

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2025.04.008

# 基于 ROS 架构的多关节泵车臂架轨迹逆运动学求解算法

肖雨瑶

(中铁十八局集团第五工程有限公司, 天津 300459)

**摘要:**对多关节泵车臂架轨迹逆运动分析时,由于测定过程中多依赖于水平方向模态推演,位姿点移动角度容易出现偏转,导致轴向控制偏差较大,轨迹控制精度降低。为此,提出对基于机器人操作系统(robot operating system, ROS)架构的多关节泵车臂架轨迹逆运动学求解算法的设计与分析。通过泵车臂架位正交点相向关系的变化,确定该点运动轨迹的上限与下限,在该区间内以正交点映射表示位姿点;划定位姿点的运行空间,从水平与垂直2个方向调整位姿点的移动角度,避免出现偏转状态,完成逆运动的模态推演;设计 ROS 协同控制机制测算并调整轨迹坐标,输出与模态推演结果相符合的多关节泵车臂架轨迹逆运动学最优解。实验结果表明:所提方法应用后,处于有约束和无约束2种状态时,运行轨迹与位姿点定位结果精准重合,轴向控制偏差逼近于0,误差在0.01~0.03 mm。逆运动学求解结果精准度提升,多关节泵车臂架轨迹控制性能得到强化。

**关键词:**ROS 架构;关节泵;车臂架;轨迹运动;改进型 D-H 调整;多关节控制

**中图分类号:**TU646 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2025)04-0072-07

## Inverse Kinematics Solution Algorithm for Multi Joint Pump Truck Arm Trajectory Based on Ros Architecture

XIAO Yuyao

(China Railway 18th Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., Tianjin 300459, China)

**Abstract:** When analyzing the inverse motion of the multi joint pump truck arm trajectory, the measurement process relies heavily on horizontal modal inference, and the movement angle of the pose points is prone to deviation, resulting in significant axial control deviation and reduced trajectory control accuracy. Therefore, a design and analysis of the inverse kinematics solution algorithm for the trajectory of multi joint pump truck arm based on robot operating system (ROS) architecture is proposed. The upper and lower limits of the motion trajectory of the pump truck arm was determined by changing the relationship between the orthogonal points, and the pose points within this interval were represented by mapping them to the orthogonal points. The operating space of the pose points were defined and the movement angle of the pose points was adjusted from both horizontal and vertical directions to avoid deviation, and the modal deduction of inverse motion was completed. ROS collaborative control mechanism was designed to calculate and adjust trajectory coordinates, and the optimal inverse kinematics solution of the multi joint pump truck arm trajectory that matches the modal inference results was drawn. The experimental results show that after applying the proposed method, when in both constrained and unconstrained states, the running trajectory and pose point positioning results accurately coincide, and the

收稿日期:2025-03-19

作者简介:肖雨瑶(1996—),女,湖南邵阳人,工程师,学士,主要研究方向为工程机械设备在工程的应用。E-mail:tuogou67@163.com。

axial control deviation is relatively close to 0, with an error between 0.01 and 0.03 mm. The accuracy of the inverse kinematics solution is improved, and the trajectory control performance of the multi joint pump truck arm is enhanced.

**Keywords:** ROS architecture; joint pump; vehicle arm frame; trajectory motion; improved D-H adjustment; multi joint control

## 0 引言

多关节泵车臂架架构的灵活性与作业效率直接关系到施工质量。这类泵车臂架由多个关节通过精密的连接件结合而成,模仿人类手臂的运动方式,在三维空间内实现多自由度运动,从而确保混凝土能够准确、高效地输送至指定位置。要实现泵车臂架的精准控制,就需要在最短的时间之内确定执行点的目标位置和姿态,进而反推出运行轨迹与方向,在复杂的环境下,实现自适应协同控制,输出运动求解。

考虑到现阶段多关节泵车臂架轨迹逆运动需求的变化,部分专业人员设计了控制方法进行应对处理。孟范伟等<sup>[1]</sup>提出基于奇异摄动的柔性关节机械臂鲁棒控制方法,主要利用奇异摄动法对原系统进行解耦,得到快慢2个异时间尺度的二阶子系统,对慢子系统设计二次补偿控制律,用扰动观测器对扰动进行观测后,实现首次补偿。但是快慢、2个异时间尺度容易促使目标发生重叠,扰动增加,出现控制失准的情况。冯适意等<sup>[2]</sup>提出基于关节优先级的冗余机械臂柔顺控制方法,通过雅可比矩阵的加权广义逆矩阵与阻抗控制中机械臂的末端速度相结合,计算出关节角度增量,并对关节角度进行迭代更新。但是随着关节角度的迭代更新,预设的优先级标准难以实现覆盖处理,导致控制准确性降低。井荣枝等<sup>[3]</sup>提出空间约束下多关节机械臂末端柔顺控制方法,根据多关节机械臂的驱动机构结构,计算机械臂末端与物体间直线距离,将其作为末端位置的限制参量,建立闭环向量约束方程。但是柔顺控制所形成的约束仅为局部搜索,缺乏全局性,容易出现控制误差高,精度低的情况。马荣华

等<sup>[4]</sup>提出多自由度机械臂抓取过程关节角度的智能控制方法,主要从连杆运动和关节运动2方面构建四自由度机械臂动力学模型;利用玛达尼推理法处理自适应滑模控制器的模糊推理规则,根据机械臂的移动误差,采用自适应修正控制器的输出量,得到优化控制器。但是由于机械臂的移动过程为连续性的,移动速度的变化也会导致轨迹运动控制偏差增加,影响最终的控制精确性。

针对上述研究的不足,本研究结合机器人操作系统(robot operating system, ROS)架构,设计多关节泵车臂架轨迹逆运动学求解算法;以所构建的通信框架为基础,协同臂架各个模块联控,通过订阅臂架末端执行器的目标位置和姿态信息,求解出各个关节的角度,输出实际的运动轨迹,在提高控制系统可扩展性和可维护性的同时,为逆运动学求解算法的优化提供了思路,进一步提高泵车臂架的控制精度和作业效率。

## 1 设计多关节泵车臂架轨迹逆运动学 ROS 求解算法

### 1.1 泵车臂架多关节位姿点表示

泵车臂架在移动的过程中,关节点动作变化所形成的轨迹点为位姿点<sup>[5]</sup>。在移动范围之内,先确定一个正交点,具体表示如式(1)所示。

$$\begin{cases} ux_{i,y} = ay_{i,y} \times bz_{i,y} - az_{i,y} \times by_{i,c} \\ uy_{i,y} = az_{i,y} \times bx_{i,y} - ax_{i,y} \times bz_{i,c} \\ uz_{i,y} = ax_{i,y} \times by_{i,y} - ay_{i,y} \times bx_{i,c} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u$ 为对照点, $x_{i,c}$ 、 $y_{i,c}$ 、 $z_{i,c}$ 为空间内三维坐标, $\mathbf{a}$ 和 $\mathbf{b}$ 分别为轨迹移动空间中的法向量和切向量。

以该正交点为轨迹内位姿的控制核心<sup>[6]</sup>。当泵车臂架处于移动状态时,末端执行器的位姿点与正交点不一致,构建转换矩阵处理<sup>[7]</sup>,如式(2)所示。

$$B_{i,j} = \begin{bmatrix} ux_{i,y} & ax_{i,y} & bx_{i,y} & x_{i,y} \\ uy_{i,y} & ay_{i,y} & by_{i,y} & y_{i,y} \\ uz_{i,y} & az_{i,y} & bz_{i,y} & z_{i,y} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $B_{i,j}$ 为转换后的位姿坐标系。

根据上述转换关系,随着泵车臂架各个关节的移动,测定出正交点的相向关系<sup>[8]</sup>,如图1所示。

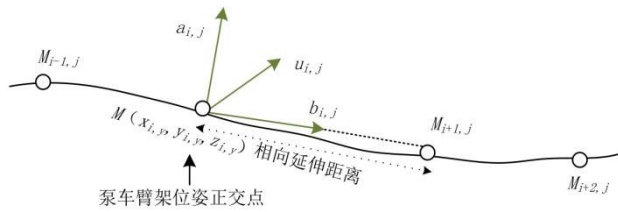


图1 泵车臂架正交点相向关系

图1中,以位姿的正交点为核心,随着泵车臂架的移动,位姿点可以进行相向延伸,扩大实际的移动范围<sup>[9]</sup>。该点位仅为单个关节的位姿点,需对多关节位姿点进行表示<sup>[10]</sup>。假定泵车臂架关节空间轨迹处于连续的运动状态,轨迹映射为一个动态的曲线,正交点在曲线之上不断变动,可以先确定空间轨迹的移动上限和下限,分别如式(3)和式(4)所示。

$$H_{\max} = \frac{B_{i,j} \times (\beta + \chi)}{\sum_{o=1} \lambda o - s} \quad (3)$$

$$H_{\min} = \frac{(\beta - \beta_a)^2 \times e}{n\lambda} \quad (4)$$

式(3)~(4)中: $H_{\max}$ 和 $H_{\min}$ 分别为空间轨迹的移动上限和下限, $\beta$ 和 $\beta_a$ 分别为相向距离和延伸距离, $\chi$ 为初始移动距离, $\lambda$ 为正交点移动位置, $o$ 为移动推演次数, $s$ 为重叠点位置, $e$ 为离散坐标, $n$ 为位移距离。

空间轨迹移动的上限和下限可以作为多关节位姿点的移动空间,进而输出最终的位姿点目标,如式(5)所示。

$$p = \frac{H_{\max} + H_{\min}}{\sum_{i=1} (t - t_i)^2 \times n_i} \quad (5)$$

式中: $p$ 为位姿点目标, $t$ 和 $t_i$ 分别为单位姿点与邻近位姿点的相向距离, $n_i$ 为位移点。

多关节位姿点并不是固定的,而是结合泵车臂架的轨迹不断移动,可作为逆运动模拟的基础点。

### 1.2 ROS 轨迹协同控制方程逆运动求解

以多关节泵车臂架的位姿点作为逆空间轨迹的基础点,依据实时的运动状态,展开模态推演。衡量轨迹前后位姿点的近似程度,测定相似位姿点移动的平滑系数如式(6)~(7)所示。

$$C = g \sum_{\eta=1} \varpi_{\eta} (Y_{\eta} - s(\delta_{\eta}))^2 \quad (6)$$

$$F_r = (1 - C) \int \left( \frac{\rho^2 \varphi}{\rho \varphi^2} \right)^2 \quad (7)$$

式(6)~(7)中: $C$ 为位姿点近似程度, $F_r$ 为平滑系数, $g$ 为初始位姿点, $\eta$ 为持续移动数量, $\varpi_{\eta}$ 为关节数量, $Y_{\eta}$ 和 $\delta_{\eta}$ 分别为移动距离和重叠移动距离, $s$ 为重叠点数量, $\rho$ 为平滑曲率, $\varphi$ 为惩罚系数。

对近似程度高的位姿点进行连接,通过平滑状态来映射持续的运动模态变化曲线,并测定出位姿点间的偏转角,如式(8)所示。

$$\vartheta = \frac{\left[ d \left( \frac{mF}{kF} \times C \right) \right]}{dl - \frac{mF}{kF}} \quad (8)$$

式中: $\vartheta$ 为位姿点间的逆向偏转角, $d$ 为臂杆距离, $m$ 和 $k$ 分别为定点矢量和移动变化矢量, $F$ 为可旋转最大角度, $l$ 为逆向偏转向量。

在空间范围内,位姿点的移动也会导致角度的偏转,假定水平和垂直2种状态下,对逆运动下位姿轨迹的模态进行推演,如式(9)所示。

$$U_p = \frac{\nu U_0}{h} \times \vartheta (\beta - \beta_a)^2 \times h_b \quad (9)$$

式中: $U_p$ 为位姿轨迹的模态推演结果, $\nu$ 为弹性系数, $U_0$ 为受约束轨迹, $h$ 为偏转点, $h_b$ 为位移偏转点。

根据模态推演结果,能够确定在水平和垂直2种状态下,位姿轨迹的偏转规律会呈现不同特征。

融合逆运动多关节姿的模态推演结果,结合ROS结构,对轨迹实现协同控制,构建反馈控制矩阵,如式(10)所示。

$$I = Z(t) \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix} + \iota \quad (10)$$

式中: $I$ 为运动轨迹反馈控制目标, $Z(t)$ 为弹性变量, $Z_1、Z_2、Z_n$ 分别为不同轨迹内的位姿模态点, $\iota$ 为轨迹特征位姿点。

将此时的运动轨迹反馈控制目标导入 ROS 结构之中,设计协同控制结构,如图 2 所示。

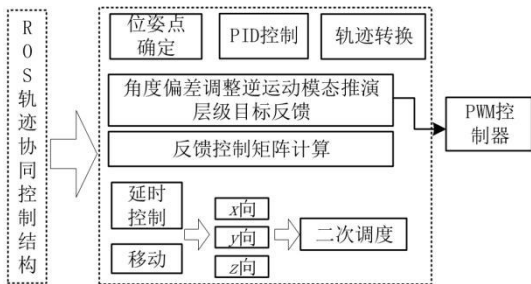


图 2 逆运动模式下 ROS 轨迹协同控制结构

结合图 2,利用 OS 层将运动轨迹反馈控制目标汇总,针对各关节的移动方向与位姿轨迹,确定协同控制内容。泵车臂架在移动的过程中,采用中间层对需要调度的点位坐标进行调整,与反馈控制矩阵关联,形成协同控制机制,最终采用应用层在逆运动模式下进行最优筛选,结合式(10)获取轨迹协同控制的最优解,如式(11)所示。

$$J = \lambda I \times \sum_{N=1} \phi N - (\tau^2 + \omega) \quad (11)$$

式中: $J$ 为轨迹协同控制的最优解, $\lambda$ 为补偿系数, $\phi$ 为弹性轨迹, $N$ 为弹性控制点, $\tau$ 和 $\omega$ 分别为逆运动距离和重叠轨迹。

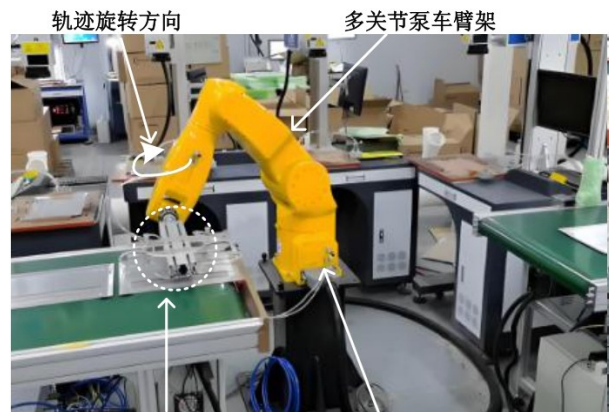
轨迹协同控制最优解反映了多节点泵车臂架的最优控制目标,能更好地保证应用的稳定与平衡。

## 2 实验与结果分析

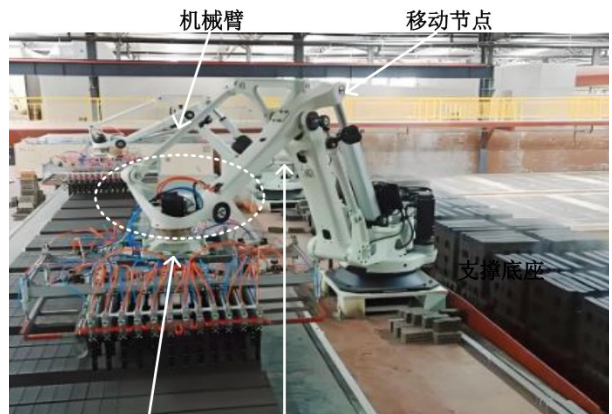
以某小型的多关节泵车臂架为仿真实验对象,确定其为三臂杆、两关节的内置结构,采集初始坐标信息,便于后期的验证和对比。以传统泵车臂架控制算法为对照组,以基于 ROS 架构的多关节泵车

臂架轨迹逆运动学求解算法(本文方法)为实验组,进行仿真实验。

由于泵车臂的控制需要多关节模式支撑,在测试过程中,需要先增设针对关节控制的辅助装置,调整对应的控制参数,实现主控仿真环境的构建。选定 2 种类型的小型多关节泵车臂架,分别为 XBBZD10-15G 型号与 RZ 型号,如图 3 所示。



(a)测试多关节泵车臂架 A



(b)测试多关节泵车臂架 B

图 3 多关节泵车臂架仿真实验环境

设置图 3 的多关节泵车臂架自由度为 2,末端执行器初始状态为开合,可以实现物体的抓、移、放等动作,保证实验测试的执行。设置泵车臂架控制参数,如表 1 所示。

按照表 1 调整实验环境,通过 MATLAB 中的 Simulink 模块实现泵车臂架轨迹跟踪环境与控制环境的关联。此外,结合 ROS 系统,使用纳纳维特-哈

表 1 泵车臂架控制参数

编号	控制指标类别	标准值
1	连杆转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.15
2	电机转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.02
3	连杆质量/kg	1
4	连杆长度/m	2.4~3.6
5	关节摩擦系数/(N·m·s·rad <sup>-1</sup> )	15
6	关节刚度/(N·m·rad <sup>-1</sup> )	180
7	相电势系数/(V·rad <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	18
8	相电阻/Ω	5.5
9	转矩系数/(N·m·A <sup>-1</sup> )	13
10	电机阻尼/(N·m·s·rad <sup>-1</sup> )	7

滕伯格(Denavit-Hartenberg, D-H)坐标转换法为运动学模型建立条件,设置动力学模型D-H参数,如表2所示。

表 2 动力学模型D-H参数

关节臂	$\theta/(^\circ)$	$D/cm$	$\alpha/(^\circ)$	$a/cm$
1	$W_1$	0	$\pi/2$	$Q_1$
2	$W_2$	0	0	$Q_2$
3	$W_3$	0	0	$Q_3$

将表2设定的动力学模型D-H参数导入MATLAB仿真软件之中,调整运动模型应用结构和控制机制,完成运动轨迹跟踪测试环境的部署。

阶跃响应状态的变化反映了测试系统中泵车臂架的控制情况,可以判断测试环境是否稳定,并保证泵车臂架在实验中快速进入状态。选择合理的D-H运动参数调整,以关节2作为目标,提取关节的阶跃信号和响应信号,如图4所示。

图4中阶跃响应曲线在3.2s左右的位置,响应

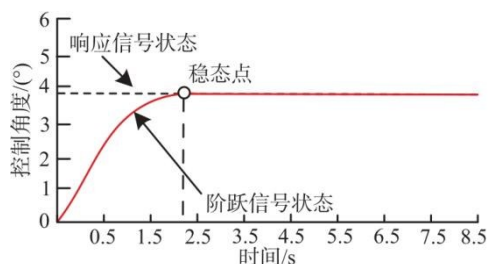


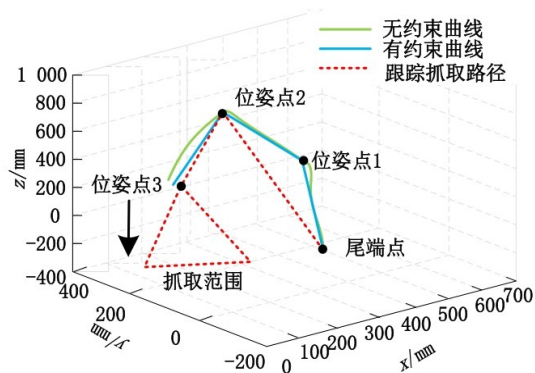
图 4 泵车臂架控制系统阶跃响应状态曲线

状态与阶跃状态逐步一致,处于较为稳定的情况,不会受到其他因素的干扰,反映了测试系统及泵车臂架控制具有较强的控制效果,可以展开轨迹运动控制测试。

以ROS架构为轨迹定位支撑,结合系统阶跃响应状态,确定次数的控制环境较为稳定。选择预选的泵车臂架A作为位姿点的测试对象。在有约束、无约束情况下,通过跟踪抓取路径为引导,对各个关节的运行轨迹与位姿点进行定位分析,如图5~7所示。



(a)移动行为1



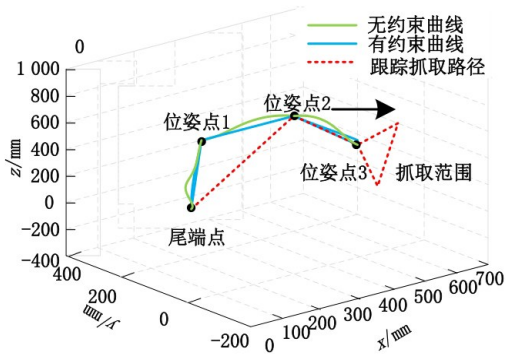
(b)移动行为1结果

图 5 仿真泵车臂架A关节移动行为1及结果

由图5~7可知,将跟踪抓取路径设置为关节运动的引导目标,当系统处于有约束和无约束2种状态时,本文算法对3种行为输出的轨迹基本相同,位姿点定位结果也精准重合,整体误差较为可控。该结果反映了ROS架构的实时调度与定位,和预设的MoveGroupInterface对象基本一致,泵车臂架在移动的过程中可以随时进行交互,可以更好地确保坐标



(a)移动行为 2

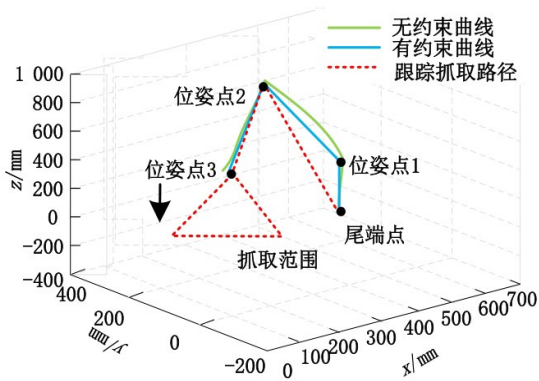


(b)移动行为 2 结果

图 6 仿真泵车臂架 A 关节移动行为 2 及结果



(a)移动行为 3

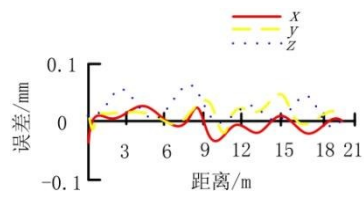


(b)移动行为 3 结果

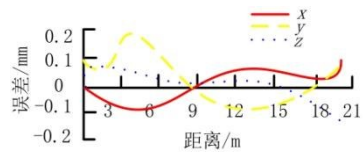
图 7 仿真泵车臂架 A 关节移动行为 3 及结果

系的稳定与真实,一定程度上可以更好地实现对运动轨迹的控制,降低整体的控制误差,具有强化位姿点定位精度的效果。

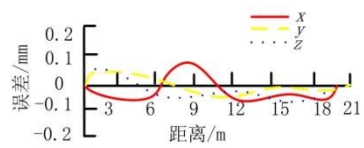
以笛卡尔空间补偿柔性机械臂轨迹跟踪控制方法(对比方法 1)、迭代学习+倒转下垂直多欠驱动关节机械臂控制策略(对比方法 2)作为对照组。选择多关节泵车臂架 B 参与实验,在位姿运动的空间之中,确定泵车臂架的 3 个可控的轴向,结合位姿点的定位,对比 3 种方法,测定在生成的逆运动移动轨迹中,轴向控制结果的对比,如图 8 所示。



(a)本文方法



(b)对比方法 1



(c)对比方法 2

图 8 空间逆运动轴向控制偏差结果

图 8 中,3 个轴向的坐标结果变化显示,本文所提算法下,轴向控制偏差较为逼近于 0,而对照组的 2 种方法控制偏差呈现出较大的波动,整体较高。说明多关节泵车臂空间逆运动时,确定位姿点之后,以 ROS 辅助目标跟踪,可以对非线性轨迹中的偏离点进行捕捉,通过多轴向对比核验及校正的方式,将偏离点对应的偏差控制到最低标准。

当多关节泵车臂处于空间逆运动时,按照目标跟踪轨迹,从 2 个方向对物品进行抓取,对比选定的 3 种方法,在水平方向和竖直方向 2 种测试条件下,

进行轨迹跟踪结果的探索,如图9所示。

从图9可以看出,在不同的运动时段下,基于水平方向和垂直方向,所提方法得出的误差为0.01~

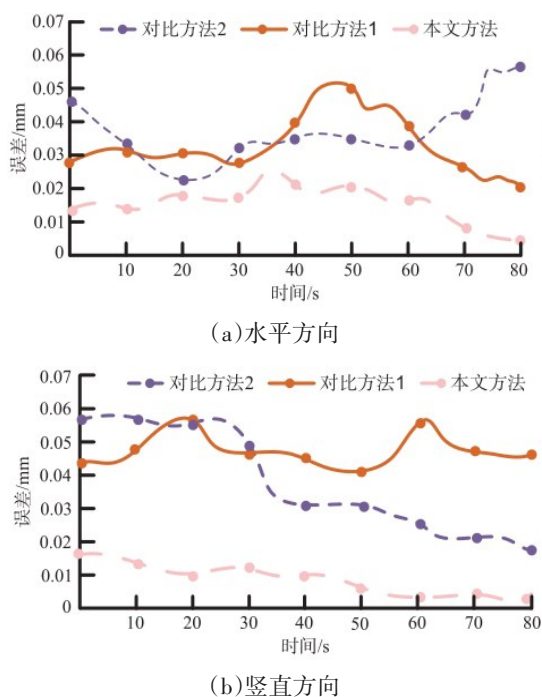


图9 轨迹跟踪控制误差结果

#### 参考文献:

- [1] 孟范伟,旷建,陈昊男,等.基于奇异摄动的柔性关节机械臂鲁棒控制[J].电机与控制学报,2024(10):193-200.
- [2] 冯适意,刘吉晓,李洋,等.基于关节优先级的冗余机械臂柔顺控制方法[J].机床与液压,2023(4):15-22.
- [3] 井荣枝,王延堂,陈小乐,等.空间约束下多关节机械臂末端柔顺控制方法[J].机械设计与制造,2024(11):122-126.
- [4] 马荣华,赵嵩.多自由度机械臂抓取过程关节角度的智能控制[J].机械设计与研究,2024(1):136-141.
- [5] 任金超,李佳昌,王平江,等.基于双插补轨迹控制的七关节机械臂避障[J].工程科学学报,2023(12):2085-2094.
- [6] 常凤筠,李佳昌,王平江.具有双插补避障功能的七关节机械臂控制系统研究[J].控制工程,2023(10):1834-1845.
- [7] 陈志环,戴雪刚,董加顺.双连杆柔性关节机械臂分数阶线性自抗扰控制[J].组合机床与自动化加工技术,2023(7):147-151.
- [8] 洪从鲁.基于电压控制策略的多关节机械臂的自适应模糊跟踪控制[J].机械设计,2023(6):39-44.
- [9] 葛大会,尤云祥,冯爱春.海流环境下二关节机械臂动力学建模及其跟踪控制[J].应用数学和力学,2023(6):666-678.
- [10] 刘刚,张红,王晓磊,等.末端速度操控的重载冗余机械臂运动学分析与仿真验证[J].液压与气动,2023(6):11-18.

0.03 mm,对照组的控制误差则高达0.03~0.07 mm,较难控制。融合相同的运动学轨迹,以位姿点的定位和轴向对空间的确定,加之ROS的测算对比,使用逆运动学求解器精准确定不同方向目标点与实际点是否保持一致,强化控制性能,以此来稳定提高运动的精准性。

### 3 结束语

以ROS为基础支撑,设计多关节泵车臂架轨迹逆运动学求解算法。通过泵车臂架位正交点相向关系的变化,确定该点运动轨迹的上限与下限,在该区间内以正交点映射表示位姿点,划定位姿点的运行空间,从水平与垂直2个方向调整位姿点的移动角度,避免出现偏转状态。完成逆运动的模态推演,同步设计ROS协同控制机制测算并调整轨迹坐标,进而输出控制最优解,促使当前的模态变化与控制效果更加接近理想状态,提高了多关节泵车臂的控制精度。

责任编辑:蒋召雪