

部件自动对接过程中的运动规划及精度控制

Motion Planning and Precision Controlling in Component Automatic Butt

中航工业北京航空制造工程研究所 罗芳 周万勇 侯志霞

[摘要] 本文针对飞机大部件自动对接的装配过程,建立了部件运动的数学模型,完成了部件的运动规划,并将其转换为定位器的运动。同时,分析了实际过程中误差产生的原因,并提出相应的补偿方法。该方法已应用于某型号飞机的对接装配中,结果表明,该补偿方法能够非常有效地提高对接精度。

关键词: 对接装配 误差补偿 运动规划

[ABSTRACT] Aircraft automatic butt process is researched, component motion mathematic model is set up, motion planning is completed, then components moving is converted to localizer moving. After this, why error occurs is analyzed, and how to compensate the error is advanced. This method is successfully used to aircraft assembly, from the testing data, It is obviously that the compensation method improved the conjunction precision.

Keywords: Butt-assembly Error compensation Motion planning

目前,飞机装配正在从传统的手工、固定式装配向数字化、柔性化装配发展。随着我国大型飞机的研制,部件尺寸越来越大,自动化对接设备的研制成为飞机柔性装配的一个关键技术。目前主流的自动对接集成控制系统布局是分布式的,自动对接系统由数控定位器、集成控制系统、仿真分析系统和测量系统组成。利用多台数控定位器支撑部件,通过驱动数控定位器的运动实现部件运动。因此,数控定位器的运动精度及其协同控制精度,很大程度上决定了部件运动的精度,直接影响自动对接的效果^[1-2]。

1 运动规划算法

针对部件尺寸大、易变形的特点,为了增加整个对接系统的刚性,减少部件的变形,采用4台定位器支撑部件,定位器与部件通过球铰连接。为了避免运动的不协调对部件的损坏,需要很好地规划部件的运动。在整个对接过程中,部件的运动视为纯刚体的运动,图1是其简化数学模型。刚体的运动是通过4个节点(即4个定位器坐标)的平动来实现的。

从图1中可以看出,对接系统的坐标系有:装配坐标系、4个定位器坐标系、部件的局部坐标系。运动部件的位姿是由部件局部坐标系表示,运动规划算法要解决的问题是:如何在装配坐标系中,将部件位姿转换成定位器各个轴的运动数据。其包括2个过程:部件运动规划和定位器的运动规划。

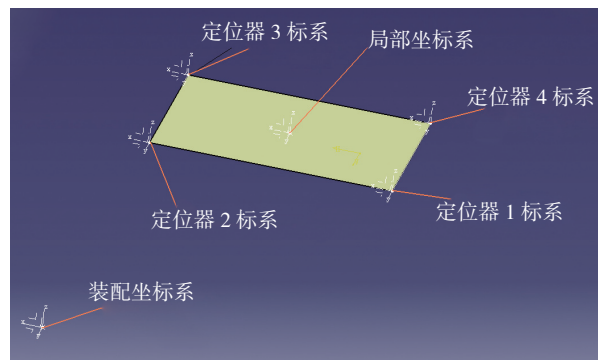


图1 对接系统数学模型

Fig.1 Mathematics modeling of automatic-butt system

1.1 部件运动规划

设部件的起始位姿是 $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, x_1, y_1, z_1)$,目标位姿是 $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2, x_2, y_2, z_2)$,部件从起始位姿运动到目标位姿,有6个方向的运动需要规划。采用S形速度曲线对部件某一方向的运动进行规划,然后将这个方向的运动方程乘以相应的比例系数就可以得到其他方向的运动方程。比例系数由式(1)求得:

$$K = \{k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6\} = \left\{ \frac{t_1}{t_{\max}}, \frac{t_2}{t_{\max}}, \frac{t_3}{t_{\max}}, \frac{t_4}{t_{\max}}, \frac{t_5}{t_{\max}}, \frac{t_6}{t_{\max}} \right\} \quad (1)$$

由式(2)求得 $\{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6\}$, t_{\max} 是它们中的最大值。

$$\{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6\} = \left\{ \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\omega_{b,\max}}, \frac{\beta_2 - \beta_1}{\omega_{b,\max}}, \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\omega_{b,\max}}, \frac{x_2 - x_1}{v_{b,\max}}, \frac{y_2 - y_1}{v_{b,\max}}, \frac{z_2 - z_1}{v_{b,\max}} \right\} \quad (2)$$

其中, $\omega_{b,\max}$ 是部件所允许的最大角速度, $v_{b,\max}$ 是部件所允许的最大速度。

在求得 t_{\max} 后,对 t_{\max} 对应方向的运动进行规划,采

用S型速度曲线进行规划,该速度曲线分为7段,0~ t_a 段加速度均匀增加、 t_a ~ t_b 段匀加速、 t_b ~ t_1 段加速度均匀减少、 t_1 ~ t_2 段匀速、 t_2 ~ t_c 段加速度均匀减小、 t_c ~ t_d 段匀减速、 t_d ~ t_3 段加速度均匀增大。

1.2 定位器的运动规划

设定位器的4个铰链球心在部件局部坐标系中的坐标可表示为 $[X_i, Y_i, Z_i]^T$,在装配坐标系中的坐标可表示为 $[X_1, Y_1, Z_1]^T$,由于部件在上架过程中,球与球窝可视完全贴合,球心与球窝心是同一个点,因此这两组坐标之间存在如下的转换关系:

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\gamma c\beta & c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha & c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha & x \\ s\gamma c\beta & s\gamma s\beta s\alpha + c\gamma c\alpha & s\gamma s\beta c\alpha - c\gamma s\alpha & y \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\beta c\alpha & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中, c 表示 \cos , s 表示 \sin , $\alpha, \beta, \gamma, x, y, z$ 分别表示部件在该状态时的位姿,由于部件规划已经规划化了部件各时刻的位姿,因此,这6个变量是已知的,且 $[X_i, Y_i, Z_i]^T$ 的值由数模给出。因此,就能够计算出在各种位姿状态下定位器球心在装配坐标系中的坐标值。然后通过与定位器自身的坐标系相乘,就能求出定位器球心在自身定位器坐标系中的坐标值。在理论上定位器的位置和轴向是能够从模型中得到,但实际上定位器的坐标系与数模有偏差,在后文中将详细叙述定位器的标定方法。

对式(3)求一阶导,得到某一时定位器各个轴的速度,对式(3)求二阶导数得,可得定位器各个轴的加速度。

2 误差产生的原因及补偿算法

数控定位器的定位误差有2种误差源:系统误差和随机误差。其中,系统误差所占比例很大,分布具有规律性且容易测量。因此,可以通过减小系统误差提高定位精度。减小系统误差有2种基本方法:(1)提高设备的制造、安装精度;(2)采用误差补偿技术^[3]。

在部件自动对接过程中,误差产生的原因有:(1)定位器安装误差;(2)定位器的定位误差;(3)随动轴误差。在明确部件误差引起原因后,设计相应的补偿方法。

2.1 定位器安装误差补偿方法

在前文中已提到,定位器的安装位置与数模中给定的位置存在差异,在将部件的运动转换成定位器的运动过程中,极易引起误差,这个误差包括两个方面:定位器的安装位置误差和定位器各个轴的方向误差。数模中的理想情况是定位器各个轴的方向与装配坐标系的方向是平行的,所以:4个定位器的相同方向之间也是完全平行的。但在实际安装过程中,无论是如何提高设备的安装精度,都无法保证它们之间的绝对平行。为此,需要求定位器坐标系与装配坐标系之间的关系 T_i ,然后在式(3)求得定位器各轴位置 $[X_i, Y_i, Z_i]$ 后,通过式(4)修正,将定位器的理论运动位置转换成实际运动位置:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = T_i \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式(4)中, T_i 表示第*i*个定位器的坐标系,第*i*个定位器坐标系的建立方法是:首先将单个定位器的主动轴和随动轴运动到各个轴的原点,然后使用激光跟踪仪测量该定位器球铰连接的球心在装配坐标系中的坐标值,然后将该坐标值作为定位器的原点。

定位器轴向的标定方法是:驱动定位器沿自身某一轴向运动,运动一段距离停止,测量该点在装配坐标系中的坐标值,在整个行程范围内采集*n*个测量点,用最小二乘法对*n*个测量点进行直线拟合,得该轴在装配坐标系的直线方程 $Ax+By+C=0$,直线的方向即是定位器轴的方向,将轴的方向单位化。

2.2 定位器定位精度误差补偿方法

2.2.1 定位器运动数据补偿

为了减少定位器运动中理论位置和实际位置的误差,需进行误差补偿。误差补偿技术是人为地制造一个与原误差大小相等、方向相反的误差补偿值修正原有误差,通过对对接系统的误差源分析、建模,实时地计算出定位器单轴的运动位置误差,将该误差量反馈到集成控制软件中,通过改变下发的运动数据,实现误差修正,提高数控定位器的定位精度。

具体实现方法是:首先将某一轴的行程范围运动划分为等距的*n*段,当定位器运动到每一个端点时,停止运动,用激光干涉仪测量该点坐标,通过反复的5次测量,干涉仪能够生成每个点的补偿值表,然后通过插补算法计算整个行程范围内所有点的补偿值^[4]。设 x_1 和 x_2 是数控系统反馈的定位器坐标值, Δx_1 和 Δx_2 是激光干涉仪测量的补偿值,求 x_1 和 x_2 之间点 x_i 的补偿值:

$$\Delta x_i = \Delta x_1 + (\Delta x_2 - \Delta x_1) \frac{x_i - x_1}{x_2 - x_1}, \quad (5)$$

发送给数控系统的运动量为 $x_i + \Delta x_i$ 。

2.2.2 定位器读数修正

对定位器的运动数据补偿后,定位器运动的位置与实际的数据相符,但是光栅尺反馈的数据与实际位置不一致。因此,需要修正光栅尺的反馈读数,设 x_1 和 x_2 是光栅尺反馈的坐标值, Δx_1 和 Δx_2 是激光干涉仪测量的该点补偿值,那么 x_1 和 x_2 之间的 x_i 的实际位置是 $x_i - \Delta x_i$,其中 Δx_i 按照式(5)进行计算。

2.3 随动轴补偿方法

由于随动轴没有驱动模块,当部件由于某些原因产生内部应力,随动轴运动到偏离随动轴原点的位置,以释放部分的内部应力。需要对随动轴的轴向和定位精度进行标定。随动轴的轴向和定位精度的标定和补偿方法与主动轴是一致的^[5-6]。若随动轴标定的坐标系,将随动轴的补偿加入后,式(4)变成如下形式:

$$\begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{pmatrix} = T_i T_s \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} + T_s \begin{pmatrix} x''_i \\ y''_i \\ z''_i \end{pmatrix} \quad (6)$$

2.4 补偿效果

采用以上算法,对误差进行补偿。图2所示的是补偿前后的定位精度。从图中可以看出,补偿前的精度范围是 $\pm 0.15\text{mm}$ 范围内,补偿后的精度达 $\pm 0.05\text{mm}$,将部件的定位精度提高了 66% 左右,可以满足部件对接装配的精度要求。该补偿方法已经成功应用于某型号飞机的对接装配。

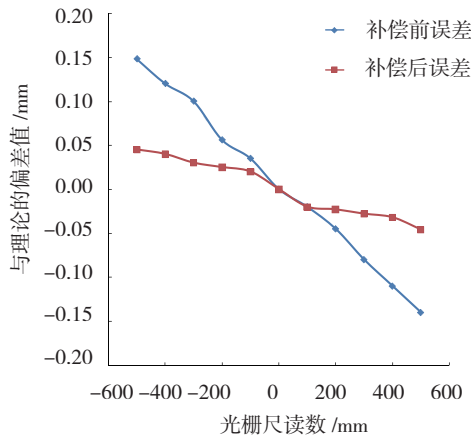


图2 补偿前后定位精度

Fig.2 Positioning accuracy before and after compensation

3 小结

(1)通过对部件的运动规划,实现了4台定位器的协同运动,保证部件在运动过程中的平稳性和协调性,避免部件在运动过程中因受力发生变形甚至破坏。(2)分析了定位误差产生的原因,定位误差包括:定位器安装误差、定位器的定位误差、随动轴误差;(3)针对产生

定位误差的不同原因,制定了相应的补偿方法。并且对补偿前后的定位精度进行比较,结果显示,补偿后的精度大幅提高,可以满足部件对接的精度要求。且该补偿方法已成功用于某型号飞机的对接装配。

参考文献

[1] 侯志霞,蒋倩,梁雪梅,等. 大部件自动对接误差控制及对合位姿规划技术 // 李志强,刘华东. 第四届数字化柔性装配技术论坛论文集—装配数字化与自动化技术. 北京: 国防工业出版社,2013:246-252.

[2] 杜兆才,邹方. 多机器人协调操作系统实现飞机大型部件对接的轨迹规划. 航空制造技术,2009(24):88-91.

[3] 曹甜东,唐小琦. 数控机床几何误差的补偿实现. 机械制造与研究,2000,35(4):88-92.

[4] 张立新,黄美玉,乔雁龙. 并联轴直线运动直线度的检测与误差补偿. 机械工程学报,2008,44(9):220-221.

[5] 张扬,高明辉. Simotion在数字化对接系统中的多轴同步控制应用. 航空制造技术,2010(32):114-116.

[6] 荆道艳,许国康,王恒,等. 大部件对接的数控定位器技术研究. 航空制造技术,2010(23):117-120.

(责编 小城)

(上接第155页)

参考文献

[1] Trivedi D, Rahn C D. Shape sensing for soft robotic manipulators // Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. San Diego: ASME,2009.

[2] Haman M W, Walker I D. Kinematics and the implementation of an elephant's trunk manipulator and other continuum Style Robots. Journal of Robotic Systems, 2003, 20(2): 45-63.

[3] Dupont P E, Lock J. Design and control of concentric-tube robots. IEEE Transactions on Robotics, 2010,26(2):209-225.

[4] Lock J, Laing G. Quasi static modeling of concentric tube robots with external Loads // The 2010 IEEE/RJSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei:IEEE, 2010:2325-2332.

[5] Yoon H S, Yi B J. A 4-DOF flexible continuum robot using a spring backbone // Proceedings of The IEEE International Conference on Mechatronics and Automation 2009:1249-1254.

[6] Georgilas IP, V D. Tourassis. ERMIS- a novel biologically inspired flexible robotic mechanism for industrial applications // 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Singapore:IEEE, 2009:1504-1509.

[7] 赵铁石,林永光,缪磊,等. 一种基于空间连杆机构的蛇形机器人. 机器人, 2006, 28(6):629-635.

[9] Hu H Y, Wang PF, Zhao B, et al. Design of a novel snake-like robotic colonoscope // Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Guilin:IEEE 2009:1957-1961.

[9] 何俊虎. 一种基于空间连杆机构的蛇形机器人 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.

(责编 深蓝)