

国产大型飞机蒙皮卧式双五轴镜像铣床 多轴联动换刀装置

余海飞^{1,2}, 黄斌¹

¹合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥

²上海拓璞数控科技有限公司技术研发中心, 上海

收稿日期: 2024年8月30日; 录用日期: 2024年11月8日; 发布日期: 2024年12月19日

摘要

针对第一代国产大型飞机蒙皮卧式双五轴镜像铣床换刀频繁出现因负载过大触发故障报警的问题, 研究设计了一种多轴联动换刀装置。该装置通过增加相对弱刚性的旋转换刀机构, 避免了换刀时机床主轴与相对高刚性的圆盘刀库直接换刀, 降低了换刀时主轴所受负载, 增加了换刀爪夹持中心自适应性, 避免了换刀时频繁报警。研制了多轴联动换刀样机, 并配套安装在国产大型飞机蒙皮卧式双五轴镜像铣床上进行了连续自动换刀测试, 结果表明, 在超3600次连续自动换刀测试中无报警发生。

关键词

多轴联动铣床, 刀爪运动方程, 换刀装置, 结构设计

Domestic Large Aircraft Skin Horizontal Double Five-Axis Mirror Milling Machine Multi-Axis Linkage Tool Change Device

Haifei Yu^{1,2}, Bin Huang¹

¹School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui

²Technology R&D Center, Shanghai Top Numerical Control Technology Co., Ltd, Shanghai

Received: Aug. 30th, 2024; accepted: Nov. 8th, 2024; published: Dec. 19th, 2024

Abstract

In order to solve the problem that the first generation of domestic large aircraft skinned horizontal double five-axis mirror milling machine frequently triggers fault alarms due to excessive load, a

multi-axis linkage tool change device was studied and designed. By increasing the relatively weak rigidity of the rotary tool change mechanism, the device avoids the direct tool change between the machine tool spindle and the relatively high rigidity disc tool magazine during tool change, reduces the load on the spindle during tool change, increases the adaptability of the tool change jaw clamping center, and avoids frequent alarms when tool change. A multi-axis linkage tool change prototype was developed, and installed on a domestic large aircraft skin horizontal double five-axis mirror milling machine for continuous automatic tool change test, and the results showed that there was no alarm in more than 3600 continuous automatic tool change tests.

Keywords

Multi-Axis Simultaneous Milling Machine, Equation of Motion of the Claw, Tool Changer, Structural Design

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

制造业是我国的国民支柱产业, 发展强盛的制造业有利于提高我国的综合国力和国际地位。数控机床作为制造业的“工业母机”, 是国家建设制造强国的重要战略性装备, 五轴联动数控机床作为机床制造业最高水平, 是衡量一个国家精密零件制造技术水平的重要标准[1]。第一代大型蒙皮卧式双五轴镜像铣机床作为国产五轴机床的新机型, 因其问世时间不长, 某些技术还不成熟, 与国外同类机型相比还有一定的差距, 尤其是自动换刀时主轴经常出现负载过大, 产生报警。

近年来, 一些研究机构设计出多种换刀装置, 以适应于各种特定工况条件下换刀。如赵飞等[2]设计了一种多功能四工位换刀装置。王素粉等[3]设计了一种可以同时完成插刀动作和拔刀动作的单臂双手式弧面凸轮式机械手。汪满新等[4]研究了刀库及其自动换刀装置换刀精度随载荷和试验次数的变化规律, 为降低主轴换刀时所受负载提供了参考。张海东等[5]提出一种六自由度换刀机器人, 解决了狭小空间人工换刀困难的问题。张博文等[6]提出换刀机械手末端位姿误差补偿方法, 实现了更加精准换刀。Adam Pettinger 等[7]利用一系列同心椭圆原理, 设计出一种创新的全机械换刀装置, 与现有的换刀装置相比, 大大降低了换刀精度要求。Xiang-Yan Zeng 等[8]设计了一种新颖的换刀装置, 可在机器人辅助显微外科手术中实现自动、快速和精确的器械更换, 该换刀装置可适配直径达 10 mm 的显微外科器械。Wei Li 等[9]设计的弹簧机自动换刀系统实现了弹簧机刀具自动更换和定位的功能, 提高了弹簧成型设备的自动化程度。Zhengtao Hu 等[10]设计一种带有两指平行夹持器的机器人机械工具, 该工具具有换刀功能, 可替代换刀装置。

针对第一代大型蒙皮卧式双五轴镜像铣机床自动换刀时常报警问题, 研制了一种多轴联动换刀装置。该装置通过增加相对弱刚性的旋转换刀机构和换刀爪夹持中心自适应调整原理, 避免了换刀时机床主轴与相对高刚性的圆盘刀库直接换刀, 降低了换刀时主轴所受负载, 避免了换刀时频繁报警。

2. 多轴联动换刀装置

原换刀装置是圆盘刀库与主轴直接进行换刀, 多轴联动换刀装置在原换刀装置中增加一个旋转换刀爪机构, 该换刀爪机构刚性弱于圆盘刀库且刀爪夹持中心具有自适应调整功能。基于卧式双五轴镜像铣

机床的结构特点, 设计的多轴联动换刀装置模型如图 1 所示。该装置主要包括固定座、移动座、换刀爪机构、P 轴传动装置、Q 轴传动装置、R 轴传动装置等, P 轴和 Q 轴为直线运动, R 轴为旋转运动; 刀爪夹持中心自适应调整功能是通过其内部弹簧和刀爪后侧伸缩装置实现的。

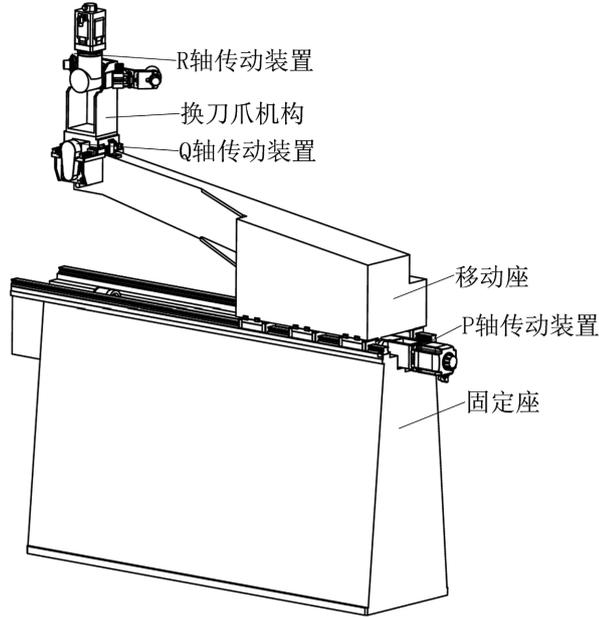


Figure 1. Schematic diagram of the structure of multi-axis linkage tool changer
图 1. 多轴联动换刀装置结构示意图

3. 基本理论

换刀时主轴所受负载主要受刀爪夹持中心定位精度影响, 通过齐次变换矩阵建立刀爪夹持中心运动学方程, 分析刀爪夹持中心空间坐标位置变换关系。

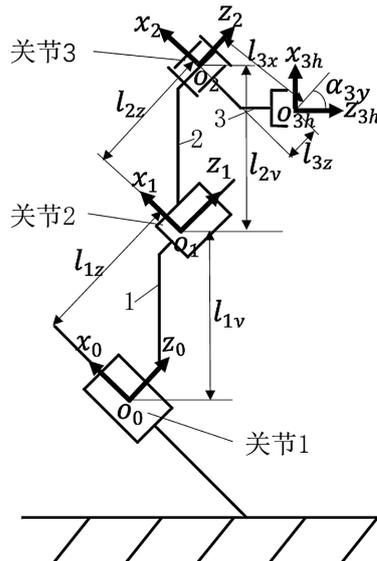


Figure 2. Multi-axis linkage tool changer connecting rod coordinate system
图 2. 多轴联动换刀装置连杆坐标系

由机器人技术[11]相关知识可知, 机械手运动学方程中涉及的参数有机械手的杆件几何参数和机械手的关节运动参数, 通过多轴联动换刀装置模型可建立多轴联动换刀装置连杆坐标系如图 2 所示。坐标系 {0}、{1}、{2}、{3h} 分别为机座坐标系、杆件坐标系 1、杆件坐标系 2 和手部坐标系, 数字 1、2、3 表示杆件 1、杆件 2 和杆件 3, 其中 l_{1y} 为杆件 1 在 y_0 轴方向的长度, l_{1z} 为杆件 1 在 z_0 轴方向的长度, l_{2y} 为杆件 2 在 y_1 轴方向的长度, l_{2z} 为杆件 2 在 z_1 轴方向的长度, l_{3x} 为杆件 3 在 x_2 轴方向的长度, l_{3z} 为杆件 3 在 z_2 轴方向的长度, α_{3y} 为 z_{3h} 轴与 z_2 轴沿 y_2 轴方向的夹角。关节 1 和关节 2 为移动关节, 变量为 d_1 和 d_2 , 关节 3 为转动关节, 变量为 θ_3 。

为了坐标变换的方便, 将机座坐标系 {0} 平移, 使 z_0 轴与 z_1 轴平行且在同一平面内。故杆件坐标系 {1} 可由机座坐标系 {0} 沿 y_0 轴平移 l_{1y} , 沿 z_0 轴平移 l_{1z} , 又关节 1 是移动副, 还需考虑沿 x_0 轴移动变量 d_1 得到; 由多轴联动换刀装置结构可知, 杆件坐标系 {2} 可由杆件坐标系 {1} 沿 y_1 轴平移 l_{2y} , 沿 z_1 轴平移 l_{2z} , 又关节 2 是移动副, 还需沿 z_1 轴平移 d_2 得到; 手部坐标系 {3h} 可由杆件坐标系 {2} 沿 x_2 轴平移 l_{3x} , 沿 z_2 轴平移 l_{3z} , 绕 y_2 轴旋转 α_{3y} , 又关节 3 是旋转副, 还需绕 z_2 轴旋转 θ_3 得到。则多轴联动换刀装置的杆件几何参数和关节运动参数如表所示。其中换刀装置运动过程中, 关节 1 会存在绕 x_1 轴的角度偏差 $d\alpha_1$, 关节 2 会存在绕 z_2 轴的角度偏差 $d\theta_2$, 如表 1。

Table 1. Parameters and joint variables of the multi-axis simultaneous tool changer

表 1. 多轴联动换刀装置的参数和关节变量

参数	杆件 i		
	1	2	3
l_{ix}	0	0	-288
l_{iy}	753.5	377	0
l_{iz}	-44	90	93
α_i	0	0	45°
d_i	0	40	0
θ_i	0	0	θ_3
关节变量 q_i	d_1	d_2	θ_3

由齐次变换矩阵, 可得到机座坐标系 {0} 到杆件坐标系 {1} 的位姿矩阵为:

$$M_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & c\alpha_1 & -s\alpha_1 & l_{1y} \\ 0 & s\alpha_1 & c\alpha_1 & l_{1z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

杆件坐标系 {1} 到杆件坐标系 {2} 的位姿矩阵为:

$$M_{12} = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & l_{2y} \\ 0 & 0 & 1 & l_{2z} + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

杆件坐标系 {2} 到手部坐标系 {3h} 的位姿矩阵为:

$$M_{23h} = \begin{bmatrix} c\alpha_3 c\theta_3 & -c\alpha_3 s\theta_3 & s\alpha_3 & l_{3x}c\alpha_3 + l_{3z}s\alpha_3 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ -c\theta_3 s\alpha_3 & s\alpha_3 s\theta_3 & c\alpha_3 & l_{3z}c\alpha_3 - l_{3x}s\alpha_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $c = \cos$, $s = \sin$, 机座坐标系 $\{0\}$ 到杆件坐标系 $\{3h\}$ 的位姿矩阵为:

$$M_{03h} = M_{01}M_{12}M_{23h} \quad (4)$$

若绝对坐标系与机座坐标系之前的位姿矩阵为 M_{b0} , 则多轴联动换刀装置手部在绝对坐标系中的位置和姿态与各机构参数和关节变量之间的函数关系为:

$$M_{bh} = M_{b0}M_{03h} \quad (5)$$

又位姿矩阵 M_{03h} 是 α_1 , θ_2 , θ_3 , d_1 , d_2 的函数, 可得换刀爪的位姿偏差为:

$$dM_{03h} = \frac{\partial M_{03h}}{\partial \alpha_1} d\alpha_1 + \frac{\partial M_{03h}}{\partial d_1} dd_1 + \frac{\partial M_{03h}}{\partial \theta_2} d\theta_2 + \frac{\partial M_{03h}}{\partial d_2} dd_2 + \frac{\partial M_{03h}}{\partial \theta_3} d\theta_3 \quad (6)$$

其中 $\alpha_1 = 0$, $\theta_2 = 0$, $\theta_3 = 0$, $d_1 = 0$, $d_2 = 40$, $d\alpha_1 = \frac{3}{200} \times \frac{\pi}{180}$, $d\theta_2 = \frac{3}{200} \times \frac{\pi}{180}$, 初定关节 3 刀爪转

动定位精度 $d\theta_3 = \frac{1}{30} \times \frac{\pi}{180}$, 初定关节 1 移动定位精度 $dd_1 = 0.05$, 初定关节 2 移动定位精度 $dd_2 = 0.03$ 。

整理计算可得:

$$dM_{03h} = \begin{bmatrix} 0 & -0.00067 & 0 & 0.05 \\ 0.00095 & 0 & 0 & -0.14 \\ 0 & 0.00067 & 0 & 0.13 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

故可得刀爪在 x_3 轴方向偏差为 $d_x = 0.05$, 在 y_3 轴方向偏差为 $d_y = 0.14$, 在 z_3 轴方向偏差为 $d_z = 0.13$, 刀爪在空间位置偏差为:

$$d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} = 0.197 \quad (8)$$

由此可得刀爪在刀柄径向平面内位置偏差为:

$$d_{yz} = \sqrt{d_y^2 + d_z^2} = 0.191 \quad (9)$$

明显可知, 刀爪在刀柄轴向位置偏差 d_x 明显小于刀爪在刀柄径向平面内位置偏差 d_{yz} , 又刀柄被夹紧外轮廓面轴向长度较短, 且刀爪的姿态偏差较小, 故实际换刀时只要考虑刀爪在刀柄径向平面内位置偏差对主轴负载的影响即可。

4. 对比分析

4.1. 装置负载分析

主轴换刀时主要受到来自刀爪在刀柄径向平面内的位置偏差, 图 3 为装置在换刀时刀柄不同位置示意图, 左边刀柄表示换刀时刀柄中心与主轴中心理论位置(中心轴完全重合); 中间刀柄表示换刀时刀柄中心与主轴中心实际位置; 右边刀柄表示换刀前刀柄中心与主轴中心偏离位置; 图 3 中 ε 即为刀爪在刀柄径向平面内位置偏差 d_{yz} 。

由力学知识及作用力与反作用定律可得出以下数值大小关系:

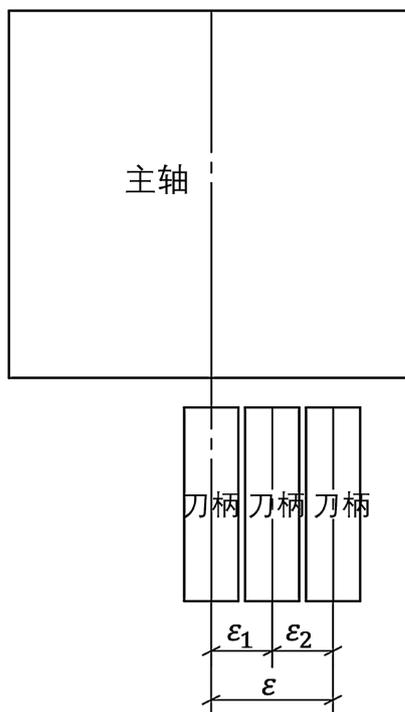


Figure 3. Schematic diagram of the deviation of the centerline of the tool changer shank
图3. 换刀刀柄中心线偏离示意图

$$\begin{cases} F_1(\varepsilon_1) = K_1 \times \varepsilon_1 \\ F_2(\varepsilon_2) = K_2 \times \varepsilon_2 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \\ F_1(\varepsilon_1) = F_2(\varepsilon_2) \end{cases} \quad (10)$$

K_1 为主轴换刀点处刚度;

K_2 为装置换刀点处刚度;

ε 为换刀前, 刀柄中心与主轴中心偏离误差;

ε_1 为换刀时刀柄中心与换刀前主轴中心偏离误差;

ε_2 为换刀时刀柄中心与换刀前刀柄中心偏离误差;

$F_1(\varepsilon_1)$ 为换刀时主轴所受刀柄作用力;

$F_2(\varepsilon_2)$ 为换刀时刀柄所受主轴作用力。

由公式(10)可知,

$$F_1(\varepsilon_1) = K_1 \times \varepsilon_1 = K_2 \times (\varepsilon - \varepsilon_1) \quad (11)$$

装置中刀库换刀点处刚度 K_2 , 主要由移动座末端固定刀库处刚度 K_3 和刀库单独固定时换刀点处刚度 K_4 决定的, 由串联机构刚度[12]关系可知:

$$\frac{1}{K_2} = \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} \quad (12)$$

运用 solidwoks 软件对各零部件换刀点处或连接处施加不同外力, 可得出不同外力条件下各零部件换刀点处或连接处的变形量, 通过计算外力的差值比上变形量的差值可得各零部件相应位置的刚度值, 即

$$K = \frac{\Delta F_0}{\Delta \varepsilon_0} \quad (13)$$

其中取 $K_1 = 100 \text{ N}/\mu\text{m}$, $K_2 = 240 \text{ N}/\mu\text{m}$, 代入计算可得原换刀装置所受负载大小为:

$$F_1 = \frac{1200}{17} \varepsilon \text{ kN} \quad (14)$$

由公式(11)可知, 要减小主轴所受外力 $F_1(\varepsilon_1)$ 值, 可通过降低 K_1 、 K_2 、 ε 和 ε_1 值, 而一般实际生产应用是不允许降低主轴刚度 K_1 值, 故只有降低 K_2 值。

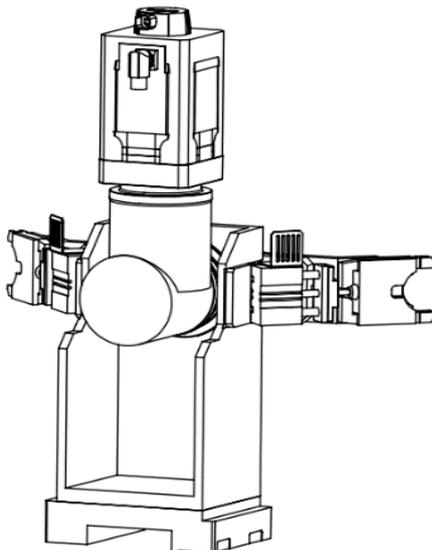


Figure 4. Schematic diagram of the tool changing jaw mechanism
图 4. 换刀爪机构示意图

图 4 为换刀爪机构, 通过换刀爪机构与主轴直接进行换刀, 因换刀爪机构低刚度和自适应调整刀柄中心的特性, 使得实际换刀时主轴所受负载较小, 控制系统不发生报警。

$$F_1(\varepsilon_1) = K_5 \times \varepsilon_3 \quad (15)$$

K_5 , 为装置中换刀爪机构换刀点处刚度;

K_6 , 刀爪自身换刀点处刚度;

ε_3 , 为换刀爪机构换刀时刀柄中心与换刀前刀柄中心偏离误差。

其中取 $K_6 = K_1 = 100 \text{ N}/\mu\text{m}$, 由串联机构刚度关系可知:

$$\frac{1}{K_5} = \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_6} \quad (16)$$

通过分析计算取 $K_5 = 70 \text{ N}/\mu\text{m}$, 由公式(15)和公式(16)同理可得新换刀装置主轴所受负载为:

$$F_1' = \frac{1200}{29} \varepsilon \text{ kN} \quad (17)$$

由公式(14)和(17)可知, 新换刀装置比原换刀装置主轴所受负载减小量为:

$$\Delta F = F_1 - F_1' = \frac{14400}{493} \varepsilon \text{ kN} \quad (18)$$

由此可知, 同等偏离误差条件下, 主轴换刀时新换刀装置比原换刀装置所受负载减小了 41%。

4.2. 自适应刀爪

为了进一步降低主轴换刀时所受负载, 换刀爪机构选用了具有柔性自矫正刀爪。图 5 为刀柄中心自适应调整示意图。左侧为刀爪处在自然状态下, 此时刀柄处于夹紧状态; 右侧为刀爪内锥销受到外部气缸推力 f_1 作用, 向右移动, 锥销内弹簧被压缩, 此时刀爪上下两摇臂处于半放松状态, 当换刀时刀柄中心与主轴偏离时, 刀爪摇臂上滚轮受到刀柄力 f_2 、 f_3 作用, 此时刀爪内上下两个弹簧被压缩, 刀爪张开角度大小改变, 刀柄中心位置做出相应地调整, 从而实现刀柄中心自适应调整的功能, 达到换刀时减小主轴所受负载目的。

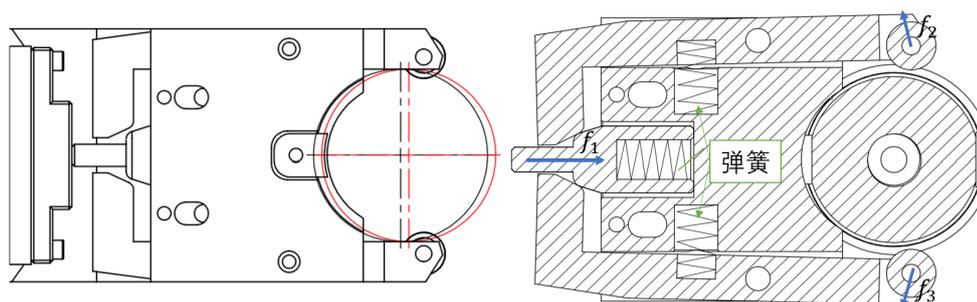


Figure 5. Schematic diagram of adaptive adjustment of the center of the shank
图 5. 刀柄中心自适应调整示意图

5. 实物验证

多轴联动换刀装置装配完后, 先由电气调试工程师找到空间换刀点坐标, 手动运行自动换刀程序数次, 确保换刀程序及换刀流程正确后交予测试工程师进行可靠性测试。本装置的可靠性评判准则以国家机械行业标准 JB/T13821-2020 盘式刀库性能试验规范作为评判依据, 以标准 JB/T13821-2020 中 8.8 节连续刀具自动交换试验作为主要测试重点。随机选用 24 把实际加工常用刀具放置圆盘刀库上进行可靠性测试, 且圆盘刀库 36 个刀位, 每个刀位平均换刀次数不少于 100 次[13], 刀具在圆盘刀库放置位置随机, 以测试装置在各种复杂工况下自动换刀的可靠性, 图 6 为换刀装置实物图和连续自动换刀时长图。



Figure 6. Diagram of the actual tool changer and the duration of the continuous automatic tool change
图 6. 换刀装置实物和连续自动换刀时长图

由此可知多轴联动换刀装置连续自动换刀达 163 小时, 以每次换刀循环时间 1 分钟计算, 可知连续自动换刀多达 9780 次, 远超 36 个刀位平均换刀次数不少于 100 次的要求, 该装置可以有效降低机床换刀报警频率, 提高加工效率。

6. 结束语

本装置完成了连续 163 个小时的无故障自动换刀测试, 多达 9780 次换刀, 平均每个刀位换刀达 271 次, 远大于每个刀位平均换刀次数不少于 100 次的要求。表明了该换刀装置可以有效降低第一代国产镜像铣床换刀时主轴所受负载, 解决了频繁因负载过大触发故障报警的问题, 验证了该换刀装置方案的可行性及装置的可靠性, 弥补了第一代国产卧式双五轴镜像铣机床自动换刀的短板, 提高了自动化生产线的生产效率, 具有一定的推广价值。

参考文献

- [1] 赵万华, 张星, 吕盾, 等. 国产数控机床的技术现状与对策[J]. 航空制造技术, 2016(9): 16-22.
- [2] 赵飞, 赵帅楠, 唐乾. 多功能四工位换刀装置设计[J]. 煤矿机械, 2019, 40(12): 106-109.
- [3] 王素粉, 陈涛. 一种数控加工中心自动换刀机械手的研发[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(6): 81-83.
- [4] 汪满新, 卞程飞, 韩军, 等. 刀库及其自动换刀装置的换刀精度检测方法和衰退规律研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 172-181.
- [5] 张海东, 黄磊, 霍军周. TBM 换刀机器人的设计分析与运动控制[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(5): 1234-1244.
- [6] 张博文, 林赉颀, 彭正阳, 等. 盾构机换刀机械手误差补偿研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(4): 1512-1521.
- [7] Pettinger, A., Dimoush, C. and Pryor, M. (2019) Passive Tool Changer Development for an Elastic and Compliant Manipulator. 2019 *IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Vancouver, 22-26 August 2019, 1200-1205. <https://doi.org/10.1109/coase.2019.8843255>
- [8] Zeng, X., Chuang, Y. and Chen, C. (2020) Automatic Instrument Changer for Robotic Microsurgical Systems. *IFAC-PapersOnLine*, **53**, 15910-15915. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.289>
- [9] Li, W., Wang, D. and Cheng, P. (2020) Design and Research of Automatic Tool Changer System for Multistation Spring Forming Machine. *Journal of Robotics*, **2020**, Article ID: 4635056. <https://doi.org/10.1155/2020/4635056>
- [10] Hu, Z., Wan, W. and Harada, K. (2019) Designing a Mechanical Tool for Robots with Two-Finger Parallel Grippers. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **4**, 2981-2988. <https://doi.org/10.1109/ra.2019.2924129>
- [11] 李团结. 机器人技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [12] 江小州, 廖国江, 叶献辉, 等. 筒体支耳连接结构局部刚度计算及特性分析[J]. 核动力工程, 2023, 44(5): 104-109.
- [13] 牟宏明, 等. JB/T13821-2020 盘式刀库性能试验规范[S]. 北京: 机械工业出版社, 2021.