

大型飞机机身壁板装配位姿调整系统的运动规划

王少锋, 张进华, 刘志刚, 洪军

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了解决大型飞机机身壁板数字化装配中的调姿与对接问题,设计了一种面向大型飞机机身部装的数字化柔性工装试验样机,提出了一种基于精密三坐标定位器四点支撑的大型飞机机身壁板的装配位姿调整方法.该方法不仅适合于调姿路径不确定的情况,而且还将装配位姿调整过程分解为位置与姿态2个调整阶段,从而降低了多轴协调控制的难度.由于装配件的位移、速度、加速度轨迹的理论计算与物理实验结果均是光滑连续的,而且满足各边界约束条件,因此该调姿系统及其运动规划方法可满足机身壁板装配调姿的精度、效率和稳定性要求,为装配件调姿运动的高效精确控制奠定了基础.

关键词: 装配;轨迹规划;位姿调整

中图分类号: V262.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)03-0102-05

Motion Planning for Posture Alignment Machine Tool Oriented Fuselage Panel

WANG Shaofeng, ZHANG Jinhua, LIU Zhigang, HONG Jun

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To meet the requirement of automated alignment and joining of fuselage panels in digital assembly, a novel type of assembly machine tool for adjusting a large subassembly location (including position and orientation) is designed. The adjusting strategy of subassembly position and orientation based on four accurate 3-axis locators support is proposed, which is suitable for the case of uncertain path and reduces the multi-axis control difficulty of every locator by decomposing the location path planning into two parts, one for position schemes and the other for orientation ones. The simulation and experiment show the accuracy, efficiency and stability of location alignment of the fuselage panels.

Keywords: assembly; trajectory planning; posture alignment

大型飞机装配是一个复杂的生产过程,由于传统刚性型架存在着设计制造周期长、精度稳定性差、通用性差等缺陷,因此基于多点支撑的装配件柔性调姿系统应运而生.

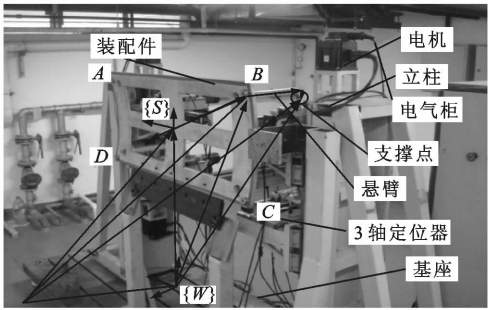
基于提高生产效率直接源于运行时间的原因,最短时间轨迹规划方法最早被提出^[1],同时在相位平面内得到了进一步推广^[2-3],但却理想地认为机器人部件为完全刚性,忽略了驱动部件的动态性能极限将产生不连续的加速度,进而导致高频振动时产生共振现象.为了削弱应力对系统结构的损坏,文献

[4-6]以关节加速度变化或关节驱动力变化对时间的积分最小为目标进行轨迹规划,从而降低了轨迹跟踪误差.尽管系统连续、平稳的运动特性是必不可少的,但最小能量消耗的轨迹规划方法还是被广泛使用,如太空机器人和水下探索等.通常,最优运动时间与最小能量消耗被同时构造为成本目标函数^[1,5,7],操控时间与能量消耗的平衡可通过相应的权重系数来调整.此外,实际工程中驱动元件的物理极限特性常常被作为轨迹规划的约束条件,同样可起到直接提高轨迹跟踪控制精度的作用^[8].

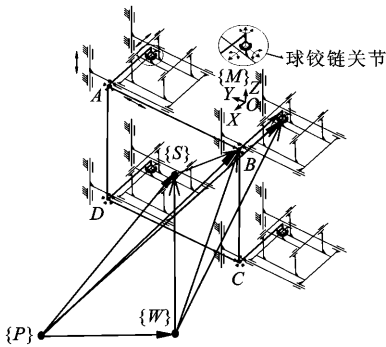
本文结合课题组设计的面向大型飞机机身壁板装配的调姿系统,研究了基于精密三坐标定位器四点支撑的大型装配件位姿调整轨迹规划问题,有效地将位姿调整过程分解为姿态与位置的调整,最终得到了装配位姿调整效率相对最高,即最短调姿时间的搜索算法与调姿运动轨迹规划方法。

1 运动学建模

为了降低多轴联动控制的难度,本文将装配件位姿调整过程分解为姿态与位置的调整过程。如图 1 所示,从机构学上可将该机构看作是 Stewart 6 自由度并联机构的一种变异,每个精密三坐标定位器就是并联机构的一个支链,装配件相当于动平台。构建与装配件理论对合位姿相重合的世界坐标系 $\{W\}$ 和以装配件参考点 P_0 为原点的惯性主轴坐标系 $\{S\}$ 。 $\{S\}$ 相对于 $\{W\}$ 的位姿分别由 P_0 的位置向量 $\boldsymbol{P}=(X,Y,Z)^T$ 和与欧拉角 ϕ,θ,ψ 相关的 3×3 阶旋



(a) 系统组成



(b) 系统运动简图

A、B、C、D: 装配件位姿观测点

图 1 大型飞机机身部装数字化柔性工装试验样机
转矩阵 ${}^W\boldsymbol{R}_S$ 获得。以各定位器相应进给方向为坐标轴,来构建驱动坐标系 $\{M_i\}$ ($i=1\sim 4$),并对 $\{W\}$ 相对 $\{M_i\}$ 的姿态旋转矩阵 ${}^{M_i}\boldsymbol{R}_W$ 进行标定。装配件位姿矢量 $\boldsymbol{v}=(\boldsymbol{P}^T,\phi,\theta,\psi)^T$, ${}^S\boldsymbol{r}_i$ 与 ${}^{M_i}\boldsymbol{Q}_i$ ($i=1\sim 4$) 分别表示球铰关节中心相对 $\{S\}$ 和 $\{M_i\}$ 的位置矢量,则

$${}^{M_i}\boldsymbol{Q}_i = {}^{M_i}\boldsymbol{R}_W\boldsymbol{q}_i^W = (\boldsymbol{P} + {}^W\boldsymbol{R}_S\boldsymbol{r}_i) \quad (1)$$

2 动力学模型

忽略系统不确定性与外部干扰,将各定位器进给轴向驱动力作为系统理论控制输入,可得到该系统的动力学模型

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{c} m\ddot{\boldsymbol{p}} - m\boldsymbol{g} + \boldsymbol{H}^M\ddot{\boldsymbol{Q}} - 4m_{iz}\boldsymbol{g} \\ \boldsymbol{I}_S\ddot{\boldsymbol{\omega}} + \tilde{\boldsymbol{\omega}}\boldsymbol{I}_S\boldsymbol{\omega} + \tilde{\boldsymbol{r}} \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}^{-1} \\ \boldsymbol{R}^{-1} \\ \boldsymbol{R}^{-1} \\ \boldsymbol{R}^{-1} \end{bmatrix} (\boldsymbol{H}^M\ddot{\boldsymbol{Q}} - 4m_{iz}\boldsymbol{g}) \end{array} \right] = \\ & \left[\begin{array}{cccc} \boldsymbol{I} & \boldsymbol{I} & \boldsymbol{I} & \boldsymbol{I} \\ \tilde{\boldsymbol{r}}_1\boldsymbol{R}^{-1} & \tilde{\boldsymbol{r}}_2\boldsymbol{R}^{-1} & \tilde{\boldsymbol{r}}_3\boldsymbol{R}^{-1} & \tilde{\boldsymbol{r}}_4\boldsymbol{R}^{-1} \end{array} \right] \boldsymbol{F} \quad (2) \\ & \boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} \text{diag}(m_{1x} + m_{1y} + m_{1z}, m_{1y} + m_{1z}, m_{1z}) \\ \vdots \\ \text{diag}(m_{4x} + m_{4y} + m_{4z}, m_{4y} + m_{4z}, m_{4z}) \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

式中: m 为装配件质量; m_{ix},m_{iy},m_{iz} ($i=1\sim 4$) 为各定位器进给轴向托板质量; $\boldsymbol{F}$ 为各定位器进给轴向驱动力矢量; $\boldsymbol{\omega}$ 为欧拉转角角速度; $\boldsymbol{I}_S$ 为装配件相对 $\{S\}$ 的惯性张量; $\boldsymbol{g}$ 为重力加速度矢量。

式(2)中的 $\boldsymbol{F}$ 具有 12 个分量,且方程个数只有 6 个,因此该系统动力学模型是一个多解的冗余驱动问题。应用 Moore-Penrose 广义逆的求解方法对下式进行求解,得到解的一般形式为

$$\begin{aligned} & \boldsymbol{F} = \boldsymbol{W}^+ \boldsymbol{P} + (\boldsymbol{I}_{12} - \boldsymbol{W}^+ \boldsymbol{W})\boldsymbol{\varepsilon} \\ & \boldsymbol{W}^+ = (\boldsymbol{W}^T \boldsymbol{W})^{-1} \boldsymbol{W}^T \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{W}$ 是 $\boldsymbol{W}^+$ 的 Moore-Penrose 广义逆矩阵; $\boldsymbol{I}_{12}$ 是 12×12 的单位矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是任意选取的 12×1 矢量,它决定了 $\boldsymbol{F}$ 可以有多组解。根据较小驱动力易于提高系统控制精度及运动稳定性的特点,选取 $\boldsymbol{\varepsilon}=\boldsymbol{0}$,得到 $\boldsymbol{F}$ 的最小 2 范数解

$$\boldsymbol{F}_{\parallel 2\parallel} = \boldsymbol{W}^+ \boldsymbol{P}$$

3 基于驱动成本最小的轨迹规划

3.1 约束条件

装配件从初始吊装位矢量 $\boldsymbol{v}_1$ 调整到理论目标对合位姿矢量 $\boldsymbol{v}_n$ 的过程中,各球铰关节中心的运动轨迹必须满足大量的约束条件,如运动学边界条件、驱动单元物理约束条件等。

运动学边界的条件为: ① $\boldsymbol{v}_1 = \boldsymbol{v}(t_1=0)$, $\boldsymbol{v}_n = \boldsymbol{v}(t_n=T)$; ② $\dot{\boldsymbol{v}}_1 = \dot{\boldsymbol{v}}(t_1=0)=\boldsymbol{0}$, $\dot{\boldsymbol{v}}_n = \dot{\boldsymbol{v}}(t_n=T)=\boldsymbol{0}$; ③: $\ddot{\boldsymbol{v}}_1 = \ddot{\boldsymbol{v}}(t_1=0)$, $\ddot{\boldsymbol{v}}_n = \ddot{\boldsymbol{v}}(t_n=T)=\boldsymbol{0}$ 。

在实际工程中,为了满足驱动元件的输出转速、

输出力矩的限制,以及避免机构的共振现象,各球铰关节的运动位置、速度、加速度必须满足一定的物理给束条件,即:① $Q_{\min}^M \leq Q^M(t) \leq Q_{\max}^M$; ② $\dot{Q}_{\min}^M \leq \dot{Q}^M(t) \leq \dot{Q}_{\max}^M$; ③ $\ddot{Q}_{\min}^M \leq \ddot{Q}^M(t) \leq \ddot{Q}_{\max}^M$.

3.2 轨迹表示

为了降低装配件在调姿过程中多驱动轴协调控制的难度,将装配件调姿运动分解为姿态与位置 2 个调整阶段,并且分别以多项式拟合,来表示装配件旋转与平移运动过程中各驱动点的运动轨迹.

3.2.1 装配件姿态调整轨迹表示 为满足装配件装配件调姿调整过程中的运动轨迹的连续性要求等,采用 5 次多项式拟合装配件,从 v_1 调整到 v_n 过程的装配姿态轨迹方程为

$$\begin{bmatrix} v(t) \\ \dot{v}(t) \\ \ddot{v}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^5 & t^4 & t^3 & t^2 & t^1 & 1 \\ 5t^4 & 4t^3 & 3t^2 & 2t & 1 & 0 \\ 20t^3 & 12t^2 & 6t & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_5 \\ a_4 \\ a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

分别将 $t=t_1=0$ 、 $t=t_n=T_f$ 代入式(3),联立各约束条件,可求解 6 个未知变量 $a_0 \sim a_5$.

3.2.2 装配件位置调整轨迹表示 针对飞机机身壁板装配位置调整过程中平移运动相对简单的特点,在平移过程中依据梯形加速模式,采用分段三次多项式,结合运动学边界条件、物理条件及轨迹连续性约束条件,构建的装配件位置调整过程中的启动、运行、停止过程的运动轨迹方程如下

$$\begin{bmatrix} v(t) \\ \dot{v}(t) \\ \ddot{v}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 & t^3 & t^3 & 1 \\ t^3 & t^3 & 1 & 0 \\ 6t & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} v(t) \\ \dot{v}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} v(t) \\ \dot{v}(t) \\ \ddot{v}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 & t^3 & t^3 & 1 \\ 3t^2 & 2t & 1 & 0 \\ 6t & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_7 \\ b_8 \\ b_9 \\ b_{10} \end{bmatrix} \quad (7)$$

分别将 $t=t_1=0$ 、 $t=t_n=T_f$ 代入式(5)~式(7),联立各约束条件,同时结合位移与速度轨迹分段函数的连续性,可求解 10 个未知变量 $b_1 \sim b_{10}$.

3.3 目标优化函数与优化方法

系统的调姿运动质量完全取决于所采用的目标函数,即

$$\min T = \int_0^{T_f} 1 dt \quad (8)$$

T_f 代表在满足所有约束条件下装配件从 v_1 调整到 v_n 的最短时间,以式(8)为优化目标,搜索 T_f 的具体步骤如图 2 所示.

4 系统实验

通过联动控制各球铰关节,可以实现装配件由 $v_1=(10,15,22,0.015,-0.02,0.025)^T$ 到 $v_n=(0\ 0\ 0\ 0\ 0)^T$ 的调整,但调姿过程不能出现如表 1 所示的运动学、动力学参数的突变.

表 1 装配系统的运动极限参数

$Q_{\max}/\text{mm}$	$\dot{Q}_{\max}/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$\ddot{Q}_{\max}/\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$
3.5	3.5	0.5

4.1 理论计算分析

设置装配件在装配姿态与位置调整中各运动序列的时间范围 $[T_{\min}, T_{\max}]$,离散计算时间间隔 $T_d=0.2\text{ s}$,将欧拉角转换顺序设定为 1、2、3,并进行理

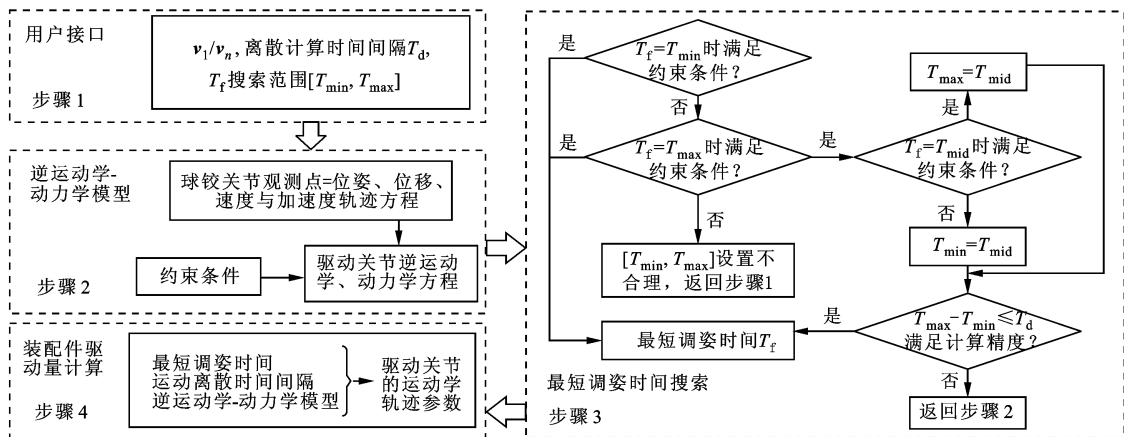


图 2 最短调姿时间 T_f 的搜索

论计算. 基于二分法,对绕 X 轴旋转的调姿序列所需最短时间的搜索结果如图 3 所示. 沿 X 轴平移的调姿序列所需最短时间的搜索结果如图 4 所示,绕 Y、Z 轴的调姿过程类同. 完整调姿历程的调姿时间序列为(6, 5.5, 8.5, 32, 36, 42). 图 3b~3d 与图 4b~图 4d 分别显示了观测点 A 的位移、速度、加速度轨迹曲线,观测点 B、C 与 D 的运动轨迹类同. 计算结果表明,轨迹规划方法降低了多轴联动的控制难度,最大限度地提高了装配效率,虽然速度曲线的尖点部位使加速度轨迹曲线出现不连续点,但其幅值较小,能够满足约束条件,即该系统驱动单元可提供所需加速度的突变,说明本文方法在理论上是可

行的.

4.2 激光跟踪仪测量分析

利用图 1 所示的试验样机,对装配件的装配位姿进行实际控制调整,同时驱动激光跟踪仪对各驱动关节的运动轨迹进行跟踪测量,进而通过与其理论位移轨迹的比对,从装配件的调姿过程及其最终定位精度两方面进一步验证上述位姿调整方法的可行性.

由于激光跟踪仪测量采样与试验样机控制采样的频率不同步,因此本文对测量数据进行了 5 次多项式曲线拟合,然后以试验样机控制采样周期对拟合曲线进行采样,并以此重构各驱动关节的位移轨迹曲线. 基于卡尔·皮尔逊设计的相关系数统计指标,计

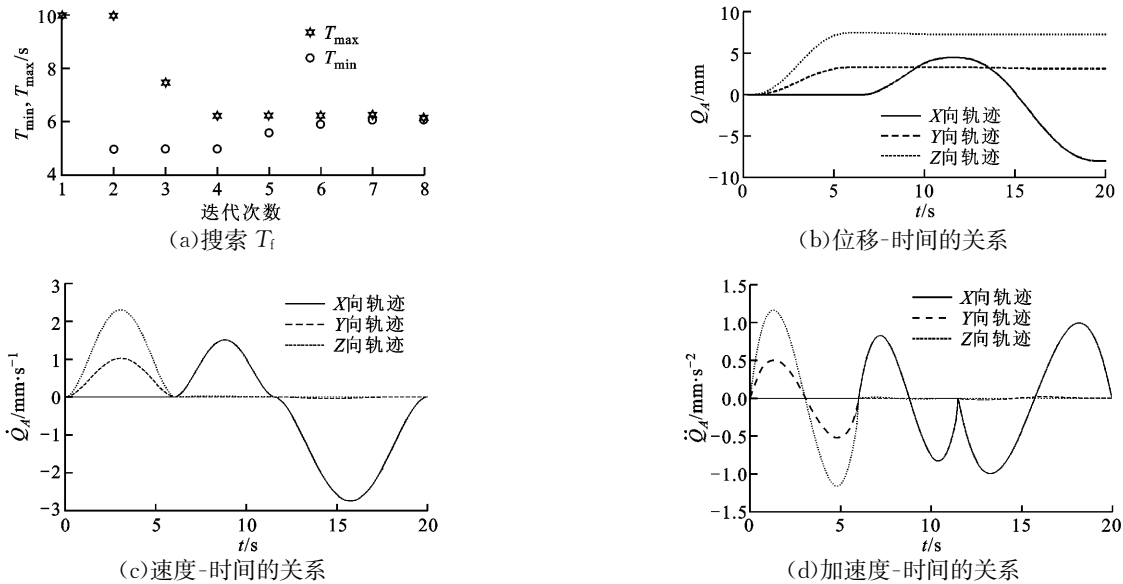


图 3 驱动关节(姿态调整)运动学的轨迹

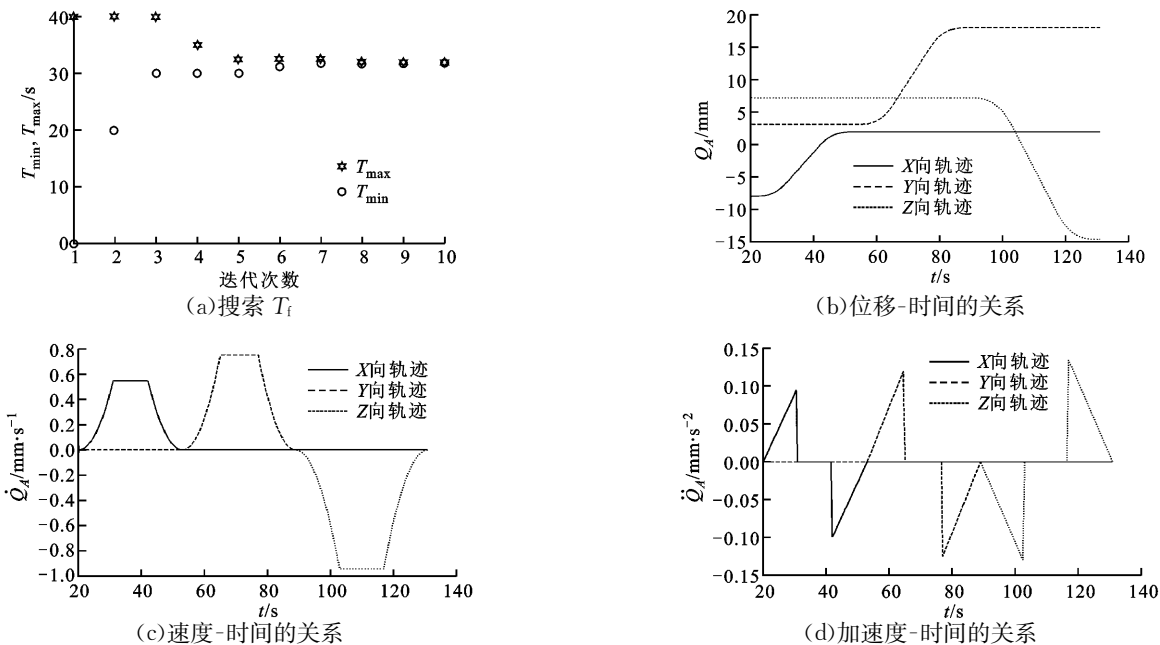


图 4 驱动关节(位置调整)运动学的轨迹

算各球铰关节的理论位移轨迹与重构实测位移轨迹的贴合度,判断实际位移轨迹与理论位移轨迹的相似性,以解决测量值与理论值的同步性问题.以球铰关节位姿观测点 A 为例,实测位移的统计采样轨迹与理论位移轨迹的相关系数计算结果如表 2 所示.

表 2 相关系数与定位精度

位姿 观测点	相关系数			定位偏差/mm		
	X	Y	Z	X	Y	Z
A	0.999 9	1.000 0	1.000 0	0.007 1	-0.120 3	0.013 9
B	0.999 9	0.999 9	0.999 9	-0.005 8	-0.121 9	0.019 3
C	0.999 9	0.999 9	0.999 5	-0.009 9	-0.117 1	0.008 9
D	0.999 8	0.999 9	1.000 0	0.003 8	-0.153 0	0.008 1

驱动关节理论目标位置与实测目标位置在 X 向、Z 向定位精度较高,在 Y 向定位精度相对较低,原因在于 Y 向是悬挂装配件的悬臂方向,由于装配件重力的原因,分别与驱动关节和装配件固联的连接杆产生了一定挠度,致使装配件上的位姿观测点在 Y 向定位精度偏低,可通过如下方式来解决:①加强连接杆的刚度;②在 Y 向做一定位移补偿;③对各驱动坐标相对世界坐标系进行精确标定.总之,该系统及其装配调姿运动规划方法能够满足工程中对姿态调整精度和效率的要求.装配件调姿前后的位姿如图 5、图 6 所示.

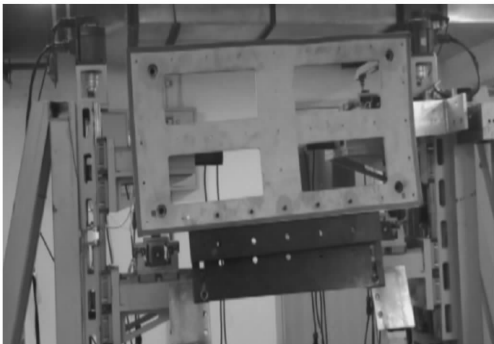


图 5 机身侧壁板与基准对准前的状态

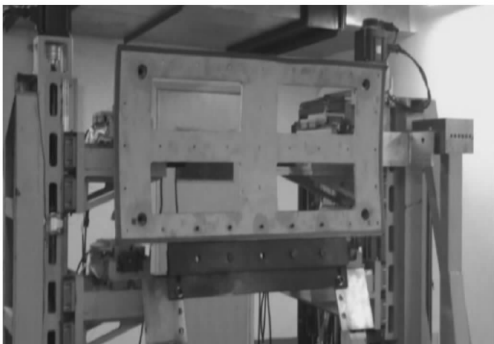


图 6 机身侧壁板与基准对准后的状态

5 结 论

本文提出了一种基于精密三坐标定位器四点支撑的大型飞机机身壁板装配位姿的调整方法,实现了对最短调姿时间的搜索.通过 5 次多项式对驱动关节运动轨迹进行插补,其理论计算与实验测量结果如下.

- (1)驱动关节速度曲线的尖点部位,使加速度轨迹曲线出现不连续点,但其幅值较小,系统驱动单元可提供所需加速度突变.
- (2)装配件的重力使驱动关节和装配件固联的悬臂连接杆产生了一定挠度,造成装配件在 Y 向的定位精度相对 X 向与 Z 向较低.
- (3)重新配置标定各定位器的安装位置,可满足不同装配件同平台装配的要求,且具有足够的柔性.

参考文献:

[1] GASPARETTO A, ZANOTTO V. A technique for time-jerk optimal planning of robot trajectories[J]. Rob Comput Integr Manuf, 2008, 24(3): 415-426.

[2] BOBROW J E, DUBOWSKY S, GIBSON J S. Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths [J]. Int J Rob Res, 1985, 4(3): 554-561.

[3] SHIN K G, MCKAY N D. Minimum-time control of robotic manipulators with geometric path constraints [J]. IEEE Trans Autom Control, 1985, 30(6): 531-541.

[4] MACFARLANE S, CROFT E A. Jerk bounded manipulator trajectory planning: design for real-time applications[J]. IEEE Trans Rob Autom, 2003, 19 (1): 42-52.

[5] MARTIN B J, BOBROW J E. Minimum effort motions for open chain manipulators with task-dependent end-effector constraints [J]. Int J Rob Res, 1999,18(2): 213-24.

[6] GASPARETTO A, ZANOTTO V. Optimal trajectory planning for industrial robots [J]. Adv Eng Software, 2010, 41(4): 548-556.

[7] CHETTIBI T, LEHTIHET H E, HADDAD M, et al. Minimum cost trajectory planning for industrial robots [J]. Eur J Mech A Solids, 2004, 23 (4): 703-715.

[8] 张斌,方强,柯映林.大型刚体调姿系统最优时间轨迹规划 [J]. 机械工程学报,2008,44(8): 248-252.

ZHANG Bin, FANG Qiang, KE Yinglin. Optimal time trajectory planning method for a kind of posture aligning system of large rigid bodies [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44 (8): 248-252.

(编辑 管咏梅)