

基于并联构型的飞机装配调姿定位机构精度研究*

王 伟¹,张春亮²,白新宇²,丁力平³

(1. 海军驻沈阳地区航空军事代表室,沈阳 110850;

2. 中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司,沈阳 110850;

3. 南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

[摘要] 针对飞机装配中机身壁板等组件调姿定位问题,本文首先提出了一种基于 3-UPS 并联构型的飞机装配调姿定位机构,该机构可以实现飞机组件装配的 6 自由度调姿与定位。同时,为提高飞机组件装配精度,分析了各运动副铰链间的误差间隙对飞机装配调姿定位机构姿态的影响,并据此建立了 3-UPS 并联机构的有效杆长模型。进一步地,基于并联机构位置正解得到了飞机装配调姿定位机构的定位精度模型。最后,通过 MATLAB 仿真分析了间隙的存在对机构运动精度的影响,为基于 3-UPS 并联机构在调姿定位中的控制补偿提供了理论基础。

关键词: 飞机装配; 3-UPS 并联机构; 有效杆长模型; 运动学正解; 定位精度

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.1/2.060



王 伟

工程师,研究方向为飞机制造装配技术。

飞机结构零件数量巨大、内部结构紧凑、协调关系复杂,其中装配工作总量占整个飞机制造总劳动量

* 基金项目: 辽宁省自然科学基金航空联合开放基金(2014028030)。

的 40%~50%^[1]。传统装配方式存在装配效率低、装配周期长和柔性较差等缺点^[2]。目前国内外广泛采用数字化、高精度装配系统对大部件进行姿态调整及定位^[3-4]。为实现飞机装配时精确调姿和定位,Naing 等^[5]研制了一套自动化装配系统,该系统主要包括三坐标数控定位器、测量设备和控制系统。柯映林等^[6]基于机身装配过程中支撑稳定性和工装可通过性的分析,提出了一种四点支撑的位姿调姿机构,该机构具有 6 个自由度。邱宝贵等^[7]针对飞机机身装配的调姿与对接,研制了基于三坐标数控定位器的并联调整机构,并对系统性能进行了测试验证。上述基于三坐标数控定位器的装配调姿系统,主要应用于机身与机翼,机身各段之间的对接,并且三坐标数控定位器一般只垂直安装,不能满足中机身侧壁板的调姿与定位。

并联机构具有精度高、刚度大、惯性小、承载能力强、速度高和易于控制等特点,因此在飞机装配中得到了广泛的应用^[8-9]。Kihlman^[10]提出基于改进 Stewart 并联机构的飞机装配低成本柔性工装,并在“神经元”无人机机身组装和机翼定位中进行了应用,显著提高了装配效率。郑联语等^[11]提出并设计了一种基于六足并联机构定位的柔性夹具,在外部测量设备辅助下实现了高精度装配定位。基于并联构型的飞机装配调姿系统,具有可重构、柔性好等优点,但受限于机械零件加工与装配精度,调姿过程中存在定位、角度等误差。通常调姿精度是影响飞机装配质量的重要因素。并联机构中存在杆件、铰链制造和装配等误差,使得并联机构实际结构参数与理想结构参数之间出现误差。Chebbi 等^[12]提出了一套含间隙并联机构误差建模方法,以提

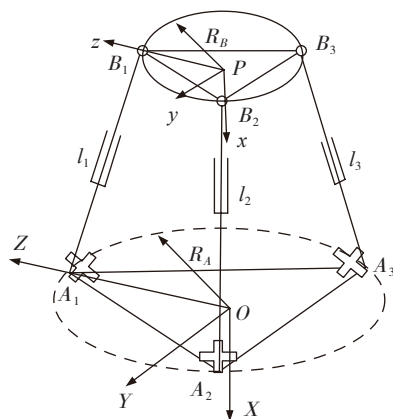
高 3-UPS 并联机构工作空间中的定位精度。王庚祥等^[13]基于连续接触模型并以 4-SPS/CU 并联机构为对象,建立球面副间隙数学模型,分析了关节间隙对该机构运动特性的影响。郭惠昕等^[14]同时考虑杆长误差和运动副间隙建立了有效杆长模型,在此基础上提出了一种平面连杆机构的稳健设计方法,有效提高了机构设计质量。上述文献研究成果都考虑了间隙存在对并联机构的精度影响,但目前尚未见到考虑运动副间隙和杆长误差的基于并联机构的飞机装配工装系统相关精度分析。

本文针对基于数控定位器的传统飞机装配系统不便应用于机身壁板等组件装配的问题,提出一种基于 3-UPS 并联构型的飞机装配系统。该机构可以通过不同安装布置形式,实现飞机部件 6 自由度的调姿与定位。高精度飞机装配要求,通过分析各运动副铰链间误差间隙对并联机构定位姿态的影响,建立了机构的有效杆长模型。基于有效杆长模型,推导出机构的运动学正解,得到包含运动副铰链间隙的真实位置和姿态。通过 MATLAB 仿真分析了间隙存在对动平台运动精度的影响,为进一步的控制补偿提供理论基础。

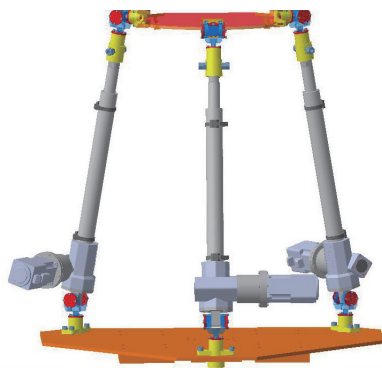
定位调姿机构原理

为实现机身壁板 6 自由度调姿定位功能,采用 3-UPS 并联构型的机构来实现某型飞机壁板的装配定位工作。3-UPS 并联机构主要由定平台 $A_1A_2A_3$ 、动平台 $B_1B_2B_3$ 以及连接动定平台之间的三条相同的支链组成(图 1)。每条支链由一个虎克铰 U 、一个移动副 P 以及一个球铰副 S 组成,其中定平台 $A_1A_2A_3$ 、动平台 $B_1B_2B_3$ 的外接圆半径分别为 R_A 和 R_B , l_i ($i=1,2,3$) 为 A_i 、 B_i 两点间的距离。

针对并联机构工装的结构特点和飞机壁板的装配工艺,并联机构各



(a) 机构简图



(b) 3D 模型

图1 3-UPS 并联机构简图及三维数模
Fig.1 Draft and 3D model of 3-UPS parallel mechanism

驱动副的控制系统以离线编程产生的定位数据为基础,驱动并联机构运动,对飞机壁板进行定位工作。

调姿机构定位误差建模

1 含间隙运动副模型及定位机构位姿分析

3-UPS 并联机构中的虎克铰 U 和球铰副 S 存在的间隙误差会导致机构位姿发生变化。虎克铰轴套孔和销轴的制造误差,会导致装配后会产生偏心距。将该偏心距看成一刚性“无质量杆”,杆长用矢量 r_a 表示,方位角用 δ_a 表示,虎克铰间隙模型如图 2 所示。

球铰副中,由于间隙的影响,球铰副的球头在球窝中将产生偏移,如图 3 所示。用空间矢量 r_b 表示球铰球头和球窝的间隙, δ_b 为球铰间隙的方位角。

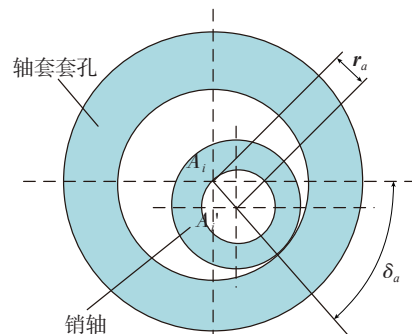


图2 虎克铰间隙模型

Fig.2 Clearance model of universal joint

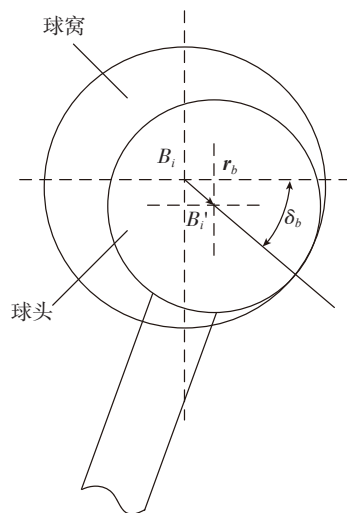


图3 球铰间隙模型

Fig.3 Clearance model of spherical joint

3-UPS 并联机构在考虑各支链上、下铰链间隙后,位姿变化如图 4 所示。动平台的位姿由理论位姿 B_1 、 B_2 、 B_3 变化为实际位姿 B_1' 、 B_2' 、 B_3' 。由于各转动副及球铰的偏心距 r_a 、 r_b 的存在,机构三条支链的有效杆长都发生了变化,与定平台的夹角也发生了变化。

2 含间隙 3-UPS 有效杆长模型

为保证在飞机装配调姿定位过程中具有较高的精度及较好的刚度,设定当动平台位姿给定后,3-UPS 并联机构将分为两步抵达所给定的位姿。第一步输入该位姿下通过位置反解求解出的理想杆长,此时虎克铰第一转动副的转角为 ψ_i ($i=1,2,3$); 第二步在杆长不变的情况下,输入虎克铰第二转动副的转角 θ_i ($i=1,2,3$),机构达到给定位姿。

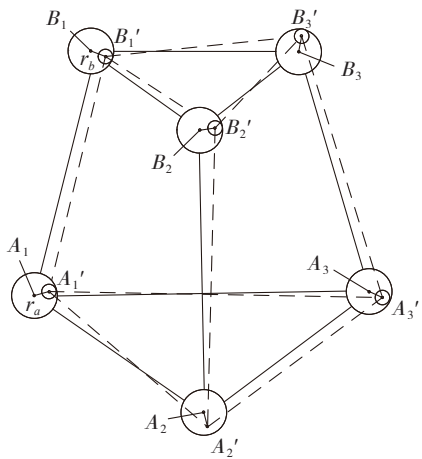


图4 考虑间隙后3-UPS并联机构位姿模型
Fig.4 Position and pose model of 3-UPS parallel mechanism considering clearance

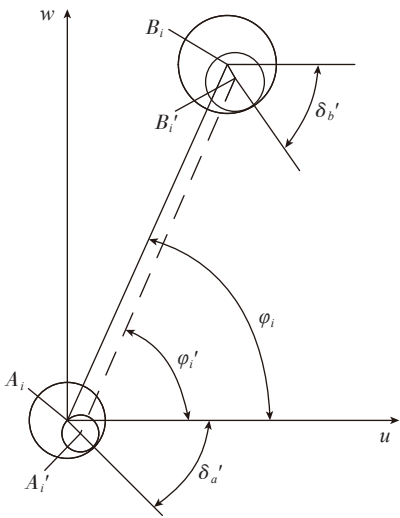


图5 $\theta_i=0^\circ$ 时uw面有效杆长计算简图
Fig. 5 Effective length model on plane uw when $\theta_i=0^\circ$

当虎克铰第一转动副转角为 ψ_i ($i=1,2,3$), 第二转动副转角为 0° 时, 如图5所示。考虑虎克铰第一转动副和球铰间隙引起的误差形成的“无质量杆”后, 杆长的有效值为 $l_{A_i B_i \circ}$

由图5得闭环矢量方程:

$$l_{A_i B_i} + B_i B_i' = A_i A_i' + l_{A_i B_i'} \quad (i=1, 2, 3) \quad (1)$$

将其用复数形式表示为:

$$l_{A_i B_i} \exp(i\varphi_i) = l_{A_i B_i'} \exp(i\varphi_i') - r_a \exp(-i\delta_a') + r_b \exp(-i\delta_b') \quad (2)$$

将式(1)的虚部和实部分开, 得到:

$$l_{A_i B_i} \cos\varphi_i = l_{A_i B_i'} \cos\varphi_i' - r_a \cos\delta_a' + r_b \cos\delta_b' \quad (3)$$

$$l_{A_i B_i'} \sin\varphi_i' = l_{A_i B_i} \sin\varphi_i + r_a \sin\delta_a' - r_b \sin\delta_b' \quad (4)$$

再将式(3)和(4)等式的两边平方后相加, 并且利用(当 x 很小时) $\sqrt{1+x} \approx 1+x/n$, 得到各支链在考虑转动副和球铰间隙后的有效杆长模型:

$$l_{A_i B_i'} = l_{A_i B_i} + r_b \cos(\varphi_i + \delta_b') - r_a \cos(\varphi_i + \delta_a') \quad (5)$$

当虎克铰第一转动副转角为 φ_i ($i=1,2,3$), 第二转动副转角为 θ_i ($i=1,2,3$) 时, 机构达到了预期给定的位姿, 此时机构最终的有效杆长为 $l_{A_i' B_i''}$, 如图6所示。

由图6得闭环矢量方程:

$$l_{A_i' B_i''} + B_i' B_i'' = A_i' A_i'' + l_{A_i' B_i'} \quad (i=1, 2, 3) \quad (6)$$

同理, 求解出最终机构的有效杆长模型为:

$$l_{A_i' B_i''} = l_{A_i' B_i'} + r_b \cos(\theta_i + \delta_b'') - r_a \cos(\theta_i + \delta_a'') \quad (7)$$

将式(5)代入式(7)可得:

$$l_{A_i' B_i''} = l_{A_i B_i} + \Delta l \quad (8)$$

其中, Δl 表示虎克铰和球铰的间隙共同作用产生的“无质量杆”杆长:

$$\Delta l = r_b [\cos(\varphi_i + \delta_b') + \cos(\theta_i + \delta_b'')] - r_a [\cos(\varphi_i + \delta_a') + \cos(\theta_i + \delta_a'')] \quad (9)$$

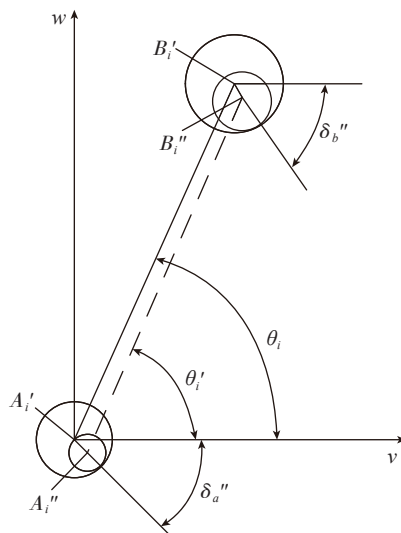


图6 uv面机构最终有效杆长计算简图
Fig.6 Final effective length model on plane uv

基于运动学正解的定位精度分析

3-UPS 并联机构的运动学正解问题可以定义为已知机构的基本尺寸参数以及机构各支链上移动副的输入位移 S_i ($i=1,2,3$) 和虎克铰第二转动副的转角 θ_i ($i=1,2,3$), 求解机构动平台的位姿 ($x_p, y_p, z_p, \alpha, \beta, \gamma$)。

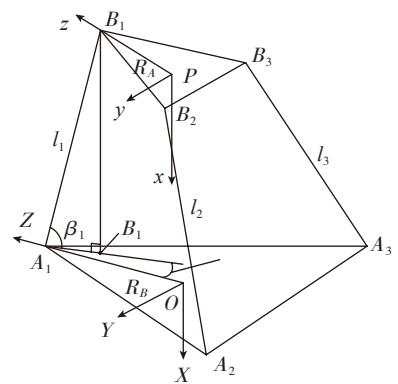


图7 3-UPS并联机构正解计算简图
Fig.7 Forward kinematics of 3-UPS parallel mechanism

建立如图7所示3-UPS 并联机构计算简图, 根据图中几何关系可得: 由 β_i 和 α_i ($i=1,2,3$) 表示的动平台球铰中心 B_i ($i=1,2,3$) 在定坐标系 $O-XYZ$ 下的坐标:

$$\begin{cases} B_1 = (-l_1 \sin\beta_1, -l_1 \cos\beta_1 \sin\alpha_1, R_A - l_1 \cos\beta_1 \cos\alpha_1) \\ B_2 = (-l_2 \sin\beta_2, \frac{\sqrt{3}}{2} R_A - l_2 \cos\beta_2 \cos(30^\circ + \alpha_2), -\frac{1}{2} R_A + l_2 \cos\beta_2 \sin(30^\circ + \alpha_2)) \\ B_3 = (-l_3 \sin\beta_3, -\frac{\sqrt{3}}{2} R_A - l_3 \cos\beta_3 \cos(30^\circ - \alpha_2), -\frac{1}{2} R_A - l_3 \cos\beta_3 \sin(30^\circ - \alpha_3)) \end{cases} \quad (10)$$

根据结构的几何约束条件可得:

$$\sin\alpha_i \cos\beta_i = \sin\theta_i \quad (11)$$

$$\cos\alpha_i \cos\beta_i = \cos\varphi_i \cos\theta_i \quad (12)$$

将式(11)和(12)代入(10)式可得由 φ_i 和 θ_i ($i=1,2,3$) 表示的动平台球铰中心 B_i ($i=1,2,3$) 坐标:

$$\begin{cases} B_1 = (-l_1 \cos \theta_1 \sin \varphi_1, -l_1 \sin \theta_1, R_A - l_1 \cos \theta_1 \cos \varphi_1) \\ B_2 = (-l_2 \cos \theta_2 \sin \varphi_2, \frac{\sqrt{3}}{2} R_A - \frac{\sqrt{3}}{2} l_2 \cos \theta_2 \cos \varphi_2 + \frac{1}{2} l_2 \sin \theta_2, \\ \quad -\frac{1}{2} R_A + \frac{1}{2} l_2 \cos \theta_2 \cos \varphi_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} l_2 \sin \theta_2) \\ B_3 = (-l_3 \cos \theta_3 \sin \varphi_3, -\frac{\sqrt{3}}{2} R_A - \frac{\sqrt{3}}{2} l_3 \cos \theta_3 \cos \varphi_3 - \frac{1}{2} l_3 \sin \theta_3, \\ \quad \frac{1}{2} R_A - \frac{1}{2} l_3 \cos \theta_3 \cos \varphi_3 + \frac{\sqrt{3}}{2} l_3 \sin \theta_3) \end{cases} \quad (13)$$

因为动平台 $B_1 B_2 B_3$ 是等边三角形,各边边长相等,从而可以列出机构的约束方程为:

$$\begin{aligned} (X_{B_1} - X_{B_2})^2 + (Y_{B_1} - Y_{B_2})^2 + (Z_{B_1} - Z_{B_2})^2 &= S^2 \\ (X_{B_2} - X_{B_3})^2 + (Y_{B_2} - Y_{B_3})^2 + (Z_{B_2} - Z_{B_3})^2 &= S^2 \\ (X_{B_3} - X_{B_1})^2 + (Y_{B_3} - Y_{B_1})^2 + (Z_{B_3} - Z_{B_1})^2 &= S^2 \end{aligned} \quad (14)$$

根据文献 [8] 中的方法,最终可以得到三个球铰点的坐标,进而得到动平台中心点的位置坐标。

$$P = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} -l_1 \cos \theta_1 \sin \varphi_1 - l_2 \cos \theta_2 \sin \varphi_2 - l_3 \cos \theta_3 \sin \varphi_3 - l_1 \sin \theta_1 - \\ \frac{\sqrt{3}}{2} l_2 \cos \theta_2 \cos \varphi_2 - \frac{\sqrt{3}}{2} l_3 \cos \theta_3 \cos \varphi_3 + \frac{1}{2} l_2 \sin \theta_2 - \frac{1}{2} l_3 \sin \theta_3 \\ R_A - l_1 \cos \theta_1 \cos \varphi_1 + \frac{1}{2} l_2 \cos \theta_2 \cos \varphi_2 - \frac{1}{2} l_3 \cos \theta_3 \cos \varphi_3 \\ + \frac{\sqrt{3}}{2} l_2 \sin \theta_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} l_3 \sin \theta_3 \end{pmatrix}^T \quad (15)$$

由于 z 轴在 B_1 与 $B_2 B_3$ 的中点的连线上,可以得到 z 轴单位向量:

$$l = \left(B_1 - \frac{B_2 + B_3}{2} \right) / \left| B_1 - \frac{B_2 + B_3}{2} \right| \quad (16)$$

y 轴与 $B_2 B_3$ 平行,则 y 轴的单位向量为:

$$m = (B_2 - B_3) / |B_2 - B_3| \quad (17)$$

根据 l 、 m 、 n 三者的关系,计算出 x 轴的单位向量:

$$n = -(l \times m) \quad (18)$$

将式(8)拆分成3个等式,即 $l_1 = l A_1 "B_1"$, $l_2 = l A_2 "B_2"$, $l_3 = l A_3 "B_3"$,代入式(13)~(18)中,便可得到运动副铰链间隙存在情况下机构的真实位置和姿态,即可求得调姿定位机构的定位精度。

数值算例

为分析间隙存在对动平台运动精度的影响,通过 MATLAB 仿真分析计算 3-UPS 并联机构在给定机构

结构参数和误差参数时的运动精度,各参数如表 1 所示。

不考虑运动副间隙和含有运动副间隙两种情况下,动平台参考点的轨迹和在 X 、 Y 、 Z 3 个方向上的位移误差对比如图 8 (a)~(d) 所示,其中理想轨迹为不考虑运动副间隙状态,实际轨迹为包含有运动副间隙状态。

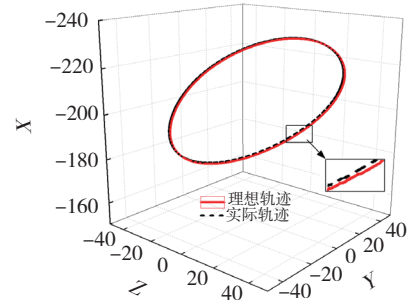
从图 8 (a) 可以看出,3-UPS 并

联机构动平台位姿精度受铰链间隙影响较大。当铰链间隙的空间矢量 r 方向与机构杆长所在方向一致时,轨迹偏差达到最大,这是因为此时间隙矢量在杆长方向上的投影最大,有效杆长也最大。

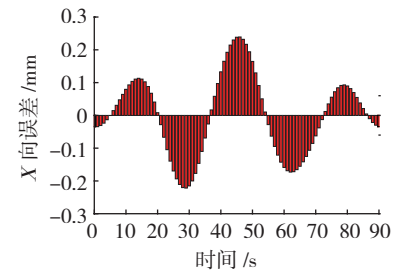
结合图 8 (b)~(d) 可知,3-UPS 并联机构动平台位姿精度在

表1 机构的结构参数

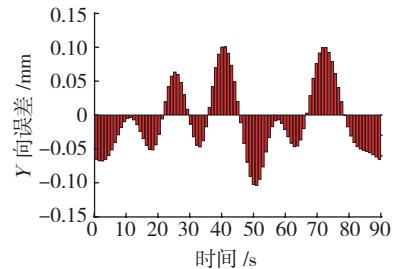
结构参数	数值
动平台半径 R_B /mm	60
定平台半径 R_A /mm	100
驱动杆伸缩范围 l /mm	200 ± 20
虎克铰第一转动副转角范围 φ_1 /rad	$-\pi/4 \sim \pi/4$
虎克铰第二转动副转角范围 φ_2 /rad	$-\pi/4 \sim \pi/4$
球铰转角范围 ψ_i /rad	$-\pi/3 \sim \pi/3$
虎克铰方位角范围 δ_a /rad	$0 \sim 2\pi$
球铰方位角范围 δ_b /rad	$0 \sim 2\pi$
虎克铰第一、二级转动副间隙 r_a /mm	0.16



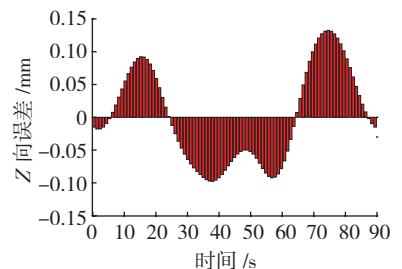
(a) 动平台参考点的运动轨迹比较



(b) 动平台参考点 X 向误差



(c) 动平台参考点 Y 向误差



(d) 动平台参考点 Z 向误差

图8 运动平台精度分析

Fig.8 precision analysis of the motion platform

X 方向上的误差值要大于在 Y 和 Z 方向上的误差值,这是因为铰链间隙的空间矢量 r 与 X 向的夹角最小,故其在 X 向的投影最大,使得对 X 向的影响也是最大的。

结论

(1) 通过分析运动副间隙对并联机构的影响,建立了有效杆长模型。

(2) 基于 3-UPS 并联机构的运动学正解, 分析了考虑运动副间隙存在的情况下定位调姿机构的精度, 为大部件的精确定位提供了分析依据。

(3) 通过数值算例, 验证了间隙对动平台运动精度的影响, 对基于 3-UPS 并联机构在调姿定位中的控制补偿具有指导意义。

参考文献

[1] LAUTERBACH K U, HENKER R, JUNKER M, et al. High resolution spectroscopy on optical signals in fiber communication systems[J/OL]. IEEE, 2009: <http://paperari:58405886848532504e88b47329a75d3f>.

[2] 许国康. 大型飞机自动化装配技术[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 734-740.

XU Guokang. Automatic assembly technology for large aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 734-740.

[3] BUTTERFIELD J, CROSBY S, CURRAN R, et al. Optimization of aircraft fuselage assembly process using digital manufacturing[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2007, 7(3): 269-275.

[4] 邹冀华, 刘志存, 范玉青. 大型飞机部件数字化对接装配技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(7): 1367-1373.

ZOU Jihua, LIU Zhicun, FAN Yuqing. Large-size airplane parts digital assembly technology[J]. Computer Integrated Manufacturing

Systems, 2007, 13(7): 1367-1373.

[5] NAING S. Feature based design for jigless assembly [D]. Bedfordshire: Grandfield University, 2004.

[6] 柯映林, 杨卫东, 李江雄, 等. 一种基于四个数控定位器的飞机部件位姿调姿系统及方法: 中国, CN200810161668.9[P]. 2009-02-11.

KE Yinglin, YANG Weidong, LI Jiangxiang, et al. A system and method of aircraft part posture alignment based on four localizers: China, CN200810161668.9 [P]. 2009-02-11.

[7] 邱宝贵, 蒋君侠, 毕运波, 等. 大型飞机机身调姿与对接试验系统[J]. 航空学报, 2011, 32(5): 908-919.

QIU Baogui, JIANG Junxia, BI Yunbo, et al. Posture alignment and joining test system for large aircraft fuselages[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(5): 908-919.

[8] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

HUANG Zhen, ZHAO Yongsheng, ZHAO Tieshi. Advanced spatial mechanism [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[9] 王珉, 曾长, 陈文亮, 等. 一种用于飞机装配的八足并联自主移动机构[J]. 机械工程学报, 2013, 49(15): 49-54.

WANG Min, ZENG Chang, CHEN Wenliang, et al. A kind of parallel mechanism of autonomous mobile for aircraft assembly[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(15): 49-54.

[10] KIHLMAN H. Flexapods—flexible tooling at SAAB for building the neuron aircraft, SAE International—2010-01-1871 [R] New York: SAE, 2010.

SAE, 2010.

[11] 郑联语, 王艺玮, 蔡志为. 基于盒式连接和六足机构的翼盒水平装配可重构柔性夹具设计与验证初探[J]. 航空精密制造技术, 2011, 47(3): 44-48.

ZHENG Lianyu, WANG Yiwei, CAI Zhiwei. Research on design and verification of a reconfigurable flexible for horizontal wingbox assembly[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2011, 47(3): 44-48.

[12] CHEBBI A H, AFFI Z, ROMDHANE L. Prediction of the pose errors produced by joints clearance for a 3-UPU parallel robot[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(9): 1768-1783.

[13] 王庚祥, 刘宏昭, 邓培生. 考虑球面副间隙的并联机构动力学模型[J]. 振动与冲击, 2014, 33(10): 43-49.

WANG Gengxiang, LIU Hongzhao, DENG Peisheng. Dynamic modeling for a parallel mechanism considering spherical joint clearance[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(10): 43-49.

[14] 郭惠昕, 岳文辉. 含间隙平面连杆机构运动精度的稳健优化设计[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 75-81.

GUO Huixin, YUE Wenhui. Design optimization of planar linkage mechanism with joint clearance for improving the robustness of kinematic accuracy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 75-81.

通讯作者: 王伟, E-mail: nationlismbai@163.com。

Positioning Accuracy Research of Assembly Tooling for Aircraft Based on Parallel Mechanism

WANG Wei¹; ZHANG Chunliang²; BAI Xinyu²; DING Liping³

(1. Navy stationed in Shenyang Aviation Military Representative Office, Shenyang 110850, China;

2. AVIC Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110850, China;

3. CMEE, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Aiming at the requirements of localization and posture alignment in aircraft digital assembly, the 3-UPS parallel mechanism which has 6-DOF was introduced as an aircraft assembly posture and positioning system. First, to improve the aircraft components assembly precision, an effective length model of 3-UPS was established by analysis the kinematic pair error clearance between hinge. Then, the positioning accuracy model of this system was obtained based on parallel mechanism positive position solution. Finally, the influence of the positioning mechanism motion precision by the kinematic pair error clearance between hinges was simulated in MATLAB, and the results of the analysis provide a theoretical basis for control compensation.

Keywords: Aircraft Assembly; 3-UPS parallel mechanism; Effective length model; Positive solution forward kinematics; Positioning accuracy

(责编 大漠)