

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.044

爬坡状态下输电导线巡检探伤机器人行走姿态控制方法

冯帅军,王方芳,谭兴华,陈瑞斌,仝海龙

(河南四达检测技术有限公司,河南 许昌 461000)

摘要:巡检探伤机器人在输电导线上行走及爬坡的过程中,其质心可能会随着坡度的变化而发生偏移,导致控制参数与实际行走状态出现偏差,从而影响行走姿态控制的稳定性。为了缓解这一问题,提出爬坡状态下输电导线巡检探伤机器人行走姿态控制方法。基于机器人质心的合力及合力矩分析机器人在爬坡状态下的非完整约束方程,从而求解爬坡状态下机器人姿态稳定条件。根据滚转角、俯仰角以及偏航角 3 个机器人行走姿态角建立相应的动力学数学模型。结合一个行走周期内机器人占地系数的计算,生成机器人行走姿态控制参数。经过测试可知:该方法控制下的巡检探伤机器人行走姿态较为稳定,满足了输电导线巡检探伤的工作需求。

关键词:机器人行走姿态;输电导线;巡检探伤机器人;爬坡状态;行走姿态控制;步态控制

中图分类号:TP242 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)03-0229-05

Walking Attitude Control Method for Transmission Line Inspection and Flaw Detection Robot in Climbing State

FENG Shuaijun, WANG Fangfang, TAN Xinghua, CHEN Ruibin, TONG Hailong

(Henan Star Detection Technology Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: During the climbing process of inspection and flaw detection robots in the environment of transmission lines, their mass center may shift with the change of slope, resulting in deviations between control parameters and actual walking states, and affecting the stability of walking posture control. To alleviate the defect, a walking posture control method for transmission line inspection and flaw detection robot in climbing state is proposed. Based on the analysis of the resultant force and resultant torque of the robot's center of mass, the nonholonomic constraint equation of the robot in the climbing state is solved to determine the stability condition of the robot's posture in the climbing state. Corresponding dynamic mathematical models are established based on the three robot walking attitude angles of roll angle, pitch angle, and yaw angle. Robot walking posture control parameters are generated by calculating the occupancy coefficient of the robot during a walking cycle. Tests show that the walking posture of the inspection and flaw detection robot controlled by this method is relatively stable, which meets the work requirements of power transmission line inspection and flaw detection.

Keywords: robot walking posture; transmission lines; inspection and flaw detection robot; climbing state; walking posture control; gait control

0 引言

巡检探伤机器人在输电导线运维领域中的应用,不仅可以在很大程度上提高巡检的工作效率,还能够避免人工登塔作业的危险。在此基础上,巡检探伤机器人还可以实现对输电线路检测数据的实时采集和分析,为输电线路的维护和管理提供更加科学的依据,提高巡检结果的准确性。为了进一步提高巡检探伤机器人的应用性能,对其在输电导线上的行走过程进行精准控制受到了领域内同行的高度重视,很多研究人员据此提出了

机器人行走姿态控制方法。

李源潮等^[1]提出了基于最大熵深度强化学习的机器人行走姿态控制方法,结合关节角参数建立机器人的动力学模型,通过余弦相似度的计算,设计机器人行走姿态控制的奖励函数。在此基础上,引入最大熵深度强化学习算法分析得出最优控制参数。但该方法中,奖励函数的设计往往依赖于设计者的主观判断和经验,这可能导致设计出的奖励函数无法全面反映机器人行走姿态的优劣,从而影响最终的控制效果。刘峰波等^[2]提出了基于 PID 控制的机器人行走姿态控制方法,分

基金项目:国网浙江省电力有限公司湖州供电公司科技项目(B311UZ230001)

第一作者简介:冯帅军(1989—),女,河南许昌人,讲师,学士,研究方向为中压电力线载波机通信技术、X 射线探伤机器人技术等,dgfucla@163.com。

析了机器人动力单元的组成结构,结合传感器中的机器人实时位姿数据,计算预测机器人的行走姿态误差。在此基础上,建立相应的PID控制函数。但PID控制器在调节过程中可能会出现超调现象,即控制量超出目标值并产生振荡,这会影响机器人的行走精度和稳定性。田艳等^[3]提出了基于循环神经网络的机器人行走姿态控制方法。分析机器人的转角范围。结合工作空间的复杂度确定机器人行走姿态类型。通过在机器人三维模型中生成相应的姿态参数,建立基于循环神经网络的行走姿态控制算法。但在实际应用中,当序列长度较长时,循环神经网络往往难以有效地捕捉和保持长期的依赖关系。这意味着该方法在实际应用中可能难以实现长时间的高精度控制。于晓春等^[4]提出了基于胞映射原理的机器人行走姿态控制方法。定义机器人行走姿态的初始参数,并利用胞映射原理解析机器人的行走能耗。通过构建相应的吸引域,实现行走姿态的控制。但胞映射实际上是一种大范围的搜索算法,它需要对状态空间进行线性扫描和验证,这通常需要很大的计算量,并且耗时较长,影响了机器人行走姿态控制的实时性能。韩耀辉等^[5]提出了基于稳定裕度计算的机器人行走姿态控制方法。在机器人的运动空间中确定其静态稳定区域。计算机器人前、后向边界稳定裕度参数,结合机器人的质心确定最终的行走姿态控制参数。但稳定裕度的计算通常涉及复杂的几何和动力学分析,需要处理大量的数据和计算。特别是在复杂地形和动态环境下,稳定裕度的实时计算变得更加困难,影响了机器人的实际控制性能。

上述所提出的机器人行走姿态控制方法在实践应用中均存在一定的弊端,受到应用场景的约束较大,难以在输电导线巡检探伤工作中进行有效控制。为了解决这一问题,本文研究提出了一种爬坡状态下输电导线巡检探伤机器人行走姿态控制方法。本方法通过对巡检探伤机器人爬坡状态的分析,确定相应的稳定条件,从而实现稳定性较高的机器人行走姿态控制。

1 输电导线巡检探伤机器人行走姿态控制方法设计

1.1 爬坡状态下机器人姿态稳定条件分析

为了确保机器人能够完成巡检工作内容,巡检探伤机器人在输电导线上行走的过程中,需要

保证机器人的稳定性。针对这一问题,本文研究分析了机器人在爬坡状态下的姿态稳定条件。

基于虚拟腿理论,分析机器人质心所受的合力及其相应的合力矩。以机器人质心建立基坐标系 (x, y, z) ,则合力及合力矩可分别描述为式(1)和式(2)的形式^[6-8]。

$$\sum F_x = (f_f + f_h) \frac{\sin \vartheta_h}{\sin \vartheta_f} - \left(\frac{\tau_f}{r_f} + \frac{\tau_h}{r_h} \right) \frac{\cos \vartheta_f}{\cos \vartheta_h} \quad (1)$$

$$\sum T_y = \begin{cases} -f_f(d \cos \varphi_f + h \sin \varphi_f) \\ \frac{\tau_f}{r_f} \left(r_f + \frac{h}{\cos \varphi_f} \right) (d + h \tan \varphi_f) \\ f_h(d \cos \varphi_f - h \sin \varphi_f) \\ \frac{\tau_h}{r_h} \left(r_h + \frac{h}{\cos \varphi_h} \right) (d - h \tan \varphi_h) \end{cases} \quad (2)$$

式中: F_x 表示机器人质心合力; T_y 表示合力矩; h 表示机器人质心与行走面之间的距离; f 表示机器人行走驱动的连杆距离; f_f 和 f_h 分别表示相应的推力; ϑ_h 和 ϑ_f 分别表示相应的竖直方向夹角; r_f 和 r_h 分别表示相应的作用力分量; φ_f 和 φ_h 分别表示相应的俯仰角; d 表示机器人的行走躯干长度。

以机器人的某一足端为原点构建世界坐标系,并定义机器人质心在世界坐标系中的坐标,如式(3)所示。

$$P_0 = \begin{bmatrix} h \sin(\varphi_f + \varphi_h) \\ h \cos(\varphi_f + \varphi_h) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 P_0 表示机器人质心的世界坐标。

通过机器人质心的坐标系转换,分析其在爬坡状态下的非完整约束方程,如式(4)所示^[9]。

$$\begin{cases} \dot{x} - R\beta(P_0) - \cos \beta \sin \theta = 0 \\ \dot{y} + R\beta(P_0) - \cos \beta \sin \theta = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\dot{x}$ 、 $\dot{y}$ 表示机器人质心在世界坐标系中的平动点; R 表示机器人爬坡运动的速度瞬心; $\beta(P_0)$ 表示质心在世界坐标系中的欧拉角; θ 表示爬坡倾角。

在该方程的约束下,结合机器人质心合力及合力矩的定义,求解机器人的质心加速度稳定条件,表达式如式(5)所示。

$$\begin{cases} m = F_x \sin \alpha_v - F \cos \alpha_v \\ I = -T_y(R + h \cos(\alpha_v - \theta)) \\ a = P_0(vI + h\beta^2) - mg \end{cases} \quad (5)$$

式中: m 表示机器人的无负载质量; α_v 表示机器

人在当前行走速度 v 下的姿态角; F 表示机器人足端与输电导线表面之间的摩擦力大小向量; I 表示转动惯量; a 表示质心加速度; g 表示重力加速度。

通过上述步骤,分析得到输电导线巡检探伤机器人在爬坡状态下行走姿态的稳定条件。

1.2 输电导线巡检探伤机器人动力学数学模型

在满足上述分析的稳定条件下,解析机器人的最优行走姿态控制参数。在这一过程中,为了能够更加精准地获取机器人的力学特性,以便设计出相应的控制参数,本文在世界坐标系下,分析建立机器人的动力学模型。

本文将机器人行走的姿态角 α 划分为滚转角、俯仰角以及偏航角 3 个部分。根据 3 种姿态角,分别在世界坐标系中建立相应的旋转矩阵,如式(6)一式(8)所示^[10-12]。

$$\eta_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega & 0 \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\eta_{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\eta_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon & -\sin\varepsilon & 0 & 0 \\ \sin\varepsilon & \cos\varepsilon & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: ω 表示滚转角; φ 表示俯仰角; ε 表示偏航角; η_{ω} 、 η_{φ} 、 η_{ε} 分别表示相应的旋转矩阵。

将上述矩阵合并为总旋转矩阵 $\eta_{\omega\varphi\varepsilon}$ 。在此基础上,利用牛顿方程对旋转矩阵进行解算,构建得出机器人在行走运动状态下的牛顿-欧拉方程:

$$G = \begin{cases} ma \\ T_y \cdot l\eta_{\omega\varphi\varepsilon} \end{cases} \quad (9)$$

式中 G 表示牛顿-欧拉方程。

基于方程的解算结果,建立输电导线巡检探伤机器人动力学数学模型,如式(10)所示^[13-15]。

$$\begin{cases} \dot{\omega} = \frac{\cos\varepsilon\cos\varphi F_x - (I_y - I_z)mg}{G(I_x)} \\ \dot{\varphi} = \frac{\cos\varepsilon\cos\varphi F_x - (I_z - I_x)mg}{G(I_y)} \\ \dot{\varepsilon} = \frac{\cos\varepsilon\cos\varphi F_x - (I_x - I_y)mg}{G(I_z)} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\dot{\omega}$ 、 $\dot{\varphi}$ 、 $\dot{\varepsilon}$ 分别表示机器人 3 种姿态角的传递函数; I_x 、 I_y 、 I_z 表示机器人转动惯量在世界坐标系 3 个轴向上的分量。

通过上述步骤,建立得到输电导线巡检探伤机器人的动力学数学模型。

1.3 生成机器人行走姿态控制参数

基于机器人的动力学数学模型,本文在机器人姿态稳定条件的约束下,根据机器人的行走特性,生成行走姿态控制的参数。

定义机器人的机械爪完成一次完整的抓取、夹持动作作为一个行走周期。由此计算机器人在一个行走周期内的占地系数如式(11)所示^[16-18]。

$$\lambda = 1 - \frac{T_1}{T} S \quad (11)$$

式中: λ 表示机器人行走占地系数; T 表示行走周期; T_1 表示机器人机械爪的抓取姿态; S 表示机器人主动轮与输电导线之间的接触面积。

求解占地系数对应的机器人行走姿态角参数,如式(12)所示。

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{\varphi} \\ \hat{\varepsilon} \end{bmatrix} = \int_0^T H(\lambda) \begin{bmatrix} \omega \\ \varphi \\ \varepsilon \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $\hat{\omega}$ 、 $\hat{\varphi}$ 、 $\hat{\varepsilon}$ 表示对应的姿态角参数; H 表示罚函数。

将求解的参数代入机器人的动力学数学方程中,并结合行走姿态稳定条件对其进行判定。取稳定条件内的最大参数值,输出得到最优的行走姿态控制参数^[19],实现对爬坡状态下的机器人行走姿态控制。

通过上述步骤,完成爬坡状态下输电导线巡检探伤机器人行走姿态控制方法的设计。

2 应用测试

为了验证本文研究内容的实践应用可行性及有效性,设计输电导线巡检探伤机器人行走姿态控制的实践应用测试。

2.1 测试准备

在本次测试中,所采用的巡检探伤机器人如图 1 所示。

图 1 所示的巡检探伤机器人主要包含机械臂和行走单元两个部分。其中,机械臂包括移动、升降、旋转关节和末端检测装置,结合辅助臂增加纵移、旋转自由度,形成稳定的三角结构。行走单元

则由主动轮和机械爪构成,通过机械爪的张合动作,实现机器人在输电导线上的行走。该巡检探伤机器人的主要技术参数如表 1 所示。

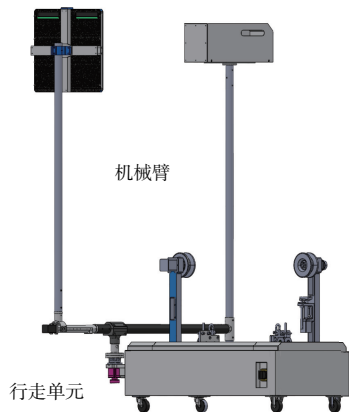


图 1 巡检探伤机器人

表 1 机器人参数

技术参数	数值
额定电压/V	48
电池容量/Ah	35
续航时间/h	8
最大功率/W	1 500
行走速度范围/(m/s)	0.01 ~ 3.00
最大负载/kg	200
最大越坎/cm	10
爬坡能力/°C	30
功耗/W	200

采用该参数的机器人满足国家标准 GB/T 5023的输电导线作为机器人的行走环境,如图 2 所示。



图 2 机器人巡检输电导线行走环境实验场景

基于图 2 所示行走实验环境,在 Matlab Simulink 仿真测试平台中设置巡检探伤机器人行走的坡度环境。在实验室环境下,将输电导线的两端架设到不同的高度,形成 0°~30°的爬坡夹

角。定义机器人的行走周期为 45 s。主动轮与输电导线之间的接触面积最大值为 51 mm²。利用 Matlab Simulink 仿真运行控制程序中的动力学数学模型,对机器人滚转角、俯仰角以及偏航角 3 个姿态角的旋转矩阵进行解算,获得行走姿态参数。

2.2 机器人动力学数学模型下的行走姿态参数

以 30°爬坡角度为测试案例,分析本文方法建立的机器人动力学数学模型对巡检探伤机器人行走姿态参数进行计算。在本次测试的行走周期时间内,本文方法控制的机器人行走姿态参数变化如图 3 所示。

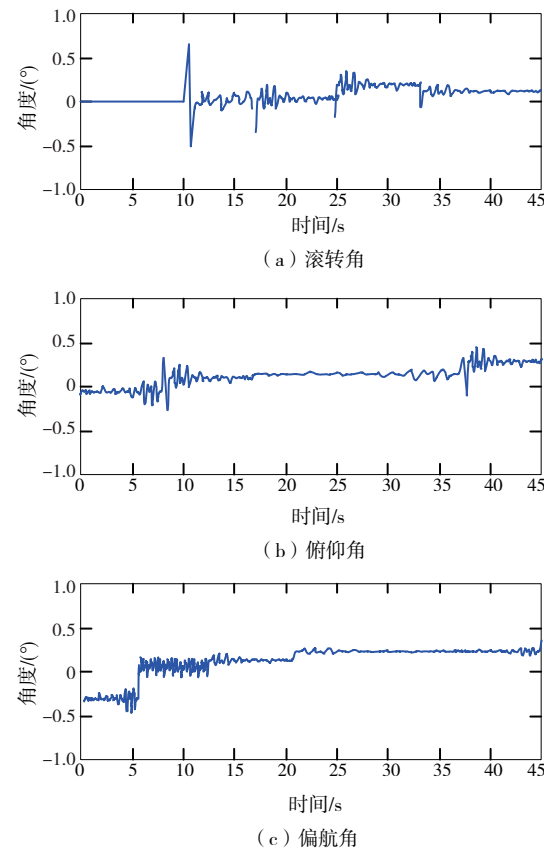


图 3 巡检探伤机器人行走姿态参数

如图 3 所示,本文方法根据机器人的爬坡环境,分别计算得出了不同角度的行走姿态参数。通过在较小范围内调整机器人的滚转角、俯仰角以及偏航角,控制其行走姿态。通过 Python 语言将上述控制参数输入到机器人的控制单元中,从而开展本次机器人行走姿态控制性能测试。

2.3 爬坡状态下机器人姿态稳定性分析

分析在上述控制参数下,巡检探伤机器人在输电导线上的行走情况,得到如图 4 所示的机器人行走稳定裕度结果。

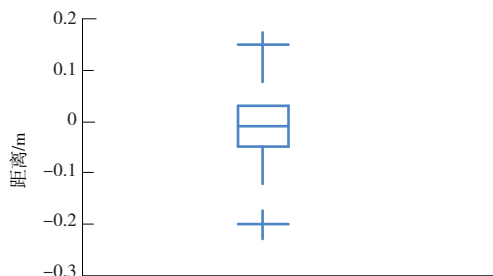


图4 机器人行走稳定裕度

根据 ZMP 稳定性判据,将机器人的质心投影在竖直方向上。计算质心投影与机器人支撑面之间的距离,得到相应的稳定裕度。在忽略水平面加速度影响的前提下,计算所得的稳定裕度越趋近于 0,说明机器人的行走姿态越稳定。由图 4 所示的结果分析可知,在本文方法控制下,巡检探伤机器人的行走稳定裕度箱线图基本分布在 0 值范围内。由此可见,本文方法对巡检探伤机器人的控制能够使得机器人的行走姿态更加稳定,具备一定的可行性。这是因为本文方法分析机器人在爬坡状态下的姿态稳定条件,将该条件作为约束建立动力学模型,通过牛顿-欧拉方程生成机器人行走姿态控制参数,可以充分满足稳定条件约束,因此保证了行走稳定性。

2.4 爬坡状态下机器人姿态控制性能对比

为了进一步验证本文方法的控制效果,分别采用文献[1]、文献[2]、文献[4]所提出的机器人行走姿态控制方法作为对比方法,进行控制效果对比分析的测试。

在本次测试中,机器人质心的初始高度为 0.24 m。在 30° 爬坡环境的输电导线行走环境下达到最终的 0.46 m 质心高度,分析各方法在爬坡过程中的机器人质心高度状态,结果如图 5 所示。

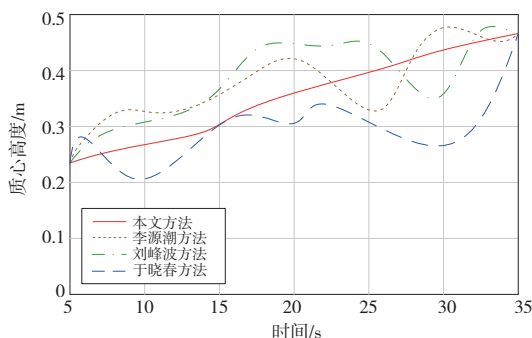


图5 机器人爬坡质心高度

由图 5 的测试结果可知,在各方法控制下,机器人均能够完成设定的爬坡路线,达到最终的

0.46 m 质心高度。但从机器人爬坡过程、质心高度的变化状态分析可知,在本文方法控制下,巡检探伤机器人爬坡更为稳定,每 5 s 的质心高度差始终低于 0.05 mm。而其他方法控制下的机器人质心高度差最高达到了 0.19 mm,说明本文方法能够以均衡的参数完成爬坡过程。这是因为本文方法考虑了爬坡过程中机器人的质心偏移,基于机器人质心的合力及合力矩设定机器人的爬坡姿态稳定约束条件,从而即使在爬坡质心偏移情况下依然获得均衡参数,将机器人姿态约束控制在稳定条件内。

3 结语

为了满足输电导线的运维工作需求,本文提出了一种针对在爬坡状态下的输电导线巡检探伤机器人行走姿态控制方法。实际应用测试的结果表明:该方法能够较为稳定地控制巡检探伤机器人完成预期的工作内容,控制性能较优,能调整出最优行走姿态决策,实现更加精准、稳定的行走姿态控制过程。

参考文献:

- [1] 李源潮,陶重彝,王琛. 基于最大熵深度强化学习的双足机器人步态控制方法[J]. 计算机应用, 2024, 44(2): 445-451.
- [2] 刘峰波,党飞飞,杨满囤,等. 井下防淤积清仓机器人行走机构纠偏控制研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(增刊1): 195-199.
- [3] 田艳,周黎莎,龚文斌,等. 在轨服务三足机器人移动步态分析与控制研究[J]. 空间控制技术与应用, 2022, 48(6): 22-31.
- [4] 于晓春,贾骏恺,李化洋,等. 六足机器人半被动行走步态控制方法及其动力学仿真[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(1): 55-61.
- [5] 韩耀辉,段晋军,王周义,等. 狭小空间匍匐式四足机器人的稳定行走控制及运动策略[J]. 科学通报, 2021, 66(33): 4334-4344.
- [6] 吴万毅,刘芳华,郭文龙. 基于改进 PPO 算法的双足机器人自适应行走控制[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2023, 26(6): 44-50.
- [7] 王小涛,张震,崔宇新,等. 月面六足机器人机构设计与行走控制方法综述[J]. 载人航天, 2023, 29(2): 264-275.
- [8] 宫赤坤,吴浔炜,袁立鹏. 基于阻抗和虚拟模型的四足机器人控制方法[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(10): 2152-2161.
- [9] 朱家乐,吴功平,蔡相男,等. 四分架架空线路作业机器人行走姿态优化方法[J]. 机械设计与制造, 2021(6): 270-273.

(下转第 241 页)

法收敛迭代次数更少,收敛速度更快。

3)通过实验数据表明,导纳控制策略能够有效抑制超调量,保证贴片过程中的稳定性,期望压力为3 N时,平均峰值由3.953 N降低至3.687 N;平均偏差由0.301 N降低为0.187 N。柔顺控制性能较传统方式得到较大提升。

参考文献:

- [1] 李红卫,蔡金元,王玉田,等. 机载有源相控阵雷达的作战优势、性能对比及军事应用[J]. 国防科技, 2015,36(6):69-73.
- [2] 高雨辰. 基于典型结构的共形阵列天线设计技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2021.
- [3] 黄浩. 基于音圈电机的力/位控制及应用[D]. 武汉:华中科技大学,2008.
- [4] LEE K,BUSS M. Force tracking impedance control with variable target stiffness[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008,41(2):6751-6756.
- [5] 朱桂兵. 控制贴片质量关键因素的研究[J]. 电子测试,2009(4):48-52.
- [6] 赵文军,史建卫,杜彬,等. 片式小元件质量控制工艺[J]. 电子工艺技术,2010,31(6):324-331.
- [7] 李有成. 组装系统低压力贴装研究[J]. 电子工业专用设备,2014,43(8):31-34,58.
- [8] 侯一雪,王敏. 系统结构状态对微小芯片贴片精度的影响[J]. 电子工艺技术,2020,41(3):146-149.
- [9] 殷跃红,朱剑英,尉忠信. 机器人力控制研究综述[J]. 南京航空航天大学学报,1997,29(2):100-110.
- [10] 臧强,田浪,胡凯,等. 机器人力控制综述[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2022,14(6):744-754.
- [11] HOGAN N. Impedance control: an approach to manipulation[C]//1984 American Control Conference. San Diego,CA,USA: IEEE,1984:304-313.
- [12] FERRAGUTI F,TALIGNANI LANDI C,SABATTINI L,

et al. A variable admittance control strategy for stable physical human - robot interaction [J]. The International Journal of Robotics Research, 2019, 38(6):747-765.

- [13] CHEN H P,LIU Y. Robotic assembly automation using robust compliant control[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2013,29(2):293-300.
- [14] 双丰,卢万玉,李少东,等. 基于强化学习的机器人轴孔装配算法[J]. 机器人,2023,45(3):321-332.
- [15] MOL N, SMISEK J, BABUŠKA R, et al. Nested compliant admittance control for robotic mechanical assembly of misaligned and tightly tolerance d parts[C]//2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Budapest, Hungary: IEEE,2016:2717-2722.
- [16] 戚毅凡,贾英宏,赵宝山,等. 基于改进神经网络的空间机械臂阻抗控制方法[J]. 中国空间科学技术, 2022,42(2):82-90.
- [17] SONG P,YU Y Q,ZHANG X P. A tutorial survey and comparison of impedance control on robotic manipulation[J]. Robotica,2019,37(5):801-836.
- [18] 李冬武,张洁,汪俊亮,等. 细纱接头机器人神经网络自适应力跟踪导纳控制[J]. 机械工程学报,2023, 59(11):221-231.
- [19] TAN Y,ZHU Y C. Fireworks algorithm for optimization [M]// TAN Y,SHI Y H,TAN K C, Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg,2010:355-364.
- [20] 谭营.《烟花算法引论》新书出版[J]. 智能系统学报,2015,10(4):547.
- [21] 赵文龙,齐柳. 基于ITAE指标等概率分布的PID参数整定[J]. 电子技术与软件工程,2015(8):95-97.

收稿日期:2023-08-31

(上接第233页)

- [10] 罗继曼,马思源,肖雅心,等. 基于交叉耦合的四足机器人Trot步态控制研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(3):554-562.
- [11] 李红岩,魏洪玲,赵龙. 激光视觉引导下的工业机器人步态运动学参数辨识[J]. 激光杂志,2024, 45(4):191-195.
- [12] 李龙坤,方鸿磊. 基于Trot步态的四足机器人行走姿态控制策略[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2025,42(2):56-62.
- [13] 芮宏斌,王天赐,库龙林,等. 受海龟爬行与山羊行走启发的四足仿生移动机器人多步态规划及动力学分析[J]. 工程设计学报,2024,31(3):309-318.
- [14] 刘恒佳,胡立坤,徐大也,等. 单腿失效六足机器人蒙特卡洛树容错步态规划[J]. 国外电子测量技术, 2023,42(8):154-161.
- [15] 谢兴彪,张晓旭,孙秀婷,等. 6-PSU 并联机器人动

力学模型辨识及其驱动力矩估计新方法[J]. 力学学报,2025,57(1):183-198.

- [16] 陈嘉睿,凌琳,蒋贵荣. 脉冲推力作用下上楼梯双足机器人行走的建模与动力学分析[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2022,40(6):131-144.
- [17] 李姗姗,王洪波,陈建宇,等. 新型四足并联军用机器人步态控制算法及仿真[J]. 兵工学报,2023, 44(3):895-909.
- [18] 冯振,牟海明,薛杰,等. 融合模仿学习的双足机器人全向行走步态生成方法[J]. 电子科技,2025, 38(1):29-36.
- [19] 严宇,刘夏清,邹德华,等. 输电线路带电巡检作业单臂机器人行走姿态控制方法[J]. 电力科学与技术学报,2016,31(2):115-120.

收稿日期:2024-07-23