, ANWER N, MATHIEU L, et al. Skin model shapes: A new paradigm shift

for geometric variations modelling in mechanical engineering[J]. Computer-Aided Design, 2014, 50: 1–15.

[25] SUN X, BAO J, LI J, et al. A digital twin driven approach for the assembly-commissioning of high precision products[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61: 101839.

[26] 杨将新, 徐旭松, 曹衍龙, 等. 基于装配定位约束的功能公差规范设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 1–8.

YANG Jiangxin, XU Xusong, CAO Yanlong, et al. Functional tolerance specification design based on assembly positioning[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(2): 1–8.

[27] MATHIEU L, MARGUET B. Integrated design method to improve producibility based on product key characteristics and assembly sequences[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2001, 50(1): 85–88.

[28] 谭昌柏, 匡衡. 基于动态规划的飞机多交点装配离散公差优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2015(5): 802–810.

TAN Changbai, KUANG Heng. Discrete tolerance optimization for aircraft multi-joint assembly based on dynamic programming[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015(5): 802–810.

通讯作者: 王仲奇, 教授, 研究方向为飞机装配工艺、专用数字化装配工艺装备研发。

Configurable Assembly Deviation Analysis Technology Based on Digital Twin Model

WANG Anyang, WANG Zhongqi, XIA Song, CHANG Zhengping, MA Zhikai
(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] Aircraft products have high requirements for geometric assembly accuracy of parts and components in the actual components assembly and final assembly process. Predicting and controlling aircraft assembly accuracy has always been one of the continuous research topics in aviation industry. Aiming at the application of digital twin in the field of assembly simulation, this paper proposed a configurable assembly deviation analysis method based on digital twin model from the perspective of geometric assembly accuracy prediction. The product discrete point cloud and product design model were taken as the geometric expression of the product twin model, and the point cloud constraint registration theory was used to realize the pose adjustment of the assembly feature matching of the part digital twin model. According to the different assembly relationships of the part digital twin model, the solution function of the relative position transformation matrix between the matched parts under various assembly relationships was constructed, and the function library was constructed. Based on the three-dimensional dimension chain model, a configurable dimension chain model was proposed to realize the rapid solution effect of "matching and calculation" of dimension chain. A configurable assembly deviation solving system was developed, and the effectiveness of the method was verified by taking an aircraft door specimens as an example.

Keywords: Digital twin model; Aircraft assembly; Assembly deviation analysis; Configurable; Dimension chain

(责编 七七)