doi: 10.7690/bgzdh.2026.10.019

火箭贮箱零件机器人自动制孔技术

高永卓[1]，丁　一[1]，董吉义[2]，程德新[1]，董　为[1]，吴冬梅[1]
（1. 哈尔滨工业大学机器人系统与技术国家重点实验室，哈尔滨 150080；
2. 上海航天设备制造总厂有限公司五分厂，上海 200245）

摘要：针对目前火箭燃料贮箱零件制孔大多采用人工手动钻制导致的效率和精度较低等问题，提出一种火箭贮箱短壳零件的机器人自动制孔技术。以火箭燃料贮箱短壳为对象，设计柔性工装、标定方法、系统控制策略和制孔工艺，形成完整的机器人自动制孔系统。该系统可适应 2 900～3 800 mm 公称直径的多种型号零部件装夹，通过基于点云扫描和手眼标定方法进行孔位标定，并完成贮箱短壳零件的机器人自动制孔实验。实验结果表明：制孔工艺可实现制孔速率 6 个/min，孔位平均偏差 0.20 mm，最大误差 0.5 mm，符合实际生产要求，取得较好的应用效果。

关键词：火箭贮箱；自动制孔；机器人加工；手眼标定
中图分类号：TJ711^{+}.9；TP242　　**文献标志码：**A

Robotic Drilling Technology for Rocket Fuel Tank Components

Gao Yongzhuo[1], Ding Yi[1], Dong Jiyi[2], Cheng Dexin[1], Dong Wei[1], Wu Dongmei[1]
(1. *State Key Laboratory of Robotics and System*, *Harbin Institute of Technology*, *Harbin* 150080, *China*;
2. *No*. 5 *Branch*, *Shanghai Aerospace Equipment Manufacturing Co*., *Ltd*., *Shanghai* 200245, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and accuracy caused by manual drilling of rocket fuel storage tank parts, a robot automatic drilling technology for short shell parts of rocket storage tanks is proposed. Design flexible fixtures, calibration methods, system control strategies, and drilling processes for the short shell of rocket fuel storage tanks to form a complete robot automatic drilling system. This system can adapt to clamping various types of components with a nominal diameter of 2 900~3 800 mm. Through point cloud scanning and hand eye calibration methods, hole position calibration is carried out, and robot automatic hole making experiments for short shell parts in storage tanks are completed. The experimental results show that the drilling process can achieve a drilling rate of 6 per minute, an average deviation of 0.20 mm in hole positions, and a maximum error of 0.5 mm, which meets the actual production requirements and achieves good application results.

Keywords: rocket fuel tank; automatic robotic drilling; robot processing; hand-eye calibration

0　引言

作为进入宇宙空间的运送器，运载火箭的实力与可靠性指标是完成国家航天规划任务的前提保障[1]。我国火箭发射任务需求呈现大幅增长的态势，但由于航空航天领域，运载火箭贮箱零部件装配工序长期处于手工作坊的生产模式，效率低下导致运载火箭的制造能力严重制约了航天器的发射需求；因此，在航天产品大批量、多品种及柔性化制造背景下，提高关键部件的产品质量和生产效率迫在眉睫。工业机器人具有易部署、生产柔性高、价格低廉的优势，越来越多地被应用于航天工业领域[2]，尤其在传统装配工艺的铆接制孔环节，一个零件上的铆接孔数量多达 400～500 个。机器人制孔自动化对于提升产品质量、优化生产模式具有重要意义。

国外航空行业起步较早发展较快，在自动制孔系统的设计和开发上已获得初步成果。美国在 20 世纪 50 年代就已经开始研发自动钻铆机并将其应用在航空装备制造行业上。美国公司 ELectroimpace 研制了一种 SA2 型自动钻铆机，该型自动钻铆机专门针对 A320 机翼壁板的制孔铆接加工[3]。美国 EI 开发了单侧细胞末端执行器（one sided cell end effector，ONCE）机器人自动钻削系统[4]，该系统的钻孔位置精度能达到±0.25 mm。与国外相对成熟的机器人自动制孔系统相比，我国在自动制孔技术上起步较晚。目前自动制孔系统的研制与应用主要集中于国内多家大型航空制造企业与高校[5]。北京航空制造工程研究所和沈阳飞机工业集团联合开发的五坐标数控自动制孔设备可用于飞机翼面类零件的柔性装配自动制孔[6]。北京航空航天大学自主研制了由主轴、进给、压紧、连接、传感、控制、视觉等单元组成的自动制孔机器人系统[7]。国内对机器人自动制孔技术的研究仍处于探索阶段，其适用性较差，制孔精度要求不高，很难达到应用场景。

收稿日期：2025-02-10；**修回日期：**2025-03-21
第一作者：高永卓（1989—），男，黑龙江人，博士。

为解决以上问题，笔者提出一种火箭贮箱短壳零件的机器人自动制孔技术。

1 柔性工装

运载火箭短壳组件包括壳段与端框，壳段与端框装配后通过铆钉进行连接。铆钉共 3 排，短壳组件结构如图 1 所示。

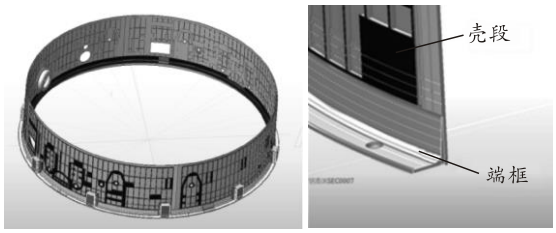

图 1 短壳结构

研究中，需对 2 900、3 350、3 800 mm 3 种直径的短壳零件完成制孔工艺，因此设计了短壳柔性工装。此套工装由多个垫板、安装板、安装环组件和夹持单元组成。转台上环形等间距安装多个垫板，相邻 2 个垫板之间安装一个安装板，安装环组件安装在安装板上，多组夹持单元均布在安装环组件上并将短壳的下部夹紧。由于筒段自身重量大，而且筒段上所需要钻孔尺寸较小，钻孔的速度快、时间短，因此采用该设计的筒段柔性工装能够保证筒段的安全夹持和钻孔。

在实际使用时，短壳柔性工装具有定位功能、夹紧功能及回转功能，其整体结构如图 2 所示。定位功能由布置在回转工作台上的 3 套楔形定位块实现，楔形定位块具有定心及支撑工件的作用，可以起到良好的定位功能。夹紧功能由定位块上的夹持单元完成，其中夹紧钳随工作台一起旋转。回转功能由柔性工装下面的转台实现，转台采用内齿传动，半流体油脂润滑。机器人和转台的相互配合，能对工件一周(360°)表面上钻孔，压板限制工件的 Z 向活动，定位销限制工件 XY 平面内的移动。不同的工件有不同位置的定位销和压板与其对应。

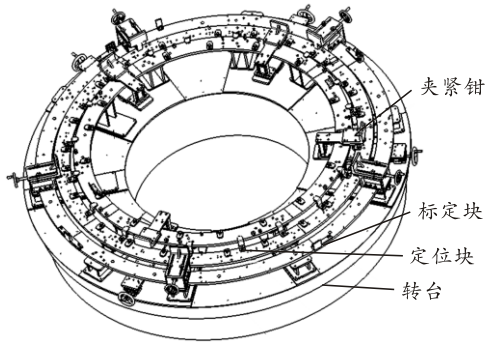

图 2 柔性工装结构

2 标定方法

在零件实际生产过程中，通过转台的定向旋转完成钻孔。传统的手动钻孔，需要人工自动定位，又因为零件上需要打孔的位置较多，效率和定位精度很难保证。机器人辅助自动打孔，很好地改善了钻孔效率问题，但是定位精度无法保证。其主要归咎于转台间隙较大，人工装配零件微变形等原因。针对这些误差来源，采用转台定向旋转，激光标定的方法。笔者主要以 2 900 规格短壳为 例，讲述其标定方法，该标定方法适用于所有零件加工。

2.1 零件布置方案

零件拼接、人工装配及零件微变形，直接影响钻孔精度，为了降低这几个方面的影响，制定了零件精准定位方案，如图 3 所示。

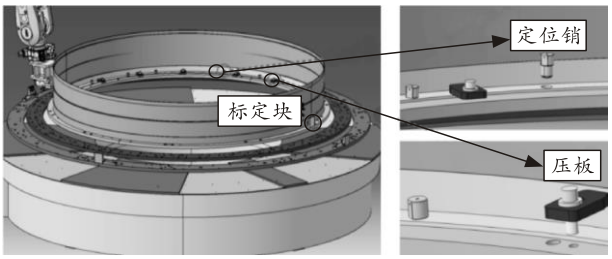

图 3 定位布置方案

由于转台上分别利用激光刻画了 4 个象限，在放置零件时，可以初步确定零件放置的位置；其次，在零件边缘处都会留有定位销，实现零件精准定位；最后，为了防止在打孔过程中，零件发生窜动，利用压板将零件固牢。

因为零件表面是一个曲面，又因为钻孔发生在零件表面，所以一定要保证钻孔时，电主轴轴线与零件表面切平面的法线平行。由于钻孔时，需要确定零件的基准，实现自动化，所以将零件基准定在象限与零件交点位置。一般而言，象限位置也是需要确定的，所以在象限位置放置一个标定块，用来确定标定块的实际坐标系和零件基准。接下来就是标定方法的研究。

2.2 标定算法

为了获得标定块的实际坐标系，以及零件的基准，需要将机器人基坐标系$\{W_b\}$、标定块坐标系$\{W_m\}$、电主轴坐标系$\{W_z\}$、零件基准坐标系$\{W_a\}$、激光传感器坐标系$\{W_s\}$、法兰盘中心坐标系$\{W_e\}$确定下来，如图 4 所示，图中标定块坐标系是理论坐标系。笔者利用 2 维的激光传感器，显示 3 维的标定块平面，其方法在算法 1 中实现。所获取的点云

数据是基于激光传感器扫描标定块获得的，该 3 维数据表征标定块表面位置信息。

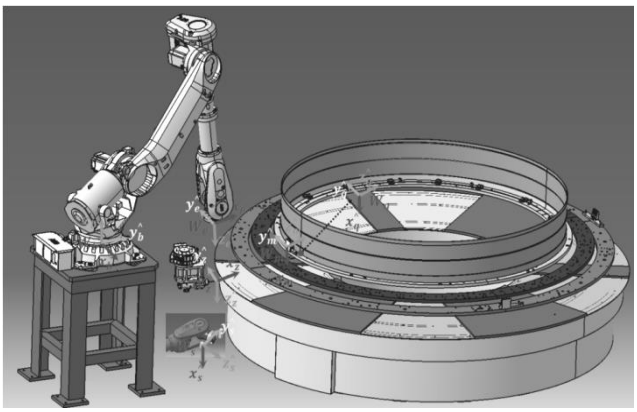

图 4　坐标系分布

2.2.1　算法 1：平面转空间方法

数据：标定块 2 维数据(x_i, z_i)；

结果：点云数据(x_k, y_k, z_k)。

1) 初始化。

2) 第一步：

① 获取 2 维数据长度 f，定义点云大小；

② 获取机器人运行速度 V，激光获取轮廓时间 t 和标定块高度 h。

3) 第二步：

① 计算 $y_i=V*t*n$；$n\in[0,\ h/(V*t)]$，n 代表第 n 个轮廓；

② 滤波，去掉杂点，存入点云数据(x_k, y_k, z_k)。

因为所获取的点云是由一些离散点表示，这些离散点没有一定规律，所以无法直接进行平面法线计算，因此需要将所有的离散点进行平面拟合，才可以计算出标定块的法线及标定块实际坐标系。点云分布如图 5 所示。

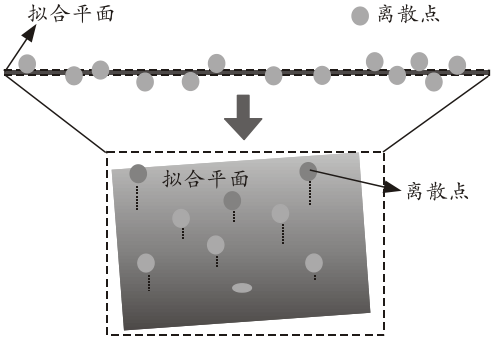

图 5　点云分布

利用最小二乘法进行平面拟合，获取拟合平面的平面方程和平面方程法向量。

定义平面的一般方程：

$$Z=a\bullet X+b\bullet Y+c。\tag{1}$$

对于存在 N 个离散点($N>3$)拟合平面，式(2)中 P 存在极小值。

$$P=\sum_{k=1}^{N}(a\bullet x_k+b\bullet y_k+c-z_k)^2。\tag{2}$$

为了获得拟合平面方程系数，分别对系数求偏导，并使偏导为 0：

$$\left.\begin{aligned}2\sum_{k=1}^{N}(a\bullet x_k+b\bullet y_k+c-z_k)\bullet x_k=0\\2\sum_{k=1}^{N}(a\bullet x_k+b\bullet y_k+c-z_k)\bullet y_k=0\\2\sum_{k=1}^{N}(a\bullet x_k+b\bullet y_k+c-z_k)=0\end{aligned}\right\}。\tag{3}$$

为了求解相应系数，将式(3)转换成矩阵形式：

$$\begin{bmatrix}\sum_{k=1}^{N}x_k^2 & \sum_{k=1}^{N}x_k^2 & \sum_{k=1}^{N}x_k\\ \sum_{k=1}^{N}x_k\bullet y_k & \sum_{k=1}^{N}y_k^2 & \sum_{k=1}^{N}y_k\\ \sum_{k=1}^{N}x_k & \sum_{k=1}^{N}y_k & N\end{bmatrix}\bullet X=\begin{bmatrix}\sum_{k=1}^{N}x_k\bullet z_k\\ \sum_{k=1}^{N}y_k\bullet z_k\\ \sum_{k=1}^{N}z_k\end{bmatrix}。\tag{4}$$

将式(4)直接简化为 $\boldsymbol{A}X=B$，$X=[a,\ b,\ c]^{\mathrm{T}}$。根据离散点的位置，结合矩阵 $\boldsymbol{A}$ 求得平面方程系数和平面法向量 $\boldsymbol{n}_p=(a, b, -1)$，即标定块的法线。

图 6 中建立理论的标定块坐标系，并计算获得实际坐标系：

$$\left.\begin{aligned}x^{\wedge'}=z^{\wedge}\times n_p\\ y^{\wedge'}=n_p\times x^{\wedge'}\end{aligned}\right\}。\tag{5}$$

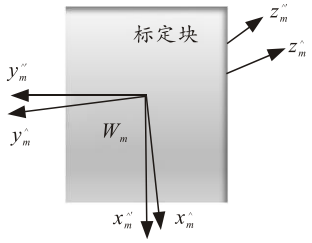

图 6　标定块理论坐标系

定义理论 z 轴分量 $z^{\wedge}=[0,0,1]^{\mathrm{T}}$，所以其他轴的分量可以通过叉乘计算获得。

根据坐标变换获得零件基准，即钻孔原点相对于机器人基座的坐标，其方法在算法 2 中实现。

2.2.2　算法 2：坐标变换

数据：${}_q^m\boldsymbol{T}$，${}_s^b\boldsymbol{T}$，${}_q^z\boldsymbol{T}$，${}_q^b\boldsymbol{T}$，(x_k, y_k, z_k)；

结果：${}_z^b\boldsymbol{T}$。

1) 初始化 $\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(x_k, y_k, z_k)$。

2) 第一步：

① 获取标定块中心相对于传感器位置$(x_c,\ y_c,$

$z_c)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(x_k,y_k,z_k)$；

② 获取标定块旋转矩阵$[\hat{x},\hat{y},\hat{z}]$，获得${}_m^s\boldsymbol{T}$。

3) 第二步：

① 获得激光传感器相对于机器人基坐标位姿矩阵${}_q^b\boldsymbol{T}={}_s^b\boldsymbol{T}*{}_m^s\boldsymbol{T}*{}_q^m\boldsymbol{T}$；

② 获得电主轴相对于机器人基坐标位姿矩阵${}_z^b\boldsymbol{T}={}_q^b\boldsymbol{T}*{}_q^z\boldsymbol{T}$。

3 系统控制策略

该机器人自动制孔系统涉及了短壳类零件钻孔从线激光扫描仪在线检测，到工控机计算生成轨迹，最后抓取电主轴工具进行作业的完整工序需求。通过机器人与专用末端执行器和视觉检测设备的集合，工控机与 PLC 控制器和机器人控制系统进行通信，系统内各模块与 PLC 控制系统关联，实现短壳类零件钻削制孔的机械化、自动化、智能化，提高了筒段短壳类零件的制孔质量及制孔效率，如图 7 所示。

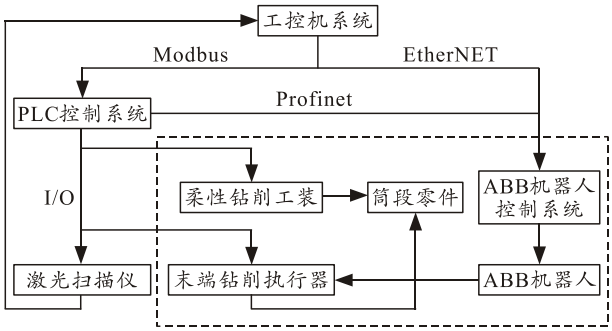

图 7 总体系统框架设计

如图 8 所示，整个系统采用分布式结构，有多个控制系统，组成部分包括：工控机系统、短壳柔性工装、电主轴及钻削刀具、机器人控制系统、PLC 控制系统、ABB 机器人、线激光扫描仪设备和转台。

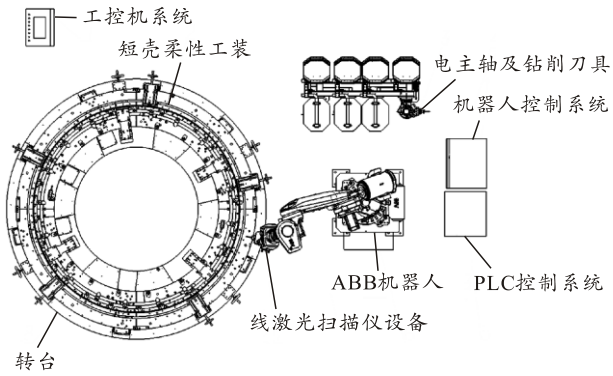

图 8 自动钻孔系统布局

工控机系统采用工业计算机，通过与下位机 PLC 控制系统采用 Modbus 通信协议来传输命令，并且使用 I/O 信号得到扫描仪的数据结果进行计算，最终生成机器人钻削加工轨迹并发送给 ABB 机器人。PLC 控制系统对在线检测设备(激光扫描仪)、末端钻削执行器(电主轴和钻削刀具)和柔性工装及转台进行实时控制。ABB 机器人在接受 PLC 指令后进行预设好的加工步骤，包括移动线激光扫描仪标定、抓放电主轴工具、执行进给钻削程序等。转台收到 PLC 指令后旋转工件到对应角度，从而弥补机器人工作空间的局限性。

4 工艺与系统实验

4.1 实验过程

在整个钻孔系统中，由于短壳工件尺寸较大，机器人工作空间无法达到所有待钻孔位置，因此需要转台对柔性工装方向进行调整。同时为了保证旋转后的位置精度，需要将 360°的短壳零件孔位分为 4 个象限处理，在每个象限都设有一个标定块，借助线激光扫描仪来进行精度标定。故系统的完整工作流程为：

1) 工控机读取接收到的钻孔位置坐标文件，选择对应程序号，开启钻孔作业；

2) 工控机发送指令给 PLC，PLC 根据钻孔位置所在象限控制转台旋转指定角度；

3) 旋转结束后，PLC 开启线激光扫描程序，ABB 机器人移动到指定位置以预设轨迹扫描标定块；

4) 工控机收到扫描结果进行计算，生成机器人加工轨迹并发送机器人控制系统，同时发送抓取指令给 PLC；

5) PLC 发送抓取指令给机器人，ABB 机器人抓取电主轴工具，设置转速后开启电主轴进行预热达到最大转速；

6) ABB 机器人根据接收到的加工轨迹，开始连续进给钻削作业，并保持与 PLC 通信；

7) 钻削完成后，PLC 发送指令给机器人，ABB 机器人回到中间点，单个孔位加工过程结束；

8) 转台复位，PLC 等待下一个孔位信息，并重复以上流程，直到所有孔位加工完成，机器人放下工具，钻孔结束。

机器人自动钻孔系统工作流程如图 9 所示。

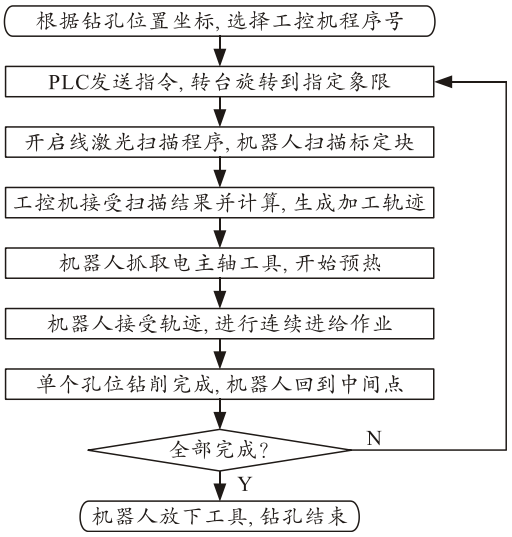

图 9　机器人自动钻孔系统工作流程

4.2　结果及分析

在实验验证中，电主轴工具搭载了 2.6 mm 钻头，为确保进给量稳定，采用分层进给的工艺方式，如表 1 所示。

表 1　主要工艺参数

分层进给次数	每次进给量/mm	每次退刀量/mm	进给速度/(mm/s)
4	3	1	8
退刀速度/(mm/s)	**调整速度/(mm/s)**	**主轴转速/(r/min)**	
60	150	4 000	

其制孔结果如图 10 所示。

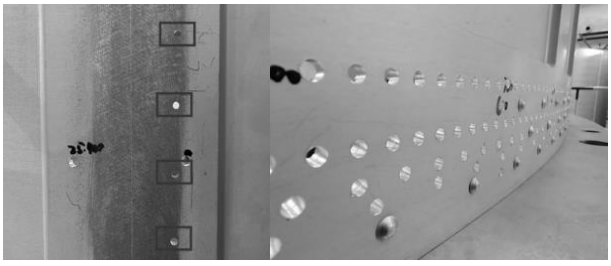

图 10　制孔效果

待加工件厚度为 10 mm，该工艺参数能够保证钻孔深度满足要求。机器人在打磨过程中始终正常保持恒定力状态，进给量稳定；且正常钻孔时飞屑均匀，机器人未发生碰撞或晃动的情况，安全性能够得到保证。

对制孔的定位精度进行验证，采用游标卡尺测量其定位距离，精度为 0.02 mm。对加工后的多个孔位位置进行实际测量，其结果如表 2 所示。

表 2　孔位定位精度数据

序号	*X* 方向距离	*Y* 方向距离	序号	*X* 方向距离	*Y* 方向距离
1	20.4	30.2	13	20.2	30.2
2	20.6	30.0	14	20.0	30.2
3	20.4	30.2	15	20.2	29.8
4	19.6	30.4	16	20.0	30.0
5	20.2	30.2	17	19.6	30.0
6	20.4	29.6	18	19.6	30.0
7	19.8	29.8	19	20.0	30.2
8	20.0	30.0	20	20.4	30.2
9	20.2	30.2	21	20.2	30.0
10	20.2	30.4	22	20.0	30.0
11	20.4	30.0	23	20.2	30.2
12	19.8	30.0	24	20.2	29.8

预设 *x* 方向的距离为 20 mm、*y* 方向的距离为 30 mm，可以看出：2.6 mm 尺寸钻头制孔的定位精度在 0.4 mm 内。

5　结束语

笔者针对火箭贮箱零件铆接制孔环节效率和精度较低的问题，完成了工业机器人自动打孔装备整体布局设计、柔性工装设计、标定方法等技术，通过工艺试验确定了最优工艺参数，并在短壳样件上进行了验证。验证结果表明，该系统满足型号产品应用需求，具备工程应用的能力。

参考文献：

[1] 吴燕生. 中国运载火箭姿态控制技术发展与展望[J]. 宇航学报, 2023, 44(4): 509−518.

[2] 孙英飞, 罗爱华. 我国工业机器人发展研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(12): 2912−2918, 3031.

[3] DEVLIEG R, SITTON K, FEIKERT E, et al. ONCE (ONe-sided Cell End effector) Robotic Drilling System[C]//SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2002: 2002−01−2626.

[4] 付鹏强, 苗宇航, 王义文, 等. 航空领域机器人自动钻孔研究进展及关键技术综述[J]. 智能系统学报, 2022, 17(5): 874−885.

[5] 楼阿莉. 国内外自动钻铆技术的发展现状及应用[J]. 航空制造技术, 2005, 6: 50−52.

[6] 周万勇, 邹方, 薛贵军, 等. 飞机翼面类部件柔性装配五坐标自动制孔设备的研制[J]. 航空制造技术, 2010(2): 44−46.

[7] 李博林. 双机器人自动制孔系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.