

DOI:10.11918/202208103

机器人激光除漆系统的设计与实现

梁杰¹, 万宝元¹, 高建设¹, 高昆²

(1. 郑州大学机械与动力工程学院, 郑州 450001; 2. 长沙航空职业技术学院航空机电设备维修学院, 长沙 410124)

摘要: 为解决传统采用化学清洗、机械打磨和喷砂的除漆方法存在产生有害废弃物、损伤基底材料、效率低及劳动强度大等问题, 基于飞机的结构形状及除漆要求, 开发了一套用于飞机表面的机器人激光除漆系统, 该机器人激光除漆系统由全向移动单元、四自由度机械臂单元、激光清洗单元和测控单元组成。首先根据 DR-5 无人侦察机的外形对激光除漆机器人进行了机械本体和控制架构设计, 并采用 D-H 法对机械臂进行了运动学分析和工作空间分析, 验证了机械臂的可达性; 接着对该机械臂进行了重复性测试, 其中 Z 向重复度利用激光位移传感器定量评价, X、Y 向重复度采用误差圆评价; 最后基于弓字形路径对 DR-5 无人侦察机机身的部分平面及曲面开展了激光除漆实验, 并根据激光除漆后表面漆层残余厚度对除漆效果进行了评价。研究表明, 激光除漆机器人的 Z 向重复度为 0.039 mm, X、Y 向重复度小于 ± 2.000 mm; 机身平面除漆实验残余厚度平均值为 6.5 μm , 曲面除漆实验残余厚度平均值为 21.3 μm 。

关键词: 激光除漆; 机械臂; 重复性测试; 轨迹规划; 残余厚度

中图分类号: TP242.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)08-0116-08

Design and implementation of a robotic laser paint removal system

LANG Jie¹, WAN Baoyuan¹, GAO Jianshe¹, GAO Kun²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, 450001, China; 2. School of Aviation Electromechanical Equipment Maintenance, Changsha Aeronautical Vocational and Technical College, Changsha 410124, China)

Abstract: Traditional chemical cleaning, mechanical sanding, and sandblasting can produce large volumes of hazardous waste and damage the substrate. In addition, the depainting process is low-efficient and labor-intensive. Based on the aircraft's structural shape and paint removal requirements, a robotic laser paint removal system for aircraft maintenance is developed. The robotic laser paint removal system contains the omnidirectional moving unit, the four-degree-of-freedom robot arm unit, the laser cleaning unit, and the measurement and control unit. Firstly, the mechanical structure and control architecture of the laser paint removal robot are designed, based on the shape of the DR-5 unmanned aerial vehicle (UAV), and the robot arm's kinematic analysis. Workspace analysis is carried out using the D-H method to verify the reachability of the robot arm. Secondly, the robot arm is tested for repeatability, where the Z-direction repeatability is quantitatively evaluated using laser displacement sensors, and the X and Y-direction repeatability is evaluated using an error circle. Finally, based on the bow path, the laser paint removal test is carried out on part of the flat surface and the curved surface of the UAV fuselage. Moreover, the paint removal result is evaluated according to the residual thickness of the surface paint layer. The results show that the repeatability of the laser paint removal robot is 0.039 mm in Z-direction and less than ± 2.000 mm in the X and Y-directions; the average residual thickness of the flat surface paint removal experiment is 6.5 μm and the average residual thickness of the curved surface paint removal experiment is 21.3 μm .

Keywords: laser paint removal; robot arm; repeatability test; path planning; residual thickness

在航空维修中, 飞机定期就需要脱漆大修一次, 便于检查铝蒙皮或结构件的缺陷和疲劳裂纹, 从而避免飞机在飞行时发生疲劳事故^[1]。因此, 飞机表面除漆是飞机维修时的一项重要工作。

传统的飞机除漆工艺主要有机械除漆、化学溶

剂除漆和超声波除漆等^[2]。机械除漆^[3]是通过手工打磨等机械手段去除工件表面漆层, 这种除漆方法劳动强度大、效率低, 且易对工件材料的基底造成损伤; 化学溶剂除漆^[4]是利用以二氯甲烷为主的有机溶剂除漆, 不仅对环境造成极大污染, 还需要耗费

收稿日期: 2022-08-26; 录用日期: 2022-10-24; 网络首发日期: 2023-07-05

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/23.1235.T.20230705.1436.006.html>

基金项目: 湖南高新技术产业科技创新引领计划(科技攻关类)(2020SK2027)

作者简介: 梁杰(1981—), 男, 副教授, 硕士生导师

通信作者: 高昆, cshygaokun@163.com

大量溶剂,成本较高。超声波除漆法是利用超声波产生的高频震动效应去除工件表面漆层,虽然除漆效果不错,但是操作复杂,适应性差。激光除漆技术^[5]实质上利用高能量激光脉冲束照射到材料表面,使其表面的漆层发生瞬间蒸发和剥离的激光应用技术,其主要原理为烧蚀效应、振动效应和声波震碎。激光除漆优点十分明显,不但很好地解决了上述的环境和经济问题,而且便于实现对除漆过程的主动控制。

国内飞机激光清洗技术现阶段主要针对激光除漆工艺开展^[6-10],而对机器人激光除漆装备及应用的研究则关注较少。国外针对飞机维护的机器人激光除漆技术研究较早^[11-12],荷兰 LR Systems 公司开发的激光清洗机器人,高 15.85 m,臂展 25.9 m,采用 20 kW 的二氧化碳激光器为商用航空公司的全机型除漆;美国 Lasertronics 公司使用自动激光除漆系统为 H-53 和 H60 直升机螺旋桨复合材料叶片除漆;Concurrent Technologies 公司和美国国家机器人工程中心联合开发的机器人激光涂层去除系统 (ARLCRS)为美国犹他州空军基地的 F-16 战斗机和 C-130 运输机除漆,其中 F-16 的除漆时间从 7 d 缩短到 3 d,C-130 的除漆时间从 10 d 缩短到 5 d。

为解决传统化学脱漆和机械除漆存在环境污染大、打磨精度差、效率低的问题,本文设计了一套包含全向移动平台、四自由度机械臂和激光清洗头等机器人激光除漆系统,该系统一方面减轻了工人的劳动强度,另一方面也提高了飞机除漆的质量和效率并减少了除漆过程废弃物的排放。

1 除漆对象描述

飞机在使用一定期限后需要探伤或大修,去除表面的旧漆膜是表面维修的首道工序。飞机的机体结构通常由蒙皮和骨架等组成,蒙皮用来构成机翼、尾翼和机身的外形。以无人侦察机 DR-5 为除漆对象,DR-5 是后掠中单翼正常布局飞机,以铝合金作为主要的机体结构材料,机长 8.972 m,机高 2.185 m,机身表面主要由曲率不等的曲面及平面组成,其机身外形如图 1 所示。



图 1 DR-5 无人侦察机机身模型
Fig. 1 Dr-5 UAV fuselage model

2 激光除漆机器人设计

2.1 激光除漆机器人机械本体组成

激光除漆机器人本体由基于麦克纳姆轮的全向移动平台和四自由度机械臂组成,整体结构如图 2 所示。全向移动平台保证了机器人激光除漆系统对机身区域的全覆盖,四自由度机械臂(3P1R)则提供了激光清洗头除漆过程位姿调整所需的自由度。

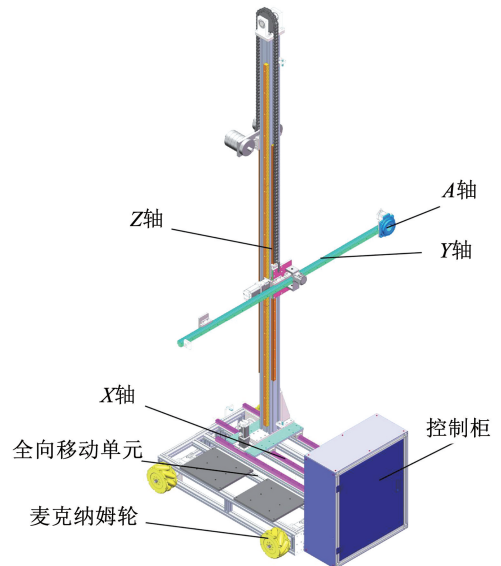


图 2 激光除漆机器人

Fig. 2 Laser paint removal robot

2.2 激光除漆机器人控制系统

激光除漆机器人控制系统硬件架构如图 3 所示。全向移动平台采用 4 个汇川伺服电机控制麦克纳姆轮的转动,四轴机械臂的 X 轴和 Z 轴采用汇川伺服电机控制,Y 轴和 A 轴则采用东方马达带绝对定位的闭环步进电机控制,两个 OMRON ZX1-LD100A61 激光位移传感器用于测量激光清洗头与机身表面的距离。

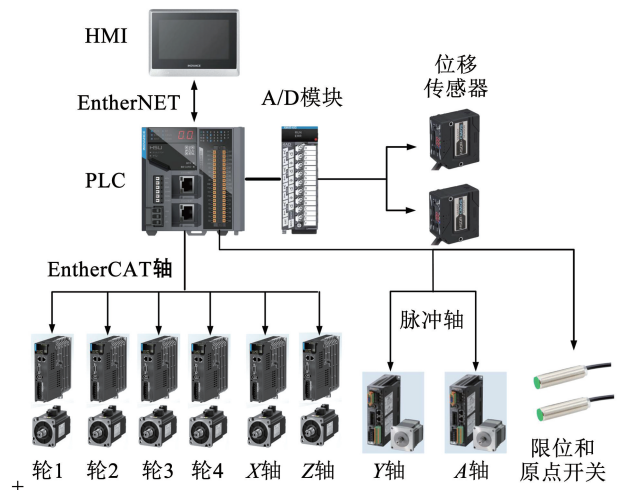


图 3 控制系统硬件架构

Fig. 3 Control system hardware architecture

激光除漆机器人控制系统软件架构如图 4 所示。

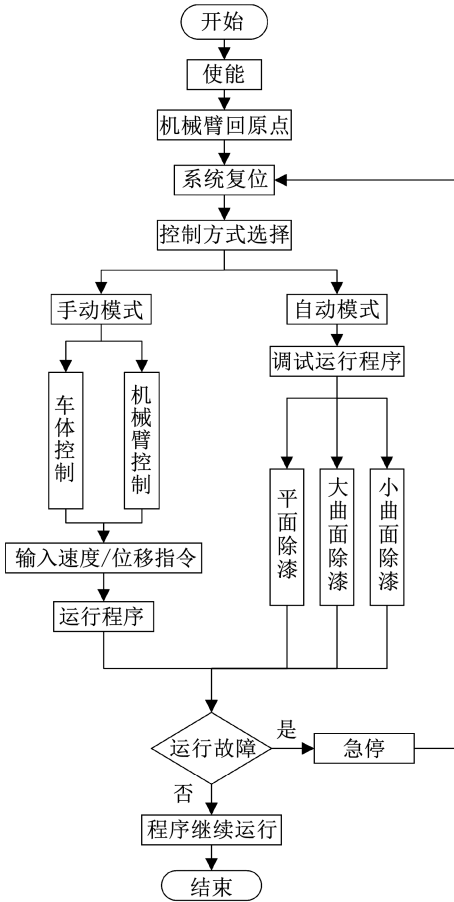


图 4 控制系统软件架构

Fig. 4 Control system software architecture

2.3 机器人运动学分析

2.3.1 机器人 D-H 模型建立

采用改进 D-H 法建立四轴机械臂的抽象连杆坐标系^[13],如图 5 所示。

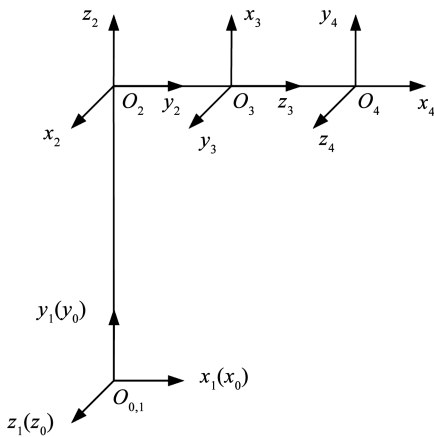


图 5 机器人连杆坐标系

Fig. 5 Robot link coordinate system

参照图 5 机械臂连杆坐标系,根据 MDH 法中连杆参数的定义,可得 DH 参数见表 1。其中, θ_i 为关节角, d_i 为连杆偏距, a_{i-1} 为连杆长度, α_{i-1} 为连杆扭转角^[14]。

表 1 激光除漆机器人 D-H 参数

Tab. 1 Laser paint removal robot D-H parameters

关节 i	$\theta_i/(\circ)$	d_i	a_{i-1}	$\alpha_{i-1}/(\circ)$	变量范围/mm
1	0	d_1	0	0	0 ~ 1 500
2	-90	d_2	0	-90	0 ~ 3 000
3	-90	d_3	0	-90	0 ~ 1 000
关节 i	$\theta_i/(\circ)$	d_i	a_{i-1}	$\alpha_{i-1}/(\circ)$	变量范围/ (\circ)
4	θ_4	0	0	-90	-180 ~ 180

2.3.2 建立正运动学方程

${}^{i-1}_i\mathbf{T}$ 来表示坐标系 $\{i\}$ 相对于坐标系 $\{i-1\}$ 的变换,其一般表达式为

$${}^{i-1}_i\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将表 1 中的参数代入式(1),可得相邻两关节坐标系之间的变换矩阵为:

$${}^0_1\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^1_2\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^2_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^3_4\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -s\theta_4 & -c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

设坐标系 $\{0\}$ 相对于基坐标系 $\{B\}$ 的变换矩阵为

$${}^B_0\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

机器人末端相对于基坐标系的齐次变换矩阵为

$${}^B_4\mathbf{T} = {}^B_0\mathbf{T} \cdot {}^0_1\mathbf{T} \cdot {}^1_2\mathbf{T} \cdot {}^2_3\mathbf{T} \cdot {}^3_4\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & d_1 \\ -s\theta_4 & -c\theta_4 & 0 & d_3 \\ c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.3.3 建立逆运动学方程

机器人逆运动学方程求解分为数值解法和解析解法, 本文采用解析解法。对笛卡尔坐标系上的点, 其对应的变化矩阵为

$${}^B_4T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_x & p_y \\ n_z & o_z & a_x & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于式(7)、(8)矩阵相等, 对应元素相同, 列出方程组:

$$\begin{cases} p_x = d_1 \\ p_y = d_3 \\ p_z = d_2 \\ n_z = c\theta_4 \\ o_z = -s\theta_4 \end{cases} \quad (9)$$

对方程组的解修正得机械臂的 4 个关节变量如下:

$$\begin{cases} d_1 = p_x \\ d_2 = p_z \\ d_3 = p_y \\ \theta_4 = \arcsin(-o_z) \\ \theta_4 = \arccos(n_z) \end{cases} \quad (10)$$

即可求得机器人各关节变量的值。因 $\theta_4 \in (-\pi, \pi)$, 根据 θ_4 的两个表达式, 可确定其唯一解。

根据分析除漆机器人的结构特点, 建立了相应的运动学方程, 为后续机器人激光除漆的轨迹规划和运动控制提供了理论基础。

2.3.4 工作空间分析

机器人工作空间代表了机器人的活动范围, 是衡量机器人工作能力的一个重要评价指标^[15]。本文用蒙特卡罗法对各个关节在关节范围内进行随机取值, 借助 MATLAB 软件, 绘制出可达工作空间点云图如图 6 所示。

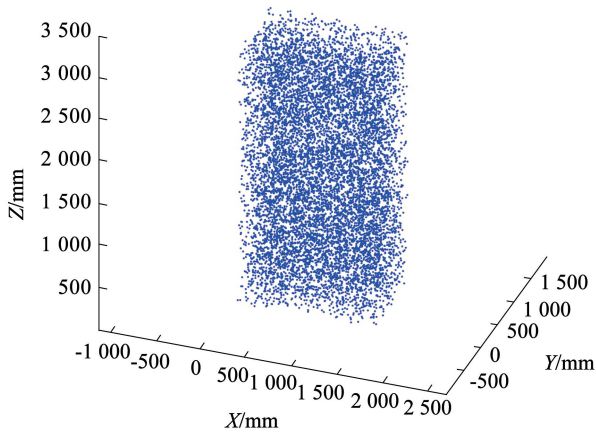


图 6 机器人工作空间点云图

Fig. 6 Point cloud image of robot workspace

从图 6 可知, 除漆机器人机械臂可达工作空间是由一个近似的长方体点云构成, 工作空间符合实际各关节的尺寸范围。

3 机器人重复性测试

机器人重复性测试现场如图 7 所示。

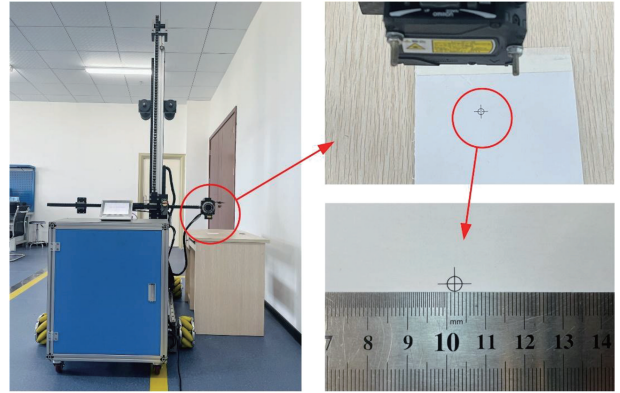


图 7 机器人重复性测试

Fig. 7 Robot repeatability test

3.1 Z 轴重复性测试

GB/T 12642—2013《工业机器人性能规范及试验方法》规定, 工业机器人的位置重复性计算公式^[16]为:

$$RP_l = \bar{l} + 3S_l \quad (11)$$

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \quad (12)$$

$$l_i = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2} \quad (13)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2}{n - 1}} \quad (14)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (15)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (16)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (17)$$

式中: x_i, y_i, z_i 分别为第 i 次实到位姿的坐标, $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 分别为同一位姿重复 n 次后各点集群中心的坐标。

机器人通过一系列线性运动引导末端执行器通过 5 个点 P_5, P_4, P_3, P_2, P_1 , 以 P_1 为起点, 按顺序移至 P_5, P_4, P_3, P_2, P_1 , 并记录点激光位移传感器的数值, 重复 30 次, 测试循环如图 8 所示。将测出数据代入式(11)~(17), 得 Z 轴 5 个点 P_1, P_2, P_3, P_4 及 P_5 的位置重复精度分别为 0.016、0.011、0.015、0.039 和 0.038 mm, 满足除漆要求。

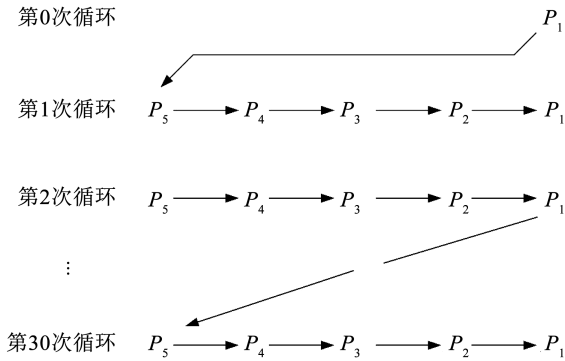


图 8 重复性测试循环图

Fig. 8 Cycle diagram for repeatability test

将所测每组数据求取其均值,并用原始数据减去均值做归一化处理,以便观察 5 组数据的波动范围,Z 轴重复度测量结果如图 9 所示。从图 9 可得,机器人 Z 轴重复性测量结果变化比较平稳,具有较好的稳定性,满足除漆的基本需求。

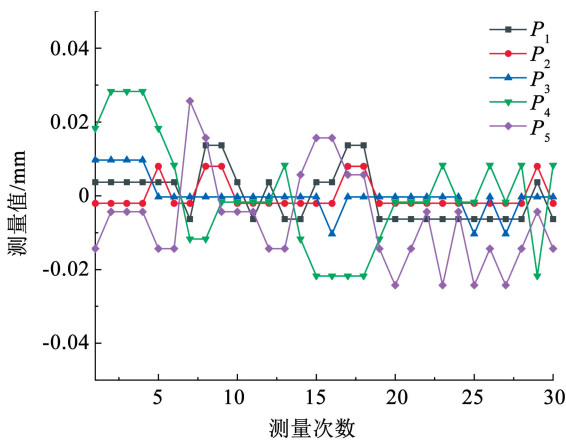


图 9 Z 轴重复度测量

Fig. 9 Z-axis repeatability measurement

3.2 X、Y 轴重复性测试

根据激光除漆机器人的设计要求,其 X、Y 轴的重重复度要求为小于 ± 2.000 mm,采用误差圆的方法对机器人 X、Y 轴重复性进行测试,即机器人工具中心点(TCP)运动一段空间轨迹,若 TCP 点每次都落在半径 2 mm 圆内,则满足 X、Y 轴重复度要求,如图 7 所示。

测试开始时机器人各轴返回工作原点,调整转台角度使激光垂直打到水平面,设定机器人 X 轴运动 200 mm,Y 轴为 100 mm,通过一系列线性运动引导末端执行器完成一条轨迹抵达 P 点,在 P 点激光照射处用 A4 纸画半径为 2 mm 的圆,将其固定,机器人返回原点后,重复这段轨迹运动到 P 点,并在 P 点停留 5 s,重复 5 次。结果表明激光照射点均在圆内,且几乎在圆心。

4 激光除漆实验

4.1 实验设备及评价方法

4.1.1 实验设备

激光清洗系统主要由全固态准连续激光器 (IS-0603QCW)、扫描振镜、冷却单元、除尘单元等组成,如图 10 所示。该激光器激光波长为 1 064 nm,最大激光功率为 600 W,其脉冲频率为 20 ~ 50 kHz,聚焦激光束产生约 0.8 mm 的光斑。检验设备使用德国尼克斯漆膜测厚仪对漆层厚度检测,其量程为 0 ~ 3 000 μm ,精度为 (3% 读数 + 2 μm);实验样品为无人侦察机模型,基材为铝合金,底漆为黄色环氧聚酰胺,面漆为灰色环氧聚酰胺,激光发射器安装在机器人末端上对飞机进行除漆。

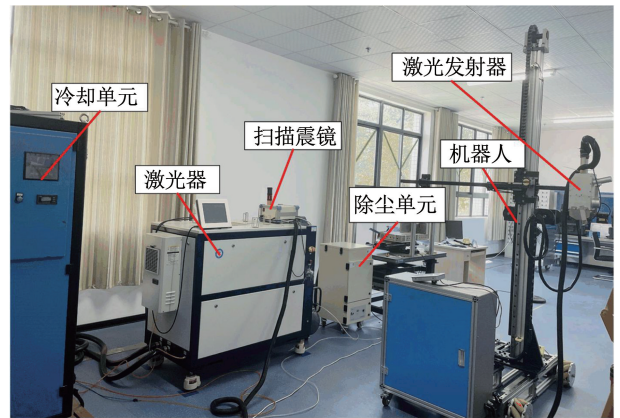


图 10 激光清洗系统

Fig. 10 Laser cleaning system

4.1.2 评价方法

目前国内激光清洗技术的评判标准尚未建立,一般是使用检测设备观察激光除漆后的试样表面形貌,根据除漆后试样的表面状况来评判除漆的效果。本文根据激光清洗飞机铝合金蒙皮表面漆层的特点,考虑到机身体积过大的情况,提出了清洗后检测机体表面清洗质量宏观到微观的评价方法,依此评判激光除漆的效果。

1) 表面宏观形貌。目视除漆后的机体表面形貌,机身底漆为黄色环氧聚酰胺,面漆为灰色环氧聚酰胺,基材表面为金属本色,因此可以直接用肉眼区分除漆质量,未除干净的表面为漆料的颜色,除干净的表面为金属本色。

2) 残余厚度检测。使用德国尼克斯漆膜测厚仪对激光除漆后的机身表面进行残余厚度检测。

4.2 实验路径规划与参数设置

本文采用机器人示教编程方法进行路径规划。首先,使用激光发射器的指示灯作为路径依据,确定激光发射器到飞机表面的最佳除漆距离(离焦量为 0)。

其次,根据机身表面的形状特征,对机身表面逐段插值的方法去完成路径的规划,使用人机交互界面操作机器人工具中心点运动到每个插值点,与此同时,利用末端执行器两端的激光位移传感器调整激光发射器的姿态;最后,在人机交互界面中记录每个插值点的机器人工具中心点的位置,将数据输送到机器人控制器中,完成机器人示教轨迹的复现。

飞机机身基本上是由平面及不规则曲面构成,因此本文选取了机身部分平面及曲面进行除漆验证。激光以“弓”字形轨迹对试样进行扫描除漆,激光器振镜系统控制激光光束沿 X 方向持续扫描,扫描宽度为 a ,安装激光清洗头的机械臂沿着 Z 方向运动,如图 11 所示。机器人末端沿着红色箭头移动,黑色箭头则是光束运动方向,激光器震镜运动与机器人末端运动形成了“之”字形清洗区域;机器人末端执行器工具点沿着红线走弓字形路径,与震镜运动形成了连续扫描区域,实现大面积除漆。

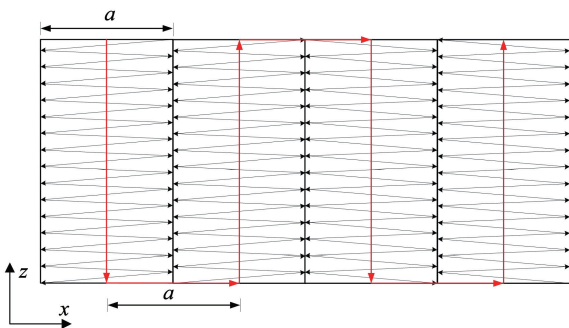


图 11 弓字形清洗路径示意图

Fig. 11 Schematic diagram of bow cleaning path

通过工艺实验确定激光功率、脉冲频率、及扫描速度等参数的值,见表 2。

表 2 激光工艺参数

Tab. 2 Laser process parameters

激光功率/W	脉冲频/kHz	扫描速度/(mm·s ⁻¹)	扫描次数/次
500	35	10	2

4.3 实验结果与分析

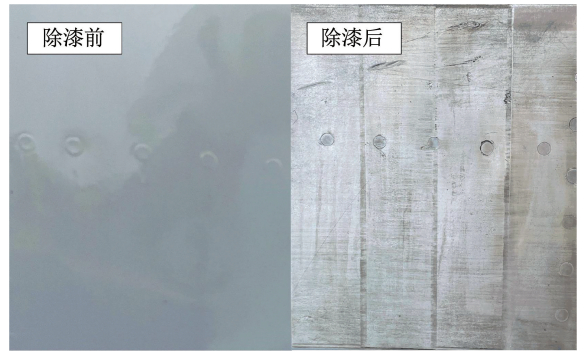
图 12 所示为机器人激光除漆现场图。

机器人完成清洗后,用除尘器或毛刷清理掉机身表面的粉末,图 13(a)、(b)分别为平面除漆及曲面除漆的前、后对比图。在清洗后表面每条路径均匀取 5 个区域,4 条路径共计 20 个区域,在每个区域中心附近用漆膜测厚仪检测 3 个位置的表面残余厚度,并取其平均值。图 14、15 分别展示了平面不同区域残余厚度均值和曲面不同区域残余厚度均值,表 3 给出了上述不同区域均值的具体值。

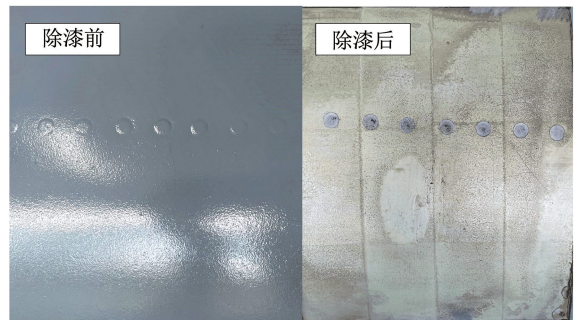


图 12 机器人激光除漆现场

Fig. 12 Test of robotic laser paint removal system



(a) 平面除漆



(b) 曲面除漆

图 13 除漆效果对比

Fig. 13 Comparison of effect of paint removal

从图 13 可以看出机身表面基本清洗干净,进一步通过表 3 对照残余厚度,平面区域各采样点的漆膜残余厚度均好于曲面区域,同时平面区域平均残余厚度为 $6.5 \mu\text{m}$,曲面区域平均残余厚度为 $21.3 \mu\text{m}$,平面清洗效果优于曲面清洗。存在残余漆层一是因机身铝合金表面氧化膜、漆层厚度不均及机身表面的一些凹坑及损伤;二是因为示教的除漆路径不能够完美的贴合机身表面的形状,在除漆过程中存在着离焦的现象。

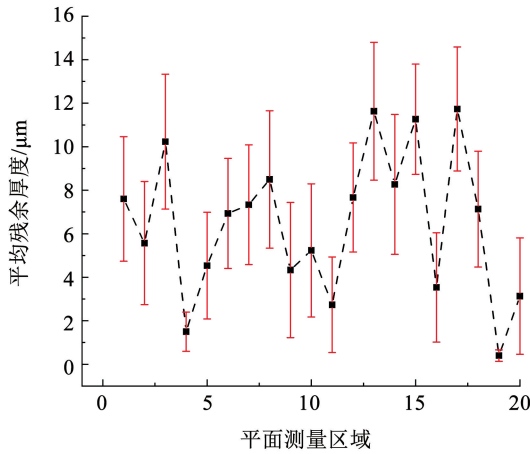


图 14 平面不同区域残余厚度均值

Fig. 14 Average residual thickness in different areas of the flat surface

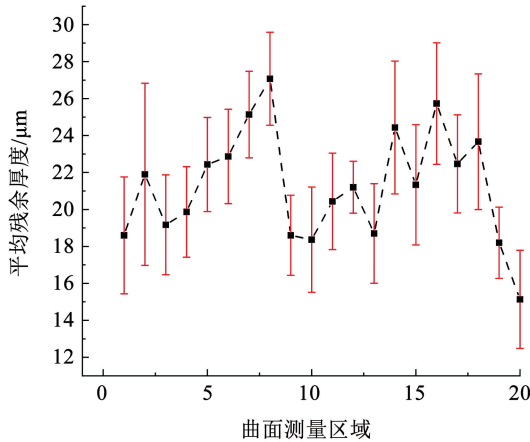


图 15 曲面不同区域残余厚度均值

Fig. 15 Average residual thickness in different areas of curved surface

表 3 除漆后表面残余厚度

Tab. 3 Surface residual thickness after paint removal

区域	平面残余厚度/ μm	曲面残余厚度/ μm
1	7.6	18.6
2	5.6	21.9
3	10.2	19.2
4	1.5	19.9
5	4.5	22.4
6	6.9	22.9
7	7.3	25.1
8	8.5	27.1
9	4.3	18.6
10	5.2	18.4
11	2.7	20.4
12	7.7	21.2
13	11.6	18.7
14	8.3	24.4
15	11.3	21.3
16	3.5	25.7
17	11.7	22.5
18	7.1	23.7
19	0.4	18.2
20	3.1	15.1
均值	6.5	21.3
标准差	3.3	3.0

5 结 论

1) 针对飞机维修过程表面除漆自动化的需求,结合某无人侦察机的机身特点,开发了一套机器人激光除漆系统。采用改进 D-H 法对除漆机械臂进行了运动学分析,利用 MATLAB 绘制了机械臂工具中心点的工作空间,并对机器人 Z 向运动进行了重复性测试,其最大值为 0.039 mm。

2) 以无人侦察机 DR-5 为验证对象,针对机身平面区域和曲面区域进行了机器人激光除漆实验。平面区域漆膜平均残余厚度为 6.5 μm ,曲面区域漆膜平均残余厚度为 21.3 μm 。结果表明,机身表面基本清洗干净。

参考文献

- [1] 蒋一岚, 叶亚云, 周国瑞, 等. 飞机蒙皮的激光除漆技术研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 29
JIANG Yilan, YE Yayun, ZHOU Guorui, et al. Research on laser paint removing of aircraft surface [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 29. DOI: 10.3788/IRLA201847.1206003
- [2] 李林, 祖道琪. 舰船铝质件除漆保养工艺研究[J]. 中国修船, 2015, 28(5): 13
LI Lin, ZU Daoqi. Study on technique of paint removal maintenance for some marine aluminum parts [J]. China Shiprepair, 2015, 28(5): 13. DOI:13352/j.issn.1001-8328.2015.05.004
- [3] 宋峰, 刘淑静, 牛孔贞, 等. 激光清洗原理与应用研究[J]. 清洗世界, 2005, 21(1): 1
SONG Feng, LIU Shujing, NIU Kongzhen, et al. Principle and application research on laser cleaning [J]. Cleaning World, 2005, 21(1): 1. DOI:10.3969/j.issn.1671-8909.2005.01.001
- [4] 雷正龙, 田泽, 陈彦宾. 工业领域的激光清洗技术[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 60
LEI Zhenglong, TIAN Ze, CHEN Yanbin. Laser cleaning technology in industrial fields [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 60. DOI:10.3788/lop55.030005
- [5] 宣善勇. 飞机复合材料部件表面激光除漆技术研究进展[J]. 航空维修与工程, 2016(8): 15
XUAN Shanyong. Research progress of laser paint removal technology for aircraft composite parts [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2016(8): 15. DOI:10.19302/j.cnki.1672-0989.2016.08.004
- [6] 刘鹏飞, 王思捷, 殷风仕, 等. 2024 铝合金表面激光除漆工艺及机理[J]. 材料导报, 2020, 34(24): 24121
LIU Pengfei, WANG Sijie, YIN Fengshi, et al. Process and mechanism of laser removal of paint on 2024 aluminum alloy [J]. Materials Review, 2020, 34(24): 24121. DOI: 10.11896/cldb.19120234
- [7] 秦哲, 高谦, 王斌, 等. 飞机蒙皮纳秒脉冲激光除漆工艺与机理研究[J]. 表面技术, 2022, 51(7): 370
QIN Zhe, GAO Qian, WANG Bin, et al. Technology and mechanism of nanosecond pulse laser paint removal of aircraft skin

- [J]. *Surface Technology*, 2022, 51(7): 370. DOI:10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.07.037
- [8] 雷正龙, 孙浩然, 田泽, 等. 不同时间尺度的激光对铝合金表面油漆层清洗质量的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 65
LEI Zhenglong, SUN Haoran, TIAN Ze, et al. Effect of laser at different time scales on cleaning quality of paint on Al alloy surfaces [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 65. DOI:10.3788/CJL202148.0602103
- [9] 万壮, 杨学锋, 夏国峰, 等. 激光频率对激光干式清洗机理及表面性能的影响[J]. *表面技术*, 2021, 50(5): 70
WAN Zhuang, YANG Xuefeng, XIA Guofeng, et al. Effect of laser frequency on the mechanism and performance of laser dry cleaning [J]. *Surface Technology*, 2021, 50(5): 70. DOI:10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.05.006
- [10] 杨文锋, 付婵媛, 钱自然, 等. 离焦量对铝合金表面激光除漆损伤特性的影响[J]. *激光与红外*, 2022, 52(6): 849
YANG Wenfeng, FU Chanyuan, QIAN Ziran, et al. Effect of defocus on damage characteristics of laser paint removal on aluminum alloy surface [J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(6): 849. DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2022.06.009
- [11] 杨文锋, 李佐, 刘畅, 等. 飞机铝合金蒙皮激光除漆及其热影响研究[J]. *激光与红外*, 2020, 50(7): 795
YANG Wenfeng, LI Zuo, LIU Chang, et al. Laser paint stripping and thermal effect research on aircraft aluminum alloy skin [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(7): 795. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2020.07.004
- [12] 王晓东, 余锦, 貂泽强, 等. 激光脱漆技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 59
WANG Xiaodong, YU Jin, MO Zeqiang, et al. Research progress on laser paint stripping technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 59. DOI: 10.3788/LOP57.050005
- [13] 陈绵鹏, 赵洪华, 温尔文, 等. 六自由度串联工业机器人运动学标定与实验研究[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2019, 33(3): 229
CHEN Mianpeng, ZHAO Honghua, WEN Erwen, et al. Kinematic calibration and experimental research of six degrees of freedom industrial robot [J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2019, 33(3): 229. DOI:10.13349/j.cnki.jdxbn.2019.03.006
- [14] CRAIG J. *Introduction to robotics* [M]. 4th ed. Beijing: Mechanical Industry Press, 2018
- [15] 何价来, 罗金良, 宦朋松, 等. 基于蒙特卡洛法的七自由度拟人机械臂工作空间分析[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2015(3): 48
HE Jialai, LUO Jinliang, HUAN Pengsong, et al. Workspace analysis of 7-DOF humanoid robotic arm based on Monte Carlo method [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2015(3): 48. DOI:10.13462/j.cnki.mmtamt.2015.03.013
- [16] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 工业机器人性能规范及其试验方法: GB/T 12642—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. *Industrial robots—Performance criteria and related test methods*; GB/T 12642—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014

(编辑 张红)