

面向航空发动机薄壁回转体 复材构件装配的机器人 调姿定位系统*

张云志,孙年俊,刘建东,赵福龙,蒋 倩

(中国航空制造技术研究院,北京 100024)

[摘要] 航空发动机上薄壁回转体复材构件的制造装配涉及到调姿定位、制孔、铆接、涂胶等工序,而调姿定位效率和定位精度关系到产品的产能和装配质量。为了进一步提高该产品的装配质量和装配效率,研制了一种机器人调姿定位系统以替代人工装配调姿定位作业。该系统是基于RV传动的4自由度高刚性机械臂,能对薄壁回转体复材构件进行自动抓取和高精度快速调姿定位,为航空发动机薄壁回转体复材构件产品的数字化制造装配调姿定位提供了新的技术手段和工艺装备。

关键词: 航空发动机; RV 减速器; 机器臂; 调姿定位系统; 钻铆

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.09.042



张云志

博士、研究员,从事机器人应用环境和自动控制技术以及飞机数字化柔性装配技术研究。

航空发动机上有些重要的回转体薄壁复材构件,其锥形外表面上要装配数十件形状各异的金属零件和钻制数以千计的铆接用孔,在装配过程中构件的调姿效率和制孔定位精度成了影响产品质量和产能的关键因素^[1]。国内在该航空产品的制造装配尚未完全摆脱人工作业模式^[2],在产品的装配精度、装配效率、状态稳定性、制造成本以及作业强度、环境方面尚需进一步提升,以适应现代航空发动机产业发展要求^[3]。探索并研制一种结构紧凑、高效、高精度的机器人自动调姿定位系统,实现航空发动机薄壁回转体复材构件产品的高质量自动化装配、提高生产效率,解放生产力已成为业界的目标,

也是全面实现航空发动机及其重要部件智能制造的必经之路^[4]。

机器人调姿定位系统

自主研发的航空发动机回转体薄壁复材构件装配的机器人调姿定位系统,如图1所示。

本机器人调姿定位系统可按产品数模预先规划孔位信息数据,自动以一定的姿态配合钻铆机联动,并使装配孔位法矢对准钻铆机的工作中心,且孔心法矢正好与上、下铆头工作中心线重合,此时上铆头推送紧固件,然后进行钻铆,以此类推,完成所有孔位的高质量调姿定位任务。

该机器人调姿定位系统的研制分为机器人本体结构设计、运动学解析、电气控制设计和系统验证4个部分。

* 基金项目: 国家科技部重点研发计划(2017YFB1300704)。

机器人本体结构设计

机器人本体结构见图2,主要由基座、机身、小臂、关节、末端手掌、气动卡爪、辅助支撑等构成。为了提高调姿精度,A、B摆角关节采用工业机器人核心部件RV的传动方式,RV减速器具有结构紧凑、传动精度高、系统刚性好的特点^[5-7]。

机器人末端手掌上装有8个带自锁功能的气动卡爪,用于对工件的夹持和释放,气动卡爪设计采用四连杆机构,夹持工件状态下,在断电、断气的情况下,仍能对工件可靠夹持。带自锁功能的气动卡爪机构采用连杆销轴结构,具体结构如图3所示。

进气口和排气口通过分配器的设计在其内部形成8个进气通道和8个排气通道,为卡爪动作提供气源和接口。辅助支撑托架为工件远端提供支撑以补偿因工件自重产生的挠度变形,调节装置可调节辅助支撑托架角度,以适应不同型号尺寸的产品装配。

运动学解析

机器人调姿定位系统是基于RV减速器传动的4自由度机器人,包括3个旋转关节和1个移动关节。其中关节1设定两个限位,分别是装卸工位和加工工位;关节2、关节3、关节4用于加工时对工件的自动调姿与定位,以满足自动钻铆的工艺要求。机器人运动学模型如图4所示。

根据Denavit-Hartenberg法,使用4个与连杆和关节相关的参数来描述参考坐标系之间的几何关系^[8],即连杆长度 a_i 、连杆扭曲 α_i 、连杆偏置 d_i 、关节角度 θ_i 。工件装配调姿定位机器人系统的D-H参数,如表1所示(其中, $a_0=2080\text{mm}$, $a_1=464\text{mm}$, $d_1=995\text{mm}$, $d_3=652\text{mm}$; θ_1 、 θ_3 、 θ_4 、 d_2 、 d_4 为未知变量)。

1 运动学正解

根据给定的机器人关节变量的

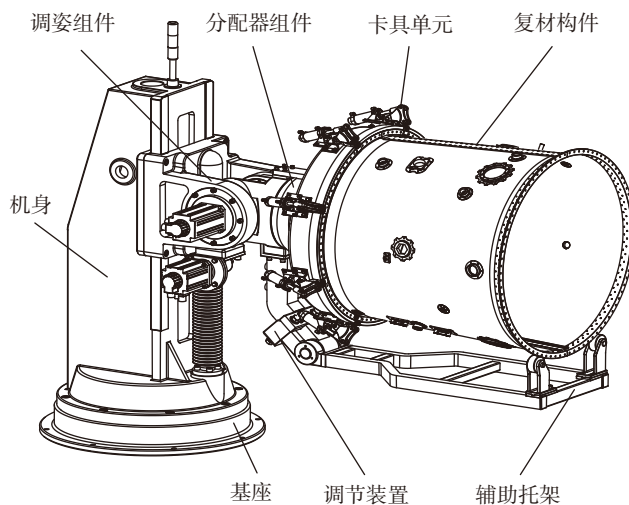


图1 机器人调姿定位系统
Fig.1 Robot positioning system

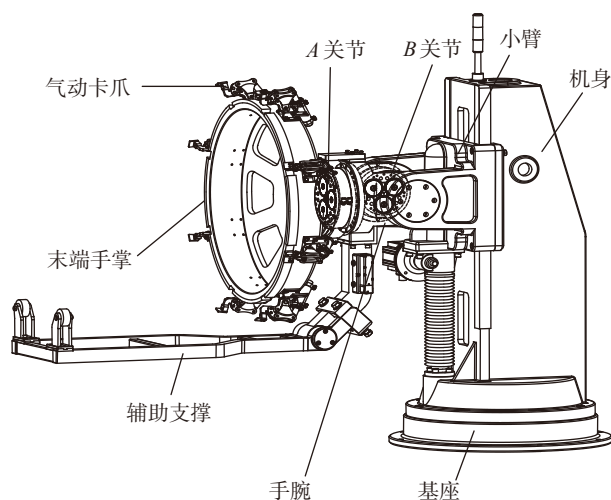


图2 机器人本体结构设计
Fig.2 Design of robot structure

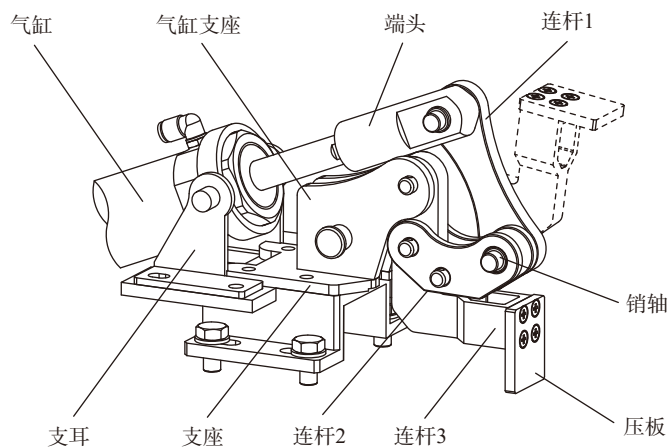


图3 气动自锁卡爪结构
Fig.3 Self-locking clamp structure

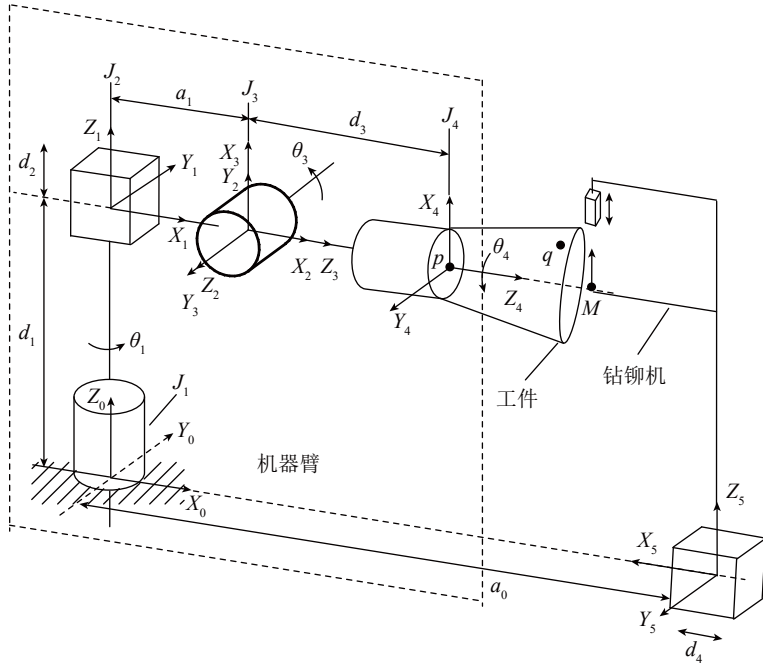


图4 机器人运动学模型
Fig.4 Robot kinematics model

表1 机器人的D-H参数

Table 1 D-H parameters of robot

<i>i</i>	<i>a</i> /mm	α_i (°)	<i>d</i> /mm	θ_i (°)
1	0	0	<i>d</i> ₁	θ_1
2	<i>a</i> ₁	90	<i>d</i> ₂	$\theta_2=0$
3	0	90	0	θ_3
4	0	0	<i>d</i> ₃	θ_4

取值来确定机器人末端执行器的位姿,这个过程被描述为机器人正运动学^[9]。 ${}^{i-1}T$ 表示坐标系*{i}*相对于坐标系*{i-1}*的位姿^[10],根据D-H约定,坐标系*{i-1}*到坐标系*{i}*的变换矩阵表示为4个基本的齐次变换矩阵的乘积:

$${}^{i-1}T = \text{Rot}_{Z,\theta_i} \text{Trans}_{Z,d_i} \text{Trans}_{X,\alpha_i} \text{Rot}_{X,a_i}$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, *c* 表示 *cos*, *s* 表示 *sin*。机器人运动学模型中 {1} ~ {4} 每个坐标系的变换矩阵可从表1和式(1)推导得到。机器人末端执行器坐标系 {4} 相对于基座坐标系 {0} 的位姿,则是以上各齐次变换矩阵的矩阵相乘。

$${}^0_4T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

4个齐次变换矩阵相乘计算后,得到:

$$\begin{cases} n_x = c_1 c_3 c_4 + s_1 s_4 \\ n_y = s_1 c_3 c_4 - c_1 s_4 \\ n_z = s_3 c_4 \\ o_x = -c_1 c_3 s_4 + s_1 c_4 \\ o_y = -s_1 c_3 s_4 - c_1 c_4 \\ o_z = -s_3 s_4 \\ a_x = c_1 s_3 \\ a_y = s_1 s_3 \\ a_z = -c_3 \\ p_x = c_1 s_3 d_3 + a_1 c_1 \\ p_y = s_1 s_3 d_3 + a_1 s_1 \\ p_z = -c_3 d_3 + (d_1 + d_2) \end{cases} \quad (3)$$

式中,将 $\cos\theta_i$ 简化写为 *c_i*, $\sin\theta_i$ 简化写为 *s_i*。

2 运动学逆解

通过末端执行器的位置和姿态

来求解对应的关节变量,这就是机器人的逆运动学问题^[11],称之为机器人运动学逆解。

2.1 求 θ_1

机器人调姿定位系统装夹工件时才需要 θ_1 旋转,用逆变换 ${}^0_1T^{-1}$ 左乘式(2)两边:

$${}^0_1T^{-1} {}^0_4T = {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T \quad (4)$$

$${}^1_4T = \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

令方程式两端的矩阵 r_{24} 的元素对应相等,可得:

$$-s_1 p_x + c_1 p_y = 0 \quad (6)$$

$$\theta_1 = a \tan 2(p_x, p_y) \quad (7)$$

2.2 依次求 θ_3 、 θ_4 、 d_2 、 d_4

机器人调姿定位系统机器人调姿时必定在加工工位, $\theta_1=0$,通过 θ_3 、 θ_4 和 d_2 的改变来改变位姿,带入式(3),变换矩阵 0_4T 可表达为:

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} c_3 c_4 & -c_3 s_4 & s_3 & d_3 s_3 + a_1 \\ -s_4 & -c_4 & 0 & 0 \\ s_3 c_4 & -s_3 s_4 & -c_3 & -d_3 c_3 + (d_1 + d_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

工件上所有加工孔位的坐标值和法矢都可通过离线编程从产品数模上获取,假设其中一个加工孔位 *q* 点的坐标值为 *q* (*x_q*, *y_q*, *z_q*),法矢为 (*v_x*, *v_y*, *v_z*)^T,为了使 *q* 点到达已知的钻铆头的工作中心点 *M* (*x_M*, *y_M*, *z_M*) 点,并且使孔位 *q* 点的法矢与钻铆方向 $[0, 0, 1]^T$ 一致(图4),可建立(9)和(10)两组方程式。

$$\begin{bmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_3 c_4 & -c_3 s_4 & s_3 \\ -s_4 & -c_4 & 0 \\ s_3 c_4 & -s_3 s_4 & -c_3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_q \\ y_q \\ z_q \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_3c_4 & -c_3s_4 & s_3 \\ -s_4 & -c_4 & 0 \\ s_3c_4 & -s_3s_4 & -c_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(9)可得到如下方程组:

$$\begin{cases} c_3c_4x_q - c_3s_4y_q + s_3z_q + d_3s_3 + a_1 = x_M \\ -s_4x_q - c_4y_q = y_M \\ s_3c_4x_q - s_3s_4y_q - c_3z_q - d_3c_3 + (d_1 + d_2) = z_M \end{cases} \quad (11)$$

由式(10)可得到如下方程组:

$$\begin{cases} c_3c_4v_x - c_3s_4v_y + s_3v_z = 0 \\ -s_4v_x - c_4v_y = 0 \\ s_3c_4v_x - s_3s_4v_y - c_3v_z = 1 \end{cases} \quad (12)$$

$$x_M + d_4 = a_0 \quad (13)$$

解上述方程,依次求解 θ_4 、 θ_3 、 d_2 、 d_4 4个未知变量。计算结果为:

$$\theta_4 = A \tan 2(-v_x, v_y) \\ -180^\circ \leq \theta_4 \leq 180^\circ \quad (14)$$

$$\theta_3 = A \sin\left(\frac{c_4v_x - s_4v_y}{v_z^2 + (c_4v_x - s_4v_y)^2}\right) \\ 75^\circ \leq \theta_3 \leq 90^\circ \quad (15)$$

$$d_2 = z_M - (s_3c_4x_q - s_3s_4y_q - c_3z_q - d_3c_3 + d_1) \\ -175\text{mm} \leq d_2 \leq 175\text{mm} \quad (16)$$

$$d_4 = a_0 - (c_3c_4x_q - c_3s_4y_q + s_3z_q + d_3s_3 + a_1) \\ -100\text{mm} \leq d_4 \leq 960\text{mm} \quad (17)$$

2.3 机器人运动学正、反解验证

在CATIA软件中取得工件产品坐标系下任意10个装配孔孔位及其法矢,见表2。

依次将孔位、法矢及已知参数 a_0 、 a_1 、 d_1 、 d_3 代入机器人反解式(14)~(17),计算结果见表3。

从表3可以看出,针对同一产品,同一曲面上的不同孔位计算出的 B 摆角值是一样的, Z 值也相同,也就是说这种结构的调姿定位系统在加工过程中,其 B 摆角、 Z 向基本不做运动,仅需要 A 摆角作旋转运动和钻铆机作 X 方向运动,由于工件入位后,其孔位与上、下钻头均有一定间距,因此在装配过程中调姿定位系统不会与钻铆机发生干涉。

在CATIA软件DMU平台上,

建立薄壁回转体复材构件装配系统模型如图5所示。

通过各关节运动副设置,形成1个包括钻铆机在内的薄壁回转体复材构件装配运动机构,如图6所示。

执行定义的机器人运动机构,将表3中计算的反解结果依次输入,可以

看见,每1组计算结果输入后,表2中对应的复材构件理论曲面上孔位都与钻铆头的工作中心 M 点重合,其法线也与上、下铆头工作中心线重合,表明机器人按照计算的结果运动后,工件的孔位及法矢能够达到指定的位置,从而验证了机器人反解算式的正确性。

表2 装配孔孔位及法矢

Table 2 Assembly hole position and normal

装配孔	x_q/mm	y_q/mm	z_q/mm	v_x	v_y	v_z
1	441.223	159.956	739.961	0.9389	0.3404	-0.0504
2	417.067	219.26	776.959	0.884	0.4647	-0.0504
3	381.909	272.781	739.961	0.8127	0.5805	-0.0504
4	378.574	271.025	665.961	0.8121	0.5814	-0.0504
5	410.456	215.785	628.959	0.884	0.4647	-0.0504
6	437.886	158.204	665.961	0.9393	0.3394	-0.0504
7	182.537	-440.683	891.924	0.3822	-0.923	-0.0504
8	-233.107	415.341	877.919	-0.489	0.8709	-0.0504
9	461.932	-23.62	605.464	0.9974	-0.051	-0.0504
10	475.809	23.638	880.113	0.9975	0.0496	-0.0504

表3 机器人反解计算结果

Table 3 Inverse calculation results of robot

装配孔	A 摆角 $\theta_4/(\circ)$	B 摆角 $\theta_3/(\circ)$	Z 值 d_2/mm	X 值 d_4/mm
1	-19.927	87.1111	29.4283	202.154
2	-27.7318	87.1111	29.4283	165.1085
3	-35.5366	87.1111	29.4283	201.154
4	-35.5993	87.1111	29.4283	276.2482
5	-27.7318	87.1111	29.4283	313.2968
6	-27.7318	87.1111	29.4283	276.2482
7	67.5	87.1111	29.4283	49.9972
8	-119.303	87.1111	29.4283	64.0199
9	2.9272	87.1111	29.4283	336.8224
10	-2.8441	87.1111	29.4283	61.8234

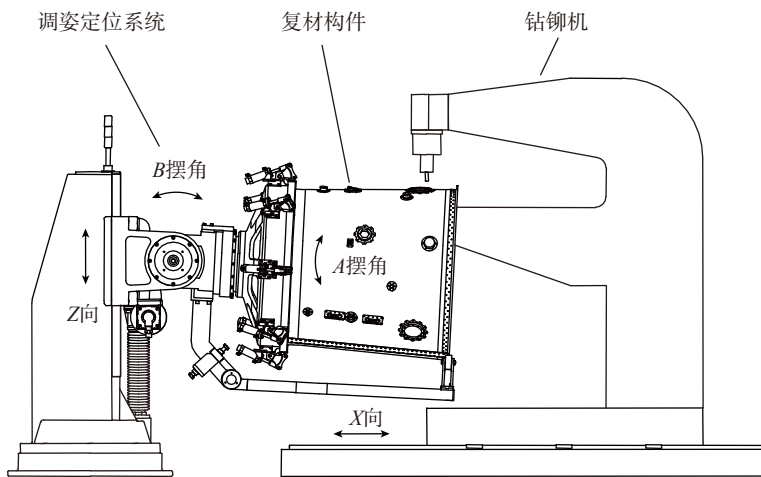


图5 调姿定位系统仿真验证

Fig.5 Simulation and verification of positioning system

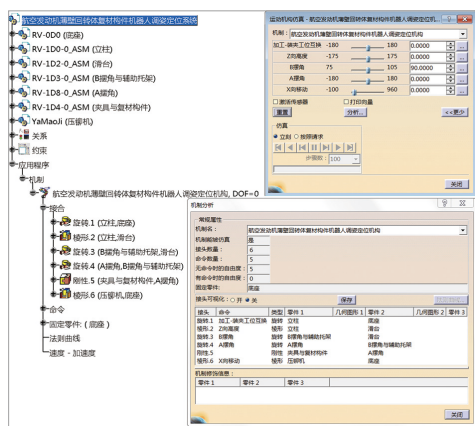


图6 装配系统机构设置

Fig.6 Mechanism setting of assembly system

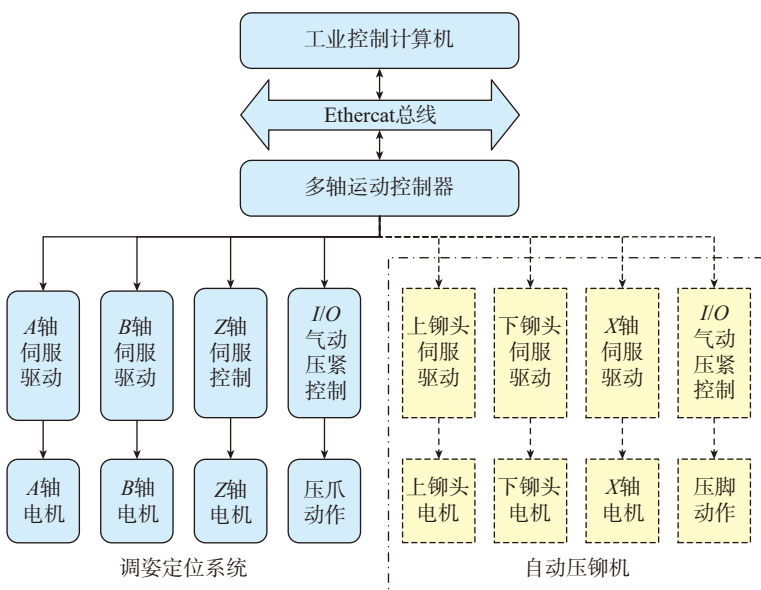


图7 控制系统硬件构成图

Fig.7 Hardware composition diagram of control system

电气控制系统设计

1 电气控制硬件构成

机器人调姿定位系统的电气控制选用倍福多轴运动控制器和米格伺服驱动系统,系统采用基于Ethercat总线的分布式控制方式。上位机完成运动控制算法、控制指令输出、信息显示等,多轴控制器完成多轴协调运动控制,伺服驱动器完成各轴的运动定位。控制器通过对信号的逻辑判断,完成对电机和气动阀门的控制(图7)。调姿定位系统设计时考虑了亟待开发的自动钻铆机(图7虚线部分),预留了控制接口。

2 调姿定位系统控制软件

机器人调姿定位系统的上位机控制软件操作平台是 windows 操作系统,软件分为单轴控制、程序控制、调姿算法、参数设置、报警提示、信息显示6个功能模块。控制软件操作界面如图8所示。

上位机通过离线编程软件规划生成的加工孔位及法矢文件,导入到调姿算法模块,生成A、B、X、Z各轴的运动轨迹和速度参数数据,通过工业以太网总线下载到多轴运动控制器。多轴运动控制器接收上位机数据后,通过内部的“电子凸轮”模式实现多轴协调同步控制输出,控制伺服驱动器驱动各轴电机实现自动调姿定位。

3 调姿定位系统工艺流程

调姿定位系统工艺流程如图9所示。

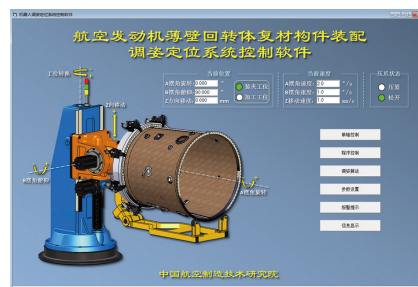


图8 控制软件操作界面

Fig.8 Control software operation interface

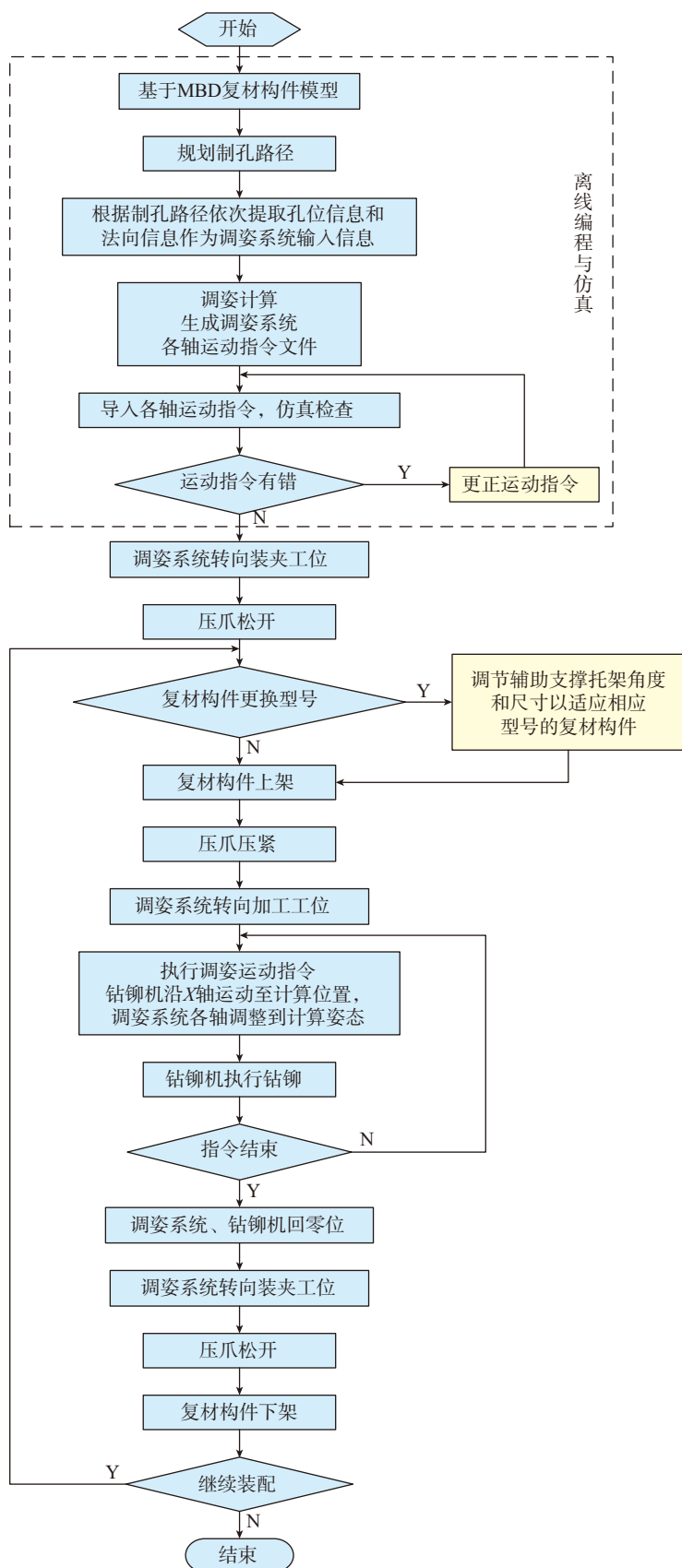


图9 调姿定位系统工艺流程

Fig.9 Process flow of positioning system

系统验证

为了证明上述结构设计的合理性、运动学算法的正确性以及控制技术的有效性,同时也为了验证国产RV减速机的精度能否满足航空专用装备的需求,研制完成了机器人调姿定位系统,如图10所示。

基于激光干涉法测定了横滚轴A摆角定位精度,基于角摆仪测定了俯仰轴B摆角的定位精度,图11和12分别是两个摆角定位精度检测结果。

检测结果表明,环境温度25℃,横滚轴A摆角的定位精度为33",重复定位精度为25";俯仰轴B摆角的定位精度为87",重复定位精度为65",符合调姿定位系统对关节减速器回转精度的要求。

结论

本文介绍了一种基于RV传动的,用于航空发动机回转体薄壁复材构件装配的4自由度机器人调姿定位系统,同时,解析了该种机器人的运动学,推导出机器人运动学方程并通过了运动仿真验证。在此基础上,完成了本机器人调姿定位系统的研制和调姿定位试验,验证了系统的调姿定位性能满足产品装配工艺要求。

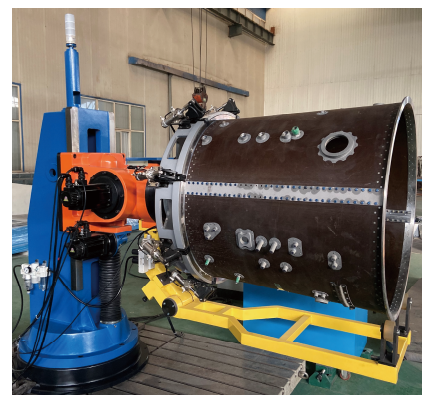


图10 机器人调姿定位系统实机

Fig.10 Real machine of robot positioning system

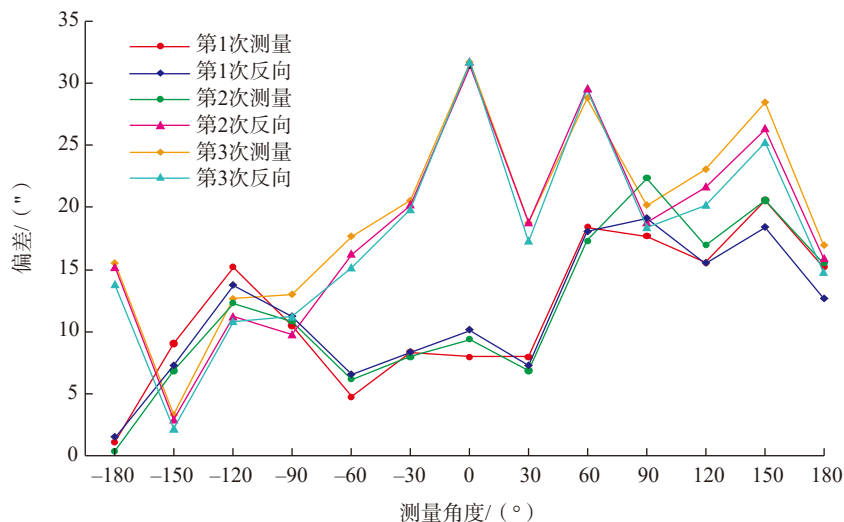


图11 横滚轴A摆角定位精度检测结果

Fig.11 Measurement results of positioning A swing angle accuracy of roll axis

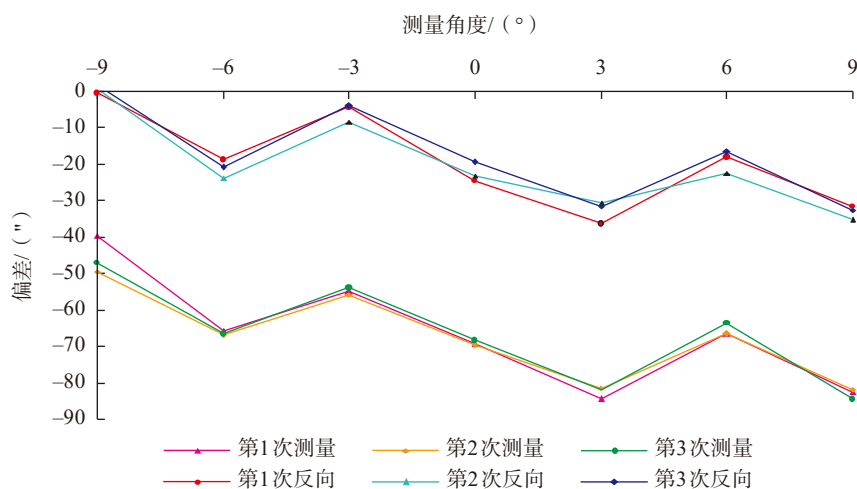


图12 俯仰轴B摆角定位精度检测结果

Fig.12 Measurement results of positioning B swing angle accuracy of pitch axis

参考文献

[1] 李添宇. 航空发动机关键制造技术现状及趋势[J]. 世界制造技术与装备市场, 2019(2): 77-79.

LI Tianyu Status and trend of key manufacturing technologies for aeroengine[J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2019(2): 77-79.

[2] 赵玉坤. 高效加工在航空机匣零件制造中的应用[J]. 中国新技术产品, 2012(6): 4-5.

ZHAO Yukun. The application of high efficiency machining in the manufacture of outer

duct case parts [J]. China New Technologies and Products, 2012(6): 4-5.

[3] 张渝, 李琳, 陈津, 等. 航空发动机重要装配工艺分析及研发展望[J]. 航空制造技术, 2019, 62(15):14-21.

ZHANG Yu, LI Lin, CHEN Jin, et al. Analysis and prospect of important assembly process of aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology 2019, 62(15): 14-21.

[4] 黄维, 黄春峰, 王永明, 等. 先进航空发动机关键制造技术研究[J]. 国防制造技术, 2009(3): 42-48;

HUANG Wei, HUANG Chunfeng, WANG Yongming, et al. Key manufacturing

technology research of advanced aero-engine[J]. Defense Manufacturing Technology, 2009(3): 42-48.

[5] 何卫东, 李力行, 徐永贤, 等. 高精度RV传动的受力分析及传动效率[J]. 机械工程学报, 1996, 32(4): 104-110.

HE Weidong, LI Lixing, XU Yongxian, et al. Analysis on the forces and efficiency of RV transmission for high precision [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 1996, 32(4): 104-110.

[6] 董向阳, 邓建一. RV传动机构的受力分析[J]. 上海交通大学学报, 1996, 30(5): 65-70.

DONG Xiangyang, DENG Jianyi. Mechanical analysis of RV transmission mechanism[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1996, 30(5): 65-70.

[7] 张迎辉, 肖君君. 机器人用RV减速器针摆传动啮合刚度计算[J]. 大连交通大学学报, 2010, 31(2): 20-23.

ZHANG Yinghui, XIAO Junjun. Meshing stiffness calculation of RV reducer driven by needle pendulum[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2010, 31(2): 20-23.

[8] 陶子航, 齐敏中. 一种六自由度轻型机械臂的设计与实现[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(6): 78-79.

TAO Zihang, QI Minzhong. Design and implementation of a 6-DOF light-weight robot[J]. Industrial Control, 2017, 30(6): 78-79.

[9] 孙学俭. 机器人技术基础[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2010.

SUN Xuejian. Fundamentals of robot techniques[M]. Beijing: Weapons Industry Press, 2010.

[10] SPONG M W, HUTCHINSON S, VIDYASAGAR M, 等. 机器人建模和控制[M]. 贾振中, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016.

SPONG M W, HUTCHINSON S, VIDYASAGAR M, et al. Robot modeling and Control[M]. JIA Zhenzhong, trans. Beijing: China Machine Press, 2016.

[11] 蔡自兴. 机器人学基础[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2015.

CAI Zixing. Fundamentals of robotics[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2015.

通讯作者: 张云志, E-mail: sfzhyz@vip.sina.com.

Robot Positioning System for Assembly of Thin-Walled Rotating Composite Components of Aero-Engine

ZHANG Yunzhi, SUN Nianjun, LIU Jiandong, ZHAO Fulong, JIANG Qian
(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] There are some important thin-walled rotary composite components in aero-engine, the manufacturing and assembly process of which include positioning, drilling-riveting, glue coating and other processes. The positioning efficiency and accuracy are related to the production capacity and assembly quality. In order to improve assembly quality and efficiency, the authors have developed a positioning system for the automatic assembly of the composite components which applies a 4-DOF manipulator based on RV transmission. It is proven to realize the automatic grasping and high-precision positioning of the composite components, as well as to solve the problem of low accuracy and efficiency of the manual posture alignment in the assembly of the composite components. This article could establish the foundation for further realizing the intelligent manufacturing of the aero-engine composite components.

Keywords: Aero-engine; RV reducer; Robotic manipulator; Positioning system; Drilling and riveting

(责编 大漠)

(上接第41页)

Manufacturing, 2016, 41: 115–126.

[43] SANTIS A D, SICILIANO B, LUCA A D, et al. An atlas of physical human-robot interaction[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2008, 43(3): 253–270.

[44] KUMAR N, PANWAR V, SUKAVANAM N, et al. Neural network based hybrid force/position control for robot manipulators[J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2011, 12(3): 419–426.

[45] 黄婷, 孙立宁, 王振华, 等. 基于被动柔顺的机器人抛磨力/位混合控制方法[J]. *机器人*, 2017, 39(6): 776–785.

HUANG Ting, SUN Lining, WANG

Zhenhua, et al. A hybrid force / position control method for robot polishing based on passive compliance[J]. *Robotics*, 2017, 39(6): 776–785.

[46] 王洪艳, 刘春洁, 黄智. 基于自适应边界能量法的柔顺力控制研究[J]. *电子科技大学学报*, 2017, 46(6): 151–156.

WANG Hongyan, LIU Chunjie, HUANG Zhi. Research on compliance control based on adaptive boundary energy method[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology*, 2017, 46(6): 151–156.

[47] 常健, 王亚珍, 李斌. 基于力/位混合算法的7自由度机械臂精细操控方法[J]. *机器人*, 2016, 38(5): 531–539.

CHANG Jian, WANG Yazhen, LI Bin. Fine control method of 7-DOF manipulator based on force/position hybrid algorithm[J]. *Robotics*, 2016, 38(5): 531–539.

[48] DUAN J, GAN Y, CHEN M, et al. Adaptive variable impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environment[J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2018, 102: 54–65.

通讯作者: 王战玺, 副教授, 主要研究方向为机器人应用技术和智能制造, 主持国防基础科研、国家自然科学基金、省重点研发计划等各类项目 10 余项, E-mail: zxwang@nwpu.edu.cn.

Review of Robot Mobile Machining System in Aviation Manufacturing

ZHENG Wei¹, DU Kunpeng¹, CHEN Hang², LIN Wei¹, WANG Gang²,
ZHANG Yiming², WANG Zhanxi²

(1. Manufacturing Engineering Department of AVIC Aircraft Co., Ltd., Xi'an 710089, China;
2. School of Mechanical Engineering, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] The mobile robot machining system is widely used in the field of aeronautical large parts assembly. Because the mobile robot machining system is separated from fixed-point operation mode for mobile machining, in actual machining process, the high-precision positioning of large parts to be machined and the machining stability of machining process must be studied and solved. Based on the review of the research on advanced mobile robot machining system at home and abroad, this paper focuses on the high-precision positioning technology of large parts in the mobile state and vibration suppression in the process of machining, in order to realize the stable machining of mobile robot, and discusses and prospects the problems to be solved and future research direction.

Keywords: Mobile robot; High-precision positioning; Dynamic model; Adaptive control

(责编 大漠)