

大部件调姿系统的误差分析

Error Analysis of Posture Adjustment for Major Part

北京航空航天大学 韩先国 田明荣

[摘要] 对基于三坐标定位器的大部件数字化柔性装配系统,建立系统运动控制所需的装配坐标系、动坐标系和 POGO 柱坐标系,并在此基础上分析了其正解算法。根据大部件对接的高精度要求,用全微分的方法建立各结构误差与对接部件位姿误差之间的误差正解模型,提出了一种基于工作空间的位姿补偿方法。最后,建立带有误差源的正解模型,以实例计算验证了误差正解模型和补偿方法的正确性。

关键词: 数字化装配 控制算法 误差模型 误差补偿

[ABSTRACT] The coordinate systems for analyzing the aircraft digital assembly system are designed. The forward and inverse solutions are analyzed. For the high precision, with differential calculus, a posture error model in relation to the structural errors is established. Then an compensatory method for precision is proposed based on the whole workspace. At last, both the error model and the compensatory method are confirmed by the accurate forward solution with given structure errors.

Keywords: Digital assembly Control algorithm Error model Error compensation

近年来数字化装配技术正逐渐应用于航空制造企业,数字化柔性装配系统不仅提高了装配质量、减小部件安装应力,而且大幅度降低了装配成本,取得了很好的经济效益。美国波音公司、洛克希德·马丁公司均建成了自己的数字化柔性装配系统^[1]。国内方面浙江大学、中航工业北京航空制造工程研究所已着手研究并开发了各自的柔性装配系统^[2]。

数字化柔性装配系统主要由机械随动定位装置、测量系统、运动控制系统以及数据管理系统等几部分组成。调姿精度是影响装配质量的重要因素,建立装配系统的误差模型以期对系统进行误差补偿是提高对接装配质量的关键所在。国内不少学者针对调姿精度做了大量的工作。浙江大学的李晨等^[3]利用多体运动学理论对基于三坐标定位器的调姿机构进行了误差分析,蒋志敏^[4]等人建立了单条 POGO 柱因受力变形引起大部件位姿误差的数学模型,并进行了仿真分析。以往的研

究均给出了位姿误差的传递模型,却没有提出有效的补偿方法。

本文在简要介绍数字化柔性装配系统相关控制算法的基础上,首先利用微分算法推导出各结构误差与对接部件位姿误差之间的关系,建立了误差正解模型,然后提出了一种基于工作空间的位姿补偿方法,最后通过实例计算,验证了该误差正解模型及补偿方法的正确性。

1 运动控制算法

1.1 位置反解

大部件调姿系统由 3 个 POGO 柱和对接部件组成,如图 1 所示, $O-XYZ$ 为装配坐标系, $O_d-X_dY_dZ_d$ 为与对接部件相固联的动坐标系。各 POGO 柱的上端以球铰与对接部件相连。动坐标系与装配坐标系的关系可以用旋转矩阵 R 和平移向量 T 来表示。

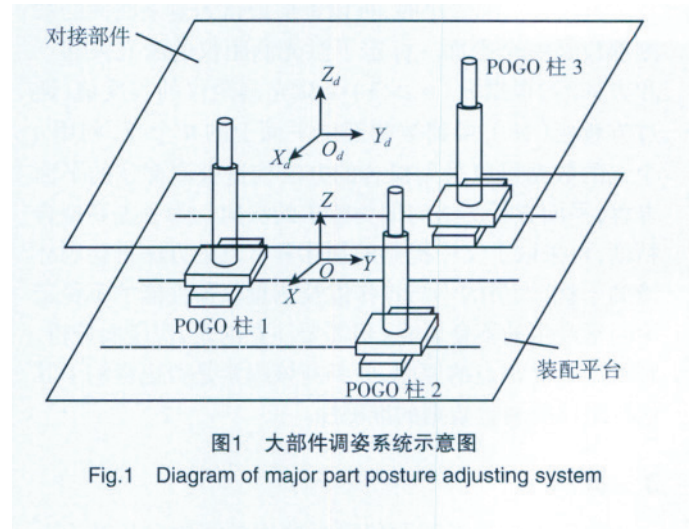


图1 大部件调姿系统示意图
Fig.1 Diagram of major part posture adjusting system

建立 POGO 柱坐标系 $O_i-X_iY_iZ_i$, 原点为初始位置时球铰中心点,各轴的方向与装配坐标系的相同。假设对接部件运动某一位姿后,取其中一条支链建立装配坐标系、POGO 柱坐标系、动坐标系之间的关系如图 2 所示。

球铰中心点 i 为坐标系变换的连接点,设球铰中心点在动坐标系中的坐标为 P_i , POGO 柱坐标系原点在装配坐标中的位置为 O_i ,则反解出实现对接部件该位姿 R 和 T 所需的驱动向量在装配坐标系下的 E_i :

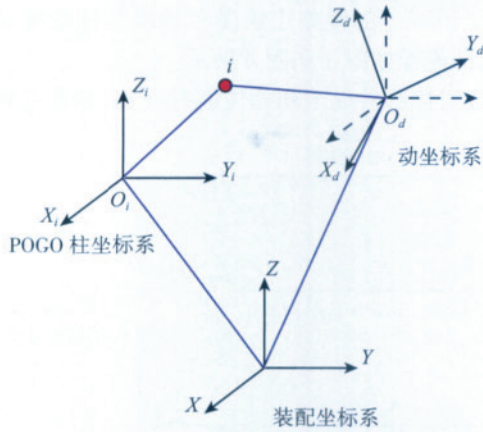


图2 各坐标系之间几何关系示意图
Fig.2 Geometry diagram of coordinate system

$$E_i = RP_i + T - O_i \quad (1)$$

令 L_{ix}, L_{iy}, L_{iz} 为 POGO 柱坐标系各轴在装配坐标系下的单位方向矢量,则

$$R_i = [L_{ix}, L_{iy}, L_{iz}] \quad (2)$$

式中, R_i 为两坐标系之间的旋转矩阵。驱动向量在 POGO 柱坐标系下的 W_i 为

$$W_i = R_i^{-1} E_i = R_i^{-1} (RP_i + T - O_i) \quad (3)$$

1.2 位置正解

位置正解是位置反解的逆过程,是已知各 POGO 柱的驱动向量求对接平台的运动位姿。将各 POGO 柱的驱动向量 W_i , 带入公式:

$$H_i = E_i + O_i = R_i W_i + O_i \quad (4)$$

求出运动后各球铰中心点在装配坐标系中的坐标 H_i , 结合球铰中心点在动坐标系中的坐标 P_i , 利用最小二乘法或奇异值分解法拟合这两组点,即可求得动坐标系相对装配坐标系的位姿参数 R 和 $T^{[5]}$ 。含有误差源的正解模型,就是将理想状态下的 R_i, W_i, P_i 和 O_i 等用实际带有误差的真实值来代替。

2 误差正解模型的建立

已知驱动向量在装配坐标系下可写为:

$$E_i = R_i W_i = x_i L_{ix} + y_i L_{iy} + z_i L_{iz} \quad (5)$$

式中, x_i, y_i, z_i 为 POGO 柱驱动向量在自身坐标系各轴上的映射值; $W_i = [x_i, y_i, z_i]^T$; POGO 柱坐标系各轴的单位方向向量 L_{ix}, L_{iy}, L_{iz} 可以写成球坐标的形式,如:

$$L = [\sin\theta\cos\phi \quad \sin\theta\sin\phi \quad \cos\theta]^T$$

方向向量的误差项可以写为:

$$dL = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\phi & -\sin\theta\sin\phi \\ \cos\theta\sin\phi & \sin\theta\cos\phi \\ -\sin\theta & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d\theta \\ d\phi \end{bmatrix}$$

$$\text{则 } dE_i = dx_i \cdot (L_{ix}) + x_i \cdot (dL_{ix}) + dy_i \cdot (L_{iy}) + y_i \cdot (dL_{iy}) + dz_i \cdot (L_{iz}) + z_i \cdot (dL_{iz}) \quad (i=1\sim 3)$$

采用两端求微分的方法推导误差正解模型,建立各结构误差与最终对接部件位姿误差的关系。动坐标系相对装配坐标系的姿态角为 (α, β, γ) , 平移向量为 $T[x, y, z]^T$ 。由式(1),令:

$$F_i = RP_i + T - O_i - E_i = 0 \quad (6)$$

两端微分可得:

$$\frac{\partial F_i}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial F_i}{\partial \beta} d\beta + \frac{\partial F_i}{\partial \gamma} d\gamma + \frac{\partial F_i}{\partial x} dx + \frac{\partial F_i}{\partial y} dy + \frac{\partial F_i}{\partial z} dz = -\frac{\partial F_i}{\partial E_i} dE_i - \frac{\partial F_i}{\partial P_i} dP_i - \frac{\partial F_i}{\partial O_i} dO_i$$

对每一条支链建立这样的微分方程,联立起来可得整个系统的结构误差与输出位姿误差之间的关系。令代表动坐标系位姿输出参数的误差项 ΔD 为

$$\Delta D = [d\alpha, d\beta, d\gamma, dx, dy, dz]^T$$

式中,

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_1}{\partial \beta} & \frac{\partial F_1}{\partial \gamma} & \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y} & \frac{\partial F_1}{\partial z} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_2}{\partial \beta} & \frac{\partial F_2}{\partial \gamma} & \frac{\partial F_2}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial y} & \frac{\partial F_2}{\partial z} \\ \frac{\partial F_3}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_3}{\partial \beta} & \frac{\partial F_3}{\partial \gamma} & \frac{\partial F_3}{\partial x} & \frac{\partial F_3}{\partial y} & \frac{\partial F_3}{\partial z} \end{bmatrix}$$

$$\Delta M = \begin{bmatrix} -\frac{\partial F_1}{\partial E_1} dE_1 - \frac{\partial F_1}{\partial P_1} dP_1 - \frac{\partial F_1}{\partial O_1} dO_1 \\ -\frac{\partial F_2}{\partial E_2} dE_2 - \frac{\partial F_2}{\partial P_2} dP_2 - \frac{\partial F_2}{\partial O_2} dO_2 \\ -\frac{\partial F_3}{\partial E_3} dE_3 - \frac{\partial F_3}{\partial P_3} dP_3 - \frac{\partial F_3}{\partial O_3} dO_3 \end{bmatrix}$$

对接系统的误差正解模型为:

$$J\Delta D = \Delta M \quad (7)$$

由于系统给定了 9 个驱动,而所求解的位姿误差数为 6 个,故采用广义逆来确定动坐标系的位姿误差:

$$\Delta D = J^+ \Delta M \quad (8)$$

利用该误差正解模型,可以建立给定的结构误差与末端位姿误差之间的关系,进而可以定量考量某一结构误差项对最终位姿的影响。该模型的建立为对接系统的精度设计提供了指导。

3 误差补偿方法

基于工作空间位姿补偿方法的提出。由位置反解方程求全微分所建立的误差模型,最终均可写为式(8)的形式。

位姿误差 ΔD 等于实际位姿 D' 与理论位姿 D 之间的差值:

$$\Delta D = D' - D \quad (9)$$

要实现精确控制,必须考虑各结构误差的影响因素,重新确定运动位姿的控制指令。假设输入的控制指令为 ΔD_k ,考虑该控制指令下的误差值 ΔD_k ,欲得到理论目标位姿 D ,应满足等式:

$$D_k = D - \Delta D_k \quad (10)$$

由于姿态误差 ΔD_k 非常小,可近似认为实际位姿的反解方程 $F(D_k)$ 与理论位姿下的反解方程 $F(D)$ 相同,两个方程具有同样的雅可比矩阵 J 和 ΔM ,则根据式(8)可知:

$$\Delta D_k = \Delta D$$

即输入理论目标指令下末端位姿的误差值等于实际位姿控制时的误差值。所以考虑误差作用下输入控制指令的补偿值应为:

$$D_k = D - \Delta D \quad (11)$$

依据推论,利用当前实测的位姿误差值来作为位姿的输入补偿值是可行的。调姿机构在实际制造和应用时,很难确定具体各结构误差的大小,所以利用该误差补偿模型,可以在各结构误差未知的情况下,依据测量出的实际位姿误差值,确定补偿后的控制指令,能够有效地提高控制效率,保证对接精度。

4 实例计算

假定各结构误差的大小,通过带有误差源的正解模

型来验证所建立的误差正解模型和误差补偿模型的正确性,验证流程如图3和图4所示。

假定对接部件处于初始位姿时,动坐标系与静坐标系

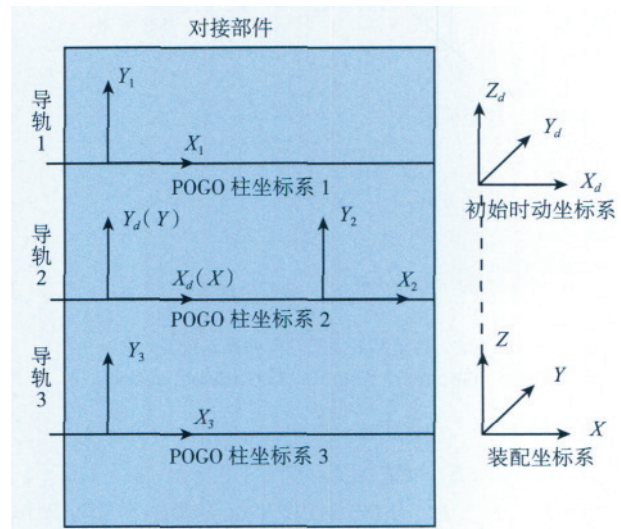


图5 各坐标系的选取规定
Fig.5 Provision of coordinate system selection

系及各 POGO 柱坐标系之间的位置关系如图5所示。

取球铰点在动坐标系中的坐标值(mm)依次为:

$$P_1 = (0, 1500, 0),$$

$$P_2 = (4000, 0, 0),$$

$$P_3 = (0, -1500, 0).$$

取 POGO 柱坐标系原点在装配坐标系中的坐标值(mm)为:

$$O_1 = (0, 1500, 1500);$$

$$O_2 = (4000, 0, 1500);$$

$$O_3 = (0, -1500, 1500).$$

球铰点在动坐标系中坐标值的误差值 dP_i (9个), POGO 柱原点在装配坐标系中的误差值 dO_i (9个), POGO 柱的定位误差值 (dx_i, dy_i, dz_i) (9个)均在 $-0.05 \sim 0.05\text{mm}$ 之间选取。POGO 柱各 Y, Z 轴的方向误差 $\delta\theta_{ix}, \delta\theta_{iy}, \delta\theta_{iz}, \delta\phi_{ix}, \delta\phi_{iy}, \delta\phi_{iz}$ (12个)均在范围 $-0.02^\circ \sim 0.02^\circ$ 之间选取, X 轴的方向误差在范围 $-0.01^\circ \sim 0.01^\circ$ 之间选取(各误差项均按最大值选取)。

根据以上误差值,取对接部件的姿态角 $\alpha = -0.5^\circ, \beta = 1^\circ, \gamma = -0.5^\circ$, 姿态矩阵 R 可根据动坐标系先绕自身的 Z 轴转动 α 角,再绕 X 轴转

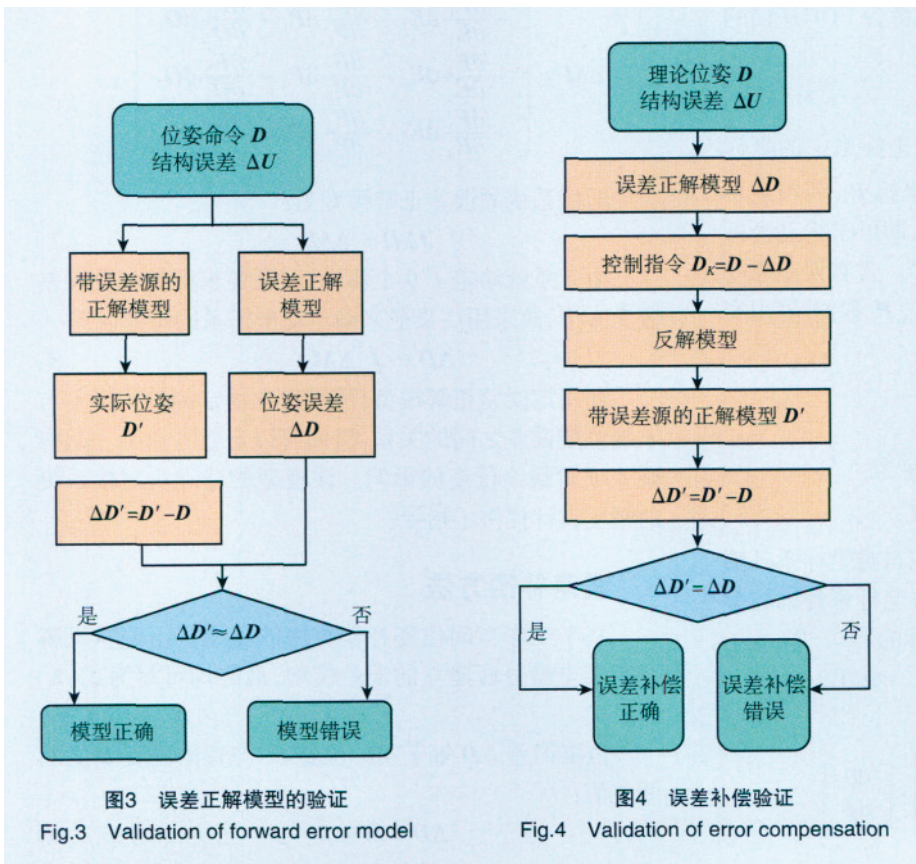


图3 误差正解模型的验证

Fig.3 Validation of forward error model

图4 误差补偿验证

Fig.4 Validation of error compensation

动 β 角,最后绕 Y 轴转动 γ 角来确定。动坐标系原点的目标位置为(300mm,150mm,1650mm)。

(1) 误差正解模型的验证。

利用误差正解模型求出各误差作用下对接部件实际位姿误差值 ΔD 与利用带有误差源作用的正解模型,求得理论控制指令下的实际位姿与目标位姿之间的误差值 $\Delta D'$ (表3)。

表1 结构误差参数 mm

i	dP_{ix}	dP_{iy}	dP_{iz}	dO_{ix}	dO_{iy}	dO_{iz}	dx_i	dy_i	dz_i
1	-0.05	-0.05	0.05	-0.05	0.05	-0.05	-0.05	-0.05	0.05
2	0.05	-0.05	0.05	0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
3	-0.05	0.05	-0.05	-0.05	-0.05	0.05	0.05	-0.05	0.05

表2 POGO柱各轴的方向参数 (°)

i	$\delta\theta_{ix}$	$\delta\theta_{iy}$	$\delta\theta_{iz}$	$\delta\phi_{ix}$	$\delta\phi_{iy}$	$\delta\phi_{iz}$
1	0.01	0.02	0.02	0.01	-0.02	0.02
2	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01	0.02	-0.02
3	-0.01	-0.02	0.02	0.01	-0.02	0.02

表3 误差正解模型验证结果

误差值	$d\alpha/(\text{°})$	$d\beta/(\text{°})$	$d\gamma/(\text{°})$	dx/mm	dy/mm	dz/mm
ΔD	-0.007849	0.001558	-0.000329	0.031077	-0.021640	0.048375
$\Delta D'$	-0.007844	0.001559	-0.000329	0.031078	-0.021638	0.048377

$$\Delta D' \approx \Delta D$$

该结果说明利用全微分所建立的误差正解模型是正确的。

(2) 误差补偿模型的验证。

根据误差正解模型求出的位姿误差 ΔD 来确定为达到目标位姿所需的控制指令, $D' = D - \Delta D$ 。由新的控制位姿参数 D' , 利用位姿反解模型反解出各 POGO 柱所需的驱动向量, 并将该向量带入含有误差源作用的正解模型中, 求出该控制指令下对接部件的实际位姿误差为:

$$\Delta D' = [0.0053^\circ, 0.0017^\circ, -0.0089^\circ, -0.1900\text{mm}, -0.1473\text{mm}, -0.0144\text{mm}]^T \times 10^{-4}$$

$$\Delta D' = \Delta D$$

可见, 补偿后的位姿误差远小于原误差值, 表明补偿效果非常理想。

5 结论

本文在分析了大部件对接相关控制算法的基础上, 利用位置正反解模型对系统的调姿精度进行了分析, 通过实例验证得出以下结论:

(1) 利用微分法所建立的结构误差到末端控制位姿误差之间的误差正解模型是正确的;

(2) 在各结构误差未知的情况下, 采用基于工作空间的位姿补偿方法是有效的。

参考文献

[1] 李彤. 飞机数字化装配技术. 科技资讯, 2009(30):22.
 [2] 荆道艳, 许国康, 王姮, 等. 大部件对接的数控定位技术研究. 航空制造技术, 2010(23):117-120.
 [3] 李晨, 方强, 李江雄. 基于三坐标定位器的大部件调姿机构误差分析. 机电工程, 2010, 27(3):6-12.
 [4] 郭志敏, 蒋君侠, 柯映林. 一种精密三坐标 POGO 柱设计与精度研究. 浙江大学学报, 2009, 43(9):1649-1654.
 [5] Arun K S, Huang T S, Blostein S D. Least-squares fitting of two 3-D point sets. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(5):68-70.

(责编 良辰)

(上接第 89 页)

3 结束语

目前, 国产民用飞机 ARJ-700 项目中, 飞机装配过程中的制孔环节大量采用手工操作, 制孔速度、制孔质量难以满足高性能飞机的要求。本文中介绍到的几种半自动以及自动制孔设备, 根据设备的特点以及适用部位, 并考虑实际装配过程中的具体情况, 应用于支线飞机 ARJ-700 以及大客 C919 等机型的生产过程中, 可以大幅度提高制孔速度、制孔质量, 在一定程度上实现装配技术的自动化、数字化和模块化。

数字化、自动化、柔性化是当前国外飞机制造技术水平的一个重要标志, 也将是国内飞机装配技术发展的方向和目标。自动制孔系统的应用, 不但能使飞机装配周期大大缩短, 而且能够提高装配质量、降低制造成本, 推动和加速我国大型客机的研制工作。

参考文献

[1] 范玉青. 现代飞机制造技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
 [2] 袁红璇. 飞机结构件连接孔制造技术. 航空制造技术, 2007(1):96-99.
 [3] 卜泳, 许国康, 肖庆东. 飞机结构件的自动化精密制孔技术. 航空制造技术, 2009(14): 61-64.
 [4] 梁青霄. 自动进给钻在飞机装配中的应用. 西飞科技, 2004(2):9-10.
 [5] 林美安, 陈文亮, 王琨, 等. 柔性轨道自动化制孔系统的仿真研究. 机械制造, 2010(548):14-16.

(责编 良辰)