

基于 PMAC 的航空结构件柔性工装 分布式控制系统设计

吴 玲

(西安交通工程学院 机械与电气工程学院, 西安 710300)

摘要: 航空结构件是航空飞行器中的重要组成部分, 航空结构件的自动化柔性工装质量直接影响航空飞行器的飞行安全水平; 为降低系统位置和姿态控制误差, 减小航空结构件的磨损面积, 设计了基于 PMAC 的航空结构件柔性工装分布式控制系统; 采用 PMAC 运动控制器, 接收电子部件的反馈信号, 控制步进电机、直流电机和交流电机; 结合工控机、定位器、伺服电机和分布式通信网络, 完成硬件系统的设计; 根据航空结构件柔性工装操作设备的组成结构和工作原理, 构建相应模型; 确定航空结构件在目标表面上的柔性工装位置, 从移动位置和装配力两个方面, 计算柔性工装控制量; 在 PMAC 控制器的作用下, 通过位姿的调整实现系统的航空结构件柔性工装分布式控制功能; 系统测试结果表明, 设计分布式控制系统的位置和姿态控制误差分别降低了 13 cm 和 0.32°, 且设计系统控制下航空结构件的磨损面积较小。

关键词: PMAC; 航空结构件; 柔性工装; 分布式控制系统

Design of PMAC Based Distributed Control System for Flexible Tooling of Aviation Structural Parts

WU Ling

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Traffic Engineering Institute, Xi'an 710300, China)

Abstract: Aviation structural parts are an important part of aircraft. The quality of automatic flexible tooling of aviation structural parts directly affects the flight safety level of aircraft. In order to reduce the position and attitude control errors of the system and reduce the wear area of aviation structural parts, a PMAC based distributed control system for flexible tooling of aviation structural parts is designed. PMAC motion controller is used to receive feedback signals from electronic components and control stepping motor, DC motor and AC motor. The hardware system is designed by combining industrial computer, positioner, servo motor and distributed communication network. According to the structure and working principle of flexible tooling operating equipment for aviation structural parts, the corresponding model is constructed. The position of the flexible tooling on the target surface is determined, and the control quantity of the flexible tooling is calculated from the moving position and assembly force. Under the function of PMAC controller, the distributed control function of flexible tooling for aviation structural parts is realized by adjusting the position and attitude of the system. The system test results show that the position and attitude control errors of the designed distributed control system are reduced by 13 cm and 0.32° respectively, and the wear area of aviation structural parts under the control of the designed system is small.

Keywords: PMAC; aeronautical structural components; flexible tooling; distributed control system

0 引言

由于航空飞机具有结构复杂、零件多、刚度低等特点, 特别是对大型飞机零部件进行组装时, 易产生变形。航空结构件柔性工装一般需要在分布式控制系统的约束下完成工装任务, 分布式控制系统是对生产过程进行集中管理和分散控制的计算机控制系统, 由计算机技术、网络技术、通信技术和自动控制技术相结合的一种把风险分散, 控制集中优化的新型控制系统^[1-2]。目前航空结构件柔性工装分布式控制系统数字化水平较弱, 自动化程度较低, 难以保证飞机装配的效率和精度。

相关领域学者对其进行了研究, 文献 [3] 设计的控制系统以 SDN 控制器作为执行装置, 利用软件定义网络对航空结构件柔性工装信号进行分析, 并生成对应的控制信号, 为系统的控制程序提供可靠的硬件支持。然而在实际的应用过程中, 该控制系统存在系统位置和姿态控制误差较大的问题。文献 [4] 设计基于自动钻铆机的飞机柔性工装技术, 通过机身壁板特点与钻铆工艺相结合, 缩短了生产周期, 但系统姿态控制误差较大。文献 [5] 结合柔性模具技术与柔性数字化装配系统, 提高了柔性工装的控制精度, 但航空结构件的磨损面积较大。

收稿日期: 2022-07-05; 修回日期: 2022-08-04。

基金项目: 西安交通工程学院 2020 年中青年基金项目(20KY-37)。

作者简介: 吴玲(1987-), 女, 山东潍坊人, 硕士, 讲师, 主要从事机械设计与制造方向的研究。

引用格式: 吴玲. 基于 PMAC 的航空结构件柔性工装分布式控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 154-160.

航空结构件是航空飞行器中的重要组成部分, 航空结构件的自动化柔性工装质量直接影响航空飞行器的飞行安全水平。为降低系统位置和姿态控制误差, 减小航空结构件的磨损面积, 设计了基于 PMAC 的航空结构件柔性工装分布式控制系统。硬件设计中以 PMAC 运动控制器为核心, 执行联机指令, 利用 AIMC-2100-00A1E 型工控机进行人机交互, 通过航空结构件数控定位器调整姿态, 选用带绝对值型编码器的伺服电机控制速度, 最后通过分布式通信网络提升控制系统的模块化程度, 提高控制系统的精度。软件部分通过航空结构件柔性工装设备结构构建基本模型, 利用硬件系统中的定位器设备, 确定航空结构件的理论定位点, 从工装装配力和移动位置两个方面计算 PMAC 的控制量, 在 PMAC 减小控制器的作用下将各个航空结构件安装在指定位置上, 减小航空结构件的磨损面积, 实现航空结构件柔性工装分布式控制。

1 航空结构件柔性工装分布式控制硬件系统设计

基于 PMAC 的航空结构件柔性工装分布式控制硬件系统设计整体组合框图如图 1 所示。



图 1 基于 PMAC 柔性工装硬件系统的整体组合框图

由图 1 可知, PMAC 运动控制器负责接收信号, 将信号反馈给工控机, 进行人机交互后, 采用航空结构件定位器控制大零件的 6 个自由度的姿态, 利用伺服电机控制提高整体控制精度, 通过分布式通信网络分散集群式通信网络的所有功能, 提升控制系统的模块化程度。以此完成基于 PMAC 的航空结构件柔性工装分布式控制硬件系统设计。

1.1 PMAC 运动控制器

在航空结构件柔性工装分布式控制系统中, 控制器起着核心作用, 通过对 PMAC 装置的优化, 使 PMAC 装置能够接收来自编码器、光栅尺、旋转变压器等电子部件的反馈信号, 从而实现对步进电机、直流电机和交流电机的控制。PMAC 运动控制器结构如图 2 所示。

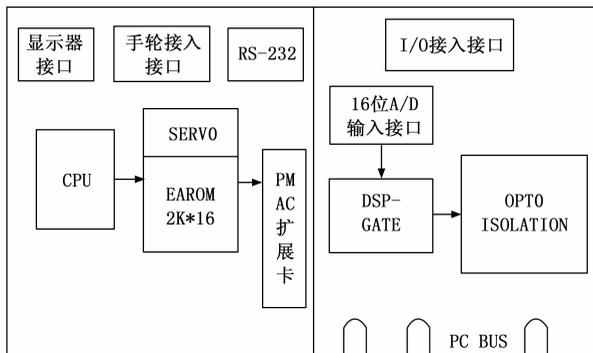


图 2 PMAC 运动控制器结构图

PMAC 运动控制器能够执行在线指令、动作指令和 PLC 指令。PMAC 接收到联机指令后, 立即执行, 无需储存, 动作指令是存储在缓冲区中的一套缓冲区, 以“R”指令调用, 其功能主要是控制电机的运动、程序逻辑控制以及变量分配, 而 PLC 的程序指令也是一套可以反复执行的缓存指令, 包括操作、逻辑控制、信息传递等。PMAC 主要体现为 PMAC-PC、PMAC-VME、PMAC-STD 和 PMAC-Lite 四种不同的硬件形式, 由于航空结构件的柔性工装具有一定的精度要求, 因此控制器必须对 4 个轴线进行控制, 并要达到四轴联动的目的, 同时, 由于系统中存在大量的输入/输出开关信号, 因此, 控制核心采用了 PMAC 运动控制器中的 IMAC-FX, 并将 PMAC 运动控制器嵌入到 B/C 型开放式 NC 中。借助 DSP56001 和数字信号处理器, 实现 PMAC 运动控制器 1~8 个轴的控制。

1.2 工控机

工控机以人机交互为主, 包括 PC 端的主操作界面和手持式的操作界面。PC 端向 GMAS 传输位置信息后, 向 GMAS 发送指令, 从而准确地定位定位仪。并对其运行状态、安全状态、电气系统状态等进行监控。手持式操作台是 PC 机的辅助设备, 它的主要功能是对定位仪进行微调, 便于工作人员在组装时使用。工控机通常在工业环境中工作, 对软件的流畅程度也有很高的要求, 因此, 工控机通常都有加固、防尘、防潮、防腐蚀、防辐射、高散热率等特殊设计。上位机和控制终端之间通过网络端口进行通信, 因此, 选择的工控机必须带有两个网络接口, 以适应通信的要求。同时, 由于工业计算机的安装容量及造价的影响, 设计系统采用 AIMC-2100-00A1E 型工控机。

1.3 航空结构件定位器

航空结构件数控定位器可实现 X、Y、Z 三个方向的姿态调整, 并针对位置条件的要求, 将对应的 NC 定位机构与模块化的思路相结合, 构成了一种具有多种形式的姿态调整系统。数控定位器主要由 3 个自由旋转的负载支架和两个垂直运动机构构成。在 3 个运动轴线上, 通过位置传感器对 Z 向运动进行闭环伺服控制, 以确保在装配过程中的姿态跟踪和定位的准确性。X、Y 方向的运动, 按结构可分为有源和无源两种, 其中, 主动轴通过位置传感器进行闭环伺服控制, 而随动轴则通过位置传感器进行姿态反馈^[6]。利用四台数控定位器构成并联姿态机构, 通过对多个轴线的协同动作进行控制, 使大零件的 6 个自由度的姿态调整。装有压力传感的载荷支架, 通过固定球头螺栓, 将其置于数控定位器的运动轴线上, 以达到 3 个旋转的自由度。球形结构可以准确地将球头螺栓固定在负载托盘上, 并利用传感器对球头的位置进行检测, 如果球头进入位置, 就对其进行锁定, 从而限制球头 Z 方向的运动。采用安全感应器对汽缸锁止机构进行锁定^[7]。压力传感器对数控定位装置进行载荷测量, 并将其输出到位置控制系统中。为了确保机械结构的安全, 定位器 X、Y、Z 方向分别安装了机械控制和力敏元件。

1.4 工装移动模块伺服电机

在选择伺服电动机时，需要考虑惯量和扭矩两个载荷参数^[8]，柔性工装设备可以把它们的惯量和力矩转换为载荷在伺服电动机的轴端上的惯性和扭矩，然后根据这些等价的惯性和扭矩来选择驱动电机。当轴具有一定的反应速度时，其负载转动的等效惯量应为电动机惯量的 5 倍。由于负荷的惯性矩增大，对电动机的轴的角加速度有较大的影响，因此减慢了载荷的加速度，减小了整体的响应^[9]。在控制系统中，每一根主轴所选择的伺服电机必须具备较强的反应能力，当 PMAC 发出新的速度指令时，使驱动电机能在最短的时间内完成所需的转速，而桁架操纵杆在作业过程中必须进行四轴联动，这就使得电机的转速控制更加困难。此外，在常规工况下，负载扭矩应低于电动机额定扭矩的 80%，并限制在伺服电动机的加速和减速范围内，进而确保伺服电机的工作寿命和最大的效能^[10]。为了记录航空结构件柔性工装操作设备各个轴的位置信息，所以必须选用带绝对值型编码器的伺服电机。

1.5 分布式通信网络

分布式通信网络的设计是为了使原有的集群式通信网络的所有功能都分散开来，并提升控制系统的模块化程度。通信网络向分布式通信网络转变的第一步是引入串行数据总线，以点对点模拟信号传输^[11]。设计控制系统中的分布式通信原理如图 3 所示。

由于采用 Modbus/TCP 工业以太网通信协议，工控机和 PMAC 控制器之间采用 Modbus/TCP 协议进行数据传输，该传输协议具有较强的纠错能力，可以有效地确保控制程序的传输精度^[12-13]。

2 航空结构件柔性工装分布式控制系统软件功能设计

利用定位仪对上下 6 组横梁进行数字控制，根据设备结构及其坐标系构建航空结构件柔性工装设备模型。在模

型的基础上，通过设定的航空结构件工装目标点坐标确定曲面位置。从工装装配力和移动位置两个方面计算 PMAC 的控制量，采用激光跟踪法和并联机床逆运动学分析法确定飞机结构最终姿态，在 PMAC 控制器的作用下，将各个航空结构件安装在指定位置上，完成航空结构件柔性工装分布式控制系统设计。

2.1 构建航空结构件柔性工装设备模型

航空结构件柔性工装采用桥架结构，其上下 6 组横梁，每一横梁上安装 4 个定位器设备，在实际加工时，利用上、下横梁上的定位仪进行数字控制，对各增强框架进行定位，从而达到航空结构件的数字化定位。而在航空结构件发生改变时，可以通过调整和重组来完成不同的产品，根据不同型号或零件的结构特征，在特定的位置部位上使用特定的可移动机构，以达到柔性工装的灵活功能^[14]。根据航空结构件柔性工装设备的结构组成和工作原理构建相应的模型，在柔性工装设备的中心轴线上定义模型原点，Z 轴沿轴线指向工装操作设备，按右手法则确定模型中 X 和 Y 轴方向。航空结构件柔性工装设备基本结构与坐标系构建结果如图 4 所示。

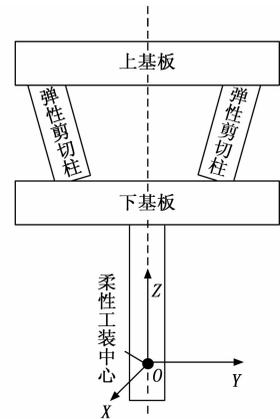


图 4 航空结构件柔性工装设备结构及其坐标系示意图

考虑航空结构件柔性工装设备的组成材料，构成工装设备的刚度系数如下：

$$T_{\text{rigidity}} = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot Q_i^T \cdot T \quad (1)$$

式中，变量 Q_i 和 T 分别表示弹性剪切柱刚度系数矩阵和广义力变换系数^[15]。对轴孔姿态误差、柔性工装机构的补偿等相关参数进行分析，从而得出柔性工装中心的位置为：

$$Y = \frac{r \sin \beta \cos \beta (\delta_c - \delta_s) + 2 \cos \beta \delta_w}{(1 + \cos^2 \beta) \delta_s} \quad (2)$$

式中， β 为柔性工装设备的旋转角度， δ_c 、 δ_s 和 δ_w 对应的是柔性工装设备的轴向刚度系数、侧向刚度系数和弯曲侧向耦合刚度系数^[16]。在建立的坐标系中将柔性工装设备的刚度系数以及工作规律，得出航空结构件柔性工装操作设备的模型构建结果。

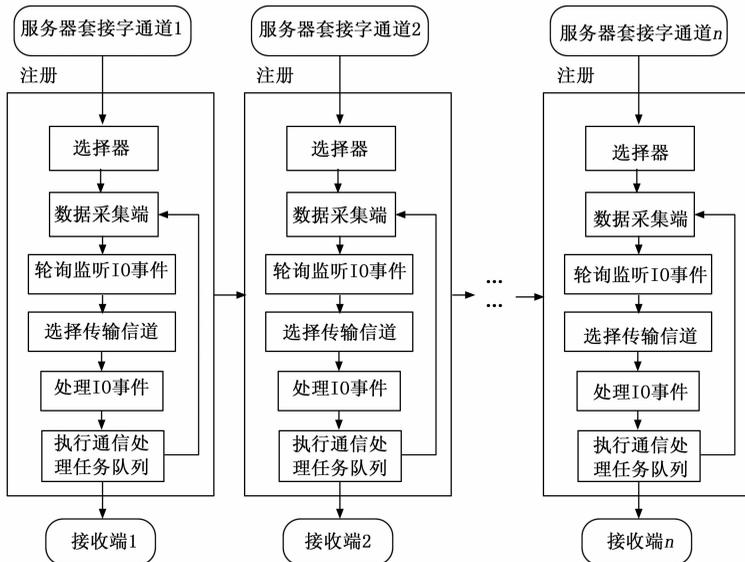


图 3 分布式通信原理图

2.2 确定航空结构件柔性工装曲面位置

在航空结构件柔性工装过程中需要确定装配曲面及曲面上孔径的位置，利用硬件系统中的定位器设备，确定航空结构件的理论定位点，工装定位柱的实际定位点应移至对应的位置，而工件的理论定位点与定位柱的实际定位点不同，工件表面与球面在理论定位点处的接触和切线是相交的^[17]。利用这两种方法，可以求出球心的真实位置，也就是球心的位置，从而达到准确的位置。工业工件表面通常是用不一致的 B 形条形曲面来构成的。基于表面理论，在给定的平面上，可以将单位法向量量化表示为：

$$f(i, j) = \frac{q_i(i, j) \times q_j(i, j)}{|q_i(i, j) \times q_j(i, j)|} \quad (3)$$

式中， $q(i, j)$ 表示航空结构件的柔性工装曲面坐标值， (i, j) 为曲面上任意位置的坐标值， $q_i(i, j)$ 和 $q_j(i, j)$ 分别为曲面对 i 和 j 的偏导值^[18]。在航空结构件的柔性工装过程中，设定航空结构件工装的目标点坐标为 $(x_{asse}, y_{asse}, z_{asse})$ ，那么工装设备的实际移动坐标可以表示为：

$$(x_{equ}, y_{equ}, z_{equ}) = (x_{asse}, y_{asse}, z_{asse}) \cdot f(i, j) \cdot R \quad (4)$$

式中，变量 R 表示柔性工装设备的机械臂长度，将式 (3) 的计算结果代入到式 (4) 中，便可得出航空结构件柔性工装曲面及目标点的定位结果。

2.3 计算航空结构件柔性工装 PMAC 控制量

从工装配力和移动位置两个方面计算 PMAC 的控制量，航空结构件的轴孔装配可以分为接近、倒角接触、一点接触和两点接触 4 个阶段，接近阶段也被称作找孔或寻孔阶段，在这个时期，轴孔没有接触，以使轴进入倒角接触阶段为目的^[19]。在倒角接触过程中，该柔性机构可帮助轴沿倒角滑下，并穿过倒角。在一次接触中，轴筒表面与钻孔的内壁相接触；当一个点接触时，两个点的接触就会产生。在实际组装中，两点的接触阶段未必会出现，两点接触阶段结束后又会恢复到一点接触的状态。以航空结构件柔性工装中的倒角接触阶段为例，轴刚接触到倒角时刻与轴沿着倒角向下移动时刻，工装操作设备满足如下关系：

$$\begin{cases} \Delta D = D_\epsilon + d_g \sin\varphi_0 \\ D_0 - \Delta D = \frac{d}{\tan\theta} - d_g (\sin\Delta\varphi - \sin\varphi_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中， ΔD 、 D_0 和 D_ϵ 分别表示柔性曲面中心相对于工装孔轴线的偏移量、初始偏移量以及轴下端中心相对于孔轴线的偏移量， d_g 为柔性中心与轴下端面的距离， d 为初始接触到当前状态接触点在孔轴线方向的移动距离， φ_0 和 $\Delta\varphi$ 分别为轴相对于孔的初始角度以及偏差量，而变量 θ 为倒角与端面的夹角^[20]。式 (5) 中变量 d 的取值范围为 $[0, \eta_0]$ ，当 d 达到最大限值时，航空结构件的柔性装配进入一点接触阶段，此时工装操作设备的装配力可以表示为：

$$F_{com} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{tran}(D_0 - \Delta U) \\ \cos\theta + \mu\sin\theta F_x \\ \sin\theta - \mu\cos\theta \\ \delta_{revo}(\Delta\varphi - \varphi_0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中，变量 δ_{tran} 和 δ_{revo} 分别为横向刚度和扭转刚度， M_θ 为工装操作设备转矩， F_x 和 F_z 分别表示工装作用力在 X 和 Z 方向上的装配力分量。将相关数据代入到式 (6) 中，得出工装合力的计算结果，由此便可得出柔性工装过程中轴孔入位时轴孔的相对位置变化以及装配时轴向进给时需要克服的力^[21]。同理可以得出航空结构件柔性工装操作过程中，两点接触操作对应的工装力计算结果。另外航空结构件柔性工装操作设备实时移动位置的控制量可以利用式 (7) 计算得出。

$$\begin{cases} \Delta x = |x_{current} - x_{target}| \\ \Delta y = |y_{current} - y_{target}| \\ \Delta z = |z_{current} - z_{target}| \end{cases} \quad (7)$$

其中： $(x_{current}, y_{current}, z_{current})$ 为当前柔性工装操作设备的位置坐标， $(x_{target}, y_{target}, z_{target})$ 为操作设备定位目标结果的位置坐标。最终将式 (6) 与式 (7) 的计算结果转换成控制程序输入到 PMAC 控制器设备中。

2.4 实现航空结构件柔性工装分布式控制

为实现航空结构件各个自由度的调姿，通过初始姿态检测、柔性工装位姿解算、轨迹规划等步骤，实现对位姿的调整，具体的调整过程如图 5 所示。

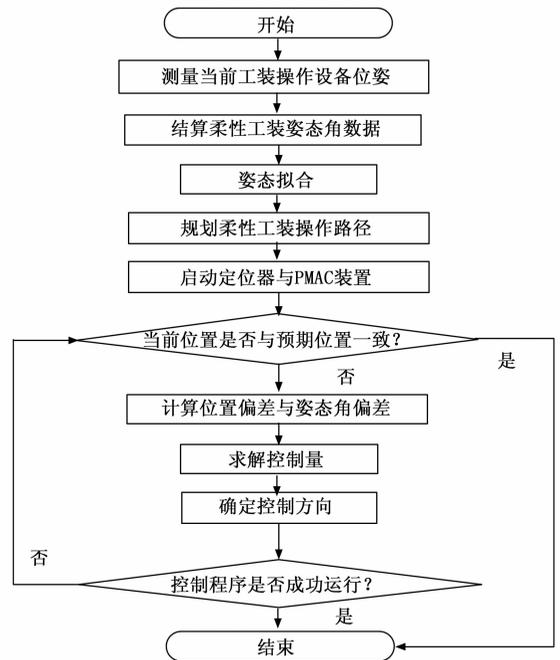


图 5 航空结构件柔性工装位姿调整流程图

采用激光跟踪法对航空结构体上的参考点进行了测量，并根据坐标变换关系，确定了其初始姿态。针对要求达到的目标位置，采用并联机床逆运动学分析法，求出了各数控定位机构的运动参数。基于初始姿态和目标姿态的相互关系，并结合机构的反运动学计算结果，确定了每一台定位器的驱动系统的运动轨迹^[22]。根据轨迹规划的结果，驱动定位装置的各个传动副进行运动。在完成姿态校正后，必须再次对基准位置进行测量，以确定飞机结构的最终姿

态,以评价其校正精度。根据并联机构正向运动学分析法,对飞机结构在确定了各个传动副的运动后所能达到的位姿进行了计算,并将其与重新测量参考点所得到的实际到达位置进行了对比,以确保姿态的质量^[23]。按照上述方法在 PMAC 控制器的作用下,将各个航空结构件安装在指定位置上,完成航空结构件的柔性工装操作。

3 系统测试

以测试设计的基于 PMAC 的航空结构件柔性工装分布式控制系统的控制功能为目的,采用对比实验的方式设计系统测试实验。因 SDN 控制器为网络操作系统(OS),以软件的形式运行,利于系统的自动管理,故实验设置基于 SDN 控制器的控制系统作为实验的对比系统,通过与该系统的对比,体现出设计系统在控制功能方面的优势。

3.1 搭建系统开发与运行环境

系统采用集线器进行分布式通信网络连接,通过 FPGA 将经过处理的光栅片、编码片等数字信号以及部分 AD 变换后的模拟值,通过 DSP 进行读出,从而完成系统的软件开发和运行。由于设计的控制系统应用了 PMAC 控制器,因此需要将设备连接到集线器中。

实验选择桁架机械手作为航空结构件柔性工装任务的操作工具,也就是系统的控制对象,在机械、电气设备组装完毕后,要进行控制系统调试,方可投入使用。首先,要对控制系统的输入和输出进行检测,并建立程序的运行坐标系,进行各种轨迹示教和动作编程,并在此基础上进行人工操作,使工装操作设备的运行速度和加速度得到合理的优化。在上述工作结束后,要进行桁架机器人的演示,得到路线图,在参与调度下进行试车,并进行移动作业,由此验证控制程序是否能够在实验环境中正常运行。

3.2 准备航空结构件样本

此次实验选择波音 737-300 型号的飞机作为工装目标,该飞机机身短而细,尺寸方面与 A320 系列飞机属于同一级别,它的主翼是一排轮子,包含 3 个舱门,在垂直的尾部有一个很明显的弯道,可以安装 CFM56-3C 发动机。此次实验选择该型号飞机中的翼梁、桁条、翼肋、蒙皮、水平尾翼和垂直尾翼作为待柔性工装的航空结构件样本,根据航空结构件的组装顺序对各个样本进行编号。

3.3 设置 PMAC 工作参数

设计的航空结构件柔性工装分布式控制系统应用了 PMAC 控制器,因此需要对该设备的工作参数进行设置。PMAC 的工作设定参数包括:启动电机、有效标志位地址、调整参数、寄存器地址等。为了便于使用,在初始化时,使用了变量化的方式,并通过设定相应的变量来实现初始化。此外,还设计了一个调试软件,可以方便地设定所需要的变量。PMAC 的变量分为 I 、 M 、 P 、 Q 四种类型,其中 I 是初始化的变量,它的主要功能是初始化系统,轴,坐标系统和编码通道,它们在存储器中有一个固定的空间,并且具有一定的含义。 M 变量是指 PMAC 和 I/O 的指针,它主要用于读写 PMAC 的存储器和 I/O 接口,从 0 到

1 023 M 的变量可以是 1 比特,也可以是 24 比特,48 比特的双浮点字。 P 和 Q 变量是普通的使用者变量,每一个都有 1 024 个,都是 48 位的浮点数,无需预先设置。由于 P 和 Q 变量都是程序变量,所以对 PMAC 的初始化没有任何意义,只对 I 和 M 变量进行了初始化设置即可。部分 PMAC 工作参数的设置情况,如表 1 所示。

表 1 部分 PMAC 工作参数设置表

参数名称	参数描述	参数值
Ix01	模拟输出通道	0 或 1
Ix69	DAC 输出范围	20 480
Ix90	坐标系 x 时间速率	80 000
I9x0	编码器解码	8
M105	模拟量输入存储地址	12

将表 1 中的参数设置结果输入到 PMAC 控制器中,完成 PMAC 控制器的初始化工作。

3.4 描述系统测试过程

根据航空样本的准备情况,生成各个结构件样本的柔性工装控制任务,并将生成结果代入到工装分布式控制系统中。将控制硬件系统中的所有设备调整至工作状态,启动柔性工装机械手和工装控制程序,通过航空结构件柔性工装分布式控制系统的运行完成控制任务。控制系统的运行界面如图 6 所示。



图 6 航空结构件柔性工装分布式控制系统运行界面

按照上述流程可以得出实验对比控制系统的运行结果。在实验运行过程中,由于定位器的横向梁是彼此独立的,为了防止碰撞,需要通过数据服务器对各个横梁的位置坐标进行合理地规划和计算。人工定位时,系统会根据各构件间的位置关系,作出碰撞判定。模具和打孔的横梁都设有一个安全的位置联锁开关,在模具的横梁“安全位”下,它的工作是有效的,反之制孔横梁只有工装在“安全位”时才可以运动。

为了体现出航空结构件柔性工装分布式控制系统的功能优势,分别从控制精度和控制效果两个方面进行测试,设置控制精度的量化测试指标为位置控制误差和姿态控制误差,其中位置控制误差的数值结果为:

$$\lambda_{\text{position}} = \sum_l \sum_{h=x,y}^{n_w} \sqrt{(h_{\text{control},l} - h_{\text{expect},l})^2} \quad (8)$$

其中： $h_{\text{control},l}$ 和 $h_{\text{expect},l}$ 分别为系统控制下第 l 个工装点的中心坐标值和预期位置中心坐标值， n_w 为待工装点数量。另外姿态控制误差的数值结果如下：

$$\lambda_{\text{attitude}} = |\vartheta_{\text{control}} - \vartheta_{\text{expect}}| \quad (9)$$

式中， $\vartheta_{\text{control}}$ 和 $\vartheta_{\text{expect}}$ 对应的是系统控制下的工装角度和预期工装角度，位置坐标和工装角度均可使用测角或测距设备直接得出。最终计算得出位置与姿态控制误差越小，说明对应系统的控制精度越高。控制效果的测试指标为航空结构件工装结果中的磨损面积，其数值结果为：

$$\psi = \sum_j^{n_{\text{abrasion}}} a_j \times b_j \quad (10)$$

式中， a_j 和 b_j 为航空结构件上磨损区域的长度和宽度， n_{abrasion} 为航空结构件上的磨损数量。最终计算得出结构件上磨损面积越大，证明系统的控制效果越差。

4 系统测试结果分析

为了验证设计系统的整体有效性，首先准备两份相同柔性工装工作面，然后利用 SDN 控制器的控制系统和设计分布式控制系统，分别在工作面上进行系统位置控制误差测试，通过控制系统运行下，航空结构件实际柔性工装位置与预期位置之间的比对，最后得出反映系统位置控制误差的测试结果，如图 7 所示。

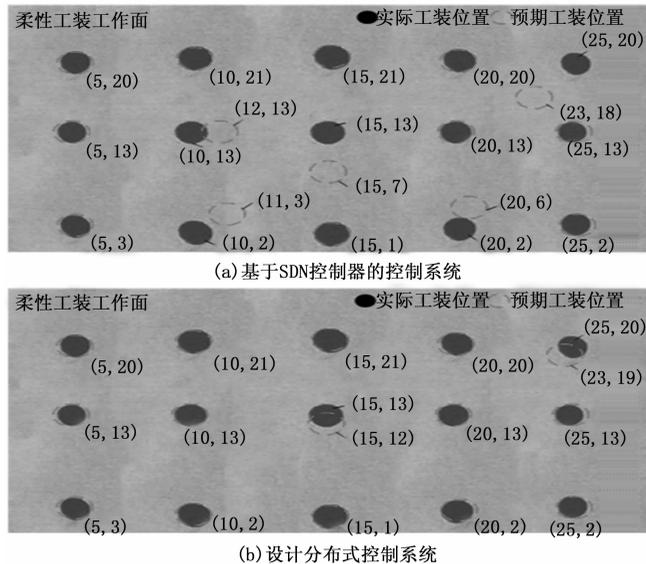


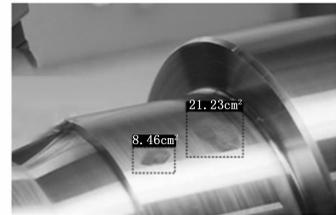
图 7 系统位置控制误差测试结果

从图 7 中可以看出，基于 SDN 控制器的控制系统有 5 个测试点偏离实际工装位置，而设计分布式控制系统有 2 个测试点偏离实际工装位置，与基于 SDN 控制器的控制系统相比，设计控制系统下，航空结构件的实际工装位置与预期位置的重合度更高。通过式 (8) 的计算，得出两个控制系统下航空结构件的位置误差分别为 16.24 cm 和 3.24 cm。姿态控制误差的测量结果如表 2 所示。

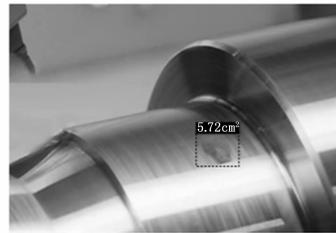
表 2 系统姿态控制误差测试数据表

航空结构件编号	预期柔性工装姿态角 / (°)	基于 SDN 控制器下的实际柔性工装姿态角 / (°)	设计控制方法下的实际柔性工装姿态角 / (°)
A1	7.2	6.6	7.0
A2	5.6	5.2	5.5
A3	1.3	1.1	1.3
A4	4.5	4.1	4.5
A5	6.7	6.3	6.6

将表 2 中的数据代入到式 (9) 中，得出两个系统姿态控制误差的平均值分别为 0.40° 和 0.08°。另外，通过式 (10) 的计算，得出两种控制系统下，柔性工装航空结构件上磨损面积的测试结果，如图 8 所示。



(a) 基于SDN控制器的控制系统



(b) 设计分布式控制系统

图 8 系统控制效果测试对比结果

从图 8 中可以直观地看出，与基于 SDN 控制器的控制系统相比，设计控制系统运行下得出航空结构件上的磨损面积更小，由此证明，设计的基于 PMAC 的航空结构件柔性工装分布式控制系统的控制效果更优。

5 结束语

航空结构件柔性工装作为航空飞机生产的重要环节，其工装质量直接影响飞机的生产效率甚至是航空飞行的安全性。通过航空结构件柔性工装分布式控制系统的设计与应用，提高了航空结构件的装配质量，为航空事业提供技术支持。

参考文献：

[1] 李 伟, 王德成, 程 鹏. 基于 PMAC 的多工位弹簧机自动换刀机构控制系统开发 [J]. 机械与电子, 2020, 38 (6): 28 - 31.

[2] 吕海东. 基于 Akka 的高可靠分布式控制系统设计与实现 [J]. 微型电脑应用, 2022, 38 (2): 176 - 177, 181.

[3] 高荣亮, 郑 乐. 高可用 SDN 控制器主从分布式系统设计

- [J]. 光通信技术, 2021, 45 (7): 59-62.
- [4] 韦 溟, 张丽艳. 机器人自动钻铆系统的现场快速自定位方法 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41 (6): 66-75.
- [5] 邓长喜, 惠盼飞. 飞机部件装配数字化柔性工装技术研究 [J]. 科海故事博览, 2021 (13): 16-17.
- [6] 黄 伟, 许艾明, 黎小华, 等. 面向航空结构件制造的智能工艺云构建关键技术 [J]. 制造技术与机床, 2021 (9): 101-106.
- [7] 王 巍, 王诚鑫, 等. 基于工艺优化的机身壁板自动钻铆预装配柔性工装设计 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (19): 99-103.
- [8] 李 真, 王 帆, 王冉璐. 永磁同步电机的自抗扰控制器参数自整定 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (5): 92-96.
- [9] 陈 诚, 黄 剑, 刘 磊, 等. 基于数据驱动的气动柔性关节 Takagi-Sugeno 模糊系统建模与预测控制 [J]. 控制理论与应用, 2022, 39 (4): 633-642.
- [10] 秦国华, 王华敏, 林 锋, 等. 基于铝合金板材应力反求与应力评测的飞机结构件加工变形控制新方法 [J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50 (1): 85-102.
- [11] 冯 斌, 张秀琼, 余晓燕. 面向航空结构件加工的刀具装配过程质量控制 [J]. 工具技术, 2021, 55 (4): 65-68.
- [12] 李 颖, 陶文坚, 陈学振. 航空结构件自动化生产线及关键技术概述 [J]. 制造技术与机床, 2021 (7): 30-35.
- [13] 曹 融, 张 敏, 杜 峰, 等. 使用 MCU 内置序列发生器控制的交流信号采样 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (5): 241-245.
- [14] 王 珉, 唐小聪, 汤加伟, 等. 航空整体结构件加工变形的快速在线测量方法 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (29): 12574-12581.
- [15] 冯 斌, 张秀琼, 余晓燕. 面向航空结构件加工的刀具装配过程质量控制 [J]. 工具技术, 2021, 55 (4): 65-68.
- [16] 朱永国, 邓 斌, 霍正书, 等. 检测数据和专家知识混合驱动的小样本飞机结构件装配粗差判定 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27 (12): 3462-3474.
- [17] 孙丽敏, 李亚宏, 齐东昱, 等. 钛合金航空结构件导孔数字化加工方法 [J]. 工具技术, 2021, 55 (8): 92-94.
- [18] 代 浩, 郝 博. 基于知识的飞机结构件智能设计 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021 (4): 84-86.
- [19] 刘 适. 面向飞机结构件数控加工的 DFM 方法研究 [J]. 制造技术与机床, 2021 (2): 66-69.
- [20] 高振铭, 朱祥龙, 康仁科, 等. 基于 LabVIEW 的锥罩装配控制系统设计 [J]. 制造技术与机床, 2021 (12): 47-51.
- [21] 王景坡, 杨 东, 范 鑫, 等. 非对称隔框类航空薄壁结构件加工变形控制 [J]. 工具技术, 2021, 55 (7): 71-75.
- [22] 胡呈祖, 周军连. 基于 STM32+FPGA 的多轴运动控制器的设计 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (12): 82-86.
- [23] 吴言穗, 王瑶为, 俞 立, 等. 多轴运动控制系统的非线性 PID 交叉耦合控制 [J]. 控制工程, 2020, 27 (5): 830-834.
- 人精度提升方法 [J]. 振动与冲击, 2022, 41 (2): 312-320.
- [13] 张春涛, 王 勇, 穆春阳, 等. 基于快速动力学辨识的机器人力/位混合控制碰撞检测研究 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42 (6): 161-171.
- [14] 吴晓光, 刘绍维, 杨 磊, 等. 基于深度强化学习的双足机器人斜坡步态控制方法 [J]. 自动化学报, 2021, 47 (8): 1976-1987.
- [15] 丁 力, 夏 天, 康绍鹏, 等. 悬停状态下旋翼飞行机器人自适应鲁棒控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35 (9): 73-79.
- [16] 霍雨佳, 李一平, 封锡盛. 基于深度强化学习的水空跨域机器人水面起飞运动控制 [J]. 电机与控制学报, 2021, 25 (12): 139-150.
- [17] 韦 中, 宋光明, 乔贵方, 等. 脊柱型四足机器人粗糙可变地形对角小跑运动控制 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2020, 50 (2): 385-394.
- [18] 张 品, 李长勇. 基于改进模糊 PID 的全向搬运机器人路径跟踪控制研究 [J]. 食品与机械, 2021, 37 (6): 114-119, 190.
- [19] 刘璟龙, 张崇峰, 邹怀武, 等. 基于干扰观测器的柔性空间机器人在轨精细操作控制方法 [J]. 航空学报, 2021, 42 (1): 196-206.
- [20] 王林军, 史宝周, 张 东, 等. 遗传算法优化的线性二次型调节器控制下 3-UPS 并联机器人稳定性分析 [J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28 (1): 112-123.
- (上接第 153 页)
- [4] 丁云鹏, 朱学军, 陈晋生, 等. 重载搬运机器人的动力学仿真及控制系统设计 [J]. 机械设计与研究, 2020, 36 (1): 38-43, 48.
- [5] 张景帅, 钟佩思, 刘 梅, 等. 搬运助力外骨骼机器人运动学建模与仿真分析 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (8): 3096-3102.
- [6] 廖列法, 李浩瀚, 李 帅, 等. 结合 Winner-Take-All 的足球机器人控制策略研究 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57 (7): 136-143.
- [7] 崔俊文, 刘自红, 石 磊, 等. 基于分层学习的四足机器人运动自适应控制模型 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (1): 105-110.
- [8] 张高巍, 杨 鹏, 王 婕, 等. 可穿戴五自由度上肢外骨骼机器人固定时间控制 [J]. 控制理论与应用, 2020, 37 (1): 205-214.
- [9] 李岳明, 王小平, 张军军, 等. 基于改进二次规划算法的 X 舵智能水下机器人控制分配 [J]. 上海交通大学学报, 2020, 54 (5): 524-531.
- [10] 杨 濛, 卞永明, 张圣良, 等. 基于柔性致动器的手功能康复机器人控制系统研究 [J]. 中国工程机械学报, 2021, 19 (5): 425-429.
- [11] 高茂源, 王好臣, 赵锦泽, 等. 双目视觉引导机器人码垛定位技术的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (1): 219-222.
- [12] 祖洪飞, 陈章位, 毛晨涛, 等. 基于极小极大算法的双臂机器