

引用格式:张健,霍凤伟,付佳. 机器人制孔末端执行器的设计及静动力学分析[J]. 有色设备,2024,38(3):64-69.

ZHANG Jian, HUO Fengwei, FU Jia. Design and static & dynamic analysis of robotic drilling end effector[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(3): 64-69.

# 机器人制孔末端执行器的设计及静动力学分析

张健, 霍凤伟, 付佳

(营口理工学院 机械与动力工程学院, 辽宁 营口 115014)

[摘要] 提出了一种新型机器人制孔末端执行器的模块化结构设计方案,阐述了该末端执行器的主要模块结构设计、技术特点和技术参数。针对末端执行器整体和主要结构零件分别进行了有限元静力学及动力学分析计算,分析结果表明结构设计科学合理。同时,进一步揭示了高速制孔末端执行器与其匹配的机器人成本和制孔质量之间的关系,可以为其他类似机器人末端执行器设计提供参考。

[关键词] 机器人制孔; 末端执行器; 设计; 静力学分析; 动力学分析

[中图分类号] TG659 [文献标志码] A [文章编号] 1003-8884(2024)03-0064-06

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.03.010

## 0 引言

飞机装配是飞机制造中最为关键的环节,其成本约为产品总成本的40%,而其工作量为直接制造工作量的50%~70%。制孔作业是飞机装配的基础工艺,发达国家飞机零部件生产过程中机器人自动制孔已经得到了广泛的使用<sup>[1]</sup>,但这些发达国家对自动制孔末端执行器的核心技术严密封锁,再加上研发的成本非常高,我国在该领域的研究仍处于跟踪阶段。因此,密切结合国家飞机制造业发展重要需求,对工业机器人制孔末端执行器本体结构进行设计及分析研究,以期开发出具有自主知识产权的机器人制孔末端执行器,为提升我国航空铝合金等结构件柔性自动制孔技术与装备水平,促进飞机装备制造业发展具有重要意义。

近年来,国内针对工业机器人制孔末端执行器的设计开展了一些研究。2010年罗和平等<sup>[2]</sup>针对钛合金材料的钻孔研制了执行器,基本体结构采用

三点支撑,三个气缸推动执行器运动,并且与机器人为同轴型式的安装。2013年张杰等<sup>[3]</sup>针对复合材料和铝合金的制孔,提出了一种机器人制孔末端执行器的设计,并进行了制孔试验验证。2020年金洁等<sup>[4]</sup>提出了一种能够兼顾功能需求和优化目标的多功能自动钻铆末端执行器结构与评估方法,最后与其他设计方法对比分析和结构运动仿真验证该方法的有效性。2021年王帅等<sup>[5]</sup>对飞机部件装配制孔工作的需求,提出一种制孔末端执行器的设计方案,并对该执行器进行了软件仿真验证。

本文针对飞机铝合金等有色金属结构件的加工需求,提出了一种新的工业机器人制孔末端执行器的结构设计方案,阐述了制孔工作原理、各单元模块的结构设计和技术特点,并对整体结构和主要结构零件分别进行了有限元静力学及动力学仿真分析计算,验证了其合理性。

## 1 制孔执行器总体设计

### 1.1 整体结构布局及工作原理

#### 1.1.1 整体结构布局

根据飞机铝合金结构件的制孔需求,提出了一种新的末端执行器的结构布局设计方案。该设计方案采用模块化结构配置,主要由安装法兰单元、Z1主进给单元、Z2压紧进给单元、电主轴单元、鼻端压紧单元、机器人视觉单元以及能量输送

[收稿日期] 2024-02-26

[第一作者] 张健(1979—),男,辽宁海城人,副教授,硕士,主要研究方向为数控机床数字化设计与制造技术。

[基金项目] 国家大学生创新创业训练计划项目(202214435007);辽宁省科学技术计划项目(2022-YKLH-14);营口理工学院引进人才科研启动经费项目(YJRC202024)。

单元组成。制孔末端执行器结构设计方案布局如图 1 所示。

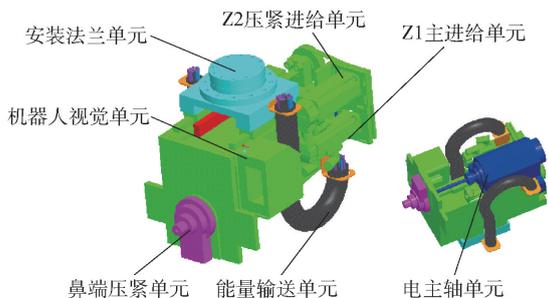


图 1 制孔末端执行器结构设计方案布局

Fig.1 Layout structure of the hole making end effector design scheme

双轴 Z1、Z2 直线进给布局,结构紧凑,确保整机高刚性、高精度和高动态特性。Z1 轴为主轴单元进给轴,实现主轴的加工进给与后退,通过直线光栅尺实现主进给的闭环控制。Z2 轴滑板上部与机器人法兰连接,下部与导轨滑块固定,导轨相对于滑板进行 Z2 轴直线运动,实现整体结构的进给,达到对工件压紧的作用,通过直线光栅尺实现压紧行程的闭环控制。主体支撑件等受力件均采用高强度铝合金,经过优化的热处理工艺及加工工艺,提高支撑件和整机的刚度和稳定性,有效抑制了切削力导致执行器乃至整个制孔系统的变形和振动。

### 1.1.2 制孔工作原理

末端执行器通过安装法兰单元与机器人固定连接。开始工作后,机器人搭载末端执行器向工件侧移动,当接近指定某一孔位后,机器人视觉单元检测待加工孔位误差,并将误差值传递给控制系统,控制系统经过计算并修正指令,然后控制机器人及搭载其上的末端执行器进行位姿调整,接下来压紧进给单元及鼻端压紧单元实现对工件的压紧,进而主进给单元及其上的电主轴单元进行制孔切削运动。当前孔位制孔加工完成后,电主轴单元停止运动,主进给单元根据指令反向运动,切削工具退出工件,并回到原始位置,机器人移动到下一个待加工孔位,继续执行下一个制孔加工循环。

## 1.2 主要单元技术特点

### 1.2.1 安装法兰单元

安装法兰单元主要由法兰盘结构件构成。其上部与机器人法兰正向连接,使工业机器人可达性好,运动更加灵活,方便规划机器人的加工轨迹,有利于

实现飞机较大曲率曲面的制孔。下部与压紧进给单元连接,压紧进给单元导轨采用大跨距设计,保证执行器整体高刚性。

### 1.2.2 主进给单元

主进给单元采用伺服电机+减速机构+滚珠丝杠驱动方案设计。其中,减速机构的采用,一方面增加伺服电机的传动扭矩,另一方面也使结构更加紧凑。滚珠丝杠两端支撑型式为一端固定、一端支持的设计。这种设计方案传动平稳、传动精度高,可以克服热变形的负面影响。

### 1.2.3 压紧进给单元

压紧进给单元传动结构设计方案与主进给单元设计方案类似。传动部分采用伺服电机+减速机构+滚珠丝杠的设计方案。滚珠丝杠两端支撑型式也是一端固定、一端支持的设计。

主进给和压紧进给的导轨副采用滚动直线导轨,动静摩擦力小,灵敏度高,高速振动小,低速无爬行,定位精度高,伺服驱动性能优,可以提高末端执行器的精度和精度稳定性。

### 1.2.4 电主轴单元

主轴组采用电主轴,具有高精度、高刚性、高效率。主轴采用 HSK 型刀柄,具有良好的高速性能,实现高转速制孔。刀柄与主轴采用锥面和端面过定位的结合方式,能有效提高结合刚度。

### 1.2.5 鼻端压紧单元

鼻端压紧单元采用独特的封闭空腔设计。风冷和除尘对流结构设计,采用上部为冷风通道结构、下部为真空负压除尘的设计方案。这种结构设计方案可保证在制孔时切屑及时回收,除尘效果好,同时保护周边环境。

## 1.3 主要技术参数

充分调研用户对制孔末端执行器的需求,以及结合对飞机铝合金的有色金属结构件的几何特性和制孔工艺特点的分析后,提出了一种工业机器人制孔末端执行器的主要技术参数,如表 1 所示。

## 2 制孔执行器静力学分析

对于制孔执行器这种复杂工程结构,一般采用有限元方法<sup>[6]</sup>进行静力学分析。通过对制孔执行器整体及主要结构零件静力学分析,得出其静力学特性。

有限元分析过程中主要包含 3 个主要的步骤:①创建有限元模型,②施加载荷,③求解和分析

结果。

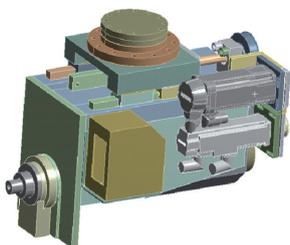
**表 1 机器人制孔末端执行器主要技术参数**  
**Table 1 Main technical parameters of robot hole making end effector**

项目名称	技术参数
主机重量/kg	<120
各轴行程	
Z1 轴行程(主轴进给行程)/mm	≥100
Z2 轴行程(整机压紧行程)/mm	≥20
主轴	
主轴功率/kW	5
主轴最高转速/(r·min <sup>-1</sup> )	10 000
压紧力/N	0~1 500

## 2.1 静力学分析准备

### 2.1.1 模型简化处理

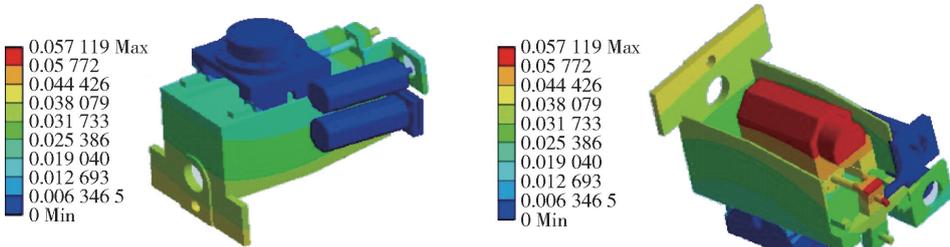
由于组成整个末端执行器的零件较多,为了便于对其进行整体分析,要对末端执行器进行必要的简化,由外部三维设计软件构建的模型导入有限元分析软件中,对模型实行检查、修改。简化后的模型具体如图 2 所示。



**图 2 简化后 3D 模型**  
**Fig. 2 Simplified 3D model**

### 2.1.2 网格划分

此网格划分采用四面体网格划分,网格的尺寸

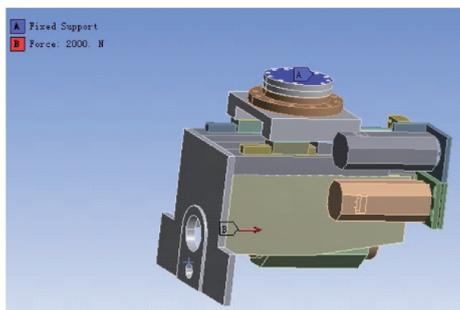


**图 4 整体静力学变形结果**  
**Fig. 4 Overall static deformation results**

设置为 10 mm,划分好后的网格共有节点 517 690,单元 323 820 个。

### 2.1.3 定义载荷及边界条件

制孔机器人末端执行器使用法兰与工业机器人固定连接。依据其设计参数要求,制孔机器人末端执行器的压紧机构所受的作用力大小是 1 500 N,基于设计安全裕量考虑,此处鼻端定义载荷为 2 000 N。定义约束后模型如图 3 所示。



**图 3 定义约束后模型**  
**Fig. 3 Model after defining constraints**

## 2.2 静力学分析结果

### 2.2.1 整体分析结果

定义载荷以及边界条件后,即可对模型求解,求解完成后提取位移变形结果。整体静力学变形如图 4 所示。从图 4 中可知,最大的变形值为 0.057 1 mm,相对于执行器整体设计精度来说,其变形值很小,因此,该制孔执行器的整体结构刚度满足要求。

### 2.2.2 主要结构件分析结果

#### 2.2.2.1 安装法兰的静力学分析结果

安装法兰的基本功能是将整个制孔执行器与机器人进行固定连接。在进行制孔作业时,该零件需要抵抗压紧力和制孔切削力,因此其结构设计必然会对制孔执行器工作过程的质量和可靠性产生较大影响,所以要对安装法兰进行静力学分析。安装法兰最大变形值为 0.006 9 mm,其刚度符合设计要求。

安装法兰变形结果如图 5 所示。

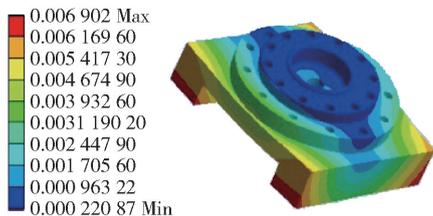


图 5 安装法兰变形结果

Fig. 5 Installation flange deformation

### 2.2.2.2 主进给支撑件的静力学分析结果

主进给支撑件的基本功能是组成制孔执行器各零部件的主要安装基础,该零件的结构刚度对制孔执行器的工作性能产生重要影响,所以要对主进给支撑件进行静力学分析。主进给支撑件最大变形值为 0.042 mm,其刚度符合设计要求。主进给支撑件变形结果如图 6 所示。

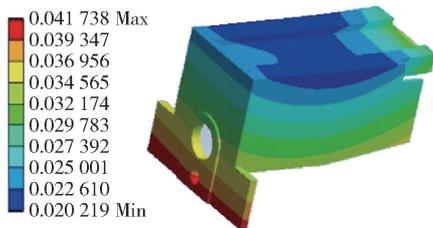


图 6 主进给支撑件变形结果

Fig. 6 Main feed support component deformation

## 3 制孔执行器动力学分析

动力学分析是研究结构优化的基础之一,由于制孔执行器的结构较为复杂,不能用解析法求其振动模式,而只能借助于有限元方法。模态分析是求解结构的固有频率和振型参数固有模态,与外部载荷情况无关。

通过静力学分析可以得到结构的静态特性。但是对于制孔执行器这类结构,实际工作过程中切削力通常以动载荷的形式作用于结构,在其作用下,就会产生不同频率的振动,这些振动很可能对制孔执行器加工性能造成影响。因此,为了保证工件的加工质量,制孔执行器一方面要具有一定静刚度,另一方面也要兼顾其动态(振动)特性。

### 3.1 模态分析准备

模态分析分析前准备工作与静力学分析时基本一致,不同的是不需要对模型施加外载荷,因为外载荷对于系统的固有频率没有影响。

### 3.2 模态分析结果

#### 3.2.1 整体模态分析结果

对制孔执行器整体进行模态分析,得到前六阶固有频率,其模态分析结果如图 7 所示。

模态分析结果表明,制孔执行器整体固有频率较低,第六阶频率为 30.32 Hz,由  $n = 60f = 1\ 819.2\ \text{r/min}$ ,

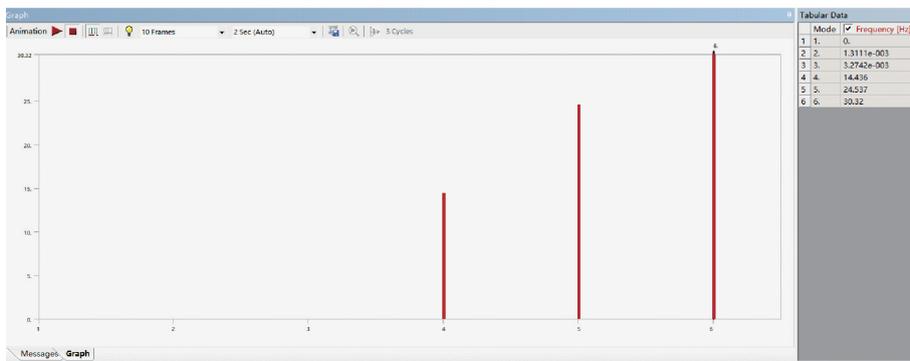


图 7 整体模态分析结果

Fig. 7 Overall modal analysis results

可得引起制孔执行器共振的最高转速是 1 819.2 r/min,所选主轴的最高转速是 10 000 r/min, 1 819.2 r/min 小于 10 000 r/min。通常,航空铝合金零件制孔时,电主轴转速要高于 2 000 r/min,属于高速制孔,因此制孔过程中执行器整体不会发生共振现象。

#### 3.2.2 主要结构件模态分析结果

对执行器最为重要的主进给支撑件进行模态分析,得到前六阶固有频率,其各阶频率如图 8 所示,各阶振型如图 9 所示。

模态分析结果表明,主进给支撑件固有频率较高,由  $n = 60f$ ,将各阶固有频率代入公式,可计

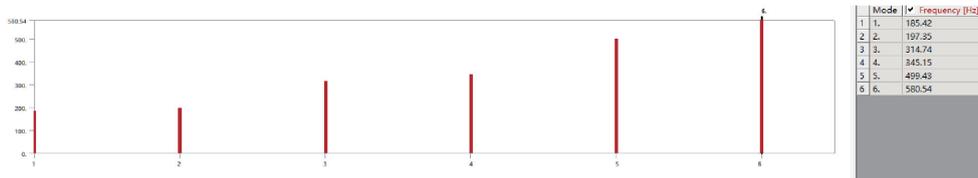


图8 主进给支撑件各阶频率

Fig.8 Various frequencies of the main feed support component

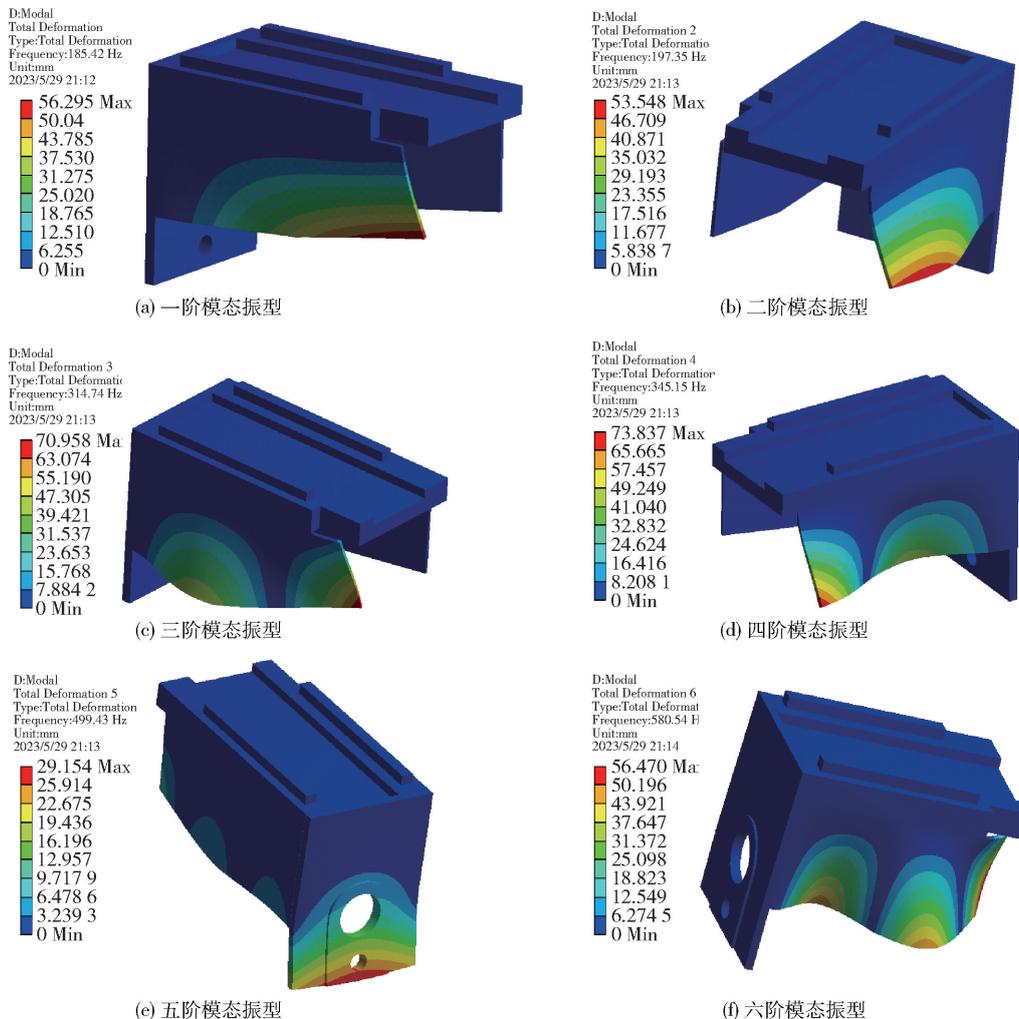


图9 主进给支撑件各阶振型

Fig.9 Various vibration modes of the main feed support component

算共振转速,见表2。由于所选主轴的最高转速是10 000 r/min,从表2中可以看出,制孔过程中主进给支撑件不会发生共振现象。如发现计算共振转速在10 000 r/min以下时要予以关注,可以通过加工参数调整或优化支撑件结构来避免共振现象。

进一步分析可知,对于高速制孔而言,制孔执行器的动态特性分析不能忽视。执行器结构的质量和刚性影响固有频率的大小,一般来说,结构件质量越

表2 主进给支撑件计算共振转速表

Table 2 Calculation of resonance tachometer for main feed support

阶数	固有频率/Hz	计算共振转速/(r·min <sup>-1</sup> )
1	185.42	11 125.2
2	197.35	11 841.0
3	314.74	18 884.4
4	345.15	20 709.0
5	499.43	29 965.8
6	580.54	34 832.4

大,固有频率越低,可以避免加工时产生共振,但会使搭载的机器人成本增加;相反,结构件质量越小,固有频率越高,虽然会使搭载的机器人成本降低,但实际加工时容易产生振动,恶化制孔质量。

#### 4 结语

随着飞机制造业的不断发展,新一代的高强轻质有色金属材料应用步伐加快,针对上述材料的高效柔性制孔必将成为飞机制造业的主题。因此,开发设计自主知识产权的工业机器人制孔末端执行器,具有广阔的应用前景。

本文以机器人制孔末端执行器为研究对象,从总体设计、静力学分析以及动力学分析进行了较为全面的研究,得到如下几点结论。

1)实现了一种新型机器人制孔末端执行器的模块化结构设计方案,阐述了各单元模块的结构设计和技术特点。

2)采用有限元分析方法,对制孔执行器整体及各主要结构件的静力学分析,分析结果表明执行器整体及主要结构件的结构刚度符合设计要求,结构设计科学合理。

3)实现对制孔执行器整体及各主要结构件的动力学模态分析,分析结果表明执行器整体及主要结构件具有良好的模态特性,制孔过程中不会发生结构共振现象。同时,进一步揭示了高速制孔末端执行器与其匹配的机器人成本和制孔质量之间的关系。为其他类似的机器人末端执行器设计具有参考价值。

#### [参考文献]

- [1] 田威,焦嘉琛,李波,等. 航空航天制造机器人高精度作业装备与技术综述[J]. 南京航空航天大学学报,2020,52(3):341-352.
- [2] 罗和平,刘春时,李焱,等. 多功能制孔执行器的研制[J]. 机械设计与制造,2010(8):144-146.
- [3] 张杰,秦现生,胡鹏,等. 基于机器人的飞机部件自动制孔末端执行器设计[J]. 制造业自动化,2013(8):15-18.
- [4] 金洁,田威,李波. 一种自动钻铆末端执行器的设计[J]. 中国机械工程,2020,31(13):1555-1561.
- [5] 王帅,刘春. 一种制孔末端执行器的设计与仿真验证[J]. 现代制造技术与装备,2021(1):5-8.
- [6] 张鄂,张帆,艾尼. 现代设计理论与方法[M]. 北京: 科学出版社,2019: 166.

## Design and static & dynamic analysis of robotic drilling end effector

ZHANG Jian, HUO Fengwei, FU Jia

(School of mechanical and power engineering of Yingkou Institute of Technology, Yingkou 115014, China)

**Abstract:** A modular structural design scheme for a new type of robotic drilling end effector has been proposed. The main modular unit structure design, technical characteristics, and technical parameters of the end effector elaborated. Next, FEM static and dynamic analysis calculations were conducted on the overall and main structural components of the end effector, and the analysis results showed that the structural design was scientifically reasonable. At the same time, it further reveals the relationship between the cost and drilling quality of high-speed drilling end effector and their matching robots, which can provide reference for the design of other similar robotic end effector.

**Key words:** robotic drilling; end effector; design; static analysis; dynamic analysis

