

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250267

面向输电线路安全运维的机器人轨迹规划与控制策略研究

花国祥^{1,2}, 尹书哲³, 潘莫寂³, 郑兆睿², 黄兴², 赵海森¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 无锡学院自动化学院, 江苏 无锡 214105;
3. 南京信息工程大学自动化学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 耐张线夹螺栓松动是高压输电线路中金具脱落、电弧放电等安全隐患的诱因之一。针对现有输电线路巡检机器人螺栓紧固作业效率和操作精度均较低等问题, 提出了一种改进的轨迹规划和轨迹跟踪控制方法。首先, 通过3-5-3多项式插值进行轨迹规划, 引入“速度暂停”机制、融合Levy飞行等多策略改进粒子群算法对轨迹进行优化, 实现兼具轨迹时间最短与运动平滑性的规划。然后, 设计了一种全局非奇异终端滑模控制结合超螺旋算法的控制器。经仿真验证, 该方法在提升系统响应速度的同时抑制抖振。最后, 实物实验进一步验证所提轨迹规划与控制方案, 提高了输电线路机器人螺栓紧固作业效率和跟踪精度。

关键词: 输电线路机器人; 轨迹规划; 多策略改进粒子群算法; 轨迹跟踪控制; 滑模控制

Research on trajectory planning and control strategy for transmission line inspection robots aimed at safe operation and maintenance

HUA Guoxiang^{1,2}, YIN Shuzhe³, PAN Moji³, ZHENG Zhaorui², HUANG Xing², ZHAO Haisen¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. School of Automation, Wuxi University, Wuxi 214105, China; 3. School of Automation,
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Loose bolts in tension clamps are among the major causes of safety hazards such as hardware detachment and arc discharge in high-voltage transmission lines. To address the low efficiency and precision of bolt-tightening operations performed by existing transmission line inspection robots, an improved trajectory planning and tracking control method is proposed. First, trajectory planning is carried out using a 3-5-3 polynomial interpolation approach. A “velocity pause” mechanism is introduced, and the trajectory is optimized using a multi-strategy improved particle swarm algorithm incorporating Levy flight, achieving both minimal trajectory time and smooth motion. Then, a controller combining global nonsingular terminal sliding mode control with a super-twisting algorithm is designed. Simulation results verify that the proposed method improves system response speed while effectively suppressing chattering. Finally, the proposed trajectory planning and control scheme is further verified through physical experiments, demonstrating significant improvements in operation efficiency and tracking accuracy of transmission line robots during bolt-tightening tasks.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177041).

Key words: transmission line robot; trajectory planning; multi-strategy improved particle swarm optimization; trajectory tracking control; sliding mode control

0 引言

高压输电线路耐张线夹螺栓松动会给电力系统带来安全隐患^[1], 过去通常采用人工带电检修方式, 危险大、效率低下。高压输电线路带电作业机器人

的出现消除了带电作业人身隐患、提高了作业效率^[2-5], 为电力系统检修提供了新的方案。但是由于轨迹时间长、控制精度低和工作效率低等问题, 螺栓紧固作业实际效果并不理想^[6]。

传统基于多项式插值的轨迹规划方法虽能保证轨迹平滑性, 但其时间优化过程高度依赖参数化模型的构建与高效求解策略^[7]。近年来, 学者们针对

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177041)

轨迹规划的时间优化问题提出了多种智能算法改进方案。文献[8]通过改进麻雀搜索算法优化 3-5-3 多项式插值的时间参数,有效缩短了机械臂循环周期;文献[9]将哈里斯鹰算法与五次多项式结合,提升了动态环境下的求解鲁棒性;文献[10]采用模拟退火算法优化粒子群算法(particle swarm optimization, PSO),在轨迹规划中避免陷入局部最优解。文献[11]提出改进粒子群(improved particle swarm optimization, IPSO)算法提升了三次样条曲线的时间优化效率;文献[12]通过融合鲸鱼优化算法提升了对 5 阶 B 样条曲线插值的参数搜索能力。然而,现有研究仍面临算法早熟收敛、对参数设置高度敏感及多维约束下搜索效率低等问题,制约了其在轨迹规划中的应用。

在轨迹跟踪控制方面,滑模控制因其对外部干扰具有较强的鲁棒性^[13-15],设计灵活等优点被广泛应用于机械臂轨迹跟踪控制^[16-18]。终端滑模^[19]的提出解决了线性滑模的渐进收敛问题,但是在到达滑模面的过程会出现奇异现象;文献[20]采用分数阶滑模解决了终端滑模的奇异性问题;文献[21]提出全局非奇异终端滑模控制(global nonsingular terminal sliding mode control, GNTSMC)方法,能够消除滑模控制中的到达阶段,并提升整个响应过程的鲁棒性。但是由于符号函数的高频切换会产生抖动现象。

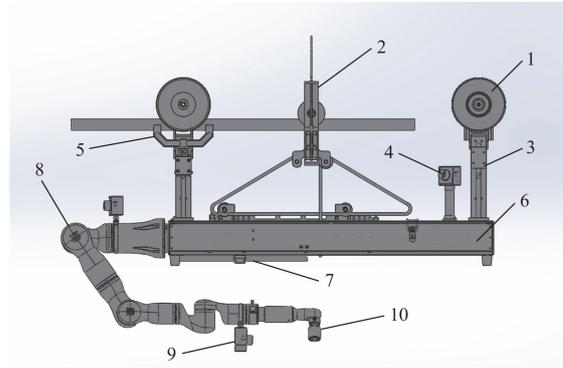
为了削弱抖动,文献[22]在全局滑模控制中引入双曲正切函数;文献[23]提出了自适应趋近律;文献[24]设计了变系数双幂次趋近律;文献[25]采用饱和函数来抑制抖动。虽然这些方法在一定程度上削弱了抖动,但也会影响系统的鲁棒性和控制精度^[26]。为了估计未知扰动,研究人员将滑模控制与各种控制方案相结合,如文献[27]提出机械臂自适应终端滑模控制;文献[28]在超螺旋(super-twisting algorithm, STA)滑模控制中加入观测器;文献[29]将神经网络与滑模控制相结合应用于机械臂控制中。

针对以上算法缺陷,本文从轨迹规划和轨迹跟踪控制两个方面进行改进,提出一种多策略协同改进的粒子群优化(multi-strategy improved particle swarm optimization, MIPSO)算法对 3-5-3 多项式插值轨迹进行以时间最短为目标优化。通过“速度暂停”和更改速度方程,加入 Levy 飞行进一步增强算法的全局搜索能力,避免陷入局部最优。实验表明, MIPSO 算法优化后的轨迹在实现时间最短同时兼顾了轨迹平滑性。在另一方面,针对机器人在高压输电线路作业中易受外部干扰而导致控制精度下降的问题,本文设计了一种 GNTSMC-STA 控制策略,以在降低抖动同时提高轨迹跟踪精度。最后通

过实验验证了所提轨迹规划和控制方案的有效性。

1 机器人作业分析及运动学建模

为保障电力系统中高压输电线路的安全,研制了一种面向输电线路安全运维的机器人,可满足 35 kV 及以上高压输电线路带电检修作业需求(如耐张线夹螺栓紧固)^[30],其系统架构如图 1 所示。



1. 驱动滚轮 2. 滑车 3. 升降滑台 4. 摄像头 5. 导线托架
6. 机箱 7. 天线 8. 机械臂 9. 双目相机 10. 电动扳手

图 1 输电线路机器人整体结构

Fig. 1 Overall structure of transmission line robot

整机采用模块化设计理念,其中,机箱作为输电线路机器人控制中枢,集成了电源管理系统、运动控制系统和通信系统等关键电路模块。

输电线路机器人的作业流程如图 2 所示,其工作序列可分为 4 个阶段。1) 第一阶段(图 2(a)和图 2(b))采用无人机协同吊装方案,通过专用吊具将自主设计的滑车机构部署至导线,继而通过滑车配置的滑轮组升降系统实现机器人的安全上线。2) 第二阶段(图 2(b)和图 2(c))依托搭载的视觉系统引导设备到达预定作业坐标。3) 第三阶段当接近耐张线夹区域后(图 2(c)和图 2(d)),系统基于双目立体视觉系统构建三维空间坐标系,通过特征点匹配算法实现目标螺栓的精确定位。在运动控制层面,利用运动学逆解方法实现关节转动角度参数的求解,结合多项式插值法生成平滑运动轨迹,通过轨迹跟踪控制使机械臂末端到达作业点。4) 最终阶段(图 2(e)和图 2(f))电动扳手完成螺栓紧固工作。

针对输电线路机器人工作效率低、精度不高和输入抖动等问题,在轨迹规划和跟踪控制两个方面进行改进^[31]。

输电线路机器人其主体结构为六自由度机械臂,通过建立改进 DH 坐标系和 DH 参数表,其中 d_i 表示连杆偏移, a_{i-1} 表示连杆长度, α_{i-1} 表示连杆扭转角、 o_{offset} 表示偏移量,如表 1 所示。

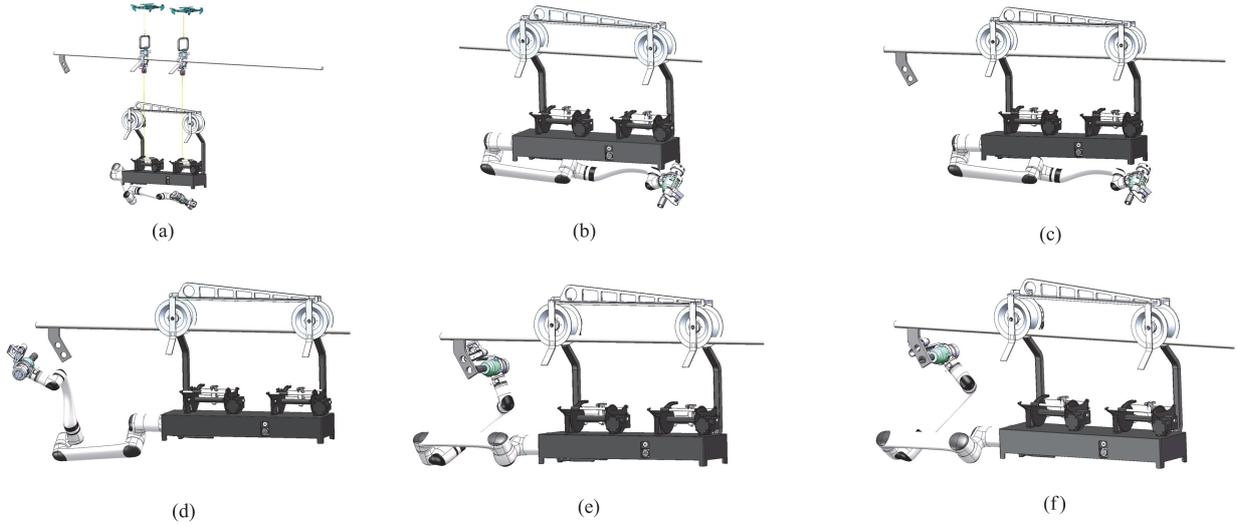


图2 输电线路机器人工作流程

Fig. 2 Workflow of transmission line robot

表1 机械臂 DH 参数

Table 1 DH parameters of robotic arm

| 关节 | d_i/mm | a_{i-1}/mm | $\alpha_{i-1}/(^{\circ})$ | $\alpha_{\text{offset}}/(^{\circ})$ |
|----|-----------------|---------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 8.94 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 90 | 90 |
| 3 | 0 | 110.56 | 0 | 90 |
| 4 | 109.15 | 0 | 90 | 0 |
| 5 | 9.65 | 0 | -90 | 180 |
| 6 | 92.3 | 0 | 90 | 0 |

2 基于 MIPSO 时间最短轨迹规划

2.1 3-5-3 多项式轨迹规划

多项式插值是机械臂关节空间轨迹规划的常用方法, 通过多项式函数在预设路径点间进行插值, 确保运动轨迹的平滑性。本文将其划分为3段连续轨迹, 采用3-5-3分段多项式插值法进行轨迹规划。针对机械臂的每个关节(编号为 $j=1,2,\dots,6$), 构造如式(1)所示的3-5-3分段插值多项式。

$$\begin{cases} l_{j1}(t) = h_{j13}t^3 + h_{j12}t^2 + h_{j11}t + h_{j10} \\ l_{j2}(t) = h_{j25}t^5 + h_{j24}t^4 + h_{j23}t^3 + h_{j22}t^2 + h_{j21}t + h_{j20} \\ l_{j3}(t) = h_{j33}t^3 + h_{j32}t^2 + h_{j31}t + h_{j30} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $l_{j1}(t)$ 、 $l_{j2}(t)$ 和 $l_{j3}(t)$ 分别表示第 j 关节在第一、二、三阶段的轨迹函数; h_{jmf} ($m=1,2,3$, $f=0,1,2,3,4,5$) 表示第 j 关节在第 m 阶段轨迹函数的 f 次多项式系数。

图3中 x_{jz} ($z=0,1,2,3$) 表示机械臂的第 j 关节在第 z 个插值点的位置; t_1 、 t_2 和 t_3 分别表示第一、二、三阶段的轨迹时间。规划过程中增加运动学约

束条件: 起始点与终止点的关节角速度、角加速度均为零, 中间路径点处需要保证连续性, 避免运动突变。

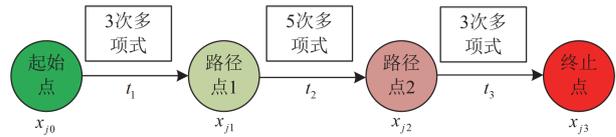


图3 3-5-3 多项式插值示意图

Fig. 3 Schematic diagram of 3-5-3 polynomial interpolation

基于上述约束条件, 通过系数矩阵 A 和边界值列向量 b 可求解各轨迹段3-5-3多项式系数 h , 从而生成满足要求的平滑轨迹。

$$h = A^{-1} \times b \quad (2)$$

2.2 多策略改进粒子群算法

PSO 是根据鸟群觅食行为提出的一种优化算法, 每个粒子代表搜索空间中的一个解, 它们通过速度和位置来描述自己的状态^[32]。具有最佳位置的粒子被称为全局最优粒子, 其他普通粒子的运动轨迹受到自身历史最优位置、全局最优粒子的位置以及算法参数的共同影响。粒子群算法能够通过这种机制寻找最优解, 具体的优化规则如式(3)和式(4)所示。

$$V_i^{k+1} = wV_i^k + c_1r_1(P_{i,\text{best}}^k - X_i^k) + c_2r_2(g_{\text{best}}^k - X_i^k) \quad (3)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (4)$$

式中: V_i^{k+1} 和 X_i^{k+1} 分别表示粒子 i 在第 $k+1$ 次迭代的速度和位置; w 为自身惯性权重; c_1 和 c_2 为学习因子; r_1 和 r_2 为 $[0,1]$ 内均匀分布的随机数, 一般取 1;

$P_{i,best}^k$ 表示粒子 i 在第 k 次迭代个体最优位置; g_{best}^k 表示第 k 次迭代全局粒子的最优位置。

传统 PSO 算法在全局优化问题中存在两个主要局限性: 1) 收敛速度较慢; 2) 容易陷入局部最优。通过采用以下 3 个方法改进 PSO 算法。

1) 引入速度暂停机制, 当 $r_3 < 0.5$ 时, 粒子保持当前速度不变, 否则按式(5)更新。这样可以增加粒子的多样性, 避免过早陷入局部最优。去除了惯性权重 w , 具体如(5)所示。

$$V_i^{k+1} = \begin{cases} V_i^k, & \text{if } r_3 < 0.5 \\ (V_i^k)^{r_4 y(k)} + c_1 r_5 (P_{i,best}^k - X_i^k) + c_2 r_6 (g_{best}^k - X_i^k), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

式中: r_3 、 r_4 、 r_5 和 r_6 为[0,1]内均匀分布的随机数; $y(k)$ 为指数衰减项, 具体如式(6)所示。

$$y(k) = e^{-\left(\frac{ck}{K}\right)^c} \quad (6)$$

式中: c 为常数; K 为最大迭代次数。

2) 为了保持多样性并避免过早收敛, 将粒子种群分为两个子群。子群体 1 由 N_1 个粒子组成, 基于经典的 PSO 机制更新位置, 对速度方程的第一项进行了修改, 并应用了速度暂停概念, 如式(5)所示。子群体 2 由 N_2 个粒子组成, 它们仅依赖当前全局最优位置进行位置更新, 如(7)所示。

$$X_i^{k+1} = \begin{cases} g_{best}^k + y(k)r_7 |g_{best}^k|^{y(k)}, & \text{if } r_8 < 0.5 \\ g_{best}^k - y(k)r_9 |g_{best}^k|^{y(k)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

式中: r_7 、 r_8 和 r_9 为[0,1]内均匀分布的随机数。

3) 为了进一步增强粒子群算法的全局搜索能力, 引入了 Levy 飞行策略。Levy 飞行是一个随机游走模型, 模拟了动物在寻找食物时的长距离跳跃行为, 与传统的正态分布随机步长相比, Levy 飞行能够以较小的概率进行长距离的跳跃。从而有助于跳出局部最优解, 探索更多的解。

在子群 2 的位置更新中引入 Levy 飞行, 以增强其全局搜索能力。当 $r_{10} < 0.5$ 时使用 Levy 飞行, r_{10} 为[0,1]内均匀分布的随机数。

Levy 飞行的子群 2 位置更新如式(8)所示。

$$X_i^{k+1} = g_{best}^k + y(k)r_6 |g_{best}^k|^{y(k)} \cdot L \quad (8)$$

Levy 飞行的步长 L 如式(9)所示。

$$L = \frac{u}{|v|^{1-\beta}} \quad (9)$$

式中: u 、 v 服从正态分布 N , $u \sim N(0, \sigma^2)$,

$v \sim N(0,1)$, σ 为方差; β 为[0,2]内的常数, 本文中取值为 1.5。方差 σ 如式(10)所示。

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\beta \Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) 2^{\left(\frac{1-\beta}{2}\right)}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (10)$$

式中: Γ 为伽马函数。

经过多策略改进后的优化算法流程如图 4 所示。

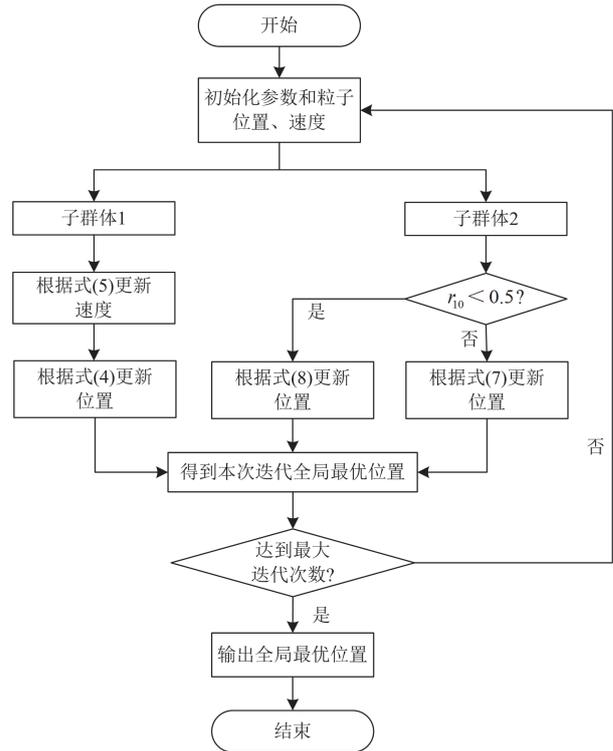


图 4 MIPSO 算法流程图

Fig. 4 Flowchart of MIPSO algorithm

2.3 改进算法性能测试

为了验证改进算法的性能, 本文选取了 Ackley 函数、最大绝对值函数、Rosenbrock 函数和 Sphere 函数作为测试对象, 结果分别对应图 5(a)—图 5(d)。在测试过程中, 将改进算法与 PSO、鲸鱼优化算法 (whale optimization algorithm, WOA)、灰狼优化算法 (grey wolf optimizer, GWO) 以及北方苍鹰优化算法 (northern goshawk optimization, NGO) 进行了对比分析。实验参数设置: 种群个数 30, 迭代次数 300。

从图 5 中可以看出, 所提出的 MIPSO 在 4 个测试函数中均表现出较快的收敛速度, 表明该算法能够迅速接近最优解, 其快速收敛特性对于实时性要求高或问题复杂的系统尤为关键。在搜索过程中, MIPSO 不仅具有较强的全局搜索能力, 最终迭代值

也极接近理论最优, 表明该方法在优化问题中兼顾了搜索效率与解质量。此外, 算法能够有效规避局部最优, 提高了获取全局最优解的可能性。

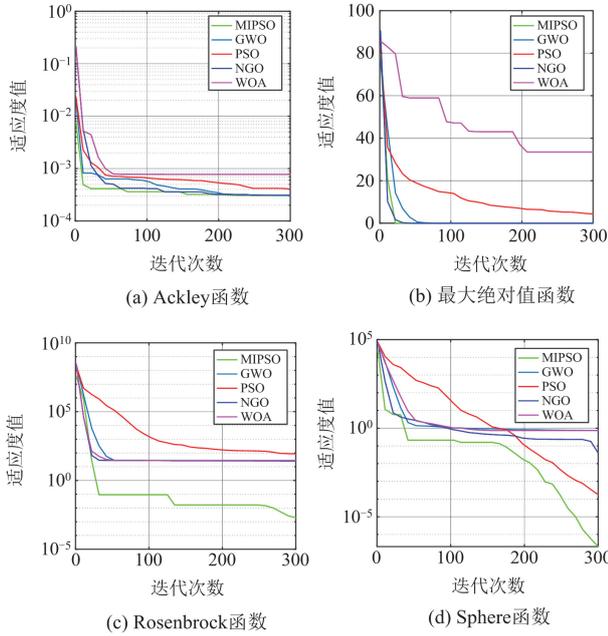


图5 算法在测试函数的收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve of the algorithm on the test function

2.4 改进算法轨迹规划实验

为实现时间最优性目标, 将轨迹规划问题建模为多约束优化任务: 以规划后的总轨迹时间 t_4 最短为优化目标, 构建如式(11)所示的适应度函数。该函数需要同时满足各物理约束条件。通过全局时间寻优策略, 有效平衡了运动效率与动力学可行性。

$$\min f(t_4) = t_1 + t_2 + t_3 \quad (11)$$

为了分析 MIPSO 算法在轨迹规划后的效果, 模拟机械臂作业过程, 设置 4 个路径点进行轨迹规划仿真实验。4 个点的笛卡尔坐标分别为起始点(-23.562, -207.467, -25.608)、路径点 1(-4.558, -203.809, 29.596)、路径点 2(-42.968, 269.101, 44.723)和终止点(-115.787, 257.943, 49.743)。关节空间下 4 个路径点通过运动学逆解得到, 表 2 为所对应的关节角度。

在轨迹规划中分别采用 MIPSO、PSO 和 IPSO 算法以轨迹时间最短为目标进行优化实验, 重复 10 次实验, 对各阶段轨迹时间取平均值得到 $\bar{t}_1, \bar{t}_2, \bar{t}_3, \bar{t}_4$, 结果如表 3 所示。

从表 3 中可以看出, 在平均轨迹时间上 MIPSO 算法相比于 PSO 算法缩短了 0.5601 s, 相比于 IPSO 算法缩短了 0.2708 s, 利用 MIPSO 优化的轨迹时间最短。

表 2 关节角度

Table 2 Joint angle

| 关节 | 起始点/rad | 路径点 1/rad | 路径点 2/rad | 终止点/rad |
|----|---------|-----------|-----------|---------|
| 1 | 1.3991 | 1.399 | -1.325 | -0.9588 |
| 2 | 1.06 | 0.748 | 0.776 | 1.01 |
| 3 | 0.4801 | 0.592 | 0.987 | 0.626 |
| 4 | 0.028 | 0.229 | -1.76 | -1.64 |
| 5 | 1.57 | 1.57 | 0.245 | 0.61 |
| 6 | 0.171 | 0.1717 | -1.57 | -1.57 |

表 3 不同算法的平均轨迹时间

Table 3 Average time of trajectory with different algorithms

| 算法 | \bar{t}_1/s | \bar{t}_2/s | \bar{t}_3/s | \bar{t}_4/s |
|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| MIPSO | 0.8746 | 1.85 | 1.132 | 3.8566 |
| IPSO | 0.894 | 2 | 1.2325 | 4.1274 |
| PSO | 1.003 | 1.945 | 1.4687 | 4.4167 |

MIPSO 优化后的轨迹曲线如图 6 所示, 可以看出机械臂执行设置的 4 个路径点轨迹时各关节的位置、速度及加速度动态特性曲线。规划后的轨迹时间为 3.8465 s。实验结果表明: 所有关节运动曲线均呈现连续、平滑无突变的特点, 有效降低了机械臂的运动损耗, 且角加速度分布符合动力学要求。图 7 通过三维空间轨迹可视化验证了规划轨迹的几何平滑性, 轨迹曲线连续且无突变点, 实现轨迹时间最短与运动平滑性兼具的规划, 证明了所提 MIPSO 算法在机械臂作业过程轨迹规划中的可行性。

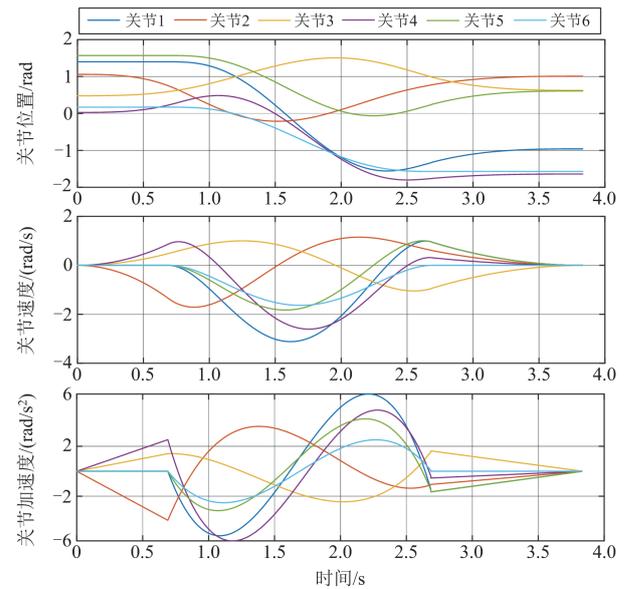


图 6 MIPSO 优化后的轨迹曲线

Fig. 6 Optimal trajectory curves for MIPSO

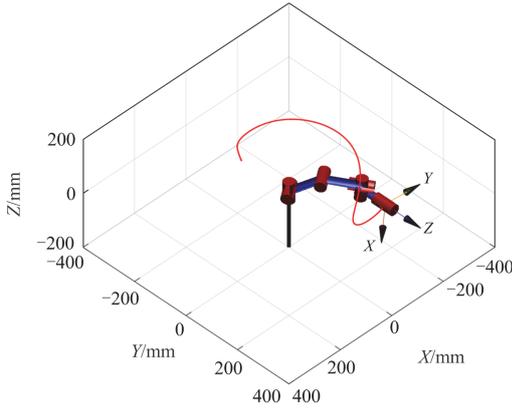


图7 机械臂轨迹规划空间模拟

Fig. 7 Spatial simulation of robotic arm trajectory planning

3 基于超螺旋全局非奇异终端滑模轨迹跟踪控制

3.1 输电线路机器人动力学建模

本文采用拉格朗日动力学方法进行输电线路机器人机械臂建模, 如式(12)所示。

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - P(q) \quad (12)$$

式中: $L(q, \dot{q})$ 为拉格朗日函数; $K(q, \dot{q})$ 为机械臂的全部动能; $P(q)$ 为机械臂系统的势能; q 、 \dot{q} 、 \ddot{q} 分别为机械臂关节转动的角度、角速度和角加速度向量, $q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathbb{R}^n$ 。

考虑外部干扰、非线性摩擦以及系统参数摄动不确定性因素影响, 将机械臂的动能、势能等方程代入拉格朗日函数中。 n 自由度机械臂动力学模型如式(13)所示。

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau + \rho \quad (13)$$

式中: $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为系统惯性矩阵; $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为离心力向量和科氏力向量之和; $G(q) \in \mathbb{R}^n$ 为重力项向量; $\tau \in \mathbb{R}^n$ 为控制力矩输入; $\rho \in \mathbb{R}^n$ 为系统集总扰动, 其中包含不确定项和外界总扰动等。

3.2 输电线路机器人控制器设计

跟踪误差 e 表示如式(14)所示。

$$\begin{cases} e = q - q_d \\ \dot{e} = \dot{q} - \dot{q}_d \\ \ddot{e} = \ddot{q} - \ddot{q}_d \end{cases} \quad (14)$$

式中: q_d 为期望机械臂关节转动的角度。本文对 GNTSMC 算法进行改进, 使轨迹跟踪误差能够在有限时间内收敛至零, 并提高控制系统的快速响应能力和控制精度。该设计保证了整个响应过程的鲁棒性。设计采用多项式插值的方式构造辅助函数 Ψ 、 ψ_1 和 ψ_2 。滑模面 s 设计如式(15)所示。

$$s = e + k_1 |e|^\varepsilon \text{sign}(e) + k_2 |\dot{e}|^\delta \text{sign}(\dot{e}) - \Psi \quad (15)$$

$$\Psi = u_0 + u_1 t + u_2 t^2 + u_3 t^3 \quad (16)$$

式中: k_1 、 k_2 为系数矩阵; ε 、 δ 为常数; u_0 、 u_1 、 u_2 、 u_3 为多项式插值系数; 其中 $k_1 = \text{diag}(k_{11}, \dots, k_{1n})$, $k_2 = \text{diag}(k_{21}, \dots, k_{2n})$, $k_{1i} > 0$, $k_{2i} > 0 (i = 1, \dots, n)$, $\varepsilon > 2$, $0 < \delta < 1$ 。在给定边界条件 $\Psi(0) = \psi_1$, $\dot{\Psi}(0) = \psi_2$, $\Psi(t_n) = 0$, $\dot{\Psi}(t_n) = 0$ 下, 可求解系数 u_0 、 u_1 、 u_2 、 u_3 , 从而得到 $\Psi(t)$ 。

$$\Psi = \psi_1 + \psi_2 t - \left(\frac{3\psi_1}{t_n^2} + \frac{2\psi_2}{t_n} \right) t^2 + \left(\frac{2\psi_1}{t_n^3} + \frac{\psi_2}{t_n^2} \right) t^3 \quad (17)$$

式中: $t_n = r_{11} t$, r_{11} 为 $(0, 1)$ 内的常数。

构造 ψ_1 、 ψ_2 消除初始值和初始导数, 保证系统初始状态 $s = 0$, $\dot{s} = 0$ 。

$$\psi_1 = e(0) + k_1 |e(0)|^\varepsilon \text{sign}(e(0)) + \quad (18)$$

$$k_2 |\dot{e}(0)|^\delta \text{sign}(\dot{e}(0))$$

$$\psi_2 = \dot{e}(0) + k_1 \varepsilon |e(0)|^{\varepsilon-1} \dot{e}(0) + k_2 \delta |\dot{e}(0)|^{\delta-1} \ddot{e}(0) \quad (19)$$

根据等效控制方法的思想, 机械臂的控制力矩输入可由等效控制 τ_{eq} 和切换控制 τ_{sw} 组成, 等效控制负责维持系统在滑模面 ($s = 0$) 上运动, 切换控制用于处理系统不确定性扰动。

控制器的等效控制部分设计为

$$\begin{aligned} \tau_{\text{eq}} = & C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - M(q)[- \ddot{q}_d - \delta^{-1} k_2^{-1} |\dot{e}|^{1-\delta} \dot{\Psi} + \\ & \delta^{-1} k_2^{-1} (I + k_1 \varepsilon |e|^{\varepsilon-1}) |\dot{e}|^{2-\delta} \text{sign}(\dot{e})] \end{aligned} \quad (20)$$

式中: I 为 n 阶单位矩阵。

在上述滑模控制器设计中, 常规设计中 $0 < \delta < 1$, 将导致控制力矩输入过大使控制器不稳定。为了避免奇异点, δ 采用式(21)所示的设计方法。

$$\delta = \begin{cases} 1, & \text{if } t \leq t_n \\ 1 + t - t_n, & \text{if } t_n < t < t_n + \xi \\ 1 + \xi, & \text{if } t \geq t_n + \xi \end{cases} \quad (21)$$

式中: ξ 为 $(0, 1)$ 内的常数, 使得状态轨迹连续运动, 同时避免了奇异点, 保证了跟踪误差 e 在有限时间收敛。

尽管提出的 GNTSMC 可以消除滑模控制到达阶段, 并实现全局鲁棒性, 但不连续控制律会导致抖振现象。在切换控制中引入 STA 抑制系统所产生的抖振现象, 并提高系统的控制精度。

$$\begin{cases} \dot{s} = -\gamma_1 |s|^{0.5} \text{sign}(s) + \zeta \\ \dot{\zeta} = -\gamma_2 \text{sign}(s) \end{cases} \quad (22)$$

式中: γ_1 、 γ_2 为系数矩阵; ζ 为辅助函数, 其中

$\gamma_1 = \text{diag}(\gamma_{11}, \dots, \gamma_{1n})$, $\gamma_2 = \text{diag}(\gamma_{21}, \dots, \gamma_{2n})$, $\gamma_{li} > 0$, $\gamma_{2i} > 0 (i=1, \dots, n)$ 。

切换控制 τ_{sw} 设计为

$$\tau_{sw} = \mathbf{M}(\mathbf{q})[\gamma_1(|\mathbf{s}|^{0.5})\text{sign}(\mathbf{s}) + \boldsymbol{\zeta}] \quad (23)$$

此时基于 GNTSMC-STA 算法机械臂的控制力矩输入如式(24)所示。

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{eq} + \boldsymbol{\tau}_{sw} =$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) - \mathbf{M}(\mathbf{q})[-\delta^{-1}\mathbf{k}_2^{-1}|\dot{\mathbf{e}}|^{1-\delta}\dot{\boldsymbol{\Psi}} - \\ & \ddot{\mathbf{q}}_d + \delta^{-1}\mathbf{k}_2^{-1}(\mathbf{I} + \mathbf{k}_1\varepsilon|\mathbf{e}|^{\varepsilon-1})|\dot{\mathbf{e}}|^{2-\delta}\text{sign}(\dot{\mathbf{e}}) + \\ & \gamma_1(|\mathbf{s}|^{0.5})\text{sign}(\mathbf{s}) + \boldsymbol{\zeta}] \end{aligned} \quad (24)$$

3.3 控制算法仿真分析

在 Matlab 中模拟输电线路机器人机械臂轨迹跟踪控制过程, 采用二自由度机械臂动力学模型进行轨迹跟踪控制数值仿真实验。参照式(13)建立二自由度机械臂动力学模型如式(25)所示。

$$\mathbf{M}_2\ddot{\mathbf{q}}_2 + \mathbf{C}_2\dot{\mathbf{q}}_2 + \mathbf{G}_2 = \boldsymbol{\tau}_2 + \boldsymbol{\rho}_2 \quad (25)$$

式中: $\mathbf{M}_2 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 为二维自由度情形下的系统惯性矩阵; $\mathbf{C}_2 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 为二维自由度情形下的离心力向量和科氏力向量之和; $\mathbf{G}_2 \in \mathbb{R}^2$ 为二维自由度情形下的重力项向量; $\boldsymbol{\tau}_2 \in \mathbb{R}^2$ 为二维自由度情形下的控制力矩输入; $\boldsymbol{\rho}_2 \in \mathbb{R}^2$ 为二维自由度情形下的系统集总扰动。

机械臂主要物理参数定义如表 4 所示。

表 4 机械臂主要物理参数

Table 4 Physical parameters of robotic arm

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|--------------------|-----|------------------------------------|-----|
| L_1/m | 1 | $J_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | 5 |
| L_2/m | 0.8 | $J_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | 5 |
| m_{10}/kg | 0.4 | m_{20}/kg | 1.2 |

表 4 中 L_1 、 L_2 分别为关节 1、2 长度; J_1 、 J_2 分别为关节 1、2 转动惯量; m_{10} 、 m_{20} 分别为关节 1、2 标称值。假设质量的不确定性为 $\pm 10\%$, 且考虑到机器人机械臂作业过程负载会发生改变, 关节 1、2 的质量 m_1 、 m_2 如图 8 所示。

扰动矩阵如式(26)所示, 期望机械臂关节转动角度

$$\mathbf{q}_d = \left[1.05 - \frac{7}{5}e^{-t} + \frac{20}{7}e^{-4t}, 1.4 + \frac{7}{5}e^{-t} - \frac{20}{7}e^{-4t} \right]^T,$$

初始关节角度 $\mathbf{q}_0 = [0.6, 2.2]^T$, 初始角速度 $\dot{\mathbf{q}}_0 = [0, 0]^T$ 。为体现本文中所设计算法的先进性, 与非奇异快速终端滑模控制(nonsingular fast terminal sliding mode control, NFTSMC)算法进行仿真比较。

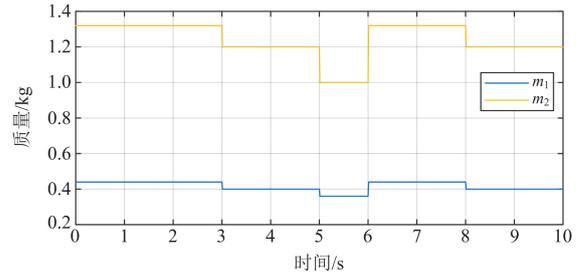
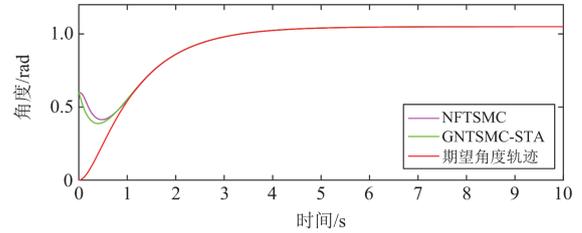


图 8 关节 1、2 的质量

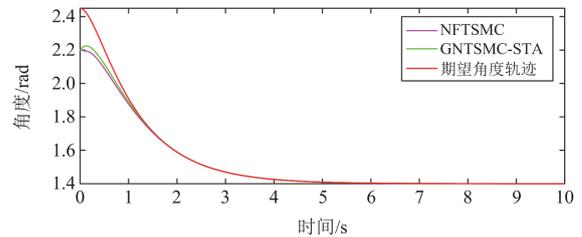
Fig. 8 Mass of joint 1 and 2

$$\boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} 0.2 \sin(3t) + 0.02 \sin(26\pi t) \\ 0.1 \sin(2t) + 0.01 \sin(26\pi t) \end{bmatrix} \quad (26)$$

图 9 为本文中设计的 GNTSMC-STA 控制策略和 NFTSMC 关节 1、2 期望角度轨迹跟踪对比情况。



(a) 关节1角度位置跟踪



(b) 关节2角度位置跟踪

图 9 关节 1、2 角度跟踪对比

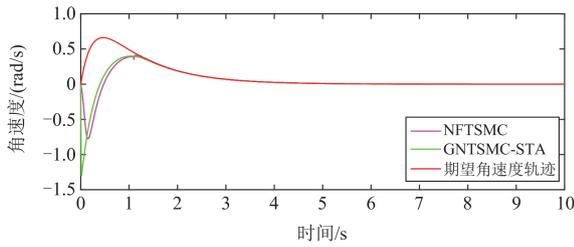
Fig. 9 Comparison of joint 1 and 2 angle tracking

图 10 为关节 1、2 期望角速度轨迹跟踪对比。图 11 为关节 1、2 控制力矩输入对比。

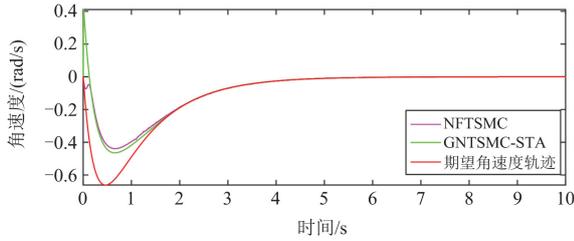
从图 9 和 10 可以看出, 机械臂在 GNTSMC-STA 控制策略下能够短时间内跟踪期望轨迹, 相比 NFTSMC 有更快的动态响应时间。从图 11 可以看出, 通过加入 STA 算法抑制了抖振。仿真结果表明, 所提算法具有强鲁棒性、快速收敛能力, 为机器人机械臂在复杂作业环境下实现轨迹跟踪控制提供了技术方案。

4 实验验证

为验证所提出的时间最优轨迹规划算法和机械臂力矩控制算法的有效性, 将仿真得到的实验数据



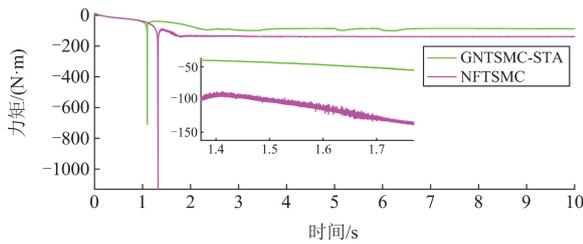
(a) 关节1角速度跟踪



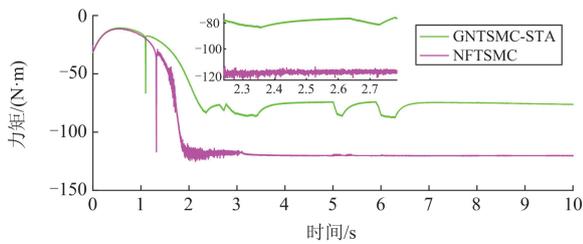
(b) 关节2角速度跟踪

图 10 关节 1、2 期望角速度轨迹对比

Fig. 10 Comparison of desired angular velocity trajectories



(a) 关节1输入力矩



(b) 关节2输入力矩

图 11 关节 1、2 控制输入力矩对比

Fig. 11 Comparison of control input torque for joints 1 and 2

应用于输电线路机器人机械臂，实验平台如图 12 所示。首先通过双目视觉相机定位得到螺栓坐标位置，进行运动学逆解得到机械臂 6 个关节的旋转角度。在仿真中采用基于 MIPSO 优化 3-5-3 轨迹规划得到最短时间轨迹，图 13 为关节位置曲线。将规划的位置曲线作为控制指令通过网线输入给机械臂的各个关节驱动器，采样时间为 5 ms。图 14 为实验中上位机测得的关节 1 轨迹跟踪误差。可以看出在 1.5 s 后跟踪误差为 0.1 rad 内，稳定后轨迹跟踪误差在

$[10^{-5}, 10^{-3}]$ rad 内，机械臂末端在 4.8 s 内到达目标位置。

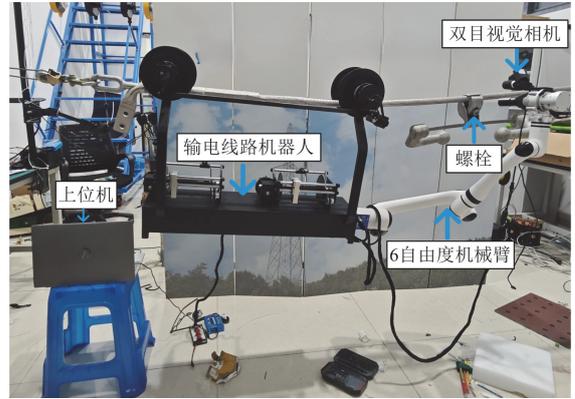


图 12 输电线路机器人实验平台

Fig. 12 Experimental platform for transmission line robotics

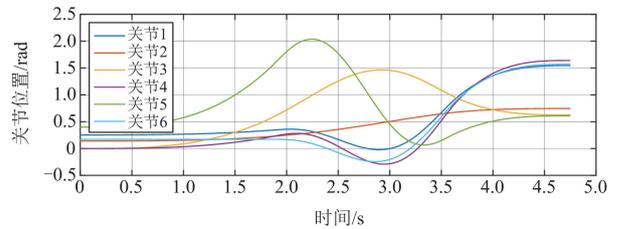


图 13 关节位置曲线

Fig. 13 Joint position curve

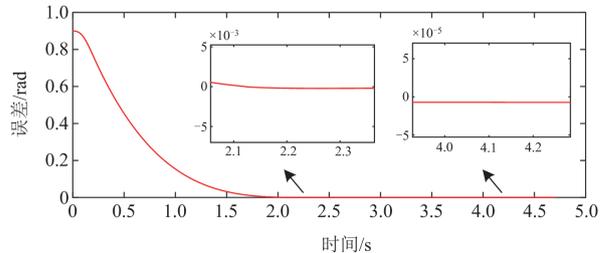


图 14 关节位置误差

Fig. 14 Joint position error

5 结论

为维护电力系统安全，针对现有高压输电线路机器人在耐张线夹螺栓紧固作业中实际效果不理想的问题，本文从轨迹规划与控制方法两个层面进行改进，得出以下结论。

1) 本文提出一种 MIPSO 算法。通过“速度暂停”和改进速度方程，在全局搜索与局部开发之间实现了更优的平衡。种群被分为两个群体保持多样性，并加入 Levy 飞行进一步增强算法的全局搜索能力，避免陷入局部最优。实验结果表明，基于 MIPSO 算法优化 3-5-3 多项式插值后生成的轨迹时

间最短, 关节运动学参数均呈现连续、平滑无突变特性。

2) 针对机器人在高压输电线路的环境下作业时易受干扰进而影响控制精度的问题。为降低抖振的同时提高轨迹跟踪精度, 设计一种全局非奇异终端滑模结合超螺旋算法。该方法消除了滑模控制到达阶段, 保证了整个系统响应过程的鲁棒性, 降低了收敛时间和输入抖振。最后通过实验验证, 在轨迹规划以及跟踪控制算法下, 机械臂末端能在 4.8 s 内到达目标点, 稳定后轨迹跟踪误差在 $[10^{-5}, 10^{-3}]$ rad 内。结果表明, 基于该算法的输电线路机器人能够高效地完成高压输电线路螺栓紧固高精度工作, 为输电线路机器人维护电力系统安全提供了新的技术方案。

参考文献

- [1] 张焕龙, 齐企业, 张杰, 等. 基于改进 YOLOv5 的输电线路鸟巢检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 151-159.
ZHANG Huanlong, QI Qiye, ZHANG Jie, et al. Research on bird nest detection method of transmission line based on improved YOLOv5[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 151-159.
- [2] 陈富国, 赵盼盼, 牛博, 等. 输电线路带电作业机器人的电磁分析与防护设计[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 81-88, 96.
CHEN Fuguo, ZHAO Panpan, NIU Bo, et al. Electromagnetic analysis and protection design of live working robot on transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 81-88, 96.
- [3] 李杰, 董林杰, 汤小兵, 等. 变电站二次设备全向巡检机器人精确定位与作业辨识[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 234-243.
LI Jie, DONG Linjie, TANG Xiaobing, et al. Precise positioning and identification of omnidirectional inspection robot for substation secondary equipment[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 234-243.
- [4] 雷霆, 钟力强, 王柯, 等. 带电作业机器人控制机箱电磁防护仿真研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(6): 131-140.
LEI Ting, ZHONG Liqiang, WANG Ke, et al. Simulation analysis of electromagnetic protection for control box of live working robot[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 131-140.
- [5] 杨权, 樊绍胜. 基于图像预处理和语义分割的电力巡检机器人视觉导航方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 248-258.
YANG Quan, FAN Shaosheng. Visual navigation method for electric power inspection robot based on image preprocessing and semantic segmentation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 248-258.
- [6] 陈磊, 郑燊聪, 蒋禹齐, 等. 基于改进混沌布谷鸟算法的风电场多机等值参数辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 99-106.
CHEN Lei, ZHENG Shencong, JIANG Yuqi, et al. Identifying multi-machine equivalent parameters of wind farms based on an improved chaotic cuckoo search algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 99-106.
- [7] 闫群民, 董新洲, 穆佳豪, 等. 基于改进多目标粒子群算法的有源配电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 11-19.
YAN Qunmin, DONG Xinzhou, MU Jiahao, et al. Optimal allocation of active distribution network energy storage based on improved multi-objective particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 11-19.
- [8] 邱冰, 李小兵, 石志新, 等. 多策略改进麻雀算法在机械臂时间最优轨迹规划中的应用[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(10): 1714-1722.
QIU Bing, LI Xiaobing, SHI Zhixin, et al. Application of multi-strategy improved sparrow algorithm in time-optimal trajectory planning of robotic arm[J]. Mechanical Science and Technology, 2024, 43(10): 1714-1722.
- [9] XU J, REN C, CHANG X. Robot time-optimal trajectory planning based on quintic polynomial interpolation and improved Harris Hawks algorithm[J]. Axioms, 2023, 12(3): 245.
- [10] 谢能斌, 辛绍杰. 基于 PSO-SA 的机器人关节空间轨迹规划[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(1): 122-128.
XIE Nengbin, XIN Shaojie. Robot joint space trajectory planning based on PSO-SA[J]. Computer Applications and Software, 2023, 40(1): 122-128.
- [11] 杜娟, 宋易奇, 陈峙, 等. 基于 IPSO 算法的改进三次样条机器人轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(11): 6-10.
DU Juan, SONG Yiqi, CHEN Zhi, et al. Improved cubic spline robot trajectory planning based on IPSO algorithm[J]. Combined Machine Tools and Automated Machining Technology, 2023(11): 6-10.
- [12] ZHAO J, ZHU X, SONG T. Serial manipulator time-jerk optimal trajectory planning based on hybrid IWOA-PSO algorithm[J]. IEEE Access, 2022, 10: 6592-6604.
- [13] 刘沛明, 郭祥贵. 基于观测器的人在环多机械臂系统预设性能二分一致性[J]. 自动化学报, 2024, 50(9): 1761-1771.
LIU Peiming, GUO Xianggui. Observer-based dichotomous consistency of preconditioning performance for human-in-the-loop multiple robotic arm systems[J]. Journal of Automation, 2024, 50(9): 1761-1771.
- [14] GHITH E S, TOLBA F A A. Design and optimization of

- PID controller using various algorithms for micro-robotics system[J]. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2022, 3(3): 244-256.
- [15] ZANGENEH M, AGHAJARI E, FOROUZANFAR M. A review on optimization of fuzzy controller parameters in robotic applications[J]. *IETE Journal of Research*, 2022, 68(6): 4150-4159.
- [16] ZHANG Y, KONG L, ZHANG S, et al. Improved sliding mode control for a robotic manipulator with input deadzone and deferred constraint[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 28(2): 7814-7826.
- [17] REN A, MA J, WANG H, et al. A comprehensive review on research methods for lithium-ion battery of state of health estimation and end of life prediction: methods, properties, and prospects[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2025, 10(3): 146-165.
- [18] LI H, CAI Y. Fixed-time non-singular terminal sliding mode control with globally fast convergence[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2022, 16(12): 1227-1241.
- [19] MAN Z H, PAPLINSKI A P, WU H R. A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, 39(12): 2464-2469.
- [20] YANG L, YANG J. Nonsingular fast terminal sliding-mode control for nonlinear dynamical systems[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2011, 21(16): 1865-1879.
- [21] 王磊, 张振国, 沈素素. 基于全局非奇异快速终端滑模结构作用下的永磁同步电机的研究[J]. *电子测量技术*, 2018, 41(3): 28-31.
- WANG Lei, ZHANG Zhenguo, SHEN Susu. Research on permanent magnet synchronous motor based on global non-singular fast terminal sliding mode structure action[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018, 41(3): 28-31.
- [22] HU Z, HU W, WANG Z, et al. Global sliding mode control based on a hyperbolic tangent function for matrix rectifier[J]. *Journal of Power Electronics*, 2017, 17(4): 991-1003.
- [23] BRAHMI B, LARAKI M H, BRAHMI A, et al. Improvement of sliding mode controller by using a new adaptive reaching law: theory and experiment[J]. *ISA Transactions*, 2020, 97: 261-268.
- [24] KANG Z, YU H, LI C. Variable-parameter double-power reaching law sliding mode control method[J]. *Automatika*, 2020, 61(3): 345-351.
- [25] VO A T, KANG H J. An adaptive terminal sliding mode control for robot manipulators with non-singular terminal sliding surface variables[J]. *IEEE Access*, 2019(7): 8701-8712.
- [26] SHI S, DAI L, MIN H, et al. Prescribed-time nonsingular terminal sliding mode control and its application in PMSM servo systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 72(6): 3072-3081.
- [27] SUN C, HUANG Z, WU H. Adaptive super-twisting global nonsingular terminal sliding mode control for robotic manipulators[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2024, 112(7): 5379-5389.
- [28] FEI J, LIU L. Fuzzy neural super-twisting sliding-mode control of active power filter using nonlinear extended state observer[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2024, 54(1): 457-470.
- [29] TRUONG T N, VO A T, KANG H J. Neural network-based sliding mode controllers applied to robot manipulators: a review[J]. *Neurocomputing*, 2023, 28(2): 3123-3133.
- [30] 詹坤, 高广德, 陈亚龙, 等. 基于辅助磁芯阻抗自适应调整的输电线路在线稳定取能方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(10): 74-83.
- ZHAN Kun, GAO Guangde, CHEN Yalong, et al. Online stabilization of energy extraction method for transmission lines based on adaptive adjustment of auxiliary core impedance[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(10): 74-83.
- [31] 李妍莎, 蔡晔, 曹一家, 等. 面向联合检修的电力信息物理系统输电线路脆弱相关性辨识[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(24): 120-128.
- LI Yansha, CAI Ye, CAO Jia, et al. Vulnerability correlation identification of transmission line for joint maintenance in power information physics system[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(24): 120-128.
- [32] 杨昊, 胡文秀, 张璐, 等. 基于 ADASYN 数据平衡化的 PSO-BPNN 变压器套管故障诊断[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(2): 170-178.
- YANG Hao, HU Wenxiu, ZHANG Lu, et al. Fault diagnosis of transformer oil-paper bushings in PSO-BPNN algorithm based on ADASYN data balancing[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(2): 170-178.

收稿日期: 2025-03-16; 修回日期: 2025-05-26

作者简介:

花国祥(1985—), 男, 博士, 副教授, 高级工程师, 研究方向为输电线路机器人、电力通信技术和综合能源管理等; E-mail: hgx@cwXu.edu.cn

尹书哲(2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为输电线路机器人和滑模控制等; E-mail: 202312490403@nuist.edu.cn

黄兴(1994—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为综合能源管理、智能微电网、超导技术和电网装备等。E-mail: huangxing@cwXu.edu.cn

(编辑 张颖)