doi:10.11887/j.cn.201401019 http://journal.nudt.edu.cn

基于状态空间模型的航天器装配角偏误差研究*

李 欣[1],于乃辉[1],曹玉君[1],张志雄[2],尚建忠[1]
(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073;
2. 国防科技大学 军事高科技培训学院,湖南 长沙 410073)

摘 要:装配过程的误差建模是分析装配误差的重要手段之一。通过分析影响航天器装配结果的尺寸和形位误差、装夹定位误差,将其装配的偏差源分为夹具装夹误差和舱段制造误差两类。并将不同形式的误差通过虚拟夹具的概念进行了统一的表达,进而基于误差流理论针对航天器舱段建立其误差传播的状态空间模型,求出了该过程的状态空间表达式,应用该模型对装配过程中的角偏误差进行了分析。将分析得到的结果同蒙特卡洛仿真的结果进行了比较,两种方法的相对误差小于3%,说明了该方法的可行性。该方法的优势在于它不仅可以分析复杂装配过程,还可以对各工位的装配效果进行观测,从而进行向后分析。

关键词:虚拟夹具;误差流;状态空间模型;角偏误差
中图分类号: **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2014)01-0104-06

Angular variation analysis of spacecraft assembly based on state space model

LI Xin[1], *YU Naihui*[1], *CAO Yujun*[1], *ZHANG Zhixiong*[2], *SHANG Jianzhong*[1]
(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. College of Continuing Education, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Variation modeling is one of the most important tools for assembly variation analysis. Considering dimension and geometric precision, and part situation precision, the deviation source that affects assembly accuracy is clustered into two types: deviation of geometric location and orientation, variation of geometric form. And these different types of variation or deviation were unified by Virtual Fixture. So a 3D rigid assembly state space modeling technique was developed for stream of variation analysis (SOVA) in multi-station processes. A missile-cabin-assembly process was analyzed in this model. It enhances the applicability in modeling complex assemblies. The developed methodology outperforms the techniques based on other simulations in computation efficiency. It is more powerful not only in forward analysis of complex assembly systems, but also in backward analysis. The model is validated by using Monte Carloseries simulations.

Key words: virtual fixtures; stream of variation; state space model; angular variation

当前航天器的结构日益复杂,舱段数目也有所增加。对于回转体零件的装配,其角偏误差是一项既重要又难以保证的装配指标。对于多舱段航天器的装配,这一问题会由于误差的累积而变得更加明显。减小装配角偏误差的意义在于提高航天器的一致性、质量稳定性及系统可靠性,从而提高其整体性能,使其能效最大化。

多工位制造过程的装配建模与误差控制[1-5]已经成为了在工程和统计研究基础上新兴的研究领域,并在上个世纪90年代取得了飞速发展。在早期研究中,Mantripragada 等遵循基准流动链(Datum Flow Chain,DFC)的概念,将装配过程的各工位看成一系列离散事件,采用状态转换方程表示该离散动态系统,并引入控制理论对系统进行优化评价,从而改进装配特征以减少产品误差。威斯康星大学的 Ceglarek 等[6]提出了基于 KPCs(Key Product characteristics)的误差流分析模型,通过采用统一的广义虚拟夹具模型表征所有约束。该模型描述了关键产品特性(PKC)和关键控制特性(KCC)之间误差的线性关系,为多工位复杂装配建模奠定了基础。在这个基础上,Jin、Ceglarek、Huang 等[7-11]提出以状态空间方程为模型对多工位的制造过程进行建模,采用向量公差来描述过程参数和产品质量特性的误差。

* **收稿日期**:2013-04-18
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175505);国家部委资助项目(51318010406)
作者简介:李欣(1987—),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士研究生,E-mail:lixinkiller@126.com;
尚建忠(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:jianzhongshang@gmail.com

1　问题描述与假设

舱段的装配在工程中是非常普遍的,它按照装配方式可分为大型舱段的装配和中小型舱段的装配。其中,大型舱段装配的方式以焊接和铆接为主,如火箭等;而中小型舱段的装配方式多以螺栓连接为主,如中小型航天器、飞行器等。舱段装配的最重要的指标之一就是各舱段之间的角偏误差。本文以航天器为研究对象,主要关注不同舱段之间在装配后产生的角偏误差。

1.1　问题描述

这里用两个舱段的装配作为阐述,舱体 1 和舱体 2 是通过一面两孔的定位方式实现装配的,即通过两个舱段对接面实现轴向定位,通过在端面上呈 180°分布的两定位销实现周向定位,并使用螺栓紧固。角偏误差为舱 1 局部坐标系和舱 2 局部坐标系对应坐标轴的夹角。舱体 1 和舱体 2 的局部坐标系分别建立在舱体 1 前端面和舱体 2 后端面上。如图 1 所示,舱体 1 的坐标系的 x 轴是其前端面的法线,y 轴是其前端面上两定位销孔中心的连线,再根据右手定则确定 z 轴;舱体 2 坐标系的 x 轴是其后端面的法线,y 轴是其后端面两定位销孔中心的连线,再根据右手定则确定 z 轴。α 为两坐标系 x 轴之间的夹角,如图 1 右侧所示,即 x_1 轴与 x_2 轴夹角;β 为两坐标系 y 轴之间的夹角,如图 1 左侧所示,即 y_1 轴与 y_2 轴夹角;γ 为两坐标系 z 轴之间的夹角,如图 1 左侧所示,即 z_1 轴与 z_2 轴夹角。

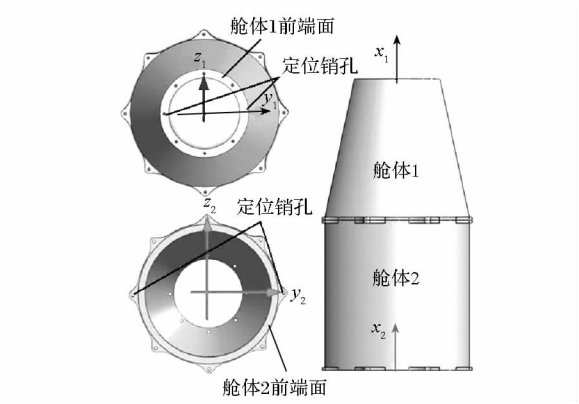


图 1　舱段对接后的角偏误差

Fig. 1　Angular variation of assembled cabin

1.2　基本假设

本文采用多工位刚体装配误差传播的状态空间模型来对其角偏误差进行分析,应用该方法的前提假设如下[3,5]:

(1)刚体假设,即所有舱段被认为是刚体,因此,舱段偏移量可以由任意一参考点的偏移量描述;

(2)刚性配合表面,配合面误差为各个配合面相对其名义位置的刚性偏离;

(3)仅考虑装夹误差和舱段制造误差;

(4)小误差假设,装夹误差和舱段制造误差相对舱段和装配尺寸小 2 ~ 3 个数量级。

2　误差传播

在每个工位上,通常包含两类误差源,即夹具装夹误差和舱段制造误差。夹具装夹误差导致舱段定位误差,包括定位点在坐标系中的偏移量。舱段制造误差是指在舱段在制造过程中配合特征的尺寸误差和形位误差。制造误差包含多种类型,其描述形式也各不相同。为建立统一的误差流模型,必须将不同形式的误差统一建模。

文献[3]提出虚拟夹具(Virtual Fixture)的概念,认为舱段上施加一个虚拟的 3 - 2 - 1 定位夹具,舱段的任何误差都可以等效认为是虚拟夹具的定位点发生相应偏离。这样误差源就可以统一建模。

本文研究的舱段装配为一面两孔的定位方式,其虚拟夹具定位点布局如图 2 所示。第一基准面上的 $P_1 - P_3$ 定位点限制的是其 x 方向的平动、绕 y 轴和 z 轴的转动;P_5 和 P_6 定位点限制的是其 y 方向的平动和其 z 方向的平动,相当于第二基准;P_4 定位点限制的是绕 x 轴的转动,相当于第三基准。

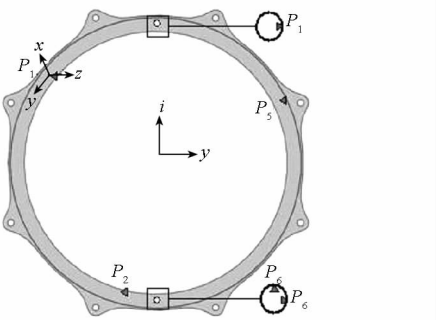


图 2　舱段一面两孔虚拟夹具定位点布局

Fig. 2　Locating points of 1-face-2-hole fixture scheme

定位点 $P_1 - P_6$ 的误差可以表示为:

$$\Delta f = (\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta y_1, \Delta y_2, \Delta z_1) \quad (1)$$

用 ΔP_r 表示舱段上任意指定的参考点的偏移量,有:

$$\Delta P_r^{global} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi} & 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} & \boldsymbol{\Phi} \end{bmatrix}^{-1} \Delta P_r^{local} = \overline{\boldsymbol{\Phi}}^{-1} \Delta P_r^{local} \quad (2)$$

其中 $\boldsymbol{\Phi}$ 为局部坐标系和全局坐标系的变换矩阵[3]，在局部坐标系下由夹具误差导致的 ΔP_r 可以由式(3)得到：

$$\Delta P_r^{local} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta\alpha \\ \Delta\beta \\ \Delta\gamma \end{bmatrix}_r = F_s \Delta f$$

$$= \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & 0 \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & 0 & 0 & 0 \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \\ \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta z_1 \end{bmatrix}_{local} \tag{3}$$

其中，L 是 P_4 和 P_5 在基准面上的距离，C_{ij} 是 P_1-P_3 对 Δz、$\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ 的影响系数，具体数值由 P_1-P_3 选取的实际位置决定。令：

$$\overline{F}_s = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi} & 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} & \boldsymbol{\Phi} \end{bmatrix}^{-1} F_s \tag{4}$$

由式(2)～(4)可得：

$$\Delta P_r^{global} = \overline{F}_s \Delta f^{local} \tag{5}$$

很明显，$\overline{F}_s$ 和 $\boldsymbol{\Phi}$ 是由夹具确定的。如果舱段被夹具完全定位，那么式(5)就提供了夹具误差和舱段偏移量的关系。为了在全局坐标系下更方便地表达配合特征面的位置和方向，在每个配合特征面都定义了局部坐标系。$\Delta P_{r(k-1)}$ 和 ΔP_{rk} 在全局坐标系和局部坐标系的变换关系如图 3 所示。

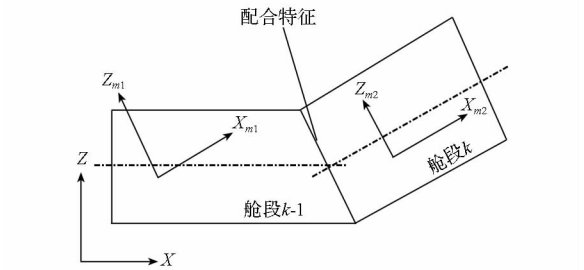


图 3 舱段配合特征在全局和局部坐标系的转换关系

Fig. 3 Transition between GCS and LCS of cabin mating feature

误差的传播计算可以表示成 3 个步骤：先应用式(2)将全局坐标系下的 $\Delta P_{r(k-1)}$ 变换到局部坐标系下的 $\Delta P^m_{r(k-1)}$，角标“m”代表其是在局部坐标系的配合特征中；如果第 $k-1$ 个舱段在全局坐标系下的装配偏移量为 $\Delta P_{r(k-1)}$，当舱段 k 通过舱段 $k-1$ 装配到装配体时，它的偏移量 ΔP_{rk} 将会受到 $\Delta P_{r(k-1)}$、舱段 k 和 $k-1$ 之间配合特征误差 $\Delta\boldsymbol{\Omega}$ 以及舱段 k 的装夹误差的影响[4,7]。这里的配合特征误差 $\Delta\boldsymbol{\Omega}$ 也可以根据虚拟夹具的理论表示成一个类似于 Δf 的 6×1 的向量。于是得到局部坐标系下的误差传播关系 $\Delta P_{rk} = J_{k-1}[\Delta P_{r(k-1)}, \Delta\boldsymbol{\Omega}_{后(k-1)}, \Delta\boldsymbol{\Omega}_{前k}, \Delta f_k]^{\mathrm{T}}$；最后应用式(2)将局部坐标系下的 ΔP^m_{rk} 变换到全局坐标系下的 ΔP_{rk}。其中：

$$J_i = \overline{\boldsymbol{\Phi}}_i^{-1} \overline{J}_i \begin{bmatrix} \overline{\boldsymbol{\Phi}}_i & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \tag{6}$$

$\overline{J}_i$ 是平面规则表面变动类型的齐次变换矩阵，它由两个分块矩阵 $\overline{J}^f_{k-1}$ 和 $\overline{J}^j_{k-1}$ 组成，它们分别是装夹误差 Δf_k 和配合特征 $k-1$ 的变换矩阵[3]。

3 三维装配的状态空间模型

N 工位的装配过程的误差流如图 4 所示。所有向量定义如下：$x(i)\in R^{n_t\times1}$ 是累计的偏差量；$U(i)\in R^{m(i)\times1}$ 是第 i 个工位产生的装夹或舱段制造误差；$Y(i)\in R^{q(i)\times1}$ 是第 i 个工位上的观测点偏移量的观测值；上标 n_t、$m(i)$ 和 $q(i)$ 分别为三个向量维数；$W(i)$ 和 $V(i)$ 是相互独立的噪声。

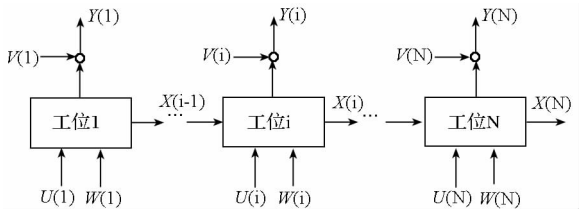


图 4 N 个工位的装配过程

Fig. 4 The stream-of-variation model of N-station assembly

该装配过程中的误差流可以由以下方程表示：

$$\boldsymbol{X}(i) = \boldsymbol{A}(i-1)\boldsymbol{X}(i-1) + \boldsymbol{B}(i)\boldsymbol{U}(i) + \boldsymbol{W}(i)$$
$$i = 1,2,\cdots,N \tag{7}$$

$$\boldsymbol{Y}(i) = \boldsymbol{C}(i)\boldsymbol{X}(i) + \boldsymbol{V}(i)$$
$$i = 1,2,\cdots,N \tag{8}$$

动态矩阵 A 表征了在装配过程中的舱段在不同工位之间转换的重定位误差，决定于装配过程中的工位与工位之间的定位基准的变换。如果装配中无重定位误差则矩阵 A 为单位矩阵 I。矩阵 B 是输入矩阵，它决定了虚拟夹具偏移量是怎样对舱段偏移量产生影响的。矩阵 C 为输出矩阵，它实际是由 0 和 1 构成的选择矩阵，表达了我们关心的测量尺寸。

假设前面过程有 k_{i-1} 个舱段参与装配，它们在第 $i-1$ 个工位上组成了子装配体 $s(i)$，然后按

照装配顺序在第 i 个工位上将 $k_i - k_{i-1}$ 个舱段装配到 $s(i)$ 上。在第 i 个工位结束后,有 k_i 个舱段在新的子装配体上。因此,状态向量 $X(i)$ 随着工位的变化不断更新:

$$\boldsymbol{X}(i) = [\underbrace{X^1(i), \cdots, X^{k_{i-1}}(i)}_{k_{i-1}\text{个舱体}} | \underbrace{X^{k_{i-1}+1}(i), \cdots, X^{k_i}(i)}_{k_i - k_{i-1}\text{个舱体}} | \underbrace{X^{k_i+1}(i), \cdots, X^{n_t}(i)}_{n_t - k_i\text{个舱体}}]^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

这里的 n_t 是总装配体中舱段的总数。

子装配体 $s(i)$ 的系统向量方程为:

$$\begin{aligned}&[X^1(i) \quad \cdots \quad X^{k_{i-1}}(i)]^{\mathrm{T}}\\ =&[X^1(i-1) \quad \cdots \quad X^{k_{i-1}}(i-1)]^{\mathrm{T}}\\ &+E_1^{s(i)}(i)+E_2^{s(i)}(i)\end{aligned} \tag{10}$$

$E_1^{s(i)}(i)$ 和 $E_2^{s(i)}(i)$ 分别为由夹具误差和重定位误差所引起的参考点的偏移量[4],这里根据研究的舱段模型可以得到:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{E}_1^{s(i)}(i) =& \boldsymbol{M}(P_{sub1}(i), P_r)\overline{F}_{s(i)}G(i)\\ &\times[X^1(i-1) \quad X^2(i-1) \quad \cdots \quad X^{k_{i-1}}(i-1)]^{\mathrm{T}}\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{E}_2^{s(i)}(i) =& -\boldsymbol{M}(P_{sub1}(i), P_r)\overline{F}_{s(i)}G(i)\\ &\times[X^1(i-1) \quad X^2(i-1) \quad \cdots \quad X^{k_{i-1}}(i-1)]^{\mathrm{T}}\end{aligned} \tag{12}$$

其中 $\boldsymbol{M}(P_{sub1}(i), P_r)$ 的表达式为:

$$\boldsymbol{M}(P_{sub1}(i), P_r) = \begin{bmatrix} \overline{\boldsymbol{Q}}(P_{sub1}(i), P_r^1) \\ \overline{\boldsymbol{Q}}(P_{sub1}(i), P_r^2) \\ \vdots \\ \overline{\boldsymbol{Q}}(P_{sub1}(i), P_r^{k_{i-1}}) \end{bmatrix} \tag{13}$$

矩阵 $\overline{\boldsymbol{Q}}(P_{sub1}(i), P_r^1)$ 所表达的是以 $P_{sub1}(i)$ 为原点,各坐标轴与全局坐标系平行的局部坐标系的偏移量 P_r^J,$G(i)$ 的表达式为:

$$G(i) = F_{(2)}Q(i)S(i) \tag{14}$$

$F_{(2)}$ 为以 0 和 1 构成的选择矩阵,$Q(i) = \mathrm{diag}\{\overline{\boldsymbol{Q}}(P_{sub1}(i), P_r^J)\}$,$S(i)$ 也为选择矩阵。$\overline{F}_{s(i)}$ 可由式(4)得到。

因此式(10)就可以写成:

$$\begin{bmatrix} X^1(i) \\ \vdots \\ X^{k_{i-1}}(i) \\ \hline X^{k_{i-1}+1}(i) \\ \vdots \\ X^{n_t}(i) \end{bmatrix} = [I - M(P_{sub1}(i), P_r)\overline{F}_{s(i)}G(i)F_{(1)}(i)] \begin{bmatrix} X^1(i-1) \\ \vdots \\ X^{k_{i-1}}(i-1) \\ \hline X^{k_{i-1}+1}(i-1) \\ \vdots \\ X^{n_t}(i-1) \end{bmatrix} + M(P_{sub1}(i), P_r)\overline{F}_{s(i)}\Delta f_{s(i)} \tag{15}$$

其中 $F_{(1)}(i)$ 为维数变换矩阵:

$$F_{(1)}(i) = [I_{6k_{i-1}\times 6k_{i-1}} 0_{6k_{i-1}\times 6(n_t - k_{i-1})}]_{6k_{i-1}\times 6n_t} \tag{16}$$

假设第 i 个工位上子装配体 $s(i)$ 有 k_{i-1} 个舱段,在该工位又把 $k_i - k_{i-1}$ 个舱段装配到了 $s(i)$ 上,重定位误差向后续舱段 $k_{i-1}+1 \sim k_i$ 的传播关系可以表示为:

$$\begin{aligned}\overline{E}_2^{s(i)}(i) =& [\cdots \quad X_{(R)}^{k_{i-1}+1} \quad X_{(R)}^{k_{i-1}+1} \quad \cdots \quad X_{(R)}^{k_i} \quad \cdots]^{\mathrm{T}}\\ =& R(i-1)[X^1(i-1) \quad \cdots \quad X^{k_{i-1}}(i-1) |\\ & X^{k_{i-1}+1}(i-1) \quad \cdots \quad X^{n_t}(i-1)]^{\mathrm{T}}\end{aligned} \tag{17}$$

$R(i-1)$ 选择了舱段 k_{i-1} 上参考点重定位后的偏移量,并给出了舱段 k_{i-1} 的偏移量是怎样通过舱段连接对后续装配产生影响的。由于 $\overline{E}_2^{s(i)}(i)$ 只考虑舱段 k_{i-1} 上的参考点的偏移量是怎样通过连接而传播的,因此,这里认为装夹误差和配合特征面的误差为 0。

这样,就可以得到状态方程:

$$A(i-1) = \begin{cases} 0 & i=1 \\ \begin{bmatrix} I - M(P_{sub1}(i), P_r)\overline{F}_{s(i)}G(i)F_{(1)}(i) & 0 \\ 0 & 0_{6(n_t - k_{i-1})\times 6n_t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{6k_{i-1}\times 6n_t} \\ R(i-1) \\ 0_{6(n_t - k_i)\times 6n_t} \end{bmatrix} & i>1 \end{cases} \tag{18}$$

$A(i-1)$ 受装配顺序的影响。在第一个工位上,前面工位的舱段偏移量为 0,所以当 $i=1$ 时,$A(0) = 0_{6n_t\times 6n_t}$。

$$U(i)=\begin{cases}\left\{\overbrace{\Delta f_1',\ \Delta\Omega_{b1}'}^{\text{零件1}},\ \overbrace{\Delta\Omega_{a2}',\ \Delta f',\ \Delta\Omega_{b2}'}^{\text{零件2}},\ \cdots\cdots,\overbrace{\Delta\Omega_{ak_1}',\ \Delta f_{k_1}',\ \Delta\Omega_{bk_1}'}^{\text{零件}k_1}\right\} & i=1\\ \left\{\overbrace{\Delta f_{s(i-1)}',\ \Delta\Omega_{s(i-1)}'}^{\text{子装配体}s(i-1)},\ \overbrace{\Delta\Omega_{a(k_{i-1}+1)}',\ \Delta f_{(k_{i-1}+1)}',\ \Delta\Omega_{b(k_{i-1}+1)}'}^{\text{零件}k_{i-1}+1},\ \cdots\cdots,\overbrace{\Delta\Omega_{ak_i}',\ \Delta f_{k_i}',\ \Delta\Omega_{bk_i}'}^{\text{零件}k_1}\right\} & i>1\end{cases}\tag{19}$$

$$B(i)=\begin{cases}\Lambda(i)_{6n_t\times n(i)} & i=1\\ \begin{bmatrix}M(P_{sub1}(i),P_r)\overline{W}_0\\ \Lambda(i)\end{bmatrix}_{6n_t\times n(i)} & i>1\end{cases}\tag{20}$$

其中 $\Lambda(i)$ 在文献[5]中给出了详细介绍。其中：

$$\Lambda(i)=\begin{cases}\begin{bmatrix}\overline{W}_0\\ J_1\overline{W}_1\\ \vdots\\ J_{k_{i-1}}\overline{W}_{k_{i-1}}\\ \hline 0_{6(n_t-k_{i-1})\times n(i)}\end{bmatrix} & i=1\\ \begin{bmatrix}J_{k_{i-1}}\overline{W}_1\\ J_{k_{i-2}}\overline{W}_2\\ \vdots\\ J_{k_i-1}\overline{W}_{k_i-k_{i-1}}\\ \hline 0_{6(n_t-k_{i-1})\times n(i)}\end{bmatrix} & i>1\end{cases}\tag{21}$$

$$n(i)=\begin{cases}18k_i-6 & i=1\\ 18(k_i-k_{i-1}+1)-6 & i>1\end{cases}$$

$$\overline{W}_0=[\overline{F}_{s(i)_{6\times 6}}|0]_{6\times n(i)}$$

$$\widetilde{W}_0=F_3(i)M(P_{sub(i)},P_r)\overline{W}_0$$

$$\overline{W}_1=\begin{bmatrix}\widetilde{W}_0\\ U_0\end{bmatrix}_{24\times n(i)}$$

$$U_0=[0_{18\times 7}|I_{18\times 18}|0]_{18\times n(i)}$$

$$\overline{W}_J=\begin{bmatrix}\overline{J}_{k_{i-1}+j-2} & \overline{W}_{j-1}\\ U_{j-1} & 0\end{bmatrix}_{24\times n(i)}$$

$$U_{j-1}=[0_{18\times(7+(j-1)\times 19)}|I_{18\times 18}|0]_{18\times n(i)}$$

如果在第 i 个工位上的舱段 J 上取 m^J 个测量点，那么舱段 J 上的每个测量点的偏差量为：

$$Y^J(i)=\begin{bmatrix}\overline{Q}(P_r^J,P_1^J)\\ \overline{Q}(P_r^J,P_2^J)\\ \vdots\\ \overline{Q}(P_r^J,P_{rJ}^J)\end{bmatrix}X^J(i)\tag{22}$$

这样就可以得到每个舱段的所有测量点的偏移量表示，即为输出方程：

$$Y(i)=\begin{bmatrix}Y^1(i)^{\mathrm{T}}\\ Y^2(i)^{\mathrm{T}}\\ \vdots\\ Y^{n_t}(i)^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}_{6\sum_{J=1}^{n_t}r^J\times 1}=C(i)X(i)\tag{23}$$

4　模型验证

设计一个三段舱段的航天器装配过程用来验证该模型，装配过程总共分为 3 个工位，装配示意图及装配顺序如图 5 所示。

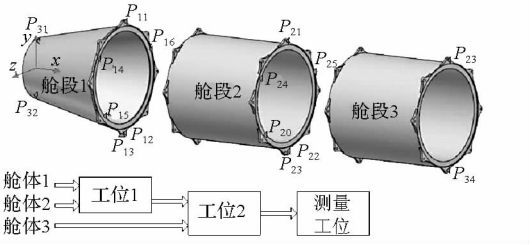


图 5　三段舱段装配的验证实例

Fig. 5　A three-cabin assembly example

其中误差源主要包括定位误差和配合特征面的误差。定位误差的平移偏移量假设服从正态分布 $N(0,\ 0.05)$，舱段 X 方向的几何误差服从正态分布 $N(0,\ 0.1)$。为了简化计算，使所有的局部坐标系的坐标轴与全局坐标系坐标轴平行。装配过程中有两对定位特征面，分别是舱体 1、2 和 2、3 的对接安装面。测量工位的定位误差很小，可以认为是 0。其状态空间表达式可以写为：

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}(1)=\boldsymbol{B}(1)\boldsymbol{U}(1)\\ \boldsymbol{X}(2)=\boldsymbol{A}(1)\boldsymbol{X}(1)+\boldsymbol{B}(2)\boldsymbol{U}(2)\\ \boldsymbol{X}(3)=\boldsymbol{A}(2)\boldsymbol{X}(2)+\boldsymbol{B}(3)\boldsymbol{U}(3)\\ \boldsymbol{Y}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{X}(3)\end{cases}\tag{24}$$

舱段定位点和测量定位点分别由表 1 和表 2 给出。

表 1　零件定位点的坐标(单位：mm)

Tab. 1　Coordinates of locating points (Unit: mm)

P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{16}
(240,137.5,0)	(240, −137.5,0)	(240, −135, −2.5)	(240, −90.7, −100)	(240, −108.75, −80)	(240,125.4,50)
P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	P_{25}	P_{26}
(540,112.5,0)	(540, −112.5,0)	(540, −110, −2.5)	(540,70,84.9)	(540,60, −92.2)	(540, −32.8,105)

表 2　测量点的坐标(单位:mm)

Tab. 2　Coordinates of measuring points (Unit: mm)

P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{34}
(900,127.5,0)	(900, -127.5,0)	(-900,127.5,0)	(-900, -127.5,0)

表 3　用状态空间模型得到的参考点的偏移量

Tab. 3　The deviation of measuring points by state space model

	Δx(mm)	Δy(mm)	Δz(mm)	$\Delta\alpha$(′)	$\Delta\beta$(′)	$\Delta\gamma$(′)
P_{31}	0.018	0.047	0.051	1.203	1.867	1.88
P_{32}	0.129	0.049	0.042			
P_{33}	0.121	0.049	0.052			
P_{34}	0.025	0.047	0.044			

表 4　用蒙特卡洛仿真得到的参考点的偏移量

Tab. 4　The deviation of measuring points by Monte Carlo simulation

	Δx(mm)	Δy(mm)	Δz(mm)	$\Delta\alpha$(′)	$\Delta\beta$(′)	$\Delta\gamma$(′)
P_{31}	0.021	0.048	0.05	1.231	1.9	1.895
P_{32}	0.128	0.049	0.047			
P_{33}	0.127	0.049	0.049			
P_{34}	0.022	0.048	0.046			

状态空间模型得到的结果如表 3 所示,蒙特卡洛仿真[11]的结果如表 4 所示,其中,$\Delta\alpha$、$\Delta\beta$ 和 $\Delta\gamma$ 分别表示 x 轴、y 轴和 z 轴的角偏误差。相对误差的定义为 $100\% \times (|\sigma_{SSM} - \sigma_{MCS}|)/\sigma_{MCS}$。蒙特卡洛仿真是基于没有线性化的完整模型,计算次数为 5000 次。结果表明状态空间模型和蒙特卡洛仿真得到的误差结果的相对误差的最大值为 2.27%,小于 3%。最终得到角偏误差的相对误差如图 6 所示。

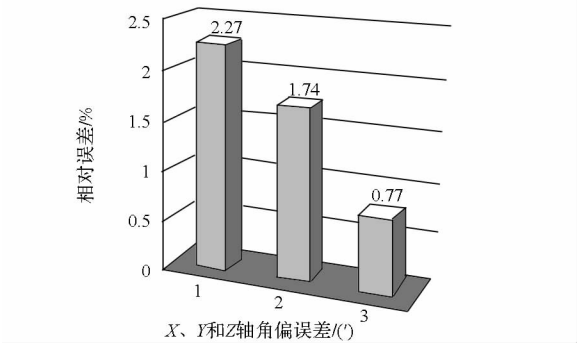


图 6　角偏误差的相对误差

Fig. 6　The relative error of angular variation

另外,状态空间模型相比于蒙特卡洛仿真的一个优势就是计算效率的提升(这是由于蒙特卡洛仿真的大部分时间都用在了重复性的模型计算上),并且这个优势会随着模型复杂程度的提高而越来越明显。

5　结论

本文针对航天器的对接装配建立了其装配过程的状态空间模型。该模型的建立得益于通过虚拟夹具的概念将不同形式的误差统一地表述成各个定位点的偏移量。它相对于传统的蒙特卡洛仿真的优势在于:提升了计算效率,尤其是在分析复杂度较高的装配过程中;更直观地表征了在装配过程中误差流动的趋势。它不仅可以用于误差分析,还可以用于误差预测、设计评估、系统优化以及关键环节辨识,即识别在装配过程中哪个误差源对最终的装配误差的贡献最大以及各个参数是怎样影响误差传播过程的。

参考文献(References)

[1] Huang W, Lin J, Kong Z, et al. Stream-of-variation modeling Ⅱ: a generic 3D variation model for rigid body assembly in multistation station assembly processes [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(5): 832 -842.

[2] Mantripragada R, Whitney D E. Modeling and controlling variation in mechanical assemblies using state transition models [C]//Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgium, IEEE, 1998:219 -226.

(下转第 115 页)

[4] YAROVIT. Yo-Mobile [EB/OL]. [2012-10-12]. www. yo-mobile. biz.

[5] 潘存云,赵云文,邓豪,等. 一种四转子活塞发动机: 中国, 201110071263. 8[P]. 2011 -03 -24.
PAN Cunyun, ZHAO Yunwen, DENG Hao, et a1. A four-rotors piston engine: China, 201110071263. 8[P]. 2011 -03 -24. (in Chinese)

[6] Deng Hao, Pan C Y, et a1. Comparison of Two Types of Twin-Rotor Piston Engine Mechanisms[J]. Journal of Central South University of Technology, 2013, 20(2): 363 -371.

[7] Roberts J A, Norman T J. Computer models for evaluating premixed and DISC wankel engine performance [R]. SAE Paper 860613, 1986.

[8] Bartand T A, Willis E A. Rotary engine performance computer program user's guide[R]. NASA-CR-191192, 1993.

[9] 李立君,唐狄毅,王 静,等. 直接喷射分层燃烧转子发动机工作过程模拟[J]. 航空动力学报,2003, 18(3): 363 -366.
LI Lijun, TANG Diyi, WANG Jing, et al. Simulation of the performance of a direct-injection stratified-charge rotary combustion engine[J]. Journal of Aerospace Power,2003,18(3):363 -366. (in Chinese)

[10] 周乃君,裴海灵,张家奇,等. 转子发动机热力过程数学模型[J]. 中南大学学报: 自然科学版,2008,39(2): 284 -289.
ZHOU Naijun, PEI Hailing, ZHANG Jiaqi, et al. Mathematic models for thermodynamic process of rotary combustion engine [J]. J. Cent. South Univ., 2008, 39(2): 284 -289. (in Chinese)

[11] Deng H, Pan C Y, et a1. A twin-rotor piston engine with annular connecting chambers [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C, 2012, 1 -10.

[12] Mattavi J N, Amann C A. Combustion modeling in reciprocating engines[M]. New York: Plenum Press, 1980.

[13] Ramos J I. Mathematical model of Spark-ignition engine in computer simulation in reciprocating engines[M]. New York: Hemisphere Pub. Corp., 1989.

[14] Vibe I. Brennverlauf und kreisprozeβ von verbrennungsmotoren [M]. Berlin: VEB-Verlag Technik, 1970.

[15] Woschni G. A universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine [R]. Society of Automotive Engineers, SAE paper 670931, 1967.

[16] 魏春源,张卫正,葛蕴珊. 高等内燃机学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2007.
WEI Chunyuan, ZHANG Weizheng, GE Yunshan. Higher internal combustion engine study [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007. (in Chinese)

(上接第 109 页)

[3] Huang W, Lin J, Bezdecny M, et al. Stream-of-variation modeling I: a generic 3D variation model for rigid body assembly in single station assembly processes [J]. ASME Transaction, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 129(5): 821 -831.

[4] Huang W. Methodologies for modeling and analysis of stream-of-variation SOVA in compliant and rigid assembly [D]. University of Wisconsin-Madison, 2004.

[5] Huang W, Lin J, Kong Z, et al. Stream-of-variation modeling-part II: A generic 3D variation model for rigid body assembly in multistation assembly processes [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2007, 129(5): 641 -652.

[6] Huang W, Ceglarek D. Model complexity reduction in stream of variation for compliant sheet metal assembly[C]// Proceedings of 9th CIRP Int. Seminar on Computer Aided Tolerancing, Arizona, 2005:11 -12.

[7] Jin J, Shi J. State space modeling of sheet metal assembly for dimensional control[J]. ASME Transaction, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1999, 121(3): 756 -762.

[8] Shiu B W, Ceglarek D, Shi J. State space model of multi-stations sheet metal assembly modeling and diagnostics [J]. Trans. NAMRI/SME, 1996, 24(2): 199 -204.

[9] Shi J. Stream of variation modeling and analysis for multistage manufacturing processes[M]. CRC Press, Boca Raton, FL, 2006: 156 -157.

[10] Ding Y, Ceglarek D, Shi J. Design evaluation of multi-station manufacturing processes by using state space approach [J]. ASME Transaction, Journal of Mechanical Design, 2002, 124(4): 416 -417.

[11] Soman S. Functional surface characterrization for tolerance analysis of flexible assemblies[D]. Brigham Young University, Provo, UT, 1999.

[12] Hsieh C C, Oh K P. Simulation and optimization of assembly processes involving flexible parts[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1996, 118(3): 377 -382.