

基于七次 B 样条曲线的输电线巡检 机器人无碰抓线轨迹规划^{*}

杨智勇 徐 博 熊宇宏 邓烈磊 杨盛泽

(湖北工业大学机械工程学院 武汉 430068)

摘 要: 针对越障时机器人各关节频繁启停引起机械臂运动不平稳、易与线路金具发生碰撞的问题,本文提出融合七次非均匀 B 样条曲线的无碰撞抓线越障轨迹规划方法。首先,建立机器人越障模型,描述其行走轮组件位姿与关节空间坐标间的映射关系,结合越障原理求取其关节空间的无碰撞区域,制定无碰撞中间路径点选取原则;其次,采用七次非均匀 B 样条曲线拟合中间路径点,构造高阶连续、边界可控的无碰撞越障轨迹;最后,利用 Adams/Matlab 软件联合仿真,结合 NSGA-II 求取机械臂末端时间与冲击最优越障轨迹。结果表明,越障抓线过程中机器人能避免与线路金具发生碰撞,且各关节的加速度与急动度变化曲线没有尖点和突变,相对于直线-多项式曲线混合轨迹插值方法,其伸缩关节加速度、急动度与轨迹平均急动度分别减少了 18.1%、83.01%与 78.32%,机器人运动更为平稳,提升了其越障过程的安全性。

关键词: 无碰越障;巡检机器人;抓线轨迹规划;B 样条曲线;时间与冲击优化

中图分类号: TP241;TN911 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Collision-free trajectory planning for power line inspection robots based on seventh-degree B-spline curves

Yang Zhiyong Xu Bo Xiong Yuhong Deng Lielei Yang Shengze

(School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: To address the issues of unstable motion of the robotic manipulator and frequent collisions with line fittings caused by frequent start-stop actions of the joints during obstacle negotiation, this paper proposes a collision-free line grasping trajectory planning method based on blended seventh-order non-uniform B-spline curves. First, an obstacle negotiation model for the robot is established, describing the mapping relationship between the pose of the walking wheel assembly and the joint space coordinates. The collision-free regions in the joint space are determined based on the principles of obstacle negotiation, and selection rules for collision-free intermediate path points are developed. Second, seventh-order non-uniform B-spline curves are employed to fit the intermediate path points, constructing a collision-free trajectory with high-order continuity and controllable boundaries. Finally, co-simulation using Adams and Matlab, combined with the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) algorithm, is performed to optimize the manipulator's end-effector time and impact for the obstacle negotiation trajectory. The results demonstrate that the proposed method effectively avoids collisions with line fittings during obstacle negotiation and line grasping. Additionally, the acceleration and jerk variation curves of all joints are smooth without sharp peaks or abrupt changes. Compared to the linear-polynomial trajectory interpolation method, the proposed approach reduces the acceleration, jerk, and average jerk of the telescopic joint by 18.1%, 83.01%, and 78.32%, respectively, resulting in smoother robot motion and enhanced safety during obstacle negotiation.

Keywords: collision-free obstacle negotiation; inspection robot; line grasping trajectory planning; B-spline curves; time and impact optimization

0 引 言

架空输电线路是电力传输系统中十分重要的一环,为

高效、可靠地传输高压电力,输电线路需定期检测和维护。随着电网检修对高质量、高可靠性的需求,利用智能巡检机器人取代传统人工实现远程无人巡检已是大势所趋^[1-2]。

收稿日期:2025-01-17

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52075152)、国家自然科学基金(51907055)项目资助

实际线路中靠近杆塔附近各类电力金具往往成群接连出现,机器人越障过程中动作平稳、实际轨迹与期望轨迹误差小,并且不能与沿线障碍物发生碰撞^[3]。现有巡检机器人越障方法大多基于自身结构特点,规划多种运动策略,自适应跨越沿线不同类型电力金具障碍物,但针对越障过程中机器人具体轨迹生成方法研究较少。为提高机器人越障性能,降低其各关节急动度,需对机器人越障轨迹生成方法深入研究^[4]。

对于关节空间下的轨迹插补方法,殷凤健等^[5]利用三次样条插值得到速度、加速度均连续的轨迹,但加速度不平滑,易导致误差积累。施祥玲等^[6]、陆佳皓等^[7]利用五次非均匀有理 B 样条曲线进行插补,得到加速度、加加速度均连续的平滑运动轨迹,但启停时刻加加速度不为 0,易导致关节在启停位置产生振动冲击,影响机器人工作安全与使用寿命。何斐凡^[8]提出了一种基于垂直距离估计的迭代七次 B 样条拟合方法、将最优轨迹规划问题公式为非线性问题,并使用自适应性搜索算法进行求解。Kucuk 等^[9]采用七次 B 样条曲线对机器人各运动关节位置进行插值,保证机械手轨迹的高阶连续,提高轨迹的平滑性,使得关节启停时刻机械手速度、加速度和加加速度皆可设定。

为寻找用于特定工作环境与需求的最优运动轨迹,轨迹优化方法也越来越受研究者的关注^[10]。常见的轨迹优化算法包括粒子群算法^[11]、神经网络^[12]、遗传算法^[13]等,南文虎等^[14]基于修型/射靶算法,矫正多重约束下的最大速度曲线,求取时间最优轨迹,但算法比较复杂且轨迹的冲击难以保证。董蓉等^[15]设计了一种非线性递减权值粒子群算法,提升了控制精度和自适应能力,赋予算法一定的学习能力和全局搜索性,提高了求解效率。谭励等^[16]采用多目标优化模型,使机械手运动过程中的动作姿态与时间在某种程度上达到综合最优。非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)是目前最为主流的多目标遗传算法之一,具有运行速度快,解

集收敛性好的优点。

本文以双臂轮式高压线缆巡检机器人为研究对象,结合 NSGA-II 算法,提出一种结合越障模型的七次非均匀 B 样条曲线的轨迹规划方法,生成无碰撞、平稳连续、低冲击、时间与冲击最优的越障抓线轨迹,实现机器人更加安全稳定、高效、快速地跨越沿线电力金具。

1 巡检机器人越障研究

1.1 巡检机器人越障策略

图 1 为巡检机器人关节机构示意图,如图 1 所示,巡检机器人具有行走轮、伸缩关节、1 号俯仰关节、1 号回转关节、错臂关节、2 号回转关节、2 号俯仰关节、伸缩关节,且双臂轮式巡检机器人为中心对称结构。

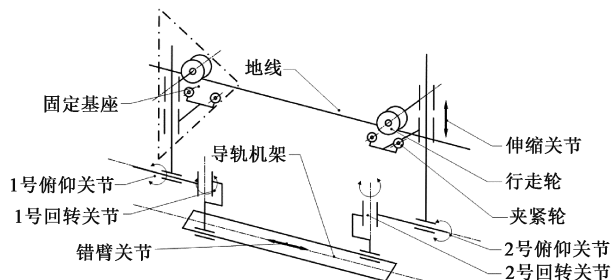


图 1 巡检机器人关节机构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of joint mechanism of inspection robot

图 2 为巡检机器人的越障流程图,其越障过程如图 2 所述:图 2(a)中机器人行走至障碍物前,前臂夹紧固定,视作机械臂基座;图 2(b)中后臂伸缩关节将行走轮举起,使其离开线缆;图 2(c)中调整俯仰关节,后臂行走轮向外脱离线缆平面;图 2(d)中错臂关节将后臂向前推进越过前臂与障碍物,此时后臂变为前臂;图 2(e)中俯仰关节归位,伸缩关节下降使行走轮回到线缆上;图 2(f)中另一臂重复上述步骤越过障碍物,此时前臂再变为后臂,巡检机器人完成越障动作并且回到初始状态。

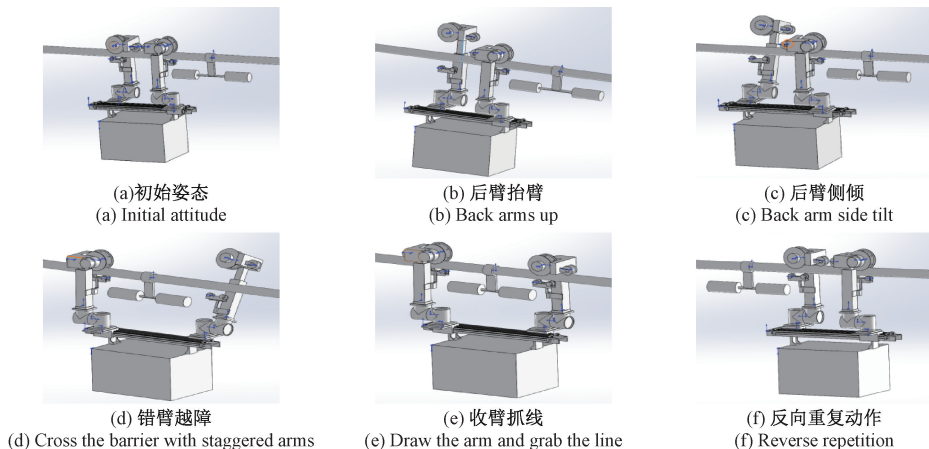


图 2 巡检机器人越障策略

Fig. 2 Obstacle crossing strategy of inspection robot

1.2 巡检机器人运动学模型

为获取越障时机器人行走轮组件在世界坐标系下的位姿,首先,结合行走轮组件与机器人基座、障碍物之间的位置关系,求解得出巡检机器人无碰撞关节空间;然后,当机器人确定障碍物类型及尺寸后,根据预设安全距离,从而得到一系列规划轨迹位置点。

图3为机器人D-H坐标系。机器人各关节杆件长度 a_{i-1} 、杆件扭角 α_{i-1} 、关节间距离 d_i 、关节扭角 θ_i 的D-H参数如表1所示。

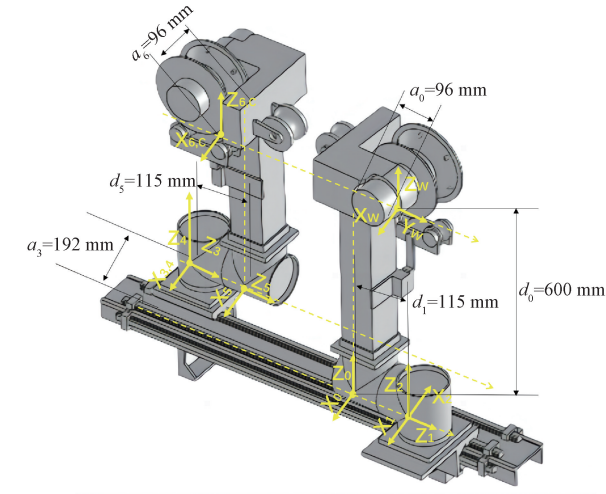


图3 巡检机器人D-H坐标系

Fig. 3 D-H coordinate system of inspection robot

表1 D-H连杆参数表

Table 1 D-H connecting rod parameter table

连杆 序号/W	$\theta_i /$ (°)	$d_i /$ mm	$a_{i-1} /$ mm	$\alpha_{i-1} /$ (°)	关节变量 范围/(°)
0	0	-600	96	0	固定
1	0	115	0	-90	-90~90
2	180	0	0	90	-180~180
3	180	-620	192	90	-625~625
4	0	0	0	90	-180~180
5	0	115	0	-90	-90~90
6	0	600	96	90	600~900

根据D-H坐标系及其参数,通过运动学公式求解越障时巡检机器人机械臂末端关节终点坐标系{6}相对于世界坐标系{W}的变换矩阵如式(1)所示。

$${}^W_6T = {}^W_0T {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)变换矩阵中各参数由式(2)详细计算而得。式(2)中, p_x 、 p_y 、 p_z 分别为机械臂末端位于世界坐标系的

坐标值 x 、 y 、 z 。详细推导过程如式(2)所示。

$$\begin{cases} s\theta_{2+4} = \sin(\theta_2 + \theta_4) \\ s\theta_i = \sin\theta_i \\ c\theta_i = \cos\theta_i \\ r_{11} = -s\theta_1 \cdot s\theta_5 - c\theta_5 \cdot (c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_4 - c\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_4) \\ r_{12} = s\theta_{2+4} \cdot c\theta_1 \\ r_{13} = c\theta_5 \cdot s\theta_1 - s\theta_5 \cdot (c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_4 - c\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_4) \\ r_{21} = -s\theta_{2+4} \cdot c\theta_5 \\ r_{22} = -c\theta_{2+4} \\ r_{23} = -s\theta_{2+4} \cdot s\theta_5 \\ r_{31} = -c\theta_1 \cdot s\theta_5 - c\theta_5 \cdot (s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_4 - s\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_4) \\ r_{32} = -s\theta_{2+4} \cdot s\theta_1 \\ r_{33} = c\theta_1 \cdot c\theta_5 - s\theta_5 \cdot (s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_4 - s\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_4) \\ p_x = 192 \cdot c\theta_1 \cdot c\theta_2 - 96 \cdot s\theta_1 \cdot s\theta_5 - 96 \cdot c\theta_5 \cdot (c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_4 - c\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_4) + d_3 \cdot c\theta_1 \cdot s\theta_2 + 115 \cdot c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot s\theta_4 + 115 \cdot c\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot c\theta_4 + d_6 \cdot (c\theta_5 \cdot s\theta_1 - s\theta_5 \cdot (c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_4 - c\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_4)) + 96 \\ p_y = 196 \cdot s\theta_2 - 115 \cdot c\theta_{2+4} - d_3 \cdot c\theta_2 - 96 \cdot s\theta_{2+4} \cdot c\theta_5 - d_6 \cdot s\theta_{2+4} \cdot s\theta_5 + 115 \\ p_z = d_6 \cdot (c\theta_1 \cdot c\theta_5 - s\theta_5 \cdot (s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_4 - s\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_4)) - 96 \cdot c\theta_1 \cdot s\theta_5 - 96 \cdot c\theta_5 \cdot (s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_4 - s\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_4) - 192 \cdot c\theta_2 \cdot s\theta_1 - d_3 \cdot s\theta_1 \cdot s\theta_2 - 115 \cdot s\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot s\theta_4 - 115 \cdot s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot c\theta_4 - 600 \end{cases} \quad (2)$$

1.3 巡检机器人越障轨迹规划

为求机器人各关节无碰越障过程中各个节点,建立障碍物与行走轮物理模型,将巡检机器人行走轮组件视为一个半径为 R ,长度为 K 的圆柱体,将障碍物简化为长宽高分别为 L 、 B 、 H 的长方体,机器人越障模型如图4所示。

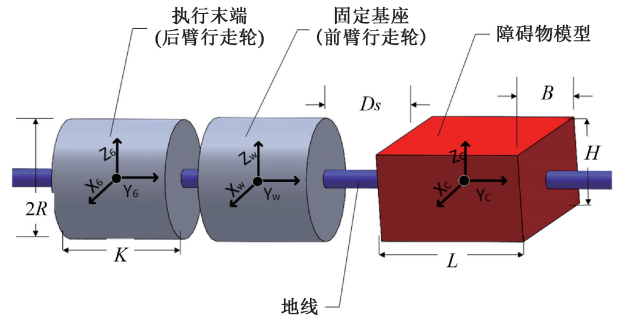


图4 机器人越障模型

Fig. 4 Robot obstacle crossing model

为保证机械臂不与障碍物发生碰撞,根据本文障碍物与行走轮的位置空间几何模型,对其行走轮组、基座、障碍物任意一坐标点作出位置约束,行走轮组件模型上任意一点 P_A 在坐标系 $\{6\}$ 下的齐次坐标记为 ${}^6P_A = [x_A, y_A, z_A, 1]^T$, 需满足式(3)中位置限定。

$$\begin{cases} x_A \leq R \cdot \cos\varphi \\ -\frac{K}{2} \leq y_A \leq +\frac{K}{2} \\ z_A \leq R \cdot \sin\varphi \end{cases} \quad (\varphi \in [0, 2\pi]) \quad (3)$$

机器人基座上任意一点 ${}^wP_B = [x_B, y_B, z_B, 1]^T$ 需满足式(4)中位置限定。

$$\begin{cases} x_B \leq R \cdot \cos\varphi \\ -\frac{K}{2} \leq y_B \leq +\frac{K}{2} \\ z_B \leq R \cdot \sin\varphi \end{cases} \quad (\varphi \in [0, 2\pi]) \quad (4)$$

联立式(1)与式(3),将行走轮组件位于坐标系 $\{6\}$ 下的点 P_A 在世界坐标系 $\{W\}$ 的齐次坐标表达如式(5)所示。

$${}^wP_A(\rho) = {}^wT(\theta_1, d_2, \theta_3, \theta_4, d_5) \cdot {}^6P_A = \begin{bmatrix} r_{11}x_A + r_{12}y_A + r_{13}z_A + p_x \\ r_{21}x_A + r_{22}y_A + r_{23}z_A + p_y \\ r_{31}x_A + r_{32}y_A + r_{33}z_A + p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,行走轮组件上任意点 ${}^wP_A = [p_{Ax}, p_{Ay}, p_{Az}, 1]^T$ 与机器人在某一时刻下的位姿 $\rho(\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4, \theta_5, d_6)$ 一一对应。

机器人基座 θ_1 与障碍物位置相对固定,且在世界坐标系下障碍物位置不发生改变,因此,求得障碍物中心点在 $\{W\}$ 坐标系下的齐次坐标如式(6)所示。

$${}^wP_{C0} = [0, (K+L)/2 + D_s, 0, 1]^T \quad (6)$$

由图 4 可知,根据圆柱体尺寸约束,金具障碍物上任意一点 ${}^wP_C = [x_C, y_C, z_C, 1]^T$ 需满足式(7)位置约束条件。

$$\begin{cases} -\frac{B}{2} \leq x_C \leq \frac{B}{2} \\ D_s + \frac{K}{2} \leq y_C \leq D_s + \frac{K}{2} + L \\ -\frac{H}{2} \leq z_C \leq \frac{H}{2} \end{cases} \quad (\varphi \in [0, 2\pi]) \quad (7)$$

本文将越障时行走轮与障碍物的安全距离 D_s 设置为 50 mm。联立式(3)、(4)与(5)可得机器人基座上任意一点 wP_B 与机器人行走臂末端上任意一点 wP_A 之间的最小距离如式(8)所示。

$$D_B = |{}^wP_A - {}^wP_B| = \sqrt{(p_{Ax} - x_B)^2 + (p_{Ay} - y_B)^2 + (p_{Az} - z_B)^2} \quad (8)$$

联立式(3)、(4)与(5)可得机器人基座上任意一点 wP_C 与机器人行走臂末端上任意一点 wP_A 之间的最小距离如式(9)所示。

$$D_C = |{}^wP_A - {}^wP_C| =$$

$$\sqrt{(p_{Ax} - x_C)^2 + (p_{Ay} - y_C)^2 + (p_{Az} - z_C)^2} \quad (9)$$

机器人确定前方障碍物类型且到达越障初始位姿后,因行走轮组件尺寸参数从与障碍物尺寸参数已确定,故 D_s 仅与机器人的位姿 $\rho(\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4, \theta_5, d_6)$ 有关,结合机器人的关节范围约束表 1,得到机器人无碰越障时各关节的几何约束条件集合 $cfps(\rho)$, 如式(10)所示。

$$\begin{cases} D_B(\rho) \geq D_s \\ D_C(\rho) \geq D_s \\ -\frac{\pi}{2} \leq \theta_1 \leq \frac{\pi}{2} \\ -\pi \leq \theta_2 \leq \pi \\ -620 \leq d_3 \leq 620 \\ -\pi \leq \theta_4 \leq \pi \\ -\frac{\pi}{2} \leq \theta_5 \leq \frac{\pi}{2} \\ 600 \leq d_6 \leq 850 \end{cases} \Rightarrow cfps(\rho) \quad (10)$$

其中,在 $\rho_j = [\theta_{1,j}, \theta_{2,j}, d_{3,j}, \theta_{4,j}, \theta_{5,j}, d_{6,j}]^T$ 的每个元素都表示机器人未与障碍物模型产生碰撞的一个位姿或一组关节值。当机器人完成越障抓线轨迹规划后,将该轨迹上各点位姿所对应的关节值 θ, d 代入式(10),若均属于集合 $cfps(\rho)$ 约束内,则该轨迹即为一条无碰撞越障轨迹。

以悬垂线夹为例,结合上述的越障策略与越障模型,求解越障过程中机器人行走轮组件跨越障碍物的中间路径点。图 5 为中间路径点空间位置示意图,如图所示,以棕色透明的圆柱体与长方体分别表示机械臂固定基座和障碍物模型,剩余 8 个圆柱体分别表示机械臂从初始路径点 m_1 到结束路径点 m_8 之间的 8 个中间路径点。

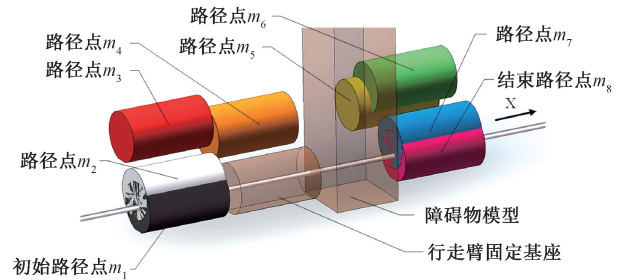


图 5 中间路径点空间位置示意图

Fig. 5 Spatial location diagram of intermediate waypoints

为计算机器人越障过程中各关节实际变换数值,将图 5 沿 Z 轴正方向向下俯视变换为中间路径点空间位置简图,如图 6 所示。

对于机器人跨越悬垂线夹,仅需 d_3, θ_5, d_6 变换即可完成越障抓线动作,当机械臂位于路径点 m_1, m_2 时,机器人执行脱线动作,其中 d_3 保持不变;设置运动到 m_2 点后机械臂进行抬升,随着行走轮组件到达路径点 m_3 时,伸缩关节将机械臂的下端抬升至固定基座顶部之上,其前端恰好与固定基座的末端处于同一平面,在行走轮组件前端相继运

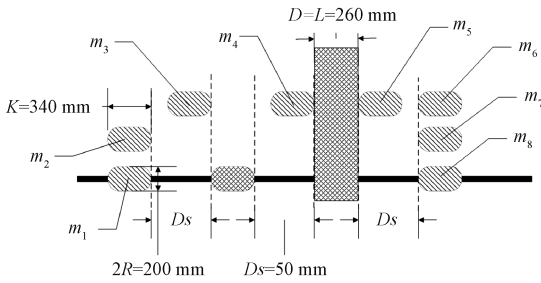


图6 中间路径点空间位置简图

Fig. 6 Spatial position diagram of intermediate waypoints

动至障碍物末端平面与前端平面的时刻(即路径点 m_4 、 m_5), 此时仅有错臂关节处于活动状态。随后, 机械臂需继续向前运动一个安全距离 D_s , 以确保安全无虞, 即可执行收臂抓线动作。

上述越障过程沿图5的从Y轴负方向向正方向俯视可得机器人侧面越障时关键运动点空间位置图, 如图7所示。

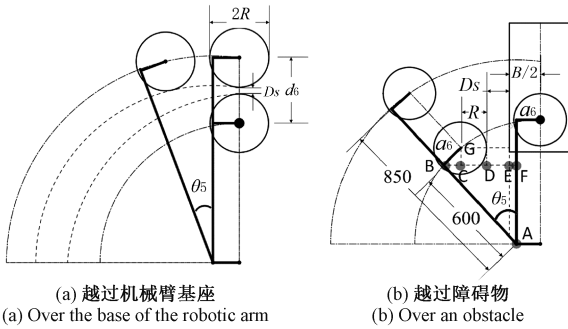


图7 关键运动点空间位置图

Fig. 7 Spatial location diagram of key moving points

结合图7(a)中机械臂位置及与周围电力金具设定的安全距离, 计算得 $d_6 = 850$ mm 时, θ_5 在关节变量范围内变化都不会使机械臂与周围电力金具发生碰撞; 如图7(b)所示, 行走轮组件跨越障碍物时(机械臂从路径点 m_4 到 m_5), 当DE长度大于安全距离 D_s 时, θ_5 的值满足越障条件, 为保障机械臂在任意伸缩长度下都不会发生碰撞, 取AB长度为最小值 600 mm, BG是关节连杆6, 其长度为 a_6 , 由几何变换可知 $\angle GBC = \angle A = \theta_5$, 故BC长度为 $a_6 \cdot \cos\theta_5$, CD长度为 R , EF长度为 $B/2 - a_6$, 根据三角函数求得 θ_5 如式(11)所示。

$$\theta_5 = \text{atan2}(R + D_s + B/2 - a_6, \pm \sqrt{(600)^2 + (a_6)^2 + (R + D_s + B/2 - a_6)^2}) - \text{atan2}(-a_6, 600) \quad (11)$$

机械臂跨越悬垂线夹时各运动点的关节值如表2所示。

2 融合七次非均匀B样条曲线的越障轨迹规划方法

当确定各运动点机械臂关节值后, 对其各离散点进行

表2 中间路径点各关节变量参数表

Table 2 Parameter table of each joint variable at the intermediate waypoint

关节 节点	$\theta_1 /$ ($^\circ$)	$\theta_2 /$ ($^\circ$)	$d_3 /$ mm	$\theta_4 /$ ($^\circ$)	$\theta_5 /$ mm	$d_6 /$ mm
m_1	0	180	-620	0	0	600
m_2	0	180	-620	0	0	650
m_3	0	180	-570	0	-10	850
m_4	0	180	-180	0	-30	850
m_5	0	180	420	0	-30	850
m_6	0	180	470	0	-10	850
m_7	0	180	470	0	0	650
m_8	0	180	470	0	0	600

拟合, 构建出一条连续的运动轨迹, 指导巡检机器人完成越障动作。由于B样条曲线具有局部支撑、路径平滑、易于修改等优点, 其凸包性质有利于满足其运动约束, 故本文使用非均匀B样条曲线对关节轨迹进行插值, 同时采用高阶样条曲线插值保证机器人越障轨迹时速度、加速度、加加速度的连续, 使运动更为平滑。

2.1 七次非均匀样条曲线的关节轨迹构造

K次非均匀B样条曲线计算公式如式(12)所示。

$$q(u) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,k}(u) = \sum_{j=i-k}^i P_j B_{j,k}(u), u \in [u_i, u_{i+1}] \quad (12)$$

其中, $q(u)$ 为 u 时刻的关节位置向量, P_i 是控制顶点向量, $B_{i,k}(u)$ 是第 i 个 K 次B样条基函数。根据德布尔-考斯特递推式求得基函数表达式, 如式(13)所示。

$$B_{i,k}(u) = \begin{cases} 1, u_1 \leq u \leq u_{i+1} & k=1 \\ 0, \text{其他} & k=1 \\ \frac{u-u_i}{u_{i+k-1}-u_i} B_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k}-u}{u_{i+k}-u_{i+1}} B_{i+1,k-1}(u), & k \geq 2 \\ \text{规定: } \frac{0}{0} = 0 & \end{cases} \quad (13)$$

联立式(12)和(13), K次非均匀B样条曲线定义域上某一点的 r 阶导矢如式(14)所示。

$$\begin{cases} q^r(u) = \sum_{j=i-k+r}^i p_j^r B_{j,k-r}(u) \\ p_j^r = \begin{cases} p_j, & l=0 \\ (k+1-l) \frac{p_j^{l-1} - p_{j-1}^{l-1}}{u_{j+k+1-l} - u_j}, & l=1, 2, \dots, r; \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

最终, 结合式(12)、(13)、(14)得出时刻 $u \in [u_k, u_{k+1}]$ 处的速度 $q'(u)$ 、加速度 $q''(u)$ 、加加速度 $q'''(u)$ 如式(15)所示。

$$\begin{cases} q'(u) = \sum_{j=i-k+1}^i p_j^1 B_{j,k-1}(u) \\ q''(u) = \sum_{j=i-k+2}^i p_j^2 B_{j,k-2}(u) \\ q'''(u) = \sum_{j=i-k+3}^i p_j^3 B_{j,k-3}(u) \end{cases} \quad (15)$$

本文采用七次非均匀 open B 样条曲线,因此共 $n+1$ 个节点, u_i 是一组非递减序列的连续变化值,定义其两端的重复度为 $k+1=8$,利用表 2 中机械臂各关节运动需经过的离散运动点序列,定义样条曲线的走向与界限范围,将表 2 中所有关节参记为 $Q_i(i=0,1,2,\cdots,n)$ 代入式(15)中,求得式(16)。

$$\begin{cases} u_i = u_{i-1} + \frac{|\Delta t_{i-k-1}|}{\sum_{j=0}^{n-1} |\Delta t_j|} \\ i = k+1, \cdots, n+k-1 \end{cases} \quad (16)$$

节点 u_i 对应机器人越障时运动点 $P_i, u \in [u_7, u_{n+1}] = [0, 1]$, 将 u 归一化,其内节点值如式(17)所示。

$$\begin{cases} u_0 = u_1 = \cdots = u_7 = 0 \\ u_{n+1} = u_{n+2} = \cdots = u_{n+7+1} = 1 \end{cases} \quad (17)$$

将曲线定义域 $u \in [u_7, u_{n+1}]$ 内的节点值带入式(12),

得到满足插值条件的 $n+1$ 个方程,获得式(18)。

$$q(u_{i+k}) = \sum_{j=i}^{i+k} P_j B_{j,k}(u_{i+k}), i = 0, 1, \cdots, n \quad (18)$$

求解 7 次 B 样条曲线的控制顶点向量一共需要 $n+7$ 个附加方程,结合巡检机器人越障特性,将起点与终点的速度 v_s, v_f 、加速度 a_s, a_f 、加加速度 j_s, j_f 设置为 0(越障前后各关节应处于静止状态),带入式(15)即可得到余下所需的 6 个附加方程。联立式(18)求得 $n+1$ 个方程,即可得到第 m 关节的控制顶点向量 ${}^m P$ 。其矩阵方程表达式如式(19)所示。

$${}^m p = A_N^{-1} q \quad (19)$$

2.2 运动学约束

为提高机械臂运行平稳性,将机器人越障时各关节的控制顶点向量进行最大值约束, ${}^m p_j^1, {}^m p_j^2, {}^m p_j^3$ 分别是第 m 关节的非均匀 B 样条速度、加速度和加加速度轨迹曲线的第 j 个控制顶点向量。其具体方程如式(20)所示。

$$\begin{cases} \max\{|{}^m p_j^1|\} \leqslant {}^m v_{\max}, j = 1, 2, \cdots, n+k+1 \\ \max\{|{}^m p_j^2|\} \leqslant {}^m a_{\max}, j = 2, 3, \cdots, n+k+1 \\ \max\{|{}^m p_j^3|\} \leqslant {}^m j_{\max}, j = 3, 4, \cdots, n+k+1 \end{cases} \quad (20)$$

机器人越障时各关节满足上述约束条件下,根据实际越障情况,将各关节的运动学约束限定如表 3 所示。

表 3 各关节运动学约束
Table 3 Kinematic constraints of each joint

运动约束关节 q_i	$v_{\max} ((^\circ/\text{mm}) \cdot \text{s}^{-1})$	$a_{\max} ((^\circ/\text{mm}) \cdot \text{s}^{-2})$	$j_{\max} ((^\circ/\text{mm}) \cdot \text{s}^{-3})$
一号俯仰关节 q_1	100	40	10
一号回转关节 q_2	100	40	10
错臂关节 q_3	200	60	20
二号回转关节 q_4	100	40	10
二号俯仰关节 q_5	100	40	10
伸缩关节 q_6	60	20	20

2.3 基于 NSGA-II 算法的时间与冲击最优越障抓线轨迹

以轨迹单次运动时间 T 与轨迹平均急动度 \bar{J} 为优化目标,通过 NSGA-II 算法求解出越障抓线轨迹的 Pareto 最优解集,该解集内任意一个解都无法在提升一个优化目标的同时不削弱其他优化目标,根据实际需求从中选取一个适宜解,得到巡检机器人最终的越障运动轨迹。轨迹平均急动度 \bar{J} 的表达式如式(21)所示。

$$\bar{J} = \left(\sum_{q=1}^6 \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T j_q^2 dt} \right) / i, q \text{ 表示关节编号}, i \text{ 为关节数量} \quad (21)$$

为获得机器人跨越绝缘子串的时间与冲击最优越障运动轨迹点,将 NSGA-II 算法中设置种群总个数为 100,交配池规模为 50,交叉概率与变异概率分别为 0.7 和 0.2,最大进化代数 200,总迭代次数为 30 次,取两位置点间的时间间隔最大为 8 s,步长设置为 0.05 s,将权重分配为 $T : \bar{J} =$

6 : 4, 并对七次非均匀 B 样条曲线构建的越障轨迹集合与 Pareto 前沿面曲线进行拟合,具体拟合曲线如图 8 所示。

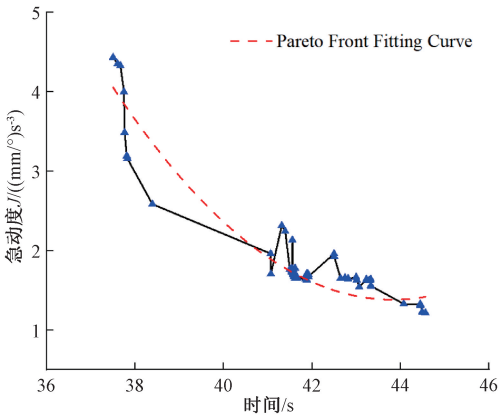


图 8 Pareto 前沿面

Fig. 8 Pareto front surface

由图 8 可知,随着时间不断增大,点 P1 右侧点急动度急剧下降,下降至 P3 点时,右侧点的急动度明显下降速率有所降低,综合考虑时间与急动度,因此将最优抓线轨迹点定为 P3,机械臂在此轨迹下运动点 $m_1 \sim m_8$ 的时间节点向量 t_p 与时间间隔向量 t_i 分别为: $t_p = [0 \ 6.4 \ 13.1 \ 18.3 \ 25.8 \ 30.3 \ 36.45 \ 41.05]$; $t_i = [6.4 \ 6.7 \ 5.2 \ 7.5 \ 4.5 \ 6.15 \ 4.6]$ 。

即可求得机器人跨越绝缘子串的时间与冲击最优越障运动轨迹。

3 巡检机器人越障仿真分析

使用 Adams/Simulink 联合仿真巡检机器人跨越绝缘子串过程,整个越障动作如图 9 所示,以初始姿态两机械臂相对障碍物位置来形容前后臂。

本文利用 7 次非均匀 B 样条曲线特性,将关节运动始末急动度设置为 0,求得越障轨迹各关节的速度 v 、加速度 a 、加加速度(急动度) j 和位置 p 变化曲线如图 10 所示。

由图 10(a)中各关节位置变换曲线可知,基于 NSGA-II 算法融合七次非均匀 B 样条曲线的关节轨迹曲线能连续、平滑地经过 $m_1 \sim m_8$, 实现无碰越障,验证了该方法的正确性。由图 10(b)~(d)中可知,各关节加速度变化光滑连续,没有畸变,关节的启停加速度都为 0,因此,运动开始

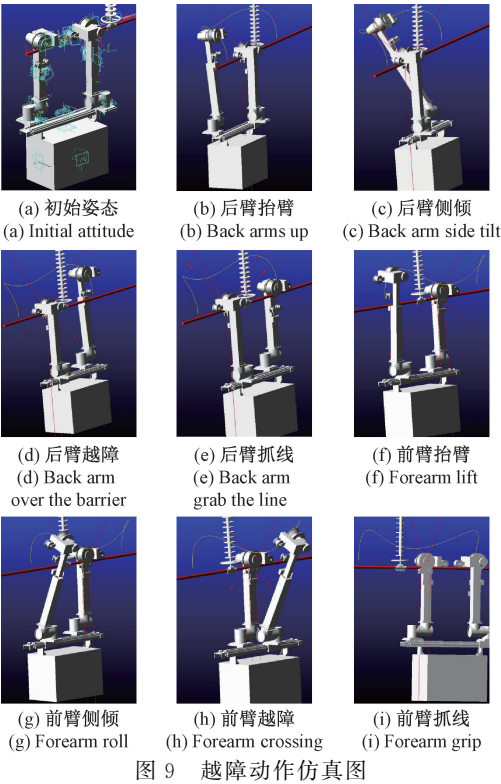


Fig. 9 Simulation diagram of obstacle crossing action

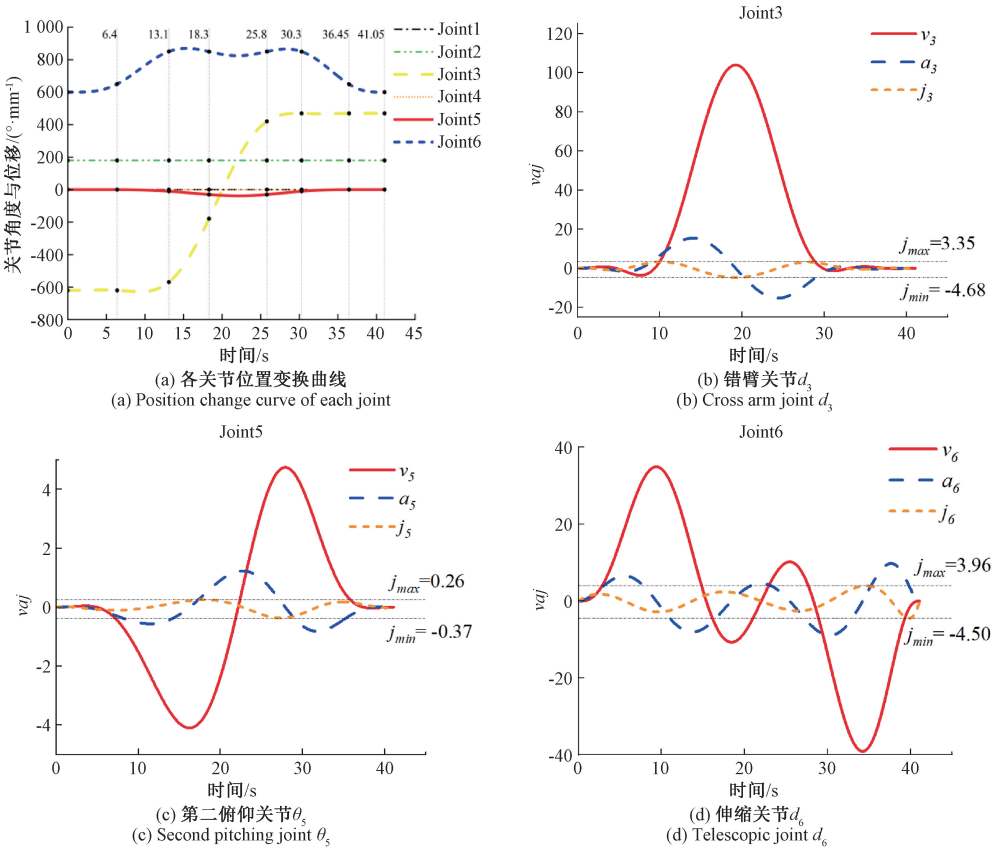


图 10 各关节的运动变化曲线
Fig. 10 Motion change curve of each joint

时关节力矩为 0, 无需提供较大的启动力矩, 能平缓地开始运动, 有利于提高轨迹跟踪精度; 运动结束时机械臂各关节力矩也为 0, 能有效消除关节的残余动能, 减少机器人振动; 同时, 整个运动轨迹中各关节最大急动度不超过 $5 ((\text{mm}/^\circ) \cdot \text{s}^{-3})$, 能够有效地避免柔性冲击, 降低机器人零部件的疲劳损坏风险。

在运动点、时间条件相同条件下将机械臂末端伸缩关节用七次非均匀 B 样条曲线轨迹规划方法 (b-spline) 与工程中常用到的直线、多项式曲线混合轨迹规划方法 (combine) 的速度 v 、加速度 a 、急动度 j 运动指标对比分析, 如图 11 所示。

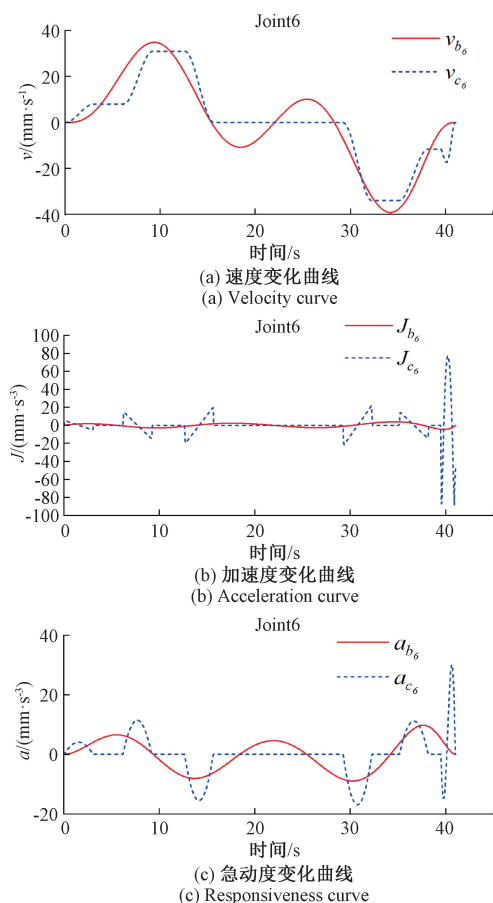


图 11 运动指标分析图

Fig. 11 Analysis diagram of movement index

如图 11(a) 所示, 两种方法所生成轨迹的速度变化曲线都是连续且平滑的, 混合轨迹的速度变化快慢与加减速时间 t_{acc} 有关; 如图 11(b) 所示, 混合轨迹的加速度 a_{c6} 仅在曲线拟合段发生变化, 且变化连续、平滑, 尽管已尽量取较大的时间范围, 但其加速度变化范围仍达到了 $-16.95 \sim 30.08 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$, 峰峰值为 $47.03 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$, 标准差为 $6.55 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$, 而 B 样条曲线轨迹的加速度变化范围仅为 $-8.95 \sim 9.77 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$, 峰峰值为 $18.72 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$, 标准差为 $5.36 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$, 同比峰峰值减少了 60.2%, 标准差减少

了 18.1%; 如图 11(c) 所示, 混合轨迹规划方法所生成轨迹的急动度变化曲线中急动度已经超出了规定范围, 达到了 $-88.81 \sim 77.12 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-3}$, 特别是在动作即将结束时由于加减速时间仅 $t_{acc}/2$, 标准差为 $12.54 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-3}$, 轨迹平均急动度 \bar{j} 为 $7.89 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-3}$ 。

将图 11 与图 10(d) 的变化曲线进行对比, 可以看出融合 7 次非均匀 B 样条曲线规划方法的伸缩关节越障抓线轨迹连续、光滑且边界可控, 其变化范围仅为 $-4.5 \sim 3.96 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-3}$, 标准差为 $2.13 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-3}$, 减少了 83.01%, 轨迹平均急动度 \bar{j} 为 $1.71 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-3}$, 减少了 78.32%, 相比于混合轨迹规划方法, 在满足运动约束的同时具有更高的平稳性, 在运行时急动度接近于 0, 能减少因柔性冲击积累导致的机器人疲劳损坏。

4 结 论

针对双臂轮式巡检机器人沿高压输电电缆越障过程中复杂动作规划与平稳性挑战, 本文提出了一种越障抓线轨迹规划方法。首先, 该方法通过对机器人构型的简化, 将其越障动作等效为六自由度串联机械臂的抓线动作, 并构建了相应的运动学模型, 精确地描述了机器人位姿与各关节值的转换关系; 其次, 结合运动学模型和越障原理, 深入分析了机器人无碰关节空间, 并制定了针对不同障碍物的中间路径点选取原则, 为机器人的越障行为提供了有效指导。此外, 针对越障过程中可能出现的关节频繁启停问题, 本文提出了一种融合 7 次非均匀 B 样条曲线的轨迹插值方法, 并基于 NSGA-II 算法求取了最优越障轨迹; 开展巡检机器人越障仿真实验与分析, 验证了所提轨迹规划方法的有效性。但是, 本文仅针对机器人在越障过程中的轨迹规划问题进行了研究, 且在实际应用中, 机器人还需要完成抓取、检测等其他功能, 因此未来将需要进一步研究如何将轨迹规划与其他功能模块进行有效集成, 以提高机器人的整体性能。

参考文献

- [1] ALHASSAN A B, ZHANG X, SHEN H, et al. Power transmission line inspection robots: A review, trends and challenges for future research [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 118: 105862.
- [2] 李刚, 智宏鑫. 电力巡检机器人路径规划方法综述[J]. 电力科学与工程, 2024, 40(4): 1-11.
LI G, ZHI H X. Review of path planning methods for electric power inspection robots [J]. Electric Power Science and Engineering, 2024, 40(4): 1-11.
- [3] 王相虎, 王宪伦, 武庆松. 移动机械臂运动规划方法研究综述[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 1-8.
WANG X H, WANG X L, WU Q S. Review of motion planning methods for mobile manipulators [J].

- Computer Measurement and Control, 2024, 32(11): 1-8.
- [4] 刘宜成, 杨迦凌, 梁斌, 等. 基于强化学习的多段连续体机器人轨迹规划[J]. 电子测量技术, 2024, 47(5): 61-69.
- LIU Y CH, YANG J L, LIANG B, et al. Trajectory planning of multi-stage continuum robot based on reinforcement learning[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(5): 61-69.
- [5] 殷凤健, 梁庆华, 程旭, 等. 基于时间最优的机械臂关节空间轨迹规划算法[J]. 机械设计与研究, 2017, 33(5): 12-15.
- YIN F J, LIANG Q H, CHENG X, et al. Research on mechanical arm joint space trajectory planning algorithm based on optimal time[J]. Machine Design and Research, 2017, 33(5): 12-15.
- [6] 施祥玲, 方红根, 郭为忠. 基于五次 NURBS 的机械臂时间-能量-平滑性多目标轨迹优化[J]. 机械设计与研究, 2017, 33(1): 12-16.
- SHI X L, FANG H G, GUO W ZH. Time-energy-jerk optimal trajectory planning of manipulators based on quintic NURBS[J]. Machine Design and Research, 2017, 33(1): 12-16.
- [7] 陆佳皓, 平雪良. 一种机械臂最优时间-冲击轨迹优化算法[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(10): 1548-1554.
- LU J H, PING X L. Time-jerk-optimal trajectory planning algorithm for manipulators[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(10): 1548-1554.
- [8] 何斐凡. 基于 B 样条曲线拟合和模糊控制的机械臂时间最优轨迹规划[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2023.
- HE F F. Time-optimal trajectory planning of manipulator based on b-spline curve fitting and fuzzy control [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2023.
- [9] KUCUK S. Optimal trajectory generation algorithm for serial and parallel manipulators[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 48: 219-232.
- [10] 滕儒民, 李玉鑫, 王欣, 等. 基于凸优化的举高消防车时间最优轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 138-144.
- TENG R M, LI Y X, WANG X, et al. Time optimal trajectory planning of elevating fire truck based on convex optimization [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 138-144.
- [11] ZHANG J X, ZHANG J X, ZHANG Q, et al. Obstacle avoidance path planning of space robot based on improved particle swarm optimization [J]. Symmetry, 2022, 14(5): 938.
- [12] ZHANG X F, XIAO F, TONG X L, et al. Time optimal trajectory planing based on improved sparrow search algorithm[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 10: 852408.
- [13] ABU-DAKKA F J, VALERO F J, SUNER J L, et al. A direct approach to solving trajectory planning problems using genetic algorithms with dynamics considerations in complex environments[J]. Robotica, 2015, 33(3): 669-683.
- [14] 南文虎, 郑海霞, 叶伯生. 基于修型/射靶算法的工业机器人固定路径时间最优轨迹规划[J]. 机器人, 2016, 38(2): 233-240.
- NAN W H, ZHENG H X, YE B SH. Time-optimal trajectory planning based on the pruning/shooting algorithm for industrial robot along specified paths[J]. Robot, 2016, 38(2): 233-240.
- [15] 董蓉, 刘放, 聂少卿, 等. 非线性递减权值 PSO 优化下的 LQR 轨迹跟踪研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(4): 44-50.
- DONG R, LIU F, NIE SH Q, et al. Research on LQR trajectory tracking under nonlinear decreasing weight PSO optimization[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(4): 44-50.
- [16] 谭励, 余煌, 杜小强, 等. 基于稳定夹持的类球形果实采摘末端执行器优化设计与试验[J/OL]. 机械工程学报, 1-13 [2025-02-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20250217.1522.027.html>.
- TAN L; YU H; DU X Q, et al. Optimal design and experiment of picking end-effector for spheroid fruits based on stable grasping [J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 1-13 [2025-02-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20250217.1522.027.html>.

作者简介

杨智勇(通信作者), 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为机器人技术、农机具自主移动平台。

E-mail: yzy017@126.com

徐博, 硕士研究生, 主要研究方向为机电一体化。

E-mail: xyh010518@126.com