

基于遗传算法与粒子群优化的机械臂关节路径优化研究

邓诗韵

(扬州大学数学科学学院, 江苏 扬州 225000)

摘要:利用 D-H 参数构建齐次变换矩阵,由此建立六自由机械臂的正逆运动学模型,确保准确描述末端执行器的位置和方向。在此基础上,定义最小化末端误差和最小化能耗的多目标优化问题,应用遗传算法、粒子群算法和局部搜索优化算法,通过多次迭代调整关节角路径以确认最小误差,求解得到最优关节角为 $(47.798^\circ, -47.798^\circ, 4.782^\circ, 84.421^\circ, -90^\circ, 0^\circ)$,末端误差为 8.823×10^{-7} mm。优化后的机械臂关节角能够显著提高生产效率和减少人工成本,末端误差得到有效控制,从而提高了操作的安全性和性能。提出了一种机械臂关节角度优化方法,结合了多种优化算法的优势,克服了以往单一算法在求解复杂优化时的局限性,具备更强的适用性。

关键词:六自由度机械臂;正逆运动学模型;关节角路径;多目标优化

中图分类号:TP242;TH165

文献标识码:A

文章编号:1003-773X(2025)08-0283-03

0 引言

机械臂作为现代工业自动化的核心组成部分,其设计和性能对于提高生产效率、保证产品质量和降低劳动成本至关重要。相对于与传统的人工生产,工业机器人能够根据计算机发出的指令,自主执行相应的动作,具有自动化、安全化以及高效率的特点^[1]。然而,在实际应用中,由于机械臂的关约束、环境变化以及运动学模型的非线性特性,传统的路径规划方法往往难以满足高精度和实时性的需求。本文首先对六自由度机械臂进行运动学分析与研究,运动学模型是控制和规划的基础,对于理解机械臂的运动方式和制定有效的控制策略尤为重要。研究拟利用智能优化算法,提出一种新的机械臂关节角度优化方法,从而预测机械臂的性能,降低风险并增强操作的安全性,为技术领域提供强有力的技术支持。

1 零位状态

零位状态是机器臂所有关节角度设定为初始值的状态,D-H 参数表详细描述了机器臂的几何构造和运动能力,包括关节的长度、扭转角、偏距以及关节角的可动范围。根据这些参数,本研究可以绘制出机器臂在零位状态下的简图,图 1 展示了机械臂各关节在零位状态下的位置和方向,以及它们之间的空间关系。图 1 中的 x 、 y 、 z 三条坐标轴表示机械臂在三维空间中的方向,单位为 mm,用于描述末端执行器的位置。

2 机械臂正运动学

在建立正运动学模型的过程中,使用 4 个参数描述机械臂的每个杆件作用,分别是连杆长度 a_i ,连杆转角 α_i ,连杆偏距 d_i ,关节转角 θ_i 。根据所述的建立连杆坐标系的方法将参数按定义如下:连杆长度 a_i ,规定为沿着 X_i 轴从 Z_i 移动到 Z_{i+1} 的距离,由于 a_i 对应的是连杆的长度,所以设定其为大于 0 的值;连杆转

角 α_i ,规定为按照右手定则绕着 X_i 轴从 Z_i 旋转到 Z_{i+1} 的角度,连杆转角 α_i 可以为正值,也可以为负值;偏距 d_i ,为沿着 Z_i 轴从 X_{i-1} 移动到 X_i 的距离,沿着 Z_i 的正向为正值,负向为负值;关节转角 θ_i ,规定为按照右手定则绕着 Z_i 轴从 X_{i-1} 旋转到 X_i 的角度值,关节转角 θ_i 可以为正值,也可以为负值。

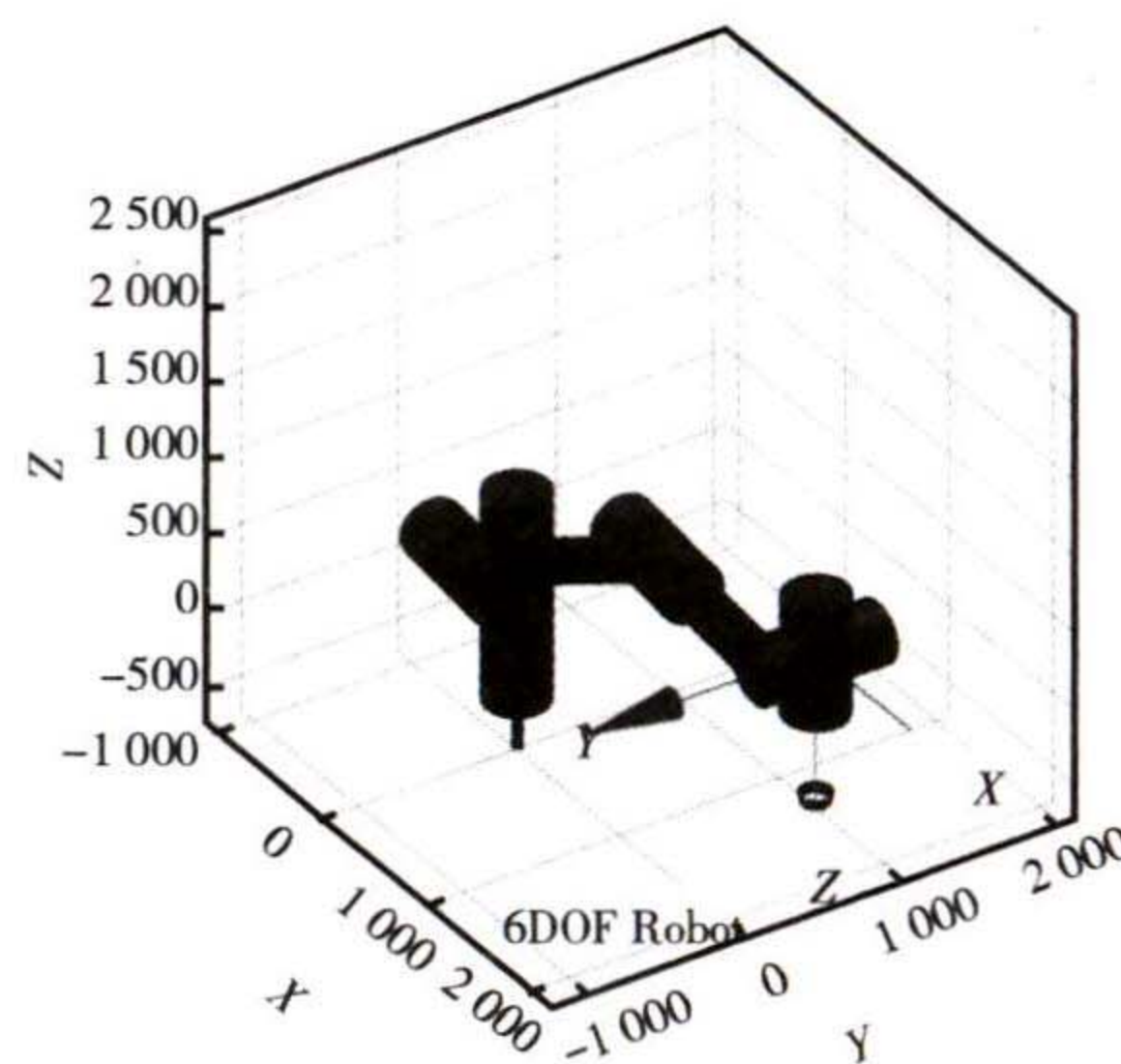


图 1 机械臂零位状态简图

由上述建立坐标系的方法步骤可以得到坐标系 $\{i\}$ 相对于坐标系 $\{i-1\}$ 的变换矩阵 ${}^{i-1}_iT^{[2]}$:

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

通过坐标变换的通用表达式可以得到机械臂的正运动学方程 0T :

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 T^{[3]}. \quad (2)$$

根据机械臂初始状态参数,可以得到的参数如表 1 所示。

将参数结合得到的正运动学方程可以得到每个对应的关节方程,从而建立机械臂的正运动学模型,

在最后结合机械臂的初始位置和姿态可以得到末端执行器的位置和姿态。

表 1 机械臂连杆参数表

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	90°	0	0	θ_2
3	0	a_3	d_3	θ_3
4	-90°	0	d_4	θ_4
5	90°	0	0	θ_5
6	-90°	0	0	θ_6

关于逆运动学的版块，具体细节见文献所示^[3]。观察解的公式可知关节转角 θ_i 会出现多组解的情况，最终应根据实际情况选取最为合适的一组解。

3 路径优化

为了对机器臂关节角路径进行优化，需要定义一个目标函数，该函数能够衡量机器臂末端执行器的实际位置与期望目标位置之间的差异，通常通过计算两者之间的欧氏距离来量化。具体来说，目标函数的公式表示为：

$$\min f = \sqrt{(x-x_t)^2 + (y-y_t)^2 + (z-z_t)^2} \quad (3)$$

式中： (x, y, z) 为根据当前机器臂关节角度进行数值计算后得到的实际位置， (x_t, y_t, z_t) 为目标位置，mm。由目标点找到全局最优关节角路径，这是一种逆求解过程，可行区域非常大，增加了空间复杂度。本文采用多精度优化法，对目标建立关节角度优化函数模型，先通过遗传算法在全局范围内进行探索，找到一个较好的初始解。再通过粒子群加快收敛速度，进一步优化初始解。最后在初始解的基础上通过 SLSQP 算法进行精细调整，确保解的高精度。

遗传算法具有对问题的初始条件要求不高，能够处理复杂的、多峰的、非线性的优化问题，而拟合效果取决于参数的选取^[4]。在本研究中经过多次尝试，最终假设种群大小为 100，最大代数为 200，交叉概率和变异概率分别为 0.7 和 0.1，将求解后的机器臂关节角度可视化，如图 2 所示。

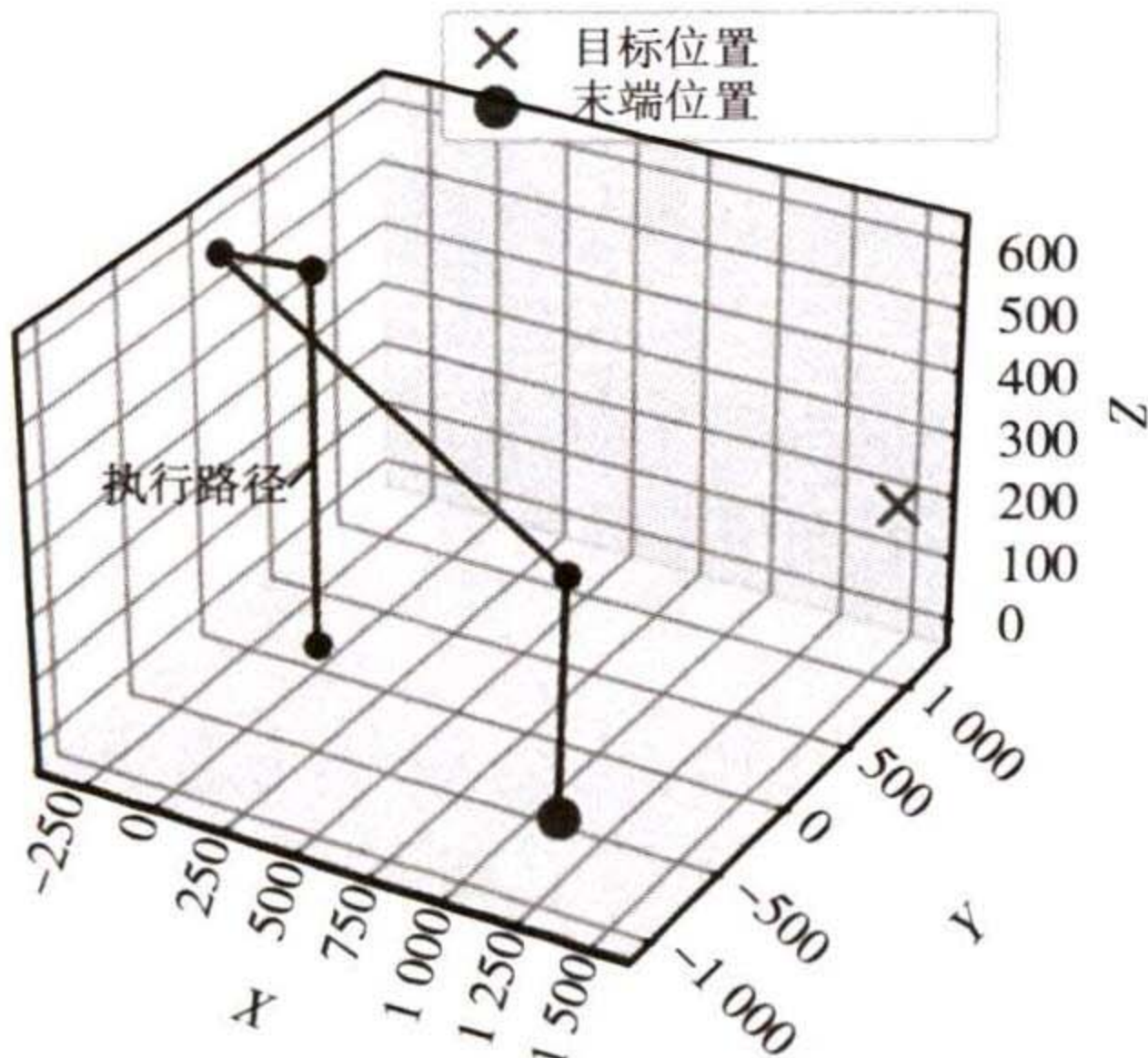


图 2 GA 算法机器臂关节角度可视化图

由图 2 观察可知末端位置和目標位置误差较大，需要进一步改进。本研究考虑采用粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)^[5] 优化参数，增加找到全局最优解的概率，提高模型性能。

对机器臂关节角进行离散化处理后，选择步长为 0.01，通过 Python 编程求解，并将得到的机器臂关节角度可视化，如图 3 所示。图 3 展示了末端路径在三维空间中的分布， x, y, z 方向表示空间坐标，单位为 mm，清楚地反映了与目标位置的偏差情况。

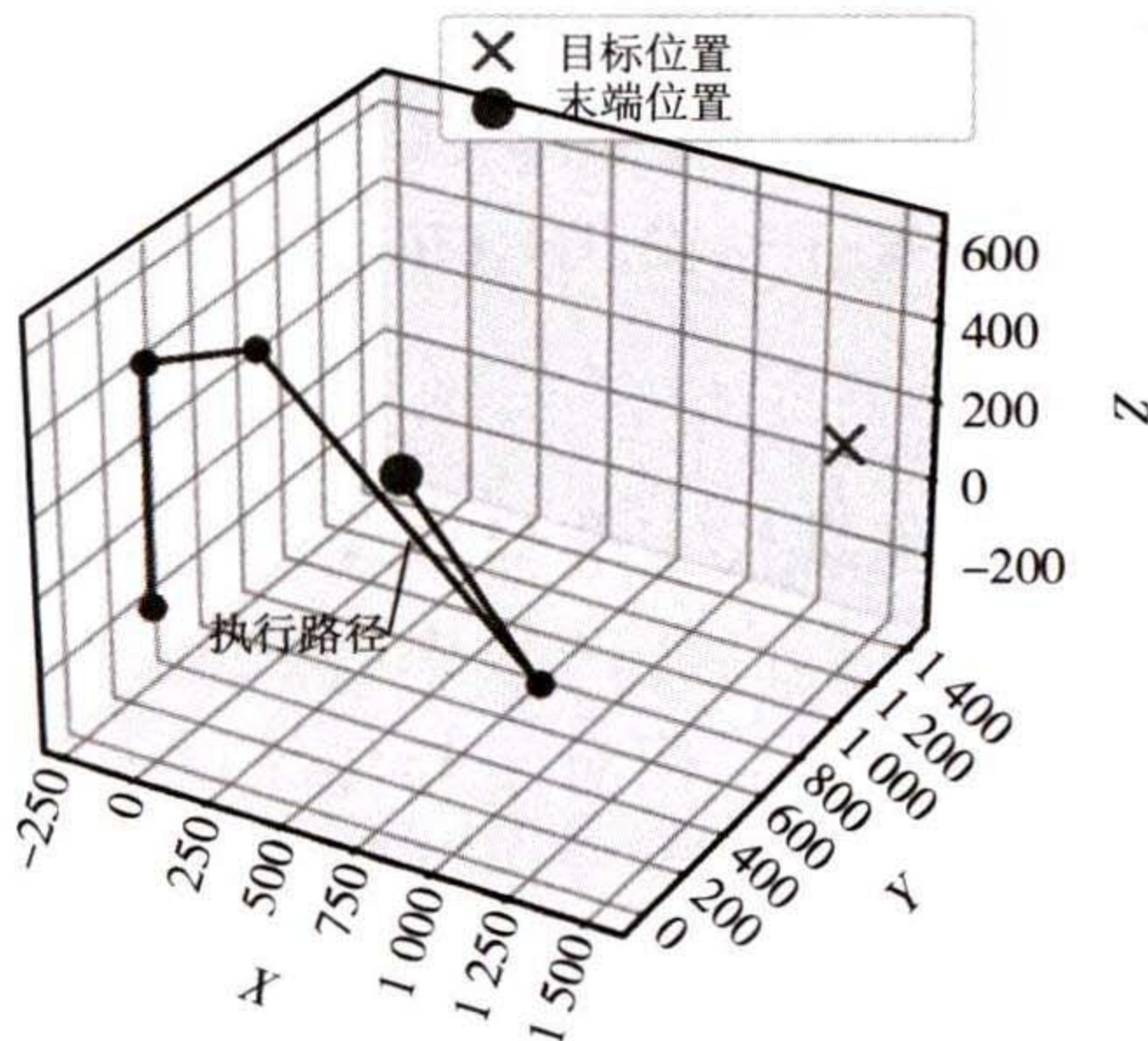


图 3 PSO 算法机械臂关节角可视化图

对图 3 分析可知，误差距离相较上种解法有所较小，但仍无法适用任务，因此需要对模型进行改进，故本文引进局部搜索在 PSO 的基础上进行调整。

最终结果进行可视化如图 4 所示。最终优化轨迹如图 4 所示，三维坐标轴 (x, y, z) 用于标明末端执行器位置，单位为 mm，反映了优化效果的空间拟合情况。

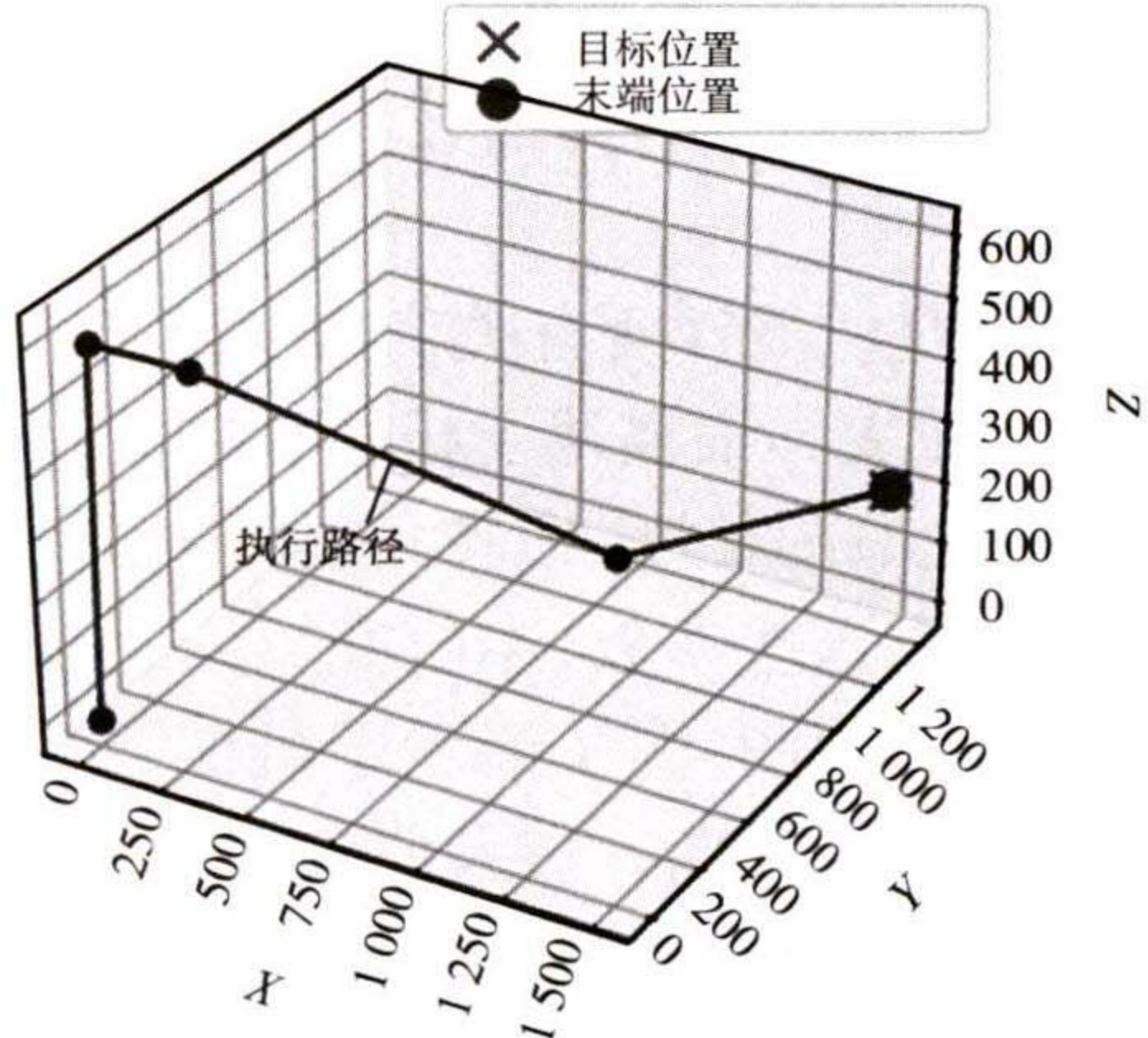


图 4 优化机械臂关节角可视化图

通过深入分析，本研究发现预测的落地点与预期目标吻合良好，精确度有了显著的提升，这种预测的准确性已经足够应对实际使用的需求。末端误差达到最小化，此时机器臂的关节角为 $(47.798, -47.798, 4.782, 84.421, -90, 0)$ ，优化后的末端误差为 8.823×10^{-7} mm，由结果可知 PSO 优化效果优于 GA，在后续的相关工作中可以优先考虑 PSO 进行末端预测。

4 结语

通过分析六自由度机器臂的关节角路径优化，旨

在解决最小化末端误差和能耗的问题。该优化方案利用正逆运动学原理进行理论分析,确保了计算关节位置的可行性和正确性;通过引入遗传算法和粒子群优化算法,调整机械臂的关节角路径从而寻找最小化末端误差的最优解。实验结果表明,优化方案能够有效减少末端执行器的位移误差,显著提升了机械臂预测落点的精度,并具有良好的稳定性,但仍存在一些不足之处,算法的参数选择和调整可能需要更精细的实验和理论支持,以适应不同环境和任务的需求。此外,实际应用中的动态环境因素和机械臂的物理限制对路径优化的影响尚未充分考虑,在未来可以开发高效的分布式路径规划算法,能够在保证实时性和效率的前提下,处理大规模多智能体系统路径规划问题,提高路径规划的智能化水平。

本文提供了一种研究思路与框架,对机械臂优化相关领域的应用进行了初步尝试。机械臂应用于实际

工作场景是必然的发展历程,可以提升生产流程的效率并降低对人力资源的依赖,需要不同领域的研究者共同研发。通过将这一优化方案付诸实践,可以对机械臂的性能进行深入测试,并验证其在不同应用场景中的适用性和有效性。

参考文献

- [1] 潘浩,苏世龙,雷俊,等.基于工业机械臂的三维立体钢筋网笼生产的研究与应用[J].工程建设与设计,2020(15):118-120.
- [2] 周杨,杨旗,闫为佳.基于 D-H 参数的六轴机器人运动学分析与仿真[J].机械工程与自动化,2024(3):56-58.
- [3] 董芳,赵文,廖锋.机械臂逆运动控制模型与方法[J].价值工程,2014,33(3):35-37.
- [4] 谢火林,江远东,刘凯,等.基于改进鲸鱼遗传算法的液压机械臂轨迹规划[J].矿山机械,2024,52(10):65-71.
- [5] 王桂荣,倪志强,周坤,等.多策略改进粒子群算法的机械臂时间最优轨迹规划[J].中国机械工程,2025,36(5):1044-1055.

(编辑:王慧芳)

Optimization Research of Robotic Arm Joint Path Based on Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization

Deng Shiyun

(School of Mathematical Sciences, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu 225000, China)

Abstract: The D-H parameters are used to construct the chi-square transformation matrix, from which the forward and inverse kinematics model of a six-freedom robotic arm is established to ensure the accurate description of the position and direction of the end-effector. On this basis, the multi-objective optimization problem of minimizing the end error and minimizing the energy consumption is defined, and genetic algorithm, particle swarm algorithm and local search optimization algorithm are applied to adjust the joint angle path through several iterations to confirm the minimum error, and the optimal joint angle is obtained as , and the end error is mm. The optimized joint angle of the robotic arm can significantly improve the productivity and reduce the labor cost, and the end error is effectively controlled. The optimized robot arm joint angle can significantly improve the productivity and reduce the labor cost, and the end error is effectively controlled, thus improving the safety and performance of the operation. A robotic arm joint angle optimization method is proposed, which combines the advantages of multiple optimization algorithms, overcomes the limitations of the previous single algorithm in solving complex optimization, and has stronger applicability.

Key words: six-degree-of-freedom robotic arm; forward-inverse kinematic model; joint angle path; multi-objective optimization

(上接第 243 页)

保养对策[J].中国医疗器械信息,2022,28(21):170-173.

- [3] 黄锦康.彩色多普勒超声诊断仪的常见故障分析及维修[J].中国设备工程,2023(9):153-155.

- [4] 范大伟.彩色多普勒超声诊断仪的常见故障分析及维修[J].医疗装备,2022,35(12):107-108.

(编辑:王慧芳)

Analysis of Common Faults and Maintenance of Color Ultrasonic Diagnostic Instrument

Wang Chengmeng, Zhou Xiaoyan

(Chinese People's Liberation Army Navy Hospital No. 971, Qingdao Shandong 266000, China)

Abstract: Aiming at the mechanical failures of color ultrasound diagnostic instrument that are easy to appear in long-term use, the problems of poor contact of probe interface, roller stagnation, loosening of display bracket and failure of control panel buttons are analyzed. High-performance materials, optimized mechanical design and structural adjustment were used to repair and optimize the equipment. The experimental results show that the contact resistance is reduced by 75%, the rolling resistance is reduced by 25%, the bracket deformation is reduced by 41.7%, the response time of the buttons is shortened to 7 ms, the failure rate is reduced by more than 70%, and the stability and reliability of the equipment are significantly improved.

Key words: color ultrasound diagnostic instrument; mechanical failure; maintenance optimization; performance improvement; reliability