

基于状态空间模型的飞行器装配误差敏感度研究

孙崇飞^{1,2} 李欣³ 朱一鸣⁴ 尚建忠¹ 罗自荣¹ 何立军⁵

(1. 国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073; 2. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255049;

3. 国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037;

4. 曼彻斯特大学机械、航天与土木工程学院, 曼彻斯特 M17JR; 5. 陆军勤务学院训练基地, 武汉 430035)

摘要: 飞行器具有零部件多、结构复杂和装配精度要求高等特点,其装配有安全性装配、少可逆性装配等要求。根据飞行器相关的关键产品特性(Key product characteristic, KPC)和关键控制特性(Key control characteristic, KCC)参数,提出一种基于状态空间模型的装配误差敏感度量化分析方法,将飞行器多舱段精密装配过程中的误差敏感度分为3级指标,并进行阐述和定义。通过联立飞行器状态空间模型和输出方程,得到输入向量和输入矩阵的关系,进而求出状态转换矩阵,得到不同级别误差敏感度的理论表达式。将随机产生服从正态分布的装配特征误差代入系统矩阵,运用蒙特卡洛(Monte Carlo)仿真对不同装配特征的敏感度指标进行计算,并对分析理论计算和蒙特卡洛仿真求得的特征级敏感度指标值。研究表明,将动态系统灵敏度分析方法应用到多工位装配过程可行,所提出的基于状态空间模型的飞行器装配误差敏感度分析方法合理,对飞行器舱段精密装配过程的精度评估具有参考意义。

关键词: 飞行器; 装配误差敏感度; 状态空间模型; 关键产品特性; 关键控制特性

中图分类号: TH161 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)05-0421-06

OSID:



Sensitivity Analysis of Aircraft Assembly Error Based on State Space Model

SUN Chongfei^{1,2} LI Xin³ ZHU Yiming⁴ SHANG Jianzhong¹ LUO Zirong¹ HE Lijun⁵

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

2 School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China

3. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China

4. School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, University of Manchester, Manchester M17JR, UK

5. Training Base, Army Logistical University, Wuhan 430035, China)

Abstract: The aircraft has the characteristics of many parts, complicated structure and high assembly accuracy requirements, and its assembly has requirements for safety assembly and less reversible assembly and so on. Based on the key product characteristics (KPC) and key control characteristics (KCC) parameters of aircraft, a theoretical method for assembly error sensitivity quantification analysis based on the state space model was proposed. And the error sensitivities in the precision assembly process of the butted-joint assembly of the aircraft were elaborated and defined, which were divided into three levels: feature level, position level and system level. The relationship between input vector and input matrix was obtained by solving the state space model of aircraft and its output equation, and the state transition matrix was obtained, and then the theoretical expressions of different levels of error sensitivity were obtained. The random assembly feature error value which obeys normal distribution was substituted into system matrix. Monte Carlo simulation was used to calculate the sensitivity indexes of different assembly features. And the sensitivity indexes of feature level obtained by theoretical calculation and Monte Carlo simulation respectively were compared and analyzed. The results showed that it was feasible to apply the sensitivity analysis method of dynamic system to the accuracy prediction and analysis of the

收稿日期: 2019-12-20 修回日期: 2020-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675527)

作者简介: 孙崇飞(1988—),男,博士生,山东理工大学讲师,主要从事智能机械装备和海洋能发电技术研究,E-mail: sunchongfei@yeah.net

通信作者: 李欣(1987—),男,助理研究员,主要从事智能机械装备制造装配技术与激光微纳加工技术研究,E-mail: lixinkiller@126.com

butted-joint assembly of the aircraft. The analysis method of aircraft assembly error sensitivity analysis based on state space model proposed was accurate and reasonable. This research method had positive significance for the accuracy evaluation of the butted-joint precise assembly process of the aircraft.

Key words: aircraft; assembly error sensitivity; state space model; key product characteristics; key control characteristics

0 引言

飞行器是人类探索未知领域和利用自然资源的重要工具^[1-2]。角偏差是飞行器多舱段精密装配的核心指标,对控制舱体内传感器电气轴线安装精度和确保飞行器正常工作具有重要意义^[3-6]。在飞行器制造过程中,不同误差源对最终装配的影响程度不同,其对应精度控制的实现难易程度也不同。通过分析每个误差源的敏感度、重点削减敏感度较大的误差源,有助于降低飞行器制造成本、提高飞行器性能特性。

飞行器装配精度主要受装夹误差和制造误差等影响,装配精度分析的重点是对误差进行建模和分析。根据配合特征和夹具对装配的影响,把装配问题分成 I 型装配和 II 型装配两大类。I 型装配中零件位置仅由配合特征决定,不包括夹具定位误差和工位内部相互作用。文献[7-11]研究了 I 型装配问题。MANTRIPRAGADA 等^[12]用运动学关节概念定义运动约束,以运动学原理和变换为主要方法分析零件间的误差累积。II 型装配中零件位置受装配特征和夹具的共同影响。II 型装配在汽车与飞机制造工业中比较常见,其典型研究见文献[13-18]。

误差敏感度表示不同装配误差对装配最终效果的影响程度,是评价装配精度重要指标。目前,装配误差敏感度的相关研究取得了一定进展。LIU 等^[19]将误差描述扩展到三维空间,构建了三维误差传递过程状态空间模型,主要将定位元件误差作为误差源。QURESHI 等^[20]在公差分析过程中将误差描述为一个间隙量,便于过度约束的公差分析。ANSELMETTI^[3]提出基于“雅可比-矢量对”模型,实现了雅可比矩阵和矢量对方法的综合。HUANG 等^[21]提出了基于 3-2-1 定位夹具的多工位装配工艺误差传递模型,形成面向三维空间的误差装配模型。LAPERRIÈRE 等^[22]将三维空间几何变化用 6 个标量方程表示,以此实现公差分析,但未考虑装配基准在误差传递中的作用。

本文提出一种包含关键产品特性(Key product characteristic, KPC)和关键控制特性(Key control characteristic, KCC)的装配误差敏感度量化分析方法。该方法基于状态空间模型对飞行器的多舱段装

配过程进行量化追踪,以控制和补偿其装配精度。

1 装配误差敏感度表示

飞行器的性能特性主要取决于实现其产品功能的关键设计特征。在装配领域,KPC 相当于关键设计特征,KPC 可以通过提高夹具定位精度和几何尺寸误差进行控制。而夹具定位精度和夹具几何尺寸误差主要包含于 KCC。KPC 和 KCC 在误差传播模型中以点的形式存在,可记为 KPCs 和 KCCs。在刚体多工位装配过程中,KCCs 误差对 KPCs 几何精度的影响依赖于各工位上夹具几何尺寸和工位间夹具的改变。

用 $\gamma(i)$ 来表示 KPC 误差与 KCC 误差的比值,对应装配状态空间模型的系统矩阵由工位之间定位的变化、单独工位上定位夹具的几何因素和 KPCs 的选择决定。如果把工位标号 i 视为动态系统的时间,则状态空间系统模型可描述为一个线性时变的随机过程。因此,可以把动态系统灵敏度分析的方法应用到多工位装配过程中。装配过程中的灵敏度分析可理解为系统对特定误差输入的响应,灵敏度指标即类似于传统控制理论中的系统增益。

图 1 为 N 个工位装配过程,KPC 误差可表示为

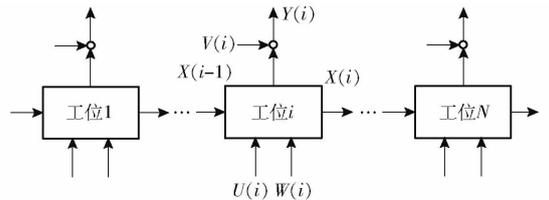


图 1 N 个工位的装配过程

Fig. 1 Assembly process of N positions

误差向量 σ_{out}^2 ,其组成元素为 Σ_Y 的对角元素。KCC 误差的输入可用夹具、工位和系统 3 个不同角度来考虑,相应 3 个级别的灵敏度指标为:

(1) 特征级别灵敏度指标 S_{ip} 为

$$S_{ip} = \sup \frac{\|\kappa \sigma_{out}^2\|_2}{\sigma_p^2} \quad (1)$$

式中 κ ——加权系数,决定 KPC 误差的重要性

$\|\cdot\|_2$ ——欧几里得范数

σ ——误差

i ——工位序号

p ——定位点序号

S_{ip} 指出了第 i 个工位上的第 p 个定位特征对 KPC 误差的贡献,相当于一个单输入多输出(Single-input multi-output, SIMO)系统的增益。它决定了对 KPC 误差贡献最大的关键定位特征。

(2) 工位级别灵敏度指标 S_i 为

$$S_i = \sup_{\sigma_i^2} \frac{\|\kappa \sigma_{out}^2\|_2}{\|\sigma_i^2\|_2} \quad (2)$$

其中, S_i 指出了在第 i 个工位上夹具的所有定位特征是如何共同影响 KPC 误差的,相当于一个多输入多输出(Multi-input multi-output, MIMO)系统的增益。它决定了对 KPC 误差贡献最大的关键工位。

(3) 系统级别的灵敏度指标 S_o 为

$$S_o = \sup_{\sigma_{in}^2} \frac{\|\kappa \sigma_{out}^2\|_2}{\|\sigma_{in}^2\|_2} \quad (3)$$

其中, S_o 指出了系统对输入误差扩大或者是抑制的能力,相当于一个 MIMO 系统的增益。

上述 S_{ip} 、 S_i 和 S_o 是 KPC 误差与 KCC 误差的比值,相当于单位 KCC 误差输入的 KPC 误差。3 个单位 KCC 误差有区别:对于单独的定位特征,单位 KCC 误差是 $\sigma_{ip}^2 = 1$;对于单独工位,单位 KCC 误差是夹具所有定位特征共同的影响,即 $\|\sigma_i^2\|_2 = 1$;对于整个系统,单位 KCC 误差是所有工位联合的影响,即 $\|\sigma_{in}^2\|_2 = 1$ 。一个小于 1 的敏感度系数意味着 KPC 误差等级可以比 KCC 误差等级更低。相反,一个大于 1 的敏感度系数说明了系统放大了输入误差。大多数的多工位系统的敏感度系数都会大于 1,然而期望得到敏感度系数较小的误差系统。因此,需要比较并分析这些敏感度系数,找出敏感工位或敏感夹具来优先满足其要求,进而减小最终误差。

如果 KCC 误差输入是非关联的,则 KPC 误差向量 σ_{out}^2 可以用每个工位的误差向量 σ_i^2 来线性表示,即

$$\sigma_{out}^2 = \sum_{i=1}^N \gamma^2(i) \sigma_i^2 \quad (4)$$

其中 $\gamma^2(i)$ 中的元素是矩阵 $\gamma(i)$ 对应元素的平方,即

$$\gamma^2 = \begin{bmatrix} \gamma_{11}^2 & \gamma_{12}^2 & \cdots & \gamma_{1m}^2 \\ \gamma_{21}^2 & \gamma_{22}^2 & \cdots & \gamma_{2m}^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{q1}^2 & \gamma_{q2}^2 & \cdots & \gamma_{qm}^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据 S_{ip} 的定义,假设每次在整个过程中只有一个误差源,则在所有 KCC 输入中只有向量 σ_i^2 是非零的,它只包含一个非零元素 σ_{ip}^2 。因此,第 i 个工位上的第 p 个定位点的敏感度指标 S_{ip} 可以表示为

$$S_{ip} = \|\kappa \gamma_p^2(i)\|_2 \quad (6)$$

根据 S_i 的定义,假设每次只有一个工位有误差输入,但是在每个工位中,会同时有多个定位特征对 σ_{out}^2 做出贡献,在所有 KCC 输入中只有向量 σ_i^2 是非零的。因此, S_i 可以表示为

$$S_i = \|\kappa \gamma^2(i)\|_2 \quad (7)$$

系统级别的敏感度考虑了所有 KCC 误差输入的可能组合,包括工位内部和工位之间。因此,它代表了整个过程系统对于 KCC 输入的敏感度。 S_o 可以表示为

$$S_o = \|\kappa [\gamma^2(1) \quad \gamma^2(2) \quad \cdots \quad \gamma^2(N)]\|_2 \quad (8)$$

当然,也可认为夹具敏感度系数是特殊的工位敏感度系数及系统敏感度系数,即考虑在相应的工位内和过程中找出最大的夹具敏感度系数分别作为工位敏感度系数和过程敏感度系数。夹具敏感度系数则代表过程对单一误差输入的响应,而实际的工位敏感度系数 S_i 和系统敏感度系数 S_o 表示多个误差输入同时作用系统的响应。这两种方法在定义上有所不同,需根据实际情况而定。

2 基于飞行器模型的敏感度理论计算

以一个三舱段飞行器的装配过程为例,对其误差敏感度进行计算和验证。装配过程分为 3 个工位,其装配示意图及装配顺序如图 2 所示。

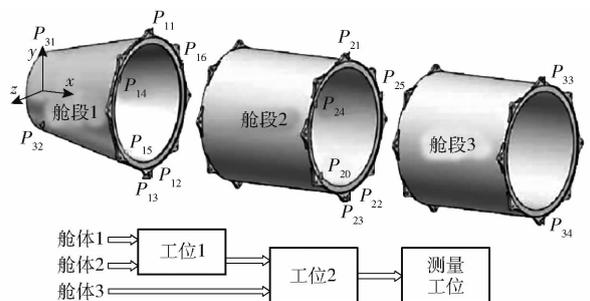


图 2 三舱段飞行器的装配实例

Fig. 2 Application example of three-section aircraft assembly

定义装配过程中的 KCC 点 $P_1 \sim P_6$ 。其中,零件定位点坐标分别为 $(240, 135, 0)$ 、 $(240, -135, 0)$ 、 $(240, -90.7, -100)$ 、 $(540, 135, 0)$ 、 $(540, 135, 0)$ 和 $(540, 125.4, 50)$,测量点 $M_1 \sim M_4$ 坐标分别为 $(0, 95, 0)$ 、 $(0, -95, 0)$ 、 $(840, 135, 0)$ 和 $(840, -135, 0)$,单位均为 mm。

夹具的可能定位顺序如表 1 所示。为简化分析,取所有 KPCs 的加权系数均为 1。

装配过程中,有 2 个装配工位和 1 个测量工位,即 $N=3$ 。测量工位应排除夹具的影响,因此其夹具的输入误差远小于其他工位,认为是零。而其他两

表1 三舱段飞行器的装配顺序
Tab.1 Aircraft assembly sequence

装配顺序	
顺序1	$[(P_1, P_2, P_3)_{\text{舱体1}}]_1 \rightarrow [(P_4, P_5, P_6)_{\text{舱体2}}]_{\text{II}} \rightarrow [(M_1, M_2), (M_3, M_4)]_{\text{III}}$
顺序2	$[(P_1, P_2, P_3)_{\text{舱体2}}]_1 \rightarrow [(P_4, P_5, P_6)_{\text{舱体2}}]_{\text{II}} \rightarrow [(M_1, M_2), (M_3, M_4)]_{\text{III}}$
顺序3	$[(P_4, P_5, P_6)_{\text{舱体3}}]_1 \rightarrow [(P_1, P_2, P_3)_{\text{舱体2}}]_{\text{II}} \rightarrow [(M_1, M_2), (M_3, M_4)]_{\text{III}}$

个工位上夹具的输入误差 $U(1)$ 、 $U(2)$ 不能忽略。定义测量值为舱体1与舱体3的 X 轴向角偏误差,以第2种装配顺序为例,装配过程的状态空间模型表达式为

$$\begin{cases} X(1) = B(1)U(1) \\ X(2) = A(1)X(1) + B(2)U(2) \\ X(3) = A(2)X(2) \\ Y = CX(3) \end{cases} \quad (9)$$

其中 A 、 B 、 C 和 U 可以由零件定位点和测量点已知坐标值计算得到,进而可得

$$Y = C[A(2)(A(1)B(1)U(1) + B(2)U(2))] = CA(2)A(1)B(1)U(1) + CA(2)B(2)U(2) \quad (10)$$

因此, $\gamma(1) = CA(2)A(1)B(1)$, $\gamma(2) = CA(2)B(2)$ 。

各工位误差对装配总误差贡献率计算式为

$$P_C = \frac{S_k}{\sum_{k=1}^2 S_k} \times 100\% \quad (11)$$

由式(7)、(11)求得该装配顺序下的工位级敏感度指标及其贡献率,如表2所示。

表2 工位级敏感度指标及其贡献率

Tab.2 Position-level sensitivity index and its corresponding contribution rate

参数	工位1	工位2
S_k	2.380	8.215
$P_C/\%$	22.46	77.54

由式(6)可求得特征级敏感度指标。每一个工位上都有2个独立的配合特征。工位1上舱体1后端面和舱体2前端面的特征级敏感度指标均为15.97%,工位2上舱体2后端面和舱体3前端面的特征级敏感度指标均为34.03%。

3 基于蒙特卡洛方法的装配误差敏感度分析

当前基于数值仿真的刚性体装配误差分析已开始用于3DCS等商业软件,其在前向设计仿真和容差分析等方面具有明显优势。蒙特卡罗(Monte Carlo)方法又称为随机模拟(Random simulation)方法,以概率统计论为理论基础,通过随机变量抽样对数学问题或工程技术问题进行分析。其计算方法及

程序结构相对简单,适应性强,可直接模拟求解,能替代设计过程中的部分真实试验。本文采用蒙特卡罗方法对多舱段飞行器装配误差敏感度进行分析和验证。

建立蒙特卡洛仿真所需的飞行器模型,如图2所示。该模型的装配采用基于虚拟夹具的3-2-1定位法定位,每个配合面上定义包括两定位销孔在内的6个定位点,如图3所示。

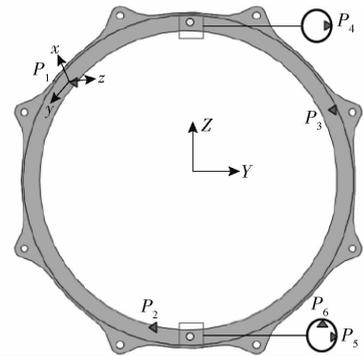


图3 舱体一面两孔的定位方式

Fig.3 Positioning method of two-hole-one-side of section

设定模型的形位公差、各连接安装面的平面度误差和垂直度误差均为0.01 mm,平面度误差和垂直度误差都是线性公差。平面度公差如图4所示。把连接面看作多个离散点的组合,连接安装面的形位公差等价于离散点在某个方向上相对于名义位置的偏移量。

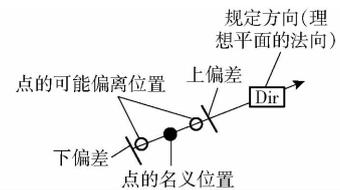


图4 平面度公差

Fig.4 Flatness tolerance

选取每个连接安装面上两个定位销孔和螺栓连接孔之一为装配特征,选取其中心点为描述连接安装面形位公差的离散点。设定每个点沿连接安装面法向量方向的偏移量服从正态分布 $N(0, 0.01)$ 。

位置度公差如图5所示。设定各连接安装面上两定位销孔的位置度公差为0.01 mm,位置度公差为圆域公差。偏离范围为一个以点的名义位置为圆心、公差为半径的圆域。

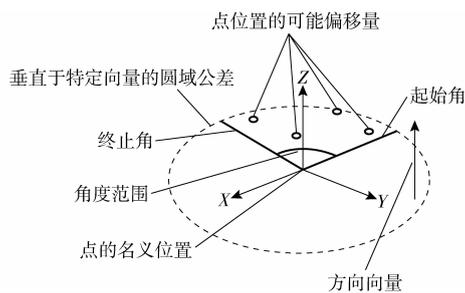


图5 位置度公差

Fig. 5 Position tolerance

设定两定位销孔的位置偏移量服从正态分布 $N(0,0.01)$ 。定义图2中舱体1与舱体2的X轴向与Y轴向角偏差为测量值,进行2000次仿真,结果如图6所示。考虑到装配顺序会对装配结果造成影响,在仿真中定义装配顺序为首先装配舱体1和舱体2,再将其作为子装配体与舱体3装配。

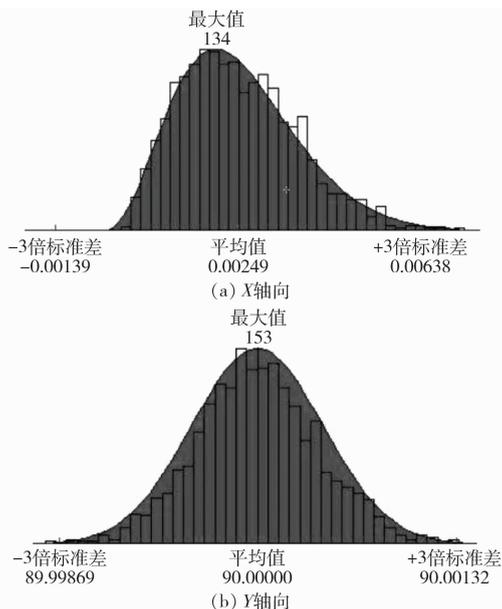


图6 舱体1与舱体3的角偏差仿真值分布

Fig. 6 Angular deviation error distribution of section 1 and section 3

以舱体1与舱体3的X轴向角偏差为测量值时,舱体2前端面对其影响最小,特征级敏感度指标为16.09%;其次为舱体1后端面对结果的影响,敏感度指标为17.03%;舱体2后端面的平面度与垂直度对结果的影响可达33.16%;对装配结果影响最大的是舱体3前端面的平面度与垂直度,其特征级敏感度指标略大于舱体2后端面,为33.72%。

对理论分析和蒙特卡洛仿真的计算结果对比可得,理论分析得出的4个配合特征面敏感度指标与蒙特卡洛仿真得出的4个配合特征面敏感度指标的误差最大为6.05%。对理论表达式与蒙特卡洛仿真计算得到的特征级敏感度进行对比验证,验证了理论方法计算飞行器多舱段装配误差敏感度的正确性。此外,当以舱体1与舱体3的Y轴方向的角偏差为测量值时,舱体3前端面和舱体2后端面两个定位销孔的位置度对其影响最大,影响率为37.48%;其次是舱体1后端面和舱体2前端面两个定位销孔位置度的影响,其值为12.52%;分析还得出,所有连接安装面的平面度与垂直度误差对舱体1与舱体3的Y轴方向的角偏差影响为0。

4 结束语

提出了一种包含关键产品特性和关键控制特性基于状态空间模型的装配误差敏感度量分析理论方法,对飞行器多舱段精密装配过程中的误差敏感度分为特征级、工位级和系统级,并进行了阐述和定义。通过联立误差状态空间模型和输出方程,求出状态转换矩阵,得到了误差敏感度的理论表达式。通过蒙特卡洛仿真的方法对上述敏感度的理论表达式进行了对比验证。研究表明,将动态系统灵敏度分析方法应用到多工位装配过程可行,基于状态空间模型的飞行器装配误差敏感度分析方法合理。

参 考 文 献

- [1] PÉREZ-ROCA S, MARZAT J, PIET-LAHANIER H, et al. A survey of automatic control methods for liquid-propellant rocket engines[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2019, 107:63-84.
- [2] 丁力,高振奇,虞青.基于改进樽海鞘群算法的四旋翼飞行器姿态优化控制[J/OL].农业机械学报,2019,50(10):243-250. DING Li, GAO Zhenqi, YU Qing. Optimal attitude control for quadrotor aircraft based on improved salp swarm algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10):243-250. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191028&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.028. (in Chinese)
- [3] ANSELMETTI B. Generation of functional tolerancing based on positioning features[J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(8):902-919.
- [4] 何晓煦,田威,曾远帆,等.面向飞机装配的机器人定位误差和残差补偿[J].航空学报,2017,38(4):287-297. HE Xiaoxu, TIAN Wei, ZENG Yuanfan, et al. Robot positioning error and residual error compensation for aircraft assembly[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(4):287-297. (in Chinese)
- [5] 李欣,于乃辉,曹玉君,等.基于状态空间模型的航天器装配角偏差研究[J].国防科技大学学报,2014,36(1):104-109. LI Xin, YU Naihui, CAO Yujun, et al. Angular variation analysis of spacecraft assembly based on state space model[J].

- Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(1): 104 - 109. (in Chinese)
- [6] 刘伟东, 宁汝新, 刘检华, 等. 机械装配偏差源及其偏差传递机理分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(1): 156 - 168.
LIU Weidong, NING Ruxin, LIU Jianhua, et al. Mechanism analysis of deviation sourcing and propagation for mechanical assembly[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(1): 156 - 168. (in Chinese)
- [7] HUANG W, LIN J, BEZDECNY M, et al. Stream-of-variation modeling—part I: a generic three-dimensional variation model for rigid-body assembly in single station assembly processes[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(4): 821 - 831.
- [8] JIN J, SHI J. State space modeling of sheet metal assembly for dimensional control[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1999, 121(4): 756 - 762.
- [9] DING Y, CEGLAREK D, SHI J. Design evaluation of multi-station assembly processes by using state space approach[J]. J. Mech. Des., 2002, 124(3): 408 - 418.
- [10] AGRAWAL R, LAWLESS J F, MACKAY R J. Analysis of variation transmission in manufacturing processes—part II [J]. Journal of Quality Technology, 1999, 31(2): 143 - 154.
- [11] HUANG W, PHOOMBOLAB T, CEGLAREK D. Explicit yield model (EYM) for tolerance synthesis of large scale complex assemblies [C] // ASME 2006 International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2006; 615 - 624.
- [12] MANTRIPRAGADA R, WHITNEY D E. Modeling and controlling variation propagation in mechanical assemblies using state transition models[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(1): 124 - 140.
- [13] HONG Y S, CHANG T C. A comprehensive review of tolerancing research[J]. International Journal of Production Research, 2002, 40(11): 2425 - 2459.
- [14] CHOU Y C, CHANDRU V, BARASH M M. A mathematical approach to automatic configuration of machining fixtures: analysis and synthesis[J]. Journal of Engineering for Industry, 1989, 111(4): 299 - 306.
- [15] WILSON R H, LATOMBE J C. Geometric reasoning about mechanical assembly[J]. Artificial Intelligence, 1994, 71(2): 371 - 396.
- [16] CHANG M, GOSSARD D C. Modeling the assembly of compliant, non-ideal parts[J]. Computer-Aided Design, 1997, 29(10): 701 - 708.
- [17] 吴玉光, 张根源, 李春光. 夹具定位误差分析自动建模方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(5): 172 - 179.
WU Yuguang, ZHANG Genyuan, LI Chunguang. Approach to automated modeling of fixture location errors analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(5): 172 - 179. (in Chinese)
- [18] ASADA H, BY A. Kinematic analysis of workpart fixturing for flexible assembly with automatically reconfigurable fixtures[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1985, 1(2): 86 - 94.
- [19] LIU J, JIN J, SHI J. State space modeling for 3-D variation propagation in rigid-body multistage assembly processes[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2009, 7(2): 274 - 290.
- [20] QURESHI A J, DANTAN J Y, SABRI V, et al. A statistical tolerance analysis approach for over-constrained mechanism based on optimization and Monte Carlo simulation[J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(2): 132 - 142.
- [21] HUANG W, LIN J, KONG Z, et al. Stream-of-variation (SOVA) modeling II: a generic 3D variation model for rigid body assembly in multistation assembly processes[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(4): 832 - 842.
- [22] LAPERRIÈRE L, ELMARAGHY H A. Tolerance analysis and synthesis using Jacobian transforms[J]. Cirp Annals, 2000, 49(1): 359 - 362.