

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.034

多轴对接调姿平台运动学仿真及轨迹规划

杨学峰

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 针对某大型部件的装配任务,以多轴对接调姿平台为研究对象,根据工作要求对调姿系统进行运动学分析、轨迹规划和最优时间轨迹优化。简化调姿平台的结构,采用改进的 D-H 参数法建立坐标系与运动学方程。利用 5 次多项式插值对调姿平台进行轨迹规划,并进一步引入粒子群算法优化轨迹规划运行时间。通过对调姿平台运动轨迹规划的仿真,分析调姿平台运动过程的关节稳定性,得到连续平滑的关节运动曲线,优化轨迹运行的时间,为后续研究该机构的轨迹跟踪控制提供重要参考依据。

关键词: 多轴对接调姿平台;运动学;轨迹规划;粒子群优化算法

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0175-05

Kinematic Simulation and Trajectory Planning of Multi-axis Docking Attitude Adjustment Platform

YANG Xuefeng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: With the aim at the assembly task of a large part and the multi-axis docking attitude adjustment platform as the research object, this paper carries out the kinematics analysis, trajectory planning and optimal time trajectory optimization of the attitude adjustment system according to the work requirements. The structure of the multi-axis docking attitude adjustment platform is simplified, and the coordinate system and kinematics equations are established by the improved D-H parameter method. The trajectory planning of the multi-axis docking attitude adjustment platform is conducted using quintic polynomial interpolation, and the particle swarm optimization algorithm is further introduced to optimize the running time of trajectory planning. Through the simulation of the motion trajectory planning of the multi-axis docking attitude adjustment platform, the joint stability in the motion process of the multi-axis docking attitude adjustment platform is analyzed, and the continuous and smooth joint motion curve is obtained, which optimizes the trajectory running time, and provides an important reference for the follow-up study of the trajectory tracking control of the mechanism.

Keywords: multi-axis docking and attitude adjustment platform; kinematics; trajectory planning; particle swarm optimization algorithm

0 引言

随着“中国制造 2025”及“工业 4.0”的提出,我国的制造业正飞速地朝着自动化、智能化方向发展^[1-4]。导弹、飞机和火箭等大型军用装备由于部件尺寸较大,因此常采用分段加工制造的方法进行生产,最终再通过对接装配的方式完成装备制造。这些大型精密部件的对接装配是决定产品制造效率的关键环节。与其他机械产品装配不同,大型部件本身存在尺寸质量大、结构复杂以及对接精度要求高等问题。传统的对接方式由装配工人观察当前架车上部件对接情况,不断地手动

调整部件的位置和姿态,直到对接面位姿满足对接要求后,向前推动架车完成对接。这种对接方式不但对装配工人的技术水平要求较高,人工劳动强度较大,对接效率低,而且还存在一定的安全隐患^[5-8]。因此,研究大型精密部件的自动化装配具有重要意义。

为保证对接精度,提高对接效率,本文根据产品对接要求,设计了一种六自由度的多轴对接调姿机构。通过改进的 D-H 法建立对接机构的运动学模型,并进行正向运动学分析。利用 5 次多项式插值对多轴对接调姿平台进行轨迹规划,并进一步引入粒子群算法优化轨迹运行时间,为后

作者简介: 杨学峰(1999—),男,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为多轴对接平台的运动规划与控制研究, fengxue_yang@njjust.edu.cn。

续的轨迹跟踪控制研究提供理论参考依据。

1 多轴对接调姿平台运动学分析

1.1 机构简述

本文设计了一种多轴对接调姿平台,该平台嵌入于某 AGV 运输车内。对接机构使用末端夹持产品部件,将其固定在调姿平台上。当运输车到达目标位置时,通过视觉测量系统和控制系统的协同作用,使对接机构完成对接操作。视觉测量系统会将测得的位姿偏差传递给控制系统,然后控制系统驱动机构的伺服电机来实现对接操作。对接机构如图 1 所示。

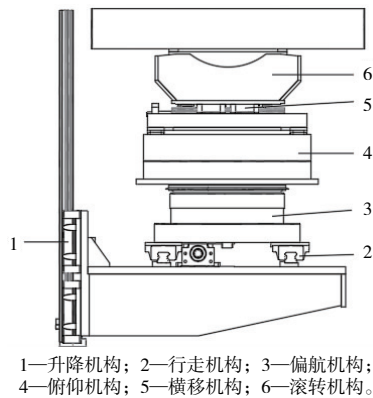


图 1 对接机构简图

图 1 所示多轴对接调姿平台由升降、行走、偏航、俯仰、横移和滚转 6 个部分组成。这些部件按照从下到上的顺序串联,实现了产品部件在 x 方向、 y 方向、 z 方向移动以及绕 x 方向、 y 方向、 z 方向转动的调姿能力。

升降机构的导轨安装在平台内部一侧,由伺服电机驱动滚珠丝杠副来实现垂直方向的移动。行走机构的导轨则安装在升降平台上,同样由伺服电机驱动滚珠丝杠副,实现纵向的行走。横移机构的导轨安装在俯仰平台上,由伺服电机驱动滚珠丝杠副来实现横向移动。

偏航机构则通过伺服电机和减速器实现绕 z 轴旋转的姿态调整。俯仰机构和滚转机构通过驱动蜗杆转动,带动两侧齿轮与设计的弧形槽啮合,从而实现绕 x 轴、 y 轴旋转的姿态调整。

1.2 D-H 坐标系的建立

为研究末端位姿与各关节变量之间的关系,需要建立连杆坐标系。本文通过改进的 D-H 法将结构复杂的多轴对接调姿平台看作一系列连杆通过关节串联而成的运动链^[9]。通常改进的 D-H

法从机构的固定基座开始对连杆进行编号,固定基座记作连杆 0,与之相连的可动连杆记为连杆 1,以各旋转关节旋转轴或直线关节运动方向为相应的 z 轴, x_i 轴沿着 z_i 轴和 z_{i+1} 轴的公垂线由关节轴 i 指向关节轴 $i+1$,如果关节轴 i 指向关节轴 $i+1$ 相交,则 x_i 轴垂直于两轴平面建立^[10]。以此类推,根据上述规则在每个连杆上分别建立连杆坐标系,建立的坐标系如图 2 所示。

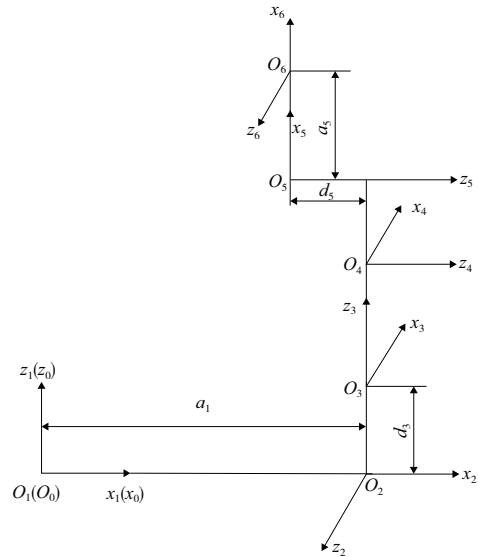


图 2 对接机构连杆坐标系

1.3 正向运动学分析

在连杆坐标关系全部确定后,根据相邻两连杆 i 与 $i-1$ 之间的相对关系,得到表 1 中所对应的 D-H 参数。

表 1 多轴对接调姿平台 D-H 参数

关节	a_{i-1}/m	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	d_i/m	$\theta_i/(^{\circ})$	offset
1	0	0	d_1	0	0 m
2	0.423	90	d_2	0	0 m
3	0	-90	0.104	θ_3	90°
4	0	90	0	θ_4	0°
5	0	0	d_5	90	-0.08 m
6	0.282	-90	0	θ_6	0°

根据 D-H 法建立的两个连杆坐标系之间的齐次变换矩阵的一般表达式为

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

将表 1 中的关节转角 θ_i 、距离 d_i 、杆长 a_i 、扭角 α_i 代入式(1)中计算,可得到多轴对接调姿平台各关节的姿态变换矩阵。以此类推,上述多轴对接调姿平台的改进 D-H 下的末端位姿变换矩阵为

$${}^0T_6 = {}^0T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:

$$\begin{cases} n_x = \sin \theta_3 \sin \theta_4 \cos \theta_6 - \cos \theta_3 \sin \theta_6 \\ n_y = -\sin \theta_3 \sin \theta_6 - \cos \theta_3 \sin \theta_4 \cos \theta_6 \\ n_z = \cos \theta_4 \cos \theta_6 \\ o_x = -\cos \theta_3 \cos \theta_6 - \sin \theta_3 \sin \theta_4 \sin \theta_6 \\ o_y = \cos \theta_3 \sin \theta_4 \sin \theta_6 - \sin \theta_3 \cos \theta_6 \\ o_z = -\cos \theta_4 \sin \theta_6 \\ a_x = \sin \theta_3 \cos \theta_4 \\ a_y = -\cos \theta_3 \cos \theta_4 \\ a_z = -\sin \theta_4 \\ p_x = a_1 + \cos \theta_3 (d_5 - 0.08) + a_5 \sin \theta_3 \sin \theta_4 \\ p_y = \sin \theta_3 d_5 - 0.08 - d_2 - a_5 \cos \theta_3 \sin \theta_4 \\ p_z = d_1 + d_3 + a_5 \cos \theta_4 \end{cases} \quad (3)$$

1.4 运动学模型的建立

为了方便研究多轴对接调姿平台在移动过程中末端位置的轨迹曲线,建立多轴对接调姿平台的模型。根据表 1 中的相关数据,利用 MATLAB 中的机器人工具箱,建立多轴对接调姿平台的模型,如图 3 所示。

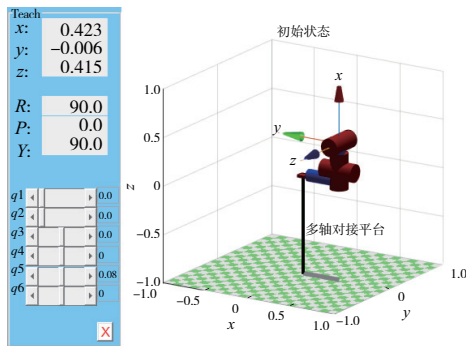


图 3 多轴对接调姿平台初始状态运动学模型

1.5 正运动学仿真

为了验证正运动学的正确性,通过 MATLAB 的机器人工具箱对多轴对接调姿平台的正运动学结果进行验证,以评估所建立模型的准确性。在工作范围内任意给定对接平台的 6 个关节变 Change,设目

标位姿 Change 为 $[0.4, 0.3, -2^\circ, 4^\circ, 0.11, 6^\circ]$,然后调用 fkine 函数,经 MATLAB 编程计算得到末端坐标系的变换矩阵 ${}^0T_6$;接着将关节变量 Change 代入式(2)中,同样也能得到相应的变换矩阵。两种计算结果如表 2 所示。

表 2 多轴对接调姿平台正运动学验证

计算方法	计算结果(${}^0T_6$)
公式计算	$\begin{bmatrix} -0.106\ 9 & -0.993\ 7 & -0.034\ 8 & 0.452\ 3 \\ -0.065\ 7 & 0.042\ 0 & -0.997\ 0 & -0.320\ 7 \\ 0.992\ 1 & -0.104\ 3 & -0.069\ 8 & 0.785\ 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
MATLAB 仿真计算	$\begin{bmatrix} -0.106\ 9 & -0.993\ 7 & -0.034\ 8 & 0.452\ 3 \\ -0.065\ 7 & 0.042\ 0 & -0.997\ 0 & -0.320\ 7 \\ 0.992\ 1 & -0.104\ 3 & -0.069\ 8 & 0.785\ 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

结果对比发现公式计算与仿真计算结果一致,证明多轴对接调姿平台正运动学方程正确。

2 关节轨迹规划及仿真

2.1 5 次多项式

轨迹规划是运动控制的前提,轨迹规划主要分为关节空间轨迹规划和笛卡尔空间轨迹规划两类。由于对接装配过程为全程无需避障,本文采用关节空间轨迹规划对多轴对接调姿平台进行仿真^[11-15]。考虑到对接装配的任务对运动轨迹的速度和加速度有严格的要求,因此采用更高阶次的 5 次多项式函数对规划的路径进行插值,以有效地避免振动的产生。5 次多项式有 6 个待定系数,可同时对起始点和目标点的角度、角速度和角加速度给出的约束条件。

5 次多项式通式可表示为

$$Q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (4)$$

式中 Q 为关节移动距离 d 或关节转动角度 θ 。

同时为了保证初始和终止的关节速度函数和关节加速度函数的连续,将其约束条件代入式(4)中可得,

$$\begin{cases} Q(t_0) = a_0 + a_1 t_0 + a_2 t_0^2 + a_3 t_0^3 + a_4 t_0^4 + a_5 t_0^5 \\ \dot{Q}(t_0) = a_1 + 2 a_2 t_0 + 3 a_3 t_0^2 + 4 a_4 t_0^3 + 5 a_5 t_0^4 \\ \ddot{Q}(t_0) = 2 a_2 + 6 a_3 t_0 + 12 a_4 t_0^2 + 20 a_5 t_0^3 \\ Q(t_f) = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 + a_4 t_f^4 + a_5 t_f^5 \\ \dot{Q}(t_f) = a_1 + 2 a_2 t_f + 3 a_3 t_f^2 + 4 a_4 t_f^3 + 5 a_5 t_f^4 \\ \ddot{Q}(t_f) = 2 a_2 + 6 a_3 t_f + 12 a_4 t_f^2 + 20 a_5 t_f^3 \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)整理为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 & t_0^4 & t_0^5 \\ 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 & t_f^4 & t_f^5 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 & 4t_0^3 & 5t_0^4 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 & 4t_f^3 & 5t_f^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_0 & 12t_0^2 & 20t_0^3 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_f & 12t_f^2 & 20t_f^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q(t_0) \\ Q(t_f) \\ \dot{Q}(t_0) \\ \dot{Q}(t_f) \\ \ddot{Q}(t_0) \\ \ddot{Q}(t_f) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)可记作 $\mathbf{MA} = \mathbf{Y}$, 则 5 次多项式系数 $\mathbf{A} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{Y}$, 设置初始位姿、目标位姿和调姿时间即可求解得到调姿定位机构驱动关节关于时间的运动轨迹方程。

2.2 轨迹优化问题描述

本文的优化目的是在满足约束条件和稳定性要求的前提下提高多轴对接调姿平台运行的效率。因此以调姿时间最短为轨迹规划目标, 即最短运行时间作为适应度函数, 可得:

$$f(t) = \min t_f \quad (7)$$

根据多轴对接调姿平台运行过程中的工作条件, 要求调姿平台能够高效率、平稳连续地完成对接调姿任务。因此, 需要保证各关节速度、加速度都小于最高约束值。故有以下约束条件:

$$\begin{cases} |\dot{Q}_i(t)| \leq v_{i\max} \\ |\ddot{Q}_i(t)| \leq a_{i\max} \end{cases} \quad (8)$$

2.3 粒子群算法的基本原理

由于多轴对接调姿平台要求在 25 s 内完成整个运动过程, 本文利用粒子群算法来优化关节空间轨迹运行时间, 从而实现调姿平台的时间最优轨迹规划。粒子群优化算法是一种基于群体智能的优化算法。它是一种模拟鸟群飞行觅食行为, 并通过个体之间的协作来寻找最优解的进化计算技术^[16-18]。粒子群算法通过速度 v 和位置 x 这两个参数模拟粒子的移动快慢和方向^[19]。粒子根据式(9)和式(10)更新自身的速度和位置:

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}^t) \quad (9)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (10)$$

式中: v_{id}^t 为第 i 个粒子第 t 次迭代时飞行速度的第 d 维分量; x_{id}^t 为第 i 个粒子第 t 次迭代时位置的第 d 维分量; P_{gd} 为群体最好位置 P_g 的第 d 维分量; p_{id} 为粒子 i 最好位置 P_i 的第 d 维分量; r_1 和 r_2 分别为随机数; c_1 和 c_2 为权重因子; ω 为惯性权重^[20]。

2.4 仿真分析

由于本文所述机构对运动轨迹的柔顺度要求较高, 因此需保证运动轨迹的始末点速度和加速度均为 0。本文将起始点时刻的关节初始参数设定为 $[0, 0, 0, 0, 0.08, 0]$, 终止点时刻的关节参数为 $[0.4, 0.3, -2^\circ, 4^\circ, 0.11, 6^\circ]$ 。根据多轴对接调姿平台的运行要求, 其速度和加速度约束如表 3 所示。

表 3 多轴对接调姿平台关节约束条件

关节	$v_{i\max}$	$a_{i\max}$
1	0.05 m/s	0.03 m/s ²
2	0.05 m/s	0.03 m/s ²
3	0.60 °/s	0.20 °/s ²
4	0.60 °/s	0.20 °/s ²
5	0.05 m/s	0.03 m/s ²
6	0.60 °/s	0.20 °/s ²

在 MATLAB 中进行粒子群算法的仿真, 粒子群算法的初始参数设置为初始种群规模 N 为 10, 惯性权重 $\omega_{\max}$ 为 0.9, $\omega_{\min}$ 为 0.3, 学习因子 c_1 和 c_2 的大小为 2, 时间段 t_f 的初值为 25 s, 最大迭代次数 G 为 100。得到各关节在表 3 约束条件下的运行时间优化结果如表 4 所示。图 4 为第 6 个关节滚转机构的最优适应度进化曲线。

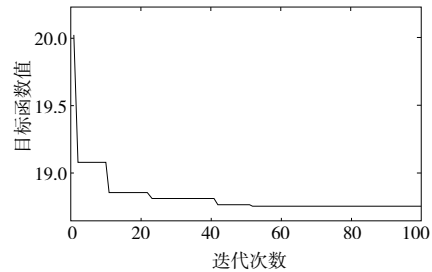


图 4 滚转机构 APSO 适应度进化曲线

表 4 各关节轨迹优化结果 单位: s

关节	1	2	3	4	5	6
t_f	15.01	11.25	5.64	10.01	2.41	18.75

由于多轴对接调姿平台在进行时间最优轨迹规划时, 需要考虑各关节运动的同步性。因此选用优化结果中的最大值作为调姿时间, 即 18.75 s。如图 5 所示, 与要求的 25 s 内完成工作相比, 调姿机构不但在表 3 的任务要求内完成了工作而且调姿时间大约缩减了 25%, 这大大提升了对接效率。

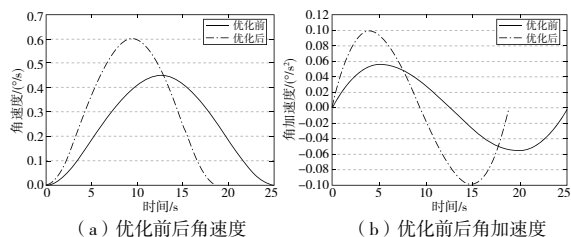


图5 滚转机构优化前后角速度、角加速度对比图像

优化后的多轴对接调姿平台末端位姿轨迹和各关节的位移、速度、加速度曲线如图6和图7所示。由仿真试验的曲线可知,利用粒子群算法对调姿平台规划出来的位移、速度和加速度曲线在整个调姿过程中连续平滑,速度和加速度没有突变情况,可以有效的避免冲击和振动,提高调姿平台运行的稳定性,从而满足对接装配的工作要求。

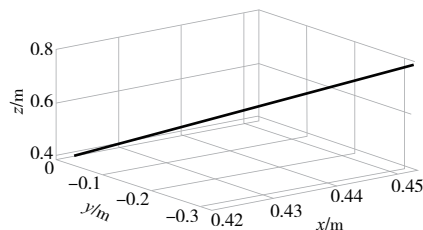


图6 多轴对接调姿平台末端位姿轨迹

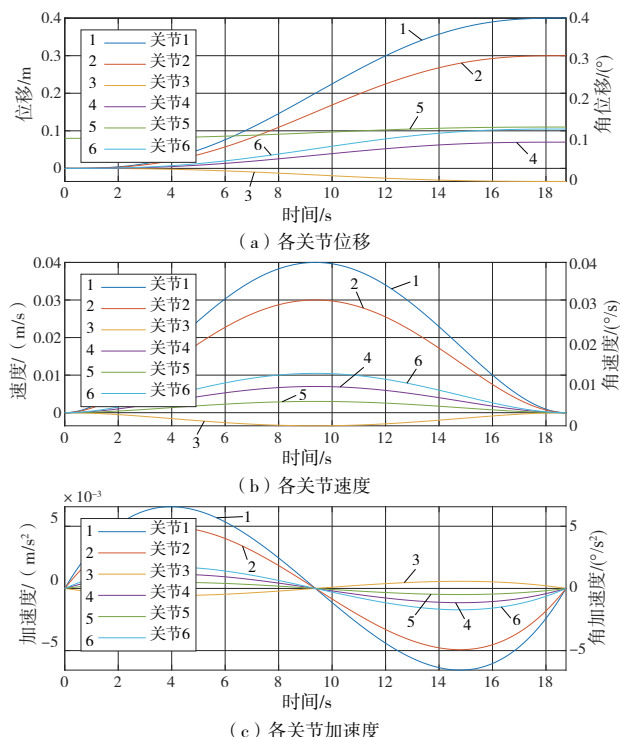


图7 多轴对接调姿平台位移、速度和加速度曲线

3 结语

本文以多轴对接调姿平台为研究对象,运用改进的D-H法对该机构进行了运动学分析。基于MATLAB建立调姿平台模型,并对其运动学方程进行验证。根据对接装配的实际工作要求利用5次多项式插值对多轴对接调姿平台进行了轨迹规划,并进一步引入粒子群算法优化轨迹规划运行时间。通过对多轴对接调姿平台运动轨迹规划的仿真,得到了连续平滑的关节运动曲线,优化了轨迹运行的时间。

各关节的位移、速度和加速度曲线表明:调姿平台的平稳性良好,可以有效的避免冲击和振动,能够满足对接装配的工作要求,为后续对该机构的轨迹跟踪控制研究提供重要理论参考依据。

参考文献:

- [1] 邢红辉,王保升,洪磊,等. 基于MATLAB的六自由度焊接机器人的运动学仿真与轨迹规划[J]. 机械设计与制造工程,2018,47(12):43-47.
- [2] 罗润东,李琼琼,郭怡笛. 劳动力成本上升、机器自动化与制造业转移[J]. 改革,2023(8):66-81.
- [3] 薛虎铖. 机械自动化技术在机械制造业中的应用[J]. 移动电源与车辆,2025,56(2):41-44.
- [4] 郝智. 制造业机械自动化生产中机器人协作应用与效率优化研究[J]. 时代汽车,2025(10):16-18.
- [5] 蔡轶. 大型固体火箭发动机装配系统研究及误差分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2022.
- [6] 杨晨兴,宋杰. 大型精密设备整体装配的位移微调工装设计[J]. 设备管理与维修,2023(13):148-150.
- [7] 何新林,尚苗,何宝庆,等. 大型精密数控转台的装配工艺技术研究[J]. 制造技术与机床,2021(7):97-100.
- [8] 关欣. 大型精密设备装配升降平台的设计[J]. 电大理工,2021(1):11-13,17.
- [9] 蒋志宏. 机器人学基础[M]. 北京:北京理工大学出版社,2018.
- [10] 邓承祥,李智杰,段铭钰. 混联式多自由度喷涂机器人运动学分析[J]. 装备制造技术,2017(7):27-30,34.
- [11] 段昊宇翔,张宇,陈昊然,等. 工业机器人轨迹规划及轨迹优化研究综述[J]. 农业装备与车辆工程,2023,61(2):54-57.
- [12] 朱峰刚. 关节速度约束下六轴机械臂空间运动轨迹规划方法[J]. 机械与电子,2023,41(3):44-49.
- [13] 王川,金晓怡,陈志鹏,等. 6-DOF抛光工业机器人关节空间轨迹规划研究[J]. 机械设计与制造,2020(11):271-274.

(下转第197页)

- 解绿色多舱车辆路径问题[J]. 控制理论与应用, 2024,41(6):1067-1078.
- [9] 朱敏,肖阳,臧昭宇. 基于改进蚁群算法的工业机器人路径规划研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(4):463-467,534.
- [10] 王建玲,王换换. 增强蚁群算法在移动机器人路径规划的应用研究[J]. 机床与液压,2024,52(10):70-77.
- [11] 杨松,洪涛,朱良宽. 改进蚁群算法的森林防火移动机器人路径规划[J]. 森林工程,2024,40(1):152-159.
- [12] 孔维立,王峰,周平华,等. 改进蚁群算法的无人机三维路径规划[J]. 电光与控制,2023,30(3):63-69.
- [13] WU L, HUANG X D, CUI J G, et al. Modified adaptive ant colony optimization algorithm and its application for solving path planning of mobile robot [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 215: 119410.
- [14] LIU C, WU L, XIAO W S, et al. An improved heuristic mechanism ant colony optimization algorithm for solving path planning [J]. Knowledge - Based Systems, 2023, 271: 110540.
- [15] 翟志波,戴玉森,周鹏鹏,等. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. 组合机床与自动化加工技术,2023(4):5-9.
- [16] 罗子灿,何广,周倩文. 基于改进蚁群算法的AGV路径规划研究[J]. 湖南工业大学学报,2024,38(6):86-92.
- [17] 王晓明,尚硕,梁超,等. 改进蚁群算法的AGV路径规划[J]. 组合机床与自动化加工技术,2023(3):63-65.
- [18] LYRIDIS D V. An improved ant colony optimization algorithm for unmanned surface vehicle local path planning with multi-modality constraints [J]. Ocean Engineering, 2021, 241: 109890.
- [19] PASANDI L, HOOSHMAND M, RAHBAR M. Modified A* Algorithm integrated with ant colony optimization for multi-objective route-finding; case study: Yazd [J]. Applied Soft Computing, 2021, 113: 107877.
- [20] NTAKOLIA C, MOUSTAKIDIS S, SIOURAS A. Autonomous path planning with obstacle avoidance for smart assistive systems [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 213: 119049.
- [21] 时维国,宁宁,宋存利,等. 基于蚁群算法与人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 农业机械学报,2023,54(12):407-416.
- [22] 刘显贵,赵率棚. 基于改进蚁群算法的电动叉车路径规划技术研究[J]. 长春工业大学学报,2023,44(4):353-359.
- [23] 孙凌宇,王威,刘文瀚,等. 多因素优化蚁群算法机器人路径规划[J]. 计算机仿真,2024,41(3):470-476.
- [24] 刘天湖,赖嘉上,孙伟龙,等. 基于跳点优化蚁群算法的菠萝田间导航路径规划[J]. 农业机械学报,2025,56(4):387-396.
- [25] 何心,李志恒,李冰,等. 一种改进蚁群算法的移动机器人路径规划研究[J]. 现代制造工程,2023(2):36-43.
- [26] CHENG J. Dynamic path optimization based on improved ant colony algorithm [J]. Journal of Advanced Transportation, 2023, 2023(1): 7651100.

收稿日期:2025-01-10

(上接第179页)

- [14] 孙阳,杨先海,代瑞恒,等. 六自由度机器人的运动学分析及码垛轨迹规划[J]. 机床与液压,2021,49(21):33-37.
- [15] 郭领. 一种串联机器人笛卡尔空间轨迹规划方法[J]. 机械设计与制造工程,2020,49(10):34-40.
- [16] 袁锦涛,刘军,邹树梁. 基于粒子群算法的工业机器人多目标最优轨迹规划[J]. 工业仪表与自动化装置,2021(5):73-79,93.
- [17] 彭思文,梁科,潘雷,等. 基于改进粒子群算法的机械臂时间最优轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术,2023(6):31-34.
- [18] 石宪闪,苗鸿宾,张伟. 基于改进粒子群算法的六自由度机械臂时间最优轨迹规划[J]. 机床与液压,2023,51(1):20-25.
- [19] 李骏,赵青,李立君,等. 基于改进粒子群算法的油茶花粉采摘机械臂轨迹规划[J]. 机械传动,2023,47(2):86-92.
- [20] 付荣,居鹤华. 基于粒子群优化的时间最优机械臂轨迹规划算法[J]. 信息与控制,2011,40(6):802-808.

收稿日期:2023-11-30