

引文格式: 雷沛, 夏凤琴, 孙海龙, 等. 面向飞机大部件的密封胶自动涂覆机器人系统研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(12): 59-67.
LEI Pei, XIA Fengqin, SUN Hailong, et al. Research on automatic sealant coating robot system for aircraft large components[J].
Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(12): 59-67.

面向飞机大部件的密封胶自动涂覆机器人系统研究

雷沛^{1,2}, 夏凤琴^{1,2}, 孙海龙^{1,2}, 陈强^{1,2}, 谷立萍^{1,2}, 卫亚斌^{1,2}

(1. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092;
2. 四川省航空智能制造装备工程技术研究中心, 成都 610092)

[摘要] 针对目前飞机大部件涂胶过程中人工作业方式存在的涂胶质量一致性差、效率低、可达性有限、工作环境恶劣等问题, 设计了龙门悬挂式机器人自动涂覆系统。该系统通过对视觉系统的标定以及对理论涂胶轨迹的修正, 评估涂胶工艺参数影响因素, 获得机器人运行速度和电机速度之间的匹配关系, 并构建集成工业相机、激光轮廓扫描仪等设备的多功能末端执行器。同时开发了一套集成控制系统和软件, 实现了大尺寸飞机部件的高效、高质量的密封胶自动涂覆。试验结果表明, 涂胶轨迹精度为 ± 0.5 mm, 胶条精度为 ± 0.5 mm, 完全可满足实际工艺需求。

关键词: 工业机器人; 自动涂覆; 多功能末端执行器; 基准识别; 集成控制

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.12.059



雷沛
高级工程师, 博士。

飞机的密封性对于其安全飞行及飞机寿命有着不可忽视的影响, 较差的密封性甚至能够危及飞行员的

人身安全。随着复合材料在航空领域使用率的提高, 飞机机身壁板、机翼骨架、座舱等大量部件都需要采用胶接方式。因此, 飞机的密封胶涂胶工作在飞机的装配制造过程中占据非常重要的地位。然而, 由于飞机大部件的结构特征多样性、结构尺寸变化繁多、非标性等特点, 目前国内涂胶工艺仍主要采用人工作业方式完成, 该方式存在涂胶量不均匀、质量一致性差、可操作性差、涂胶材料威胁工人健康等问题, 严重制约了我国飞机制造业的发展。

工业机器人在点焊、打磨、搬运、切割、喷漆等诸多工艺中被广泛应用^[1-3], 随即基于工业机器人的自动涂胶系统应运而生, 发展至今衍生出4类自动涂胶系统: 一般涂胶机器人、机械式涂胶机器人、软仿形涂胶机器人和智能化涂胶机器人^[4-5], 其中智

能化涂胶机器人因采用机器视觉技术、智能控制技术等, 已成为自动涂胶工艺的发展趋势。目前以美国 Adept Technology 公司、瑞典 ABB 公司为首, 设计出的专用涂胶机器人系统无论是自动化程度、精度水平、涂覆质量以及经济成本都已经达到了领先水平, 其产品涂胶领域有较为广泛的应用。

而国内涂胶机器人的相关技术与国外还有一定的差距。国内机器人涂胶系统最早应用于汽车生产线^[6-7], 受飞机大部件的结构特征多样性、喷头姿态等特性影响, 无法将其照搬到飞机制造业。张羽^[8]提出针对飞机壁板的直角坐标喷涂式涂胶机, 可对一定型号的机翼薄壁件进行喷涂, 但无法实现大尺寸零件和空间曲面特征范围的喷涂作业。张卫攀等^[9]开展了 AGV 移动式机器人涂胶系统研究, 但该系统移动过程定位误差较

大,需配备高精度传感器来修正移动误差,增加了系统的复杂性。许斌等^[10]研究了基于点云分析的涂胶路径规划技术。另外,章易镰^[11]和葛腾^[12]等根据不同的涂胶效率和涂胶工艺需求,设计了不同类型的末端执行器,如气动式末端执行器。然而,当前研究的机器人自动涂胶系统大多面对特定的小型部件,存在系统结构灵活性差、工作空间较小、涂胶精度差等问题。此外,当前研究文献评估胶条质量时,多采用离线检测技术^[13-14]或在涂胶完成后由人工操作游标卡尺进行测量,无法实现实时在线检测胶条质量。因此,研究适用于飞机装配过程的自动涂胶系统对飞机制造业具有重要的意义。

针对传统人工作业方式在自动涂胶时的缺陷,以及当前相关研究中存在的不足,本文开展了多功能末端执行器设计、基准识别与补偿、智能工艺路径规划、高精度自动涂覆控制等关键技术研究,研发了一套面向飞机大部件的密封胶自动涂覆机器人系统。

1 系统基本组成及工作原理

1.1 系统基本组成

密封胶自动涂覆机器人系统如图1所示,主要由龙门架、工业机器人、机器人控制柜、轨道、末端执行器和运动控制系统组成,其中工业机器人安装于龙门架上端,同时龙门架固定于双轴同步运动轨道,从而实现工业机器人系统的八轴联动。该系统采用卧式姿态进行胶液涂覆,防止涂覆过程中胶液的滴落,减小了重力对自动涂覆过程的影响,并且该龙门悬挂式系统扩展了机器人作业空间,使得在移动站位后也不需重新标定基准坐标系,对于大型复杂部件的自动涂覆应用具有实用性。

1.2 末端执行器设计

末端执行器是机器人自动涂覆系统实现自动挤胶、刮胶、基准识别、

胶形检测等功能的关键部分,其结构形式直接影响涂胶效率和质量。为了提高涂胶效率,满足不同涂胶工艺的设备快换,本文按作业流程对功能特性进行了层次划分,采用拓扑技术优化设计,并通过有限元仿真方法对末端执行器的关键结构进行强度

校核,设计了一种集成多功能涂覆末端执行器,如图2所示。末端执行器采用针筒式作业方式,主要由伺服电机、工业相机、激光轮廓扫描仪、摄像头、180°补偿机构、弹性刮胶片、阀门开关、涂胶头和胶筒组成。多功能末端执行器的工作原理如图3所示,

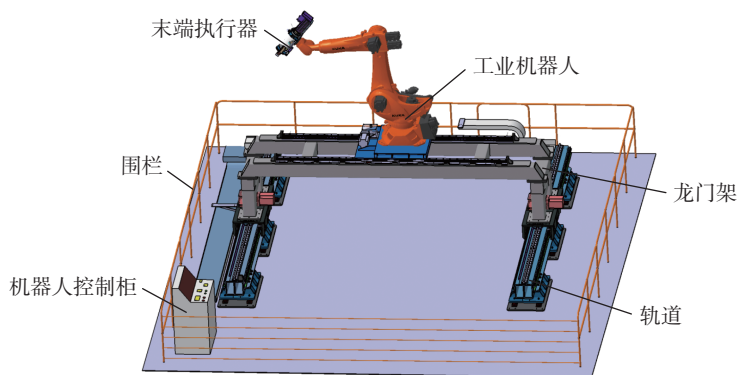


图1 飞机大部件的密封胶自动涂覆机器人系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of automatic sealant coating robot system for aircraft large components

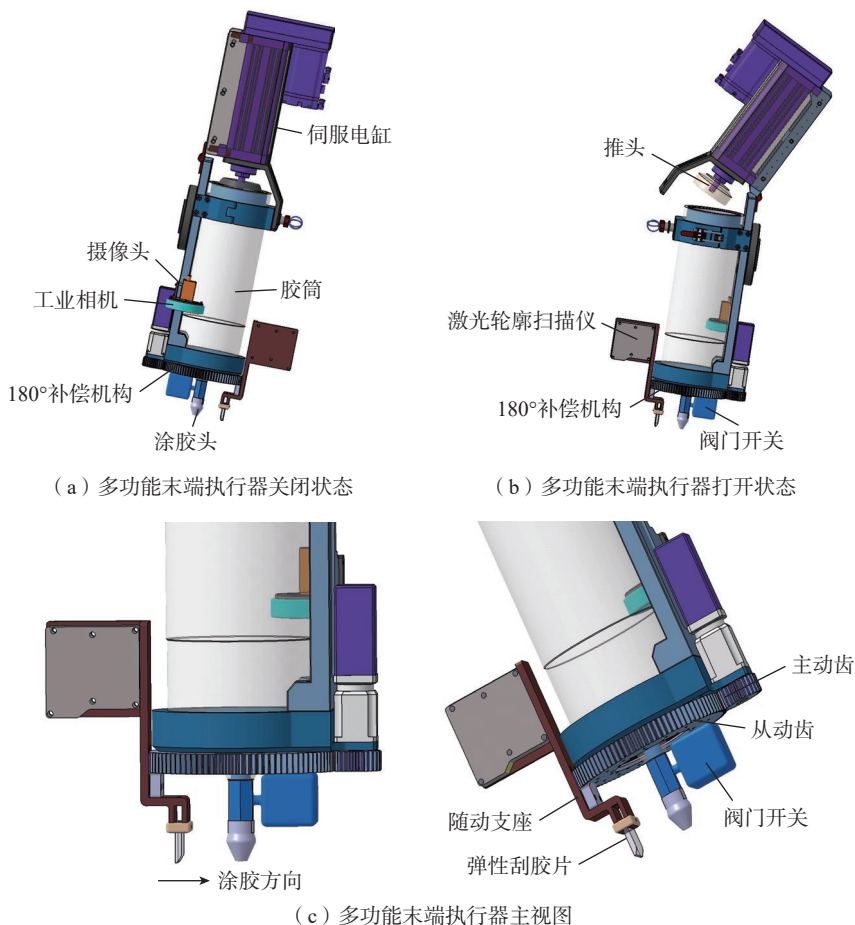


图2 多功能末端执行器的多视图

Fig.2 Multiple views of integrated multifunctional end-effector

伺服电缸采用二级伸缩缸体,保证涂胶量在被充分满足的情况下缩短了末端执行器尺寸,节省了安装空间,并且通过推动活塞将胶筒内胶液向下挤出,涂胶头胶嘴将成型胶条涂覆在产品表面,密封容腔内部液体流速低、压力稳定,使得胶量均匀,涂胶质量一致性好、精度高。另一方面,末端执行器姿态有时无法保证弹性刮片与产品的垂直关系,为补偿机器人在涂胶过程中无法达到的姿态角度,设计了180°补偿机构,其包含的旋转电机让主/从动齿传动装置带动随动支座上的弹性刮胶片和激光轮廓扫描仪绕胶筒轴线旋转,并通过集成控制软件设置涂胶路径中弹性刮片与产品的垂直补偿角度,控制伺服电机运动到精确的角度位置,保证了扫描方向与机器人涂胶方向一致,以及弹性刮片与产品的垂直关系,随即刮胶片可将胶条刮薄为胶层,使得胶层厚度均匀一致。此外,工业相机用于获取实际产品基准点在图像中的坐标值,实现基准识别功能;激光轮廓扫描仪用于获取胶条形状特征数据,判断胶层质量是否满足加工指标;摄像头用于涂胶过程监控,便于工人观察涂胶现场情况。进一步地,弹性刮胶片、涂胶头可根据不同涂胶工艺、涂胶对象进行快速更换,提高了工作效率,扩大了产品实用性。

2 集成控制系统硬件组态与软件设计

2.1 控制系统硬件组态

本系统采用现场总线模式,由KUKA机器人作为本体承载多功能末端执行器完成涂胶、刮胶等工作。利用上位机PC集成控制的方式实现运动控制、设备监控、数据传输与存储等功能,EL6695端子模块接入KUKA机器人控制柜中实现机器人系统的内部变量映射,并与汇川PLC控制器利用EtherCAT通信方式实现变量地址映射和参数配置。同时,

控制器与2个伺服轴通过EtherCAT总线协议完成电机高速运动响应控制,其他辅助设备的控制则是采用不同的端子模块接入端子耦合模块中实现。最后,以交换机作为数据交换中心,上位机PC采用Ethernet/IP工业以太网与激光轮廓扫描仪、工业相机、机器人控制系统和PLC控制器取得链接,从而实现对整个加工系统

的集成控制,系统网络拓扑架构如图4所示。

2.2 控制系统软件设计

集成控制系统采用分层级模块化的方式构建,总体架构分为4层,即设备接口层、逻辑控制层、数据处理层和用户界面层,如图5所示。

(1)设备接口层。主要包括机器人控制接口、激光轮廓仪接口、相

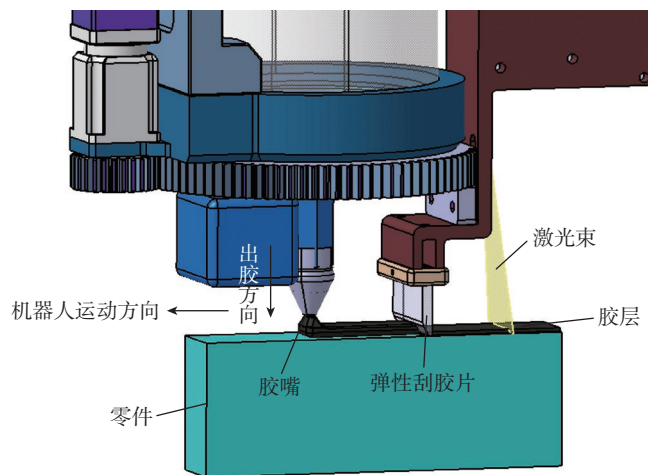


图3 多功能末端执行器的工作原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of working principle of multifunctional end-effector

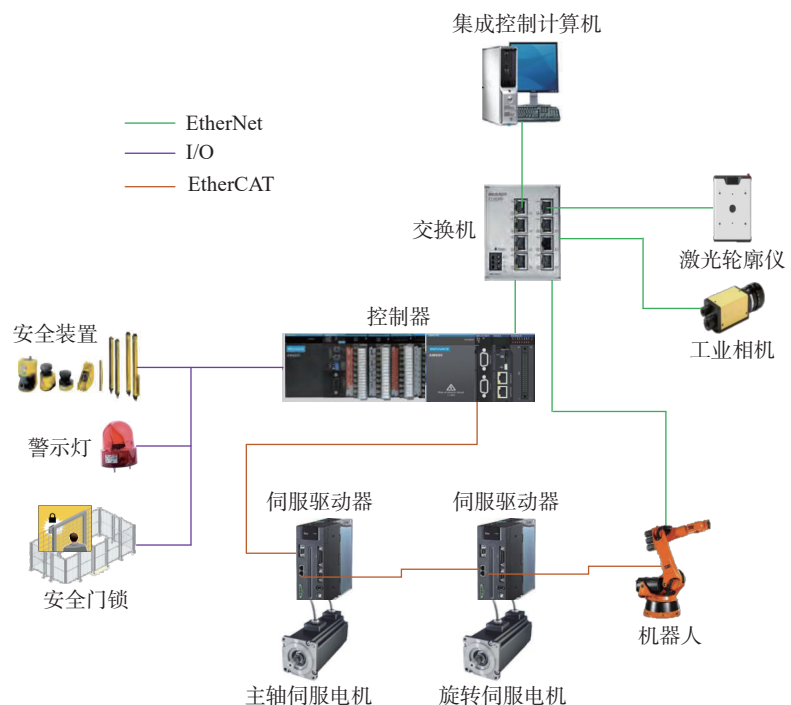


图4 系统的网络拓扑架构

Fig.4 Network topology architecture of system

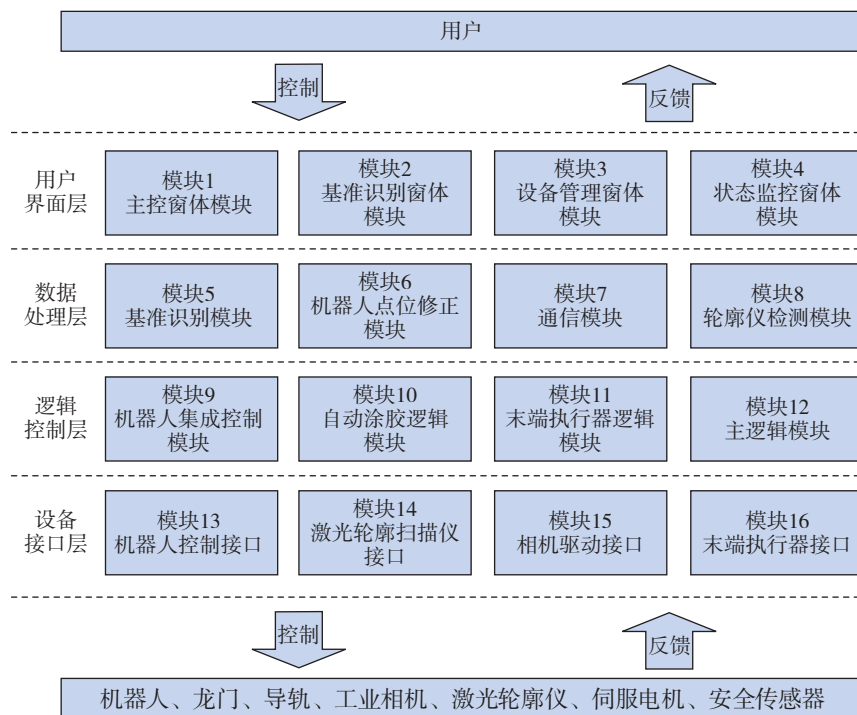


图5 集成控制软件架构
Fig.5 Integrated control software architecture

机驱动接口和末端执行器接口。

(2)逻辑控制层。用于实现各设备、装置的工作逻辑与流程控制。其中机器人集成控制模块是将机器人控制接口所支持的功能整合在一起,包括坐标系选择、运行模式显示、程序发送等;自动涂胶逻辑模块定义了机器人自动涂胶的完整过程,当机器人执行自动涂胶离线程序时,该模块被调用控制机器人与末端执行器协同完成自动涂胶任务;末端执行器逻辑模块用于实现末端执行器中的各装置协同工作,包含各项功能的判定条件和互锁机制设置,保证末端执行器稳定、安全的工作。

(3)数据处理层。该层作用是对机器人程序中的点位数据、基准识别中的图像数据、工艺参数数据以及与控制逻辑层交互的设备数据进行处理和分析。其中基准识别模块是应用机器视觉技术对工业相机拍摄到的图像进行特征识别与检测,获取基准孔实际坐标值与理论坐标值之间的转换关系;机器人点位修正模块是

利用基准识别找到的转换关系对机器人离线编程的理论涂胶点坐标进行修正,得到修正后机器人实际涂胶轨迹;通信模块主要是包含两条通信主线,第1条通信主线是利用TCP/IP协议获取激光轮廓仪和工业相机的数据,第2条通信主线是基于Modbus TCP通信协议的应用程序编程接口(API),实现与PLC控制器通信,发送控制指令及读取设备状态等。

(4)用户界面层。用于接收用户指令和反馈系统运行状态,实现人机交互功能。其中的模块均采用WPF(Windows Presentation Foundation)与C#语言以面向对象方式编程的窗体模块,各窗体模块为数据处理层、逻辑控制层和设备接口层中各功能模块提供输入,并将执行结果和过程信息进行显示。该控制软件包含主界面(系统准备)、基准识别、自动涂胶、设备管理、状态监测5个界面,具有维护性高、扩展性强、现场操作人员使用方便等特点,系统的控制软件操作界面如图6所示。

3 系统工艺流程

自动涂覆机器人系统的工作流程如图7所示,其关键的工艺过程如下。

(1)坐标系标定。为让机器人自动涂胶系统按照规划的路径精确运行,需对现场各设备进行坐标系标定,以获取各设备之间的坐标转换关系。

(2)系统自检。系统上电开启后,系统完成自检工作。自检内容包括伺服电机状态、机器人控制系统状态以及通信现场总线状态等,如果系统自检存在错误需进行故障排查,直到系统自检成功。

(3)系统初始化。为了保证设备的稳定运行和参数配置有效性,需初始化机器人系统与运动控制系统,以及上位机与运动控制系统之间的交互数据,可通过上位机控制软件中的初始化模块完成系统初始化。

(4)生成理论离线编程程序(NC程序)。基于DELMIA平台,采用CAA及VBA两种二次开发技术设计了机器人自动涂胶离线编程软件。通过在自动涂胶离线编程软件中导入产品数模,采用一种梁肋涂胶机器人末端执行器TCP姿态的计算方法,同时结合轮廓面法向提取技术和涂胶中心线离散规划技术,获得末端执行器TCP的姿态角 α 、 β 、 γ ,并设置涂胶轨迹间距、点位间距、涂胶起始点等工艺参数,生成机器人涂胶离线编程程序。

(5)涂胶工艺参数设置。每一类产品的涂胶工艺参数都存在差异,因此在机器人进行自动涂胶任务前,需对加工产品的涂胶工艺参数进行设置,其设置的依据见下文过程(8)。

(6)基准识别与误差补偿。由于产品存在制造误差、装配误差、产品放置位置误差等,按照理论离线编程程序进行自动涂胶工作可能造成涂胶轨迹精度差,无法满足涂胶质



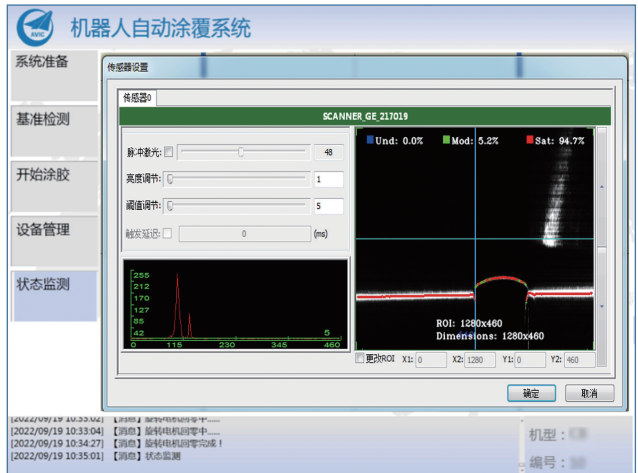
(a) 基准识别界面



(b) 设备管理界面



(c) 涂胶界面



(d) 状态监测管理界面

图 6 控制软件的操作界面

Fig.6 Operation interface of integrated control software

量。因此本文根据工业相机拍摄到的基准孔图像,采用模式匹配、特征提取和几何元素拟合方法得到基准孔在涂胶工件中的实际坐标值,并利用奇异值分解算法计算出基准实际位置与理论位置的转换关系,使得机器人的涂胶轨迹与飞机产品外形的相对位置关系与仿真环境中一致。基准识别与补偿算法的详细步骤如下。

步骤 1。假设产品上所有的基准孔实际中心坐标位置为 $h_{ai}(x_i, y_i) = [h_{a1}(x_1, y_1), h_{a2}(x_2, y_2), \dots, h_{ai}(x_i, y_i)]$, 并通过产品数模获取基准孔的理论中心坐标位置为 $h_{ti}(x_i, y_i) = [h_{t1}(x_1, y_1), h_{t2}(x_2, y_2), \dots, h_{ti}(x_i, y_i)]$ 。其中 $i \geq 2$, i 表示基准孔数量; h_{ti} 、 h_{ai}

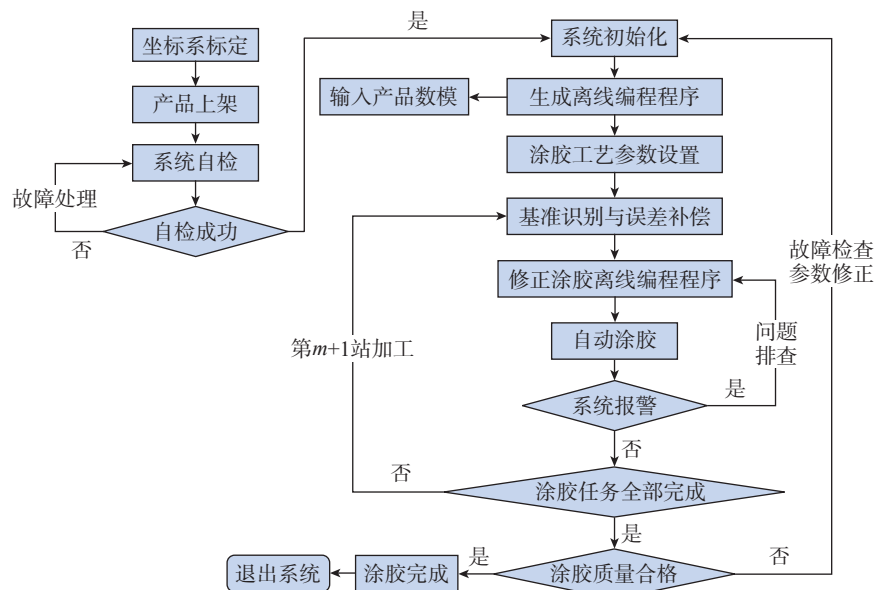


图 7 系统工艺流程图

Fig.7 System process flow chart

分别表示第 i 个基准孔理论坐标值和实际坐标值。

步骤 2。假设待涂胶产品的任一理论涂胶点为 $p_{tn}(x_n, y_n)$, 实际涂胶点为 $p_{an}(x_n, y_n)$, $n \geq 1$, n 为涂胶点数量。则理论基准孔中心点 $h_{ti}(x_i, y_i)$ 与理论涂胶点 $p_{tn}(x_n, y_n)$ 连线所形成的向量为 $\vec{h_{ti}p_{tn}}$, 两个理论基准孔中心点 $h_{t(i-1)}(x_{(i-1)}, y_{(i-1)})$ 与 $h_{ti}(x_i, y_i)$ 连线所形成的向量 $\vec{h_{t(i-1)}h_{ti}}$ 分别向坐标系 X 轴、 Y 轴方向投影可得到 $\vec{h_{t(i-1)}p_{tn}(x)}$ 、 $\vec{h_{t(i-1)}p_{tn}(y)}$ 、 $\vec{h_{t(i-1)}h_{ti}(x)}$ 、 $\vec{h_{t(i-1)}h_{ti}(y)}$ 。同理可知, 实际基准孔中心点 $h_{ai}(x_i, y_i)$ 与实际涂胶点 $p_{an}(x_n, y_n)$ 形成的向量为 $\vec{h_{ai}p_{an}}$, 两个实际基准孔中心点 $h_{a(i-1)}(x_{(i-1)}, y_{(i-1)})$ 与 $h_{ai}(x_i, y_i)$ 连线所形成的向量 $\vec{h_{a(i-1)}h_{ai}}$ 分别向坐标系 X 轴、 Y 轴方向投影可得到 $\vec{h_{a(i-1)}p_{an}(x)}$ 、 $\vec{h_{a(i-1)}p_{an}(y)}$ 、 $\vec{h_{a(i-1)}h_{ai}(x)}$ 、 $\vec{h_{a(i-1)}h_{ai}(y)}$ 。基于等比例偏移原理, 可得到以下位置关系:

$$\begin{cases} \frac{\vec{h_{t(i-1)}p_{tn}(x)}}{\vec{h_{t(i-1)}h_{ti}(x)}} = \frac{\vec{h_{a(i-1)}p_{an}(x)}}{\vec{h_{a(i-1)}h_{ai}(x)}} \\ \frac{\vec{h_{t(i-1)}p_{tn}(y)}}{\vec{h_{t(i-1)}h_{ti}(y)}} = \frac{\vec{h_{a(i-1)}p_{an}(y)}}{\vec{h_{a(i-1)}h_{ai}(y)}} \end{cases} \quad (1)$$

步骤 3。理论基准孔 $h_{t(i-1)}(x_{(i-1)}, y_{(i-1)})$ 、 $h_{ti}(x_i, y_i)$ 在 X 、 Y 方向的坐标值与实际基准孔 $h_{a(i-1)}(x_{(i-1)}, y_{(i-1)})$ 、 $h_{ai}(x_i, y_i)$ 在 X 、 Y 方向的坐标值差值 $\Delta x_{(i-1)}$ 、 Δx_i 、 $\Delta y_{(i-1)}$ 、 Δy_i 可表示为

$$\begin{cases} \Delta x_{(i-1)} = x_{a(i-1)} - x_{t(i-1)}, \quad \Delta x_i = x_{ai} - x_{ti} \\ \Delta y_{(i-1)} = y_{a(i-1)} - y_{t(i-1)}, \quad \Delta y_i = y_{ai} - y_{ti} \end{cases} \quad (2)$$

步骤 4。假设实际涂胶点 $p_{an}(x_n, y_n)$ 相对于理论涂胶点 $p_{tn}(x_n, y_n)$ 在 X 、 Y 方向的坐标值差值为 $\Delta x'$ 、 $\Delta y'$, 则实际涂胶点与理论涂胶点坐标值存在以下关系:

$$\begin{cases} p_{an}(x_n) = p_{tn}(x_n) + \Delta x' \\ p_{an}(y_n) = p_{tn}(y_n) + \Delta y' \end{cases} \quad (3)$$

步骤 5。根据式(1)~(3), 实际涂胶点 $p_{an}(x_n, y_n)$ 的坐标值可由以下方程式获得:

$$p_{an}(x_n) = p_{tn}(x_n) + \frac{1}{(p_{tn}(x_n) - x_{t(i-1)}) \times \Delta x_i + (x_{ti} - p_{tn}(x_n)) \times \Delta x_{(i-1)}} \quad (4)$$

$$p_{an}(y_n) = p_{tn}(y_n) + \frac{1}{(p_{tn}(y_n) - y_{t(i-1)}) \times \Delta y_i + (y_{ti} - p_{tn}(y_n)) \times \Delta y_{(i-1)}}$$

(7) 修正的涂胶离线编程程序。基于 3 次均匀 B 样条曲线插值轨迹规划方法, 将所有实际涂胶点作为型值点, 拟合出待涂胶工件的实际涂胶轨迹, 进而得到修正后的机器人涂胶 NC 程序。

(8) 自动涂胶。PLC 控制器向机器人控制系统发送涂胶开始命令和程序号, 工业机器人在获得程序号后按照修正 NC 程序轨迹带动末端执行器移动至涂胶起点, 协同开展挤胶、涂胶、刮胶等工作。为保证胶层的宽度和厚度, 提出了涂胶配速控制工艺参数关系式, 其推导过程如下。

步骤 1。定义活塞挤胶量为 $V_1 = s_1 \times \Delta d_1$, 其中 s_1 为活塞横截面积; Δd_1 为活塞的移动位移。假设挤胶所需的时间为 dT_1 , 则可知活塞的移动速度为 $v_1 = \Delta d_1 / (dT_1)$; d 为胶条厚度。

步骤 2。定义末端涂胶量为 $V_2 = w \times d \times \Delta d_2$, 其中 w 为胶条宽度; Δd_2 为出胶口移动位移。假设满足末端涂胶量所需的时间为 dT_2 , 则可知机器人末端执行器运动线速度为 $v_2 = \Delta d_2 / (dT_2)$ 。

步骤 3。在设定的时间下, 密封涂覆过程中活塞挤胶量与末端涂胶量相等, 可知:

$$\begin{cases} V_1 = V_2, \quad dT_1 = dT_2 \\ \int_0^t (s_1 \times v_1) dT_1 = \int_0^t (w \times d \times v_2) dT_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中, t 表示涂胶过程中系统的工作时间。

步骤 4。假设忽略电机加速时间, 电机运动速度和活塞移动速度成正比, 满足关系 $v_1 = kv$, 其中 k 表示比例

因子, $k > 0$; v 表示电机的运动速度。则可获得机器人末端执行器移动速度和电机速度关系如下:

$$\frac{v}{v_2} = \frac{w \times d}{s_1 \times k} \quad (6)$$

胶层的宽度和厚度属于已知的工艺参数, v 和 v_2 之间的关系可容易获得, 技术人员可根据涂胶现场环境以及胶体状态适当调整 v 和 v_2 的速度比值。因此, 调整关键工艺参数可精确控制胶层均匀性、厚度一致性。

(9) 系统报警判定。机器人自动涂胶过程中, 系统出现伺服轴超过正负限位、急停信号激活、零点标定丢失、驱动器故障等错误时, 系统将停止运动, 需排查系统故障直到系统无报警状态。

(10) 涂胶任务完成判定。当一个工位涂胶任务完成后, 将判定是否所有的涂胶工位都已经完成涂胶任务, 如果不满足条件, 则重复操作过程(5)~(7), 直到所有的涂胶任务完成。

(11) 涂胶质量合格判定。所有涂胶任务完成后, 对胶条几何形状的特征数据进行判断。设定胶层符合工艺要求的宽度和厚度的最小值和最大值分别为 w_{\min} 、 w_{\max} 、 d_{\min} 、 d_{\max} , 当激光轮廓仪检测到胶层的宽度和厚度不满足 $w_{\min} \leq w_{\text{act}} \leq w_{\max}$ 和 $d_{\min} \leq d_{\text{act}} \leq d_{\max}$ 范围时, 则认为该胶条质量不合格, 同时记录下工业机器人系统的坐标值, 为操作人员提供故障排查以及涂胶工艺参数修正依据, 保证涂胶质量合格。

4 试验验证

基于上述末端执行器、KUKA 机器人、激光轮廓仪、工业相机等硬件设备搭建了试验平台, 如图 8 所示。为验证本文所提出的密封胶自动涂覆机器人系统的有效性, 以某型机翼骨架作为验证对象, 机翼骨架部件呈三角形扁平状, 待涂胶轨迹长度约 70 m, 投影面积约 12 m²。密封胶选用 HM112, 密度为 1.29 g/cm³, 常温下

流淌性为 3~4 mm。选取机翼骨架上某条梁的两个理论基准孔坐标值为 (-115.695 mm, 2479.857 mm)、(1274.398 mm, 1243.704 mm), 通过本文提出的基准识别和补偿算法可得实际基准孔坐标值为 (-124.096 mm, 2467.441 mm)、(1277.909 mm, 1263.407 mm), 理论涂胶轨迹坐标值所对应的实际坐标值数据如表 1 所示。

基准识别算法使得修正后的涂胶轨迹符合理论涂胶轨迹趋势, 涂胶

轨迹精度为 ± 0.5 mm, 满足加工要求 (图 9)。

进一步验证机器人运动线速度、电缸速度与胶条质量的关系。由式 (6) 可知, 由于各因素之间的交互作用影响小于单因素^[13], 对胶条质量的影响不显著。因此, 本文采用正交试验方法选取机器人运动速度, 分别为 40 mm/s、50 mm/s、60 mm/s、70 mm/s, 电机速度分别为 0.15 mm/s、0.2 mm/s、0.25 mm/s、0.3 mm/s、0.35

mm/s, 每组试验重复 5 次, 机翼样件涂胶试验如图 10 所示, 试验结果如表 2 所示。

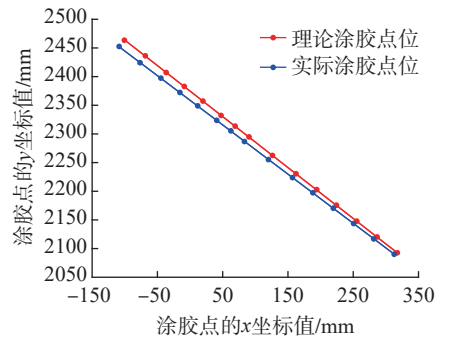


图 9 理论涂胶轨迹与实际涂胶轨迹的关系图

Fig.9 Relationship between theoretical gluing track and actual gluing track



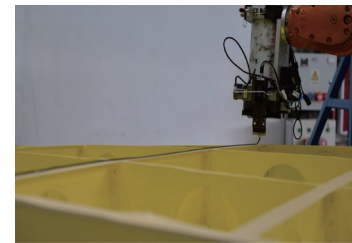
图 8 密封胶自动涂覆机器人系统

Fig.8 Automatic sealant coating robot system

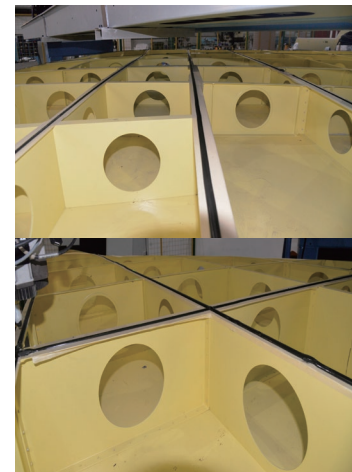
表 1 涂胶轨迹的理论坐标值和实际坐标值数据

Table 1 Theoretical coordinate value and actual coordinate value of gluing trail

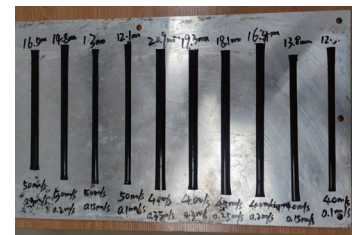
测点编号	理论涂胶轨迹坐标/mm	实际涂胶轨迹坐标/mm
1	(-100.776, 2464.4)	(-109.048, 2452.385)
2	(-68.761, 2435.923)	(-76.760, 2424.648)
3	(-36.747, 2407.446)	(-44.471, 2396.911)
4	(-8.562, 2382.369)	(-16.044, 2372.486)
5	(19.622, 2357.303)	(12.381, 2348.071)
6	(47.806, 2332.226)	(40.807, 2323.646)
7	(68.876, 2313.483)	(62.057, 2305.389)
8	(89.937, 2294.746)	(83.299, 2287.139)
9	(126.175, 2262.499)	(119.847, 2255.730)
10	(162.799, 2229.934)	(156.785, 2224.011)
11	(193.559, 2202.592)	(187.808, 2197.380)
12	(224.416, 2175.199)	(218.930, 2170.698)
13	(255.313, 2147.768)	(250.091, 2143.980)
14	(286.324, 2120.243)	(281.368, 2117.171)
15	(317.121, 2092.906)	(312.430, 2090.544)



(a) 涂胶过程



(b) 涂胶结果



(c) 涂胶胶条

图 10 机翼样件涂胶试验

Fig.10 Glue coating test of wing sample

表 2 涂胶工艺参数正交试验结果统计表
Table 2 Orthogonal test results of gluing technology parameters

序号	机器人运动速度/ (mm · s ⁻¹)	电机速度/ (mm · s ⁻¹)	第 1 次胶条 宽度/mm	第 2 次胶条 宽度/mm	第 3 次胶条 宽度/mm	第 4 次胶条 宽度/mm	第 5 次胶条 宽度/mm	胶条宽度 平均值/mm
1	40	0.15	13.8	13.8	13.7	14.2	14.1	13.92
2	40	0.2	16.4	16.7	16.5	16.1	16.5	16.44
3	40	0.25	18.1	18.3	18.4	18.5	18.0	18.26
4	40	0.3	19.3	19.4	19.2	19.4	19.7	19.40
5	40	0.35	20.9	20.5	20.5	21	21.2	20.82
6	50	0.15	13.0	12.8	13.2	13.2	13.1	13.06
7	50	0.2	14.8	14.4	14.6	14.6	14.8	14.64
8	50	0.25	16.5	16.5	16.8	16.3	16.4	16.5
9	50	0.3	17.7	17.2	18.2	17.4	17.7	17.64
10	50	0.35	19.1	19.5	19.6	18.6	19.5	19.26
11	60	0.15	11.2	11.2	11.7	11.3	11.4	11.36
12	60	0.2	13.1	13.4	13.5	13.4	13	13.28
13	60	0.25	14.8	14.4	14.6	14.3	14.2	14.46
14	60	0.3	16.3	16.2	16	15.8	16.3	16.12
15	60	0.35	17.8	17.6	17.8	17.3	17.7	17.64
16	70	0.15	8.4	8.5	8.1	8.5	8.6	8.42
17	70	0.2	10.6	10.7	10.2	10.0	10.6	10.42
18	70	0.25	13.2	13.0	13.4	13.4	13.4	13.28
19	70	0.3	14.7	14.4	14.9	14.9	14.5	14.68
20	70	0.35	16.2	16.6	16.3	16.6	16.6	16.46

从因素趋势图 11 中可以得知, 胶条宽度跟机器人的运动速度 (v_2) 成反比, 与电机运动速度成正比。伺服涂胶的每次出胶条宽度满足精度需求, 胶条精度为 ± 0.5 mm, 涂胶一致

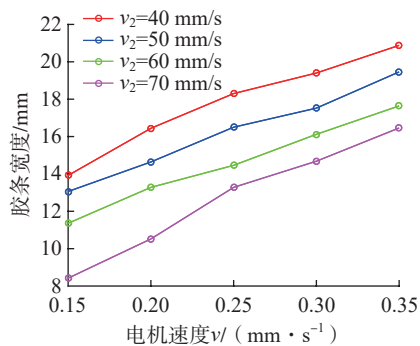


图 11 因素影响趋势

Fig.11 Factor influence trend chart

性好。

5 结论

本文提出了面向飞机大部件的密封胶机器人自动涂覆系统。设计了集成多功能的柔性涂覆末端执行器来实现自动挤胶、刮胶、基准识别和胶条检测。并通过搭建试验平台验证本文提出的基准识别与误差补偿修正算法的有效性, 研究了胶条质量影响因素与工艺参数关系。试验结果表明, 涂胶轨迹精度为 ± 0.5 mm, 胶条精度为 ± 0.5 mm, 涂胶一致性好, 完全满足实际工艺要求。

参考文献

[1] 王霆. 工业机器人焊缝跟踪与自动

涂胶系统的设计与实现 [D]. 北京: 北京工业大学, 2015.

WANG Ting. Design and implementation of industrial robot seam tracking and automatic gluing system[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.

[2] CHEN Y H, DONG F H. Robot machining: Recent development and future research issues[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9): 1489-1497.

[3] 雷沛, 曾德标, 江开林, 等. 面向飞机大型成型模具的机器人精整技术研究 [J]. 航空制造技术, 2020, 63(5): 74-79, 102.

LEI Pei, ZENG Debiao, JIANG Kailin, et al. Research on robot assisted polishing technologies for large aircraft shaping mold[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(5): 74-79, 102.

[4] 艾博, 周占福, 吕磊. 全自动涂胶设备及涂胶工艺的研究 [J]. 电子工业专用设备,

2019, 48(3): 56–59.

AI Bo, ZHOU Zhanfu, LÜ Lei. Research of equipment and coating process by automatic spin-coater[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2019, 48(3): 56–59.

[5] 梅学华. 涂胶机器人喷挤技术集成应用[J]. 现代涂料与涂装, 2016, 19(7): 64–66.

MEI Xuehua. Application of UBS & GAD technology of glue-robot[J]. Modern Paint & Finishing, 2016, 19(7): 64–66.

[6] 汪振中. 机器人在汽车挡风玻璃自动涂胶系统的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2019(1): 236.

WANG Zhenzhong. Application of robot in automatic gluing system of automobile windshield[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(1): 236.

[7] 戴力. 汽车涂胶工艺应用研究[J]. 汽车零部件, 2017(8): 71–74.

DAI Li. Application of automobile gumming process[J]. Automobile Parts, 2017(8): 71–74.

[8] 张羽. 飞机壁板涂胶机械系统设计[D]. 西安: 西京学院, 2015.

ZHANG Yu. The mechanical system design of aircraft panel gluing machine[D]. Xi'an: Xijing

University, 2015.

[9] 张卫攀, 郭春英, 甘志超, 等. 智能涂胶机器人系统在航空工业中的应用[C]//2016 航空试验测试技术学术交流会论文集. 北京: 中国航空学会, 2016: 479–481.

ZHANG Weipan, GUO Chunying, GAN Zhichao, et al. Application of intelligent gluing robot system in aviation industry[C]//Proceedings of 2016 Aviation Test Technology Academic Exchange Conference. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2016: 479–481.

[10] 许斌, 周新房, 王伟华, 等. 面向飞机长桁壁板的柔性化机器人涂胶系统[J]. 航空制造技术, 2022, 65(19): 100–106, 118.

XU Bin, ZHOU Xinfang, WANG Weihua, et al. Flexible robot gluing system for aircraft stringer and skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(19): 100–106, 118.

[11] 章易镰, 范云飞. 基于伺服驱动的钉孔稳定涂胶方法研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(14): 76–81.

ZHANG Yilian, FAN Yunfei. Research on servo sealant applying method for fastener hole[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(14): 76–81.

[12] 葛腾, 何嘉龙, 周汐睿. 基于 FANUC 机器人控制系统的机器人螺杆泵涂胶系统的设计[J]. 装备制造技术, 2021(2): 60–63.

GE Teng, HE Jialong, ZHOU Xirui. Design of robot screw pump gluing system based on FANUC robot control system[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2021(2): 60–63.

[13] 叶敏, 梅雪川, 高燕, 等. 面向自由曲面精准涂胶的胶线质量模型研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(19): 70–73.

YE Min, MEI Xuechuan, GAO Yan, et al. Research on the glue line quality model for precise coating of free-form surface[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(19): 70–73.

[14] 陈甦欣, 汪涛. 基于视觉的涂胶质量检测方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(7): 138–141.

CHEN Suxin, WANG Tao. Quality inspection method for glue spreading based on vision[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(7): 138–141.

通讯作者: 夏凤琴, 工程师, 硕士。

Research on Automatic Sealant Coating Robot System for Aircraft Large Components

LEI Pei^{1,2}, XIA Fengqin^{1,2}, SUN Hailong^{1,2}, CHEN Qiang^{1,2}, GU Liping^{1,2}, WEI Yabin^{1,2}

(1. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China;

2. Sichuan Aviation Intelligent Manufacturing Equipment Engineering Technology Research Center, Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] Aiming at the problems of poor consistency, low efficiency, limited accessibility and poor working environment in manual operation mode during the gluing process of aircraft large components, the automatic gluing system for gantry hanging robot was designed. Through the calibration of the vision system and the correction of the theoretical gluing trajectory, the gluing system evaluates the affecting factors of the gluing technology parameters, obtains the matching relationship between the robot running speed and the motor speed, and constructed multifunctional end-effector integrating industrial cameras, laser contour scanners and other equipment. At the same time, an integrated control system and software are developed to realize the automatic coating of sealant with high efficiency and quality for large size aircraft components. The test results show that the accuracy of the gluing track is ± 0.5 mm, and the accuracy of the rubber strip is ± 0.5 mm, which can fully meet the actual process requirements.

Keywords: Industrial robot; Automatic coating; Multifunctional end-effector; Datum identification; Integrated control

(责编 七七)