

基于状态空间模型的飞行器角误差控制

宁丹峰^{1,2}, 陈万春¹, 杨明辉², 孙燕洁²
(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083; 2. 北京航天新凤机械设备有限公司, 北京 100854)

摘 要: 针对飞行器装配角误差过程控制问题,提出了基于状态空间模型的逐步最小化角误差法及全局最小化最终角误差法,并与直接装配法进行了对比. 研究表明:直接装配法角误差服从莱斯分布并逐渐增加;逐步最小化角误差法和全局最小化最终角误差法角误差服从广义极值分布,逐步最小化角误差法不受装配零件个数的影响,全局最小化最终角误差法角误差均值与标准差均随零件增加收敛于0.
关 键 词: 状态空间模型;飞行器;装配;蒙特卡罗仿真;误差控制
中图分类号: TP 391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)10-1421-05

Vehicle Angular Variation Control Based on State Space Model

NING Dan-feng^{1,2}, CHEN Wan-chun¹, YANG Ming-hui², SUN Yan-jie²
(1. School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
2. Beijing Aerospace New Wind Machinery Co., Ltd., Beijing 100854, China. Corresponding author: NING Dan-feng, E-mail: lianghaolove999 @ 163. com)

Abstract: Minimized angular variation stage-by-stage method (MAVSM) and minimized the final angle variation method (MFAVM) were proposed based on the state space model for vehicle assembly, and compared with the direct assembly method (DAM). The results showed that the angular variation of DAM follows the Rice distribution, and increases with the stage. The MAVSM and MFAVM follow generalized extreme value distribution. MAVSM is not affected by the stage, but the mean and standard deviation of angle variation decrease with the stage and converge at 0 for MFAVM.
Key words: state space model; vehicle; assembly; Monte Carlo simulation; variation control

飞行器安装角误差是指飞行器几何要素相对其基准的误差,主要包括飞行器舱段连接精度及各设备的安装误差等. 由于制造过程中偏差不可避免,零件的实际特征相对于其名义特征的位置、形状和方向都存在误差^[1]. 实际装配过程中大多涉及的是圆柱体零件^[2-3],所以本文主要研究圆柱体装配.

在圆柱形零件的对接装配中,主要关注某2个零件轴线之间的夹角误差,配合特征的几何变动在装配过程中累积传播,会使产品精度超差. 在设计和制造中,提出较紧的公差要求,有利于提高产品质量,但会增加产品的制造成本. 为了降低产品装配时间和成本,在装配过程中能够对误差进行预测以控制误差累积是很重要的^[4-5].

Mantriparagada 等^[6]遵循基准流动链(datum flow chain,DFC)概念,将装配过程的各工位看成一系列离散事件. 文献[5-7]提出了基于关键产品特性(key product characteristics,KPC)的误差流分析模型. 文献[8-10]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.

控制圆柱形零件装配过程中的误差累积的方法有2种^[2]:①通过最小化零件中心相对于坐标轴的距离来控制其半径偏差,从而实现直线装配;②通过最小化理论与实际平面的角度误差来控制其坐标轴偏移,从而实现平行装配. Hussian^[1]针对直线装配,提出3种装配方法的最小化误差的累积. Yang 等^[2]分析了直线装配和平行装配.

本文针对圆柱形零件对接装配的角误差问

题,研究了角误差的传播和其分布规律.对比研究了直接装配法、逐步最小化角误差法及全局最小化最终角误差法,利用蒙特卡洛仿真验证了 3 种方法的有效性及其角误差的分布规律.

1 角误差传播模型

1.1 问题描述

装配体由 n 个类似图 1 所示的零件对接而成.零件的顶面和底面为配合特征,坐标系 F 和 F' 分别与两个配合特征绑定.产品的角误差定义为第一个零件底面的法线与第 n 个零件顶面法线所夹角,也就是图 2 中 Z_0 与 Z_n 的夹角.

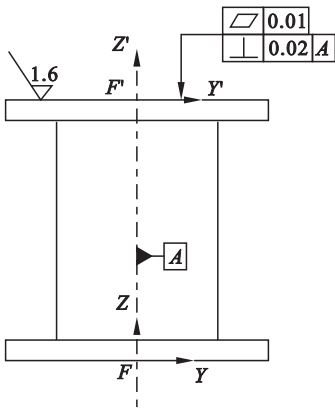


图 1 零件示意图
Fig. 1 Schematic diagram of part

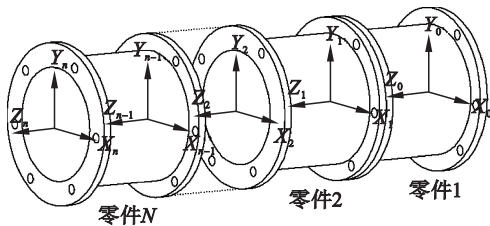


图 2 由 n 个零件组成的装配体
Fig. 2 Model of n -parts assembly

为简化问题,假设装配为第一类型装配^[6],零件对接时配合特征完全重合,如图 2 所示,将坐标系 0 设为全局坐标系.

1.2 角误差传播模型

在图 1 中,由于加工误差的存在,零件的顶面和底面是不平行的.假设 F' 相对于 F 的旋转误差为 $(\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma)$,分别为 F' 绕坐标系 F 的 X, Y, Z 轴的旋转角度,其中 $\Delta\gamma = 0$. F' 变换为 F 的变换矩阵 $R_{F'}^F$ 可以简化为 3×3 的旋转变换矩阵^[5]:

$$R_{F'}^F = R_X(\Delta\alpha)R_Y(\Delta\beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta\beta \\ 0 & 1 & -\Delta\alpha \\ -\Delta\beta & \Delta\alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

矢量 Z_2 在坐标系 1 和坐标系 0 中分别记为 Z_2^1 与 Z_2^0 ,上标表示参考坐标系.则 Z_2^0 在坐标系 0 中的表达式为

$$Z_2^0 = {}^0R \times Z_2^1 = {}^0R \times {}^1R \times Z_2^2. \quad (2)$$

矢量 Z_n 在坐标系 0 中可表示为

$$Z_n^0 = {}^0R \times {}^1R \times L_n^{n-1}R \times Z_n^n. \quad (3)$$

产品的角误差 $\Delta\theta^{(n)}$ 可通过 Z_n^0 和 Z_0 的点乘计算得到,特别当 $n = 1$ 时,零件上下端面的角误差:

$$\Delta\theta = \sqrt{\Delta\alpha^2 + \Delta\beta^2}. \quad (4)$$

2 多零件对接装配

n 个零件对接装配过程可分为 n 个工步进行,每个工步装配一个零件.

直接装配法中零件的装配方向随机确定,即装配过程中不进行角误差优化控制;逐步最小化角误差法与全局最小化最终角误差法是通过在每个工位优化零件的装配方向或对加工误差进行补偿,降低角误差的幅值.

2.1 直接装配法

这种装配方法不主动补偿角误差,零件装配的方向完全随机.每个零件的加工误差 $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 符合正态分布 $N(\mu, \sigma)$, n 个零件对接后的角误差为

$$\Delta\theta^{(n)} \sim \text{Rice}(\sqrt{2}n\mu, \sqrt{n}\sigma).$$

角误差的均值、标准差都是 n 的增函数.

2.2 逐步最小化角误差法

在每个装配工位上都控制角误差最小,在工位 n 最小化 $\Delta\theta^{(n)}$ 的方法是将零件 i 绕其对称轴旋转,在它的 k 种方向中选取使 $\Delta\theta^{(n)}$ 最小的方向装配.通过优化每个装配工位中零件的装配方向,最终实现产品的角误差最小.影响角误差分布的参数包括加工参数 $\Delta\alpha(\Delta\beta)$ 和装配零件数量 n 及对接孔个数 k .

使用逐步最小化角误差法进行装配($k = 6$),角误差与零件制造误差分布参数 μ, σ 的关系如图 3 所示.角误差与零件对接螺钉孔个数 k 的关系如图 4 所示.

2.3 全局最小化最终角误差法

此方法的目标是利用零件加工误差之间的补偿关系,优化每个工位零件的装配方向,保证最终产品的角误差最小.装配中需提前测量零件的角误差并标定方向.图 5 是使用方法进行装配($k = 6$)时,角误差与零件制造误差分布参数 μ, σ 的关系.图 6 是角误差与对接孔个数 k 的关系.

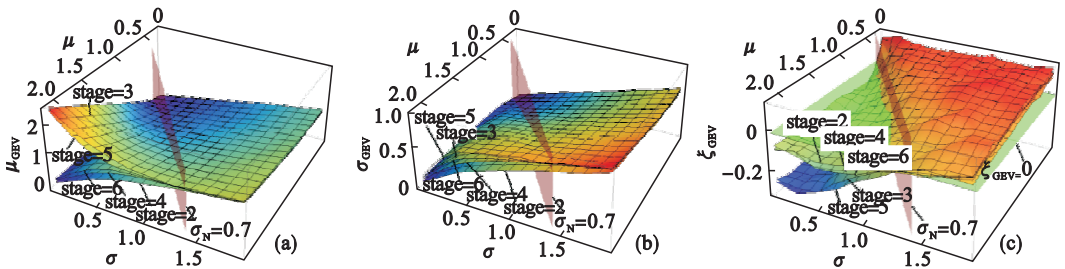


图 3 角误差与加工误差分布参数的关系
Fig. 3 Relations among distribution parameters of angular variation and machining error

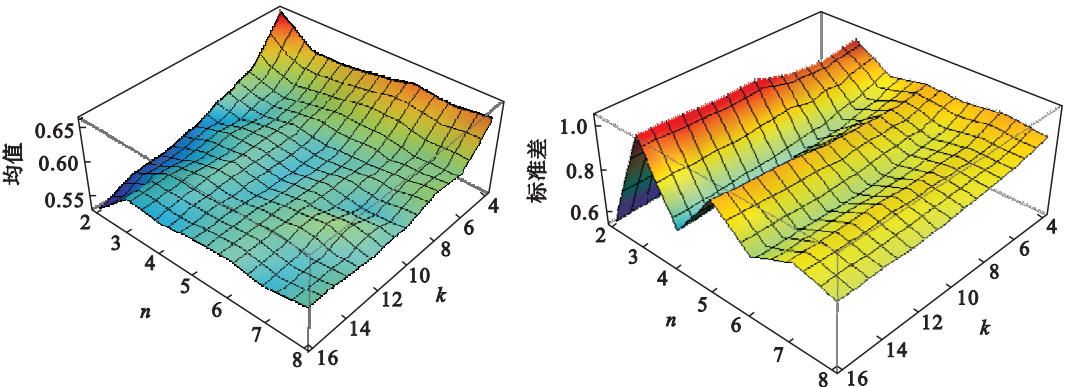


图 4 角误差与对接孔个数及装配零件数量之间的关系
Fig. 4 Relations among angular variation, numbers of butt holes and parts number
(a)— $\Delta\theta \sim \text{Rice}(0.1, 0.7)$; (b)— $\Delta\theta \sim \text{Rice}(1.414, 0.4188)$.

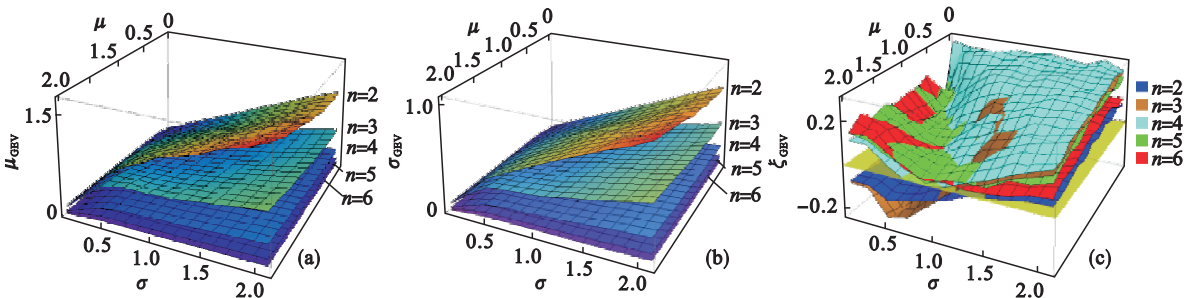


图 5 角误差与加工误差分布参数的关系
Fig. 5 Relations among distribution parameters of angular variation and machining error

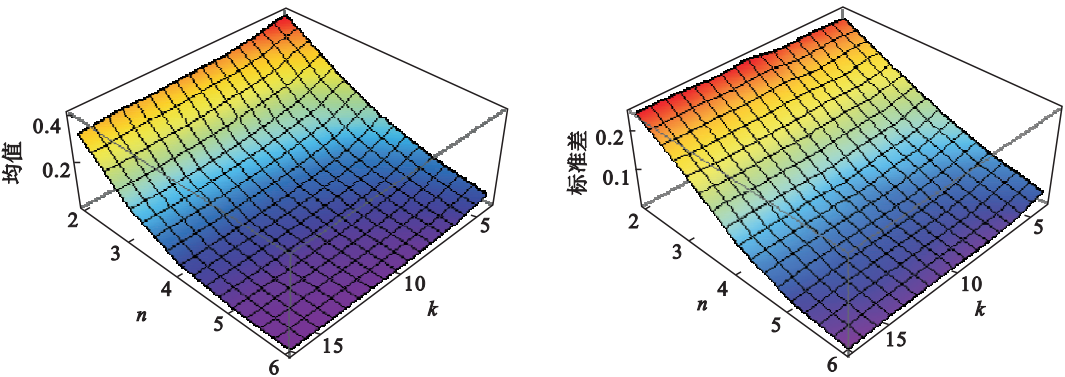


图 6 角误差与对接孔个数及装配零件数量之间的关系
Fig. 6 Relations among angular variation, numbers of butt holes and part number

3 装配实例

使用上述 3 种方法对 2 个实例进行装配,每

个实例包括 8 个零件,零件端面上有 6 个螺钉孔,分为 8 个工位进行装配。不考虑装配定位误差和测量误差,每个装配实例仿真 10 000 次。2 个实例零件的参数见表 1。

表 1 实例零件的分布参数
Table 1 Distribution parameters of assembly examples

| 实例 | $\Delta\alpha$ | $\Delta\theta$ |
|----|-------------------|-------------------------------|
| 1 | $N(0.070\ 7,0.7)$ | $\text{Rice}(0.1,0.7)$ |
| 2 | $N(1,0.418\ 8)$ | $\text{Rice}(1.414,0.418\ 8)$ |

4 讨 论

4.1 直接装配法

使用直接装配法装配,角误差的均值、标准差

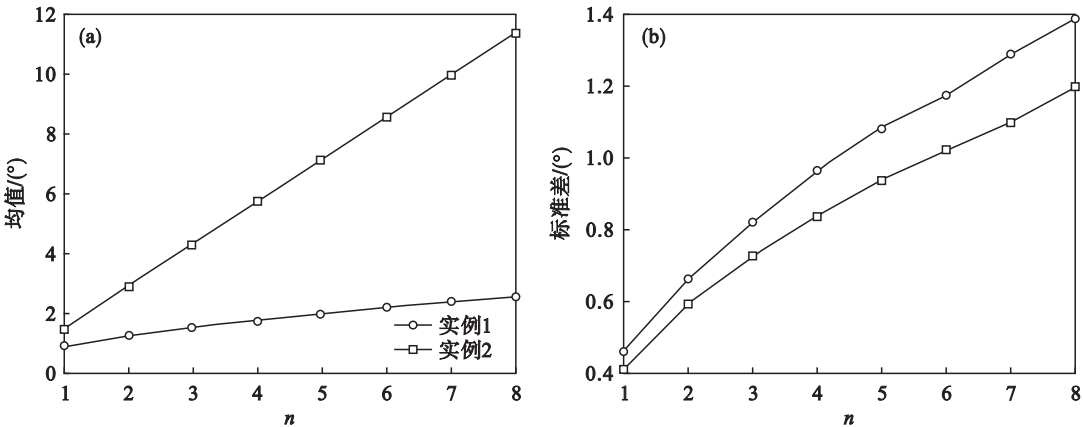


图 7 直接装配法中角误差均值、标准差与装配零件数量之间的关系
Fig. 7 Relations among angular variation mean, standard deviation and part number

4.2 逐步最小化角误差法

在图 8 中,实例 1 与实例 2 的角误差均值呈现出不同的特征,实例 1 零件对接后角误差均值基本保持不变;实例 2 的角误差均值则出现明显的震荡,第奇数装配工位角误差均值处于波峰,第偶数装配工位角误差均值处于波谷,并随着装配零件的增加逐渐收敛;相同的特征也体现在标准差上.实例 1 中角误差的分布参数基本不随装配

工位的变化而变化;而实例 2 中角误差的分布参数随装配工位有规律波动.

使用逐步最小化角误差,装配后角误差明显小于单个零件的角误差.可见,单个零件加工误差相同,但实例 1 的均值和标准差均小于实例 2 (除 $n=2$),说明装配后角误差的标准差不仅与零件角误差标准差有关,还与零件角误差的均值有关.

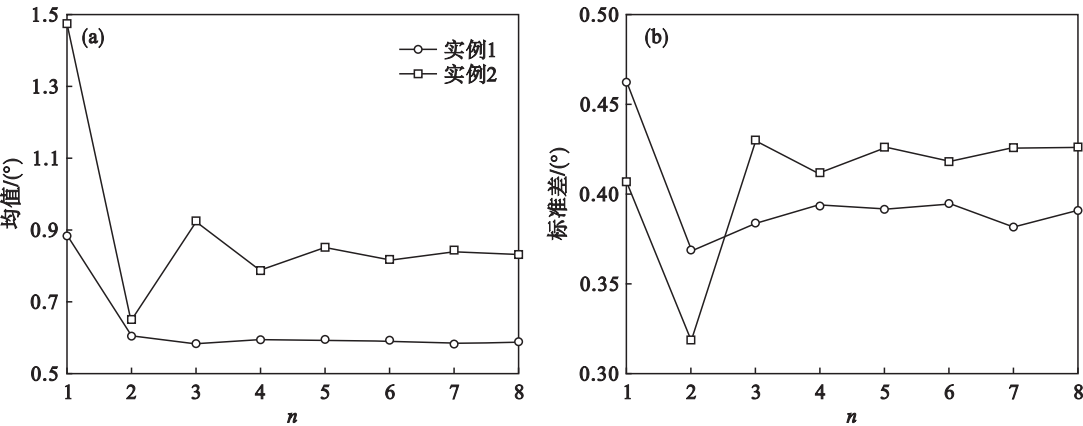


图 8 逐步最小化角误差法中角误差均值、标准差与装配零件数量之间的关系
Fig. 8 Relations among angular variation mean, standard deviation and part number

逐步最小化角误差法对零件加工误差的补偿能力有限,对接零件个数的增加对降低产品角误

差并无明显作用.

4.3 全局最小化最终角误差法

全局最小化最终角误差法是全局优化,由图

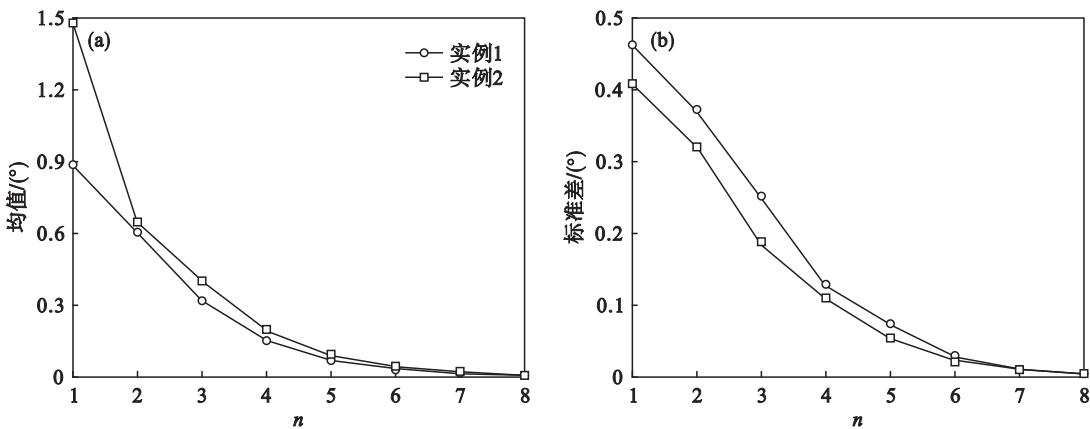


图 9 全局最小化最终角误差法中角误差均值、标准差与装配零件数量之间的关系
Fig. 9 Relations between angular accuracy mean, standard deviation and part number

5 结 论

本文研究了飞行器装配中的角误差问题,分析了 3 种装配方法对角误差的控制情况.直接装配法是最简单的装配方式,但零件的加工误差在装配过程中累积显著,难以保证装配精度;逐步最小化角误差法能够较大程度补偿零件加工误差,且装配精度几乎不受装配零件个数的影响;全局最小化最终角误差法通过零件加工误差互补偿,实现了全局优化,角误差的均值和标准差均随装配零件个数呈指数下降,并收敛于 0.

参考文献:

[1] Hussain T, Yang Z, Popov A A, et al. Straight-build assembly optimization: a method to minimize stage-by-stage eccentricity error in the assembly of axsymmetric rigid components (two-dimensional case study) [J]. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011, 133(3) :031014 – 031019.

[2] Yang Z, Popov A A, McWilliam S. Variation propagation control in mechanical assembly of cylindrical components [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2012, 31 (2) : 162 – 176.

[3] Cai M, Yang J X, Wu Z T. Mathematical model of cylindrical form tolerance[J]. *Journal of Zhejiang University Science*,

9 可见,角误差均值和标准差均随装配工位数的增加呈指数规律下降.不论零件加工误差如何,只要对接零件个数足够多,产品角误差都接近 0.

2004, 5(7) : 890 – 895.

[4] Xiong C, Rong Y, Koganti R P, et al. Geometric variation prediction in automotive assembly[J]. *Assembly Automation*, 2002, 22 : 260 – 269.

[5] 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]. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2007, 129(4) : 821 – 831.

[6] Mantripragada R, Whitney D E. Modeling and controlling variation in mechanical assemblies using state transition models [J]. *Robotics and Automation*, 1999, 15 (1) : 124 – 140.

[7] Huang W, Lin J, Kong Z, et al. Stream-of-variation modeling II : a generic 3d variation model for rigid body assembly in multistation assembly processes [J]. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2007, 129 (4) : 832 – 842.

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

[9] Huang W, Kong Z. Simulation and integration of geometric and rigid body kinematics errors for assembly variation analysis[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2008, 27 (1) : 36 – 44.

[10] Jin J, Shi J. State space modeling of sheet metal assembly for dimensional control [J]. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1999, 121(4) : 756 – 762.